

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.19603

红壤区旱地和水田土壤磷素状况及其流失风险

肖作义¹, 马飞^{1, 2}, 柳开楼³, 赵学强^{2, 4*}, 郑春丽¹,
张昊青^{2, 4}, 王嘉林^{2, 4}, 沈仁芳^{2, 4}

(1. 内蒙古科技大学能源与环境学院, 内蒙古 包头 014010; 2. 中国科学院南京土壤研究所 / 土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 江苏 南京 210008; 3. 江西省红壤研究所 / 国家红壤改良工程技术研究中心, 江西 南昌 330046; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 红壤一般偏酸且铁铝富集, 磷与铁、铝形成 Fe-P、Al-P, 降低了红壤磷的有效性。施磷提高红壤供磷能力, 但是未被作物利用的磷积累在土壤中, 对水体环境构成威胁。研究红壤磷素状况对于提高作物产量和保护环境具有重要意义。已有很多关于红壤磷素状况方面的报道, 但是很少将红壤磷素状况与水体磷进行关联分析。在典型红壤区江西省余江县布点采集了旱地和水田土样各 54 份, 周边水样 24 份, 分析了土壤有效磷 (Olsen-P 和 Bray-P) 含量、水溶性磷 (CaCl₂-P) 含量和水样总磷含量。结果表明, 以 Olsen-P 为指标, 11% 的旱地和 39% 的水田土壤缺磷, 61% 的旱地和 39% 的水田土壤磷适合作物生长, 11% 的旱地和 11% 的水田土壤处于高磷状态。以 Bray-P 为指标, 11% 的旱地和 33% 的水田土壤缺磷, 6% 的旱地和 33% 的水田土壤磷适合作物生长, 77% 的旱地和 6% 的水田土壤处于高磷状态。Olsen-P、Bray-P 与 CaCl₂-P 三者之间具有极显著相关关系, 对 Olsen-P 与 CaCl₂-P、Bray-P 与 CaCl₂-P 分别进行回归分析, 求得土壤磷流失突变点的 Olsen-P 和 Bray-P 含量分别为 56.31 和 118.4 mg · kg⁻¹。依据这两个标准, 水田土壤有效磷均未超过磷流失突变点, 旱地土壤 Olsen-P 和 Bray-P 超过突变点的样品比例分别为 50% 和 33%。水田周边排水沟渠水的总磷含量均低于《地表水环境质量标准》Ⅱ类水标准。总之, 调查的红壤区水田土壤整体较为缺磷、磷流失风险低, 旱地土壤有效磷含量和磷流失风险都较高。

关键词: 旱地; 水田; 磷; 流失风险

我国红壤地区总面积约 218 万 km², 耕地面积约 2800 万 hm², 为全国供应了一半农业产值, 养活了全国近一半人口^[1]。红壤广泛分布于我国南方热带和亚热带地区, 该地区水热资源丰富, 作物生产潜力巨大^[2]。大多数红壤 pH 较低, 经常存在铝毒、锰毒、酸害和养分缺乏等限制作物生长的因子, 导致红壤上作物生产潜力难以充分发挥^[3-4]。受自然和人类活动等因素影响, 近年来土壤酸化面积不断扩大, 南方红壤地区的土壤酸化尤为严重^[5-6]。

磷是植物生长发育必需的营养元素之一, 参与植物体内各种生理生化活动, 也是决定土壤肥力和

土壤质量的重要指标之一^[7-8]。土壤磷含量直接影响作物产量和品质^[9]。据统计, 全球耕地土壤大约有 43% 缺磷, 我国耕地土壤有 2/3 缺磷^[10]。红壤中可溶性铝离子含量较高, 过多的铝离子会固定红壤中的磷酸根, 降低红壤中磷的生物有效性, 导致植物容易缺磷^[3, 11]。因此, 磷素短缺已成为限制南方红壤地区作物生长的重要因素之一, 施用磷肥是解决红壤区农田土壤缺磷的主要方式。由于磷肥利用率低, 长期过量施用磷肥导致土壤中的磷不断积累, 在南方多雨条件下, 土壤中积累的磷易通过淋洗和径流等方式进入水体, 造成水体富营养化^[12-13], 对当地生态环境和人类健康构成威胁。

不同土地利用方式是影响土壤养分有效性的主要因素。旱地和水田是我国南方红壤地区的两种主要耕地类型, 评估红壤地区旱地和水田土壤磷生物有效性和环境风险对于农业生产和环境保护均具有重要意义。虽然已有不少关于红壤磷生物有效性和磷环境风险的研究, 但是少有研究将红壤磷生物有效性、流失风险与水体磷含量三者进行关

收稿日期: 2019-12-25; 录用日期: 2020-02-21

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31672229); 江西省自然科学基金项目 (20192BAB203022)。

作者简介: 肖作义 (1962-), 男, 内蒙古包头人, 教授, 硕士, 主要从事水处理技术及环境保护应用研究。E-mail: xiao2135333@126.com。

通讯作者: 赵学强, E-mail: xqzhao@issas.ac.cn。

联分析。CaCl₂ 溶液提取的土壤磷与径流液中的磷含量有很好的相关性,常被用来评价土壤磷素流失风险^[14-16]。表征土壤有效磷的指标主要有 Olsen-P 和 Bray-P,二者对于不同土壤类型具有不同农学意义,但是哪种有效磷指标与磷流失风险的关系更为密切尚不清楚。本研究以典型红壤区江西省余江县作为采样区域,采集了不同乡镇旱地和水田土壤样品以及水田周边水体样品,测定了土壤有效磷(Olsen-P 和 Bray-P)和 CaCl₂ 提取态磷含量及水样总磷含量。拟通过这些研究,比较红壤旱地和水田土壤磷素丰缺状况及其流失的环境风险。

1 材料与方法

1.1 江西省余江县采样情况

采样区域余江县位于江西省东北部山区丘陵向鄱阳湖平原过渡地段,处于东经 116°41′~117°09′,北纬 28°04′~28°37′,总面积约为 936 km²,气候类型为亚热带湿润季风气候,年均气温约 17.6℃,年

均降水量约 1766 mm^[17-18]。余江县主要地形为低丘,主要土壤类型为低丘红壤及其发育的红壤性水稻土,约占全县土壤面积的 90%^[19]。

采样时间为 2019 年 4 月下旬,选取余江县马荃镇、杨溪乡、平定乡、潢溪镇、中童镇、刘家站、锦江镇、黄庄乡、画桥镇 9 个乡镇作为采样区域(图 1),其中旱地土采样点 18 个,水稻土采样点 18 个。因为有些水田采样点周围排水沟没有排水,有些水田采样点共用一个排水沟,最终只有 8 个水样采样点。每个采样点随机采集来自同一田块 3 个不同地方的土壤样品,并采集相应水田周围水样,获得 54 份旱地土壤样品,54 份水田土壤样品,24 份水体样品,共 132 份样品(表 1)。土壤采集深度为 0~20 cm,水样取自水田排水沟渠上清液。样品带回实验室后,土样均匀混合、自然风干、去杂、研磨,过 2 mm 筛后,测定磷相关指标。水样经过滤后置于 4℃ 冰箱,用于测定总磷含量。

表 1 江西余江采样情况

编号	采样点	经纬度	采样数量			
			旱地土	水田土	水样	总数
1	马荃镇青山村	116°53′25″E 28°9′12″N	3	3	3	9
2	马荃镇林溪村	116°49′01″E 28°7′10″N	6	0	3	9
3	杨溪乡	116°42′57″E 28°14′31″N	0	6	3	9
4	平定乡	116°53′12″E 28°18′18″N	6	6	0	12
5	潢溪镇丁山村	116°54′03″E 28°20′51″N	3	3	3	9
6	中童镇严家村	116°58′53″E 28°15′29″N	3	3	0	6
7	刘家站垦殖场	116°55′42″E 28°12′21″N	12	6	3	21
8	锦江镇江付村	116°53′25″E 28°25′01″N	9	9	3	21
9	黄庄乡黄家庄上黄	116°57′10″E 28°28′53″N	0	9	3	12
10	画桥镇画桥村	117°1′55″E 28°30′46″N	12	9	3	24
	合计		54	54	24	132

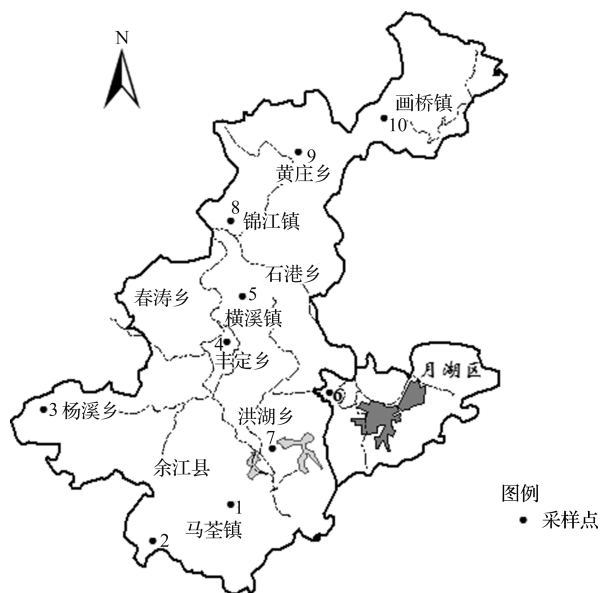


图1 江西余江采样分布图

注: 图上数字对应表1中的编号。

1.2 分析方法

土壤测定参照土壤农化常规分析方法^[20], 土壤 Olsen-P 采用 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NaHCO}_3$ 溶液浸提 (液土比 20:1), 土壤 Bray-P 采用 $\text{NH}_4\text{F}-\text{HCl}$ 溶液浸提 (液土比 10:1), 土壤 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 采用 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{CaCl}_2$ 溶液浸提 (液土比 10:1), 然后都在 25°C 下振荡 30 min, 钼锑抗比色法测定。水样总磷利用电感耦合等离子体原子发射光谱仪 (Avio 200, 美国) 进行测定。

1.3 数据处理与统计分析

数据采用 WPS 2019 与 SPSS 25.0 进行统计分析和作图。土壤 Bray-P、Olsen-P 与 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 的定量关系利用数学方法, 以不偏离突变点为基础, 分步计算关系方程, 使土壤高 Bray-P 含量、Olsen-P 含量与 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量之间的关系方程斜率最大, 相关系数最高, 而使土壤低 Bray-P 含量、Olsen-P 含量与 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量之间的关系方程斜率最小, 再根据两个方程来计算土壤磷流失突变点^[21-22]。采用皮尔逊相关性分析确定土壤有效磷、 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 之间的相关系数。

2 结果与分析

2.1 余江县土壤有效磷分析

以 Olsen-P 作为参考, 一般认为, 适合作物生长的水田土壤 Olsen-P 为 $11 \sim 20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 旱

地土壤为 $21 \sim 40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。当 Olsen-P 大于 $41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时相对偏高, 小于 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时则相对缺乏^[23]。图 2 结果表明, 有 39% 的水田土壤 Olsen-P 小于 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有 39% 的水田土壤 Olsen-P 在 $11 \sim 20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, 11% 的水田土壤 Olsen-P 大于 $41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 表明有 1/3 以上的水田土壤缺磷, 1/3 以上的水田土壤磷含量适合作物生长, 1/10 的水田土壤高磷。旱地土壤 Olsen-P 分析结果表明, 有 11% 的旱地土壤 Olsen-P 小于 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 11% 的旱地土壤 Olsen-P 大于 $41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有 61% 的旱地土壤 Olsen-P 在 $21 \sim 40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, 这表明旱地土壤缺磷较少, 2/3 左右的旱地土壤磷浓度适合作物生长。

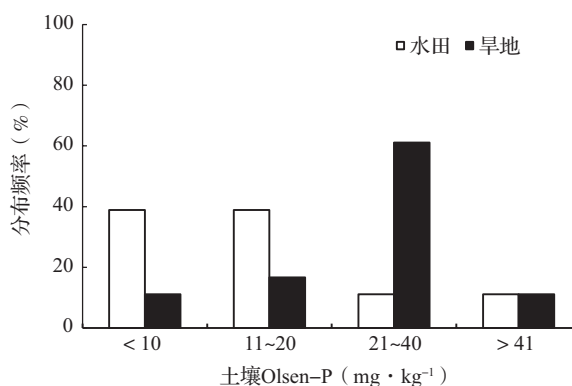


图2 水田和旱地土壤 Olsen-P 分布频率

以 Bray-P 作为参考, 参照土壤农化常规分析方法^[20]和沈建国等^[24] Bray-P 分级标准, 农田土壤 Bray-P 含量小于 $7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 为缺磷状态, 水田土壤 Bray-P 为 $7 \sim 20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 适合作物生长, 旱地土壤在 $21 \sim 50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 适合作物生长, 当大于 $51 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 为高磷状态。由图 3 可知, 有 33% 的水田土壤 Bray-P 小于 $7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有 33% 的水田土壤 Bray-P 在 $8 \sim 20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, 6% 的水田土壤 Bray-P 大于 $51 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 表明 1/3 以上的水田土壤处于缺磷状态, 1/3 以上的水田土壤磷浓度适合作物生长, 极少有水田处于高磷状态。旱地土壤 Bray-P 分析结果表明, 有 11% 的旱地土壤 Bray-P 小于 $7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 6% 的旱地土壤 Bray-P 在 $21 \sim 50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, 77% 的旱地土壤 Bray-P 大于 $51 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 表明旱地土壤很少出现低磷状态, 3/4 以上的旱地土壤高磷。

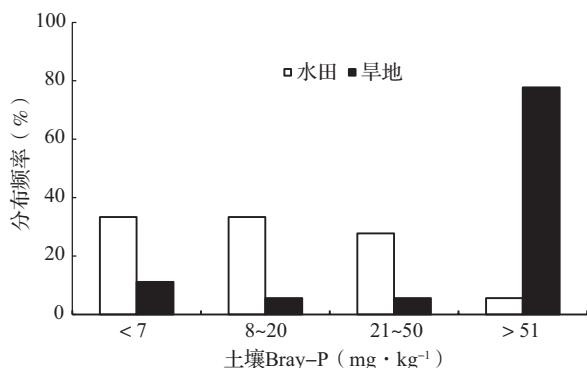


图3 水田和旱地土壤 Bray-P 分布频率

2.2 余江县土壤有效磷与水溶性磷之间的关系

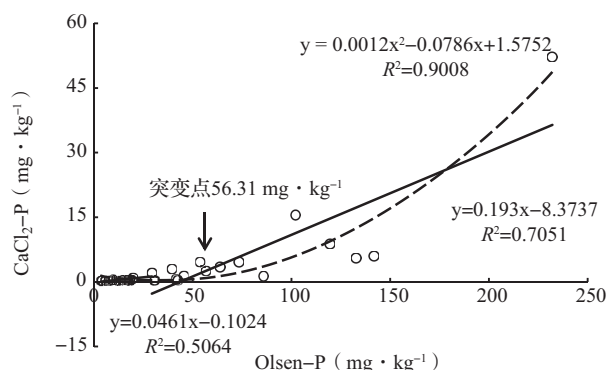
土壤各种磷含量之间的皮尔逊相关性分析表明, Olsen-P 与 Bray-P、Olsen-P 与 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 、Bray-P 与 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 都呈极显著正相关关系 (表 2)。

表2 土壤各种磷含量之间的皮尔逊相关性分析 (n=36)

	$\text{CaCl}_2\text{-P}$	Olsen-P	Bray-P
$\text{CaCl}_2\text{-P}$	1		
Olsen-P	0.816**	1	
Bray-P	0.784**	0.844**	1

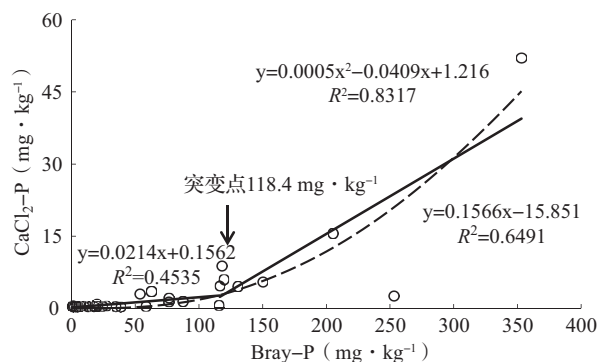
注:**表示极显著相关 ($P<0.01$)。

土壤 Olsen-P 和 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量的定量关系分析表明, 两条相关直线存在一个明显的“突变点” (图 4)。“突变点”对应的 Olsen-P 浓度为 $56.31 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 相应的 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 浓度为 $2.49 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。当土壤 Olsen-P 低于 $56.31 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 土壤 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 浓度很低, 变化幅度也很小。在“突变点”之后, $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 快速增加, 最大 Olsen-P 浓度 ($232.09 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的测试土壤对应的 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 浓度已达到 $52.28 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

图4 土壤 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 与 Olsen-P 含量的定量关系

土壤 Bray-P 和 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 的关系与土壤 Olsen-P 和 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 的关系有同样的趋势 (图 5), 但其

“突变点”不同, “突变点”对应的 Bray-P 浓度为 $118.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 相应的 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 浓度为 $2.69 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。土壤 Bray-P 浓度低于“突变点”值时, 其对应的土壤 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 浓度变化不显著, 当土壤 Bray-P 浓度超过“突变点”值后, 其对应的土壤 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 浓度快速增加, 最大 Bray-P 浓度 ($353.13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的测试土壤对应的 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 浓度也已达 $52.28 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

图5 土壤 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 与 Bray-P 含量的定量关系

2.3 余江县土壤磷的流失风险分析

土壤磷的“突变点”是土壤磷流失临界值, 低于这个“突变点”, 土壤中磷流失风险较小, 高于“突变点”, 土壤磷流失风险较高^[25]。图 6 计算了采样点水田和旱地土壤 Olsen-P、Bray-P 超过磷“突变点”的土壤样品占比, 以评价余江县土壤磷流失风险。水田所有土壤样品 Olsen-P、Bray-P 均未超过“突变点”, 旱地土壤样品 Olsen-P、Bray-P 超过“突变点”的土样占比分别为 50% 和 33%。

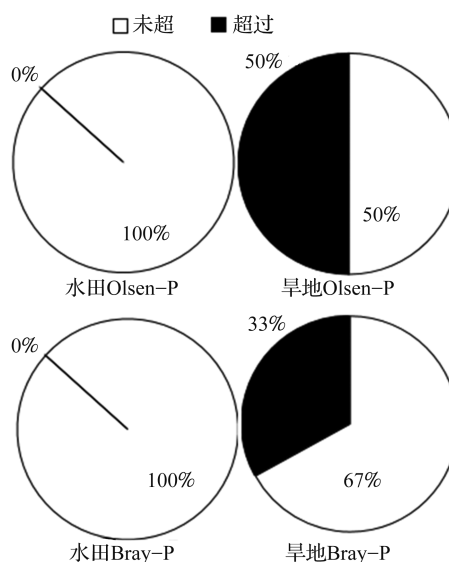


图6 水田和旱地土壤样品超过磷“突变点”的占比

为了进一步确定余江县磷流失情况,对水田采样点周边排水沟渠水总磷含量进行了测定。结果表明,水田周边沟渠水总磷含量偏低,所有水样总磷含量均低于地表水环境质量标准(GB 3838-2002) II类水的总磷标准限值($\leq 0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)(表3)。

表3 水田周边排水沟渠水总磷情况

编号	采样点	总磷 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
1	马荃镇青山村	0.026*
2	马荃镇林溪村	0.016**
3	杨溪乡	0.010**
5	潢溪镇丁山村	0.014**
7	刘家站垦殖场	0.006**
8	锦江镇江付村	0.017**
9	黄庄乡黄家庄上黄	0.041*
10	画桥镇画桥村	0.027*

注:**表示低于《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002) I类水总磷标准($<0.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$);*表示低于《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002) II类水总磷标准($<0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

3 讨论

3.1 红壤区旱地和水田土壤磷丰缺情况

本研究调查的红壤区水田土壤 Olsen-P 和 Bray-P 均表明,1/3 以上的土壤缺磷,1/3 以上的土壤磷适合作物生长,较少土壤出现高磷状况。旱地土壤 Olsen-P 和 Bray-P 结果均表明,大部分旱地土壤有效磷含量偏高,仅有约 1/10 土壤缺磷。童文彬等^[26]的研究结果表明,浙江省红壤区旱地土壤有效磷(Olsen-P)平均含量远高于水田,44.84%的水田土壤处于低磷($<10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),仅 17.04%的水田土壤有效磷超过 $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,旱地土壤有效磷在 $21 \sim 40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和大于 $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的占比较大,说明有较高比例的水田土壤缺磷,旱地土壤有效磷含量较高。黄庆海^[10]的长期定位试验研究表明,长期施磷的旱地红壤有效磷含量持续上升,长期施磷的水田土壤有效磷含量上升幅度很小,含量在 $15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右,说明施磷更易提高旱地土壤有效磷含量,而对水田土壤有效磷含量影响较小。鲁艳红等^[27]和吕真真等^[28]研究表明,磷肥投入是影响土壤磷有效性的重要因素,长期不施磷或磷投入不足会导致土壤磷短缺,降低土壤磷有效性,而化肥磷及有机无机磷配施提高了土壤有效磷含量。本研究结果表明,余江县 1/3 的水田土

壤表现为缺磷状态,这可能是由于稻田磷肥投入不足,需要提高磷肥的施用量,而旱地由于土壤有效磷含量较高,可以适当降低磷肥的施用量。

3.2 红壤区旱地和水田磷流失风险分析

土壤有效磷含量与 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 提取的磷一般具有很好的相关性,且存在“突变点”^[16],该“突变点”可作为土壤磷流失临界值来预测土壤磷流失风险。土壤磷流失的有效磷含量临界值是指当土壤有效磷含量到达某一水平时,如果土壤有效磷含量继续升高,就会对水环境造成一定风险^[29]。虽然土壤磷流失受土壤类型、降雨量、灌溉方式、施肥量等多种因素影响,但是在相同条件下以土壤磷流失的有效磷含量临界值来预测土壤磷流失风险仍有一定意义。姜波等^[30]研究表明,土壤磷流失临界值比满足作物磷素营养需要的临界值高,按照土壤磷淋失临界值来进行磷素管理不仅可以满足作物对磷的需要,而且可以指导磷肥的合理施用,对提高磷肥利用率和降低土壤磷对水体的污染均具有重要意义。Hesketh 等^[31]研究表明 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 与土壤 Olsen-P 有着很好的相关性,且可能会出现一个突变点,该点对应的 Olsen-P 的浓度就是土壤磷流失的临界值,当超过该点时就可能发生磷流失。钟晓英等^[21]利用 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 和 Olsen-P 对我国 23 个土壤磷流失风险进行了评估,结果显示不同土壤的磷流失临界值不同,临界值所对应的 Olsen-P 在 $29.96 \sim 156.78 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间。Liang 等^[16]研究了大田菜地土壤和盆栽菜地土壤的磷流失风险,Olsen-P 突变点分别为 55.9 和 $53.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,对应的 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量分别为 0.69 和 $0.42 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。柏兆海等^[32]研究了县域农田土壤磷流失风险,砂壤、轻壤和重壤分别对应的突变点 Olsen-P 含量为 23.1 、 40.1 和 $51.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。申艳等^[33]研究了磷肥施用量对潮土 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 和 Olsen-P 比值的影响,以此来评价土壤磷流失风险,结果表明 $30.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 是 Olsen-P 流失临界值,高量磷肥的施用提高土壤 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量的同时也会加大磷流失风险。王荣萍等^[34]研究了不同质地土壤磷的流失风险,结果表明,壤质粘土、粘壤土、砂质粘壤土的 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 和 Olsen-P 线性相关且有明显突变点,对应的突变点分别为 79.74 、 51.08 、 $43.99 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,而 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 与 Bray-P 没有显著的相关性,也没有明显突变点。本研究利用 CaCl_2 提取的磷作为土壤

溶液磷含量指标,与土壤 Olsen-P、Bray-P 进行拟合,结果发现 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 与 Olsen-P、Bray-P 均线性相关且有明显突变点,土壤磷流失突变点 Olsen-P、Bray-P 含量分别为 56.31 和 $118.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,对应的 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 浓度分别为 2.49 和 $2.69 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。由于红壤区水田和旱地土壤 pH 都较低,Bray-P 主要用来评价酸性土壤磷的生物有效性,所以采用土壤磷流失突变点 Bray-P 的含量来评价红壤磷流失风险更为合理。

依据本研究得出的土壤磷流失突变点,余江县水田土壤磷含量均未超过磷突变点,表明水田土壤磷流失风险较低,旱地 Olsen-P、Bray-P 超过磷突变点分别占 50% 和 33%,旱地 Olsen-P 含量最高为 $232.09 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,Bray-P 含量最高为 $353.13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,是土壤磷流失突变点的数倍,表明旱地土壤磷具有一定流失风险。本研究对采样点水田周边排水沟渠水总磷含量的测定结果也表明,所有水田周边的水样总磷含量都低于地表水环境质量标准 (GB 3838-2002) II 类水的总磷标准限值,表明水田磷流失风险确实较小。

4 结论与建议

通过考虑土壤磷的农学意义和环境意义两个方面,对南方红壤区水田、旱地的土壤磷素丰缺情况进行了分析。在此基础上,对土壤有效磷含量、 $\text{CaCl}_2\text{-P}$ 含量和周边水样磷浓度进行了关联分析,探讨了红壤磷流失风险,为南方红壤磷素管理提供了理论依据。主要结论和建议如下: (1) 余江县水田土壤的缺磷点位比例较高,高磷点位较少,旱地土壤则与之相反; (2) 余江县水田土壤中,所有调查点位的土壤有效磷未超过磷流失突变点,磷流失风险低,而旱地土壤中有效磷超过磷流失突变点的点位较多,磷流失风险高; (3) 建议余江县适当增加水田中磷肥的施用量,降低高磷旱地的磷肥施用量。

参考文献:

- [1] 赵其国. 开拓资源优势,创新研发潜力,为我国南方红壤地区社会经济发展作贡献——纪念中国科学院红壤生态实验站建站 30 周年[J]. 土壤, 2015, 47 (2): 197-203.
- [2] 沈仁芳, 赵学强. 酸性土壤可持续利用[J]. 农学学报, 2019, 9 (3): 16-20.
- [3] Zhao X Q, Chen R F, Shen R F. Coadaptation of plants to multiple stresses in acidic soils [J]. Soil Science, 2014, 179 (10-11): 503-513.
- [4] 鲍学敏, 赵学强, 肖作义, 等. 铝对不同耐铝水稻品种根系生长和养分吸收的影响[J]. 植物生理学报, 2015, 51 (12): 2157-2162.
- [5] 孙波, 梁音, 徐仁扣, 等. 红壤退化与修复长期研究促进东南丘陵区生态循环农业发展[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33 (7): 746-757.
- [6] Tao L, Li F B, Liu C S. Mitigation of soil acidification through changes in soil mineralogy due to long-term fertilization in southern China [J]. Catena, 2019, 174: 227-234.
- [7] Ma J, He P, Xu X, et al. Temporal and spatial changes in soil available phosphorus in China (1990-2012) [J]. Field Crops Research, 2016, 192: 13-20.
- [8] 李杰, 石元亮, 陈智文. 我国南方红壤磷素研究概况[J]. 土壤通报, 2011, 42 (3): 763-768.
- [9] 李春林, 陈敏旺, 王寅, 等. 吉林省农田耕层土壤速效磷、钾养分的时空变化特征[J]. 中国土壤与肥料, 2019 (4): 16-23.
- [10] 黄庆海. 长期施肥农田地力演变特征[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2014. 1-90.
- [11] 赵学强, 沈仁芳. 提高铝毒胁迫下植物氮磷利用的策略分析[J]. 植物生理学报, 2015, 51 (10): 1583-1589.
- [12] 刘惠见, 邓洪, 黄维恒, 等. 滇池流域不同利用方式下红壤磷素渗漏环境风险评价[J]. 中国土壤与肥料, 2019 (2): 54-60.
- [13] Rashmi I, Biswas A K, Kartika K S, et al. Phosphorus leaching through column study to evaluate P movement and vertical distribution in black, red and alluvial soils of India [J]. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 2020, 19 (3): 241-248.
- [14] 吕家珑. 农田土壤磷素淋溶及其预测[J]. 生态学报, 2003, 23 (12): 2689-2701.
- [15] Maguire R O, Sims J T. Soil testing to predict phosphorus leaching [J]. Journal of Environmental Quality, 2002, 31: 1601-1609.
- [16] Liang L Z, Shen R F, Yi X Y, et al. The phosphorus requirement of *Amaranthus mangostanus* L. exceeds the 'change point' of P loss [J]. Soil Use and Management, 2009, 25: 152-158.
- [17] 刘绍贵, 张桃林, 王兴祥, 等. 江西省余江县土壤肥力变化和驱动因素与对策研究[J]. 土壤通报, 2006, 37 (5): 869-874.
- [18] 李平, 熊又升, 王兴祥, 等. 余江县稻田土壤肥力状况及其对水稻产量影响的初步研究[J]. 土壤通报, 2010, 41 (5): 1095-1100.
- [19] 张忠启, 茆彭, 于东升, 等. 近 25 年来典型红壤区土壤 pH 变化特征——以江西省余江县为例[J]. 土壤学报, 2018, 55 (6): 1545-1553.
- [20] 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.
- [21] 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.

- [22] 赵伟明, 王艳艳, 马嘉伟, 等. 临安山核桃林地土壤磷素状况及淋失风险分析 [J]. 浙江农业学报, 2014, 26 (1): 154-158.
- [23] Liang L Z, Zhao X Q, Yi X Y, et al. Excessive application of nitrogen and phosphorus fertilizers induces soil acidification and phosphorus enrichment during vegetable production in Yangtze River Delta, China [J]. Soil Use and Management, 2013, 29 (2): 161-168.
- [24] 沈建国, 王忠, 李丹, 等. 余杭区新垦红壤耕地肥力特征及地力评价 [J]. 土壤通报, 2018, 49 (1): 55-60.
- [25] 许仙菊, 张永春, 赵学强, 等. 菜地土壤磷的农学和环境效应研究进展 [J]. 江西农业学报, 2010, 22 (7): 128-131.
- [26] 童文彬, 杨良飏, 章明奎. 浙江省红壤丘陵区旱地与水田土壤肥力的比较研究 [J]. 江西农业学报, 2019, 31 (4): 46-50.
- [27] 鲁艳红, 廖育林, 聂军, 等. 长期施肥红壤性水稻土磷素演变特征及对磷盈亏的响应 [J]. 土壤学报, 2017, 54 (6): 1471-1485.
- [28] 吕真真, 刘秀梅, 侯红乾, 等. 长期不同施肥对红壤性水稻土磷素及水稻磷营养的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25 (8): 1316-1324.
- [29] 段永惠, 刘娟, 刘惠见, 等. 红壤性水稻土磷素淋溶流失特征及环境阈值研究 [J]. 云南农业大学学报 (自然科学版), 2019, 34 (6): 1070-1075.
- [30] 姜波, 林咸永, 章永松. 杭州市郊典型菜园土壤磷素状况及磷素淋失风险研究 [J]. 浙江大学学报 (农业与生命科学版), 2008, 34 (2): 207-213.
- [31] Hesketh N, Brookes P C. Development of an indicator for risk of phosphorus leaching [J]. Journal of Environmental Quality, 2000, 29: 105-110.
- [32] 柏兆海, 万其宇, 李海港, 等. 县域农田土壤磷素积累及淋失风险分析——以北京市平谷区为例 [J]. 农业环境科学学报, 2011, 30 (9): 1853-1860.
- [33] 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淋失风险分析 [J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24 (6): 1689-1696.
- [34] 王荣萍, 丁效东, 廖新荣, 等. 华南地区蔬菜地不同质地土壤磷素淋失临界值研究 [J]. 中国农学通报, 2014, 30 (19): 246-250.

Current phosphorus status of red soil in drylands and paddy fields and its loss risks

XIAO Zuo-yi¹, MA Fei^{1, 2}, LIU Kai-lou³, ZHAO Xue-qiang^{2, 4*}, ZHENG Chun-li¹, ZHANG Hao-qing^{2, 4}, WANG Jia-lin^{2, 4}, SHEN Ren-fang^{2, 4}

(1. School of Environment and Energy, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou Inner Mongolia 014010; 2. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing Jiangsu 210008; 3. Jiangxi Institute of Red Soil/National Engineering and Technology Research Center for Red Soil Improvement, Nanchang Jiangxi 330046; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: Red soils are generally acid and contain more Fe and Al that can form Fe-P and Al-P, resulting in low P bioavailability. Applying P fertilizer can improve the capability of red soils to supply P for plants, but the P that is not used by plants accumulates in soils and has potential risks in polluting surface water. Researching soil P status has important implications for increasing crop yield and protecting ecological environment. Much more attention has been paid to the P status of red soils and surface water, but fewer studies pay attention to the direct link between red soil P status and surface water P pollution. We collected 54 soil samples in drylands, 54 soil samples in paddy fields and 24 water samples around paddy fields in Yujiang County, Jiangxi Province. We determined the Olsen-P, Bray-P and $\text{CaCl}_2\text{-P}$ concentrations of soil samples, and the total P concentrations of water samples. The results showed that, according to Olsen-P, 11% of drylands and 39% of paddy fields were P-deficient, 61% of drylands and 39% of paddy fields were P-moderate, and 11% of drylands and 11% of paddy fields were P-excess. According to Bray-P, 11% of drylands and 33% of paddy fields were P-deficient, 6% of drylands and 33% of paddy fields were P-moderate, and 77% of drylands and 6% of paddy fields were P-excess. A extremely correlation was observed among Olsen-P, Bray-P and $\text{CaCl}_2\text{-P}$. On the basis of the regressive analyses between Olsen-P and $\text{CaCl}_2\text{-P}$, and between Bray-P and $\text{CaCl}_2\text{-P}$, the change points of P loss were 56.31 and 118.4 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ for Olsen-P and Bray-P, respectively. According to the change points, the concentrations of Olsen-P and Bray-P in paddy fields never exceeded the P change point, but 50% and 33% of drylands exceeded the P change points of Olsen-P and Bray-P, respectively. The total P concentrations in the ditches around paddy fields never exceeded the total P standard for surface water in class II of the *Environmental Quality Standard for Surface Water*. Taken together, dryland soils have high available P concentrations and high P loss risk, whereas paddy soils have low available P concentrations and low P loss risk.

Key words: dryland; paddy field; phosphorus; loss risks