

# 南方红壤区不同侵蚀程度下耕地土壤有效磷空间分布特征及其驱动因素<sup>①</sup>

江叶枫<sup>1,2</sup>, 叶英聪<sup>2</sup>, 郭熙<sup>1,2\*</sup>, 饶磊<sup>1,2</sup>, 李伟峰<sup>1,2</sup>, 孙凯<sup>1,2</sup>

(1 江西农业大学国土资源与环境学院, 南昌 330045; 2 江西省鄱阳湖流域农业资源与生态重点实验室, 南昌 330045)

**摘要:**以江西省兴国县耕地土壤有效磷为研究对象, 结合高程、坡度、成土母质、土壤质地、耕层厚度和地貌类型等因素, 运用 Spearman 相关性分析、回归分析和普通克里格法, 对不同侵蚀程度下土壤有效磷空间变异及其驱动因素进行研究。结果表明: 随着侵蚀程度的加深, 土壤有效磷均值呈下降趋势, 当侵蚀程度不断加重时, 土壤有效磷均值又呈上升趋势。不同侵蚀程度下土壤有效磷含量差异显著( $P < 0.001$ )。变异系数由大到小依次为极强度侵蚀(35.20%) > 剧烈侵蚀(28.09%) > 轻微侵蚀(28.02%) > 重度侵蚀(27.90%) > 无明显侵蚀(25.96%) > 中度侵蚀(25.78%)。在无明显侵蚀时, 成土母质能独立解释 1.7% 的土壤有效磷空间变异。在轻微侵蚀、中度侵蚀和重度侵蚀时, 高程的独立解释能力分别为 5.7%、2.3% 和 2.9%。在极强度侵蚀时, 成土母质的独立解释能力为 5.0%。在剧烈侵蚀时高程的独立解释能力为 1.9%。因此, 高程和成土母质是不同侵蚀程度下土壤有效磷空间变异的驱动因素。研究成果为不同侵蚀程度下合理开展耕地利用和水土保持工作提供了参考。

**关键词:** 不同侵蚀程度; 土壤有效磷; 变异; 驱动因素; 高程; 成土母质

**中图分类号:** S157; S158 **文献标识码:** A

耕地土壤有效磷是表征土壤供磷能力、确定磷肥用量和农业磷环境风险评价的重要指标, 其含量与动态变化在一定程度上影响土壤质量与区域环境<sup>[1-2]</sup>。磷元素缺乏与富集都将严重制约农业生产<sup>[3]</sup>。近几十年来, 随着对农业磷肥施用量的不断提升, 土壤中磷素含量出现了明显的变化, 并相继出现了一些磷素富集与流失现象, 对生态环境与农业可持续发展构成了极大威胁<sup>[4-5]</sup>。充分了解土壤有效磷空间分布特征及其驱动因素对合理施用磷肥、管理土壤资源以及农业面源污染重点区域的识别与治理具有重要意义<sup>[6]</sup>。

土壤有效磷含量在空间分布上往往表现出明显的异质性, 不同区域其空间分布特征及其影响因素也存在差异<sup>[7]</sup>。目前对土壤有效磷空间变异的影响因素研究大多数都集中在不同耕作方式<sup>[8-9]</sup>、不同尺度<sup>[10]</sup>、不同施肥模式<sup>[11]</sup>等。前人研究表明土壤受到不同程度的侵蚀会显著地改变土壤有效磷含量<sup>[12]</sup>。因此, 研究不同侵蚀程度下土壤有效磷空间变异特征及其影响因素有利于更加详细地描述土壤有效磷空间变

异规律和更加精确地评价区域磷淋失风险。

在土壤有效磷空间变异的影响因素中, 定性因素如成土母质、地貌类型或土壤质地以及耕层厚度等对其影响显著<sup>[13]</sup>; 定量因素如高程、坡度和坡向等也会显著影响土壤有效磷的空间分布<sup>[5,10]</sup>; 但目前对定性和定量因素大多以定性描述为主, 缺乏对不同影响因素的定量分析。因此, 定性因素量化研究越来越受到国内外学者的重视与关注。胡玉福等<sup>[14]</sup>、罗由林等<sup>[15]</sup>、Bell 等<sup>[16]</sup>为认识土壤属性空间变异影响因素量化研究方面提供了一定的经验。前人研究表明定性因素量化研究对准确获取土壤属性空间变异信息、区域资源优化利用以及环境保护方面具有重要作用<sup>[17]</sup>。

南方红壤区总面积 218 万 km<sup>2</sup>, 其中红壤系列面积约 128 万 km<sup>2</sup>, 占全区总面积的 58.7%, 红壤区的侵蚀退化已成为限制这一地区农业持续发展的障碍因素, 严重威胁着区域土壤环境和农业可持续发展<sup>[18-19]</sup>。因此, 研究红壤区不同侵蚀程度与土壤属性含量变化动态

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(41361049), 江西省自然科学基金项目(20122BAB204012)和江西省赣鄱英才“555”领军人才项目(201295)资助。

\* 通讯作者(xig435@163.com)

**作者简介:** 江叶枫(1994—), 男, 江西余干人, 硕士研究生, 主要从事土壤养分变异研究。E-mail: jiangyf0308@163.com

成为土壤生态学面临的严峻课题。本文以南方红壤区侵蚀相对严重的兴国县为案例区,以耕地土壤有效磷为研究对象,结合高程、坡度、成土母质、土壤质地、耕层厚度和地貌类型等因素,运用 Spearman 相关性分析、回归分析和普通克里格法对兴国县土壤有效磷空间分布特征及其影响因素进行定量分析。以期对不同侵蚀程度下土壤有效磷空间变异研究、减少磷素流失或累积、降低耕地面源污染以及水土保持工作等方面提供参考依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区域概况

兴国县隶属于江西省赣州市,地理坐标介于  $115^{\circ}01' \sim 115^{\circ}51'E$ ,  $26^{\circ}03' \sim 26^{\circ}42'N$ 。地处中国中亚热带南部,江西省中南部,赣州市北部。辖区总面积  $3\,215\text{ km}^2$ ,东西长  $84\text{ km}$ ,南北宽  $72\text{ km}$ 。地势北高南低,境内主要地貌类型为山地和丘陵,平原与岗地较少,经济相对落后,是江西省较为典型的山区县和贫困县之一。海拔在  $150 \sim 1\,186\text{ m}$  之间,年平均降水天数为  $155\text{ d}$ ,年平均降水量为  $1\,522\text{ mm}$ ,年平均气温为  $18.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,年平均日照为  $1\,926.5\text{ h}$ 。地带性植被为亚热带常绿阔叶、针叶林,但由于森林砍伐和农业活动,植被多为残存的次生林和灌丛,仅北部山区存在小面积常绿阔叶林。自 1983 年被国务院列为全国八个水土保持重点治理区之一,经过几十年的治理,兴国县植被覆盖率达到  $42.3\%$ <sup>[20]</sup>。耕地土壤类

型主要为红壤、黄壤和水稻土等。零坡度耕地面积为  $12\,187\text{ hm}^2$ ,占总耕地面积的  $17.88\%$ ,主要分布在中度侵蚀、重度侵蚀和无明显侵蚀程度下;坡度为  $0 \sim 10^{\circ}$  耕地面积为  $53\,711\text{ hm}^2$ ,占总耕地面积的  $79.34\%$ ,主要分布在无明显侵蚀、轻微侵蚀、中度侵蚀、重度侵蚀和极强度侵蚀程度下;坡度  $>10^{\circ}$  耕地面积为  $2\,262\text{ hm}^2$ ,占总耕地面积的  $2.78\%$ ,主要分布在剧烈侵蚀、无明显侵蚀和重度侵蚀程度下。土壤侵蚀类型以水力侵蚀为主。

### 1.2 数据来源

土壤样品按照《耕地地力调查与质量评价技术规程》,于 2010 年 11 月 9 日至 2011 年 2 月 3 日农作物收获后采用多点混合的方法采集土壤样品  $4\,351$  个(图 1A)。每个采样点均以 GPS 记录其经纬度,每个样点采用“X”法均匀随机抽取 5 个样点,经充分混合后用五分法留取样品  $1\text{ kg}$ ,土壤样品经过自然风干后,在实验室磨碎过筛,采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定耕地土壤有效磷含量<sup>[21]</sup>。DEM(数字高程模型)数据由 1:10 000 地形图生成(图 1B),高程和坡度数据均由 DEM 借助 ArcGIS10.2 软件处理提取。

### 1.3 侵蚀程度划分

试验于 2010 年 11 月 9 日至 2011 年 2 月 3 日,在实地采样的基础上,参照 1997 年水利部颁布的 SL190-1996《土壤侵蚀分类分级标准》,根据平均侵蚀模数对每个采样点利用通用土壤流失方程进行土壤侵蚀计算,对江西省兴国县土壤侵蚀程度进行分级(表 1)。

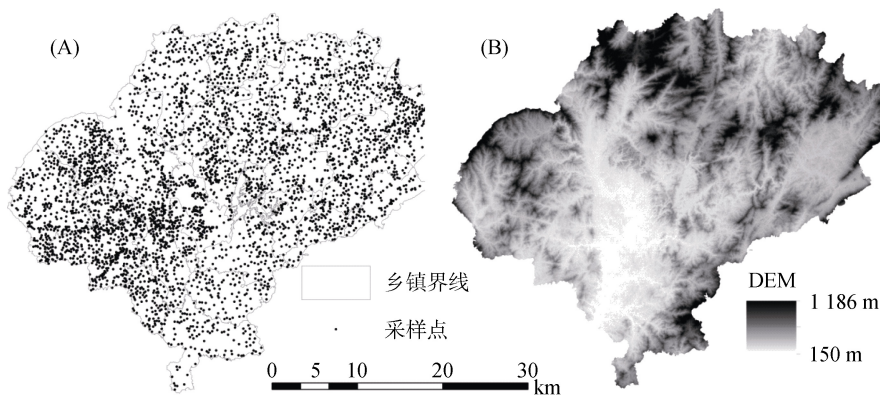


图 1 研究区耕地土壤样点分布图及 DEM

Fig. 1 Sampling sites of farmlands and DEM of study area

表 1 土壤侵蚀分级

Table 1 Classification of soil erosion

平均侵蚀模数( $t/(km^2 \cdot a)$ )	<500	500 ~ 2 500	2 500 ~ 5 000	5 000 ~ 8 000	8 000 ~ 15 000	>15 000
侵蚀程度	无明显侵蚀	轻微侵蚀	中度侵蚀	重度侵蚀	极强度侵蚀	剧烈侵蚀
侵蚀度	1	2	3	4	5	6

1.4 数据处理

本文采用阈值法(3 倍的标准差)<sup>[22]</sup>对采样点土壤有效磷含量进行异常值处理,剔除异常值后的样本为 4 334 个,本文后续研究均采用处理后的数据。空间变异用 ArcGIS10.2 生成数据图层后再用 GS+7.0 进行半变异函数计算和模型拟合。在 Spearman 相关性分析中,定性因子如成土母质、土壤质地、耕层厚度(分区间)和地貌类型按照《耕地地力调查与质量评价技术规范》分别进行赋值。在土壤有效磷空间变异影响因素的回归分析中,把高程分为 4 组:<200 m、200~400 m、400~600 m、>600 m;坡度分为 3 组:零坡度、0~10°、>10°;成土母质分为 3 组:干枚岩、红砂岩、花岗岩;土壤质地分为 3 组:轻壤、砂壤、中壤;耕层厚度分为 3 组:0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm;地貌类型分为 3 组:平原、丘陵、山地;同时对重分组的变量进行哑变量<sup>[15,17]</sup>赋值。通过对定性变量进行哑变量赋值,实现对定性的定量化研究。常

规性统计分析、Spearman 相关性分析、回归分析以及哑变量赋值均在 IBM SPSS Statistics 22 软件中完成。最后用 ArcGIS10.2 插值生成研究区土壤有效磷含量空间分布图。

2 结果与分析

2.1 土壤有效磷的描述性统计特征

4 334 个土壤样点数据统计分析结果表明(表 2),土壤有效磷含量值域范围为 6.22~43.11 mg/kg,平均值为 18.07 mg/kg,变异系数为 27.84%,呈中等程度的变异性。从分布类型可以得出不同侵蚀程度下土壤有效磷均符合对数正态分布,可以进行半变异函数分析和普通克里格法插值。不同侵蚀程度下土壤有效磷的变异系数均为中等变异性。变异系数由大到小依次为极强度侵蚀(35.20%)>剧烈侵蚀(28.09%)>轻微侵蚀(28.02%)>重度侵蚀(27.90%)>无明显侵蚀(25.96%)>中度侵蚀(25.78%)。

表 2 耕地土壤有效磷的描述性统计特征  
Table 2 Descriptive statistics of soil available phosphorus

侵蚀程度	样本数	最小值(mg/kg)	最大值(mg/kg)	平均值(mg/kg)	标准差(mg/kg)	变异系数(%)	偏度	分布类型
1	1 996	6.95	36.90	18.45 B	4.79	25.96	0.64	对数正态
2	373	9.50	34.40	17.81 C	4.99	28.02	0.93	对数正态
3	366	7.80	37.90	16.33 D	4.21	25.78	0.78	对数正态
4	426	7.80	32.90	16.92 D	4.72	27.90	0.86	对数正态
5	209	6.40	43.11	19.83 A	6.98	35.20	0.72	对数正态
6	964	7.00	37.70	18.23 BC	5.12	28.09	0.52	对数正态
合计	4 334	6.22	43.11	18.07	5.03	27.84	0.73	对数正态

注:表中同列数据大写字母不同表示不同侵蚀程度下土壤有效磷含量差异达 P<0.01 显著水平。

2.2 半方差函数分析

半方差函数能较好地刻画土壤有效磷空间分布的随机性和结构性,是描述土壤有效磷空间变异最有效的方法。从图 2 和表 3 可以看出,土壤有效磷的最优模型为指数模型,模型的拟合系数为 0.919,拟合程度较高。从模型的参数来看,土壤有效磷的块金效应(随机性因素引起的空间变异与系统总空间变异的比值)<sup>[23-24]</sup>为 11.55%,表明土壤有效磷呈强空间相关性,空间变异由采样方式、实验误差以及磷肥施用量等随机性因素和成土母质、土壤质地、地貌类型以及耕层厚度等结构性因素共同作用。变程为 7.53 km,

表明土壤有效磷的空间自相关范围较大。

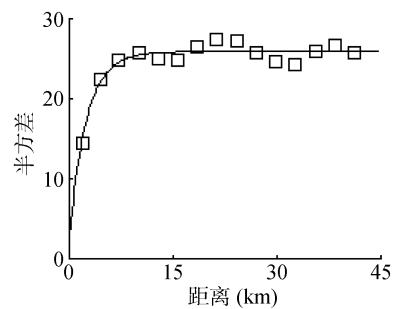


图 2 土壤有效磷半方差函数图  
Fig. 2 Isotropic semivariogram of soil available phosphorus

表 3 土壤有效磷的半方差函数参数  
Table 3 Semivariance parameters of soil available phosphorus

土壤属性	模型	块金值	基台值	块金效应(%)	变程(km)	拟合系数	残差平方和
土壤有效磷	指数	2.99	25.88	11.55	7.53	0.919	0.110

### 2.3 土壤有效磷与影响因素相关性分析

从 Spearman 相关性分析结果可知(表 4), 高程在无明显侵蚀、轻微侵蚀、中度侵蚀和重度侵蚀程度下与土壤有效磷均呈显著的相关关系( $P<0.01$ )。坡度在无明显侵蚀程度下呈正向相关, 而在轻微侵蚀时坡度变成负向相关; 前人研究结果表明<sup>[25-26]</sup>, 当坡度超过一定限度时, 土壤属性含量与坡度呈反比关系, 说明存在坡度临界值。成土母质在不同侵蚀

程度下相关系数均小于零, 土壤有效磷含量高低依次为千枚岩>红砂岩>花岗岩。土壤质地无明显侵蚀和轻微侵蚀时与土壤有效磷呈显著的正相关关系, 耕层厚度呈显著的负相关关系, 说明土壤颗粒越小, 土壤有效磷含量越高, 且表现出一定的表聚性, 其他侵蚀程度下影响均不显著。地貌类型在无明显侵蚀、轻微侵蚀和剧烈侵蚀程度下影响显著, 具体表现为山地>丘陵>平原。

表 4 不同侵蚀程度下土壤有效磷与影响因素 Spearman 相关性分析  
Table 4 Spearman correlations between soil available phosphorus and influential factors under different erosion degrees

侵蚀程度	高程	坡度	成土母质	土壤质地	耕层厚度	地貌类型
1	0.066**	0.049*	0.038	0.060**	-0.072**	0.082**
2	-0.148**	-0.160**	-0.198**	0.189**	-0.234**	0.250**
3	0.253**	0.009	0.006	-0.043	-0.076	0.096
4	-0.191**	0.038	0.051	-0.075	0.058	0.049
5	0.021	-0.191**	-0.245**	0.106	-0.043	0.063
6	-0.021	-0.015	-0.111**	-0.003	-0.022	0.101**
合计	-0.042**	-0.021	0.046**	0.050**	0.004	0.061**

注: \*表示相关性达到  $P<0.05$  显著水平, \*\*表示相关性达到  $P<0.01$  显著水平。

### 2.4 土壤有效磷空间变异特征

为了直观地反映土壤有效磷的空间变异特征, 在半变异函数模型拟合的基础上对兴国县耕地土壤有效磷运用普通克里格法进行空间插值, 进而得到土壤有效磷的空间分布(图 3A), 土壤侵蚀图(图 3B)由水利部调查的全省土壤侵蚀图处理提取。兴国县土壤有

效磷含量分布总体趋势是: 随着侵蚀程度的加深, 土壤有效磷均值呈下降趋势, 当侵蚀程度不断加重时, 土壤有效磷均值又呈上升趋势(表 2)。说明侵蚀对土壤有效磷含量有明显影响。土壤有效磷含量在 10.0~20.0 mg/kg 之间的区域面积最广, 总体水平一般, 与常规性统计分析结果较为一致。

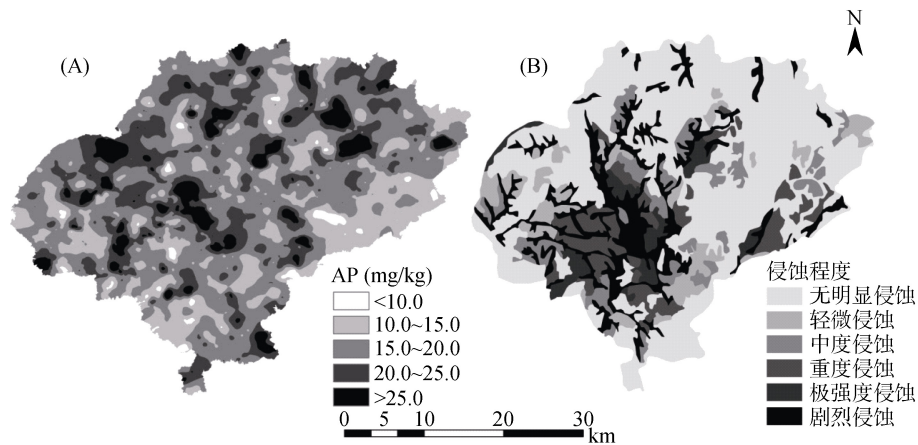


图 3 土壤有效磷空间分布图和土壤侵蚀图

Fig. 3 Spatial distribution of soil available phosphorus (A) and soil erosion (B)

从不同侵蚀程度来看(图 3), 土壤有效磷高值区域大部分都分布在无明显侵蚀、极强度侵蚀和剧烈侵蚀程度下, 部分侵蚀程度较高的区域土壤有效磷含量也高, 这与表 2 结果一致。重度侵蚀、极强度侵蚀和剧烈侵蚀程度下两两之间均有显著差异( $P<0.01$ )。无明显侵蚀除与剧烈侵蚀无显著差异外, 与其他侵蚀程

度都差异显著, 表明侵蚀显著地改变了土壤有效磷含量, 与表 5 结果一致。极强度侵蚀与所有侵蚀程度差异显著(表 2), 且从表 2 可以看出极强度侵蚀的土壤有效磷含量平均值最高, 达到 19.83 mg/kg, 究其原因: 由于极强度侵蚀程度下耕地防治措施较好, 改造治理后经济效益较大, 同时其治理难度较大, 耗费

时间较长<sup>[27-28]</sup>，因而其波动范围越大，而最大值与最小值也说明了这一点；兴国县在防治耕地水土流失方面做了大量有效的艰苦工作，成效显著，因而其均值含量较高。由于采样点较少导致土壤有效磷含量分布随机性较大，无法比较在同等采样数下两者的差异。总之，土壤有效磷含量在不同侵蚀程度下差异极显著(表 5,  $P<0.001$ )。

表 5 不同侵蚀程度下土壤有效磷含量方差分析  
Table 5 Variance analysis of soil available phosphorus under different erosion degrees

	均方	F 值	Sig.
组间	2 699.557	21.903	0.000
组内	106 687.251		

表 6 不同高程土壤有效磷描述性统计特征  
Table 6 Descriptive statistics of soil available phosphorus under different elevation

高程(m)	样点数	最小值(mg/kg)	最大值(mg/kg)	平均值 mg/kg)	标准差(mg/kg)	变异系数(%)
<200	989	6.40	37.70	18.17	5.20	28.62
200 ~ 400	2 143	6.50	43.11	17.96	5.12	28.51
400 ~ 600	965	6.22	36.70	18.12	4.62	25.50
>800	237	9.68	30.80	18.72	4.94	26.39

表 7 不同侵蚀程度下土壤有效磷与影响因素回归分析的校正决定系数(%)  
Table 7 Adjusted  $R^2$  of regression analysis between soil available phosphorus and influential factors under different erosion degrees(%)

侵蚀程度	高程	坡度	成土母质	土壤质地	耕层厚度	地貌类型
1	1.4*	-	1.7*	0.4*	0.6*	0.8*
2	5.7**	1.1*	5.2**	4.3**	4.0**	4.7**
3	2.3**	-	-	-	-	-
4	2.9**	-	-	1.6*	1.8**	1.1*
5	-	3.4**	5.0**	1.6*	-	-
6	1.9**	-	1.0*	-	0.8*	1.0*
合计	1.8*	2.2*	1.6*	1.2*	-	0.4*

注：\*表示  $P<0.05$  显著水平，\*\*表示  $P<0.01$  显著水平，-表示无显著影响。

2.5.2 坡度 坡度主要通过影响降雨入渗时间及径流流速从而影响坡面表层土壤颗粒起动、侵蚀方式和径流的挟沙能力，从而导致到土壤有效磷含量存在差异。坡度对土壤有效磷含量影响显著( $P<0.05$ , 表 7)。从表 8 可以看出，均值含量大小

## 2.5 土壤有效磷空间变异的影响因素

2.5.1 高程 高程对土壤有效磷的影响主要体现在水热条件再分配过程和人为活动方面。从表 6 可以看出，随着高程的上升，土壤有效磷呈先下降后上升的趋势，与 Spearman 相关性分析结果较为一致。不同高程下土壤有效磷均值范围为 17.96 ~ 18.72 mg/kg，高程大于 800 m 时土壤有效磷含量最高，为 18.72 mg/kg；高程在 200 ~ 400 m 之间的土壤有效磷含量最低，为 17.96 mg/kg。从变异系数可以看出，不同高程下土壤有效磷均属于中等程度的变异性。高程对土壤有效磷空间变异影响显著( $P<0.05$ , 表 7)。

随坡度增大而降低，与 Spearman 相关性分析结果不一致，这可能是因为重分组扩大了局部范围的影响程度，使得在整体上揭示了土壤有效磷变异情况。变异系数也随坡度增大而减小，均表现为中等程度的变异性。

表 8 不同坡度土壤有效磷描述性统计特征  
Table 8 Descriptive statistics of soil available phosphorus under different slopes

坡度	样点数	最小值(mg/kg)	最大值(mg/kg)	平均值(mg/kg)	标准差(mg/kg)	变异系数(%)
零坡度	935	6.41	43.11	18.24	5.43	29.77
0 ~ 10°	1 958	6.50	40.30	18.12	4.94	27.26
>10°	1 441	6.22	36.74	17.94	4.85	27.03

**2.5.3 成土母质** 成土母质通过影响土壤颗粒组成、物理化学和风化过程等进而引起土壤有效磷含量的差异。成土母质对土壤有效磷空间变异影响显著( $P < 0.05$ , 表 7)。不同成土母质类型间土壤有效磷均值差异明显(表 9),以千枚岩最高(18.93 mg/kg),千枚岩透水能力强,抗风化能力弱,可为植被提供

良好的生存环境,土壤有效磷含量较高;花岗岩最低(17.30 mg/kg),花岗岩透水能力低,抗风化能力强,植被易被破坏,水土大量流失,土壤有效磷积累量少。从变异系数可以看出(表 9),不同母质间土壤有效磷均呈中等变异性,变异系数最高为 27.74%(红砂岩),最低为 27.40%(花岗岩)。

表 9 不同成土母质类型土壤有效磷描述性统计特征  
Table 9 Descriptive statistics of soil available phosphorus under different parent materials

成土母质类型	样点数	最小值(mg/kg)	最大值(mg/kg)	平均值(mg/kg)	标准差(mg/kg)	变异系数(%)
千枚岩	1 302	6.22	43.11	18.93	5.19	27.42
红砂岩	1 561	6.41	41.70	18.13	5.03	27.74
花岗岩	1 471	7.50	40.30	17.30	4.74	27.40

**2.5.4 土壤质地** 土壤质地具有不同的成土过程、土壤颗粒的矿物组成和理化性质,从而使得土壤有效磷含量存在差异性。不同土壤质地对土壤有效磷含量影响显著( $P < 0.05$ , 表 7)。从表 10 可以看出,3 种土壤质地中均值大小依次为中壤(18.39 mg/kg) > 轻壤(17.99 mg/kg) > 砂壤(17.68 mg/kg)。变异系数处于 26.40% ~ 28.62% 之间,以轻壤变异系数最大(28.62%),以砂壤变异系数最小(26.40%),均属于中等变异性。砂壤一般保水保肥能力差,施入的肥料不易在土壤中积累,这可能是导致砂壤土壤有效磷含量偏低的主要原因。

**2.5.5 耕层厚度和地貌类型** 从表 11 可以看出,不同耕层厚度土壤有效磷含量呈下降趋势。0 ~ 10 cm 土壤有效磷平均含量最高,为 18.29 mg/kg; 10 ~ 20 cm 含量次之,为 18.16 mg/kg; 20 ~ 30 cm 含量最低,为 17.48 mg/kg;表现出一定的表聚性。从变异系数看不同耕层厚度下土壤有效磷均呈中等程度的变异性。表 12 结果表明土壤有效磷含量山地最高(18.47 mg/kg),丘陵其次(17.66 mg/kg),最低的为平原(16.85 mg/kg),这与 Spearman 相关性分析结果一致(表 4)。从变异系数可以看出,不同地貌类型下土壤有效磷均为中等程度的变异性。

表 10 不同土壤质地土壤有效磷描述性统计特征  
Table 10 Descriptive statistics of soil available phosphorus under different soil textures

土壤质地	样点数	最小值(mg/kg)	最大值(mg/kg)	平均值(mg/kg)	标准差(mg/kg)	变异系数(%)
轻壤	1 361	6.40	41.70	17.99	5.06	28.62
砂壤	874	7.10	37.70	17.68	4.75	26.40
中壤	2 099	6.22	43.11	18.39	5.09	27.68

表 11 不同耕层厚度土壤有效磷描述性统计特征  
Table 11 Descriptive statistics of soil available phosphorus under different topsoil thickness

耕层厚度(cm)	样点数	最小值(mg/kg)	最大值(mg/kg)	平均值(mg/kg)	标准差(mg/kg)	变异系数(%)
0 ~ 10	1 920	6.22	43.11	18.29	5.04	27.56
10 ~ 20	1 551	6.40	41.70	18.16	4.81	26.49
20 ~ 30	863	7.00	40.29	17.48	5.31	30.38

表 12 不同地貌土壤有效磷描述性统计特征  
Table 12 Descriptive statistics of soil available phosphorus under different landform types

地貌类型	样点数	最小值(mg/kg)	最大值(mg/kg)	平均值(mg/kg)	标准差(mg/kg)	变异系数(%)
平原	237	8.42	28.80	16.85	4.52	26.82
丘陵	1 593	7.02	41.70	17.66	5.10	28.88
山地	2 504	6.22	43.11	18.47	4.98	26.96



## 2.6 各影响因素对土壤有效磷空间变异的独立解释能力

为定量解释各影响因素对土壤有效磷空间变异的独立解释能力。对高程、坡度、成土母质、土壤质地、耕层厚度和地貌类型进行回归分析。表 7 为各影响因素与土壤有效磷含量进行回归分析的校正决定系数。从表 7 可以看出,高程仅在极强度侵蚀程度下无显著影响,其他侵蚀程度下的独立解释能力范围为 1.4% ~ 5.7%。坡度在轻微侵蚀和极强度侵蚀时的独立解释能力分别为 1.1% 和 3.4%。成土母质对土壤有效磷空间变异的独立解释能力范围为 1.0% ~ 5.2%,在中度与重度侵蚀时无显著影响。土壤质地的独立解释能力范围为 0.4% ~ 4.3%,在中度侵蚀与剧烈侵蚀时无显著影响。耕层厚度在全部样点的回归分析中影响不显著;在不同侵蚀程度下的独立解释能力范围为 0.6% ~ 4.0%,且在中度侵蚀与极强度侵蚀时影响不显著。地貌类型的独立解释能力为 0.8% ~ 4.7%,在中度侵蚀与极强度侵蚀时与土壤有效磷含量无显著影响。在无明显侵蚀时,成土母质(1.7%)是驱动土壤有效磷空间变异的主要因素。在轻微侵蚀(5.7%)、中度侵蚀(2.3%)和重度侵蚀(2.9%)时,高程为主要驱动因素。在极强度侵蚀时主要驱动因素又变为成土母质(5.0%)。在剧烈侵蚀时高程是影响土壤有效磷空间变异的主要驱动因素。

## 3 讨论

### 3.1 高程对土壤有效磷的影响

Spearman 相关性分析表明不同侵蚀程度下土壤有效磷含量随高程呈先上升后下降,再上升又下降的总体趋势。主要原因在于:在高程较低或平原地区,人类活动较多,土地开发利用强度大,磷肥施用量大,植物表聚作用强烈,且地形平坦,磷素淋失程度较低,土壤有效磷含量普遍较高;虽然部分区域精耕细作土壤有效磷含量较低,但范围较小。随着高程的上升,温度随之降低,植物表聚性趋于缓和,土壤淋失程度较之剧烈而磷素含量减少。当高程再次上升,由于兴国县的特殊地形,这部分耕地大部分耕作在山脊,山坡上土壤有效磷流失量大部分汇入山脊中的耕地,土壤有效磷含量上升。当海拔继续上升,基岩的裸露,植被较为稀疏,降雨直接降落到地面上,受植被、降雨和坡度的综合作用使得土壤有效磷含量下降。回归分析与方差分析的结果表明(表 7),不同侵蚀程度下高程对土壤有效磷影响显著,随着侵蚀程度的加深高程对土壤有效磷的独立解释能力呈先上升后下降的

趋势。严加亮<sup>[29]</sup>对武夷山不同海拔下土壤有效磷空间变异进行研究,发现海拔对土壤有效磷含量影响显著,表现为随着海拔的上升,土壤有效磷含量呈上升趋势。黄尚书<sup>[30]</sup>、田晓春等<sup>[31]</sup>、张继平等<sup>[32]</sup>也得出相似的结果,本研究结果与此一致。

### 3.2 成土母质对土壤有效磷的影响

Mage 和 Porder 等<sup>[33]</sup>在综合分析气候、植被类型、地形地貌等各种因素对土壤有效磷空间变异影响的基础上,发现众多影响因素中成土母质对土壤有效磷含量与分布的影响最大,本研究结果与此较为一致。相关性分析表明不同母质下土壤有效磷含量表现为:千枚岩>红砂岩>花岗岩。不同母质发育的土壤有效磷含量不同,这与土壤颗粒组成差异有关。张海东等<sup>[34]</sup>、何利昌等<sup>[35]</sup>研究表明,土壤细颗粒对土壤重要属性的保护能力较强。究其原因:颗粒越小,越容易黏结,在一定程度封堵地表径流量,抗侵蚀能力增强,从而保护土壤有效磷含量。黏粒含量越多,土壤的胶结能力就越强,土壤孔隙度越小,通气性能差,且不利于土壤的排水,造成土壤淹渍,从而更加容易发生地表径流,抗侵蚀能力减弱,不利于土壤有效磷的累积。千枚岩母质主要由质地黏细的颗粒发育而来,有利于土壤有效磷的累积。而红砂岩主要由细砂粒发育而来,但其质地疏松,土层中存在细砂较多,其有效磷累积能力要低于千枚岩。花岗岩发育形成的土壤机械组成以细砂粒和粗砂粒为主,且粗砂粒所占的比重较大,较弱的凝聚力致使表层土壤疏松,土壤抗蚀性差,不利于土壤有效磷的累积。回归分析与方差分析的结果表明(表 6),成土母质在中度侵蚀和重度侵蚀时对土壤有效磷含量影响不显著,在其他侵蚀程度下对土壤有效磷影响显著,且成土母质可独立解释不同侵蚀程度下 1.0% ~ 5.2% 的土壤有效磷空间变异。

### 3.3 土壤侵蚀对土壤有效磷的影响

李裕元等<sup>[36]</sup>模拟侵蚀条件下土壤有效磷空间分布特征,发现侵蚀显著地改变了土壤有效磷含量,土壤有效磷含量空间变化为波浪状。陈晓燕等<sup>[37]</sup>模拟不同降雨强度下土壤有效磷的空间变异特征,发现土壤有效磷含量先增大,然后逐渐减少,最后趋于平稳的变化。其他学者也发现土壤侵蚀是导致土壤有效磷变异的重要因素<sup>[38]</sup>,但二者的变化关系并非简单的线性关系,这与本文研究结果一致。在无明显侵蚀和轻微侵蚀时,侵蚀对土壤有效磷含量影响显著,这是因为在侵蚀初期耕地表层较为松散,表层中对土壤有效磷吸附作用较强的细颗粒随径流流失,导致大量土

壤有效磷下降(表 2);在中度侵蚀和重度侵蚀时,随着侵蚀的不断加重,土壤原地表松散细颗粒减少,土壤入渗率变得稳定,在一定程度上减少了土壤有效磷随径流流失的风险,虽然中度侵蚀和重度侵蚀之间土壤有效磷均值有所不同(表 2),但无显著差异(表 2);在极强度侵蚀和剧烈侵蚀时,表层土壤颗粒结构被破坏,土层表面形成结皮,抗溅蚀能力增强,坡面土壤颗粒流失强度明显减少,土壤有效磷含量呈上升趋势(表 2)。土壤侵蚀能够破坏土壤资源,降低土壤肥力和质量,造成生态环境恶化;日益严重的土壤侵蚀对耕地利用、水土保持和环境保护构成了很大威胁,已成为全球性的重大环境问题之一。虽然近年来兴国县在防治耕地水土流失方面做了大量有效的艰苦工作,成效显著,经验丰富,但也仍然存在严重的土壤侵蚀问题。不同侵蚀程度下土壤有效磷空间变异的影响因素除了高程和成土母质外,如 pH、降雨量、有机质含量、植被覆盖指数、耕作方式和人为活动等都与土壤有效磷含量有着较为直接的关系,同时由于土壤侵蚀是一个与时空尺度相关的过程,不同的尺度具有不同的主导性或者控制性过程,结合时空尺度与更多影响因素有利于更加详细地描述侵蚀条件下土壤有效磷空间变异特征。

#### 4 结论

1) 兴国县土壤有效磷含量在 6.22 ~ 43.11 mg/kg, 平均含量 18.07 mg/kg, 变异系数为 27.84%, 呈中等程度的变异性。不同侵蚀程度下土壤有效磷含量差异显著( $P < 0.001$ ), 其变异系数由大到小依次为极强度侵蚀(35.20%) > 剧烈侵蚀(28.09%) > 轻微侵蚀(28.02%) > 重度侵蚀(27.90%) > 无明显侵蚀(25.96%) > 中度侵蚀(25.78%)。

2) 在无明显侵蚀时,成土母质能独立解释 1.7% 的土壤有效磷空间变异,是影响土壤有效磷空间变异的重要因素。在轻微侵蚀、中度侵蚀和重度侵蚀时,高程为重要影响因素,其独立解释能力分别为 5.7%、2.3% 和 2.9%。在极强度侵蚀时重要影响因素为成土母质,其独立解释能力为 5.0%。在剧烈侵蚀时高程是影响土壤有效磷空间变异的重要因素,其独立解释能力为 1.9%。高程和成土母质已成为不同侵蚀程度下土壤有效磷空间变异的主要驱动因素。

#### 参考文献:

[1] 陈磊, 云鹏, 高翔, 等. 磷肥减施对玉米根系生长及根际土壤磷组分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(6): 1548-1557

- [2] 陈美领, 陈浩, 毛庆功, 等. 氮沉降对森林土壤磷循环的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(16): 4965-4976
- [3] 张蕊, 曹静娟, 郭瑞英, 等. 祁连山北坡亚高山草地退耕还林草混合植被对土壤碳氮磷的影响[J]. 生态环境学报, 2014, 23(6): 938-944
- [4] 魏玉奎, 李新平, 刘瑞丰, 等. 设施农业土壤磷素富集的动态变化[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(1): 126-132
- [5] 张瑜, 张黎明, 周碧青, 等. 基于 GIS 技术的耕地有效磷富集与生态风险评价——以福建省泰宁县为例[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(2): 326-336
- [6] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000
- [7] 贾玉华, 邵明安. 黄土区撂荒地土壤全磷的小尺度空间变异研究[J]. 土壤通报, 2014, 45(1): 116-122
- [8] 李强, 唐春闰, 李帆, 等. 水旱轮作植烟土壤有效磷的时空变异及风险评估[J]. 烟草科技, 2016, 49(6): 22-29
- [9] 王振华, 朱波, 李青云. 不同土地利用方式下侵蚀泥沙中磷释放风险评价[J]. 中国环境科学, 2011, 31(3): 474-480
- [10] 王幼奇, 白一茹, 展秀丽. 在不同尺度下宁夏引黄灌区农田土壤养分空间变异分析[J]. 干旱区研究, 2014, 31(2): 209-215
- [11] 和利钊, 张杨珠, 刘杰, 等. 不同施肥和调理剂对侵蚀红壤肥力和抗侵蚀性的修复效应[J]. 水土保持学报, 2012, 26(4): 54-58
- [12] 周丽娜, 孙婕, 雷金银, 等. 培肥措施对侵蚀坡耕地春玉米产量与土壤养分的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(5): 121-125
- [13] 赵晓蕊. 武功山地草甸土壤磷素的空间分布及磷素有效性的研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2014
- [14] 胡玉福, 邓良基, 张世熔, 等. 川中丘陵区典型小流域土壤氮素空间变异特征及影响因素研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(3): 70-75
- [15] 罗由林, 李启权, 王昌全, 等. 近 30 年来川中紫色丘陵区土壤碳氮时空演变格局及其驱动因素[J]. 土壤学报, 2016, 53(3): 582-593
- [16] Bell M J, Worrall F. Estimating a region's soil organic carbon baseline: The undervalued role of land management[J]. Geoderma, 2009, 152(1/2): 74-84
- [17] 罗由林, 李启权, 王昌全, 等. 川中丘陵县域土壤碳氮比空间变异特征及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2015, 26(1): 177-185
- [18] 赵其国. 我国红壤的退化问题[J]. 土壤, 1995, 27(6): 281-285
- [19] 赵颖. 长汀红壤退化区生态恢复过程中植被—土壤系统养分动态研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2014
- [20] Wang K, Wang H J, Shi X Z, et al. Landscape analysis of dynamic soil erosion in Subtropical China: A case study in Xingguo County, Jiangxi Province[J]. Soil & Tillage Research, 2009, 105(2): 313-321
- [21] 徐剑波, 宋立生, 夏振, 等. 基于 GARBF 神经网络的耕地土壤有效磷空间变异分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(16): 158-165
- [22] 何东健, 陈煦, 任嘉琛, 等. 土壤速效磷含量近红外光谱田间快速测定方法[J]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 152-157



- [23] Hernandezstefanoni J L, Poncehernandez R. Mapping the spatial variability of plant diversity in a tropical forest: Comparison of spatial interpolation methods[J]. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2006, 117(1/2/3): 307–334
- [24] Zhu Q, Lin H S. Comparing ordinary kriging and regression kriging for soil properties in contrasting landscapes[J]. *Pedosphere*, 2010, 20(5): 594–606
- [25] 严友进, 戴全厚, 伏文兵, 等. 喀斯特坡地土壤地下侵蚀模拟试验研究[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(6): 7–13
- [26] 潘忠成, 袁溪, 李敏. 降雨强度和坡度对土壤氮素流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(1): 9–13
- [27] 宋正姍, 史学正, 王美艳, 等. 南方侵蚀治理区土壤碳分布及主控因素研究[J]. *土壤*, 2013, 45(5): 850–855
- [28] 王艳, 王建, 王治国. 川中丘陵紫色泥岩极强度侵蚀区的防治措施与效益研究[J]. *水土保持研究*, 1997, 4(1): 138–140, 144
- [29] 严加亮. 武夷山不同海拔土壤磷素的空间异质性研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2012
- [30] 黄尚书. 武功山退化草甸生态系统磷素研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2014
- [31] 田晓春, 邓小华, 田茂成, 等. 湘西州植烟土壤有效磷含量区域分布特征[J]. *作物研究*, 2014, 28(6): 630–633
- [32] 张继平, 张林波, 王凤玉, 等. 井冈山国家级自然保护区森林土壤养分含量的空间变化[J]. *土壤*, 2014, 46(2): 262–268
- [33] Mage S M, Porder S. Parent material and topography determine soil phosphorus status in the Luquillo Mountains of Puerto Rico[J]. *Ecosystems*, 2013, 16(2): 284–294
- [34] 张海东, 于东升, 王宁, 等. 植被恢复过程中侵蚀红壤有机质变化研究[J]. *土壤*, 2013, 45(5): 856–861
- [35] 何利昌, 樊贵盛, 吉晋兰. 细颗粒物潜土入土对入渗的影响研究[J]. *灌溉排水学报*, 2015, 34(2): 102–104
- [36] 李裕元, 邵明安, 张兴昌. 侵蚀条件下坡地土壤水分与有效磷的空间分布特征[J]. *水土保持学报*, 2001, 15(2): 41–44
- [37] 陈晓燕, 王茹, 卓素娟, 等. 不同降雨强度下紫色土陡坡地侵蚀泥沙养分特征[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(6): 1–5
- [38] 张合兵, 聂小军, 程静霞.  $^{37}\text{Cs}$  示踪采煤沉陷坡土壤侵蚀及其对土壤养分的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(4): 137–143

## Spatial Distribution of Soil Available Phosphorus and Its Driving Factors Under Different Erosion Degrees in South China

JIANG Yefeng<sup>1,2</sup>, YE Yingcong<sup>2</sup>, GUO Xi<sup>1,2\*</sup>, RAO Lei<sup>1,2</sup>, LI Weifeng<sup>1,2</sup>, SUN Kai<sup>1,2</sup>

(1 Academy of Land Resource and Environment, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 2 Key Laboratory of Poyang Lake Watershed Agricultural Resources and Ecology of Jiangxi Province, Nanchang 330045, China)

**Abstract:** The spatial variation and the driving factors of soil available phosphorus (AP) of farmlands in Xinguo County under different erosion levels were analyzed by using the methods of Spearman correlation analysis, regression analysis and ordinary kriging combined with elevation, slope, parent material, soil texture, topsoil thickness and landform type. The results showed that the average AP decreased first and then increased with the increase of soil erosion level. Significant differences were found between AP under different soil erosion degrees ( $P < 0.001$ ), the coefficient of variation decreased in the order as extremely intensive erosion (35.20%) > severe erosion (28.09%) > slight erosion (28.02%) > serious erosion (27.90%) > unobvious erosion (25.96%) > moderate erosion (25.78%). In the case of unobvious erosion, parent material could explain 1.7% of spatial variability of AP. In the cases of slight, moderate and serious erosion, elevation could explain 5.7%, 2.3% and 2.9% of spatial variability of AP, respectively. In the case of the extremely intensive erosion, parent material could explain 5.0% of the spatial variability characteristics of AP. In the case of severe erosion, elevation could explain 1.9% of the spatial variability characteristics of AP. Thus, parent material and elevation are the main driving factors in controlling the spatial distribution of AP. The study results could provide references for the rational use of farmlands and for soil and water conservation under different erosion degrees.

**Key words:** Different erosion degrees; Soil available phosphorus; Variation; Driving factors; Elevation; Parent material