

DOI :10.3969/j.issn.1004-6933.2011.03.006

淹水条件下渗漏强度对稻田 TP 浓度的影响

邵园园^{1,2},俞双恩^{1,3},孙雪梅^{1,3}

(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.江苏省秦淮河水利工程管理处,江苏 南京 210001;3.河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098)

摘要 通过蒸渗测坑进行淹水稻田不同渗漏强度控制试验,研究水稻各生育阶段中不同渗漏强度下地表水及地下水 TP 浓度变化。结果表明,稻田灌水扰动田表土壤颗粒,加速了土壤磷的释放,是淹水过程中地表水 TP 浓度升高的主要原因,尤其在田表面没有形成板结层之前,灌水或降雨会使土壤磷颗粒大量析出,淹水 3—5 d 后,由于沉淀作用,地表水 TP 浓度明显降低,渗漏强度对淹水前期稻田地表水 TP 浓度影响较为显著,对地下水 TP 浓度影响不显著。

关键词 水稻;渗漏强度;TP 浓度;显著性

中图分类号 S143.2 S274.3 文献标识码:A 文章编号:1004-6933(2011)03-0024-04

Influence of seepage rate on TP concentration in paddy soil on condition of flooding

SHAO Yuan-yuan^{1,2}, YU Shuang-en^{1,2}, SUN Xue-mei^{1,2}

(1. Key Laboratory of Efficient Irrigation-Drainage and Agricultural Soil-Water Environment in Southern China, Ministry of Education, Nanjing 210098, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Through the controlled experiment on seepage rate of the inundated rice paddy by the use of lysimeters, the changes of total phosphorus (TP) concentration of the surface and underground water caused by different seepage rate were studied at various growth stages. The results showed that the main reason of the rising of TP concentration in surface water during irrigation was the disturbance of the topsoil caused by irrigation accelerating the release of soil phosphorus. Especially before the compaction layer was formed on the surface of the rice field, a large number of soil phosphorus particles would be separated out by irrigation or rainfall. Due to precipitation, the TP concentration of the surface water was decreased apparently after 3-5 days inundation. The seepage rate had a significant influence on the TP concentration of surface water at earlier inundating stage, but no significant influence on that of underground water.

Key words: paddy rice; seepage rate; TP concentration; significance

随着化肥农药的大量施用,农田排水使农田特征污染物进入水体,导致水体富营养化程度加剧。磷是水体富营养化的主要限制因子^[1],在非点源污染中,来自农田系统的磷高达 24.7%^[2],农田排水造成的磷损失已成为南方地区农业面源污染的主要来源^[3]。因此,开展淹水条件下不同渗漏强度对地表水、地下水 TP 浓度的影响研究,对合理制定稻田

水位调控方案,最大限度地减少磷素对水体环境的污染具有重要意义。

1 试验材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2008 年 5 月至 10 月在河海大学节水园区节水与农业生态试验场内进行。该试验场共有

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:邵园园(1986—),女,江苏泰州人,硕士研究生,研究方向为水资源规划与环境保护。E-mail:shaoyy820@163.com
通讯作者:俞双恩(1961—),教授。E-mail:seyu@hhu.edu.cn

32 个固定式蒸渗测坑(有底 28 个,无底 4 个),每个蒸渗测坑的规格为 2.5 m×2 m×2 m(长×宽×高)。地面设有移动式雨棚,地下设有廊道及设备间,每个有底的蒸渗测坑都与地下设备间内对应的水柱连通,可以实现地下水位自动控制。在每个测坑中部埋设地下水观测井,观测井由一根直径为 4 cm,长 2.0 m 的 PVC 管制成,在下端 1.5 m 长度内用电钻打间隔约 3 cm、均匀交错分布的小孔,然后用土工布包裹,埋入测坑中已用土钻钻好的孔内,管口距地面约 25 cm,高出测坑上沿 3~5 cm。从地表向下 20 cm 内 PVC 管外壁与土壤紧密接触,防止地表水沿外壁下渗。

蒸渗测坑内土壤为黏壤土,由当地土 2002 年分层回填压实。0~30 cm 土壤肥力均匀,田间持水率为 25.28%,总孔隙度为 44.97%,pH 值为 7.78,土壤有机质质量分数 2.40%,全氮质量比 0.90 g/kg,全磷质量比 0.32 g/kg,速效磷质量比 12.50 mg/kg。

1.2 试验设计及试验方法

1.2.1 试验方案设计

试验种植的水稻品种为镇稻 99,5 月 4 日泡种,5 月 6 日育秧,6 月 26 日移栽,10 月 7 日收割。试验期间共施肥两次,基肥(复合肥)在移栽前一天施入水中,每个蒸渗测坑施入 600 g,其中 N、P₂O₅、K₂O 所占比例分别为 15%、15%、15%;分蘖肥(尿素)于 7 月 10 日施入,每个蒸渗测坑施入 65 g。

试验在蒸渗测坑内进行,分别在水稻分蘖期、拔节孕穗期、抽穗开花期和乳熟期 4 个生育阶段进行淹水及不同渗漏强度控制试验(表 1)。灌溉水源为试验场内的地下水,控水结束后将水层降至适宜水层上限。每个方案安排 2 个测坑试验。

1.2.2 水位控制、采样及测定方法

淹水试验中,每天上午 8:00 观测农田水位深度,若观测值低于设计淹水深度,则计算所需灌水量,由电磁阀自动灌溉系统进行灌溉,使不同方案间的水位深度保持一致。在量测水位前,先标定各测坑的地下水观测井的管口到地表的高度,测定时用钢尺测量管口到地下水面的距离,该距离减去相应的管口高度即为该测坑的地下水深度。由于试验是在封闭的测坑中进行,为了更好地模拟田间环境,各方案按设定的渗漏强度控制,通过测坑面积与渗漏强度的乘积来计算排水量,并由蒸渗测坑底部的排水管进行控制排水。

在水稻各生育阶段控水期间,每隔 1 天采集 1 次稻田地表及地下水样,控水前、后各加测 1 次。取地表水水样时,用 50 mL 医用注射器,随机抽取蒸渗测坑内 4 处表层水样,注入塑料瓶;取地下水样时,从地下廊道排出的渗漏水中采集水样,注入塑料瓶。

水样取后 24 h 内在实验室进行水质分析,水样中 TP 浓度采用过硫酸钾消解法、钼锑抗分光光度法测定^[4],测定仪器为岛津紫外分光光度仪 UV2800。

表 1 淹水条件下不同渗漏强度方案

生育期	方案号	淹水深度/ mm	渗漏强度/ (mm·d ⁻¹)	控水日期
分蘖期 (7 月 7 日—8 月 4 日)	方案 1	120	2	7 月 15 日—
	方案 2	120	4	7 月 24 日
拔节孕穗期 (8 月 5 日—8 月 18 日)	方案 3	250	2	8 月 6 日—
	方案 4	250	4	8 月 15 日
抽穗开花期 (8 月 19 日—9 月 2 日)	方案 5	250	2	8 月 21 日—
	方案 6	250	4	8 月 30 日
乳熟期 (9 月 3 日—9 月 21 日)	方案 7	250	2	9 月 6 日—
	方案 8	250	4	9 月 15 日

2 试验结果分析

2.1 各生育阶段地表水 TP 浓度的变化

分蘖期地表水 TP 浓度变化见图 1。随着控水利时的延长,TP 浓度先上升后下降,在控水后期又有所回升。7 月 15 日灌水至设计淹水深度,因灌水对田面土壤的扰动,引起土壤颗粒悬浮于水中^[5],同时淹水使土壤氧化还原电位降低,与磷酸根离子结合的高价铁被还原为低价铁,磷酸亚铁的溶解度较高,增加了磷的有效性,因此方案 1、2 的地表水 TP 浓度均有所上升,在控水 3 d 后,方案 1 和方案 2 的 TP 浓度达到一个峰值。控水中期,田表水层稳定,被扰动程度较小,悬浮于水中的泥颗粒逐渐沉入田表,地表水 TP 浓度持续下降。控水后期,田表水位有所降低,为满足设计淹水深度要求,需要进行补水,因而扰动了水层,使一部分附着在土壤表层的磷释放地表水中^[6],导致地表水 TP 浓度回升。在整个淹水过程中,方案 2 的地表水 TP 浓度均大于方案 1,造成这种现象的原因是,地表水进入土壤强度较大,将土壤中的气体强行排出,而带出更多的土壤颗粒,使 TP 浓度提高。

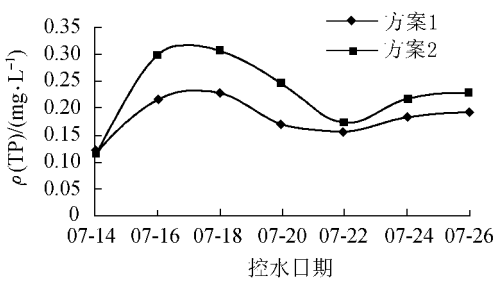


图 1 分蘖期地表水总磷质量浓度

拔节孕穗期淹水期间,方案 3、4 的地表水 TP 浓度变化见图 2,其变化趋势是先上升后下降。控水前稻田表面没有水层,8 月 6 日灌水至设计淹水深度,虽然分蘖后期晒田使田表土壤板结,但灌水仍会

扰动田表土壤,颗粒态磷悬浮于水中,同时由晒田到灌水的过程,使土壤与水层之间形成了一个干湿交替的环境,这种环境有利于促使难溶性磷转化为可利用态磷^[7-8],引起地表水 TP 浓度上升。控水 3 d 后,TP 浓度达到峰值,控水中后期,地表水层基本处于静止状态,悬浮的颗粒逐渐下沉,加之拔节孕穗期是营养生长和生殖生长同时进行的时期,水稻生长发育旺盛,对水分、养分的吸收都进入最高峰,穗分化需要充足的养分,对磷的吸收明显增多,所以地表水 TP 浓度迅速降低。在整个淹水过程中,方案 4 的地表水 TP 浓度大于方案 3,造成这种现象的原因与分蘖期相似,主要是地表水进入土壤强度大,将土壤中的微小颗粒交换出来,使 TP 浓度偏高。

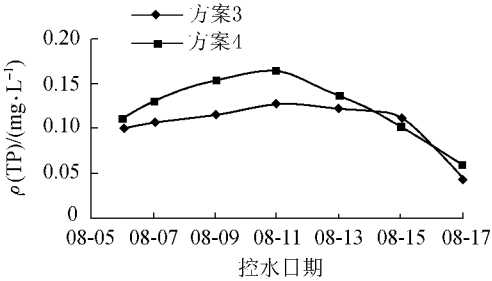


图 2 拔节孕穗期地表水总磷质量浓度

抽穗开花期淹水期间地表水 TP 浓度变化见图 3,其变化趋势也是先上升后下降。8 月 21 日,根据控水水位要求,灌水至田面水层为 250 mm,虽然该阶段田表土层更加板结,加之水稻植株茂盛,灌水对土壤的扰动相对较小,但仍然会使土壤表面微小颗粒悬浮于水中,使地表水 TP 浓度有所增加,控水 2—3 d 后浓度达到峰值,只是浓度相对较低。控水中后期,地表水层基本处于静止状态,悬浮的颗粒逐渐下沉,地表水 TP 浓度逐渐降低并趋于稳定。在整个淹水过程中,方案 6 的地表水 TP 浓度大于方案 5,造成这种现象的原因与前两个生育阶段相似。

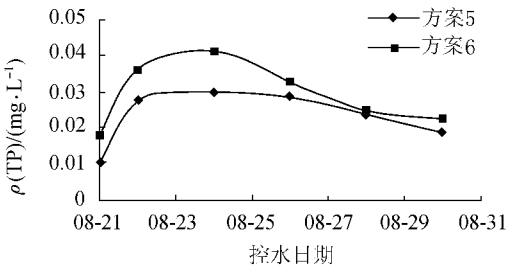


图 3 抽穗开花期地表水总磷质量浓度

乳熟期淹水期间地表水 TP 浓度变化见图 4,其变化趋势是先下降后略有上升。灌水前,方案 7、8 的地表水浓度均在 0.05 mg/L 左右,灌水后由于水层增加使得测坑内地表水量增加,稀释了原地表水 TP 浓度,虽然灌水过程中扰动土壤有部分磷析出,但析出数量还不足以使地表水 TP 浓度超过灌水前

的浓度。随着地表水的逐渐平静,颗粒态磷逐渐下沉,TP 浓度逐渐下降并趋于稳定,到控水后期略有回升,是由于地表水消耗所导致。

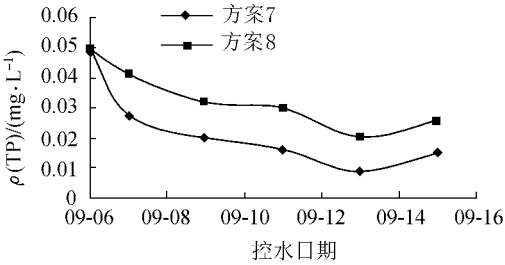


图 4 乳熟期地表水总磷质量浓度

2.2 各生育阶段地下水 TP 浓度的变化

分蘖期地下水 TP 浓度变化见图 5。随着控水利时的延长,地下水 TP 浓度呈现先下降后增加的趋势。控水初期,部分磷素与土壤中的 Al、Fe、Ca 等元素形成沉淀物,导致向下淋失的磷素较少,当增大渗漏量时,由于起到稀释的效果,地下水 TP 浓度开始时略微有所下降。控水中后期地下水 TP 浓度有所增加,这是由于在淹水条件下,土壤中有有机阴离子代替了部分被吸附的磷,土壤的固磷能力下降,从而使与之相结合的磷被释放出来,不断向下淋失。由于方案 2 的日渗漏强度较大,促使磷素在垂直剖面的迁移,向下淋失的磷素多于方案 1,所以方案 2 的地下水 TP 浓度偏高。

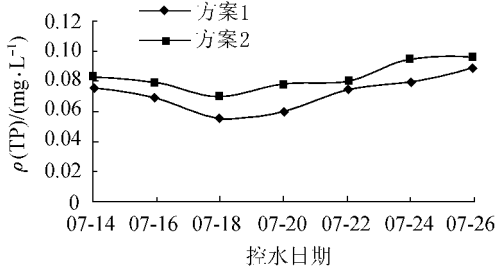


图 5 分蘖期地下水总磷质量浓度

拔节孕穗期地下水 TP 浓度变化见图 6。淹水前由于稻田处于烤田状态,表面土层出现了一些收缩缝,灌水后稻田表面水层较深,地表水顺着裂缝直接补充地下水,悬浮于水中或溶解在水中的磷不易被剖面土壤吸附,直接被纵向输入到地下水中^[9],导致地下水 TP 浓度持续增加。控水中后期,稻田表面

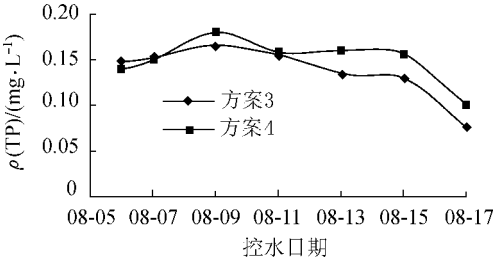


图 6 拔节孕穗期地下水总磷质量浓度

的裂缝已经消失,磷素向下迁移量有所减少,加之作物对磷的吸收增加,地下水 TP 浓度迅速降低。由于方案 4 的日渗漏强度大,其下渗过程中夹带土壤颗粒的能力大,增加了溶解态磷随水流向下运移的几率^[10],所以方案 4 的地下水 TP 浓度始终高于方案 3。

抽穗开花期地下水 TP 浓度变化见图 7。在控水开始时地下水 TP 浓度出现短暂上升,是由于设计的渗漏强度超过以前强度,突然增大的渗漏量会带走土壤中更多的磷颗粒。随着控水历时的延长和渗漏量的稳定以及作物根系对磷素的充分吸收,地下水 TP 浓度逐渐下降并趋于稳定。由于方案 6 日渗漏强度较大,向下淋失的磷素量较多,导致方案 6 的地下水 TP 浓度略高于方案 5。

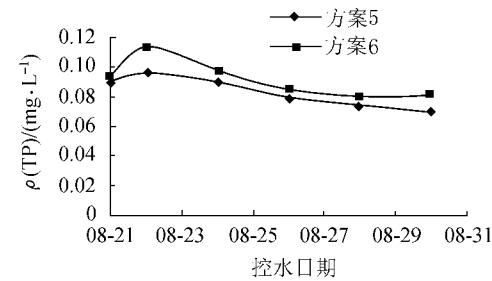


图 7 抽穗开花期地下水总磷质量浓度

乳熟期地下水 TP 浓度变化见图 8。整个乳熟期控水期间,地下水 TP 浓度变化趋势较为平缓。这是由于在水稻生长末期长势已经基本稳定,对磷素吸收量减少的同时,磷素向下迁移量已基本稳定,所以,乳熟期地下水 TP 浓度变化比较平稳。

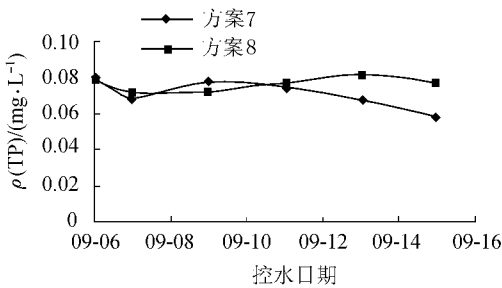


图 8 乳熟期地下水总磷质量浓度

2.3 渗漏强度对 TP 浓度影响分析

水稻各生育阶段地表水 TP 浓度(控水期间 TP 浓度平均值)是分蘖期大于拔节孕穗期大于乳熟期大于抽穗开花期,由于分蘖期田间水层深度较浅,地表水总磷浓度偏高,随着作物吸收的影响,其余生育阶段地表水 TP 浓度均低于分蘖期;地下水 TP 浓度(控水期间 TP 浓度平均值)是拔节孕穗期大于抽穗开花期大于分蘖期大于乳熟期,由于拔节孕穗期控水前的烤田状态使部分磷直接输入地下水,导致拔节孕穗期地下水 TP 浓度偏高,抽穗开花期地下水 TP 浓度略高于分蘖期,两者差别不大;各生育阶段

渗漏强度为 4 mm/d 的方案,其地表水、地下水 TP 浓度均不同程度地高于渗漏强度为 2 mm/d 的方案。

运用 SPSS 软件进行渗漏强度对 TP 浓度影响的单因素方差分析,分析结果见表 2。由于地表水 TP 浓度变化幅度较大,将地表水 TP 浓度分为控水前 5 d、控水后 5 d、控水全期(10 d)3 种情况进行分析,分析结果显示,控水前 5 d,各生育阶段渗漏强度对地表水 TP 浓度影响的显著性水平均小于 0.05,达到显著水平;控水后 5 d,除乳熟期外,其他各生育阶段渗漏强度对地表水 TP 浓度影响的显著性水平均大于 0.05,未达到显著水平;控水全期,分蘖期和乳熟期渗漏强度对地表水 TP 浓度影响的显著性水平小于 0.05,达显著水平,其他生育阶段未达到显著水平;各生育阶段渗漏强度对地下水 TP 浓度影响的显著性水平均大于 0.05,未达到显著水平。

由此可以说明,不同渗漏强度对地表水 TP 浓度的影响较为显著,尤其是对控水前 5 d 的地表水 TP 浓度影响较大,而由于磷素在土壤中移动速度很慢,向下淋失量较小^[11],不同渗漏强度对地下水 TP 浓度没有显著的影响。

表 2 不同渗漏强度对地表水、地下水 TP 浓度影响的显著性水平

水稻生育期	方案号	地表水显著性水平			地下水显著性水平
		控水(1—5)d	控水(5—10)d	控水(1—10)d	控水(1—10)d
分蘖期	方案 1	0.041	0.243	0.049	0.114
	方案 2				
拔节孕穗期	方案 3	0.048	0.852	0.350	0.404
	方案 4				
抽穗开花期	方案 5	0.035	0.515	0.183	0.263
	方案 6				
乳熟期	方案 7	0.046	0.030	0.027	0.128
	方案 8				

3 结 论

a. 稻田灌水扰动田表土层,加速了土壤磷的释放,是地表水 TP 浓度升高的主要原因,尤其是在田表面没有形成板结层之前,灌水或降雨会使土壤磷颗粒大量析出。

b. 淹水 3—5 d 后,由于沉淀作用使地表水 TP 浓度明显降低,因此在淹水不深的情况下,应尽量延迟地表排水时间,减少 P 的流失。

c. 不同渗漏强度对淹水前期稻田地表水 TP 浓度影响较为显著,对地下水 TP 浓度影响不显著。

d. 分蘖期和拔节孕穗期在淹水前期地表水 TP 浓度较大,地下水 TP 浓度较低;抽穗开花期和乳熟期地表水 TP 浓度较低,地下水 TP 浓度较高。因此,控制磷污染的水稻控制排水策略应是(下转第 57 页)

破 $\alpha = 0.05$ 置信水平 ,呈现出显著性减少趋势。这也从一个侧面印证了“近百年来 ,中国气温增暖的突变点在 1987 年 ,从 1987 年我国才开始出现明显增暖突变(全球突变点是 1979 年)”这一结论^[8]。

c. 5a 径流量滑动平均与累积距平曲线均反映出一定的周期性变化规律 ,周期约为 9 ~ 14 a ,而其他资料的研究表明 ,海河流域径流周期约为 35 a (18 a 枯 ,17 a 丰)^[4] ,因本次资料序列较短 ,未能进行更深研究。

河川径流的变化可以反映出气候变化 ,但是同时也受到其他诸如地理位置、流域面积大小、植被情况、人类活动等因素影响 ,关系比较复杂 ,仅通过有限、局域、短期、单一的指标对整个流域长期的规律进行研究 ,并不能作出较大区域乃至全球性气候变化的结论。海河流域作为我国水资源对气候变化最为脆弱的流域之首^[9] ,有必要采用更多的资料对整个流域的水文特征作进一步研究。

参考文献 :

[1] 何俊仕 ,林洪孝.水资源规划及利用[M].北京 :中国水利

水电出版社 2008 :1-2.

[2] 范世平 ,徐明 ,周喜.山西桑干河水资源管理及可持续利用研究[J].水利经济 2007 25(4) :58-61.
[3] 王林旺.山西省暴雨成因及时空分布研究[J].中国水利 2003(12) :34-36.
[4] 胡方荣 ,侯宇光.水文学原理[M].北京 :水利电力出版社 ,1988 :129-131.
[5] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京 :气象出版社 2007 :69-73.
[6] 于延胜 ,陈兴伟.水文序列变异的差积曲线-秩检验联合识别法在闽江流域的应用[J].资源科学 2009 ,31(10) :1717-1721.
[7] 常柏林 ,李效羽 ,卢静芳 ,等.概率与数理统计[M].2 版.北京 :高等教育出版社 2007 :116-118.
[8] 尤卫红 ,段旭 ,邓自旺 ,等.全球、中国及云南近百年气温变化的层次结构和突变特征[J].热带气象学报 ,1998 ,14(2) :173-180.
[9] 中国国家发展改革委员会.中国应对气候变化国家方案[M].北京 :科学技术出版社 2007 :18.

(收稿日期 2010-05-28 编辑 徐 娟)

(上接第 27 页)分蘖期和拔节孕穗期在淹水初期应尽量避免地表排水 ,抽穗开花期和乳熟期则应尽量避免地下排水。

e. 本试验是在有底测坑内进行的 ,不同强度的渗漏量都能实现 ,但是在大田条件下 ,由于犁底层的存在 ,往往较大的渗漏量很难实现 ,在生产实践中可以通过降低农沟水位或划破犁底层的办法增加稻田渗漏量。

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) :369-375.
[2] 马永生 ,张淑英 ,邓兰萍.氮、磷在农田沟渠湿地系统中的迁移转化机理及其模型研究进展[J].甘肃科技 2005 ,21(2) :114-115.
[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.
[4] 国家环境保护总局.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 :243-248.
[5] 章二子.蓄水控灌模式下稻田磷素流失规律研究[D].南京 :河海大学 2009.
[6] 季亚辉 ,俞双恩.水位管理对稻田地表水 TP 的影响[J].河海大学学报 :自然科学版 2008 ,36(6) :777-780.
[7] 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.

[8] SANYAL S K ,DE DATA S K. Chemistry of phosphorus transformations in soil[J]. Advances in Soil Science ,1991 ,16 :1-118.
[9] SHAIPILEY H L A ,CHUREK W. A conceptual approach for integrating phosphorus and nitrogen management at watershed scales[J]. J Environ Qual 2000 29 :158-166.
[10] MOZAFFARI M ,SIMS J T. Phosphorus availability and sorption in an Atlantic coastal plain watershed dominated by animal-based agriculture[J]. Soil Science ,1994 ,157(2) :97-107.
[11] 罗良国 ,闻大中 ,沈善敏.北方稻田生态系统养分渗漏规律研究[J].中国农业科学 2000 33(2) :68-74.

(收稿日期 2010-04-01 编辑 高渭文)

