

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2014.05.015

暴雨条件下不同灌排模式稻田排水中氮磷变化规律

孙亚亚^{1,2}, 俞双恩^{1,2}, 陈军³, 肖梦华^{1,2}, 王宁^{1,2}

(1. 河海大学南方地区高效灌排与农业水土环境教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 3. 宿迁市宿城区水务局, 江苏 宿迁 223800)

摘要: 为研究暴雨条件下不同灌排模式稻田排水中氮磷质量浓度变化规律,减少农田面源污染,提高氮肥的利用效率,在江苏省宿迁市宿城区运南灌区开展田间试验。试验结果表明:与常规灌排模式(CK)相比,控制灌排模式节水18.7%,排水总量减少50.6%,水稻产量减少3.6%;控制灌排模式由于增加了稻田蓄水深度,减少了雨后排水量,延迟了雨后排水时间,稻田排水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TN和TP流失总量分别比CK减少48.15%、49.09%、45.54%和49.10%,节水减排效果显著。

关键词: 稻田;暴雨;控制排水;控制灌溉;氮磷质量浓度;氮磷流失

中图分类号:S511 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2014)05-0455-05

Changes of nitrogen and phosphorus concentrations in surface drainage from paddy field under different irrigation and drainage modes

SUN Yaya^{1,2}, YU Shuangen^{1,2}, CHEN Jun³, XIAO Menghua^{1,2}, WANG Ning^{1,2}

(1. Key Laboratory of Efficient Irrigation-Drainage and Agricultural Soil-Water Environment in Southern China, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Sucheng District Water Authority, Suqian 223800, China)

Abstract: A field experiment was conducted in the Sucheng District, in Suqian of Jiangsu Province, in order to study the changes of the concentrations of nitrogen and phosphorus in surface drainage from a paddy field after a rainstorm with different irrigation and drainage modes, and to reduce agricultural non-point source pollution and improve the utilization efficiency of nitrogen fertilizer. The experimental results show that, compared with conventional irrigation and drainage modes, the controlled irrigation and drainage mode caused an 18.7% reduction in total irrigation water, a 50.6% reduction in total drainage water, and a 3.6% reduction in rice yield. As the controlled irrigation and drainage mode increased the storage water depth in the paddy field, it caused drainage to decrease after the rainstorm, the drainage time to be delayed, and the total amounts of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, TN, and TP losses in the surface drainage from the paddy field to decrease by 48.15%, 49.09%, 45.54%, and 49.10%, respectively, indicating a significant effect in water conservation and drainage reduction.

Key words: paddy field; rainstorm; controlled drainage; controlled irrigation; concentrations of nitrogen and phosphorus; nitrogen and phosphorus losses

水体富营养化现象是当今世界水污染治理的难题,已成为全球最重要的环境问题之一,而农业面源污染是引起水体富营养化的一个重要原因^[1-3]。常规的灌排模式(CK)下,灌溉和降雨均可能导致较多携带大量农田养分的排水直接进入水体,导致河流和湖泊水质富营养化。研究表明,单位面积稻田由于渗漏和径流产生的氮磷流失量达旱田的4倍以上,传统的灌排模式已不能应对日益严重的水环境问题,因此,稻田控制

收稿日期:2013-07-01

基金项目:江苏省水利科技项目(2011037);江苏高校优势学科建设工程资助项目(水利工程);中央高校基本科研业务费专项(2011B12214)

作者简介:孙亚亚(1990—),男,江苏宿迁人,硕士研究生,主要从事灌排理论与节水灌溉研究。E-mail:syyhhu@126.com

通信作者:俞双恩,教授。E-mail:seyu@hhu.edu.cn

灌排技术引起人们的关注^[4]。在保证水稻产量的同时,控制灌溉模式可以提高作物水分利用效率,减轻灌溉和排水对环境的压力^[5-6];通过对农田水位的调控,控制排水技术能减少稻田排水量,降低排水中氮磷质量浓度,进而有效减少农田氮磷的流失^[7-8]。

南方地区水稻生长期的降雨多以暴雨形式出现,雨滴击溅侵蚀效应明显,尤其是在水稻生长早期,稻田地表裸露,容易导致稻田土壤表层可溶性养分以及吸附和结合在地表水中泥沙颗粒表面的无机态和有机态养分随泥沙流失^[9-10]。笔者在以往成果的基础上^[11-13],研究了暴雨条件下不同灌排模式对稻田排水及氮磷质量浓度变化的影响,为合理制定稻田排水方案和控制面源污染提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验区基本情况

试验于2012年6—10月在江苏省宿迁市宿城区运南灌区试验基地进行。试验区(33°87'N,118°26'E)属于暖温带季风气候,年降雨量为892.3 mm,年均降雨天数为120 d,主汛期(6—9月)雨量占年降雨量的60%~70%,且多以暴雨形式出现。该区年均水面蒸发量约为900 mm,年平均气温为14.1℃,最高月平均气温为27.2℃,日照时数为2 315 h,平均无霜期为211 d。耕层土壤为砂壤土,0~30 cm土壤密度为1.35 g/cm³,总孔隙度为45.32%,pH为7.5,土壤有机质质量比为22.31 g/kg、全氮质量比为0.9105 g/kg、速效氮质量比为0.02746 g/kg、土壤全磷质量比为0.31 g/kg,土壤速效磷质量比为0.0115 g/kg。

1.2 试验设计

供试水稻品种为粳稻,施肥量根据当地施肥习惯确定。试验期间共施肥3次,于6月25日、7月9日和8月10日分别施基肥、分蘖肥及穗肥,施肥量以纯氮计算,分别为120 kg/hm²、60 kg/hm²和60 kg/hm²。此外,各处理基肥中均施用50 kg/hm²的磷肥(P₂O₅)和钾肥(K₂O)。

各试验小区长30 m,宽20 m,试验小区之间从田埂边向地下内嵌50 cm深的塑料防渗膜,防止小区间的水分交换。常规灌排格田按照原有农田规格布置;控制灌排格田田埂高30 cm,顶部宽30 cm,逐层压实后修坡。试验区排水沟出口处设水位调控闸门和三角量水堰,可以实现排水沟水位的控制和排水计量。

试验设计常规灌排和控制灌排2种处理,每种处理3个重复,共6个小区,总计0.6 hm²。田间小区布置如图1所示。

常规灌排模式:按照当地水稻用水习惯管理(浅湿灌溉),各生育阶段稻田水位控制指标见表1,低于适宜水位下限时灌水至适宜水位上限,降雨时超过允许蓄水深度时及时排水至允许蓄水深度,排水沟自由排水,不进行沟水位调节。

控制灌排模式:各生育阶段稻田水位控制指标见表1,稻田水位低于适宜水位下限时灌水至适宜水位上限,稻田水位超过允许最大蓄水深度时,排水至允许最大蓄水深度,但蓄水不超过5 d取(本文的淹水天数为5 d),5 d后将稻田水层深度降至适宜水位上限,排水沟的排水口有控制闸,可以进行沟水位调节。

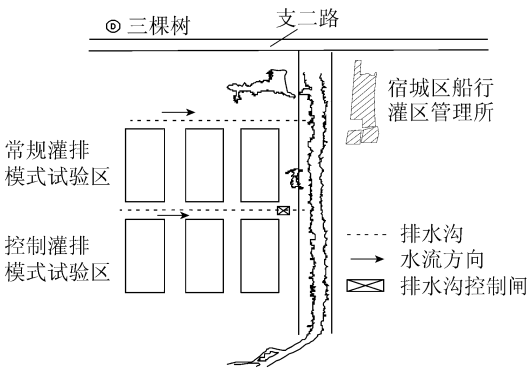


图1 试验小区布置

Fig. 1 Layout of experimental plot

表1 水稻各生育期水位控制指标

Table 1 Water level control indices for different growth periods of rice

生育期	常规灌排模式			控制灌排模式		
	适宜水位上限	适宜水位下限	允许蓄水深度	适宜水位上限	适宜水位下限	允许蓄水深度
分蘖期(前期)	30	0	50	30	-200	80
分蘖期(后期)	0	0.6θ	0	30	-200	80
拔节孕穗期	30	0	70	30	-200	150
抽穗开花期	30	0	70	30	-200	150
乳熟期	30	0	60	30	-200	100

注:θ为根系层的土壤体积饱和含水率;数字正值为田面淹水深度,负值为地下水位距田面的距离。

1.3 分析项目与方法

2012 年水稻生长期 24 h 降雨量达到暴雨级别(>50 mm) 的次数有 4 次, 分别出现在 7 月 24 日(102.6 mm)、8 月 15 日(169.1 mm)、9 月 3 日(74.2 mm) 和 9 月 17 日(59.5 mm)。

a. 以 8 月 15 日暴雨为例分析不同灌排模式稻田排水的氮磷质量浓度变化,取水间隔为暴雨后控水开始第 1 天、第 2 天、第 3 天、第 4 天、第 5 天。水样取后保存于低温冰箱内,在 24 h 内进行分析。取样点为各排水农沟出口。

b. 水质分析。水样测 TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、TP 共 4 项指标,依照《水和废水监测分析方法》分别采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法、絮凝沉淀纳氏试剂光度法、紫外分光光度法、过硫酸钾消解法进行测定。测定仪器为 UV2800 岛津紫外分光光度仪。

2 结果分析

2.1 不同灌排模式稻田灌排水量及产量

2012 年不同灌排模式下水稻全生育期灌排水量及产量见表 2。由表 2 可知,控制灌排模式全生育期地表排水总量比 CK 减少 50.6%,提高了降雨利用率。运南灌区耕层土壤为砂壤土,稻田水入渗较快,有利于稻田控制排水,提高降雨利用率。

控制灌排模式下水稻全生育期灌水量 507.6 mm, 产量为 6416.83 kg/hm², 比 CK 节水 18.7%。由于深蓄指标略深且蓄水时间长,导致水稻生长受滞轻微减产 3.6%。控制灌排模式合理调控了土壤水分,保证了水稻的经济产量,实现了田间水资源的高效利用,基本达到节水、高产的目标。

表 2 不同灌排模式下水稻全生育期灌排水量及产量

Table 2 Irrigation and drainage water volume and rice yield over whole growth period of rice with different irrigation and drainage modes

灌排模式	灌水量/ mm	全生育期 降雨量/ mm	地表 排水 总量/mm	降雨 利用率/ %	实际 产量/ (kg·hm ⁻²)
CK	624.50	508.90	205.90	59.54	6656.41
控制灌排模式	507.60	508.90	101.70	78.05	6416.83

表 3 稻田田面水深变化

Table 3 Changes of surface water depth in paddy field

mm

灌排模式	田面水深					
	08-15	08-16	08-17	08-18	08-19	08-20
CK	169.1	70	55	40	25	10
控制灌排模式	169.1	150	135	120	105	30

2.2 不同灌排模式稻田田面水深变化

8 月 15 日暴雨后不同灌排模式稻田田面水深变化见表 3。降雨后第 1 天,按照水稻不同灌排模式各生育期水位控制指标,稻田水位超过允许最大蓄水深度,排水至允许最大蓄水深度。降雨后第 2~4 天,稻田不进行地表排水,排水沟中的排水量主要是稻田侧渗水量。降雨后第 5 天,控制灌排模式将多余的地表水排出,并达到适宜水位上限,CK 无地表排水。

2.3 不同灌排模式稻田排水中氮质量浓度变化

暴雨后不同灌排模式稻田排水中 $\rho(\text{NH}_4^+\text{-N})$ $\rho(\text{NO}_3^-\text{-N})$ $\rho(\text{TN})$ 变化规律为(表 4): (a) $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TN 主要集中在降雨后第 1 天的初次排水,后 3 次采样的质量浓度明显要小于初次排水,主要是由于暴雨雨滴击溅侵蚀稻田表层,使稻田地表水中悬浮物增多,导致氮随稻田地表排水流失。(b) 控制灌排模式允许蓄水深度大,悬浮物浓度相对较低,使得前期地表排水中 $\rho(\text{NH}_4^+\text{-N})$ $\rho(\text{NO}_3^-\text{-N})$ $\rho(\text{TN})$ 稍低于 CK。(c) 降雨后第 2~4 天, $\rho(\text{NH}_4^+\text{-N})$ 呈下降趋势,主要是由于第 2~4 天排水沟中的水主要是稻田侧渗水,随着时间的推移,硝化作用以及土壤的吸附作用使 $\rho(\text{NH}_4^+\text{-N})$ 下降;控制灌排模式排水中 $\rho(\text{NH}_4^+\text{-N})$ 稍低于 CK,是因为控制灌排模式延长了降雨在稻田土壤中的滞蓄时间,使 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 向 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 转化的时间增加; $\rho(\text{NO}_3^-\text{-N})$ $\rho(\text{TN})$ 亦呈下降趋势,但控制灌排模式部分时段排水中 $\rho(\text{NO}_3^-\text{-N})$ $\rho(\text{TN})$ 稍高于 CK,主要是因为控制灌排模式田面水层深,侧渗量稍大。(d) 降雨后第 5 天控制灌排模式水样的 $\rho(\text{NH}_4^+\text{-N})$ $\rho(\text{NO}_3^-\text{-N})$ $\rho(\text{TN})$ 稍高于 CK,主要原因是控制灌排模式有多余地表水排出,且稻田地表水 $\rho(\text{NH}_4^+\text{-N})$ $\rho(\text{NO}_3^-\text{-N})$ $\rho(\text{TN})$ 比排水沟水体的高。

以上分析可知,暴雨后控制灌排模式稻田排水中平均 $\rho(\text{NH}_4^+\text{-N})$ $\rho(\text{NO}_3^-\text{-N})$ $\rho(\text{TN})$ 小于 CK,说明控制灌排模式可以有效降低排水中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TN 质量浓度;降雨初期水稻排水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TN 质

量浓度较高,此时应尽量避免地表排水。

2.4 不同灌排模式稻田排水中总磷质量浓度变化

暴雨后不同灌排模式稻田排水中 $\rho(\text{TP})$ 质量浓度变化见表 4,可以看出:(a)排水中 $\rho(\text{TP})$ 在雨后第 1 天最高,后 3 次采样的 $\rho(\text{TN})$ 明显要小于初次排水,这是因为磷肥施入土壤后只有小部分呈离子态的磷酸盐能被作物吸收,大部分被土壤吸持转化为难溶性磷酸盐类^[14],在降雨的冲刷、击溅作用下以颗粒态磷^[15]随地表水排出。(b)控制灌排模式允许蓄水深度大,悬浮物浓度相对较低,进而导致前期地表排水中 $\rho(\text{TN})$ 稍低于 CK。(c)降雨后第 2~4 天, $\rho(\text{TN})$ 均呈下降的趋势,但控制灌排模式 $\rho(\text{TP})$ 部分时段稍高于 CK,原因是此时排水沟中的排水主要是稻田侧渗水,控制灌排模式田面水层深,侧渗量稍大,导致部分时段 $\rho(\text{TN})$ 稍高于 CK,但差异不大。(d)雨后第 5 天控制灌排模式水样的 $\rho(\text{TN})$ 稍高于 CK,原因是控制灌排模式将多余地表水排出至适宜水位上限,而 CK 没有地表排水。

以上分析可知,暴雨后控制灌排模式稻田排水中平均 $\rho(\text{TN})$ 小于 CK,说明控制灌排模式可以有效降低排水的 TP 质量浓度。降雨初期稻田排水中 TP 质量浓度较高,应避免雨后立即排水。

表 4 稻田排水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TN、TP 质量浓度变化

Table 4 Changes of concentrations of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, TN, and TP in paddy field drainage								mg/L
日期	$\rho(\text{NH}_4^+\text{-N})$		$\rho(\text{NO}_3^-\text{-N})$		$\rho(\text{TN})$		$\rho(\text{TP})$	
	CK	控制灌排模式	CK	控制灌排模式	CK	控制灌排模式	CK	控制灌排模式
08-16	1.53	1.45	1.04	0.96	3.81	3.62	1.61	1.47
08-17	1.01	0.95	0.69	0.63	2.65	2.51	1.02	0.97
08-18	0.94	0.88	0.61	0.58	2.44	2.33	0.92	0.89
08-19	0.85	0.82	0.52	0.55	2.16	2.25	0.82	0.85
08-20	0.71	0.77	0.47	0.51	2.01	2.09	0.74	0.78

2.5 不同灌排模式稻田排水中氮磷负荷变化

用 SPSS13.0 软件进行统计分析,依据 F-检验进行显著性分析(LSD), $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TN 及 TP 的显著性 α 值分别为 0.041、0.022、0.037 和 0.045($\alpha<0.05$ 时,差异为显著)。可以看出,控制灌排模式和 CK 不同处理间 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TN 及 TP 质量浓度差异均显著。不同灌排模式稻田排水中氮磷负荷变化计算公式为

$$L = \left(\sum_{i=1}^n C_{\text{di}} Q_{\text{di}} \right) \times 10^{-2}$$

(1)

式中: L ——不同灌排模式稻田氮磷指标排放负荷, kg/hm^2 ; C_{di} ——不同灌排模式试验区水稻每日排水氮磷质量浓度, mg/L ; Q_{di} ——不同灌排模式试验区水稻每日排水水量, mm ; i ——水稻排水日序号; n ——排水天数,d,本次试验 n 取 5 d。

8 月 15 日暴雨后控制灌排模式稻田 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TN 流失负荷分别为 $0.84 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 、 $0.56 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 和 $2.20 \text{ kg}/\text{hm}^2$,分别比 CK 减少 48.15%、49.09% 和 45.54%,减排效果明显(见表 5)。控制灌排模式 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 TN 质量浓度整体比 CK 低,通过控制排水量和浓度降低双重途径来减少氮流失总量。排水量和氮质量浓度状况决定稻田氮流失主要发生在暴雨初期,控制灌排模式控制了氮流失关键时期的排水量,显著减少了氮的流失总量。

控制灌排模式稻田 TP 流失总量为 $0.85 \text{ kg}/\text{hm}^2$,比 CK 减少 49.10%,减排效果明显。控制灌排模式控制了暴雨后磷高质量浓度时期的排水量,有效减少了磷流失。另外,控制闸降低了出水流速,使水流携带能力减小,减轻了颗粒态磷流失。

表 5 不同灌排模式下稻田排水中氮磷负荷变化

Table 5 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, TN, and TP losses in drainage from paddy field with different irrigation and drainage modes					
灌排模式	农沟排水量/ mm	$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 流失负荷/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	$\text{NO}_3^-\text{-N}$ 流失负荷/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	TN 流失负荷/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	TP 流失负荷/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
CK	99.10	1.62	1.10	4.04	1.67
控制灌排模式	79.10	0.84	0.56	2.20	0.85

3 结 论

a. 暴雨雨滴对稻田地表的击溅以及冲刷产生的水力侵蚀,使稻田地表水悬浮物增加,造成了氮磷随径流

流失,反映在降雨初期稻田水氮磷质量浓度很高。控制暴雨初期地表排水是减少农田养分排放的重要途径。

b. 控制灌排模式高效利用了水分和养分,有效控制了氮磷流失关键时期的排水,实现了节水高产、减排控污的目标。控制灌排模式显著降低了地表排水总量,提高了降雨的利用率,有效减少灌水量,与常规灌排模式相比,全生育期稻田排水量减少 50.6%,雨水利用率提高 31.09%,节水 18.7%,轻微减产 3.6%;控制了暴雨初期稻田氮磷高质量浓度时段的排水, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TN 和 TP 流失总量分别较 CK 减少 48.15%、49.09%、45.54% 和 49.10%,减排效果显著。

参考文献:

[1] 邱建军,李虎,王立刚. 中国农田施氮水平与土壤氮平衡的模拟研究[J]. 农业工程学报,2008, 24(8): 40-44. (QIU Jianjun, LI Hu, WANG Ligang. Simulation of nitrogen level and balance in cropland in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(8): 40-44. (in Chinese))

[2] 郭鸿鹏,朱静雅,杨印生. 农业非点源污染防治技术的研究现状及进展[J]. 农业工程学报,2008, 24(4): 290-295. (GUO Hongpeng, ZHU Jingya, YANG Yinsheng. Research status and development of technologies for controlling agricultural non-point source pollution[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(4): 290-295. (in Chinese))

[3] 祁俊生. 农业面源污染综合防治技术[M]. 重庆: 西南交通大学出版社,2009: 1-56.

[4] 司友斌,王慎强,陈怀满. 农田氮、磷的流失与水体富营养化[J]. 土壤,2000(4): 188-193. (SI Youbin, WANG Shenqiang, CHEN Huaiman. Water eutrophication and losses of nitrogen and phosphates in farmland[J]. Soils, 2000(4): 188-193. (in Chinese))

[5] 彭世彰,郝树荣,刘庆,等. 节水灌溉水稻高产优质成因分析[J]. 灌溉排水,2000, 19(3): 3-5. (PENG Shizhang, HAO Shurong, LIU Qing, et al. Study on the mechanisms of yield-raising and quality-improving for paddy rice under water-saving irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2000, 19(3): 3-5. (in Chinese))

[6] 彭世彰,徐俊增,黄乾,等. 水稻控制灌溉模式及其环境多功能性[J]. 沈阳农业大学学报,2004, 35(5/6): 443-445. (PENG Shizhang, XU Junzeng, HUANG Qian, et al. Controlled irrigation of paddy rice and environmental multi functionality [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2004, 35(5/6): 443-445. (in Chinese))

[7] WESTSTROM I, MESSING I. Effects of controlled drainage on N and P losses and N dynamics in a loamy sand with spring crops [J]. Agricultural Water Management, 2007, 87(3): 229-240.

[8] NG H Y F, TAN C S, DRURY C F, et al. Controlled drainage and subirrigation influences on tile nitrate loss and corn yields in a sandy loam soil in south western Ontario[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2002, 90(1): 81-88.

[9] 肖梦华,俞双恩,章云龙. 控制排水条件下淹水稻田面及地下水氮浓度变化[J]. 农业工程学报,2011, 27(10): 180-186. (XIAO Menghua, YU Shuangen, ZHANG Yunlong. Changes of nitrogen in flooding paddy field on condition of controlled drainage[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(10): 180-186. (in Chinese))

[10] 殷国玺,张展羽,郭相平,等. 地表控制排水对氮质量浓度和排放量影响的试验研究[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2006, 34(1): 21-24. (YIN Guoxi, ZHANG Zhanyu, GUO Xiangping, et al. Experimental study on effect of controlled drainage from ground surface on concentration and discharge of nitrogen[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2006, 34(1): 21-24. (in Chinese))

[11] 彭世彰,张正良,罗玉峰,等. 灌排调控的稻田排水中氮素的变化规律[J]. 农业工程学报,2009,25(9):21-26. (PENG Shizhang, ZHANG Zhengliang, LUO Yufeng, et al. Variation of nitrogen concentration in drainage water from paddy fields under controlled irrigation and drainage[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(9): 21-26. (in Chinese))

[12] 高焕芝,彭世彰,茆智,等. 不同灌排模式稻田排水中氮磷流失规律[J]. 节水灌溉,2009(9):1-3. (GAO Huanzhi, PENG Shizhang, MAO Zhi, et al. N and P losses in surface drainage from paddy field under different irrigation and drainage modes [J]. Water Saving Irrigation, 2009(9):1-3. (in Chinese))

[13] 肖梦华,俞双恩,王彦彦,等. 淹水稻田氮磷浓度变化以及基于环境因子变化的最优排水时机[J]. 水科学与水工程, 2013, 6(2): 164-177. (XIAO Menghua, YU Shuangen, WANG Yanyan, et al. Changes of nitrogen and phosphorus at the change of environmental factors and optimal drainage time in flooded paddy field[J]. Water Science and Engineering, 2013, 6(2): 164-177. (in Chinese))

[14] 王少仁,夏培楨. 石灰性土壤三种磷肥不同用量的磷肥利用率及其缓效率[J]. 土壤通报,2008, 39(4): 1363-1368. (WANG Shaoren, XIA Peizhen. The use efficiency and slow-release rate of various P fertilizers with different application rates on calcareous soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2008, 39(4): 1363-1368. (in Chinese))

[15] 殷国玺,张展羽,邵光成. 农田地表排水对排水中磷质量浓度的影响[J]. 水利水电科技进展,2006, 26(4): 24-26. (YIN Guoxi, ZHANG Zhanyu, SHAO Guangcheng. Effects of controlled drainage from field surface on concentration of phosphor discharge[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2006, 26(4): 24-26. (in Chinese))