

红壤性水稻土磷素淋溶流失特征及环境阈值研究*

段永蕙¹, 刘娟^{2,4}, 刘惠见^{3,4}, 张淑香⁵, 张乃明^{3,4**}

(1. 山西财经大学 资源环境学院, 山西 太原 030006;

2. 云南农业大学 植物保护学院, 云南 昆明 650201;

3. 云南农业大学 资源与环境学院, 云南 昆明 650201;

4. 云南省土壤培肥与污染修复工程实验室, 云南 昆明 650201;

5. 中国农业科学院 农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要:【目的】揭示不同磷含量水平下红壤性水稻土磷素淋溶流失特征及土壤磷素环境阈值。【方法】选取低(P1)、中(P2)、高(P3)3个磷素水平的红壤性水稻土作为研究对象,采用土柱渗漏试验方法,研究磷素在水稻土剖面中的空间分布特征、土壤渗滤液中总磷(TP)和可溶性总磷(TDP)的含量、流失量特征以及土壤磷素环境阈值。【结果】不同磷素水平红壤水稻土全磷和 Olsen-P 含量在 0~60 cm 都有不同程度的累积,在土壤剖面上大致呈现出随着土壤剖面深度的增加,磷素累积量逐渐减少后趋于稳定的趋势;从土壤渗滤液中不同磷形态的含量特征来看,不同磷水平水稻土渗滤液中 TP、TDP 和 PP 含量和流失量都呈现出 P3>P2>P1 的特点,与土壤表层 Olsen-P 含量分布规律一致;红壤性水稻土发生淋溶时的土壤磷素环境阈值为 50.34 mg/kg。【结论】滇中红壤性水稻土可能存在磷淋失风险,且土壤中磷素 Olsen-P 含量越高,淋失风险越大。

关键词: 红壤性水稻土; 磷素; 淋溶; 环境阈值

中图分类号: S 158.5

文献标识码: A

文章编号: 1004-390X(2019)06-1070-06

Characteristics of Phosphorus Leaching Losses and Environmental Threshold in Red Paddy Soils

DUAN Yonghui¹, LIU Juan^{2,4}, LIU Huijian^{3,4}, ZHANG Shuxiang⁵, ZHANG Naiming^{3,4}

(1. College of Resources and Environment, Shanxi University of Finance and Economics, Taiyuan 030006, China;

2. College of Plant Protection, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China;

3. College of Resource and Environmental Science, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China;

4. Yunnan Soil Fertility and Pollution Restoration Laboratory, Kunming 650201, China; 5. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: [Purpose] To explore the characteristics of phosphorus leaching losses and soil phosphorus environmental threshold in red paddy soils under different phosphorus levels. [Method] We collected paddy soil with three phosphorus levels (P1, P2 and P3), a soil column simulation experiment was conducted to study the spatial distribution characteristics of phosphorus in four soil profiles, as well as TP, TDP content, loss characteristics of soil leakage and put forward the environmental

收稿日期: 2018-10-13

修回日期: 2019-08-27

网络首发时间: 2019-11-08 09:46:56

*基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大课题(2012ZX07102-003); 云南省科技合作计划(2015IC022); 云南省科技创新人才计划项目(2015HC018)。

作者简介: 段永蕙(1964—),女,山西洪洞人,硕士,教授,主要从事环境地学、环境管理研究。

E-mail: duan.yonghui@163.com

**通信作者 Corresponding author: 张乃明(1963—),男,山西长治人,博士,教授,主要从事土壤培肥与污染修复研究。E-mail: zhangnaiming@sina.com

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1044.S.20191107.1448.002.html>



threshold value of soil phosphorus. [Result] The contents of total phosphorus and available phosphorus in red paddy soil at different P levels were accumulated at 0-60 cm soil layers. In the soil profile, the phosphorus accumulation gradually decreased and tended to stabilize as the soil profile depth increases. The concentrations and infiltration loss of TP, TDP and PP in the leakage fluid of red paddy soil with different phosphorus levels showed $P_3 > P_2 > P_1$, which was consistent with the distribution of Olsen-P content in soil surface. The soil phosphorus threshold value of red paddy soil was 50.34 mg/kg. [Conclusion] There may be a risk of phosphorus leaching in red paddy soil in Central Yunnan, and the higher Olsen-P content was in the soil, the greater the risk of leaching was.

Keywords: red paddy soil; phosphorus; leaching loss; the environmental threshold value

磷既是植物生长必需的营养元素, 又是地表水富营养化的限制因子, 长期施用磷肥已导致磷素在水稻土中累积明显, 增加了磷素流失导致水体富营养化的风险。目前, 中国对水稻土磷素的研究主要集中在太湖地区^[1]。研究发现: 施磷能增加土壤磷素渗漏迁移的风险^[2], 水稻土磷素淋溶流失的主要形态为可溶态或颗粒态^[3], 且土壤中磷素达到一定水平, 磷的流失量随着土壤磷素水平的提高而急剧增加^[4]。水稻土在云南省总面积虽然不大, 但分布较为广泛, 特别是九大高原湖泊所在流域都有水稻土的分布; 其中, 红壤性水稻土约占全省水田面积的 40%。红壤发育的水稻土由于长期受施肥、灌溉等因素的影响^[5], 产生周期性干湿交替和氧化还原交替过程, 导致土壤中元素的淋溶与淀积, 在一定程度上仍继承了地带性土壤的某些特性, 但又与一般水稻土有所差异^[6]。以往对红壤性水稻土的研究主要集中于长期不同施肥条件下肥力演变、磷素累积和形态变化、磷素吸附特性及其影响因素方面的研究^[7-8]。水稻土在淹水条件下, 下渗是磷素流失的主要方式^[9], 而关于红壤性水稻土淋溶流失特征及其环境阈值的报道目前还很少。本研究选取滇中 3 个磷水平红壤性水稻土作为研究对象, 采用土柱模拟试验方法, 探讨红壤性水稻土磷素淋溶流失情况以及与土壤 Olsen-P 的关系, 对于合理使用磷

肥、控制农田磷面源污染、促进农业可持续发展具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 试验区概况及样品采集

供试土壤为第四纪红色黏土发育而成的水稻土, 采样点位于昆明市宜良县 (E 103°20'33", N 25°6'45"), 属于北亚热带季风气候, 年均温 16.3 ℃, 年均降雨量 898.9 mm, 降雨集中在 7、8 月, 宜良县土壤以红壤为主, 水稻土为县内粮食生产的主要土类。于 2017 年 3 月田面水完全落干水分后, 按照“S”形 5 点采样法采集耕层土样 (0~20 cm) 及剖面土壤样品, 采用自下而上分层采集, 每个层次分为 0~20 cm、>20~40 cm、>40~60 cm 共 3 个层面, 采集土壤大致分为低 (P1)、中 (P2)、高 (P3) 3 个磷素水平。供试土壤的基本性质如表 1 所示。

1.2 渗漏试验装置

将 PVC 管 (直径 10 cm) 截取为 3 段, 每段 20 cm, 截取后的每段 PVC 管底端用尼龙网包裹, 然后将不同磷素水平土壤装入土柱, 用 PVC 接口连接成高 60 cm 的土柱桶。土柱底部装入约 2 cm 厚的石英砂, 在石英砂与土壤之间放置 1 张 300 目的纱网。土壤用 PVC 封盖盖住底部, 在封盖底上打 1 个直径为 0.5 cm 的小孔, 用

表 1 供试土壤 (0~20 cm) 的基本性质

Tab. 1 Basic properties of the tested soil (0-20 cm)

磷素水平 phosphorus levels	pH	有机质含量/ (g·kg ⁻¹) OM	无定形氧化铁含量/ (g·kg ⁻¹) Fe	无定形氧化铝含量/ (mg·kg ⁻¹) Al	速效磷含量/ (mg·kg ⁻¹) AP	全磷含量/ (g·kg ⁻¹) TP	土壤质地 soil texture
P1	5.92±0.04	37.90±0.56	2.33±0.20	11.76±0.05	18.20±1.38 a	1.00±0.06	黏土 clay
P2	6.70±0.07	35.91±0.34	2.20±0.06	11.28±0.11	57.16±1.22 b	1.19±0.02	黏土 clay
P3	5.03±0.03	16.97±0.33	1.74±0.12	9.39±0.31	107.85±5.61 c	1.25±0.04	壤质黏土 loamy clay

注: 同一列不同字母表示在 $P<0.05$ 水平差异显著。

Note: Different letters in the same column indicate significant difference at $P<0.05$ levels.

橡胶塞将排水管固定便于收集渗漏液，将土柱直立地放在架子上。每个磷素水平设 3 个重复。

采用质量法控制灌水量(土壤饱和持水量)，灌水量大小以田间持水量为准，每周灌水 1 次，灌水量约 300 mL，灌水时间为试验开始的第 7、14、21、28、35 和 42 天，于灌水当天采集渗漏液，测量渗漏液的体积。土壤表面与土柱顶端有 5 cm 的空间可供灌溉。为避免流速过快，在土壤表面放置 1 张无磷滤纸，水样可以匀速下渗，还可以避免产生边际效应，模拟试验用水为超纯水。

1.3 分析项目与方法

1.3.1 项目测定

渗漏液中 TP(总磷)采用过硫酸钾氧化—钼酸铵分光光度法测定；可溶性总磷(TDP)先用 0.45 μm 滤膜过滤，再用过硫酸钾氧化—钼酸铵分光光度法测定；颗粒磷(PP)=TP-TDP；土壤全磷采用 NaOH 熔融—钼锑抗比色法测定；土壤 Olsen-P 先用 0.5 mol/L NaHCO₃ 溶液浸提，再用钼蓝比色法测定；有机质采用重铬酸钾—外加加热法测定；pH 采用水土比 1：2.5 的玻璃电极法测定^[10]。

1.3.2 土壤磷素环境阈值的计算

采用分段线性模型(split-line model)拟合土壤中 Olsen-P 含量与渗漏液中总磷浓度的关系。采用数学方法，以不偏离突变点为基础，分别计算关系方程，使高 Olsen-P 与 TP 之间的关系方程

斜率最大，相关系数最高；低 Olsen-P 和 TP 之间的关系方程斜率最小；最后根据 2 个方程计算交点即为土壤磷素环境阈值^[11]。

1.4 数据统计分析方法

试验数据采用 Excel 2016 进行整理和作图；采用 SPSS 18.0 进行单因素方差分析和显著性检验，检验方法采用 ANOVA 法，显著水平为 0.05。

2 结果与分析

2.1 红壤性水稻土磷素剖面分布状况

由表 2 可知：不同磷水平水稻土大致呈现出随着土壤剖面深度的增加，磷素累积量逐渐减少的趋势。土壤表层磷素累积量最大，P1、P2、P3 水平土壤表层全磷含量的平均值分别为 1.00、1.19 和 1.25 g/kg，土壤表层全磷含量在整个土壤剖面的占比分别为 39.36%、39.43% 和 39.72%；P1、P2 和 P3 水平 Olsen-P 含量的平均值分别为 18.20、57.16 和 107.85 mg/kg，土壤表层 Olsen-P 含量在整个土壤剖面的占比分别为 40.78%、55.12% 和 62.00%。其他土层磷素累积量较小，这与磷素在土壤中的移动有关。造成磷素在土壤中的移动可能存在以下 4 个方面的原因：一是肥料表施，二是植物根系对下层磷素的吸收，三是磷素的移动性较小，四是土壤中无定形氧化铁、铝以及黏粒对磷素的固定作用^[12]。

表 2 红壤性水稻土磷素剖面分布
Tab. 2 Distribution of phosphorus profiles in red paddy soils

剖面深度/cm soil depth	全磷含量/(g·kg ⁻¹) TP			速效磷含量/(mg·kg ⁻¹) AP		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3
0~20	1.00±0.06	1.19±0.02	1.25±0.04	18.20±1.38	57.16±1.22	107.85±5.61
>20~40	0.94±0.04	0.96±0.02	1.08±0.05	14.26±1.09	31.21±2.61	50.21±4.42
>40~60	0.60±0.02	0.86±0.04	0.82±0.09	12.16±0.75	15.33±1.59	15.92±1.60

2.2 不同磷素水平红壤性水稻土各土层渗漏液中磷素的平均含量

由图 1 可知：从整体上看，不同磷素水平土壤渗漏液中 TP 的质量浓度为 0.09~0.40 mg/L，TDP 的质量浓度为 0.07~0.29 mg/L，PP 的质量浓度为 0.01~0.10 mg/L；红壤性水稻土渗漏液中磷素含量随着土壤磷素水平的提高而提高，与土壤中 Olsen-P 含量分布规律一致，这表明土壤渗漏液中磷素浓度的大小主要取决于土壤有效磷的含量。此外，从垂直方向上看，不同磷水平土壤渗

漏液中磷素含量都随着土壤剖面深度的增加而降低，土壤表层渗漏液中的磷素含量最高，P1、P2 和 P3 水平土壤表层渗漏液中 TP 含量的平均值分别为 0.14、0.22 和 0.40 mg/L，TDP 含量的平均值分别为 0.08、0.14 和 0.29 mg/L，PP 含量的平均值分别为 0.06、0.08 和 0.10 mg/L。不同磷水平红壤 TDP 占 TP 的比重为 56.25%~84.05%，PP 占 TP 的比重为 15.95%~43.75%，TDP 所占比例明显高于 PP，说明不同磷素水平红壤性水稻土渗漏流失主要以 TDP 为主。

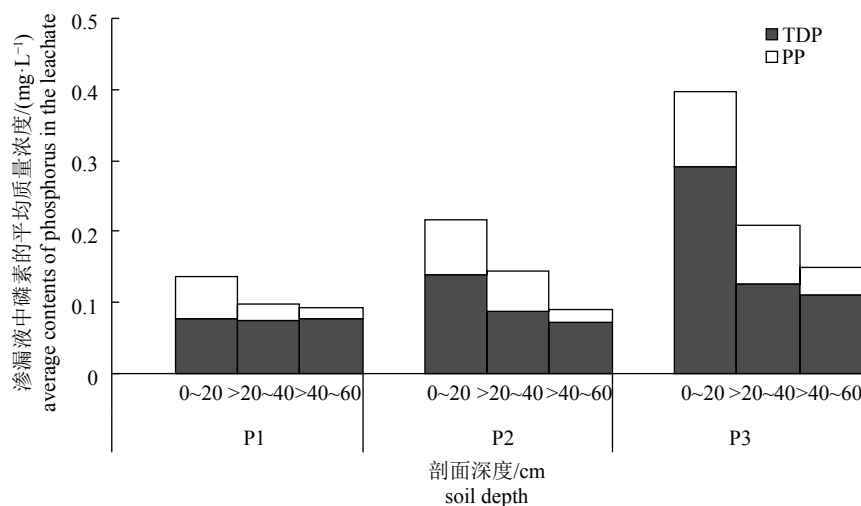


图 1 不同磷素水平红壤性水稻土各土层渗漏液中磷素的平均含量

Fig. 1 The average content of phosphorus in the leachate of various soil layers of red paddy soil with different phosphorus levels

2.3 不同磷素水平红壤性水稻土磷素下渗流失量的比较

由图 2 可知: 在土壤表层 (0~20 cm), P1、P2 和 P3 水平 TP 流失量分别为 12.98、14.12 和 24.85 mg/m², TDP 流失量分别为 8.32、9.48 和 17.16 mg/m², 3 个磷素水平水稻土的磷素下渗流失量在土壤表层差异显著, 流失量大小为 P3>P2>P1; 在>20~40 cm 土层范围内, 磷素下渗流失量缓慢降低, P3 水平的 TP 流失量显著高于 P1 和 P2 水平, 而 3 个磷素水平土壤的 TDP 流失量差异不显著; 在>40~60 cm 土层范围内, 3 个

磷素水平土壤 TP 和 TDP 流失量无显著差异。表层土壤的 TP 流失量要高于其他土层, 这可能与土壤中磷素的迁移有关, 红壤性水稻土在长期的水耕熟化的作用下, 黏粒下移以及受土壤本身 pH 和无定形氧化铁、铝含量的影响, 降低了磷素向下淋溶。

从渗漏液中 TDP 流失量占 TP 流失量的占比来看, 红壤性水稻土迁移到水体中的 TDP 流失量分别占 TP 流失量的 66.05%、63.55% 和 66.04%, TDP 流失量在 TP 中的占比明显高于 PP, 说明不同磷素水平红壤性水稻土渗漏流失主要以 TDP 为主。

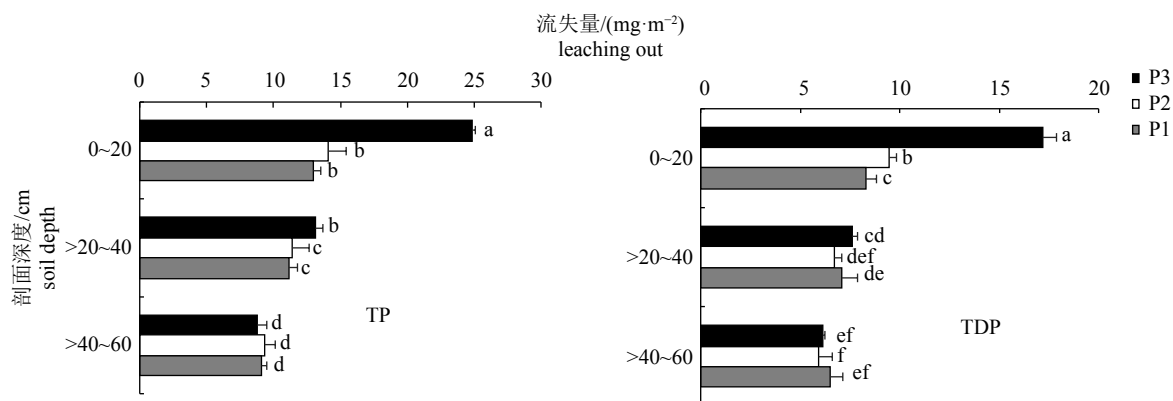


图 2 不同磷素水平水稻土磷素下渗流失量

Fig. 2 Leaching out of phosphorus infiltration in red paddy soils with different phosphorus levels

2.4 土壤中 Olsen-P 含量与渗漏液中总磷质量浓度的关系

土壤中有效磷含量与渗漏液中 TP 质量浓度有密切关系, 将不同含磷水平不同土层的土壤有

效磷与其对应渗漏液中 TP 质量浓度利用分段回归模型 (split-line model) 进行拟合 (图 3), 得出红壤性水稻土 Olsen-P 含量与模拟试验渗漏液中 TP 质量浓度之间并不是线性关系, 其相关方程

如下:

$y_1 = 0.0017x + 0.0839$ ($R^2 = 0.2881$, $P = 0.607^{**}$, Olsen-P ≤ 50.34);

$y_2 = 0.0039x - 0.0274$ ($R^2 = 0.9337$, $P = 0.966^{**}$, Olsen-P ≥ 50.34).

式中, x 为 Olsen-P 含量, mg/kg; y 为渗滤液中 TP 含量, mg/L; ** 表示在 0.01 水平 (双侧) 上显著相关。

计算得出在淋溶作用下土壤磷素环境阈值处 Olsen-P 含量为 50.34 mg/kg。当土壤 Olsen-P 含量小于土壤磷素环境阈值时, 土壤中磷素不迁移或者迁移很少; 而当土壤中 Olsen-P 含量大于土壤磷素环境阈值时, 经下渗作用进入渗滤液中的 TP 质量浓度急剧增加。

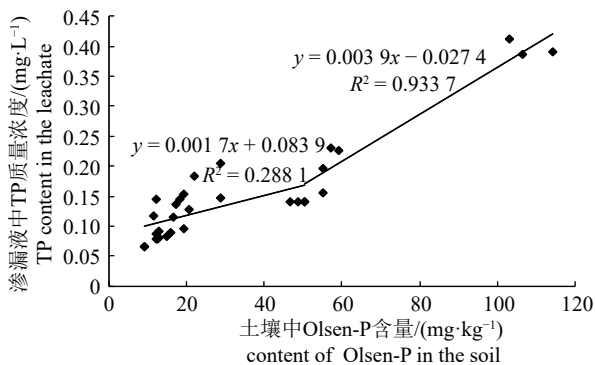


图 3 土壤中 Olsen-P 含量与渗滤液中总磷浓度的关系

Fig. 3 Relationship between Olsen-P content in soil and total phosphorus concentration in leachate

3 讨论

3.1 红壤性水稻土磷素迁移规律及流失量特征

由于水稻土在淹水的条件下, 下渗是磷素流失的主要方式, 研究红壤性水稻土的淋溶流失特征对于控制稻田磷素流失具有重要意义。本研究得出: 红壤性水稻土渗滤液中磷素含量及流失量随着土壤磷素水平的提高而提高, 呈现 $P_3 > P_2 > P_1$ 的规律, 与土壤中 Olsen-P 含量分布规律一致, 这与徐红娇等^[13]得出的不同土地利用方式下红壤渗滤液中磷素含量大棚 (高磷水平) > 露地 (中磷水平) > 草地 (低磷水平)、袁兴程等^[14]研究得出不同土地利用下输出 TP 量大小顺序为: 稻田土 (高磷) > 果园土 (中磷) > 林地土 (低磷) 的结论一致, 说明土壤表层磷素含量和流失量的大小主要取决于地表土壤有效磷的含量。不同磷素水平土

壤渗滤液中各磷素形态含量都随着土壤剖面的加深而降低, 与土壤剖面中土壤的磷素累积规律大致一致, 但各自含量变化的情况不尽相同。不同磷素水平红壤性水稻土渗滤流失的主要形态为 TDP, 与大多数研究结论^[15-18]一致。

3.2 红壤性水稻土磷素淋溶环境阈值的差异

土壤磷素环境阈值是指当土壤磷素达到一定水平时, 再进一步增加土壤磷素将对环境产生很大影响^[19]。不同地区和不同土壤条件下, 土壤磷素环境阈值存在很大的差异, 而土壤 Olsen-P 含量 20~30 mg/kg 是相对安全的农田土壤磷素环境阈值。过去人们对水稻土的研究主要集中在太湖流域。颜晓等^[20]对太湖地区 13 年的不同施磷水平进行研究, 稻田磷素径流及淋溶的土壤耕层 (0~15 cm) 临界值分别为 24.8 mg/kg 和 26.0 mg/kg, 这与张焕朝等^[21]在太湖常熟研究的囊水型水稻的“突变点”为 26.0 mg/kg 以及李卫正等^[2]在同一地区的模拟试验得出的囊水型水稻“突变点”为 26.3 mg/kg 的结果相近。本研究将不同含磷水平的土壤有效磷与其对应渗滤液中 TP 质量浓度利用分段回归模型进行拟合, 计算得出在淋溶作用下土壤磷素环境阈值处 Olsen-P 含量为 50.34 mg/kg。红壤性水稻土的土壤磷素环境阈值要高于一般水稻土, 主要是与红壤性水稻土的性质有关, 红壤性水稻土土壤呈酸性, 土壤中无定形氧化铁、铝含量要比一般水稻土更高, 对磷的吸附固定能力强, 降低了磷向下淋溶, 使得导致土壤磷素淋溶的土壤 Olsen-P 含量提高。同时与梁圆等^[22]研究得出的红壤性水稻土速效 P “突变点”平均值为 (114.22±7.86) mg/kg 的结论差异很大, 主要是因为梁圆等^[22]采用的是田面水, 水层中磷素浓度与表土中磷素含量关系密切, 存在很大变幅, 而本研究采用的是渗滤液, 变幅小, 更具参考价值。

4 结论

(1) 土壤全磷和有效磷含量大致呈现出随着土壤剖面深度的增加, 磷素累积量逐渐减少后趋于稳定的趋势。

(2) 渗滤液中 TP 的质量浓度范围为 0.09~0.40 mg/L, TDP 的质量浓度范围为 0.07~0.29 mg/L, PP 的质量浓度范围为 0.01~0.10 mg/L, 渗滤液中各磷形态含量取决于土壤有效磷的含量。

(3) 在整个渗滤试验中, 不同磷水平红壤性

水稻土 TP、TDP 下渗流失量大小为 $P_3 > P_2 > P_1$, 渗漏液中磷素流失的主要形态为 TDP。

(4) 采用不同含磷水平的土壤有效磷与其对应渗漏液中 TP 质量浓度利用分段回归模型进行拟合, 得出红壤性水稻土磷素淋溶流失的土壤环境阈值为 50.34 mg/kg。

[参考文献]

- [1] 刘星, 梁成华, 杜立宇, 等. 施磷对水稻土磷素淋溶的影响[J]. 广东农业科学, 2012(9): 55. DOI: 10.3969/j.issn.1004-874X.2012.09.038.
- [2] 李卫正, 王改萍, 张焕朝, 等. 两种水稻土磷素渗漏流失及其与 Olsen 磷的关系[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2007, 31(3): 52. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2006.2007.03.011.
- [3] 张红爱, 张焕朝, 钟萍. 太湖地区典型水稻土稻—麦轮作地表径流中磷的变动规律[J]. 生态科学, 2008, 27(1): 17. DOI: 10.3969/j.issn.1008-8873.2008.01.004.
- [4] 宋春丽, 樊剑波, 何园球, 等. 不同母质发育的红壤性水稻土磷素吸附特性及其影响因素的研究[J]. 土壤学报, 2012, 49(3): 607. DOI: 10.11766/trxb201104200142.
- [5] 李忠佩, 李德成, 张桃林, 等. 红壤水稻土肥力性状的演变特征[J]. 土壤学报, 2003, 40(6): 870. DOI: 10.11766/trxb200212080611.
- [6] 王姗姗. 长期施肥下我国典型红壤性水稻土肥力演变特征与持续利用[D]. 北京: 中国农业科学院, 2012.
- [7] 叶会财, 李大明, 黄庆海, 等. 长期不同施肥模式红壤性水稻土磷素变化[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6): 1521. DOI: 10.11674/zwyf.2015.0618.
- [8] 黄庆海, 李茶苟, 赖涛, 等. 长期施肥对红壤性水稻土磷素积累与形态分异的影响[J]. 土壤与环境, 2000, 9(4): 290. DOI: 10.3969/j.issn.1674-5906.2000.04.010.
- [9] 张翼, 岳玉波, 赵峥, 等. 不同施肥方式下稻田氮磷流失特征[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2015, 33(1): 1. DOI: 10.3969/j.issn.1671-9964.2015.01.001.
- [10] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [11] 李学平, 石孝均, 刘萍, 等. 紫色土磷素流失的环境风险评估——土壤磷的“临界值”[J]. 土壤通报, 2011, 42(5): 1153. DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2011.05.024.
- [12] 庄远红. 蔬菜地土壤磷素状况及其淋失风险研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2006.
- [13] 徐红娇, 包立, 张乃明, 等. 滇池流域不同利用方式红壤渗滤液的磷素形态变化[J]. 水土保持学报, 2015, 29(3): 267. DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2015.03.048.
- [14] 袁兴程, 钱新, 庞宗强, 等. 不同土地利用方式土壤表层氮、磷流失特征研究[J]. 环境化学, 2011, 30(9): 1657.
- [15] 陆欣欣, 岳玉波, 赵峥, 等. 不同施肥处理稻田系统磷素输移特征研究[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(4): 394. DOI: 10.3724/SP.J.1011.2014.31036.
- [16] 项大力, 杨学云, 孙本华, 等. 灌溉水平对壤土磷素淋失的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(1): 112. DOI: 10.11674/zwyf.2010.0116.
- [17] HANSEN N C, GUPTA S C, MONCRIEF J F. Snow-melt runoff, sediment, and phosphorus losses under three different tillage systems[J]. Soil and Tillage Research, 2000, 57(1/2): 93. DOI: 10.1016/S0167-1987(00)00152-5.
- [18] GAYNOR J D, FINDLAY W I. Soil and phosphorus loss from conservation and conventional tillage in corn production[J]. Journal of Environmental Quality, 1995, 24(4): 734. DOI: 10.2134/jeq1995.00472425002400040026x.
- [19] HESKETH N, BROOKES P C. Development of an indicator for risk of phosphorus leaching[J]. Journal of Environment Quality, 2000, 29(1): 105. DOI: 10.2134/jeq2000.00472425002900010013x.
- [20] 颜晓, 王德建, 张刚, 等. 长期施磷稻田土壤磷素累积及其潜在环境风险[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(4): 393. DOI: 10.3724/SP.J.1011.2013.00393.
- [21] 张焕朝, 张红爱, 曹志洪. 太湖地区水稻土磷素径流流失及其 Olsen 磷的“突变点”[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2004, 28(5): 6. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2006.2004.05.002.
- [22] 梁圆, 王兴祥, 张桃林. 基于水环境风险的红壤性水稻土 Olsen-P 突变点研究[J]. 土壤, 2008, 40(5): 770. DOI: 10.3321/j.issn:0253-9829.2008.05.016.

责任编辑: 何馨成