

# 氮素实时监控技术对夏玉米产量及氮效率的影响

董云中, 王永亮, 郭彩霞, 郭军玲, 杨治平, 张 强 \*

(山西省农业科学院农业环境与资源研究所, 山西省土壤环境与养分资源重点实验室, 山西 太原 030006)

**摘要:** 为了对山西南部夏玉米区氮肥的高效利用提供理论依据, 采用田间定位试验, 应用氮素实时监控技术研究了目标产量为  $7.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  时夏玉米优化施氮量。结果表明, 与农户习惯施氮量相比, 优化的氮用量大幅减少, 3 年累积减少氮肥投入  $491 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。由于氮素实时监控技术对夏玉米进行了氮素的分期调控, 使得氮素供应能够满足夏玉米全生育期的需求, 最终产量较农户习惯增加 6.3%, 增收  $1\,418 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 同时, 氮肥的利用效率、农学利用率以及偏生产力显著提高, 而土体硝态氮的累积与淋洗则大幅下降, 降低了对环境污染的风险。

**关键词:** 氮肥监控; 夏玉米; 产量; 氮效率; 山西省

中图分类号: S147.21

文献标志码: A

文章编号: 1005-4944(2013)05-0018-05

## Real-time Nitrogen Management for Yield and Utilization of Summer Maize

DONG Yun-zhong, WANG Yong-liang, GUO Cai-xia, GUO Jun-ling, YANG Zhi-ping, ZHANG Qiang\*

(Institute of Agriculture Environment and Resources Research, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Shanxi Province Key Laboratory of Soil Environment and Nutrient Resources, Taiyuan 030006, China)

**Abstract:** The field experiment was conducted to research the effect of real-time N management on the grain yield of summer maize and nitrogen efficiency in order to supply theoretic basis for nitrogen optimal management in south of Shanxi Province. The results clearly showed that optimal N rates were significantly lower than farmer's practice. The amounts of 3-year accumulative saving N fertilizer were  $491 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ . Compared with farmer's practice, the grain yield of optimal N rate increased by 6.3%, and the incomes  $1\,418 \text{ yuan} \cdot \text{hm}^{-2}$  due to the coherence of N supply and N demand. Moreover, N recovery efficiency, N agronomic efficiency, and N partial factor productivity of optimal N treatment were significantly increased and the nitrate accumulation and leaching were obviously reduced.

**Keywords:** real-time N management; summer maize; grain yield; nitrogen efficiency; Shanxi Province

氮是农业生产中三大营养元素之一, 在养分资源的管理中, 氮素的管理是核心, 科学管理氮肥对作物产量提高、环境改善作用重大<sup>[1]</sup>。目前, 在实际生产当中, 由于氮素来源广, 去向复杂<sup>[2]</sup>, 农户对氮肥的管理比较盲目, 尤其是在农业主产区, 过量施用氮肥现象十分突出。据统计, 我国氮肥目前消费量占化肥总量的 2/3 左右, 占世界总量的 30% 左右, 成为世界第一

生产和消费大国<sup>[3]</sup>。不合理氮肥施用不仅造成氮素资源的严重浪费, 同时导致氮素效率的降低, 而且带来严重的环境问题。因此, 作物高产、氮肥高效利用和生态环境保护的统一成为现代农业发展必须解决的关键问题<sup>[4]</sup>。夏玉米是山西省南部地区主要种植作物, 近年来, 无论是单产还是总产均有了大幅提高。高产的实现主要是依靠氮肥的大量投入, 而且农户普遍认为在玉米生长前期多施肥是确保玉米高产的重要手段, 因此将 60% 左右的氮肥施在玉米苗期。农户的这种习惯模式极不符合夏玉米“前轻后重”的需氮规律, 造成施肥时期与作物生长的不一致<sup>[5]</sup>。项目通过氮肥实时监控技术<sup>[6]</sup>的应用, 确定夏玉米氮肥优化施用量, 提高夏玉米产量和氮肥利用效率, 减少环境污染, 为山西省夏玉米生产提供氮肥资源优化管理理论和技术支撑。

收稿日期: 2013-04-26

**基金项目:** 公益性行业(农业)科研专项经费资助(201103003); 国家星火计划项目(2012GA630001); 山西省科技产业化环境建设项目(2012071003-1); 太原市明星项目(12024710)

**作者简介:** 董云中(1956—), 男, 山西太原人, 副研究员, 主要从事养分资源高效管理研究工作。

E-mail: dongyunzhong13579@163.com

\*通信作者: 张 强 E-mail: sxsnsyts@163.com

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验于2008—2010年在山西省临汾市洪洞县大槐树镇李堡村进行。该村位于110°30'E~112°50'E, 36°15'N~36°23'N, 以种植冬小麦-夏玉米轮作为主, 多年平均降雨量528 mm左右, 年均气温12.0℃, 夏玉米多年产量在350~450 kg·667 m<sup>-2</sup>。供试土壤为潮土, 质地为粘质壤土, 肥力水平较高。基础养分状况为:pH 8.39, 有机质14.23 g·kg<sup>-1</sup>, 全氮1.071 g·kg<sup>-1</sup>, 有效磷19.61 mg·kg<sup>-1</sup>, 速效钾141 mg·kg<sup>-1</sup>。夏玉米播种前土壤0~30、30~60、60~90 cm土层NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N含量分别为24.63、7.89、5.75 mg·kg<sup>-1</sup>, 容重分别为1.34、1.53、1.56 g·cm<sup>-3</sup>。

### 1.2 试验设计

试验设3个处理:(1)不施氮肥处理(CK);(2)农民传统施氮处理(FP):340 kg·hm<sup>-2</sup>, 其中, 苗期施纯氮210 kg·hm<sup>-2</sup>, 大喇叭口期追施130 kg·hm<sup>-2</sup>; (3)氮肥优化管理方式(采用氮素实时监控技术确定, OPT)。本试验共3个处理, 4次重复, 12个小区。试验中各处理磷肥施用量均为45 kg·hm<sup>-2</sup> (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), 磷肥为普钙, 含P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>为12%, 在夏玉米播种前做基肥一次施入土壤。因土壤有效钾含量较高, 故不施钾肥。各处理间水分管理条件一致, 均采用畦灌方式, 3个生长季平均每季浇水量为260 mm, 出水口装有水表计量和控制小区浇水量。试验于每年6月初播种, 10月初收获。

### 1.3 调查项目与测试方法

土壤样品: 播种前和收获后采集0~30、30~60、60~90 cm土层土壤样品, 过5 mm筛, 冰箱-4℃冷藏, 测定硝态氮含量。另外, 0~30 cm土样风干后测定土壤常规理化性状。

植物样品: 在夏玉米成熟期, 每小区取5株代表性样株, 分茎秆和籽粒两部分, 于105℃杀青30 min, 70℃烘至恒重, 称取干物重; 粉碎后样品用于植物氮素含量测定。收获时, 小区单打单收, 测定生物产量和籽粒产量。

土壤硝态氮田间快速测试: 称取混匀好的新鲜土壤样品50 g, 放入振荡瓶中, 加50 g去离子水按1:1水土比浸提, 田间人工上下左右晃动2次, 每次2 min, 中间静置1 min。定性滤纸过滤到小烧杯或胶卷盒中, 用硝酸盐反射仪测定滤液中的硝酸盐含量。

土壤硝态氮室内仪器测试: 称取新鲜土样12 g, 用50 mL 2 mol·L<sup>-1</sup> KCl溶液浸提, 震荡60 min, 过滤,

用流动注射分析仪FossStar5000测定NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N含量, 同时测定土壤含水量<sup>[7]</sup>。

植株全氮: 称取0.2500 g植株样品, 按照国标GB 2905—1982用半微量凯氏定氮法测定植株全氮含量<sup>[8]</sup>。

氮效率计算公式<sup>[9]</sup>如下:

氮肥利用率(RE<sub>N</sub>, %)=(施氮区地上部吸氮量-空白区地上部吸氮量)/施氮量×100;

氮肥农学效率(AE<sub>N</sub>, kg·kg<sup>-1</sup>)=(施氮区籽粒产量-空白区籽粒产量)/施氮量;

氮肥偏生产力(PFP<sub>N</sub>, kg·kg<sup>-1</sup>)=施氮区产量/施氮量;

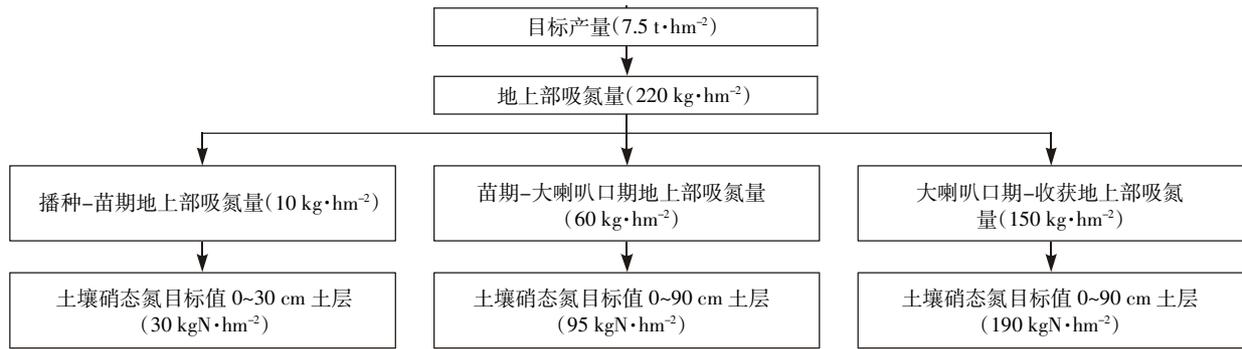
试验数据采用Excel 13.0和SigmaPlot9.0统计软件进行分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 氮素实时监控技术与优化施氮量确定

氮素实时监控技术主要针对氮素来源多与去向复杂特点提出<sup>[10]</sup>。该技术根据夏玉米生长发育各时期氮素需求规律和根系生长状况, 确定各阶段所需氮素供应量(土壤硝态氮+肥料氮)。针对山西省夏玉米主产区生产状况, 目前平均产量为6.75 t·hm<sup>-2</sup>, 设计目标产量增加10%~15%, 即7.5 t·hm<sup>-2</sup>。依据夏玉米氮素养分吸收规律<sup>[11]</sup>, 地上部氮素吸收总量为220 kgN·hm<sup>-2</sup>, 其中, 从播种到苗期氮吸收量为10 kgN·hm<sup>-2</sup>, 考虑夏玉米根系氮吸收量, 将该阶段氮素供应目标值设定为30 kgN·hm<sup>-2</sup>, 该阶段根系主要分布于0~30 cm土层, 因此氮肥最优用量(播前)为氮素供应目标值减去0~30 cm土层硝态氮含量。同样原理, 从苗期到大喇叭口期氮素吸收量为60 kg·hm<sup>-2</sup>, 根系吸收大约35 kg·hm<sup>-2</sup>, 因此该阶段氮素供应目标值为95 kgN·hm<sup>-2</sup>, 考虑根系在该阶段主要分布于0~90 cm土层, 土壤供氮量考虑0~90 cm土壤无机氮。从大喇叭口期到收获期氮素吸收量为150 kg·hm<sup>-2</sup>, 考虑根系大约吸收40 kg·hm<sup>-2</sup>, 此阶段氮素供应目标值为190 kgN·hm<sup>-2</sup>, 该时期作物根系主要分布在0~90 cm土层, 土壤供氮量考虑0~90 cm土壤无机氮。详细技术参数见图1。

根据图1, 对2008—2010年夏玉米试验氮肥优化管理方式处理(处理3)采用田间硝态氮速测法进行了氮肥用量确定。从表1可见, 氮肥优化管理方式处理应用氮素实时监控技术, 氮肥用量基本保持在180 kg·hm<sup>-2</sup>左右。与当地农民传统施氮340 kg·hm<sup>-2</sup>相比, 氮肥用量显著降低, 3年累计减少氮肥用量491



注:作物阶段施氮量=土壤硝态氮目标值-速测的土壤硝态氮(kgN·hm<sup>-2</sup>)

图1 基于土壤硝态氮测试和养分平衡的氮素实时监控技术参数

表1 夏玉米试验优化氮肥用量确定(kgN·hm<sup>-2</sup>)

试验年份	播前氮肥用量	大喇叭口期氮肥追施量	氮肥总用量
2008	60	111	171
2009	60	118	178
2010	60	120	180

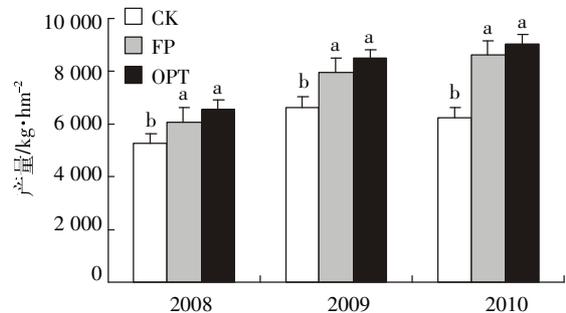
kg·hm<sup>-2</sup>,大大降低了肥料投入成本。

## 2.2 不同氮肥管理对夏玉米产量及效益的影响

连续3年应用氮素实时监控技术对夏玉米氮肥优化用量进行试验。结果显示,与农户习惯施肥处理比较,优化施氮处理显著降低了氮肥用量,3年累计减少氮肥用量491 kg·hm<sup>-2</sup>,氮肥成本累计减少1964元·hm<sup>-2</sup>,3年增收节支平均为1418元·hm<sup>-2</sup>(表2)。在减氮基础上,优化施氮处理产量比农户习惯施氮产量3年平均增加6.3%(图2)。增产幅度虽然不大,优化施氮与农户习惯施氮之间差异也不明显,但优化施氮处理减少了氮肥用量,降低了肥料成本。

## 2.3 不同氮肥管理对氮效率的影响

氮肥利用率、氮肥农学利用率以及氮肥偏生产力是评价作物氮效率的3个重要参数。表3结果显示,优化施氮处理氮肥利用率3年平均为26.6%,而传统处理平均只有15.2%,优化施氮处理比传统施氮处理高出11.4个百分点。农户习惯氮肥管理夏玉米地上部存在氮素奢侈吸收,多吸收的氮素大部分贮存在秸秆中,没有转化为籽粒产量,故氮素农学利用率较低,



a, b, c 是表示3个处理之间的显著性比较,字母相同,表示处理之间差异不显著;字母不相同,表示处理之间差异显著( $P < 0.05$ )

图2 不同处理不同年份夏玉米产量

表3 不同处理的氮效率

年份	处理	氮肥利用率/%		氮肥农学利用率/kg·kg <sup>-1</sup>		氮肥偏生产力/kg·kg <sup>-1</sup>	
		RE <sub>N</sub>	增加	AE <sub>N</sub>	增加	PFP <sub>N</sub>	增加
2008	FP	12.27	—	2.47	—	17.91	—
	OPT	22.29	10.02	7.71	5.24	38.40	20.49
2009	FP	14.10	—	3.93	—	23.37	—
	OPT	26.32	12.22	10.51	6.58	47.65	24.28
2010	FP	19.24	—	7.04	—	25.32	—
	OPT	31.18	11.94	15.64	8.60	50.17	24.85

优化氮肥处理比农户习惯3年平均高出6.8 kg·kg<sup>-1</sup>。相对农户习惯氮肥管理,优化氮肥管理每千克氮素可以生产38.40~50.17 kg的玉米籽粒产量,氮肥偏生产

表2 夏玉米氮素优化处理增收节支情况

试验年份	增产/kg·hm <sup>-2</sup>	节肥/kg·hm <sup>-2</sup>	产量增收/元·hm <sup>-2</sup>	成本降低/元·hm <sup>-2</sup>	增收节支/元·hm <sup>-2</sup>	增收节支平均/元·hm <sup>-2</sup>
2008	477	169	763	676	1439	1418
2009	535	162	856	648	1504	
2010	420	160	672	640	1312	

力增加  $23.20 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。可见,采用氮素实时监控技术可以在产量增加的基础上,大大减少氮肥用量,提高氮肥利用效率,增加农民收入。

### 2.4 不同氮肥管理对土壤环境影响

2008 年对第一季夏玉米 0~90 cm 土体硝态氮空间分布以及硝态氮累积总量进行了研究(图 3)。在全生育期共测定 4 次,分别是施基肥前(2008-06-02)、追肥前(2008-07-21)、追肥后 10 d(2008-08-02)、收获后(2008-10-02)。结果看到,OPT(优化施氮处理)的硝态氮主要分布在表层,整个剖面没有出现明显的累积峰值,向下淋洗不严重。FP(农户习惯施氮处理)在玉米整个生长期,0~90 cm 土体内硝态氮水平均较高,说明农户长期大量的施用氮肥,造成了硝态氮的严重淋失,不仅氮肥利用率下降,而且对环境形成了潜在风险。从 0~90 cm 土体硝态氮累积量也可以看出(图4),OPT 处理硝态氮累积量显著低于 FP 处理,夏玉米生长 1 季后 OPT 处理硝态氮累积量与播前基础值相比有所下降,没有造成土体硝态氮的过多累积,而 FP 处理硝态氮累积量几乎为播前基础值的 1.75 倍。

### 3 讨论

过量施氮在山西省南部夏玉米种植区是一个普遍问题。确定氮肥优化施用量,使作物高产,养分高效,又环境友好,不至于造成土体硝酸盐的大量累积和淋失,是目前氮素养分管理研究的目标<sup>[12]</sup>。赵荣芳等<sup>[13]</sup>研究认为,华北地区夏玉米施氮量达  $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  时, $\text{NO}_3^-$ -N 淋洗损失占施氮量的 33.5%。本研究中,

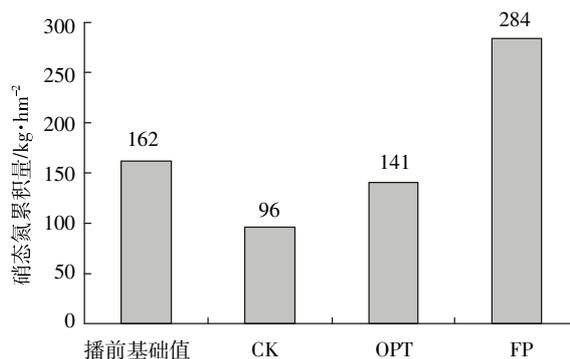


图 4 不同处理 0~90 cm 土体硝态氮的累积情况

农户传统施氮量高达  $340 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,  $\text{NO}_3^-$ -N 淋洗损失风险很大。因此,在山西省南部夏玉米高产区分区迫切需要对氮肥施用进行优化管理。Chen 等<sup>[14]</sup>提出根据氮素资源特征建立氮素实时监控技术,对氮肥进行优化管理。本项目通过 3 年的试验验证,证实该技术解决了土壤氮素供应与夏玉米各生育时期养分需求一致性问题。与农户传统施肥相比,施肥次数没有增加,只增加了土壤硝态氮的测试环节,但是该环节的应用不仅大幅度降低了氮肥的施用量,3 年累计推荐的氮用量比传统施氮量减少  $491 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。而且土壤硝态氮速测方法简单,农民易于接受,很适合推广。

项目对试验区进行的大量农户施肥调查发现,长期以来农户夏玉米生产中传统氮肥管理模式为重底肥轻追肥。最新研究表明,高产夏玉米花前对氮素需求量少,开花后对氮素需求量增加。特别是现代高产玉米品种的籽粒库容增大,要求生育后期碳、氮供应要充足。而农户传统施氮方式下,土壤硝态氮时空变

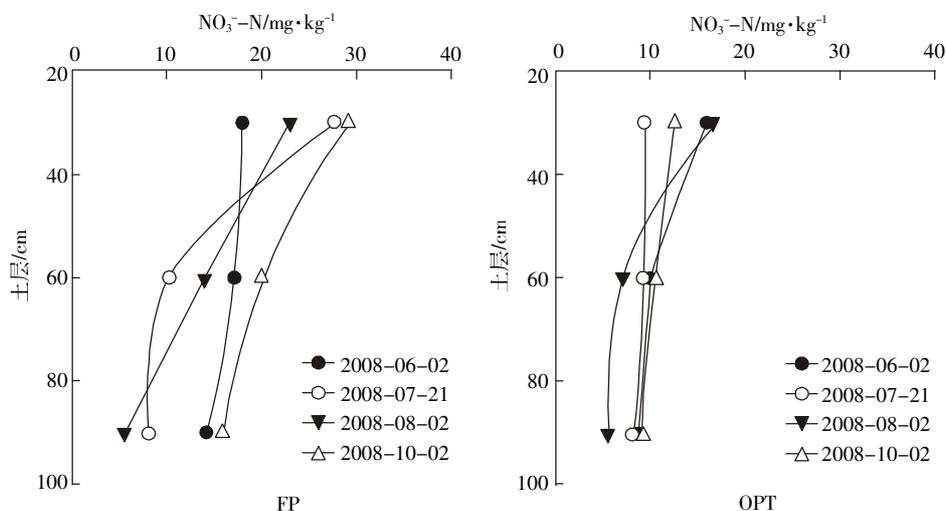


图 3 夏玉米收后不同处理 0~90 cm 土体硝态氮含量动态分布

异很难与夏玉米需肥及根系生长规律相吻合,前期氮供应过多,后期供氮明显不足,严重影响夏玉米增产潜力。本试验应用氮素实时监控技术,在夏玉米播前、大喇叭口期依据土壤硝态氮含量以及夏玉米需求量来确定氮肥用量,最大限度地发挥了夏玉米增产潜力,在氮素用量减少的基础上,产量比农户习惯增产6.3%,显著提高了氮素养分效率。

国内许多学者对夏玉米合理施氮量提出过建议,例如,徐钰等<sup>[5]</sup>研究认为,在山东省高肥力土壤上,夏玉米产量为 $9\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时优化施氮量为 $240\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,此用量下0~120 cm土壤硝态氮积累较少。赵营等<sup>[6]</sup>对陕西省夏玉米的研究提出,产量为 $6.5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时优化施氮量为 $125\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。可见,不同区域不同目标产量下氮肥合理用量有所不同。本试验条件下,目标产量为 $7.5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,应用氮素实时监控技术,推荐的氮肥用量为 $180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,与夏玉米一生氮素总需求 $180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 一致。因此,从作物高产与环境保护角度考虑,本研究认为,在山西省南部夏玉米种植区,适宜氮肥用量 $180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,能达到夏玉米高产与氮素养分高效的一致。

#### 4 结论

氮素实时监控技术是目前国内较先进的一种氮肥推荐方法。该技术在山西南部夏玉米3年的应用,目标产量为 $7.5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,优化施氮量为 $180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,依据夏玉米氮素养分吸收规律,底肥施入氮素总量的1/3,大喇叭口期施入氮素总量的2/3,就完全可以满足夏玉米全生育期氮素养分的需求。试验结果表明,与农户习惯施氮相比,优化施氮处理3年累计氮用量减少 $491\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,产量增加6.3%,增收 $1\,418\text{ 元}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,同时,显著提高了氮肥的利用效率,土体硝态氮的累积与淋洗也大幅下降。

#### 参考文献:

- [1] 张福锁. 养分资源综合管理研究与应用[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2006.
- [2] 陈新平, 张福锁. 小麦-玉米轮作体系养分资源综合管理理论与实践[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2006: 58-59.
- [3] 中国统计年鉴[M]. 2005.
- [4] 张福锁, 马文奇, 陈新平. 养分资源综合管理理论与技术概论[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2006: 17-18.
- [5] 崔振岭. 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[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.
- [6] Chen X, Zhang F. Synchronizing N supply from soil and fertilizer and N demand of winter wheat by an improved  $N_{min}$  method[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2006, 74: 91-98.
- [7] Liu X, Ju X, Zhang F, et al. Nitrogen recommendation for winter wheat using  $N_{min}$  test and rapid plant tests in North China Plain[J]. *Communication in Soil Science and Plant Analysis*, 2003, 34(17-18): 2539-2551.
- [8] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 147-159.
- [9] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924.
- [10] 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: 1-9.
- [11] 张强, 杨治平. 山西省小麦玉米轮作体系养分资源综合管理[M]// 陈新平, 张福锁. 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: 230-240.
- [12] 张福锁. 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[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2008: 40-41.
- [13] 赵荣芳. 冬小麦-夏玉米轮作中水氮资源的优化管理及其可持续性评价[D]. 北京: 中国农业大学, 2006.
- [14] Chen X, Zhou J, Wang X. Optimal rates of nitrogen fertilization for a winter-corn cropping system in Northern China [J]. *Communication in Soil Science and Plant Analysis*, 2004, 35(3-4): 583-597.
- [15] 徐钰, 江丽华, 林海涛, 等. 不同氮肥运筹对玉米产量、效益及土壤硝态氮含量的影响[J]. 土壤通报, 2011, 42(5): 1196-1199.
- [16] 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[J]. 土壤肥料, 2006(2): 30-33.