

浙北水稻主产区田间土-水磷素流失潜能

张志剑¹, 王珂¹, 朱荫湄¹, 郭敏红¹, 周顺根² (1. 浙江大学环境与资源学院, 杭州 310029, E-mail: zhangzjq@sohu.com; 2. 杭州市余杭农科所, 杭州 311113)

摘要:选取嘉善、余姚、德清、余杭 4 个具有代表性浙北水稻主产区, 研究了水田土-水磷素流失潜能及环境意义。4 稻区高水平磷肥投入促进了土壤富磷化, 土壤 Olsen-P 积累的同时, 相应地提高了土壤生物性有效磷、水浸提磷, 并提高了土壤磷素的流失潜能。稻区土壤在富磷化过程中, 存在着土壤磷素的农学意义向环境意义方向演变的趋势。在非植稻期, 稻区农田水体, 包括沟渠水、田表水、排渠水、暗管排水等总磷 (TP) 平均超过了易诱发水体富营养化临界值, 其中溶解磷 (DRP) 占总磷 40%; 主要是源于绿肥田表水及部分排渠中的溶解磷对稻区外水体构成了直接危害。在非植稻期, 因稻区间农耕措施的差异导致了土壤富磷水平与对应田表水磷素水平不具相关性; 在植稻期, 施磷措施促进水田土壤富磷, 相应地提高了田表水磷素水平。

关键词:主产稻区; 磷素; 土-水; 流失潜能; 浙北

中图分类号: X131.3 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2001)01-04-0098

Phosphorus Loss Potential of Soil-Water in Sites of the Main Rice-yield Area in the Northern Zhejiang

Zhang Zhijian¹, Wang Ke¹, Zhu Yinmei¹, Guo Minhong¹, Zhou Shungen² (1. College of Science of Environment and Natural Resources, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China E-mail: zhangzjq@sohu.com; 2. Yuhang Institute of Agricultural Science, Hangzhou 311113)

Abstract: Phosphorus (P) loss potential and its environmental impact from soil-water were surveyed in Jiashan Yuyao, Deqing and Yuhang, named main rice-yield areas in Northern Zhejiang province China. High P input has resulted in soil P accumulation. Higher soil Olsen-P contributed its bio-available P, water extracted P and increased soil P loss potential. The role of P in paddy soils is of environmental rather than agronomic concern in the process of soil P build-up. During the no-rice time, total P (TP) concentration in the various water including ditch drain inside/outside field, field surface water and pipe drain et al are over the critical values associated with accelerated waters eutrophication. The average proportion of dissolved reactive P (DRP) concentration in TP was 40%, however, these current DRP levels in partly ditch drain outside field and surface or ground water in no-rice time could not caused serious impact to the outside waters nearby rice-yield agriculture area. No significant line correlation between soil P tests and P in field surface water was found in no-rice time due to differences in field tillage among rice-yield areas, while P application increased both soil P and its correspondingly field surface P level after rice was planted at the same time.

Key words: main rice-yield area; phosphorus; soil-water; loss potential; Northern Zhejiang

土壤磷素的流失可以由降雨造成的地表径流和用于排水降渍的地下暗管流输出, 国外的研究多集中于此^[1-3]。由于土壤磷素流失发生不仅与施磷量、土壤富磷程度有关, 同时深刻地受到耕作制、排水途径、土地利用等农事管理因子的影响^[1-6]。因此, 在土壤富磷化地区, 有必要对多样化的磷素流失途径、相应的流失潜能进行研究。

目前浙北水稻主产区, 除了水稻栽培以外, 冬作麦

类、油菜或绿肥等农业生产也较普遍。而稻区土壤磷素流失途径除了植稻期间水稻生长季节性人为排水^[7]之外, 还应包括非植稻期农田的多种排水渠道, 如冬作搁

基金项目: 浙江省科技计划项目 (99-2-030); 浙江省自然科学基金项目 (496028)

作者简介: 张志剑 (1973~), 男, 博士研究生, 主要从事农业非点源控制与水资源保护等方面的研究。

收稿日期: 2000-06-16

田排水、暗管排水等,因此,本文选取嘉善、余姚、德清、余杭 4 个代表性稻区,进行选点评估 4 区土壤富磷化水平,及非植稻期土-水磷素流失潜能;同时结合余杭单季稻磷肥定位试验,探讨植稻期内土-水磷素流失潜能。

1 材料和方法

1.1 稻区土-水采样及分析

(1) 采样 4 个稻区土壤均为质地较粘的青紫泥,时间为 1999-04-05。嘉善稻区选点中寒村,土样(0.0~5.0 cm 层,下同)采自小麦田、油菜田和闲置田,水样分别采自冬作搁田沟渠、排渠的输出口、地下暗管的集水池及河水;余姚稻区选点钟家门,土样为机耕 2 d 后的绿肥田、闲置水田,水样为机耕后的田表水、排渠水、观察井地下水(85 cm)以及灌溉水源;德清稻区选点仰家村,土样采自大麦田,水样采自排渠水、地下暗管(80 cm)以及灌溉水源;余杭稻区选点农场,土样均为越冬机耕闲置水田,水样为田表水、排渠水、水产换水和用于灌溉的河水。

(2) 分析方法 土样分析:碳酸氢钠磷浸提(即 Olsen-P):配制 0.5 mol/L NaHCO₃(pH 8.5)浸提液,水:土=25,平衡 0.5 h,分析过滤液中的磷,Olsen-P 也称之为作物生长速效磷指标;0.1 mol/L NaOH 浸提磷:水:土=500,平衡 17 h 后,分析过滤液中的磷;水浸提磷:水:土=25,蒸馏水浸提 1 h,测定过滤液中的磷。

(3) 水样分析 未过滤的水样经过硫酸钾氧化预处理测得其总磷(TP),过普通滤纸后的水样直接测定其中的磷得总活性磷(TRP),过 0.45 μm 滤膜的水样测

得溶解磷(DRP),微量磷测定为孔雀绿比色法^[8],其余为钼蓝比色法。

1.2 大田磷肥试验设计

余杭单季稻磷肥定位试验采用单排单灌的排灌系统,塑料薄膜包被小区田埂使之相互封闭独立。施用磷肥当天移栽水稻^[7],设 4 种处理,重复 3 次。处理 I,不施 P;处理 II,季施 P 53 kg/hm²;处理 III,季施 P 106 kg/hm²;处理 IV,有机无机 1:1 配施 P 53 kg/hm²。本文为 1997 年数据。

2 结果与分析

2.1 稻区土壤富磷化

就水稻生长而言,Olsen-P 大于 15 mg/kg 时,施磷的增产效应不大。依此而论,除了仰家村部分水稻土壤 Olsen-P 较低外,其余稻区土壤均可视为富磷,见表 1。若按文献^[8]推荐的单季最佳磷肥用量 26.3~32.7 kg/hm²,这种富磷土壤的形成显然与当地高投入的含磷肥料有关(年均耕地施磷 59~94 kg/hm²)。0.1 mol/L NaOH 浸提磷是指土壤或径流冲刷进入水体的沉积物在 24 h 内释放供给藻类生长的总有效磷,称之为土壤生物性有效磷^[9]。从土壤调查来看,0.1 mol/L NaOH 浸提磷在稻区间水平差异较大,其中农场土壤该值最高,为 502.2 mg/kg,其余 3 个稻区为 162.33~178.86 mg/kg 之间,水浸提-P 代表土壤在径流条件下释放并能直接被藻类吸收利用的水溶性磷^[9,10],水浸提-P 水平在 2.26~3.95 mg/kg。可知,4 稻区富磷土壤具有较大的磷素流失潜能。

表 1 4 稻区农田土壤磷素状况/(mg·kg⁻¹)

稻区	Olsen-P		0.1 mol/L NaOH-P		水浸提-P	
	变幅	平均值	变幅	平均值	变幅	平均值
中寒村	15.64~32.27	22.55	96.73~289.47	164.74	2.02~2.55	2.26
钟家门	12.39~20.47	17.74	110.76~219.98	178.86	2.00~2.97	2.49
仰家村	5.95~19.15	12.68	150.90~172.12	162.33	1.55~4.43	2.68
农场	34.20~71.07	51.29	433.95~574.73	502.20	3.33~4.57	3.95

2.2 稻区农田水体磷素状况

4 稻区内各类水体总磷(TP)平均值变幅为 0.069~1.457 mg/L;总活性磷(TRP)平均值为 0.037~1.074 mg/L;溶解磷(DRP)平均值为 0.028~0.885 mg/L(表 2)。4 稻区农田水体 TP 水平平均超过了易诱发水体富营养化的临界值,即总磷 0.035~0.100 mg/L^[2]。由于流失的土壤磷素水平与负荷在径流发生地与最终进入水体时不完全一致^[12],一般认为地表径流溶解磷>0.25 mg/L 水平^[11]或地下水溶解磷大于 0.1 mg/L^[12]

时,被认为富磷化土壤对水体构成了直接危害。从表 2 可知:4 稻区内中,只有钟家门绿肥田表水与农场排渠水的 DRP 平均值超过了 0.25 mg/L,占稻区内各类田表水的 20%;暗管与观察井的 DRP 平均值均不大于 0.1 mg/L。说明尽管 4 稻区土壤富磷明显,但在非植稻期内,主要是源于绿肥田表水及部分排渠的 DRP 对稻区外水体构成直接危害。

同时发现农田机耕与否及其历经时间均引起了田表水磷素差异,机耕田(如钟家门、农场)大于非机耕田

(如中寒村),这与大田试验时人工耘田提高了表水磷素^[7]相一致;新近机耕水田(如钟家门)大于越冬机耕水田(如农场);在同一稻区且同期机耕,但不同前作的水田(如钟家门),表现为绿肥田大于闲置田.当然上述差异也可能与稻区间的土壤磷素(表1)及其空间差异性、稻区内的农耕措施等有关.

表 2 4 稻区农田环境水体磷素状况/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

稻区	采样点	TP		TRP		DRP		TRP	DRP
		变幅	平均值	变幅	平均值	变幅	平均值	TP	TP
中寒村	冬作沟渠	0.061 ~ 0.076	0.069	0.031 ~ 0.043	0.037	0.028 ~ 0.028	0.028	0.54	0.41
	排渠	0.156 ~ 0.219	0.188	0.076 ~ 0.091	0.084	0.036 ~ 0.056	0.048	0.45	0.26
	集水池	0.178 ~ 0.221	0.200	0.062 ~ 0.095	0.078	0.023 ~ 0.040	0.032	0.39	0.16
	河水	0.219	0.219	0.137	0.137	0.116	0.116	0.63	0.53
钟家门	闲置田	0.247 ~ 0.785	0.479	0.231 ~ 0.309	0.271	0.160 ~ 0.219	0.202	0.57	0.42
	绿肥田	0.810 ~ 0.920	0.865	0.263 ~ 0.345	0.308	0.241 ~ 0.304	0.273	0.36	0.32
	排渠	0.273 ~ 0.694	0.485	0.131 ~ 0.318	0.224	0.133 ~ 0.279	0.206	0.46	0.42
	观察井	0.050 ~ 0.128	0.097	0.027 ~ 0.060	0.042	0.018 ~ 0.032	0.028	0.43	0.29
	灌溉水	0.229	0.229	0.163	0.163	0.146	0.146	0.71	0.64
仰家村	排渠	0.228 ~ 0.327	0.265	0.057 ~ 0.100	0.074	0.033 ~ 0.060	0.049	0.28	0.18
	暗管	0.092 ~ 0.114	0.097	0.047 ~ 0.083	0.062	0.028 ~ 0.057	0.044	0.64	0.45
	灌溉	0.140	0.140	0.107	0.107	0.065	0.065	0.76	0.46
农场	闲置田	0.176 ~ 0.503	0.383	0.081 ~ 0.363	0.208	0.074 ~ 0.202	0.130	0.54	0.34
	排渠	1.396 ~ 1.518	1.457	1.031 ~ 1.116	1.074	0.879 ~ 0.891	0.885	0.74	0.61
	水产换水	0.605	0.605	0.467	0.467	0.151	0.151	0.77	0.25
	河水	0.098	0.098	0.079	0.079	0.064	0.064	0.81	0.65

在稻区农田不发生土层地表侵蚀前提下,比较水样磷素形态可知,TRP/TP 平均值变幅为 0.28 ~ 0.81;DRP/TP 平均值变幅为 0.16 ~ 0.65.各类水样总活性磷一般占了总磷的 50 % 以上,溶解磷一般也在总磷的 40 %.但本文 DRP/TP 不及施磷后牧草地排水中水溶性磷占总磷水平的 90 % ~ 95 %^[13].这种差异可能是 4 稻区水样中的磷来源于土壤磷库,与前作施用化肥中的磷直接关系不大,也可能与水样此时的地表悬浮胶体、有机质有关,如绿肥田表水、集水池、观察井、地下暗管(表 2)等水样的 DRP 一般也不到总磷的 50 %,这与 Suzanne 等^[6]研究地下暗管磷流失形态分析结论相似;但又不及当 Olsen-P 大于 60 mg / kg 的旱作土壤的地

下暗管排水,DRP 达到总磷的 66 % ~ 86 % 水平^[5],这种差异有待于从暗管排水的有机质组成、土壤水分迁移等方面进一步论证.

2.3 稻区土壤磷素相关性

由于 4 稻区水稻土同属于青紫泥土壤,可将所有土壤测试磷指标作相关分析.分析发现土壤 Olsen-P 积累的同时,磷素存在朝着 0.1 mol/L NaOH-P 方向积累的趋势,2 者达到了极显著水平,见图 1(A).土壤 0.1 mol/L NaOH-P 水平与其水浸提-P 水平的相关性也达到了显著水平,见图 1(B).被调查的土壤水浸提-P 水平与其土壤 Olsen-P 也存在极显著的线性相关性($r = 0.7644, n = 13$).

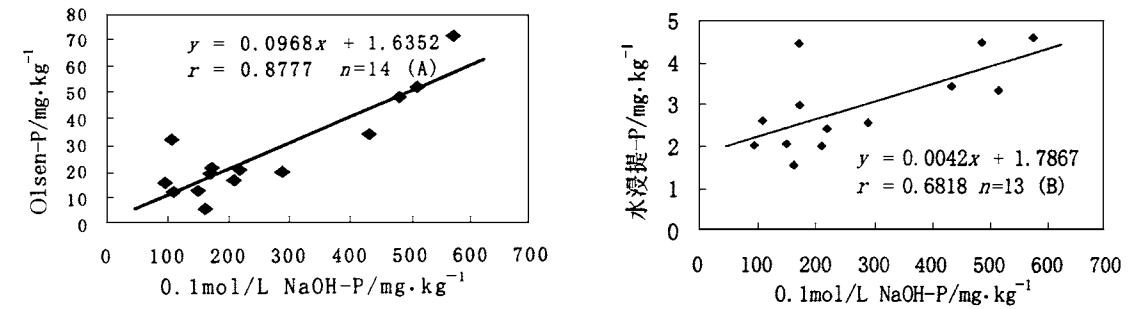


图 1 稻区土壤 0.1 mol/L NaOH-P 与 Olsen-P、水浸提-P 的相关关系

分析可知:稻区土壤磷积累的同时,其土壤生物性有效磷、水溶性磷水平也相应显著增加;结合表 1 数据,稻区土壤磷素不仅满足水稻生长,而且土壤富磷化的同时向表水释放磷素的潜能增强.由此可见,4 稻区土壤在富磷化过程中,土壤磷素的农学意义向着环境意义演变趋势明显.这与 Sharpley 等^[10]调查全美土壤磷素环境意义时归纳的结论相符.

2.4 稻区农田土-水磷素相关性

将所有来源于 4 稻区土壤与对应田表水总磷水平进行相关性分析,发现土壤 0.1 mol/L NaOH-P、水浸提-P 及 Olsen-P 与田表水总磷水平均没有达到显著线性相关(表 3).

表 3 土壤磷测定(x)与田表水总磷(y)的相关性¹⁾

土壤磷测定 / mg·kg ⁻¹	田表水总磷/ mg·L ⁻¹		
	b	a	r
0.1 NaOH-P	- 0.0003	0.5128	0.1916
水浸提磷	- 0.0367	0.5316	0.1245
Olsen-P	0.0054	0.5959	0.3722
Olsen-P ²⁾	0.0069	- 0.1796	0.8424

1) b 为回归系数, a 为截距. $t_{0.05} = 0.632$, $t_{0.01} = 0.765$.

2) 磷肥定位试验.

但在大田磷肥试验中,经不同磷肥处理后的水田表土,历经第 9d 时,土壤 Olsen-P 水平与田表水总磷的相关性达到了显著性水平.本文的土-水磷素相关性与一般认为的土壤磷素水平与地表径流磷素水平之间正线性相关的观点^[2,10,11,14]有不同之处.这除了与前述中由于田间机耕搅动表土与否及其历经时间等差异引起的田表水磷素不同之处,还可能与施入水田的磷肥在土-水中的数量分配随时间的动态变化有关.即在农田状况均一的前提下,如大田磷肥试验,施磷措施促进水田土壤富磷,相应地提高了田表水磷素;而仅从富磷土壤向表水释放的磷素则取决于土-水界面磷素分配能力,显然,对于这种能力的表征研究将有助于了解水田磷素的流失潜能.

3 结论

(1) 浙北主产稻区高水平的磷肥投入造成了土壤的富磷化.土壤 Olsen-P 积累的同时,相应地提高了土壤生物性有效磷、土壤水浸提-P,提高了土壤磷素的流失潜能.稻区土壤在富磷化过程中,存在着土壤磷素的农学意义向环境意义方向演变的趋势.

(2) 在非植稻期,稻区农田水体,包括沟渠水、田表水、排渠水、暗管排水等 TP 水平均超过了易诱发水体富营养化临界值,其中 DRP 占 TP40%,但主要是源于

绿肥田表水及部分排渠中的 DRP 对稻区外水体构成直接危害.

(3) 在非植稻期,稻区间农耕措施的差异导致土壤富磷水平与对应田表水磷素水平不具相关性;而在施磷并移栽水稻后第 9d 时,施磷措施促进水田土壤富磷,相应地提高了田表水磷素.

参考文献:

1 Haygarth P M, Jarvis S C. Soil derived phosphorus in surface runoff from grazed grassland lysimeters. *Water Research*, 1999, **13**: 140 ~ 148.

2 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.

3 Suzanne Beauchemin, Simard R R, Cluis D. Forms and concentration of phosphorus in drainage water of twenty-seven tile-drained soils. *J. Environ. Qual.*, 1998, **27**: 721 ~ 728.

4 Sims J T, Simard R R, Joern B C. Phosphorus loss in agricultural drainage: historical perspective and current research. *J. Environ. Qual.*, 1998, **27**: 277 ~ 293.

5 Sharpley 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.

6 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.

7 Rao A S, Reddy K S, Takkar P N. Malachite green method compared to ascorbic acid for estimating small amounts of phosphorus in water, 0.01 M calcium chloride, and Olsen soil extractions. *Commun Soil Sci Plant Anal.*, 1997, **28**(6 ~ 8): 589 ~ 601.

8 王兴仁, 曹一平, 张福锁. 磷肥恒量监控法在农业中应用探讨. *植物营养与肥料学报*, 1995, **1**(3 ~ 4): 59 ~ 63.

9 Gartley K L, Sims J T. Phosphorus Soil Testing: Environmental Uses and Implication. *Commun Soil Sci Plant Anal.*, 1994, **25**(9 & 10): 1565 ~ 1582.

10 Sharpley 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.

11 Sharpley A N. Dependence of runoff phosphorus on extractable soil phosphorus. *J. Environ. Qual.*, 1995, **24**: 920 ~ 924.

12 Breeuwsma A, Reijerink J G A, Schoumans O F. Impact of manure on accumulation and leaching of phosphate on area of intensive livestock farming. In Steet K (ed), *Animal waste and the landwater interface*, New York: Lawis Publ. CRC, 1995. 239 ~ 251.

13 Austin N R, Bernard Prendergast J, Collins M D P. Phosphorus losses in irrigation runoff from fertilized pasture. *J. Environ. Qual.*, 1996, **25**: 63 ~ 68.

14 Pote D H, Daniel T C, Nichols D J et al. Relationship between phosphorus levels in three ultisols and phosphorus concentrations in runoff. *J. Environ. Qual.*, 1999, **28**: 170 ~ 175.