

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2017.01.009

旱涝交替胁迫对稻田地表及地下水总磷的影响

王梅^{1,2},周伟³,高世凯^{1,2},郭蓉^{1,2},俞双恩^{1,2}

(1. 河海大学南方地区高校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. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院,陕西 杨凌 712100)

摘要: 通过蒸渗测坑对水稻拔节孕穗期和抽穗开花期2个重要生育期进行水位调控试验,研究单个生育阶段旱涝交替胁迫及2个生育阶段连续旱涝交替胁迫的稻田地表水、地下水总磷(TP)质量浓度变化。结果表明:旱涝交替胁迫对稻田地表水、地下水TP质量浓度变化影响显著,先旱后涝处理地表水的平均TP质量浓度比先涝后旱处理地表水TP质量浓度高,且P释放量下降速率快;地下水各处理受涝阶段的平均TP质量浓度比受旱阶段高,旱涝急转后TP质量浓度显著增加;与单个生育期进行旱涝交替胁迫处理相比,连续2个生育期进行旱涝交替胁迫处理时抽穗开花期TP质量浓度变化规律相似,但地表水平均TP质量浓度偏低,地下水平均TP质量浓度偏高。

关键词: 稻田水位调控试验;旱涝交替胁迫作用;水稻拔节孕穗期;水稻抽穗开花期;稻田地表水;稻田地下水;TP质量浓度

中国分类号:S274.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2017)01-0063-06

Influence of alternative stress of drought and waterlogging on total phosphorus concentration in surface and subsurface water of paddy field

WANG Mei^{1,2}, ZHOU Wei³, GAO Shikai^{1,2}, GUO Rong^{1,2}, YU Shuang'en^{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. College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China)

Abstract: Through water level control tests in two important growth stages of rice, the jointing-booting and heading-flowering stages, the change of total phosphorus (TP) mass concentration in surface and subsurface water of a paddy field were studied using lysimeters under alternative stresses of drought and waterlogging (ASDW) in individual stages and two consecutive growth stages. The results show that ASDW had a significant influence on the change of TP mass concentrations in surface and subsurface water of a paddy field, the TP mass concentration in surface water with the treatment of waterlogging after drought was much higher than it was with the treatment of drought after waterlogging, and the declining rate of phosphorus release amount was faster. The mean TP mass concentration in the waterlogging phase was higher than in the drought phase with all treatments of subsurface water. The TP mass concentration increased significantly after the abrupt alternation from drought to waterlogging. Compared with that during the individual growth stages with the treatment of ASDW, the change of TP mass concentration in the heading-flowering stage during the two consecutive growth stages with the treatment of ASDW was similar, the mean TP mass concentration in

收稿日期: 2016-03-23

基金项目: 国家自然科学基金(51479063); 中央高校基本科研业务费专项(2015B34614)

作者简介: 王梅(1988—), 女, 云南昭通人, 博士研究生, 主要从事水稻灌排理论与节水灌溉研究。E-mail: 1120422537@qq.com

通信作者: 俞双恩, 教授。E-mail: seyu@hhu.edu.cn

surface water was lower, and the mean TP mass concentration in subsurface water was higher.

Key words: paddy field water level control experiment; drought and waterlogging alternative stress; jointing-booting stage of rice; heading-flowering stage of rice; surface water of paddy field; subsurface water of paddy field; TP mass concentration

水体富营养化已经成为全球关注的问题,磷素是引起水体富营养化重要的主导因子之一^[1]。地表径流是磷素主要的流失途径^[2],已经成为南方地区农业面源污染的主要来源^[3]。近几年的研究表明,农田长期大量施用磷肥,导致耕层磷素大量累积,也会引发较强的淋溶损失^[4]。南方地区水稻生长期与雨季重合,为提高雨水利用效率,减少灌溉排水成本,农民往往利用稻田调蓄雨水,使水稻经受一定的涝渍胁迫;长时间不降雨又不能及时灌溉时水稻会遭受干旱胁迫,因此水稻在大田生长期经常受到旱涝交替胁迫的影响^[5]。季亚辉等^[6]研究表明,水稻随着淹水深度的增加,单位面积释放的 TP 越多。孙亚亚等^[7]研究表明,增加蓄水深度,延迟排水,可以减少土壤磷素损失。黄荣等^[8]研究表明,暴雨前田面保持一定水深可以降低雨滴溅蚀减少土壤磷素损失,田面水层深度与雨后地表水 TP 质量浓度呈负相关关系。Xiao 等^[9]研究表明,水稻淹水初期田面水磷负荷较高,随着淹水时间的增加,呈降低的趋势。邵园园^[10]研究表明:在地下水位相同时,水稻分蘖期、拔节孕穗期地下水 TP 质量浓度随着受旱历时的延长而降低,抽穗开花期则随着受旱历时的延长而增加,乳熟期影响不显著;受旱历时相同时,分蘖期、拔节孕穗期地下水 TP 质量浓度随着地下水位降低而降低,抽穗开花期与乳熟期规律则相反。以往的研究多是针对单一受涝或单一受旱条件下稻田水磷素的浓度变化,特别是受涝条件下的研究较多,但是对旱涝交替胁迫下稻田水磷素变化规律的研究涉及较少。已有研究表明^[11],农田水位不仅能准确反映稻田的水分状况,还能更好地反映田面水层自然消退和旱涝急转时的突变过程。因此,利用农田水位作为控制灌排的调控指标,开展旱涝交替胁迫对稻田水 TP 质量浓度的影响研究,对合理制定稻田水位调控方案,控制灌溉排水标准,最大限度地减少磷素对水体环境的污染具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 试验区基本情况

试验于 2015 年 5—10 月在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宁校区节水园区内进行。节水园区位于北纬 31°86′、东经 118°60′,属亚热带湿润性气候区,年均气温 15.7℃,年均降雨量 1 021.3 mm,年均蒸发量 900 mm,日照时数 2 212.8 h,年均无霜期 237 d。区内设有 32 个固定式蒸渗仪(有底 28 个、无底 4 个),分为 2 组,每组 16 个,每个蒸渗仪的规格为 2.5 m×2 m×2 m(长×宽×高),地下设有廊道和设备间,地上设有移动式雨棚,为了准确控制农田水位,降雨时关闭雨棚。测坑内土壤为黏壤土,0~30 cm 土壤密度 1.46 g/cm³,田间持水率 25.28%,总孔隙度 44.97%,有机质含量(质量分数)2.19%,pH 为 6.97,全氮、速效氮、全磷、速效磷质量比分别为 0.91 g/kg、27.65 mg/kg、0.32 g/kg、12.5 mg/kg。

1.2 试验设计

供试的水稻品种为南梗 9108,5 月 13 日育秧,6 月 16 日移栽。共施肥 3 次,基肥为复合肥(N、P、K 质量比为 15:15:15),分蘖肥与穗肥为尿素(含氮量质量分数 46.4%),施肥量分别为 900 kg/hm²、100 kg/hm²、50 kg/hm²,施肥时间分别为 6 月 13 日、6 月 28 日、8 月 18 日。在拔节孕穗期、抽穗开花期单个生育阶段与拔节孕穗期、抽穗开花期连续 2 个生育阶段进行先旱后涝、先涝后旱 2 种控制灌排试验,试验在有底测坑内进行,每个处理设 3 个重复。先旱后涝处理,控水开始自然耗干田面水层直到地下水埋深达到设定的下限值后立即灌水至淹水上限值,之后不补水,让其自然消退至控制灌排的适宜灌水下限,先涝后旱各处理,控水开始灌水至淹水上限,然后让其自然消退,直到受旱下限,再灌水至该生育期灌水适宜上限,其他时间段按照控制灌溉要求进行水位管理。田面有水层时保持 2 mm/d 的田间渗漏量,田面无水层时渗漏量为 0 mm/d。试验设计方案见表 1。

1.3 水质分析及数据处理

地表水按照取水间隔(淹水第 1 天、第 3 天、第 5 天)在不扰动土壤层情况下,采用 50 mL 医用注射器,随机抽取测坑内中部地表水,注入塑料瓶;地下水按照取水间隔(控水第 1 天、第 3 天、第 5 天、第 6 天、第 8 天、

第 10 天)采集地下排水的尾水,注入塑料瓶。稻田水 TP 质量浓度测定采用过硫酸钾氧化钼锑抗分光光度法,测定仪器为岛津紫外分光光度仪 uv 2800。

利用 Excel 软件对数据进行初步整理,利用 SPSS 13.0 软件进行显著性分析,利用 Origin 8.0 软件对数据进行绘图。

表 1 试验设计方案
Table 1 Test design scheme

处 理	分蘖期			拔节孕穗期			抽穗开花期			乳熟期		
	GX	GS	RY	GX	GS	RY	GX	GS	RY	GX	GS	RY
HL 1	-20	5	15	-50	20		-20	5	15	-20	5	15
HL 2	-20	5	15	-20	5	15	-50	20		-20	5	15
HL 3	-20	5	15	-50	20		-50	20		-20	5	15
LH 1	-20	5	15	-50	20		-20	5	15	-20	5	15
LH 2	-20	5	15	-20	5	15	-50	20		-20	5	15
LH 3	-20	5	15	-50	20		-50	20		-20	5	15

注:HL 指先旱后涝,LH 指先涝后旱;数字正值为田面淹水深度,负值为地下水位距田面的距离;GX 指灌水适宜下限,GS 指灌水适宜上限,RY 指降雨时允许蓄水深度。

2 结果与分析

2.1 单个生育期旱涝交替胁迫 TP 质量浓度变化

2.1.1 地表水 TP 质量浓度变化

拔节孕穗期、抽穗开花期稻田地表水 TP 质量浓度和 P 释放量变化见图 1。控水时间分别为 7 月 29 日至 8 月 7 日、8 月 24 日至 9 月 2 日,2 个生育期先旱后涝处理下的地下水位分别于 8 月 3 日、8 月 20 日达到 -50 cm,此时进行旱涝急转。拔节孕穗期、抽穗开花期各处理的 TP 质量浓度变化趋势相似,淹水第 1 天 TP 质量浓度都较高,这是因为灌水对土壤表层扰动,使颗粒态磷含量增加,随着淹水时间的增加各处理 TP 质量浓度逐渐减小,这与悬浮物的逐渐沉淀以及作物的吸收有关。先旱后涝处理平均 TP 质量浓度较先涝后旱处理高,且淹水第 1 天 HL1 处理 TP 质量浓度较 LH1 处理提高了 44%,HL2 处理 TP 质量浓度较 LH2 处理 TP 质量浓度提高了 61%,这是因为干旱初期好氧微生物快速生长,使磷富集在增长的微生物群落中,进一步干燥时微生物死亡,再次复水时微生物吸收利用的磷被释放出来^[12],这与张志剑等^[13]及 Lauren 等^[14]的研究结论相似。先旱后涝处理 P 释放量^[15]较先涝后旱大,这可能与旱后复水水稻的补偿机制有关。郭相平等^[16]研究表明,旱后复水,水稻根系进一步延伸,数量增加,受旱时消失的浮根复水后加速生长,吸水吸肥能力增加。

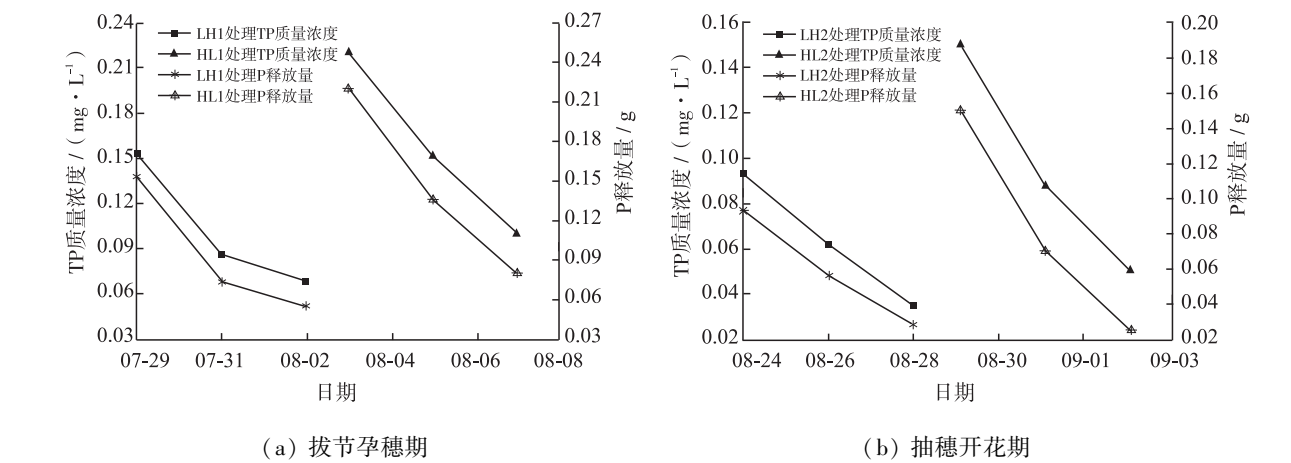


图 1 单个生育期地表水 TP 质量浓度和 P 释放量变化
Fig. 1 Changes of TP mass concentration and phosphorus release amount in surface water during individual growth stages

2.1.2 地下水 TP 浓度变化

拔节孕穗期、抽穗开花期稻田地下水 TP 质量浓度变质量化见图 2。LH1、LH2 处理 TP 浓度整体呈下降趋势,一方面因为水稻处于营养生长和生殖生长旺盛时期,根系分布在土壤下层的比例增加,根系吸收磷素能力提高;另一方面因为淹水后适度旱胁迫可以改善土壤还原状况,减轻还原物质对根系的毒害,促进了根系吸收能力。HL1、HL2 处理受旱阶段 TP 质量浓度变化幅度不大,旱涝急转后 TP 质量浓度增加,在第 3 天达到最大值后浓度降低,这是因为持续性干旱使土壤缝隙变大,复水后在土壤优势水流作用下^[17],顺着土壤缝隙补充地下水,悬浮于水中或溶解到水中的磷不易被土壤吸附,使地下水 TP 质量浓度增大,这也是先旱后涝 TP 平均质量浓度较先涝后旱处理高的原因。LH1、LH2 处理受旱阶段平均 TP 质量浓度分别较 HL1、HL2 受涝阶段平均 TP 质量浓度低 62%、44%,HL1、HL2 处理受旱阶段平均 TP 质量浓度分别较 LH1、LH2 受涝阶段平均 TP 浓度低 38%、26%,一方面因为淹水阶段较高的地上 P 素向下淋溶,另一方面因为持续性淹水使土壤处于厌氧状态,导致土壤氧化还原电位值降低,PH 上升,Fe³⁺被还原为 Fe²⁺,结合态 P 转换为溶解态 P 释放,土壤供磷能力增加^[18]。

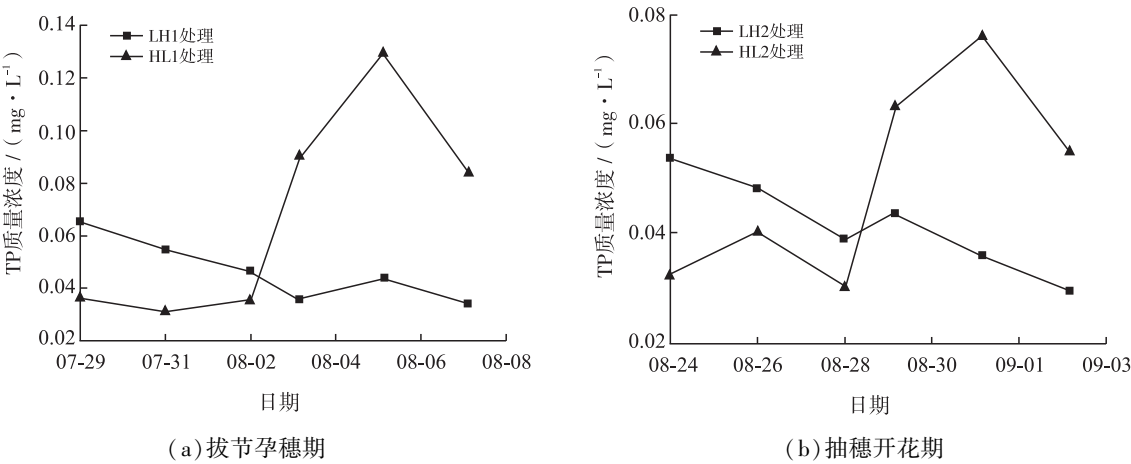


图2 单个生育期地下水 TP 质量浓度变化

Fig. 2 Change of TP mass concentration in subsurface water during individual growth stages

2.2 连续 2 个生育期旱涝交替胁迫稻田地表水、地下水 TP 质量浓度变化

连续 2 个生育期地表水 TP 质量浓度和 P 释放量变化见图 3。拔节孕穗期、抽穗开花期控水时间分别为 7 月 29 日至 8 月 7 日、8 月 24 日至 9 月 2 日,2 个生育期先旱后涝处理下的地下水位分别于 8 月 3 日、8 月 20 日达到-50 cm,此时进行旱涝急转。HL3、LH3 处理抽穗开花期地表水的 TP 质量浓度随着淹水时间的增加逐渐降低,HL3 处理 P 释放量减小速率较 LH3 处理快,淹水第 1 天 TP 质量浓度都很高,HL3 处理较 LH3 处理 TP 质量浓度提高了 45%,这与单个生育期抽穗开花期 TP 质量浓度变化规律相似。HL3、LH3 处理抽穗开花期地表水平均 TP 质量浓度分为 0.044 mg/L、0.037 mg/L,与抽穗开花期单个生育期旱涝交替胁迫处理相比平均 TP 浓度分别降低了 54%、41%,这是因为连续的旱涝交替促使田面逐渐形成一层保护层,灌水对土层的扰动减小,TP 质量浓度减小。

连续 2 个生育期地下水 TP 质量浓度变化见图 4。LH3 处理抽穗开花期 TP 质量浓度呈下降的趋势,HL3 处理受旱阶段 TP 质量浓度下降但波动不大,旱涝急转后 TP 质量浓度增加并在淹水第 3 天达到了最大值,后 TP 质量浓度逐渐下降,HL3、LH3 处理受涝阶段平均 TP 质量浓度较受旱阶段高,这与单个生育期抽穗开花期 TP 质量浓度变化规律相似。HL3、LH3 处理抽穗开花期平均 TP 质量浓度分别为 0.063 mg/L、0.060 mg/L,与单个生育期抽穗开花期旱涝交替胁迫处理下平均 TP 质量浓度相比分别提高了 27%、44%,这是因为连续的旱涝交替可以促进土壤磷素的释放与下渗^[19]。

2.3 旱涝交替胁迫对稻田地表水、地下水 TP 质量浓度影响分析

用 SPSS 软件进行水稻旱涝交替胁迫对拔节孕穗期、抽穗开花期单个生育期与连续 2 个生育期中抽穗开花期稻田地表水、地下水 TP 质量浓度影响显著性分析($P<0.05$),结果表明,先旱后涝处理、先涝后旱处理对拔节孕穗期、抽穗开花期单个生育期,以及连续 2 个生育期中抽穗开花期稻田地表水、地下水 TP 质量浓度变

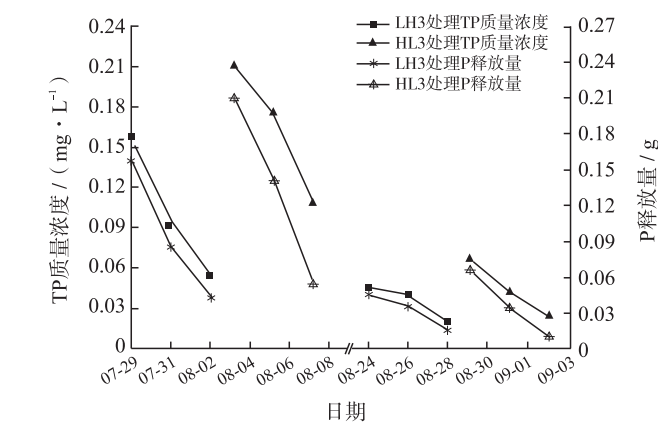


图 3 连续 2 个生育期地表水 TP 质量浓度和 P 释放量变化

Fig. 3 Changes of TP mass concentration and phosphorus release amount in surface water during two consecutive growth stages

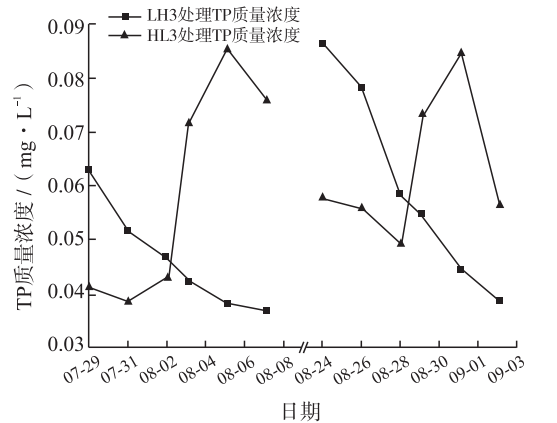


图 4 连续 2 个生育期地下水 TP 质量浓度变化

Fig. 4 Change of TP mass concentration in subsurface water during two consecutive growth stages

化影响显著。稻区农田水体总磷易诱发水体富营养化的临界值为 0.035 ~ 0.100 mg/L^[20],由表 2 可知各处理均存在诱发水体富营养化的危险,特别要注意的是旱后复水的水体排放。

表 2 旱涝交替胁迫下稻田地表水、地下水平均 TP 质量浓度

Table 2 Mean mass concentrations of TP in surface and subsurface water in paddy field under alternative stresses of drought and waterlogging

mg/L

拔节孕穗期				抽穗开花期			
处理	地表水 ρ(TP)	地下水 ρ(TP)		处理	地表水 ρ(TP)	地下水 ρ(TP)	
		H	L			H	L
HL1	0.157	0.034	0.101	HL2	0.096	0.034	0.064
LH1	0.103	0.038	0.055	LH2	0.063	0.036	0.046
HL3	0.165	0.041	0.078	HL3	0.045	0.058	0.071
LH3	0.102	0.039	0.054	LH3	0.037	0.045	0.055

注:H 指控水受旱阶段,L 指控水受涝阶段。

3 结 论

- a. 单个生育期旱涝交替胁迫各处理地表水 TP 浓度淹水第 1 天较高,先旱后涝处理平均 TP 质量浓度较先涝后旱处理高,且淹水第 1 天 HL1 处理 TP 质量浓度较 LH1 处理提高 44%,HL2 处理 TP 质量浓度较 LH2 处理 TP 质量浓度提高了 61%,因此宜尽量避免淹水初期地表的排水,特别是旱后淹水的即时排放。
- b. 单个生育期旱涝交替胁迫各处理地下水平均 TP 质量浓度受涝阶段较受旱阶段高,旱涝急转后地下水 TP 质量浓度显著增加,在第 3 天达到最大值。旱涝交替胁迫各处理均存在诱发水体富营养化的危险,特别是旱涝急转后 TP 质量浓度最高,需采取合理控制排水措施,避免面源污染的发生。
- c. 与单个生育期进行旱涝交替胁迫处理相比,连续 2 个生育期进行旱涝交替胁迫处理时抽穗开花期 TP 质量浓度变化规律相似,但地表水平均 TP 质量浓度偏低,地下水平均 TP 质量浓度偏高。

参考文献:

[1] 高超,张桃林. 农业非点源磷污染对水体富营养化的影响及对策[J]. 湖泊科学,1999,11(4):319-375. (GAO Chao, ZHANG Taolin. Contribution of agricultural phosphorus losses to eutrophication of waters and its controlling strategies [J]. Journal of Lake Sciences,1999,11(4):319-375. (in Chinese))

[2] 李学平,孙燕,石孝均. 紫色土稻田磷素淋失特征及其对地下水的影响[J]. 环境科学学报,2008,28(9):1832-1838. (LI Xueping,SUN Yan,SHI Xiaojun. Characteristics of phosphorus leaching and its impact on groundwater in purple paddy soil [J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2008,28(9):1832-1838. (in Chinese))

- [3] 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 Xiangping,ZHANG Zhanyu,YIN Guoxi. Effect of controlled drainage on loss of nitrogen and phosphorus from paddy field [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Agricultural Science),2006,24(3):307-310. (in Chinese))
- [4] 连彦峰,刘树庆. 农田土壤中磷素流失与水体富营养化[J]. 河北农业科学,2008,2(7):91-93. (LIAN Yanfeng, LIU Shuqing. Phosphorus losses from agricultural lands and water eutrophication [J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences,2008,2(7):91-93. (in Chinese))
- [5] 郭相平,甄博,陆红飞. 水稻旱涝交替胁迫叠加效应研究进展[J]. 水利水电科技进展,2013,33(2):83-86. (GUO Xiangping,ZHEN Bo,LU Hongfei. Research advances in pile-up effects of drought and waterlogging alternative stress on rice [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2013,33(2):83-86. (in Chinese))
- [6] 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 Yahui, YU Shuang'en. Influence of water level management on total phosphorus concentration of surface water in paddy fields [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2008,36(6):777-780. (in Chinese))
- [7] 孙亚亚,俞双恩,陈军,等. 暴雨条件下不同灌排模式稻田排水中氮磷变化规律[J]. 河海大学学报(自然科学版),2014,42(5):455-459. (SUNYaya, YU Shuang'en,CHEN Jun,et al. Changes of nitrogen and phosphorus concentrations in surface drainage from paddy field under different irrigation and drainage modes [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2014,42(5):455-459. (in Chinese))
- [8] 黄荣,俞双恩,肖梦华,等. 分蘖期稻田不同水层深度下暴雨后地表水 TP 的变化[J]. 节水灌溉,2011(11):41-43. (HUANG Rong,YU Shuang'en,XIAO Menghua,et al. Study on variation rules of total phosphorus under different water depth in one rainstorm event at tillering stage in paddy fields [J]. Water Saving Irrigation,2011(11):41-43. (in Chinese))
- [9] XIAO Menghua,YU Shuang'en,WANG Yanyan,et al. Nitrogen and phosphorus changes and optimal drainage time of flooded paddy field based on environmental factors [J]. Water Science and Engineering,2013,6(2):164-177.
- [10] 邵园园. 农田水位调控对稻田磷素的影响[D]. 南京:河海大学,2010.
- [11] 俞双恩,邢文刚,邵光成,等. 以农田水位作为水稻灌排指标的研究进展[J]. 灌溉排水学报,2010,29(2):134-136. (YU Shuang'en,XING Wengang,SHAO Guangcheng,et al. Research advance on irrigation-drainage for rice by using field water level as regulation index [J]. Journal of Irrigation and Drainage,2010,29(2):134-136. (in Chinese))
- [12] THANH-NGUYEN B,MARSCHNER P. Effect of drying and rewetting on phosphorus transformation in red brown soils with different soil organic matter content [J]. Soil Biology and Biochemistry,2005,37(8):1573-1576.
- [13] 张志剑,王光火,王柯,等. 模拟水田的土壤磷素溶解特征及其流失机制[J]. 土壤学报,2001,38(1):139-143. (ZHANG Zhijian,WANG Guanghuo,WANG Ke,et al. Phosphorus dissolubility and its loss mechanism of the simulated paddy soils [J]. Acta Pedologica Sinica,2001,38(1):139-143. (in Chinese))
- [14] LAUREN E,KINSMAN C,JONATHAN O'B,et al. HAMILTON,et al. Re-flooding a historically drained wetland leads to rapid sediment phosphorus release [J]. Ecosystems,2014,17(4):641-656.
- [15] 俞双恩. 以农田水位为调控指标的水稻田间灌排理论研究[D]. 南京:河海大学,2008.
- [16] 郭相平,张烈君,王为木,等. 作物水分胁迫补偿效应研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版),2005,33(6):634-637. (GUO Xiangping,ZHANG Liejun,WANG Weimu,et al. Advances in compensatory effects response to water stress [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2005,33(6):634-637. (in Chinese))
- [17] SANDER T,GERKE H H. Preferential flow patterns in paddy fields using a dye tracer [J]. Vadose Zone Journal,2007,6(1):105-115.
- [18] 程希雷. 农田排水中氮磷迁移转化规律研究进展[J]. 绿色科技进展,2015(5):193-196. (CHENG Xilei. Research progress of migration and transformation of nitrogen and phosphorus in farmland [J]. Journal of Green Science and Technology,2015(5):193-196. (in Chinese))
- [19] IRIS M S,STEFAN P,THOMAS H. Impact of drying and re-flooding of sediment on phosphorus dynamics of river floodplain systems[J]. Science of the Total Environment,2012,432:329-337.
- [20] HECKRATH G,BROOKES P C,POULTON P R,et al. Phosphorus leaching from soils containing different phosphorus concentration in the broad balk experiment[J]. Environment Quality,1995,24:904-910.