

应用于水稻生产的增效减负环保型施肥技术比对 ——以宁夏引黄灌区为例

张爱平¹, 高 霁¹, 刘汝亮², 陈 哲¹, 杨世琦¹, 杨正礼¹, 张晴雯^{1*}

(1.中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所农业部农业环境重点实验室, 农业清洁流域创新团队, 北京 100081; 2.宁夏农林科学院, 宁夏 银川 750000)

摘 要:过量施肥及盲目灌溉导致宁夏引黄灌区水稻种植中氮素淋失严重, 氮肥利用率低下。探索能够在保障水稻产量前提下减少氮素淋失、提高氮素利用率的环保型施肥技术是该区域实现农业可持续发展的现实需求。本研究在前期研究的基础上, 就不同施肥技术对灌区水稻生育期内氮素淋失、氮素利用率及水稻产量的影响效果进行比对, 旨在为后续工作中技术筛选及推广提供依据。试验共设置4个处理, 分别是(1)无肥对照(CK): 不施氮肥; (2)常规施肥(FP): 施用氮肥 300 kg N·hm⁻², 60%作为基肥, 分蘖和孕穗期各追肥 20%; (3)侧条施肥(SD): 施用水稻专用控释肥 120 kg N·hm⁻², 水稻插秧时将肥料一次性施入; (4)育苗箱全量施肥(NB): 施用水稻专用控释肥, 用量为 120 kg N·hm⁻², 育秧时一次性全量施入育秧盘。结果表明, 采用 SD 和 NB 在氮素用量较 FP 降低 60% 的情况下, 水稻产量都不会下降。SD 可以显著降低稻田氮素淋溶损失, FP 水稻生育期内可溶性总氮(TN)、硝态氮(NO₃⁻-N)和铵态氮(NH₄⁺-N)淋失量分别为 39.89、26.22 kg·hm⁻² 和 5.49 kg·hm⁻², SD 和 FP 相比, TN、NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 的淋失量分别减少 18.97、11.18 kg·hm⁻² 和 2.27 kg·hm⁻²; 同时 SD 可以显著提高宁夏灌区水稻氮素利用率, 较 FP 提高 21.4%。NB 和 FP 相比, TN、NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 淋失量分别减少 14.36、10.14 kg·hm⁻² 和 1.84 kg·hm⁻², 氮素利用率亦提高 15.7%, 但是 TN、NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 淋失量较 SD 处理分别增加 4.61、1.04 kg·hm⁻² 和 0.43 kg·hm⁻², 同时氮素利用率亦减少 5.7%。综合考虑水稻产量和环境效益, SD 更适合在宁夏灌区水稻种植中推广应用。

关键词:施肥技术; 灌淤土; 氮淋失; 氮素利用率; 宁夏引黄灌区

中图分类号: S147.21

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2015)02-0175-10

doi: 10.13254/j.jare.2014.0334

The Comparison of Different Fertilizer Technologies on Nitrogen Leaching Losses and Nitrogen Use Efficiency in Rice Production—Taking Ningxia Irrigation Region as an Example

ZHANG Ai-ping¹, GAO Ji¹, LIU Ru-liang², CHEN Zhe¹, YANG Shi-qi¹, YANG Zheng-li¹, ZHANG Qing-wen^{1*}

(1. Agricultural Clean Watershed Research Group, Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, CAAS, Beijing 100081, China; 2. Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan 750000, China)

Abstract: High N fertilizer and flooding irrigation applied to rice in anthropogenic-alluvial soil often result in N leaching and low use efficiency of applied fertilizer N from the rice field in Ningxia irrigation region in the upper reaches of the Yellow River. Sound N management practices need to be established to improve N use efficiency while sustain high grain yield levels and minimize fertilizer N loss to the environment. We investigated the effects of different fertilizer technologies on N leaching, N use efficiency and rice yield. The four fertilizer N treatments were CK (No nitrogen fertilizer application treatment); FP (Farmer's practice of application rate of urea at 300 kg N·hm⁻², 60% used as base fertilizer, 20% as tillering fertilizer and 20% as booting fertilizer); SD (Controlled-release nitrogen fertilizer at 120 kg N·hm⁻², all controlled-release fertilizer was applied as base fertilizer while transplant rice seedlings) and NB (Controlled-release nitrogen fertilizer at 120 kg N·hm⁻², all controlled-release fertilizer was applied as base fertilizer in the seeding soil). The results showed that the SD and NB treatments could reduce the amount of nitrogen applied by 60% compared to FP but still maintain crop yields while substantially reducing N losses to the environment. The SD could significantly decrease the N leaching losses from the paddy field. Under the FP treatment, the leaching losses of

收稿日期: 2014-11-27

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(BSRF201306); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07201-009)

作者简介: 张爱平(1980—), 助理研究员, 主要从事农业污染防治方面研究。E-mail: apzhang0601@126.com

* 通信作者: 张晴雯 E-mail: wagj_100@126.com

TN, NO_3^- -N and NH_4^+ -N were 39.89, 26.22 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ and 5.49 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, respectively. Compared with FP treatment, the SD treatment could decrease the leaching losses of TN, NO_3^- -N and NH_4^+ -N by 18.97, 11.18 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ and 2.27 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$. The nitrogen use efficiency of SD treatment was 55.7% which increased by 21.4% compared with FP treatment. NB treatment also could decrease nitrogen leaching losses TN, NO_3^- -N and NH_4^+ -N by 14.36, 10.14 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ and 1.84 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ and increase the N use efficiency by 15.7% compared with FP, but it increased nitrogen leaching losses of TN, NO_3^- -N and NH_4^+ -N by 4.61, 1.04 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ and 0.43 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ and decreased nitrogen use efficiency by 5.7% compared with SD. Considering the importance of sustaining high food production and minimizing negative environmental threat, we recommend the SD as an alternative management strategy for mitigating N loss in irrigated rice system in Ningxia irrigation region.

Keywords: fertilizer technology; anthropogenic-alluvial soil; nitrogen leaching; nitrogen use efficiency; Ningxia Yellow River irrigation region

化肥是保障作物产量的重要手段之一,中国是世界上最大的化肥消费国,化肥用量占世界化肥总用量的 32%,其中灌溉水稻化肥用量约占 7%,并生产着全国 95%左右的大米^[1-2]。宁夏引黄灌区位于我国西北干旱和半干旱区,灌溉面积 9 697 km^2 ,是我国最大和最古老的灌区之一。水稻是该地区主要种植作物,单季氮肥用量达 300 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,远高于 180 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的全国平均水平^[3],同时由于引黄灌溉便利,水稻整个生长季的灌溉量在 1 400~1 600 $\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 之间,过量施肥加上盲目灌溉导致该地区水稻种植中氮素流失严重,氮肥利用率低下^[4-6]。据估算,宁夏灌区每年所施氮肥的 20%~65%会进入黄河^[7],并且每年约有 28 865 t 氮素从稻田经各种途径损失^[4],而淋失是该地区稻田氮素损失的主要途径之一。围绕如何提高宁夏灌区稻田氮素利用率,相关学者也进行了探讨^[8-10],但这些研究大多集中在优化水肥管理上,围绕施肥技术的综合研究很少。因此,探索能够在保障水稻产量前提下减少氮素淋失、提高氮素利用率的环保型施肥技术是实现该区域农业可持续发展的现实需求之一。

侧条施肥技术(SD)和育苗箱全量施肥技术(NB)是日本从 20 世纪 90 年代开始应用于水稻生产的 2 种环保型施肥技术。SD 是在水稻插秧时将肥料一次性集中施于秧苗一侧 5~8 cm 深处的施肥方法,这种施肥方法的优点是可将肥料呈条状集中而不分散,形成一个贮肥库逐渐释放供给水稻生育需求。NB 是在水稻育秧时将控释氮肥一次性集中施于水稻种子附近,插秧时肥料附着在水稻根系上带进土壤,从而将肥料集中在水稻根系附近,逐渐释放养分供给水稻生育需求,减少肥料养分流失。相关研究表明二者在提高氮素利用率、降低氮素损失以及作物增产方面都有积极作用^[11-12],但现有研究大多数集中在对稻田氮素径流损失的影响上^[12-14],对氮素淋失影响的相关研究很少,同时二者的实际应用效果与气候和土壤条件也有很大关系^[15]。宁夏引黄灌区灌淤土是在人为引用含

泥沙的水灌溉落淤与耕种施肥交替作用下形成的一种特殊的土壤类型^[16],该区域稻田氮素淋失严重,对当地水体环境造成很大影响^[5-6],寻求减少氮素淋失的技术途径对实现该区域农业可持续发展,保障黄河水质安全都有重要意义。结合中-日政府间合作项目(JICA 项目 II 期),课题组从 2010 年引进这 2 种施肥技术,并通过大田试验分别验证其在宁夏灌区的有效性和应用可行性^[17-18]。本研究是在前期试验基础上,进一步就 2 种环保型施肥技术的节肥效果、氮素流失削减能力及氮素利用率提高情况进行比对,旨在为后续工作中技术筛选及推广提供依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验于 2011 年在宁夏引黄灌区灵武市灵武农场三队进行(106°17'43" E, 38°07'14" N),属温带大陆性半干旱气候,海拔为 1 110 m,年均降水量 192.9 mm,年蒸发量 1 762.9 mm,年平均积温为 3 866.3 $^{\circ}\text{C}$ 。土壤类型为灌淤土,耕层厚度约 20 cm,土壤肥力属于中高产田,表层土壤盐分含量和土壤 pH 值均较高,土壤基本性质见表 1。水稻是该区域主要种植作物之一,化肥投入水平为 300 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。主要的种植模式为稻麦轮作。

水稻生育期内降雨量和灌溉量见图 1。

水稻生育期内渗漏量见表 2。

1.2 试验设计

试验共设 4 个处理,(1)无肥对照(CK):不施氮肥;(2)常规施肥(FP):尿素,用量为 300 $\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$,施用方法为 60%作为基肥撒施,其余部分分别在分蘖和孕穗期各根外追肥 20%;(3)侧条施肥(SD):水稻专用控释肥,释放周期 100 d 左右,溶出速率呈“S”型曲线,用量为 120 $\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$,水稻插秧时用侧条施肥机将肥料一次性集中施于秧苗一侧 5~8 cm 深处;(4)育苗箱全量施肥(NB):水稻专用控释肥,释放周期

表 1 试验地土壤基本性质

Table 1 Properties of the anthropogenic-alluvial soil in the study site

土层深度 Soil depths/cm	容重 Bulk density/g·kg ⁻¹	有机质 Organic matter/g·kg ⁻¹	总氮 Total N/g·kg ⁻¹	孔隙度 Porosity /%	土壤粒度 Soil particle size/%		
					粘粒 Clay	粉粒 Silt	砂粒 Sand
0~20	1.39	14.14	10.98	43.15	17.79	52.43	26.91
20~40	1.56	10.42	0.96	41.71	16.70	52.15	25.64
40~60	1.63	8.12	0.75	41.03	27.01	66.71	5.26
60~80	1.50	5.56	0.34	44.82	12.11	31.96	55.93
80~100	1.52	4.48	0.31	43.72	15.96	42.05	42.00

表 2 水稻不同生育期内渗漏量(mm)

Table 2 Different leakage amount in rice growth period (mm)

处理 Treatment	生育期 Growth stage						总量 Total
	返青期 Seedling stage	分蘖期 Tillering stage	孕穗期 Booting stage	开花期 Flowering stage	灌浆期 Filling stage	成熟期 Harvest stage	
CK	54.8	306.5	20.7	11.6	40.2	21.3	455.1
FP	82.3	424.8	59.4	33.6	67.4	20.3	687.8
SD	67.4	386.7	35.6	29.3	49.3	27.3	595.6
NB	65.3	364.8	40.5	32.6	54.2	31.4	588.8

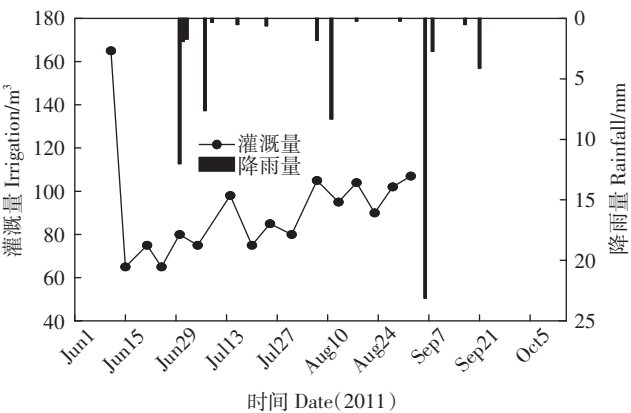


图 1 水稻生育期内灌溉量和降雨量

Figure 1 Precipitation and irrigation amount during whole growing period of rice

100 d 左右,溶出速率呈“S”型曲线,用量为 120 kg N·hm⁻²,育秧时一次性全量施入育秧盘,随秧苗移栽进入土壤)。磷钾肥均作为基肥在整地时一次性施入,施用量分别为 90 kg P₂O₅·hm⁻² 和 90 kg K₂O·hm⁻²。供试水稻品种均为 96D10,于 2011 年 5 月 20 日育秧,6 月 17 日插秧,10 月 12 日收获。每处理 3 个重复,随机区组排列。小区之间在插秧前用双层塑料膜隔离,地下埋深 130 cm,地面田埂包高 30 cm,以减少小区间的测渗和串流。每个小区设有独立的排水口和灌水口,水稻生长季(从泡田至收获)共灌水 18 次,灌溉量为 1 450 mm。其他农作管理措施与当地常规管理同步。

水稻生长期间,不人为排水,保持田面原有水深,使其自然渗漏和蒸发。

1.3 样品采集与测定

1.3.1 水样采集

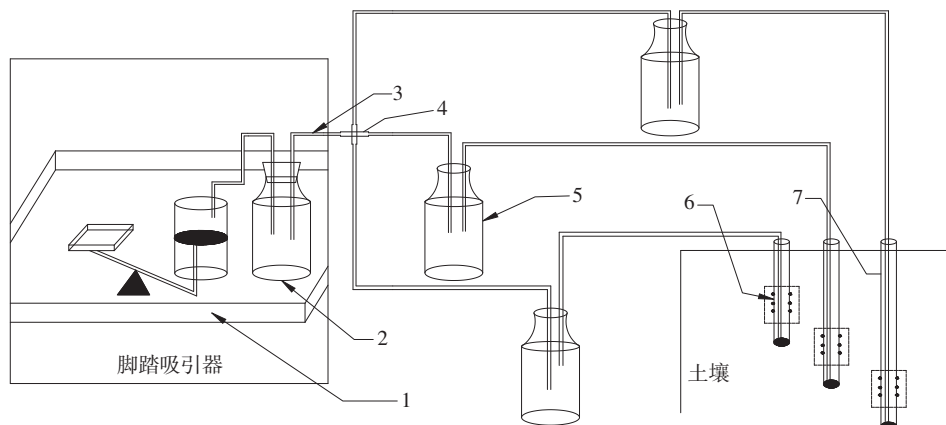
按照每次施肥后 1、3、5、7、9 d 采集淋溶水。其余时间段按照 10 d 的间隔采集。整个生育期共计采样 20 次。土壤淋溶液采用已经获得专利的淋溶水采样装置(图 2)采集,该装置用打孔的 PVC 管收集固定层次的土壤溶液,小区内打入的长度为 150 cm,其中地上部分 30 cm。以 100 cm 土层的淋溶水氮素浓度作为计算氮素渗漏损失量的依据。

1.3.2 植株样采集

在水稻成熟时,每小区采用 5 点取样法按照对角线采集 1 m² 的样方,之后按照籽粒和秸秆部位分开,于烘箱内 70 ℃杀青 20 min,105 ℃烘干至恒重,计算水稻籽粒产量和秸秆生物量,并进一步考种,测定株高、穗长、穗数、穗粒数及千粒重等指标。

1.3.3 渗漏量测定

渗漏量测定采用蒸渗仪(图 3)。蒸渗仪的安装参考中华人民共和国水利行业标准灌溉试验规范^[19](中华人民共和国水利行业标准 SL13—2004,2005)。蒸渗仪面积 1 m²,水稻插秧前埋入试验小区,埋深 100 cm,地上部分 30 cm,蒸渗仪里按照原状土层回填,土壤高度和大田保持相同,插秧时蒸渗仪里按照大田水稻种植密度种植水稻,所有农事操作同大田。通过监



1 脚踏吸引器;2 缓冲瓶(5 L);3 四通 PE 气动阀;4 $\Phi 6$ mm PE 气动管;5 缓冲瓶(0.5 L);6 无纺布;7 $\Phi 50$ mm PVC 塑料管

图 2 淋溶水取样装置

Figure 2 Leakage water sampling device

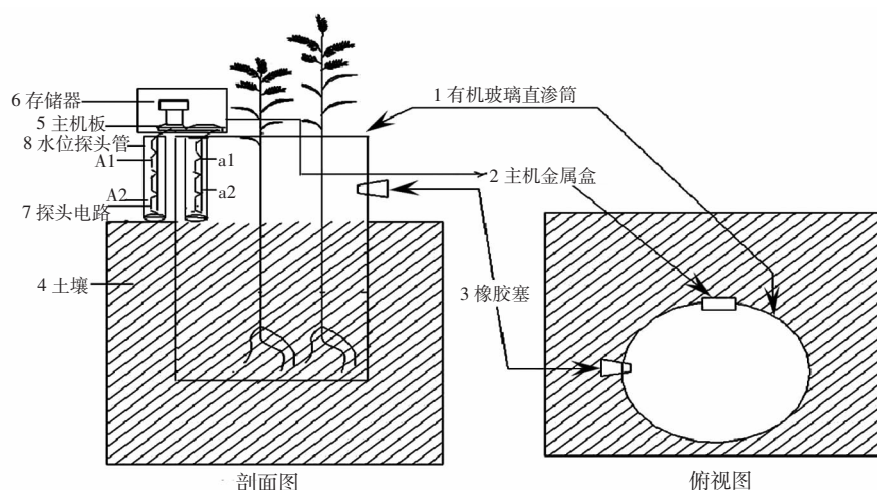


图 3 渗漏量测定装置

Figure 3 Leakage water quantity device

测探头获取渗漏桶内外壁不同的水位,然后经单片机做减法得到水位差,计算渗漏量,相关监测数据会保存到存储器中。初次田间观测时记录渗漏桶内壁水位值为 a_1 ,渗漏桶外壁水位为 A_1 ,下一次观测时记录渗漏桶内壁水位值为 a_2 ,渗漏桶外壁水位为 A_2 ,则 $(A_1 - A_2) - (a_1 - a_2)$ 差值即为稻田单位时间内水分渗漏量。

1.3.4 样品测定

土壤有机质采用重铬酸钾容量法-外加热法^[20];土壤和植株全氮测定采用凯氏法^[20];水样总氮用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法,硝态氮和铵态氮用法国产 FUTURA 流动分析仪测定。

1.4 数据分析

氮素渗漏量^[21]:

$$Q_n = C_n Q_w \quad (1)$$

式中, Q_n 为氮素渗漏量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; C_n 为氮素平均浓度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; Q_w 为淋溶液体积, $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

氮素利用率^[22]:

$$NUE = \frac{N_{\text{uptake with } N \text{ application}} - N_{\text{uptake without } N \text{ application}}}{N_{\text{applied}}} \times 100 \quad (2)$$

其中, $N_{\text{uptake with } N \text{ application}}$ 为施氮处理地上部吸氮量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; $N_{\text{uptake without } N \text{ application}}$ 为不施氮处理地上部吸氮量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; N_{applied} 为氮肥施用量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

氮肥偏生产力^[23]:

$$PFP = \frac{Y}{N_{\text{applied}}} \quad (3)$$

其中, Y 为水稻产量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; N_{applied} 为氮肥施用量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

所得数据采用 SAS 软件进行统计分析,并用 Sigmaplot 12.5 作图,多重比较采用最小显著差异法

(LSD),方差分析在 $\alpha=0.05$ 水平上进行。

2 结果与分析

2.1 不同施肥技术对水稻产量的影响

所有施氮处理和 CK 相比,都显著提高了水稻产量。FP、SD 和 NB 处理水稻产量分别为 7 098.33, 7 120.00 kg·hm⁻² 和 6 984.33 kg·hm⁻²(表 3),其中 SD 处理较 CK 提高 110.22%,FP 和 NB 处理分别提高 109.56%和 106.20%,但各施肥处理之间差异不显著($P<0.05$)。这表明采用 SD 和 NB 施肥技术,在氮肥用量降低 60%的情况下,水稻产量不会下降。在对产量构成因素的影响上,所有施肥处理都显著提高了水稻的有效穗数,FP、SD 和 NB 处理的有效穗数分别比 CK 处理增加 129.12%,132.42%和 120.88%,同时 FP 和 SD 有效穗数显著高于 NB,但 FP 和 SD 之间没有显著差异($P<0.05$)。不同处理间水稻千粒重差异显著,SD 处理水稻千粒重为 29.63 g,较 FP(23.87 g)提高 24.13%,较 NB(27.76 g)提高 6.74%,可见千粒重增加是 SD 在氮肥用量较 FP 降低 60%的情况下水稻产量没有发生显著变化的重要原因之一。

表 3 不同施肥技术对水稻产量及其构成因子的影响
Table 3 Effects of different fertilizer technologies on rice yield and its composition

处理 Treatment	籽粒产量 Yield/ kg·hm ⁻²	穗粒数 Grain number	穗数 Panicle numbers/ × 10 ⁴ ·hm ⁻²	千粒重 1 000-grain weight/g
CK	3 387.00b	71.83b	182.33c	25.20c
FP	7 098.33a	109.33a	417.33a	23.87d
SD	7 120.00a	107.93a	423.00a	29.63a
NB	6 984.33a	111.61a	402.67b	27.76b

2.2 不同施肥技术对氮素淋失的影响

2.2.1 可溶性总氮

不同施肥技术下,稻田生育期内淋溶液中可溶性总氮(TN)浓度变化趋势相似,施肥或灌水后的 1~3 d 淋溶液中 TN 浓度出现峰值,随后逐步下降(图 4)。所有处理淋溶液中 TN 浓度最大值都出现在第 1 次取样时,CK、SD、NB 和 FP 处理下,淋溶液中 TN 浓度最大值分别为 5.61、7.49、11.66 mg·L⁻¹ 和 17.36 mg·L⁻¹,SD 和 NB 处理淋溶液中 TN 最大浓度分别比 FP 处理低 9.87 mg·L⁻¹ 和 5.70 mg·L⁻¹,CK 处理淋溶液中 TN 浓度在整个生长季节都保持较低水平,浓度处于 1.75~5.61 mg·L⁻¹ 之间,显著低于其他处理。插秧 50 d 后,除 FP 处理外所有处理淋溶液中 TN 浓度都降到

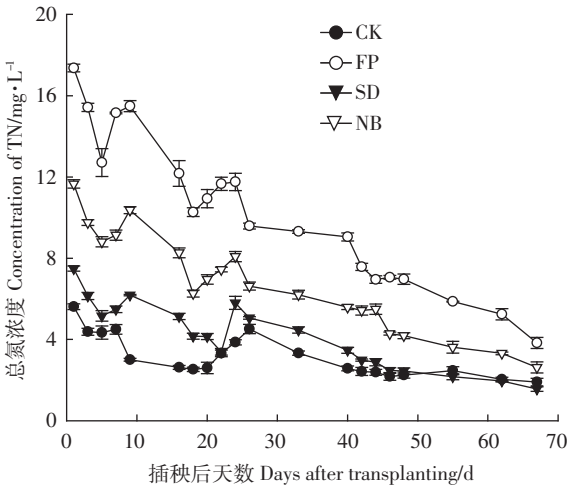


图 4 水稻生育期内淋溶水中 TN 动态
Figure 4 Dynamics of TN concentration in leaching water at 100 cm depth under different treatments

5.0 mg·L⁻¹ 以下,FP 处理也低于 7.0 mg·L⁻¹,这表明插秧后 50 d 前是稻田氮素淋失的关键时期。

从表 4 可以看出,水稻生育期内 TN 淋失量大小顺序为 FP>NB>SD>CK。淋失量最大的为 FP 处理,淋失量达 39.89 kg·hm⁻²,与 FP 处理相比,SD 处理 TN 淋失量减少 47.6%,同时 SD 处理较 NB 处理 TN 淋失量亦减少 18.06%。施肥处理水稻各个生育时期 TN 淋失方差分析结果显示:FP 处理返青期和分蘖期 TN 淋失量显著高于 SD 和 NB 处理,但 SD 和 NB 之间差异不显著;相较于 FP 处理,SD 和 NB 处理 TN 主要淋失期后延至开花期,因此二者在开花期的 TN 淋失量明显高于 FP 处理。

2.2.2 硝态氮

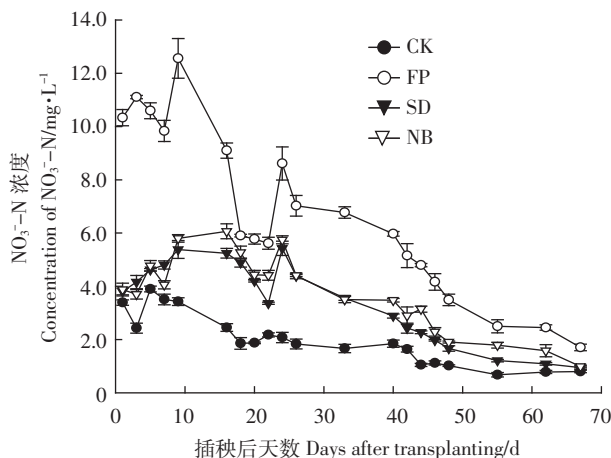
不同施肥技术下水稻生育期内淋溶液中 NO₃⁻-N 动态如图 5 所示。各处理淋溶液中 NO₃⁻-N 浓度变化呈现与 TN 相似趋势,即随时间推移逐渐下降。同时所有施肥处理淋溶液中 NO₃⁻-N 浓度都高于 CK 处理,CK 处理 NO₃⁻-N 浓度最大值为 3.89 mg·L⁻¹,FP 处理为 12.56 mg·L⁻¹,已高于 10.0 mg·L⁻¹ 的安全标准。SD 和 NB 处理 NO₃⁻-N 浓度最大值分别为 5.42 mg·L⁻¹ 和 6.06 mg·L⁻¹,较 FP 处理分别降低 7.14 mg·L⁻¹ 和 6.50 mg·L⁻¹。另外,SD 处理相较 NB 处理淋溶液中 NO₃⁻-N 浓度最大值略低。淋溶液中 NO₃⁻-N 浓度和施肥、灌溉等农事操作密切相关,FP 处理 2 次追肥(插秧后 10 d 和 23 d)都导致淋溶液中 NO₃⁻-N 浓度出现小的峰值。伴随 FP 处理淋溶液中 NO₃⁻-N 浓度的 2 个峰值,SD 和 NB 处理 NO₃⁻-N 浓度也有小幅回升,主要是受当地农事操作习惯即追肥后灌水的影响。

表 4 水稻生育期 TN 淋失量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)Table 4 The amount of TN leaching at different rice growth stages ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)

处理 Treatment	生育期 Growth stage						总量 Total
	返青期 Seedling stage	分蘖期 Tillering stage	孕穗期 Booting stage	开花期 Flowering stage	灌浆期 Filling stage	成熟期 Harvest stage	
CK	1.39b	4.49b	2.43c	2.13b	1.07b	0.44b	11.95d
FP	8.41a	19.74a	5.24b	2.57b	2.36a	1.57a	39.89a
SD	1.82b	6.42b	5.12b	3.56a	2.34a	1.67a	20.92c
NB	1.82b	6.42b	6.81a	5.86a	2.96a	2.11a	25.53b

注:同一列数据后不同字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Values followed by different letters in same column meant significant difference among treatments ($P<0.05$). The same as below.

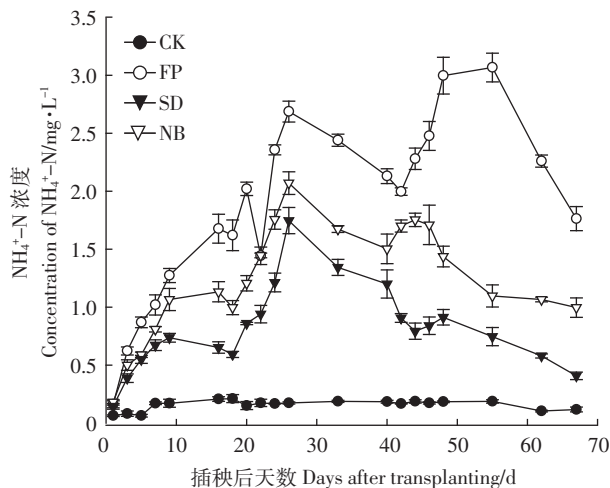
图 5 水稻生育期内淋溶水中 NO_3^- -N 动态Figure 5 Dynamics of NO_3^- -N concentration in leaching water at 100 cm depth under different treatments

水稻生育期内不同施肥技术下 NO_3^- -N 淋失量见表 5,其中 FP 处理水稻生育期内 NO_3^- -N 总淋失量为 $26.22 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,较 CK 高 $18.5 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,SD 和 NB 处理 NO_3^- -N 淋失量分别为 $15.04 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $16.08 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,分别比 FP 处理减少 42.64% 和 38.67%。CK 和 FP 处理 NO_3^- -N 淋失主要发生在分蘖期和孕穗期,分别占淋失总量的 64.1% 和 76.7%,而 SD 和 NB 处理 NO_3^- -N 淋失的主要时期较 FP 和 CK 有所延长,直到开花期,其间淋失量分别占总淋失量的 73.2% 和 73.4%。 NO_3^- -N

是氮素淋失的主要形式,4 个处理下水稻整个生育期内 NO_3^- -N 淋失量占 TN 淋失量的 63.1%~71.9%。

2.2.3 铵态氮

水稻生育期内淋溶液中 NH_4^+ -N 浓度变化趋势与 TN 和 NO_3^- -N 不同(图 6),出现峰值时间较二者晚,和 NO_3^- -N 相比,淋溶液中 NH_4^+ -N 浓度在水稻整个生育期都维持在较低水平($<3.50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),其中 CK 处理整个生育期淋溶液中 NH_4^+ -N 浓度均低于 0.5

图 6 水稻生育期内淋溶水中 NH_4^+ -N 动态Figure 6 Dynamics of NH_4^+ -N concentration in leaching water at 100 cm depth under different treatments表 5 水稻生育期 NO_3^- -N 淋失量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)Table 5 The amount of NO_3^- -N leaching at different rice growth stages ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)

处理 Treatment	生育期 Growth stage						总量 Total
	返青期 Seedling stage	分蘖期 Tillering stage	孕穗期 Booting stage	开花期 Flowering stage	灌浆期 Filling stage	成熟期 Harvest stage	
CK	0.65c	3.25b	1.70d	1.45c	0.44b	0.22c	7.72c
FP	2.35a	14.94a	5.17a	1.69c	1.42a	0.65b	26.22a
SD	1.32b	4.06b	3.71c	3.24b	1.63a	1.08a	15.04b
NB	1.12b	3.86b	4.21b	3.74a	1.84a	1.31a	16.08b

mg·L⁻¹,而 SD 和 NB 处理的最大值分别为 1.74 mg·L⁻¹ 和 2.07 mg·L⁻¹, 分别较 FP 处理最大值低 1.32 mg·L⁻¹ 和 0.99 mg·L⁻¹。除 CK 处理外,其余施肥处理淋溶液中 NH₄⁺-N 浓度整体呈现先升高后降低的趋势,这可能是由于上层 NH₄⁺-N 需要一定时间才能被淋洗到较深土层,同时深层土体一般处于饱和厌氧条件,硝化作用较弱,导致 NH₄⁺-N 持续累积,而后期 NH₄⁺-N 浓度下降明显,可能是由于晒田所致。

在水稻整个生长季,各处理间 NH₄⁺-N 淋失量在 0.87~5.49 kg·hm⁻² 之间,其中 FP 处理淋失量最大,为 5.49 kg·hm⁻²,SD 处理为 3.22 kg·hm⁻², 较 FP 处理减少 41.34%,NB 和 SD 处理没有显著差异(表 6)。在水稻各个生育时期,FP 处理下分蘖期、灌浆期和成熟期的 NH₄⁺-N 淋失量显著高于 SD 和 NB 处理,但 SD 和 NB 之间没有差异。开花期 SD 处理 NH₄⁺-N 淋失量明显少于 NB 处理。CK 和 FP 处理 NH₄⁺-N 淋失主要发生在分蘖期,分别占各自 NH₄⁺-N 总淋失量的 33.3% 和 30.6%,SD 和 NB 处理 NH₄⁺-N 淋失主要发生在孕穗期,分别占 NH₄⁺-N 总淋失量的 32.6%和 36.9%。

2.3 不同施肥技术对氮素利用率和偏生产力的影响

SD 显著提高水稻氮素利用率,FP 处理下水稻氮素利用率为 34.3%, 而 SD 和 NB 处理为 55.7%和 50.0%,分别比 FP 高 21.4%和 15.7%,同时 SD 处理较 NB 处理氮素利用率提高 5.7%。各施肥处理中水稻总吸氮量大小顺序为 FP>SD>NB>CK(表 7),其中 SD 和 NB 之间无显著差异,其余各处理差异显著;各处理间

秸秆吸氮量和籽粒吸氮量表现出和总吸氮量相同的趋势,即 FP 吸氮量最高,CK 吸氮量最低,SD 和 NB 之间没有显著差异(*P*<0.05)。氮肥偏生产力指单位投入的肥料氮所能生产的作物籽粒产量,在本试验中,FP 处理氮肥偏生产力为 23.7 kg·kg⁻¹,SD 和 NB 处理为 59.3 kg·kg⁻¹ 和 58.2 kg·kg⁻¹,显著高于 FP 处理,但 SD 和 NB 处理之间不存在明显差异。

3 讨论

已有研究表明,减少氮素淋失是提高氮素利用率的重要途径之一^[24-25],宁夏引黄灌区水稻种植过程中氮肥用量大,施用方法一般为撒施,同时习惯于施肥后大水漫灌,导致大量氮素随灌溉水下渗淋失^[6]。本研究成果显示在 FP 处理下, 氮素淋失量为 39.89 kg·hm⁻²,高于我国太湖地区的 10~34 kg·hm⁻²^[26]和南方稻田的 6.8~27.0 kg·hm⁻²^[27],刘汝亮等^[10]在引黄灌区采用氮肥后移技术,优化施氮量为 240 kg·hm⁻² 时,稻田总氮淋失量减少 33.1%,为 29.78 kg·hm⁻²,与南方稻田研究结果相近。采用 SD 后, TN、NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 的淋失量分别减少 47.56%,42.64%和 41.34%。主要原因是 SD 处理所用的水稻专用控释肥的释放规律和水稻生长的需肥规律基本一致,更好地实现了养分的供需平衡。从水稻的各个生育时期来看,分蘖和孕穗期是氮素淋失的关键时期,水稻生育前期土壤氮素残留较高,基肥施用量大以及泡田灌溉等操作频繁是早期氮素淋失量较高的主要原因^[28-29]。水稻生育后期灌

表 6 水稻生育期 NH₄⁺-N 淋失量(kg·hm⁻²)
Table 6 The amount of NH₄⁺-N leaching at different rice growth stages (kg·hm⁻²)

处理 Treatment	生育期 Growth stage						总量 Total
	返青期 Seedling stage	分蘖期 Tillering stage	孕穗期 Booting stage	开花期 Flowering stage	灌浆期 Filling stage	成熟期 Harvest stage	
CK	0.12b	0.29c	0.12b	0.09c	0.21b	0.05c	0.87c
FP	0.27a	1.68a	1.18a	0.81ab	1.01a	0.53a	5.49a
SD	0.22a	0.53bc	1.05a	0.64b	0.42b	0.36b	3.22b
NB	0.20ab	0.57b	1.35a	0.94a	0.33b	0.27b	3.65b

表 7 不同施肥技术对氮素利用率及偏生产力影响
Table 7 Effects of different fertilizer technologies on NUE and PFP

处理 Treatment	秸秆吸氮量 Straw N uptake/kg·hm ⁻²	籽粒吸氮量 Grain N uptake/kg·hm ⁻²	总吸氮量 Total N uptake/kg·hm ⁻²	氮素利用率 NUE/%	氮素偏生产力 PFP/kg·kg ⁻¹
CK	17.1c	38.2c	55.3c	—	—
FP	69.6a	88.5a	158.1a	34.3	23.7b
SD	43.5b	78.6b	122.1b	55.7	59.3a
NB	40.4b	74.9b	115.3b	50.0	58.2a

水量减少,同时淋溶液中氮素主要来源于土壤前期施肥残留氮^[30-31],因此淋失量显著降低,这表明水稻生育前期(返青期到开花期)是防止氮素淋失的关键时期,这与 Zhang 等^[32]的研究结果一致。土壤质地和灌溉情况是影响农田氮素淋失的重要因子^[33]。Prunty 等^[34]的研究表明,在干旱和半干旱土壤中氮素的淋溶损失很少,而在多雨的温带土壤中氮素的淋溶损失为 20~30 kg·hm⁻²,在欧洲和美国中部的某些地区甚至高达 50 kg·hm⁻²,Ju 等^[35]在长江南部黄泥土稻田试验发现,在施氮量为 300 kg·hm⁻² 条件下,水稻生育季内没有观测到硝态氮淋失,但本研究结果显示宁夏引黄灌区 NO₃⁻-N 是稻田氮素淋失的主要形式。NO₃⁻-N 是宁夏引黄灌区稻田氮素淋失的主要形式,这与许多研究结果一致^[5-6,9,32],主要原因是灌淤土中 60 cm 以下砂粒含量较高,持水性能差,水稻整个生育期灌水 18~23 次左右,灌溉量一般在 1 400~1 600 m³·hm⁻² 之间,同时 NO₃⁻易随重力水沿土壤孔隙迁移。NH₄⁺-N 相较于 NO₃⁻-N 淋失量要小的多,主要是由于 NH₄⁺-N 更容易被土壤吸附。

大量施肥是保障作物产量的重要手段,但也是造成氮素利用率低下的主要原因^[36]。宁夏灌区作为北方特大型自流农灌区,化肥用量逐年上升,1980—2012 年,宁夏灌区作物产量从 1.20×10⁶ t 增加到 3.59×10⁶ t,增加了 2.99 倍,化肥用量从 1.71×10⁵ t 增加到 1.033×10⁶ t,增加了 6.04 倍,其中氮肥的增加量为 5.33×10⁵ t^[37]。灌溉水稻氮素易随灌溉水流失,导致氮素利用率较早地作物低,一般灌溉水稻氮素利用率为 20%~40%,而旱地作物可达 40%~60%^[38]。本研究中,FP 处理水稻氮素利用率为 34.3%,采用 SD 技术后氮素利用率提高 21.4%,主要是由于试验所施用的水稻专用控释肥在水稻根部形成贮肥库,极大地提高了肥料养分释放和水稻养分需求的同步性。氮肥的高投入和低利用率同时导致氮肥偏生产力低下^[39],本研究中,当氮肥用量为 300 kg·hm⁻² 时,氮肥偏生产力显著低于氮肥水平为 120 kg·hm⁻² 时,这与 Zebarth 等^[40]研究得出的当氮肥用量超过 150 kg·hm⁻² 时,增施氮肥反而会导致氮肥偏生产力降低的结论一致。

SD 在氮肥用量较 FP 处理降低 60% 的情况下,水稻产量没有发生明显变化。和 FP 处理相比,SD 和 NB 处理显著提高了水稻千粒重,可能是因为常规处理前期营养生长过剩,在水稻灌浆期出现不同程度的倒伏,影响了水稻籽粒灌浆,导致千粒重较低。而 SD 和 NB 处理在水稻生长后期养分的持续均衡供应促

进了水稻千粒重的增加^[41]。根据张爱平等^[17]的研究,采用 SD 技术,施用山东施可丰化工有限公司生产的控释肥,在氮素投入降低约 40% 的条件下,与农民常规 (FP) 处理比较水稻籽粒产量没有出现降低,但当氮素用量降低约 60% 时,水稻产量下降。而本试验中,当氮肥用量减少 60% 时,水稻产量和常规施肥相比没有发生明显变化,导致这种结果的可能原因是本试验所施用的是由中-日政府间合作项目 (JICA 项-II 期) 日方专家提供的水稻专用控释肥,其释放规律更能满足水稻生长所需,因此后续研究中研发适合该地区水稻养分需求规律的专用控释肥,探索适用于该地区的环保型施肥技术,转变传统生产模式,是宁夏引黄灌区农业非点源污染防治工作的重点。

4 结论

(1) 侧条施肥技术 (SD) 可以显著降低宁夏灌区稻田氮素淋溶损失。侧条施肥技术 (SD) 和常规施肥技术 (FP) 相比, TN 淋失量减少 18.97 kg·hm⁻², NO₃⁻-N 淋失量减少 11.18 kg·hm⁻², NH₄⁺-N 淋失量减少 2.27 kg·hm⁻²; 和育苗箱全量施肥技术 (NB) 相比, TN 淋失量亦减少 4.61 kg·hm⁻²。

(2) 侧条施肥技术 (SD) 显著提高了水稻氮素利用率和氮素偏生产力。侧条施肥技术 (SD) 和常规施肥技术 (FP) 相比氮素利用率提高 21.4%, 同时较育苗箱全量施肥技术 (NB) 氮素利用率提高 5.7%。在对氮素偏生产力的影响上, 侧条施肥技术 (SD) 较常规施肥技术 (FP) 高 35.6 kg·kg⁻¹。

(3) 在氮肥用量较常规施肥技术 (FP) 降低 60% 的情况下, 应用侧条施肥 (SD) 和育苗箱全量施肥技术 (NB) 水稻产量都不会下降, 二者显著提高了水稻千粒重, 分别比常规施肥处理增加 24.13% 和 16.29%。综合考虑水稻产量和环境效益, 侧条施肥技术 (SD) 更适合在宁夏灌区水稻种植中推广应用。

参考文献:

- [1] Heffer P. Assessment of fertilizer use by crop at the global level[EB/OL]. <http://www.fertilizer.org/ifa/Home-Page/LIBRARY/Publication-database.html/Assessment-of-Fertilizer-Use-by-Crop-at-the-Global-Level-2006-07-2007-08>.
- [2] Maclean J L, Dawe D C, Hardy B, et al. Rice Almanac (third ed)[M]. IRRI, Los Baños, Philippines, 2002: 253.
- [3] Peng S, Buresh R J, Huang J. Strategies for overcoming low agronomic nitrogen use efficiency in irrigated rice systems in China[J]. *Field Crops Research*, 2006, 96: 37-47.

- [4] Zhang Q W, Yang Z L, Zhang H, et al. Recovery efficiency and loss of ^{15}N -labelled urea in a rice-soil system in the upper reaches of the Yellow River basin[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2012, 158: 118-126.
- [5] 易 军. 宁夏引黄灌区稻田氮素迁移特征研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2011.
YI Jun. Study on the characteristics of nitrogen migration in rice fields in Ningxia irrigation region[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2011.(in Chinese)
- [6] 张爱平, 杨世琦, 杨正礼, 等. 宁夏引黄灌区水体污染现状及污染源解析[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(6): 1295-1301.
ZHANG Ai-ping, YANG Shi-qi, YANG Zheng-li, et al. Analysis on current situation of water pollution and pollutant sources in Ningxia Yellow River irrigation region[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(6): 1295-1301.(in Chinese)
- [7] 于 涛, 陈静生. 农业发展对黄河水质和氮污染的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18(5): 2-9.
YU Tao, CHEN Jing-sheng. Impacts of the agricultural development on the water quality and nitrogen pollution of the Yellow River: case of Ningxia irrigation area[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2004, 18(5): 2-9.(in Chinese)
- [8] 尹 娟, 费良军, 勉韶平. 宁夏银南灌区稻田控制排水条件下氮素淋失的研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2006, 34(1): 108-112.
YIN Juan, FEI Liang-jun, MIAN Shao-ping. Experiment on the nitrogen leaching in the drainage condition of rice field in Ningxia Yinnan irrigation region[J]. *Journal of Northwest Sci-Technology University*, 2006, 34(1): 108-112.(in Chinese)
- [9] 王永生, 黄 剑, 杨世琦. 宁夏黄灌区稻秆还田对硝态氮流失量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(4): 697-703.
WANG Yong-sheng, HUANG Jian, YANG Shi-qi. The Influence of rice straw returning on the leaching losses of the nitrate nitrogen in Ningxia irrigation district, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(4): 697-703.(in Chinese)
- [10] 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 postponing 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)
- [11] Kaneta Y, Tsuchiya A. The effects of coated fertilizer in the nursery box on rice growth and nitrogen absorption[J]. *Journal of the Science of Soil and Manure, Japan*, 1997, 68: 185-188.(in Japanese)
- [12] Hidaka S, Hashima M. The whole application of controlled-release fertilizer in nursery box to paddy rice[J]. *Bulletin of the Saitama Agricultural Experiment Station*, 2000, 52: 13-25.(in Japanese)
- [13] Yuichi T, Junji I, Tadaaki Y. Improvement of the quantity of drained water from paddy field and the growth of rice plant by side-dressing[J]. *Bulletin of the Shimane Agricultural Experiment Station*, 1992, 26: 25-49.(in Japanese)
- [14] Kaneta Y Single. Application of controlled availability fertilizer to nursery boxes in non-tillage rice culture[J]. *Japan Agricultural Research Quarterly*, 1995, 29: 111-116.(in Japanese)
- [15] Maeoka Y, Kimura K, Okamoto K, et al. The adaptability of the controlled release fertilizers for the major rice cultivars in Yamaguchi Prefecture and the method to utilize these fertilizers effectively[J]. *Yamaguchi Tec Cent Agri Fore*, 2010(1): 71-78.(in Japanese)
- [16] 马玉兰. 灌淤土研究新进展[J]. 土壤通报, 1996, 27(4): 155-158.
MA Yu-lan. New progress in the study of anthropogenic-alluvial soil [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1996, 27(4): 155-158.(in Chinese)
- [17] 张爱平, 刘汝亮, 杨世琦, 等. 基于控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)
- [18] 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. Effects of seed-ing-box total fertilization on rice yield and nitrogen Loss[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(7): 1853-1860.(in Chinese)
- [19] 中华人民共和国水利行业标准. 灌溉试验规范, SL13—2004[S]. 北京: 中华人民共和国水利部, 2005.
Water conservancy industry standard, Irrigation test specification, SL13—2004[S]. Beijing: The People Republic of China, 2005.(in Chinese)
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 52-60.
BAO Shi-dan. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 52-60.(in Chinese)
- [21] Riley W J, Ortiz-Monasterio I, Matson P A. Nitrogen leaching and soil nitrate, and ammonium levels under irrigated wheat in Northern Mexico [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2001, 61(3): 223-236.
- [22] Lea P J, Azevedo R A. Nitrogen use efficiency. I. Uptake of nitrogen from the soil[J]. *Annals of Applied Biology*, 2006, 149(3): 243-247.
- [23] Cassman K G, De Datta S K, Amarante S T, et al. Long-term comparison of the agronomic efficiency and residual benefits of organic and inorganic nitrogen sources for tropical lowland rice[J]. *Experimental Agriculture*, 1996, 32(4): 427-444.
- [24] Van der Laan M, Annandalea J G, Bristow K L, et al. Modelling nitrogen leaching: Are we getting the right answer for the right reason[J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 133: 74-80.
- [25] Peng S, Garcia F V, Laza R C, et al. Increased N-use efficiency using a chlorophyll meter on high-yielding irrigated rice[J]. *Field Crops Research*, 1996, 47: 243-252.
- [26] 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(2-3): 117-127.
- [27] Xing G X, Zhu Z L. An assessment of N loss from agricultural fields to the environment in China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, 57(1): 67-73.
- [28] Cao W, Hong H, Zhang Y, et al. Anthropogenic nitrogen sources and

- exports in a village-scale catchment in Southeast China[J]. *Environ Geochem. Health*, 2006, 28: 45–51.
- [29] Zheng X, Huang Y, Wang Y, et al. Seasonal characteristics of nitric oxide emission from a typical Chinese rice wheat rotation during the non-water logged period[J]. *Global Change Biol*, 2003(9): 219–227.
- [30] Zhou S, Nishiyama K, Watanabe Y, et al. Nitrogen budget and ammonia volatilization in paddy fields fertilized with liquid cattle waste[J]. *Water Air Soil Pollut*, 2009, 201: 135–147.
- [31] Wang D J, Liu Q, Lin J H, et al. Optimum nitrogen use and reduced nitrogen loss for production of rice and wheat in the Yangtse Delta region [J]. *Environ. Geochem. Health*, 2004, 26: 221–227.
- [32] Zhang A P, Liu R L, Gao J, et al. Regulating N application for rice yield and sustainable eco-agro development in the upper reaches of Yellow River Basin, China[EB/OL]. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/239279>. The Scientific World Journal, [2014].
- [33] 叶优良, 李 隆, 张福锁. 灌溉对大麦/玉米大田土壤硝态氮累积效应研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(5): 105–109.
YE You-liang, LI Long, ZHANG Fu-suo. Effect of irrigation on soil NO_3^- -N accumulation and leaching in maize/barley intercropping field [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2004, 20(5): 105–109. (in Chinese)
- [34] Prunty L, Greenland R. Nitrate leaching using two potato-corn N-fertilizer plans on sandy soil[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1997, 65(1): 1–13.
- [35] Ju X T, Xing G X, Chen X P, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, 106(9): 3041–3046.
- [36] Meng F, Olesen J E, Sun X, et al. Inorganic nitrogen leaching from organic and conventional rice production on a newly claimed calcistoll in central Asia[J]. *PLoS ONE*, 2014, 9(5): e98138. doi: 10.1371/journal.pone.0098138.
- [37] 宁夏统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2013.
Ningxia Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2013. (in Chinese)
- [38] Vlek P L G, Byrnes B H. The efficacy and loss of fertilizer N in lowland rice[J]. *Fertilizer Research*, 1986(9): 131–147.
- [39] Prasad R, Singh R K, Rani A, et al. Partial factor productivity of nitrogen and its use efficiency in rice and wheat[J]. *Fertiliser News*, 2000, 45(5): 63–65.
- [40] Zebarth B J, Drury C F, Tremblay N, et al. Opportunities for improved fertilizer nitrogen management in production of arable crops in eastern Canada: A review[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2009, 89(2): 113–132.
- [41] 刘汝亮, 李友宏, 王 芳, 等. 缓释肥侧条施肥技术对水稻产量和氮素利用效率的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2014, 31(2): 45–49.
LIU Ru-liang, LI You-hong, WANG Fang, et al. Effect of slow-release fertilizer side bar fertilization technology on rice yield and nitrogen use efficiency[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2014, 31(2): 45–49. (in Chinese)