

淹水土壤土-水界面磷素迁移转化研究

田娟, 刘凌, 丁海山, 陈涛

(河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098)

摘要:通过室内 PVC 土槽实验,模拟了淹水条件下土壤上覆淹水和孔隙水中磷的释放及其影响因素 Eh 值、pH 值、 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 和溶解有机质(DOC),以及土壤中无机磷组分的转化,并通过偏最小二乘主成分分析法分析影响磷迁移转化的因素,得到主要影响因子.实验结果表明,54 d 淹水期间,上覆淹水可溶性磷浓度大于孔隙水的磷浓度,前者累积释磷量是后者的 16 倍;土壤磷的释放主要以 Fe-P、O-P 和 Al-P 为主,Ca-P 基本不变,其中以 Fe-P 的贡献最大,淹水期间比初始值减少了 30.4%~72%;主成分分析表明,Eh 值、 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 和 DOC 是影响上覆淹水磷释放的主要因子,DOC 络合 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 成水溶性三元复合体,释磷机制以络合增溶为主;DOC 是影响土壤孔隙水磷释放主要因子,释磷机制以竞争吸附为主,高浓度铁离子的存在阻止了孔隙水中磷释放.

关键词:淹水土壤;土-水界面;磷释放;迁移转化

中图分类号:X53 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2008)07-1818-06

Mobilization and Transformation of Phosphorus from Water-Soil Interface of Flooded Soil

TIAN Juan, LIU Ling, DING Hai-shan, CHEN Tao

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Mobilization and transformation of phosphorus from water-soil interface of flooded agricultural soils is a concern, and it has been a leading cause of eutrophication of lakes and rivers. Using PVC soil trough, we modeled the mobilization and transformation of P, ferrous iron, ferric iron, dissolved organic carbon(DOC) between soil floodwater and porewater induced by flooding, and characterized the main factors that contributed to phosphorus release by using the principal component-partial least squares method. This study shows that flooding soils induced significant release of phosphate to the floodwater over a 54-d period. Cumulative phosphate content in floodwater was 16 times as much as in porewater. The changes that occurred among the inorganic P forms during flooding were also investigated. Significant changes in the inorganic P fractions Fe-P, Al-P, Ca-P, and O-P occurred in soil during flooding. Typically, the Ca-P fraction was almost unchanged during flooding. The others decreased, and Fe-P contents during flooding decreased by 30.4%-72% of its initial value, which significantly contributed to the release of phosphate to floodwater and porewater. The major factors that affected the floodwater phosphate release were Eh, ferrous iron, ferric iron, and dissolved organic carbon (DOC). The factor that affected the porewater phosphate release was DOC. The predominant mechanism of DOC induced floodwater P release was ligand-enhanced dissolution, and that induced porewater P release was competitive sorption. Furthermore, ferric iron in porewater affected the porewater P release.

Key words: flooded soil; water-soil interface; phosphorus release; mobilization and transformation

磷素在土壤中的环境行为是国内外环境科学与农业科学的研究热点^[1~3],尤其在土壤-水环境中的迁移转化是影响其行为的重要因素^[4].这些过程除了与土壤本身物理化学性质有关外,还与淹水的环境变化有关.淹水导致土壤磷在土-水环境中发生变化^[5,6].洪水来临时,土壤被淹没,土-水体系呈还原状态,磷释放,随着淹水时间的增长,上覆水中的磷浓度足够高时,磷可能重新被土壤吸附;而当洪水慢慢退却时,变化的环境因素可能又会引起土-水系统磷相互释放或吸附.目前,水淹没条件下土-水界面磷素迁移转化机制研究的还不是很深入;土壤释放或吸附磷随淹水条件变动,二者之间的响应机制还缺乏研究.本实验用 PVC 土槽模拟淹水土壤磷释放,以及淹水期间土壤无机磷组分的变化,研究淹水

土壤磷素在水-土界面的迁移转化,旨在加深对淹水条件下土壤磷素释放机制的认识,为磷引起的富营养化治理提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 供试土壤和淹水水样

2006-11-30 在金坛取水稻土,取表层土 0~15 cm,多点采样混匀,用湿土填供试土槽.土深 20 cm,淹没水深 20 cm(蒸馏水).放在地下室培养,温度 12~16℃,水淹没持续时间 54 d.土壤基本理化性质见表 1.

收稿日期:2007-07-14;修订日期:2007-10-09

基金项目:国家自然科学基金项目(50579016)

作者简介:田娟(1980~),女,博士研究生,主要研究方向为生态水利、非点源污染以及土壤磷释放与迁移等, E-mail: tianjuan980106@126.com

表 1 土壤基本理化性质

Table 1 Selected characteristics of the soil sample

pH/CaCl ₂	总 P/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	有机质/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	Al-P/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Fe-P/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	O-P/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Ca-P/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	砂粒/%	粉土/%	黏土/%
5.83	0.83	15.3	51.5	307.5	10.2	161.5	52.9	23.1	24.0

1.2 实验方法

采用 PVC 土槽模拟淹水土壤磷素在水土界面的迁移转化,如图 1 所示.土槽长 30 cm,宽 20 cm,高 50 cm.侧壁上装有 2 个阀门,即中出水口(土壤孔隙水)和下出水口(模拟出流),中出水口距槽底 15 cm,下出水口距槽底 3 cm,以采集土壤孔隙水和出流;用 100 mL 注射器取上覆淹水(上出水口).取样体积均为 100 mL,先用慢速滤纸过滤,再过 0.45 μm 膜,用钼蓝比色法测水中可溶性磷(DRP)^[7];用邻菲罗啉比色法测淹水中 Fe^{2+} 和总 $\text{Fe}^{[7]}$;用 2100 型 C/N 多功能 TOC 仪测定淹水中的溶解有机质(DOC).

水持续淹没土壤,每隔 4 d 取 1 次水样,每次取样后用注射器注入一定的蒸馏水,维持水面深度保

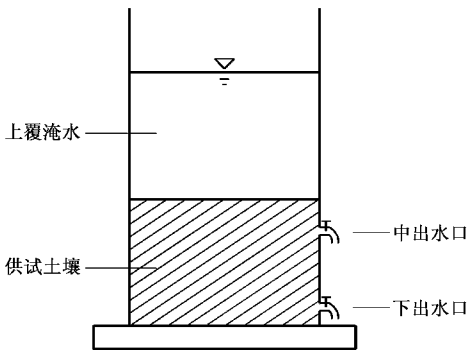


图 1 实验土槽示意

Fig.1 Sketch map of experimental soil trough

持不变.每隔 10 d 左右取 1 次土样.土样用直径为 1 cm 左右的直玻璃管插入土槽底部,堵住玻璃管口取土,湿土直接离心(4 500 r/min, 15 min),去掉土样中的超饱和水,取 0.5 g 离心土测土中各种无机磷形态和总磷^[8],以及土壤湿度(105℃烘 6~8 h),2 次重复.

2 结果与分析

2.1 淹水土壤上覆水和孔隙水中磷素释放特征

不同采样深度土壤溶液中磷释放结果见表 2.前 13 d,上覆淹水中可溶性磷的含量随淹水天数逐渐增大,13 d 之后又逐渐下降.整个淹水期间,中出水口处土壤释放可溶性磷量呈动态交替变化,而下出水口处基本上没有监测到可溶性磷.上覆淹水可溶性磷浓度高于土壤孔隙水中磷浓度,54 d 累积磷释放通量是土壤孔隙水的 16 倍,两者 DRP 相关系数仅为 0.274,这与 Young 等^[9]研究结果相矛盾,他们研究得出,在淹水前一小段时间内上覆水磷浓度大于孔隙水,绝大部分淹水时间内孔隙水可溶性磷的浓度大于上覆淹水磷浓度.之所以得出不同的实验结果,主要是由于淹水和孔隙水中不同数量影响磷释放的铁离子存在,本实验土壤孔隙水中存在大量铁离子(比 Young 等实验铁浓度高),抑制了土壤孔隙水中可溶性磷的释放.

2.2 影响水-土界面磷素迁移转化的因素

表 2 土壤上覆淹水和孔隙水可溶性磷释放实验数据

Table 2 Changes in floodwater-porewater phosphate concentrations and release fluxes

淹水天数/d	上覆淹水 DRP		中出水口 DRP		下出水口 DRP	
	浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	释放通量/ $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$	浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	释放通量/ $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$	浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	释放通量/ $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$
2	0.060	11.700	0.006	1.120	0.000	0.000
6	0.150	29.900	0.000	0.001	0.000	0.000
9	0.140	26.700	0.007	1.390	0.000	0.000
13	0.160	31.100	0.000	0.002	0.000	0.000
22	0.050	9.100	0.009	1.660	0.000	0.000
35	0.000	0.080	0.000	0.004	0.000	0.000
41	0.010	2.010	0.011	2.210	0.010	1.930
54	0.006	1.200	0.000	0.005	0.020	3.840

2.2.1 氧化还原电位和淹水 pH 值

淹水期间上覆淹水和土壤孔隙水 pH 值和 Eh

值的变化如图 2.从淹水过程来看,土壤 pH 值均趋于中性,水-土界面 Eh 值(上覆淹水)随淹水天数的

增加而逐渐下降,第54 d最低值为100 mV左右,土壤孔隙水在淹水17 d后呈明显的厌氧状态,最低达-32 mV.孔隙水中的厌氧状态比上覆淹水中的剧烈,但是磷的释放量却很低.这可能是,孔隙水中释放的大部分磷向上覆淹水迁移扩散速度较快,另外有一部分可能被水土界面下土壤中的基质(主要是 Fe^{3+})吸附了.

2.2.2 土壤上覆淹水和孔隙水中 Fe^{2+} 和总 Fe

铁氧化物、氢氧化物和水合物,尤其是具有较大表面积的非晶质氧化铁,是酸性土壤中重要的吸附基质^[10].淹水可引起土壤氧化铁等的复杂变化, Fe 循环在很大程度上控制着磷的迁移转化过程.厌氧状态 Fe^{3+} 被还原成 Fe^{2+} ,进而使与铁结合的不溶性磷酸盐溶解,铁和磷就释放^[11, 12].另外有报道^[13-15],如果淹水中溶解氧没消耗完全,淹水土壤中就存在氧化还原界面, Fe^{2+} 能通过泵升作用(Fe-pumping)迁移到氧化界面那端成 Fe^{3+} ,阻止磷酸盐迁移,而使溶解态磷重新被吸附.从图3可以看出,上覆淹水中

从第6 d开始出现 Fe^{2+} ,并且随淹水天数呈上升趋势,13 d后逐渐下降,淹水后期逐渐趋于0;孔隙水 Fe^{2+} 在淹水第9 d开始出现,17 d以后大大增加.从图2也可看出,上覆淹水 Eh 值从第6 d开始突然下降,直到13 d.孔隙水 Eh 值从第9 d开始下降,17 d以后呈强烈的厌氧状态.这说明氧化还原条件是 Fe-P 释放的主要影响因素之一.淹水17 d后上覆淹水中总 Fe 和 Fe^{2+} 的浓度基本趋于0,而土壤孔隙水中都逐渐增加,这可能是氧化还原界面的存在阻止了孔隙水中铁向上覆水的迁移.由表2和图3可知,孔隙水中并没有大量的可溶性磷,但却有大量的铁存在, Fe^{3+} 的浓度大于 Fe^{2+} 的,这可能是由于厌氧微生物作用产生大量有机酸,与 Fe^{3+} 形成水溶性络合物,致使溶解态 Fe^{3+} 浓度高.这种溶解态的 Fe^{3+} 和 Fe^{2+} 容易形成混合氢氧化物,具有较大的比表面积^[16-18],吸附可溶性磷酸根离子.另外,厌氧还原产生的 Fe^{2+} 能发生次级化学反应,形成亚铁的水溶性复合物或沉淀^[19],导致孔隙水中 DRP 浓度降低.

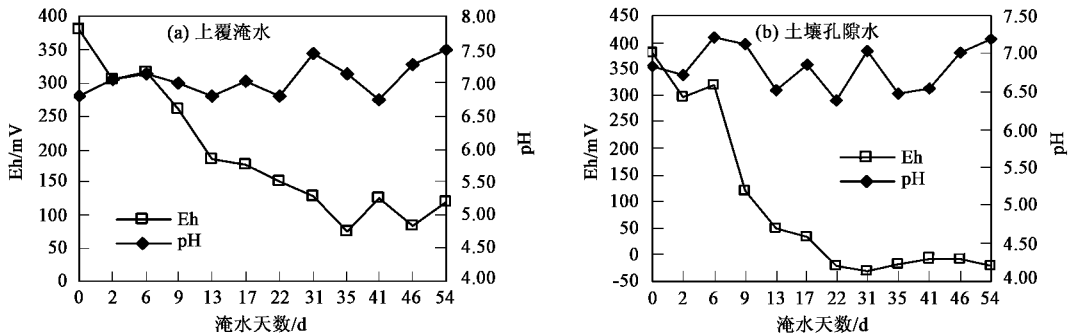


图2 上覆淹水和土壤孔隙水中 Eh 和 pH 的变化

Fig.2 Changes in floodwater-porewater Eh and pH values

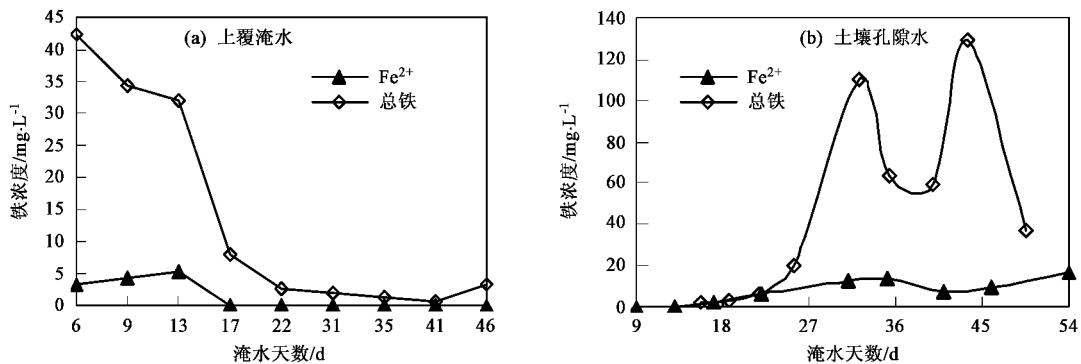


图3 上覆淹水和土壤孔隙水中 Fe^{2+} 和总 Fe 的变化

Fig.3 Changes in floodwater-porewater Fe^{2+} and total Fe concentrations

2.2.3 土壤上覆淹水和孔隙水中 DOC

厌氧条件下^[20, 21],有机物的氧化速率减低,产生

大量水溶性代谢产物,二氧化碳浓度降低,水溶性有机质(DOC)浓度增加.DOC 吸附在土壤表面或铁氧

化物表面,会影响土壤固相组分及厌氧还原条件下磷酸盐的溶解机制和速度.可溶性有机质溶磷机制主要有竞争吸附和络合增溶溶解^[22].溶解的有机质可以吸附在土壤矿物表面,与磷酸根竞争吸附,越来越多的磷位被占据,可溶性磷就释放.另外 DOC 能促进铁铝的溶解,还能与铁磷和铝磷络合成水溶性的三元复合体,进而伴随磷的溶解^[23,24].由图 4 可以看出,随着淹水天数的增加,可溶性磷的变化与 DOC 的变化趋势基本一致,DOC 浓度增加,可溶性

磷也增加,反之亦然.上覆水中 DRP 与 DOC 呈显著线性相关, $r = 0.871 (n = 12)$; 孔隙水中 DRP 与 DOC 也呈显著线性相关, $r = 0.845 (n = 12)$.上覆淹水中 DOC 与 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 之间相关性很高(分别为 0.847 和 0.932, n 均为 12),说明淹水和孔隙水中有水溶性三元复合体 $DOC-Fe-PO_4$ 存在,溶磷机制以络合增溶为主.而土壤孔隙水中 DOC 与铁的相关关系不是很好,说明溶磷机制以竞争吸附为主.

2.3 淹水土壤中无机磷形态的转化

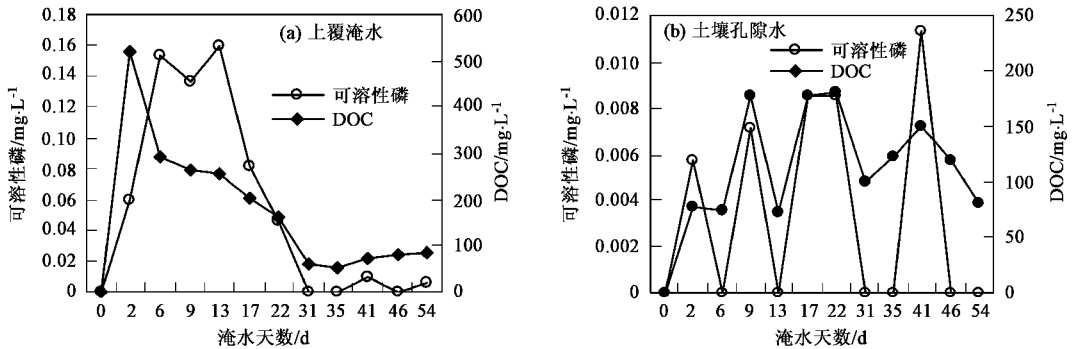


图 4 上覆淹水和土壤孔隙水中磷及 DOC 的变化

Fig. 4 Changes in floodwater-porewater phosphate and DOC concentrations

淹水期间,土壤的化学性质和电化学性质发生了很大的变化,这些条件的变化大大影响了土壤中磷的稳定性,引起土壤无机磷组分之间的相互转化^[25].淹水期间,由于上覆水中磷的释放量很低,尤其到淹水后期,土壤释磷量几乎为零(表 2),所以进一步研究土壤中无机磷组分的变化,以探求淹水水稻土土壤磷的迁移转化机制.由图 5 可以看出,54 d 淹水中,Fe-P 和 O-P 变化较大,Fe-P 比初始值减少 30.4% ~ 72%,在淹水中期后呈动态变化. Fe-P 在淹水第 22 d 的时候含量最低,此时的土水体系呈强烈还原状态(见图 2),大量与磷酸盐结合的 Fe^{3+} 被还原成 Fe^{2+} ,导致 Fe-P 的释放. O-P 在整个淹水期先降低后升高, O-P 淹水前期以溶解为主,后期以闭蓄为主.淹水初期闭蓄态磷释放,而淹水后期增加可能是一部分铁磷转化的结果. Al-P 的释放动力学比 Fe-P 的慢, Al-P 先是保持不变,后期逐渐下降. Ca-P 在淹水期间相对比较稳定.说明水中可溶性磷的释放主要是以 Fe-P, O-P 和 Al-P 为主,其中 Fe-P 的贡献最大.这样看来理论上应该有大量可溶性磷释放,但实测并没有,说明土壤中吸附基质(铁等)对磷的吸附速率远大于土壤释磷速率.

2.4 影响淹水土壤磷迁移转化因素主成分分析

淹水条件下,水稻土磷素迁移转化的因素很多,

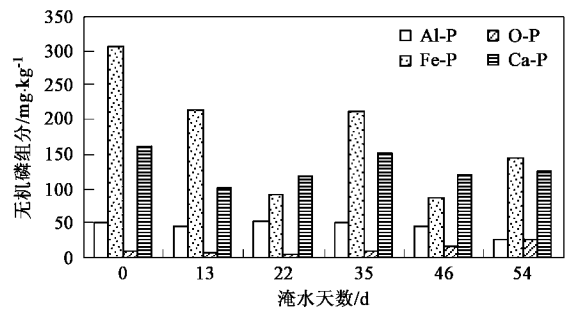


图 5 淹水期间土壤中各种形态无机磷转化

Fig. 5 Changes in inorganic P fractions of soil during flooding

机制也很复杂,不同的实验条件可以得出不同的结果.为了进一步了解淹水过程中磷素迁移转化能力和机制,综合各环境影响要素进行主成分分析.传统的主成分分析方法完全抛开因变量,对自变量系统提取主成分,降低了对因变量取值的解释能力.本研究采用偏最小二乘回归分析中的主成分提取方法,使提取的主成分能够较好地解释因变量(DRP),可降低自变量之间的高相关性对主成分分析结果的影响.表 3 为主成分计算后的因子载荷表,表 4 是不同取样处的 DRP 与各相应的主成分的相关系数表,样本数 $n = 12$.

表 3 和表 4 表明,上覆淹水可提取 2 个主成分

t1 和 t2. t1 与 DRP 的相关系数达到 0.92, 与 t1 相关系数较大的有 DOC、Fe³⁺、Fe²⁺ 和 Eh 值, 所以, 在上覆淹水中, DOC、Fe³⁺、Fe²⁺ 和 Eh 值 4 个因素对 DRP 影响程度较大; t2 与 DRP 的相关系数只有 0.21, 与 t2 相关系数较大的是 pH 值, pH 值对土壤磷释放影响程度不大. 上覆淹水中, 第一主成分为氧化还原因子, 有较高因子载荷的有 DOC、Fe³⁺、Fe²⁺ 和 Eh, 对土壤磷释放影响大, 第二主成分为水体酸碱度因子, 其中有较高载荷的只有 pH, 对 DRP 影响相对较小.

土壤孔隙水可提取 3 个主成分 t1、t2 和 t3. t1

表 3 因子载荷表

Table 3 Factor loading table

取样点	主成分	影响因素					累计贡献率/%
		Eh	pH	Fe ²⁺	Fe ³⁺	DOC	
上覆淹水	t1	0.88	-0.50	0.89	0.96	0.98	74.02
	t2	-0.17	-0.85	-0.22	-0.17	-0.09	90.74
土壤孔隙水	t1	-0.11	-0.57	-0.49	-0.43	0.88	30.81
	t2	-0.54	0.28	0.52	0.61	0.46	55.28
	t3	0.77	0.76	-0.53	-0.41	0.09	87.82

表 4 DRP 与主成分相关系数表

Table 4 Correlation coefficient table of DRP and principal components

DRP	主成分		
	t1	t2	t3
上覆淹水	0.92	0.21	
土壤孔隙水	0.85	0.20	0.09

3 结论

(1) 54 d 淹水期, 土壤孔隙水氧化还原电位 (-32 mV) 远低于上覆水 (100 mV), 但是其磷含量远低于上覆水磷含量, 主要是高浓度的铁离子抑制了孔隙水可溶性磷的释放.

(2) 淹水期间, 土壤无机磷组分 Fe-P 是磷释放的主导因子, Al-P 和 O-P 次之, Ca-P 基本不释放磷酸根.

(3) 通过偏最小二乘主成分分析得出, 上覆淹水中氧化还原因子 (Eh 值、Fe²⁺、Fe³⁺ 和 DOC) 是影响磷释放的主要因素, 而土壤孔隙水中只有 DOC 在磷释放中起主导作用.

(4) 上覆淹水和土壤孔隙水中可溶性磷的迁移转化受 DOC 的不同溶磷机制以及铁离子浓度控制. DOC 的溶磷机制前者以络合增溶为主, 后者以竞争吸附为主; Fe³⁺ 在磷素迁移转化中起主要的吸附作用.

参考文献:

[1] 陆文龙, 张福锁, 曹一平. 磷土壤化学行为研究进展[J]. 天津

与 DRP 的相关系数达到 0.85, 与 t1 相关系数较大的是 DOC, 所以, 在土壤孔隙水中, DOC 对 DRP 影响程度最大; t2、t3 这 2 个主成分与 DRP 的相关系数很小 (0.20, 0.09), 这 2 个主成分的贡献率差别不大, 另外 4 个影响因素, 如 t2、t3 的相关关系强弱不明显, 所以, 直接把 pH 值、Fe²⁺、Fe³⁺、Eh 值划分为一类, 这一类对 DRP 的影响较小. 可知影响土壤孔隙水磷素释放的主要因素是溶解有机质 DOC, 这可能是竞争吸附的结果, DOC 占据了土壤表面的许多吸附点位, 使土壤吸附的磷进入土壤溶液中.

农业科学, 1998, 4(4): 1-7.

[2] 高超, 张桃林, 吴蔚东. 农田土壤中的磷向水体释放的风险评价[J]. 环境科学学报, 2001, 21(3): 344-348.

[3] Van der Molen D T, Breeuwsma A, Boers P C M. Agricultural nutrient losses to surface water in the Netherlands: impact, strategies, and perspectives[J]. J Environ Qual, 1998, 27: 4-11.

[4] Mulqueen J, Rodgers M, Scally P. Phosphorus transfer from soil to surface waters[J]. Agricultural Water Management, 2004, 10: 1-15.

[5] Pant H K, Nair V D, Reddy K R, et al. Influence of flooding on phosphorus mobility in manure-impacted soil[J]. J Environ Qual, 2002, 31: 1399-1405.

[6] White J R, Reddy K R, Majer-Newman J. Hydrologic and vegetation effects on water column phosphorus in wetland mesocosms[J]. Soil Sci Soc Am J, 2006, 70: 1242-1251.

[7] 国家环境保护总局编. 水和废水监测分析方法 [M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 246-248, 368-370.

[8] 鲁如坤主编. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. 166-169, 175-178.

[9] Young E O, Ross D S. Phosphate release from seasonally flooded soils: A laboratory microcosm study[J]. J Environ Qual, 2001, 30: 91-101.

[10] Szilas C P, Borggard O K, Hansen H C B. Potential iron and phosphate mobilization during flooding of soil material [J]. Water, Air and Soil Pollution, 1998, 106: 97-109.

[11] Sallade Y E, Sims J T. Phosphorus transformation in the sediments of Delaware's agricultural drainageways: I. phosphorus forms and sorption [J]. J Environ Qual, 1997a, 26(6): 1571-1579.

[12] Sallade Y E, Sims J T. Phosphorus transformation in the sediments of Delaware's agricultural drainageways: II. Effect of reducing conditions on phosphorus release [J]. J Environ Qual, 1997b, 26: 1579-1588.

- [13] Bartlett R J, James B R. System for categorizing redox status by chemical field testing [J]. *Geoderma*, 1995, **68**: 211-218.
- [14] Moore P A, Reddy K R. Role of Eh and pH on phosphorus geochemistry in sediments of Lake Okeechobee, Florida [J]. *J Environ Qual*, 1994, **23**: 955-964.
- [15] Sah R N, Mikkelsen D S, Hafez A A. Phosphorus behavior in flooded-drained soils. II. Iron transformation and phosphorus sorption [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1989, **53**: 1723-1729.
- [16] Khalid R A, Patrick Jr W H, Delaune R D. Phosphate sorption characteristics of flooded soils [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1977, **41**: 305-310.
- [17] Patrick W H, Khalid R A. Phosphate release and sorption by soils and sediments: effect of aerobic and anaerobic conditions [J]. *Science*, 1974, **186**: 53-55.
- [18] Vadas P A, Sims J T. Phosphorus sorption in manured Atlantic coastal plain soils under flooded and drained conditions [J]. *J Environ Qual*, 1999, **28**: 1870-1877.
- [19] Noemi C, Saul F, Ana G. Implications of iron solubilization on soil phosphorus release in seasonal flooded forests of the lower Orinini River, Venezuela [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, **38**: 1494-1499.
- [20] Fiedler S, Kalbitz K. Concentrations and properties of dissolved organic matter in forest soils as affected by the redox regime [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2003, **54**: 1441-1447.
- [21] Roden E E, Edmonds J W. Phosphate mobilization in iron-rich anaerobic sediment: Microbial Fe (III) oxide reduction versus iron-sulfide formation [J]. *Arch Microbiol*, 1997, **139**: 347-378.
- [22] Johnson S E, Loeppert R H. Role of organic acids in phosphate mobilization from iron oxide [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2006, **70**: 222-234.
- [23] Hutchison K J, Hesterberg D. Dissolution of phosphate in a phosphorus-enriched ultisol as affected by microbial reduction [J]. *J Environ Qual*, 2004, **33**: 1793-1802.
- [24] Willet I R. Causes and prediction of changes in extractable phosphorus during flooding [J]. *Aust J Soil Res*, 1989, **27**: 45-54.
- [25] Sah R N, Mikkelsen D S. Transformations of inorganic phosphorus during the flooding and draining cycles of soil [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1985, **50**: 62-67.