

控灌中蓄及减量施肥对稻田氮素动态的影响

金斌斌^{1,2}, 邵孝侯², 徐朝辉³, 刘进宝¹, 曾洪学¹

(1. 浙江同济科技职业学院, 浙江 杭州 311231; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098;
3. 南京市水利规划设计院有限责任公司, 江苏 南京 210006)

摘要:为寻求高效生态的水-肥管理模式以减轻稻田施肥所引起的面源污染,在浙江省余姚试验区采用对比试验观测田面水与各土层土壤中氮素形态及其质量浓度,对不同水肥管理模式下稻田氮素的变化规律进行分析。结果表明:施基肥7 d后减量施肥,田面水的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度均值为常规施肥的46.14%, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 质量浓度均值为常规施肥的83.62%;控灌中蓄节水灌溉模式与减量施肥耦合能延长田间水的滞蓄时间,使稻田氮素肥料快速入渗并较多地保留在作物耕层,提高氮肥的有效利用率,降低田面排水的氮素浓度,减少氮素的深层渗漏;施肥后4 d内田面水的氮素浓度较高,应控制排水以避免氮肥流失,减轻稻田氮肥施用所引起的农业面源污染。

关键词:控灌中蓄;减量施肥;稻田;氮素浓度;节水灌溉

中图分类号:S365 文献标志码:A 文章编号:1006-7647(2017)03-0084-05

Effects of controlled and mid-gathering irrigation and reducing fertilization on dynamics of nitrogen in paddy fields//JIN Binbin^{1,2}, SHAO Xiaohou², XU Zhaozhui³, LIU Jinbao¹, ZENG Hongxue¹ (1. Zhejiang Tongji Vocational College of Science and Technology, Hangzhou 311231, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Nanjing Water Planning and Designing Institute Company Limited, Nanjing 210006, China)

Abstract: In order to establish an effective ecological management mode of irrigation and fertilization to reduce non-point source pollution caused by fertilization in paddy fields, nitrogen forms and mass concentrations in surface water and soil water in different soil layers were observed with comparative field trials in an experimental zone in Yuyao City of Zhejiang Province. The variations of nitrogen forms in paddy fields with different irrigation and fertilization modes were analyzed. The results show that in surface water, the average concentration of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ at seven days after the application of basal fertilizer using the reducing fertilization mode was 46.14% of that using the conventional fertilization mode, while the average concentration of $\text{NO}_3^-\text{-N}$ was 83.62% of that using the conventional fertilization mode. The controlled and mid-gathering irrigation mode coupled with reducing fertilization can prolong the field water storage time, allow nitrogen to infiltrate more rapidly and reserve in the tilth layer, and lead to the improvement of effective utilization of nitrogen, the decrease of the nitrogen concentration in surface drainage, and the decrease of nitrogen deep seepage. High nitrogen concentration of surface water was sustained in four days after fertilization. It is pointed out that drainage should be controlled during this period, so that the loss of nitrogen fertilizer can be avoided and the agricultural non-point source pollution caused by nitrogen fertilization can be alleviated.

Key words: controlled and mid-gathering irrigation; reducing fertilization; paddy field; nitrogen concentration; water-saving irrigation

我国南方水稻播种面积大,氮肥施用水平高,但利用率低^[1]。氮素随降雨径流和稻田渗漏进入水体,引发地表水体的富营养化和地下水水质恶化,是南方地区农业面源污染的主要来源^[2-7]。对农业面源污染的控制途径主要有源头控制、过程阻断和末端治理3种,其中过程阻断和末端治理技术费用大、耗时久^[8],因此,在分析稻田氮素的时空迁移特征和

潜在流失规律的基础上,研究南方稻田氮素减排降污技术,创新稻田水肥管理模式,从源头上控制农业面源污染具有重要的现实意义。近年来,国内外学者分别针对稻田水分管理、施肥水平和施肥方式对氮素损失的影响开展了研究^[9-13],对稻田土层的养分淋失规律也有涉及^[14-15],但对不同水肥条件下稻田氮素损失的研究以田面水的氮素变化为主^[8,16]。

控灌中蓄模式是在控制灌溉^[17]的基础上对降雨积蓄上限进行量化的一种节水灌溉技术。秧苗本田移栽后,返青期田面保留 5~25 mm 的薄水层,返青以后的各个生育阶段田面不建立灌溉水层,遭遇大雨,控制田面蓄水水层在稻田相应生育期最大耐淹深度的 1/2(分蘖后期晒田除外),但不超过 70 mm,蓄水历时不超过 3 d。控灌中蓄模式极大程度地提高了降雨的有效利用率^[18]。目前,主要就水稻需水规律、灌溉定额、雨水利用以及对产量的影响等方面开展了控灌中蓄节水灌溉技术田间试验研究^[19],对该技术在农业面源污染控制方面的作用研究尚未深入。本文在田间试验中耦合了控灌中蓄节水灌溉模式和减量施肥技术,并传统的水稻灌溉与施肥技术进行对比,监测了水肥管理对稻田田面水及不同层次土壤溶液中的氮素浓度变化的影响,探讨氮素在水稻生育期的流失规律,以期对南方稻田建立高效、生态的水肥管理制度提供参考。

1 试验方法

1.1 试验区概况

试验区位于浙江省余姚市河姆渡镇(29°98'N, 121°36'E),属北亚热带季风气候带,年降水量 1 263~1 987 mm,降水集中在 4—6 月的梅雨季节和 7—9 月的台风季节,形成两个峰值,易发生洪涝。干旱指数为 0.72,年蒸发量为 900~950 mm,年平均相对湿度为 80%。年平均气温为 16.5℃,年平均日照为 2 061 h,日照率为 47%。无霜期约 228 d。试验区耕层土壤为非石灰性潴育型水稻土,土壤密度为 1.35 g/cm³,地下水埋深范围为 50~150 cm。2012 年水稻本田期内降水量如图 1 所示。

1.2 试验方案

试验水稻品种为台湾高雄 139,属中晚熟品种,种植密度为 79.35 万~82.50 万苗/hm²。水稻采用大棚育苗,试验区插秧移栽的方式进行种植,移栽时间为 2012 年 7 月 6 日,全生育期历时 134 d。

试验设 2 种水分管理模式:常规淹水灌溉(flooding irrigation, 记为 F)和控灌中蓄(controlled and mid-gathering irrigation, 记为 C),在水稻各生育期内的根层土壤水分控制指标如表 1 所示。

表 1 2 种水分管理模式下水稻各生育阶段

根层土壤水分控制指标

生育阶段	控灌中蓄			常规淹水灌溉			
	水层/ mm	土壤含水率/%		蓄雨 上限/ mm	水层/ mm	土壤含水率/%	
		下限	上限			下限	上限
返青期	5~25				30~50		
分蘖前期		70	100	50	0~30		
分蘖中期		65	100	50	15~30		
分蘖后期	0	60	100	0	0	60	100
拔节孕穗期		80	100	70	30~50		
乳熟期		65	100	0	15~30		

试验设常规施肥(记为 1)和减量施肥(记为 2) 2 种施肥模式,常规施肥量采用当地农民的习惯用量,减量施肥的施肥总量为常规施肥量的 80%。施肥均采用基肥+追肥的方式,基肥在移栽当天施,追肥在分蘖期(移栽后 22 d)和孕穗前期(移栽后 41 d)各施 1 次。常规施肥处理的施肥量折合成施氮量分别为 56.25 kg/hm²、90.43 kg/hm² 和 58.60 kg/hm²,总施氮量 205.28 kg/hm²;减量施肥处理的施肥量折合成施氮量分别为 45.00 kg/hm²、72.34 kg/hm² 和 46.88 kg/hm²,总施氮量 164.22 kg/hm²。

2 种水分管理模式与 2 种施肥模式组合,共 4 种处理,分别记为 F1、F2、C1、C2,每种处理重复 3 次,总计 12 个小区,小区随机布置,单灌单排。

1.3 测定项目

1.3.1 水量平衡项目

试验区设置雨量计和标尺,各小区的进水管路及出水口分别安置水表。测量指标包括作物各生育时期及整个生育期各试验小区的降雨量、田面水层深、灌溉和排水量等,记录各地块的灌溉次数和灌溉定额。

1.3.2 水样采集

试验区在 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 分层埋设土壤溶液取样器,每次施肥前后、降雨后即开始采集田面水和土壤溶液样品,1 天 1 次,持续 1 周;每次排水时,在小区出水口处取样,并检测水位变化。水样水质观测的指标为总氮(TN)、铵态氮(NH₄⁺-N)和硝态氮(NO₃⁻-N),对应的测定方法为:TN 采用碱性过硫酸钾氧化紫外分光光度法,NH₄⁺-N

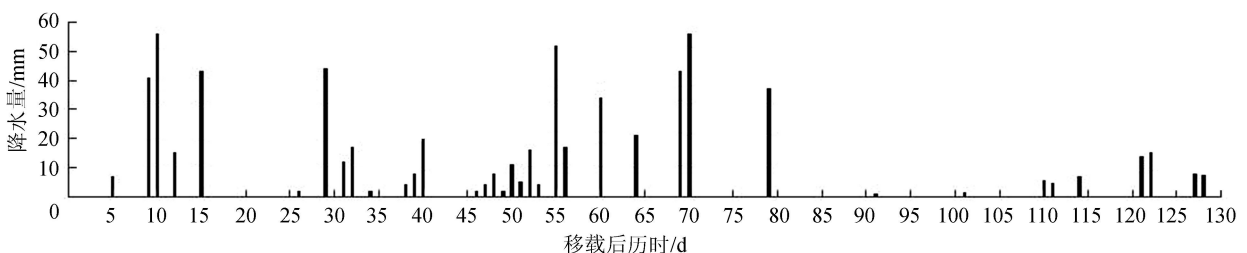


图 1 水稻本田期内降水量

采用絮凝沉淀纳氏试剂光度法, NO_3^- -N 采用紫外分光光度法。

2 结果与分析

2.1 水肥管理对田面水氮素变化的影响

图2、图3分别为施肥后田面水的铵态氮质量浓度和硝态氮质量浓度随移栽后天数的变化趋势。因孕穗期控灌中蓄处理不建立田面灌溉水层且穗肥施入一周内降雨没有形成田面水层,无法测得田面水氮素变化情况,故只对前2次施肥结果(基肥和分蘖肥)进行分析。由图2可知,氮肥施用当天,2次施肥田面水的 NH_4^+ -N 浓度均达到了峰值,之后呈快速下降趋势,4 d 后 NH_4^+ -N 质量浓度在较低值水平缓慢下降并趋于平稳,而图3表明 NO_3^- -N 的质量浓度变化相较于 NH_4^+ -N 整体存在延迟现象,峰值出现在施肥后的第2、3天。这是由于氮肥溶于水后先分解成 NH_4^+ -N,再在硝化细菌的作用下通过硝化反硝化作用,部分转化为 NO_3^- -N,这一转化过程历时1~3 d,之后随着 NH_4^+ -N 质量浓度的降低,硝化反应产物也逐渐减少, NO_3^- -N 质量浓度也趋于平缓。

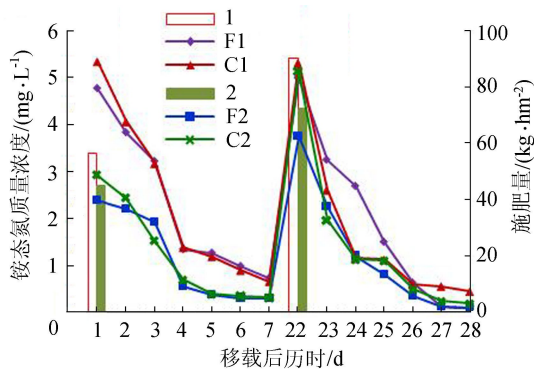


图2 不同水肥管理模式下田面水铵态氮质量浓度变化

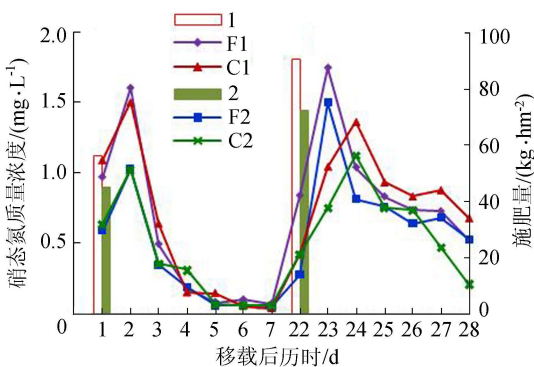


图3 不同水肥管理模式下田面水硝态氮质量浓度变化

施肥量相同的情况下,施基肥后控灌中蓄的田面水 NH_4^+ -N 质量浓度高于常规模式,这是由于控灌中蓄在返青期的田面水层深度小于常规灌溉,基肥溶于水后浓度较大。在此后的3 d内,经硝化、吸收和蒸发后浓度迅速下降并与常规灌溉处于相似水

平。分蘖肥施用后1~3 d控灌中蓄处理的 NH_4^+ -N 质量浓度降幅较大,常规灌溉降幅相对平缓,究其原因这是由于返青后控灌中蓄基本不保留田面水层,农田土壤通气性良好,使得分蘖肥施入后 NH_4^+ -N 能较快地进入耕层的土壤孔隙中,随土壤水被作物吸收。2个生育期 NO_3^- -N 的质量浓度变化差别较大,施入基肥后,4种处理的 NO_3^- -N 均在第2天达到峰值,而分蘖期2种灌水处理的质量浓度峰值不再重叠,控灌中蓄模式的峰值滞后于常规灌溉模式1 d,其原因一方面是因为控灌中蓄施肥后1~3 d的 NH_4^+ -N 迁移到了土壤耕层,使得能参与硝化反应的 NH_4^+ -N 减少,从而导致了 NO_3^- -N 的减少;另一方面硝化反应产生的 NO_3^- -N 也因良好的土壤通气性而更易进入土壤耕层,作为作物的养分被吸收。

施肥量不同对施基肥后田面水中氮素质量浓度影响较大,减量施肥的 NH_4^+ -N 质量浓度均值为常规施肥的46.1%; NO_3^- -N 质量浓度均值为常规施肥的83.6%,施肥量少田面水中的氮素质量浓度低,尤其1~4 d质量浓度差值大,后期经迁移后逐渐趋于相同水平。施入分蘖肥后,不同施肥量的田面水氮素质量浓度差值较小,减量施肥的 NH_4^+ -N 质量浓度均值为常规施肥的74.5%; NO_3^- -N 质量浓度均值为常规施肥的76.6%。主要是由于分蘖期氮素较多地进入耕层,使得田面水层中的氮素质量浓度趋于相似水平。

上述分析结果表明,稻田排水应尽可能地控制在施肥3~4 d以后,这样可以防止氮素随田面水流失,减轻水污染。

2.2 水肥管理对土壤溶液氮素变化的影响

图4、图5为施肥量相同,灌溉模式不同的情况下水稻全生育期不同土层深度土壤溶液中铵态氮和硝态氮的质量浓度变化。从图4、图5可以看出,0~20 cm土层的 NH_4^+ -N 质量浓度峰值最大,这可能是由于稻田土壤组分对 NH_4^+ -N 具有较强的吸附作用,且施肥主要集中此层中,导致浓度升高。随着土层深度的增加, NH_4^+ -N 的质量浓度呈现明显下降趋势,且变化趋缓,尤其是40~60 cm深度处土壤溶液中的 NH_4^+ -N 质量浓度基本维持在一个稳定的较小值。施肥初期,土壤溶液中 NO_3^- -N 质量浓度随着土层深度增大而逐渐增大,这是由于土壤带负电荷,而 NO_3^- -N 也是带负电荷,不易被吸附,会随土壤水下渗,使下层土层中的 NO_3^- -N 质量浓度增大。因此下层土层的 NO_3^- -N 质量浓度在施肥后达到峰值,并在被作物吸收利用后逐步降低至低谷,而浅层被吸附的 NH_4^+ -N 此后逐步硝化为 NO_3^- -N,故 NO_3^- -N 质量浓

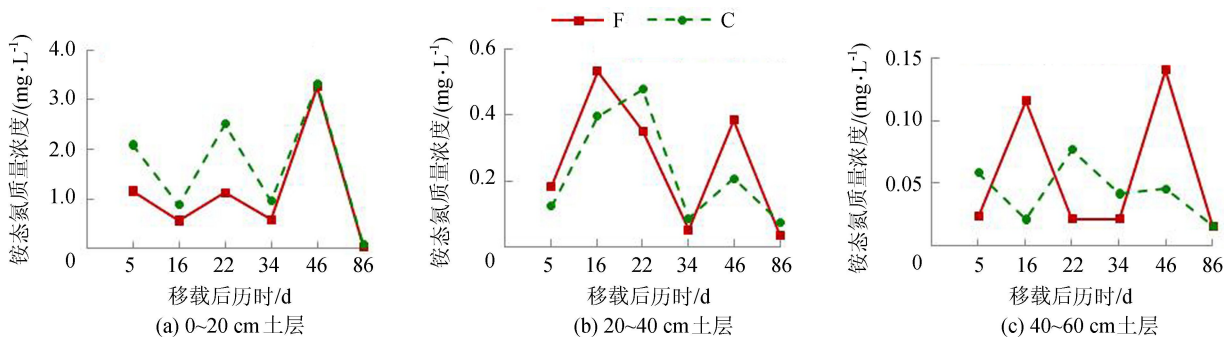


图4 相同施肥量不同灌溉模式下土壤溶液(0~60 cm 土层)铵态氮质量浓度变化

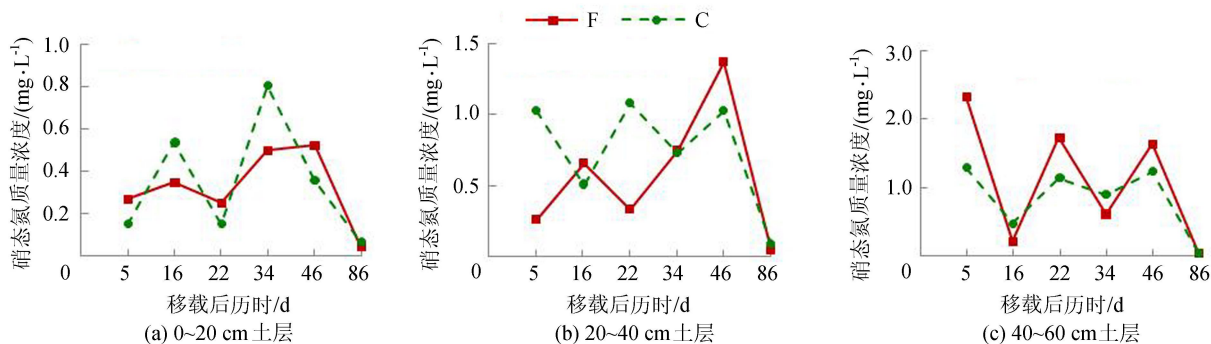


图5 相同施肥量不同灌溉模式下土壤溶液(0~60 cm 土层)硝态氮质量浓度变化

度的峰值滞后于深层土层。

土壤溶液中氮素质量浓度受灌溉模式的影响。施穗肥前 0~20 cm 土层中土壤溶液的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度控灌中蓄高于常规灌溉,施穗肥后 2 种模式的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度差别不大。究其原因控灌中蓄模式的田间水层较浅,入渗的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度较高,且渗漏量小于常规灌溉;控灌中蓄灌溉方式施穗肥后灌溉模式对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度的影响较小,说明控灌中蓄灌溉方式并不加重土壤承载氮肥的负担,对土壤环境污染极小。浅层土层中土壤溶液的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 质量浓度表现为控灌中蓄模式高于常规灌溉,这与控灌中蓄的渗漏量小于常规灌溉有关;40~60 cm 土层则相反,常规灌溉下土层的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 质量浓度大于控灌中蓄,这是由于控灌中蓄模式改善了稻田的土壤含水量,使稻田土壤系统的硝化作用较常规灌溉迅速。

3 结论

a. 控灌中蓄模式下稻田长期处于无水层状态,土壤通气性良好,能加速氮素向土壤耕层的迁移,且由于控灌中蓄模式灌水量较少,使得氮素没有充分的载体进入深层土壤,使土壤中的氮素较多地维持在土壤耕层,而控制排水拉长了排水周期,延长了田间水的滞蓄时间,使水稻可以高效地利用施入的肥料,降低了排水时的氮素质量浓度,减少了对地下水的污染。

b. 施肥量与稻田中的氮素质量浓度成正比,施肥量越大,流失进入径流和地下水中的氮素质量浓度也越大,故减量施肥可有效降低稻田中的氮素质量浓度,减少水体污染。

c. 田间的氮素质量浓度在施肥后达到高值,3~4 d 后开始下降并趋于平缓,因此稻田排水应避免在施肥后 4 d 内进行,以防氮素随地表径流汇入河道加重面源污染。

参考文献:

[1] 肖顺勇,唐建初,刘钦云,等. 湖南省农业面源污染分析及其防治对策[J]. 农产品质量与安全,2006(5):23-25. (XIAO Shun Yong, TANG Jian Chu, LIU Qin Yun, et al. Analysis of agricultural non-point pollution and countermeasures in Hunan Province [J]. Quality and Safety of Agro-Products,2006(5):23-25. (in Chinese))

[2] 刘平乐. 农业面源污染及其防治[J]. 甘肃科技,2011,27(3):147-150. (LIU Ping Le. Agricultural non-point pollution and prevention [J]. Gansu Science and Technology,2011,27(3):147-150. (in Chinese))

[3] 饶静,许翔宇,纪晓婷. 我国农业面源污染现状、发生机制和对策研究[J]. 农业经济问题,2011(8):81-87. (RAO Jing, XU Xiangyu, JI Xiaoting. Situation, generation mechanism of agricultural non-point pollution and countermeasures [J]. Problems of Agricultural Economy, 2011(8):81-87. (in Chinese))

[4] 陈军,权文婷,孙记红. 太湖氮磷浓度与水质因子的关系[J]. 中国环境监测,2011(3):79-83. (CHEN Jun,

- QUAN Wenting, SUN Jihong. Relationship between nitrogen, phosphorus concentration and water quality factors[J]. Environmental Monitoring in China, 2011(3): 79-83. (in Chinese))
- [5] XIE Y X, XIONG Z Q, XING G X, et al. Assessment of nitrogen pollutant sources in surface waters of Taihu Lake region[J]. Pedosphere, 2007, 17(2): 200-208.
- [6] 胡玲珍, 陈振楼, 刘杰. 长江三角洲湖泊富营养化演变趋势及其调控对策[J]. 重庆环境科学, 2003, 25(3): 6-9. (HU Lingzhen, CHEN Zhenlou, LIU Jie. Variational trends and control countermeasures of lake eutrophication in the Yangtze River delta[J]. Chongqing Environmental Science, 2003, 25(3): 6-9. (in Chinese))
- [7] 刘涛, 揣小明, 陈小锋, 等. 江苏省西部湖泊水环境演变过程与成因分析[J]. 环境科学研究, 2011, 24(9): 995-1002. (LIU Tao, CHUAI Xiaoming, CHEN Xiaofeng, et al. Evolution of lake water environment in west Jiangsu Province and analysis of causes [J]. Research of Environmental Sciences, 2011, 24(9): 995-1002. (in Chinese))
- [8] 王静, 郭熙盛, 王允青, 等. 保护性耕作与平衡施肥对巢湖流域稻田氮素径流损失及水稻产量的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(6): 1164-1171. (WANG Jing, GUO Xisheng, WANG Yunqing, et al. Effects of conservation tillage and balanced fertilization on nitrogen loss from paddy field and rice yields in Chaohu region [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(6): 1164-1171. (in Chinese))
- [9] 王强, 杨京平, 陈俊, 等. 非完全淹水条件下稻田表面水体中三氮的动态变化特征研究[J]. 应用生态学报, 2004, 15(7): 1182-1186. (WANG Qiang, YANG Jingping, CHEN Jun, et al. Dynamics of three kinds of nitrogen in surface water of rice field with an independent irrigation system[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(7): 1182-1186. (in Chinese))
- [10] BOUMAN B A M, LAMPAYAN R M, TUONG T P. Water management in irrigated rice: Coping with water scarcity [M]. Los Baos, Philippines: International Rice Research Institute, 2007: 19-46.
- [11] 李宗新, 董树亭, 王空军, 等. 不同施肥条件下玉米田土壤养分淋溶规律的原位研究[J]. 应用生态学报, 2008, 19(1): 65-70. (LI Zongxin, DONG Shuting, WANG Kongjun, et al. Soil nutrient leaching patterns in maize field under different fertilizations; an in situ study [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(1): 65-70. (in Chinese))
- [12] 杜建军, 毋永龙, 田吉林, 等. 控/缓释肥料减少氨挥发和氮淋溶的效果研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(2): 49-52. (DU Jianjun, WU Yonglong, TIAN Jilin, et al. Effect of several controlled/slow-release fertilizers on decreasing ammonia volatilization and N leaching [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21(2): 49-52. (in Chinese))
- [13] CHIEN S H, PROCHNOW L I, CANTARELLA H. Recent developments of fertilizer production and use to improve nutrient efficiency and minimize environmental impacts [J]. Advances in Agronomy, 2009, 102(9): 267-322.
- [14] YANG S H, PENG S Z, XU J Z, et al. Nitrogen loss from paddy field with different water and nitrogen managements in Taihu Lake region of China[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2013, 44(16): 2393-2407.
- [15] 王莹, 彭世彰, 焦健, 等. 不同水肥条件下水稻全生育期稻田氮素浓度变化规律[J]. 节水灌溉, 2009(9): 12-16. (WANG Ying, PENG Shizhang, JIAO Jian, et al. Research on nitrogen dynamics in paddy field under different levels of water and fertilizer during whole growing period[J]. Water Saving Irrigation, 2009(9): 12-16. (in Chinese))
- [16] 叶玉适, 梁新强, 金熠, 等. 节水灌溉与控释肥施用对稻田田面水氮素变化及径流流失的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(5): 105-112. (YE Yushi, LIANG Xinqiang, JIN Yi, et al. Dynamic variation and runoff loss of nitrogen in surface water of paddy field as affected by water-saving irrigation and controlled-release fertilizer application[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(5): 105-112. (in Chinese))
- [17] 彭世彰. 节水高产水稻控制灌溉技术[J]. 水利水电科技进展, 1991, 11(4): 75-77. (PENG Shizhang. Controlled irrigation technique for paddy field with water-saving and high yield [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 1991, 11(4): 75-77. (in Chinese))
- [18] 何生兵. 水稻生态节水灌溉模式研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [19] 邵孝侯, 何俊, 胡秀君, 等. 水稻控灌中蓄灌溉模式的节水增产效应[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(3): 357-359. (SHAO Xiaohou, HE Jun, HU Xiujun, et al. Effect of controlled and mid-gathering irrigation mode on water-saving and yield-increasing of paddy field [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2013, 41(3): 357-359. (in Chinese))

(收稿日期: 2016-06-29 编辑: 骆超)

