

缓释肥侧条施肥技术对水稻产量和氮素利用效率的影响

刘汝亮, 李友宏, 王芳, 赵天成, 陈晨, 洪瑜, 周丽娜*

(宁夏农林科学院农业资源与环境研究所, 宁夏 银川 750002)

摘要:利用田间小区试验,系统研究了基于缓释肥料的侧条施肥技术对水稻产量和氮素利用效率的影响。试验结果表明:与农民常规施肥处理(FP)比较,侧条施肥技术高缓释肥处理(HF)水稻氮素投入比农民常规施肥处理(FP)降低约40%,水稻产量没有显著降低,穗粒数比农民常规施肥处理增加了8.36%。侧条施肥技术显著提高了水稻地上部吸氮量和氮肥偏生产力,降低了氮素的表观损失量。侧条施肥各处理氮肥偏生产力在39.1~67.8之间,显著高于FP处理的23.7。FP处理氮素表观损失量高达174.2 kg·hm⁻²,侧条施肥各处理表观损失量在23.2~61.9 kg·hm⁻²之间。综合考虑水稻产量和环境因素,基于缓释肥料的侧条施肥技术是一种资源节约和环境友好的施肥技术。

关键词:侧条施肥;水稻;产量;氮平衡;氮素利用效率

中图分类号:S147.3 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2014)01-0045-05 doi: 10.13254/j.jare.2013.0157

Effect of Slow-release Fertilizer Side Bar Fertilization Technology on Rice Yield and Nitrogen Use Efficiency

LIU Ru-liang, LI You-hong, WANG Fang, ZHAO Tian-cheng, CHEN Chen, HONG Yu, ZHOU Li-na*

(Institute of Agricultural Resources and Environment, Ningxia Academy of Agro-forestry Science, Yinchuan 750002, China)

Abstract: A field plots experiment was conducted to study the effects of side bar fertilization technology on rice yield and nitrogen use efficiency. The results showed that side bar fertilization technology based on high quantity of slow-release fertilizer treatment (HF) reduced the amount of nitrogen applied by approximately 40% compared to conventional fertilizer treatments (FP) but had no remarkable effects on rice yields while the number of ear of rice increased 8.36%. Side bar fertilization technology significantly increased rice nitrogen uptake and partial factor productivity from nitrogen applied (PFP_N), reducing the apparent loss of nitrogen. Side bar fertilization technology treatment PFP_N was between 39.1 and 67.8, significantly higher than the 23.7 of FP treatment. Apparent N losse of FP treatment was 174.2 kg·hm⁻² and each side bar fertilization technology treatment was between 23.2 kg·hm⁻² and 61.9 kg·hm⁻². Considering the rice yield and environmental factors, side bar fertilization technology based on slow-release fertilizer was one of environment-friendly technology that can be applied.

Keywords: side bar fertilization technology; rice; yield; N balance; nitrogen use efficiency

随着农业生产水平日益提高,农田尤其是稻田化肥过量施用导致的退水面源污染正在成为影响宁夏引黄灌区黄河水质的重要原因。长期以来,“大肥大水”促高产是农民追逐高产的主导思想,宁夏引黄灌

区化肥的投入已经处于较高水平,加上大水漫灌等不合理灌溉方式,不仅造成水资源的浪费,而且还导致肥料流失严重。据统计,宁夏引黄灌区近年来化肥平均施用量为1400~1500 kg·hm⁻²,单位面积施用纯N量为300~360 kg·hm^{-2[1-2]}。氮素在土壤中的迁移受到灌溉的显著影响,随着水分运移淋失是导致各种环境问题产生的直接原因^[3-4]。因此,减少因稻田退水导致的农业面源污染对保障宁夏段黄河水质安全与整个黄河流域社会经济的可持续发展,具有现实迫切性与长远的战略意义。

收稿日期:2013-09-22

基金项目:环保部公益行业项目“宁夏黄灌区农业面源污染阻控技术研究” (201109029)

作者简介:刘汝亮(1982—),男,河南夏邑人,博士,助理研究员,研究方向为农业环境保护与面源污染防控。

E-mail:laoer168@126.com

*通信作者:周丽娜 E-mail:linazhou1980@163.com

氮肥的种类和施用方式是降低肥料用量和提高利用率的有效途径^[5]。近年来国内研究结果表明缓/控释肥料因其溶解和释放速度缓慢,可以减少肥料损失,提高氮素利用率^[6]。翟军海等^[7]报道了施用控释/缓释肥料可使氮肥利用率达 60%~80%,达到相同作物产量氮肥用量降低 10%~50%,减少淋溶损失,降低 NO₃⁻-N 污染。侧条施肥技术在提高氮肥利用率、降低养分流失方面效果显著,为控制农业面源污染,日本从 20 世纪 90 年代开始推广应用。侧条施肥是指利用侧条施肥机器在水稻插秧时将肥料呈条状集中施在水稻一侧 3~5 cm 左右,施肥深度为 2~5 cm,肥料在水稻根际形成一个贮肥库逐渐释放供给水稻吸收,降低了养分的固定和流失,从而提高了肥料的利用率^[8]。扈艳萍等^[9]研究结果表明,水稻机插侧条施肥与常规施肥相比,肥料利用率提高了 19.87%,增产 16.00%。国内将缓释肥料和侧条施肥技术结合起来的研究还未见报道,本文利用中日政府合作项目——环境友好型农业技术开发和利用,从日本引进了侧条施肥机在宁夏引黄灌区开展田间试验,旨在明确基于缓释肥的侧条施肥技术对提高水稻产量和减少氮素损失的效果,为环境友好型农业技术提供依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

田间试验于 2011 年 4 月—10 月在宁夏灵武市灵武农场三队农田进行。试验点位于东经 106°17'58",北纬 38°07'33",该区属温带大陆性半干旱气候,海拔为 1 110 m,多年平均降水量 192.9 mm,年蒸发量 1 762.9 mm,平均温度 8.9 ℃,全年日照 4 434.7 h,无霜期 163 d,年平均积温为 3 866.3 ℃。供试土壤类型为灌淤土,2011 年试验开始前农田土壤基本理化性质如表 1 所示,供试田块土壤基础肥力中等偏上。

1.2 试验设计

田间小区试验设以下 5 个处理:(1)CK(不施肥料);(2)LF(Low fertilizer,低量缓释肥);(3)MF(Middle fertilizer,中量缓释肥);(4)HF(High fertilizer,高量缓释肥);(5)FP(Farmer Practice,农民常规施肥);各处理施肥量见表 2。缓释肥料由山东施可丰化工有限

公司生产,其中 N 含量为 23.0%,P₂O₅ 为 13.0%,K₂O 为 10.0%。农民常规施肥处理氮素用尿素(N,46%),磷肥用重过磷酸钙(P₂O₅,46%),钾肥用氯化钾(K₂O,60%)。缓释肥料全部作基肥在插秧时用机器一次施入,农民常规处理 60%的氮素肥料和全部磷钾肥料在整田时作基肥施入,剩余氮肥分别在水稻分蘖期和孕穗期作追肥施入,2 次追肥量均为 20%。

表 2 侧条施肥试验设计(kg·hm⁻²)

处理	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	缓释肥料用量
CK	0	0	0	—
LF	74	41.8	32.2	321.7
MF	125	70.7	54.4	543.5
HF	176	99.5	76.5	765.2
FP	300	90	75	—

供试水稻品种为 96D10。2011 年 5 月 20 日育秧,6 月 17 日插秧,10 月 12 日收获。用侧条插秧机配套的专用育秧盘,每盘 448 穴。当秧苗高度长至 12 cm 左右时用侧条施肥机器插秧。水稻株距为 16 cm,行距 33 cm,每穴 3~4 株(图 1)。试验小区长 43.5 m,宽 7.8 m,面积 340 m²。各试验小区之间在水稻种植前用双层塑料膜隔离,地下埋深 30 cm,地面田埂包高 30 cm,以减少处理间的侧渗和串流。每个小区都设有单独的排水口和灌水口,单排单灌,灌溉水引自黄河水,其余田间管理同当地的农作习惯。水稻生长期间,水不人为排出田外,保持田面原有水深,让其自然渗漏和蒸发。每个处理重复 3 次,小区随机区组排列。水稻测产方法为小区全部收获,同时采集 1 m² 的样品进行室内考种。

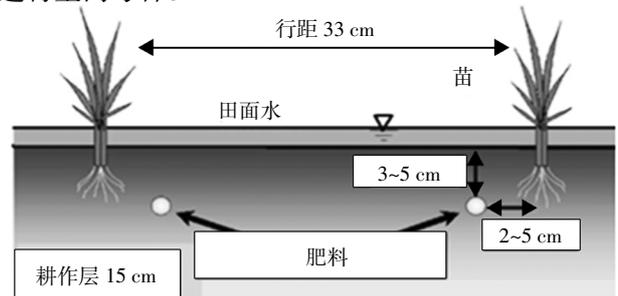


图 1 侧条施肥技术概念图

Figure 1 The side bar fertilization concept map

表 1 供试土壤的基本理化性质

Table 1 Basic properties of tested soil

土壤层次 Soil layer/cm	容重 Bulk density/g·cm ⁻³	质地 Texture	有机质 Organic matter/g·kg ⁻¹	全氮 Total N/g·kg ⁻¹	速效氮 Available N/mg·kg ⁻¹	速效磷 Available P/mg·kg ⁻¹	速效钾 Available K/mg·kg ⁻¹
0~20	1.48	中壤土	13.5	0.94	78.2	29.7	167.0

1.3 测定方法

水样硝态氮和铵态氮用法国产 FUTURA 流动分析仪测定,土壤容重用环刀法,土壤和植株全氮用凯氏法,全磷用钼锑抗比色法,全钾用火焰光度法。

数据处理采用 EXCEL 和 SAS(8.0)软件,方差分析用 LSD 检验。

2 结果与分析

2.1 侧条施肥技术对水稻产量的影响

施肥是水稻获得高产的保障。试验结果表明(表3),各处理水稻植株和子粒产量均随着施肥量的提高而增加。各施肥处理间比较,农民常规施肥(FP)处理子粒产量最高,为 7 098 kg·hm⁻²,其次是高缓释肥(HF)处理,子粒产量为 6 879 kg·hm⁻²,分别比对照提高了 3 711 kg·hm⁻² 和 3 492 kg·hm⁻²,但农民常规施肥(FP)处理与高缓释肥(HF)处理间差异不显著。中量缓释肥(MF)处理子粒产量为 5 800 kg·hm⁻²,显著低于 FP 和 HF 处理。利用缓释肥料配合侧条施肥技术,HF 处理在氮素投入降低约 40%的条件下,水稻子粒产量与 FP 处理比较没有显著降低,这是因为缓释肥料在水稻根际附近形成的贮肥库可以缓慢释放养分供给水稻的需求,为水稻产量形成奠定基础。

表 3 侧条施肥对水稻产量的影响

Table 3 Effect of side bar fertilization on rice yield

处理 Treatment	秸秆产量 Straw yield/ kg·hm ⁻²	增产率 Ratio/ %	子粒产量 Grain yield/ kg·hm ⁻²	增产率 Tatio/ %
CK	2 946d	—	3 387d	—
LF	4 107c	39.4	5 017c	48.1
MF	4 637c	57.4	5 800b	71.2
HF	5 426b	84.2	6 879a	103.1
FP	5 784a	96.3	7 098a	109.6

注:同列内不同字母表示差异显著($P<0.05$),下同。

Note: Different letters within the same column mean significant difference ($P<0.05$), the same as below.

水稻苗期之后分蘖消长是水稻生长发育的基本特性之一,也是形成水稻健康群体进而实现高产的前提^[10]。农民常规施肥处理模式一般为基肥占 60%,分蘖期追施 20%。由于在水稻分蘖前就投入了大量的氮素,能够促进水稻早生快发,形成较高的分蘖数,从而为水稻高产打下基础。缓释肥料由于前期分解速率慢,势必会影响到水稻分蘖。在本研究条件下,农民常规施肥(FP)处理水稻有效穗为 417 个·m⁻²(表4),高于其他处理。高缓释肥(HF)处理由于在水稻生育后

表 4 侧条施肥对水稻产量构成因素的影响

Table 4 Effect of side bar fertilization on rice yield composition

处理 Treatment	株高 Plant high/cm	穗长 Panicle length/cm	穗粒数 Grain number/个	有效穗 Panicles/ 个·m ⁻²	千粒重 1 000 grain weight/g
CK	69.4c	12.1c	71.8b	182c	25.2a
LF	84.8b	14.9b	93.2a	286b	26.2a
MF	89.7b	16.2a	107.8a	347a	26.7a
HF	97.8a	17.8a	118.4a	384a	26.5a
FP	99.6a	15.9ab	109.3a	417a	23.8a

期可以持续提供养分供应,提高了水稻的穗粒数,比 FP 处理增加了 8.3%,所以最终水稻产量并没有出现显著的降低。研究表明,侧条施肥还可以降低水稻子粒的空秕率,提高千粒重,从而增加水稻的产量,增产幅度在 16%左右^[11-12]。

2.2 侧条施肥技术对水稻氮素吸收和偏生产力的影响

不同施肥处理对水稻秸秆吸氮量、子粒吸氮量和地上部总吸氮量都有显著影响。氮素吸收累积主要集中在子粒中,作物秸秆也累积相当量的氮素,且其与秸秆产量密切相关。水稻秸秆和子粒吸氮量随着施肥量提高而增加,FP 处理和 HF 处理水稻地上部总吸氮量显著高于其他施肥处理,但 FP 处理和 HF 处理差异不显著(表5)。FP 处理吸氮量为 158.1 kg·hm⁻²,其次为 HF 处理的 135.1 kg·hm⁻²,其他施肥处理总吸氮量显著低于 FP 处理和 HF 处理。HF 处理可以满足水稻生育期对氮素的需求,在减少氮肥用量的前提下并没有减少植株对氮素的吸收量,降低了氮素流失的风险。

氮肥偏生产力(PFP_N)表示施用每千克氮肥能生产的粮食产量,其大小可以表征提高氮肥利用率的潜力^[13-14]。从 PFP_N 角度评价了水稻氮肥生产效率情况,结果表明,施入每千克氮肥不同施肥处理可生产作物子粒产量存在差异,PFP_N 随着施氮量的增加呈现出降低的趋势。LF 处理、MF 处理、HF 处理和 FP 处理

表 5 侧条施肥对水稻氮素吸收和氮肥偏生产力的影响

Table 5 Effect of side bar fertilization on rice N uptake and PFP

处理 Treatment	秸秆吸氮量 Straw N uptake/ kg·hm ⁻²	子粒吸氮量 Grain N uptake/ kg·hm ⁻²	总吸氮量 Total N uptake/ kg·hm ⁻²	氮肥偏生产 力 PFP _N /kg· kg ⁻¹
CK	15.1d	36.2c	49.6d	—
LF	36.7c	42.3b	79.0c	67.8
MF	42.1c	58.4b	100.5b	46.4
HF	56.7b	78.4a	135.1a	39.1
FP	69.6a	88.5a	158.1a	23.7

注:氮肥偏生产力=作物产量/施氮量。

Note: PFP_N = Crop yield/ N input.

PF_N 分别为 67.8、46.4、39.1 kg·kg⁻¹ 和 23.7 kg·kg⁻¹。侧条施肥各处理的 PF_N 均显著高于农民常规施肥 (FP) 处理。可见,侧条施肥技术可以显著提高氮肥的生产效率^[14]。

2.3 侧条施肥技术对土壤-水稻体系中氮素表观平衡的影响

根据水稻整个生育期间的氮素输入和输出项,以 0~100 cm 深度土层为界面,计算水稻-土壤体系内氮素表观平衡,结果如表 6 所示。氮肥投入和残留的 N_{min} 是当季水稻的主要氮素输入途径,其次是灌水带入的氮,稻田土壤长期处于淹水状态,矿化作用很难发生,当季土壤氮素矿化量仅有 2.4 kg·hm⁻²。水稻氮素输出主要是表观损失、作物吸收和土壤残留。常规施肥处理氮素的表观损失量显著高于各侧条施肥处理,不同施肥处理下表观损失达 49.2~174.2 kg·hm⁻²,最高的为 FP 处理,整个水稻生育期氮素的表观损失量为 174.2 kg·hm⁻²;其次是 MF 处理,氮素的表观损失为 61.9 kg·hm⁻²。各处理间土壤 N_{min} 残留差异不大,CK 处理在水稻收获后 0~100 cm 土层 N_{min} 是 54.2 kg·hm⁻²,而 FP 处理虽然施氮量高达 300 kg·hm⁻²,水稻收获后 0~100 cm 土层 N_{min} 残留也只有 93.5 kg·hm⁻²。说明施入的氮肥随着渗漏水淋洗和干湿交替导致的氨挥发损失严重,大部分损失出水稻-土壤体系,造成对环境的危害^[13]。

3 讨论

水稻侧条施肥技术是日本近年来开始推广的一种水稻栽培技术,占到日本国内水稻种植面积的 60% 左右。由于肥料呈条状施在根系一侧,肥料的脱氮和溶出损失少,肥料用量减少 30% 左右,但根际氮肥浓度高于常规施肥的 5~6 倍,水稻分蘖数比常规增加

20%~30%。李昊儒等^[11]在山东夏玉米上进行的侧条施肥结果表明,侧条施肥夏玉米产量分别比常规混施高 3.26%,同时提高了氮肥利用率。本课题组连续进行了 2 年的田间小区试验,2010 年水稻产量结果见参考文献[14],2011 年水稻产量和 2010 年差异较大,有 20% 左右的降幅,原因是 2011 年 9 月下旬水稻灌浆期,宁夏出现连续 10 d 的持续降雨天气,导致当年引黄灌区水稻产量下降,但 2 年的趋势表现一致,侧条施肥 HF 处理与农民常规施肥处理比较,水稻产量均没有出现显著降低。

采用侧条施肥技术并配合缓释肥料,可以显著提高水稻地上部对氮素的吸收量。侧条施肥各处理水稻生育期间氮素表观损失显著低于农民常规施肥 (FP) 处理,氮素表观损失在 49.2~61.9 kg·hm⁻²,远低于 FP 处理的 174.2 kg·hm⁻²,侧条施肥技术较大程度上降低了氮素损失。朱兆良等^[12]认为稻田生态系统中化肥氮的当季表观利用率低、损失率偏高,有时有明显的净残留。当氮素供应输入超过作物同化能力时,稻田系统氮出现盈余^[15],将导致损失增加,并对环境产生影响^[16]。缓释肥在提高氮肥利用率上效果显著,与普通肥料相比,其肥效长、一次施用能够满足作物整个生育期生长的养分需求,配合侧条施肥技术,可以减少施肥次数并提高作物产量,提高肥料利用率,降低肥料流失对环境的污染。缓释肥价格虽然高于普通肥料,但施肥量减少了约 40%,并没有增加经济投入,水稻全生育期一次施肥,降低了劳动强度,在将来的水稻种植中应用前景广阔。

4 结论

(1)采用侧条施肥技术,HF 处理在氮肥用量减少约 40% 的条件下,与农民常规施肥 (FP) 处理比较子

表 6 水稻生育期 0~100 cm 土层氮素表观平衡(kg·hm⁻²)

Table 6 Apparent N balance during the whole rice season in 0~100 cm soil layer(kg·hm⁻²)

项目 Item	CK	LF	MF	HF	FP
N 输入 N input					
施氮量 N fertilizer	0	74	125	176	300
灌水带入氮 Irrigation N	21.1	21.1	21.1	21.1	21.1
秧苗带入氮 Seeding N	1.2	1.0	1.0	1.0	1.2
播前无机氮 N _{min} before Planting	103.4	103.4	103.4	103.4	103.4
净矿化 Net mineralization	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4
总量 Sum	129.0	201.9	252.9	303.9	429.0
N 输出 N output					
水稻收获带走 N removal by harvest	51.6	86.5	109.9	150.2	161.3
残留无机氮 Residual N _{min}	54.2	66.2	81.1	96.0	93.5
氮表观损失 N surplus	23.2	49.2	61.9	57.7	174.2
总量 Sum	129.0	201.9	252.9	303.9	429.0

粒产量没有显著降低;HF处理水稻有效穗低于FP处理,但穗粒数比FP处理增加了8.3%。

(2)水稻地上部吸氮量随着施肥量提高而增加,FP处理和HF处理水稻地上部总吸氮量显著高于其他处理,但FP处理和HF处理差异不显著。氮肥偏生产力(PFP_N)随着施氮量的增加呈现出降低的趋势,侧条施肥各处理的PFP_N在39.1~67.8 kg·kg⁻¹之间,显著高于FP处理,侧条施肥技术可以显著提高氮肥生产效率。

(3)FP处理氮素表观损失量最高,为174.2 kg·hm⁻²,大部分氮素损失出水稻-土壤体系,造成对环境的危害。侧条施肥各处理氮素表观损失量在49.2~61.9 kg·hm⁻²之间,显著低于常规施肥处理。

参考文献:

- [1] 刘汝亮,李友宏,张爱平,等.育秧箱全量施肥对水稻产量和氮素流失的影响[J].应用生态学报,2012,23(7):1853-1860.
LIU Ru-liang, LI You-hong, ZHANG Ai-ping, et al. Effect of seeding-box total fertilization technology on rice yield and N loss[J]. *China Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(7): 1853-1860. (in Chinese)
- [2] 张晴雯,张惠,易军,等.青铜峡灌区水稻田化肥氮去向研究[J].环境科学学报,2010,30(8):1707-1714.
ZHANG Qing-wen, ZHANG Hui, YI Jun, et al. The fate of fertilizer-derived nitrogen in a rice field in the Qingtongxia irrigation area[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(8): 1707-1714. (in Chinese)
- [3] 刘汝亮,李友宏,张爱平,等.氮肥后移对引黄灌区水稻产量和氮素淋溶损失的影响[J].水土保持学报,2012,26(2):16-20.
LIU Ru-liang, LI You-hong, ZHANG Ai-ping, et al. Effect of posting N application on rice yield and N losses in Yellow River irrigation area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(2): 16-20. (in Chinese)
- [4] 赵营,同延安,张树兰,等.氮磷钾施用量对灌淤土水稻产量及肥料利用率的影响[J].西北农业学报,2010,19(2):118-121.
ZHAO Ying, TONG Yan-an, ZHANG Shu-lan, et al. Effect of different N, P₂O₅, K₂O rates on yield and fertility using efficiency of paddy field in irrigation-warping soil of Ningxia[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2010, 19(2): 118-121. (in Chinese)
- [5] 刘汝亮,李友宏,马世铭,等.供氮水平对引黄灌区春小麦氮平衡及产量和加工品质的影响[J].干旱地区农业研究,2011,29(4):94-98.
LIU Ru-liang, LI You-hong, MA Shi-ming, et al. Effects of N application rates on N balance, grain yield and industrial quality of spring wheat[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2011, 29(4): 94-98. (in Chinese)
- [6] 徐明岗,李菊梅,李东初,等.控释氮肥对双季水稻生长和氮肥利用率的影响[J].植物营养与肥料学报,2009,15(5):1010-1015.
XU Ming-gang, LI Ju-mei, LI Dong-chu, et al. Effects of controlled-release nitrogen fertilizer on growth and fertilizer use efficiency of double rice in southern China [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(5): 1010-1015. (in Chinese)
- [7] 翟军海,高亚军,周建斌.控释/缓释肥料研究概述[J].干旱地区农业研究,2002,20(1):45-48.
ZHAI Jun-hai, GAO Ya-jun, ZHOU Jian-bin. The review of controlled/slow release fertilizer[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2002, 20(1): 45-48. (in Chinese)
- [8] 易军,张晴雯,王明.宁夏黄灌区灌淤土硝态氮运移规律研究[J].农业环境科学学报,2011,30(10):2046-2053.
YI J, ZHANG Q W, WANG M, et al. Nitrate-nitrogen transport in an anthropogenic-alluvial soil of Ningxia irrigation area, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(10): 2046-2053. (in Chinese)
- [9] 扈艳萍,朱彪,高振芹.水稻机插侧条施肥效果研究[J].辽宁农业科学,2005(3):22-23.
HU Yan-ping, ZHU Biao, GAO Zhen-qin. The research on rice machine transplanting of side fertilization[J]. *Liaoning Agriculture Science*, 2005(3): 22-23. (in Chinese)
- [10] 张惠,杨正礼,罗良国,等.黄河上游灌区稻田N₂O排放特征[J].生态学报,2011,31(21):6606-6615.
ZHANG H, YANG Z L, LUO L G, et al. The feature of N₂O emission from a paddy field in irrigation area of the Yellow River [J]. *Acta Ecological Sinica*, 2011, 31(21): 6606-6615. (in Chinese)
- [11] 李昊儒,梅旭荣,郝卫平,等.山东省夏玉米侧条施肥技术应用研究[J].中国农学通报,2012,28(27):130-133.
LI Hao-ru, MEI Xu-rong, HAO Wei-ping, et al. The application of side fertilization technology on summer corn in Shandong province[J]. *China Agriculture Science Bulletin*, 2012, 28(27): 130-133. (in Chinese)
- [12] 朱兆良,张福锁.主要农田生态系统氮素行为与氮肥高效利用的基础研究[M].北京:科学出版社,2010:24-26.
ZHU Zhao-liang, ZHANG Fu-suo. Main farmland ecosystem nitrogen behavior and the basic research of efficient utilization of nitrogen fertilizer[M]. Beijing: Science Press, 2010: 24-26. (in Chinese)
- [13] 刘保存,徐明秋,邹国元,等.缓控释肥料理论与实践[M].北京:中国农业科学技术出版社,2009:51-53.
LIU Bao-cun, XU Ming-qiu, ZOU Guo-yuan, et al. Theory and practice of slow controlled release fertilizer[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2009: 51-53. (in Chinese)
- [14] 张爱平,刘汝亮,杨世琦,等.基于缓释肥的侧条施肥技术对水稻产量和氮素流失的影响[J].农业环境科学学报,2012,31(3):555-562.
ZHANG Ai-ping, LIU Ru-liang, YANG Shi-qi, et al. Effect of side bar fertilization technology based on slow-release fertilizer on rice yield and nitrogen losses[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(3): 555-562. (in Chinese)
- [15] Anonym. Fertilized to death [J]. *Nature*, 2003, 425: 894-895.
- [16] Cui Zhen-ling, Zhang Fu-suo, Chen Xin-ping, et al. On-farm evaluation of an in-season nitrogen management strategy based on soil N_{min} test [J]. *Field Crops Research*, 2008, 105: 48-55.