太湖地区渗育性水稻土径流中磷组分的研究*

王小治[1,2]　曹志洪[2†]　盛海君[1]　封　克[1]　朱建国[2]
(1 扬州大学环境科学与工程学院, 江苏扬州　225009)
(2 中国科学院南京土壤研究所, 南京　210008)

摘　要　本试验于 2002 年在太湖地区渗育性水稻土上进行, 研究不同施磷水平下(P 0、30、70、150 和 300 kg hm^{-2}) 麦稻轮作中土壤径流磷的损失。研究结果表明: 在麦稻轮作期间, 除最高施磷处理 P 300 kg hm^{-2} 的径流磷损失达到 P 0.75 kg hm^{-2}外, 其余各施肥处理与对照无显著差异。虽然径流损失的磷最多也不足施磷量的 0.1%; 但径流中溶解磷浓度均已超过水体富营养化磷浓度的阈值(0.02 mg L^{-1}), 故农田径流携带的磷长期进入水体也会加重水体富营养化。径流携带的磷以产生第一次径流时为最多; 径流磷中以颗粒磷为主占总磷的 60% 以上; 溶解磷则在 40% 以下, 而溶解磷中以有机磷为主, 除 P 300 kg hm^{-2}处理外, 其余处理的径流中溶解有机磷占总溶解磷的 52.0% ~ 76.2% 之间。因此, 仅测定溶解的无机磷作为溶解磷组分, 必将低估径流溶解磷的数量及其贡献; 施肥未增加当季径流中溶解有机磷的浓度。

关键词　渗育性水稻土; 径流; 磷组分; 溶解有机磷; 富营养化
中图分类号　S143.2　　文献标识码　A

磷元素是湖泊水体富营养化的关键因子之一[1]。我国太湖水体的富营养化磷素富集也是主要的贡献之一[2]。有研究认为农业非点源污染物的大量输出是导致受纳水体富营养化的原因之一[3,4], 因此对农业非点源磷污染的研究已日益受到人们的重视[5,6]。随径流进入水体的磷包括溶解磷(Dissolved phosphorus, DP) 和颗粒磷(Particulate phosphorus, PP) , 而溶解磷包含溶解无机磷(Dissolved inorganic phosphorus, DIP) 和溶解有机磷(Dissolved organic phosphorus, DOP) 两部分。进入水体的颗粒磷也能缓慢释放影响水体富营养化, 但溶解磷则与水体富营养化更直接相关。已有研究表明, 溶解有机磷与溶解无机磷具有相似的营养效应[7], 浮游植物、细菌对溶解有机磷的吸收有两种可能的途径, 一种是直接吸收, 另一种是通过碱性磷酸酶降解后再被吸收[8]。我国有关农田向水体径流磷排放的研究中尚未测定溶解有机磷, 一般是将径流液过滤后直接用比色法测定的磷作为溶解磷(实为 DIP) , 而把用过硫酸钾消化未经过滤的径流液所测定的总磷(Total phosphorus, TP) 与溶解磷(实为 DIP) 的差值作为颗粒磷(PP)[9,10]。显然, 这样计算所得的颗粒磷中包括了溶解有机磷。不能准确反应径流携带磷中有机磷占的比重及其对水体富营养化的贡献。太湖流域雨量丰富, 季节性降雨明显。土壤表层中溶解的无机磷、有机磷和颗粒磷(包含有沉淀的各种无机磷, 被颗粒吸附的无机磷和有机磷以及部分不能通过滤纸的有机磷) 都会随地表径流而流失, 进而汇入河流湖泊对地表水的富营养化有一定的贡献。据对太湖地区水土流失的研究[11]表明, 水域年平均淤积达 2.5 cm, 表明坡降虽不大, 但仍有明显的水土流失。本文所研究的稻季的径流是指水稻生长季节下大雨或暴雨后, 田面水溢出田埂流出的水流, 而麦季径流是指冬麦生长季节下雨或下雪后, 从田间排水沟排出的水流。径流或排水流的形成与降水灌溉、坡降和土壤的结构质地等有关。太湖地区稻田约占总耕地的 90% 上下[12], 要准确评估由农田径流迁移至水体中的 P 量, 必须对各种典型水稻土的磷素在土壤—水体间的迁移情况进行研究。对各占太湖地区水稻土总面积约 26% 和 30%[13] 的潜育性和潴育性水稻土的 P 随径流损失研究已有报道[10], 对渗育性水稻土(占太湖地区水稻土总面积的 23%[13]) 上 P 随径流损失的研究至今尚是空白。为此, 在太湖地区渗育性水稻土上进行了本研究。对麦稻轮作各季收集的径流, 除通常分析径流中的溶解磷和颗粒磷外, 还对

* 国家重点基础研究发展规划项目(G199901 1806) 和中国科学院南京土壤研究所土壤圈物质循环开放课题(025103) 资助
† 通讯作者
作者简介: 王小治(1975~) , 男, 讲师, 现为中国科学院南京土壤研究所在职博士生
收稿日期: 2003- 04- 28; 收到修改稿日期: 2003- 08- 21

径流排放的溶解磷中的有机磷和无机磷做了分别测定。这将有助于全面了解太湖流域水稻土土—水界面磷素的迁移, 明确径流磷中各种磷素形态的比例, 评估不同施肥水平和不同磷素形态对水体环境造成的压力, 为环境友好的肥料管理提供理论依据, 为针对性的减排措施提供参考。

1　材料与方法

1.1　试验地点及试验处理

本研究是 2002 年 2 月起在江苏张家港市鹿苑镇鹿北村渗育性水稻土上采用随机排列的田间小区试验方式进行的。供试土壤的基本性状为: 有机质 15.2 g kg^{-1}、全氮 1.26 g kg^{-1}、全磷 0.69 g kg^{-1}、速效磷 7.27 mg kg^{-1}。在小麦生长季设 P 0、30、70、150、300 kg hm^{-2} 5 个不同施磷肥处理(分别用 P0、P30、P70、P150、P300 表示), 磷肥(过磷酸钙) 于 2002 年 2 月 6 日撒施于地表, 生长期间不再施用磷肥。所有处理的氮、钾肥用量一致, 分别为 N 300 kg hm^{-2}、K_2O 60 kg hm^{-2}。稻季施肥同麦季。每处理设 4 个重复, 小区面积 30 m^2(5 m× 6 m)。小区间田埂宽 30 cm, 两侧覆以塑料布, 埋深 60 cm 以防止串水串肥, 每小区单独排灌(麦季无灌溉), 灌溉量及其余管理措施同大田。

在每小区顶端设径流水收集池一个。收集池采用内径 90 cm、高 100 cm 的涵管, 底端封闭, 顶端分别在高出地表 7 cm(供水稻季收集田面径流水) 和地表下 10 cm(供小麦季收集田面径流水) 处安装 PVC 管收集径流水。顶端加盖防雨水进入径流水收集池。

1.2　取样及测定

本试验中径流均在降雨后发生, 平时无径流。麦季、稻季径流量均与降雨量密切相关, 而稻季径流量还与降雨前田面水位高度有关。麦季径流为排水, 在降雨强度及降雨量较小时即可发生, 麦季时在田面挖一十字交叉浅沟将径流引入到距地表下 10 cm PVC 管口, 使雨后或雪融化后的田面无水持留, 引入径流池收集; 而稻季的径流是田面水溢出田埂(本试验为地表上方 7 cm 水管) 的水流, 由于一般灌溉使田面水的水位维持在 3~ 5 cm, 故只有较大的降雨量才产生径流, 田面水超过 7 cm 的部分即被认为是可产生径流的部分而加以收集。雨后收集径流池中均匀混合的水样并记录每次所收集的径流水总量。

径流水样全磷(TP) 用过硫酸钾消化(120℃, 200 kPa 消化 30 min) 钼锑抗比色法。径流水样经 0.45 μm 的滤膜过滤, 滤液直接用钼锑抗比色法测定溶解无机磷(DIP), 对另一平行滤液采用过硫酸钾消化(同上) 钼锑抗比色法测定水样中溶解总磷(DTP)。水样中溶解总磷(DTP) 扣除溶解无机磷(DIP) 即得到溶解有机磷(DOP) 含量: (DOP= DTP− DIP), 水样中全磷(TP) 与溶解总磷(DTP) 之差(PP= TP− DTP) 即为颗粒磷(PP)[14]。

1.3　数据的统计分析

所得结果用 Excel2000、SPSS10.0 进行统计分析。

2　结果与讨论

2.1　麦季径流磷素排放

由于在2002年2月6日才完成本试验小区的

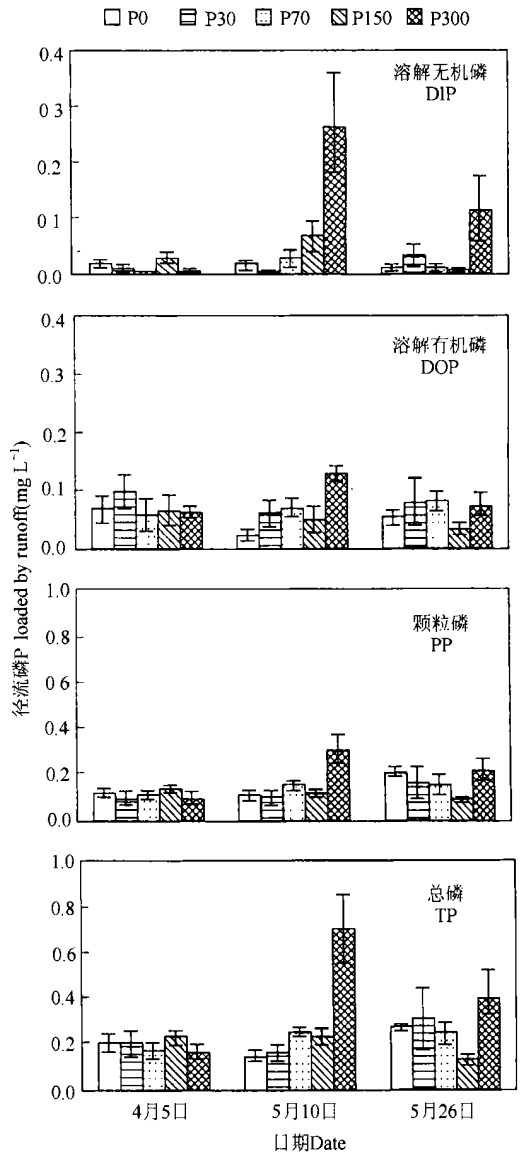

图 1　麦季施肥对不同时期径流磷浓度的影响

Fig. 1　Effect of P application rate on P concentration in runoff at different date in wheat season

布置工作, 故在此之前的径流没有收集。只在4月5日、5月10日和5月26日收集到3次径流, 每次径流中各类磷的含量见图1。从图1可以看出, 在5月10日的P300处理径流中各类磷浓度显著高于其它处理, 此次径流的DIP、DOP、PP和TP浓度分别达到P 0.26 mg L^{-1}、P 0.13 mg L^{-1}、P 0.30 mg L^{-1}和P 0.70 mg L^{-1}。其余时间各处理径流中DIP浓度在P 0.00~ 0.07 mg L^{-1}之间, DOP浓度在P 0.02~ 0.10 mg L^{-1}之间, PP浓度在P 0.09~ 0.21 mg L^{-1}之间, TP在P 0.13~ 0.40 mg L^{-1}之间, 各类磷浓度间均无显著差异($p < 0.05$)。

从麦季(2月6日~ 6月15日)径流磷的排放量来看(见图2), P300处理的径流磷排放量显著高于其它处理, 其中DIP为P 0.07 kg hm^{-2}, DOP为P 0.04 kg hm^{-2}, PP为P 0.10 kg hm^{-2}, TP为P 0.21 kg hm^{-2}, 其余处理间径流磷排放量无显著差异。说明在2月6日~ 6月15日小麦生长期内, P 0~ 150 kg hm^{-2}施肥量的条件下, 径流中磷的浓度、径流磷排放量与施入磷量之间不存在明显正相关的关系, 即低于P 150 kg hm^{-2}的施肥并未显著提高当季径流磷的浓度和磷的排放量。这一方面与土壤对磷的缓冲能力有关, 施入磷肥中的易溶解部分较多地以化学固定、吸附固定、生物固定等方式转为非溶解态磷, 不易随径流流失; 而另一方面则是由于试验开始较迟, 没有能收集到11月至2月6日期间这一径流磷排放最敏感危险期的径流所至。(本试验中得到的麦季径流量不代表全生育期, 但仍然可以讨论径流磷的组成成分, 这是本文关注的重点。)而当施肥量达到P300kghm^{-2}时, 已超过该种土壤对磷的缓冲范围, 径流中磷的浓度将大大提高, 径流磷损失量显著增加。然而即使如此, 径流磷排放总量只占施入磷肥的很小一部分。就P300处理而言, 通过径流损失的磷不到施磷量的0.1%。但在所有处理中, 径流溶解磷的浓度均已超过水体富营养化磷的阈值(0.02 mg L^{-1})[(1)]。因此, 大量的径流长期向河流积聚仍有可能造成水体的富磷现象。

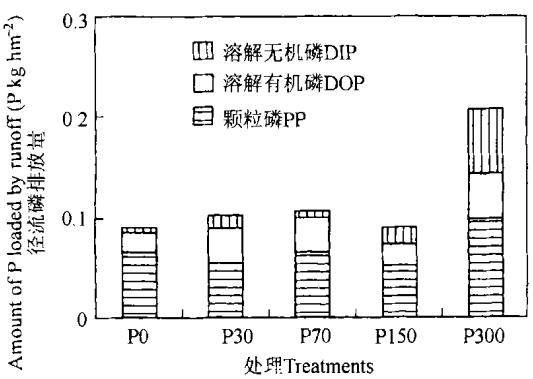

图2 麦季施肥对径流磷排放及磷组分的影响

Fig. 2 Effect of P application rate on amount and partition of P loaded by runoff in wheat season

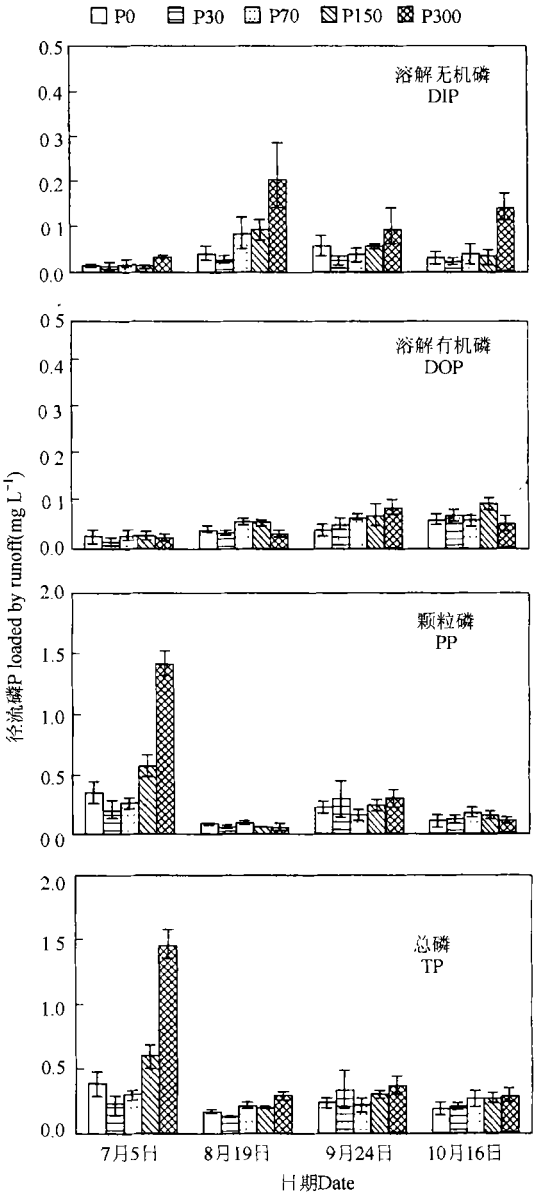

图3 稻季施肥对不同时期径流磷浓度的影响

Fig. 3 Effect of P application rate on P concentration in runoff at different date in rice season

(1) Foy R H, Withers P J A. The contribution of agricultural phosphorus to eutrophocation. The Fertilizer Society Proceedings, 1995. 1~ 32

2.2　稻季径流磷素排放量

本试验中, 稻季分别在 7 月 5 日、8 月 1 9 日、9 月 24 日和 10 月 16 日共收集到 4 次径流。如图 3 所示, 在 7 月 5 日, 即稻季发生第一次径流时, P300 处理径流中除 DOP 外, 其余各类磷浓度均显著高于其它处理, DIP、PP 和 TP 的浓度分别达到 P 0.03、1.40 和 1.46 mg L^{-1}, 而在后来的三次径流中各处理间磷浓度无明显差异, 各处理径流中 DIP 浓度在 P 0.02 ~ 0.20 mg L^{-1}之间, DOP 浓度在 P 0.03~ 0.09 mg L^{-1}之间, PP 浓度在 P 0.05~ 0.28 mg L^{-1}之间, PP 在P 0.12~ 0.37 mg L^{-1}之间。

从图 4 可以看出, P300 处理的稻季径流磷排放量显著高于其它处理, 其中 DIP 为 P 0.05 kg hm^{-2}, DOP 为P 0.16 kg hm^{-2}, PP 为 P 0.32 kg hm^{-2}, TP 为 P 0.54 kg hm^{-2}; P150 处理的稻季径流磷总损失量虽高于对照处理, 但统计分析表明其与对照之间在 $p < 0.05$ 水平下并未呈现显著差异(见表 1) , 而 P30 和 P70 处理的稻季径流磷总损失量并未大于对照处理。

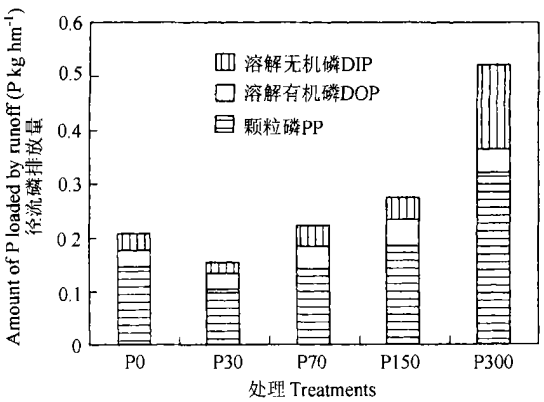

图 4　稻季施肥对径流磷排放及磷组分的影响

Fig. 4　Effect of P application rate on amount and partition of P loaded by runoff in rice season

不同时期的径流磷损失量有较大的差异。土壤耕翻和移栽前后, 土壤养分被耕耘扰动, 所施的肥料虽有部分与表层土壤相混, 但不少仍留在水体中, 田面的混水层表明还有大量土粒没有沉积下去。因此, 第一次发生径流期间排放的磷最多。对于 P150 和 P300 处理来说, 第一次径流排放的磷占整个稻季径流排放磷的 44% 和 65% 。

在水稻生长季节, 低于 P 70 kg hm^{-2}的施肥并未提高径流磷的浓度和磷的总损失量, 这是因为在土壤无机磷浓度达到某一突变点(Change point) 之前, 径流磷损失差异不明显[15]。而当施肥量达到 P 150 kg hm^{-2}时径流中磷的浓度将提高, 径流磷损失量也变大。虽然麦季 P150 处理的各形态磷素损失的平均值小于 P30 和 P70 处理, 但各值的标准误有所不同, P 150 kg hm^{-2}施肥量以下的各处理之间在 $p < 0.05$ 水平下未呈现显著差异(见表 1) 。麦季、稻季结果相对照表明, 土壤在麦季和稻季对磷的缓冲能力不同, 麦季大于稻季。在稻季, 第一次径流损失的磷在 4 次总径流磷损失中占的比例最大, 其中颗粒磷的损失起了决定性的作用。

2.3　径流中磷组分

2.3.1　颗粒磷、溶解磷在径流携带磷中的比例　　从表 1 中可看出, PP、DTP 的量及各自所占径流 TP 的比例在麦季、稻季中有所不同。在麦季, 除 P300 处理中 PP 占总磷的比例为 48%, 略低于 DTP 所占的比例 52% 外, 其处理中均以 PP 为主, 占总磷的比例在 53% ~ 72% 之间; 在稻季, 所有处理径流磷损失均以 PP 为主, 占总磷的比例在 65% ~ 76% 之间。这体现了磷在土壤中很易被吸附、固定的特性。从整个麦稻轮作来看, 径流磷损失中以 PP 为主, 这与在潜育性和潴育性水稻土上的试验结果一致[9]。

稻季径流磷损失中 PP 所占的比例比麦季颗粒磷的比例高, 这可能与稻季降雨多为暴雨, 其对田面表土的搅动强度大有关。移栽前后, 仍有部分肥料留在水体, 且还有大量土粒没有沉积下去。因此, 稻季径流 PP 在径流 TP 中所占的比例以 7 月 5 日第一次产生径流时为最大(见图 2) , 而这也有部分原因是当时水稻苗较小, 高度较低, 密度较疏, 降雨时雨点打击土壤表层的冲量较大, 易溅起较多的土壤颗粒, 因而径流水中的 TP 浓度较高。

在麦季和稻季中, PP 占总磷的比例有随施磷量的增加而降低的趋势。在同一次降雨引发的各处理的径流中携带的 PP 是基本相同的, 但随着施磷量增加, DIP 增加比较明显, 故有此结果。这也是麦季 P300 处理中 PP 占总磷的比例略低于溶解磷的原因。

2.3.2　溶解无机磷、溶解有机磷在溶解磷中的比例　　如表 2 所示, 稻季径流中 DIP、DOP 及 DTP 的量均大于麦季(2 月 6 日~ 6 月 15 日) 。就 DOP 在 DTP 中所占比例来看, 所有处理都是麦季的大于稻季的: 麦季为 39.5% ~ 76.2% 之间; 稻季为 22.3% ~ 64.1% 之间, 这可能是由于稻季的矿化作用强使得 DIP 的比例相对较高而 DOP 的比例相对较低之故。除了P300处理中溶解有机磷占溶解磷的比例

低于溶解无机磷所占的比例外(原因将在下面讨论),其余处理中无论麦季还是稻季均以溶解有机磷为主。在不同季节、不同处理中溶解有机磷占溶解磷的比例有所不同,不同土壤上溶解有机磷的比例也有所差异,如果对径流液的滤液直接用钼锑抗比色法进行测定的磷作为溶解磷,因为这一分析方法实际只是测得溶解无机磷,这将大大低估溶解磷在径流总磷中的比例。本试验结果有力证明在一般施磷肥量下,农田径流携带的水溶性磷中应是以有机磷为主。

表 1 磷肥施用对径流中溶解磷、颗粒磷排放量的影响(Mean(S. E.))

Table 1 Effect of P application rate on amount of DP and PP loaded by runoff

	磷排放量 Amount of P ($g\ hm^{-2}$)			占总磷比例 Percent. of TP(%)	
	溶解磷 DP	颗粒磷 PP	总磷 TP	溶解磷 DP	颗粒磷 PP
麦季 Wheat season					
P0	25.5(1.9) a[1)]	64.0(5.6) ab	89.4(5.4) a	28.5	71.5
P30	46.5(12.6) a	53.2(18.9) a	99.7(31.4) a	46.7	53.3
P70	40.6(5.6) a	65.5(11.2) ab	106.1(8.4) a	38.3	61.7
P150	39.1(8.5) a	51.2(5.7) a	90.3(3.1) a	43.3	56.7
P300	108.1(21.3) b	99.0(10.5) b	207.1(23.8) b	52.2	47.8
稻季 Rice season					
P0	61.5(11.5) a	146.5(13.3) ab	214.8(21.1) a	28.6	68.2
P30	50.6(4.9) a	102.5(18.8) a	181.5(45.3) a	27.9	56.5
P70	79.2(15.2) a	142.3(16.4) ab	210.2(30.3) a	37.7	67.7
P150	89.9(6.4) a	184.7(27.3) b	281.1(31.2) a	32.0	65.7
P300	203.9(48.6) b	320.2(20.1) c	543.1(60.6) b	37.5	59.0

1) 相同的字母表示在 $p<0.05$ 水平下无显著差异 The same letter are not significantly different($p<0.05$)

表 2 磷肥施用对径流溶解磷中无机磷、有机磷排放量的影响

Table 2 Effect of P application rate on amount of DIP and DOP loaded by runoff

	磷排放量 Amount of P ($g\ hm^{-2}$)			占溶解磷比例 Percent. of DP(%)	
	无机磷 DIP	有机磷 DOP	溶解磷 DP	无机磷 DIP	有机磷 DOP
麦季 Wheat season					
P0	6.1	19.4	25.5	23.8	76.2
P30	12.8	35.5	46.5	27.6	76.4
P70	7.8	32.7	40.6	19.3	80.7
P150	17.1	22.0	39.1	43.7	56.3
P300	65.4	42.7	108.1	60.5	39.5
稻季 Rice season					
P0	29.3	32.2	61.5	47.7	52.3
P30	18.2	32.4	50.6	35.9	64.1
P70	37.7	41.2	79.2	47.6	52.0
P150	40.4	49.5	89.9	44.9	55.1
P300	158.5	45.4	203.9	77.7	22.3

从图 1、图 3 中还可看出, 与溶解无机磷浓度的变化有所不同, 同一次径流中不同处理之间溶解有机磷的浓度均无显著差异, 表明在试验所施磷肥水平下, 当季施用的磷肥并未增加溶解有机磷的浓度。而溶解无机磷随磷肥用量的增加而略有增加, 这就是在 P300 处理中溶解有机磷占溶解磷的比例低于溶解无机磷所占的比例的原因。持续过量施用磷肥对径流中溶解有机磷的影响应进一步的研究, 但一般认为溶解有机磷的来源有以下三方面: 1) 土壤中原有有机质分解出的低分子量有机磷; 2) 施入有机肥中的低分子量的有机磷; 3) 施入无机肥转化形成的低分子量有机磷。本试验结果至少可排除目前有第 3 种途径的可能(或者是没有测到其微小的增加量), 但可合理的推断当季施用的有机肥(如人、畜粪便、秸杆还田、污泥等) 很可能大大增加以溶解有机磷形式随径流进入水体的数量, 因而施用有机肥通过径流排放对水体富营养化的贡献可能大于无机磷肥。这就要求加强对有机肥施用加以科学管理, 而并非一味提倡的施用有机肥便是绿色环保的。

3 结　论

一年的试验结果表明, 太湖地区渗育性水稻土上径流磷中以颗粒磷为主。稻季径流磷排放以移栽后不久发生的第一次径流时最多。

本试验已有的数据表明, 通过径流排放的总磷除最高施肥处理 P 300 kg hm^{-2}达到 P 0.75 kg hm^{-2}外, 其余各施肥处理均与对照接近, 在 0.28～0.37 kg hm^{-2}之间。即使在最高施肥处理下, 通过径流损失的磷仍不到施磷量的 0.1%, 说明在目前水稻土的磷素水平下, 正常施用磷肥当季对水体的污染的贡献率不大。但考虑到径流溶解磷浓度均超过水体富营养化磷的阈值, 故来自农田径流的磷(如果进入水体前没有截留的话) 在水体的长期累积对富营养化也有一定的贡献。所以仍应注意该地区磷肥的合理施用。

除P300处理外, 其余处理在麦、稻季中均以溶解有机磷为主, 占溶解磷的比例在 52.0%～76.2% 之间。证明在一般磷肥用量下, 径流携带的农田可溶性磷中应是以有机磷为主。如仅以溶解无机磷作为溶解磷, 将大大低估径流溶解磷的排放及其对富营养化的贡献。施用有机肥对通过径流对水体富营养化的贡献可能大于无机肥, 应加强对有机肥施用的管理。施肥未增加径流中溶解有机磷的浓度, 但持续过量磷肥的施用对径流溶解有机磷的影响应做进一步的研究。

参 考 文 献

[1] Daniel T C, Sharpley A N, Lemunyon J L. Agricultural phosphorus and eutrophication: A symposium overview. J. Environ. Qual., 1998, 27: 251～257

[2] 范成新. 太湖水体生态环境历史演变. 湖泊科学, 1996, 8(4): 297～304. Fan C X. Historical evolution of water ecological setting in Taihu Lake (In Chinese). J. Lake Sci., 1996, 8(4): 297～304

[3] 吴炳方. 水田植物营养素的流失和控制措施. 环境科学, 1991, 12(3): 88～91. Wu B F. Botanical nutrients running off from paddy fields and the suitable control measures (In Chinese). Environmental Science, 1991, 12(3): 88～91

[4] Coote D R, MacDonald E M, Dickinson W T, *et al*. Agriculture and water quality in the Canadian Great Lakes Basin I. Representative agricultural watersheds. J. Environ. Qual., 1982, 11: 473～481

[5] Sharpley A N, Daniel T C, Sims J T, *et al*. Determining environmentally sound soil phosphorus levels. J. Soil and Water Conservation, 1996, 51(2): 160～166

[6] 单保庆, 尹澄清, 于静, 等. 降雨—径流过程中土壤表层磷迁移过程的模拟研究. 环境科学学报, 2001, 21(1): 7～12. Shan B Q, Yin C Q, Yu J, *et al*. Study in phosphorus transport in the surface layer of soil with rainfall simulation method(In Chinese). Acta Scientiae Circumstantiae, 2001, 21(1): 7～12

[7] Conter J B, Wetzel R G. Uptake of dissolved inorganic and organic phosphorus compounds by phytoplankton and bacterioplankton. Limnol. Oceanogr., 1992, 37(2): 232～243

[8] 黄邦钦, 王海黎, 洪华生, 等. 厦门海域浮游植物和细菌对溶解有机磷的利用. 厦门大学学报(自然科学版), 1996, 35(4): 625～630. Huang B Q, Wang H L, Hong H S, *et al*. Uptake of Dissolved Organic Phosphorus compounds by phytoplankton and bacterioplankton in Xiamen Seawaters(In Chinese). J. Xiamen University (Natural Science), 1996, 35(4): 625～630

[9] 杨金玲, 张甘霖, 张华, 等. 亚热带丘陵区域不同土地利用系统磷素径流输出特征. 环境科学, 2002, 23(5): 36～41. Yang J L, Zhang G L, Zhang H, *et al*. Runoff phosphorus discharge from different land use system in Subtropical Hilly Areas(In Chinese). Enviro. Sci., 2002, 23(5): 36～41

[10] Zhang H C, Cao Z H, Shen Q R, *et al*. Effect of phosphate fertilizer application on phosphorus (P) losses from paddy soils in Taihu Lake Region I. Effect of phosphate fertilizer rate on P losses from paddy soil. Chemosphere, 2003, 50: 695～701

[11] 卜兆宏. 长江流域太湖区降雨侵蚀力及其应用的研究. 农村生态环境, 1994, 10(4): 1～6. Bu Z H. A study on rainfall erosivity and its application in the Taihu Lake region of Changjiang River basin(In Chinese). Rural Eco-Environment, 1994, 10(4): 1～6

[12] 徐琪. 论水稻土肥力进化与土壤质量—以太湖地区为例. 长江流域资源与环境, 2001, 10(4): 323～328. Xu Q. Evolution of soil fertility in relation to its quality in paddy field of the TaiHu Lake

area(In Chinese). Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2001, 10(4): 323~328

[13] 徐琪, 陆彦椿, 刘元昌, 等著. 中国太湖地区水稻土. 上海: 上海科学技术出版社, 1980. 58. Xu Q, Lu Y C, Liu Y C, *et al*. eds. The Paddy Soil of Tai-Hu Region in China(In Chinese). Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1980. 58

[14] 郭丰, 聂鑫, 周时强, 等. 同安湾潘涂对虾养殖垦区不同形态磷的含量与动态. 水产学报, 2001, 25(5): 443~447. Guo F, Nie X, Zhou S Q, *et al*. The contents and dynamics of phosphorus in shrimp culture area of Pantu, Tong'an Bay, Xiamei(In Chinese). Journal of Fisheries of China, 2001, 25(5): 443~447

[15] 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

STUDY ON THE FRACTIONATION OF PHOSPHORUS LOADED BY THE RUNOFF AND DRAINAGE FLOWS OF PERCOGENIC PADDY SOILS IN THE TAIHU LAKE REGION

Wang Xiaozhi[1,2] Cao Zhihong[2] Sheng Haijun[1] Feng Ke[1] Zhu Jianguo[2]

(1 Agricultural College, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225009, China)

(2 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract A field plot experiment with five P application rates in 4 replications was conducted on the Percogenic paddy soil in the Taihu Lake Region (TLR) under wheat-rice rotation in the year 2001 to 2002, in order to estimate the total phosphorus (TP) lost via drainage flow in wheat season and runoff flow in rice season and to figure out various parts of P loaded by both runoff and drainage flows. Results indicated that the highest P lost via runoff and drainage flow was of 0.75 kg hm^{-2}, which is less than 0.1% of P applied. However, the concentration of dissolved P in both runoff and drainage flow were higher than 0.02 mg L^{-1}(the threshold concentration of P for inland water eutrophication). The result suggested that continuous P application with rate higher than the P demand by crops, certainly increase the risk of water eutrophication. Total P loaded by runoff and drainage flow can be partitioned as particulate P (PP), representing more than 60% of the TP, and dissolved phosphorus (DP), less than 40%. Among them dissolved organic phosphorus (DOP) was 52.0%~76.2% in all treatments except for the highest P rate applied. Therefore, the amount and the contribution of DP in the runoff and drainage flow have been underestimated, because usually only dissolved inorganic phosphorus (DIP) is measured while DOP be discharged. The concentration of DOP in the runoff and drainage flow did not increase along with increasing P application rates in this experiment. It indicates that the source of DOP is mainly the interior soil organic P dissolved by the runoff and drainage water.

Key words Percogenic paddy soils; Runoff; P loss; Dissolved Organic Phosphorus (DOP); Eutrophication