

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2012.03.005

淹水稻田抽穗开花期氮磷变化及最佳排水时机

王彦彦^{1,2}, 俞双恩^{1,2}, 肖梦华^{1,2}, 黄 荣^{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)

摘要 : 通过蒸渗仪试验, 研究了淹水稻田在水稻抽穗开花期不同渗漏水平下稻田水氮磷的变化特性, 建立了基于减污的多目标模型. 结果表明 : 在水稻抽穗开花期淹水条件下, 整个淹水期间地表水和地下水 TP 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度均呈先降后增的趋势, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 质量浓度则相反 ; 渗漏强度的大小对抽穗开花期稻田地表水和地下水的 TP, $\text{NH}_3\text{-N}$ 以及 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的质量浓度影响不显著 ; 在淹水条件下, 水稻抽穗开花期在低渗漏水平时, 宜在控水第 4 天进行地表排水.

关键词 : 水稻 ; 抽穗开花期 ; TP 质量浓度 ; $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度 ; $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 质量浓度 ; 多目标模型

中图分类号 : S143.1 ; S274.3 **文献标志码** : A **文章编号** : 1000-1980(2012)03-0270-05

Changes of nitrogen and phosphorus at sprouting and blooming stage and optimal drainage time in flooded paddy field

WANG Yan-yan^{1,2}, YU Shuang-en^{1,2}, XIAO Meng-hua^{1,2}, HUANG Rong^{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)

Abstract : The concentration changes of nitrogen and phosphorus under different seepage conditions at the sprouting and blooming stage in a flooded paddy field were studied through lysimeter experiments. A multi-objective model was established for pollution abatement. The results show that at the sprouting and blooming stage, the concentrations of TP and $\text{NH}_3\text{-N}$ in surface water and groundwater in the paddy field initially decreased and then increased during the flooded period, and the concentration of $\text{NO}_3^- \text{-N}$ changed in reverse ; and the influence of the seepage rate on the concentrations of TP, $\text{NH}_3\text{-N}$, and $\text{NO}_3^- \text{-N}$ was not significant. The simulation results of the multi-objective model show that surface drainage should be carried out on the fourth day after water control at a low seepage level during the sprouting and blooming stage in the flooded paddy field.

Key words : rice ; sprouting and blooming stage ; TP concentration ; $\text{NH}_3\text{-N}$ concentration ; $\text{NO}_3^- \text{-N}$ concentration ; multi-objective model

水稻是我国最主要的粮食作物, 播种面积大. 在水稻生长期, 降雨量比较集中, 农田排水量大, 这不但会造成水资源的浪费, 更会导致水稻种植区氮磷的流失, 带来严重的环境问题, 由农田排水造成的氮磷损失已经成为农业面源污染的主要来源^[1]. 因此, 研究稻田淹水条件下水质变化特性, 对于科学地制订稻田排水方案、减少面源污染具有重要意义. 本文在以往成果的基础上^[2-4], 研究了淹水稻田抽穗开花期不同渗漏强度条件下氮磷的变化, 为控制排水时机和降低面源污染提供依据.

收稿日期 : 2011-05-06

基金项目 : “十一·五”国家科技支撑计划(2006BAD11B06) ; 国家自然科学基金(50839002)

作者简介 : 王彦彦(1987—), 女, 河南新乡人, 硕士研究生, 主要从事与节水灌溉理论与新技术研究. E-mail : wangyanyan870811@163.com

1 试验材料与试验方法

1.1 试验区基本情况

试验于 2010 年 6—10 月在河海大学节水园区的蒸渗测坑内进行.该试验区位于河海大学江宁校区,属于亚热带湿润气候,冬冷夏热,四季分明.年均降雨量 1 021.3 mm,多年平均蒸发量为 900 mm 左右,绝对最高温度 43 ℃,年均气温 15.7 ℃,最热月平均温度 28.1 ℃,年无霜期 237 d,年均日照量 2 212.8 h.

蒸渗测坑内土壤为黏壤土,由当地土分层回填密实.土壤类型为黄棕壤,肥力均匀,密度为 1.46 g/cm³.每个测坑面积 2×2.5 m²,有底测坑深 2.0 m,可实现自动灌溉与排水和水位自动控制.

1.2 试验设计和试验方法

为了研究淹水条件下稻田水质的变化规律,在水稻抽穗开花期选择 4 个有底蒸渗测坑进行蓄水试验,分为 2 种处理,每个处理 4 个重复(每个处理有南北 2 个测坑,每个测坑的南北为 2 个重复).2 种处理起始淹水深度均为 250 mm,地下水渗漏量分别为 2 mm/d(处理 1)、4 mm/d(处理 2).8 月 30 日开始通过地面灌溉的方式补水至设计蓄水深度,9 月 8 日结束,淹水历时为 10 d.淹水期间按设定的渗漏水量通过地下排水口控制水位下降不补水,淹水结束后将地表水层降至适宜水层上限,按照浅湿调控灌溉模式进行水位管理.在蓄水的第 1、4、7、10 d 分别取处理的地表水和每天排出的渗漏水进行水样水质测定.灌溉用水为试验地井水.

用 50 mL 医用注射器,不扰动土层,随机小心地抽取各蒸渗测坑水层中地表水,注入塑料瓶,并做好标记.地下水取样为地下廊道测坑排水口的渗漏水.取出的水样可保存于低温冰箱内进行冷藏处理,但应尽量在 48 h 内进行分析.水样测 TP、NH₃-N、NO₃⁻-N 共 3 项指标.测定方法分别为:过硫酸钾消解钼锑抗分光光度计法、絮凝沉淀纳氏试剂光度法、紫外分光光度法^[5].测定仪器为岛津紫外分光光度仪 UV2800.

2 试验结果分析

2.1 淹水条件下 TP 的变化

抽穗开花期稻田水 TP 质量浓度的动态变化过程见图 1.

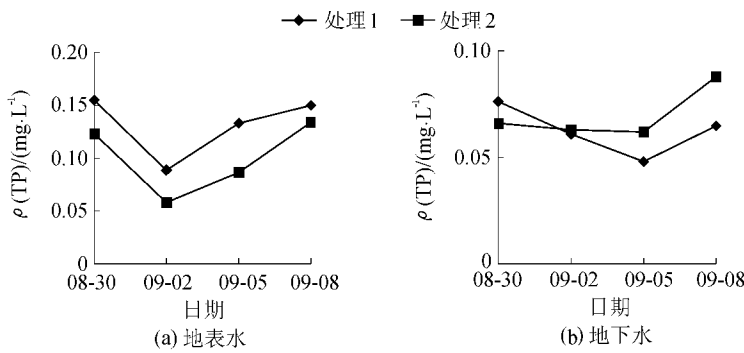


图 1 TP 质量浓度变化

Fig. 1 Variation of TP concentration

分析图 1(a)可知:在整个淹水过程中,2 种处理地表水 TP 质量浓度的变化特征相似.淹水初期由于灌水对地表的扰动,使得颗粒态 P 含量增加,TP 质量浓度处于较高水平.随着地表水中悬浮物的沉淀,TP 质量浓度逐渐减小;之后随着淹水时间的延长,TP 质量浓度逐渐增加.这是因为(a)水分的消耗使得地表水深减小(b)稻田长期淹水,土壤表层一部分三价铁被还原,从而使与之相结合的 P 被释放^[6].

由图 1(b)可以看出,淹水 1 周内,2 种处理的地下水 TP 质量浓度均呈下降趋势.处理 1 的 TP 质量浓度下降较快,到 9 月 2 日开始低于处理 2.这是因为淹水时蒸渗测坑内地下水与地表水连为一体,尽管地表水不断补充地下水,但由于土壤对 P 的吸附作用,补充到地下水的 TP 减少,使得地下水的 TP 质量浓度有所下降,表现为渗漏量越小的处理下降越快.后期,长期淹水造成的还原状态使土壤固 P 能力下降^[7],增加了溶解态 P 随水流向下运移的几率^[8].淋失到地下水中的 TP 也有所增加,因此,地下水的 TP 质量浓度有所回升.

运用 SPSS 软件对不同处理的 TP 质量浓度进行显著性分析,得地表水显著性 $\alpha = 0.222$,地下水显著性 $\alpha = 0.432$,均大于 0.05,差异不显著,说明 2 种渗漏强度对稻田水 TP 质量浓度变化的影响不大.

2.2 淹水条件下 NH₃-N 质量浓度的变化

抽穗开花期稻田水 NH₃-N 质量浓度的动态变化过程见图 2.

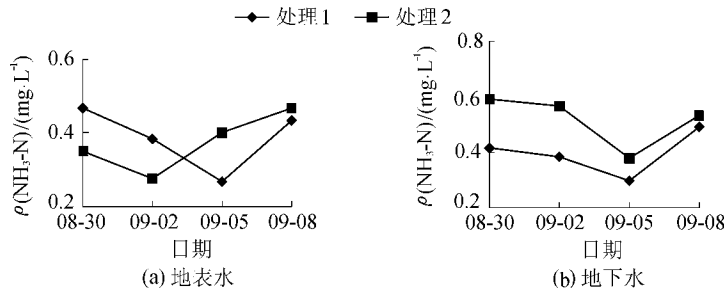


图 2 NH₃-N 质量浓度变化

Fig. 2 Variation of NH₃-N concentration

由图 2(a)可以看出,淹水第 1 天由于灌水对表层土的扰动,2 种处理的 NH₃-N 质量浓度相对较高,但均小于 0.5 mg/L,处于较低水平.这是由于前期水稻田面干湿交替的环境使稻田表面形成了一层保护层,灌水对土层虽有扰动,但从表层土中析出的 NH₃-N 数量不多.随着淹水历时的延长,地表水 NH₃-N 质量浓度逐渐下降,这是土壤和作物对 NH₃-N 的吸附和吸收造成的.到淹水后期 NH₃-N 质量浓度呈上升趋势,原因一是水分的消耗使得地表水量减少,二是长时间的淹水使得淹没在水中的枯叶逐渐腐烂,分解释放了一部分氮素^[9-10].

图 2(b)表明,地下水 NH₃-N 质量浓度表现为先减小后增加的变化趋势.这是因为开始蓄水时,田间水量的增加,起到了稀释地下水 NH₃-N 质量浓度的作用.随着时间的延长和地表水中 NH₃-N 质量浓度的增大,向下淋失到地下水中的 NH₃-N 质量浓度也在增加,加之土壤中的 NH₃-N 溶解到地下水中,使淹水后期地下水的 NH₃-N 质量浓度逐渐上升,表现为渗漏量小的处理 NH₃-N 质量浓度上升较快.

分析其显著性系数,得地表水 $\alpha = 0.816$,地下水 $\alpha = 0.103$,均大于 0.05,说明 2 种渗漏强度条件下稻田水 NH₃-N 质量浓度变化差异不显著.

2.3 淹水条件下 NO₃⁻-N 质量浓度的变化

抽穗开花期稻田水 NO₃⁻-N 质量浓度的动态变化见图 3.

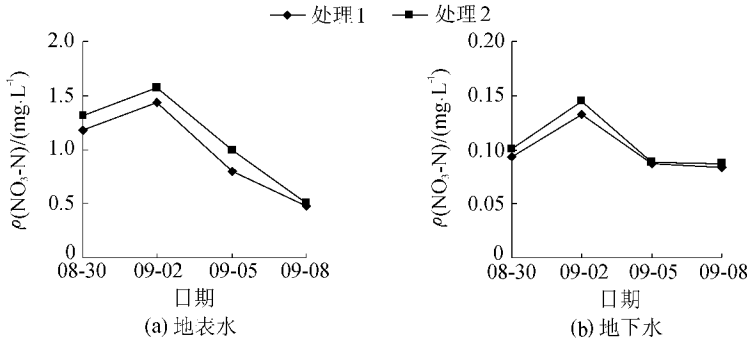


图 3 NO₃-N 质量浓度变化

Fig. 3 Variation of NO₃⁻-N concentration

分析图 3(a)可知,淹水初期,由于灌水扰动了水稻田面水层,使吸附在土壤表层的 NH₄⁺-N 重新溶于水中,在有氧环境下 NH₄⁺-N 经硝化作用转化为 NO₃⁻-N,使地表水 NO₃⁻-N 质量浓度升高,在淹水第 4 天达到最大值.随着时间的推移,地表水中的土壤颗粒逐渐下沉到地面,经硝化作用转化的 NO₃⁻-N 少于作物吸收和反硝化损失的 NO₃⁻-N,因此地表水的 NO₃⁻-N 质量浓度降低.控水结束时处理 1 和处理 2 的 NO₃⁻-N 质量浓度比控水开始时分别下降了 59.6% 和 61.2%.

由图 3(b)可知,2 种处理的地下水 NO₃⁻-N 质量浓度在整个控水期间的大小和变化趋势相近,淹水初期逐渐升高,在淹水第 4 天达到最大值,然后随着淹水时间的延长而下降,最后趋于稳定.2 种处理在整个处理过程中 NO₃⁻-N 质量浓度变化幅度很小,且整体处于较低水平,这是由于抽穗开花期是水稻生长最旺盛时期,

根系吸氮能力强^[11],土壤水及地表水中的 NO_3^- -N质量浓度均较低,因此淋失到地下的 NO_3^- -N较少。经过显著性分析得出,不同处理对地表水和地下水 NO_3^- -N质量浓度影响不显著。

3 基于减污的稻田排水时机

本文的试验结果表明,在比较小的渗漏量下(2 mm/d 和 4 mm/d),渗漏强度的变化对稻田地表水 TP、 NH_3 -N、 NO_3^- -N 质量浓度影响不显著,可将 2 种处理的观测值进行平均作为低渗漏强度下稻田氮、磷的质量浓度。稻田作物区土壤由于犁底层、渗育层和水耕沉淀层的存在,其保水保肥性好,暴雨发生后通过稻田渗漏排除的水量很小,而主要通过地表排水排除拦蓄在稻田里的雨水。基于 NO_3^- -N 的不稳定性,根据《地表水环境质量标准》^[12]的要求,将 TP 和 NH_3 -N 作为主要减污指标。本文根据蓄水条件下地表水 TP 和 NH_3 -N 质量浓度的变化规律,探讨基于减污效应的水稻抽穗开花期稻田地表排水的最佳时机。

3.1 控制排水条件下抽穗开花期 TP、 NH_3 -N 质量浓度变化曲线拟合

根据抽穗开花期控水期间水样测得的 TP、 NH_3 -N 质量浓度,运用 SPSS 软件回归模拟得拟合曲线,见图 4。回归曲线方程式分别为

$$\rho(\text{TP}) = -0.0007t^3 + 0.0135t^2 - 0.0758t + 0.2018 \quad (1)$$
$$\rho(\text{NH}_3\text{-N}) = 0.0002t^3 + 0.0025t^2 - 0.0427t + 0.4485 \quad (2)$$

式中: $\rho(\text{TP})$ 、 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ ——淹水稻田地表水的 TP、 NH_3 -N 质量浓度; t ——淹水时间。

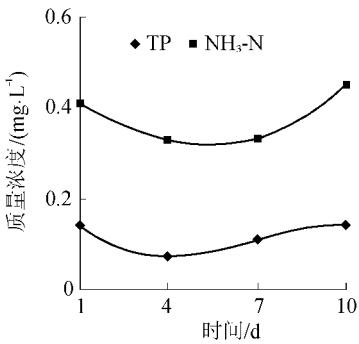


图 4 淹水条件下 TP、 NH_3 -N 质量浓度变化
Fig. 4 Variations of TP and NH_3 -N concentrations during flooded period in paddy field

3.2 基于减污的多目标控制排水目标函数

考虑到 TP 和 NH_3 -N 的质量浓度对地表水污染程度的不同,可根据地表水环境质量标准限值(表 1^[12])对 TP 和 NH_3 -N 的质量浓度赋予权重,得到水稻抽穗开花期减少 TP、 NH_3 -N 流失的多目标控制排水目标函数 Y :

$$Y = -0.0005t^3 + 0.0117t^2 - 0.0703t + 0.2429 \quad (3)$$

式中 t 为淹水时间,约束条件为 $0 < t < 10$ 。

用 Matlab 软件进行数值分析,当 $t = 4.06$ d 时,目标函数 Y 取得最小值 0.117。

考虑到水稻不同生育阶段的耐淹水深和耐淹历时不同(表 2^[13]),选择第 4 天进行地表排水。

表 1 地表水环境质量标准基本项目标准限值		
Table 1 Standard limits for basic items of environmental quality standards for surface water		
分类	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{TP})(\text{以 P 计})(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$
I 类	≤ 0.015	≤ 0.02 (湖、库 0.01)
II 类	≤ 0.5	≤ 0.1 (湖、库 0.025)
III 类	≤ 1	≤ 0.2 (湖、库 0.05)
IV 类	≤ 1.5	≤ 0.3 (湖、库 0.1)
V 类	≤ 2	≤ 0.4 (湖、库 0.2)

表 2 水稻的耐淹水深和耐淹历时		
Table 2 Water depth and duration of submergence tolerance of rice		
生育期	耐淹水深/cm	耐淹历时/d
返青期	3~5	1~2
分蘖期	6~10	2~3
拔节期	15~25	4~6
孕穗期	20~25	4~6
成熟期	30~35	4~6

4 结 论

- 抽穗开花期淹水处理过程中,不同渗漏强度对稻田 TP、 NH_3 -N 的质量浓度影响不明显,2 种处理变化趋势相一致,地表水和地下水中的 TP、 NH_3 -N 的质量浓度均为先减小后增加。
- 在水稻抽穗开花期淹水过程中,2 种处理的地表水和地下水 NO_3^- -N 质量浓度变化趋势一致,都是先增加,而后逐渐降低,控水结束时处理 1 和处理 2 的地表水 NO_3^- -N 质量浓度比控水开始时分别下降了 59.6% 和 61.2%,处理 2 的地表水 NO_3^- -N 质量浓度始终高于处理 1,但 2 种处理之间差异不显著。
- 在淹水条件下,水稻抽穗开花期的最佳排水时间为淹水后第 4 天,应避免淹水后立即排水。

参考文献:

- [1] 郭相平, 张展羽, 殷国玺. 稻田控制排水对减少氮磷损失的影响[J]. 上海交通大学学报: 农业科学版, 2006, 24(3): 307-310. (GUO Xiang-ping, ZHANG Zhan-yu, YIN Guo-xi. Effect of controlled drainage on loss of nitrogen and phosphorous from paddy field[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University: Agricultural Science, 2006, 24(3): 307-310. (in Chinese))
- [2] 季亚辉, 俞双恩. 水位管理对稻田地表水总磷的影响[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2008, 36(6): 777-780. (JI Ya-hui, YU Shuang-en. Influence of water level management on total phosphorus concentration of surface water in paddy field[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2008, 36(6): 777-780. (in Chinese))
- [3] 孙雪梅, 俞双恩, 邵园园. 淹水条件下渗漏强度对稻田 NO_3^- -N 质量浓度的影响[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2011, 39(1): 109-114. (SUN Xue-mei, YU Shuang-en, SHAO Yuan-yuan. Influence of seepage rate on NO_3^- -N concentration in flooding paddy field[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2011, 39(1): 109-114. (in Chinese))
- [4] 邵园园, 俞双恩, 孙雪梅. 淹水条件下渗漏强度对稻田 TP 浓度的影响[J]. 水资源保护, 2011, 27(3): 24-27. (SHAO Yuan-yuan, YU Shuang-en, SUN Xue-mei. Influence of seepage rate on TP concentration in paddy soil on condition of flooding[J]. Water Resources Protection, 2011, 27(3): 24-27. (in Chinese))
- [5] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 243-281.
- [6] 鲁如坤. 土壤磷素化学研究进展[J]. 土壤学进展, 1990(6): 1-5. (LU Ru-kun. Chemistry research on soil phosphorus[J]. Progress in Soil Science, 1990(6): 1-5. (in Chinese))
- [7] 张志剑, 朱荫湄, 王珂, 等. 水稻田土-水系统中磷素行为及其环境影响研究[J]. 应用生态学报, 2001, 12(2): 229-232. (ZHANG Zhi-jian, ZHU Yin-mei, WANG Ke et al. Phosphorus behavior in soil-water system of paddy field and its environmental impact[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(2): 229-232. (in Chinese))
- [8] NOVAK J M, WATTS D W, HUNT P G et al. Phosphorus movement through a coastal plain soil after a decade[J]. J Environ Qual, 2000, 29: 1310-1315.
- [9] 吴群河, 曾学云, 黄钊. 溶解氧对河流底泥中三氮释放的影响[J]. 环境污染与防治, 2005, 27(1): 21-24, 52. (WU Qun-he, ZENG Xue-yun, HUANG Yue. The effect of DO on nitrogen releasing from sediments of rivers[J]. Environmental Pollution & Control, 2005, 27(1): 21-24, 52. (in Chinese))
- [10] 顾久君, 金朝晖, 刘振英. 乌梁素海沉水植物腐烂分解试验研究[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(4): 181-184. (GU Jiu-jun, JIN Zhao-hui, LIU Zhen-ying. Experimental studies on decomposition process of submerged macrophytes from Wuliangsu Lake[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2008, 22(4): 181-184. (in Chinese))
- [11] 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-Tech University of Agriculture and Forestry: Natural Science Edition, 2006, 34(1): 108-112. (in Chinese))
- [12] GB 3838—2002 地表水环境质量标准[S].
- [13] 史海滨, 田军仓, 刘庆华. 灌溉排水工程学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006: 237-238.