

李 敏, 王春雪, 舒正文, 等. 牛粪化肥配施对稻田下渗水氮素流失和水稻氮素积累的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(4): 903–911.

LI Min, WANG Chun-xue, SHU Zheng-wen, et al. Infiltration water nitrogen loss and rice nitrogen accumulation in a paddy field fertilized with a combination ratio of cow manure and chemical fertilizer[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(4): 903–911.

牛粪化肥配施对稻田下渗水氮素流失和水稻氮素积累的影响

李 敏¹, 王春雪¹, 舒正文¹, 王 昭¹, 陈建军¹, 李 元^{1*}, 祖艳群¹, 张克强²

(1. 云南农业大学资源与环境学院, 云南省农业环境污染控制与生态修复工程实验室, 昆明 650201; 2. 农业农村部大理农业环境科学观测实验站, 云南 大理 671004)

摘 要: 采用田间小区试验研究了牛粪与化肥不同比例配施[100% 化肥(100%CF)、70% 化肥+30% 牛粪(70%CF+30%MF)、50% 化肥+50% 牛粪(50%CF+50%MF)、30% 化肥+70% 牛粪(30%CF+70%MF)]的稻田土壤中 20、40、60 cm 处下渗水中总氮(TN)、铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)和硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)的时空变化、氮素下渗流失量和水稻氮素积累特征。结果表明: 不同处理的 TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 流失量以水稻分蘖期较大, 氮素流失以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为主, 占 TN 流失的 64.3%~76.7%, 后期氮素流失较少; 50%CF+50%MF 在 60 cm 处下渗水 TN 时间间隔加权平均浓度高于上层, 其他处理的 TN 均表现为随土层深度增加而减小。不同处理的氮素流失量中以 50%CF+50%MF 最高, 为 $23.12 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 显著高于其他处理。水稻产量随牛粪配施量增加而降低, 但不同处理之间无显著差异; 30%CF+70%MF 处理显著降低水稻地上部植株氮素累积量, 不利于水稻对氮素的吸收利用。因此, 综合考虑水稻产量和氮素流失情况, 70%CF+30%MF 是值得推荐的最优配比。

关键词: 水稻; 牛粪; 配施比例; 下渗水; 流失量; 氮素积累

中图分类号: X592 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2019)04-0903-09 doi:10.11654/jaes.2018-0695

Infiltration water nitrogen loss and rice nitrogen accumulation in a paddy field fertilized with a combination ratio of cow manure and chemical fertilizer

LI Min¹, WANG Chun-xue¹, SHU Zheng-wen¹, WANG Zhao¹, CHEN Jian-jun¹, LI Yuan^{1*}, ZU Yan-qun¹, ZHANG Ke-qiang²

(1. College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Yunnan Engineering Laboratory for Agricultural Environment Pollution Control and Ecological Remediation, Kunming 650201, China; 2. Dali Scientific Observing and Experimental Station of Agro-Environment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Dali 671004, China)

Abstract: Field plot experiments with spatial and temporal variations of total nitrogen (TN), ammonium nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$), and nitrate nitrogen ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) in paddy soil at 20, 40 cm, and 60 cm of infiltration water were used to study nitrogen leachate loss and nitrogen accumulation in rice using four different proportions of cow manure and chemical fertilizer. The results showed that the loss of TN, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ in all treatments was greater during the tillering stage of rice, in which $\text{NH}_4^+\text{-N}$ contributed to the greatest nitrogen loss, accounting for 64.3%~76.7% of TN loss. Less nitrogen loss occurred during the later growing period. The TN time-interval weighted average concentration of infiltration water at 60 cm was higher than that of upper layers at 50%CF+50%MF, whereas all other treatments showed a decrease with increasing depth. Nitrogen loss was highest for the 50%CF+50%MF treatment at $23.12 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, which was significantly higher than other treatments. Rice yield decreased with an increase of cow manure fertilization but there was no significant difference between the four

收稿日期: 2018-05-27 录用日期: 2018-09-17

作者简介: 李 敏(1992—), 男, 硕士研究生, 江苏盐城人, 研究方向为农业面源污染控制。E-mail: 845716610@qq.com

*通信作者: 李 元 E-mail: liyuan@ynau.edu.cn

基金项目: 云南省教育厅科学研究基金产业化培育项目(2016CYH11); 云南省农田无公害生产创新团队项目(2017HC015)

Project supported: Yunnan Provincial Education Department's Scientific Research Fund Industrialization Project(2016CYH11); The Science Technology Innovation Team of Yunnan Province(2017HC015)

treatments. The 30%CF+70%MF treatment significantly reduced nitrogen accumulation in rice aboveground, which was not conducive to the absorption and utilization of nitrogen in rice. Therefore, considering the rice yield and nitrogen loss, 70%CF+30%MF is recommended as the optimal fertilizer and cow manure fertilization ratio.

Keywords: rice; cow manure; combination ratio; infiltration water; loss; nitrogen accumulation

我国是全球最大的水稻生产国,其种植面积占全球的18%~19%,水稻总产量居全球首位,约占27%~28%^[1]。而与此同时,化肥用量也随着人们对粮食高产的追求而逐年增加,我国耕地面积不足全世界的10%,但化肥用量接近世界总用量的1/3,已经成为农业面源污染的主要原因^[2]。很多地区稻田氮肥施用量超过了300 kg·hm⁻²,容易导致较高的氮流失风险^[3],从而加重周边环境的负荷^[4]。我国又是畜禽养殖大国,畜禽粪便资源丰富,并逐年增长^[5],这也成为主要的农业面源污染源。许多学者研究指出,畜禽粪便与化肥混合施用,无机氮的正激发效应可以提高有机氮矿化,有机氮的存在可以促进无机氮的生物固定,从而降低无机氮的挥发和硝化淋失,提高氮肥的利用效率^[6-9]。由于畜牧业废弃物含N、P、K和微量元素,合理使用可补充化肥的不足,而且合理使用粪肥和化肥还可以减少畜牧业带来的污染问题^[10],因此,牛粪与化肥配施是解决农业面源污染的有效措施^[5-6]。

下渗淋溶是稻田养分损失的重要途径之一,由于过度依赖化肥,养分大量随下渗水流失,造成严重的农业面源污染,其中氮素养分的流失最为严重,也最为复杂^[11-12]。牛粪与化肥配施能够调节土壤中养分的释放强度,持续稳定地提高供氮能力,促进作物的生长^[13-14],有利于提高作物产量和氮素利用效率^[15-16]。同时,牛粪中大量的有机质,还能加强土壤对铵态氮养分的固定^[17],施入农田后为土壤带入大量的碳源,改变土壤中的C/N,促进微生物的固氮作用,减少氮素的下渗流失^[18-19]。因此,牛粪与化肥配施于稻田,不仅能解决牛粪造成的环境压力,还能改善土壤肥力,降低农业面源污染的风险,提高水体质量。

洱海流域的奶牛养殖业发展迅速,奶牛粪便量也随之相应增加。针对当地稻田化肥用量高、奶牛粪便污染严重的问题,研究不同比例牛粪配施化肥对稻田土壤下渗水中氮素的影响,筛选既有利于水稻生长又能减少氮素流失的施肥配比,对于降低洱海流域农业面源污染、提高化肥利用效率具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 试验田概况

试验田位于云南省农业农村部环境保护科研监测所大理综合实验站(25°50'N,100°07'E)。该区域季风气候明显,干湿季分明,海拔1900 m,降雨主要集中在5—10月,全年降雨量为1048 mm。2017年稻季总降雨量为617 mm,平均气温在21℃左右,总日照时数为1145 h,平均相对湿度为80.28%,风向主要为西南风,平均风速0.7 m·s⁻¹。土壤类型为水稻土,土壤基本理化性质见表1。

1.2 试验设计

试验于2017年5月30日到10月1日开展,共设4个施肥处理,每个处理3次重复,各处理随机分布。各小区长6 m、宽5 m,面积30 m²,田埂夯实,并加塑料膜防侧渗和串流,顶层加空心砖铺砌,土埂宽0.5 m、高0.4 m,塑料膜深入地下0.4 m。处理设置:全化肥处理(100%CF)、70%化肥+30%牛粪配施处理(70%CF+30%MF)、50%化肥+50%牛粪配施处理(50%CF+50%MF)、30%化肥+70%牛粪配施处理(30%CF+70%MF)。每个处理的纯氮施入量均为160 kg·hm⁻²。供试化学肥料为:尿素(N,46.4%)、过磷酸钙(P₂O₅,16%)、硫酸钾(K₂O,50%)。供试牛粪为大理当地鲜奶牛粪便,其养分含量为:全氮0.49%±0.05%,

表1 供试土壤的基本理化性状

Table 1 Basic physical and chemical properties of the tested soil

土壤层次 Soil layer/cm	pH	全氮 Total N/ g·kg ⁻¹	碱解氮 Alkaline N/ mg·kg ⁻¹	全磷 Total P/ g·kg ⁻¹	速效磷 Available P/ mg·kg ⁻¹	有机质 Organic matter/ g·kg ⁻¹	全钾 Total K/ g·kg ⁻¹	速效钾 Available K/ mg·kg ⁻¹
0~20	7.57±0.26	3.93±0.32	336.81±43.66	1.15±0.11	61.13±0.99	70.47±8.04	21.71±1.22	73.84±13.06
20~40	7.88±0.13	1.01±0.09	83.57±8.11	0.56±0.06	54.10±5.43	24.38±2.24	22.21±0.53	40.23±3.60
40~60	7.77±0.23	0.63±0.05	50.36±3.27	0.54±0.12	29.96±5.71	19.56±3.15	19.24±2.36	42.71±2.20

全磷 $0.19\% \pm 0.01\%$, 全钾 $0.10\% \pm 0.02\%$, 含水量 $78.20\% \pm 2.66\%$ 。牛粪和化学磷钾肥作为底肥一次性施入, 100%CF 的尿素按 1:1:1 的比例分别在插秧、分蘖前期、出穗期施入稻田, 其他 3 种处理底肥不施尿素, 尿素按 1:1 的比例分别在分蘖前期、出穗期施入稻田。不同处理的牛粪与化肥施用量见表 2。

供试水稻品种为“云粳 25”, 水稻种植密度为 $600 \text{ 万穴} \cdot \text{hm}^{-2}$, 每穴 2~3 株。2017 年 5 月 30 日插秧, 同时施底肥, 插秧后 18 d 施分蘖肥, 68 d 施穗肥, 120 d 收割。

1.3 样品采集与分析

土壤样品采集: 水稻种植前在试验田中采用棋盘法用土钻采集 0~20、20~40、40~60 cm 土壤, 风干、过筛、备用。

牛粪样品采集: 在当地奶牛养殖场随机抽取 6 个当日的鲜牛粪样品, 风干、研磨、过筛、备用。

水稻样品采集: 在水稻收获时, 每个试验小区随机选取 1 m^2 的样方进行收割, 测定水稻籽粒及茎叶的鲜质量, 晾干后进行干质量的测定。取部分鲜样烘干、研磨、过筛、备用。

下渗水样采集: 每个小区在土层 20、40、60 cm 处埋设下渗水收集管(PVC 管), 采样前 1 d 将收集管中的水抽净, 各深度的下渗水在不施肥期间每 10 d 采集一次, 每次施肥后第 2 d 采集一次, 采样时间为上午 10:00, 整个水稻种植期共采水样 12 次。水样采好后装于 250 mL 的聚乙烯瓶中带回实验室于 $4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷藏, 并于 48 h 内进行测定。

植物样品总氮(TN)、总磷(TP), 牛粪样品 TN、TP, 土壤样品 pH 值、有机质、TN、TP、碱解氮、速效磷、全钾和速效钾的测定方法参照《土壤农化分析》第三版^[20]。水样 TN 的测定采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法, 硝态氮($\text{NO}_3\text{-N}$)的测定采用紫外分光光度法, 铵态氮($\text{NH}_4\text{-N}$)的测定采用纳氏试剂分光光度法。

1.4 数据处理

氮素渗漏损失量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) = 氮素时间间隔加权平均浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) $\times$ 渗水量(m^3) $\times 10^{-3}$ /面积(hm^2)^[21]

氮素时间间隔加权平均浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) = Σ 每次渗漏水氮素浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) $\times$ 时间间隔(d)/总生长时间(d)^[22]

渗水量(m^3) = 渗水速度($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$) $\times$ 面积(m^2) $\times$ 浸没时间(d) $\times 10^{-3}$

氮素累积量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) = 干物质累积量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) $\times$ 植株氮含量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) $\times 10^{-3}$

本研究的试验田地下水位深度在 60 cm 左右, 因此氮素渗漏流失量的计算参考 60 cm 处的氮素时间加权平均浓度。水稻浸没时间为 86 d, 采样时间间隔为 10 d, 总生长时间为 120 d, 稻田平均渗水速度经测定为 $12 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

试验数据采用 SPSS 19.0 进行分析, 采用 Origin 9.1 作图。

2 结果与分析

2.1 不同处理稻田下渗水氮素浓度的时空变化特征

施用基肥后第 2 d, 100%CF 的 TN、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度高于其他处理(图 1A、图 1D), $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度则低于其他处理(图 1G); 施用分蘖肥后第 2 d(6 月 18 日), 各处理 20、40 cm 和 60 cm 处下渗水的 TN、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度均显著升高, 2~10 d 内快速下降趋于平稳; 施用穗肥后第 2 d, 仅 20 cm 处 100%CF 的下渗水中 TN、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 波动较大(7.41 、 $6.34 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 其他施肥处理的较为平稳(1.22 ~ $3.12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 0.57 ~ $1.48 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 各处理在 40 cm 和 60 cm 处的下渗水 TN 浓度也无较大波动。这说明, 化肥氮施用第 2 d 对 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度的影响不大, 各处理不同深度的下渗水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度随时间的推移呈现先上升后下降的趋势。100%CF 处理 40 cm 处的下渗水在施分蘖肥后 10 d 时(6 月 28 日), TN、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ (图 1B、图 1E、图 1H) 的浓度均显著增高, 这说

表 2 不同配比的牛粪与化肥施用量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)

Table 2 The amount of cow dung and fertilizer application in different proportions($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)

处理 Treatments	施肥总量 Total amount of fertilizer				底肥 Base fertilizer				追肥 Top dressing	
	尿素 (N, 46.4%)	过磷酸钙 (P_2O_5 , 16%)	硫酸钾 (K_2O , 50%)	牛粪	尿素 (N, 46.4%)	过磷酸钙 (P_2O_5 , 16%)	硫酸钾 (K_2O , 50%)	牛粪	分蘖肥	穗肥
									尿素(N, 46.4%)	
100%CF	345	419	116	0	115	419	116	0	115	115
70%CF+30%MF	241	419	116	9794	0	419	116	9794	120	120
50%CF+50%MF	172	419	116	16 323	0	419	116	16 323	86	86
30%CF+70%MF	103	419	116	22 852	0	419	116	22 852	52	52

明100%化肥施用在土壤40 cm处的硝化作用在10 d时达到最高值;50%CF+50%MF处理60 cm处的下渗水在施分蘖肥后第10 d时,TN和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度达到峰值,这说明50%的牛粪替代在分蘖肥施入的10 d内,硝化反应可能较弱。

2.2 不同处理稻田下渗水氮素时间间隔加权平均浓度分析

如表3所示,除50%CF+50%MF外,各施肥处理

下渗水中TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 时间间隔加权平均浓度均表现出随土层深度的增加而降低的趋势。100%CF处理的20 cm和40 cm处的TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 都显著高于其他3个施肥处理;而在60 cm处的下渗流失层,50%CF+50%MF的TN、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 都显著高于其他施肥处理,说明100%CF能提高0~40 cm(水稻根系能够到达的)土层的TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度,这有利于水稻对氮素的吸收利用,而50%CF+50%MF的氮素流失

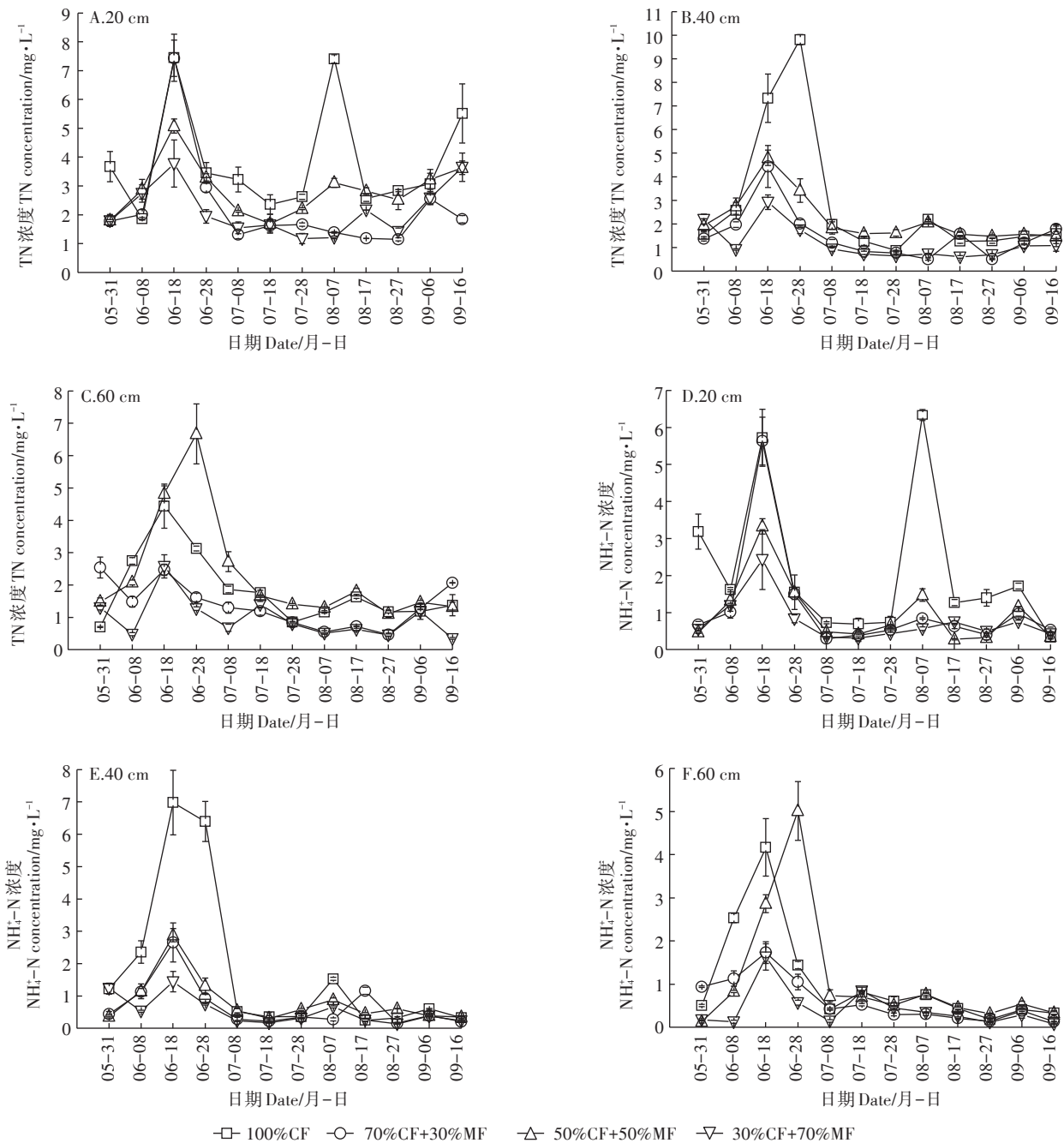
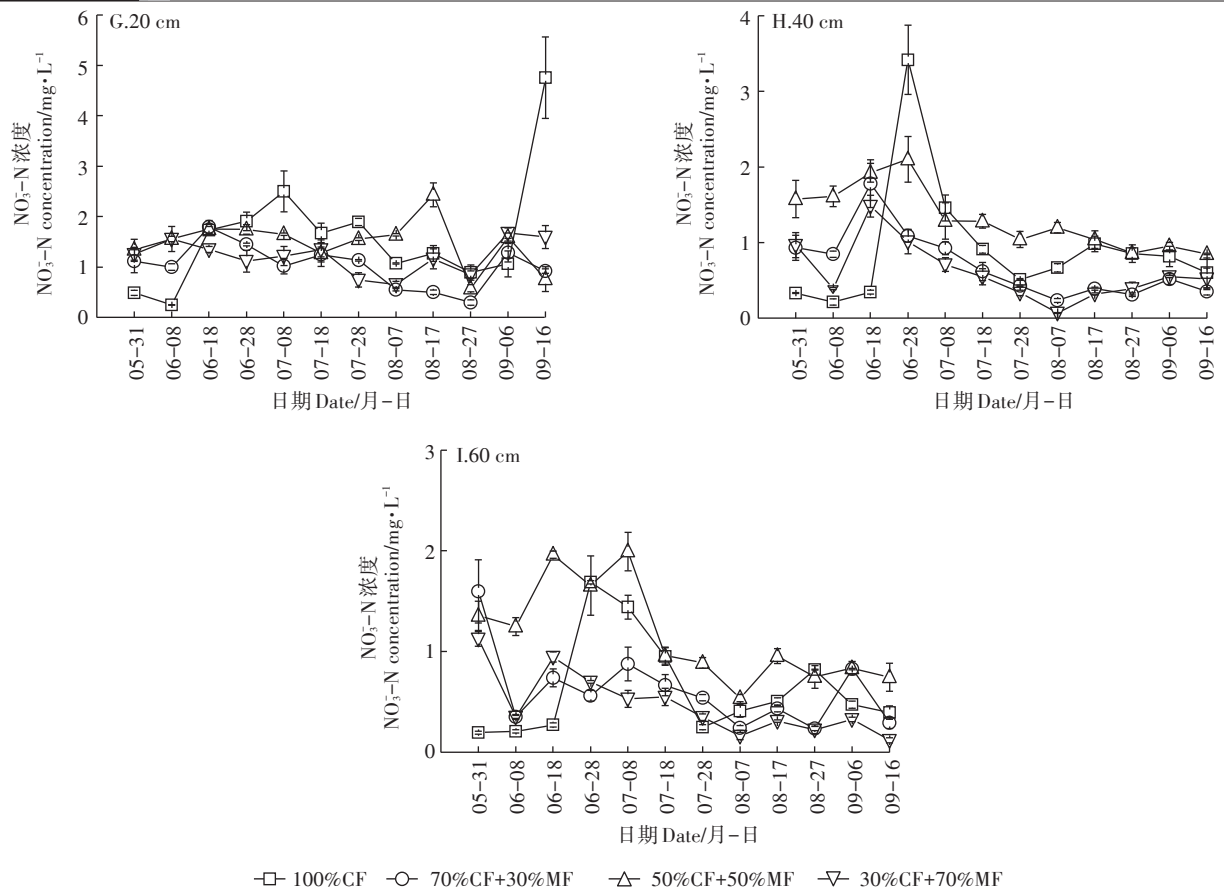


图1 不同深度稻田下渗水TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度的变化

Figure 1 Concentration changes of TN, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ at different depth of infiltration water in rice field



续图1 不同深度稻田下渗水TN、NH₄⁺-N和NO₃⁻-N浓度的变化
Continued figure 1 Concentration changes of TN, NH₄⁺-N and NO₃⁻-N at different depth of infiltration water in rice field

表3 不同施肥处理下渗水中TN、NH₄⁺-N和NO₃⁻-N的时间间隔加权平均浓度(平均值±标准差, mg·L⁻¹)
Table 3 Time-interval-weighted average concentration of TN, NH₄⁺-N and NO₃⁻-N in infiltration water with different fertilization treatments (Mean value±SD, mg·L⁻¹)

指标 Index	深度 Depth/cm	100%CF	70%CF+30%MF	50%CF+50%MF	30%CF+70%MF
TN	20	3.91±0.15a	2.24±0.13c	2.92±0.10b	2.21±0.04c
	40	2.74±0.10a	1.53±0.08c	2.16±0.13b	1.17±0.05d
	60	1.84±0.01b	1.39±0.05c	2.30±0.09a	0.94±0.03d
NH ₄ ⁺ -N	20	2.02±0.08a	1.10±0.07b	0.97±0.05c	0.75±0.08d
	40	1.72±0.09a	0.67±0.04c	0.81±0.05b	0.51±0.02d
	60	1.03±0.06a	0.58±0.05b	1.09±0.04a	0.41±0.04c
NO ₃ ⁻ -N	20	1.77±0.07a	1.02±0.04d	1.47±0.03b	1.23±0.03c
	40	0.92±0.08b	0.69±0.04c	1.29±0.05a	0.60±0.02c
	60	0.63±0.01b	0.59±0.03c	1.14±0.03a	0.45±0.01d

注:同行4种施肥处理之间进行单因素方差分析,不同字母表示在0.05水平上差异显著。下同。
Note: One-way anova was carried out between 4 fertilization treatments in the same row. Different letters indicate significantly different at 0.05 level. The same below.

风险最高。

2.3 水稻季下渗水氮素损失量

各处理的TN下渗流失量大小为50%CF+50%MF>100%CF>70%CF+30%MF>30%CF+70%MF(表4)。

其中50%CF+50%MF的TN、NH₄⁺-N和NO₃⁻-N下渗流失量均显著高于其他处理。而70%CF+30%MF和30%CF+70%MF的TN下渗流失较100%CF分别降低了24.58%和48.62%。30%CF+70%MF的TN、NH₄⁺-N

和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 下渗流失量均最低。

2.4 水稻产量

水稻平均产量随着化肥替代比例的增加而降低(图2),其由高到低顺序为100%CF($10\,933\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)>70%CF+30%MF($10\,633\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)>50%CF+50%MF($9833\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)>30%CF+70%MF($8333\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$),各处理之间没有显著性差异。研究表明,在短期内牛粪替代化肥不会带来水稻产量的显著降低。

2.5 水稻氮素累积量

由表5可知,30%CF+70%MF的籽粒氮素累积量显著低于100%CF和70%CF+30%MF,而100%CF、70%CF+30%MF和50%CF+50%MF间则无显著差异;70%CF+30%MF的茎叶氮素累积量显著高于其他3种处理;植株氮素总累积量(籽粒与茎叶之和)为70%CF+30%MF>50%CF+50%MF>100%CF>30%CF+70%MF。因此,70%CF+30%MF的水稻对氮

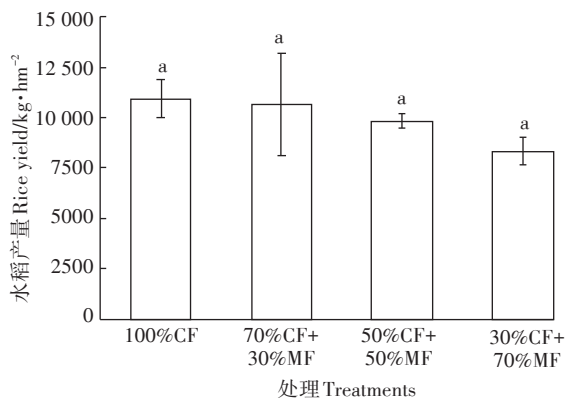


图2 不同施肥处理水稻产量

Figure 2 The yield of rice in different fertilizer treatments

素积累量最高,而30%CF+70%MF的氮素积累量最低。

3 讨论

3.1 牛粪化肥配施对稻田下渗水氮素浓度时空变化的影响

近年来,不少研究发现稻田下渗水中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度过高会造成大量的氮素流失^[23]。而王正银^[24]研究发现,施用牛粪后 $\text{NH}_4\text{-N}$ 在下层土壤中积累总量最低,其矿化过程由慢到快,呈现出低速递增趋势。本研究发现,氮素的下渗流失主要集中在施分蘖肥后的2~10 d内,且流失以 $\text{NH}_4\text{-N}$ 为主,受追施化肥的影响较大,这与李娟等^[25]的研究结果一致。100%CF处理的氮素流失以 $\text{NH}_4\text{-N}$ 为主,张玉平等^[26]也发现,牛粪与化肥配施有利于减缓稻田 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的下渗淋失,本研究结果与之相似。两次追肥的结果差异表明氮肥的合理运筹同样影响稻田氮素的下渗流失,这可能需要调整氮肥的施用次数。刘汝亮等^[27]的研究也表明,氮肥少量多次施用或氮肥后移有利于降低渗漏水中氮素的最高浓度,减少氮素的下渗损失。

3.2 牛粪化肥配施对稻田下渗水氮素流失量的影响

土壤对氮素有一定吸收固定作用,且上层土壤氮素转化较为剧烈^[28],另外有机肥施于稻田表层,氮素释放对上层影响较大,因此土壤上层下渗水中氮素浓度较下层要高。本研究中各施肥处理的TN时间间隔加权平均浓度随深度增加而降低,只有50%CF+50%MF在60 cm处的TN加权平均浓度高于40 cm处,原因可能是50%CF+50%MF施用分蘖肥后2~10 d内60 cm处的氮素浓度都保持较高水平。杨蕊等^[29]研

表4 不同施肥处理氮素下渗流失量(平均值±标准差, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)

Table 4 Infiltration loss amount of nitrogen under different fertilization treatments (Mean value±SD, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)

指标 Index	100%CF	70%CF+30%MF	50%CF+50%MF	30%CF+70%MF
TN	18.99±0.10b	14.34±0.52c	23.74±0.93a	9.70±0.31d
$\text{NH}_4\text{-N}$	10.63±0.62a	5.99±0.52b	11.25±0.41a	4.23±0.41c
$\text{NO}_3\text{-N}$	6.50±0.10b	6.09±0.31c	11.76±0.31a	4.64±0.10d

表5 不同施肥处理水稻氮素累积量(平均值±标准差, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)

Table 5 Nitrogen accumulation in rice of different fertilizer treatments (Mean value±SD, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)

水稻部位 Different parts of rice	100%CF	70%CF+30%MF	50%CF+50%MF	30%CF+70%MF
籽粒 Grain	89.09±14.42a	87.51±19.19a	80.52±8.27ab	59.03±7.31b
茎叶 Stems and leaves	24.37±5.79c	40.81±7.03a	35.48±3.63b	22.43±4.56c
地上部总累积量 Accumulation of aboveground	111.72±16.31a	132.09±27.24a	115.32±7.16a	78.87±8.51b

究表明施用有机肥后各种微生物群落逐渐壮大,第4周矿化速率迅速加快,释放出大量的无机态氮,Bittman等^[19]发现施用牛粪可以提高土壤中的微生物数量,促进土壤中有有机态氮的矿化,所以50%CF+50%MF下渗水中可能溶解的矿质氮较多。此外,还有研究表明^[30],施入稻田的氮、磷其中之一超过或低于适合用量,会促进另一养分的流失。本研究中随着牛粪配施量的增加,磷的施入量增高,过量投入可能会促进氮的流失^[15]。70%CF+30%MF的牛粪配施量较少,受微生物影响不大,且诸多研究表明适量的有机肥配施化肥可以提高土壤中有有机胶体对带正电的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸附固定,减少氮素的流失^[15-16,26,30];30%CF+70%MF可能因为化肥配施量少,水稻分蘖期又是一个吸氮高峰期,需吸收大量的氮素养分^[31],矿化出的氮大多被水稻吸收,因此下渗水中的氮素浓度较低。有研究表明^[15],随着有机肥配施比例增加,TN的淋失量呈先增后减的趋势,其中45%有机肥配施的TN流失量最大,这与本研究结果相似。

3.3 牛粪化肥配施对水稻氮素积累的影响

与化肥不同的是,有机肥中超过50%的氮素都是有机态氮,需要经过矿化释放无机氮才能被植物吸收利用^[32]。有机肥中的氮素当季释放率一般低于20%^[29],因此配施量过大则不利于水稻的前期生长发育。本研究结果显示水稻产量随牛粪配施量的增加而降低,说明水稻产量受牛粪氮素释放量的制约。水稻对氮素的累积与分配是决定水稻生长发育与产量的重要因素^[33],前人关于有机肥与化肥配施对水稻氮素吸收利用的研究结果不一,其最佳配施比例在15%~50%^[13,16,34]。本研究结果表明牛粪配施量在50%以内对水稻籽粒氮素累积量影响不大,而70%CF+30%MF最有利于水稻茎叶的氮素吸收利用。本研究中30%CF+70%MF的水稻氮素累积效果最差,不利于水稻对氮素的吸收利用。

3.4 牛粪与化肥配施的最优配比筛选

研究表明,有机肥配施比例控制在20%~40%对降低氮素下渗流失以及水稻生长发育的效果较好^[15,27,35],本研究中牛粪与化肥配施以70%CF+30%MF效果最好。4种牛粪配施化肥处理中70%CF+30%MF和30%CF+70%MF的氮素流失量均较100%CF有所降低,而50%CF+50%MF的氮素流失量却大于100%CF,30%CF+70%MF的水稻对氮素的吸收利用效果最差。综上所述,在保证水稻不减产的前提下,70%CF+30%MF是化肥与牛粪配施的最优配

比处理,与前人研究结果一致^[15,26,35]。

4 结论

(1)水稻分蘖期的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 流失量较大,抽穗期则很小,可通过少量多次追施氮肥或氮肥后移等方法,减少 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的流失。

(2)50%CF+50%MF会显著增加氮素的下渗流失;30%CF+70%MF的水稻对氮素吸收利用效果最差,所以在水稻生产中,不宜采用50%CF+50%MF和30%CF+70%MF的施肥配比。

(3)各施肥处理均不影响水稻产量,70%CF+30%MF处理氮素的下渗流失量最小,水稻吸收利用率最高,是牛粪配施化肥的最优配比处理。

参考文献:

- [1] 朱德峰, 张玉屏, 陈惠哲, 等. 中国水稻高产栽培技术创新与实践[J]. 中国农业科学, 2015, 48(17): 3404-3414.
ZHU De-feng, ZHANG Yu-ping, CHEN Hui-zhe, et al. Innovation and practice of high-yield rice cultivation technology in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(17): 3404-3414.
- [2] 王 敬, 程 谊, 蔡祖聪, 等. 长期施肥对农田土壤氮素关键转化过程的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(2): 292-304.
WANG Jing, CHENG Yi, CAI Zu-cong, et al. Effects of long-term fertilization on key processes of soil nitrogen cycling in agricultural soil: A review[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(2): 292-304.
- [3] 李 娟. 不同施肥处理对稻田氮磷流失风险及水稻产量的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
LI Juan. Effects of different fertilization treatments on rice yield and the risk of nitrogen and phosphorus losses from paddy field[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [4] 李卫华, 范 平, 黄东风, 等. 稻田氮磷面源污染现状、损失途径及其防治措施研究[J]. 江西农业学报, 2011, 23(8): 118-123.
LI Wei-hua, FAN Ping, HUANG Dong-feng, et al. Studies on plant source pollution situation, loss ways of nitrogen and phosphorus in rice paddy and prevention measures[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2011, 23(8): 118-123.
- [5] 谢光辉, 包维卿, 刘继军, 等. 中国畜禽粪便资源研究现状述评[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(4): 75-87.
XIE Guang-hui, BAO Wei-qing, LIU Ji-jun, et al. An overview of researches on livestock and poultry excreta resource in China[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2018, 23(4): 75-87.
- [6] 张 鸣, 高天鹏, 李 昂, 等. 畜禽粪肥与化肥配施对春小麦产量和养分吸收利用的影响[J]. 麦类作物学报, 2014, 34(2): 216-221.
ZHANG Ming, GAO Tian-peng, LI Ang, et al. Effects of different combinations of animal manures and chemical fertilizer on yield, nutrient uptake and utilization of spring wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2014, 34(2): 216-221.
- [7] 袁颖红. 长期施肥对红壤性水稻土氮素形态的影响[J]. 安徽农业科

- 学, 2010, 38(16):8550-8553.
- YUAN Ying-hong. Effects of long-term different fertilizations on nitrogen in red paddy soil[J]. *Journal of Anhui Agri Sci*, 2010, 38(16): 8550-8553.
- [8] 叶 静, 安藤丰, 符建荣, 等. 不同有机肥对土壤中的氮素矿化及对化肥氮固持的影响[J]. *浙江农业学报*, 2008, 20(3):176-180.
- YE Jing, AN Teng-feng, FU Jian-rong, et al. Effects of different organic manures on N mineralization and N retention in the soil[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2008, 20(3):176-180.
- [9] Han K H, Choi W J, Han G H, et al. Urea-nitrogen transformation and compost-nitrogen mineralization in there different soils as affected by the interaction between both nitrogen inputs[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2004, 39(3):193-199.
- [10] Hooda P S, Edwards A C, Anderson H A, et al. A review of water quality concerns in livestock farming areas[J]. *The Science of the Total Environment*, 2000, 250:143-167.
- [11] 叶玉适, 梁新强, 周柯锦, 等. 节水灌溉与控释肥施用对太湖地区稻田土壤氮素渗漏流失的影响[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(1):270-279.
- YE Yu-shi, LIANG Xin-qiang, ZHOU Ke-jin, et al. Effects of water-saving irrigation and controlled-release fertilizer application on nitrogen leaching loss of paddy soil in Taihu Lake region[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(1):270-279.
- [12] 陆 敏, 刘 敏, 茅国芳, 等. 大田条件下稻田土壤氮素淋失研究[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2006(4):71-77.
- LU Min, LIU Min, MAO Guo-fang, et al. Study on nitrogen leaching of paddy soil in the field experiments[J]. *Journal of East China Normal University(Natural Science)*, 2006(4):71-77.
- [13] 欧杨虹, 徐阳春, 沈其荣. 有机氮部分替代无机氮对水稻产量和氮素利用率的影响[J]. *江苏农业学报*, 2009, 25(1):106-111.
- OU Yang-hong, XU Yang-chun, SHEN Qi-rong. Effect of combined use of organic and inorganic nitrogen fertilizer on rice yield and nitrogen use efficiency[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2009, 25(1):106-111.
- [14] 周卫军, 王凯荣, 张光远, 等. 有机与无机肥配合对红壤稻田系统生产力及其土壤肥力的影响[J]. *中国农业科学*, 2002, 35(9):1109-1113.
- ZHOU Wei-jun, WANG Kai-rong, ZHANG Guang-yuan, et al. Effects of inorganic-organic fertilizer incorporation on productivity and soil fertility of rice cropping system in red soil area of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(9):1109-1113.
- [15] 焦军霞, 杨 文, 李裕元, 等. 有机肥化肥配施对红壤丘陵区稻田土壤氮淋失特征的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(6):1159-1166.
- JIAO Jun-xia, YANG Wen, LI Yu-yuan, et al. Impact of combined manure and chemical fertilization on nitrogen leaching from paddy field in red earth hilly area of China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(6):1159-1166.
- [16] 刘红江, 蒋华伟, 孙国峰, 等. 有机-无机肥不同配施比例对水稻氮素吸收利用率的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2017(5):61-66.
- LIU Hong-jiang, JIANG Hua-wei, SUN Guo-feng, et al. Effect of different organic-inorganic fertilizers combination ratio on nitrogen use efficiency of rice[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017(5):61-66.
- [17] 王吉苹, 朱木兰, 李青松. 农田土壤氮素渗漏淋失研究进展[J]. *四川环境*, 2014, 33(6):118-125.
- WANG Ji-ping, ZHU Mu-lan, LI Qing-song. Research progress of nitrogen leaching in farmland soil[J]. *Sichuan Environment*, 2014, 33(6):118-125.
- [18] 付海丽. 牛粪与化肥配施对侧柏根际土壤微生物数量和酶活性的影响[J]. *生物灾害科学*, 2014, 37(2):134-139.
- FU Hai-li. Effect of cattle manure co-applied with inorganic fertilizer on microorganism population and enzyme activity in the rhizosphere soil of *Platycladus orientalis*[J]. *Biological Disaster Science*, 2014, 37(2):134-139.
- [19] Bittman S, Forge T A, Kowalenko C G. Responses of the bacterial and fungal biomass in a grassland soil to multi-year applications of dairy manure slurry and fertilizer[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(4):613-623.
- [20] 鲍士旦. 土壤农业化学分析[M]. 三版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- BAO Shi-dan. Soil and agro-chemistry analysis[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [21] Zhao X, Zhou Y, Min J, et al. Nitrogen runoff dominates water nitrogen pollution from rice-wheat rotation in the Taihu Lake region of China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2012, 156(4):1-11.
- [22] Zhao X, Zhou Y, Wang S Q, et al. Nitrogen balance in a highly fertilized rice-wheat double-cropping system in southern China[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2011, 76:1068-1078.
- [23] 陈 贵, 陈 莹, 施卫明. 氮肥对水稻不同生长期土壤不同深度氮素渗漏的影响[J]. *土壤*, 2013, 45(5):809-814.
- CHEN Gui, CHEN Ying, SHI Wei-ming. Effect of fertilizer N on N leaching at different soil depths during growth periods of rice[J]. *Soils*, 2013, 45(5):809-814.
- [24] 王正银. 有机肥氮和碳素矿化动力学[J]. *西南农业大学学报(自然科学版)*, 1993, 15(3):197-201.
- WANG Zheng-yin. Kinetics of organic nitrogen and carbon mineralization[J]. *Journal of Southwest Agricultural University*, 1993, 15(3):197-201.
- [25] 李 娟, 李松昊, 鄢奇峰, 等. 不同施肥处理对稻田氮素径流和渗漏损失的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(5):23-28, 33.
- LI Juan, LI Song-hao, WU Qi-feng, et al. Effects of different fertilization treatments on runoff and leaching losses of nitrogen in paddy field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(5):23-28, 33.
- [26] 张玉平, 刘 强, 荣湘民, 等. 有机无机肥配施对双季稻田土壤养分利用与渗漏淋失的影响[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(1):22-27, 32.
- ZHANG Yu-ping, LIU Qiang, RONG Xiang-min, et al. Effects of combined application of organic fertilizer and chemical fertilizer on double cropping rice nutrient utilization and leaching loss from paddy soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(1):22-27, 32.

- [27] 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.
- [28] Egiarte G, Arbestain M C, Ruiz-Romera E, et al. Study of the chemistry of an acid soil column and of the corresponding leachates after the addition of an anaerobic municipal sludge[J]. *Chemosphere*, 2006, 65(11): 2456-2467.
- [29] 杨蕊, 李裕元, 魏红安, 等. 畜禽有机肥氮、磷在红壤中的矿化特征研究[J]. 植物营养与肥科学报, 2011, 17(3): 600-607.
YANG Rui, LI Yu-yuan, WEI Hong-an, et al. Study on nitrogen and phosphorus mineralization of livestock and chicken manure in red soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2011, 17(3): 600-607.
- [30] 廖义善, 卓慕宁, 李定强, 等. 适当化肥配施有机肥减少稻田氮磷损失及提高产量[J]. 农业工程学报, 2013, 29(增刊1): 210-217.
LIAO Yi-shan, ZHUO Mu-ning, LI Ding-qiang, et al. Formulated fertilization for reducing nitrogen and phosphorus losses from paddy fields and increasing rice yield[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(Suppl 1): 210-217.
- [31] 邹长明, 秦道珠, 徐明岗, 等. 水稻的氮磷钾养分吸收特性及其与产量的关系[J]. 南京农业大学学报, 2002, 25(4): 6-10.
ZOU Chang-ming, QIN Dao-zhu, XU Ming-gang, et al. Nitrogen, phosphorous and potassium uptake characteristics of rice and its relationship with grain yield[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2002, 25(4): 6-10.
- [32] Sorensen P, Jensen E S, Nielsen N E. The fate of ^{15}N -labelled organic nitrogen in sheep manure applied to soil of different texture under field conditions[J]. *Plant and Soil*, 1994, 162(1): 39-47.
- [33] 何昌芳, 李鹏, 郜红建, 等. 配方施肥及氮肥后移对单季稻氮素累积和利用率的影响[J]. 中国农业大学学报, 2015, 20(1): 144-149.
HE Chang-fang, LI Peng, GAO Hong-jian, et al. Nitrogen accumulation and use efficiency of single rice under soil testing and nitrogen distribution[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2015, 20(1): 144-149.
- [34] 田亨达, 张丽, 张坚超, 等. 施用有机无机复混肥对太湖平原乌泥土稻麦生长的影响[J]. 南京农业大学学报, 2012, 35(1): 69-74.
TIAN Heng-da, ZHANG Li, ZHANG Jian-chao, et al. Effect of organic-inorganic compound fertilizers on the growth of rice and wheat in south Jiangsu[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2012, 35(1): 69-74.
- [35] 周江明. 有机-无机肥配施对水稻产量、品质及氮素吸收的影响[J]. 植物营养与肥科学报, 2012, 18(1): 234-240.
ZHOU Jiang-ming. Effect of combined application of organic and mineral fertilizers on yield, quality and nitrogen uptake of rice[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2012, 18(1): 234-240.