

应金耀, 阮弋飞, 邬奇峰, 等. 钱塘江附近农田土壤磷的积累及其流失的潜在风险[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(1): 26-32.

YING Jin-yao, RUAN Yi-fei, WU Qi-feng, et al. Accumulation and runoff loss potential risk of soil phosphorus in agricultural land near Qiantang River[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2019, 36(1): 26-32.

钱塘江附近农田土壤磷的积累及其流失的潜在风险

应金耀¹, 阮弋飞², 邬奇峰², 谢国雄³, 章明奎^{4*}

(1. 杭州市萧山区农技推广中心, 浙江 萧山 311203; 2. 杭州市临安区农技推广中心, 浙江 临安 311300; 3. 杭州市植保土肥总站, 杭州 310020; 4. 浙江大学环境与资源学院, 杭州 310058)

摘要:为探讨钱塘江周边农田土壤磷流失风险, 采集了181个代表性农田土壤, 分析了土壤藻类可利用磷、植物有效磷(Olsen P)、水溶性磷和磷零吸附时的磷平衡浓度(EPC₀)。结果表明, 土壤藻类可利用磷在5.89~932.65 mg·kg⁻¹之间, 平均为105.30 mg·kg⁻¹; 植物有效磷在1.00~444.76 mg·kg⁻¹之间, 平均为30.57 mg·kg⁻¹, 达到较高水平; 蔬菜地土壤磷素积累明显高于一般农田。土壤水溶性磷含量和EPC₀值随土壤中植物有效磷积累而增加, 当土壤中植物有效磷超过60 mg·kg⁻¹时, 土壤水溶性磷含量迅速增加; 土壤中植物有效磷>60 mg·kg⁻¹的样品比例达11.60%。土壤EPC₀可作为评价土壤磷素向水体释放磷的强度指标, 根据土壤EPC₀值与植物有效磷之间的线性关系, 估算得到的径流中磷达到Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ类地表水环境质量标准上限值相应的土壤植物有效磷临界值分别为7.9、13.7、20.9、28.2 mg·kg⁻¹和35.4 mg·kg⁻¹, 研究区大约有35.9%的农田磷积累可能产生的地表径流磷含量在Ⅳ~Ⅴ类的范围。研究认为, 钱塘江近江地段部分农田土壤中磷素已有明显积累, 存在较高的流失风险。建议把植物有效磷为30 mg·kg⁻¹和60 mg·kg⁻¹分别作为这一区域农田磷肥限量施用和禁止施用的参考值。

关键词:钱塘江; 农田; 磷; 积累; 释放

中图分类号:S151.93; X820.6 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2019)01-0026-07 doi: 10.13254/j.jare.2018.0051

Accumulation and runoff loss potential risk of soil phosphorus in agricultural land near Qiantang River

YING Jin-yao¹, RUAN Yi-fei², WU Qi-feng², XIE Guo-xiong³, ZHANG Ming-kui^{4*}

(1. Xiaoshan Agricultural Technology Promotion Center of Hangzhou, Xiaoshan 311203 China; 2. Lin'an Agricultural Technology Promotion Center of Hangzhou, Lin'an 311300, China; 3. Hangzhou Plant Protection and Soil-fertilizer Station, Hangzhou 310020, China; 4. College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: In this paper, 181 representative soil samples were collected from farmlands near Hangzhou section of the Qiantang River for characterizing algae available P, plant available P (Olsen P), water soluble P, and phosphorus equilibrium concentration at zero phosphorus adsorption (EPC₀), and evaluating its potential runoff loss risk. Results showed that accumulation of soil phosphorus in the study area reached a high level, and contents of soil algae available P ranged from 5.89 to 932.65 mg·kg⁻¹, with average of 105.30 mg·kg⁻¹. Contents of plant available P ranged from 1.00 to 444.76 mg·kg⁻¹ with mean of 30.57 mg·kg⁻¹. Soil phosphorus accumulated in vegetable soil was higher than that of other farmland. Content of soil water soluble P and EPC₀ increased with increasing the plant available P. Soil water soluble P increased rapidly when the plant available P was over 60 mg·kg⁻¹. About 11.60% of the soil samples had plant available P over 60 mg·kg⁻¹. The EPC₀ could be used as a threshold to evaluate release potential of soil phosphorus. From the linear relationship between the EPC₀ value and the plant available P of the soils, it was estimated that the critical values of plant available P were 7.9, 13.7, 20.9, 28.2 mg·kg⁻¹ and 35.4 mg·kg⁻¹, respectively, when phosphorus concentration in runoff from the agricultural lands reached at the upper limit of the environmental quality standard of Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ, Ⅳ and Ⅴ for the surface waters. About 35.9% of the farmlands in the study area had soil phosphorus

收稿日期:2018-03-05 录用日期:2018-05-03

作者简介:应金耀(1965—),男,浙江萧山人,学士,高级农艺师,主要从事土壤质量与养分管理技术的推广应用研究工作。E-mail:xsnyjy19651@163.com

*通信作者:章明奎 E-mail:mkzhang@zju.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(41071145)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41071145)

accumulation as high as it could product high runoff P concentrations which were equivalent to the range of P from IV to inferior V surface waters. It was concluded that some of the farmlands had obvious P accumulation in the soils, and had high risk of phosphorus runoff loss. It was suggested that application rate of phosphorus fertilizer should be controlled in the agricultural lands when the plant available P was over $30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, and phosphorus fertilization should be banned when the plant available P was over $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Keywords: Qiantang River; farmland; phosphorus; accumulation; release

磷是地球生命系统的主要营养元素,也是生态系统中常见的营养限制因子。由于农田土壤的磷素水平常常不能满足农作物生长的需要,施磷是农业高产的重要措施。但磷肥施用不当可导致磷在土壤中的过量积累,增加磷向地表水体的迁移,加剧地表水的富营养化^[1-2],农田磷素流失已成为地表水体中磷的重要来源^[3-5]。因此,了解农田土壤磷素积累及其存在形态有助于认识农田土壤磷素积累对地表水水质可能产生的潜在污染,为科学施肥提供依据。近年来,随着耕地利用强度加大、化肥施用量增加,由农业活动引起的面源污染问题逐渐受到关注^[2]。影响农田土壤氮、磷流失的因素很多,影响方式也很复杂。主要影响因素包括气候因子(降水量、降水强度、降水历程、蒸发量等)、土壤因子(土壤结构、质地、导水率、容重、养分积累、pH以及覆盖程度和表面粗糙度等)、水文地理因子(坡度、坡长、地下水位等)及农作管理因子(施肥数量、种类、方式、时间以及灌溉和耕作制度)等^[6-9]。国内外文献报道的农田磷素流失在时空上有很大的差异,施肥水平、气候条件、管理方式和土壤类型对农田磷素流失均可产生影响^[10-14]。研究表明,农田磷的流失与土壤磷的积累密切相关^[15],而农田土壤中积累的磷对水体的潜在影响随农田与水体之间的距离减小而增大,水体附近的农田对水体的影响最为明显。钱塘江是浙江省的第一大河,杭州市地表年供水量的85%来源于钱塘江,其水体的质量对杭州市生产、生活有极大的影响。钱塘江流域内分布的工业、农业、采砂、船舶、生活等人为活动都可能会对钱塘江水质产生影响。该区域是浙江省农业(包括粮食、果蔬等经济作物)集约生产的重要区域。为了获得高产,这一区域的肥料施用水平较高,农业面源污染是这一区域较大的污染源。但至今对这一区域农田土壤的磷素积累状况缺乏全面的认识。为了解长期施用磷肥对钱塘江流域农地土壤磷积累及其流失风险的影响,在钱塘江流域杭州段近江地区采集了181个代表性土壤样品,分析了土壤藻类可利用磷、有效磷、可释放态磷和磷零吸附时的磷平衡浓度(EPC_0),探讨土壤中磷的流失风险。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

研究区域位于钱塘江杭州地区段,在新安江水库与杭州市市区之间(图1),从上游至下游分布的县(市、区)依次为淳安县(千岛湖)、建德市、桐庐县、富阳区和萧山区(属杭州市区)。于2014年12月在研究区内采集了181个农田土壤样品,所有样品的采样点分布在离钱塘江(包括千岛湖)水体3 km的范围内,每一个土样由各采样点半径为10 m的农田范围内的7~10个分样混合而成,采样深度统一为0~15 cm。采样地涉及淳安县、建德市、桐庐县、富阳区和萧山区(图1),基于各行政区近江地段农田分布的面积及农田类型,相应的采样数分别为21、34、22、74个和30个;根据采样地的土壤利用状况,大致可把样地分为蔬菜地和一般农田(主要种植水稻和旱作),采样数各为83个和98个。据浙江省第二次土壤普查土壤类型的划分^[16],涉及的土壤类型有水稻土和潮土2个土类,包括泥质田、培泥砂田、洪积泥砂田、泥砂田、粉泥田、培泥砂土、清水砂、粉泥土、淡涂泥等土属。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 藻类可利用磷、植物有效磷和水溶性磷的测定

采集的土壤样品经充分混合、风干后分别过2 mm和0.15 mm土筛,用于土壤分析和试验。藻类可



图1 采样点分布示意图

Figure 1 Distribution diagram of sampling points

利用磷是指土壤中能被藻类吸收利用的磷组分^[17],当土壤物质从农田中流失进入水体时,这部分磷可对水体藻类生长及发生富营养化产生影响;植物有效磷是指土壤中能被作物吸收利用的磷,常被用来评价土壤中可被作物吸收利用的磷的强度^[18-19];水溶性磷是指土壤中能溶于水的磷组分,它可直接释放进入水体,影响地表水体中磷的浓度^[20]。土壤中藻类可利用磷含量>植物有效磷含量>水溶性磷含量,藻类可利用磷由植物有效磷及溶于弱碱的有机磷和部分铝结合态磷组成^[20-21];植物有效磷主要由水溶性磷和可交换态磷组成。藻类可利用磷用0.1 mol·L⁻¹ NaOH提取,水土比为500:1^[22];土壤中植物有效磷(Olsen P法)用0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃(pH 8.5)溶液提取^[23];水溶性磷的提取方法如下:称相当4 g土样于100 mL离心管中,加入40 mL的0.02 mol·L⁻¹ KCl稀盐溶液,加盖振荡2 h,离心过滤后用钼兰比色法测定提取液中磷的浓度。

1.2.2 土壤磷零吸附的溶液磷平衡浓度(EPC₀)的测定

根据土壤中植物有效磷的分析结果,从181个采集的农田土壤样品中筛选50个(蔬菜地25个、一般农田25个)样品用于EPC₀的测定。EPC₀为土壤对溶液中磷零吸持量时溶液中磷的浓度,可表征土壤磷的释放强度及对水体的影响程度。一般来说,土壤磷的EPC₀值与水溶性磷呈正相关。当农田土壤磷的EPC₀值超过周围水体磷的浓度时,农田磷的流失可对周围水体产生明显影响。EPC₀值的测定方法如下:每一土壤各称取5 g共10份于100 mL的离心管中,分别加入含P量各为0、0.005、0.010、0.025、0.050、0.10、0.25、0.50、1.00、1.50 mg·L⁻¹的0.02 mol·L⁻¹ KCl溶液(P用KH₂PO₄配置)50 mL,同时加入3滴氯仿,以抑制微生物的活动。在25℃下间歇振荡48 h,过滤后用钼兰比色法测定平衡溶液中磷的浓度,根据试验前后磷浓

度的变化计算土壤对P的吸附量/解吸量。利用回归法计算吸附量为零时的平衡液中磷浓度(EPC₀)。

2 结果与分析

2.1 土壤中藻类可利用磷和植物有效磷的积累状况

NaOH提取的土壤磷与水生藻类生长密切相关,其能代表土壤中可释放供给藻类生长的有效磷总量^[22]。由表1可知,钱塘江近江地段农田土壤藻类可利用磷在5.89~932.65 mg·kg⁻¹之间,平均为105.30 mg·kg⁻¹。不同采样点之间的土壤藻类可利用磷有很大的差异,最高为最低的158.34倍,变异系数为122.26%。

分析结果(表1)表明,钱塘江近江地段农田土壤中植物有效磷在1.00~444.76 mg·kg⁻¹之间,平均为30.57 mg·kg⁻¹。不同采样点之间的土壤中植物有效磷也有很大的差异,变异系数达181.356%。根据土壤磷素能否满足作物生长需要,土壤中植物有效磷由高至低一般可分为6级:特高(>40 mg·kg⁻¹)、高(20~40 mg·kg⁻¹)、中(15~20 mg·kg⁻¹)、中下(10~15 mg·kg⁻¹)、低(5~10 mg·kg⁻¹)和很低(<5 mg·kg⁻¹)^[16]。统计表明,钱塘江近江地段农田土壤中植物有效磷<5 mg·kg⁻¹和>40 mg·kg⁻¹的样品比例分别占6.1%和15.5%;在5~10、10~15、15~20、20~40 mg·kg⁻¹之间的比例分别为26.5%、19.9%、9.4%、22.7%。由此可见,长期施用磷肥已使钱塘江近江地段农田土壤植物有效磷总体上达较高水平,但变幅较大,仍约有52.5%的土壤其植物有效磷在15 mg·kg⁻¹以下,但也有15.5%的样品土壤的植物有效磷超过了植物正常生长需要的量(>40 mg·kg⁻¹)。土壤中藻类可利用磷与植物有效磷的变化有显著的相似性,二者之间具有显著的相关性($r=0.987, n=181, P<0.01$)。

2.2 不同地段农田土壤磷积累的差异

由表1可知,钱塘江不同地段农田土壤中藻类可

表1 不同地段农田土壤磷积累的比较

Table 1 Comparison of soil phosphorus accumulated in farmlands at different sections of the Qiantang River

地段 Section	藻类可利用磷 Algae available P/mg·kg ⁻¹		植物有效磷 Plant available P/mg·kg ⁻¹		水溶性磷 Water-soluble P/mg·kg ⁻¹	
	范围 Range	平均±标准差 Mean±standard deviation	范围 Range	平均±标准差 Mean±standard deviation	范围 Range	平均±标准差 Mean±standard deviation
淳安县(n=21)	28.74~298.74	93.03±80.49b	4.90~113.30	27.86±33.78b	0.36~7.87	1.31±1.17b
建德市(n=34)	5.89~174.56	56.96±40.74b	1.20~62.80	13.79±13.53b	0.12~1.65	0.48±0.42b
桐庐县(n=22)	29.63~255.87	90.99±62.03b	5.10~72.50	22.12±19.23b	0.24~2.13	0.66±0.49b
富阳区(n=74)	7.24~932.65	118.41±157.44ab	1.00~444.76	36.28±69.86ab	0.02~85.45	3.80±4.11ab
萧山区(n=30)	75.35~312.54	178.277±90.21a	20.30~95.20	49.81±28.04a	0.27~10.65	2.86±1.56a

注:同一列统计值后字母不同者表示差异显著($P<0.05$)。

Note: Different letters in the same column indicate significant differences ($P<0.05$).

利用磷和植物有效磷有一定的差异。虽然各县(市、区)内土壤磷的积累水平因土地利用方式不同有较大的差异,但总体上以近杭州中心城市的萧山区为最高,其植物有效磷平均已超过了 $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 显著高于淳安县、建德市和桐庐县。建德市最低,其植物有效磷平均含量低于 $15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。富阳区农田土壤中藻类可利用磷和植物有效磷也较高,接近于萧山区,二者之间差异不明显;而桐庐县和淳安县的农田土壤中藻类可利用磷和植物有效磷平均含量处于中等水平。钱塘江不同地段农田土壤中藻类可利用磷和植物有效磷的差异,一方面可能与各地施磷水平差异有关,另一方面也可能与土地利用方式差异有关。萧山区和富阳区农田种植蔬菜较多,其施磷水平往往也较高。种植蔬菜的农田土壤中平均藻类可利用磷和植物有效磷高于一般农田(图2),前者土壤中藻类可利用磷和植物有效磷分别在 $21.45 \sim 932.65 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $3.80 \sim 444.76 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,平均分别为 $144.23 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $45.95 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 后者土壤中藻类可利用磷和植物有效磷分别在 $5.89 \sim 312.54 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1.00 \sim 95.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,平均分别为 $72.33 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $17.54 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。种植蔬菜的农田土壤中藻类可利用磷和植物有效磷平均分别为一般农田的2.0倍和2.6倍,其中它们之间植物有效磷的差异达到显著水平($P < 0.05$)。

2.3 土壤中水溶性磷含量

水溶性磷是土壤中易释放进入水体磷的容量指标,在雨季或灌溉排水过程中易释放至径流中,对农田土壤磷素流失(淋失)有很大的影响。分析结果(表

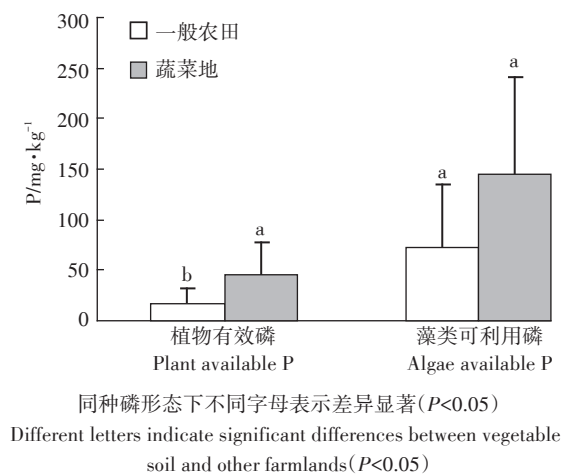


图2 蔬菜地与一般农田土壤藻类可利用磷和植物有效磷(Olsen P)的比较

Figure 2 Comparison of soil algae available P and plant available P(Olsen P) between vegetable soil and other farmlands

1)表明,钱塘江不同地段农田土壤中水溶性磷含量在 $0.02 \sim 85.44 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,平均为 $2.59 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 变异系数达395.37%。与藻类可利用磷和植物有效磷的变化相似,钱塘江不同地段农田土壤间水溶性磷也有很大的差异。同样,蔬菜地与一般农田之间土壤水溶性磷也有很大的差异,前者平均为 $4.86 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 后者平均为 $0.67 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 前者为后者的7.3倍。由此可见,由于土壤磷素积累的差异,不同农田之间土壤可释放至径流中的水溶性磷也有极大的差异。

2.4 土壤磷零吸附时溶液磷平衡浓度(EPC₀)

模拟试验表明,在设定的初始低浓度磷溶液($0 \sim 1.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)范围内,土壤对磷吸持量随溶液中磷浓度的增加而增加,二者具线性关系。由吸附试验的平衡液中磷浓度与土壤对磷吸附量/解吸量之间建立的回归方程中可计算当磷吸附量/解吸量为零时的平衡液磷的浓度,此浓度即为EPC₀。利用该值可判别土壤与水作用时,土壤与水体间磷的流向。当水体中磷浓度高于该土壤的EPC₀时,土壤可发生对磷的吸附作用;而当水体中磷浓度低于该土壤的EPC₀时,土壤将发生磷的释放作用。50个样品的测定结果表明,土壤EPC₀有很大的差异,在 $0.0056 \sim 1.45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,平均为 $0.325 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 变异系数为73.54%,最大值为最低值的259倍。与植物有效磷的情况相似,种植蔬菜的农田($n=25$)土壤EPC₀平均约为一般农田($n=25$)的5.3倍。

2.5 土壤中水溶性磷、EPC₀与植物有效磷的关系

图3为土壤水溶性磷与植物有效磷的关系,从图3可知,土壤中水溶性磷随植物有效磷的增加而增加,土壤中植物有效磷越高,水溶性磷随植物有效磷增加程度也越明显;土壤中植物有效磷为 $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

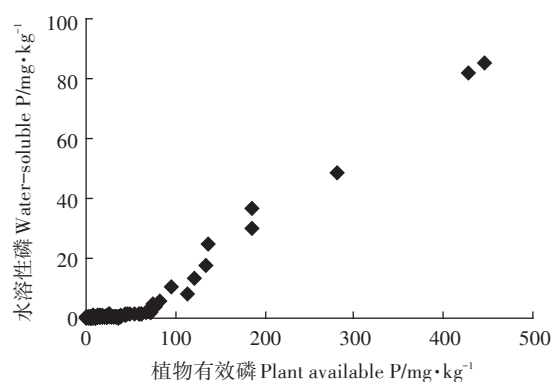


图3 土壤水溶性磷与植物有效磷(Olsen-P)的关系

Figure 3 Relationship between water-soluble P and plant available P(Olsen P)

左右是一个明显的转折点。当土壤中植物有效磷低于 $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,土壤水溶性磷普遍较低,其随植物有效磷增加的变化较小,水溶性磷随植物有效磷直线变化的斜率为 0.025;但当土壤中植物有效磷高于 $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,水溶性磷随之迅速地增加,其变化的斜率为 0.205,为植物有效磷低于 $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时的 8.2 倍。可见,一旦土壤中植物有效磷超过 $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,土壤中磷的释放迅速增强。本研究土壤中有 11.60% 的植物有效磷超过了 $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

图 4 表明,土壤 EPC_0 值随植物有效磷(Olsen P)增加而增加,两者的线性关系为: $\text{EPC}_0 = 0.0138 \text{ Olsen P} - 0.089$ ($r = 0.8675$, $n = 50$, $P < 0.01$)。当土壤与水体之间不发生磷的相互交换时,水溶液中磷的浓度大致与土壤的 EPC_0 值相同,因此,河流 I、II、III、IV、V 类地表水总磷环境质量标准上限值对应的 EPC_0 值分别为 0.02、0.10、0.20、0.30、0.40 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。根据以上土壤 EPC_0 值与植物有效磷之间的关系,可大致估算出河流 I、II、III、IV、V 类地表水总磷环境质量标准上限值对应的土壤植物有效磷含量分别为 7.9、13.7、20.9、28.2 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 35.4 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。根据采集的 181 个农田土壤样品的植物有效磷含量分布,对应于河流 I、II、III、IV、V 和劣 V 类地表水总磷环境质量标准的农田土壤样本数组成分别为 21.54%、28.18%、14.36%、10.50%、6.63% 和 18.78%,由此可以推断,大约有 35.9% 的农田磷积累已达到较高水平 ($28 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),产生的地表径流的磷处于 IV~劣 V 类的范围,这表明钱塘江附近大约有 1/3 的农田磷积累水平可对水体产生明显磷污染潜在风险。

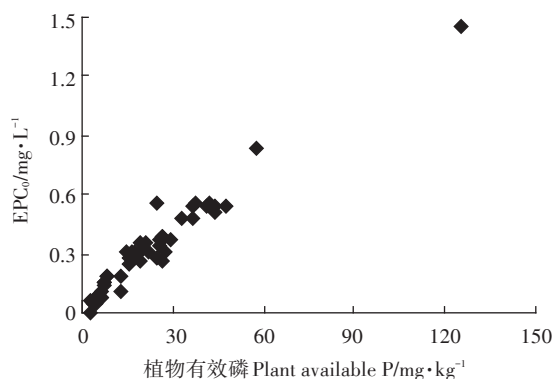


图 4 土壤磷零吸附的溶液磷平衡浓度 (EPC_0) 与植物有效磷 (Olsen-P) 的关系

Figure 4 Relationship between phosphorus equilibrium concentration at zero phosphorus adsorption (EPC_0) and plant available P (Olsen P)

3 讨论

农田中磷的流失对水环境的影响主要通过 2 种途径:通过地表径流方式把磷直接输入地表水体和通过下渗水方式把磷带入地下水,二者都与土壤中磷的积累有关。因此,与传统农业对土壤磷素管理不同,现代农业希望达到的土壤磷水平既能满足农作物正常生长的需要,但又不能使磷素过度积累影响环境。一般农田地表径流流失的磷主要发生在雨季,其流失的磷可以是水溶态,也可以为颗粒态,但无论是可溶态还是颗粒态,地表径流中的磷等浓度常常与表层土壤中磷积累呈正相关^[14,24]。本研究表明,目前钱塘江杭州段附近农田磷积累已达到较高的水平,其植物有效磷平均为 $30.57 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,远高于 20 世纪 80 年代杭州市耕地土壤植物有效磷的平均含量 ($11.45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[25],其原因与近 30 年来磷肥施用量大幅增加有关。据报道,长期高量施用化肥或畜禽粪便引起土壤磷积累已成为许多农区地表径流中养分流失的主要原因^[26-28]。

农田磷素主要是在降雨、灌溉过程中通过径流、排水或渗滤以溶解态或颗粒态形式进入水体,其进入水体需满足 2 个方面的条件:一是存在由农田向外迁移的径流,二是农田土壤中有足够的磷进入径流。钱塘江杭州段位于亚热带地区,降水丰富,每年 5—8 月是这一地区的雨季,也是当地农作物的主要生长季节,而且此时大棚蔬菜地已揭棚生产。由于钱塘江流域特殊的地形,沿江两岸农田外侧为丘陵山地,降雨季节常常可产生大量的地表径流注入钱塘江。这种情况下,积累在土壤中的磷可逐渐释放随径流迁入钱塘江水体,从农田中释放进入水体磷的数量与土壤中磷的积累程度有关。国内外对土壤磷素积累与土壤向环境中释放磷能力的关系作了较多的研究,当农田磷积累较低时,其流失的磷相对较少,对水环境的影响也较小;但当土壤磷积累至一定程度时,土壤向环境中释放磷的能力会发生明显的变化,释放强度明显地提升。有研究把土壤向环境中释放磷的强度发生明显变化的土壤磷积累“转折点”称之为淋失/流失阈值(或临界值)^[15],并应用此值作为保护水质和识别土壤是否应禁止施用化肥和粪肥的依据。从本研究土壤的水溶性磷(易释放态磷)含量与植物有效磷的关系可以看出,当土壤中植物有效磷超过 $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,土壤向环境中释放磷的强度显著提升。这一阈值基本上与文献[19, 24, 29]范围一致。例如,Heckrath

等^[24]通过比较渗漏液与土壤有效磷的关系发现,当土壤植物有效磷超过 $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,渗漏水中磷的浓度会发生明显的增加。钟晓英等^[29]通过室内模拟试验对我国 23 个耕地土壤进行了磷淋失风险评估,得出不同土壤磷淋失阈值差异较大,在 $29.96 \sim 156.78 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间。一般认为当土壤中植物有效磷在 $20 \sim 40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间时,土壤磷素已基本能满足作物生长的需要^[19]。本研究也表明,当土壤中植物有效磷含量达 $28 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,其对钱塘江水体产生明显影响,可导致部分水体向 IV~劣 V 类方向发展,而此类农田的面积约占研究样本的 1/3 左右。鉴于土壤中植物有效磷超过 $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,土壤水溶性磷迅速增加,相应的土壤磷的流失潜力也显著地增强,说明此时土壤磷流失风险大大增加,再继续施用磷肥,可发生磷的显著流失。因此,可考虑把植物有效磷为 $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 作为钱塘江流域农田磷肥禁止施用的参考值,此时应该禁止施用磷肥。而当土壤磷含量达到 $28 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,农田产生的地表径流中磷的含量已达到较高水平,大致处于 IV~劣 V 类地表水磷浓度的范围,考虑到钱塘江上游水质主要为 I~Ⅲ类水,而当土壤有效磷达到 $30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时已基本满足大多数农作物生长的需要,磷肥应采取限量施用的方式,减少磷肥的投入或隔年施用磷肥,以减免对周围水质的影响。

4 结论

(1) 钱塘江附近农田土壤磷已有明显的积累,植物有效磷平均达 $30.57 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,但不同利用方式土壤之间有很大的差异;土壤中植物有效磷积累水平:萧山区>富阳区>淳安县>桐庐县>建德市;蔬菜地土壤磷的积累量高于一般农田。

(2) 研究区土壤中可释放磷容量(水溶性磷)和强度(EPC₀值)均随土壤磷积累而增加。同一区域内缺磷土壤与磷过度积累土壤共存,这要求加强农田土壤有效磷水平的检测,并根据植物有效磷状况确定施磷量,在磷积累明显(高于 $30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)的土壤应严格控制磷肥施用量,或采用隔年施用磷肥的方法。当土壤中植物有效磷超过 $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,土壤水溶性磷迅速增加,磷的释放潜力显著增强,建议把植物有效磷为 $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 作为这一区域农田土壤磷肥禁止施用的参考值。

参考文献:

[1] Edwards A C, Twist H, Codd G A. Assessing the impact of terrestrially

- derived phosphorus on flowing water systems[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29(1):117-124.
- [2] Van Der Molen D T, Breewwsma A, Boers P C M. Agricultural nutrient losses to surface water in the Netherlands: Impact, strategies, and perspectives[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1998, 27(1):4-11.
- [3] Drewry J J, Newham L T H, Croke B F W. Suspended sediment, nitrogen and phosphorus concentrations and exports during storm events to the Tuross estuary, Australia[J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(2):879-887.
- [4] 李文超, 翟丽梅, 刘宏斌, 等. 流域磷素面源污染产生与输移空间分异特征[J]. 中国环境科学, 2017, 37(2):711-719.
- LI Wen-chao, ZHAI Li-mei, LIU Hong-bin, et al. Contrasting spatial distribution of the emission and export of phosphorus loss from a typical watershed in Yunnan Plateau lakes area[J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(2):711-719.
- [5] 解清杰, 杜甫义, 苏航, 等. 生态介质对农业面源污染中氮磷的截留效果[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2016, 37(5):591-596.
- XIE Qing-jie, DU Fu-yi, SU Hang, et al. Retention effect of eco-medium on nitrogen and phosphorus of agricultural non-point source pollution[J]. *Journal of Jiangsu University (Natural Science Editions)*, 2016, 37(5):591-596.
- [6] Han C W, Xu S G, Liu J W, et al. Nonpoint-source nitrogen and phosphorus behavior and modeling in cold climate: A review[J]. *Water Science and Technology*, 2010, 62(10), 2277-2285.
- [7] 康玲玲, 朱小勇, 王云璋, 等. 不同雨强条件下黄土性土壤养分流失规律研究[J]. 土壤学报, 1999, 36(4):536-543.
- KANG Ling-ling, ZHU Xiao-yong, WANG Yun-zhang, et al. Research on nutrient loss from a loessial soil under different rainfall intensities [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1999, 36(4):536-543.
- [8] Eblers W. Observations on earthworm channels and infiltration on tilled and untilled losses soil[J]. *Soil Science*, 1975, 119:242-249.
- [9] Giri S, Mukhtar S, Wittie R. Vegetative covers for sediment control and phosphorus sequestration from dairy waste application fields[J]. *Transactions of the ASABE*, 2010, 53(3):803-811.
- [10] Cao Z H, Zhang H C. Phosphorus losses to water from lowland rice fields under rice-wheat double cropping system in the Tai Lake region [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2004, 26(2/3):229-236.
- [11] Zhang M K, He Z L, Calvert D V, et al. Spatial and temporal variations of water quality in drainage ditches within vegetable farms and citrus groves[J]. *Agricultural Water Management*, 2003, 65:39-57.
- [12] 李艾芬, 章明奎. 浙北平原不同种植年限蔬菜地土壤氮磷的积累及环境风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(1):122-127.
- LI Ai-fen, ZHANG Ming-kui. Accumulation and environmental risk of nitrogen and phosphorus in vegetable soils with different plantation history in northern Zhejiang[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(1):122-127.
- [13] 高秀美, 汪吉东, 刘兆普, 等. 集约化蔬菜地土壤磷素累积特征及流失风险[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(1):82-86.
- GAO Xiu-mei, WANG Ji-dong, LIU Zhao-pu, et al. Accumulation and leaching risk of phosphorus in vegetable soils under intensive cultivation[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010, 26(1):

- 82-86.
- [14] Hooda P S, Truesdale V W, Edwards A C, et al. Manuring and fertilization effects on phosphorus accumulation in soils and potential environmental implications[J]. *Advances in Environmental Research*, 2001, 5(1):13-21.
- [15] Schoumans O F, Groenendijk P. Modeling soil phosphorus levels and phosphorus leaching from agricultural land in the Netherlands[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29:111-116.
- [16] 浙江省土壤普查办公室. 浙江土壤[M]. 杭州:浙江科学技术出版社, 1993:394-395.
Zhejiang Soil Investigation Office. Soils of Zhejiang Province[M]. Hangzhou:Zhejiang Science and Technology Press, 1993:394-395.
- [17] 刘子国, 黄敏, 余萃. 表征测试指标分析土壤磷素流失风险的研究[J]. 湖南农业科学, 2008(4):75-77, 80.
LIU Zi-guo, HUANG Min, YU Cui. Study on the loss risk of phosphate fertilizer in soil by characteristic test index analysis[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2008(4):75-77, 80.
- [18] 傅绍清, 宋金玉. 土壤有效磷的测定方法及其与磷素形态关系的研究[J]. 土壤学报, 1982, 19(3):305-310.
FU Shao-qing, SONG Jin-yu. Determination of available phosphorus in soil and its relationship with phosphorus forms[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1982, 19(3):305-310.
- [19] 龚娟, 马友华, 胡宏祥, 等. 农田土壤磷的环境指标研究进展[J]. 中国农学通报, 2016, 32(2):112-117.
GONG Juan, MA You-hua, HU Hong-xiang, et al. Research progress on environmental indicators of phosphorus in cropland soil[J]. *Chinese Agronomy Bulletin*, 2016, 32(2):112-117.
- [20] 章明奎. 农业系统中氮磷的最佳管理实践[M]. 北京:中国农业出版社, 2005:76-110.
ZHANG Ming-kui. Best management practice of nitrogen and phosphorus in agricultural system[M]. Beijing:China Agricultural Publishing House, 2005:76-110.
- [21] Fang F, Brezonic P L, Mulla D J, et al. Estimating runoff phosphorus losses from calcareous soils in the Minnesota River basin[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2002, 32(6):1918-1929.
- [22] Wolf A M, Baker D E, Pionke H B. Soil tests for estimating labile, soluble and algae-available phosphorus in agricultural soils[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1985, 14(3):341-348.
- [23] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海:上海科技出版社, 1978.
Nanjing Institute of Soil Research, Chinese Academy of Sciences. Methods of soil physico-chemical analysis[M]. Shanghai:Shanghai Science and Technology Press, 1978.
- [24] Heckrath G, Brookes P C, Poulton P R, et al. Phosphorus leaching from soils containing different phosphorus concentrations in the Broadbalk experiment[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1995, 24(2):904-910.
- [25] 徐世根. 杭州土壤[M]. 杭州:浙江科学技术出版社, 1991.
XU Shi-gen. Soils of Hangzhou[M]. Hangzhou:Zhejiang Science and Technology Press, 1991.
- [26] Shafqat M N, Pierzynski G M. Long-term effects of tillage and manure applications on soil phosphorus fractions[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2010, 41(9):1084-1097.
- [27] Gale P M, Mullen M D, Cieslik C, et al. Phosphorus distribution and availability in response to dairy manure applications[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2000, 31(5/6):553-565.
- [28] Motavalli J, Miles R. Soil phosphorus fractions after 111 years of animal manure and fertilizer application[J]. *Biology and fertility of Soil*, 2002, 36(1):35-42.
- [29] 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 Xiao-ying, ZHAO Xiao-rong, BAO Hua-jun, et al. The evaluation of phosphorus leaching risk of 23 Chinese soils. I. Leaching criterion[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(10):2275-2280.