

盘锦地区稻田田面水氮素动态变化及 化学氮肥投入阈值研究

宫亮¹, 隽英华¹, 王建忠², 刘艳¹, 孙文涛^{1*}

(1.辽宁省农业科学院植物营养与环境资源研究所, 辽宁 沈阳 110161; 2.农业部农产品质量监督检验测试中心(沈阳), 辽宁 沈阳 110161)

摘要:以水稻为供试作物, 水稻土为供试土壤, 采用田间定位试验的方法, 以施肥后田面水中的总氮(TN)、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度为指标, 进行了施肥后田面水中氮素释放规律研究。结果表明, 施肥后田面水中的总氮(TN)、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度随着施肥量的增加而增加, 随着时间的推移三者的浓度呈先上升后下降的趋势, 一周后趋于稳定; 以氮素表观盈余率和植株吸氮量为指标, 从环境安全角度研究水稻生产化学氮肥投入阈值, 初步确定试验区环境安全化学氮肥投入阈值为 189.22~218.98 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; 以水稻产量为指标, 进行了粮食安全氮肥投入阈值研究, 初步确定试验区水稻生产粮食安全化学氮肥投入阈值为 202.24~288.89 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。综合考虑粮食安全和环境安全, 试验区化学氮肥投入阈值为 202.24~218.98 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

关键词: 水稻; 田面水; 氮素; 化学氮肥; 投入阈值

中图分类号: S147.22

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2013)06-0096-05

Variations of Nitrogen in Surface Water Body of a Paddy Field and Input Threshold of Chemical N Fertilizer in Panjin City, China

GONG Liang¹, JUAN Ying-hua¹, WANG Jian-zhong², LIU Yan¹, SUN Wen-tao^{1*}

(1. Institute of Plant Nutrition and Environmental Resources, Liaoning Academy of Agricultural Sciences, Shenyang 110161, China; 2. Supervision & Testing Center for Farm Product Quality, Ministry of Agriculture (Shenyang), Shenyang 110161, China)

Abstract: This experiment adopted rice as treated crop, rice soil was used for test soil, field trials were conducted to study the input threshold of chemical N fertilizer in rice from the viewpoint of food security and environmental safety. The results during three years (2010—2012) showed that the concentrations of total nitrogen (TN)、ammonium nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) and nitrate nitrogen ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) in the surface water increased with increasing of fertilizer application, and first increased then decreased with being stable after a week. By determination the nitrogen uptake and the apparent nitrogen surplus rate, the input thresholds of chemical N fertilizer should be controlled at about 189.22~218.98 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, as the environmental safety be considered. From the effect of N fertilizer on rice yield simulated by linear plus plateau model, the input thresholds of chemical N fertilizer should be controlled at about 202.24~288.89 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, when considering the food security. Considering food security and environmental security, the input thresholds of chemical N fertilizer should be controlled at about 202.24~218.98 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$.

Keywords: rice; surface water; nitrogen; chemical N fertilizer; input threshold

收稿日期: 2013-07-13

基金项目: 公益性行业(农业)专项经费(20100314-4); 国家科技支撑计划(2013BAD05B07); 辽宁省重大科技攻关计划(2011201029)

作者简介: 宫亮(1981—), 男, 辽宁本溪人, 助理研究员, 主要从事植物营养与肥料研究工作。E-mail: gongliang1900@sina.com

* 通信作者: 孙文涛 E-mail: wentaosw@163.com

水稻是我国重要粮食作物之一,总产量约占全国粮食总产量的1/2。施用氮肥是提高水稻产量的重要措施。近20年来,我国氮肥施用量逐年增加,但稻田氮素利用率只有20%~40%^[1-2]。目前,关于氮肥损失途径及造成环境污染问题的研究报道较多^[3-6],但是,兼顾氮肥施用的农业效益和环境效益,确定作物高产和环境安全的最佳施氮量的研究则少见报道。本试验以辽宁省盘锦市为例,在区域现行氮肥用量的基础上,参考试验数据,提出盘锦地区水稻生产化学氮肥的合理投入阈值,为有效减少农业面源污染,保障粮食安全提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验田概况

盘锦市是辽宁省水稻主产区之一,水稻种植面积约12万hm²,占辽宁省水稻种植面积20%左右。在施肥技术上存在着养分不平衡,氮肥施入量偏大,磷、钾肥施入量不足的特点^[7]。试验于2010—2012年在盘锦市盘山县墙子镇航呈农场进行。试验区位于辽河三角洲中心地带,属温带半湿润季风气候类型,年均降雨量600~750mm,年均气温8~9℃,无霜期165~170d。供试土壤为水稻土,耕层土壤理化性质为pH8.2、有机质22.57g·kg⁻¹、全氮1.42g·kg⁻¹、有效磷21.61mg·kg⁻¹、速效钾164.22mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

通过测土推荐施肥法结合资料调研,确定试验区最佳经济施氮量为210kg·hm⁻²,磷肥用量为90kg·hm⁻²,钾肥用量为90kg·hm⁻²。在最佳经济施氮量的基础上试验设6个氮肥处理,处理内容见表1。每个处理3次重复,随机区组排列。

供试水稻品种为盐丰47,4月10日育苗,5月26日插秧,插秧密度为30cm×16.5cm,10月9日收获。磷钾肥用量相同,全部基施,氮肥施用比例为基肥-分蘖肥-穗粒肥:40%-30%-30%。氮肥为尿素(含N46%),磷肥为磷酸二铵(含P₂O₅46%、N18%)、

过磷酸钙(含P₂O₅18%),钾肥为氯化钾(K₂O60%)。小区面积50m²,周围设有保护行,各小区之间筑埂并用塑料薄膜包埂,以减少小区间肥水渗透。各小区均设有单独的排水口和进水口,单排单灌。

1.3 样品采集与测定

每次施肥后的1、2、3、5、7、9d采集田面水,采样均在上午8:00—10:00进行。采样时用100mL医用注射器,不扰动水层,按照对角线取样法,每小区取5个点田面水混合样300mL。采样结束后,迅速带回实验室分析测定铵态氮、硝态氮、全氮。未能当日分析的水样保存在4℃冰箱中,于次日分析。水样硝态氮测定采用紫外分光光度计比色法,铵态氮测定采用靛酚蓝比色法,全氮采用碱性过硫酸钾紫外分光光度计比色法。

水稻成熟后,各处理采集植株5穴,分别测定茎、叶和籽粒干重及相应的含氮量。茎、叶和籽粒干重用烘干法测定,植株全氮测定用开氏法。各小区单收单打,统计小区产量。

1.4 指标计算公式

养分投入仅包括化肥施入量,不考虑降水、灌溉、大气沉降等带入的养分。养分支出仅包括因作物收获而带出的养分,不考虑因淋洗、挥发和反硝化造成的养分损失^[8]。养分平衡采用表观平衡法计算,即:养分平衡值=养分投入量-作物携出量;养分盈余率(%)=(平衡值/作物携出量)×100。试验数据采用Excel 2003和SAS 9.1进行处理。

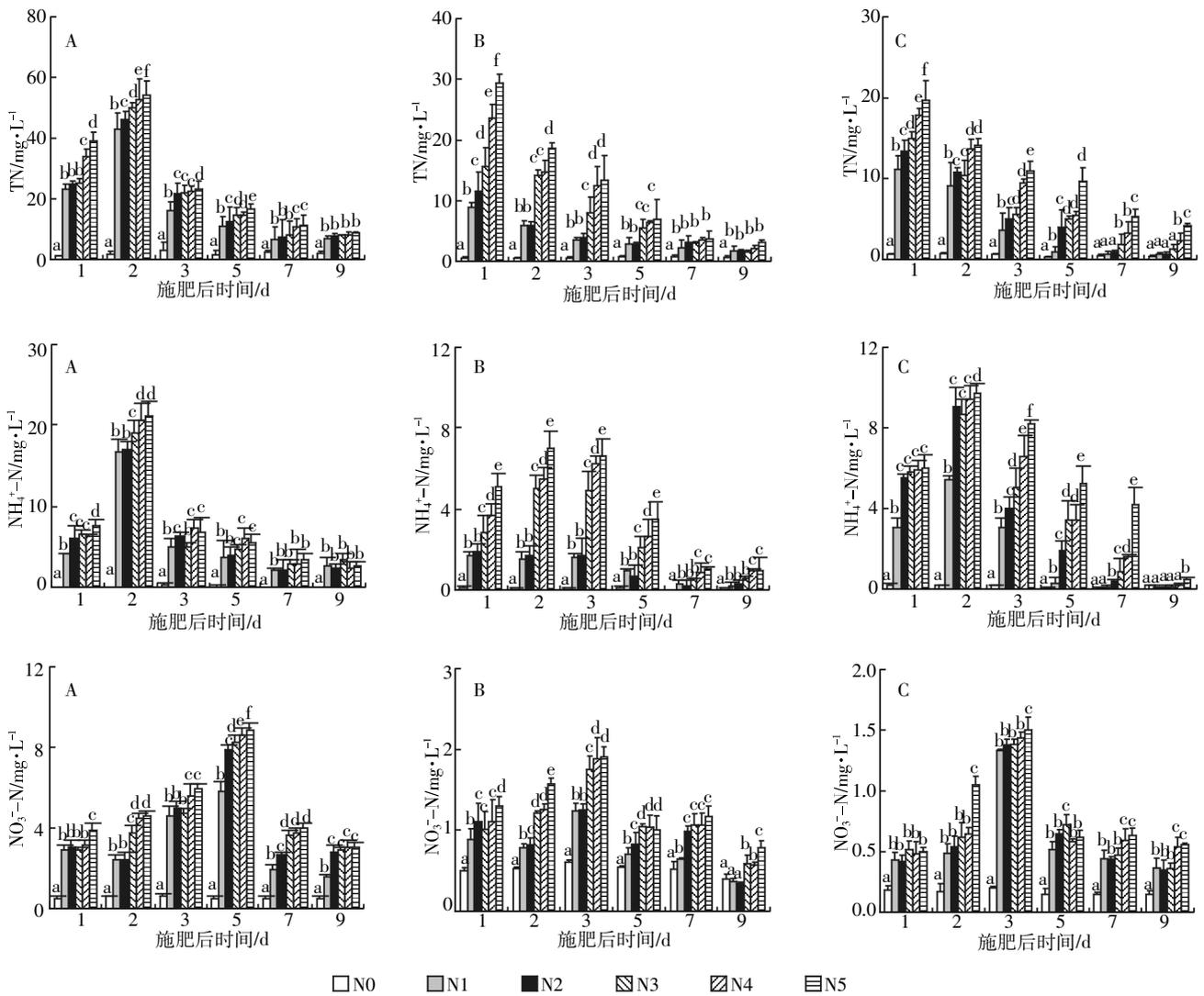
2 结果与讨论

2.1 稻田田面水中(TN)、NH₄⁺-N和NO₃⁻-N浓度的动态变化特征

施肥后田面水中氮素变化情况见图1。从图1可见,施入基肥后田面水中TN浓度迅速提高,在第2d达到峰值,之后随着时间的推移逐渐下降,到第7d趋于稳定,此时田面水中TN浓度为峰值的15.36%~16.90%。施入分蘖肥和穗肥后的第1d田面水TN浓度即达到峰值,之后随着时间的推移呈下降趋势,到第7d趋于稳定。施入基肥后田面水TN浓度峰值较2次追肥滞后,这可能是由于施肥方法不同造成的。基肥在插秧前均匀撒施田面后耙地,将肥料耙入耕层土壤中,从而减缓了氮素向田面水释放的速度,其峰值出现在施肥后第2d。而分蘖肥和穗粒肥则直接均匀撒施田面水中,氮素在田面水中直接分解,因此TN浓度在施肥后第1d即达到峰值。

表1 试验处理

处理	处理内容	施氮量/kg·hm ⁻²
N0	对照(不施化学氮肥)	0
N1	优化施氮量75%	160
N2	优化施氮量100%	210
N3	优化施氮量125%	260
N4	优化施氮量150%	315
N5	优化施氮量200%	420



A 基肥, B 分蘖肥, C 穗肥; 小写字母表示 N0~N5 处理间 $\alpha=0.05$ 水平上方差分析的结果, 字母相同代表处理间差异不显著, 反之代表处理间差异显著

图 1 3 次施肥后稻田田面水 TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的动态变化

施入基肥后, 田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度在第 2 d 达到峰值后迅速下降, 第 3 d 即下降到峰值的 25.69%~36.80%, 至第 7 d 趋于稳定, 此时 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度为峰值时的 12.07%~15.86%。施入分蘖肥和穗肥后, 田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度在第 2 d 达到峰值后缓慢下降, 至第 7 d 趋于稳定, 此时 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度分别为峰值的 10.77%~16.15% 和 2.15%~23.07%。其原因可能是, 尿素施入稻田后经过脲酶水解成为大量 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, 导致田面水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度迅速提高, 而水稻苗期根系不发达, 对氮素营养物质的吸收能力弱, 需求量少, 因此大量的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 转化为气态氮排放到大气当中, 或通过土壤渗漏损失掉, 导致田面水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 迅速降低。水稻分蘖期和孕穗期为水稻需肥关键期, 此时水

稻对氮素营养的吸收能力较强, 需求量较大, 因此减缓了 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的损失, 从而降低了 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度的下降速率。相较而言, 施入穗肥后 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度下降减缓的现象更为明显。

施肥后田面水中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度远远低于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, 3 个施肥时期峰值分别为 8.87、1.91 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 1.50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 且分别出现在施入基肥后第 5 d 和追肥后第 3 d。这可能是因为, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 主要来源于尿素水解产生的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 通过硝化作用形成, 而 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 通过植株吸收, 挥发和淋失等损失, 可以转化为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的数量已经很少, 同时由于淹水条件下硝化作用较弱及反硝化作用的存在, 导致稻田田面水中的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度较低, 且峰值出现在施肥后 3~5 d。

方差分析结果表明:施肥后 1~7 d 为氮素集中释放时期。施用氮肥 7 d 内,不同处理间田面水中 TN、NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 的浓度随着施氮量的增加显著增加;施用氮肥 7 d 后,各处理田面水中不同形态氮素浓度差异不显著。这一结论与王小治等^[9]、金洁等^[10]研究结果一致。

水稻田中氮肥损失途径主要有氨挥发、硝化-反硝化、淋洗和径流。就石灰性土壤而言,氨挥发是导致氮肥损失的重要原因^[11-12]。氨挥发主要通过微气象学原位测定技术进行定量研究^[13],其结果不仅受田面水的 NH₄⁺-N 浓度影响,而且与施肥时间、风速、光照和 pH 值等因素有关,因此,很难用氨挥发来定量评价氮肥损失对环境造成的负面影响。本试验在施用氮肥后 1~9 d 内分时段对田面水 TN、NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 的浓度进行测定,旨在研究施氮后田面水不同形态氮素浓度与氮素损失的相关性,进而根据其浓度来定量评价氮肥损失。研究结果显示,施氮后 1~3 d 为氨挥发高风险期(TN 和 NH₄⁺-N 浓度峰值出现时期)。但如何根据田面水中不同形态氮素浓度来评价氮肥损失则有待于进一步研究。

2.2 施氮量与植株吸氮量、氮盈余率的关系

对施氮量和水稻吸氮量、氮盈余率进行相关性分析,结果见图 2。水稻植株吸氮量和施氮量符合线性加平台模型。当施氮量低于 218.98 kg·hm⁻² 时,植株吸氮量随着施氮量的增加而增加;当施氮量高于 218.98 kg·hm⁻² 时,植株吸氮量增幅不显著,氮素流失到环境中的风险增大。氮盈余率和施氮量呈正相关。当施氮量为 189.22 kg·hm⁻² 时,盈余率为零,此时氮素投入量和携出量基本持平;当施氮量高于 189.22 kg·hm⁻² 时,氮素开始出现盈余,氮盈余率与施氮量呈正相关。综合考虑植株吸氮量和氮盈余率 2 个因子对环境的影响,盘锦地区环境安全化学氮肥投入阈值为

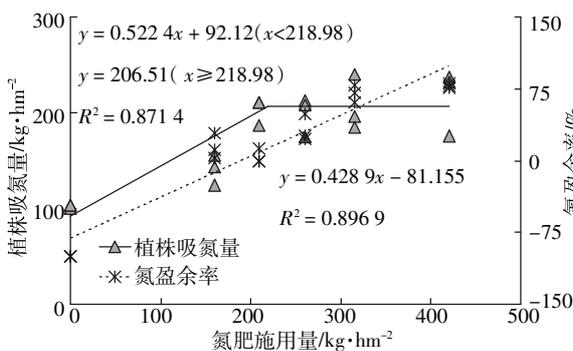


图 2 施氮量与植株吸氮量、氮盈余率的关系

189.22~218.98 kg·hm⁻²。

2.3 施氮量与作物产量的关系

近年来,由于水稻品种向耐倒伏、耐肥和高产的趋势发展,水稻在达到较高产量水平的一定施氮范围内,并不因施氮量过量而立即导致倒伏和减产,而是出现一个产量平台。因此,本试验采用线性加平台模型对水稻产量和施氮量进行拟合,结果见图 3。从图 3 可以看出,当氮肥施用量为 224.71 kg·hm⁻² 时,水稻产量最高为 10 092 kg·hm⁻²,此后,随着施氮量的增加,水稻产量增加不明显。姜琴等^[14]和周江明等^[15]研究表明,在传统施氮量的基础上减氮 15%~25%,水稻减产不显著。根据盘锦地区水稻生产实际情况,按照最高产量施氮量的 90%来计算试验区水稻产量氮肥投入阈值下限,结果为 202.24 kg·hm⁻²。为保证粮食安全,将施氮量后移至最高产量施氮量的 125%处,作为产量氮肥投入阈值上限,结果为 288.89 kg·hm⁻²。因此,盘锦地区粮食安全化学氮肥投入阈值为 202.24~288.89 kg·hm⁻²。

在确定氮肥推荐用量中,施肥模型的选择十分重要。在对施肥模型的评价上,研究者一致认为应该从模型统计检验的拟合程度和推荐施肥量的节省程度来考虑^[16-18]。目前研究认为,线性加平台模型可以在保证产量不会过分降低的情况下使推荐施肥量较低^[19]。本研究通过线性加平台模型计算得到的推荐施肥量,远低于通过二次多项式模型计算得到的推荐施肥量。

3 结论

(1)通过测定施氮后田面水中 TN 和 NH₄⁺-N 浓度峰值出现时间,确定施氮后 1~3 d 为氨挥发高风险期。对施氮后 N0~N5 处理的田面水 TN、NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 浓度进行 $\alpha=0.05$ 水平的方差分析,确定施氮后 1 周左右为氮素集中释放时期。

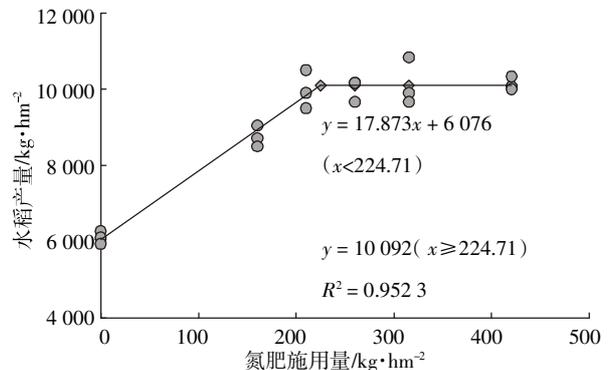


图 3 氮肥施用量与水稻产量的关系

(2)以氮素表观盈余率为0时氮肥施用量为环境安全阈值下限,以水稻植株最大吸氮量为环境安全阈值上限,确定试验区环境安全化学氮肥投入阈值为189.22~218.98 kg·hm⁻²。

(3)以水稻最高产量施肥量的90%~125%施氮量作为粮食安全化学氮肥投入阈值,结果为202.24~288.89 kg·hm⁻²。

(4)综合考虑环境安全和粮食安全,以环境安全化学氮肥投入阈值上限和粮食安全化学氮肥投入阈值下限确定试验区化学氮肥投入阈值为202.24~218.98 kg·hm⁻²。这个宏观施氮范围对防止目前农户盲目施用过量氮肥具有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] Zhu Z L, Chen D L. Nitrogen fertilizer use in China contributions to food production impacts on the environment and best management strategies [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 63:117-127.
- [2] Cassman K G, Peng S, Oik D C, et al. Opportunities for increased nitrogen use efficiency from improved resource management in irrigated rice systems[J]. *Field Crops Research*, 1998, 56:7-39.
- [3] 朱兆良.农田中氮肥的损失与对策[J]. *土壤与环境*, 2000, 9(1):1-6.
- [4] 宋勇生, 范晓晖, 林德喜, 等.太湖地区稻田氨挥发及影响因素的研究[J]. *土壤学报*, 2004, 41(2):265-269.
- [5] 朱兆良.中国土壤氮素[M]. 南京:江苏科学技术出版社, 1992:212-249.
- [6] Ghosh B C, Ravi Bhat. Environmental hazards of nitrogen loading in wetland rice fields [J]. *Environmental Pollution*, 1998, 102(1):123-126.
- [7] 王志兴, 陈广红, 夏明, 等.盘锦市水稻生产面临的问题与解决途径的探讨[J]. *北方水稻*, 2008, 39(3):122-123.
- [8] 摄晓燕, 谢永生, 郝明德, 等.黄土旱塬长期施肥对小麦产量及养分平衡的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2009, 27(6):27-31.
- [9] 王小治, 朱建国, 宝川靖和, 等.施用尿素稻田表层水氮素的动态变化及模式表征[J]. *农业环境科学学报*, 2004, 23(5):852-856.
- [10] 金洁, 杨京平, 施洪鑫, 等.水稻田面水中氮磷素的动态特征研究[J]. *农业环境科学学报*, 2005, 24(2):357-361.
- [11] 赵振达, 张金盛.提高氮肥利用率的研究——第Ⅱ报 铵态氮化肥在石灰性土壤上氨的挥发损失[J]. *土壤通报*, 1981, 12(1):16-19.
- [12] Roelcke M, Han Y, Li S X, et al. Laboratory measurements and simulations of ammonia volatilization from urea applied to calcareous Chinese loess soils[J]. *Plant and Soil*, 1996, 181: 123-129.
- [13] Shen S-M. Contribution of nitrogen fertilizer to the development of agriculture and its loss in China[J]. *Acta Pedol Sin*, 2002, 39:12-25.
- [14] 姜琴, 郁海金, 施振云.水稻化学氮肥减量施用的有效途径[J]. *上海交通大学学报:农业科学版*, 2006(5):452-455.
- [15] 周江明, 余华波, 毛建芬.水稻减氮施肥综合效益研究[J]. *中国农学通报*, 2006(9):260-263.
- [16] 陈新平, 周金池, 张福锁, 等.小麦-玉米轮作制中氮肥效应模型的选择——经济、环境效益分析[J]. *土壤学报*, 2000, 37(3):346-354.
- [17] 毛达如, 张承东.推荐施肥技术中施肥模型与实验设计研究[J]. *土壤通报*, 1991, 22(5):216-218.
- [18] 王兴仁.分类回归法在区域施肥决策中的应用[J]. *土壤通报*, 1989, 20(1):17-20.
- [19] 贾良良, 陈新平, 张福锁, 等.北京市冬小麦氮肥适宜用量评价方法的研究[J]. *中国农业大学学报*, 2001, 6(3):67-73.