

潮土磷素累积流失风险及环境阈值

刘娟^{1,3}, 张乃明^{2,3*}, 张淑香⁴

(1. 云南农业大学植物保护学院, 昆明 650201; 2. 云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201; 3. 云南省土壤培肥与污染修复工程实验室, 昆明 650201; 4. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要: 潮土是中国分布比较广、施肥强度大的典型耕作土壤, 潮土中磷素累积与流失对区域水环境的污染风险不容忽视。该研究在潮土面积最大的河南省采集磷素水平不同的典型潮土作为供试土壤, 采用人工模拟降雨及土柱模拟试验方法, 通过测定土壤中 Olsen-P 和溶解态活性磷 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量以及径流或淋滤液中各形态磷浓度, 研究了潮土中磷素随地表径流和下渗流失特征, 并通过分段线性模型对潮土的磷素环境阈值进行拟合。结果表明: 1) 不同形态磷在潮土土壤剖面中均有一定程度的累积, 土壤 Olsen-P 和 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量表现为高磷最大, 中磷次之, 低磷最小, 而磷吸持指数值表现为低磷最大, 中磷次之, 高磷最小。从磷素的剖面分布来看, 低磷和中磷水平潮土 Olsen-P 和 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量随着土壤深度的增加而降低, 而高磷水平的潮土 Olsen-P 和 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量在 20~40 cm 土层含量最高。2) 不同磷水平潮土径流中总磷 (Total Phosphorus, TP)、可溶性总磷 (Total Dissolved phosphorus, TDP) 和颗粒磷 (Particulate Phosphorus, PP) 浓度和流失量大小表现为高磷最高, 中磷和低磷水平土壤次之, 潮土径流流失以 PP 为主。3) 低磷和中磷水平潮土淋滤液中的各形态磷浓度和流失量随着土层深度的增加而降低, 而在高磷水平的潮土淋滤液中, 20~40 cm 土层淋滤液中磷浓度和流失量要显著高于其他土层, 在整个土壤剖面磷素浓度随着土层深度的增加呈现先上升后下降的趋势, 潮土淋滤流失以 TDP 为主, 其中, 高磷和低磷水平潮土以可溶性有机磷占主导, 而中磷水平潮土以钼酸盐反应磷占主导。4) 通过分段回归模型将不同含磷水平潮土的水溶性磷与土壤中 Olsen-P 含量进行拟合, 得出潮土土壤磷素环境阈值为 24.65 mg/kg, 研究还表明径流和渗漏液中 TP 浓度与土壤 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量呈显著正相关, 因此可通过测定 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 来预测并判断土壤磷素流失风险。

关键词: 磷; 土壤; 径流; 潮土; 环境阈值; 流失风险

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.20.002

中图分类号: S158.5; X522

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2020)-20-0008-09

刘娟, 张乃明, 张淑香. 潮土磷素累积流失风险及环境阈值[J]. 农业工程学报, 2020, 36(20): 8-16. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.20.002 <http://www.tcsae.org>

Liu Juan, Zhang Naiming, Zhang Shuxiang. Accumulative loss risk of phosphorus and its environmental threshold in fluvo-aquic soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(20): 8-16. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.20.002 <http://www.tcsae.org>

0 引言

潮土是中国北方重要耕地土壤, 面积约 1 267 万 hm^2 , 占中国耕地面积的 9.39%^[1]。潮土区最普遍的种植制度为夏玉米-冬小麦一年两熟制^[2], 这种复种指数高、利用强度大的种植模式对潮土本身养分消耗量很大^[3]。其次, 由于潮土区雨量分布不均, 易受旱、涝、和次生盐渍化威胁, 同时由于黄河多次泛滥和改道沉积的作用, 导致潮土肥力水平低^[4]。在各项肥力指标中, 土壤磷素是潮土生产力最重要的限制因子。虽然潮土全磷含量较高, 但有效磷在大部分地区含量较低, 为了使小麦和玉米获得高产, 需要在农业生产中大量施用磷肥, 而高频率、过量的施肥使得潮土区土壤形成了巨大的磷库, 潮土本身属于轻质属性, 且潮土区属于暖温带半湿润型季风气候,

雨季多集中于 7—9 月^[5], 磷素累积引起的环境问题不容忽视。

土壤中磷素迁移到水体中主要包括 3 种途径, 即地表径流、侵蚀和淋滤, 而地表径流和淋滤通常被认为是农田土壤中磷素迁移到水环境最主要的途径^[6-7]。由于农田土壤磷素流失为主的农田非点源污染已成为水环境污染的一个重要来源^[8-9], 使得磷素非点源污染研究的重要性更加凸显^[10-11]。过去在黄淮海地区的潮土中, 虽然土壤全磷含量较高, 但有效磷在大部分地区呈亏缺状态, 在第二次土壤普查时潮土有效磷甚至不足 5 mg/kg, 磷素流失的风险小, 因此人们对潮土的研究主要集中在潮土不同肥力土壤的基础地力、长期施肥对潮土磷素利用与累积、长期不同施肥模式潮土肥力演变规律及其持续利用以及夏玉米-冬小麦轮作系统下, 玉米和小麦两大主要作物的 Olsen-P 农学阈值研究等方面^[5,12-13]。但是随着施磷量提高以及磷肥不断投入, 土壤中的磷素含量逐渐由亏转为盈, 导致土壤磷素大量累积^[14], 潮土区土壤有效磷平均值已经上升到了 27.9 mg/kg^[15], 且在潮土区小麦-玉米轮作体系下, 小麦和玉米 Olsen-P 农学阈值分别为 13.1 和

收稿日期: 2020-06-01 修订日期: 2020-10-10

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFD0201208-2); 云南省对外科技合作计划院士工作站 (2015IC022)

作者简介: 刘娟, 博士生, 主要从事农用化学物质与环境方面的研究。

Email: 15587214232@163.com

*通信作者: 张乃明, 博士, 教授, 主要从事土壤培肥与污染修复方面的研究。

7.5 mg/kg^[13], 这就表明潮土区大多数土壤中的 Olsen-P 含量已经远远地超过作物生长的需要, 继续施肥不仅不能提高作物产量, 还会增加土壤磷素随径流和淋滤到水环境中的风险, 对环境造成潜在威胁^[16]。

磷素在土壤中累积引起磷素流失的报道很多, 目前关于农田磷素流失的研究主要是以地表径流流失规律的探究为主, 在一些富磷的砂土或结构发育良好的黏土中也有磷淋滤的报道^[17]。已有研究表明, 土壤中磷的流失不仅受到土壤有效磷含量的影响, 还受到土壤理化性质, 例如土壤有机质、pH、孔隙度、阳离子交换量, 土壤容重、交换性钙、镁、土壤质地以及土壤中鉄、铝和碳酸钙含量的影响^[18]。其中, 土壤磷素水平是影响耕地土壤磷素流失的重要原因之一, 当土壤有效磷含量超过其环境阈值时, 土壤径流和渗滤液中磷含量将明显增加, 从而对水环境构成威胁^[19]。关于坡耕地红壤、紫色土等磷素迁移与流失规律以及太湖流域水稻土径流和渗滤液中磷素组分的研究已经有大量报道^[17], 而针对潮土在土壤中累积引起的径流和淋滤迁移和土壤磷素环境阈值以及径流或淋滤液中全磷含量与土壤 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 之间的关系方面的研究还很少。本文选取潮土作为研究对象, 通过人工模拟降雨试验和土柱淋滤试验方法, 探讨不同磷水平潮土径流和淋滤液磷素流失状况, 并在此基础上提出土壤磷素环境阈值, 为潮土区水环境保护和土壤磷素管理提供重要的科学依据。

表 1 供试土壤 0~20 cm 土层的理化性质

Table 1 Physicochemical properties of tested soil at 0-20 cm layer

磷水平 Phosphorus levels	pH 值 pH value	有机质 Organic matter (g·kg ⁻¹)	碱解氮 Available nitrogen (mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available phosphorus (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium (mg·kg ⁻¹)	全磷 Total phosphorus (g·kg ⁻¹)	颗粒组成 Particle composition/%			土壤质地 Soil texture
							<0.002 mm	0.002~<0.02 mm	0.02~2.0 mm	
低 Low	8.25	8.75	12.24	8.5	86.9	0.76	29.56	15.64	54.80	砂质黏土
中 Medium	8.01	9.33	23.05	33.4	199.8	0.87	30.54	10.58	58.88	砂质黏土
高 High	8.16	9.34	31.8	42.3	264.5	0.91	31.32	7.21	61.47	砂质黏土

1.2 径流试验设计

径流试验于 2017 年 6—7 月在云南省农业节水工程技术研究中心模拟降雨大厅进行, 设备采用 NLJY-10 型室内人工模拟降雨控制系统(南林电子生产), 喷头高度为 16 m, 喷头类型为散喷型, 有效降雨面积约 40 m²。该人工模拟降雨控制系统的精度主要是通过雨滴分布(小、中、大雨滴所占比例数)及雨滴降落终速来控制, 采用色斑法测定雨滴直径大小, 采用高速摄影法校验雨滴降落终速; 在进行径流试验以前, 进行降雨均匀度的测定及降雨强度的标定, 其主要是通过计算降雨期间地面设置的雨量筒(8 个)观测到的降雨量的平均值实现, 率定后降雨均匀系数大于 95%, 雨滴降落终速可达到自然雨滴的 99%, 降雨特性接近于天然降雨。

试验采用 70 cm(长)×28 cm(宽)×22 cm(高)的土槽作为盛土容器, 然后向土槽中填装等量 0~20 cm 耕层土, 为了确保填装土壤的均匀, 采用分层填装的方法即每隔 5 cm 填装一层, 在填装下层之前, 抓毛上一层已填进土壤的表层, 以防止各土层之间出现分层现象, 同时, 通过分层填装与压实相结合的方法控制土壤容重,

1 材料与方法

1.1 土壤样品采集

土壤样品取自河南省郑州市农科院试验地(34°47'25"N, 113°40'42"E), 该区域属于温带湿润、半湿润季风气候, 冬春干旱少雨、夏季炎热湿润, 年平均降水量 665 mm, 雨季多集中在 7—9 月。分析该区域降雨资料发现, 潮土地区最大降雨强度为 78 mm/h^[20]。该区域地形较为平坦, 坡度在 5°~15°之间, 试验所用土壤为潮土(淡半水成土), 成土母质为黄河冲积物, 土壤质地为砂质黏土, 于 2017 年 4 月, 按照“随机”多点混合的原则, 采集耕层(0~20 cm)及剖面土壤样品, 土壤剖面按层次采样, 自下而上分层采取, 每个层次分为 0~20、>20~40、>40~60 和>60~80 cm 共 4 个层面。

根据耕层(0~20 cm)土壤磷素含量状况, 将采集的潮土大致分为低、中、高 3 种磷素水平的土壤。低磷水平潮土连续 27 a 每年平均施磷肥(普通过磷酸钙, P₂O₅ 含量 12.05%, 下同) 75 kg/hm², 中磷水平潮土每年平均施磷肥 175 kg/hm², 而高磷水平潮土每年平均施磷肥 265 kg/hm²; 磷肥施用量是根据潮土区施肥现状进行设置, 在研究区域内具有典型性和代表性。将采集回来的土壤样品, 剔除土样中的石块、粗有机物和侵入体等, 风干、磨碎, 过 2 mm 孔径筛, 分层充分混匀后备用。供试土壤的主要基本性质如表 1 所示。

确保填装好的土壤容重保持在 1.3 g/m³ 左右。基于潮土区坡耕地现状及降雨发生频率, 本试验坡度设计为 8°, 降雨强度设计为 30 mm/h, 每 7 d 降雨 1 次, 每次降雨 32 min, 每 4 min 用径流桶收集 1 次径流, 并测定径流体积, 降雨试验结束后取各时段采集的径流样进行测定, 每个磷素水平设置 3 个重复。

1.3 淋滤试验设计

淋滤试验于 2017 年 8—10 月在云南农业大学化学楼进行, 将 PVC 管(长 80 cm, 直径 10 cm)截取为 4 段, 每段 20 cm, 用尼龙网包裹每段 PVC 管的底端, 然后分别将 3 种含磷水平的潮土分层填充到土柱中, 为了方便地分离和恢复完整的土柱, 该研究采用 PVC 接口(直径为 11 cm)将每段土柱连接成高 80 cm 的土柱桶。土柱桶底部填充约 2 cm 厚的石英砂, 石英砂和土壤之间由 1 张 48 μm 的纱网分隔, 然后用 PVC 封盖(直径为 11 cm)盖住土柱底部。为了能够方便地收集淋滤液, 在每个封盖上钻 1 个小孔, 小孔直径约 0.5 cm, 用橡胶塞将排水管用固定在封盖上收集淋滤液, 最后将土柱直立地放在架子上。淋滤试验开始以前, 向土壤中加入超纯水达到饱

和持水量后静置 24 h, 淋滤试验连续进行 42 d, 每 7 d 灌水 1 次, 每次灌水约 300 mL, 在灌水后的 24 h 内收集淋滤液, 测定淋滤液体积。为避免土壤受到干扰, 在土壤表面放置 1 张无磷滤纸, 同时, 滤纸还可使水样匀速下渗, 避免产生边际效应, 每个磷素水平潮土设置 3 个重复。

1.4 分析项目与方法

溶液中总磷 (Total Phosphorus, TP) 浓度采用过硫酸钾-钼蓝比色法 (GB 11893—89) 测定; 可溶性总磷 (Total Dissolved Phosphorus, TDP) 浓度采用 0.45 μm 滤膜过滤, 过硫酸钾-钼蓝比色法 (GB 11893—89) 测定; 钼酸盐反应磷 (Molybdate Reactive Phosphorus, MRP) 采用 0.45 μm 滤膜过滤, 钼蓝比色法测定; 颗粒磷 (Particulate Phosphorus, PP) 为 TP 与 TDP 的差值; 可溶性有机磷 (Dissolved Organic Phosphorus, DOP) 为 TDP 与 MRP 的差值;

土壤 pH 值采用酸度计 (NY-T 1121.2—2006) 测定; 有机质采用重铬酸钾氧化-容量法 (NY-T 1121.6—2006) 测定; 碱解氮采用碱解扩散法测定; 有效磷 (Olsen-P) 采用钼锑抗比色法 (HJ704-2014) 测定; 速效钾采用 1 mol/L 的中性 NH_4OAc (pH 值为 7) 溶液浸提, 火焰光度法测定; 全磷采用碱熔-钼锑抗比色法 (HJ632-2011) 测定; 溶解态活性磷 ($\text{CaCl}_2\text{-P}$) 采用 0.01 mol/L 氯化钙溶液浸提 (土水质量比 1:5), 钼锑抗比色法测定; 土壤磷吸持指数 (Phosphate Sorption Index, PSI): 在水土质量比为 10:1 的条件下, 按每克土中加入 1.5 mg 磷酸盐, 平衡后测得土壤吸磷量与平衡溶液磷浓度, 采用计算式 (1) [21] 计算。

$$\text{PSI} = 100X/\lg C \quad (1)$$

式 (1) 中 X 为土壤吸磷量, mg/g ; C 为平衡溶液中磷浓度, $\mu\text{mol/L}$ 。

1.5 数据统计与分析方法

采用 Excel 2007 和 Sigmaplot 10.0 对数据进行分析, 通过软件 SPSS 19.0 对所有数据进行单因素方差分析和显著性检验, 检验方法采用 ANOVA 法, 采用 OriginPro 9.0 进行作图, 所有结果数据均采用 3 个重复试验所获数据的平均值。

为了计算场降雨径流磷素流失量, 采用公式

$$L = \frac{\sum_{i=1}^n c_i v_i}{S_0} \quad (2)$$

式中 L 为磷素流失量, mg/m^2 ; n 为取样次数; c_i 为各时段采集径流样的磷素浓度, mg/L ; v_i 为各时段采集径流样的体积, L ; S_0 为土槽的面积, m^2 。

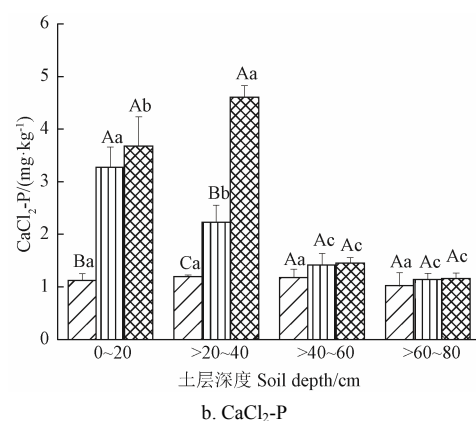
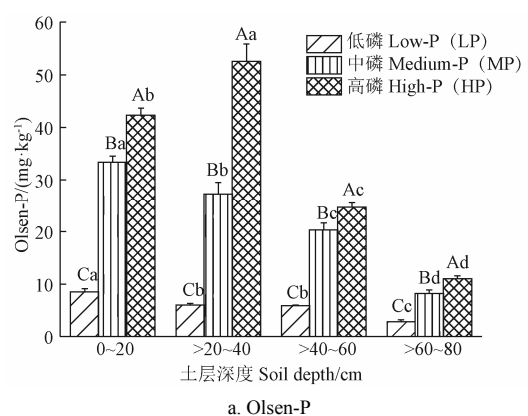
采用分段线性模型 (Split-line Model) 计算潮土磷素流失的环境阈值。根据 Olsen-P 与 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 之间的关系图, 采用数学方法, 以不偏离突变点为基础, 分别拟合低和高 Olsen-P 含量与 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 之间的分段线性回归方程, 2 个方程的交点即为土壤磷素环境阈值 [17]。

2 结果与分析

2.1 潮土中有效磷和易溶解态磷及吸持指数

不同磷水平潮土中 Olsen-P 累积状况如图 1a 所示,

由图可知, 3 个磷素水平潮土在土壤剖面中 Olsen-P 含量 (质量分数, 下同) 分别为 3.0~8.5、11.0~52.5 和 8.2~33.4 mg/kg , 不同磷水平潮土 Olsen-P 含量在各土层中表现出一致规律, 即高磷水平最高, 中磷水平次之, 而低磷水平最低, 3 个磷素水平之间呈显著性差异。从土壤剖面分布来看, 低磷和中磷土壤中 Olsen-P 含量随着土壤剖面深度的增加呈降低趋势, 而高磷水平土壤在 20~40 cm 土层最高。全国第二次土壤普查养分分级标准将土壤中 Olsen-P 含量分为 6 个等级, 将 3 个磷素水平潮土表层土壤 (0~20 cm) 中的 Olsen-P 含量与全国第二次土壤普查的养分分级标准进行比较, 高磷水平潮土达到一级标准, 土壤 Olsen-P 极高; 中磷水平潮土达到二级标准, 土壤 Olsen-P 很高; 低磷水平潮土达到四级标准, 土壤 Olsen-P 中等, 这说明潮土表层均出现了一定程度的累积。



注: 不同大写字母表示同一土层不同磷素水平间 P 累积差异显著 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示同一磷素水平不同土层间 P 累积差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: The different uppercase letters indicate significant difference in phosphorus level among soils with different phosphorus levels in the same soil layer ($P < 0.05$). The different lowercase letters indicate a significant difference in phosphorus among soils with different soil layers at the same phosphorus levels ($P < 0.05$).

图 1 不同磷水平潮土中 Olsen-P 和 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 的含量

Fig.1 Olsen-P and $\text{CaCl}_2\text{-P}$ contents in fluvo-aquic soils with different phosphorus levels

不同磷水平潮土中 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 累积状况如图 1b 所示, 由图可知, 土壤剖面中 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量范围为 1.01~4.20 mg/kg 。不同磷水平潮土 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量在各土层中存在差异, 在 0~20 cm 土层, 高磷和中磷水平土壤 $\text{CaCl}_2\text{-P}$

含量显著高于低磷水平土壤, 而高磷和中磷水平土壤之间差异不显著; 在 20~40 cm 土层, 3 个磷素水平土壤之间 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量高磷最高, 中磷次之, 低磷最低, 且各磷水平之间呈显著性差异; 而在 40~60 cm 和 60~80 cm 土层, 3 个磷素水平土壤之间 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量未达到显著性差异。从土壤剖面分布来看, 低磷土壤 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量虽然随着土壤剖面深度的增加呈降低趋势, 但各层次土壤中的 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量差异性不显著。中磷土壤在整个土壤剖面 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 随着土壤剖面深度的增加, $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量降低, 在 40~60 cm 和 60~80 cm 土层中 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量差异不显著。高磷土壤中 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 质量分数范围为 1.15~4.20 mg/kg, $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量在 20~40 cm 土层最高, 而在 40~60 cm 和 60~80 cm 土层 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量未达到显著性差异, 在整个剖面上 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量呈现先上升, 再下降的趋势。

土壤 PSI 反映了土壤磷吸持或释放潜力, 一般用于表征土壤固相磷向液相释放的可能性。对不同磷水平潮土的 PSI 值进行分析计算得出, 各层次土壤的 PSI 值的范围为 4.38~22.42, 其中, 低、中、高磷水平潮土在土壤剖面中的 PSI 值分别为 4.66~22.42、6.22~10.58 和 4.75~9.30, 在整个土壤剖面中, 低磷水平土壤磷吸持指数最大, 中磷水平土壤次之, 高磷水平土壤磷吸持指数最小, PSI 越大, 说明土壤吸持磷的能力越强, 而 PSI 越小, 说明土壤中的磷越容易发生迁移。从土壤剖面来看, 不同磷水平潮土 PSI 值随着土壤剖面深度的增加表现出不同的趋势, 高磷和低磷水平潮土在整个土壤剖面随着土壤深度的增加, PSI 值降低, 而中磷水平潮土在整个土壤剖面变化幅度整体较小, 大致呈先下降再上升, 再下降的趋势 (图 2)。

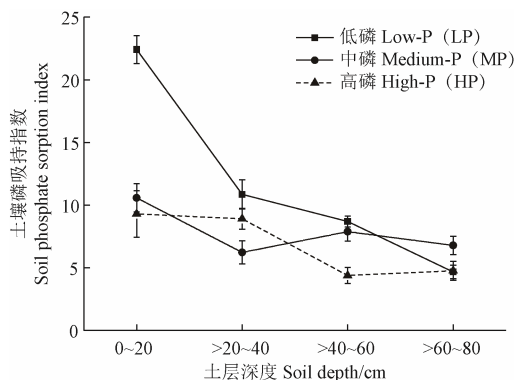


图 2 不同磷水平潮土各土层磷吸持指数 (PSI)

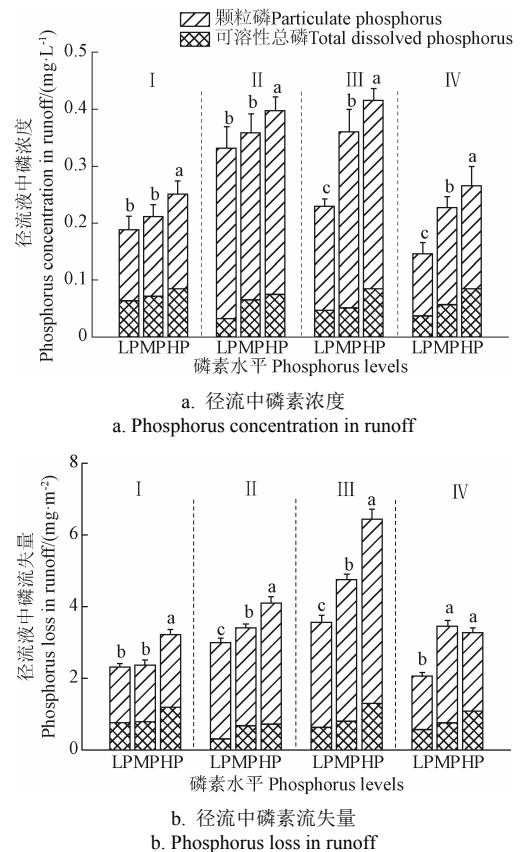
Fig.2 Soil phosphate sorption index of each layer in fluvo-aquic soils with different phosphorus levels

2.2 不同磷水平潮土径流中各形态磷浓度及流失量

不同磷水平潮土径流中各形态磷浓度如图 3a 所示, 表层径流中 TP 浓度为 0.146~0.416 mg/L, 可溶性总磷 TDP 浓度为 0.032~0.086 mg/L, 颗粒磷 PP 浓度为 0.109~0.330 mg/L, 不同磷水平潮土 TP、TDP 和 PP 浓度大小表现为高磷水平潮土最高, 中磷和低磷水平潮土次之。通过方差分析得出, 在第 1 场降雨和第 2 场降雨中, 高磷水平潮土径流中 TP 浓度要显著高于低磷和中磷水平, 而

低磷和中磷水平之间 TP 浓度未达到显著性差异; 在第 3 场和第 4 场降雨中, 3 种磷水平潮土径流中 TP 浓度均达到了显著性差异。从径流中各形态磷占 TP 的比例来看, 不同磷水平潮土 TDP 占 TP 的比例为 9.76%~34.02%, 而 PP 占 TP 的比例为 65.98%~90.24%, PP 所占比例明显高于 TDP, 说明 3 种磷水平潮土径流流失都以颗粒态为主。

不同磷水平潮土径流中各形态磷流失量如图 3b 所示, 3 种磷水平潮土径流中 TP 流失量为 2.05~6.05 mg/m², TDP 流失量为 0.31~1.29 mg/m², PP 流失量为 1.48~5.16 mg/m², 不同磷水平潮土径流 TP、TDP 和 PP 流失量大小表现为高磷水平土壤最大, 中磷和低磷水平土壤次之, 3 种磷素水平潮土径流中 TP 流失量的大小顺序与土壤表层有效磷含量具有一致性, 这说明土壤表层磷素累积状况可能会影响径流磷素流失量的大小。从各形态磷占总磷的比例来看, 不同磷水平潮土 TDP 流失量占 TP 流失量的 10.31%~37.46%, PP 流失量占 TP 流失量的 62.54%~89.69%, 由此可见, 潮土径流中土壤表层磷素流失以颗粒态为主。



注: I~IV代表不同降雨场次; 不同小写字母表示同一降雨场次不同磷水平之间潮土径流液中磷素浓度或流失量差异显著 ($P<0.05$)。Note: I-IV indicate different rainfall events; Different lowercase letters indicate significant difference in phosphorus concentration or loss in runoff among different phosphorus levels at the same rainfall event ($P<0.05$).

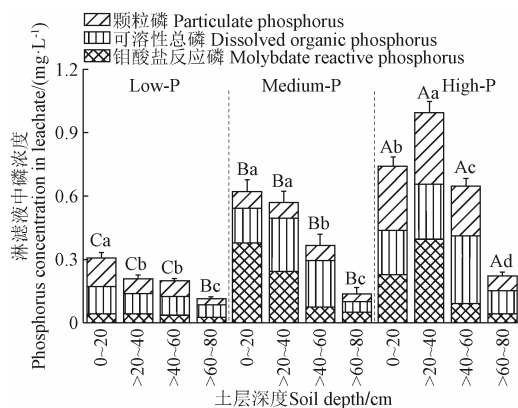
图 3 不同磷水平潮土径流中各形态磷浓度及流失量

Fig.3 Concentrations and losses of various forms of phosphorus in fluvo-aquic runoff with different phosphorus levels

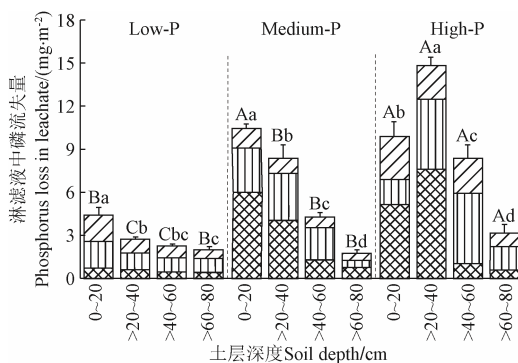
2.3 不同磷水平潮土淋滤液中各形态磷浓度及流失量

不同磷水平潮土淋滤液中各形态磷浓度如图 4a 所示, 由图可知, 不同磷水平潮土淋滤液中各形态磷浓度

差异大, TP、TDP、PP、MRP 和 DOP 浓度分别为 0.114~0.995、0.084~0.660、0.031~0.335、0.027~0.378 和 0.050~0.321 mg/L, 潮土淋滤流失以 TDP 为主, 在 TDP 中, 高磷和低磷水平土壤以 DOP 为主, 而中磷水平土壤以 MRP 为主。从淋滤液中各形态磷的剖面分布来看, 低磷和中磷水平潮土淋滤液中的各形态磷浓度随着剖面深度的增加磷素浓度降低, 在表层 (0~20 cm) 淋滤液中的磷素浓度最高; 而在高磷水平的潮土淋滤液中, 各形态磷浓度在 20~40 cm 土层最高。3 种磷素水平潮土底层 (60~80 cm) 土壤淋滤液中的磷素浓度普遍较低, 但 3 种磷水平土壤淋滤液中 TP 浓度均超过了水体富营养化阈值 (0.02 mg/L) [22]。



a. 淋滤液中磷素浓度
a. Phosphorus concentration in leachate



b. 淋滤液中磷素流失量
b. Phosphorus loss in leachate

注: 不同大写字母表示同一土壤剖面不同磷水平之间差异显著 ($P < 0.05$); 不同小写字母代表同一磷素水平不同剖面之间差异显著 ($P < 0.05$);

Note: Different uppercase letters indicate significant difference among different phosphorus levels in the same soil layer ($P < 0.05$); Different lowercase letters indicate significant difference among different layers at the same phosphorus levels ($P < 0.05$).

图 4 不同磷水平潮土淋滤液中各形态磷浓度及流失量

Fig.4 Concentrations and losses of different forms of phosphorus in fluvo-aquic soil leachate with different phosphorus levels

不同磷水平潮土淋滤液中各形态磷流失量如图 4b 所示, 由图可知, 不同磷水平潮土淋滤液中 TP、TDP、PP、MRP 和 DOP 流失量分别为 1.97~14.84、1.29~12.48、0.41~2.99、0.42~7.60 和 0.51~4.92 mg/m²。潮土淋滤液中以 TDP 为主, 在 TDP 中, 不同含磷水平土壤占主导的磷形式又存在差异, 其中, 高磷和中磷水平潮土淋滤流失以 MRP 为主, 而低磷

水平潮土淋滤流失以 DOP 为主。从淋滤液中各形态磷的剖面分布来看, 低磷和中磷水平潮土淋滤液中的各形态磷流失量随着剖面深度的增加而降低, 而在高磷水平的潮土淋滤液中, 20~40 cm 土层的磷流失量要显著高于其他土层。

2.4 土壤磷素的环境阈值拟合

为了更好地预测磷的损失潜力, 利用分段线性模型 (Split-line Model), 将不同含磷水平潮土的 Olsen-P 含量与土壤中 CaCl₂-P 进行回归拟合 (如图 5), 得出潮土 Olsen-P 含量与 CaCl₂-P 之间并不是 1 条直线关系, 而是 2 线斜率明显不同的直线, 其相关方程如下:

$$\begin{cases} y = 0.02x + 1.01 & (R^2 = 0.87, \text{Olsen-P} \leq 24.65 \text{ mg/kg}) \\ y = 0.10x - 0.69 & (R^2 = 0.93, \text{Olsen-P} > 24.65 \text{ mg/kg}) \end{cases} \quad (3)$$

式中 x 为 Olsen-P 含量, mg/kg; y 为土壤中 CaCl₂-P 含量, mg/kg。

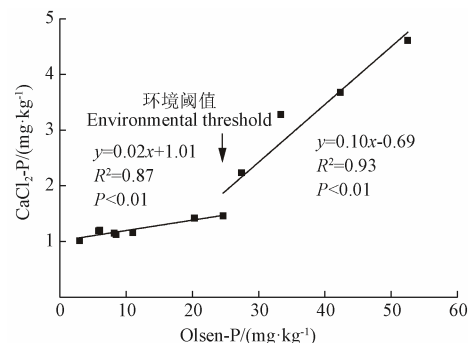


图 5 不同磷水平潮土的水溶性磷与土壤中 Olsen-P 的关系

Fig.5 Relationship between water-soluble phosphorus and Olsen-P in fluvo-aquic soil with different phosphorus levels

通过计算得出, 研究区域内潮土土壤磷素环境阈值为 24.65 mg/kg。当土壤 Olsen-P 含量小于或等于土壤磷素环境阈值时, CaCl₂-P 含量随 Olsen-P 增加而增加的幅度小, 而当土壤中 Olsen-P 的含量大于土壤磷素环境阈值时, CaCl₂-P 含量随 Olsen-P 增加而增加的幅度大。

进一步分析潮土径流液或淋滤液中 TP 浓度与土壤 CaCl₂-P 之间的关系, 发现线性方程可以较好地拟合潮土径流或淋滤液中 TP 浓度与土壤 CaCl₂-P 含量之间的关系, 通过线性回归分析得出径流液和淋滤液中 TP 浓度与土壤 CaCl₂-P 关系如图 6 所示。

径流中 TP 浓度与土壤 CaCl₂-P 含量的相关方程为

$$y = 0.06x + 0.11 \quad (R^2 = 0.80, P < 0.01, \text{样本量为 } 12) \quad (4)$$

淋滤液中 TP 浓度与土壤 CaCl₂-P 含量的相关方程为

$$y = 0.21x + 0.03 \quad (R^2 = 0.79, P < 0.01, \text{样本量为 } 36) \quad (5)$$

式中 x 为土壤 CaCl₂-P 含量, mg/kg; y 为土壤中 TP 浓度, mg/L。

由拟合方程发现, 土壤中 CaCl₂-P 含量与径流或淋滤液 TP 浓度存在正相关关系, 随着土壤中 CaCl₂-P 含量增加, 径流或淋滤液 TP 浓度也随之增加。通过测定土壤中 CaCl₂-P 来预测径流或淋滤液中 TP 浓度, 可以评估土壤磷素流失对水体造成的污染。

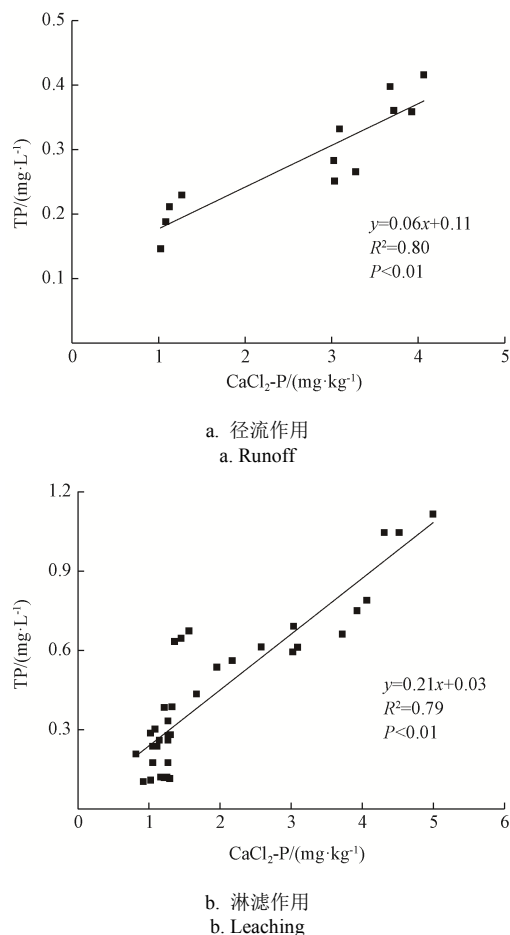


图 6 潮土径流液和淋滤液中总磷浓度 (TP) 与 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 之间的关系

Fig.6 Relationship between Total Phosphorus concentration (TP) in runoff or leachate and $\text{CaCl}_2\text{-P}$ in fluvo-aquic soil

3 讨论

3.1 不同磷水平潮土磷素累积流失特征

潮土区是中国重要的小麦-玉米主产区,这种复种指数高、利用强度大的种植模式对潮土本身养分消耗量很大,需要在农业生产中大量施用磷肥,而高频率、过量的施肥使得潮土区土壤形成了巨大的磷库。在本研究中发现,潮土表层土壤(0~20 cm)已经出现了一定程度的磷素累积,将3个磷素水平潮土表层土壤(0~20 cm)中的 Olsen-P 含量与全国第二次土壤普查的养分分级标准进行比较,高磷水平潮土达到一级标准,土壤 Olsen-P 极高;中磷水平潮土达到二级标准,土壤 Olsen-P 很高;低磷水平潮土达到四级标准,土壤 Olsen-P 中等,这说明潮土表层均出现了一定程度的累积。当土壤中磷素累积超过环境阈值,土壤中磷素可以通过地表径流、侵蚀以及淋滤等途径迁移到水体环境中,进而加剧水环境污染负荷。

在本研究中,3种磷水平表层径流中 TP 浓度为 0.146~0.416 mg/L, TDP 浓度为 0.032~0.086 mg/L, PP 浓度为 0.109~0.330 mg/L,不同磷水平潮土 TP、TDP 和 PP 浓度大小表现为高磷水平潮土最高,中磷和低磷水平潮土次之,这与崔力拓等^[23]先前通过天然降雨径流试验得到的褐土地表径流中不同形态磷的含量随土壤磷素水

平的提高也相应地增加的结论一致,并且在其他土壤类型如黄壤、紫色土等也发现了类似的观察结果^[24-25],这说明径流液中磷素浓度与土壤本身磷素累积状况有密切关系。本实验室还通过人工模拟降雨试验,比较了黑土、潮土和红壤中磷素随地表径流流失的特征,发现黑土、潮土和红壤表层径流中磷素浓度和磷素流失量均表现为潮土最大,红壤次之,黑土最小^[26]。磷素在潮土中的扩散性要强于其他2种土壤,主要是因为潮土所在区域为中国主要的农耕区,磷肥的逐年投入及施磷量的提高,加剧土壤中磷素累积状况,潮土为砂质黏土,土壤中黏粒含量较黑土和红壤少,所以当径流发生时,潮土比其他2种土壤更容易发生迁移。从各形态的比例来看,本研究得出颗粒态磷是潮土径流流失的主要形态,这与秦华等^[27]研究得出径流作用下 PP 浓度占总磷浓度80%以上以及左继超等^[28]研究得出的地表径流磷素输出以 PP 为主的结论相同,在降雨的过程中,径流中磷素的流失不仅与土壤本身含磷状况密切相关,还可能与坡度、降雨强度、径流量等因素相关,所以,在季风区,应结合土壤本身性质以及该区域降雨条件,对养分流失进行管理。

在本研究中,不同磷水平潮土淋滤液中 TP 浓度为 0.114~0.995 mg/L, TDP 浓度为 0.084~0.660 mg/L, PP 浓度为 0.031~0.335 mg/L, MRP 浓度为 0.027~0.378 mg/L, DOP 浓度为 0.050~0.321 mg/L。低磷和中磷水平潮土淋滤液中的各形态磷含量随着剖面深度的增加,磷素浓度降低,而高磷水平潮土淋滤液中磷素浓度随着土层深度的增加,呈现先上升后下降的趋势,这种现象的出现与土壤中 Olsen-P 含量的高低密切相关,在高磷土壤中,20~40 cm 土层径流液中的磷素浓度要高于土壤表层,主要是因为本身施磷水平较高,作物吸收不了过多的磷,在降雨的作用下,由磷素向下淋溶所致。本实验室还通过土柱淋溶试验^[1],比较黑土、潮土、红壤和水稻土淋溶流失差异,发现不同类型土壤 TP 流失量以潮土最大,水稻土和黑土次之,红壤最小,这主要是由于长期耕作条件下,潮土本身磷含量累积过高,以及潮土砂质黏土的土壤质地,黏粒含量比其他几种土壤少造成的。本研究还发现,不同磷水平潮土淋滤流失以 TDP 为主,这与项大力等^[29]在壤土以及陆欣欣等^[30]的得出的淋滤流失以 TDP 为主的结论一致,这主要是因为淋滤与径流磷素流失不同,淋滤流失受外部因素(坡度、降雨强度、径流量等)的影响要小于土壤本身性质的影响,土壤中磷素含量、土壤质地等在潮土淋滤过程中发挥着极其重要的作用。

3.2 潮土土壤磷素环境阈值的科学性及应用

不同类型土壤磷素环境阈值差异很大,钟晓英等^[31]通过土壤培养试验,得出中国11种土壤类型23个土壤的土壤磷素环境阈值在 29.96~156.78 mg/kg 之间变化。聂敏等^[32]通过室内模拟试验,发现中国16种可变电荷土壤(红壤、黄壤等)的土壤磷素环境阈值在 56~123 mg/kg 之间变化,同时,赵小蓉等^[33]还通过研究土壤磷素环境阈值与土壤理化性质的关系时发现,土壤磷素环境阈值

与土壤 pH 呈抛物线关系, 当 pH 值大于 6 时, 土壤磷素环境阈值随着 pH 的升高而减小。在本研究中, 利用分段回归模型 (Split-line Model), 将不同含磷水平潮土的水溶性磷与土壤中 Olsen-P 含量进行回归拟合, 分析得出潮土的土壤磷素环境阈值为 24.65 mg/kg, 潮土本身为石灰性土壤, 土壤 pH 值在 8.01~8.25 之间, 所以与其他土壤类型相比, 潮土土壤磷素环境阈值可能偏低, 而潮土中土壤有机质、土壤质地、无定形氧化铁、铝含量、碳酸钙等是否对土壤磷素环境阈值造成影响还需要进一步深入研究。

一般而言, 当水体中的含磷量超过了水体富营养化阈值 (0.02 mg/L) 就可能造成水体中藻类的大量繁殖。在本研究中发现, 当潮土 Olsen-P 含量超过土壤磷素环境阈值 (即: 24.65 mg/kg) 时, 从土体中排出的水进入河流或湖泊中, 极可能对水体造成污染。因此, 在潮土区域, 应该根据潮土目前的磷素累积状况, 适当减少施磷量, 在维持作物产量的同时, 降低 P 对水环境造成污染的风险, 在保证作物不减产的条件下, 适当减少施磷量还可以在一定程度提高土壤中已累积磷素的再利用^[34], 这对于农业生产与生态环境保护都具有重要的现实意义。本研究中, 还建立了径流或淋滤液中总磷与 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 之间的关系, 发现潮土径流或淋滤液 TP 浓度与土壤中 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量存在正相关关系, 径流或淋滤液 TP 浓度会随着土壤 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量的增大迅速增加, 因此, 可以通过测定土壤中 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 的含量来预测径流和淋滤液中 TP 浓度, 从而对土壤磷素迁移对水环境造成的污染进行评价。

4 结 论

1) 土壤剖面中的 Olsen-P 含量 (质量分数) 为 3.0~33.4 mg/kg, 溶解态活性磷 ($\text{CaCl}_2\text{-P}$) 含量为 1.01~4.20 mg/kg, 土壤磷吸附指数 (PSI) 值为 4.38~22.42, Olsen-P 和溶解态活性磷 ($\text{CaCl}_2\text{-P}$) 含量表现为高磷最高, 中磷次之, 低磷最低, 而 PSI 值表现为低磷最高, 中磷次之, 高磷最低。

2) 不同磷水平潮土径流中总磷、可溶性总磷和颗粒磷浓度和流失量大小为高磷最高, 中磷和低磷水平土壤次之, 潮土径流流失以颗粒态为主。

3) 低磷和中磷水平潮土淋滤液中的各形态磷浓度和流失量随着土层深度的增加而降低, 而在高磷水平的潮土淋滤液中, 20~40 cm 土层淋滤液中磷浓度和流失量要显著高于其他土层, 潮土淋滤流失以可溶态为主。

4) 通过分段回归模型将不同含磷水平潮土的水溶性磷与土壤中 Olsen-P 含量进行拟合, 得出潮土土壤磷素环境阈值为 24.65 mg/kg。同时还得出, 径流液和淋滤液中总磷浓度与土壤中 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量呈显著正相关, 可通过测定 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 来预测从土体排出水的磷浓度。

【参 考 文 献】

- [1] 刘娟, 包立, 张乃明, 等. 我国 4 种土壤磷素淋溶流失特征[J]. 水土保持学报, 2018, 32(5): 67-73.
Liu Juan, Bao Li, Zhang Naiming, et al. Characteristics of phosphorus leaching losses in four soils in China[J]. Journal of soil and Water conservation, 2018, 32(5): 67-73. (in Chinese with English abstract)
- [2] 黄欣欣, 廖文华, 刘建玲, 等. 长期秸秆还田对潮土土壤各形态磷的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(5): 779-789.
Huang Xinxin, Liao Wenhua, Liu Jianling, et al. Effects of long-term straw return on various fractions of phosphorus in Fluvo-aquic soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(5): 779-789. (in Chinese with English abstract)
- [3] 信秀丽, 钦绳武, 张佳宝, 等. 长期不同施肥下潮土磷素的演变特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6): 1514-1520.
Xiu Xiuli, Qin Shengwu, Zhang Jiabao, et al. Dynamics of phosphorus in Fluvo-aquic soil under long-term fertilization[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(6): 1514-1520. (in Chinese with English abstract)
- [4] 申艳, 段英华, 黄绍敏, 等. 潮土 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量对磷肥施用的响应及其淋失风险分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(6): 1689-1696.
Shen Yan, Duan Yinghua, Huang Shaomin, et al. Response of $\text{CaCl}_2\text{-P}$ to phosphorus fertilization and leaching risk in fluvo-aquic soils[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, 24(6): 1689-1696. (in Chinese with English abstract)
- [5] 黄绍敏, 郭斗斗, 张水清. 长期施用有机肥和过磷酸钙对潮土有效磷积累与淋溶的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(1): 97-102.
Huang Shaomin, Guo Doudou, Zhang Shuiqing. Effects of long-term application of organic fertilizer and superphosphate on accumulation and leaching of Olsen-P in fluvo-aquic soil[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(1): 97-102. (in Chinese with English abstract)
- [6] Koopmans G F, McDowell R W, Chardon R W, et al. Soil phosphorus quantity-intensity relationships to predict increased soil phosphorus loss to overland and subsurface flow[J]. Chemosphere, 2002, 48: 697-687.
- [7] Simmonds B, McDowell R W, Condron L M, et al. Can phosphorus fertilizers sparingly soluble in water decrease phosphorus leaching loss from an acid peat soil[J/OL]. Soil Use and Management, 2016. doi:10.1111/sum.12274
- [8] Wang G, Wu B, Zhang L, et al. Role of soil erodibility in affecting available nitrogen and phosphorus losses under simulated rainfall[J]. Journal of Hydrology, 2014, 514: 180-191.
- [9] 吴汉卿, 万炜, 单艳军, 等. 基于磷指数模型的海河流域农田磷流失环境风险评价[J]. 农业工程学报, 2020, 36(14): 17-27.
Wu Hanqing, Wan Wei, Shan Yanjun, et al. Environmental risk assessment of phosphorus loss from farmland based on phosphorus index model in the Haihe River Basin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(14): 17-27. (in Chinese with English abstract)
- [10] Kleinman P J A, Church C, Saporito L S, et al. Phosphorus leaching from agricultural soils of the delmarva peninsula, USA[J]. Journal of Environment Quality, 2015, 44(2): 524-534.
- [11] Jarvie H P, Johnson L T, Sharpley A N, et al. Increased soluble phosphorus loads to lake erie: Unintended consequences of conservation practices[J]. Journal of Environment Quality, 2017, 46(1): 123-132.
- [12] 张水清, 黄绍敏, 姜翼来, 等. 华北潮土区不同肥力水平

- 土壤基础地力研究[J]. 中国农学通报, 2016, 32(20): 97-100.
- Zhang Shuiqing, Huang Shaomin, Lou Yilai, et al. Basic soil productivity study on different fertility levels in fluvo-aquic soil region, North China[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(20): 97-100. (in Chinese with English abstract)
- [13] 郭斗斗, 黄绍敏, 张水清, 等. 潮土小麦和玉米 Olsen-P 农学阈值及其差异分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(5): 1184-1190.
- Guo Doudou, Huang Shaomin, Zhang Shuiqing, et al. Threshold values of soil Olsen-P for maize and wheat in fluvo-aquic soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, 23(5): 1184-1190. (in Chinese with English abstract)
- [14] 万炜, 师纪博, 刘忠, 等. 栖霞市苹果园氮磷养分平衡及环境风险评价[J]. 农业工程学报, 2020, 36(4): 211-219.
- Wan Wei, Shi Jibo, Liu Zhong, et al. Nitrogen and phosphorus nutrient balance and environmental risk assessment of apple orchard in Qixia city[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(4): 211-219. (in Chinese with English abstract)
- [15] 李少丛, 万红友, 王兴科, 等. 河南省潮土、砂姜黑土基本性质变化分析[J]. 土壤, 2014, 46(5): 920-926.
- Li Shaocong, Wan Hongyou, Wang Xingke, et al. Basic properties variation of fluvo-aquic soil and lime calcic black soil in Henan province[J]. Soils, 2014, 46(5): 920-926. (in Chinese with English abstract)
- [16] 王帅兵, 宋娅丽, 王克勤, 等. 不同雨型下反坡台阶减少红壤坡耕地氮磷流失的效果[J]. 农业工程学报, 2018, 34(13): 160-169.
- Wang Shuaibing, Song Yali, Wang Keqin, et al. Effects of reverse-slope terrace on nitrogen and phosphorus loss in sloping farmland of red loam under different rainfall patterns[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(13): 160-169. (in Chinese with English abstract)
- [17] Li YY, Gao R, Yang R, et al. Using a simple soil column method to evaluate soil phosphorus leaching risk[J]. Clean-Soil, Air, Water, 2013, 41(11): 1100-1107.
- [18] Heckrath G, Brookes P C, Poulton P R, et al. Phosphorus leaching from containing different phosphorus concentrations in the Broadbalk experiment[J]. J Environ Qual, 1995, 24: 904-910.
- [19] Hesketh N, Brookes P C. Development of an Indicator for risk of phosphorus leaching[J]. J Environ Qual, 2000, 29: 105-110.
- [20] 杜明成, 王振龙, 姜翠玲, 等. 淮北平原黄潮土多雨强变坡度产流产沙规律试验模拟[J]. 水土保持学报, 2018, 32(6): 34-39.
- Du Mingcheng, Wang Zhenlong, Jiang Cuiling, et al. Simulation of runoff and sediment production regularity of different rainfall intensity and changeable slope gradients in the Yellow fluvo-aquic soil of the Huaibei plain[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2018, 32(6): 34-39. (in Chinese with English abstract)
- [21] 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): 267-271.
- Xu Hongjiao, Bao Li, Zhang Naiming, et al. Changes of phosphorus fractions in leachate from red soil under different land use types in Dianchi Basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(3): 267-271. (in Chinese with English abstract)
- [22] OECD. Eutrophication of waters[M]//Monitoring, Assessment and Control. Paris, France, OECD: 1982.
- [23] 崔力拓, 李志伟. 洋河流域缓坡地土壤磷素径流输出特征[J]. 水土保持学报, 2006, 37(3): 10-12.
- Cui Lituo, Li Zhiwei. Characteristics of soil phosphorus export by surface runoff from gentle slope in Yanghe watershed[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 37(3): 10-12. (in Chinese with English abstract)
- [24] 刘方, 何腾兵, 钱晓刚, 等. 不同利用方式下黄壤旱坡地磷素状况及环境影响分析[J]. 土壤与环境, 2002, 11(3): 232-236.
- Liu Fang, He Tengbing, Qian Xiaogang, et al. The status of phosphorus and its environmental effects analysis under various land use patterns in Yellow soil of hilly areas[J]. Soil and Environmental Sciences, 2002, 11(3): 232-236. (in Chinese with English abstract)
- [25] 李学平, 孙燕, 石孝均. 紫色土稻田磷素淋失特征及其对地下水的影响[J]. 环境科学学报, 2008, 28(9): 1832-1838.
- Li Xueping, Sun Yan, Shi Xiaojun. Characteristics of phosphorus leaching and its impact on ground water in purple paddy soil[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 28(9): 1832-1838. (in Chinese with English abstract)
- [26] 刘娟, 张淑香, 宁东卫, 等. 3种耕作土壤磷随地表径流流失的特征及影响因素[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(10): 1346-1352.
- Liu Juan, Zhang Shuxiang, Ning Dongwei, et al. Characteristics of phosphorus runoff losses and influencing factors in three cultivated soils[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019, 35(10): 1346-1352. (in Chinese with English abstract)
- [27] 秦华, 李晔, 李波, 等. 人工模拟降雨条件下石灰土养分流失规律[J]. 水土保持学报, 2016, 30(1): 1-4.
- Qin Hua, Li Ye, Li Bo, et al. Nutrient loss of limestone soil under artificial simulated rainfall[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2016, 30(1): 1-4. (in Chinese with English abstract)
- [28] 左继超, 郑海金, 奚同行, 等. 自然降雨条件下红壤坡地磷素随径流垂向分层输出特征[J]. 环境科学, 2017, 38(10): 4178-4186.
- Zuo Jichao, Zheng Haijin, Xi Tonghang, et al. Characteristics of phosphorus output through runoff on a red soil slope under natural rainfall conditions[J]. Environmental Science, 2017, 38(10): 4178-4186. (in Chinese with English abstract)
- [29] 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): 112-117.
- Xiang Dali, Yang Xueyun, Sun Benhua, et al. Impacts of irrigation regimes on phosphorus leaching in manural loessial soil[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(1): 112-117. (in Chinese with English abstract)
- [30] 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): 394-400.
- Lu Xinxin, Yue Yubo, Zhao Zheng, et al. Phosphorus loss and migration characteristics in paddy fields under different

- fertilization treatments[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(4): 394-400. (in Chinese with English abstract)
- [31] 钟晓英, 赵小蓉, 鲍华军, 等. 我国 23 个土壤磷素淋失风险评估 I. 淋失临界值[J]. 生态学报, 2004, 24(10): 2275-2280. Zhong Xiaoying, Zhao Xiaorong, Bao Huajun, et al. The evaluation of phosphorus leaching risk of 23 Chinese soils I. Leaching criterion[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(10): 2275-2280. (in Chinese with English abstract)
- [32] 聂敏, 肖和艾, 廖敦秀, 等. 亚热带可变电荷土壤磷素淋失临界点及其与土壤特性的关系[J]. 环境科学学报, 2013, 33(2): 579-586. Nie Min, Xiao Heai, Liao Dunxiu, et al. Phosphorus leaching change point of subtropical variable-charge soils and its relations with soil properties[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(2): 579-586. (in Chinese with English abstract)
- [33] 赵小蓉, 钟晓英, 李贵桐, 等. 我国 23 个土壤磷素淋失风险评估 II. 淋失临界值与土壤理化性质和磷吸附特性的关系[J]. 生态学报, 2005, 26(9): 3011-3017. Zhao Xiaorong, Zhong Xiaoying, Li Guitong, et al. The evaluation of phosphorus leaching risk of 23 Chinese soils II. The relationships between soil properties, P absorption characteristics and the leaching criterion[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 26(9): 3011-3017. (in Chinese with English abstract)
- [34] 张福锁, 崔振岭, 陈新平. 最佳养分管理技术单列[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2010: 5-7.

Accumulative loss risk of phosphorus and its environmental threshold in fluvo-aquic soil

Liu Juan^{1,3}, Zhang Naiming^{2,3*}, Zhang Shuxiang⁴

(1. College of Plant Protection, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2. College of Resource and Environmental Science, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 3. Yunnan Soil Fertility and Pollution Restoration Laboratory, Kunming 650201, China; 4. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Fluvo-aquic soil is a typical cultivated soil with the widely distribution and high intensity of fertilization in China. However, the accumulation and loss of phosphorus in fluvo-aquic soil cannot be ignored as the ecological changes. In this study, the typical fluvo-aquic soils were collected as the test soils with different phosphorus levels (high, medium, and low) in Henan province, China, in order to explore the characteristics of phosphorus loss from fluvo-aquic soil induced by surface runoff and leaching. Simulation experiments of an artificial rainfall and a soil column were conducted to measure the content of Olsen-P and soluble active phosphorus ($\text{CaCl}_2\text{-P}$) in soils, and the concentrations of different forms of phosphorus in runoff or leaching. In a split-line model, the relationship between soil Olsen-P content and Total Phosphorus (TP) in solution was used to evaluate P risk from black soil in surface runoff and leaching. The results showed that: 1) The contents of Olsen-P and $\text{CaCl}_2\text{-P}$ in fluvo-aquic soil profiles were in the order of high, medium and low phosphorus level, whereas, the soil phosphorus sorption index value were in the order of low, medium and high phosphorus level. In the profile distribution of phosphorus, the content of Olsen-P and $\text{CaCl}_2\text{-P}$ in fluvo-aquic soil with low and medium phosphorus level decreased with increasing soil profile, while the content of Olsen-P and $\text{CaCl}_2\text{-P}$ in fluvo-aquic soil with high phosphorus level was the highest in the 20-40 cm soil layer. 2) The concentration and losses of TP, Total Dissolved Phosphorus (TDP) and particulate phosphorus (PP) in the runoff from fluvo-aquic soils with different phosphorus levels were in the order of high > medium > low phosphorus level, and the PP dominated in fluvo-aquic soil runoff. 3) The concentration and loss of various forms of phosphorus in the leachate of low- and medium-phosphorus level from fluvo-aquic soil decreased with the increasing soil depth. However, in the leachate of high phosphorus level, the concentration and loss of phosphorus in the 20-40 cm soil profile were significantly higher than those of in other soil profiles, where the phosphorus concentration in the whole profile increased first and then decreased with the increasing soil profile, whereas, the profile of high phosphorus level presented the distribution pattern that upper and lower was low, and middle was high. The leaching loss of fluvo-aquic soil was dominated by TDP. The high- and low-phosphorus fluvo-aquic soil was dominated by Dissolved Organic Phosphorus (DOP), while the medium-phosphorus fluvo-aquic soil was dominated by Molybdate Reactive Phosphorus (MRP). 4) The relationship between $\text{CaCl}_2\text{-P}$ and Olsen-P were characterized using split-line models, identifying the thresholds at 24.65 Olsen-P mg/kg for the fluvo-aquic soil. It was also pointed out that the TP concentration in runoff and leachate was positively correlated with the $\text{CaCl}_2\text{-P}$ content in soil, and that $\text{CaCl}_2\text{-P}$ can be used to predict the phosphorus concentration of water discharged from soil. The outcomes derived from these experimental conditions regarding the determination of P loss in runoff by the artificially simulated rainfall experiment. The P loss in leaching by the soil column method and P environmental thresholds also need further verification in the field. This finding can help to assess phosphorus loss from fluvo-aquic soil under different phosphorus levels, and further to provide a scientific basis for water environment protection and soil phosphorus management in fluvo-aquic soil areas.

Keywords: phosphorus; soils; runoff; fluvo-aquic soil; environmental threshold; loss risk