

养分资源管理的理论和技术及其在 小麦玉米高产轮作中的应用

王兴仁 张福锁 曹一平 陈新平 江荣凤

(中国农业大学 资源与环境学院,北京 100094)

摘要 本文以高产小麦、玉米轮作为例,阐述了养分资源综合管理的理论、技术及其应用,展示了在轮作施肥运筹、作物氮营养基因型与施肥调控的关系、施肥与节水灌溉等农业管理措施的优化组合等方面的研究结果。

关键词 养分资源; 综合管理; 小麦和玉米; 高产轮作

中图分类号 S 147

文章编号 1007-4333(2003)S0-0036-06

文献标识码 A

The theory and technology of nutrient resources integrated management and their application on high yield wheat-maize rotation system

Wang Xingren, Zhang Fusuo, Cao Yiping, Chen Xinping, Jiang Rongfeng

(College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100094, China)

Abstract This paper reviews the theory and technology of nutrient resource integrated management and their application on high yield wheat-maize rotation system. It also discusses the management of fertilization, the relationship of genotypic differences in nitrogen nutrition of crops and fertilization managements, and the optimized combination of the agricultural managements of fertilizer and water-saving irrigation.

Key words nutrient resources; integrated management; wheat and maize; high-yield rotation system

1985年以来,中国农业大学植物营养系与有关单位合作,先后承担了国家“七五”、“八五”、“九五”科技攻关项目——黄淮海平原施肥专题的研究。其中,“七五”以曲周县为主要试验基地,在多点田间试验的基础上,通过氮磷肥料效应模式和土壤肥力评判,对小麦、玉米等作物实现了定量化配方施肥^[1-3]。在此基础上,“八五”研究建立了“可持续发展中作物优化施肥技术系统”,在推荐施肥时考虑到冬小麦-夏玉米轮作中的施肥后效和气候年度变异,评价施肥效果时考虑到施肥对土壤肥力和 NO_3^- -N土壤剖面分布等环境因素的影响,周年双季亩产达到近吨粮水平,氮磷肥用量更为节省,其中磷肥节省30%以上^[4]。“九五”期间与农学专家合作,研究了黄淮海平原土壤氮磷钾养分的时空变异规律和与之相适应的动态平衡施肥技术,提出了“冬小麦-夏玉米吨粮高产节肥省水条件下农田综合管理技术模式”^[5]。“九五”后,进一步扩大研究领域和应用范围,建立了“作物养分实时监测和施肥调控技术

(RTNMRT)”。

在完成施肥专题研究过程中,涉及到了养分资源宏观管理的基础理论研究,从现代生态农业和可持续发展的高度,对植物营养和施肥问题的认识形成了养分资源综合管理的理论和技术。

1 养分资源综合管理的理论和原则

1.1 养分资源管理的基本理论

植物生产中的养分都具有资源属性,人们把植物-动物生产系统中来自土壤、肥料和环境中的养分统称为养分资源^[6,7],养分资源管理的基本理论含义:

1) 视植物-动物生产过程为一个系统,将土壤、肥料和环境所提供的养分均作为养分资源。

2) 将系统中养分的投入与产出的平衡、提高养分循环与利用的强度作为养分资源综合管理的核心,根据不同营养元素的土壤、肥料效应的时空变异特点,采用实时监测方法进行不同的施肥调控。

收稿日期:2003-09-18

基金项目:国家重点科技攻关资助项目(96-004-01-14)

作者简介:王兴仁,教授;张福锁,教授,博士生导师,联系作者,主要从事植物营养和养分资源管理研究。

3) 施肥是农田养分调控的主要手段,但调控目标不仅是作物的优质高产,还有优化农业生态系统中物质和能量的循环,协调优质高产、土壤肥力和良性生态环境之间的辩证关系,保证农业的可持续发展。

4) 农田养分管理是养分资源综合管理的一个环节。将改进施肥技术,与挖掘植物高效利用养分的生物学途径相结合,将科学施肥与优化耕作栽培管理相结合是农田养分管理的3个主要方面。

1.2 养分资源综合管理的技术原则

养分资源综合管理涉及生态系统食物链的各个环节,它包括4个方面:

- 1) 农田养分和肥料效应时空变异的监测和施肥调控;
- 2) 提高养分利用效率的生物学途径;
- 3) 施肥技术与其它农学措施的结合;
- 4) 养分收支平衡的环境量化评估。

其中以农田养分变异的实时监测和施肥调控最为重要。

1.2.1 农田养分施肥调控技术模式 技术模式是合理施肥必须遵循的技术框架。它与平衡施肥的基本原则相一致,但其不限于一个生长季或一个田块的肥料养分配比,而是从养分资源视点出发,针对不同营养元素的土壤和肥料效应的时空变异规律,将土壤养分的供应持续调控在作物所需要的适宜水平。氮磷钾和微量元素等肥料的施肥原则可以概括为:“调控施用氮肥,监控施用磷钾肥,矫正施用中、微量元素肥料,配合施用有机肥”^[8,9]。

1) 调控施用氮肥 氮肥效应的时空变异具有总体稳定性和局部变异性。稳定性是指在一定农业生态条件下和时空范围内,土壤氮水平、氮肥效应及氮肥施用量是相对稳定的;变异性主要表现在氮肥在土壤中的残效较小,土壤游离氮的形态和含量变异较大,作物对过量施氮的反应较磷、钾更为敏感,由氮在生态系统中的活跃性所决定,氮肥施用不当对大气、水等造成的损失较大。据此,在一定条件下可将氮肥施用量控制在作物达到最适产量和品质目标要求的范围内,以此为基础,通过土壤、植物测试确定具体田块或作物的推荐施肥量。

2) 监控施用磷钾肥 土壤的磷钾养分和肥料效应具有累积性和连续变异的特点,变异的程度和方向是土壤养分和肥料效应之间动态平衡的结果。中、长期肥料定位试验证明,可以将获得作物持续较

高产量并维持土壤有效磷钾不低于或在临界值的施肥量为合理施肥量。既可保持施肥量的相对稳定,又可节约用量,采用定期监测土壤有效磷钾养分和年度间产量变化趋势的方法,决策推荐施肥量。

3) 矫正施用中、微量元素肥料 并非所有土壤和作物都需要施用中、微量元素肥料^[10]。看缺素与否,借助于土壤测试或植株诊断等方法确定。综合考虑作物产量、氮磷钾肥施用量和土壤母质等因素。施用不当,对不缺素的土壤或作物可产生危害。

4) 配合施用有机肥 有机肥和化肥各有优缺点,二者应配合施用。适量有机肥的作用是培肥土壤和稳定产量。尤其是在障碍性逆境土壤条件下如盐渍化,质地过粘、过砂或遇到灾害性天气等。从宏观管理看,重视施用人、畜粪尿对土壤磷的归还作用,重视秸秆还田对土壤钾的归还作用,施用半腐熟有机肥对设施条件下土壤的改良作用。从养分资源综合管理的角度出发,施用有机肥后化肥的用量必须相应地降低,长期适量施用有机肥的供养作用是不可忽视的。

1.2.2 施肥技术研究法 针对氮磷钾等营养元素的土壤养分和肥料效应时空变异的不同特点,应采用不同的研究方法^[11~13]。

1) 试验设计和施肥模式的建立 长期定位试验对推荐施肥和建立施肥模型是不可缺少的。在试验设计时,不必将磷钾肥施用量作为自变量纳入施肥模型,可将适宜磷钾肥作为“肥底”,增加施氮量的水平数(一般不少于5~6个),建立氮肥效应模型。倡导“直线相交”或“线性+平台”等模型,线性模型与二次模型相比不但推荐施肥量大为节省,而且还可防止或减少产量预报中因外推法而导致结果偏高。研究表明,由于试验因素的减少,不但提高试验效率,而且还降低了非典型效应方程出现的几率。

2) 肥料效益评价 立足于生态农业和可持续发展的高度思考,要从肥料产量、经济、环境、品质和土壤肥力方面影响对施肥效益进行综合评价。长期以来,人们一直把肥料当季利用率作为肥料效益的重要指标,为此在试验方案中必须设置不施肥的处理。据不同营养元素的土壤养分和肥料效应的时空变异特点,分别采用不同的评价方法,对磷钾的施用而言,其土壤养分和作物产量的变化趋势、保持土壤养分评价平衡是更为重要的指标,其肥料利用率应以轮作周期或更长时期计。

1.2.3 养分资源宏观管理 养分资源综合管理的

理论认为,农业生态系统的养分循环存在着农田养分平衡和系统养分平衡 2 个相互制约的平衡关系^[9],后者具有时空变异的特点,与养分资源宏观管理的关系更为密切。以我国为例,其时间变异主要表现为建国后全国土壤养分、肥料效应、肥料养分结构(有机肥与化肥比例,氮磷钾比例等)的变化和肥料进出口战略等;空间变异主要表现为全国土壤养分区域变化、肥料的作物结构和区域分配等。这些是养分资源管理主要内容,也是主要依据。由于农田和系统养分平衡存在相互制约关系,研究养分资源的科学管理必须以农田养分管理为基础,鉴于我国农业生产的所有制和组织形式,今后要特别注重对农户一级养分资源管理的调研。

1.2.4 施肥技术物化 施肥技术物化就是以商品肥料为载体,通过提高产品的科技含量使农民在施用肥料的同时,也将科学施肥技术应用于生产实践。据养分资源综合管理的理论,我国的施肥技术物化至少应考虑到下列技术原则:

1) 兼顾产品的专用性和广谱性 专用性是基于不同营养元素的土壤养分和肥料效应的时空变异特征;广谱性则是为便于农民使用和市场营销。世界发达国家肥料产品开发几乎都有共同的历程^[14],即随着推荐施肥技术和农化服务水平的提高,散装复混肥和用于制造复混肥或调节复合肥养分的单质肥(含流体肥)的比例越来越大。

2) 强调养分适时监测 据养分时空变异规律对作物和土壤进行实时测定,这不仅是推荐施肥的需要,也是产品开发的需要。

3) 强调“两个不能代替” 肯定优质生物制剂(即所谓“生物肥料”)和商品有机肥的积极作用,生物制剂只是在特定条件下,补充或改善作物营养,因而不能代替化肥;有机肥还给土壤的有机质有限,不能代替常规农家肥的改土作用^[9]。

综上所述,养分资源管理是一个技术体系,其重点是农田养分管理,管理的要点就是“区别对待,实时测控”,即对不同营养元素的土壤养分和肥料效应变异特点,分别采取不同的实时监测方法和施肥调控方法。

2 在冬小麦-夏玉米高产轮作中的应用

“九五”期间,以养分资源综合管理的理论和技术原则为指导,在“八五”施肥专题研究成果和中国农大吴桥实验站连续获得大面积吨粮或超吨粮高产

的基础上,研究了高产轮作的养分实时监测和施肥调控技术,作物氮营养基因差异及其与施肥推荐的关系,将施肥调控与作物优化栽培措施相结合并建立了农田管理综合技术模式^[5]。

2.1 高产轮作的土壤养分和肥料效应的时空变异特点和施肥调控技术

1996—1999年,在吴桥实验站进行了 5 水平氮肥效应试验^[15],结合长期定位试验进行了磷钾肥茬口分配试验^[16]。这些试验均以当地的肥源和有机肥(年农户厩肥 $30 \text{ m}^2 \cdot \text{hm}^{-2}$)为肥底。主要研究结果如下:

2.1.1 氮的适时监测和施肥调控 先将一个轮作周期作为施肥调控单位,在田间试验的基础上,通过施肥模型确定施肥总量。在本试验条件下,对冬小麦-夏玉米分别采用线性加平台和二次曲线模式,求得每季氮肥最佳施用量分别为 119.6 和 $112.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,参考其他试验结果将这 2 种作物推荐每季施氮量分别为 135 和 $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。借助先进的土壤、植物快速测试技术,建立诊断施肥模型,对氮肥进行分期、逐步调控。

小麦播前基肥调控模式为:

$$N_b = (130.8 - N_{\min}) \times \frac{1}{2} \quad (1)$$

式中: N_b 和 N_{\min} 分别为基肥施氮量和土壤 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 矿化无机氮 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。本研究和田间试验证明^[14],黄淮海平原壤质土壤 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 剖面无机氮与施氮量之间高度相关。

小麦追肥调控模式为:

$$N_d = 138.5 - 0.071 T \quad (2)$$

式中: N_d 和 T 分别为拔节期追氮量和植株硝酸盐的反射仪测值 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。玉米基肥由于抢时播种,在小麦氮肥残效基础上补施适量氮肥(全生育期施量的 $1/3$)。

玉米追肥调控模式为:

$$N_d = 1166.44 - 25.19 R \quad (3)$$

式中: N_d 和 R 分别为大喇叭口期追氮量和 SPAD 叶绿素仪读数。追肥的氮营养诊断采用反射仪和叶绿素仪。采用叶绿素仪,要注意不同玉米基因型的差异。

2.1.2 磷钾的适时监测和施肥调控 涉及一个轮作周期肥料的茬口分配和更长时期土壤养分监测和施肥调控。轮作周期不同作物的磷钾肥分配,在吴桥和昌平试验站长期定位试验结果表明:一般应将

磷肥作小麦基肥施用, 每年 $135 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \text{ P}_2\text{O}_5$, 玉米只利用小麦磷肥的后效。但如果小麦播前土壤有效磷水平较低(一般不到 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ P}$) 或施磷量较少, 则以小麦、玉米两茬分施为好。钾肥则应重施于夏玉米, 每年施用量为 $\text{K}_2\text{O} 120 \sim 150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。粉状钾肥与粒状氮、钾肥难以用机具混施。考虑长期施肥运筹, 建议将黄淮海平原壤质土谷类作物的土壤磷、钾有效养分的临界水平分别定为 P(Olsen 法) $10 \sim 15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $\text{K}(\text{NH}_4\text{AcO 法}) 90 \sim 100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 每 3~5 年监测 1 次, 据土壤养分和产量水平的变化趋势, 对前述推荐施肥量作适当调节。

2.1.3 有机肥施肥运筹 我国有机肥对作物的养分供应量(以 $\text{N} + \text{P}_2\text{O}_5 + \text{K}_2\text{O}$ 计) 约占有机肥和化肥养分总量的 $1/3$, 除了供应养分外, 有机肥在改土和稳产方面具有不可替代的作用。本研究有机肥施用量是可行的, 它提供的养分相当于每年每公顷 45 kg N , $22 \text{ kg P}_2\text{O}_5$ 和 $7 \text{ kg K}_2\text{O}$ ^[5], 其产量效应与不施肥相比, 分别增加 25.4% 和 19.8%。该有机肥施用量对

土壤养分变化趋势有不同影响, 当土壤有效养分较高时, 前述化肥推荐施用量的土壤有效磷水平和产量未下降, 或有提高, 当土壤有效养分较低时, 如有效磷为 $\text{P} 4.78 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有效钾为 $\text{K} 63.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 年施 $\text{P}_2\text{O}_5 103.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $\text{K}_2\text{O} 150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 未能扭转土壤有效磷钾的下降趋势, 但几乎所有试验的小麦和玉米都达到了吨粮或超吨粮目标^[16]。更长时期的产量变化趋势有待进一步观测。

2.2 作物氮营养的基因型差异和氮肥推荐

按肥料设计对小麦、玉米各 6 个品种进行了田间比较试验(表 1)^[16]。由表 1 可知, 不同基因型作物之间的养分效率和增产潜力差异很大, 在不施肥条件下, 小麦品种衡 4041、95021 和泰山 021 的平均产量较其余 3 个品种的平均产量增加 10.6%, 后者施用 $\text{N} 90 \sim 180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 才能达到前者不施氮的产量水平。推荐施肥时应考虑到作物营养基因型差异, 并根据植株测试结果对推荐施肥量进行参数校正^[12]。

表 1 不同品种小麦和玉米的氮肥产量效应

Table 1 Effect of N fertilizer application levels on the yield of different genotypic winter wheat and maize (t $\cdot \text{hm}^{-2}$)

施氮量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	小麦品种					
	915091	衡 4041	95021	6029(1998 年) 76 选点(1997 年)	山东 45(1998 年) 稳 41(1997 年)	泰山 021
0	6.44	7.55	7.44	6.82	7.02	7.44
90	6.48	7.52	8.23	7.47	6.77	7.54
180	7.15	7.65	8.51	7.60	7.29	7.77
270	6.97	7.66	8.83	7.41	7.14	7.75
360	7.04	7.63	8.83	7.37	7.13	7.71
	玉米品种					
	唐抗 5	掖单 22	鲁原单 14	丹玉 13	农大 108	农大 3315
0	8.13	9.12	8.66	6.94	8.08	6.75
112.5	8.72	10.72	9.21	7.36	8.55	6.95
225	8.46	9.94	9.40	8.20	8.56	7.21
337.5	9.14	10.41	9.33	8.06	9.13	6.94
450	8.48	10.91	9.65	7.62	8.64	7.18

2.3 高产轮作的省肥节水综合管理技术

在轮作施肥、节水灌溉和水、肥营养基因型试验的同时还布置了各种优化技术整合的定位试验, 在此基础上提出了以高产省肥节水为主要效益目标的农田综合管理技术模式^[5](表 2)。在不施有机肥的情况下, 施肥量可适当增加, 氮、磷、钾可分别增加至 $\text{N} 150 \sim 225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{季}^{-1}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5 135 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 、

$\text{K}_2\text{O} 150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。田间观测结果证明, 过量施肥导致的土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失等环境问题也得到了有效控制。以雨季 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失可能性最大的夏玉米为例^[16], 施氮量为 $\text{N} 112.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的所有 6 个品种, $\text{N} 225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的部分品种, 在收获时 0~20 cm 土层的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量都维持在播种时的水平($< 10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

表 2 冬小麦-夏玉米吨粮高产省肥节水条件下农田综合管理技术模式

Table 2 The technical mode of cropland synthetic management on high production of winter wheat and summer maize under economical fertilization and water-saving irrigation conditions

项 目	小麦春季不浇水	小麦 1 水或 2 水		玉米	
	基肥(播前)	基肥(播前)	追肥(拔节期)	基肥或种肥	追肥
有机肥(厩肥 $\text{m}^2 \text{hm}^{-2}$)	30				
施氮量(N, $\text{kg} \text{hm}^{-2}$) *	135(0~135)	65(0~65)	70(0~70)	40	80(0~80)
施磷量(P_2O_5 , $\text{kg} \text{hm}^{-2}$)	120	120	0	0	0
施钾量(K_2O , $\text{kg} \text{hm}^{-2}$)	0	0	0	120	0
施硫酸锌($\text{kg} \text{hm}^{-2}$)	0	0	0	30	0
灌水量(mm)	播前灌足底墒 春季不灌溉	播前灌足底墒,1 水在拔节期灌 水 75 mm,2 水在拔节和开花期各 灌水 75 mm		在灌浆期灌水 75 mm	
播种期	比传统适时麦迟播 15 d。在河北吴桥 10-10—10-20 期间 完成			麦收后争取早播	
种植密度	比传统适时麦增加播种量,保证穗数,穗数型品种 45~50 万 $\cdot(337 \text{ m}^2)^{-1}$;穗重型品种 30~35 万 $\cdot(667 \text{ m}^2)^{-1}$ 。			宽行密植,行距 66 cm(耩播),株 密度 4 000~5 000 株 $\cdot(667 \text{ m}^2)^{-1}$	
品种	弱冬型抗逆高产品种			95~100 d 中晚熟高产高抗品种	
其他	选种、保证播种质量			选种,保证播种质量,迟在 6 叶 期间苗,迟到苞叶松开,顶部子 粒黑层形成时收获	

注:具体施氮量可按式(1)~(3)的施肥模式调控。

3 养分资源管理的特点及发展前景

3.1 优点

养分资源管理具有 3 个主要优点:

1) 站在生态农业的高度,以农业可持续发展为目标,使施肥技术与施肥理论之间,施肥技术与其它农业措施之间,农田施肥与养分资源宏观管理之间,肥料综合效益目标之间的关系得到了有机协调,因而拓宽了平衡施肥的概念和施肥决策的领域。

2) 以土壤养分和肥料效应的时空变异规律为主要依据,分别进行养分实时监测和施肥调控。这与平衡施肥的原则相一致,但其着眼点不仅是当季作物的氮磷钾肥料配合比例,而是将土壤养分的持续供应和作物持续高产作为评价施肥技术的主要指标,因而是动态平衡施肥^[5]。

3) 分析土壤养分供应水平时,除施肥外,还考虑到环境补给及土壤养分的生物活化,这对农田养分管理不仅有直接意义,而且具有决策性的战略意义。例如新近研究表明,在持续 10 年的水旱轮作中,环境输入的氮每年高达 $126 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[18],这说

明,目前我国农业生产的节肥高产潜力很大的。

3.2 发展前景

20 世纪 90 年代联合国粮农组织 (FAO) 等提出了植物养分综合管理 (Integrated plant nutrient management) 的概念,后来美国将养分管理作为土壤资源管理项目的一部分^[19]。我国朱兆良等在其论著中也提到养分管理问题^[20]。1995 年,张福锁、王兴仁等明确提出养分资源的概念,对养分资源管理的理论和技术进行了较系统的阐述,并用于推荐施肥系统,作物营养的库源关系调控^[21]和养分宏观管理等方面的研究^[22]。

养分资源综合管理的观念。日趋普及与应用,应做的工作很多,例如,在农田养分资源综合管理的 4 个关键技术中,远没有做到对农田养分收支平衡的环境影响进行量化评估。还没有沿着食物链的线索对农业生态系统养分资源的综合优化管理进行多学科的合作研究。但是建设现代高效生态农业是我国农业可持续发展的必由之路^[9],因此,养分资源综合管理的理论和技术将在其中发挥越来越大的作用,并使自身得到不断发展。

参 考 文 献

- [1] 陈伦寿,毛达如,王兴仁,等. 曲周县冬小麦优化配方施肥模型和效应反馈的研究[A]. 杨守春主编. 黄淮海平原主要作物优化施肥和土壤培肥技术[C]. 北京:中国农业出版社,1991. 58~65
- [2] 陈伦寿,毛达如,王兴仁,等. 曲周县夏玉米优化配方施肥模型和效应反馈的研究[A]. 杨守春主编. 黄淮海平原主要作物优化施肥和土壤培肥技术[C]. 北京:中国农业出版社,1991. 87~92
- [3] 张承东,毛达如,陈伦寿,等. 曲周县计算机施肥决策与咨询服务系统[A]. 杨守春主编. 黄淮海平原主要作物优化施肥和土壤培肥技术[C]. 北京:中国农业出版社,1991. 131~133
- [4] 王兴仁,曹一平,毛达如. 作物施肥综合调控系统的建立和应用[J],北京农业大学学报. 1995,21(增刊):1~6
- [5] 王兴仁,张福锁,曹一平,等. 节水型吨粮田动态平衡施肥理论和技术[A]. 张福锁主编. 养分资源综合管理[C]. 北京:中国农业大学出版社,2003,100~112
- [6] 张福锁,王兴仁,王敬国. 提高作物养分资源利用效率的生物学途径[A]. 北京农业大学学报,1995,21(增刊):104~110
- [7] 王兴仁,曹一平,张福锁. 土壤氮磷钾养分资源特征和综合管理策略[J]. 北京农业大学学报. 1995,21(增刊):89~92
- [8] 张福锁,王兴仁,巨晓棠,等. 农田氮磷钾养分时空变异和施肥调控[A]. 张福锁主编. 养分资源综合管理[C]. 北京:中国农业大学出版社,2003,79~87
- [9] 张福锁,王兴仁. 养分资源综合管理[A]. 路明主编. 现代生态农业[C]. 北京:中国农业出版社,2002. 158~162
- [10] 江荣风,张福锁,苏德纯,等. 中、微量元素养分监测矫正施肥技术[A]. 张福锁主编. 养分资源综合管理[C]. 北京:中国农业大学出版社,2003. 88~99
- [11] 王兴仁,毛达如,陈伦寿,等. 我国北方石灰性土壤养分变化趋势和施肥对策[A]. 毛达如主编. 土壤管理与施肥[C]. 北京:中国农业出版社,1994. 27~62
- [12] 王兴仁,陈新平,张福锁,等. 施肥模型在我国推荐施肥中的应用[J]. 植物营养与肥料学报,1998,4(1):67~74
- [13] 王兴仁,张福锁,陈新平,等. 推荐施肥量的参数校正-再论施肥模型在我国推荐施肥中的应用[A]. 张福锁主编. 养分资源综合管理[C]. 北京:中国农业大学出版社,2003,121~134
- [14] 陈靖宇. 对我国复合肥料生产发展趋势的展望[J]. 化肥工业,2000. 27(1):17~20
- [15] 曾长立. 冬小麦-夏玉米轮作高产条件下氮素调控技术的研究[D]. 北京:中国农业大学,1999
- [16] 江华. 冬小麦-夏玉米轮作高产中土壤-植物综合诊断推荐施肥技术研究[D]. 北京:中国农业大学,1998
- [17] 周顺利. 高产条件下冬小麦、夏玉米氮营养特性的差异及氮肥推荐[D]. 北京:中国农业大学,2000
- [18] 石孝均. 水旱轮作体系中的养分循环特征[D]. 北京:中国农业大学,2003
- [19] 范明生,张福锁,江荣风,等. 养分资源综合管理发展概况[A]. 张福锁主编. 养分资源综合管理[C]. 北京:中国农业大学出版社,2003. 30~39
- [20] 朱兆良. 农田生态系统中化肥氮的去向和管理[A]. 朱兆良、文启孝主编. 中国土壤氮素[C]. 南京:江苏科技出版社,1992. 213~219
- [21] 赵正雄. 云南烤烟打顶后的干物质与钾素积累规律及其调控[A]. 北京:中国农业大学,2003
- [22] 马文奇,毛达如,张福锁. 山东省作物施肥现状与环境问题[A]. 张福锁主编. 养分资源综合管理[C]. 北京:中国农业大学出版社,2003. 156~167