

磷在稻田土壤中的淋溶和迁移模拟研究

周全来^{1,2}, 赵牧秋^{1,2}, 鲁彩艳^{1,2}, 史奕¹, 陈欣^{1*}

(1 中国科学院沈阳应用生态研究所陆地生态过程重点实验室, 沈阳 110016; 2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 稻田土壤磷 (P) 的淋溶和迁移受到人们的普遍关注。对水稻土施 P 后立即进行高强度淋洗的研究表明, 施 P 对各处理淋出液的 P 浓度没有明显影响, 各种形态的 P 淋溶到 60 cm 土层以下的浓度不超过 0.1 mg/kg, 折合每公顷损失 P 量分别为可溶活性 P 约 1.2 ~ 1.4 kg, 非活性 P 为 1.2 ~ 1.6 kg, 全 P 为 2.5 ~ 2.8 kg, 对地下水影响小。施 P 量低于 400 kg/hm² 时, 施入的 P 没有移出上层土壤; 当施 P 量高于 800 kg/hm² 时, P 从上层向下移动现象明显; 施 P 量超过 1600 kg/hm² 后, 移动距离可达 10 cm。并预测出上层土壤可能发生 P 的移动和淋溶的土壤 Olsen-P 阈值为 74.1 mg/kg, 超过该值发生 P 移动和淋溶的可能性增加。

关键词: 稻田土壤; 磷; 淋溶; 迁移

中图分类号: S143.2

磷 (P) 是农业生产中关键元素之一, 由于 P 易被土壤固定, P 肥施入土壤后的生物有效性较低, 当季利用率大体在 10% ~ 25% 的范围内^[1]。所以, 传统观点认为施入土壤中的 P 绝大多数为土壤所固持, 不易为植物利用, 其进入土壤溶液中只是很少的一部分, 即使耕层以下 60 cm 土壤溶液中的 P 全部随水淋溶出来, 其损失也很小^[2]。但是自从农田底层土壤排水中发现有 P 浓度升高现象以来^[3], 有人得出淋溶作用损失 P 量与径流损失量相当或更多的结论^[4], 并认为一次大剂量施 P 使土壤溶液中 P 增加后, 要经过多年时间才能降到安全水平以下^[5]。以上两种观点都有其局限性。首先, 当土壤溶液中 P 浓度减少时, 土壤中各种形态的 P 都可以不同程度通过分解、解析或溶解进入土壤溶液中, 为植物利用^[6-7]。土壤含 P 低或施用 P 量较少时, 由于土壤的固持作用, 土壤溶液中 P 含量极微, 甚至不易测定, 但当施 P 量超过某一阈值后, 由于土壤中 P 吸附位点饱和, 土壤溶液中可溶性 P 浓度会迅速增加, 可能导致 P 随亚表层径流沿土壤剖面向下移动^[6,8]; 其次, P 在不同土壤中的淋溶阈值极易受土壤性质的影响, 尤其是土壤 pH 值^[6], 因此, 对不同地区、不同性质的土壤, P 在土壤中的表现会有不同。

对于 P 的下移过程, 隋红建^[9]认为 P 下移是一

个不断吸持与扩散的过程, P 在土壤剖面垂直方向迁移很少, 主要集中在耕层土壤。土壤对 P 的运移有强烈的阻滞作用^[10], 稻田浸水环境下, 一旦 P 被土壤固定后, 也很难向下迁移^[11]。虽然对 P 施入稻田土壤中能否发生移动, 发生 P 移动的条件及移动距离的研究很少有人报道, 但开展这些研究对施入土壤中 P 的特性、稻田 P 损失和产生 P 的面源污染的可能性等都会有更深入的了解。本试验采用室内模拟方法, 对稻田土壤施以不同剂量 P 肥, 研究施入土壤中的 P 的淋溶损失和上层土壤中 P 的向下移动可能性及发生 P 移动的条件, 从而掌握 P 肥在稻田土壤中的淋溶和移动规律, 为 P 肥合理施用及环境管理提供科学依据。

1 材料方法

1.1 供试土壤

供试土壤采自中国科学院沈阳生态实验站 (41°31'N, 123°24'E) 水稻土, 其上层土 (0 ~ 20 cm) 和下层土 (20 ~ 60 cm) 主要理化性质见表 1。

1.2 试验设计

试验共设 6 个处理, 即 P₀, 不施 P 对照 (CK); P₁₀₀ 施 P 量为 P 100 kg/hm²; P₂₀₀ 施 P 量为 P 200 kg/hm²; P₄₀₀ 施 P 量为 P 400 kg/hm²; P₈₀₀ 施 P 量为 P 800 kg/hm²; P₁₆₀₀ 施 P 量为 P 1600 kg/hm², 所施

①基金项目: 国家自然科学基金 (30470336) 和中国科学院陆地生态过程重点实验室基金资助。

* 通讯作者 (chenxin@iae.ac.cn)

作者简介: 周全来 (1974—), 男, 硕士研究生, 主要从事农田土壤磷素循环过程研究。E-mail: zhouquanlai@126.com

表1 供试土壤主要理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of tested soil

土壤层次	总 C (g/kg)	全 N (g/kg)	全 P (g/kg)	速效 K (mg/g)	速效 P (mg/kg)	pH
上层 (0~20 cm)	10.10	1.20	0.25	98.2	29.6	6.7
下层 (20~60 cm)	7.54	0.87	0.26	87.3	14.8	7.4

用的 P 肥为重过磷酸钙，研磨，过 0.1 mm 筛。

将 100 目尼龙网置于管底部出水口上，上方装填 30 mm 经酸洗、漂净的沙子，并将沙子表面压平实，然后称 2.0 kg 下层土，每次装填 1/3，并轻拍排除大孔隙和裂缝，令其体积质量 (容重) 在 1.2 g/cm³ 左右，最后加蒸馏水使土壤紧实，上方保持一薄层水，每天加入 10 cm 蒸馏水淋洗 1 次，淋洗 5 天，然后装填上层土。将上层土壤 0.83 kg 按不同处理撒入过筛后的 P 肥，在塑料袋中混合均匀，按上述方法装入土柱中，约高 20 cm，然后徐徐注入蒸馏水，使土面有约 12 cm 深水层，并立即开始淋洗试验，每天淋洗 390 ml 水量 (约 100 mm)，接收淋洗液，计量体积 (图 1)。淋洗试验持续进行 30 天，于试验的第 1、2、3、4、8、10、18 和 30 天取样，总计淋洗水量约 11700 ml (3000 mm)。计算每天淋洗液中 P 量和 30 天淋失 P 总量。淋溶量的计算用以下公式：

$$Q = KS \sum_{i=1}^8 C_i \Delta T V_i$$

Q 为淋溶量 (kg/hm²)， C_i 为两次相邻采样时淋溶样品的平均浓度， V_i 为两次相邻采样时淋溶样品的平均体积 (ml)， ΔT 为两次采样的间隔时间 (天)， S 为土柱横截面面积 (cm²)， K 为单位转换系数。

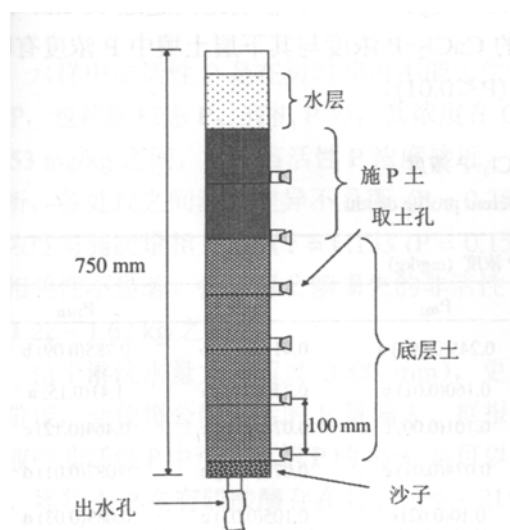


图1 土柱填充设计

Fig. 1 Design of soil-filling lysimeter

完成淋洗试验后，将管中的水排空，将管平放，拔去胶塞，用不锈钢勺从孔中取足量的土，风干，测定可溶性 P (CaCl₂-P) 和 Olsen-P 浓度。

1.3 统计分析方法

用 split-line 模型预测在该供试土壤上发生 P 淋溶和迁移时土壤 Olsen-P 阈值^[12-13]，该模型即是用两条不同斜率的直线描述土壤测试 P (STP: soil test phosphorus，此处用土壤 Olsen-P) 与可溶性 P (CaCl₂-P) 之间的关系，两条直线如下：

当土壤中 STP (Olsen-P) 低于阈值时，

$$\text{CaCl}_2\text{-P} = m_1 (\text{STP}) + c$$

当土壤中 STP (Olsen-P) 高于阈值时；

$$\text{CaCl}_2\text{-P} = m_1 (\text{STP}) + m_2 (\text{STP} - T_{\text{STP}}) + c$$

公式中 c 是截距； m_1 是当土壤中 STP 低于阈值时的斜率； m_2 是土壤 STP 高于阈值时的直线斜率与 m_1 的差； T_{STP} 是该土壤 STP (Olsen-P) 阈值。

c 、 m_1 、 m_2 、 T_{STP} 4 个参数利用统计软件 SAS8.2 中非线性回归分析 (PROC NLIN) 高斯-牛顿 (Gauss-Newton) 法估计得到^[14]。

1.4 分析方法

接收液中全 P (TP) 浓度：将淋洗液用 H₂SO₄-HClO₄ 消煮，钼蓝比色法测定；可溶性 P (DRP)：将淋洗液用 0.45 μm 滤膜过滤后，采用异丁醇萃取-钼蓝比色法测定。由此可得以下项目：

非活性 P (包括土壤颗粒态 P、有机态 P 和可溶性有机 P) (UP) = TP-DRP；土壤 Olsen-P 采用碳酸氢钠法测定；土壤 CaCl₂-P 用异丁醇萃取-钼蓝比色法测定，其他各项测定采用常规分析方法^[15]。

2 结果与讨论

2.1 施 P 对土壤 Olsen-P 移动性影响

Olsen-P 是土壤速效 P，易于为土壤根系吸收，从淋溶土柱的不同层次土壤的 Olsen-P 测定结果 (表 2) 可以看出，上层土 (0~20 cm) 与下层土 (20~60 cm) 中 Olsen-P 浓度存在明显差异 ($P < 0.01$)，不同处理上层土两个取样点 (10 cm 和 20 cm) 之间，存在明显差异，但又有所不同。P₀~P₄₀₀ 处理 10 cm

取样点处 P 浓度高于 20 cm 处 Olsen-P 浓度, 但施 P 量超过 800 kg/hm² 后的两个处理 (P₈₀₀ 和 P₁₆₀₀), 上层土中 20 cm 取样点处 Olsen-P 浓度高于 10 cm 取样点处, 上述现象的原因是由于施 P 量低于 400 kg/hm² 时, P 溶出的量很少, 移动距离很短, 基本上不会离开上层土 (0~20 cm), 当施 P 量高于 800 kg/hm² 后, P 溶出量和移动距离增加, 致使 20~30

cm 之间的下层土 Olsen-P 浓度也有大幅增加。特别是处理 P₁₆₀₀ 的 30 cm 取样点处 Olsen-P 浓度明显高于 40~60 cm 各点浓度, 表明当施 P 量超过 1600 kg/hm² 以后, P 在土柱中移动距离可以超过 10 cm, 可见在施 P 量低于 400 kg/hm² 时, 对土壤中 P 移动影响并不大, 而高于这一浓度后, 则发生明显的垂直迁移。

表 2 土壤剖面不同深度土壤 Olsen-P 浓度

Table 2 Concentrations of soil Olsen-P at different profile depths

深度 (cm)	不同处理 Olsen-P 浓度 (mg/kg)					
	P ₀	P ₁₀₀	P ₂₀₀	P ₄₀₀	P ₈₀₀	P ₁₆₀₀
10	28.6 (0.70) a	35.9 (0.57) a	43.7 (1.02) a	63.3 (1.94) a	82.8 (5.80) b	117.5 (1.32) b
20	23.4 (2.17) b	30.4 (2.11) b	35.9 (5.16) b	52.3 (3.90) b	94.5 (7.07) a	146.2 (2.84) a
30	16.2 (0.58) c	16.0 (1.01) c	16.2 (0.68) c	17.0 (0.46) c	18.1 (2.19) c	61.7 (6.93) c
40	15.2 (0.68) cd	14.8 (0.89) c	14.9 (0.43) c	15.6 (0.12) c	15.4 (0.10) c	15.6 (0.17) d
50	15.5 (0.43) cd	15.1 (1.04) c	15.7 (0.40) c	15.9 (0.52) c	15.0 (1.00) c	16.3 (0.20) d
60	13.7 (1.21) d	14.4 (0.43) c	13.7 (0.66) c	13.8 (0.68) c	14.5 (1.22) c	13.7 (1.27) d

注: 同列不同字母表示均值在 $P<0.05$ 水平下显著, 括号内值为标准偏差, 下同。

在一般施 P 量下, 由于土壤溶液中的 P 会逐渐被土壤吸附或与 Fe、Al 等形成沉淀物, 难以借助于水的作用向下扩散和移动。但是当土壤施 P 量超过土壤对 P 的吸附饱和度, 土壤中 P 浓度迅速增加, 借助于水的作用扩散速度会增加, 而且可能会出现质流, 使 P 移动速度猛增。从本试验可知, 对供试土壤施 P 超过 800 kg/hm², P 明显移动; 当施 P 量超过 1600 kg/hm² 后, P 的移动距离已超过 10 cm。

2.2 施 P 对土壤 CaCl₂-P 移动性影响

用 0.01 mol/L CaCl₂ 提取的 P 浓度与土壤渗出水中的 P 浓度相关性明显, 可以用作表征土壤中溶于水中的 P 浓度, CaCl₂-P 是易于随水淋失到底层的

P 形态^[4, 6]。从表 3 中可见, P₀~P₄₀₀ 处理上层土壤 20 cm 取样点处 CaCl₂-P 浓度略低于 10 cm 处浓度, 原因是由于 20 cm 采样点处土样中包含了少部分下层土, 使浸提液中 CaCl₂-P 浓度偏低。而 P₈₀₀ 和 P₁₆₀₀ 处理 10 cm 处 CaCl₂-P 浓度低于 20 cm 处 CaCl₂-P 浓度, 表明施 P 超过 800 kg/hm² 后, 使土壤中的 P 发生明显移动, 用 0.01 mol/L CaCl₂ 溶液能浸提出更多 P。同 Olsen-P 一样, P₁₆₀₀ 处理 30 cm 取样点处 CaCl₂-P 浓度明显高于 40~60 cm 取样点, 表明施 P 量超过 1600 kg/hm² 时, P 移动距离超过 10 cm, 所浸提出的 CaCl₂-P 浓度与其下层土壤中 P 浓度有明显差异 ($P<0.01$)。

表 3 土壤剖面不同深度土壤 CaCl₂-P 浓度

Table 3 Concentrations of soil CaCl₂-P at different profile depths

深度 (cm)	不同处理 CaCl ₂ -P 浓度 (mg/kg)					
	P ₀	P ₁₀₀	P ₂₀₀	P ₄₀₀	P ₈₀₀	P ₁₆₀₀
10	0.082(0.02) a	0.111(0.01) a	0.152(0.03) a	0.245(0.001) a	0.414(0.11) b	0.785(0.09) b
20	0.078(0.02) a	0.097(0.02) ab	0.150(0.06) a	0.160(0.01) b	0.730(0.06) a	1.41(0.15) a
30	0.056(0.01) a	0.070(0.02) ab	0.087(0.01) a	0.101(0.00) c	0.078(0.02) c	0.464(0.12) c
40	0.057(0.02) a	0.057(0.01) c	0.072(0.01) a	0.074(0.01) c	0.077(0.02) c	0.087(0.01) d
50	0.065(0.03) a	0.08(0.05) ab	0.087(0.03) a	0.10(0.02) c	0.105(0.03) c	0.089(0.03) d
60	0.041(0.01) a	0.048(0.01) c	0.078(0.01) a	0.091(0.01) c	0.083(0.03) c	0.098(0.08) d

2.3 淋出液中 P 浓度

一般可溶活性 P 被认为是可以直接淋溶到土壤下层的 P，其活性较强，也易于为土壤吸附，可溶活性 P 向下淋洗过程，是不断参与土壤的吸附与解析过程，淋出液中 P 是吸附与解析平衡后土壤溶液中的 P。从表 4 可见，不同处理在淋洗水量相当的情况下，8 次取样平均可溶活性 P 浓度在 0.039 ~

0.048 mg/L 之间，全 P 浓度范围在 0.082 ~ 0.093 mg/L 之间，不同处理可溶性 P 浓度间虽存在差异 ($P < 0.05$)，但其浓度并不随施 P 量增加而递增，全 P 损失量也不随施用量增加而递增，说明供试土壤对 P 吸附能力比较强。可溶活性 P 淋失量折合成每公倾损失在 1.2 ~ 1.4 kg 之间，全 P 损失 P 量约为 2.5 ~ 2.8 kg/hm²。

表 4 接收液中可溶活性 P、全 P 和非活性 P 浓度及每公倾淋失量

Table 4 Concentrations of dissolved reactive phosphorus(DRP), unreactive phosphorus (UP) and total phosphorus (TP) as well as P leaching loss per hectare

P 组分	处理	样品中的 P 浓度 (mg/L)	淋溶损失 (mg)	每公倾 P 损失 (kg)
可溶活性 P	P ₀	0.043 (0.007) ab	0.503	1.308
	P ₁₀₀	0.039 (0.009) b	0.455	1.183
	P ₂₀₀	0.048 (0.014) a	0.563	1.464
	P ₄₀₀	0.040 (0.012) b	0.468	1.218
	P ₈₀₀	0.039 (0.009) b	0.457	1.189
	P ₁₆₀₀	0.040 (0.010) b	0.469	1.221
非活性 P	P ₀	0.043 (0.019) a	0.503	1.308
	P ₁₀₀	0.049 (0.018) a	0.572	1.486
	P ₂₀₀	0.040 (0.020) a	0.469	1.220
	P ₄₀₀	0.053 (0.019) a	0.621	1.613
	P ₈₀₀	0.052 (0.025) a	0.634	1.647
	P ₁₆₀₀	0.047 (0.027) a	0.599	1.557
全 P	P ₀	0.082 (0.014) a	0.960	2.495
	P ₁₀₀	0.084 (0.011) a	0.980	2.548
	P ₂₀₀	0.084 (0.019) a	0.985	2.561
	P ₄₀₀	0.093 (0.018) a	1.089	2.831
	P ₈₀₀	0.088 (0.021) a	1.033	2.684
	P ₁₆₀₀	0.082 (0.024) a	0.963	2.504

水样中非活性 P 是在短时间内不能为生物利用的 P，包括颗粒态 P、有机 P 等，其浓度在 0.043 ~ 0.053 mg/kg 之间，与可溶活性 P 浓度接近，经方差分析，各处理之间浓度差异不显著 ($P = 0.256$)，且其浓度与施肥量相关系数 $r = 0.133$ ($P = 0.158$)，二者相关性不显著，折合每公倾损失的非活性 P 量约为 1.22 ~ 1.62 kg 之间。

由于淋洗水量大 (超过 3000 mm)，更多的 P 被带走，会使每公倾带走的 P 量偏大。据报道土壤溶液中非活性 P 中可溶有机 P 的 45% 是可以水解的^[13]，颗粒态 P 在有磷酸酶存在时，10% ~ 21% 也会水解为生物可用 P^[16]，总之，土壤溶液总 P 的约 50% 可以被磷酸酶水解^[17]，其余部分 P 性质仍很稳

定，但本研究中 P 的淋失量都低于 0.1 mg/L，因此，对面源污染贡献小。

2.4 土壤 P 淋溶和移动的潜力

土壤 Olsen-P 浓度与 0.01 mol/L CaCl₂ 浸提 P 浓度之间有很好的相关性，当土壤 Olsen-P 浓度高于阈值以后，水溶性 P 浓度会迅速提高，发生 P 垂直迁移。Hesketh 和 Brookes^[8] 认为 0.01 mol/L CaCl₂ 浸提 P 近似为土壤排出水中 P，Olsen-P 可以作为预测产生 P 淋溶损失指标。为预测上层土壤 P 淋溶可能性，用上层土测得的土壤 Olsen-P 为横坐标，CaCl₂-P 浓度值为纵坐标，用分段回归 (split-line) 模型拟合，如图 2 所示，图中两条直线的交点处 Olsen-P 浓度为 74.1 mg/kg，如果土壤

Olsen-P 浓度高于该值, 土壤浸提出的 CaCl_2 -P 浓度升高迅速, 易于随水淋失, 可见, 该土壤最大有效 P (Olsen-P) 持 P 能力约为 74.1 mg/kg。

从表 3 结果可见, 当施 P 量为 800 kg/hm^2 时, 土壤中 Olsen-P 在 10 cm 和 20 cm 两取样点处 Olsen-P 浓度分别为 82.8 mg/kg 和 94.5 mg/kg ; 当施 P 量为 1600 kg/hm^2 时, 10 cm 和 20 cm 两取样点处 Olsen-P 浓度分别为 117.5 mg/kg 和 146.2 mg/kg , 都高于阈值, 表明土壤经过 30 天的淋洗后, 其淋失潜力仍然很大。虽然田间土壤对速效 P 的固定作用及植物对 P 的利用会使上层土壤中的 P 量逐渐减少, 但要达到低于淋溶阈值仍需较长时间。

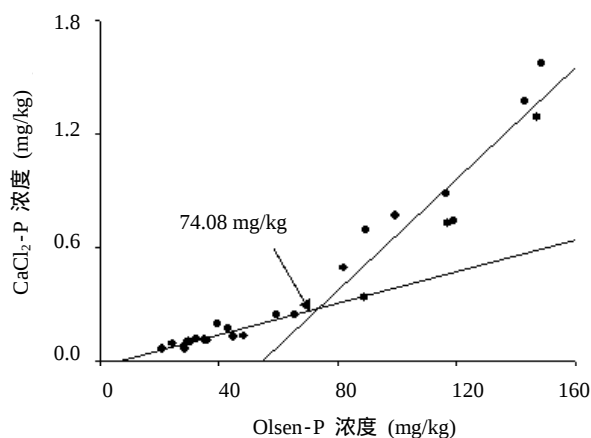


图 2 0~20 cm 土壤 CaCl_2 -P 和 Olsen-P 关系

Fig. 2 Relationship between CaCl_2 -P and Olsen-P at 0~20 cm topsoil

3 结论

(1) 本试验淋溶过程损失的 P 量很少, 各种形态 P 在样品中的浓度不超过 0.1 mg/kg , 折合每公顷损失 P 量分别为可溶活性 P 约 $1.2 \sim 1.4 \text{ kg}$, 颗粒态 P 为 $1.2 \sim 1.6 \text{ kg}$, 全 P 为 $2.5 \sim 2.8 \text{ kg}$ 。施入土壤中的 P 多被上层土壤固定, 没有增加下层淋出水中的 P 量, 对地下水影响小。

(2) 施 P 量低于 400 kg/hm^2 时, 土壤中 P 没有超过 P 吸附饱和度, 施入的 P 没有移出上层土壤, 当施 P 量高于 800 kg/hm^2 时, 土壤对 P 吸附接近饱和, P 向下移动现象明显, 施入 P 量超过 1600 kg/hm^2 时, 移动距离可达 10 cm 以上。

(3) 施 P 量低于 400 kg/hm^2 时, 土壤浸提出的 CaCl_2 -P 浓度低, 不易进入土壤溶液中, 施 P 量高于 800 kg/hm^2 后, CaCl_2 -P 浓度迅速增加, 进入土壤中的 P 量会迅速增加。

(4) 通过 split-line 模型预测出土壤 Olsen-P 超过 74.1 mg/kg 时, 发生 P 移动和淋溶的可能性增加, 该值也可作为土壤最大有效 P (Olsen-P) 持 P 能力。本试验中当 P 施用量超过 800 kg/hm^2 时, 试验 30 天后, 仍可能发生 P 移动和淋溶。

参考文献:

- [1] 沈善敏. 论我国磷肥发展与对策. 土壤通报, 1985, 16 (3): 97-103
- [2] 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. 中国农业科学, 2000, 33 (2): 68-74
- [3] Heckrath G, Brookes PC, Poulton PR, Goulding KWT. Phosphorus leaching from containing different phosphorus concentrations in the Broadbalk experiment. J. Environ. Qual., 1995, 24: 904-910
- [4] McDowell RW, Sharpley AN. Approximating Phosphorus Release from Soils to Surface Runoff and Subsurface Drainage. J. Environ. Qual., 2001, 30: 508-520
- [5] McDowell RW, Sharpley AN. Variation of phosphorus leached from Pennsylvanian soils amended with manures, composts or inorganic fertilizer. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2004, 102: 17-27
- [6] McDowell RW, Mahieu N, Brookes PC, Poulton PR. Mechanisms of phosphorus solubilisation in a limed soil as a function of pH. Chemosphere, 2003, 51: 685-692
- [7] 鲁如坤, 时正元, 钱承梁. 磷在土壤中有效性的衰减. 土壤学报, 2000, 27 (3): 323-329
- [8] McDowell RW, Sharpley AN, Brookes PC, Poulton PR. Relationship between soil test phosphorus and phosphorus release to solution. Soil Sci., 2000, 165 (2): 137-149
- [9] 隋红建, 杨邦杰, 张家炳. 入渗条件下土壤中磷离子迁移的数值模拟. 环境科学学报, 1996, 16 (3): 302-307
- [10] 吕家珑, 张一平, 张君常, 苏仕平. 土壤磷运移研究. 土壤学报, 1999, 36 (1): 75-82
- [11] 谢学俭, 冉炜, 沈其荣. 淹水条件下水稻田中磷的淋溶研究. 土壤, 2003, 35 (6): 506-509
- [12] Hesketh N, Brookes PC. Development of an indicator for risk of phosphorus leaching. J. Environ. Qual., 2000, 29: 105-110
- [13] McDowell RW, Koopmans GF. Assessing the bioavailability of dissolved organic phosphorus in pasture

- and cultivated soils treated with different rates of nitrogen fertilizer. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, 38 (1): 61-70
- [14] 阮桂海. SAS 统计分析实用大全. 北京: 清华大学出版社, 2003: 408-422
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 125-136
- [16] Toor GS, Condon LM, Dib HJ, Cameron KC, Cade-Menun BJ. Characterization of organic phosphorus in leachate from a grassland soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 2003, 35: 1317-1323
- [17] Pant HK, Edwards AC, Vaughan D. Extraction, molecular fractionation and enzyme degradation of organically associated phosphorus in soil solutions. *Biology and Fertility of Soils*, 1994, 17: 196-200

Simulation of Leaching and Transport of P in Paddy Soil

ZHOU Quan-lai^{1,2}, ZHAO Mu-qiu^{1,2}, LU Cai-yan^{1,2}, SHI Yi¹, CHEN Xin¹

(1 Key Laboratory of Terrestrial Ecological Process, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

2 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: P leaching and transport in paddy soil has been a public concern for a long time. A lab leaching experiment was conducted to study P leaching and vertical transport in paddy soil after P was applied to tested paddy soil. Results showed no significant influence of P application on P concentration in leached-water samples obtained by 60 cm high soil-filling lysimeters in different treatments; P concentrations of different fractions of leached-water samples were all less than 0.1 mg/L, equal to 1.2 ~ 1.4 kg/hm² of dissolved reactive phosphorus (DRP), 1.2 ~ 1.6 kg/hm² of unreactive phosphorus (UP) and 2.5 ~ 2.8 kg/hm² of total phosphorus (TP) lost from tested soil, respectively, thus, could influence little on groundwater; P did not transport to subsoil as P applied amount less than 400 kg/hm², but an obvious P transport was found as P applied amount above 800 kg/hm², which could reach 10 cm when P applied amount above 1600 kg/hm²; 74.1 mg/kg was forecasted as threshold of Olsen-P in top soil to leach and transport to subsoil, and possibility of P leaching and transport would increase if P concentration beyond it.

Key words: Paddy soil, P, Leaching, Transport