

DOI: 10.11766/trxb201908220433

王肖君, 王季丰, 侯琼, 冷明珠, 倪吾钟. 西苕溪流域主要经济林土壤磷素流失风险研究[J]. 土壤学报, 2021, 58 (2): 487-494.

WANG Xiaojun, WANG Jifeng, HOU Qiong, LENG Mingzhu, NI Wuzhong. Potential Risk of Phosphorus Loss from Main Non-Wood Forest Soils in Xitiaoxi Watershed[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58 (2): 487-494.

## 西苕溪流域主要经济林土壤磷素流失风险研究\*

王肖君<sup>1</sup>, 王季丰<sup>1</sup>, 侯琼<sup>1</sup>, 冷明珠<sup>2</sup>, 倪吾钟<sup>1†</sup>

(1. 浙江大学环境与资源学院, 浙江省农业资源与环境重点实验室, 杭州 310058; 2. 浙江省安吉县农业农村局, 浙江安吉 313300)

**摘要:** 经济林土壤磷素积累与潜在流失风险的研究对流域内磷素管理和面源污染控制十分必要。通过采样调查和室内分析研究了西苕溪流域主要经济林土壤测试磷的状况及磷素流失的潜在风险, 调查采集了西苕溪流域安吉段主要经济林(毛竹、白茶、板栗)土壤样品 105 个, 探讨了土壤理化性质对土壤磷素流失的影响以及土壤有效磷的控制阈值。结果表明, 土壤水溶性磷(WEP)与土壤有机碳(SOC)、全磷(TP)呈极显著正相关( $P < 0.01$ ), 模拟酸雨浸提磷(SARP)也与土壤SOC、TP呈极显著正相关( $P < 0.01$ ), 土壤WEP、SARP与pH呈极显著负相关( $P < 0.01$ ), 但决定系数 $R^2$ 分别仅有0.187~0.280, 影响相对较小。土壤WEP、SARP与有效磷(Bray 1-P)的关系可用分段线性回归方程描述( $P < 0.01$ ),  $R^2$ 分别可达0.992、0.991, 估算得出, 与WEP、SARP相对应的土壤Bray 1-P的阈值分别为93.63、87.68  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 后者较前者降低了5.95  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。此外, 土壤Bray 1-P含量超过40  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、低于5  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的样品占比分别可达17.14%、38.01%, 缺磷与磷过度积累现象并存。土壤磷素的流失风险主要受土壤Bray 1-P、TP、SOC、pH等因素的影响, 其中Bray 1-P是最重要的影响因子。酸雨会加大土壤磷素流失的潜在风险, 作为酸雨频发区域的西苕溪流域, 土壤有效磷水平的限制应更为严格。

**关键词:** 西苕溪流域; 经济林; 土壤测试磷; 阈值; 模拟酸雨

中图分类号: S153; S151.9 文献标志码: A

## Potential Risk of Phosphorus Loss from Main Non-Wood Forest Soils in Xitiaoxi Watershed

WANG Xiaojun<sup>1</sup>, WANG Jifeng<sup>1</sup>, HOU Qiong<sup>1</sup>, LENG Mingzhu<sup>2</sup>, NI Wuzhong<sup>1†</sup>

(1. College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang Provincial Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Bureau of Agriculture and Rural Affairs of Anji County, Zhejiang Province, Anji, Zhejiang 313300, China)

**Abstract:** 【Objective】 Studies on accumulation and potential loss risk of soil phosphorus in non-wood forest soils are essential to management of soil phosphorus and control of non-point source P pollution in watersheds. So a research project was carried out in the Xitiaoxi watershed. 【Method】 In the project, a total of 105 soil samples were collected in the main non-wood forests, such as moso bamboo (*Phyllostachys heterocyclus* (Carr.) Mitford cv. *Pubescens* Mazel ex H.de leh.), white tea (*Camellia sinensis* (L.)

\* 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07101-012)资助 Supported by the Major Science and Technology Program for Water Pollution Control and Treatment (No. 2014ZX07101-012)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: wzni@zju.edu.cn

作者简介: 王肖君(1994—), 男, 浙江人, 硕士, 主要从事养分资源管理与农业面源污染控制研究。E-mail: wxj0531@qq.com

收稿日期: 2019-08-22; 收到修改稿日期: 2019-12-19; 网络首发日期(www.cnki.net): 2020-05-11

O. Ktze.), chestnut (*Castanea mollissima* Bl.) in the watershed for lab analysis of concentrations of water-extractable phosphorus (WEP) and simulated-acid-rain-extractable phosphorus (SARP) and some main soil physico-chemical properties such as total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), total potassium (TK), alkalyzable nitrogen (AN), available phosphorus (Bray 1-P), readily available potassium (AK), pH, soil organic carbon (SOC). Acid rain set at 4.75 in pH was simulated and prepared with sulphate acid and nitrate acid. Correlation analysis and regression analysis was performed of the obtained data to determine influences of soil physico-chemical properties on the risk of phosphorus runoff loss and threshold of soil available phosphorus. 【Result】 In the survey area, soil TP content varied in the range of 0.22-0.73 g·kg<sup>-1</sup> (0.42 g·kg<sup>-1</sup> on average) and Bray 1-P content in the range of 0.93-313.2 mg·kg<sup>-1</sup> (30.87 mg·kg<sup>-1</sup> on average) with coefficient of variation reaching up to 204.7% and the soil samples over 40 mg·kg<sup>-1</sup> and below 5 mg·kg<sup>-1</sup> in Bray-P content accounted for 17.14% and 38.01% of all the analyzed ones, respectively; soil WEP content varied in the range of 0.03- 38.15 mg·kg<sup>-1</sup> (2.64 mg·kg<sup>-1</sup> on average) with coefficient of variation reaching up to 267.5%; and soil SARP content varied in the range of 0.03-42.91 mg·kg<sup>-1</sup> (2.86 mg·kg<sup>-1</sup> on average) with coefficient of variation reaching up to 268.6%. It was found that soil WEP and SARP were significantly and positively related to soil organic carbon (SOC) and TP ( $P < 0.01$ ), and negatively to soil pH, with determination coefficient ( $R^2$ ), however, being only 0.266, 0.251, 0.280, 0.262, 0.187 and 0.190, respectively, which indicates that they are relatively not much affected by these soil properties. The relationship between WEP, SARP and Bray 1-P could be described by the piecewise linear regression equation, which was  $y = \begin{cases} 0.0569x - 0.043, & x < 93.63 \\ 0.1483x - 8.601, & x > 93.63 \end{cases}$  for WEP with  $R^2$  being 0.992 ( $r=0.996$ ), and  $y = \begin{cases} 0.0571x - 0.0216, & x < 87.68 \\ 0.1604x - 9.079, & x > 87.68 \end{cases}$  for SARP with  $R^2$  being 0.991 ( $r=0.995$ ). Hence, the thresholds of soil Bray 1-P was reckoned to be 93.63 and 87.68 mg·kg<sup>-1</sup>, respectively, based on WEP and SARP and the latter was 5.95 mg·kg<sup>-1</sup> lower than the former. 【Conclusion】 All the findings in the study demonstrate that both the phenomena of phosphorus deficiency and excessive accumulation exist in the non-wood forest soils of Xitiaoxi watershed. Soil Bray 1-P, TP, organic matter and pH are the main factors affecting the potential risk of phosphorus runoff loss and Bray 1-P is the most significant one. Acid rain enhances the potential risk of phosphorus runoff loss. As the studied region is one that suffers from frequent acid rain, the content of soil available phosphorus should be more strictly controlled.

**Key words:** Xitiaoxi watershed; Non-wood forest; Soil test phosphorus; Threshold; Simulated acid rain

水体富营养化是当今世界面临的最主要的水污染问题, 严重影响了人们的正常生活, 制约了区域社会经济的可持续发展。西苕溪作为太湖上游的重要支流, 入湖水量大, 其携入的氮磷等污染物均会对太湖水环境质量产生最直接的影响<sup>[1]</sup>。据统计, 西苕溪流域林地面积占了流域总面积的 65%以上<sup>[2]</sup>, 每年可产生超过 650 t 的总氮流失量及 270 t 的总磷流失量。其中, 经济林面积占了林地面积的 56%, 土壤侵蚀及其产生的养分流失量占比 77%<sup>[3]</sup>。

大量研究表明, 由于化肥及有机肥的不合理施用, 土壤磷素积累现象明显。以钱塘江附近农田为例, 超过土壤磷素流失阈值 60 mg·kg<sup>-1</sup> 的土样占比可达 11.60%<sup>[4]</sup>。当土壤中磷素积累到一定水平时, 其释放潜力会急剧增加, 土壤磷释放能力突变点所对应的土壤有效磷含量即土壤磷素流失阈值<sup>[5]</sup>。综合 Hesketh 和 Brookes<sup>[6]</sup>、Zhao<sup>[7]</sup>等的研究结果可以发现, 不同类型的土壤磷素流失阈值差异很大, 最

大值甚至可达最小值的 16 倍。自从提出土壤磷素流失阈值概念后, 土壤磷素流失阈值的研究引起了国内外学者的广泛关注。但是大多数研究集中在农田土壤<sup>[8-11]</sup>上, 对经济林土壤磷素流失阈值的研究相对较少。

相关数据显示, 浙江省酸雨覆盖面积可达 90% 以上, 其中重酸雨区约占 20%, 酸雨污染严重<sup>[12]</sup>。西苕溪流域位于浙江省西北部的湖州市境内, 2012—2017 年年均降水 pH 在 4.60~4.98 之间, 6 年 pH 中位数为 4.75, 酸雨率超过了 90%。刘旭阳等<sup>[13]</sup>发现, 酸雨显著提高了土壤磷的含量。大量研究表明, 长期的酸雨作用会导致土壤磷素流失, 且土壤磷流失总量与酸雨 pH 存在显著的非线性关系。随着 pH 的降低, 土壤磷流失总量先增加后降低<sup>[14]</sup>。Liang 等<sup>[15]</sup>研究发现, pH1.6~6.0 范围内, pH 越低, 胶体态磷流失风险就越高。

综上, 土壤磷素流失阈值研究以及酸雨对土壤磷素流失的影响一直是学者们关注的重点。虽

然也有少量土壤磷素流失阈值与土壤 pH 关系的研究<sup>[7]</sup>,但是关于酸雨对土壤磷素流失阈值的影响仍未见报道。因此,本文拟通过模拟酸雨浸提实验,根据土壤水溶性磷、模拟酸雨浸提磷与有效磷之间的相关关系,对西苕溪流域主要经济林土壤磷素流失风险进行研究,旨在为酸雨频发区土壤磷素流失阈值研究提供新思路,对流域内磷素的管理、农业面源污染及水体富营养化治理也具有十分重要的意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 土样的采集与预处理

浙江省安吉县境内西苕溪流域面积为 1 806 km<sup>2</sup>,约占西苕溪流域总面积的 79.42%。根据安吉县主要经济林的分布情况,采集毛竹林、白茶园、板栗林土壤样品(0~20 cm) 105 个,采样点分布如图 1 所示。采集的土样在室温下自然风干后,研磨过筛(20 目、100 目),保存备用。

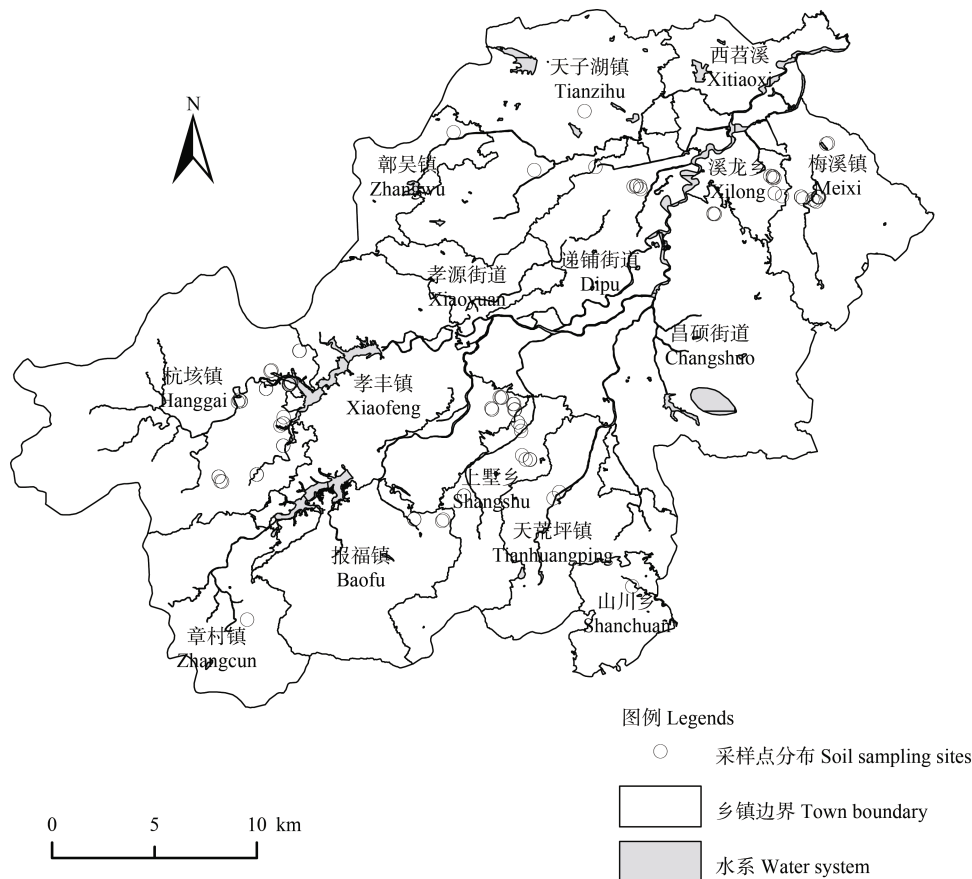


图 1 主要经济林土壤采样点分布图

Fig. 1 Map of soil sampling sites in the main non-wood forests

### 1.2 测定项目与方法

水溶性磷(WEP)采用蒸馏水浸提,水土比为 10:1,振荡时间 30 min,0.45 μm 滤膜过滤后用磷钼蓝比色法测定<sup>[16]</sup>;模拟酸雨浸提磷(SARP)测定方法参照水溶性磷,其中浸提液换成 pH 为 4.75 的模拟酸雨;土壤有效磷含量采用 Bray 1 法,盐酸-氟化铵溶液提取,钼蓝比色法测定<sup>[17]</sup>,其他土壤理化性质如全氮(TN)、全磷(TP)、全钾(TK)、碱解氮(AN)、速效钾(AK)、pH、有机碳(SOC)

等测定方法参照《土壤农业化学分析方法》<sup>[17]</sup>。

模拟酸雨的配制:根据湖州市 2012—2017 年年均降水 pH 及酸雨成分资料,设置模拟酸雨的 pH 为 4.75,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>与 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>的摩尔浓度比为 1:1。模拟酸雨以浓硫酸、浓硝酸为原材料,采用逐步稀释法配制。首先以浓硫酸和浓硝酸配置成 pH 为 1 的酸雨母液,再用蒸馏水稀释至 pH4.75 的模拟酸雨<sup>[18]</sup>。

### 1.3 数据处理与分析

经济林土壤采样点的分布采用 ArcMap 10.2 作

图。试验数据用 Excel 2010 软件整理、作图,用 SPSS 20.0 做相应指标间的相关性分析。土壤活性磷与 Bray 1-P 之间的定量关系利用分段线性回归模型拟合,拟合方程如下:

$$y = \begin{cases} a + bx, & x < \alpha \\ a + bx + c(x - \alpha), & x \geq \alpha \end{cases}$$

式中,  $y$  为土壤活性磷,  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;  $x$  为 Bray 1-P,  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;  $a$  为纵坐标上的截距,  $b$ 、 $c$  为拟合回归直线方程的斜率;  $\alpha$  为分段线性回归方程转折点所对应的 Bray 1-P 含量, 即阈值,  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

## 2 结果

### 2.1 西苕溪流域经济林土壤基本理化性质与活性磷含量

调查区域安吉县 105 个经济林土壤的基本理化性质汇总情况如表 1 所示, 土壤 SOC 含量  $9.00\sim 26.35 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 平均为  $16.59\pm 3.65 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; 土壤 pH  $3.55\sim 5.92$ , 平均为  $4.69\pm 0.45$ ; TN、TP、TK 含量分别在  $0.72\sim 2.07$ 、 $0.22\sim 0.73$ 、 $3.57\sim 22.80 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间, 平均值分别为  $1.38\pm 0.33$ 、 $0.42\pm 0.11$ 、 $9.81\pm 3.56 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; 土壤 AN、AK 含量分别在  $74.10\sim 265.7$ 、 $48.00\sim 379.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间, 平均值分别为  $152.2\pm 39.90$ 、 $138.5\pm 69.02 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。与其他指标相比, Bray 1-P 含量变幅较大, 范围在  $0.93\sim 313.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间, 平均为  $30.87\pm 63.18 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 变异系数可达 204.7%。

统计数据表明, 约 17.14% 的土壤 Bray 1-P 含量超过  $40 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 但也有 38.01% 的土壤 Bray 1-P 含量低于  $5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

土壤活性磷的提取分别采用蒸馏水和模拟酸雨浸提, 结果如图 2 所示: 土壤水溶性磷 (WEP) 含量  $0.03\sim 38.15 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 平均为  $2.64\pm 7.06 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 变异系数为 267.5%; 模拟酸雨浸提磷 (SARP) 含量  $0.03\sim 42.91 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 平均为  $2.86\pm 7.69 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 变异系数为 268.6%。SARP 含量总体高于 WEP, 但未达到显著性水平 ( $P>0.05$ )。

### 2.2 土壤磷素流失风险与土壤有效磷的关系

分段线性回归分析得出, 土壤水溶性磷含量与有效磷含量的回归方程为:

$$y = \begin{cases} 0.0569x - 0.043, & x < 93.63 \\ 0.1483x - 8.601, & x > 93.63 \end{cases} \quad R^2 = 0.9916$$

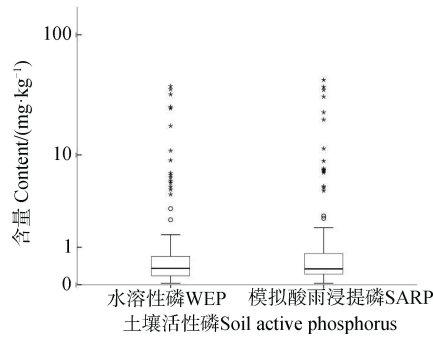
统计检验结果表明, 回归方程的显著性达到极显著水平 ( $P<0.01$ )。从图 3 可以看出, 拟合曲线上有一明显的转折点, 相对应的 Bray 1-P 含量为  $93.63 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。当 Bray 1-P 低于  $93.63 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  时, WEP 含量随着 Bray 1-P 变化很小, 拟合线段斜率为 0.0569; 当 Bray 1-P 超过  $93.63 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , WEP 含量迅速增加, 具体表现为: Bray 1-P 每增加  $10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , WEP 增加  $1.48 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 拟合线段斜率增加了 1.61 倍。因此, Bray 1-P 含量  $93.63 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  可作为研究区域主要经济林土壤磷素流失阈值。统计数据表明, 西苕溪流域主要经济林土壤 Bray 1-P 超过阈值的样品占比 12.38%。

表 1 调查区域 105 个经济林土壤基本理化性质

Table 1 Basic soil physico-chemical properties of the 105 sampling sites in the main non-wood forests under survey

| 土壤性质<br>Soil properties | SOC/<br>( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) | pH   | TN/<br>( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) | TP/<br>( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) | TK/<br>( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) | AN/<br>( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) | Bray 1-P/<br>( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) | AK/<br>( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) |
|-------------------------|---|------|--|--|--|---|---|---|
| 平均值 Mean                | 16.59                                     | 4.69 | 1.38                                     | 0.42                                     | 9.81                                     | 152.2                                     | 30.87   | 138.5                                     |
| 标准差 SD                  | 3.65                                      | 0.45 | 0.33                                     | 0.11                                     | 3.56                                     | 39.9                                      | 63.18   | 69.02                                     |
| 最小值 Min                 | 9   | 3.55 | 0.72                                     | 0.22                                     | 3.57                                     | 74.1                                      | 0.93  | 48  |
| 最大值 Max                 | 26.35                                     | 5.92 | 2.07                                     | 0.73                                     | 22.8                                     | 265.7                                     | 313.2   | 379.4                                     |
| 变异系数 CV/%               | 22.02                                     | 9.51 | 24.04                                    | 27.25                                    | 36.35                                    | 26.22                                     | 204.7   | 49.83                                     |

注: SOC、TN、TP、TK、Bray 1-P、AN、AK 分别表示土壤有机碳、全氮、全磷、全钾、有效磷、碱解氮和速效钾。下同。  
Note: SOC, TN, TP, TK, Bray 1-P, AN and AK stands for soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, total potassium, available phosphorus, alkalyzable nitrogen, readily available potassium, respectively. The same below.



注：箱图中最上方和最下方的线段表示数据的最大值和最小值，箱图中矩形上下两边分别表示第三四分位数和第一四分位数，矩形中间的粗线表示中位数，图中圆圈和星号分别表示离群值和极值。Note: The line segments at the top and bottom of the box diagram represent the maximum and minimum values of the data; the upper side and the lower side of the rectangle in the box represents the 3<sup>rd</sup> and 1<sup>st</sup> quartile, respectively, and the bold in the middle of the rectangle represents the median; and the circle and asterisk in the diagram represents the outlier and extremum, respectively.

图 2 土壤水溶性磷和模拟酸雨浸提磷含量

Fig. 2 Water-extractable phosphorus (WEP) and simulated-acid-rain-extractable phosphorus (SARP) content in the soils

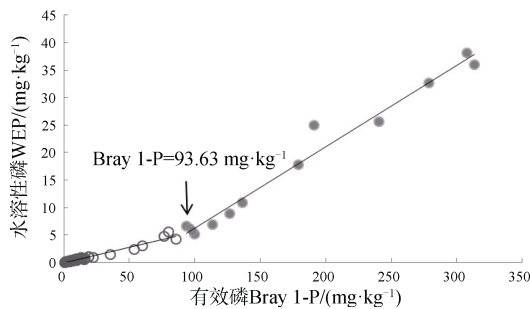


图 3 土壤水溶性磷与有效磷的关系

Fig. 3 Relationship between WEP and Bray 1-P

酸雨会影响土壤磷的溶出，土壤模拟酸雨浸提磷与有效磷含量的关系见图 4，分段线性回归方程为：

$$y = \begin{cases} 0.0571x - 0.0216, & x < 87.68 \\ 0.1604x - 9.079, & x > 87.68 \end{cases} \quad R^2 = 0.9912$$

显著性检验结果表明，回归方程达到极显著水平 ( $P < 0.01$ )。SARP 含量普遍高于 WEP，且其上限较 WEP 上限高  $4.76 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。在模拟酸雨的作用下，拟合方程的两个斜率均有所增加。此外，SARP 所对应的土壤磷素流失阈值为  $87.68 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，较 WEP 所对应的阈值降低了  $5.95 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

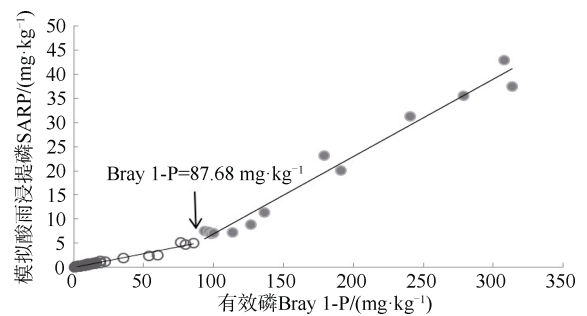


图 4 土壤模拟酸雨浸提磷与有效磷的关系

Fig. 4 Relationship between SARP and Bray 1-P

### 2.3 土壤测试磷与土壤基本理化性质的关系

本文对土壤全磷、有效磷、活性磷与土壤基本理化性质做了相关性分析，结果如表 2 所示：土壤 SOC、TN、AN、AK 与所有土壤测试磷指标均呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ )；土壤 pH 与所有土壤测试磷指标呈极显著负相关；土壤 TK 与 Bray 1-P、WEP、SARP 呈极显著负相关，但决定系数  $R^2$  较小。

表 2 土壤全磷、有效磷、活性磷与土壤基本理化性质的关系

Table 2 Relationships of total phosphorus, available phosphorus and active phosphorus with basic physico-chemical properties of the soils

| 土壤性质<br>Soil properties | 土壤测试磷 Soil test phosphorus |          |          |          |
|-------------------------|----------------------------|----------|----------|----------|
|                         | TP                         | Bray 1-P | WEP      | SARP     |
| SOC                     | 0.697**                    | 0.549**  | 0.516**  | 0.529**  |
| pH                      | -0.296**                   | -0.481** | -0.433** | -0.436** |
| TN                      | 0.829**                    | 0.433**  | 0.408**  | 0.420**  |
| TP                      | 1**                        | 0.546**  | 0.501**  | 0.512**  |
| TK                      | -0.027                     | -0.318** | -0.280** | -0.273** |
| AN                      | 0.717**                    | 0.401**  | 0.387**  | 0.403**  |
| AK                      | 0.395**                    | 0.354**  | 0.399**  | 0.395**  |

注：\*\*表示 0.01 水平显著相关；\*表示 0.05 水平显著相关。Note: \*\*Correlation is significant at the 0.01 level; \* Correlation is significant at the 0.01 level.

### 3 讨论

#### 3.1 西苕溪流域主要经济林土壤磷素积累状况

土壤全磷和有效磷作为评价土壤肥力、磷素水平的指标,常被用来反映土壤磷素水平及磷素积累情况。西苕溪流域经济林土壤 TP 含量  $0.22\sim 0.73\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 平均为  $0.42\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。Bray 1-P 含量变幅极大, 范围在  $0.93\sim 313.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间, 平均为  $30.87\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 变异系数可达 204.7% (表 1)。其中, Bray 1-P 含量超过  $40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、低于  $5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  的土壤样品分别达到了 17.14%、38.01%, 且二者占比超过了 55%。可见, 本研究地经济林磷缺乏与磷过度积累土壤并存。这可能与山区林农的粗放式管理有关。通常认为, Bray 1-P 含量在  $20\sim 40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间即可基本满足作物的需求, 过多土壤磷的积累将导致土壤中磷素吸附位点减少, 无法继续容纳外源磷素, 大大增加土壤磷素的流失风险<sup>[19]</sup>, 而 Bray 1-P 低于  $5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  又将影响作物的正常生长<sup>[17]</sup>。因此, 有必要对该地经济林土壤磷素水平及其分布进行调查, 根据相应的土壤有效磷含量确定适宜的施肥量, 同时加强对土壤磷关键源区的识别<sup>[20]</sup>, 严格控制磷肥施用。

#### 3.2 土壤基本理化性质与土壤磷素流失风险的关系

水溶性磷 (包括文中的模拟酸雨浸提磷) 与径流水中磷的浓度密切相关, 因此可用来分析土壤磷素随径流及酸雨径流流失的风险。大量研究表明, 土壤磷素的流失受土壤有效磷、全磷、pH、有机质等诸多因素的影响。其中, 土壤有效磷对土壤磷素流失影响最大, 可作为土壤磷的环境指标<sup>[21]</sup>。这也解释了本文中 Bray 1-P 的决定系数  $R^2$  远高于 TP、pH、SOC 等因素的结果 (表 2)。本研究还发现, 随着土壤 pH 下降, 土壤 Bray 1-P、WEP、SARP 在统计学水平上有显著的增加 (表 2), 与黄敏等<sup>[22]</sup>的研究结果一致。土壤 TN、AN、AK 与 WEP、SARP 均呈极显著正相关 (表 2), 这可能与农户普遍施用 NPK 复合肥有关。土壤 SOC 与 WEP、SARP 以及 Bray 1-P 的相关关系均可达到极显著水平 (表 2), 与 Huang 等<sup>[23]</sup>的研究结果相一致。Heredia 和 Cirelli<sup>[24]</sup>及 Meng 等<sup>[25]</sup>认为, 土壤有机质易与磷酸根离子竞争土壤固相表面的专性吸附点位, 从而减少了土壤对磷的吸附, 且土壤有机质的存在有助于土

壤磷向土壤溶液中释放。夏文建等<sup>[26]</sup>和 Yan 等<sup>[27]</sup>的研究发现, 土壤有机质含量高的土壤磷吸持饱和度 (DPS) 较大, 土壤吸附磷的能力较弱。因此, 土壤有机质含量的增加将导致土壤吸附磷的能力下降, 土壤磷更容易向液相中转移, 从而使土壤磷素流失阈值降低。Fortune 等<sup>[28]</sup>研究发现, 土壤磷素流失阈值与土壤有机碳呈显著负相关, 与本文推断结果一致。但是也有学者认为, 有机质的存在可以增加土壤团聚体的稳定性<sup>[29]</sup>。团聚体作为土壤磷素释放与流失的重要载体, 对土壤磷素流失具有重大影响, 且土壤磷素流失阈值随着土壤有机碳的增加而增大<sup>[7]</sup>。关于有机质与土壤磷素流失风险的关系有待于进一步的研究。

#### 3.3 模拟酸雨对经济林土壤磷素流失风险的影响

西苕溪流域年均降水 pH 在  $4.60\sim 4.98$  之间, 酸雨率超过 90%, 处于较重酸雨区与重酸雨区之间<sup>[30]</sup>, 酸雨污染严重。袁宇志等<sup>[31]</sup>研究表明, 相对于其他类型耕地土壤而言, 红壤旱地更易受到酸雨的影响, 导致土壤酸化。同时磷素作为水体富营养化的关键限制性因子, 酸雨对土壤磷素流失的影响不容忽视。土壤磷素流失阈值的研究一直是国内外学者研究的热点。阈值所对应的有效磷 Olsen-P、Mehlich-3 P 含量得到了广泛研究, 相比之下, Bray-P 在土壤磷素流失风险研究中的应用较少。仅有零星报道显示, 美国俄亥俄州农业土壤磷素淋失阈值为 Bray 1-P  $122\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ <sup>[32]</sup>。本研究中, WEP、SARP 与 Bray 1-P 的相关分析结果显示, 西苕溪流域经济林土壤磷素流失阈值分别为  $93.63$ 、 $87.68\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  (图 3, 图 4)。当土壤 Bray 1-P 含量超过土壤磷素流失阈值时, WEP 及 SARP 急剧增加, 土壤磷素流失风险加大。关于酸雨对土壤磷素流失的影响主要体现在以下两个方面。一方面, 一定强度的酸雨有助于土壤无机磷组分的溶解, 可以促进土壤微生物生物量磷和酸性磷酸酶活性提高, 从而提高土壤磷的有效性<sup>[33-34]</sup>。本研究也发现, 土壤 SARP 含量普遍高于 WEP, 且分段线性拟合曲线的两段斜率均有了一定程度的提高 (图 3, 图 4)。可见 pH4.75 的模拟酸雨有助于土壤磷向土壤溶液中释放。另一方面, 酸雨的长期作用将导致土壤磷素流失阈值降低。土壤磷素流失阈值越低, 土壤磷素流失风险就越大。Zhao 等<sup>[7]</sup>的研究结果显示, 当土壤 pH<6.0 时, 土壤磷素流失阈值随着 pH 的升高而升高; 而当土壤

pH>6.0 时, 随着 pH 的升高土壤磷素流失阈值将降低。本研究发现, 模拟酸雨作用下土壤磷素流失阈值下降了  $5.95 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。这表明, 相同背景下将会有更多经济林土壤处于土壤磷高流失风险范畴, 土壤磷素的潜在流失风险将进一步加大。而常规的根据水溶性磷与土壤有效磷的相关关系得出的磷素流失阈值可能会低估酸雨频发区土壤磷素流失的风险。

## 4 结 论

西苕溪流域安吉段经济林土壤磷素状况变异较大, Bray 1-P 含量超过  $40 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、低于  $5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  的土壤样品占比分别可达 17.14%、38.01%, 缺磷和磷过度积累现象并存。土壤磷素积累导致水溶性磷、模拟酸雨浸提磷大幅度升高, 存在较大的磷素流失潜在风险。影响土壤磷素流失的因子主要有土壤有效磷、全磷、pH、有机质等, 其中有效磷是最重要的影响因子。水溶性磷、模拟酸雨浸提磷与土壤 Bray 1-P 的分段线性回归分析得出, 西苕溪流域经济林土壤磷素流失阈值分别为  $93.63 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  (水溶性磷)、 $87.68 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  (模拟酸雨浸提磷), 酸雨会进一步增大磷素的流失风险。鉴于西苕溪流域为酸雨频发区, 在土壤有效磷水平的实际限控中应充分考虑酸雨增大磷素流失风险的作用。

## 参考文献 (References)

- [ 1 ] Zhang Y, Xu Y P, Yu Z H, et al. Environmental flow assessment in Xitiaoxi catchment of the Taihu Basin[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, 45 ( 10 ): 1193—1198. [张媛, 许有鹏, 于志慧, 等. 太湖西苕溪流域环境流量评价分析[J]. *水利学报*, 2014, 45 ( 10 ): 1193—1198.]
- [ 2 ] Jin L M, Zhang Q, Li H P, et al. Characteristics of non-point source N pollution in Xitiaoxi catchment, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30 ( 7 ): 1385—1390. [金黎明, 张奇, 李恒鹏, 等. 西苕溪流域非点源氮污染特征[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30 ( 7 ): 1385—1390.]
- [ 3 ] Dong D Y, Zhang B, Zhang C Q, et al. Assessment on soil nutrients loss of forestland in Anji County of the Taihu basin[J]. *Resources Science*, 2011, 33 ( 8 ): 1608—1612. [董敦义, 张彪, 张灿强, 等. 太湖流域安吉县林地养分流失评估[J]. *资源科学*, 2011, 33 ( 8 ): 1608—1612.]
- [ 4 ] Ying J Y, Ruan Y F, Wu Q F, 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. [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.]
- [ 5 ] 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 ( 5 ): 904—910.
- [ 6 ] Hesketh N, Brookes P C. Development of an indicator for risk of phosphorus leaching[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29 ( 1 ): 105—110.
- [ 7 ] Zhao X R, Zhong X Y, Bao H J, et al. Relating soil P concentrations at which P movement occurs to soil properties in Chinese agricultural soils[J]. *Geoderma*, 2007, 142 ( 3/4 ): 237—244.
- [ 8 ] Jalali M, Jalali M. Assessment risk of phosphorus leaching from calcareous soils using soil test phosphorus[J]. *Chemosphere*, 2017, 171: 106—117.
- [ 9 ] Xi B, Zhai L M, Liu J, et al. Long-term phosphorus accumulation and agronomic and environmental critical phosphorus levels in Haplic Luvisol soil, Northern China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 15 ( 1 ): 200—208.
- [ 10 ] Khan A, Lu G Y, Ayaz M, et al. Phosphorus efficiency, soil phosphorus dynamics and critical phosphorus level under long-term fertilization for single and double cropping systems[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 256: 1—11.
- [ 11 ] Shen Y, Duan Y H, Huang S M, 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. [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.]
- [ 12 ] Zhang H L. Study on the present situation, causes and control measures of acid rain in Zhejiang Province[J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2015 ( 5 ): 191—192. [张慧玲. 浙江省酸雨现状、成因及防治对策研究[J]. *绿色科技*, 2015 ( 5 ): 191—192.]
- [ 13 ] Liu X Y, An W L, Jin Q, et al. Effects of simulated acid rain on soil carbon, nitrogen, and phosphorus contents and ecological stoichiometry characteristics of paddy field in Fuzhou plain[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33 ( 3 ): 199—206. [刘旭阳, 安婉丽, 金强, 等. 模拟酸雨对福州平原水稻田土壤碳、氮、磷含量及其生态化学计量学特征影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33 ( 3 ): 199—206.]
- [ 14 ] Jalali M, Naderi E. The impact of acid rain on phosphorus leaching from a sandy loam calcareous soil of western Iran[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 66 ( 1 ): 311—317.
- [ 15 ] Liang X Q, Liu J, Chen Y X, et al. Effect of pH on the release of soil colloidal phosphorus[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2010, 10 ( 8 ): 1548—1556.



- [ 16 ] Liao X L, Nair V D, Canion A, et al. Subsurface transport and potential risk of phosphorus to groundwater across different land uses in a Karst springs basin, Florida, USA[J]. *Geoderma*, 2019, 338: 97—106.
- [ 17 ] LU R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. [鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000.]
- [ 18 ] Cui H B, Zhang S W, Li R Y, et al. Leaching of Cu, Cd, Pb, and phosphorus and their availability in the phosphate-amended contaminated soils under simulated acid rain[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24 ( 26 ): 21128—21137.
- [ 19 ] Wang J W, Wang Y L, Yao Y, et al. Effects of long-term fertilization on phosphorus retention and release of soil aggregates in upland red soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54 ( 5 ): 1240—1250. [王经纬, 王艳玲, 姚怡, 等. 长期施肥对旱地红壤团聚体磷素固持与释放能力的影响[J]. *土壤学报*, 2017, 54 ( 5 ): 1240—1250.]
- [ 20 ] Lou H Z, Yang S T, Zhao C S, et al. Detecting and analyzing soil phosphorus loss associated with critical source areas using a remote sensing approach[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 573: 397—408.
- [ 21 ] Gong J, Ma Y H, Hu H X, et al. Research advances on environmental indicator of soil phosphorus in farmland[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016, 32 ( 2 ): 112—117. [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.]
- [ 22 ] Huang M, Liang R X, Yin W W, et al. Effects of typical greenhouse factors on labile phosphorus in soil[J]. *China Environmental Science*, 2018, 38 ( 5 ): 1818—1825. [黄敏, 梁荣祥, 尹维文, 等. 典型设施环境条件对土壤活性磷变化的影响[J]. *中国环境科学*, 2018, 38 ( 5 ): 1818—1825.]
- [ 23 ] Huang L D, Wang H Y, Li Y X, et al. Spatial distribution and risk assessment of phosphorus loss potential in urban-suburban soil of Lishui, China[J]. *Catena*, 2013, 100: 42—49.
- [ 24 ] Heredia O S, Fernández Cirelli A. Environmental risks of increasing phosphorus addition in relation to soil sorption capacity[J]. *Geoderma*, 2007, 137 ( 3/4 ): 426—431.
- [ 25 ] Meng C, Liu H Y, Wang Y, et al. Response of regional agricultural soil phosphorus status to net anthropogenic phosphorus input ( NAPI ) determined by soil pH value and organic matter content in subtropical China[J]. *Chemosphere*, 2018, 200: 487—494.
- [ 26 ] Xia W J, Ji J H, Liu J, et al. Effect of long-term fertilization on soil phosphorus characteristics and loss risk of red soil[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26 ( 12 ): 1876—1886. [夏文建, 冀建华, 刘佳, 等. 长期不同施肥红壤磷素特征和流失风险研究[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26 ( 12 ): 1876—1886.]
- [ 27 ] Yan Z J, Chen S, Dari B, et al. Phosphorus transformation response to soil properties changes induced by manure application in a calcareous soil[J]. *Geoderma*, 2018, 322: 163—171.
- [ 28 ] Fortune S, Lu J, Addiscott T M, et al. Assessment of phosphorus leaching losses from arable land[J]. *Plant and Soil*, 2005, 269 ( 1/2 ): 99—108.
- [ 29 ] Chu B J, Yu G H, Liu F F, et al. Characterization of mineral-organic complex in soil microaggregates with synchrotron radiation infrared micro-imaging method[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54 ( 6 ): 1451—1458. [褚冰杰, 余光辉, 刘飞飞, 等. 土壤微团聚体中矿物-有机复合体特征[J]. *土壤学报*, 2017, 54 ( 6 ): 1451—1458.]
- [ 30 ] Wu X B. The variation characteristics and cause analysis of acid rain in Xianning City[J]. *Environmental Science and Technology*, 2014, 37 ( S1 ): 82—86. [吴新碧. 咸宁市酸雨变化特征及其成因分析[J]. *环境科学与技术*, 2014, 37 ( S1 ): 82—86.]
- [ 31 ] Yuan Y Z, Guo Y, Zhang Y C, et al. Impacts of landscape patterns on farmland soil acidification in typical subtropical small watersheds of China[J]. *Soils*, 2019, 51 ( 1 ): 90—99. [袁宇志, 郭颖, 张育灿, 等. 亚热带典型小流域景观格局对耕地土壤酸化的影响[J]. *土壤*, 2019, 51 ( 1 ): 90—99.]
- [ 32 ] Dayton E A, Whitacre S D, Holloman C H. Demonstrating the relationship between soil phosphorus measures and phosphorus solubility: Implications for Ohio phosphorus risk assessment tools[J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2014, 40 ( 3 ): 473—478.
- [ 33 ] Xu H Q, Zhang J E, Yu J Y, et al. Effects of simulated acid rain on leaching of phosphorus,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$  and  $\text{Fe}^{2+}$  from lateritic red soils[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17 ( 5 ): 1172—1178. [徐华勤, 章家恩, 余家瑜, 等. 模拟酸雨对赤红壤磷素及  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{Fe}^{2+}$  淋失特征的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17 ( 5 ): 1172—1178.]
- [ 34 ] Li Z, Wang H, Xu H Q, et al. Effect of simulated acid rain on the dynamics of phosphorus in paddy soil[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2015, 36 ( 3 ): 477—481. [李泽, 王华, 徐华勤, 等. 模拟酸雨对水稻土磷素动态变化的影响[J]. *农业现代化研究*, 2015, 36 ( 3 ): 477—481.]

( 责任编辑: 陈荣府 )