

# 模拟水田的土壤磷素溶解特征 及其流失机制\*

张志剑 王光火 王珂

(浙江大学土壤与农业化学系, 杭州 310029)

朱荫湄

(浙江大学农业环境保护系, 杭州 310029)

## PHOSPHORUS DISSOLUBILITY AND ITS LOSS MECHANISM OF THE SIMULATED PADDY SOILS

Zhang Zhi-jian Wang Guang-huo Wang Ke

(Department of Soil Science and Agriculture Chemistry, Zhejiang University, Hangzhou 310029)

Zhu Yin-men

(Department of Agriculture Environmental Protection, Zhejiang University, Hangzhou 310029)

**关键词** 模拟水田, 磷素, 流失机制

**中图分类号** S143.2

磷素在农业生产中是不可缺少的。包括土壤成土矿物、氧化物等在内的土壤固磷介质对磷有明显的固定作用。但越来越多的研究发现:土壤磷素以地表径流、明渠或暗渠等排水途径流失进入环境,引发水体富营养化<sup>[1,2]</sup>。从地表径流<sup>[3~5]</sup>和地下暗管<sup>[2,6]</sup>排水发现土壤磷素的流失主要归因于低能量吸附点位占优势的富磷土壤。土壤磷素流失又受到多种因子的影响,当旱作土壤改为淹灌土壤时,土壤磷素的有效性显著提高<sup>[7]</sup>;干—湿交替的土壤磷素有效性及溶解特性又受到土壤水分状况和干湿交替时间的限制<sup>[8,9]</sup>;在厌氧条件下的湿地环境能降低土壤对磷的固定能力,提高磷素的溶解活性<sup>[10]</sup>。因此,对于这种受水分影响的情形不能简单地判断土壤磷素的流失潜能。由于土壤磷素的溶解特性与土壤当时的氧化还原状况直接相关<sup>[8]</sup>,水稻田的磷素溶解及淋溶特征规律可能与上述旱地的情况有所不同,也可能与水旱轮作或干—湿交替下的土壤不同。鉴于此,我们采取了三种典型浙北水稻土进行室内模拟水田环境,探讨磷素的溶解及其流失规律。

\* 中英交流合作项目 (SHA/992/297) 和浙江省自然科学基金资助项目 (496028)

收稿日期: 1999-08-26; 收到修改稿日期: 2000-05-26

# 1 材料与方 法

## 1.1 土 样 的 采 集

采取了三种耕作层(0~20cm)水稻土:嘉兴嘉善镇北黄斑田,系发育于河相沉积物;嘉兴海宁许巷粉泥田,系发育于近海沉积物;杭州余杭农科所青紫泥田,系发育于湖沼相淤积物。这三种土壤均为浙北稻区优势性土种。

## 1.2 水田模拟试验

(1) 水稻栽培箱的制作:材料为防锈镀锌白铁皮,箱长为 40.0cm,宽为 40.0cm,高为 30.0cm。在离箱底 7.0cm、12.0cm、17.0cm 和 22.0cm 的四个侧面中央分别开一小孔,焊上长为 2.5cm、外径为 1.0cm 的引水管。箱底设有直径为 2.0cm 排水口。盛土前,在栽培箱底部盛入 2.0cm 厚的石英砂,盖上清洁的纱布,装入过 3.0mm 筛的风干水稻土。

(2) 土壤层间水采样管的制作:取内径为 1.4cm,长为 35.0cm 的白色无磷橡胶管,在橡胶管的两侧交叉开凿内径为 0.4cm 的小孔 16~18 个。小孔用清洁的海绵塞住,橡胶管的一端用橡皮塞封住(另一端接入栽培箱对应的引水管)。

(3) 磷肥施用水平设计(以 P 计)见表 1,所有磷肥为  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ ,补足 N(尿素)和 K(KCL)肥,肥料均作基肥并与土壤均匀混合。每箱盛过 3mm 筛土壤 35kg,盛土的过程中同步加入适量的水,同时安装相应的层间水采样管,栽培箱的有效土层为 20cm。放置玻璃房内,所有盛土栽培箱保持表层水深为 5.0cm。一天后开始采取水样,同时移栽秧龄为 20 天的水稻苗。成活后(约一周)间苗为每箱 9 丛,每丛 1 株。不设不插水稻的对照处理。

表1 模拟水田磷使用量(mg/kg)

磷肥用量	水稻土类型		
	黄斑田	粉泥田	青紫泥田
I	0.0	0.0	0.0
II	125	125	62.5
III	250	250	125

(4) 水样采集方法:用 50ml 塑料瓶分别收集从栽培箱不同高度的引水管放出的土壤层间水,同时采取表层水样。取水样时间:第一次排水前,每隔 2~3 天取一次;第二次排水前,每隔 4 天取一次;第三次排水前,每隔 7 天取一次。每次排水后,自然落干 2 天,再灌水。排水均从箱子的底部排水口排入对应的塑料桶,用称量法计算排水量。从中取 50ml 混合水样。排水时间分别为:施磷后 15 天、33 天、75 天、110 天。

## 1.3 分 析 方 法

土壤有机质、总磷、 $\text{NaHCO}_3$ 浸提磷(以下称 Olsen-P)见文献<sup>[1]</sup>;土壤机械分析为吸管法;树脂磷测定为  $\text{HCO}_3^-$  饱和的 717 型阴离子树脂袋法<sup>[12]</sup>;最大磷吸附容量依据 Langmuir 吸附等温式推算而得。所有水样必须在 12 小时内预处理完毕。水样经过硫酸钾氧化法预处理后钼蓝比色法测定即为水样总磷,经过滤(普通滤纸)钼蓝比色法直接测定即为水样活性磷<sup>[6]</sup>。

# 2 结果与讨论

## 2.1 土壤磷素状况

供试水稻土除粉泥田粉粒水平较高之外,其余土壤粘性较重,见表 2。一般而言,土壤

Olsen-P含量大于10mg/kg时,施磷对水稻生长影响不明显,因此可以称之为富磷土壤。从表2可知,三种土壤磷素水平对水稻生长而言已达富磷水平,同时,树脂磷水平也较高。类似黄斑田、粉泥田的富磷水稻土在浙北尤其是嘉兴地区较为普遍<sup>[13]</sup>,而采自余杭的青紫泥田富磷水平较其余两种高。因此,选取这三种类型的水稻土能够代表该地区优势性水稻土的同时,又侧重于面向土壤磷素流失的研究前提。这也是本研究采用两种不同的施磷方案的原因。

表2 供试土壤基本性质

土壤	土壤机械分析(中国制)			有机质 (g/kg)	总磷 (g/kg)	Olsen-P (mg/kg)	树脂磷 (mg/kg)	最大磷吸附容量 (mg/kg)
	粘粒(%)	粉粒(%)	砂粒(%)					
黄斑田	43.82	52.71	3.47	28.1	0.62	15.63	37.29	603.3
粉泥田	29.47	67.32	3.22	9.1	0.57	16.20	32.54	437.3
青紫泥田	50.11	46.78	3.11	26.0	0.99	66.8	92.7	691.3

## 2.2 层间水磷素的动态行为

水田模拟试验避免了渗漏和降水的影响,20cm的土层代表了水稻生长养分供给最活跃和土壤营养物质流失进入水体环境最为集中的土壤层。由于水田特有的耕作及水肥管理,将整个水田耕层作为磷素流失的扩散源,这与径流作用下不超过5cm表土的旱地研究是不同的<sup>[1,3]</sup>。模拟水田土壤层间水的磷素变化表现的动态特征为:

(1) 受三次排水和水稻生长的影响,出现了三个代表性的土壤层间水总磷峰值。淹水后第12天,土壤层间水总磷迅速达到最大峰值,各土壤层间水总磷水平在施磷水平下没有明显的差异。第二个峰值为淹水后第32天,水样总磷浓度开始表现出层间差异,大小顺序为15.0cm层 > 10.0cm层 > 5.0cm层,其间,水稻生长加快。由于受前二次排水引起土壤磷有较大流失的影响,第45天时,土壤层间总磷水平几乎达到了整个研究时期的最低值。最低谷值为淹水后约55天,此后三种层间水总磷浓度差异更加明显,但大小顺序不变。可知:排水后自然落干的“湿土”与再行淹灌的“淹土”,即湿—淹的交替过程不影响水稻土磷素的溶解能力,似乎不发生干—湿交替造成土壤铁氧化物包被磷素从而降低磷素的活性<sup>[8,9]</sup>的结果。

(2) 层间水总磷浓度明显地高于表层水总磷水平。例如,在淹水5天后,黄斑田处理II的层间水总磷总量为1.872mg/L,而表层水则为0.121mg/L,相差15.5倍;青紫泥田处理III分别为3.068mg/L和0.232mg/L,相差13.2倍,其它时期水样分析也得出两者相差近一个数量级的结论。但不论施磷水平高低,土壤表层水总磷浓度一般都在0.5mg/L以下。层间水与表层水磷素水平的差异说明:淹水土壤磷素的溶解能力增强。水稻土磷素的潜在流失应当考虑整个耕作层的土壤耕层水,这与湿地的磷素释放特征<sup>[14]</sup>有相似之处,但与旱地磷素流失研究<sup>[1,4,15]</sup>的差异较大。

(3) 土壤层间水总磷动态变化与土壤富磷程度和施磷水平有关。由于土壤原有磷库水平的差异(表2),在不施磷的三种土壤处理I中,几乎各对应层间水总磷浓度水平表现为青紫泥田 > 黄斑田 > 粉泥田;另外,比较两种不同的施磷方案发现:同等用磷水平下,青紫泥处理III层间水磷水平不同程度地大于其余两种水稻土的处理II对应层间水。就同一水稻土而言,施磷增加了层间水磷素水平,即处理III > 处理II > 处理I。上述特征与有关研究认为高水平的土壤磷库或施磷水平增加引起磷素流失的水平越大的结论<sup>[4,15]</sup>相类似。

(4) 层间水活性磷的动态特征与总磷的变化基本相似,所不同的是粉泥田第三次峰值水

平与首次峰值水平相当。这可能与粉泥田质地较轻及磷素吸附容量较小有关(表 2),从而在淹水条件下,土壤磷素较易被解析。因土壤质地不同造成磷素流失的差异还表现在土壤剖面磷素的积累与淋溶的研究<sup>[2]</sup>。

### 2.3 土壤排水与磷素流失

在水稻栽培中,进行田间排水以达到水稻生长最佳条件的做法是一种常见的管理措施。本试验在水稻收获前共进行了四次模拟田间排水,见表 3。

从表 3 可以看出:在排水总量(约为 6L)基本稳定的前提下,第一次排水中磷的浓度与流

表3 模拟水田四次排水的磷素水平与流失负荷

排 水	黄斑田			粉泥田			青紫泥田			
	处理I	处理II	处理III	处理I	处理II	处理III	处理I	处理II	处理III	
1	浓度(mg/L)	0.510	1.380	1.90	0.151	0.420	0.862	0.766	1.051	1.642
	负荷(mg/箱)	3.162	8.550	12.046	0.924	2.570	5.379	4.734	6.632	9.885
2	浓度(mg/L)	0.280	0.801	1.160	0.090	0.218	0.516	0.361	0.720	1.003
	负荷(mg/箱)	1.688	4.774	7.076	0.547	1.280	2.988	2.170	4.327	5.807
3	浓度(mg/L)	0.161	0.380	0.640	0.079	0.123	0.304	0.221	0.480	0.750
	负荷(mg/箱)	0.939	2.271	3.786	0.457	0.711	1.860	1.273	2.789	4.365
4	浓度(mg/L)	0.107	0.220	0.480	0.063	0.104	0.260	0.190	0.440	0.640
	负荷(mg/箱)	0.626	1.327	2.803	0.378	0.618	1.490	1.123	2.504	3.846

失负荷最高,随后的多次排水中,磷浓度降低较快,但排水磷素水平均大于对应的表层水;排水中磷素水平随施磷量的增加而提高,这与分析层间水磷素水平时结论相符。从磷素随排水流失来看,比较而言,土壤富磷水平不及青紫泥田的黄斑泥和粉泥田,此时淹水下的该类水稻土排水也能达到较高的磷素水平。因此,从水稻土磷素流失管理的角度考虑,施磷后除了防止田面水排放有可能造成较大的磷素流失<sup>[16]</sup>之外,还应加强土壤排水磷素流失的管理。

### 2.4 模拟水田磷素流失的动力学特征

利用动力学原理可以较为直观地揭示水田排水的土壤磷素流失特征。就同一种类型的水稻土,每次排水时,得出三种不同处理的磷素流失负荷占各自处理磷素流失总负荷的百分数的平均值,即排水磷素流失百分数。三种类型水稻土的排水磷素流失百分数与排水次数的函数,见表 4。研究发现:在控水条件下,水田排水磷素流失百分数( $y$ )与排水的发生次数

表4 四次排水的磷素流失百分数模拟方程

土壤类型	模拟方程	相关系数 $r$
黄斑田	$Y=82.953e^{-0.5567t}$	0.9959**
粉泥田	$Y=60.64e^{-0.3990t}$	0.9733*
青紫泥田	$Y=57.905e^{-0.3763t}$	0.9635*

( $t$ )存在着  $y = a \cdot e^{-bt}$  递减规律,遵循  $-dy/dt = kt$  的动力学一级速率定律;分析流失百分数的绝对值可知,首次排水磷素流失占总流失量的近 45%。水田的这种磷素流失动力学特征与牧草地磷肥流失百分数有很大的相似性,所不同的是后者首次地表径流磷素流失百分数达到了 80% 以上<sup>[15]</sup>,这除了耕作不同造成地表径流与水田土壤排水的差异之处,与土壤长时

间的淹水促进磷素溶解增强有关。玉米—大豆轮作下某一特定的暗管排水, 磷素累积流失量与排水总量服从动力学一级速率定律, 而流域内磷素流失量则与该流域的径流量呈直线相关<sup>[17]</sup>, 实际水稻生产区内是否具有类似的规律, 有待进一步研究。

### 参 考 文 献

1. Sharply A N, Chapra S C, Wedepohl R *et al.* Managing agricultural phosphorus for protection of surface waters: issues and options. *J. Environ. Qual.*, 1994, 23:437~451
2. Sims J T, Simard R R, Joern B C. Phosphorus loss in agricultural drainage: Historical perspective and current research. *J. Environ. Qual.*, 1998, 17:277~293
3. Daniel T C, Sharpley D R, Edwards D R *et al.* Minimizing surface water eutrophication from agriculture by phosphorus management. *J. Soil and Water Conservation*, 1994, 49(2):30~38
4. Pote D H, Daniel T C, Sharpley A N *et al.* Relating extractable soil phosphorus to phosphorus losses in runoff. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1996, 60:855~859
5. Shaplay A N, Daniel J C, Sims J T *et al.* Determining environmentally sound soil phosphorus levels. *J. Soil and Water Conservation*, 1996, 51(2):160~166
6. Heckrath G, Brookes P C, Poulton P R *et al.* Phosphorus leaching from soils containing different phosphorus concentrations in the Broadbalk Experiment. *J. Environ. Qual.*, 1995, 24:904~910
7. 梁嘉陵. 淹水条件下白浆土磷素有效化机理的研究. *土壤通报*, 1997, 28(5):217~218
8. Sanyal S K, De Datta S K. Chemistry of phosphorus transformations in soil. *Advance in Soil Science*, 1991, 16:61~72
9. Zhang Y S, Lin X Y, Ni W Z. Effects of flooding and subsequent air-drying on phosphorus adsorption and available phosphorus in the paddy soils. *Chinese J. Rice Sci.*, 1998, 12(1):40~44
10. Gale P M, Reddy K R, Graetz D A. Phosphorus retention by wetland soils used for treated wastewater disposal. *J. Environ. Qual.*, 1994, 23:370~377
11. 南京农业大学主编. 土壤农化分析. 北京: 农业出版社, 1992. 29~73
12. 陈国孟, 鲁如坤. 关于测定土壤有效磷总量的研究. *土壤学报*, 1993, 30(4):391~389
13. 张志剑, 王光火. 嘉兴地区水稻土磷素状况与环境效应评估. *科技通报*, 1999, 15(5):377~381
14. 缪绅裕. 模拟湿地系统中土壤氮磷释放的动态研究. *生态科学*, 1998, 17(2):267~271
15. Austin N R, Prendergast J B, Collins D. Phosphorus losses in irrigation from fertilized pasture. *J. Environ. Qual.*, 1996, 25:63~68
16. 张志剑, 王珂, 朱荫涓等. 水稻田表水磷素的动态特征及其潜在环境效应的研究. *中国水稻科学*, 2000, 14(1):55~57
17. Xue Y, David M B, Gentry L E. *et al.* Kinetics and modeling of dissolved phosphorus export from a tile-drained agricultural watershed. *J. Environ. Qual.*, 1998, 27:917~922