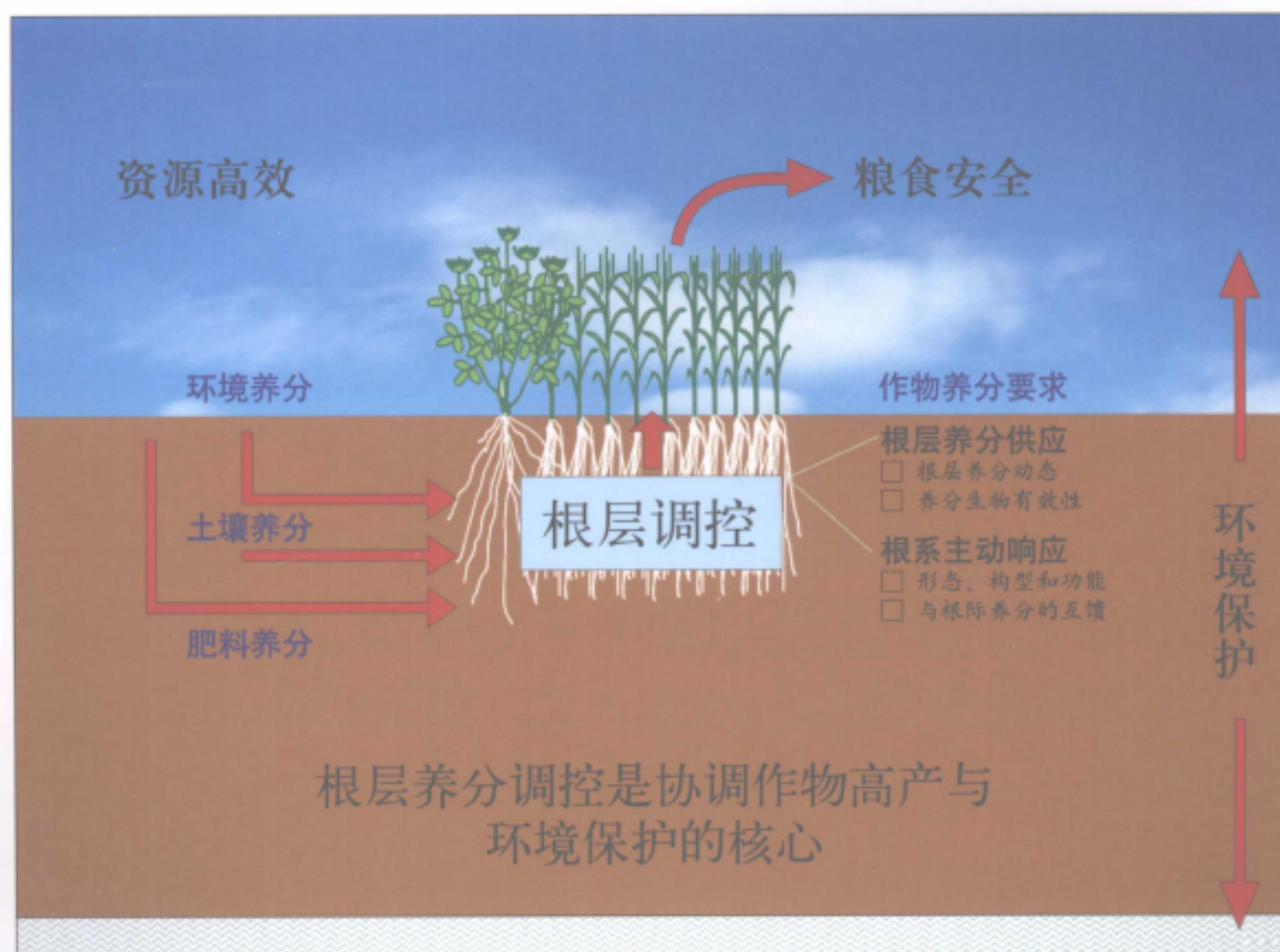


张福锁 等著

协调作物高产与环境保护的 养分资源综合管理技术研究与应用



中国农业大学出版社

协调作物高产与环境保护的 养分资源综合管理技术研究与应用

- 成熟于20世纪80年代的测土配方施肥技术在20多年后才被国家大面积推广应用……
- 养分资源综合管理技术才刚刚走过15年的探索之路……
- 人多地少、资源紧缺的国情决定了现阶段养分管理的首要目标是增产，而中国经济快速增长和人民生活的日益改善为能够协调作物高产与环境保护的养分资源综合管理技术发展提供了时代的机遇……
- 全面小康社会需要施好产量肥、经济肥和环保肥，同时呼唤确保粮食安全、环境安全和人类健康的食物链养分管理技术的创新与发展……

ISBN 978-7-81117-465-6



9 787811 174656 >

定价：40.00元

张福锁 等著

协调作物高产与环境保护的 养分资源综合管理技术 研究与应用

中国农业大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

协调作物高产与环境保护的养分资源综合管理技术研究与应用 / 张福锁等著. —北京: 中国农业大学出版社, 2008.5

ISBN 978-7-81117-465-6

I. 协… II. 张… III. 作物—栽培—土壤有效养分—综合管理—研究 IV. S506.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 051279 号

书 名 协调作物高产与环境保护的养分资源综合管理技术研究与应用
作 者 张福锁 等著

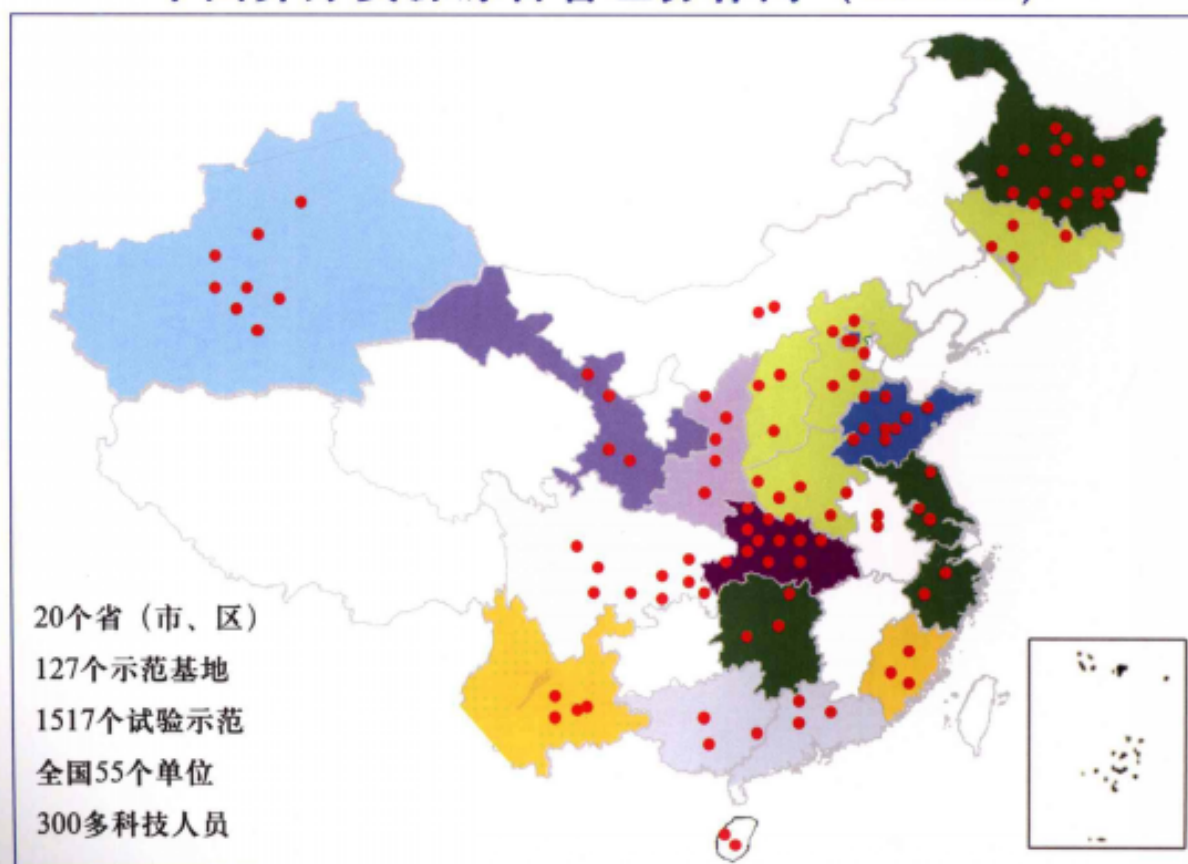
策划编辑	孙 勇	责任编辑	孙 勇
封面设计	北京博雅思企划有限公司	责任校对	马文奇
出版发行	中国农业大学出版社		
社 址	北京市海淀区圆明园西路 2 号	邮政编码	100094
电 话	发行部 010-62731190, 2620 编辑部 010-62732617, 2618	读者服务部	010-62732336
网 址	http://www.cau.edu.cn/caup	出 版 部	010-62733440
经 销	新华书店	e-mail	cbsszs@cau.edu.cn
印 刷	北京地大彩印厂		
版 次	2008 年 5 月第 1 版 2008 年 5 月第 1 次印刷		
规 格	889 × 1194 16 开本 7.75 印张 139 千字		
印 数	1~11 500 册		
定 价	40.00 元		

图书如有质量问题本社发行部负责调换

编著人员

张福锁	陈新平	高祥照	江荣凤	陈 清	马文奇
吕世华	申建波	杜 森	同延安	崔振岭	鲁剑巍
高 强	叶优良	姜远茂	米国华	巨晓棠	张卫峰
刘全清	刘学军	危常州	曹一平	李春俭	冯 固
张朝春	范明生	李晓林	王朝辉	张 强	宝德俊
李 隆	邹应斌	王方浩	王光火	邹春琴	郭世伟
刘元英	樊小林	郑 毅	汤 利	石孝均	薛进军
吴良欢	杨建昌	钟旭华	黄见良	张 炎	田长彦
沈其荣	贾小红	郭天文	孙建好	张宏彦	张俊伶
左元梅	李世清				

中国养分资源综合管理协作网 (CNNM)



1993年初的两个生产问题引发出15年的探索……

1994年北京市自然科学基金委员会第一个项目开始了新的征程……

1998年开始的长达10年的中—德多学科综合研究把养分资源综合管理推向华北平原……

2003年启动的948重大国际合作项目使华北平原的研究思路和经验走向全国……

十五年的探索与进步

- 提出了协调作物高产与环境保护的养分资源综合管理思路
- 抓住了根层养分调控这一关键突破口,走出了定向调控与充分发挥作物根系主动活化利用和响应根层养分生物学潜力相结合的新路子
- 阐明了根层养分供应与作物养分需求在数量上相匹配、在时间上相同步、在空间上相耦合的原理
- 提出不同养分资源管理的策略。氮素因来源广、转化复杂、时空变异大,损失途径多,必须采用精细的实时管理;磷钾具有较高的生物有效性和长期的后效,因此可以3~5年监测一次,通过平衡手段进行恒量监控
- 建立了氮素实时监控、磷钾恒量监控、中微量元素因缺补缺、矫正施用等养分管理技术,与水肥一体化技术、高产栽培等技术集成创新,建立了不同作物体系养分资源综合管理技术
- 系统阐明了集约化高投入作物生产体系大幅度节肥增效的原理,基本上解决了主要作物节肥增效的技术难题,建立的养分资源综合管理技术在平均增产8%的前提下,节氮26%,节磷20%,提高氮肥利用率11个百分点,减少氮素损失47%
- 建立了由55个单位300多科技人员参加的、覆盖全国20个省市自治区12种作物体系的中国养分资源综合管理协作网(CNNM)
- 进入国际学术和化肥产业研究与应用带头单位,成为FAO亚太地区中心、IFA、IRRI、IPI等国际机构和著名大学、研究单位的主要合作伙伴……

概要

21 世纪“谁来养活中国？”近 50 年来，我国农业走出了一条“高投入、高产出和高资源环境代价”的发展道路，以占世界 9% 的耕地养活了占全球 20% 的人口，粮食单产和总产大幅度提高，人均粮食产量超过了世界平均水平。然而从长远来看，我国粮食产需缺口仍然较大、粮食消费增长和耕地面积减少的矛盾还很尖锐，水资源短缺且时空分布不均的形势将依然持续并严重威胁粮食安全。20 世纪 90 年代，美国世界观察研究所所长布朗先生就曾针对上述情况向全世界发出了“21 世纪谁来养活中国？”的疑问；争辩 10 多年后他坚持认为，即使中国采用全球最严格的土地保护政策，水资源短缺和肥料增产潜力接近极限也会使中国粮食安全成为全球性问题，即随着经济的迅速发展，中国有能力大量进口粮食，从而有可能引发世界粮食价格大幅度上涨。布朗的警示绝不是耸人听闻，中国如果不能突破作物高产与资源高效的瓶颈，粮食安全问题终将成为国际政治问题。

“施肥 = 增产”？

人多地少、水土资源不足的基本国情决定了我国农业必须走集约化发展道路。化肥作为粮食增产的决定性因子之一在我国农业生产中发挥着举足轻重的作用。建国以来直至 20 世纪 90 年代，我国粮食产量一直随着化肥用量的增加而同步增长，当时的配方施肥与平衡施肥等技术在我国粮食产量水平大面积由低产向中产的跨越中起到了关键的技术支撑作用。近 20 年来，我国化肥用量持续高速增长，

目前已超过 5000 万 t，占全球用量的 35%，但粮食总产却增加缓慢。“增肥不增产”、“土壤养分过量累积”和“养分生产效率下降”等问题已成为我国农业生产中亟待解决的重要问题。

过分依赖化肥增大了资源环境压力

化肥虽然能够显著增加作物产量，但过量施肥不但不能增产，反而会加大对环境的压力。随着化肥的大量施用，土壤中氮素和磷素养分会大量累积并对环境造成威胁。大量试验结果表明，我国土壤有效磷含量正在以年均 0.031mg/kg 的速度增加，北方菜田土壤有效磷可高达 171mg/kg，远远超过了国际上 60mg/kg 的环境临界值；我国华北地区高产田土壤硝态氮的累积量平均已经达到 200kg/hm² 以上。如果每吨氮肥生产过程中排放的 CO₂ 以 3~4t 计，全国化肥工业每年排放的温室气体量超过 1 亿 t；化肥进入农田生态系统之后会继续释放 N₂O，这也是温室气体的源头之一。化肥的生产和施用加剧了资源紧缺的状况，每年仅化肥生产就要消耗 1 亿 t 的标准煤，而且还在以年均 1000 万 t 的速度增长；同时，我国磷矿资源正在迅速耗竭、硫资源进口依存度已上升至 60%。中国 70% 的钾肥靠进口，国际、国内寡头垄断和进口、销售环节层层加价导致钾肥价格大幅上涨，对国家粮食安全和农民增收造成严重威胁。

为什么要进行养分资源综合管理？

面临我国粮食产量徘徊、资源紧缺、环境污染

加重的现状,怎样才能实现作物高产的同时,使资源和环境代价最低?这不仅是国际学术界研究探讨的科学热点,而且是中国农业可持续发展必须解决的现实问题。国际上悲观主义者认为,追求高生产力一定要付出不可承受的环境代价!乐观主义者则认为,通过优化农田生态系统、依靠科技进步、挖掘作物产量潜力、提高资源利用效率,不仅可以持续提高农业生态系统的生产力水平,而且能够改善系统的稳定性和可持续性,达到高产与环境友好的目标。我国的国情决定了我们不能走西方发达国家以牺牲产量为代价优先改善环境的道路,而必须走作物高产与环境保护相协调、生产与生态双赢的发展道路。因此,我们从养分管理的技术需求上必须做到下列几点,①实现从单一增产的目标向作物高产、资源高效和环境保护的综合目标转变;②从以往只考虑化肥的施肥技术向统筹考虑土壤、肥料和环境来源养分的养分资源综合管理转变,尽快解决如何实时定量土壤和环境养分供应状况等问题;③从以往大肥大水的粗放管理向土壤-作物-环境过程的精确调控转变,同时与高产栽培、水分管理等技术综合集成;④考虑消费了全国半数以上化肥的蔬菜和果树等经济作物的养分管理,从大田作物向经济作物转变。

十五年研究的艰苦历程和收获

1993年初,北京市和山东省农业技术推广部门向我们提出下列生产中的问题:“为什么小麦和玉米推荐的氮、磷肥用量持续增长,但作物产量却未显著提高?”,“为什么设施蔬菜生产中农民要大量施肥,而一旦降低肥料用量就有减产的风险?”。实际上,这两个问题都表明单靠持续增加化肥用量以提高作物产量水平的时代已经过去,我国农业发展

已经到了一个需要同时兼顾产量、资源利用效率和环境保护多重目标的新阶段。1994年,我们明确提出养分资源的概念,即把植物生产中来自土壤、肥料和环境中的养分统称为养分资源,打破了原有只定量管理化肥养分的传统思维。同年以“作物耕层氮素动态及生物调控机理的研究”为题申报了北京市自然科学基金重点项目,开始了根层养分生物有效性的理论和技术攻关。1996年和1998年分别在农业部引进项目“土壤/植株测试推荐施肥”和北京市自然科学基金重大项目“北京地区小麦玉米氮肥推荐技术的研究与应用”中突破了根层无机氮快速定量技术和植株硝酸盐快速诊断技术的难关,建立了相应的指标体系——分别在北京、河北、河南、山东、山西、陕西、四川、云南等地的小麦、玉米、蔬菜、马铃薯、油菜等旱地作物上建立了土壤/植株测试推荐施肥技术体系,进行了大面积试验示范和推广。1998年在德国教育科技部(BMBF)支持下,开始了作物栽培、植物营养、土壤、植物保护、生态学、农业信息技术和农业经济与政策等多学科、国内与国际联合攻关的“华北平原高产高生产力条件下环境可承受的可持续农业研究”项目,采用超大型田间定位试验方案(一个主试验占地5hm²),引进和建立了农田生态系统物质循环、作物生长发育和环境效应、以及生物多样性变化的长期原位监测系统和技术,使作物高产、资源高效和环境效应的定量研究与长期评价成了可能。2003年农业部948项目“养分资源综合管理技术引进与中国技术体系的建立和应用”使我们能够把全国55个单位的研究、教学、技术推广、化肥企业和农业管理等方面的专家组织起来,形成“全国养分资源管理协作网(CNNM)”,同时与德国、美国、英国、国际水稻研究所、国际肥料工业协会、世界粮农组

织等国家与国际机构合作,开展了覆盖全国12种作物体系的养分资源综合管理理论与技术研究,建立了养分资源综合管理技术体系。

十五年来,我们的研究工作取得了一系列新进展:①阐明了氮、磷、钾等养分的资源特征和环境来源养分的重要性,揭示了作物主动响应和活化利用根层养分的生物学机制,建立了以根层养分调控为核心协调作物高产与环境保护的养分资源综合管理技术新途径;②创建了氮素实时监控技术,突破了根层氮素定量方法及其调控指标的技术瓶颈,实现了来自土壤、肥料和环境的根层氮素供应与高产作物的需求在数量上匹配、时间上同步、空间上耦合,保障高产作物需求并最大限度地减少养分向环境的排放;③创建了基于根层土壤测试和养分平衡的磷、钾恒量监控技术,改变了过去忽视磷、钾长期后效的做法,发挥了磷、钾的生物有效性并简化了管理;④抓住主要限制因子,将养分管理技术与高产栽培、水分管理等技术有机集成,建立了全国不同生态区小麦、玉米、水稻、蔬菜、果树等12种主要作物的养分资源综合管理技术体系,简化为可操作的区域技术模式。

近年来,在20个省(市)127个研究基地上进行的1517个试验示范的结果表明,在集约化条件下,养分资源综合管理技术平均增产8%、节氮26%、节磷20%,提高氮肥利用率11个百分点,减少氮素损失47%。该技术成果近3年累计推广面积455万hm²,增产193.6万t,增收节支35.4亿元。项目实施过程中,形成了科研、教学、推广、企业等55个单位组成的土肥、栽培和环境等多学科结合的“全国养分资源综合管理协作网”,培养研究生82人,发表论文165篇,已出版专著10部,正在出版的专著3本,出版中英文论文集

4部,出版科普画册4本累计发行50万册,推动了学科发展和行业科技进步,为全国测土配方施肥等国家行动提供了有力的技术支撑,为国际集约化农业发展中突破作物高产与环境保护尖锐矛盾的瓶颈摸索了一条可行的途径。

未来的养分管理——食物链养分管理

食物链养分循环的最初驱动力是人类的消费。随着生活水平的不断提高,人们对肉、蛋、奶等畜牧产品的需求量越来越大,因此,畜牧业生产体系的养分管理就必须提上议事日程。我国畜牧业的飞速发展已经彻底改变了传统的养分流动模式,成为环境养分的主要来源,这种趋势还将持续很长时间,因此,加强畜牧业生产体系的养分管理研究工作是食物链养分管理的重要一环。

人类的生活方式和习惯决定着动植物产品的消费及其对资源环境的压力。我们需要从食物链养分管理的角度出发,更好更聪明的规划我们的生活和食物结构,解决食物链养分利用效率和循环率低、大量元素快速流动造成微量元素相对缺乏以及重金属和有机污染物通过食物链进入家庭餐桌等重大问题,尽可能地减少养分的过量流动,减轻其对资源环境的压力。

未来中国的养分管理,不仅要考虑农田,尤其要考虑畜牧业和家庭消费体系。要管好我们的嘴,合理消费,在保证充足和优质食品供应的前提下,大幅度提高食物链各个生产与消费环节养分的利用效率,减少养分向环境的排放,以实现生产持续增加、资源高效利用、人民健康和环境质量持续改善的目标。从农田走向食物链,是养分资源综合管理的第二次飞跃,也是植物营养学科的发展方向。





中国农业大学植物营养
研究生和老师合影

目 录

一、从施肥到养分资源管理：新的问题，新的挑战	1
1. 施肥就是为了增产	1
2. 二十多年来科学施肥理论和技术的研究与应用没有取得重大突破	3
3. 养分管理落后带来巨大的资源压力和环境风险	5
4. 养分资源综合管理：协调作物高产与环境保护的新途径	7
二、十五年探索与发展：养分资源综合管理技术体系的建立历程	10
1. 施肥为什么不增产——新的问题，新的思考(1993年起)	10
2. 形成根层养分调控学术思路——新的探索(1994年起)	12
3. 根层养分调控技术及其指标体系的建立(1996年起)	15
4. 根层养分调控与作物栽培、水分管理等技术结合的新尝试(1999年起)	21
5. 建立最先进的环境效应自动监测系统，对养分资源综合管理技术增产 增效、降低环境危害进行了长期定量评价	25
6. 养分资源管理由田间走向区域，由华北走向全国(2003起)	27
三、从理论到实践：养分资源综合管理的技术原理与创新	37
1. 建立了以根层养分调控为核心，协调作物高产与环境保护的养分资源综 合管理新途径	38
2. 创建了氮素实时监控技术，实现根层氮素供应与作物氮素需求在数量上 匹配、时间上同步和空间上耦合	40
3. 创建了磷钾恒量监控技术，实现了磷钾养分的简化管理与其生物有效性 充分发挥的巧妙结合	44
4. 建立了中微量元素因缺补缺、矫正施用的养分管理策略及其新指标体系	46
5. 抓住不同生态区作物高产高效的关键限制因子，将养分管理技术与作物 高产栽培、水分管理等技术综合集成，建立了我国主要作物的养分资源 综合管理技术体系，实现了作物高产与环境保护的协调	46



6. 建立了整套全新的农田养分环境效应监测体系, 系统评价了养分资源综合管理技术长期的环境效应	51
7. 与当前国内外同类技术的比较	51
四、养分资源综合管理技术体系的应用与推广: 成果展示	54
1. 建立技术推广部门、农民科技协会、肥料企业和教学科研部门等多渠道的技术推广模式	54
2. 主要技术经济指标	59
3. 社会效益及其对行业与学科发展的推动作用	64
五、未来发展: 从同时实现高产高效到食物链养分管理	75
1. 养分资源综合管理技术是同时实现作物高产和资源高效的基础	75
2. 食物链养分管理	80
六、附 录	89
1. 出版著作目录	89
2. 主要SCI文章及中英文文章	90
3. 最新发表文章	100
4. 培养研究生论文目录	102
5. 举办的重要国际会议	105
6. 张福锁教授应邀到国外机构和国际会议所做英文报告	106
7. 项目支持	111

一、从施肥到养分资源管理： 新的问题，新的挑战

■ 实现作物稳定增产、保障粮食安全，是我国农业今后面临的重大任务，这就要求我们要不断地增强农田生态系统的生产力、稳定性和持续性；施肥的主要目的是保障养分供应、实现高产稳产。集高产、优质、资源高效和生态环境保护多重目标为一体的现代农业，要求我们必须实现养分资源的综合管理。

1. 施肥就是为了增产

我国人多地少，以占世界9%的耕地养活了全球20%的人口，创造了人类前所未有的奇迹。自上世纪50年以来，肥料的施用极大地促进了我国粮食生产的发展，直至上世纪90年代中期，随着化肥用量不断增加，我国粮食产量也同步增加，当时采用的配方施肥与平衡施肥技术在我国粮食产量水平大面积由低产到中产的提升过程中起到了关键的支撑作用。此后，在化肥投入直线增长的同时，粮食增产停顿，1996—2006年，我国化肥用量增长了34%，而粮食总产量却下降了1.4%，化肥的增产效益和利用率大幅度降低。1999年开始，随着我国粮食生产连续滑坡，粮食安全问题再次凸现。尽管国家加大了对粮食生产的投入和政策扶持，近几年粮食生产基本

实现了恢复性增长，但仍没有达到历史上的最高产量水平。2020年以前我国人口仍将继续增长，每年满足人们的口粮需求至少要生产6亿t粮食，这比目前要增长20%；若要满足膳食改善则需要生产6.4亿t粮食，比目前要增长28%；若要满足能源及工业等发展则需要生产6.6亿t粮食，比目前增长32%。最近10年粮食单产年均增长仅1%，按照现有增长速度，即使保证面积不变也难以实现粮食生产需求。若按照现有资源利用效率，实现粮食增产的资源需求会更大，资源保障更困难，因此，在持续提高作物产量水平的前提下实现农业的可持续发展，是保障我国粮食安全的长期需求（图1-1，图1-2）。

目前我国化肥产量已超过5000万t（纯养分），其中氮肥总产占全球的35%，磷肥总产



图 1-1 保障粮食安全的长期需求是我国现代农业面临的挑战



图 1-2 传统农作已经难以满足现代农业的粮食安全生产的需求

占全球的 27%，成为名符其实的世界化肥第一生产和消费大国。目前我国单位播种面积氮肥用量已经达到了 $200\text{kg}/\text{hm}^2$ ，是世界平均

水平的 3 倍，是欧美发达国家的 2 倍，但是，我国氮肥用量年均增长量仍达到 100 万 t（纯氮素）。我们总结了近年来全国粮食主产区的 1333 个田间试验资料，结果表明：水稻、小麦和玉米氮肥利用率平均为 28.3%、28.2% 和 26.1%，磷肥利用率分别为 13.1%、10.7% 和 11.0%，钾肥利用率分别为 32.4%、30.3% 和 31.9%；三大粮食作物的氮肥利用率水平从 20 世纪 90 年代的平均 35% 下降到了 27.5%；单位化肥投入生产的粮食从 20 世纪 80 年代以前的 $100\text{kg}/\text{kg}$ ，下降到 90 年代的 $34\text{kg}/\text{kg}$ ，最近几年已经降低到 $22\text{kg}/\text{kg}$ ，目前正以年均 $1\text{kg}/\text{kg}$ 的速度下降（图 1-3）；单位化肥投入所能增产的粮食从 20 世纪 90 年代以前的 $20\text{kg}/\text{kg}$ 下降到目前的 $7.5\text{kg}/\text{kg}$ 。按照粮食生产需求发展和肥料利用效率的变化速度，要实现 2020 年粮食增产目标，化肥需求量还要增长一倍，而我国天然气仅能满足其一半的需求，其它能源和资源消耗也非常大，环境压力也难以承受。

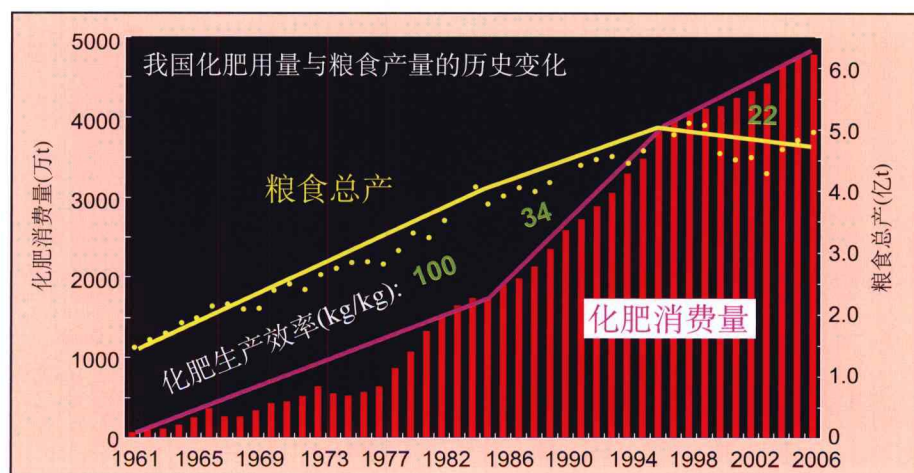


图 1-3 不断增加的肥料投入并没有持续增加粮食产量，导致肥料效率持续下降

2. 二十多年来科学施肥理论和技术的研究与应用没有取得重大突破

1840年德国化学家李比希(Liebig)提出了矿质营养学说,奠定了化肥生产和施用的理论基础。1842年,英国学者鲁茨(Lawes)用硫酸和骨粉制造出了过磷酸钙,开始了化肥的生产和施用。1901年氮肥从日本输入到我国台湾,开创了我国施用化肥的新纪元。1957年我国成立了全国化肥试验网,开始了氮肥、磷肥的肥效试验研究。1959—1962年我国组织开展了第一次全国土壤普查和第二次全国氮、磷、钾三要素肥效试验,为促进粮食生产发挥了重要作用。1979年我国组织开展了第二次全国土壤普查,摸清了我国耕地基本情况。1981—1983年我国组织开展了第三次大规模的化肥肥效试验,对氮、磷、钾及中量元素和微量元素肥料的协同效应进行了系统研究,随后开展缺素补施、配方施肥和平衡施肥技术推广,为粮食增产做出了巨大贡献。

第二次土壤普查以后,我国没有继续开展全国性的施肥技术研究与示范工作,科学施肥理论与技术没有取得重大突破,农户化肥用量越来越大而肥料效率不断下降。我们2002—2004年与全国农技推广服务中心对全国20个省(市、自治区)两万多个农户施肥状况进行了调查,其资料显示,我国水稻、小麦和玉米三大粮食作物地区间肥料投入极不平衡,氮肥平均投入量范围分别为153~341 kg/hm²、94.3~233 kg/hm²和161~301 kg/hm²;国内外有关研究结果表明,粮食作物氮肥施用量的合

理水平不应超过180 kg/hm²,而我国农户氮肥施用量超过250 kg/hm²的农户比例高达1/3;同时,过量施用磷肥和钾肥的现象也非常普遍。三大粮食作物磷肥施用量超过80 kg/hm²的农户比例高达40%~78%,小麦超量施磷现象最为明显;钾肥施用尤为盲目,例如在常规产量水平下往往投入高产条件下的钾肥用量,调查资料显示,水稻钾肥施用量超过120 kg/hm²的面积高达18%。此外,我国仍有1/3的农户施肥量不足。

近几年施肥不当对作物品质的不利影响逐步扩大。中国农业大学“十五”期间在山东省惠民县的调查结果显示,同一村不同农户每年小麦氮肥施用量(有机肥+化肥)变幅为155~540 kg/hm²,不同农户小麦籽粒全氮含量变幅达1.90%~2.46%(寇长林,2004);同一村不同农户洋葱生产中化学氮肥平均用量变幅达252~963 kg/hm²,有的农户因氮肥投入不足而限制了葱头产量和品质水平的提升,有的则因氮投入过量使葱头品质变劣——既不耐贮藏,又导致病害加重等;同一村不同农户大棚黄瓜氮肥的投入量变幅为375~3219 kg/hm²,有的农户因投肥不足导致产量低、品质差、弯瓜较多,有的农户则因施氮量过大导致病害严重、口味变差(刘维震,2006);过量施用氮肥还导致了小麦倒伏、马铃薯块茎大小不一(图1-4)、蔬菜抗病性下降、苹果和桃等着色不好和大多数果品风味变差等。

农户科学施肥水平低且差异极大的原因是人们囿于落后的施肥观念和技术束缚。我国农户在施肥方面有许多种不科学的观念:

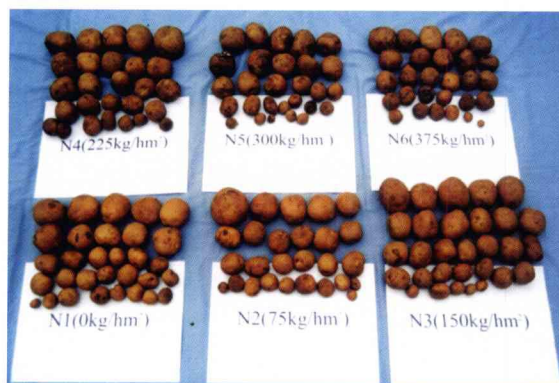


图 1-4 施氮不足与过量均对马铃薯块茎的品质产生很大影响

①偏施氮肥、忽视其它养分的搭配——这是由于我国施用氮肥的历史较长，农户通常认为施氮肥是促进作物生长的主要措施所致，在这种情况下，由于其它营养元素的配比不能满足高产需要，氮肥的肥效也就难以充分发挥；②很多农民认为肥料施得越多，作物产量就越高——有人为了高产而多用肥，甚至有人为了省事而多用肥；③只把化肥当作养分，忽视有机肥和环境养分的利用——这些人只重视化肥，认为有机肥具有改良土壤的作用，却忽视有机肥中各种养分的定量和利用。这些落后观念使农户的施肥技术难以更新。目前我国绝大多数农户的施肥技术还停留在20世纪80年代的水平，只重视化肥投入的数量，不重视分期调控和综合管理。常常出现施肥时间不适宜、氮肥撒施、磷钾肥表施、随水冲施肥、大水漫灌、水肥不协调等不合理现象（图 1-5，图 1-6）。

积造与施用农家肥、土杂肥等有机肥以改良土壤、培肥地力，是我国传统农业的精华，早在3000年前，我国古代农民就知道用动物和植物的残体或废弃物肥田以获得更多

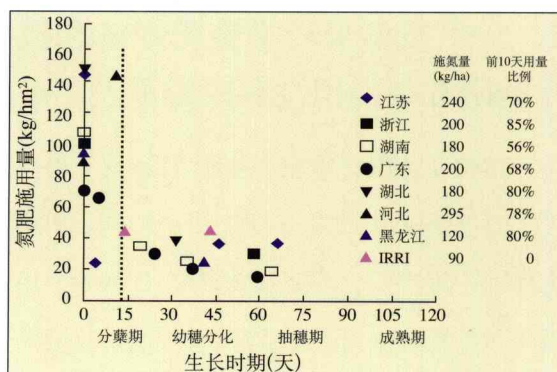


图 1-5 水稻施肥普遍存在“前重后轻”的问题，农民在基肥的投入量很大，基本都在80%以上。大量的氮肥集中在前期施用，产生了大量无效分蘖，使群体质量下降、易倒伏造成减产。同时，由于前期水稻吸收氮的能力较低，会导致大量氮肥损失、产生环境污染

更好的作物产品。现在，这种优良传统逐渐被摒弃，有机肥中氮素投入占农田氮素投入的比重下降到了25%以下、磷素的比重下降到了37%、钾素的比重也下降到61%。据估算，我国可还田利用的有机氮磷钾资源量分别达到2176.4万t、380.2万t和1907万t，偏重施用化肥、忽视施用有机肥的观念使我们一方面浪费了大量的资源，另一方面也造成环境污染。在化肥施肥时期上，农民们普遍习惯于在作物生长前期过量施肥。从图1-5可以看出农民对水稻基肥的投入量仍然都在80%以上，在前期集中施用大量氮肥，导致了大量的无效分蘖，使群体质量下降，抗倒伏能力减弱，病虫害危害加重。同时，由于前期水稻吸收氮素的能力较弱，会导致大量氮素损失。

特别值得注意的是，随着经济作物的规模化快速发展，其化肥消费量已经占到全国用肥量的54%，但是，我国长期侧重于粮食作物施肥技术的研发，对经济作物施肥技术的研究和创新远远不能满足生产需求，致使经济作物田



图 1-6 华北平原农民投肥习惯描述

间技术指导跟不上,水、肥资源盲目投入的现象十分普遍。在设施蔬菜生产中,肥料的投入量往往是蔬菜最佳需肥量的数倍;由于所用肥料以高浓度复合肥类为主,含磷比例太高,而一般又在生产中直接施用,因此,这样施肥既不符合蔬菜养分的需求,又造成了设施菜田土壤中磷素的快速累积。有机肥是设施蔬菜生产中非常重要的肥源,但人们尚不清楚如何科学管理和施用它,对其中养分的有效性研究不够,无法量化其养分输入数量。

3. 养分管理落后带来巨大的资源压力和环境风险

化肥是资源消耗型产业,过量施肥会导

致大量的资源浪费。2006 年我国氮肥生产综合能耗为 1 亿 t 标准煤,占全国能源消耗的 5% 左右;每年增加的 300~400 万 t 纯氮还需要再消耗近 1000 万 t 标准煤。盲目施肥导致的化肥需求量不断增长给我国能源供应紧张形势进一步雪上加霜。我国用于磷肥生产的高品位磷矿储量约为 11 亿 t,磷肥生产每年消耗的磷矿超过 1 亿 t (资源量),以现有的消耗量和利用技术,富矿资源储量仅能利用到 2014 年;化肥,特别是磷肥生产能力的增强又导致了硫资源需求量的急剧增加,每年需要进口的硫磺数量超过了 1000 万 t,占国际硫磺贸易量的 1/4 还多,进口量的逐年增加导致硫磺价格 2007 年一年就增长了 8 倍,国内磷肥价格也

翻了一番。我国钾资源不足,钾肥的大量施用带动了钾肥的大量进口,目前我国氯化钾进口量已经接近了1000万t,国际钾肥供应联盟从2005年开始将我国钾肥进口价格提高了50%,达到1554元/t,同时在进口、零售多级经销体系的炒作下,2008年初零售价格增长到3200元/t,继续增加钾肥用量将使我国粮食安全在很大程度上依赖于国外。目前,我国化肥用量不断增长与国内资源供应紧张的矛盾已经非常尖锐,只有通过优化施肥技术、减少化肥用量来缓解。

我国化肥用量不断增长的状况在带来资源紧张的同时,也因过量施肥导致了土壤中养分的大量累积,增加了营养物质向环境中排放的风险。华北地区大量的试验结果表明,高产农田土壤1m土层中累积的硝酸盐量每公顷已高达数百甚至上千千克,远远超过了作物生长的需要量;过量的肥料投入导致农田环境养分累积的问题突出,引起了大气、水体和陆地生态系统中活性氮浓度水平的持续升高,从而导致了大气氮素沉降量的急剧增加。

华北平原大气无机态氮干湿沉降总量约为60 kg/hm²/yr,若考虑有机态氮素的沉降在内,氮素的沉降总量不少于70 kg/hm²/yr(图1-7)。从农田系统排放到环境中的NP养分最终去向是水体。全国目前水体污染物来源于工业、生活和农业面源的大约各占1/3,太湖地区农业面源对水环境中氮负荷的贡献超过70%(朱兆良,2005)。很多研究结果表明,太湖、巢湖、滇池、杭嘉湖水网、密云水库、洱海等重要水体污染源中来自农业面源的TN和TP贡献率分别在30%~90%(图1-8)。

由于养分的循环特性,大量施用化肥以后,未被利用的养分经过多种途径又会回到农田,充分利用这些养分,是提高资源效率、减少污染的必由之路。如上所述,我国土壤养分资源、大气和水体等环境养分资源的数量在急剧增长,其中南方降雨和灌溉水输入的总氮量平均达到55~70 kg/hm²,北方降雨和灌溉水输入的总氮量较少,平均为20~25 kg/hm²。因此,在进行大面积氮肥施用量推荐时,南方应充分考虑降雨和灌溉水输入的氮素量,这是作物营

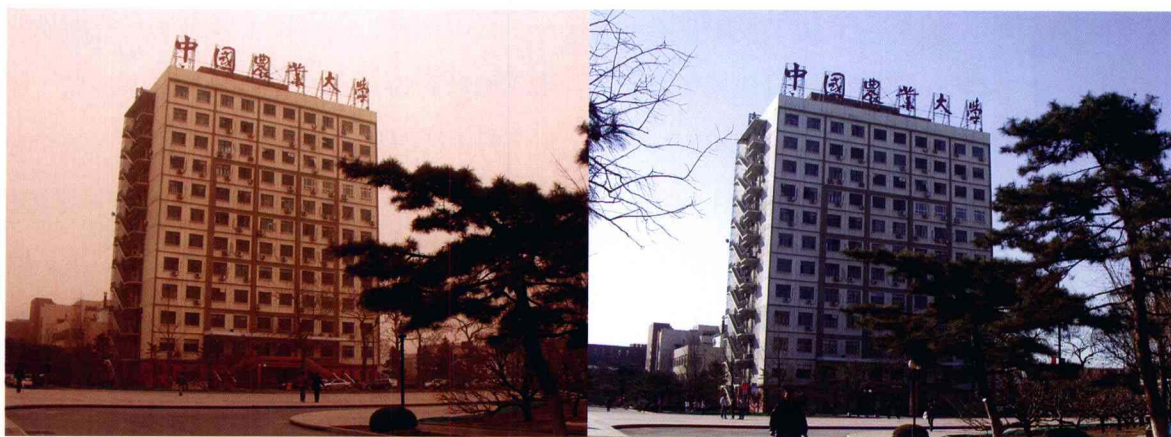


图1-7 2006年4月17日的北京(左图):第七次沙尘暴每平方米达到20g降尘,一天降了33万t沙尘,折合纯氮约2000t

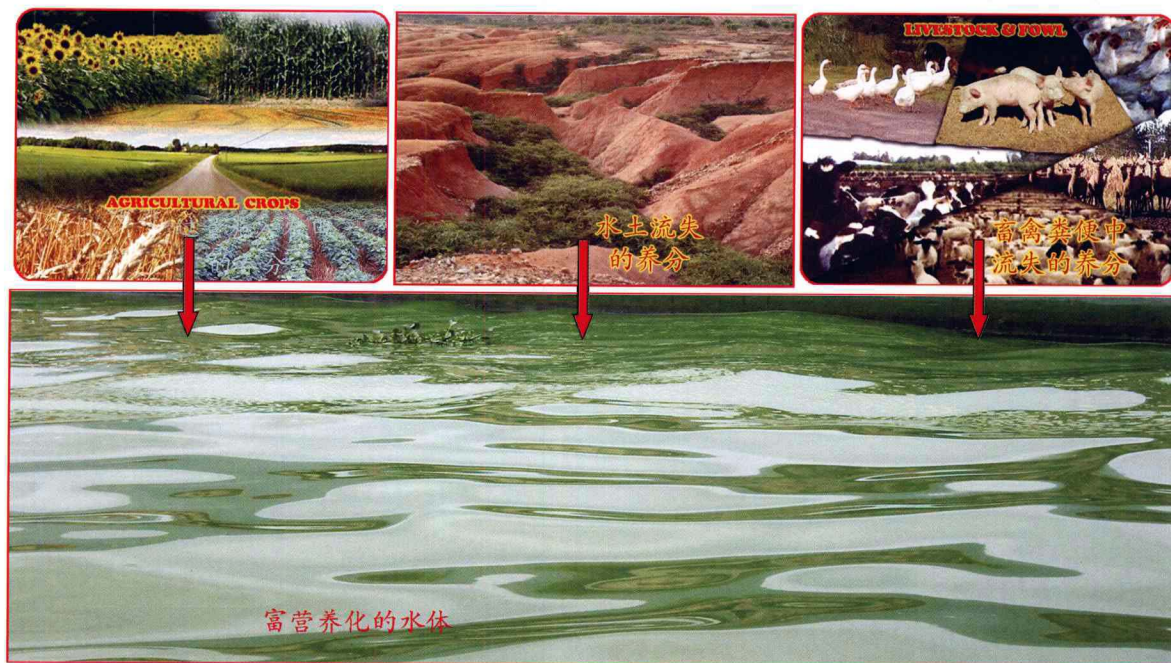


图1-8 面源污染一般指分散的污染源造成的水体污染,即降雨的冲击及地表径流的冲刷致使土壤颗粒、土壤有机物、化肥、农药、有机肥料或城市地面污染物等流入受纳水体的一种污染形式。这种污染形式具有发生区域的随机性、排放途径及排放污染物的不确定性、污染负荷空间分布的差异性等主要特征。

养元素的一个重要来源。设施菜田区长期大水大肥的粗放管理,已导致地下水硝酸盐含量大面积超标,当采用硝酸盐含量高的地下水灌溉时,可通过灌溉水输入 $40\sim 254\text{kg}/\text{hm}^2$ 的氮素,这部分氮素对作物生长发育的贡献不可忽视。

4. 养分资源综合管理: 协调作物高产与环境保护的新途径

近年来,大量施用化肥导致增肥不增产、养分资源浪费和环境污染的现象越来越明显,转变传统观念、创新养分管理技术,实现高产、高效、环境友好的养分资源综合管理目标是落实科学发展观的具体体现,也是时代的需求。协调作物高产与环境保护的新技术途径必须考虑以下4个转变:①养分管理必须从增产的单一目标向作物高产、资源高效和环

境保护的綜合目标转变,我们不能继续走过去单一追求高产的道路,也不能完全照搬发达国家牺牲产量保护环境的道路,而必须别无选择地走养分资源综合管理的道路;②由于环境养分输入量剧增、土壤残留养分也在增多,必须从以往只考虑肥料施肥技术(传统的三类六法)向统筹考虑土壤、肥料和环境来源养分的养分资源综合管理方式转变;③要实现高产和环保的协调,就必须从以往主要考虑投入产出关系向土壤-作物-环境过程的精确调控转变,同时与高产栽培、水分管理等技术综合集成;④蔬菜和果树等经济作物的迅猛发展消费了全国一半以上的化肥,却一直缺乏有效的养分管理技术,从大田作物向经济作物的转变迫在眉睫(图1-9)。

作物高产与环境保护能否协调发展,是

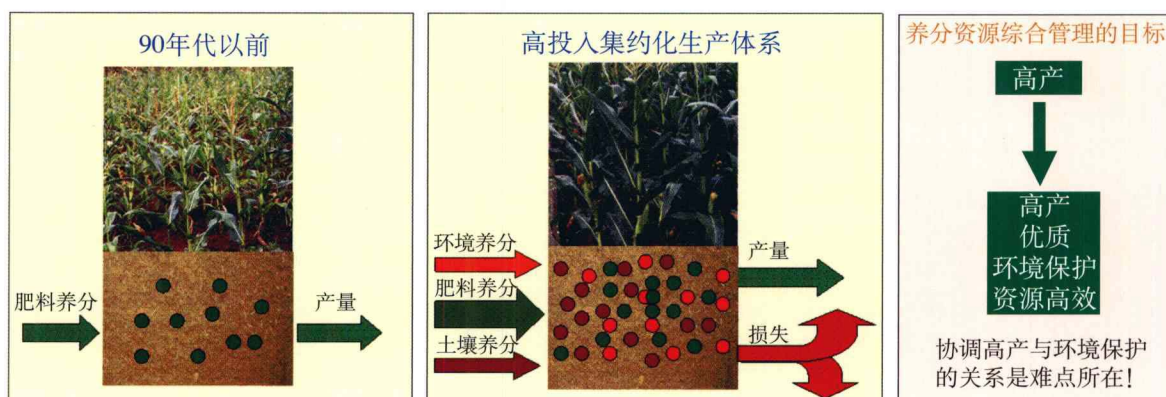


图 1-9 20 世纪 90 年代以前我国只注重肥料投入，导致土壤和环境养分累积越来越多，目前高投入集约化生产体系中已形成大量投入、大量累积且大量损失的情况，作物产量也难以继续提高，必须走综合管理的道路

国内外关注的焦点。欧洲国家为了保护环境，大幅度降低了化肥用量，其中德国在执行严格的环境保护条例时，化肥用量从 20 世纪 80 年代的 500 万 t 减少到了 2000 年的 300 万 t，粮食总产和单产不但没有下降，反而一直在增长（图 1-10）。荷兰、丹麦、美国、日本、法国、英国等国家也出现同样的现象。

美国的化肥用量在上世纪 80 年代就已不再大幅增加，而作物

产量却在持续增长，养分生产效率由最低点的 44kg/kg 提高到 66kg/kg，同时实现了作物高产与资源高效（图 1-11）。从 1976 年至今，美国的玉米氮肥用量一直保持在 130kg/hm² 左右，而玉米产量却从 5.5t/hm² 增长到 9t/hm² 以上，其氮肥利用效率提高了 51% 而单产同时提高了 62%。其关键原因是将肥料施用技术与育种（高产高效品种）、栽培措施、保护性耕作措施进行了集成，提高了养分利用效率。

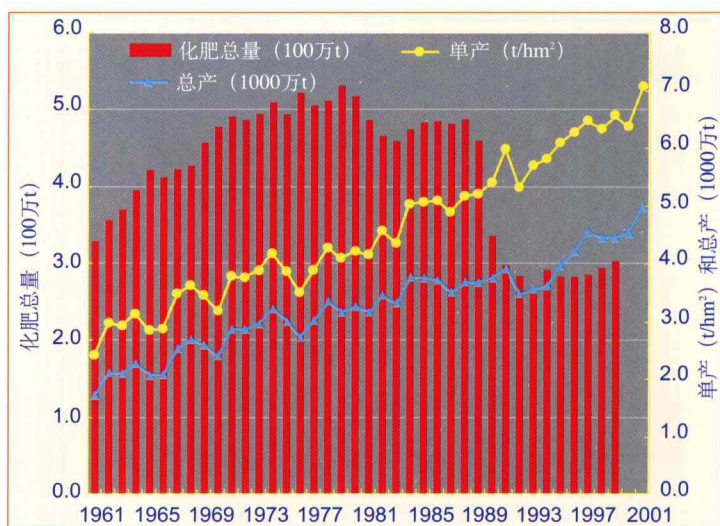


图 1-10 德国 40 年来的肥料投入下降了 40%，然而粮食产量却增长了 130%，体现了合理养分资源管理可以保证在高产的情况下，实现资源高效利用

美国的经验证明，我国要同时实现作物增产、资源高效和环境友好的多重目标虽然难度很大，但还是有可能的。因此，我们将养分资源综合管理的内容概括为：从农业生态系统论的观点出发，协调农业生态系统中养分投入与产出平衡、调节养分循环与利用强度，实现养分资源高效利用，使生产、生态、环境和经济得到协调发展（张福锁等，2003）。

在养分资源综合管理理论与技术体系

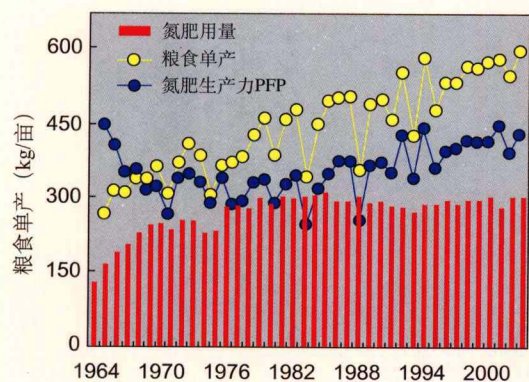


图 1-11a 美国玉米单产、氮肥用量及氮肥生产力 (根据 USDA 数据整理)

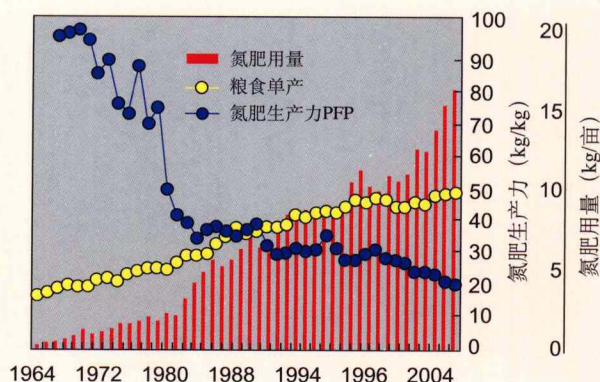


图 1-11b 中国粮食单产、氮肥用量及氮肥生产力 (根据国家统计数据整理)

中, 养分管理目标已经从静态地保持养分平衡发展为动态地保持养分循环, 从单一满足作物对养分的需要发展为同时关注养分资源的合理利用并实现经济效益、生态效益和社会效益的相互协调, 从单一关注当年的养分增产效果发展为同时关注肥料的残效、也关注生态环境对未利用养分的

负担能力; 施肥生态效益已经从保持和提高土壤肥力发展为同时重视多余养分或毒害元素对生态环境的风险与管理, 从创造适宜作物成长的养分环境发展为充分挖掘高产品种的生物学潜力、利用作物对各种环境条件的适应性, 在增产的同时, 提高养分资源利用效率。

二、十五年探索与发展：养分资源 综合管理技术体系的建立历程

■ 1993年农技推广部门的一些问题触发了我们的思考,针对施肥为什么不增产的农业生产问题,我们通过北京市自然科学基金项目、农业部引进国际先进农业技术项目、科技部国家科技攻关、国家自然科学基金、中德国际合作等十多个项目的持续支持,从根层养分动态研究(1994年起)入手,突破了根层养分定量化技术的瓶颈(1996年起),实现了小麦玉米根层养分调控的大田应用(1998年起),以华北平原为核心开展了作物栽培、水肥管理和环境保护等多学科联合攻关(2001年起),以主要作物体系养分资源综合管理技术创新与应用为重点组织了全国20个省市12种作物体系的技术集成和大范围试验示范(2003年起),实现了作物高产与环境保护的协调(图2-1)。

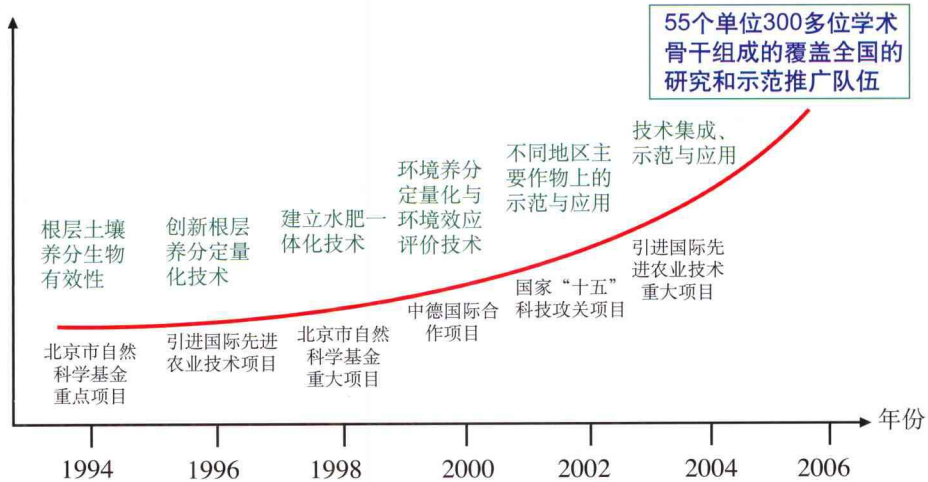


图2-1 养分资源综合管理技术体系建立和应用的历程

1. 施肥为什么不增产——新的 问题，新的思考(1993年起)

1993年,北京市和山东省农业技术推广

部门向中国农业大学提出如下生产问题:

“为什么小麦和玉米推荐的氮、磷肥用量持续增长,但作物产量却未显著提高?”,“为

什么设施蔬菜生产中农民要大量施肥，而一旦降低肥料用量就有减产的风险？”。这几个问题反映了当时我国农业生产实践中初露端倪的肥料生产效率下降的重要问题、即简单地靠化肥施用来大幅度提高作物产量的难度越来越大。

对当时国内外养分管理技术的分析表明，我国20世纪80年代中期通过配方施肥工作建立的肥料效应函数、土壤肥力丰缺指标、养分平衡等推荐施肥方法，基本上将土壤—作物体系视为“黑箱”，主要根据投入—产出关系来确定施肥量。这些方法较好地解决了当时大田粮食作物施肥不足和养分不平衡的问题，对粮食产量由低产到中产的跨越起到了关键作用，但却难以解决随后在我国很多地区出现的高投入集约化生产体系中作物高产与环境保护相矛盾的新问题。

以往在推荐施肥中常常采用二次多项式模型（图2-2）来确定最佳施肥量，其理论依据是粮食作物的产量随施氮量的增加而增加，但在过量施氮情况下可能因倒伏、病虫害或群体质量恶化等原因而导致减产。然而，自20

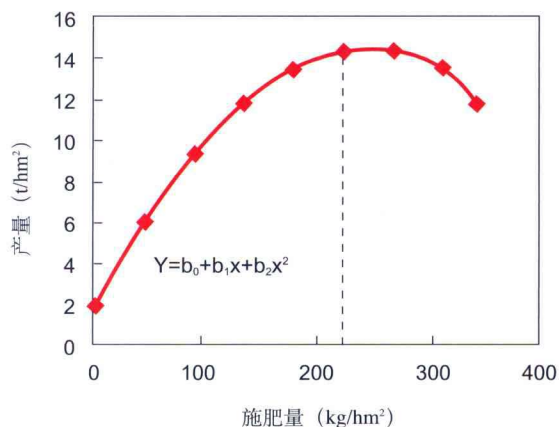


图 2-2 国内在推荐施肥中常用的二次多项式模型图示

世纪90年代初，随着抗倒伏、耐肥高产品种的推广及相应的栽培技术的改进，多数品种在达到较高产量水平后的一定施氮量范围内，并不因施氮过量而出现倒伏和减产，而是出现一个产量平台（图2-3，陈新平等，2000），这也是农业技术推广部门逐渐发现利用二次多项式模型方法得到的最佳推荐施肥量越来越高，但作物产量并未显著增加的主要原因。

我们经过大量的田间试验发现，采用二次多项式（图2-4 A）、线性+平台（图2-4 B）、二次+平台（图2-4 C）、平方根（图2-4 D）等模型都可以很好地拟合同一组试验数据，但线



图 2-3 过量施氮以往容易造成作物倒伏减产(左)，而现代耐肥品种却不易倒伏(右)

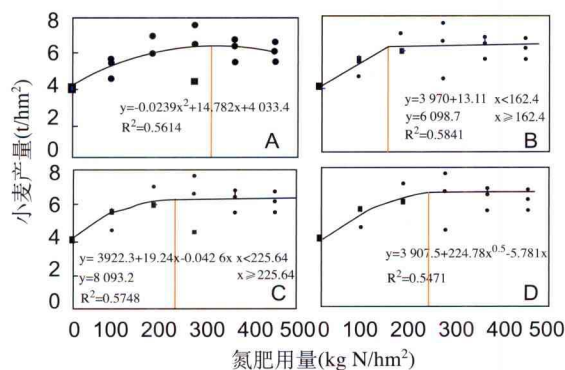


图 2-4 冬小麦不同氮肥效应模型比较
(贾良良等, 2001)

性+平台得到的推荐施肥量远低于传统的二次型或平方根模型 (贾良良等, 2001)。通过在北京、河北、河南、山东、陕西等地进行的多年多点试验证明, 线性+平台推荐的施肥量比较合理 (贾良良等, 2001; Chen et al., 2004)。

上述工作虽然揭示了当时“多施肥不增产”的主要原因, 但却没有解决土壤养分供应和高产作物需求的匹配规律, 供应与利用过程的“黑箱”处理限制了养分的精确管理, 要想从理论和技术上揭开这个“黑箱”, 从根本上实现养分供需在数量和时空相一致, 协调集约化农区作物高产与环境保护的矛盾, 就必须寻找新的学术思路, 开展全新的研究。

2. 形成根层养分调控学术思路——新的探索(1994 年起)

由于长期从事根际过程及其调控机制的基础研究, 我们在试验中认识到根系具有强大的活化利用土壤养分的能力, 只要保证根系健康生长, 施入根层土壤的养分就会被作物吸收利用。由此提出了作物根层养分调控可能是协调作物高产与环境保护的关键突破

口。1994 年我们获得了北京市自然科学基金重点项目“作物根层氮素动态及生物调控机理的研究(编号: 6951001)”的支持, 开始将根际理论研究拓展到作物养分管理领域, 迈出了我们在根层养分调控方面十五年的探索的第一步。

(1) 养分生物有效性的启示

早在 20 世纪 70 年代美国普渡大学的 Barber 教授就提出了土壤养分生物有效性的概念, 但把它应用于农田养分管理实践还是一个新的尝试。我们发现, 磷、钾主要累积在根层, 因此其有效性主要取决于根系的活化利用能力, 即生物有效性; 而氮极易移动, 提高氮的利用效率就必须特别强调其在时间和空间上与根系分布的耦合。

大量研究表明, 单纯依靠化学浸提方法测定的土壤养分总量, 并不能准确代表作物实际能够利用的养分数量, 这是因为: ①作物能通过根系生理活动高效活化和吸收一些化学方法不能浸提的难溶性养分, 作物本身的遗传特性及其与环境条件之间的相互作用决定了养分有效化过程的强弱; ②作物能够通过根系的不断生长来扩大根层范围, 从而主动截获和摄取那些曾远离根表的养分。因此, 作物自身的生物学特性对于土壤养分的有效性有重要影响 (图 2-5)。

我们通过长期定位试验发现, 化学浸提方法测定的土壤有效磷钾只能反映土壤磷钾供应的趋势, 却低估了作物利用磷钾的生物学潜

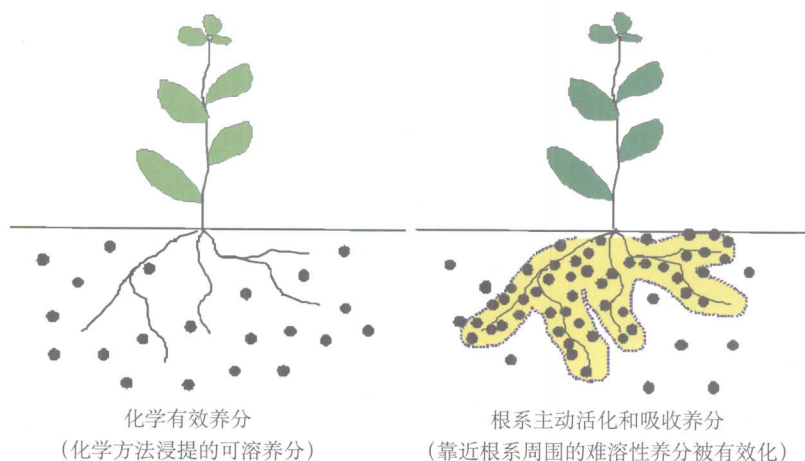


图 2-5 土壤养分的化学有效性和生物有效性示意图

力。尽管磷肥在土壤中被吸附固定，化学有效性随之降低，但是作物根系可以通过其生理作用及根际过程使化学方法不能浸提的难溶性磷转化为生物有效性磷（图 2-6），从而充分发挥磷的后效、显著提高磷肥的累积利用率（刘建玲等，1999, 2000; Shen et al., 2004）。这说明磷钾元素没有必要象氮素那样，对其供应强度进行实时监控，完全可以在较长的周期内进行恒量监控以发挥其生物有效性。

(2) 根系与养分供应的互馈机制

传统施肥技术强调充足供应氮素养分，甚至要求要有盈余，结果使土壤溶液中的氮素浓度普遍偏高，常常高达 5~10 mmol/L 左右。我们的研究发现，根层氮素浓度适宜的水

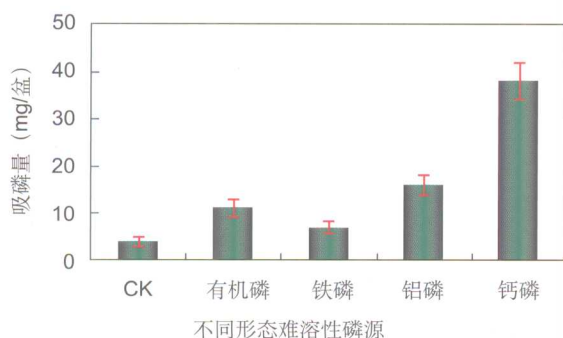


图 2-6 玉米对难溶性磷的活化利用能力比较

平为 0.5~1.0 mmol/L 左右（图 2-7，田秋英，2005），此时玉米扎根最深，侧根最长（Wang et al., 2004; 郭亚芬等，2005），根系发育质量最好，吸收范围最大，作物地上部发育最佳；超过该浓度后，多施的氮肥不能被吸收，反而抑制侧根发育，使

根系吸收范围显著缩小，作物地上部生物反而下降（图 2-8）。

虽然根系生长具有“趋肥性”的现象已早为人知，但对其机理与调控途径却知之不多。

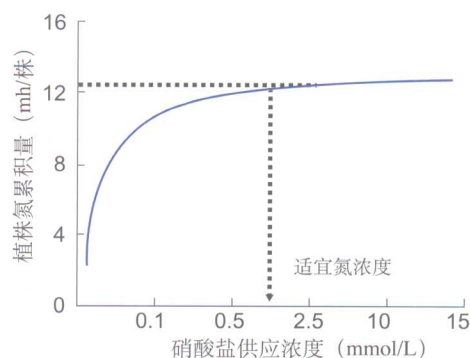


图 2-7 不同供氮条件下玉米幼苗氮素积累曲线



图 2-8 前期施肥量大抑制作物的生长发育（左为养分资源管理，右为常规推荐施肥）

我们的研究发现，只有当土壤氮素浓度处于较低水平时，根系才可以充分发挥其“趋肥性”潜力，主动寻找土壤中分布不均的氮素；当局部氮素浓度达到 1mmol/L 时，刺激侧根生长的效果达到最佳；在局部供氮区，玉米的侧根长度可比对照增加 41.3%（图 2-9，郭亚芬等，2005；Guo et al., 2005）。而在过量施肥条件下，根层氮素浓度过高，作物根系“趋肥性”的生物学潜力发挥不出来。我们的试验表明，通过根层调控可以有效地调节根系发育和分布，同时也能调节地上部生长和成熟度（图 2-10）。

（3）养分时空变异特征

在作物生长过程中，受土壤氮素供应、施肥、降雨及灌水的影响，土壤氮素表现出很强的时空变异性。在传统的基、追肥各半或重施

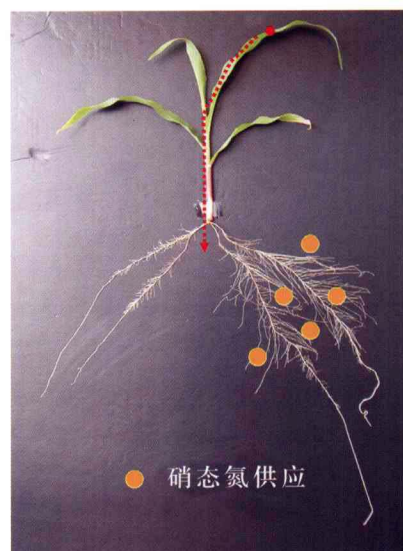


图 2-9 局部养分刺激对根系发育的影响

基肥的方式下，作物生长前期氮素供应量往往过高，传统管理模式（大量的冬灌和春灌）易造成土壤硝态氮随水大量移出根层，使后期的供氮明显不足（图 2-11，Liu et al., 2003），严重影响了高产作物品种的增产潜力，带来



图 2-10 根层调控对根系分布和作物生长的影响

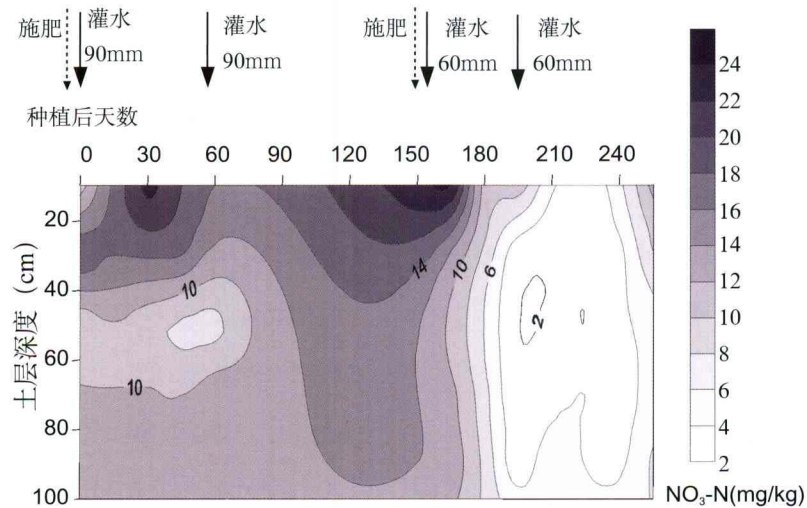


图 2-11 传统水、氮管理造成硝态氮在前期淋洗，后期供应不足的情况

了较大的环境风险。因此，我们设想如果能将作物根层土壤有效养分调控在既能满足作物高产的养分需求，又不至于造成养分过量累积而向环境中迁移的范围内，那就有可能使来自土壤、肥料和环境的养分供应与高产作物养分需求在数量上匹配、在时间上同步、在空间上耦合，从而实现作物高产与环境保护相协调的目标（图 2-12）。

虽然这一新的技术思路令人振奋，但要实现就必须突破一系列关键技术问题：①如何定量土壤、肥料和环境来源养分资源的贡献、并确定其生物有效性？②如何突破根层养分实时量化与监控的技术难关？③如何才能使根层养分的供应与高产作物根系生长和养分需求相同步？④如何针对氮、磷、钾等养分资源特征建立相应的根层养分调控技术？

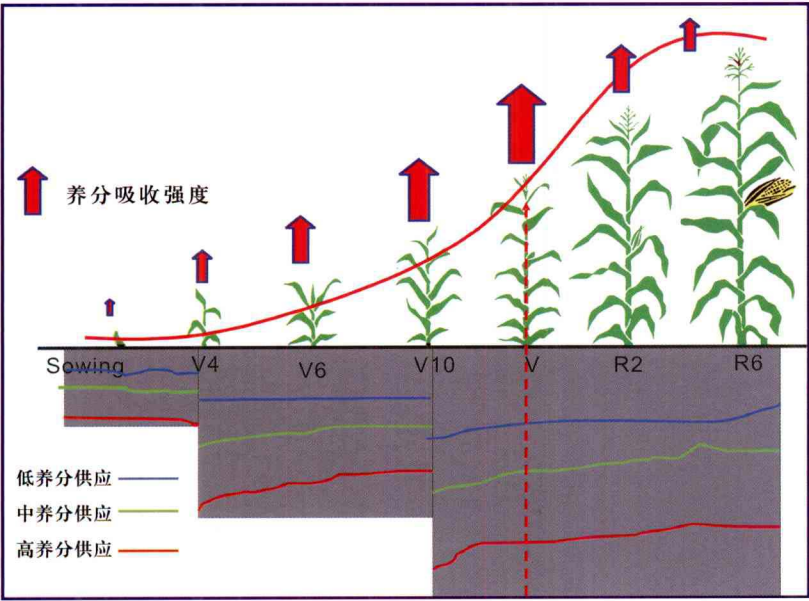


图 2-12 养分供应与作物养分需求同步示意图

3. 根层养分调控技术及其指标体系的建立(1996 年起)

在探讨根层养分调控思路是否可行的初期，我们面临 3 个必须解决的难题：①根层养分简便、快速、准确的量化技术；②根层养分的临界指标；③根层养分的有效调控手段。从 1996 年开始，我们在农业部引进项

目“土壤植株测试推荐施肥(编号: 961061)”和北京市自然科学基金重大项目“北京地区小麦玉米氮肥推荐技术的研究与应用(编号: 6980001)”的资助下,对不同养分元素的根层调控技术及其调控指标进行系统地研究,逐渐建立氮肥、磷钾肥和中微量元素根层养分调控指标体系,并找出了相应的施肥调控措施。

(1) 创建了根层土壤硝态氮的快速测试技术, 解决了氮肥实时监控技术的方法“瓶颈”

我国一直沿用的土壤碱解氮测试方法已被证明难以反映田间条件下土壤的供氮能力(朱兆良, 1992)。我们研究发现旱地土壤硝态氮可以很好的表征土壤氮素的供应能力,其含量与优化氮肥用量呈明显的负相关(图 2-13)。

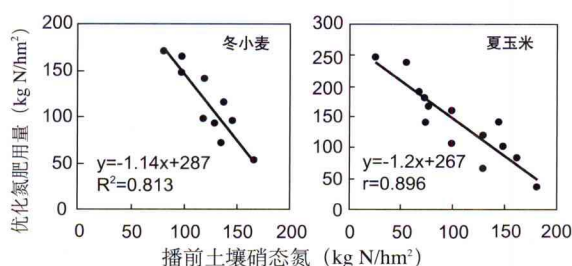


图 2-13 播前土壤硝态氮与优化氮肥用量的关系

为了能在田间快速定量土壤供氮能力,我们创建了根层土壤硝态氮快速测试方法,突破了氮肥实时监控技术的方法“瓶颈”(崔振岭等, 2005)。该方法以田间现场采样分析为手段,可在 0.5h 内完成测试,明显提高了测试的时效性,与实验室常规的连续流动分析仪测定结果(0.01 mol/L CaCl₂ 溶液以 1:10 土水比浸提)相比,测定结果绝对相差小于 10 kg N/hm²,完全符合实时监控技术要求,且分析费用低廉,具有很好的推广应用前景。

土壤硝态氮田间快速测试技术流程主要包括以下 5 个环节(图 2-14): ①土壤样品采集; ②以 1:1 水土比在田间快速浸提新鲜土样中的硝态氮; ③以 Merck 反射仪(偶联反应原理,测试精度 0.22 mg NO₃⁻ - N/L)和试纸条显色,快速测定浸提液硝态氮含量; ④以酒精灼烧法快速测定土壤水分含量; ⑤根据土壤容重计算根层土壤硝态氮含量。

与以往定性或半定量的土壤速测方法相比,该方法显著提高了测试精度;与实验室常规测试方法相比,该方法大大提高了测试的时效性,而且分析费用低廉并具有很好的展示度。



图 2-14 作物根层土壤硝态氮速测技术流程图

(2) 建立根层养分临界指标，认识到环境养分重要性，并突破其定量化技术

作物生长发育规律和养分吸收规律是确定根层养分临界值和调控策略的重要依据。然而，我国现有可利用的资料多为20世纪80年代在中低产条件下获得的，已不能适应当前养分管理的需求。为此，我们在不同作物上进行了613个大田试验，深入系统地研究了高产粮食作物、蔬菜及其它经济作物等共计89个不同品种的养分吸收规律，全面更新了高产粮食作物和经济作物的养分吸收利用参数，明确了高产作物氮营养的显著特征是“中后期氮素需求显著增加”，据此建立了根层养分供应指标，为养分实时监控提供了关键参数（表2-1）。

在根层养分临界指标建立过程中，我们发现近20年来集约化农田环境养分数量越来越大。为了准确定量环境来源、特别是大气干湿沉降来源的氮素数量和空间变异特征，我们通过国际合作项目，引进了国际上研究大气沉降最新的仪器设备，如湿沉降自动采样器、Radiello被动采样器、Digital大流量和freOMNI小流量颗粒物采样器以及ITNI（Integral Total Nitrogen Input）系统，对我国主要农业生态区，特别是华北平原大气氮素干湿沉降的形态、数量、来源和植物有效性等进行了深入探讨。目前已经建立了一整套较为完整的环境养分定量方法（图2-15）和全国干湿沉降监测网（图2-16），包括直接定量大气干、湿沉降数量（湿沉降自动收集器

表 2-1 高产粮食作物、蔬菜及其他经济作物的养分吸收规律研究试验统计

作物	小麦	玉米	水稻	番茄	黄瓜	菠菜	花椰菜	大白菜	棉花	油菜	马铃薯	烟草
试验(个)	144	178	83	55	26	22	9	24	20	15	5	32
品种(个)	10	27	9	10	5	4	4	6	5	4	2	3



图 2-15 环境养分定量化系列仪器设备

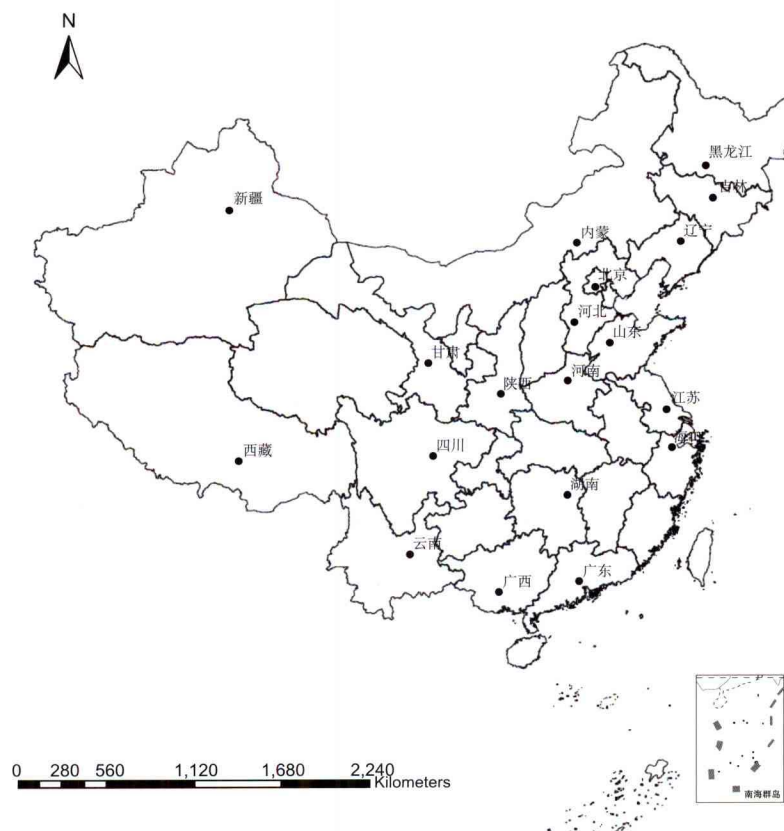


图 2-16 我们建立的全国环境养分监测网
(图中有标注的省份指该省有一至数个沉降监测点)

+被动采样器+颗粒物采样器)以及间接定量环境氮总量和生物有效性(改进的 ITNI 系统)的方法。

多年多点的结果表明,华北平原每年铵态氮和硝态氮的湿沉降通量平均为 27 kg N/hm^2 , 若考虑雨水中有有机氮的输入(约占总氮的 30%), 湿沉降输入的氮素总量高达 38 kg N/hm^2 (Liu et al., 2006; Zhang et al., 2008a,b)。被动采样器和颗粒物采样器的结果显示, 干沉降在华北平原大气氮素沉降中所做贡献更大, 根据北京东北旺、河北曲周的监测结果估计, 大气氮素干沉降数量可达 53 kg N/hm^2 , 其中气态氨和气溶胶态铵的沉降约占 70%, 而二氧化氮和气溶胶态硝酸盐只占 30% (Kopsch,

沈建林等, 待发表资料)。而基于 ^{15}N 稀释法的 ITNI-盆栽系统结果进一步表明, 华北小麦—玉米体系中大气氮素干湿沉降总量为 $80 \sim 90 \text{ kg/hm}^2$, 其中约 60% 可被当季作物吸收利用 (He et al., 2007)。通过仪器直接测定获得的氮素干、湿沉降结果(91 kg N/hm^2)和根据指示植物获得的结果(88 kg N/hm^2)相当吻合, 这充分表明大气氮素沉降已经成为我国华北农田生态系统中一项重要的环境养分资源。

(3) 氮肥实时监控技术体系的建立

在根层土壤硝态氮快速测试方法和临界指标取得突破的基础上, 我们创建了农田氮肥实时监控技术体系(图 2-17), 主要通过作物不同生育阶段的氮肥需求确定根层氮素供

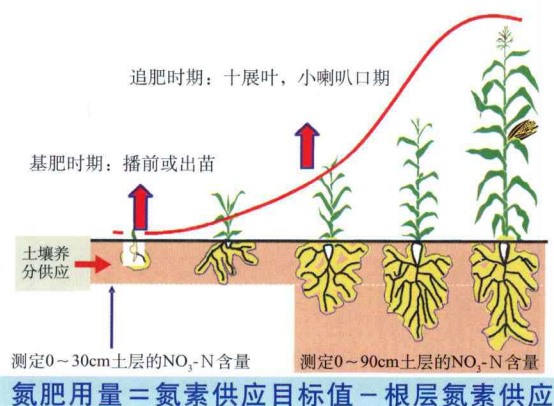


图 2-17 基于土壤硝态氮测试的根层氮素调控技术示意图

应目标, 结合根层土壤硝态氮田间快速测试值确定实时氮肥用量。

为了确保氮肥实时监控技术准确到位, 我们引进并建立了作物生育期植株硝酸盐快速诊断技术, 通过 300 多个田间试验, 建立了我国 9 种主要旱地作物植株硝酸含量快速测试诊断指标, 为氮肥实时监控提供了有效的反馈调节手段 (图 2-18)。

针对水稻定期淹水和土壤有效氮测试方法的局限性, 以及氮素实时监控不能直接通过作物根层有效氮的动态测定来实现的实际情况, 我们引进了国际水稻所的养分实地管理技术(SSNM)、特别是叶色卡(LCC)、便携

式叶绿素仪(SPAD)等水稻氮素营养诊断速测方法 (图 2-19), 通过植株水稻叶色诊断技术反映植株氮素营养状况与根层土壤养分供应, 探讨我国主要水稻产区的植株叶色诊断值与推荐施氮量的关系, 建立的水稻氮素实时监控技术。该技术依据高产水稻氮素需求规律来确定不同生育阶段叶色诊断值, 通过实时叶色诊断确定不同生育阶段氮肥的推荐用量。在我国南方的双季早稻和双季晚稻以及南方、华北和东北的单季稻上进行了多年多点田间验证和大面积应用表明, 我们建立的水稻氮肥实时监控技术可有效地解决了传统施肥总量投入过高、基肥比例过大的问题。

(4) 磷钾肥恒时监控技术体系的建立

在国内已有的养分管理技术中磷、钾管理基本采用肥料效应函数法或由肥料当季利用率决定的养分平衡法。虽然这些方法对我国肥料的平衡施用和作物增产起到了重要作用, 但却存在以下问题: ①基于单季作物肥料效应函数法确定的磷肥用量一般都高出作物带走量的 1 倍以上, 当前华北平原小麦-玉米轮作体系磷肥用量普遍在 150~250 kg

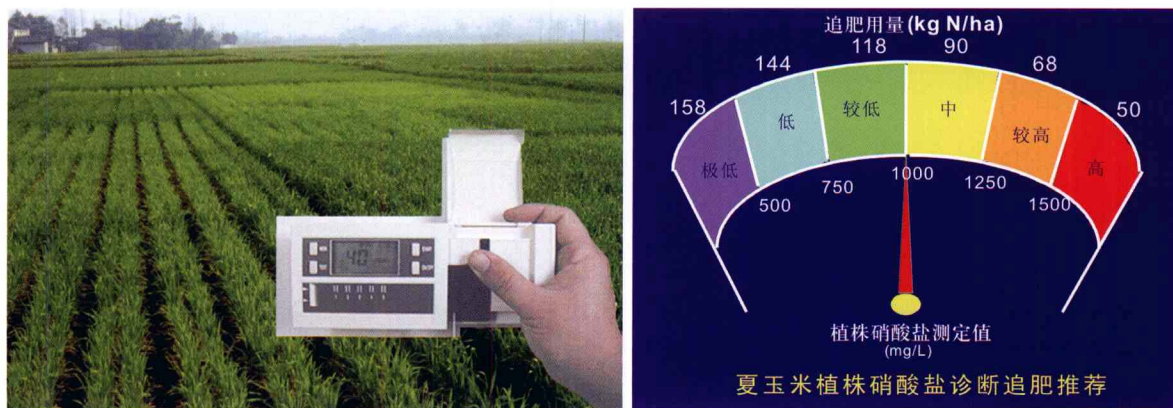


图 2-18 华北地区夏玉米植株硝酸盐诊断追肥推荐示意图

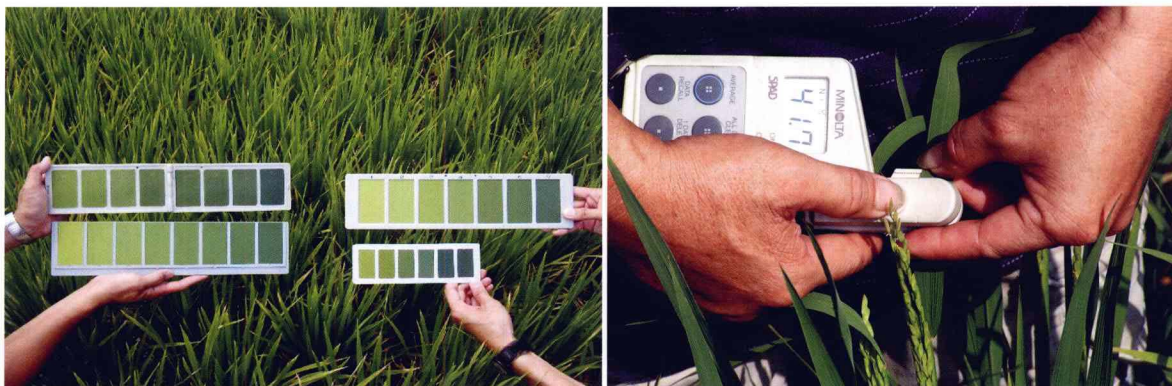


图 2-19 基于叶色卡（左）和叶绿素仪（右）的水稻氮营养诊断图示

$P_2O_5/hm^2/yr$ 范围内, 20 多年来的连续大量施肥已使土壤有效磷从 20 世纪 80 年代的 $5\sim 10\text{ mg/kg}$ 普遍提升到 $15\sim 30\text{ mg/kg}$ 。部分农田, 特别是菜田和高投入农田, 高量的土壤有效磷累积已成为资源和环境问题。按这种趋势, 20 年之内该地区的土壤有效磷水平可能会超过国外普遍认为的能造成环境问题的阈值 ($50\sim 60\text{ mg/kg}$); ② 基于现有方法确定的钾肥推荐用量不能实现土壤养分的收支平衡, 特别是在大田作物有机肥施用不足、秸秆还田率低的情况下, 造成了土壤钾素肥力总体上呈下降趋势。

欧美国家经过早期的土壤培肥(主要是磷、钾)后, 从 20 世纪 70 年代末 80 年代初开始基本进入维持施肥阶段。而我国目前却面临着完全不同的情况, 一方面土壤磷、钾总体肥力水平仍然不高, 需要继续提升; 另一方面, 部分地区由于连续多年大量施用磷肥, 土壤有效磷上升过快, 在不久的将来就会面临土壤磷过量积累引起的一系列问题。因此, 如何合理施用磷、钾肥, 使我国的土壤磷、钾肥力既能满足持续稳定高产的需

要, 又不对生态环境构成威胁且具有较高的养分资源利用效率, 就必须在养分管理技术上进行重大创新。

基于对根层养分生物有效性等的新认识和磷、钾养分进入土壤大多累积在根层土壤的特点, 我们设想只要将根层磷、钾长期维持在一个适宜水平上, 作物就可发挥其根系的生物学潜力, 高效利用这些养分。后来在长期定位试验研究中我们也发现, 作物养分管理一般不需要对土壤磷、钾肥力进行每年每个生长季节的频繁监测, 采用 3~5 年一个周期的监测就可以满足管理的需要。这样不仅可以降低测定频率 $66\%\sim 80\%$, 节省大量的测试成本, 而且有利于发挥根系活化利用养分的生物学潜力(王兴仁等, 1995, 李秋梅, 2001)。通过对 20 年长期定位试验和大量根际磷活化利用的基础研究我们还发现, 土壤有效磷、钾的变化主要是由土壤-作物系统磷、钾的收支平衡决定的(曹宁等, 2007)。为了将根层磷、钾长期维持在一个适宜水平和发挥作物本身利用磷、钾养分的生物学潜力, 我们依据根层养分监测结果, 结合养分

收支平衡，提出了“提高”、“维持”或“控制”的管理策略及相应的施肥推荐，构建了磷、钾恒量监控的简化管理技术（图 2-20）。该技术在利用和提高养分生物有效性的基础上简化了管理，可以将土壤磷、钾肥力调控到既满足持续高产稳产的需求、又不对生态环境构成威胁的范围内。

（5）中微量元素因缺补缺、矫正施肥体系的建立

我们早期的研究发现，随着作物新品种的应用、复种指数的提高和作物产量的持续增加，作物对中微量元素的需求量明显增大，20 世纪 80 年代建立的中微量元素丰缺指标已不能适应当前农业生产的需求，建立与更新不同作物中微量元素养分管理指标体系势在必行。如长江流域油菜土壤有效硼临界指标已由 20 世纪 80 年代的 0.5 mg/kg 上升到当前的 0.58 mg/kg；在成都平原水旱轮作体系（水稻-小麦，或水稻-油菜）中，当水田转为旱地时，土壤易溶态锰、吸附态锰和碳酸

盐态锰含量都会显著减少，大大降低了土壤锰的生物有效性，常常导致小麦、油菜等旱作作物缺锰；高浓度氮、磷、钾化肥的大量施用以及有机肥施用量的不断减少，导致作物从土壤中带走的中微量元素养分无法及时得到补充，微量元素缺乏面积日益增加。

通过大量研究和实践验证，我们发现微量元素具有典型的“木桶效应”，缺则减产甚至绝产，丰则贮于根层，依赖作物的生物学潜力发挥而被活化利用。据此，我们提出了在提高养分生物有效性的基础上，中微量元素因缺补缺、矫正施用的养分管理策略，并建立与更新了不同作物的中微量元素养分管理指标体系。

4. 根层养分调控与作物栽培、水分管理等技术结合的新尝试（1999 年起）

随着根层养分调控技术应用的不断扩展，新的问题、新的挑战也不断涌现。我们在山东

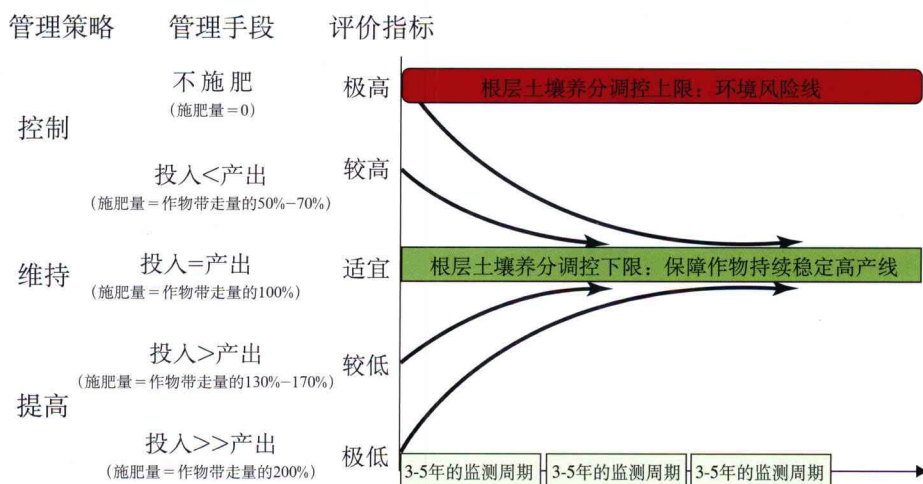


图 2-20 基于养分平衡和土壤测试的磷、钾肥恒量监控技术模式

寿光辣椒大棚进行根层养分调控时出现了即使在施肥量应该可以满足作物生长发育需求的条件下,作物生育后期仍然严重脱肥,辣椒产量明显降低的现象(图2-21)。我们无法解释这个现象,因此又重复了一季,得到与前一季相同的试验结果。这个结果惹的该试验地农民非常生气,觉得他这个种菜能手太丢人,甚至把我们的研究生赶出了大棚。

为了找出原因,我们只好换了一个大棚,在用同一试验方案的同时,采用了 ^{15}N 示踪技术,研究不同水肥管理条件下肥料氮的去向,找出减产原因。结果非常明确,造成养分供应不足的“罪魁祸首”是过量灌溉!在农民大水漫灌($>600\text{mm}/\text{季}$)的情况下保护地辣椒的氮素利用率仅为11%,有近90%的肥料氮不能被当季作物利用,绝大部分随水淋出根层。因此,水肥一体调控成了大棚菜地养分资源综合管理的关键。

为此,自2002年开始我们根据蔬菜作物水分养分需求规律和土壤供应特点,提出了设施蔬菜的氮素实时监控技术,并建立了相

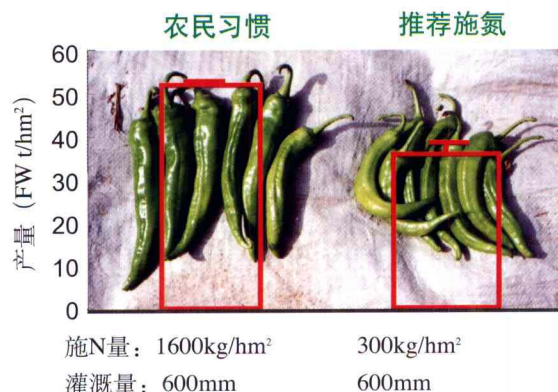


图2-21 由于忽视了水分管理而造成养分管理不成功的教训(农民大水大肥造成大量浪费,推荐施肥量合理但过量灌溉使养分淋失造成减产)

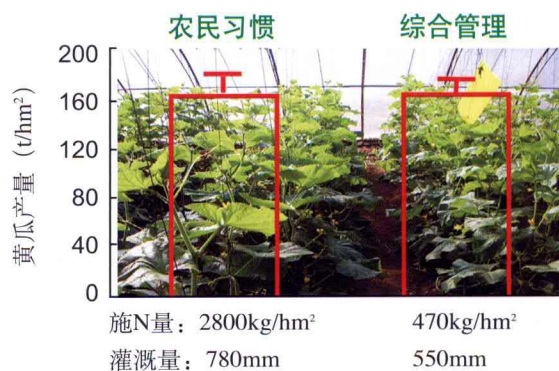


图2-22 水肥一体化管理在保证高产的前提下大幅度降低了氮肥用量

应的指标体系,重点通过水分管理控制蔬菜根层养分,满足作物不同生育阶段养分需求。图2-22是我们综合水分优化管理、高产栽培措施和土壤调控等技术建立的黄瓜养分综合管理技术在山东寿光的试验验证结果,通过养分资源综合管理技术,在保证黄瓜高产的基础上,氮素投入大幅度减少,氮肥利用率显著提高,土壤残留 NO_3^--N 大幅度下降,环境效益明显。

上述经验告诉我们,要使以根层养分调控为核心的养分资源综合管理技术在农业生产中发挥重要作用,就必须与水分管理、高产栽培等技术进行有效集成。为此,我们积极寻求新的、多学科合作的可能。1998年,我们通过中德国际合作项目“华北平原高产高生产力条件下环境可承受的持续农业研究”建立了植物营养学、土壤学、作物栽培学、生态学、环境科学等多学科协作的平台,并在北京郊区-东北旺建立了占地 20hm^2 的长期定位试验,结合中国农业大学曲州实验站和吴桥实验站,重点探讨了根层养分调控与作物栽培、水分管理等技术的集成途径及其产量

和环境效应。

设在东北旺的小麦-玉米轮作主试验占地 5hm²，由 18 处理、72 个小区构成，是一个超大型的定位试验（图 2-23，图 2-24），经过连续 10 年的多学科综合研究，把养分管理技术与水分管理、秸秆还田和高产栽培技术等有机集成，形成了多学科、中外合作探讨集约化可持续农业发展道路的研究平台。

在东北旺试验基地上，我们还建立露地花椰菜-苋菜-菠菜轮作定位试验（图 2-25，图 2-26），通过引进德国先进水、氮管理技术，

重点攻克了氮素实时监控与水肥一体化技术有效集成的难题，并对其应用效果进行了评价，获得了节肥、节水效果显著，环境效益明显的结果。在连续 3 年的多学科研究中发现，与农民习惯相比，养分资源综合管理技术可降低氮肥用量 70%，灌溉水减少 391mm，节约水资源 31%，硝酸盐淋洗减少 67%。

2001 年，我们在国家“十五”科技攻关项目支持下，在华北平原粮食和蔬菜主产区山东省惠民县建立了研究示范基地。针对当地作物用肥、用药量大、产量不稳、病虫害

大量发生，环境污染严重等特点，我们将蔬菜水肥管理技术、蔬菜病虫害综合防治技术和农药残留微生物降解技术等有机集成，构建了华北平原集约化农区蔬菜养分资源综合管理技术；将小麦、玉米氮素实时监控技术、磷钾恒量监控技术与水肥一体化技术、以及小麦、玉米生产体系病虫害综合防治技术有机集成，建立了华北平原集约化农区小麦-玉米轮作养分资源综合管理技术（图 2-27），实现了增产、节肥、节药、提高养分效率和减少环境污染等多重目标。

值得一提的是，试验示范过程本身就是一个从农民不相信到相信、从被动学到主动用的过程。最初我们提出试验示范方案



图 2-23 东北旺冬小麦-夏玉米定位试验全景图

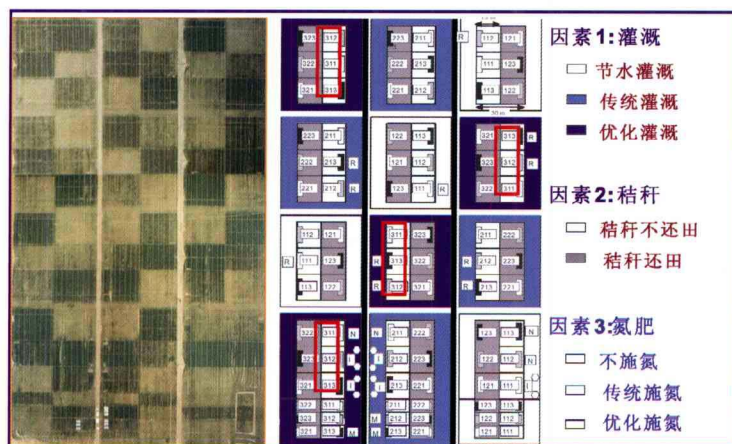


图 2-24 东北旺小麦-玉米轮作体系定位
试验设计及效果图

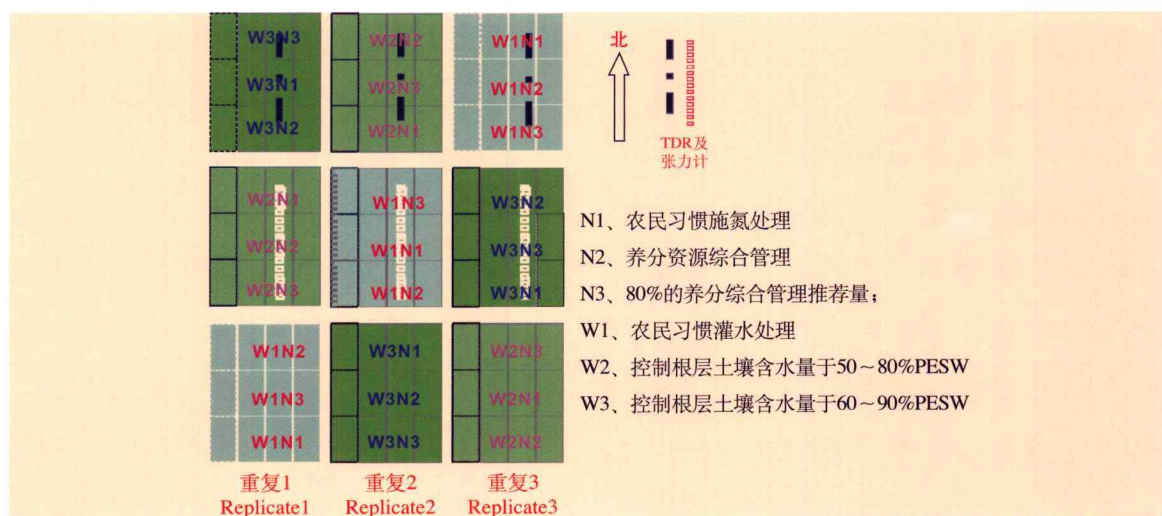


图 2-25 东北旺露地花椰菜-苋菜-菠菜轮作定位试验田间布置图



图 2-26 东北旺露地花椰菜-苋菜-菠菜轮作田间试验蔬菜长势

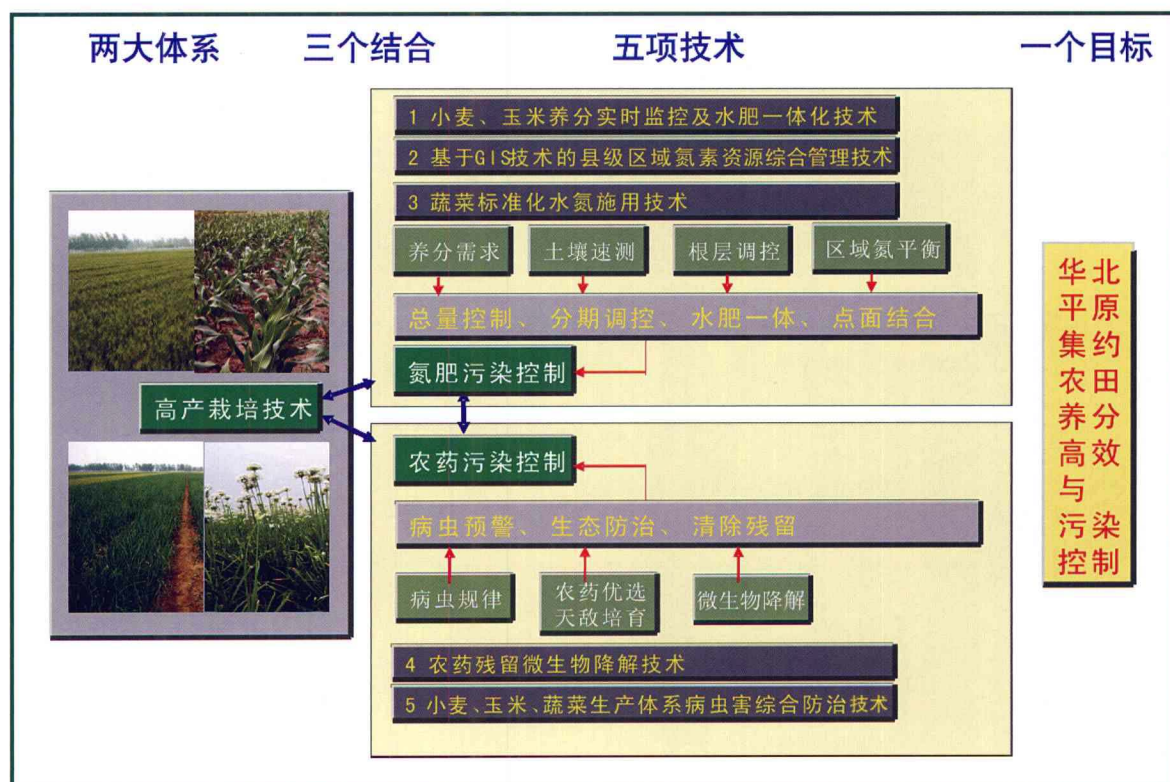


图 2-27 华北平原集约化农区农田养分资源综合管理技术集成

时,遭到绝大部分农民包括试验户的强烈反对,有人甚至不顾试验要求,偷偷施肥。面对重重困难,我们一方面加强宣传,一方面要求参加工作的研究生与农民同住、同吃、同劳动,随时用获得的最新数据资料给大家进行讲解和指导,同时帮助解决农民生产中出现的各种问题。在试验过程中,农民奇怪地发现,节约氮肥60%以上的施肥处理从苗子长相上一点也看不出与大肥大水的差别,收获后发现专家提出的将氮肥用量降低60%以上的养分管理技术不但不降低黄瓜产量,反而弯瓜少了,卖钱多了。农民一传十,十传百,认识发生了转变,争先恐后地要求在自己地里做研究和示范,后几年的试验示范工作开展得越来越顺利。农民们不仅主动要求作为示范户承担课题示范工作,而且主动和课题组的学生交朋友,热心地帮助他们解决遇到的问题,经常请他们到家里吃饭。当时还发生了一个小小的故事,有一年当课题组安排的试验户所育的黄瓜苗因天气原因而毁掉的时,全村20多个黄瓜种植户知道这一消息后自发地从各自所育的苗子中你三百、我五百地匀出苗子,主动送到试验地里,并挑选出大小均匀的苗子帮助移栽,让课题组

成员分外感动。课题组与当地农民亲如一家的佳话也在当地传开,当地媒体还纷纷做了进行报道,也引起当地政府部门的重视,有的博士生还被村里农民授予锦旗。

5. 建立最先进的环境效应自动监测系统,对养分资源综合管理技术增产增效、降低环境危害进行了长期定量评价

养分资源综合管理技术的环境影响评价是关系到该技术可否持续的关键,为此我们抓住国际合作的机遇,在长达8年的中德国际合作项目和农业部948项目的大力支持下,在国内首次引进建立了全新的环境效应监测体系,将最先进的氨挥发风洞法测定技术、 N_2O 原位连续自动监测技术、硝酸盐淋洗的原位树脂柱测定技术等结合组装成田间自动监测系统(图2-28),对农田水分养分和其它物质,尤其是氮素的去向,特别是环境排放量进行了长期原位观测。北京晚报曾在“400万的设备深埋地下,北京在做中国最贵的农业试验”专题报道中介绍了东北旺长期定位试验——“在北京海淀区东北旺乡一片占地260亩的试验田里,来自中国和德国的数十

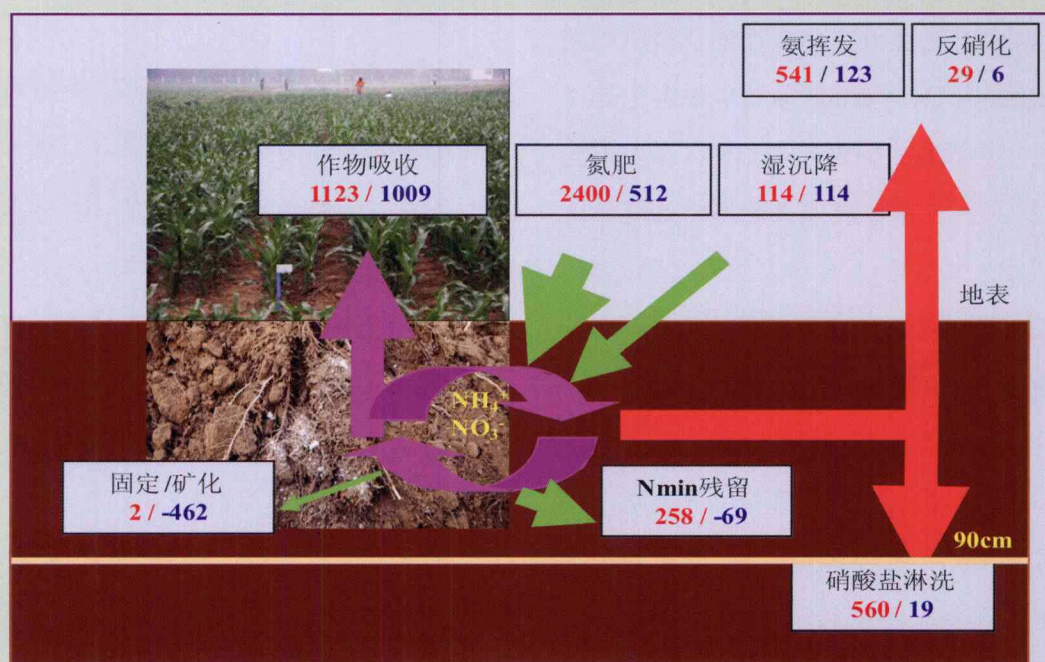


图 2-28 建立的全新的环境效应监测系统

采用国际上最先进的技术设备定位研究养分资源 综合管理的环境效应

(1999 – 2003 年农田养分循环监测结果)

(红色数值为农民习惯, 蓝色数值为养分资源综合管理, 单位 kg/hm^2)



N_2O emission in CO_2 -equivalents for conventional (A), optimized (B) treatment for summer maize area in the Northern China Plain in 1995 based on field measurements in Dongbeiwang 2001

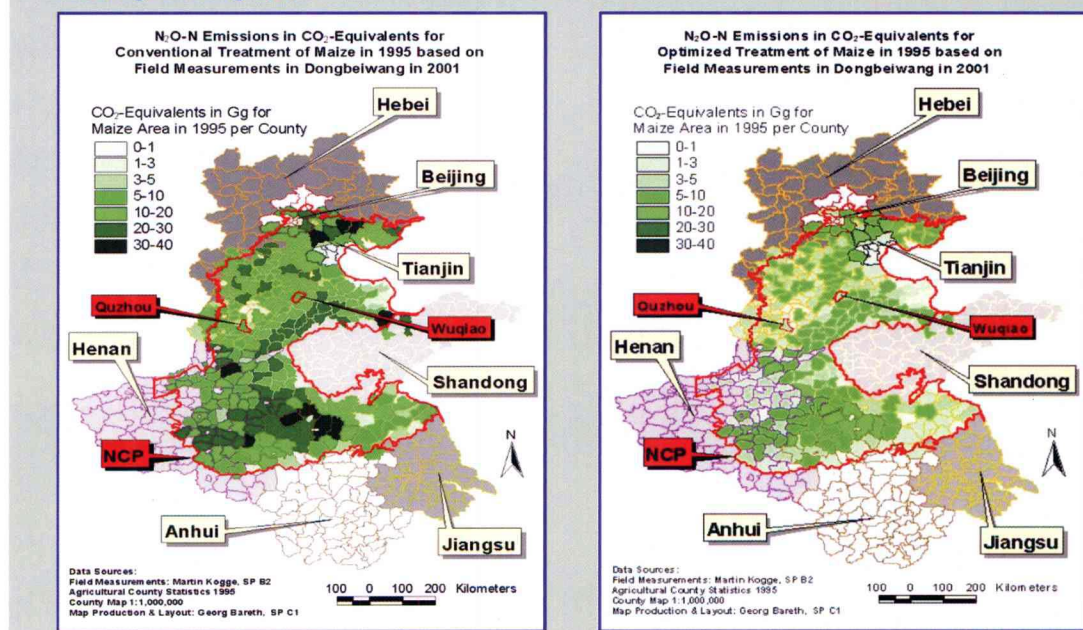


图 2-29 养分资源综合管理技术降低养分环境排放的效果
(上图为养分循环结果, 下图为华北平原评价结果, Bareth, 个人交流)

位科学家已经忙碌了近3年时间了,他们正在进行一项中国最为昂贵的农业课题研究——用埋在地里的价值100万德国马克的先进设备,为中国农民探寻一条经济合理、保护环境的“种田”方法……”

通过多年定位研究发现,养分资源综合管理技术在试验条件下节省氮、磷肥和灌溉水分别达75%、40%和28%,作物增产3%,经济效益提高86%,氨挥发、氧化亚氮排放和硝酸盐淋洗分别降低77%、72%和100%,大气增温潜势降低73%,达到了协调作物高产与环境保护。采用新建立的农业环境信息系统(Agro-Environment information system)将东北旺定位监测结果应用于华北平原小麦—玉米轮作体系发现,养分资源综合管理技术可以降低氧化亚氮排放高达3倍(图2-29)。

6. 养分资源管理由田间走向区域,由华北走向全国(2003起)

在田间尺度的养分资源综合管理技术取得重大突破的同时,我们认识到养分资源综合管理技术要想在我国国民经济主战场中发挥更大的作用,就必须从田间走向区域,由区域走向全国。2003年开始,我们通过引进国际先进农业科学技术项目(养分资源综合管理技术引进与中国技术体系的建立和应用2003-Z53)将养分资源管理技术推向全国。

养分资源综合管理技术在不同生态区不同作物体系中应用时碰到的第一个问题就是如何适应这些地区的特点、准确抓住主要生

产限制因子,并与解决生产问题的其它技术有机结合。例如,在我国北方冬小麦-夏玉米轮作体系中,氮肥用量过大、基肥比例过高、大水漫灌严重、部分地区磷肥过量等问题比较严重,我们首先在北京郊区-东北旺试验基地有针对性地集成了氮肥实时监控技术、磷钾肥恒量监控技术和水肥一体化技术,并与高产栽培技术相结合,构成田块尺度的养分资源综合管理技术体系,并通过多点试验示范,提炼简化为区域尺度的养分资源综合管理技术;2001年以山东省惠民县为基地开展了大面积试验示范和验证,取得很好的经济、环境效益;2003年,我们将小麦-玉米轮作体系养分资源综合管理技术扩展到整个华北平原和陕西、山西等地(图2-30)。

为了能使养分资源综合管理技术更好的服务于农业生产,我们将养分管理技术与地统计学和GIS等区域评价技术结合,构建区域尺度养分综合管理技术体系。在此基础上,我们设计大区域水平的作物专用肥复合肥和小区域尺度作物专用BB肥,并通过产业化,

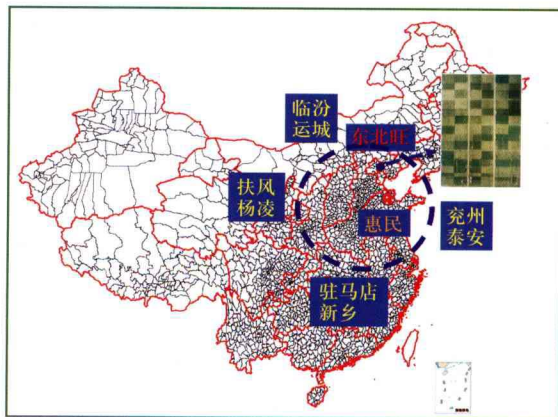


图2-30 小麦玉米养分资源综合管理技术从理论研究走向试验验证、走向全国

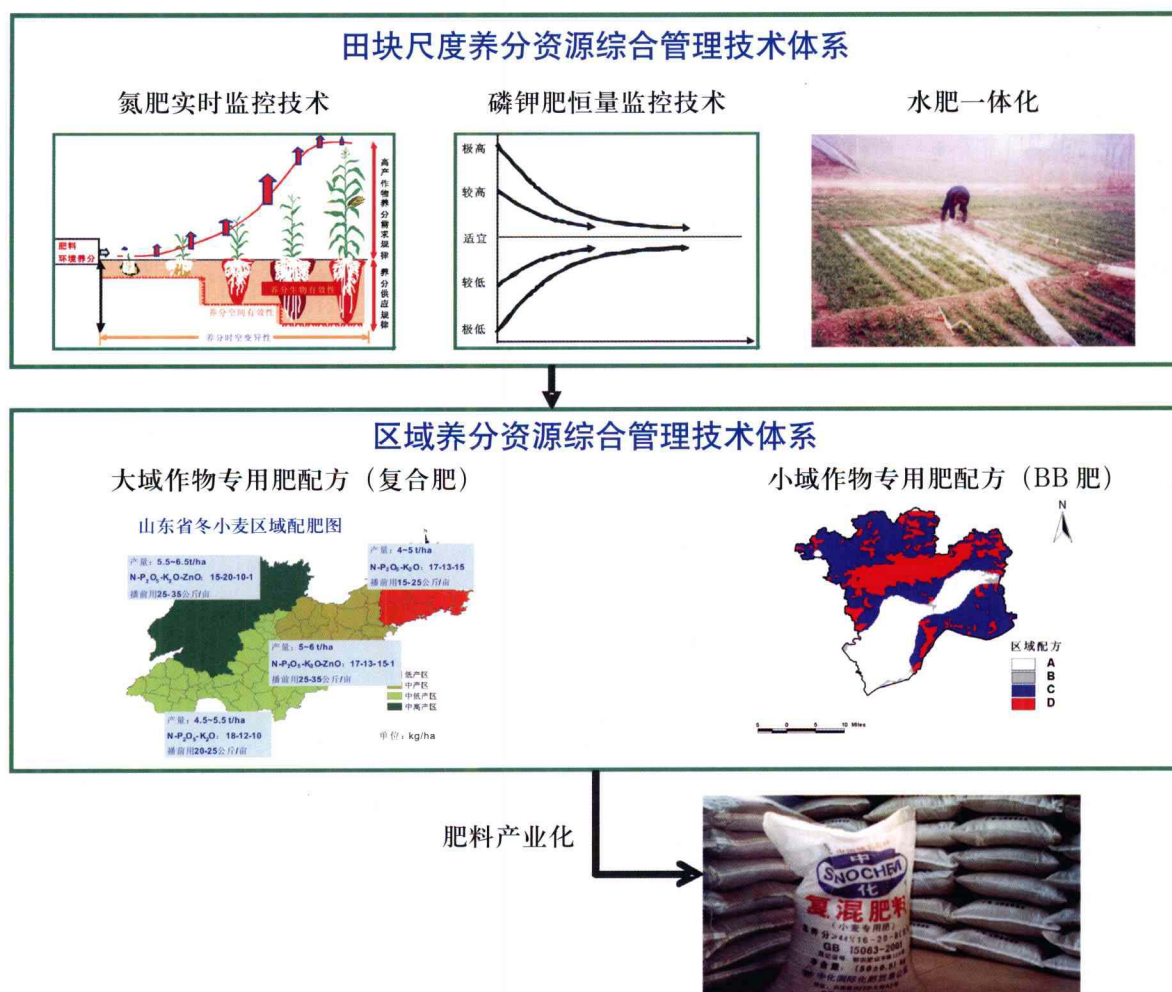


图 2-31 小麦、玉米轮作体系技术集成示意图

使养分资源综合管理的技术在生产中的应用更加简化和方便（图 2-31）。

南、湖北、广东、四川、重庆等省市大面积示范应用，取得了很好的经济、社会和环境效益。

在我国南方的水稻生产体系中，主要针对对氮肥用量偏高，基、蘖肥比重大，养分损失严重、利用率低等问题，在高产栽培技术的基础上，建立了以氮的总量控制和分期调控技术（基于 SPAD 或 LCC 的氮营养诊断实时监控）为核心的水稻养分资源综合管理技术（图2-32）。该技术在江苏、湖

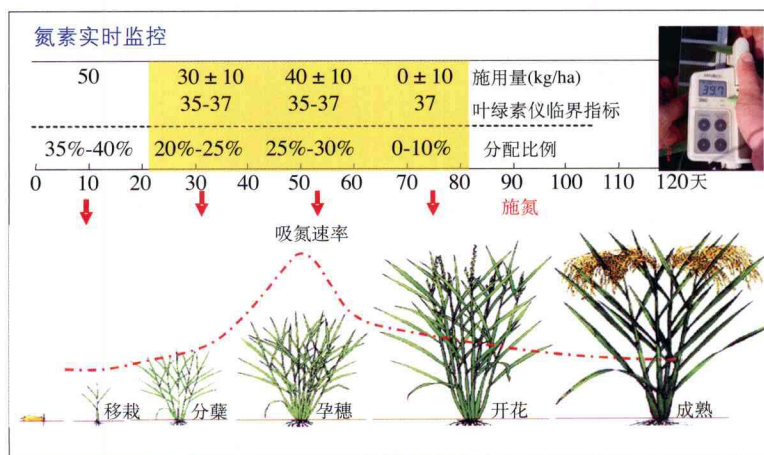


图 2-32 水稻生产体系技术集成示意图

在东北寒地水稻生产中，我们针对氮肥施用时期不合理造成水稻无效分蘖过多、通风透光不良、群体质量下降、水稻倒伏和稻瘟病重、严重制约水稻产量提高的问题，结合高产优化栽培技术、氮肥总量控制和分期调控相结合的实时管理技术及磷钾肥恒量监控技术，形成了一套新的寒地水稻养分资源综合管理技术，进行了 100 多个点次的田间小区试验和大田对比试验，涵盖了黑龙江省 1、2、3、4 积温带水稻主产区，取得了水稻产量稳定增产在 10% 以上，节肥省药、减少病害的效果（图 2-33）。

该技术在试验示范区得到了稻农的普遍好评和应用。如 2005 年木兰县利东乡三胜村农户尚清玉采用此项技术在单反用量大幅度减少情况下产量提高 14%，2006 年周围农户的 60hm² 稻田都向他学习采用了这项技术。2007 年，当地应用该项技术的面积达到 200hm²，凡是应用这项技术的农户都非常满意。

在东北玉米种植区，我们针对当前玉米生产中存在的栽培密度低、一次性施肥易造

成前期烧苗、后期脱肥早衰等问题，在高产栽培技术基础上，建立了以氮肥实时监控技术，磷钾恒量监控技术和增密高产栽培技术相结合的春玉米养分资源综合管理技术（图 2-34），在吉林、辽宁、黑龙江等地进行了大面积示范推广。

在四川丘陵区的水旱轮作系统，针对灌溉水短缺、干旱频繁发生、养分资源利用不合理、水稻生长前期受低温影响、油菜生育期过长等问题，从品种选择、连续免耕、节水灌溉、地膜覆盖、优化栽培、秸秆还田、推荐施肥、间套作、病虫草害综合防治等多项技术的结合上入手，建立了水旱轮作体系养分资源综合管理技术，重点攻克了氮素总量控制，水稻三围栽培技术与水稻地膜覆盖技术的有机集成，建立了节水、高产和养分高效利用的养分资源综合管理技术体系（图 2-35）。该技术应用由开始时的一个村几户人家发展到 2007 年遍布四川全省 1500 多个村的约 67000hm²。

在北方苹果主产区，我们针对大水大

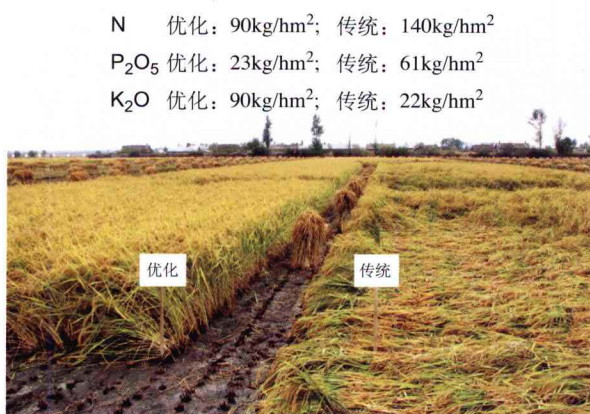


图 2-33 寒地水稻养分资源综合管理技术效果
(优化处理明显降低下部节间长度，从而防止倒伏，最终获得高产)

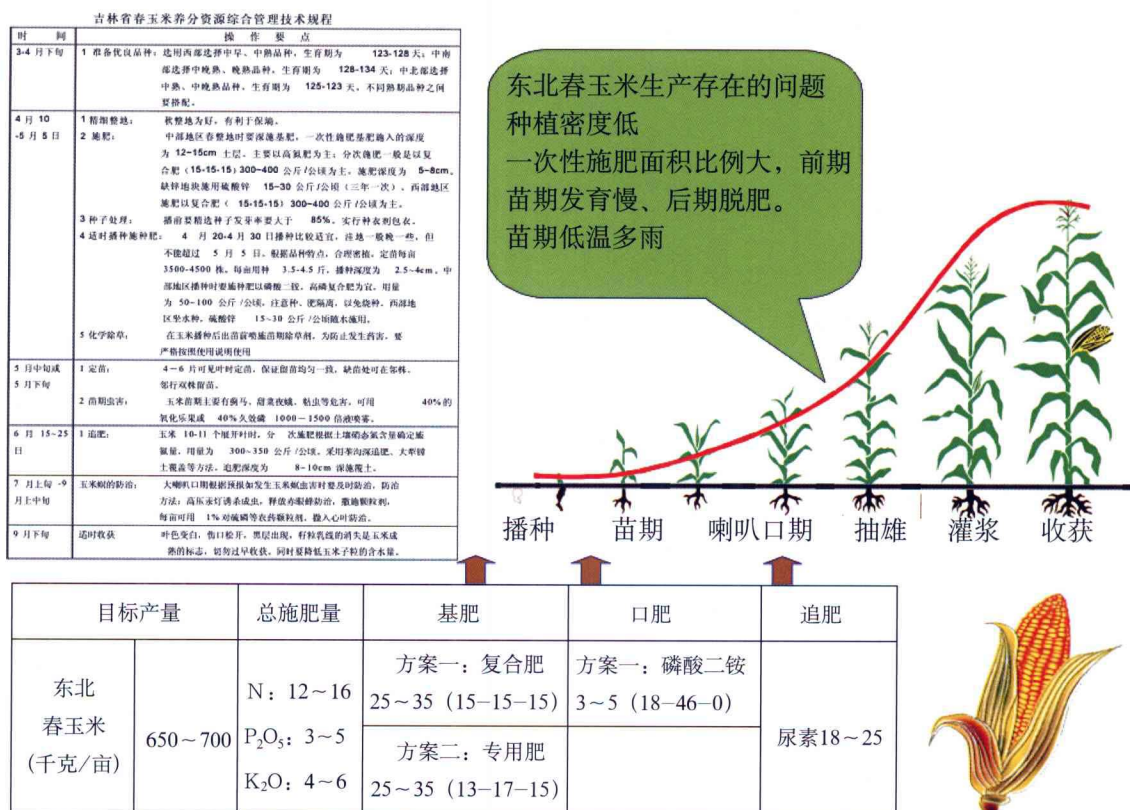
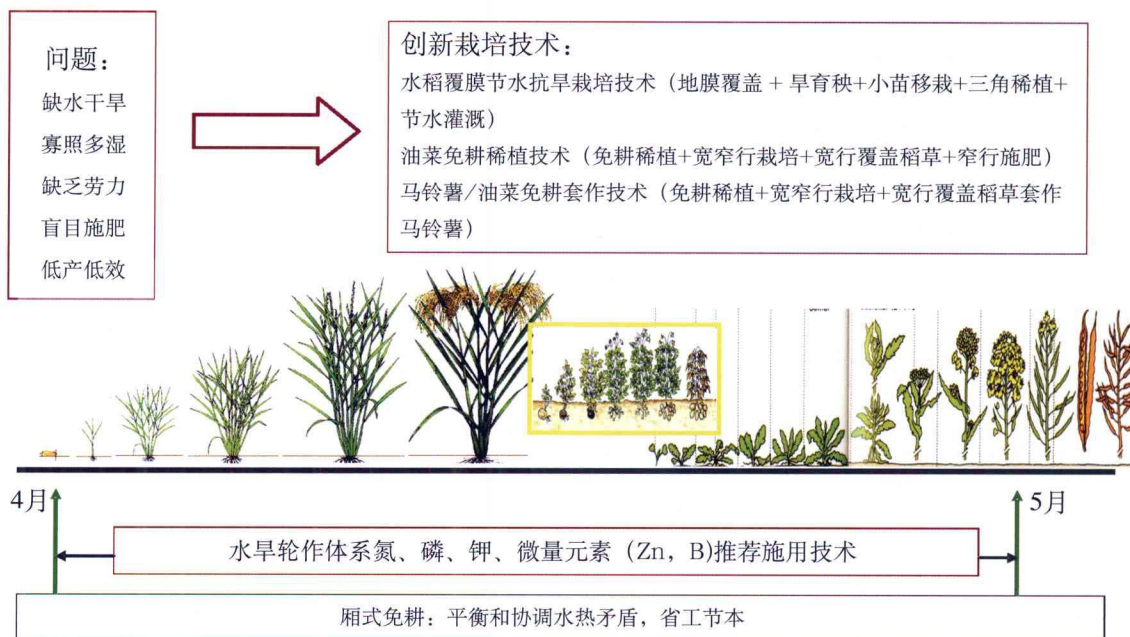


图 2-34 东北春玉米养分资源管理综合技术集成示意图



周年高产高效的水旱轮作体系养分资源综合管理技术

图 2-35 水旱轮作体系养分资源综合管理技术集成示意图

肥、立园土壤条件差等问题，依据苹果周年养分需求规律，建立了总量控制与分期调控的养分管理技术，与果枝修剪技术、行间覆盖或生草技术等有机集成，有效地协调了高产、养分供应、树体结构/长势之间的矛盾（图 2-36）。该技术在山东烟台、栖霞、威海和陕西的白水等苹果主产区大面积示范、推广、应用。

针对我国蔬菜，特别是大棚蔬菜生产体系“大肥大水”问题突出，而蔬菜作物根系浅，养分吸收能力差等问题，重点探讨了氮肥实时监控和水肥一体化技术的结合问题，集成了磷钾恒量监控技术、中微量元素因缺补缺技术和高产栽培技术，最终形成了蔬菜

养分资源综合管理技术，实现了水肥高效、作物优质高产和环境效应最小化的有机结合（图 2-37）。

针对我们油菜主产区耕地肥力水平差、并且常常同时缺乏多种养分，施肥中的盲目性和随意性很大，肥料增产效果差等主要生产问题，我们将氮素实时监控技术、磷钾恒量监控技术和中微量元素因缺补缺（如补充硼肥）等技术与油菜高产优质栽培技术和覆草及开深沟防涝技术等相结合，建立了油菜养分资源综合管理技术体系，并在我们油菜主产区的长江流域进行大面积示范推广和应用（图 2-38）。

在建立全国不同区域不同作物养分资

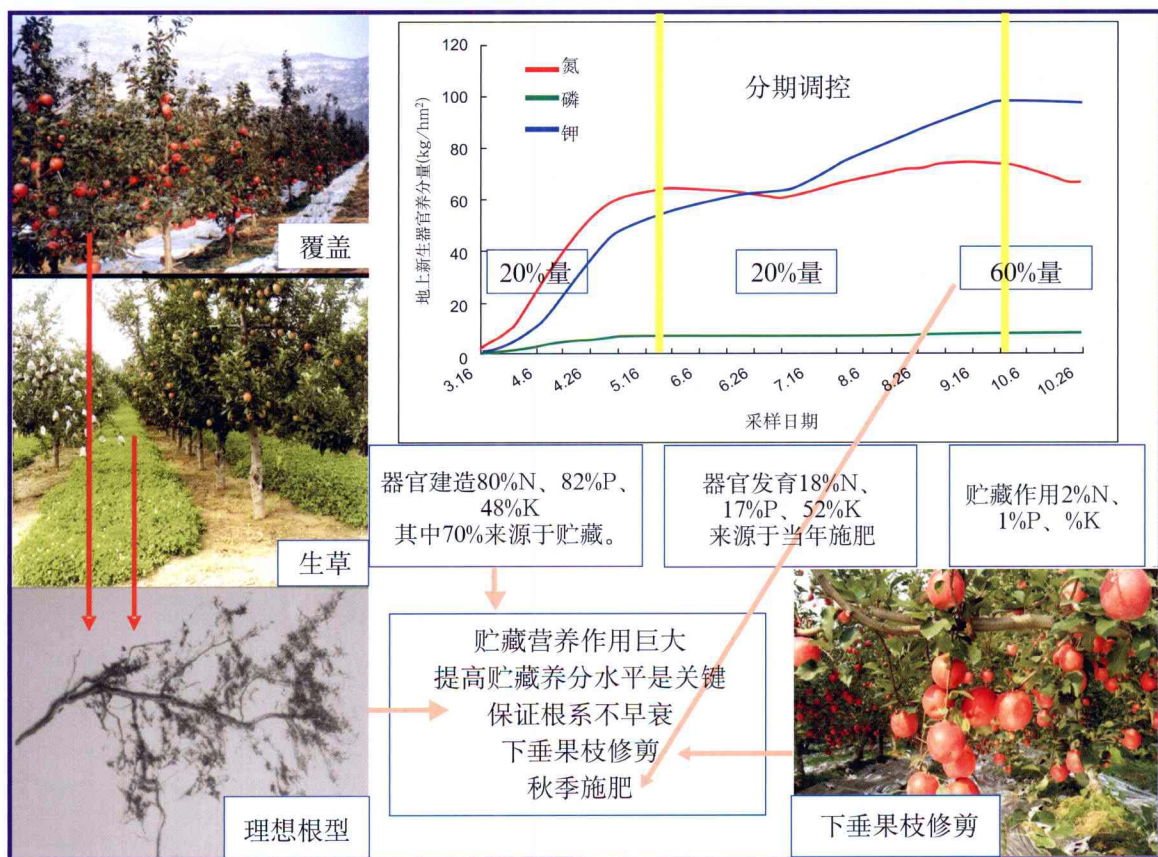


图 2-36 苹果养分资源综合管理技术集成示意图

以**水肥一体化和氮素实时监控技术**、**磷钾恒量监控技术**及**高产栽培技术有效集成的蔬菜等经济类作物养分资源综合管理技术**实现了**节肥、增产、增收**的目标

温室茄果高产优质高效综合栽培技术规程

适用范围:本规程适用于华北地区日光温室栽培多年的日光温室。此规程是在优良的基础上,对各项技术进行综合集成,制定日光温室土壤可持续利用的黄瓜优质、安全、高产的技术规程。

本规程规定了日光温室黄瓜栽培的品种选择、育苗、环境条件的管理、病虫害防治及克服连作障碍的技术措施等。

使用效果:利用本规程可使主要土传病害发生频率降低50%以上,防治土传病害的农药用量降低60%以上,氮肥使用量降低40%以上,保证正茬增产10%以上,连作不成产,蔬菜产品达到农业部无公害标准,每亩每年节约氮肥投入成本600元,节约农药投入成本400元,增加产值800元。

技术规程:

1. 日光温室前处理

1.1 选择轮作、休闲和套种的日光温室:轮作一般选择高收益的番茄和黄瓜进行轮作;休闲作物多选用根系分泌物具有抑制黄瓜连作障碍的百合科(大蒜、葱)、绿篱(白菜、菠菜)、豆科(毛茛子)等,也可以闲、套种玉米、苜蓿等作物。

黄瓜

早熟以秋为主,晚熟以春为主。综合有机肥和生物肥7-15天进行追肥。每次每公顷追肥量不超过8千克。

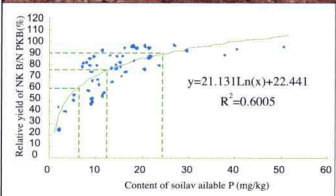
	目标产量 (定植前半月)	基肥 (定植前半月)	苗期	初花期	初瓜期	盛瓜期
保护地 (秋栽)	15000 ~ 20000 千克	亩施有机肥5 ~ 8 立方厘米, 10 ~ 15 千克磷 (P ₂ O ₅), 10 ~ 15 千克钾 (K ₂ O)	亩施氮 (N) 2 ~ 3 千克, 1 次	以控为主, 根据情况追肥 1 次	亩施氮 (N) 3 ~ 4 千克, 钾 (K ₂ O) 4 ~ 6 千克, 1 ~ 2 次	亩施氮 (N) 3 ~ 4 千克, 钾 (K ₂ O) 4 ~ 6 千克, 6 ~ 8 次
保护地 (春栽、秋育苗)	8000 ~ 12000 千克	亩施有机肥 5 ~ 8 立方厘米, 10 ~ 15 千克磷 (P ₂ O ₅), 10 ~ 15 千克钾 (K ₂ O)	亩施氮 (N) 2 ~ 3 千克, 1 次	以控为主, 根据情况追肥 1 次	亩施氮 (N) 3 ~ 4 千克, 钾 (K ₂ O) 4 ~ 6 千克, 1 次	亩施氮 (N) 3 ~ 4 千克, 钾 (K ₂ O) 4 ~ 6 千克, 4 ~ 5 次
露地	4000 ~ 5000 千克	亩施有机肥 5 ~ 8 立方厘米, 10 ~ 15 千克磷 (P ₂ O ₅), 10 ~ 15 千克钾 (K ₂ O)	亩施氮 (N) 2 ~ 3 千克, 1 次	以控为主, 根据情况追肥 1 次	亩施氮 (N) 3 ~ 4 千克, 钾 (K ₂ O) 4 ~ 6 千克, 1 次	亩施氮 (N) 3 ~ 4 千克, 钾 (K ₂ O) 4 ~ 6 千克, 2 ~ 3 次

1998-2005年北京市121个蔬菜试验示范中养分资源综合管理技术的应用效果

蔬菜种类	平均增产量 (t/hm ²)	增产 %	平均节氮量 (kg N/hm ²)	节氮 %	增收 (元/hm ²)
露地果菜类	3.69	6.8	151	19.0	3330
露地叶菜类	4.96	7.9	155	27.7	1785
保护地果菜类	3.66	6.4	183	21.0	4335
平均	4.1	7.0	163	22.6	3150

图 2-37 蔬菜养分资源综合管理技术集成示意图

油菜养分资源综合管理技术集成及效果



- (1) 以土壤养分测试结果为基础,修正建立土壤不同养分丰缺指标,判断种植区域土壤养分丰缺状况,针对性地进行因土施肥策略
- (2) 根据优质高产油菜品种的养分需求特性和目标产量,在氮磷过量施肥区域实行“减氮控磷”技术,在施肥不足区域实行“增肥”技术,在养分施用失衡区域实行“调肥平衡”技术
- (3) 改变以施基肥为主的习惯方式为“基追配合、氮钾分施”方式
- (4) 对土壤pH低于6的耕地进行“石灰面施、翻耕调酸、施二(年)隔三(年)”措施
- (5) 对油菜田采用稻草覆盖保墒保温、开沟防涝护根技术
- (6) 研制油菜“机械开沟-施肥-播种-覆土”一体化轻简种植技术

2004~2007年油菜试验示范中养分资源综合管理技术效果

养分	养分调整	样本数	增产比例	平均增产量 (kg/hm ²)	增产 %	平均调节肥量 (kg/hm ²)	调节率 %
N	增施	49	81.6	371	16.5	32	14.7
	减施	26	61.5	131	5.0	35	28.0
P ₂ O ₅	增施	50	74.0	296	12.8	27	128.6
	减施	38	55.3	84	3.3	32	39.6
K ₂ O	增施	71	71.8	234	9.7	39	123.8
	减施	18	72.2	84	3.2	18	23.5
硼砂	增施	47	72.3	254	11.0		

图 2-38 油菜养分资源综合管理技术集成示意图

源综合管理技术体系的同时，我们总结区域养分资源特征和各地作物生产情况，对全国 65 种大田作物、蔬菜和果树养分管理技术进行了模式化和简单化，并编写的大田作物、蔬菜和果树养分资源管理图谱，结合农业部“科技入户”行动等在全国发行 50 万册，大大扩展了养分资源综合管理技术的辐射范围。

为了进一步扩大技术示范和技术推广的力度,近年来,我们在农业部948项目中专门组织了全国20个省市自治区农业厅土肥站和80个县农业局土肥站(图2-39,表2-2),通过每年2次大规模养分资源综合管理技术培训,共同制订各地主要作物养分资源综合管理技术方案和详细的示范计划,使每个县每年最少完成10个示范方,全国每年共计800~900个示范作为验证和样板,图2-40是其中两例),各个省市自治区和各县也通过技术培训和田间示范等多种手段,推动新技术的大面积推广应用。



图 2-39 养分资源综合管理技术在全国主要 20 个省（市）示范推广分布情况



图 2-40 黑龙江农垦和湖北油菜养分资源综合管理技术示范区标牌举例

表 2-2 养分资源综合管理技术推广单位与主要负责和参加人

地 区	主要负责和参加人员	单 位
河 北	马利民, 贾文竹, 张里占, 李旭光, 刘淑桥, 王平, 许宁	河北省土肥站
馆陶县	李永昕	馆陶县土肥站
安平县	王彦琴	安平县土肥站
清苑县	王淑珍	清苑县土肥站
无极县	孙素卿	无极县土肥站
丰南区	王贵政	唐山土肥站
昌黎县	赵建民	昌黎县土肥站
山 东	蒋庆功, 于舜章	山东省土壤肥料总站
招远市	吴德敏	招远土肥站
东阿县	王祥明	东阿土肥站
新泰市	李天玉	新泰土肥站
寿光市	陈永智	寿光土肥站
博兴县	刘永志	博兴土肥站
临邑县	李方京	临邑土肥站
陕 西	赵建兴, 李文祥, 徐文华, 李亚周	陕西省土肥站
陈仓区	王银福	陈仓区土肥站
扶风县	乌鸿科	扶风县土肥站
高陵县	安振峰	高陵县土肥站
武功县	李高远	武功县土肥站
河 南	郑义, 易玉林, 孙笑梅, 刘玉堂, 白莉娟, 徐俊恒	河南省土壤肥料站
滑 县	刘红军	滑县农业技术推广中心
扶沟县	张宝山	扶沟县农业技术推广中心
汝南县	任双喜	汝南县土壤肥料站
孟津县	李玛瑙	孟津县土壤肥料站
新郑市	李建峰	新郑市土壤肥料站
许昌县	张国恩	许昌县土壤肥料站
山 西	贺玉柱, 赵建明, 康宇, 张君伟	山西省土肥站
运城市	孟晓民	运城市土肥站
临汾市	李连科	临汾市土肥站
洪洞县	杨建胜	洪洞县土肥站
稷山县	薛徐柱	稷山县土肥站
临猗县	李晋峰	临县土肥站
盐湖区	郭永东	盐湖区土肥站
江 苏	徐 茂, 殷广德	江苏省土肥站
丹阳市	谢金学	丹阳市土肥站
姜堰市	钱宏兵	姜堰市土肥站
海 安	陈 斌	海安土肥站
仪征市	王长松	仪征市土肥站
江 都	唐宝国	江都土肥站
安 徽	赵建勋, 钱晓华, 田杰, 邱宁宁, 胡荣根, 吴义鸿, 陈崇兰	安徽省土肥站
庐江县	吕和平	庐江县农技中心
芜湖县	吴传洲	芜湖县土肥站
贵池区	刘春生	贵池区农技中心

续表

地 区	主要负责和参加人员	单 位
太湖县	施爱枝	太湖县农技中心
湖 南	谢卫国, 黄铁平, 刘如清, 夏海鳌, 危长宽, 刘毅斌, 杨 琳	湖南省土壤肥料工作站
宁乡县	袁跃之	宁乡县土壤肥料工作站
安乡县	郑孝标	安乡县土壤肥料工作站
湘阴县	任可爱	湘阴县土壤肥料工作站
澧 县	何运祥	澧县土壤肥料工作站
冷水滩	周芳庆	冷水滩土壤肥料工作站
双峰县	彭晚桂	双峰县土壤肥料工作站
江 西	周志成, 陈永昌, 邹绍文	江西省土壤肥料技术推广站
奉新县	阴小刚	奉新县土肥站
兴国县	叶 青	兴国县土肥站
万年县	毛平丰	万年县土肥站
贵溪县	侯冰鑫	贵溪县土肥站
吉 林	王剑峰, 刘振刚, 梁影, 宋立新	吉林省土肥总站
伊通县	张玉欣	伊通县农技中心
九台市	孙宇欣	九台市土肥站
东丰县	仇长礼	东丰县农技中心
前郭县	毛森林	前郭县农技中心
德惠县	崔振礼	德惠县农技中心
重 庆	李 伟	重庆市农业技术推广总站
重 庆	石孝均	西南大学资环学院
梁平县	胡王仲	重庆市农业技术推广总站
南川区	熊正辉	重庆市农业技术推广总站
江津区	戴亨林	重庆市农业技术推广总站
垫江县	王 帅	重庆市农业技术推广总站
新 疆	艾尼瓦尔·木沙, 雷海, 董巨河	新疆土肥站
喀什地区	董积中	喀什地区土肥站
塔城地区	杨方永	塔城地区土肥站
阿克苏	曹明艳	阿克苏地区
昌吉州	李凤玲	昌吉州土肥
莎车县	王 东	莎车县农技
库车县	张 昀	库车县农技
沙湾县	宋鸿飞	沙湾县农技
呼图壁	付增云	呼图壁农技
四 川	黄泽林, 陈庆瑞	四川省农科院土肥所
宜宾市	刘兴万	宜宾市土肥站
大竹县	陈志春	大竹县土肥站
长宁县	牟一平	长宁县土肥站
仁寿县	刘书琴	仁寿县土肥站
射洪县	杨文广	射洪县土肥站
广 西	宾士友, 黄武龙, 李少泉, 罗应平, 陈松, 黄绍富, 伍华远, 梁运献, 黄朝富, 蒋建民, 陈彦毅	广西土肥站
柳江县	曾广巧	柳江县土肥站
武鸣县	李金菊	武鸣县土肥站

续表

地 区	主要负责和参加人员	单 位
八步区	关艳玉	八步区土肥站
合浦县	姚宗儒	合浦县土肥站
湖 北	陈传友, 童军, 黄和平, 徐勇	湖北省土肥站
浠水县	汪 航	浠水县土肥站
天门市	尹长元	天门市土肥站
安陆市	王记安	安陆市土肥站
赤壁市	姚忠清	赤壁市土肥站
内蒙古	郑海春, 郜翻身, 朴明姬, 李文彪	内蒙古土肥站
开鲁县	肖彦江	开鲁县农技中心
科左中旗	梅园雪	科左中旗农技中心
达茂旗	李凤英	达茂旗土肥站
察右中旗	赵润喜	察右中旗农技中心
黑龙江	董桂军	农垦总局农业局
八五二农场	王向平	八五二农场
八五二农场	惠振宝	八五二农场
七星农场	西 亮	七星农场
七星农场	聂 录	七星农场
八五〇农场	郑绪凯	八五〇农场
八五〇农场	裘 蜂	八五〇农场
七星泡农场	冯广林	七星泡农场
七星泡农场	霍庆民	七星泡农场
黑龙江省	胡瑞轩, 王国良, 付建和, 郭玉华, 张凤彬	黑龙江省土肥管理站
双城市	张文成	双城市农业技术推广中心
肇东市	邢东光	肇东市农业技术推广中心
五常市	于永贵	五常市农业技术推广中心
桦川县	刘君阁	桦川县农业技术推广中心
哈尔滨	顾思平	哈尔滨市农业技术推广中心
辽 宁	刑岩, 李金凤, 赵斌, 姜娟, 刘顺国	辽宁省土壤肥料工作站
开原市	郭淑鲜	开原市土肥站
辽中县	于奎武	辽中土肥站
昌图县	王雅雅	昌图土肥站
海城市	迟继胜	海城土肥站

三、从理论到实践：养分资源 综合管理的技术原理与创新

■ 针对现有的施肥技术难以协调作物高产与环境保护的尖锐矛盾这一重大问题，经过15年努力，①阐明了氮磷钾等养分的资源特征和环境来源养分的重要性，揭示了作物主动响应和活化利用根层养分的生物学机制，建立了以根层养分调控为核心的协调作物高产与环境保护的养分资源综合管理技术新途径。②创建了氮素实时监控技术，突破了根层氮素定量方法及其调控指标的技术瓶颈，实现了来自土壤、肥料和环境的根层氮素供应与高产作物的需求在数量上匹配、时间上同步、空间上耦合，保障高产作物需求并最大限度地减少养分向环境的排放。③创建了基于根层土壤测试和养分平衡的磷钾恒量监控技术，改变了过去忽视磷钾长期后效的做法，发挥了磷钾的生物有效性，并简化了管理。④建立了中微量元素因缺补缺、矫正施用的养分管理策略及其新指标体系。⑤抓住主要限制因子，将养分管理技术与高产栽培、水分管理等技术有机集成，建立了全国不同生态区小麦、玉米、水稻、蔬菜、果树等12种主要作物的养分资源综合管理技术体系，并简化为可操作的区域技术模式（图3-1）。

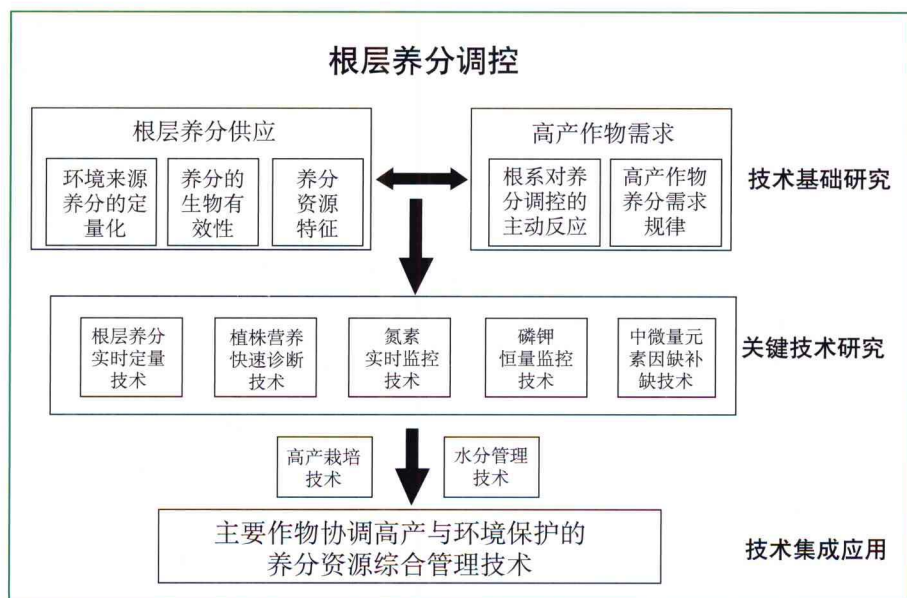


图 3-1 养分资源综合管理的技术原理与创新

1. 建立了以根层养分调控为核心，协调作物高产与环境保护的养分资源综合管理新途径

以往的施肥技术，将土壤-作物体系作为“黑箱”，无法针对根层养分过程进行实时调控，也就不能实现作物高产与环境保护的协调。我们突破不同养分管理策略、环境来源养分贡献和根系与根层养分供应之间的互馈过程3个关键环节，建立了以根层养分调控为核心的协调作物高产与环境保护的养分资源综合管理新途径。

(1)发现氮磷钾等养分具有不同的资源特征，必须采取不同的管理策略，改变过去那种对所有养分都采用同一管理模式的做法

以往的施肥技术对氮磷钾和中微量元素采用同一种管理策略，即使是国际上的精准农业也常常沿用这一技术思路，对土壤磷钾进行实时实地精确测定和管理。我们长期系统的研究发现，氮素具有来源广、转化快、时空变异大、损失途径多、环境影响显著等特征，必须进行精细的实时监控。而磷钾则相对稳定、易在根层土壤中累积；过去常常认为，磷钾在土壤中易被吸附固定而失去肥效，但我们及国内外的大量研究却表明，磷肥具有长期的、远远高出我们以前预期的累积利用率(40~50%)，钾也如此，这是因为作物根系可以通过其生理作用及根际过程使化学方法难以提取的难溶性磷转化为作物可以吸收利用的生物有效性磷，从而增加磷的后效、显著

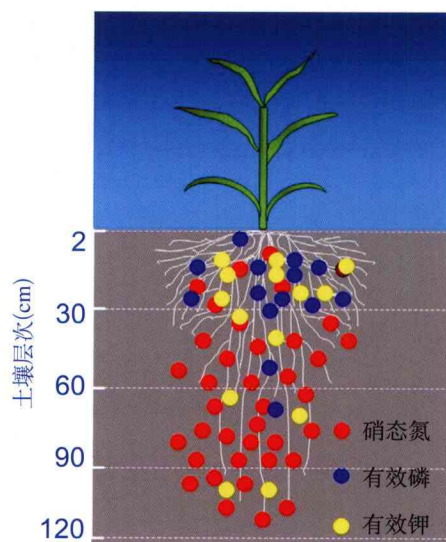


图 3-2 氮、磷、钾养分的垂直分布与根系分布的关系

提高磷肥的累积利用率(刘建玲等, 1999; Shen et al., 2004)，因此，磷钾管理就没有必要像氮素那样在每个作物生长季进行实时监控(图3-2)。中微量元素由于容易在根层土壤中积累，只要根系生长健康就可有效活化利用。如果土壤缺乏，就可通过施肥加以矫正，因此，宜采用因缺补缺、矫正施用的原则。

(2)发现集约化农区土壤和环境养分贡献很大，因此必须将土壤、肥料和环境养分资源统筹考虑

我们研究发现，近20多年来集约化农田土壤积累的养分和环境来源的养分数量越来越大。华北平原每年来自大气干湿沉降的氮素已经超过 80 kg/hm^2 (He et al., 2007)，部分集约化菜地来自灌溉水的氮素养分超过 100 kg/hm^2 ，接近蔬菜吸收量的 $1/3$ ；与此同时，由于连年过量施肥，土壤养分累积数量越来越大，如华北平原0~100cm土壤无机氮小麦-玉米轮作体系播前高达 $221 \sim 275 \text{ kg/hm}^2$ ，果园达

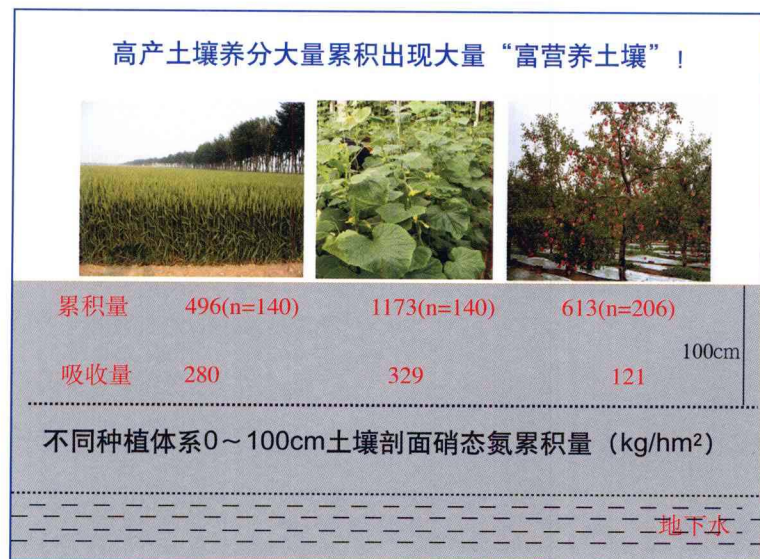


图 3-3 不同作物体系土壤氮素积累量

613 kg/hm², 大棚蔬菜更高达 1173 kg/hm² (Ju et al., 2006, 图 3-3), 如不很好加以利用, 不仅造成资源浪费, 也会对环境产生严重威胁。因此, 农田养分管理必须改变以往只重视肥料养分的做法, 将来自土壤、肥料和环境的养分资源统筹考虑。

(3) 揭示了根系与根层养分供应之间的互馈机制, 发现根层养分调控是保证作物高产、降低环境风险的关键

根系是植物生命活动“隐藏在地下的另一半”, 是作物吸收营养的门户。我们经过长期探索逐步揭示了根系与根层养分供应之间的互馈机制, 发现适宜的根层养分浓度能够促进根系的生长, 而根系的健康生长反过来又促进养分生物有效性的提高 (Tian et al., 2005; Chun et al., 2005), 因此, 通过根层养分调控发挥作物生物学潜力是提高养分

生物有效性的重要途径, 具有“四两拨千斤”的效果。传统施肥技术强调充分供应氮肥, 甚至要有盈余, 结果使土壤溶液中的氮素浓度普遍偏高, 往往高达 5~10 mmol/L 左右。我们的研究发现, 玉米根层氮素浓度适宜的水平为 0.5~1.0 mmol/L 左右 (Tian et al., 2005), 此时玉米根系发育最好, 扎根深, 侧根长 (Wang et al., 2004; 郭亚芬等,

2005), 吸收范围大, 土壤养分的生物有效性显著增加; 超过该浓度后, 多施的氮肥不仅不能被吸收, 反而会抑制侧根发育, 使根系吸收范围显著缩小, 氮素养分的生物有效性下降 (图 3-4)。因此, 根层养分调控是提高养分生物有效性, 保证作物高产、降低环境风险的关键。

(4) 建立了“以根层养分调控为核心”的养分资源综合管理技术新途径

经过长期探索和积累, 我们建立了以根层养分调控为核心的养分资源综合管理技术



图 3-4 玉米根系对氮素供应的反应

协调作物高产与环境保护的根层养分调控

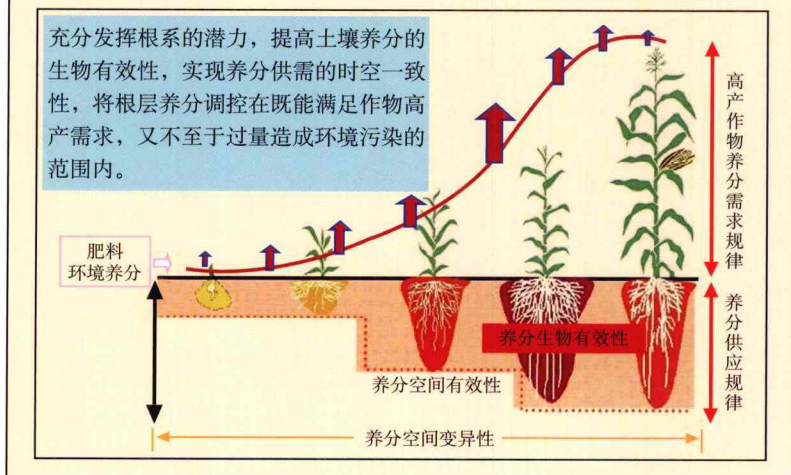


图 3-5 “以根层养分调控为核心”的养分资源综合管理新途径

新途径（图 3-5），其要点是：

- 将以往对整个土体土壤养分的管理调整为对作物根层养分供应的定向调控；
- 各种养分由于具有不同的生物有效性和时空变异特征，应采取不同的管理策略；
- 根层养分适宜供应范围的确定，既要考虑高产作物根系生长发育的特点、不同生育期养分需求和利用特征，还要充分挖掘、利用作物对根层养分的活化和竞争吸收能力，提高养分利用率并降低养分在转化和迁移过程中损失的强度；
- 实时定量根层来自土壤和环境的养分供应，明确高产作物关键时期适宜的根层养分供应范围，针对不同土壤和气候条件下养分的主要损失途径，确定肥料养分投入的数量、时期和方法；
- 养分管理必须与高产栽培、水分管理等技术有机集成，消除影响作物生长的障碍因素，发挥品种的增产潜力（张福锁等，2006）。

以根层养分调控为核心的养分资源综合管理技术新途径，强调作物生物学潜力的发挥，重视环境养分的贡献，通过对作物-土壤-环境系统养分过程的实时定量化调控，协调作物高产与环境保护，突破了过去以投入产出分析为手段、把土壤-作物系统视为“黑箱”的局限。14年来，我们一步一

个脚印验证和完善最初的设想，坚持不懈，最终摸索出这一新途径，并在技术上取得突破，在生产中得到应用。而国际上直到 2007 年，美国康奈尔大学 Drinkwater 和 Snapp 才在 *Advance in Agronomy* 上发表了第一篇类似思路的观点性文章。

2. 创建了氮素实时监控技术，实现根层氮素供应与作物氮素需求在数量上匹配、时间上同步和空间上耦合

无论是从经济、还是从作物高产与环境保护的角度出发，氮素管理都是养分管理的重点和难点。这不仅是因为氮肥占我国化肥总用量的 2/3、许多地区氮肥施用不合理，而且也是由氮具有来源广、转化快、损失途径多、环境影响大的特征所决定的。只有对根层氮素进行精确的实时监控，才能实现与作物需求的同步，最大限度地减少损失，而我

国一直沿用的土壤碱解氮测试方法被证明难以反映田间条件下土壤的供氮能力(朱兆良, 1992)。为此, 我们通过以下三个方面的突破, 创建了氮素实时监控技术, 并实现了该技术其从农田向区域的拓展。

(1) 创建根层土壤硝态氮快速测试方法, 突破了实时监控技术的方法“瓶颈”

我们发现, 旱地土壤硝态氮能实时反映根层氮素供应(陈新平等, 1997; 陈清等, 2003; Chen et al., 2004), 为了进行根层氮素的实时监控, 我们创新了根层土壤硝态氮的快速测定方法。该方法以田间现场采样分析为手段, 可在半小时内完成测试, 明显提高了测试的时效性, 与实验室常规的连续流动分析仪测定结果(0.01 mol/L CaCl_2 溶液以 1:10 土水比浸提)相比, 测定结果绝对相差小于 10 kg N/hm^2 (图 3-6), 完全符合实时监控技术要求(崔振岭等, 2005), 且分析费用低廉, 具有很好的推广应用前景。

(2) 全面更新了高产粮食作物和经济作物的氮素吸收利用参数, 明确了高产作

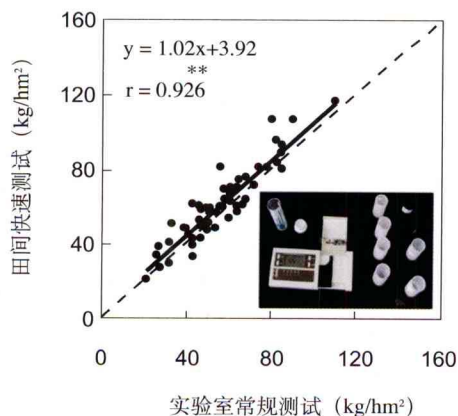


图 3-6 作物根层土壤硝态氮速测技术

物氮营养的显著特征是“中后期氮素需求显著增加”, 据此建立了根层土壤氮素供应指标, 为氮素实时监控提供了关键参数

传统施肥技术强调重施基肥, 基肥用量常占总施肥量的 50% 以上, 有些地方甚至采用 100% 作基肥的“一炮轰”策略。本项目实施 15 年来, 在不同作物上进行了 613 个大田试验, 深入系统地研究了高产粮食作物、蔬菜及其它经济作物等共计 89 个不同品种的养分吸收规律(周顺利等, 2000; 陈清等, 2002; 2003; 彭福田和姜远茂, 2006; 樊红柱和同延安, 2006; 李春俭等, 2006; 陈新平等, 2006)。研究发现, 与以往品种相比, 现代高产粮食作物品种中后期的养分需求显著增加, 因此必须重视生育中后期的养分调控。例如, 与老品种相比, 现代高产玉米品种后期保持强大的根系, 开花后吸氮量已经由 30% 上升到 40%, 而叶片氮素的输出率则由 50% 下降到 25%~30% (春亮等, 2005), 说明现代品种籽粒灌浆对后期氮素吸收的依赖性明显增强(图 3-7)。项目在很多经济作物上获取的养分吸收规律的一手数据, 改变了我国这方面资料缺乏的现状。依据这些结果, 我们建立了不同作物不同生育期根层养分供应指标, 为氮素实时监控技术提供了关键技术参数。

同时, 针对稻田土壤特征, 定期淹水和土壤有效氮测试方法的局限性, 与国际水稻研究所合作, 引进并建立了基于叶绿素仪 (SPAD) 和叶色卡 (LCC) 的植株氮营养诊断技术和指标体系, 建立了我国主要水稻生产区的叶色诊

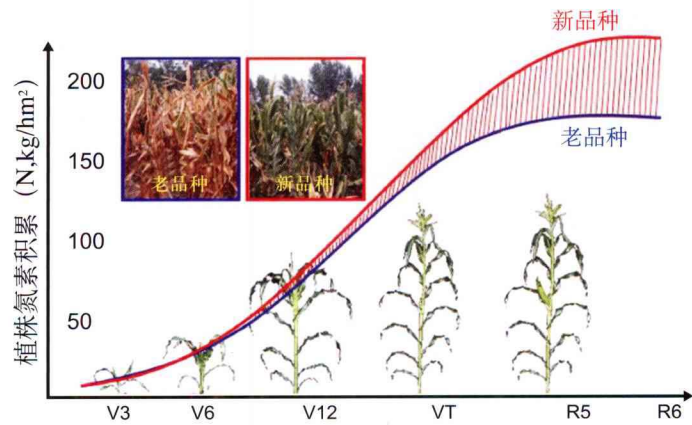


图 3-7 新老玉米品种的氮素需求规律比较

断值与推荐施氮量的关系（表 3-1），使水稻的氮素实时监控也得以实现。

（3）建立了植株硝酸盐快速诊断技术与指标，为氮素实时监控提供了有效的反馈调节手段，确保氮素实时监控准确到位

在创新根层土壤硝态氮快速测试技术的同时，项目引进了反射仪法快速测试植株汁液硝酸盐含量的方法，建立了植株硝酸盐快速诊断技术，开展了 300 多个田间试验，从采

样方法到诊断指标进行了一系列的技术创新：①在采样技术方面，通过大量的田间试验确定了 9 种作物的采样时间及采样部位，如小麦的采样测试部位为茎基部 1cm 样段，玉米为最新展开叶中脉的中段，较国际上采用玉米茎秆样品相比，采样更为简单，对作物的破坏性更低。②建立了我国 9 种主要旱地作物硝酸盐含量快速测试诊断指标（表 3-2；陈新平等，2006；黄生斌等，2002；陈清等，2006；

表 3-1 不同生态区水稻氮营养诊断及推荐施肥指标(kg/hm²)

种植类型	分蘖、孕穗期临界值与推荐量				灌浆期临界值与推荐量	
	SPAD	LCC	蘖肥	穗肥	临界值	粒肥
双季早稻	<35	<3.5	42	49	<37 (SPAD) 或<4 (LCC)	14
	35~37	3.5~4	35	42		
	>37	>4	28	35		
双季晚稻	<35	<3.5	49	49	<37 (SPAD) 或<4 (LCC)	14
	35~37	3.5~4	42	42		
	>37	>4	35	35		
南方单季稻	<35	<3.5	56	84	<37 (SPAD) 或<4 (LCC)	14
	35~37	3.5~4	45.5	70		
	>37	>4	35	56		
华北单季稻	<36	<3.5	77	77	<38 (SPAD) 或<5 (LCC)	14
	36~38	3.5~5	63	63		
	>38	>5	49	49		
东北单季稻	<38	<3.5	20	30	<40 (SPAD)	5
	38~40	3.5~4	15	20		
	>40	>4	10	10		

表 3-2 我国主要旱地作物植株硝酸盐快速诊断的采样测试部位与时期

作物	采样测试部位	采样测试时期	临界值(NO ₃ ⁻ , mg/L 汁液)
小麦	茎基部	拔节期	1300~1500
玉米	最新展开叶中脉	大喇叭口期	1000~1240
番茄	最新展开叶中脉	第一穗果膨大期	4500~5200
		第二穗果膨大期之后	3800~4500
黄瓜	最新展开叶中脉	初瓜期	3800~4500
大白菜	最新展开叶中脉	包心前期	2500~3000
棉花	蕾期	倒四叶叶柄	8000~9000
马铃薯	倒4叶叶柄	块茎形成期(出苗后20天)	6000~7000
	倒4叶叶柄	块茎增大期(出苗后45天)	4000~5000
啤酒大麦	茎基部	拔节期	1500~2000
烟草	最新展开叶脉基部	移栽后至打顶前	2000~3000

李春俭等, 2006; 张朝春等, 2005), 为氮素实时监控提供了有效的反馈调节手段。

基于上述 3 方面的突破, 我们创建了农田氮素实时监控技术(图 3-8)。其要点是: ① 根据高产作物不同生育阶段的氮素需求规律确定根层氮素供应指标; ② 采用创新的根层土壤硝态氮快速测试方法, 量化不同生育阶段来自土壤和环境的根层(深度随生育期逐渐变深)氮素供应, 不足的通过施肥予以

调控; ③ 在关键生育期进行植株氮营养诊断, 检验根层氮素调控是否准确到位, 为进一步改进氮素实时监控技术提供有效的反馈调节手段。

(4) 以农田氮素实时监控为核心, 发展氮肥“总量控制、分期调控”技术, 实现了氮素实时监控技术从田块到区域拓展及应用的综合化和简化

在实际应用中, 通过分析多年多点应用

氮素实时监控技术的试验示范结果, 摸清了区域内氮素供应的来源与数量, 进而确定作物生育期氮素供应总量; 依据不同生育阶段作物阶段氮素需求规律和土壤、环境养分阶段供应特征, 确定氮肥基追比例(图 3-9)。

我们在华北小麦 121 个田间试验研究中发现, 小麦季土壤和环境氮素的有效供应总量为 87 kg N/hm², 作

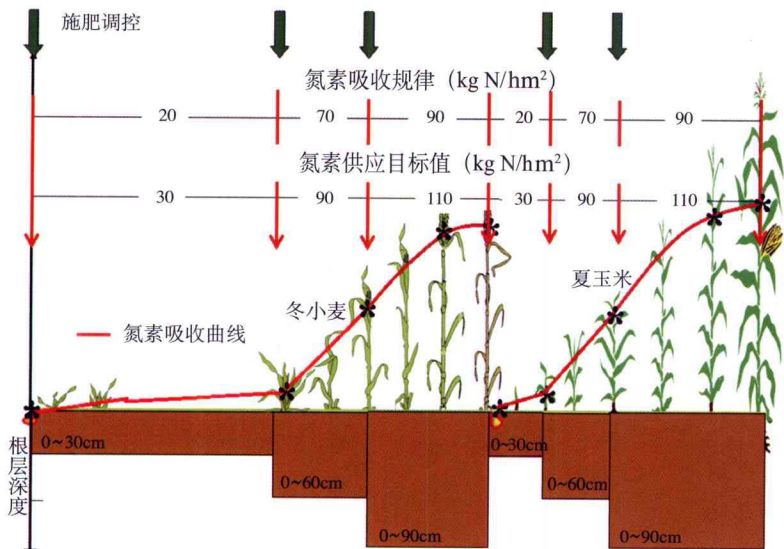


图 3-8 以根层养分调控为核心的农田氮素实时监控技术
(以小麦-玉米轮作为例)

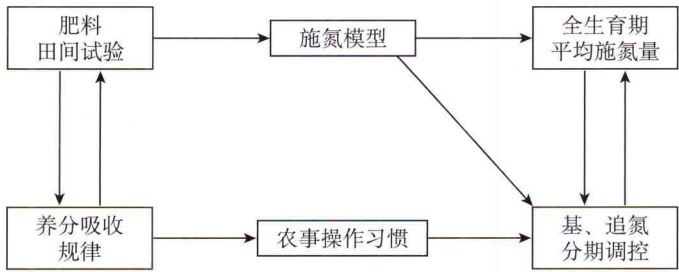


图 3-9 区域氮素总量控制、分期调控示意图

就可在维持或略有增加小麦产量的前提下,比农民传统管理节省氮肥60%,氮肥基追比调整为1:2.0,使氮肥在不同生育时期的分配比例与小麦的阶段性氮肥需求完全同步(表3-3)。

总之,氮素实时监控技术同步了

物氮素需求 174 kg N/hm²,氮肥总量控制在 131 kg N/hm²左右(氮素损失控制在43 kg N/hm²),

土壤、环境和肥料来源的氮素供应与作物的氮素需求,重点解决了高产作物不同生育期的供

表 3-3 华北冬小麦氮素实时监控技术与农民传统管理的氮肥用量比较(kg N/hm², n=121)

	产量水平	全生育期	播种-拔节	拔节-收获	基追比
冬小麦氮素吸收量		174	56	118	1:2.1
农民传统氮肥用量	6~7.5 t/hm ²	325	130	195	1:1.5
实时监控技术氮肥用量		131	44	87	1:2.0

氮问题,与国际上通用的土壤无机氮测试方法比较,氮素实时监控技术由于更好地实现了土壤、环境和肥料氮素供应与作物不同生育期的氮素需求在数量上的匹配、时间上的同步和空间上的耦合,因此具有更大的节氮潜力和更好的环境效应(Chen et al., 2006)。

3. 创建了磷钾恒量监控技术,实现了磷钾养分的简化管理与其生物有效性充分发挥的巧妙结合

国内已有的施肥技术中磷钾管理基本采用肥料效应函数法、土壤养分丰缺指标法或由肥料当季利用率决定的养分平衡法,没有考虑磷肥的累积效应,而国外的精准农业又过于强调对磷钾养分随时随地的精细测定与管理。我们通过20年长期定位试验和大量根际磷活化利用的基础研究发现,只有将根层磷钾长期维持在一个适宜水平上才能充分发

挥作物的生物学潜力,实现磷钾养分的高效利用。为此,我们重点解决以下几个关键问题,创建了磷钾恒量监控技术。

(1) 确定了主要作物根层有效磷、钾适宜范围,在满足作物高产需求的同时降低磷素积累的环境风险

保障持续高产稳产需要相对较高的土壤肥力,这是根层有效磷钾应达到的低限;土壤有效磷钾不应高到对环境造成风险或资源浪费,这是根层有效磷钾应控制的高限。依据上述原则,我们通过大量田间试验,建立(蔬菜)和修正(大田作物)了主要高产作物的根层土壤有效磷钾指标和土壤磷的环境风险指标(表3-4;张福锁等,2006)。

(2) 通过长期定位试验确定了以3~5年为一个周期来进行土壤磷钾监测,可大大降低测定频率,节省测试成本

由于根层磷钾不像氮素那样易于随水淋

表 3-4 主要作物土壤有效磷恒量监控指标(Olsen-P, mg/kg)

作物体系	研究地区	适宜根层浓度	环境风险浓度
小麦/玉米	华北	14~30	60
水稻	南方	10~20	30
蔬菜	华北	20~60	60
棉花	新疆	13~30	65
油菜	华中	16~25	40

洗或气态损失,为充分发挥作物利用土壤磷钾的生物学潜力,我们通过长期定位试验发现,在养分管理中不需要对土壤磷钾肥力进行单一生长季或每年的频繁监测,可以将3~5年作为一个周期来进行监测。这样可以降低测定频率66%~80%,节省大量的测试成本(王兴仁等,1995,李秋梅,2001)。

(3) 创建了以养分平衡为手段、以根层磷钾适宜范围为目标磷钾恒量监控简化 管理技术,比常规技术节肥20%~50%

我们通过长期定位试验发现,土壤有效磷钾的变化主要是由土壤-作物系统磷钾的收支平衡决定的(曹宁等,2007)。为了将根

层磷钾长期维持在一个适宜水平和发挥作物本身利用磷钾养分的生物学潜力,本项目依据根层养分监测结果,结合养分收支平衡,提出“提高”、“维持”或“控制”的管理策略及对应的施肥推荐,构建了磷钾恒量监控的简化
管理技术(表3-5,表3-6)。以山东省为例,61130个土壤测试样品中仅有27%的有效磷含量低于适宜水平(<14 mg P/kg),依据本项目建立的磷钾恒量监控技术,小麦-玉米轮作体系磷肥推荐用量平均为72 kg P₂O₅/hm²/yr,而依据单季作物肥料效应函数法的磷肥推荐用量平均为120 kg P₂O₅/hm²/yr,仅此一项,山东省年节省纯磷14.4万t。

表 3-5 华北平原冬小麦-夏玉米轮作体系磷肥恒量监控技术指标

肥力分级	土壤 Olsen-P (P, mg/kg)	目标产量 (t/hm ²)		磷肥推荐用量 (P ₂ O ₅ , kg/hm ²)		
		小麦	玉米	短期和中期		长期
				秸秆还田	秸秆不还田	
高	> 30		0	0		每3~5年对土壤速效磷进行监测,调整磷肥的施用量
中	14~30	6	6	80~90	100~115	
低	< 14	115~135	135~160			

注:2/3磷肥用在小麦季,1/3磷肥用在玉米季

表 3-6 华北平原冬小麦-夏玉米轮作体系钾肥恒量监控技术指标

肥力分级	土壤交换性钾 (K, mg/kg)	目标产量(t/hm ²)		钾肥推荐用量(K ₂ O, kg/hm ²)	
		小麦	玉米	短期和中期(秸秆还田)	
				短期和中期(秸秆还田)	长期
高	> 100			0	每3~5年对土壤交换性钾进行监测,调整钾肥的施用量
中	70~100	6	6	50	
低	< 70			100	

注:1/3钾肥用在小麦季,2/3钾肥用在玉米季

同时, 鉴于粮食作物秸秆中累积的钾往往占吸钾量的80%以上, 恒量监控技术特别强调秸秆还田在钾收支平衡中的重要作用, 克服了已往钾肥推荐难以实现土壤养分收支平衡, 造成土壤钾素肥力下降的问题。

本项目建立的磷钾恒量监控技术及指标体系, 在利用和提高养分生物有效性的基础上简化了管理, 可以使土壤磷、钾肥力既满足持续高产稳产的需求、又不对生态环境构成威胁这一新要求。

4. 建立了中微量元素因缺补缺、矫正施用的养分管理策略及其新指标体系

中微量元素具有典型的“木桶效应”, 缺则减产甚至绝产, 丰则贮于根层, 依赖作物的生物学潜力发挥而被活化利用。为此, 我们提出了在提高生物有效性的基础上, 中微量元素因缺补缺、矫正施用的养分管理策略, 并建立与更新了不同作物的中微量元素养分管理指标体系。

在长江流域油菜生产中普遍缺硼, 施用硼肥成了油菜获得高产的重要措施。由于作物品种和土壤养分状况等的变化, 20世纪80年代确立的土壤有效硼临界指标(0.5 mg/kg)已经不能准确指导当前的油菜生产。我们通过大量田间试验, 确定了目前生产条件下土

壤有效硼临界值为0.58 mg/kg (表3-7)。30个试验验证表明, 依据新的土壤有效硼临界值标准, 有80%左右的地块需要施硼, 施硼平均增产油菜籽428 kg/hm², 平均增产达28.0%。

在成都平原水旱轮作体系中我们发现, 当水田转为旱地时, 土壤易溶态锰、吸附态锰和碳酸盐态锰都会显著减少, 大大降低了土壤锰的生物有效性, 容易引起小麦和一些蔬菜作物缺锰, 项目组采取减少有效锰向土壤深层迁移、水稻秸秆还田保持土壤锰素肥力、利用扎根深活化锰能力强的作物品种和生育前期补施锰肥等措施, 有效地解决了作物缺锰问题(刘学军等, 1999; 吕世华, 2002; Lu et al., 2004)。

5. 抓住不同生态区作物高产高效的关键限制因子, 将养分管理技术与作物高产栽培、水分管理等技术综合集成, 建立了我国主要作物的养分资源综合管理技术体系, 实现了作物高产与环境保护的协调

在上述养分管理技术取得突破的基础上, 通过土肥、栽培、环境等多学科协作, 将养分管理技术与相应的高产栽培、水分管理等技术综合集成(图3-10), 主要包括:

①不同养分管理技术的有机集成。针对不同生态区养分管理关键问题, 对氮素实时

表 3-7 长江流域油菜土壤有效硼含量, 主要品种以及施用硼肥的临界值变化

时间	土壤有效硼含量(mg/kg)	主要品种	施用硼肥的临界值(mg/kg)
20世纪80年代	0.33	白菜型品种: 耐缺硼能力强	0.50
目前	0.44	甘蓝型品种: 对缺硼尤其敏感	0.58

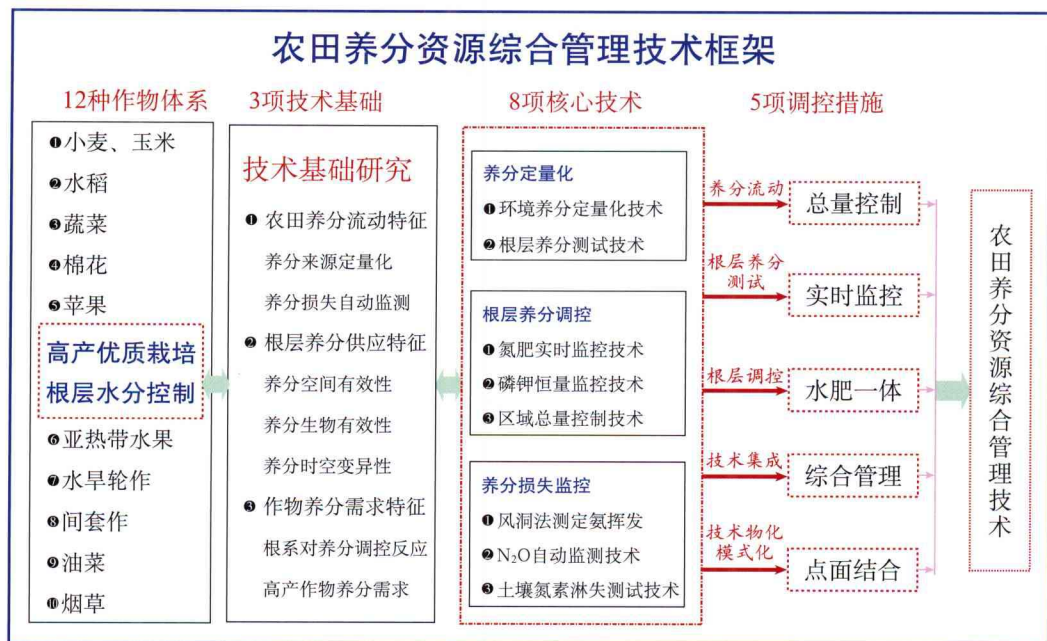


图 3-10 农田养分资源综合管理技术集成示意图

监控、磷钾恒量监控和中微量元素矫正施用等技术进行有重点的选择性集成。

②水肥管理技术的集成。水分管理直接影响根层养分迁移转化，控制水分才能有效地调控根层养分，增强养分与水分的协同效应。因此，养分资源综合管理技术将水分管理与养分管理技术进行了有机集成。

③养分管理与高产栽培技术的集成。作物栽培模式决定了作物的养分需求总量和阶段性需求特征，从而决定了根层土壤养分需要调控的强度，因此，本项目将养分管理技术与不同生态区主要作物的高产栽培技术进行了有机集成。

针对不同生态区制约作物高产和养分高效的关键问题，我们构建了小麦、玉米、水稻、油菜、蔬菜、果树等 12 种主要作物的养分资源综合管理技术体系（表 3-8），并进行大规模验证与应用。

在冬小麦-夏玉米轮作体系中，本项目将高产栽培技术、氮素实时监控技术、磷钾恒量监控技术和水肥一体化技术进行综合集成，通过大型（5hm²）、长期（8 年）和多学科综合定位研究发现，养分资源综合管理技术体系在该试验条件下节省氮、磷肥和灌水量分别为 75%、40% 和 28%，作物增产 3%，经济效益提高 86%，氨挥发、氧化亚氮排放和硝酸盐淋洗分别降低 77%、72% 和 100%，大气增温潜势降低 73%，达到了协调作物高产与环境保护（表 3-9）。

在蔬菜生产体系中，重点攻克了氮素实时监控与水肥一体化技术有效集成的难题。例如，在露地花椰菜-苋菜-菠菜轮作体系进行的连续 3 年的定位验证试验表明：养分资源综合管理技术减少施氮量 70%；灌溉量减少 391mm，节约水资源 31%，硝酸盐淋洗比传统处理减少 67%（表 3-10）。

表 3-8 建立的不同生态区主要作物养分资源综合管理技术体系

区域与作物	针对的主要问题	核心技术	集成的其它主要技术
华北平原小麦 - 玉米轮作	氮肥过量普遍, 底肥比重大	氮素实时监控技术	高产栽培技术 磷钾恒量监控技术 水肥一体化技术
东北地区春玉米	氮肥一次性施用普遍	氮素实时监控技术	增密高产栽培技术 磷钾恒量监控技术 中微量元素因缺补缺技术
四川丘陵区水旱轮作	养分不平衡 季节性缺水	氮肥总量控制技术 水稻地膜覆盖旱作栽培技术	磷钾恒量监控技术 水稻三围栽培技术 中微量元素因缺补缺技术
北方露地和保护地蔬菜	大水大肥	氮素实时监控技术 水肥一体化技术	磷钾恒量监控技术 高产栽培技术
南方水稻(江苏, 湖南, 湖北, 广东, 浙江)	氮肥施用过量普遍, 80% 的 N 用在水稻生长早期	氮肥总量控制和基于 SPAD 或 LCC 的营养诊断实时监控技术	高产栽培技术 磷钾恒量监控技术
北方水稻(黑龙江)	氮肥施用时期不合理, 忽视穗肥调控	氮肥总量控制和基于 SPAD 或 LCC 的营养诊断实时监控技术	高产栽培技术 磷钾恒量监控技术
长江流域油菜	养分不平衡, 以基肥为主; 硼缺乏比较普遍	氮肥总量控制、分期施用技术 磷钾恒量监控技术 硼肥矫正施用技术	轻简高产栽培技术 稻草覆盖与开沟
山东苹果	养分不平衡, 根系早衰	养分总量控制与分期调控技术 下垂果枝修剪技术	起垄覆盖 行间生草技术
新疆棉花	养分不平衡 重基轻追	氮素实时监控技术 磷钾恒量监控技术	地膜覆盖高产栽培技术 水肥一体化技术
烟草(云南、贵州、福建)	后期供氮过量导致烟碱含量高 过于依赖施用钾肥	氮素实时监控技术 生长调节剂和断根等技术提高钾的吸收转运	优质栽培技术
间套作(甘肃)	大水大肥	氮素实时监控技术 水肥一体化技术	磷钾恒量监控技术 高产栽培技术
热带亚热带果树	养分不平衡, 品质差	养分总量控制与分期调控技术	果枝修剪技术 行间生草技术

技术物化是适应我国农业和农民现状的一种有效的技术推广方式, 区域作物专用肥及其配套的施用技术是养分管理技术的一个物化集成。本项目以养分管理技术为指导, 利

用 GIS 等信息技术, 建立了区域性的作物专用肥研发技术。

以本项目在山东省黄河下游地区的小麦专用肥研发为例, 首先在本区域内进行

表 3-9 小麦-玉米轮作体系养分资源综合管理和传统管理的综合比较 (1999 - 2007)

	监测指标	养分资源综合管理	传统管理	增量 * (%)
资源消耗	氮肥用量(kg N/hm ² /yr)	147	600	-75
	灌水量 (mm/yr)	278	386	-28
	磷肥用量(kg P ₂ O ₅ /hm ² /yr)	135	225	-40
	钾肥用量(kg K ₂ O/hm ² /yr)	0	0	0
资源利用效率	氮肥利用率 (%)	50.2	14.7	241
	水分利用率 *(kg/hm ² a/mm)	96	77	25
生产力	产量 (t/hm ² /yr)	10.8	10.5	3
	经济效益 (元 /hm ² /yr)	7217	3890	86
环境效应	氨挥发损失 (kg N/hm ² /yr)	31	138	-77
	硝化 - 反硝化损失 (kg N/hm ² /yr)	2	9	-78
	硝酸盐淋洗 (kg N/hm ² /yr)	6	109	-94
	大气增温潜势 CO _{2eq} (kg N/hm ² /yr)	998	3730	-73

* 增量 = (养分资源综合管理 - 传统管理) / 传统管理 × 100%

表 3-10 露地花椰菜-苋菜-菠菜轮作养分资源综合管理和传统管理的综合比较 (1999 - 2002)

	监测指标	养分资源综合管理	传统管理	增量 * (%)
资源消耗	氮肥用量(kg N/hm ²)	643	2153	-70
	灌水量 (mm)	860	1251	-31
资源利用效率	水分利用率(kg/hm ² /mm)	213	149	43
	氮肥利用率 (%)	49	18	172
生产力	产量 (t/hm ²)	183.9	186.5	-1.4
环境效应	硝酸盐淋洗 * (kg N/hm ²)	402	1232	-67

* 增量 = (养分资源综合管理 - 传统管理) / 传统管理 × 100%

土壤测试,采用GIS等技术获得区域性的土壤养分图;其次,根据本地区的“氮肥总量控制+氮素实时监控确定的基追分配的技术模式”和区域作物目标产量水平,建立冬小麦氮肥基肥推荐数字化图,类似地建立以磷、钾恒量监控技术为基础建立冬小麦磷、钾肥推荐数字化图以及区域性的小麦专用肥配方数字化图(图3-11)等,研发了该地区小麦专用肥的适宜配方。通过配方调整,改变了农民原来氮素基肥投入过量的现状,将养分管理技术通过产品的研发

和生产来进行推广。

试验结果表明,无论是高产田块还是中产田块,与其它同类肥料相比,施用小麦专用肥可提高小麦产量10%~20%,有效地降低肥料用量,减少施肥成本,提高肥料效率,增加农民收入900~1050元/hm²(图3-12)。将养分管理技术通过产品“物化”,使其在推广中变得“简单化”,项目获作物专用肥国家发明专利1项(2004100376162)。目前已与大型化肥企业合作,进行了作物专用肥的生产与推广工作,有效地扩大了技术应用的力度。

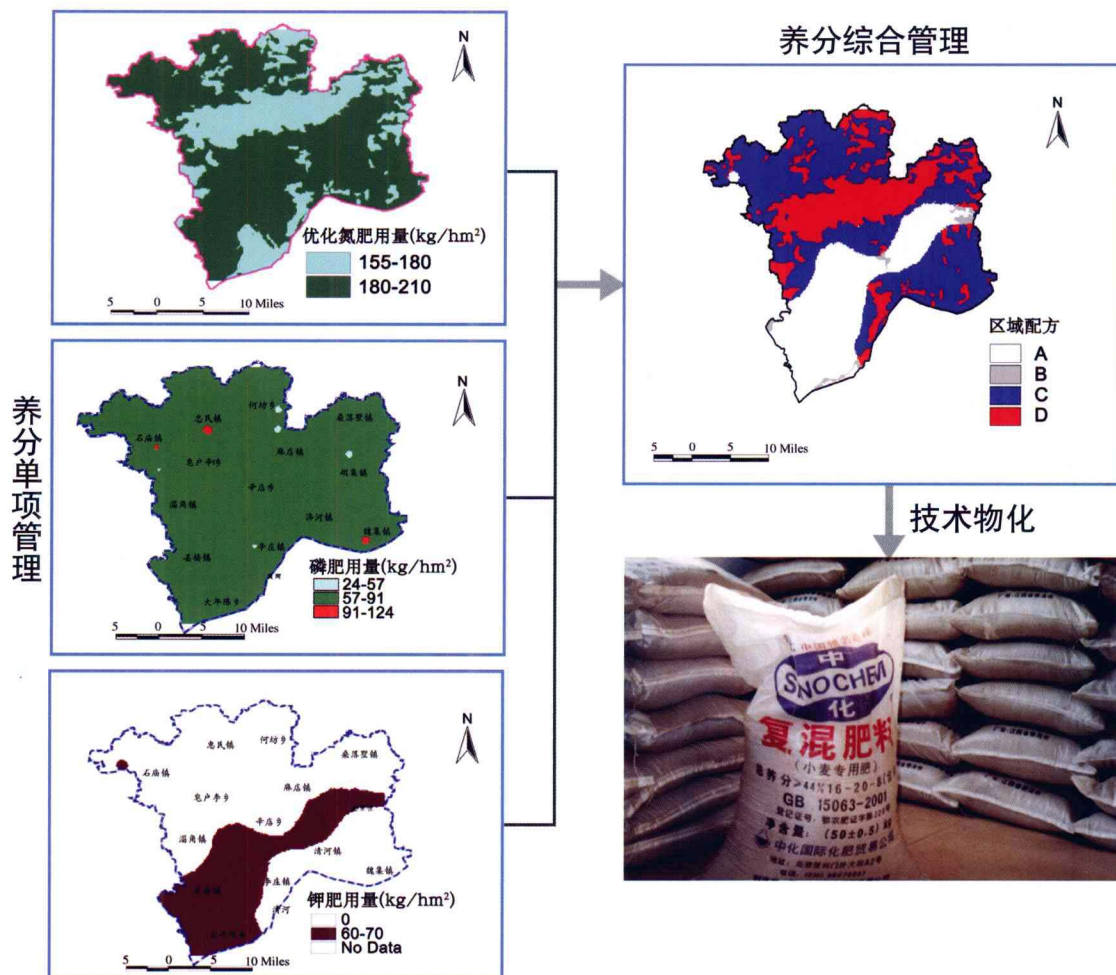


图 3-11 养分资源综合管理技术物化示意图



图 3-12 养分资源综合管理物化技术在小麦上的应用

6. 建立了整套全新的农田养分环境效应监测体系, 系统评价了养分资源综合管理技术长期的环境效应

为了综合评价养分资源综合管理技术的环境效应, 在长达 8 年的中德国际合作项目和农业部 948 项目的大力支持下, 我们引进建立了全新的环境效应监测体系, 有效地将最先进的氨挥发风洞法测定技术、 N_2O 原位连续自动监测技术、硝酸盐淋洗的原位树脂柱测定技术等综合一起, 系统评价证明养分资源综合管理技术确实能够大幅度降低养分向环境的排放数量 (表 3-11)。

7. 与当前国内外同类技术的比较

本项目所建立的以根层养分调控为核心的养分资源综合管理技术体系, 应对集约化农业作物高产与环境保护的综合目标, 与国内 20 世纪 80 年代中期建立的以施肥增产为

目的的配方施肥技术, 以及国际上以环境保护为优先目标的养分管理技术相比有很大的不同, 是针对我国农业生产实际的技术创新。具有以下鲜明的特点:

(1) 技术途径创新

与国内外常规养分管理技术相比, 我们发现集约化农田环境养分的输入量越来越大, 因此统筹管理土壤、肥料和环境不同来源的养分; 发现氮磷钾等养分具有不同的资源特征, 采取了不同的管理策略, 改变过去那种对所有养分都采用同一管理模式的做法; 发现根层养分调控是保障作物高产、降低环境风险的关键, 从过去“(肥料) 投入-(作物) 产出关系”的黑箱管理走向以根层养分为核心的、对土壤-作物-环境系统养分过程的实时量化调控, 充分发挥作物高效利用养分的生物学潜力, 使来自土壤、环境和肥料的根层养分供应与高产作物养分需求在数量上匹配、时间上同步、空间上耦合, 协调高产

表 3-11 不同作物中养分资源综合管理和传统管理的环境效应监测与评价

环境效应参数/作物	传统管理	养分资源综合管理	减少幅度(%)*	有关论文
氨挥发 (kg N/hm²)				
小麦	59	15	75	丁新泉, 2005
玉米	77	34	56	苏芳等, 2007
设施辣椒	11	7	36	Zhu <i>et al.</i> , 2005
N_2O 排放(g N/hm²)				
小麦	410	243	41	高志岭, 2004
玉米	1347	362	73	高志岭, 2004
设施番茄	5500	3400	38	He <i>et al.</i> , 2007
硝酸盐淋洗(kg N/hm²)				
小麦	96	22	77	赵荣芳, 2006
玉米	82	3	96	Zhao <i>et al.</i> , 2006
设施番茄	402	70	83	任 涛, 2007
设施辣椒	353	231	35	Zhu <i>et al.</i> , 2005

* 减少幅度 = (传统管理 - 养分资源综合管理) / 传统管理 × 100%

与环境保护目标。而国际上直到2007年,美国康奈尔大学 Drinkwater 和 Snapp 才发表了第一篇类似思路的观点性论文。

(2) 核心技术创新

氮素实时监控技术: 以往的氮肥管理技术重总量,对作物生育中后期的营养调控重视不够,也缺乏有效的调控技术。本项目建立的氮素实时监控技术,解决了总量控制和分期调控难以有机结合的技术难题,尤为重要是这一技术便于简化,有利于形成区域上简化、可操作的模式及广泛应用。其中,创新的土壤根层硝态氮快速测试技术与以往国内外定性或半定量的土壤速测方法相比,显著提高了测试的准确性;与实验室常规测试方法相比,大大提高了测试的时效性且分析费用低廉。项目引进、创新了我国主要旱地作物植株硝酸盐快速测试技术及诊断指标、水稻基于叶绿素仪和叶色卡的氮营养诊断指

标,都是适合我国国情的技术创新,可同时解决氮肥缺乏和氮肥过量的问题。

磷钾恒量监控技术: 欧美国家的农田磷钾管理已进入维持施肥阶段,而国内磷肥推荐基本采用肥料效应函数法或由肥料当季利用率决定的养分平衡法,并且推荐每年每个生长季都进行土壤测试,不仅工作量大,而且推荐施肥量往往过高。本项目建立的磷钾恒量监控技术及指标体系不但确定了我国主要作物协调作物高产与环境保护的根层有效磷钾的合理范围,还将土壤磷钾监测周期延长到3~5年,实现了磷钾养分的简化管理与发挥作物生物有效性潜力的有机结合,适应了使我国的土壤磷、钾肥力既满足持续稳定作物高产的需求、又不对生态环境构成威胁这一新要求,同时兼顾了“土壤培肥”与“维持施肥”两种不同情况。

(3) 技术集成创新

本项目与以往施肥技术不同的是,特别注重多学科综合和技术集成创新。项目从一开始就与栽培、土壤、植物营养等专家结合,近十年来主要技术创新都是多学科协作取得的。集成建立的基于根层养分调控的养分资源综合管理技术体系,实现了养分管理技术与高产栽培技术、水肥一体化技术等有机整合,这是国内外都需要努力的方向。

田块水平的养分资源综合管理技术

有效地解决了施肥不足和施肥过量两方面的问题

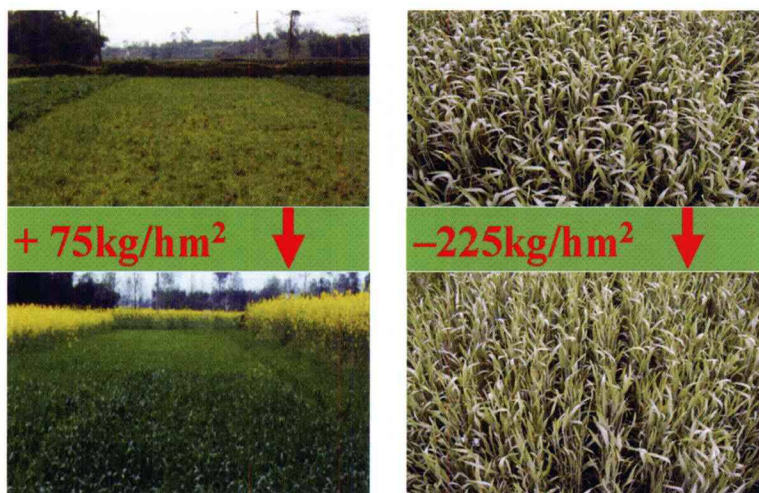


图 3-13 养分资源管理技术有效的解决了施肥不足和施肥过量的问题

(4) 主要技术经济指标分析

国内以往的养分管理技术主要通过增施肥料、平衡营养等,适用于中低产条件下进一步提高作物产量,而发达国家的养分管理

技术基本上在维持现有产量水平条件下,控制或降低肥料用量,保护环境。本技术可以同时解决施肥不足与施肥过量的生产问题,协调了作物高产与环境保护(表 3-12)。

表 3-12 本项目的总体科学技术水平、主要技术经济指标与当前国内外同类技术的比较

项目	本技术成果	国内同类技术	国际上同类技术
技术思路	· 给根施肥——根层养分调控 · 综合考虑各种养分资源 · 根据不同养分特征采取不同的管理策略	· 给土壤施肥,忽视根系对养分调控的主动反应 · 主要考虑肥料养分 · 往往采取同样的管理策略	
氮素管理	实现了总量控制与分期调控的实时定量化	一般只推荐总量	忽视生育后期的氮素调控
根层土壤硝态氮速测技术	测定绝对误差小于 10 kg N/hm ² , 可以在半小时内完成,分析费用低廉。	定性或半定量	实验室测试时效性差
磷钾恒量监控技术	3-5 年监测与简化管理,同时兼顾“土壤培肥”与“维持施肥”两种不同情况	生长季监测、磷肥推荐量高	维持施肥
技术集成	实现了养分管理技术与作物高产栽培技术和水分管理技术的有机集成	大多采用单项养分管理技术	
主要技术经济指标	作物增产 8%, 亩节本增效 110 元; 氮肥利用率提高 11 个百分点, 节氮 26%, 节磷 20%, 减少氮素损失 47%	施肥量大, 肥料利用率低, 环境风险大	在维持现有产量水平条件下, 控制或降低肥料用量, 保护环境

四、养分资源综合管理技术体系的应用与推广：成果展示

■ 在全国20个省市127个基地进行的1517个试验示范结果表明，养分资源综合管理技术在集约化生产条件下平均增产8%，节氮26%，节磷20%，提高氮肥利用率11个百分点，减少氮素损失47%。近三年累计推广面积454.33万hm²，增产193.6万t，增收节支34.9亿元。项目实施过程中形成了科研、教学、推广、企业等55个单位组成的土肥、栽培和环境等多学科结合的全国养分资源综合管理协作网，培养研究生82人，发表论文165篇，已出版专著10部，正在出版中的著作3部，出版中英文论文集4本，出版科普画册4部累计发行50万册，推动了学科发展和行业科技进步，为全国测土配方施肥等国家行动提供了有力的技术支持，为国际集约化农业协调作物高产与环境保护的发展道路探索提供了可行的途径。

项目本着“边研究边示范应用”的原则，在深入开展技术创新的同时，积极探索满足政府、科研人员、技术推广人员和农民不同层次需求的技术应用途径，既研发了一批适于科研人员应用的新思路、新方法和新手段，也建立了适合技术推广人员应用的测试方法和技术指标，还形成了适合农民直接应用的技术规程与图解（表4-1），同时还建立了科研、教学、推广、企业等55个单位的土肥、栽培和环境等多学科结合的全国养分资源综合管理协作网，促进了技术成果的普及和应用。

1. 建立技术推广部门、农民科技协会、肥料企业和教学科研部门等多渠道的技术推广模式

针对当前我国农业生产“技术转化率低，推广应用难”的局面，我们采用技术推广部门、农民科技协会、肥料企业和教学科研部门等多渠道的技术推广方法，取得显著的社会、经济和环境效益。

（1）利用农业技术推广部门的优势，开展大面积示范推广

项目实施单位中国农业大学和全国农业

表 4-1 养分资源综合管理的技术层次和其适用对象

技术层次	具体技术	适用对象
研究需求	氮素实时监控技术	科研人员
	磷钾恒量监控技术	
	中微量元素因缺补缺矫正施肥技术	
	大气沉降及其生物有效性定量监测技术	
	氨挥发风洞法测定技术	
	N ₂ O 田间原位自动监测技术	
示范推广	硝酸盐淋洗原位树脂柱测定技术	技术推广人员
	根层硝态氮快速测试技术及指标	
	植株硝酸盐快速诊断技术及指标	
	水稻基于 SPAD 和 LCC 的氮营养诊断技术及指标	
	磷钾恒量监控技术及其指标	
	中微量元素因缺补缺矫正施肥技术及其指标	
直接应用	不同作物养分资源综合管理技术体系	农民
	不同生态区主要作物养分资源综合管理技术规程	
	区域作物专用肥及配套施用技术	
	作物施肥图解	

技术推广服务中心共同组织具有良好工作条件的省、市、县农技推广部门,进行大面积的技术示范和推广。我们负责养分资源综合管理技术的建立与培训,与各级农业技术推广部门建立高效的合作机制,充分发挥农业技术推广主渠道的作用,在农业部“丰收计划”、“三节工程”等项目配合下,进行大面积的示范推广(图4-1)。

在总结区域养分资源特征和作物生产情况的基础上,我们组织队伍,对全国65种大田作物、蔬菜和果树养分资源综合管理技术进行了模式化和简单化(表4-2),图4-2是在黄淮海冬小麦和保护地番茄上形成的技术规程和施肥图解的例子。我们编写的大田作物、蔬菜和果树养分资源管理图谱,在全国发行50万册,大大扩展了养分资源综合管理技术的辐射范围。

为了加大示范推广的力度和范围,我们直接组织全国20个省市80个县的土肥站,每年进行2次养分资源综合管理的技术培训,制订各地主要作物的养分资源综合管理技术规程和详细的示范方案,补贴部分示范工作经费,使每县每年完成10个示范方(全国800个/年),通过技术培训、田间示范等多种手段,每县累积推广约2.7万hm²,开展了扎实的、大面积的示范推广工作(图4-3)。

(2) 与肥料企业合作,通过作物专用肥物化技术扩大推广面积

为了进一步加大养分资源综合管理技术示范、推广力度,我们与中化化肥公司等20多家肥料企业建立长期稳定的合作关系,以区域性作物养分资源综合管理技术模式为依据,通过作物专用肥研发-销售-服务等渠道实现



图4-1 技术推广现场 (左上为重庆水稻养分管理现场会; 右上为山东小麦养分资源管理技术田间培训; 左下为四川水旱轮作养分管理现场会; 右下为北京小麦追肥前现场测试 $\text{NO}_3\text{-N}$)

表 4-2 区域上模式化的养分资源综合管理技术

分类	区域与作物
大田作物(21 类)	黄淮海平原冬小麦, 长江流域冬小麦, 黄淮海夏播玉米, 东北春播玉米, 双季早稻, 双季晚稻, 南方单季稻, 华北单季稻, 东北单季稻, 小麦/玉米间作, 蚕豆/玉米间作, 大豆, 西北内陆棉花, 黄河流域棉花, 长江流域棉花, 油菜, 花生, 马铃薯, 甘薯, 甘蔗, 甜菜
蔬菜(25 类)	保护地黄瓜, 露地黄瓜, 保护地番茄, 露地番茄, 保护地茄子, 露地茄子, 保护地甜椒, 露地甜椒, 草莓, 白菜, 甘蓝, 花椰菜, 露地生菜, 保护地生菜, 菠菜, 萝卜, 胡萝卜, 芹菜, 大葱, 洋葱, 大蒜, 冬瓜, 西葫芦, 南瓜, 西瓜
果树(19 类)	苹果, 梨, 桃, 杏, 李, 樱桃, 猕猴桃, 板栗, 冬枣, 葡萄, 柑橘, 柿, 山楂, 香蕉, 荔枝, 龙眼, 菠萝, 芒果, 茶树

技术的物化和应用。累计研发、生产各种作物专用肥22个54万t, 直接应用面积83.33万hm²。图4-4为小麦/果蔬专用肥研发-产业化实例。

**(3) 以试验基地为中心, 项目组成员
直接开展技术示范与推广**

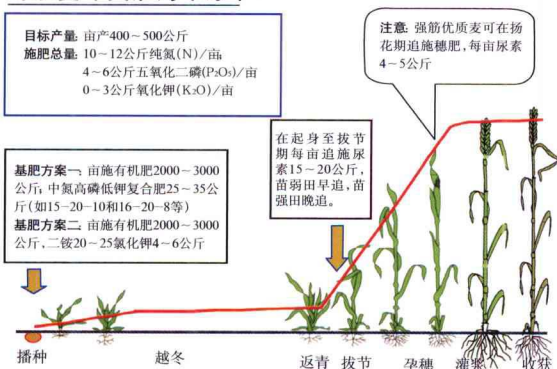
养分资源综合管理理念是全新的, 要农

民普遍接受还需要一个过程。我们通过田间地头的演示和大量建立示范区、召开现场会、举行“田间日”等活动, 向人们展示养分资源综合管理技术的应用效果。近年来, 我们组织全国20个省、市、区的300多名科技人员在全国建立试验示范基地127处, 开展农

黄淮海平原冬小麦生产技术规程

时 间	操 作 要 点
9月中下旬	准备优良品种：高肥水地块选用大、中型穗品种，如：淄麦12、鲁麦23改良系等；中肥水地块选用中型穗密植品种，如：济南17、滨麦3号等。
	播前灌水造墒：玉米收获前或收获后灌底墒水，足墒播种，保证一播全苗。尽量避免播后灌后，影响小麦冬前发育。
	整地施肥：有条件的地方在玉米收获时应实施秸秆机械粉碎还田，在亩施有机肥2000公斤的基础上，亩施中化“小麦专用肥”50斤（N、P ₂ O ₅ 、K ₂ O、ZnO分别为8、10、4、0.5斤/亩），若选用其它肥料可按以上养分用量配比混施。有机肥和化肥均匀撒于地表，及时深耕30厘米，耙耱平整，畦长控制在50米左右。
10月上旬	种子处理：精选种子，实行种衣剂包衣或药剂拌种，为防止蚜虫、蛴螬等地下害虫，播前选用40%甲基异柳磷或35%甲基硫环磷按种子量的0.1~0.2%拌种。为防苗期病害，用2%立克秀按种子量的0.15%拌种。
	播种：当地小麦最适播期为10.5~10.15、10.15、10.5播量为24斤，以后每晚播一天增加1斤种子，最大播量不超过每亩40斤，行距为18~20cm，播深为3~4cm，下种要均匀，播后及时镇压保墒。播种时墒情差或整地差的地块应适当提高下种量，播后土壤干旱出苗差的地块要及时灌出苗水，灌水后人工松土防止土壤板结。播种时要严把播种质量关，做到一播全苗。

冬小麦（黄淮海平原）



保护地番茄高产优质高效综合栽培技术规程

针对日光温室黄瓜生产中连作障碍严重问题，在不改变温室主要茬口生产黄瓜条件下，利用温室休闲期种植不同科属作物或间作，拟通过填闲、间作作物栽培，改善温室土壤营养条件和微生物组成。选取百合科、豆科、禾本科、速生叶菜等相关作物进行夏季填闲或与黄瓜间、套作，经过三年的试验研究，分析了土壤相关理化性状，调查了黄瓜的生长状况及产量，结果表明在温室夏季休闲期间种植一茬葱蒜或蒜等百合科蔬菜后有利于降低土壤病原菌，增加土壤生物多样性，利于土壤环境的修复及黄瓜产量的提高；夏季温室休闲期种植一茬甜玉米后相比休闲对照可明显降低土壤的养分积累，有利于延缓土壤盐渍化进程。

一. 技术原理

1. 轮作的好处

采用轮作的方式能很好地解决连作产生的一系列问题，表现在：

保护地冬春/秋冬茬番茄

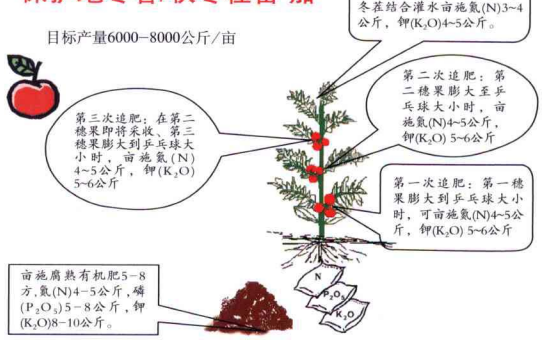


图4-2 作物养分资源综合管理技术规程与施肥图解实例
(左为黄淮海冬小麦，右为山东保护地冬春/秋冬茬番茄)



图4-3 养分资源综合管理技术研讨班



图 4-4 专用肥研发与产业化

户调查 48613 户，开展田间试验示范 1517 个（图 4-5）。以基地/示范区为阵地，通过组织农民参观、田间宣传、讲课等形式进行技术示范、推广。

我们也顺应潮流，组织创建多种农民科技协会，发挥民间组织的技术推广作用。例如

我们在四川简阳建立了生态农业科技产业化协会，通过农户+专家+县乡农技推广人员+村社技术人员的组织形式，以宣传教育、技术服务、产品流通、农资供应为手段，开展技术推广应用工作，使养分资源综合管理技术得到大面积推广应用，推动了当地农业产业化

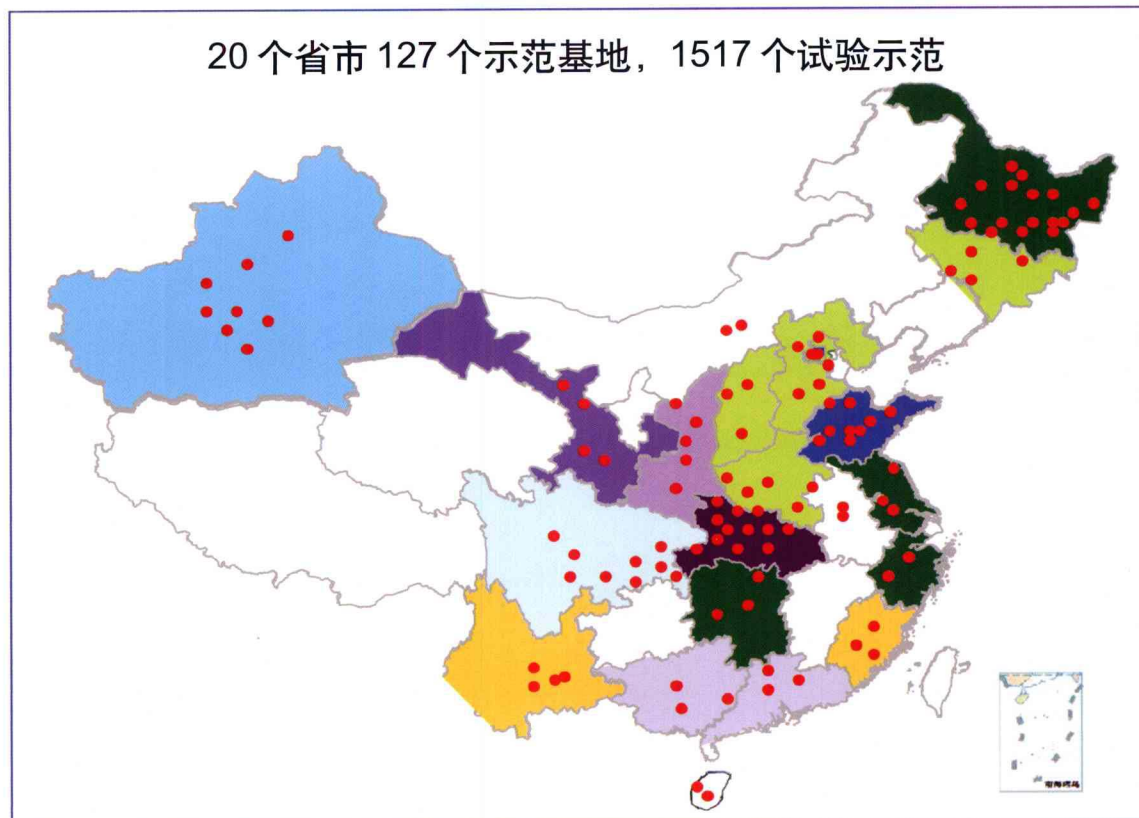


图 4-5 全国 20 个省市 127 个示范基地，1517 个试验示范分布示意图



图 4-6 农民科技协会工作图示（左上图为专家给农民培训；右上图为科技协会年终表彰大会；左下图为科技协会田间成果展示；右下图为应用养分资源管理技术农民喜获丰收）

的发展,取得了非常好的效果(图4-6)。总结组建农民科技协会的经验,我们认识到,这种针对农民和农村实际的推广模式实现了“四位一体”,促进了资源的优化配置和充分利用,做到了大多数农民脱贫和共同发展,具有成本低、效率高的特点;同时,这种模式能有效地解决农技推广“最后一公里”和“农民素质低下、分散”两大制约农村发展的问题,确保在推广过程中不会拉大农民内部的贫富差距,是推广公共技术的有效模式;最后,在农村劳动力转移加剧、留守农民素质无法快速提高、政府农技推广体系不能短期内彻底改革的情况下,我们探索的“科研、教学团队(专家库)+农业信息化+协会(基层农技部门、村社能人、农民)”的模式,是新时期中

国特色农技推广的新尝试。

2. 主要技术经济指标

(1) 全国试验示范中取得的主要经济指标

在我国北方地区冬小麦-夏玉米轮作体系中示范的结果表明,与农民传统管理相比,养分资源综合管理增加小麦单产5%~8%,玉米单产6%~10%,同时,小麦季节氮30%~70%,玉米季节氮20%~50%(Chen, 2003; 崔振岭, 2005)。在华北平原小麦-玉米轮作体系中,农民传统管理作物收获后土壤残留硝态氮含量在218~650 kg N/hm²之间,平均高达362 kg N/hm²(156个试验示范小区的平均值),对环境造成了严重的威胁。养分资源综合管

理技术将作物收获后0~90cm土层硝态氮含量控制在33~175 kg N/hm²之间,平均125 kg N/hm²,接近了欧盟对大田作物收获后0~90cm土层硝态氮的限制标准(100 kg N/hm²)。养分资源综合管理技术将氮素损失控制在35~40 kg N/hm²之间,比农民传统管理相比,小麦、玉米季氮素损失分别下降50%~70%和35%~50%(Chen, 2003; 崔振岭, 2005)(图4-7)。

在我国水稻主产区80多个点的田间试验示范结果表明,采用养分资源综合管理技术后,较农民习惯管理术增加水稻籽粒产量8%~14%,降低氮肥用量20%~45%;南方稻

田一季氮素损失量由农民传统管理的81 kg/hm²下降到35 kg/hm²;北方稻田一季氮素损失量由54 kg/hm²下降到23 kg/hm²(Liu et al., 2005; Fan et al., 2005)。从全国平均来看,养分资源综合管理技术能将水稻生育内的氮素损失较传统管理降低30%~45%。图4-8为水稻养分资源综合管理技术在黑龙江庆安的田间施用效果。

在四川省42个县(市、区)试验结果表明,与农民习惯管理相比,应用养分资源综合管理技术可使水稻季增产100~180 kg/亩,油菜季增产25~60 kg/亩,通过油菜/马铃薯套作增种了一季作物,马铃薯产量可达

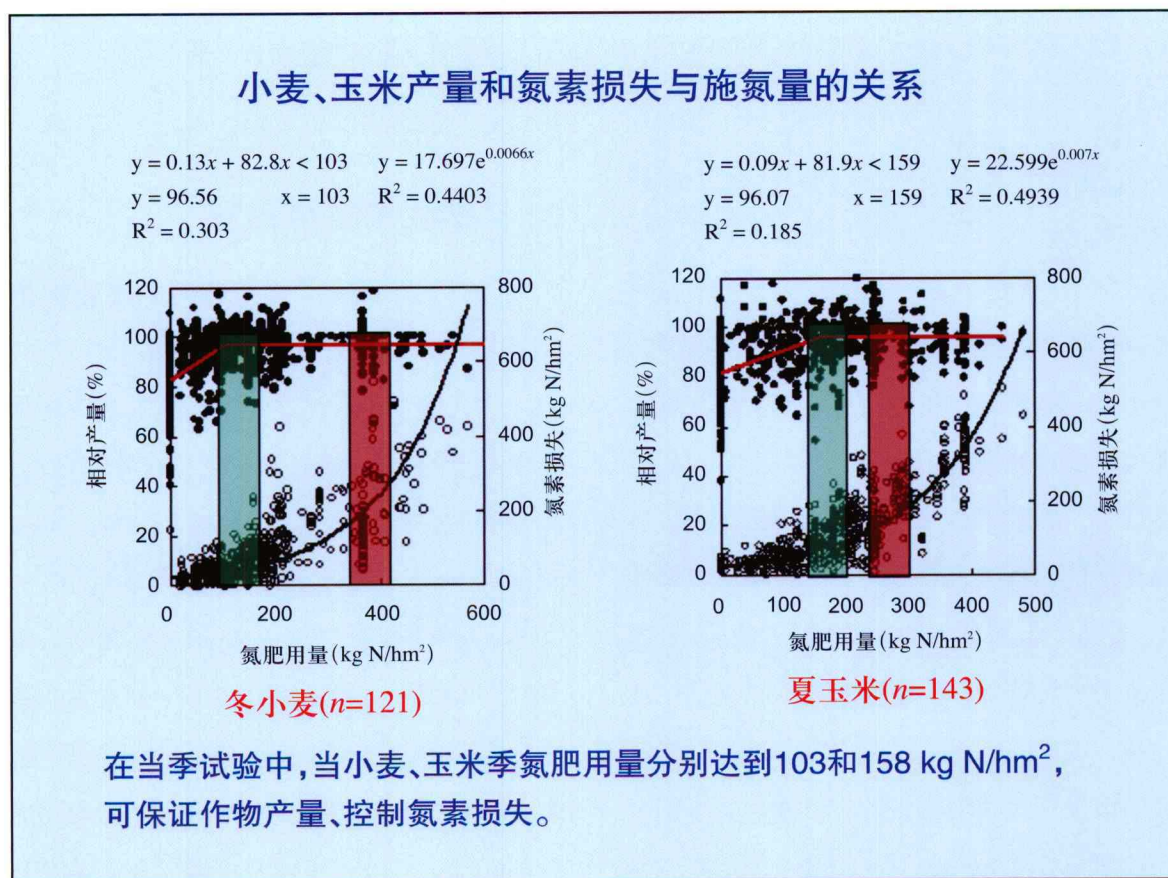


图4-7 小麦、玉米产量和氮素损失与施氮量的关系

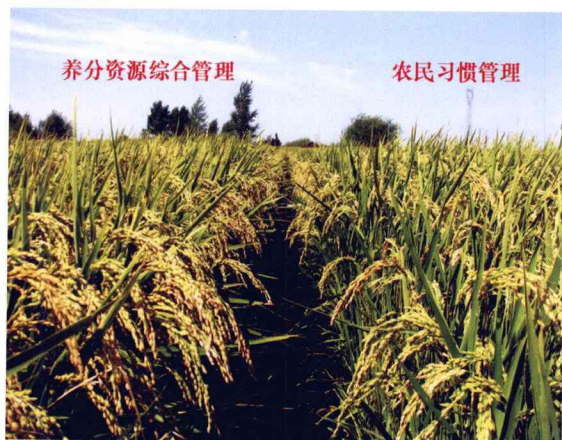


图 4-8 养分资源综合管理技术在黑龙江庆安应用效果 (平均节肥 38%, 增产 11%)



图 4-9 养分资源综合管理技术在四川水旱轮作体系中的应用效果
(左图为油菜套作马铃薯, 右图为水稻养分资源管理效果)

10%; 减少病虫害的发生, 红点病和黑点病减轻 20%~50%, 取得明显经济效益 (图 4-10)。

在北京市对大白菜、甘蓝、花椰菜、菠菜、芹菜、黄瓜、番茄、生菜、茄子等主要蔬菜作物进行了 121 个点的养分管理试验示范结果表明, 与农民常规管理相比, 应用养分资源综合管理技术平均增加蔬菜产量 3.66~4.96 t/hm², 降低氮肥用量 151~183 kg N/hm², 增加农民收入 1785~4335 元/hm² (表 4-3, Chen et al., 2005; 张宏彦,

2004; 张晓晟, 2002)。在山东省的保护地生产体系中, 农民的氮肥施用量为 400~830 kg



图 4-10 养分资源综合管理技术在苹果应用效果

表 4-3 1998—2005 年北京市 121 个蔬菜试验示范中推荐施肥技术的效果

蔬菜种类	平均增产量(t/hm ²)	增产 %	平均节氮量 (kg N/hm ²)	节氮 %	增收(元 /hm ²)
露地果菜类	3.69	6.8	151	19.0	3330
露地叶菜类	4.96	7.9	155	27.7	1785
保护地果菜类	3.66	6.4	183	21.0	4335
平均	4.1	7.0	163	22.6	3150

N/hm² (平均为 591 kg N/hm²)，而养分资源综合管理氮肥投入仅需 127~341 kg N/hm² (平均为 213 kg N/hm²)，较农民习惯节氮 64%，而番茄产量水平与农民习惯施肥相同 (82 t/hm²) (汤丽玲等，2005)。

养分资源综合管理技术在湖北省油菜主产区对比示范田的结果表明，除 6 个示范增产率小于 5% 外，81% 的应用示范技术区有明显增产效果。应用养分资源综合管理技术比习惯施肥增收油菜籽 7~57 kg/亩，平均增收油菜籽 23 kg/亩，增产幅度为 5%~56%，平均为 24%；同时，应用养分资源综合管理技术的油菜籽含油量提高 1~3 个百分点，取得了明显的经济和社会效益 (图 4-11)。

全国 20 个省市 12 种作物体系 127 个基地进行的 1517 试验示范结果表明，养分资源综

合管理技术同时解决了施肥不足和施肥过量问题，在集约化生产条件下，养分资源综合管理技术在增加作物产量的同时，提高养分效率，节约化肥，显著降低施肥造成的环境压力。总体加权平均，应用本项技术可使作物增产 8%，亩节本增效 110 元；提高氮肥利用率 11 个百分点，节氮 26%，节磷 20%，减少氮素损失 47%，实现了作物高产与环境保护的协调 (表 4-4)。

(2) 全国大面积示范推广的主要经济指标

自 20 世纪 90 年代末以来，养分资源综合管理技术成果在北京、山东、河北、河南等省(市、自治区)小麦、玉米、蔬菜、水稻、棉花、烟草等我国集约化农业生产体系中得到广泛应用。在全国主要作物体系下示范推广



图 4-11 养分资源技术在湖北油菜应用效果

表 4-4 养分资源综合管理技术试验示范经济和环境技术指标 (注: 括号内数字为变幅范围)

作物	地区	试验 示范 数	经济指标		环境指标			
			增产(%)	节本增效 (元/亩)	节氮(%)	节磷(%)	提高氮肥利用 率(百分点)	降低氮 素损失(%)
小麦	华北	126	7 (3~10)	45 (30~70)	40 (35~50)	26 (20~35)	11 (8~16)	50 (40~60)
	西北	42	11 (7~15)	65 (40~80)	8 (-20~30)	-	14 (10~16)	5 (0~18)
玉米	华北	151	8 (5~10)	50 (30~85)	32 (10~50)	20 (10~30)	9 (6~16)	40 (30~60)
	西北	65	12 (7~16)	60 (40~100)	5 (-20~25)	-	11 (8~16)	5 (0~10)
	东北	57	6 (3~9)	45 (30~80)	8 (-12~16)	-	12 (9~15)	-
水稻	南方	366	9 (5~11)	85 (50~119)	25 (-10~32)	-	12 (10~14)	-
蔬菜	华北	253	4 (0~8)	200 (120~349)	40 (30~50)	40 (20~65)	13 (8~18)	70 (60~90)
棉花	新疆	17	7 (3~10)	84 (60~110)	40 (-10~60)	-	11 (6~16)	-
苹果	山东	36	13 (8~20)	510 (460~539)	30 (-10~50)	35 (-5~50)	12 (6~18)	-
油菜	湖南	239	12 (5~22)	85 (30~114)	8 (-20~30)	7 (-25~35)	9 (6~11)	-
水旱 轮作	四川	48	14 (8~20)	220 (200~349)	35 (-30~50)	-	11 (5~20)	38 (25~48)
间套 作	甘肃	29	8 (5~14)	100 (80~120)	35 (-20~50)	-	13 (10~16)	-
烟草	西北	88	5 (0~10)	100 (80~120)	40 (30~50)	-	11 (6~16)	45 (20~50)
平均		1517	8	110	26	20	11	47

效果表明: ① 该技术示范推广面积增长速度
快,近3年的示范推广面积分别为101.2万hm²,
142.4万hm²和210.73万hm²,年增长率44%;
②增产、增收效果显著,应用该技术全国亩均
增加作物产量28kg,增加农民收入52元/亩;
③环境效益逐渐显现,该技术在我国主要作

物体系中节氮26%,节磷20%,减少氮素损
失47%,提高氮肥利用率11个百分点。近3
年来(2005—2007),养分资源综合管理技术
累计推广应用454.33万hm²,增加作物产量
193.6万t,增收节支35.4亿元,实现了作物高
产与环境保护的协调。

3. 社会效益及其对行业与学科发展的推动作用

近年来,养分资源综合管理技术共培养博士研究生 34 名,硕士研究生 48 名,发表中文核心期刊论文 120 篇,英文论文 45 篇,已出版著作 10 部(图 4-12),正在出版中的著作 3 部,

出版科普画册 4 部(图 4-13),中英文论文集 4 本(图 4-14),获国家发明专利 3 项(图 4-15)。

通过项目实施,取得了显著的社会效益。

(1) 实现了技术跨越,推动了学科发展和养分管理的技术进步

本成果使我国养分管理技术由传统的



图 4-12 已出版养分资源综合管理系列丛书 10 部

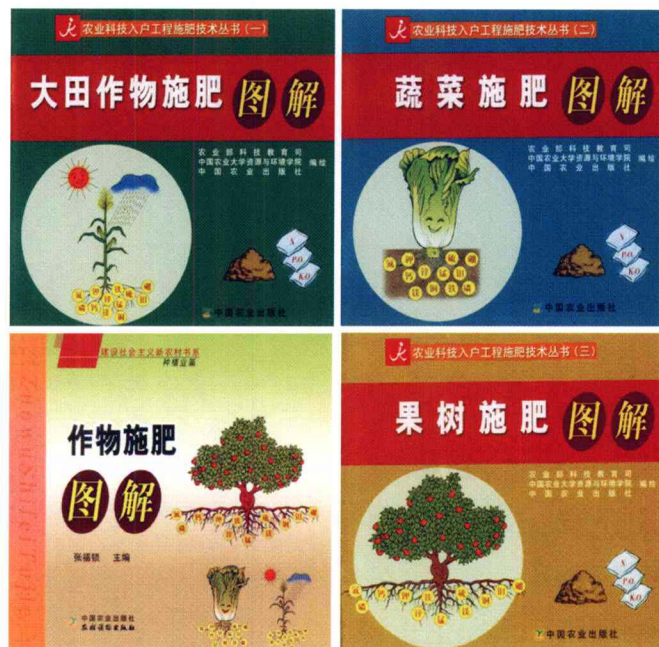


图 4-13 已出版作物施肥画册系列 4 部

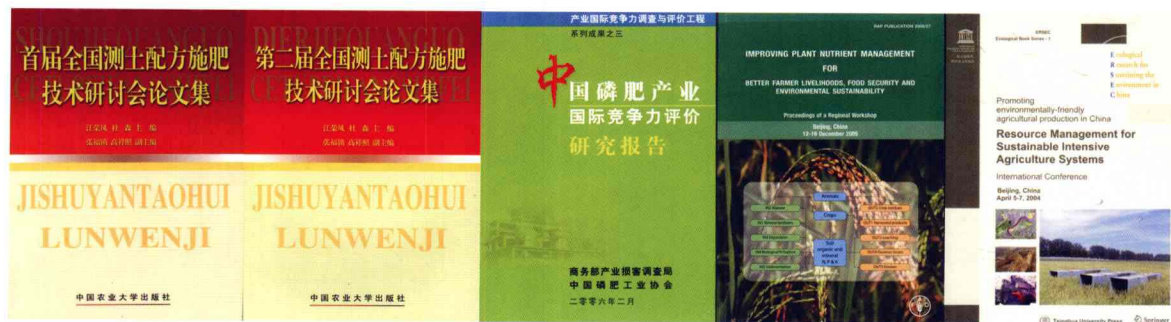


图 4-14 出版的论文集和专题报告



图 4-15 已申请发明专利 3 项

“投入-产出”黑箱分析提升到对土壤-作物-环境系统养分过程量化调控的水平，使植物营养学科发展到理论与生产实际紧密结合，基础研究与国民经济主战场应用融为一体，为解决高投入集约化农业高产与环境保护的尖锐矛盾提供了切实可行的途径与技术。我们不但通过许多“集团作战式”的试验研究提出了大量可行的养分资源综合管理技术并得到示范推广，取得了巨大的社会效益，而且有效地组织了频繁的“狂轰烂炸”式的学术讨论（图4-16），使我们对养分资源综合管理理论和技术有了更深刻的认识，促进了学科发展。养分资源管理技术的开展推动了全国第一个植物营养学科的建立与发展，使之 2001 年成为全国重点学科，2007 年被评为全国农业资

源利用学科第一名。项目主持人也被选为国际植物营养委员会主席，2005 年主持召开了第十五届国际植物营养学大会，这是 60 年来国际植物营养委员会第一次在发展中国家召开这一盛会。

(2) 实现了观念更新，从根本上改变了“重施基肥”、“高产就必须多施肥”的传统观念，控制总量、降低基肥、调控追肥的理念与技术被广泛接受与应用

通过 15 年来项目的实施，特别是与国内土壤肥料界及各级农技推广部门通力合作，逐步改变了科研人员、领导干部、技术推广人员和农民“重施基肥”、“创高产必须依靠多施肥”的观念，在注重施肥的增产效应的同时，关注肥料的环境效应已经成为从专家到社会的共识。在项目执行期间，多次配合中央和地



图 4-16 养分资源综合管理学术研讨

方电视、广播进行科学施肥知识的讲座和宣传,开辟农业广场讲座150场,大学生科技下乡小分队307支3938人次(图4-17),接受农民电话咨询6万人次,填写问卷15000多份;发放各类图书期刊12000余册、农业科技光盘3000多张、自编宣传小册子10000多份,多种形式普及养分管理知识(图4-18)。

(3) 为国家“测土配方施肥”、“沃土工程”等农业重大行动在全国范围内的实施提供了有力的技术支持

20多年来由于投入增加,作物品种、土壤肥力等发生了很大变化,原有的土壤养分丰缺指标和推荐施肥指标等已不能适应目前生产的需要。另外,随着种植业结构的调整,蔬菜等经济作物面积不断扩大,而在本项目实施前,我国蔬菜等经济作物的推荐施肥技

术极为缺乏。本项目适逢其时地为当前在全国范围内实施的测土配方施肥工作提供了最有力的技术支持(图4-19)。项目主持人被农业部聘请为全国测土配方施肥专家组组长,本项目有4位成员是部专家组成员,负责这一重大项目的技术把关和指导工作。

养分资源综合管理工作也得到党和国家领导人的亲切关怀。过去几年来,先后有党和国家领导人吴邦国委员长、姜春云副总理、回良玉副总理及国家有关部委十多位部长、副部长到中国农业大学资源与环境学院视察工作,回良玉副总理还出席由中国农业大学植物营养系组织主办的“第十五届国际植物营养大会”,并致辞和会见参加大会的部分科学家。此间,养分资源综合管理项目主持人张福锁教授分别向两位副总理和吴邦国委员长等汇报了有关工



图 4-17 丰富多彩的社会实践活动



图 4-18 养分资源综合管理技术推荐手册

作, 得到了重视和好评 (图 4-20)。

(4) 推动了复合肥料产业常规技术的升级

养分资源管理项目的实施全面引导了我国复合肥产业以农业需求为目标进行产品研发和农化服务, 推动了复合肥料产业常规技术的升级, 提高了肥料企业服务农业的能力。项目组



图 4-19 测土配方施肥专家组会议 (左) 与全国技术研讨会 (右)



图 4-20 国家领导人视察养分资源综合管理技术进展
(左上图为国家副总理回良玉视察, 右上图为原国家副总理姜春云视察; 下图为人大委员长吴邦国视察)

与国内多家肥料企业合作,开展“以培养服务三农,贯彻养分资源综合管理思想、熟悉化肥产业生产、营销和施用各环节的企业技术骨干为核心”的培训、田间示范、产业讲座等工作,并与中化化肥、中阿化肥等大型企业以成立研发中心、博士后流动站等方式开展工作,引领复合肥料产业服务农业、健康发展(图4-21)。

2003年,我们建立了全国养分资源管理协作网,设立专门网站(网址: <http://www.cnnm.com.cn> /, 图4-22)用于信息发布、各种项目进展和成果介绍、知识普及、产品推介等。据不完全统计,协作网建立之初,就有49个单位(31个国内单位和18个国际单位),130多位专家参与该协作网。协作网会员可以免费浏览网页、下载各种资料、数据,也可以发布消息。同时,利用中化化肥农大研发中心这一平台,建设中化化肥农化服务网,提供各种免费服务和咨询。

cnm. com.cn /, 图4-22)用于信息发布、各种项目进展和成果介绍、知识普及、产品推介等。据不完全统计,协作网建立之初,就有49个单位(31个国内单位和18个国际单位),130多位专家参与该协作网。协作网会员可以免费浏览网页、下载各种资料、数据,也可以发布消息。同时,利用中化化肥农大研发中心这一平台,建设中化化肥农化服务网,提供各种免费服务和咨询。



图4-21 养分资源管理技术在我国肥料行业中发挥作用



图4-22 养分资源综合管理协作网和中化化肥农化服务网

始建于2003年的养分资源综合管理协作网成员

国内合作者

全国农业技术推广服务中心	高祥照, 杜 森, 马常宝
河北农业大学	马文奇, 黄亚群, 魏 静
西北农林科技大学	同延安, 张树兰, 梁东丽, 李生秀, 王朝辉, 张林森, 韩明玉
山西农科院	张 强, 陈明昌, 杨治平, 赵德芳
山东农业大学	姜远茂, 束怀瑞, 董树亭, 叶优良
河南农业大学	叶优良, 郭天财, 朱云集
河南农科院土肥所	宝德俊, 王绍中, 黄绍敏, 寇长林
吉林农业大学	高 强, 黄立华
湖南农业大学	邹应斌, 冯跃华, 敖合军, 唐启源
浙江大学	王光火, 吴良欢
扬州大学	杨建昌, 凌启鸿, 戴其根, 张洪程
广东农科院水稻所	钟旭华, 黄农荣, 黄 庆, 欧杰文
华中农业大学	鲁建巍, 黄见良, 崔克辉, 王 强
新疆农科院土肥所	张 炎, 马兴旺, 白灯莎, 李雪源, 田立文
石河子大学	危常州, 侯振安, 李俊华
中国科学院新疆生态地理所	田长彦, 吕昭智, 胡明芳
北京市土肥站	廖 洪, 贾小红, 贺建德, 吴文强
甘肃省农科院	郭天文, 孙建好, 马忠明, 包兴国
云南省农科院资源与环境研究所	洪丽芳, 段宗颜, 肖炎波, 付丽波
云南农业大学	郑 毅, 汤 利, 赵正雄
四川农科院土肥所	吕世华, 曾祥忠, 樊红柱
西南大学	石孝均, 刘宏斌, 牛君仿
中化化肥有限公司	杜克平, 沈 奇, 夏 江, 孙爱文
中国-阿拉伯化肥有限公司	沈 兵, 武四海
中国农科院农业资源与区划研究所	赵秉强, 李燕婷
东北农业大学	刘元英, 彭显龙, 罗盛国

广西大学

华南农业大学

中科院南京土壤研究所

内蒙古农业大学

南京农业大学

薛进军

樊小林, 张承林, 严小龙

施卫明, 尹斌, 王德健

樊明寿

郭世伟, 沈其荣, 潘根兴, 丁艳峰

国际合作者

International Rice Research Institute

(IRRI), Manila, Philippines

Iowa State University, USA

Rothamsted Research, UK

Hohenheim University, Germany

Kassel University, Germany

BASF, Germany

University of Nebraska, Lincoln, USA

K+S Kali GmbH, Kassel, Germany

International Potash Institute (IPI)

La Trobe University, Australia

Queensland University, Australia

Melbourne University, Australia

University of California Davis, USA

University of Pennsylvania, USA

Wageningen University, the Netherlands

Adelaide University, Australia

University of Western Australia, Australia

Centre de Recherche INRA-HDR University,

Montpellier, France.

Braunschweig Technical University, Germany.

International Fertilizer Industry Association (IFA)

Food and Agriculture Organization (FAO)

Peng SB, Buresh R., Dobermann A.

Blackmer A.

Goulding K., Powlson D., Zhao FJ

Römheld V., Doluschitz R., Bareth G., Liebig H.,

Fangmeier A., Müller T.

Buerkert A.

Popp Th., Isermann R.

Dobermann A. Cassman, K.

Härdter R., Guo YL.

Ivanova S., Magen H.

Tang CX.

Huang LB.

Chen DL.

Brown P.

Dou ZX.

Oenema O., Hoffland E.

Smith S., Smith A., Marschner P.

Rengel Z., Lambers H.

Hinsinger P

Nieder R., Roelcke, M.

Maene, L., Heffer, P.

Yuji Niino

(5) 为国际上同时实现作物高产、养分高效和环境保护等多重目标的可持续农业提供了成功的典范

养分资源综合管理技术的成功不仅在解决我国生产实践问题,而且为国际集约化可持续农业发展提供了典范。联合国粮农组织 (FAO)、世界肥料工业协会 (IFA) 等国际组织将养分资源管理技术作为发展中国家解决安全和环境保护矛盾的范例。FAO 委托共同建立亚太地区养分管理协作网,希望把这一经验得以推广,现已完成 16 国专家的培训; IFA 邀请我们参与制定全球作物养分管理战略计划。项目组主持人张福锁教授应邀到印度、韩国、日本、美国、德国、荷兰等十多个国家介绍中国经验 (图 4-23, 图 4-24)。中

德、中英、中荷、中澳、中美等国际合作,尤其是多学科综合研究与示范工作在全国陆续展开,项目成员被邀请参加全球养分管理伙伴计划、养分管理政策论坛等,国际影响越来越大。

受联合国科教文组织、粮农组织和国际植物营养委员会等国际组织委托,先后主办国际会议 10 余次。2005 年 9 月 14 日至 17 日,第 15 届国际植物营养大会由中国农业大学植物营养系主办在北京召开,这是国际植物营养史上第一次由发展中国家举办的大会,会议规模、学术水平和组织水平都是空前的,国务院副总理回良玉出席大会,并发表热情洋溢的讲话 (图 4-25)。通过这次大会,中国植物营养学界向世界同行展示了自己的研究结



图 4-23 部分国际会议和学术活动照片



图 4-24 项目组主持人被国际肥料工业协会授予“国际作物营养”奖



图 4-25 第 15 届国际植物营养大会在北京召开

果,扩大了中国植物营养学在世界的影响。第16届国际植物营养委员会主席美国加里弗尼亚戴维斯分校的Brown教授在大会上曾说“在植物营养学科学领域,中国已经处于世界领先水平”;第14届国际植物营养委员会主席德国汉诺威大学Horst教授也在大会发言中说“这次大会是国际植物营养学会成立以来首次在发展中国家举办,我虽已来北京两天,但并没有感觉是在发展中国家……,中国植物营养学的发展令世界瞩目”;国际著名微量元素营养专家、土耳其Cakmak教授也感叹道“我以前来过中国,但是这次到中国使我感到惊讶!中国社会的发展太快了,中国的植物营养研究是非常棒的”;国际著名植物生物学家、美国康奈尔大学的L. Kochian教授也感慨说“本届大会是我所经历的人数最多,组织工作最好的一次大会,我没想到中国有这么多

杰出的植物营养专家,你们在植物营养领域是国际领先的”。

2005年12月12日至16日,由联合国粮农组织(FAO)和中国农业大学联合主办的“亚太地区作物养分管理研讨会”在北京颐泉山庄宾馆成功举办,来自亚太地区17个国家的专家学者和FAO、中国政府官员等与会。会议主要议程是围绕亚太地区各国的养分管理现状和存在问题,结合发达国家的经验,从政策制定到农户行为、从田块到区域提出适合亚太各国国情植物养分管理策略和技术。与会代表一致同意建立亚太地区植物养分综合管理协作网,并提议由中国农业大学牵头组织。本次研讨会的举办以及亚太地区协作网的建立标志着中国已经成为全球养分管理研究和技术培训的中心之一。

五、未来发展：从同时实现高产高效到食物链养分管理

■ 面临我国人口、资源、环境、和粮食安全等多方面的压力，做好养分资源综合管理依然是我国社会、经济可持续发展的关键。一方面，我国人口的持续刚性增长要求未来粮食生产能力必须年均增长2.0%，而耕地减少、水资源短缺始终是我国农业发展无法回避的硬约束，因此，必须持续提高单位面积的作物产量。然而，长期以来，我国粮食增产过多依赖于水肥资源的大量投入，这不仅使我国粮食生产成本剧增，而且加大了对环境的威胁。只有在大幅度提高作物产量的同时，提高养分利用效率，减少养分损失，才能实现作物高产、养分高效和环境友好。另一方面，氮、磷等养分既是动植物的生命元素，也是环境污染的因素，这把“双刃剑”既存在于动植物生产体系，也贯穿于人类生活和食物消费、资源开发与利用、以及生态环境保护等过程中。氮、磷等养分随化肥、食物、饲料等沿着“资源—化肥—农田—畜牧生产—家庭—环境”体系进行食物链循环流动，其流动强度和速度不但决定着生产力和生产效率的高低，而且直接关系到食品和环境质量，因此，从区域和国家层次上开展食物链养分管理就成为一个新的研究方向。

1. 养分资源综合管理技术是同时实现作物高产和资源高效的基础

(1) 实现作物产量和养分资源效率协同提高是我国农业可持续发展的必然选择

我国是一个拥有13亿人口的农业大国和发展中国家，确保国家粮食安全始终是经济发展、社会稳定和国家富强的基础，是直接关系到国计民生的大事。建国以来，我国粮

食生产取得了巨大成就，实现了粮食供求总体平衡、丰年有余的历史性转变。2007年我国粮食总产量突破1万亿斤大关，实现了自1985年以来粮食首次连续4年增产的历史记录。但是粮食单产年均增长率却从上世纪80年代的4.5%下降到目前的1.5%，除了耕地面积和质量下降、农村劳动力转移等因素之外，化肥增产效应降低也是其重要原因。为了确保作物增产，我国用世界9%的耕地消费了

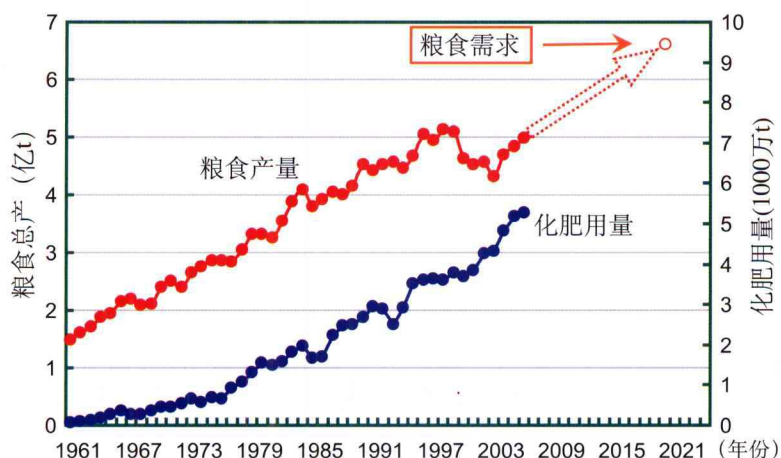


图 5-1 我国粮食产量和化肥消费量发展趋势

35%的化肥，近10年来我国化肥用量已从3000多万t猛增到5000多万t（图5-1），单位化肥生产的粮食却从1977年的55kg/kg下降到目前的20kg/kg，每年下降1kg/kg。化肥增产效应的大幅度下降使我国粮食持续增产面临严峻的挑战。要实现2030年中国粮食安全，总产必须在现有基础上提高40%以上，单产增加45%以上，即年均增长率要达到2.0%（王宏广等，2005），提高粮食生产能力的任务十分艰巨。特别是在耕地面积持续减少和粮食种植面积扩大潜力非常有限的形势下，大面积持续提高作物单产已经成为保障我国粮食安全的唯一选择。而养分资源利用效率低下不仅导致农业生产成本增加，影响农民增收，而且造成环境问题，成为制约我国农业可持续发展的重要因素。因此，提高作物产量和肥料利用率，逆转肥料增产效应下降的趋势，实现在增产的同时，大幅度提高肥料效率是我国农业科技亟待解决的难题，也是国内外农业可持续发展的必然选择。

（2）如何协调作物高产与养分资源高效是当前国际农业可持续发展的研究热点

20世纪60年代掀起的第一次绿色革命，大幅度提高了主要粮食作物的单产水平，为全球粮食安全做出了巨大贡献。然而，20世纪90年代以来，全球粮食生产出现了新的问题，粮食安全面临重大挑战：①粮食产量增长趋缓，并出现徘徊局面，2002年世界粮食产量与1997年相比下降了14%。②粮食需求压力日益增大。为了养活日益增长的人口，2050年世界粮食产量需在现在基础上增加1倍（Tilman et al., 2002）。当前，由于油价上涨，生物质能源对粮食的需求增加，世界谷物库存已降至50年来最低点，危机凸显。③资源耗竭和环境恶化。粮食生产的发展越来越受到资源和环境的制约，第一次绿色革命走的是“高投入、高产出和高资源环境代价”的道路，农田养分流失造成的面源污染、生物多样性下降、温室气体排放增加等生态环境问题对集约化农业提出了新的挑战。

(Matson et al., 1997)。

国际学术界一直关注上述热点问题。Matson 等 (1997) 在 “Science” 上撰文提出“集约化可持续农业”概念; Tilman (1999) 指出必须更有效地利用农田养分以降低农业对环境的负效应; Swaminathan (2000) 提出了 “Evergreen Revolution”, 主张适度增加外部投入, 改善农田生产效率, 同时增强农业可持续性、降低环境成本; Cassman 则提出了农业的“生态集约化”, 主张通过土壤质量的改善、水肥资源调控以及综合管理途径来挖掘作物的产量潜力, 同时达到保护生态环境的目标 (Cassman, 1999; Cassman et al., 2003)。然而, 如何在大量实现增产的同时大幅度提高资源效率目前仍然还没有很好的模式。由此可见, 同时实现作物产量持续提高与资源高效利用是当前国际上农业可持续发展的研究热点, 是人类面临的最大的科学挑战之一 (Tilman et al., 2002)。

(3) 通过挖掘作物生物学潜力和增进土壤生产力, 减少对水肥等外部资源投入的依赖是实现作物高产高效的根本途径

作物产量和资源效率能否协同提高是农业可持续发展的重大科学命题。西方发达国家由于人口资源问题的矛盾不如发展中国家那样突出, 在作物高产与资源高效利用上往往采取效率优先原则, 而我国的基本国情决定了必须走高产与高效并重的农业发展道路。对比我国品种区域试验产量和大田作物平均产量发现, 近十年来新

品种在区域试验中可实现的产量明显提高, 而大田的平均产量增长缓慢。为了解决这一问题, “十五”以来, 我国加强了作物高产、超高产的栽培技术研究, 取得了显著进展, 三大作物的高产记录不断刷新, 存在的主要问题一是小面积上获得的高产纪录难以重演, 更难在生产中大面积实现, 二是水肥投入普遍过大, 资源利用效率不高。我们建立的协调作物高产与环境保护的养分资源综合管理技术在农田养分管理的理论与实践方面取得了可喜的进展, 在集约化生产中可显著减少化肥投入, 提高养分利用效率, 但增产幅度有待提高。

由此可见, 我们面临的突出问题是: 一方面在小面积上获得的高产超高产纪录难以重演, 更难以在生产中大面积实现; 另一方面又由于过多依赖水肥资源投入, 导致资源利用效率不高。因此, 迫切需要开展高产高效理论与技术的创新性研究。我们认为, 通过挖掘作物的生物学潜力和提高土壤生产力, 而非过分依赖水肥等大量投入, 是实现作物产量和资源利用效率协同提高的根本途径。如图5-2所示, 目前作物栽培研究在比较肥沃的土壤上通过精细的栽培和大量的水肥投入实现了高产或超高产, 而以根层养分调控为核心的养分资源综合管理技术可以在肥力一般的土壤上实现节肥增效, 要实现高产、高效的协调, 就需要将养分资源综合管理技术、作物高产栽培技术和土壤生产力提高技术紧密结合。

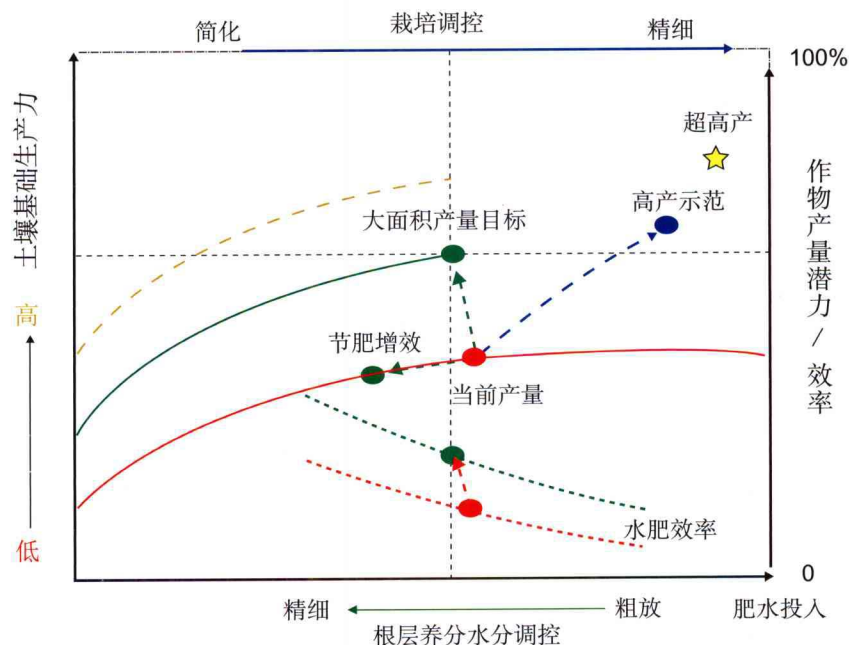


图 5-2 实现作物高产高效的养分资源综合管理技术途径示意图

(4) 以高产高效为目标的养分资源综合管理理论与技术的研究重点

挖掘作物产量潜力是实现作物高产高效的前提。第一次绿色革命通过品种矮化、提高稻麦等作物的收获指数来大幅度提高作物产量潜力，而晚近不少研究表明，未来作物产量的提高应在保持或增加收获指数的基础上，重点依靠增加作物生物产量。Peng 和 Khush (2003) 分析了国际水稻研究所 1968—1998 年水稻品种的演进规律，发现 30 年来水稻品种生产力的提高主要是通过增加生物产量获得的，而收获指数并没有明显变化。提高作物的生物产量，必须尽可能地增加作物全生育期的光合物质生产，其关键在于建立合理的群体结构，协调个体与群体以及源与库之间的矛盾，使个体和群体共同发挥最大效能。Shearman 等 (2005) 对英国小麦高

产新品种的研究表明，开花前生长速率的提高有利于增加单位面积的粒数，同时扩大了灌浆物质的供应。美国在 20 世纪后期一直把“持续提高作物生产力的途径”作为国家级重点研究领域，通过提高密度、综合调控资源投入，在挖掘作物的产量潜力方面取得了重大突破，创造出单季玉米产量高达 27.8 t/hm^2 的世界纪录。大量研究表明，高产粮食作物籽粒灌浆物质的 80%~90% 来自抽穗后的光合生产，经济产量与抽穗后的干物质生产呈极显著的线性相关，因此延长绿叶面积持续时间以增加结实期的光合生产是提高作物生物产量和经济产量的关键途径。因此，优化群体结构、增加花后物质生产、提高分配效率，挖掘作物产量潜力是高产高效条件下养分资源综合管理技术研究重点之一。

在提高作物生产力的同时，如何实现资

源高效利用?这不仅是关系到作物生物学潜力能否充分发挥的重大问题,而且也是农业生产能否持续的关键。集约化农业通过大量化肥、灌溉水投入和高强度耕作等农业措施克服土壤对作物生长发育的限制,但往往以牺牲环境、降低效益和耗竭资源为代价。在持续提高作物产量同时又要使环境负效应降到最低的情况下,养分的优化管理更加困难,必须加强对养分高效利用的科学机制的认识(Cassman et al., 2002)。近年来,国际上一些学者主张以充分发挥作物高效利用养分资源的生物学潜力为核心的综合调控途径来提高作物产量,减少对不可再生资源的依赖(Drinkwater and Snapp, 2007)。作物对水分养分资源的吸收利用不仅取决于这些资源的数量和有效性,而且还极大地依赖于根系对水分养分的吸收能力及其对多变土壤环境的适应能力。以往的研究只重视通过大量施肥提高土壤养分浓度,忽视了利用作物根系对土壤养分的活化作用以及根系与水分养分的协调机制,难以做到作物生产力与水分养分资源利用效率协同提高。研究表明,作物根系不仅可以主动适应并显著改变根际土壤环境,而且能对水肥调控做出积极响应(Jackson et al., 1990; Zhang and Forde, 1998)。根系还可通过分泌有机酸等根分泌物来改变根际的土壤化学和生物学过程,显著提高根系主动活化和摄取土壤养分的能力,根系之间的相互作用也受到根层土壤养分的影响(Kroon, 2007)。显然,作物根系的水分养分

利用能力和根-土互作关系,不仅仅是一个重要的科学前沿问题(Gruntman and Novoplansky, 2004),更是一个关系到作物群体质量控制和水分养分高效利用效率的技术突破口,也是高产高效条件下养分资源综合管理技术一个研究重点。

改善土壤质量是稳定实现作物高产与资源高效利用的基础。土壤是作物生产的基础,作物产量潜力和水肥调控作用的持续稳定发挥依赖于良好的土壤条件。未来全球主要禾谷类作物实现增产潜力的主要途径之一是提高土壤质量(Cassman, 1999; Tilman et al., 2002; Richter et al., 2007)。Drinkwater and Snapp (2007)指出,在全球范围内,作物系统对N和P利用效率不高的原因之一在于土壤C与N、P的循环过程没有有效耦合。同时,以土壤碳管理为核心的土壤资源高效利用机制研究引起了广泛关注(Tiessen et al., 1994; Cater, 2002; Lal, 2004; Lal, 2007; Lehmann, 2007)。充分利用高产农作系统提高土壤资源的利用效率,从而降低外部投入和成本也是近年来国际学术界研究的热点问题,水肥投入与高产群体结构的协调不仅是高产高效的核心环节,也是提高土壤生产力的关键(Swift et al., 2004; Giller et al., 2005)。在集约种植条件下,秸秆还田、有机无机配合、轮作、保护性耕作和增加生物多样性等措施已被证明是实现作物持续高产、增强农田生态系统稳定性的有效技术(Rasmussen et al., 1998; Brady and Weil, 2002)。当前,生物质能源发展中对秸秆的大

量利用引起了人们对土壤质量的忧虑,对此展开了一系列的实证和模拟研究,强调秸秆还田对稳定和提高土壤有机质的重要性 (Saffih-Hdadi and Mary, 2008)。因此,如何提高土壤生产力是高产高效条件下养分资源综合管理技术又一个研究重点。

总之,高产高效条件下养分资源综合管理技术不仅是国际上农业可持续发展的重大科学命题,也是我国农业科技人员亟待解决的技术难题。近年来,我国科学家在作物的高产栽培和土壤水肥管理研究领域取得了不少的进展,为国家粮食生产的发展做出了重要的贡献。目前面临的关键问题是,高产栽培与水肥资源高效利用的研究互相脱节;在高产的同时实现资源高效利用的理论和技

途径研究还很薄弱。迫切需要建立以高产栽培为核心,栽培、土壤、植物营养等多学科密切合作的研究平台,深入研究在作物产量持续提高的同时实现资源高效利用的机制 (图5-3),共同探讨作物高产和资源高效利用的作物群体、土壤以及养分定量调控的技术途径,进而发展以高产高效为目标的养分资源综合管理技术体系。

2. 食物链养分管理

氮、磷等养分作为动植物生命元素和环境污染因子 (张福锁, 2003),不但存在于动植物生产体系,还与人类食物消费、资源利用、生态环境等密切相关,它们伴随化肥、食物、饲料等物质时刻沿着“资源—化肥—农

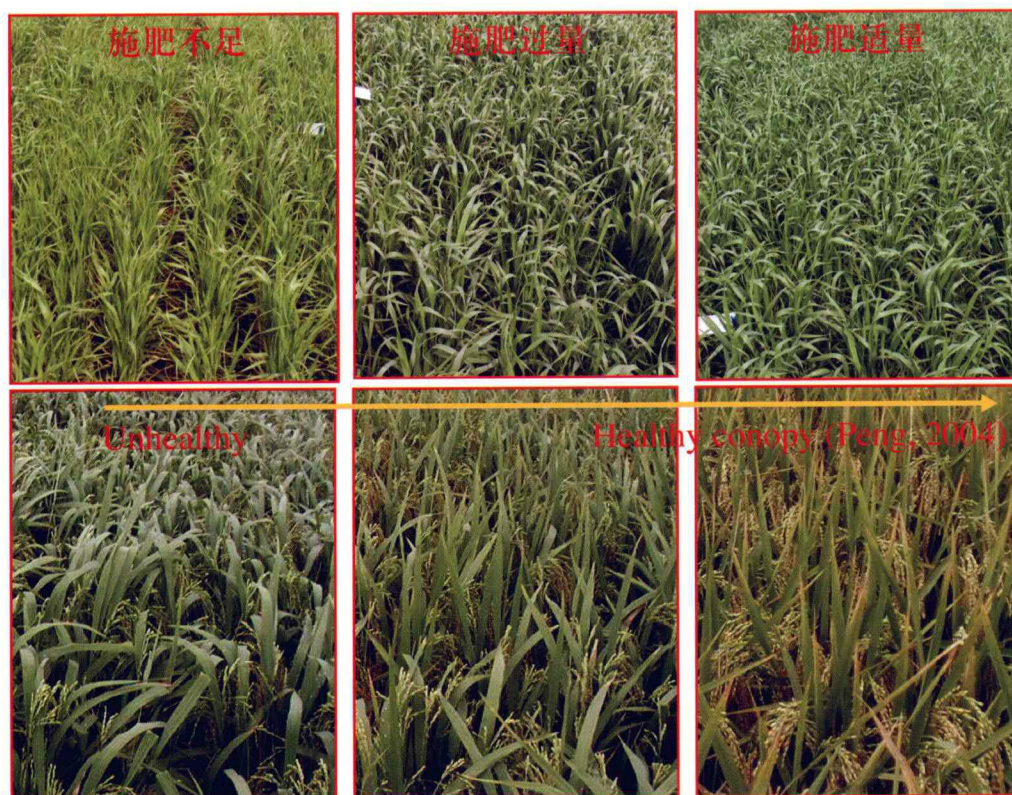


图 5-3 施肥与冠层质量的关系举例

田—畜牧生产—家庭—环境”体系进行食物链养分纵向流动(张福锁等, 2006)。在这个流动过程中, 养分的存量和流量直接关系到资源、环境、社会经济、生产、食品安全等可持续发展的目标, 因此, 从食物链角度做好养分资源的综合管理就成为可持续发展的重要内容(Zhang et al, 2005; 张福锁等, 2006; 马文奇等, 2006)。

(1) 食物链养分管理的基本内涵

养分管理最初是土壤学和植物营养学的名词, 主要指与农田施肥有关的行动(张福锁, 2003), 但随着人们对氮、磷等养分在可持续发展中作用的深入认识, 逐渐扩展到农牧生产体系(张福锁, 2003; Oenema, 2004)和整个食物链(Zhang et al, 2005; 张福锁等, 2006; 马文奇等, 2006)。养分管理之所以要扩展到整个食物链, 与它们流动模式和特征

(图 5-4) 有关。养分在食物链中核心的流动部分是动植物生产, 食物需求是其最重要的驱动力; 为了生产比较多的植物产品, 还需要投入化肥。而化肥的生产需要资源, 所以食物链养分流动链条起始部分就是资源开发和化肥生产, 这一过程不但关系到资源的利用, 也有一部分养分会排放到环境。食物链养分流动最后一部分就是人类食用食物之后的养分去向。由此可见, 养分在食物链的流动不但关系着人类食物需求, 也关乎资源和生态环境安全。从食物链角度进行养分的优化管理就成为可持续发展的必然需求。为此, 我们提出的食物链养分管理就是从一个特定区域的食物生产与消费系统出发, 把养分看作资源, 以养分资源的流动规律为基础, 通过多种措施(如政策、经济、技术等)的综合, 优化食物链及其与环境系统的养分传递,

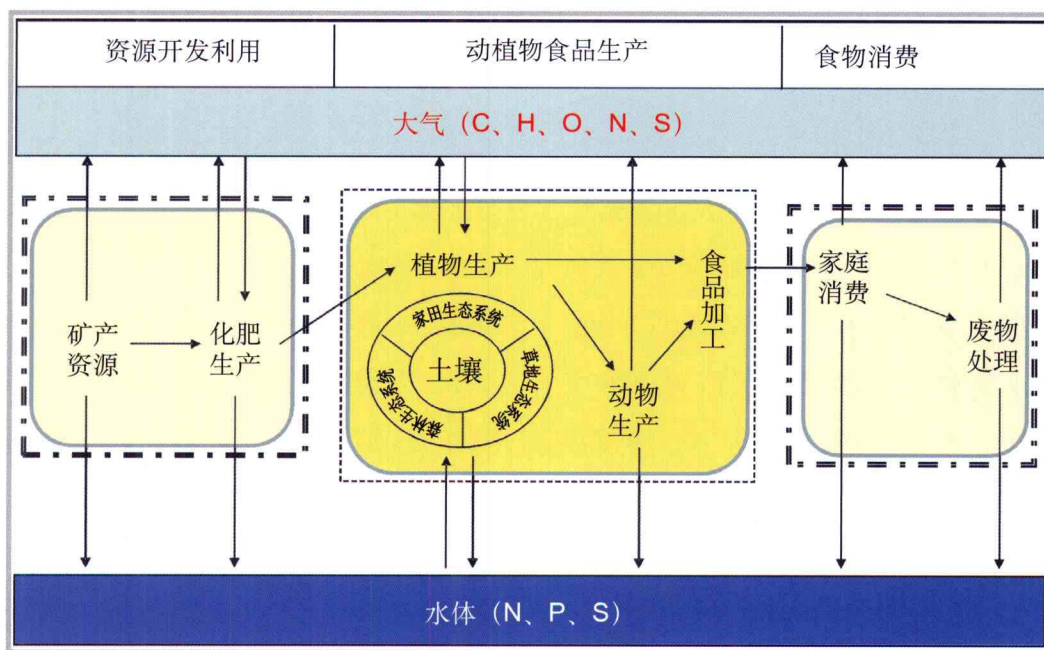


图 5-4 食物链养分流动的一般模式

调控养分输入和输出,协调养分与社会、经济、农业、资源和环境的关系,实现生产力逐步提高和环境友好的目标(马文奇和张福锁,2008)。

(2)我国面临的食物链养分管理问题

在21世纪,随着我国人口增长、社会经济发展和人民生活水平的逐步提高,食物链养分流动将进一步加大,同时也会带来更多的资源消耗和环境养分排放,未来将面临更为严峻的食物链养分问题,将是我国可持续发展面临的重要挑战。其主要表现在以下几个方面。

首先,食物链养分流量大幅度增长。人类在消费食物的同时也在消费其中的养分,由于各种食物中养分含量不同,消费的养分数量也因食物结构而异,这也造成各个区域人均消费食物养分数量的差异。以氮为例,我国居民消费氮素水平明显低于欧美发达国家,并且我国农村居民消费氮素也低于城镇,说明随着经济发展和营养改善,人均氮素消费量会进一步增加。伴随人口和人均氮素消费量的增长,食物链养分流动数量大幅度增加。我们课题组测算,1980年到2005年,农田氮素总流量从2310万t增加到4840万t;动物生产体系氮素流动也大幅度提高,从1980年的869万t,提高到2005年2605万t;家庭消费系统氮素流量从306万t增加到789万t。按照目前我国经济发展速度,如果不进行调控,在我国达到人口高峰时,家庭消费系统氮素流量将比2005年分别增加了100万t氮以上,

而我国居民每增加1kg氮素消费,在动植物生产体系就需要多投入7kg的氮素(马文奇和张福锁,2008),按此推算,食物链中动植物生产体系的流量将增加700多万吨以上。

其次,食物链养分流动质量有待提高。近十年来,我国社会经济得到了快速发展,一方面为消除营养缺乏和改善居民健康提供了经济、物质基础,另一方面也导致了膳食结构、生活方式和疾病谱的变化。2002年开展的“中国居民营养与健康状况调查”数据显示,我国居民营养过剩和营养不良共存的问题日渐突出,一方面,营养过剩导致了慢性非传染性疾病患病率的迅速上升。另一方面,儿童营养不良在农村地区仍然较严重(翟凤英和杨晓光,2006)。此外,人类通过育种、施肥和优化管理方式提高了作物产量,满足了人类对粮食的基本要求,但是却没有考虑人体健康的影响,以至带来了‘潜在的饥饿’,即微量元素的缺乏(张福锁等,2006)。

第三,食物链养分生产效率低,废弃物循环率下降。与国际先进水平相比,我国动植物生产体系养分利用效率和增产效应都很低,并由此造成了养分大量浪费和损失。主要表现在:①我国化肥利用率明显低于发达国家水平。发达国家主要粮食作物氮磷钾肥当季利用率分别为50%~70%,15%和50%~60%(Finck,1992),而我国目前在试验条件下水稻、小麦和玉米的氮肥利用率仅仅和世界主要国家农户条件下得到的氮肥利用率相当;更远远低于世界一些国家和地区在试验条件下得

到的水稻、小麦和玉米的氮肥利用率 40% ~ 60% 的数值, 而实际上主要粮食作物在良好的管理条件下的氮肥利用率会更高, 如水稻在良好管理条件下氮肥利用率可达 50% ~ 80% (Cassman, et al., 1993; Peng et al., 1998; Dobermann et al., 2000)。②我国动物生产的养分效率仍低于国际先进国家。中国畜禽养殖业与先进畜禽养殖国家相比, 养分转化效率很低。我国畜禽养殖业 N 效率为 13%, 荷兰、美国分别为 31%、23%; 从畜禽养殖品种来看, 按照从大到小的顺序, N 效率在猪养殖中为 34.5%; 家禽为 28.3%; 肉牛为 4.5%; 羊为 3.8% (Zhang et al, 2005)。传统“猪—粪—饲料—猪”模式, 有机肥还田, 农业废弃物作

饲料, 养分循环利用率高。但是随着化肥大量施用、规模化养殖比例提高和城镇化进程加快, 粪肥堆弃、秸秆焚烧和工业使用比例上升, 从而降低了养分的内部循环 (图 5-5)。农田、畜牧和家庭系统废弃养分循环利用率与 1980 年相比分别下降 10%、35% 和 10%。

第四, 大量养分排放的巨大环境压力。目前环境污染问题已经严重影响了我国可持续发展, 其中很多方面与食物链养分流动有关 (张福锁等, 2006)。如 2007 年无锡饮用水污染的主要原因是太湖的严重富营养化, 其中与氮磷排放过多有关。据研究, 太湖富营养化中的氮, 34% 来自人畜粪便, 14% 来自生活污水, 24% 来自农田, 6% 来自养殖业,



图 5-5 传统有机养分还田被化肥、堆弃、焚烧、发电等方式代替

而22%来自工业生产(程序, 2007);其中除与工业生产有关外, 78%的氮来源与食物链养分流动有关, 可见食物链养分管理在控制水体污染中的重要作用。据估算, 2000年与1952年相比, 人口增加了1倍, 而环境养分排放增加8倍(马文奇等, 2006);根据营养学会膳食结构推荐量, 到2020年人均蛋白质日摄入量增加10g, 那么环境养分排放将增加3000万t。随着我国人口增加和社会经济发展, 养分向环境排放数量必然增加, 这个问题会越来越严重。我们的分析结果表明, 按照目前的排放参数推算, 到我国人口高峰时, 未来我国向大气年排放的氮在1600万~2826万t;向水体年排放氮在738万~1304万t, 可以使3.7万~6.5万亿 m^3 地表水氮素含量增加2mg/L, 进而超过水体污染标准。大气的部分氮将通过沉降的形式进入陆地和水体生态系统, 成为重要的氮源。如果考虑到多年的累积效应, 则未来环境压力将十分严峻(马文奇和张福锁, 2008)。

第五、食物链养分流动带来不可再生资源的大量消耗。随着食物链输入养分数量大量增加, 化肥生产和消费数量也将急剧增大。化肥是资源消耗型产业。2005年我国氮肥生产综合能耗达到1亿t标准煤, 占全国能源消耗的5%左右。如果氮肥产量进一步增加, 势必对我国紧张的能源供应带来影响。我国高品位磷矿储量约为11亿t, 每年的消耗量超过1亿t(资源量), 以现有的消耗量和利用技术, 现有的富矿资源仅能利用到

2014年(张卫峰等, 2005)。硫资源形势也不乐观, 最近几年中国国内生产供应量增长缓慢, 进口硫大幅度增加, 目前对进口依赖过多。此外, 钾资源依靠进口的局面短期内不会改变。

最后, 目前的养分管理模式还不能适应未来的需要。食物链养分管理涉及多个方面, 其管理职能也分属不同职能部门, 因此在管理上属于分段管理模式。受各个阶段或单元目标的影响, 各部门的管理目标也不同, 有些部门偏重生产和经济目标, 而有些偏重环境目标, 上下游之间缺乏协调一致的目标, 不能实现资源、环境和生产多个目标的兼顾, 这种矛盾造成了对可持续发展的障碍和掣肘(程序, 2007)。从目前的现状看, 这种分段管理模式短期内还很难改变。此外, 在养分管理中, 亦存在过于偏重技术方面的研究和推广、忽视政策和法规的制定和应用等问题(马文奇和张福锁, 2008)。

(3) 食物链养分管理的手段

食物链养分管理措施通常包括政策和技术两个方面(图5-6), 并由此通过各个环节的优化, 实现增产增收、资源高效、环境友好等目标。政策通常是政府采取的一些改变人行为或决策的措施, 以满足整个社会的目标。养分管理政策也包括两类, 一类是约束性的法规类, 另一类是刺激性的经济手段或其他措施。食物链养分管理的技术也很多, 但总的可以分为两类, 一类是对养分物质输入和产生数量的直接调控。如在农田养分管

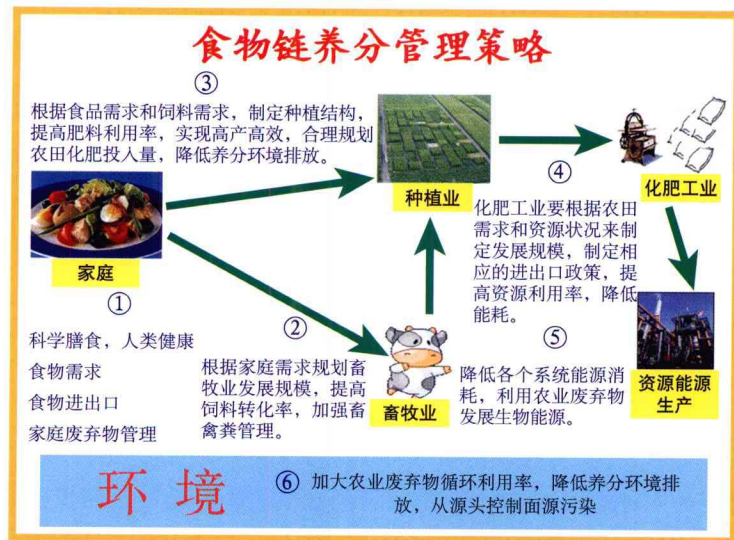


图 5-6 食物链养分管理政策和技术示意图

理技术中,化肥推荐技术一直是最受重视的,目前我国开展的测土配方施肥项目就是在推广化肥养分管理技术。另一类是对养分流动过程的调节。如防止土壤侵蚀的技术可以减少养分的损失、沼气的发展可以改变有机养分去向、饲料植酸酶的利用可以提高磷素利用效率、作物和动物增产技术可以增加养分产出等。

(4) 食物链养分综合管理的重点

综上所述,在 21 世纪,随着我国人口增长、社会经济发展和人民生活水平的逐步提高,食物链养分流量将进一步加大,同时也会带来更多的资源消耗和环境养分排放,未来将面临更为严峻的食物链养分问题,而目前养分管理模式不适应未来的要求,这些问题将是我国可持续发展面临的重要挑战(马文奇和张福锁, 2008)。为此,应该从下列几方面来加强食物链的养分管理。

首先,优化食物营养结构,降低养分需

求和资源环境压力。近年来,中国居民的生活水平日益提高,膳食结构正在逐步从“吃饱求生存”向“吃好求健康”的方向发展。但是,也存在许多问题,特别是传统的以植物食品为主的饮食模式逐渐为西方以动物食品为主的模式所代替,动物食品需求数量大幅度增加,不仅影响人民的身体健康,还带来巨大的养分需求压力 and 资源环境问题。因此,应该合理规划营养需求,优化食物链系统养分流量,减少不必要的养分浪费。同时,要加强营养教育,鼓励人民追求合理的膳食结构,不要盲目追求欧美发达国家过去的生活方式而食用过多的动物食品,以免增加食物需求压力、影响身体健康并带来更严重的环境压力。以蛋白质消费为例,按照居民营养推荐标准,我国成人男子的日蛋白质摄入量在 75~90g 之间,女子在 65~80g 之间,而儿童一般更低(翟凤英和杨晓光, 2006),如果取 75g 作为平均值,则年摄入氮素为 4.4kg,

考虑到食物的损失,人均消费达到4.9kg,这略低于目前我国大城市的平均水平。如果我们未来按照这个数量来合理规划膳食结构,则会大大降低食物氮需求和氮素环境排放(马文奇和张福锁,2008)。

其次,提高养分利用效率和循环率,减少环境排放。未来重点应该在提高养分效率上下功夫,关键是大力发展和推广养分优化管理技术,在农田生产时提高化肥增产效率和秸秆回田率,在畜牧生产上提高饲料转化率和粪尿利用率,在家庭消费时提高粪尿利用率和污水垃圾处理率。以氮为例,作者估计,如果通过改进养分资源管理技术,提高养分利用效率,增加养分循环利用率,可以大幅度减少化肥需求和环境排放(图5-7,马文奇和张福锁,2008)。

再次,制定相关政策,调控养分流动模式,协调生产与环境的矛盾。1980年,中国9.9亿人口,城镇化率为17.8%,食物链养分流动呈现出低流量、低存量、低环境资源代价和高效率的“三低一高”的流动状态;

2005年,中国要养活13亿人口,城镇化率达到27.4%,食物链养分流动则为高流量、高存量、高环境资源代价和低效率的“三高一低”的流动状态;到2020年,人口将达到14.5亿,城镇化率达到50%,面对资源和环境的双重瓶颈,中国食物链养分管理必须走更高流量和存量、更高效率和更低环境资源代价的“新三高一低”战略(图5-8)。因此,我国急需从整个食物链角度实施养分管理的相关政策,发展养分资源综合管理技术,以协调未来生产和环境之间的巨大矛盾,进而实现可持续发展的目标。

最后,加强食物链养分管理研究,为优化我们的生活及环境管理提供政策依据和技术支持。目前,针对我国食物链养分管理开展的研究刚刚起步,以下四方面的研究应该加强:第一,需要从国家尺度上深入研究食物链体系养分流动规律及其驱动机制,探讨食物链养分优化管理策略及其政策法规调控措施,从宏观上通过食物结构、农牧业结构、城乡结构等的优化,调整作物生产-动物生产-家庭

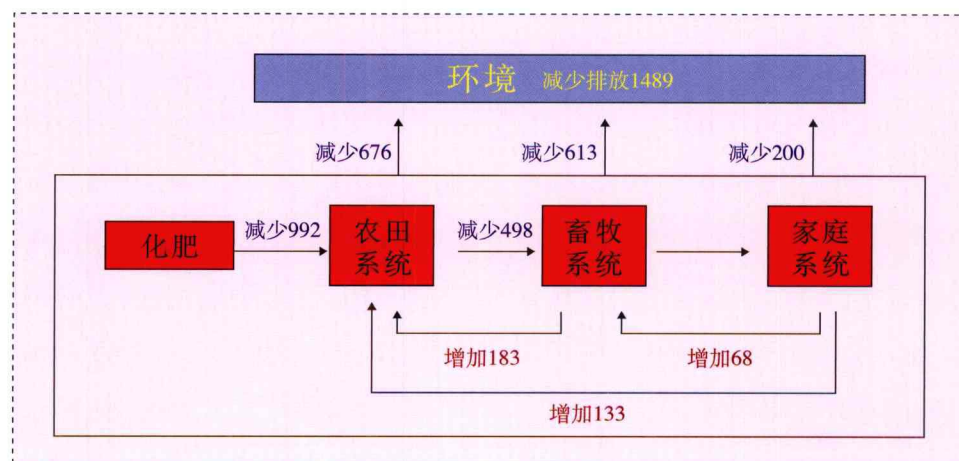


图 5-7 食物链氮素养分资源流动和循环优化潜力的情景分析 (单位: 万 t N)

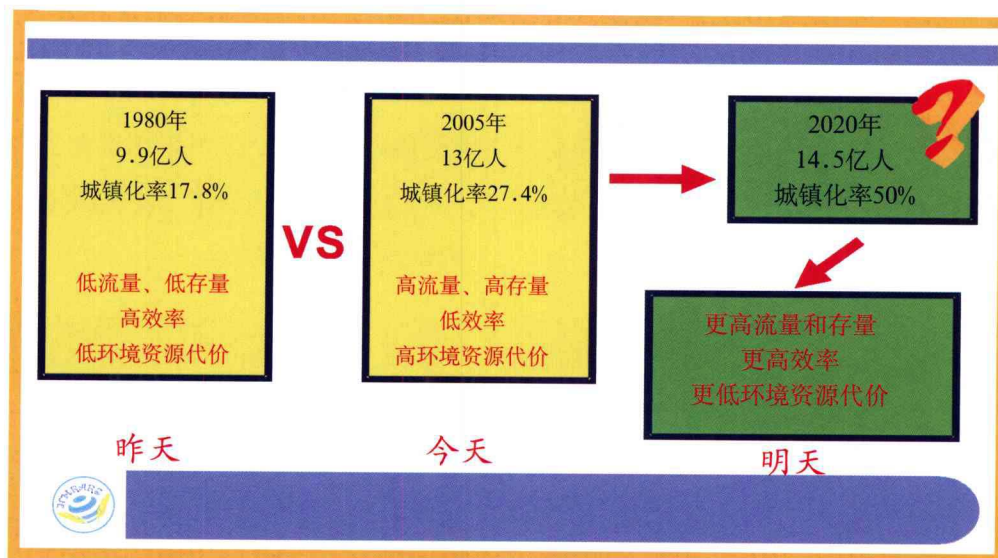


图 5-8 昨天、今天、明天中国食物链氮素养分流动三种模式

消费的养分关系, 改变养分流动数量和模式, 减少养分向环境排放。第二, 开展区域/流域农田、畜牧和家庭亚系统养分流动和循环规律及其调控策略的研究, 为进一步调整作物种植结构、畜禽品种结构、家庭膳食结构, 优化各亚系统养分流动以及促进养分循环提供依据。第三, 开展以提高农田、畜牧和家庭亚系统养分利用效率为核心的养分资源综合管理技术研究工作, 特别要加强动植物高产条件下养分高效利用及其管理技术的创新, 为

实现生产生态双赢的目标提供技术支撑。第四, 要开展国家、区域/流域等不同尺度食物链体系养分流动模型研究, 建立养分资源综合管理决策支持系统, 为制定养分管理政策和法规提供支持(马文奇和张福锁, 2008)。图 5-9就是我们利用中国食物链养分流动模型进行情景分析的结果, 表明通过优化食物链养分管理提高养分效率可以大幅度减少养分向环境的排放, 如果能达到发达国家的利用效率, 环境养分排放可以降低 53%!

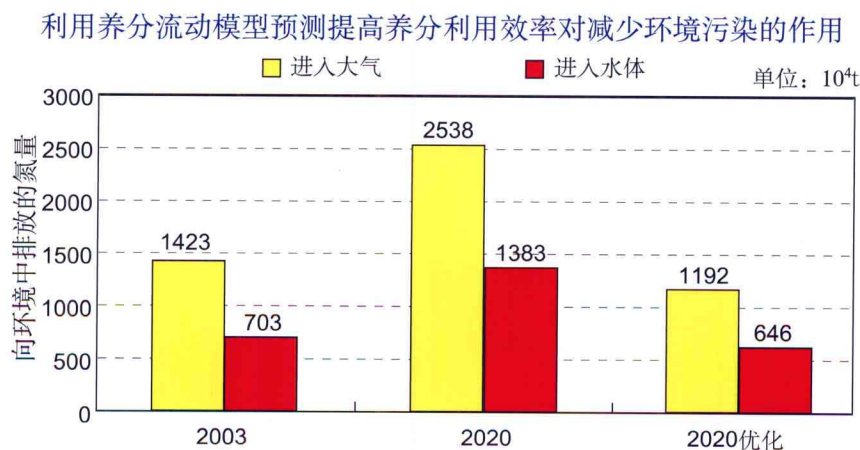


图 5-9 利用养分流动模型预测分析未来优化管理对养分环境排放的影响

总之，未来中国的养分管理，不仅要考虑农田，尤其还要考虑畜牧业和家庭消费体系。管好我们的嘴、合理消费，在保证充足和优质食品供应的前提下，大幅度提高食物链各个生产与消费环节养分的利用效率，减

少养分向环境的排放，以实现生产持续增加、资源高效利用、人民健康和环境质量持续改善的目标（图5-10）。从农田走向食物链，是养分资源综合管理的第二次飞跃，也是植物营养学科的发展方向。

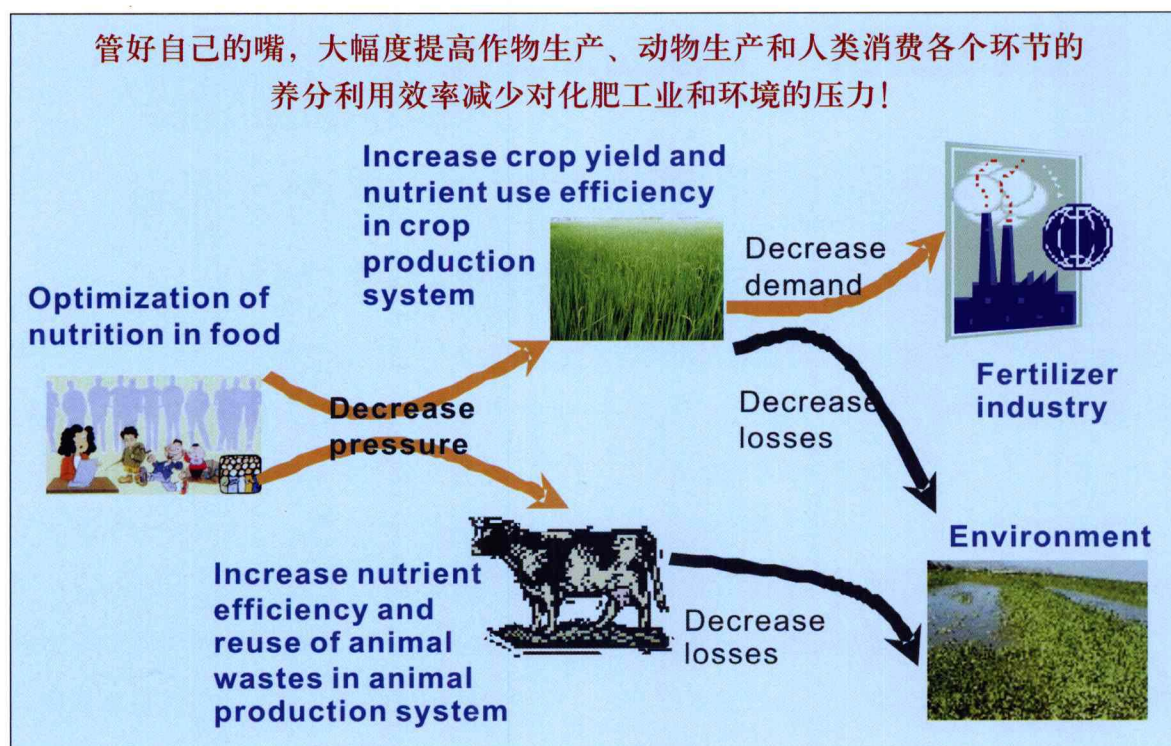


图 5-10 食物链养分资源综合管理的意义和途径

六、附录

1. 出版著作目录

- 1) 陈清, 张福锁主编. 蔬菜养分资源综合管理技术理论与实践. 北京: 中国农业大学出版社, 2007.
- 2) 姜远茂, 张宏彦, 张福锁主编. 北方落叶果树 - 养分资源综合管理理论与实践. 北京: 中国农业大学出版社, 2007.
- 3) 张福锁, 张卫峰, 马文奇主编. 中国化肥产业技术与展望. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- 4) 张福锁主编. 测土配方施肥技术要览. 北京: 中国农业大学出版社, 2006.
- 5) 张福锁, 马文奇, 陈新平主编. 养分资源综合管理理论与技术概论. 北京: 中国农业大学出版社, 2006.
- 6) 陈新平, 张福锁主编. 小麦 - 玉米轮作体系养分资源综合管理理论与实践. 北京: 中国农业大学出版社, 2006.
- 7) 申建波, 张福锁主编. 水稻养分资源综合管理理论与实践. 北京: 中国农业大学出版社, 2006.
- 8) 李春俭, 张福锁主编. 烟草养分资源综合管理理论与实践. 北京: 中国农业大学出版社, 2006.
- 9) 张福锁主编. 养分资源综合管理技术研究与应用. 北京: 中国农业大学出版社, 2006.
- 10) 农业部科技教育司, 中国农业大学资源与环境学院, 中国农业出版社编绘. 农业科技入户工程施肥技术丛书(一) - 大田作物施肥图解. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- 11) 农业部科技教育司, 中国农业大学资源与环境学院, 中国农业出版社编绘. 农业科技入户工程施肥技术丛书(二) - 蔬菜施肥图解. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- 12) 农业部科技教育司, 中国农业大学资源与环境学院, 中国农业出版社编绘. 农业科技入户工程施肥技术丛书(三) - 果树施肥图解. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- 13) 张福锁主编. 养分资源综合管理. 北京: 中国农业大学出版社, 2003.
- 14) 田长彦, 冯固主编. 棉花养分资源综合管理理论与实践. 北京: 科学出版社 (即将出版)
- 15) 张宏彦, 张福锁主编. 养分管理与农作物品质. 北京: 中国农业大学出版社 (即将出版)

- 16) 马文奇, 张福锁主编. 中国食物链养分流动规律与优化管理研究. 北京: 中国农业大学出版社 (即将出版)

2. 主要 SCI 文章及中英文文章 (英文 45 篇, 中文 120 篇)

- 1) Chen XP, Zhang FS, Römheld V, Horlacher D, Schulz R, Boening-Zilens M, Wang P, Claupein W. Synchronizing N supply from soil and fertilizer and N demand of winter wheat by an improved N_{min} method. *Nutr. Cycl. Agroecosys.*, 2006, 74: 91-98
- 2) Zhao RF, Chen XP, Zhang FS, Zhang HL, Schroder J, Römheld V. Fertilization and nitrogen balance in a wheat-maize rotation system in North China. *Agron. J.*, 2006, 98(4): 938-945
- 3) Liu XJ, Ju XT, Zhang FS, Chen XP. Nitrogen recommendation for winter wheat using N_{min} test and rapid plant tests in North China Plain. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 2003, 34 (17&18): 2539-2551
- 4) He FF, Chen Q, Jiang RF, Chen XP, Zhang FS. Yield and nitrogen balance of greenhouse tomato with conventional and site-specific recommended nitrogen management in Northern China. *Nutr. Cycl. Agroecosys.*, 2007, 77: 1-14
- 5) Liu XJ, Ju XT, Zhang Y, He CE, Kopsch J, Zhang FS. Nitrogen deposition in agroecosystems in the Beijing area. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 2006, 113: 370-377
- 6) Ju XT, Kou CL, Zhang FS, Christies P. Nitrogen balance and groundwater nitrate contamination: Comparison among three intensive cropping systems on the North China Plain. *Environ. Pollut.*, 2006, 143: 117-125
- 7) Chen Q, Zhang FS, Zhang HY, Christie P, Li XL. Evaluation of current fertilizer practice and soil fertility in vegetable production in the Beijing region. *Nutr. Cycl. Agroecosys.*, 2004, 69: 51-58
- 8) Chen Q, Li XL, Horlacher D, H. P. Liebig. Effects of different nitrogen rates on open-field vegetable growth and nitrogen utilization in the North China Plain. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 2003, 35(11&12): 1725-1740
- 9) Ju XT, Kou CL, Christie P, Dou ZX, Zhang FS. Changes in the soil environment from excessive application of fertilizers and manures to two contrasting intensive cropping systems on the North China Plain. *Environ. Pollut.*, 2007, 145(2): 497-506
- 10) Chen Q, Zhang HY, Li XL, Horlocher D, Liebig HP. Use of modified N-expert system for vegetable production in the Beijing region. *J. Plant Nutr.*, 2005, 28: 475-487
- 11) He CE, Liu XJ, Fangmeier A, Zhang FS. Quantifying the total airborne nitrogen input into agroecosystems in the North China Plain,

- Agric. Ecosyst. Environ., 2007, 121: 395-400
- 12) Ju XT, Gao Q, Christie P, Zhang FS. Interception of residual nitrate from a calcareous alluvial soil profile on the North China Plain by deep-rooted crops: A ^{15}N tracer study Environ. Pollut., 2007, 146(2): 534-542
- 13) Ju XT, Liu XJ, Pan JR, Zhang FS. Fate of ^{15}N -labeled urea under a winter wheat-summer maize rotation on the North China Plain, Pedosphere, 2007, 17(1): 52-61
- 14) Niu JF, Chen FJ, Mi GH, Li CJ, Zhang FS. Transpiration, and nitrogen uptake and flow in two maize inbred lines as affected by nitrogen supply. Annals of Botany. 2007, 99 (1):153-160
- 15) Zhang FS, Fan MS, Zhang WF. Principles, dissemination and performance of fertilizer best management practices developed in China. Fertilization Best Management Practices, International Fertilizer Industry Association. Paris, France. 2007, ISBN2-9523139-2-X, pp. 193-201
- 16) Zhang XS, Liao H, Chen Q, Christie P, Li XL, Zhang FS. Response of tomato in calcareous soil to different application rates of seedbed phosphorus fertilizer. Pedosphere, 2007, 17 (1): 70-76
- 17) Cui ZL, Chen XP, Li JL, Xu JF, Shi LW, Zhang FS. Effect of N fertilization on grain yield of winter wheat and apparent N losses. Pedosphere, 2006, 16(6): 806-812
- 18) Ju XT, Liu XJ, Zhang FS, Christie P. Effect of long-term fertilization on organic nitrogen forms in a calcareous alluvial soil on the North China Plain. Pedosphere, 2006, 16(2): 224-229
- 19) Ju XT, Zhang FS. Utilization and management of organic wastes in Chinese agriculture: Past, present and perspectives, Science in China Series C-Life Sciences, 2006, 48: 965-979
- 20) Liu XJ, Li L, Zhang FS. Rhizosphere management as part of intercropping and rice-wheat rotation systems. In: Biological Approaches to Sustainable Soil Systems, Uphoff N et al., (eds). CRC. 2006, pp. 559-574
- 21) Peng SB, Buresh RJ, Huang JL, Yang JC, Zou YB, Zhong XH, Wang GH, Zhang FS. Strategies for overcoming low agronomic nitrogen use efficiency in irrigated rice systems in China. Field Crops Res., 2006, 96: 37-47
- 22) Zhang FS, Fan MS, Chen XP, Li JB, Shen L, Cui ZL. Integrated nutrient management in cropping systems in China. In: Balanced Fertilization for Sustaining Crop Productivity. Proceedings of the International Symposium, Benbi DK et al., (eds) Invited Papers. International Potash Institute Horgen, Switzerland. 2006, pp. 135-146

- 23) Zhang FS, Fan MS, Zhao BQ, et al. Fertilizer use, soil fertility and integrated nutrient management in China. *In: Improving Plant Nutrition Management for Better Farmer Livelihoods, Food Security and Environmental Sustainability*, Zhang FS. et al., (eds). Proceedings of a Regional Workshop. 2006, Beijing, China.
- 24) Chen XP, Zhang FS, Römheld V. Management and fate of nitrogen fertilizer in a winter wheat/summer maize rotation system in the Northern China Plain. *In: Plant Nutrition for Food Security, Human Health and Environmental Protection*, Li et al., (eds). Tsinghua University Press, Beijing, 2005, pp. 890-891
- 25) Chun L, Mi GH, Li J, Zhang FS, Chen FJ. Genetic analysis of maize root characteristics in response to low nitrogen stress. *Plant Soil*, 2005, 276: 369-382
- 26) Cui ZL, Chen XP, Zhang FS, Li JL, Xu JF, Shi LW. Nitrogen fertilization recommendation for winter wheat/summer maize rotation system towards high yield and friendly environment. *In: Plant Nutrition for Food Security, Human Health and Environmental Protection*, Li et al., (eds). Tsinghua University Press, Beijing, 2005, pp. 1178-1179
- 27) Fan MS, Jiang RF, Liu XJ, Zhang FS, Lu SH, Zeng XZ, Christie P. Interactions between non-flooded mulching cultivation and varying nitrogen inputs in rice-wheat rotations. *Field Crops Res.*, 2005, 91: 307-318
- 28) Fan MS, Liu XJ, Jiang RF, Zhang FS, Lu SH, Zeng XZ, Christie P. Crop yields, internal nutrient use efficiency and changes in soil properties in rice-wheat rotations under non-flooded mulching cultivation. *Plant Soil*, 2005, 277(1-2): 265-276
- 29) Ju XT, Wan YJ, Kou CL, Zhang FS. Nitrate accumulation in agricultural soils and groundwater of the North China Plain. *In: Plant Nutrition for Food Security, Human Health and Environmental Protection*, Li et al., (eds). Tsinghua University Press, Beijing, 2005, pp. 1056-1057
- 30) Liu XJ, Ai YW, Zhang F, Lu SH, Zeng XZ, Fan MS. Crop production, nitrogen recovery and water use efficiency in rice-wheat rotation as affected by non-flooded mulching cultivation (NFMC). *Nutr. Cycl. Agroecosys.*, 2005, 71 (3): 289-299
- 31) Liu XJ, Ju XT, Chen XP, Zhang FS, Römheld V. Nitrogen recommendations for summer maize in Northern China using the N_{min} test and rapid plant tests. *Pedosphere*. 2005, 15 (2): 246-254
- 32) Römheld V., Zhang FS. Sino-German research project on sustainable agricultural production in Northern China: Recommen-

- dations for farmers and policy makers. *In: Promoting Environmentally-friendly Agricultural Production in China, Resource Management for Sustainable Intensive Agriculture Systems*, Römheld V. et al., (eds). Tsinghua University Press, 2005
- 33) Tian QY, Chen F, Zhang FS and Mi GH. Possible involvement of cytokinin in nitrate-mediated root growth in maize. *Plant Soil*, 2005, 277: 185-196
- 34) Zhu JH, Li XL, Christie P, Li JL. Environmental implications of low nitrogen use efficiency in excessively fertilized hot pepper cropping systems. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 2005, 111: 78-80
- 35) Chen XP, Zhou JC, Wang XR, Blackmer AM, Zhang FS. Optimal rates of nitrogen fertilization for a winter wheat-corn cropping system in Northern China. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 2004, 35(3-4): 583-597
- 36) Ju XT, Liu XJ, Zhang FS. Nitrogen transformations in a Chinese aquic cambisol following applied of urea with dicyandiamide or plant residues. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 2004, 35(17-18): 2397-2416
- 37) Ju XT, Liu XJ, Zhang FS, Marco R. Nitrogen fertilization, soil nitrate accumulation, and policy recommendations in several agricultural regions of China. *Ambio*, 2004, 33(6): 300-305
- 38) Lu SH, Liu XJ, Li L, Zeng XZ, Zhang FS. Effect of Manganese spatial distribution in the soil profile on wheat growth in rice-wheat rotation. *Plant and Soil*, 2004, 261:39-46.
- 39) Shen JB, Li R, Zhang F, Fan J, Tang C, Rengel Z. Crop yields, soil fertility and phosphorus fractions in response to long-term fertilization under the rice monoculture system on a calcareous soil. *Field Crops Res.*, 2004, 86: 225-238
- 40) Wang Y, Mi GH, Chen FJ, Zhang JH, Zhang FS. Response of root morphology of nitrate supply and its contribution to nitrogen accumulation in maize. *J. Plant Nutr.*, 2004, 27: 2189-2202
- 41) Chen Q, Li XL, Horlacher D and H. P. Liebig. Effects of different nitrogen rates on open-field vegetable growth and nitrogen utilization in the North China Plain. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 2003, 35(11&12): 1725-1740
- 42) Chen Q, Zhang HY, Tang LL, Li XL, Horlocher D, Liebig HP. Effects of water and nitrogen supply on spinach growth and soil mineral N residues. *Pedosphere*, 2002, 12(2): 171-178
- 43) Ju XT, Liu XJ, Zou GY, Wang ZH, Zhang FS. Evaluation of pathway of nitrogen loss in winter wheat and summer maize rotation system. *Agric. Sci. in China*. 2002, 1(11): 1224-1231
- 44) Fan XL, Zhang FS. Soil water, fertility and

- sustainable agricultural production in arid and semiarid regions on the loess plateau. J. Plant Nutr. Soil Sci., 2000, 163(1): 107-113
- 45) Wang ZY, Tang YL, Zhang FS. Effect of molybdenum on growth and nitrate reductase activity of winter wheat seedlings as influenced by temperature and nitrogen treatments. J. Plant Nutr., 1999, 22 (2): 387-395
- 46) 崔振岭, 徐久飞, 石立委, 陈新平, 张福锁, 李俊良. 土壤剖面硝态氮含量的快速测试方法. 中国农业大学学报, 2005, 10(1): 10-12
- 47) 张宏彦, 陈清, 李晓林, 汤丽玲, 张晓晟. 利用不同土壤 N_{min} 目标值进行露地花椰菜氮肥推荐. 植物营养与肥料学报, 2003, 9 (3): 342-347
- 48) 何飞飞, 肖万里, 李俊良, 陈清, 江荣风, 张福锁. 日光温室番茄氮素资源综合管理技术研究. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(3): 394-399
- 49) 王兴仁, 曹一平, 张福锁, 陈新平. 磷肥恒量监控施肥法在农业中应用探讨. 植物营养与肥料学报, 1995, 1(3-4): 59-64
- 50) 高志岭, 陈新平, 张福锁, Kogg M, Römheld V. 农田土壤 N_2O 排放的连续自动测定方法. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(1): 64-70
- 51) 武俊喜, 陈新平, 贾良良, 张福锁, Römheld V. 冬小麦/夏玉米轮作中高肥力土壤的持续供氮能力. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(1): 1-5
- 52) 崔振岭, 石立委, 徐久飞, 李俊良, 张福锁, 陈新平. 氮肥施用对冬小麦产量、品质和氮素表观损失的影响研究. 应用生态学报, 2005, 16(11): 2071-2075
- 53) 李俊良, 陈新平, 李晓林, 张福锁. 大白菜氮肥施用的产量效应、品质效应和环境效应. 土壤学报, 2003, 40(2): 261-265
- 54) 刘庆梅, 刘陪军, 朱同贵, 郭跃升, 曲仁国, 蒋庆功, 崔振岭, 陈新平, 张福锁. 氮素实时监控技术在冬小麦上的示范. 中国农技推广, 2005, (5): 36-37
- 55) 马文奇, 张福锁, 陈新平. 中国养分资源综合管理研究的意义与重点. 科技导报, 2006, 22(10): 64-67
- 56) 贾小红, 郭瑞英, 王秀群, 陈清, 张福锁. 菜田养分资源综合管理与可持续发展. 生态环境, 2007, 16(2): 714-718
- 57) 李春俭, 张福锁, 李文卿等. 我国烤烟生产中的氮素管理及其与烟叶品质的关系. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(2): 331-337
- 58) 刘维震, 张宏彦, 江荣风, 张福锁. 露地洋葱施肥、土壤养分及产量状况的分析研究. 土壤通报, 2007, 38(1): 58-63
- 59) 甄兰, 崔振岭, 陈新平等. 25 年来种植业结构调整驱动的县域养分平衡状况的变化-以山东惠民县为例. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(2): 213-222
- 60) 陈新平, 张福锁. 测土配方施肥工作的几个技术问题. 中国农资 - 测土配方施肥专栏, 2006, (1): 48-49
- 61) 陈新平, 张福锁. 通过“3414”试验建立

- 测土配方施肥技术指标体系. 中国农技推广, 2006, 4: 36-39
- 62) 崔振岭, 陈新平, 张福锁, 石立委, 李俊良. 不同灌溉畦长对麦田灌水均匀度与土壤硝态氮分布的影响. 中国生态农业学报, 2006, 14(3): 82-85
- 63) 樊红柱, 同延安, 苹果树各器官中钙素分布研究. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2006, 34(3): 119-121
- 64) 樊红柱, 同延安. 幼果期富士苹果树体各器官钙定量分析. 中国土壤肥料, 2006, 205: 53-55
- 65) 彭福田, 姜远茂. 不同产量水平苹果园氮磷钾营养特点研究. 中国农业科学, 2006, 39(2): 361-367
- 66) 石维, 同延安, 赵营, 樊红柱. 灌溉施肥对冬小麦土壤氮素盈亏的影响. 麦类作物学报, 2006, 26(2): 93-97
- 67) 王平, 田长彦, 陈新平, 张福锁. 南疆棉花施氮量及氮素平衡分析. 干旱地区农业研究, 2006, 24(1): 77-83
- 68) 叶优良, 韩燕来, 王文亮, 黄玉芳. 高产小麦氮肥施用研究进展. 中国农学通报, 2006, 22(9): 264-265
- 69) 张福锁, 陈清, 张晓晟, 何飞飞. 传统蔬菜生产中的养分投入分析及其对环境的影响. 见: 朱兆良等(主编). 中国农业面源污染控制对策. 中国环境科学出版社, 2006, pp.43-59
- 70) 赵营, 同延安, 赵护兵. 不同供氮水平对夏玉米养分累积、转运及产量的影响. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(5): 622-627
- 71) 赵营, 同延安, 赵护兵. 不同施氮量对夏玉米产量、氮肥利用率及氮平衡的影响. 土壤肥料, 2006, 202: 30-33.
- 72) 陈清, 张福锁, 李晓林. 蔬菜生产的氮素调控技术与应用. 中国蔬菜, 2005, 138: 57-64
- 73) 张卫峰, 马文奇, 张福锁, 马骥. 中国、美国、摩洛哥磷矿资源优势及开发战略比较分析. 自然资源学报, 2005, 20(3): 378-386
- 74) 春亮, 陈范骏, 张福锁, 米国华. 不同氮效率玉米杂交种的根系生长、氮素吸收与产量形成. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(5): 615-619
- 75) 郭亚芬, 米国华, 陈范骏, 张福锁. 硝酸盐供应对玉米侧根生长的影响. 植物生理与分子生物学学报, 2005, 31(1): 90-96
- 76) 寇长林, 巨晓棠, 张福锁. 三种集约化种植体系氮素平衡及其对地下水硝酸盐含量的影响. 应用生态学报, 2005, 16(4): 660-667
- 77) 李志宏, 张云贵, 刘宏斌, 张福锁. 叶绿素仪在夏玉米氮营养诊断中的应用. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(6): 764-768
- 78) 鲁剑巍, 陈防, 张竹青, 刘冬碧, 李剑夫, 陈健. 磷肥用量对油菜产量、养分吸收及经济效益的影响. 中国油料作物学报, 2005, 27(1): 73-76
- 79) 曲日涛, 周长青, 宋海燕, 叶优良. 小麦-玉米高产区肥料施肥状况与养分平衡研究. 中国农学通报, 2005, 21(12): 225-229

- 80) 汤丽玲, 陈清, 李晓林, 陈永智, 丁光国. 日光温室秋冬茬番茄氮素供应目标值的研究. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(2): 230-235
- 81) 王克武, 肖艳, 贾小红, 陈清, 曹一平, 张福锁. 滴灌施肥条件下番茄施氮量的确定. 中国蔬菜, 2005, 138: 67-69
- 82) 王克武, 张晓晟, 肖艳, 贾小红, 陈清. 无公害菜田土壤环境评价系统的建立和应用. 生态环境, 2005, 14(3): 378-381
- 83) 王平, 陈新平, 田长彦, 汤庆峰, 张福锁. 新疆南部地区棉花施肥现状及评价. 干旱区研究, 2005, 22(2): 264-269
- 84) 王平, 陈新平, 田长彦, 张福锁. 不同水氮管理对棉花产量、品质及养分平衡的影响. 中国农业科学, 2005, 38(4): 761-769
- 85) 危常州, 候振安, 雷咏雯, 朱和明, 张福锁, 鲍柏杨, 郭琛, 王桂花. 不同地理尺度下综合施肥模型的建模与验证. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(1): 13-20
- 86) 张朝春, 江荣风, 张福锁, 王兴仁. 氮磷钾肥对马铃薯营养状况及块茎产量的影响. 中国农学通报, 2005, 279-283
- 87) 张丽娟, 巨晓棠, 高强, 张福锁. 两种作物对土壤不同层次标记硝态氮利用的差异. 中国农业科学, 2005, 38(2): 333-340
- 88) 张丽娟, 巨晓棠, 张福锁, 毕淑芹, 高强. 小麦各生育期对土壤不同深度标记硝态氮的利用. 中国农业科学, 2005, 38(11): 2261-2267
- 89) 张晓晟, 陈清, 贺建德, 张宏彦, 李晓林. 京郊露地蔬菜平衡施肥产量和养分数据库的建立. 中国蔬菜, 2005, 138 (增刊): 53-57
- 90) 赵荣芳, 陈新平, 张福锁. 基于养分平衡和土壤测试的冬小麦氮素优化管理方法研究. 中国农学通报, 2005, 21(11): 211-225
- 91) 白优爱, 贺建德, 陈清, 李晓林. 京郊保护地秋季番茄的氮素供应及其利用. 中国蔬菜, 2004, 2: 7-9
- 92) 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 不同氮肥施用后土壤各氮库的动态研究. 中国生态农业学报, 2004, 12(1): 92-94
- 93) 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 长期施肥对土壤有机氮组成的影响. 中国农业科学, 2004, 37(1): 87-91
- 94) 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 冬小麦生长期土壤固定态铵与微生物氮的动态研究. 中国生态农业学报, 2004, 12(1): 90-91
- 95) 寇长林, 巨晓棠, 高强, 甄兰, 张福锁. 两种农作体系施肥对土壤质量的影响. 生态学报, 2004, 24(11): 2548-2556
- 96) 李俊良, 刘洪对, 张晓晟, 王秀峰, 陈清. 灌溉方式对露地菠菜的生长及氮素利用的影响. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(4): 398-402
- 97) 吕世华, 任光俊, 曾祥忠, 刘学军, 张福锁. 不同移栽期对强化栽培条件下优质水稻生长和产量的影响. 中国生态农业学报, 2004, 12(2): 138-139
- 98) 汤丽玲, 陈清, 张福锁, 李晓林. 日光温室番茄的氮素追施与反馈调控. 植物营养与

- 肥料学报, 2004, 10(4): 391-397
- 99) 张宏彦, 陈清, 李晓林, 张福锁, Liebig HP. 控制淋洗条件下土壤-花椰菜体系无机氮动态及平衡. 土壤通报, 2004, 35(2): 130-136
- 100) 邹国元, 张福锁, 巨晓棠, 陈新平, 刘学军. 冬小麦-夏玉米轮作条件下氮素反硝化损失研究. 中国农业科学, 2004, 37(10): 1492-1496
- 101) 艾应伟, 刘学军, 张福锁, 毛达如, 曾祥忠, 吕世华, 潘家荣. 不同覆盖方式对旱作水稻氮肥肥效的影响. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(4): 416-419
- 102) 白优爱, 巨晓棠, 陈清, 李晓林. 商品有机肥及蔬菜残体在菜地土壤中的氮素矿化研究. 中国农业科技导报, 2003, 5(2): 45-49
- 103) 包雪梅, 张福锁, 马文奇, 徐文华. 陕西省有机肥料施用状况分析评价. 应用生态学报, 2003, 14(10): 1669-1672
- 104) 陈清, 汤丽玲, 张宏彦, 张晓晟, 李晓林. 水分和氮素供应对菠菜累积硝酸盐和吸收钾素的影响. 应用与环境生物学报, 2003, 9(5): 485-488
- 105) 陈清, 张晓晟, 张宏彦, 吴建繁, 李晓林. 氮素供应对露地胡萝卜的生长及其氮素利用的影响. 中国蔬菜, 2003, 1: 4-6
- 106) 巨晓棠, 张福锁. 氮肥利用率的要义及其提高的技术措施. 科技导报, 2003, 4: 51-54
- 107) 巨晓棠, 张福锁. 关于氮肥利用率的思考. 生态环境, 2003, 12(2): 192-197
- 108) 巨晓棠, 张福锁. 中国北方土壤硝态氮的积累及其对环境的影响. 生态环境, 2003, 12(1): 24-28
- 109) 鲁剑巍, 陈防, 余常兵, 李剑夫, 张竹青. 油菜施钾效果及土壤速效钾临界值初步判断. 中国油料作物学报, 2003, 25(2): 107-112
- 110) 鲁剑巍, 陈防, 张竹青, 李剑夫. 磷钾肥配合施用对油菜产量及养分积累的影响. 华中农业大学资源环境学院. 中国油料作物学报, 2003, 25(2): 52-53
- 111) 马文奇, 张福锁. 化肥高效利用与控制技术. 见: 李文华 (主编), 生态农业-中国可持续农业的理论与实践. 化学工业出版社. 2003, pp.376-401
- 112) 彭福田, 姜远茂, 顾曼如, 束怀瑞. 氮素对苹果果实内源激素变化动态与发育进程的影响. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(2): 208-213
- 113) 王圣瑞, 马文奇, 徐文华, 黎青慧, 张福锁. 陕西省小麦施肥现状与评价研究. 干旱地区农业研究, 2003, 21(1): 31-37
- 114) 杨军, 陈新平, 张福锁, 王兴仁. 应用长期定位试验研究化肥施用的能量效率. 中国农业大学学报, 2003, 8(3): 31-36
- 115) 张宏彦, 陈清, 汤丽玲, 李晓林, 张福锁. 花椰菜残留物氮矿化及其对下茬蔬菜产量及氮吸收的影响. 华北农学报, 2003, 18(3): 102-105
- 116) 张晓晟, 陈清, 张宏彦, 程昌秀, 李晓林. 用于无公害蔬菜生产的氮素平衡推荐决策系统. 农业工程学报, 2003, 19(3): 212-215

- 117) 陈清, 张宏彦, 张晓晟, 李晓林, Liebig HP. N-Expert 专家系统在无公害菠菜生产中的应用. 华北农学报, 2002, 17(4): 128-134
- 118) 陈清, 张宏彦, 张晓晟, 吴建繁, 李晓林. 京郊大白菜的氮素吸收特点及氮肥推荐. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(4): 404-408
- 119) 段宗颜, 肖焱, 肖焱波, 苏凡, 张福锁, 金航, 陈新平, 孔令明, 雷宝坤. 玉米高产栽培的氮肥优化调控技术研究. 中国农业科技导报, 2002, 4(4): 40-43
- 120) 黄生斌, 陈新平, 张福锁. 不同品种冬小麦土壤及植株测试氮肥推荐指标的研究. 中国农业大学学报, 2002, 7(5): 26-31
- 121) 黄生斌, 陈新平, 张福锁. 冬小麦施氮对下茬夏玉米的后效. 中国农业大学学报, 2002, 7(1): 54-58
- 122) 贾良良, 陈新平, 张福锁, 刘宏斌, 吴健繁. 北京市冬小麦氮肥适宜用量评价方法的研究. 中国农业大学学报, 2001, 6(3): 67-73
- 123) 巨晓棠, 边秀举, 刘学军, 张福锁, 毛达如. 旱地土壤氮素矿化参数与氮素形态的关系. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(3): 251-259
- 124) 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 尿素DCD和有机物料配施条件下氮素的转化和去向. 中国农业科学, 2002, 35(2): 181-186
- 125) 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 尿素配施有机物料时土壤不同氮素形态的动态及利用. 中国农业大学学报, 2002, 7(3): 52-56
- 126) 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 小麦苗期施入氮肥在土壤不同氮库的分配和去向. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(3): 259-264
- 127) 巨晓棠, 潘家荣, 刘学军, 陈新平, 张福锁, 毛达如. 高肥力土壤冬小麦生长季肥料氮的去向研究.I 冬小麦生长季肥料氮的去向. 核农学报, 2002, 16(6): 397-402
- 128) 李俊良, 崔德杰, 孟祥霞, 李晓林, 张福锁. 山东寿光保护地蔬菜施肥现状及问题的研究. 土壤通报, 2002, 33(2): 126-128
- 129) 汤丽玲, 陈清, 张宏彦, 张晓晟, 李晓林, Liebig HP. 不同灌溉和施氮措施对露地菜田土壤无机氮残留的影响. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(3): 282-287
- 130) 王朝辉, 刘学军, 巨晓棠, 张福锁. 田间土壤氨挥发的原位测定-通气法. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(2): 205-209
- 131) 王圣瑞, 陈新平, 高祥照, 毛达如, 张福锁. “3414” 肥料试验模型拟合的探讨. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(4): 409-413
- 132) 张福锁, 巨晓棠. 对我国持续农业发展中氮肥管理与环境问题的几点认识. 土壤学报, 2002, 39(增刊): 41-55
- 133) 张宏彦, 陈清, 汤丽玲, 李花粉, 李晓林. 不同水氮管理措施对菠菜产量和水氮利用的影响. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(1): 48-53
- 134) 张宏彦, 陈清, 尤努斯, 汤丽玲, 李晓林. 模拟秋冬季保护地栽培条件下不同基因型菠菜氮素利用及硝酸盐累积特点. 农业环境保护, 2002, 21(3): 237-240
- 135) 朱建华, 李俊良, 李晓林, 张福锁. 几种复

- 合肥施用对蔬菜保护地土壤环境质量的
影响. 农业环境保护, 2002, 21(1): 5-8
- 136) 邹国元, 张福锁. 根际反硝化作用与
 N_2O 释放. 中国农业大学学报, 2002, 7
(1): 77-82
- 137) 邹国元, 赵紫娟, 张福锁, 李新慧. 运用乙
炔抑制 - 静态土柱培养法测定旱地土壤
氮素反硝化损失. 土壤通报, 2002, 33(5):
381-384
- 138) 李俊良, 朱建华, 张晓晟, 孟祥霞, 陈清, 李
晓林, 张福锁. 保护地番茄养分利用及土
壤氮素淋失. 应用与环境生物学报, 2001,
7(2): 126-129
- 139) 李志宏, 张福锁, 郭素英. 菜田土壤有效氮
的动态研究. 土壤通报, 2001, 32(1): 19-21
- 140) 申建波, 张福锁, 毛达如. 底土胁迫效应
与植物根系的适应性. 中国生态农业学
报, 2001, 9(2): 60-63
- 141) 汤丽玲, 陈清, 张宏彦, 李晓林. 不同水
氮处理对菠菜硝酸盐累积和土体硝态氮
淋洗的影响. 农业环境保护, 2001, 20(5):
326-328
- 142) 汤丽玲, 陈清, 张宏彦, 李晓林. 采用试纸
条 - 反射仪方法快速测定蔬菜硝酸盐含
量. 北方园艺, 2001, 5: 9-10
- 143) 袁新民, 杨学云, 同延安, 李晓林, 张福锁.
不同施氮量对土壤 NO_3^- -N 累积的影响.
干旱地区农业研究, 2001, 19(1): 8-12
- 144) 张宏彦, 李俊良, 张晓晟, 李晓林, 张福锁.
复合肥及复合微肥对几种果菜类蔬菜产
量和经济效益的影响. 土壤肥料, 2001, 1:
20-21
- 145) 邹国元, 李新慧, 张福锁, 陈新平. 农田土
壤硝化 - 反硝化作用与 N_2O 的排放. 土壤
与环境, 2001, 10(4): 273-276
- 146) 邹国元, 张福锁, 陈新平, 巨晓棠, 刘学军,
潘家荣. 秸秆还田对旱地土壤反硝化的影
响. 中国农业科技导报, 2001, 3(6): 47-50
- 147) 邹国元, 张福锁, 李新慧. 下层土壤反硝
化作用的研究. 植物营养与肥料学报,
2001, 7(4): 379-384
- 148) 陈新平, 周金池, 王兴仁, 张福锁, 宝德俊,
贾晓红. 小麦 - 玉米轮作制中氮肥效应模
型的选择 - 经济和环境效益分析. 土壤学
报, 2000, 37(3): 346-354
- 149) 陈新平, 周金池, 王兴仁, 张福锁. 冬小
麦、夏玉米不同品种 (系) 之间的氮营
养效率的差异. 中国农业大学学报, 2000,
5(1): 80-83
- 150) 高祥照, 马文奇, 崔勇, 王蓉芳, 张福锁. 我
国耕地土壤养分变化与肥料投入状况. 植
物营养与肥料学报, 2000, 6(4): 363-369
- 151) 刘建安, 米国华, 张福锁. 玉米基因型与
土壤氮素表观平衡. 生态农业研究, 2000,
8(2): 38-41
- 152) 刘建玲, 张福锁, 杨奋翻. 北方耕地和蔬
菜保护地土壤磷素状况研究. 植物营养与
肥料学报, 2000, 6(2): 179-186
- 153) 周顺利, 张福锁, 王兴仁, 米国华, 毛达如.
高产条件下不同品种冬小麦氮素吸收与

- 利用特性比较的研究. 土壤肥料, 2000, 6: 20-24
- 154) 陈清, 张宏彦, 李晓林. 生产无公害蔬菜的几种平衡施氮技术. 北京农业科学, 1999, 17(增刊): 56-60
- 155) 郭李萍, 王兴仁, 张福锁, 陈新平, 毛达如. 不同年份施肥对作物增产效应及肥料利用率的影响. 中国农业气象, 1999, 20(4): 20-23
- 156) 刘建玲, 李仁岗, 张福锁. 小麦-玉米轮作土壤中磷肥化学行为及积累态. 植物营养与肥料学报, 1999, 5(1): 14-20
- 157) 刘学军, 吕世华, 张福锁, 毛达如. 施锰深度对不同基因型小麦缺锰的影响. 应用生态学报, 1999, 10(2): 179-182
- 158) 王兴仁, 李洁茹, 苏德纯, 曹一平, 毛达如. 北京石灰性潮土长期轮作的磷肥合理运筹. 中国农业大学学报, 1999, 4(5): 43-49
- 159) 米国华, 汤利, 张福锁. 两种熟相小麦籽粒建成期的氮素吸收与转运. 中国农业大学学报, 1999, 4(3): 53-57
- 160) 苏德纯, 邹凤春, 张福锁. 不同磷效率基因型冬小麦对土壤磷空间分布不均的反应. 土壤通报, 1999, 30(6): 271-273
- 161) 苏德纯, 任春玲, 王兴仁. 不同水分条件下施磷位置对冬小麦生长及磷营养的影响. 中国农业大学学报, 1998, 3: 55-60
- 162) 苏德纯, 杨奋翮, 张福锁. 北京郊区蔬菜保护地土壤磷空间及形态分布特征. 中国蔬菜, 1999, (4): 7-11
- 163) 吕世华, 罗秦, 刘学军, 张福锁. 四川盆地小麦氮营养的快速诊断及其应用. 中国农业大学学报, 1998, 3(1): 63-67
- 164) 王兴仁, 陈新平, 张福锁, 毛达如. 施肥模型在我国推荐施肥中的应用. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(1): 67-74
- 165) 陈新平, 张福锁. 可持续农业中的推荐施肥. 化肥工业, 1996, 23(3): 7-10
- ### 3. 最新发表文章 (其中英文7篇, 中文15篇)
- 166) Cui ZL, Zhang FS, Chen XP, Miao YX, Li JL. On-farm evaluation of an in-season nitrogen management strategy based on soil Nmin test. Field Crops Res., 2008, 105: 48-55
- 167) Zhang Y, Liu XJ, Fangmeier A, Goulding C, KTW, Zhang FS. Nitrogen inputs and isotopes in precipitation in the North China Plain. Atmos. Environ., 2008, 42: 1436-1448
- 168) Zhang Y, Zheng LX, Liu XJ, Jickells T, Capec JN, Goulding C, KTW, Fangmeier A, Zhang FS. Evidence for organic N deposition and its anthropogenic sources in China, Atmos. Environ., 2008, 42: 1035-1041
- 169) Shou LN, Jia LL, Cui ZL, Chen XP, Zhang FS. Using high-resolution satellite imaging to evaluate nitrogen status of winter wheat, J. Plant Nutr., 2007, 30:1669-1680
- 170) Fan MS, Lu SH, Jiang RF, Liu XJ, Zeng XZ, Goulding KWT, Zhang FS. Nitrogen input,

- ¹⁵N balance and mineral N dynamics in a rice-wheat rotation in southwest China, *Nutr. Cycl. Agroecosyst*, 2007, 79:255-265
- 171) Liu XJ, Mosier AR, Halvorson AD, Reule CA, Zhang FS. Dinitrogen and N₂O emissions in arable soils: Effect of tillage, N source and soil moisture. *Soil Biol. Biochem.*, 2007, 39: 2362-2370
- 172) Zhang XS, Liao H, Chen Q, Christie P, Li XL. Response of tomato in calcareous soil to different application rates of seedbed phosphorus fertilizer. *Pedosphere*, 2007, 17(1): 70-76
- 173) 崔振岭, 陈新平, 张福锁, 徐久飞, 石立委, 李俊良. 华北平原冬小麦/夏玉米轮作体系土壤硝态氮的适宜含量. *应用生态学报*, 2007, 18(10): 2227-2232
- 174) 高强, 巨晓棠, 张福锁. 几种新型氮肥对叶菜硝酸盐累积和土壤硝态氮淋洗的影响. *水土保持学报*, 2007, 21(1): 9-13
- 175) 米国华, 陈范骏, 春亮, 郭亚芬, 田秋英, 张福锁. 玉米氮高效品种的生物学特征. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(1): 155-159
- 176) 苏芳, 丁新泉, 高志岭, 黄彬香, 陈新平, 张福锁, Kogge M, Römheld V. 华北平原冬小麦-夏玉米轮作体系氮肥的氨挥发. *中国环境科学*, 2007, 27(3): 409-413
- 177) 陶芾, 滕婉, 李春俭, 张福锁. 我国烤烟生产体系中的养分平衡. *中国烟草科学*, 2007, 28(3):1-5
- 178) 王激清, 马文奇, 江荣风, 张福锁. 中国农田生态系统氮素平衡模型的建立及其应用. *农业工程学报*, 2007, 23(8): 210-215
- 179) 王兴仁, 江荣风, 刘全清, 王方浩, 张福锁. 施肥与环境的关系. *磷肥与复肥*, 2007, 22(5):10-14
- 180) 许秀成, 张福锁. 养分资源综合管理与肥料创新-探索化肥行业发展之道. *磷肥与复肥*, 2007, 22(3):1-6
- 181) 杨俊刚, 崔振岭, 张福锁, 陈新平, 黄绍敏, 宝德俊. 应用养分资源综合管理技术研发河南优质小麦专用肥. *磷肥与复肥*, 2007, 22(5):71-73
- 182) 杨莉琳, 张福锁, 毛仁钊, 高强, 巨晓棠. 华北平原农田生态系统土壤 C、N 净矿化及尿素转化研究. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(5): 824 - 830
- 183) 张福锁, 崔振岭, 王激清, 李春俭, 陈新平. 中国土壤和植物养分管理现状与改进管理. *植物学通报*, 2007, 24(6): 687-694
- 184) 张丽娟, 巨晓棠, 张福锁, 彭正萍. 土壤剖面不同层次标记硝态氮的运移及其后效. *中国农业科学*, 2007, 40(9):1964-1972
- 185) 张四代, 王激清, 张卫峰, 王利, 马文奇, 张福锁. 我国东北地区化肥消费与生产现状、问题及其调控策略. *磷肥与复肥*, 2007, 22(5):74-78
- 186) 赵荣芳, 邹春琴, 张福锁. 长期施用磷肥对冬小麦根际磷、锌有效性及其作物磷锌营养的影响. *植物营养与肥料学报*,

2007, 13(3):368-372

- 187) 马文奇, 张福锁. 食物链养分管理——中国可持续发展面临的挑战. 科技导报, 2008, 26(1): 68-73.

4. 培养研究生论文目录

博士论文 34 篇

- 1) Chen Q. 2003. Development of controlling tools in irrigation and fertilization for vegetable production in the North China Plain. University of Hohenheim. Stuttgart. Germany.
- 2) Chen. XP. 2003. Optimization of the N fertilizer management of a winter wheat/summer maize rotation system in the Northern China Plain. University of Hohenheim. Stuttgart. Germany.
- 3) 何飞飞. 2006. 设施番茄生产体系的氮素优化管理及其环境效应研究. 导师: 江荣风
- 4) 刘维震. 2006. 日光温室黄瓜和露地洋葱氮素养分综合管理技术研究. 导师: 江荣风
- 5) 秦艳青. 2006. 不同氮肥用量和施用方式对烤烟生长、产量和质量的影响. 导师: 张福锁
- 6) 石秋梅. 2006. 不同机械损伤对烤烟体内烟碱浓度的影响及其可能的调节机制. 导师: 李春俭
- 7) 赵荣芳. 2006. 冬小麦-夏玉米轮作水氮资源优化管理体系的可持续性评价. 导师: 毛达如、张福锁、陈新平
- 8) 崔振岭. 2005. 华北平原冬小麦-夏玉米轮作体系优化氮肥管理-从田块到区域尺度.

导师: 张福锁, 陈新平

- 9) 王平. 2005. 南疆高产棉田水氮优化管理研究. 导师: 张福锁, 陈新平
- 10) 张晓晟. 2005. 京郊地区集约化蔬菜生产中氮素综合管理系统的建立和应用. 导师: 李晓林, 张福锁, 陈清
- 11) 春亮. 2004. 玉米氮高效品种选育及根系形态对低氮反应的遗传分析. 导师: 张福锁
- 12) 高志岭. 2004. 冬小麦/夏玉米轮作体系农田土壤 N_2O 排放和 CH_4 吸收特征. 导师: 张福锁, 陈新平
- 13) 郭亚芬. 2004. 玉米根系对局部供应硝酸盐反应的基因型差异及可能的生理调控机制. 导师: 毛达如, 张福锁, 米国华
- 14) 寇长林. 2004. 华北平原集约化农作区不同种植体系施用氮肥对环境的影响. 导师: 张福锁, 巨晓棠
- 15) 汤丽玲. 2004. 日光温室番茄的氮素追施调控技术及其效益评估. 导师: 李晓林, 陈清
- 16) 张丽娟. 2004. 农田生态系统中残留硝态氮的行为及植物利用. 导师: 张福锁, 巨晓棠
- 17) 高强. 2003. 土壤剖面不同位置累积硝态氮的作物有效性及去向. 导师: 张福锁, 巨晓棠
- 18) 石孝均. 2003. 水旱轮作体系中的养分循环特征. 导师: 张福锁
- 19) 李燕婷. 2002. 酸性根际肥的研制及其在石灰性土壤上的施用效果评价. 导师: 张福锁
- 20) 王圣瑞. 2002. 陕西省和北京市主要作物施肥状况与评价. 导师: 张福锁

- 21) 张宏彦. 2002. 露地无公害蔬菜生产氮素平衡管理的研究. 导师: 李晓林, Liebig HP.
- 22) 朱建华. 2002. 蔬菜保护地氮素去向及其利用研究. 导师: 李晓林, 张福锁
- 23) 李俊良. 2001. 莱阳、寿光两种不同种植模式中蔬菜施肥问题的研究. 导师: 张福锁
- 24) 潘家荣. 2001. 华北平原冬小麦/夏玉米轮作体系于体系中化肥氮的去向. 导师: 张福锁
- 25) 邹国元. 2001. 冬小麦/夏玉米轮作体系中肥料氮的硝化-反硝化作用研究. 导师: 张福锁
- 26) 高祥照. 2000. 中国肥料使用现状评价与发展战略研究. 导师: 毛达如, 张福锁
- 27) 巨晓棠. 2000. 冬小麦/夏玉米轮作体系土壤中肥料氮的转化及去向. 导师: 张福锁
- 28) 刘兆辉. 2000. 山东大棚蔬菜土壤养分特征及合理施肥研究. 导师: 李晓林, 张福锁
- 29) 周顺利. 2000. 高产条件下冬小麦、夏玉米氮营养特性的基因型差异及氮肥推荐. 导师: 毛达如, 张福锁
- 30) 李志宏. 1999. 土壤、植株测试推荐施氮技术的研究及应用. 导师: 张福锁, 郭素英
- 31) 刘建玲. 1999. 石灰性土壤中磷肥转化及其影响因素研究. 导师: 张福锁
- 32) 马文奇. 1999. 山东省作物施肥现状、问题与对策. 导师: 毛达如, 张福锁
- 33) 袁新民. 1999. 黄土高原地区土壤硝态氮的累积及影响因素. 导师: 李晓林, 张福锁
- 34) 郭李萍. 1998. 北京潮土小麦—玉米轮作

条件下施肥综合效应的定位研究. 导师: 张福锁

硕士学位论文 48 篇

- 1) 高域. 2006. 水稻养分资源综合管理优化技术体系的建立与应用. 导师: 申建波
- 2) 蔡鸿光. 2006. 松辽平原玉米带玉米氮素效率基因型差异及综合效益分析. 导师: 高强
- 3) 曹国良. 2006. 不同栽培模式对稻油轮作体系生产力与氮素利用的影响. 导师: 刘学军
- 4) 初明光. 2006. 山东省养分投入现状调查. 导师: 张福锁
- 5) 樊红柱. 2006. 苹果树体生长发育、养分吸收利用与累积规律. 导师: 同延安
- 6) 樊惠. 2006. 滴灌条件下氮素调控对保护地生菜生长及品质的影响. 导师: 李晓林
- 7) 彭丽华. 2006. PSNT 技术在设施栽培黄瓜氮素养分管理中的应用. 导师: 陈清
- 8) 谭庆军. 2006. 我国 BB 肥产业发展的问题分析与对策. 导师: 陈新平
- 9) 肖敏. 2006. 长期施肥对土壤碳贮量及氮素矿化动力学的影响. 导师: 巨晓棠
- 10) 杨俊刚. 2006. 提高小麦、玉米氮肥利用率的肥料新产品研究. 导师: 陈新平
- 11) 赵营. 2006. 冬小麦/夏玉米轮作体系下养分吸收利用与累积规律及优化施肥研究. 导师: 同延安
- 12) 郑利霞. 2006. 华北平原雨水有机氮的定量研究. 导师: 刘学军
- 13) 丁新泉. 2005. 华北平原冬小麦-夏玉米轮

- 作体系氮肥的氨挥发. 导师: 陈新平
- 14) 郭金强. 2005. 北疆棉花膜下滴灌水肥耦合规律的研究. 导师: 危常州
- 15) 石 维. 2005. 小麦 - 玉米栽培条件下的硝酸盐淋失与氮素利用. 导师: 同延安
- 16) 杨倩. 2005. 不同土地利用方式对土壤碳素平衡影响的研究. 导师: 王敬国
- 17) 张玉铭. 2005. 华北太行山前平原冬小麦-夏玉米轮作农田氮素循环与平衡研究. 导师: 张福锁, 陈新平
- 18) 赵登超. 2005. 树形改造对红富士苹果生长和结果的影响. 导师: 姜远茂
- 19) 邹修华. 2005. 营养诊断技术在胶东红富士苹果上的应用研究. 导师: 姜远茂
- 20) 张旭. 2004. 北京地区水稻地表覆盖旱作中温室气体排放. 导师: 林杉, 郑循华
- 21) 钟茜. 2004. 华北平原冬小麦/夏玉米轮作体系对氮素环境承受力的研究. 导师: 张福锁
- 22) 周敏. 2004. 球肥对几种蔬菜生长及氮素利用的影响. 导师: 江荣风, 陈清
- 23) 白优爱. 2003. 京郊保护地番茄养分吸收及氮素调控研究. 导师: 李晓林, 陈清
- 24) 杜安刚. 2003. 新型硝化抑制剂 DMPP 和 BASF 复合肥在不同作物上的应用效果. 导师: 毛达如, 张福锁, 巨晓棠
- 25) 刘向生. 2003. 玉米磷效率基因型差异的生理及遗传分析. 导师: 米国华
- 26) 任智慧. 2003. 京郊露地菜田土壤硝酸盐淋洗变化及阻控对策. 导师: 李花粉, 陈清
- 27) 王瑞芳. 2002. 覆膜旱作条件下水稻氮素营养和土壤氮素转化的研究. 导师: 林杉
- 28) 武俊喜. 2003. 冬小麦/夏玉米轮作体系中土壤供氮能力的研究. 导师: 张福锁, 陈新平
- 29) 杨军. 2003. 华北平原小麦玉米生产中施肥的能量效率. 导师: 张福锁, 陈新平
- 30) 张朝春. 2002. 马铃薯优化堆荐施肥技术体系的研究. 导师: 张福锁, 江荣风
- 31) 张晓晟. 2002. 氮素专家系统的建立及其在京郊露地菜田的应用. 导师: 李晓林
- 32) 赵荣芳. 2002. 基于养分平衡和土壤测试的农田养分资源管理方法研究. 导师: 陈新平
- 33) 黄生斌. 2001. 不同基因型高产冬小麦氮肥推荐指标及氮营养效率的研究. 导师: 陈新平
- 34) 李秋梅. 2001. 高肥力土壤上冬小麦/夏玉米轮作中磷钾肥合理施用的研究. 导师: 陈新平
- 35) 刘 坤. 2001. 不同灌溉策略下冬小麦根系的分布与水分, 养分的空间有效性. 导师: 张福锁, 陈新平
- 36) 汤丽玲. 2001. 水分和氮素供应对菜田土壤 - 作物体系中硝酸盐累积的影响. 导师: 李晓林
- 37) 贾良良. 2000. 冬小麦氮肥推荐技术的研究. 导师: 陈新平
- 38) 袁福生. 2000. 应用传递函数模型随机模拟土壤中硝态氮的淋洗. 导师: 张福锁
- 39) 张晓峰. 2000. 新疆棉花专用叶面肥的研制. 导师: 曹一平

- 40) 崔建宇. 1999. 磷胁迫对植物活化利用矿物钾的影响及其机理研究. 导师: 张福锁
- 41) 贾小红. 1999. 北京地区土壤培肥与冬小麦推荐施肥技术的研究. 导师: 张福锁, 曹一平
- 42) 鲁剑巍. 1999. 油菜对钾的反应及钾肥有效施用配套技术的研究. 导师: 曹一平, 陈坊
- 43) 杨奋翻. 1999. 蔬菜保护地土壤磷形态及其迁移转化特征. 导师: 李和生, 张福锁
- 44) 曾长立. 1999. 冬小麦-夏玉米轮作高产条件下氮素调控技术的研究. 导师: 张福锁
- 45) 张宏彦. 1999. 几种复合肥及复合微肥在山东省主要蔬菜作物上应用效果的研究. 导师: 张福锁, 李晓林
- 46) 江华. 1998. 冬小麦—夏玉米轮作高产中土壤植株诊断的施肥技术研究. 导师: 张福锁
- 47) 周金池. 1997. 冬小麦—夏玉米轮作条件下氮素营养综合诊断推荐施肥技术的研究. 导师: 王兴仁, 张福锁
- 48) 王山虎. 1996. 土壤硝化, 反硝化过程的空间变异性及 N_2O 的产生. 导师: 王敬国

5. 举办的重要国际会议

- 1) 2000.3.20-26 Sino-German Workshop on “Studies on Sustainable Farming Systems in the Northern China Plain”, Beijing
- 2) 2001.4.2-6. Sino-German workshop on “Studies on Sustainable Farming Systems in the Northern China Plain”, Beijing, China
- 3) 2001.8.10-12. International Workshop on Tobacco Nutrition and Fertilization, Yuxi, China
- 4) 2001.12.12-14. Sino-German Workshop on “Sustainable Agricultural Production in China-Special attention to socio-economic process as well as to food quality and security”
- 5) 2002.4.4-7. Sino-German Workshop on Recycling of Organics, Beijing
- 6) 2004.4.5-8. UNESCO/ BMBF International Conference on Sustainable Resource Management for Intensive Agriculture Systems, Beijing, China
- 7) 2004.7.5-7. Sino-German workshop on “Modelling Material Flows and Production System for Sustainable Resource Use in Intensified Crop Production in the North China Plain”
- 8) 2004.7.14-20. International Training Course on Plant Nutrition, Yunan, China
- 9) 2004.10. The 1st Block Seminar on Sino-Germany Project of Sustainable Resource Use in intensified Crop Production in the North China Plain, Beijing
- 10) 2004.10. International Workshop on “Nitrogen Cycling and Environment Impact”, Beijing
- 11) 2005.4.4-8. The 2nd Sino-German Block-Seminar on Sustainable Resource Use in intensified Crop Production in the North China Plain, Beijing
- 12) 2005.9. Annual Meeting of Harvestplus-

- | | |
|---|---|
| <p>China 2005. Beijing, China</p> <p>13) 2005.9.14-19. XV International Plant Nutrition Colloquium, Beijing</p> <p>14) 2005.9.20-24. International Symposium on Fertilization, Beijing</p> <p>15) 2005.12.12-16. FAO Regional Workshop on Improving Plant Nutrient Management for Better Farmer-Livelihood, Food Security and Environment, Beijing</p> <p>16) 2006.3.19-24. The 4th Sino-German Block-Seminar on Sustainable Resource Use in Intensified Crop Production in the North</p> | <p>China Plain, Beijing</p> <p>17) 2006.6.15-18. Sino-German Workshop on Crop Nitrogen Management, Beijing</p> <p>18) 2006.9.19-21. Workshop on Higher Yield and Higher NUE of Maize, Beijing</p> <p>19) 2007.3.25-31. The 6th Sino-German Block-Seminar on Sustainable Resource Use in Intensified Crop Production in the North China Plain, Beijing</p> <p>20) 2007.11.8-10. Sino-EU Workshop on Nutrient Management, Wageningen, The Netherlands</p> |
|---|---|

6. 张福锁教授应邀到国外机构和国际会议所做英文报告

项目主持人张福锁教授应邀到印度、韩国、日本、美国、德国、荷兰等 13 个国家介绍中国经验，被 IFA 作为集约化农业养分管理的典型，参与制定全球作物养分管理战略。

报告年份	地点	会议名称	报告题目
2008.4.13-18	Jeju, Korea	5 th International Crop Science Congress	Nutrient management in crop production system for agro-ecosystem sustainability
2007.12.5-7	New Delhi, India	2007 FAI Annu. Seminar	Improving fertilizer use efficiency through management practices-China experience
2007.11.8	Wageningen, Netherlands	Lunch Seminar	Intercropping for improving resource use and crop yield
2007.11.6	Wageningen, Netherlands	Workshop on Conservation Agriculture	Can crop yield, nutrient use efficiency and soil productivity be increased at the same time?
2007.11.1-2	Shanghai, China	China/Asia Fertilizer Markets and Technology Conference	The future of China's fertilizer production and use
2007.10.22-24	Beijing, China	International workshop on Aerobic Rice	Bioavailability of zinc to aerobic rice
2007.10.1-5	Costa do Sauípe-Bahia Brazil	4 th World Nitrogen Conference	Nutrient management in China-Accomplishments, problems and challenges.

续表

报告年份	地点	会议名称	报告题目
2007.9.13-14	Beijing, China	International symposium on sustainable land-use in China: The contribution of collaborative Sino-German research	Material flows and pollution analysis in the NCP
2007.8.20-22	Beijing, China	中美生态环境前沿讨论会	Nutrient Management in China-From production systems to the food chain
2007.5.21-24	Istanbul, Turkey	The 75 th Annual Meeting of IFA	Fertilizer Management in China: Challenges and Opportunities
2007.5.24-28	Istanbul, Turkey	Second International symposium on Zinc Interactions in Soil Plant System (Zinc Crops 2007)	Soil and crop management for improving zinc nutrition of crops
2007.5.19-21	Wageningen, Netherland	Workshop of Nutrient Management	Nutrient management in China-From production systems to the food chain
2007.5.14-16	Beijing, China	Sino-Dutsch workshop on Future international collaboration	Multidisciplinary international cooperation: An experience of Sino-German collaboration
2007.4.13-15	Jiangxi, China	Sino-German symposium on Soil and Environment	Improved nutrient management in cropping systems in China
2007.3.21-23	Stuttgart, Germany	欧洲有机农业大会	A perspective on organic agriculture in China: Opportunities and challenges
2007.3.6-10	Brussel, Belgium	International Workshop on Fertilizer Best Management Practices	Principles, dissemination, and perspective of FBMPs developed in China
2006.12.10-17	Taiwan, China	海峡两岸土壤肥料学术交流会	Nutrient Management in China: From production systems to the food chain
2006.11.30-12.2	JeJu, South Korea	5 th International Crop Science Pre-conference: International Symposium on Crop Science and Biotechnology in the 21st Century	Nutrient management in China-Form production systems to the food chain
2006.11.22-25	Ludhiana, India	International Symposium on Balanced Fertilization for Sustaining Crop Productivity	Nutrient management in main cropping systems in China
2006.9.20-22	Suwon, South Korea	International Symposium on Nitrogen Behavior and Management Systems in Agro-ecosystems.	Nutrient management in two agro-ecosystems in China

续表

报告年份	地点	会议名称	报告题目
2006.9.19-20	Beijing, China	Miniworkshop on higher yield and NUE in maize	Nutrient management for maize production in China
2006.9.11-15	Yunnan, China	Sino-Japan Symposium on Plant Nutrition	Reduction of nitrogen fertilizer in rice production in China
2006.6.15-18	Beijing, China	Sino-German Workshop on Reduction of the Excessive Mineral Nitrogen	Fertilization in Intensive Chinese Agriculture Nitrogen Management in Chinese Cropping Systems
2006.2.27-3.2	Yunnan, China	IFA Agriculture Conference, Optimizing Resource Use Efficiency for Sustainable Intensification of Agriculture	Sustainable use of plant nutrients in China
2005.12.10-17	Beijing, China	FAO "Regional Workshop on Improving Plant Nutrient Management for Better Farmer-Livelihood, Food Security and Environment"	Nutrient management in China-From production systems to the food chain
2005.11.29-12.2	Xi'an, China	Sino-British Workshop on Agricultural Technology	Nutrient management in China-From production systems to the food chain
2005.9.20-24	Beijing, China	International Symposium on Fertigation	Nutrient management in crop production systems in China
2005.9.14-19	Beijing, China	15 th International Plant Nutrition Colloquium	Nutrient management in China- From production systems to the food chain
2005.4.4-8	Adelaide, Australia	2 nd International Congress of Biogeochemistry of Trace Element	Micronutrients and micronutrition of soils and crops in China
2004.11.15-16	Beijing, China	Harvestplus-China Symposium	Iron and zinc mobilization and uptake by cereal plants
2004.10.12-16	Nanjing, China	3 rd World Nitrogen Conference	Utilization and management of organic manures in China
2004.10.11	Hangzhou, China	International Symposium on Trace Elements and Ecosystem Health	Micronutrient deficiencies in aerobic rice
2004.9	Munich, Germany	1 st International Congress of Rhizosphere	Rhizosphere management for improving crop yield and nutrient use efficiency in China
2004.7.5-7	Beijing, China	Sino-German Workshop on DNDC model	Possibilities and limitations in modeling and C flows in cropping systems of the Northern China Plain

续表

报告年份	地点	会议名称	报告题目
2004.5.15-22	Kiel, Germany	Sino-German Workshop on Sustainable Land Use	Intercropping: An traditional innovatable farming system for sustainable agriculture
2004.4.11-16	Tokyo, Japan	XII international Symposium on Interactions of Iron Soil-Plant Systems	Remediation of iron deficiency in crops
2004.4.5-7	Beijing, China	International conference on "Resource Management for Sustainable Intensive Agriculture Systems	Ecological research: The Sino-German project on sustainable agricultural production in Northern China-Recommendations for farmers and policy makers
2003.9	Perth, Austrilia	2 nd International Symposium on Phosphorus Cycling in Soil-Plant Continuum	Do interspecific interactions reduce phosphorus fertilizer rates in the faba bean/maize intercropping?
2003.11	Beijing, China	3 rd Pacific-Asia Symposium on Soil Contaminants	Root apoplast and root surface: A factor influncing metal accumulation from soil and in plants
2003.10	Nanjing, China	Sino-German Workshop on Soil Environment	Rhizosphere processes in major cropping systems in China
2003.9	Nanjing, China	International Workshop on Integrated soil, Water and Nutrient Management for Sustainable Rice-Wheat Cropping Systems in Asia	Nutrient management in rice-wheat rotation in Sichuan
2003.3.17-19	Beijing, China	Sino-Geman workshop	Environmental acceptable and sustainable agriculture with high yield and high productivity in the Northern China plain
2002.11	Wangenngen The Netherland	International Symposium on Food-Based Interventions to Alleviate Nutrient Deficiency: From Natural Resource to Healthy People	Zinc deficiency in aerobic rice
2002.10	Beijing, China	International Workshop on Plant-Soil Interactions	Rhizosphere management in China
2002.9.4-6	Beijing, China	International Workshop on Potassium	Nutrition of plants, possibility to increase potassium content in flue-curd tobacco in Yunnan

续表

报告年份	地点	会议名称	报告题目
2002.8	Wier, Austria	Advanced International Training Course on Rhizosphere	Rhizosphere management in Chinese agriculture
2002.8.14-21	Banvov Tailand	17 th World Congress of Soil Science	Studies on rhizosphere dynamics towards the exploitation of cropping potential for nutrient utilization in China
2002.7.8-10	Nanjing, China	International Symposium on Non-point source pollution	Optimizing nitrogen fertilization to minimize nitrate accumulation in soils in China
2002.5.6-7	Guangzhou, China	International Workshop on P Nutrition in Soil and Plant	Agronomic and ecological aspects of nutrient efficiency, the case of China
2002.4	Beijing, China	Sino-German Workshop on Recycling of Organic Waste	Organic wastes and nutrient recycling in China
2001.12-12-14	Beijing, China	Sino-German Workshop on Efficient Use of Nutrient in Agriculture	Strategies to increase nutrient use efficiency in crop production in China
2001.11	Perth, Australia	International Symposium on Cluster Roots	Interspecific competitive and facilitative interactions in intercropping system
2001.8.3-9	Beijing, China	World Fertilizer Congress	Agronomic and ecological aspects of nitrogen fertilizer application in China
2001.7	Hannover, Germany	14 th International Plant Nutrition Colloquium	Contribution of above and below-ground interactions to intercropping advantage
2000.09	Beijing, China	First International Symposium on Phosphorus Cycling in Soil-Plant Continuum	Genotypical variation for P efficiency-a case study with wheat
1998.11	Kiel, Germany	Sino-German Workshop on Plant Nutrition	Role of plant nutrition in Chinese agricultural development
1997.9	Tokyo, Japan	13 th International Plant Nutrition Colloquium	Phosphorus deficiency enhances root exudation of low-molecular weight organic acids and utilization of sparingly soluble inorganic phosphates by radish (<i>Raghanus satiuvs</i> L.) and rape (<i>Brassica napus</i> L.) plants
1997.7.20-25	Hohenheim, Germany	International Symposium on Interactions of Iron in Soil-Plant Systems	Intercropping improves iron nutrition of peanut plant by maize

7. 项目支持

- 1995—1997年北京市基金委重点项目6951001 “作物根层氮素动态及生物调控机理的研究”, 杨志福、张福锁教授主持, 经费数额: 17万元
- 1996—2000年引进国际先进农业技术项目961061 “土壤植株测试推荐施肥”, 张福锁教授主持, 15万美元 60万人民币 (共180万)
- 1998—2001年北京市自然科学基金重大项目6980001 “北京地区小麦玉米氮肥推荐技术的研究与应用”, 张福锁教授主持, 经费数额: 60万
- 1998—2003年中德合作项目BMBF0339712A “华北平原高产高生产力条件下环境可承受的持续农业研究”, 张福锁教授主持, 经费数额: 173万马克配套30万人民币 (共722万)
- 2000—2002年农业部丰收计划200073020101 “可持续农业的优化施肥与节水技术”, 江荣风教授主持, 经费数额: 25万元
- 2000—2002年国家自然科学基金39900085 “环境保护与高产高效多目标并重的推荐施肥方法研究”, 陈新平教授主持, 经费数额: 13万元
- 2001—2004年国家“十五”科技攻关重点项目(2002BA516A02) “氮肥污染控制技术的研究”, 张福锁教授主持, 经费数额: 240万元
- 2002—2003年农业部精确农业项目“土壤、植株测试诊断技术在精确农业中的应用研究”, 江荣风教授主持, 经费数额: 20万元
- 2003—2005年引进国际先进农业科学技术项目2003-Z53 “养分资源综合管理技术引进与中国技术体系的建立和应用”, 张福锁教授主持, 经费数额: 1100万元
- 2003—2005年国家自然科学基金倾斜项目30270772 “华北平原小麦/玉米轮作中推荐施肥技术的应用基础研究”, 张福锁教授主持, 经费数额: 40万元