

峡江县土壤养分空间特征及与地形因子的相关性

赵越^{1,2}, 罗志军^{1,2}, 赵杰^{1,2}, 齐松^{1,2}, 曹丽萍^{1,2}

(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:研究区域耕地土壤养分的空间特征及其与地形因子的相关性,可为土壤养分的有效保持和耕地资源的高效利用提供依据。以江西省峡江县为例,运用地统计学方法与GIS技术,对土壤养分的空间特征与空间自相关性进行了分析,并探讨土壤各养分与地形因子之间的相关性。结果表明:(1)峡江县土壤养分分布均符合正态分布,变异系数由大到小依次为有效磷(56.64%)>速效钾(37.69%)>碱解氮(26.67%)>有机质(22.60%)。(2)峡江县土壤养分总体呈现中部低,四周高,东部含量大于西部的特点,桐林乡土壤养分含量较高,巴邱镇含量较低,空间分布不均匀。经空间自相关分析可知,土壤养分H—H型聚集主要集中于研究区东部,L—L则位于研究区西部。(3)高程与土壤养分之间均为显著正相关关系;坡度与有机质、有效磷、碱解氮均呈现显著负相关;坡向与有机质、速效钾显现出显著正相关关系,碱解氮则显现出极显著正相关关系;曲率和地形起伏度与土壤养分均未表现出显著的相关关系,坡度变率与土壤养分均显现出显著的负相关关系。

关键词:地形因子;地统计学;空间变异性;峡江县

中图分类号:S153.6

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)05-0118-06

The Spatial Characteristics of Soil Nutrients and the Correlation with Topographic Factors in Xiajiang County

ZHAO Yue^{1,2}, LUO Zhijun^{1,2}, ZHAO Jie^{1,2}, QI Song^{1,2}, CAO Liping^{1,2}

(College of Land Resources 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 characteristics of soil nutrients and their correlation with topographic factors can be used to provide evidence for effective conservation of soil nutrients and efficient utilization of cultivated land resources. Taking Xiajiang County of Jiangxi Province as an example, we analyzed the spatial characteristics and spatial autocorrelation of soil nutrients by using geostatistics and GIS technology, and also discussed the correlation between soil nutrients and terrain factors. The results showed that: (1) the distribution of soil nutrients in Xiajiang County accorded with the normal distribution; the coefficient of variation decreased in the order: available phosphorus (56.64%)>available potassium (37.69%)>alkaline hydrolysis nitrogen (26.67%)>organic matter (22.60%); (2) soil nutrients in Xiajiang County showed the low level in the middle part, high level in four sides, and larger in the east than in the west; the soil nutrient contents in Tonglin town was relatively high, and the contents in Baqiu town was low, and the spatial distribution was uneven; the spatial autocorrelation analysis showed that the H—H type aggregation of soil nutrients mainly concentrated in the eastern part of the study area, while L—L was located in the western part of the study area; (3) elevation was significantly positively correlated with soil nutrients; slope gradient was significantly negatively correlated with organic matter, available phosphorus and alkaline hydrolysis nitrogen; slope aspect was significantly positively correlated with organic matter, available potassium, and was a very significantly positively correlated with alkaline hydrolysis nitrogen, soil nutrients had no significant correlations with the curvature and the terrain; slope variability was significantly negatively correlated with soil nutrients.

Keywords: topographic factors; geostatistics; spatial variability; Xiajiang County

土壤养分是土壤生态系统中的重要组成部分,也是植物生长的必要营养来源,土壤养分得空间分布随着土壤环境的改变而显示出一定的分布规律。近年来,对土壤养分中空间分布规律方面的研究逐渐增多,但所采用的方法各异,角度多样,结论也有所不同^[1-2],朱菊兰等^[3]研究者对浑河太子河流域的土壤养分进行了空间分异研究,马桦薇等^[4]研究了待复垦村庄的土壤养分的空间分布特点,但对于影响土壤养分空间分布的因素缺乏必要的探讨。而土壤养分的空间分布受到诸多因素的影响,是地形地貌、成土母质、土壤侵蚀、气温、降水、施肥等因素综合作用的结果^[5],而地形是影响土壤养分的一个重要因素之一,而前人的研究往往针对地形的某个方面,如刘国顺等^[6]通过对缓坡烟田土壤养分空间变异的研究,发现土壤有机质、碱解氮、速效磷、速效钾呈现中等的空间变异性,而在坡度较大的地区,土壤养分出现低值,在较为平缓的地区,土壤养分出现高值。杨建虎等^[7]发现黄土高原小流域土壤养分的空间分布特征与地形因子密切相关,土壤有机质和速效养分含量与高程和坡度呈负相关关系,与坡向呈正相关关系,而前人的研究过于关注土壤养分的含量分布,缺乏对土壤空间变异性与自相关性的研究,且缺乏对地形因子较为全面的探讨,而峡江县四周高,中间低,地形特殊且耕地广布,具有良好的研究条件。本文在前人研究的基础上,对峡江县的土壤养分空间特征进行探讨,并对地形因子与土壤养分的关系进行分析,以期为峡江县的土地利用、耕地保护、精准施肥等工作的开展提供参考。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

峡江县位于江西省中部,地跨北纬 27.46°—27.76°N、东经 114.46°—115.86°E。总面积约为 1 287.43 km²。丘陵广布,东西边界海拔略高,中部地势较低,耕地广布。平均气温约为 17.9℃,年降水量约 1 360.1 mm,年平均日照为 1 586.6 h。地处中低纬度,属中亚热带季风湿润气候,水热充足,森林广布,动、植物资源丰富,为农作物生长提供了诸多有利条件。其中土壤以红壤为主,水稻土、潮土次之。是全国蔬菜生产重点县之一。

1.2 研究方法

1.2.1 采样方法 根据《全国耕地地力调查与质量评价技术规程》规定,在 GPS 定位技术的支持下,为保证样点在数量和空间上的均匀分布,按照均匀性、代表性和连续性的原则,同时考虑地形部位的基础上进行采样,在峡江县的耕地范围内进行“S”法均匀随机采取 15~20 个样点,进行充分混合后利用四分法取 1 kg。通过手持 GPS 实地记录采样点坐标与海拔

等位置信息,样点采集厚度约为 20 cm,于 2013 年秋收集样点 6 034 个。

1.2.2 分析方法 土壤样本经自然风干,去杂,过筛等处理之后,通过重铬酸钾(K₂Cr₂O₇)外加热的方法得出土壤有机质的含量;碱解氮则是通过碱解扩散法测定得出;速效钾则采用乙酸铵浸—提火焰光度计法测定。有效磷则是通过 NaHCO₃ 提取,然后再采用钼锑抗比色法对所提取的有效磷含量加以测定。此外,采用 30 m 分辨率的规则格网数字高程模型(DEM)提取峡江县坡度、坡向等地形要素信息。

1.3 数据处理方法

1.3.1 基础数据处理 本文采用 IBM SPSS Statistics 22 软件数据进行描述性与统计分析处理,由于特异质的存在会影响数据的准确性,故采用三倍标准差的方法进行特异质的剔除。借助 ArcGIS 10.2 软件进行空间分析、插值图制作、地形数据的提取等,考虑到耕地图斑破碎化的特点,故本文采用全域作为制图范围以实现表达效果的最优化。

1.3.2 半变异函数分析方法 地统计学与 GIS 技术的结合已经广泛应用于空间分析的各个领域^[8],为了实现土壤养分的空间分析,本文采用 GS⁺ 7.0 软件在假定采样点数据符合二阶平稳和本征假设基础上进行半变异函数分析与模型拟合,可表示为:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

式中: $\hat{\gamma}(h)$ 为半变异函数; h 为步长; $N(h)$ 表示间隔 h 的样点数; $z(x_i)$ 与 $z(x_i + h)$ 则分别表示在 $z(x_i)$ 与 $z(x_i + h)$ 处的实测值。

1.3.3 空间自相关分析方法 采用 Geoda 5.1i 软件通过对空间权重计算与 Moran's I 指数计算对土壤养分数据进行空间自相关分析。空间自相关分析用来检验某些空间变量在特定位置的属性值是否与邻近位置的属性值显著相关的算法,可以分为全局空间自相关(Global Spatial Autocorrelation)与局部空间自相关(Local Spatial Autocorrelation)^[9],全局空间自相关的公式为(2)、(3);局部空间自相关更能展示土壤养分的空间聚集性,有利于空间表现,公式为(4):

$$I = \frac{n}{S_0} \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

$$\text{其中 } S_0 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \quad (3)$$

$$I = x'_i \sum_{j=1}^n w_{ij} x'_j \quad (4)$$

式中: n 为样本总数; x_i 与 x_j 分别为样本 i 与 j 在所在位置的属性值; \bar{x} 为样本平均值; w_{ij} 为空间权重。

2 结果与分析

2.1 土壤养分描述性统计

样本总数为 6 034 个,剔除异常点之后,土壤中有机质、有效磷、速效钾、碱解氮有效样本分别为 6 029,6 030,6 025,6 031 个,研究区土壤养分描述性统计特征如表 1 所示。

表 1 土壤养分描述性统计特征

土壤养分	样本数	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数/%	偏度	分布类型
有机质/(g·kg ⁻¹)	6029	4.00	62.20	29.90	6.76	22.60	0.35	正态
有效磷/(mg·kg ⁻¹)	6030	2.10	86.00	23.50	13.32	56.64	0.95	正态
速效钾/(mg·kg ⁻¹)	6025	23.00	201.00	108.90	41.05	37.69	0.48	正态
碱解氮/(mg·kg ⁻¹)	6031	42.00	316.80	151.60	40.43	26.67	0.66	正态

2.2 半变异函数分析

通过半变异函数常常用于区域化变量在分隔距离上对各样本变异程度的度量,可以用以研究土壤养分的结构性、独立性、相关性以及空间变异特点研

由表 1 可知,峡江县土壤有机质平均值为 29.90 g/kg,有效磷平均值为 23.50 mg/kg,土壤速效钾平均值为 108.90 mg/kg,土壤碱解氮平均值为 151.60 mg/kg。可知有机质与碱解氮含量适中,有效磷与土壤速效钾含量总体上偏低。从分布类型可以得知均符合正态分布。变异系数由大到小依次为有效磷(56.64%)>速效钾(37.69%)>碱解氮(26.67%)>有机质(22.60%)。

究^[10],其主要模型包含球状模型(Spherical)、高斯模型(Gaussian)、指数模型(Exponential)、线性模型(Linear)等,分析结果如表 2 所示。

表 2 土壤养分半变异函数参数

土壤养分	样本数	模型	块金值 (C ₀)	基台值 (C+C ₀)	块金效应 C/ (C+C ₀)/%	变程/m	决定 系数 R ²
有机质	6029	指数	0.464	0.722	35.75	43000	0.983
有效磷	6030	高斯	0.545	0.904	39.72	45500	0.978
速效钾	6025	高斯	0.944	1.154	18.20	46436	0.990
碱解氮	6031	高斯	0.258	1.573	83.60	49986	0.986

由表 2 可知,指数模型为有机质最适宜模型,速效磷、速效钾、碱解氮最适宜模型均为高斯模型,4 类土壤养分最适宜模型的决定系数 R² 均大于 0.9 且接近于 1,表明拟合模型可以较好地反映土壤的空间特征。块金值常常是由于误差小于取样尺度造成的,用来表示随机部分的空间异质性,越大的块金值意味着在较小尺度上的某种过程越应重视^[11]。峡江县土壤养分的 4 类养分因子块金值均为正值,表明存在着由于采样误差,随机或短距离变异引起正基底效应。基台值是区域变量总体特征的表现,包括结构性、随机性变异,基台值越大表示系统总的空间异质性越高,有机质基台值最低,碱解氮基台值最高,表明有机质总的变异性最低,碱解氮总的变异性最高。块金效应表示随机部分引起的空间异质性占系统总变异的比列,小于 25%,25%~75%,大于 75%分别表示强烈、中等、较弱的空间变异性。峡江县土壤养分中,有机质、有效磷均属于中等变异性,块金效应值分别为 35.75%和 39.72%,表明其空间变异不易受到人类活动的影响,而主要受气候、成土母质、颗粒大小等因素影响。速效钾块金效应值为 18.20%,表明其具有较强的空间变异性,主要影响因素为等结构性因素(地形、母质等)^[12]。碱解氮则显现出较弱的空间变异性,块金效应值为 83.60%,表明土壤中随机成分对碱解氮的含

量影响较大,随机性变异起主导性作用,可能是其空间变异容易受到人类活动的影响,如翻耕、施肥等,造成了土壤碱解氮的弱空间变异性^[13]。

2.3 空间自相关分析

通过对峡江县土壤养分的自相关分析可知,土壤有机质、有效磷、速效钾、碱解氮 Moran's 值分别为 0.417 2、0.493 9、0.474 1 和 0.458 9,4 种情况下 p 值均小于 0.05,z 值大于 1.96,表明 4 类土壤养分因子都具有显著的空间自相关性,为了获知其空间聚集特征与异常值所在区域,采用 LISA 分布图将空间聚集情况和异常值分布借助 ArcGIS 10.2 软件进行展示^[14],得到各类土壤养分的 LISA 分布图。

由图 1 可知,4 类土壤养分在空间聚集分布上均显示出显著的聚集特征,低值—低值(L—L)均集中分布于研究区西侧,高值—高值(H—H)则集中分布于研究区东侧,且低值—低值(L—L)面积最大,高值—高值(H—H)次之,表明研究区东侧土壤养分含量普遍较高,形成高值聚集分布;西侧土壤养分含量普遍较低,聚集且分布广泛。各类土壤养分因子中高值—低值(H—L)聚集类型都主要分布于仁和镇、水边镇西北部等区域,在戈坪镇也有小范围的分布、低值—高值(L—H)集聚分布范围较小且零散。东部地区耕地土壤养分质量明显高于西部地区,造成土壤养分高值区的集中分布,从而形

成东部的高值—高值(H—H)聚集区和西部的低值—低值(L—L)聚集区。而位于仁和镇附近地区的高值—低值(H—L)分布区,表明其土壤养分含量较高,但其临

近单元的养分含量较低,主要受到戈坪乡、巴邱镇等乡镇影响。经过以上空间自相关聚集特征表明峡江县土壤养分整体含量东高西低特征明显。

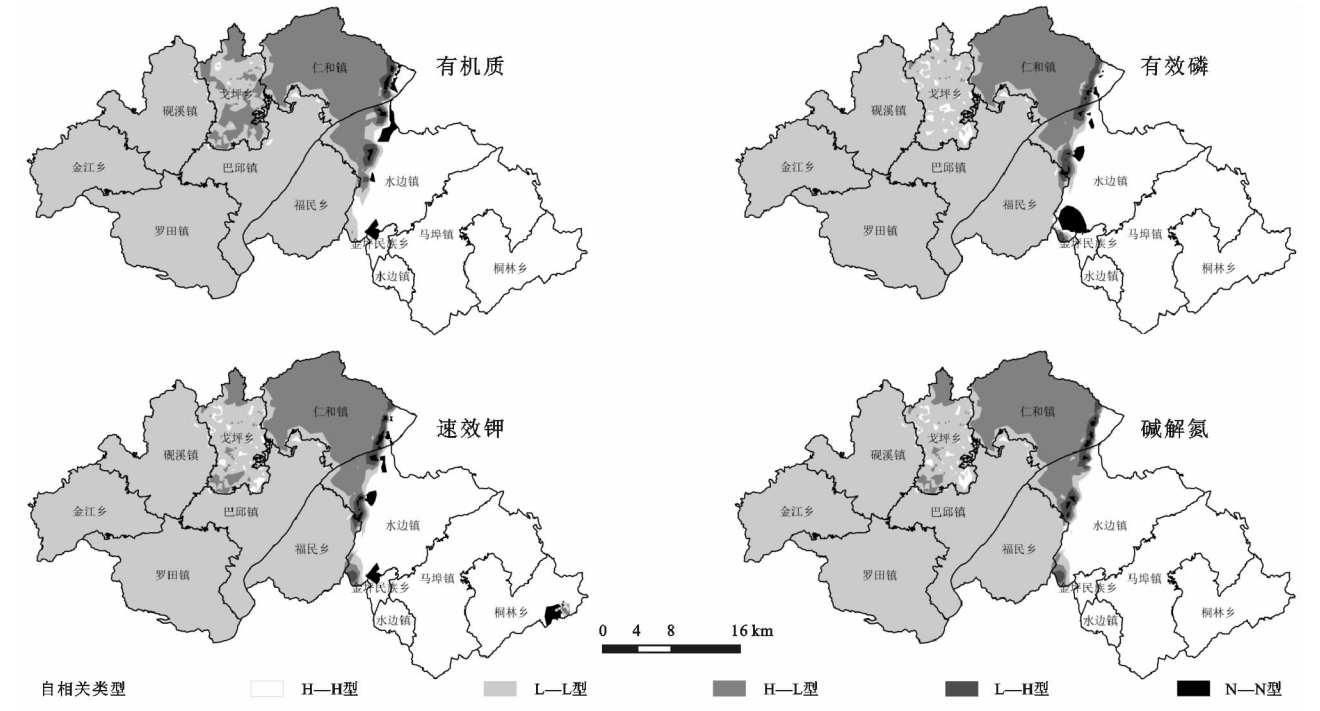


图 1 研究区土壤养分 LISA 图

由图 2 可知,峡江县土壤养分含量呈现“东高西低”的特点,印证了自相关分析的相关结论,桐林乡土壤各类养分因子含量均较高,巴邱镇则较低。桐林乡海拔较高,高差较大,地形较为复杂,人口密度较小,植被覆盖率高,生态环境条件较为优越,土壤耕作层较厚,很好的保留了土壤的养分;巴邱镇海拔较低,地形较为平缓,有着良好的农业发展和城市布局条件,峡江县县城 1997 年之前位于巴邱镇,之后将县城迁移至水边镇,长期以来以巴邱镇为中心的老县城聚集了众多居民,人类活动频繁,长期的土地开发活动破坏了土壤中的养分含量,造成巴邱镇土壤养分含量普遍较低的结果。土壤有机质含量中的最高值与最低值分布范围较小且零碎,高值多分布于桐林乡,低值于巴邱镇,其他乡镇中有机质含量差异较小。有效磷含量较为集中连片,最低值分布范围广泛,戈坪镇、仁和镇、水边镇以西均为最低值分布区,是 4 类土壤养分因子中最低值分布最为范围的养分类型,表明峡江县西部有效磷含量整体较低,需要大量的补充磷肥。土壤速效钾是一种土壤中存在水溶性钾,此部分钾能很快地被植物吸收利用,故称为速效钾,速效钾含量在空间分布上呈现出东高西低,巴邱镇最低的特点。可能是由于西部广泛分布着不含钾且保钾困难的高岭类矿物,且经过河流侵蚀、风化淋溶作用等,使得黏粒中的水云母含量减少,引起了峡江县西部土壤养分

中钾含量不足^[15]。土壤碱解氮包括无机态氮和结构简单能为作物直接吸收利用的有机态氮,而碱解氮的含量,往往容易受到土壤有机质含量和氮素化肥的使用情况影响,土壤中的氮又跟植物根系及其生命活动息息相关,在土壤中呈锥形分布,峡江县碱解氮含量适中,巴邱镇含量过低,其他乡镇分布较为均匀,尤其东部地区较为集中分布的农田,较好的施肥条件,为农作物生长提供了很好的条件。

2.4 土壤养分与地形因子相关性分析

土壤养分的空间分布具有一定的规律性,受到多种因素综合作用,如地貌类型、土壤母质、水热分布、人类活动等。首先通过从 DEM 中提取峡江县坡度、坡向、曲率、坡度变率、地形起伏度等地形因子,经过对采样点地形信息的提取对采样点进行分类统计,将坡向分为阴坡(0°~45°,351°~360°)、半阴坡(45°~90°,270°~315°)、半阳坡(90°~135°,225°~270°)、阳坡(135°~225°)4 类,坡度分为 1~5 等,高程分为小于 40 m,40~80 m,80~120 m,120~160 m、大于 160 m 六等,再借助 IBM SPSS Statistics 22 将高程、坡度、坡向、曲率、坡度变率、地形起伏度等地形因子与峡江县土壤养分之间进行 pearson 相关性分析,为了便于计算,坡向按照阴坡、半阴坡、半阳坡、阳坡进行标准化^[16],分别编排为 1,2,3,4,数字越大,表示坡向越向阳,分析结果如表 3 所示。

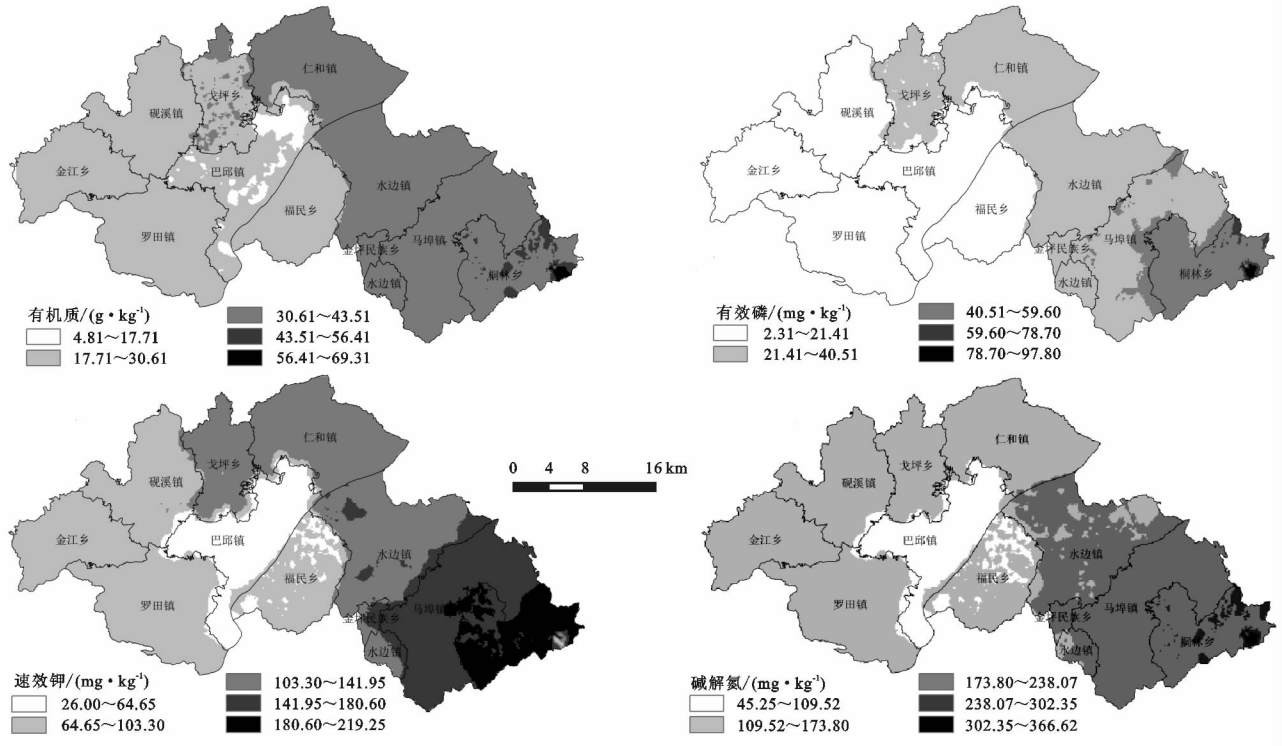


图 2 研究区土壤养分空间分布

表 3 不同坡度、坡向及高程土壤养分含量特征

项目	分类	样点数	有机质/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有效磷/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效钾/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	碱解氮/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
坡向	阴坡($0^{\circ} \sim 45^{\circ}$, $351^{\circ} \sim 360^{\circ}$)	600	16.28	22.62	88.43	100.75
	半阴坡($45^{\circ} \sim 90^{\circ}$, $270^{\circ} \sim 315^{\circ}$)	1005	21.15	25.11	98.02	123.60
	半阳坡($90^{\circ} \sim 135^{\circ}$, $225^{\circ} \sim 270^{\circ}$)	1230	22.45	28.14	102.13	135.26
	阳坡($135^{\circ} \sim 225^{\circ}$)	3299	34.21	33.32	112.41	163.21
坡度	0 级($<2^{\circ}$)	109	33.44	30.11	130.94	172.47
	1 级($2^{\circ} \sim 6^{\circ}$)	4095	27.81	19.37	95.98	139.08
	2 级($6^{\circ} \sim 10^{\circ}$)	155	35.46	34.98	138.48	185.48
	3 级($10^{\circ} \sim 15^{\circ}$)	82	31.88	27.05	122.39	162.73
	4 级($15^{\circ} \sim 25^{\circ}$)	304	30.79	25.52	117.88	157.30
	5 级($>25^{\circ}$)	224	26.56	22.38	104.59	155.29
高程	$<40 \text{ m}$	659	30.55	24.47	112.63	155.32
	40~80 m	3747	28.37	20.61	100.06	142.58
	80~120 m	1387	33.10	29.65	126.91	170.34
	$>160 \text{ m}$	94	37.85	40.52	164.70	200.50

表 4 土壤养分与地形因子相关性分析

项目	有机质	有效磷	速效钾	碱解氮
高程	0.257 **	0.262 **	0.257 **	0.256 **
坡度	-0.296 **	-0.310 **	-0.321	-0.302 **
坡向	0.177 **	0.171	0.146 **	0.176 *
曲率	-0.015	-0.16	-0.17	-0.016
坡度变率	-0.088 **	-0.073 **	-0.084 **	-0.082 **
地形起伏度	0.005	-0.003	0.001	-0.001

注: * 表示 $p < 0.05$; ** 表示 $p < 0.01$ 。

由表 3 可知,在坡向方面,阳坡采样点中分布最

多,养分含量最高,阴坡土壤养分含量最低,样点分布最少,表明在阳坡中土壤养分含量能保持较高水平;在坡度方面,样点主要分布于 1 级坡度($2^{\circ} \sim 6^{\circ}$),但其中各养分含量均为各坡度级别中最低;在高程方面,多数样点分布于 40~80 m 范围内,而随着高程的升高,土壤养分含量逐渐提高。由表 4 相关分析可知,高程与土壤养分之间显示显著的正相关关系($p < 0.05$),高程越高,土壤养分含量均越高,这与表 3 中结果保持一致,峡江县高程较高区域多分布于桐林乡等研究区

东部边界,此区域植被覆盖率高,植物根系发达,保肥效果好,人类活动对生态环境的影响较小,很好的保留了土壤养分,而低海拔区往往人类活动频繁,土地开发活动多,土壤养分流失严重,造成该区域土壤养分含量较低^[17]。坡度与有机质、有效磷、碱解氮的均呈现显著负相关($p < 0.05$),有效磷与坡度的相关性不明显,坡度增大,土壤就越容易受到地表径流等外力侵蚀作用影响,使得土壤养分因侵蚀作用而降低,速效钾与作物、成土母质等要素的关系密切,能直接被作物吸收,在含云母的地区含量较高,故不易受到坡度变化的影响。坡向与有机质、速效钾显现出显著正相关($p < 0.05$)关系,碱解氮则显现出极显著正相关关系($p < 0.01$)。耕地越向阳,通常水热条件越好,具有更加适宜农作物生长的条件,植物根系较为发达,有助于土壤养分的涵养,而阴坡、半阴坡水热条件较差,植物的光合作用弱于向阳坡,作物产量较低,植物体与土壤的养分交换较弱,导致土壤养分含量较低^[18]。曲率和地形起伏度与土壤养分均无明显的相关关系,表明土壤养分与曲率和地形起伏度无明显关系,可能由于峡江县较为平缓的地形无较大的曲率和地形起伏度的变化,故其对土壤养分的含量影响较弱。坡度变率与土壤养分含量显著负相关关系($p < 0.05$),随着坡度变化幅度的加大,土壤养分越容易流失,而较为平缓的地面坡度,更适宜土壤的养分保留。

3 结论

(1) 峡江县土壤养分分布均符合正态分布,变异系数由大到小依次为有效磷(56.64%)>速效钾(37.69%)>碱解氮(26.67%)>有机质(22.60%)。有机质、有效磷均属于中等变异性,速效钾属于强烈空间变异性,碱解氮则显现出较弱的空间变异性。

(2) 空间分析研究表明:峡江县土壤养分总体呈现中部低,四周高,东部含量大于西部的特点,且土壤养分中正相关H—H型、L—L型均比较集中连片,H—H型主要分布在东部地区,L—L型则主要分布于西部。负相关的H—L型、L—H型分布范围较小,H—L型主要分布于北部地区,L—H型分布则较为零散。

(3) 通过相关关系分析,发现研究区高程与土壤养分之间均为显著正相关关系;坡度与有机质、有效磷、碱解氮的均呈现显著负相关;坡向与有机质、速效钾显现出显著正相关关系,碱解氮则显现出极显著正相关关系;曲率与土壤养分均未显现出显著的相关关系,坡度变率与土壤养分均显现出显著负相关关系。

参考文献:

[1] 李青华,张静,王力,等.黄土丘陵沟壑区山地苹果林土壤干

化及养分变异特征[J].土壤学报,2018,55(2):503-514.

- [2] 范夫静,宋同清,黄国勤,等.西南峡谷型喀斯特坡地土壤养分空间变异特征[J].应用生态学报,2014,25(1):92-98.
- [3] 朱菊兰,刘森,张阳,等.浑河太子河流域地形和土地利用对表层土壤养分空间变异的影响[J].生态学报,2016,35(3):621-629.
- [4] 马桦薇,师学义,张美荣,等.待复垦村庄土壤养分特征研究:以山西省西部村为例[J].水土保持研究,2015,22(4):107-112.
- [5] 赵业婷.基于GIS的陕西省关中地区耕地土壤养分空间特征及其变化研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2015.
- [6] 刘国顺,常栋,叶协锋,等.基于GIS的缓坡烟田土壤养分空间变异研究[J].生态学报,2013,33(8):2586-2595.
- [7] 杨建虎,常鸿莉,魏琪.黄土高原小流域土壤养分空间特征及其与地形因子的相关性[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2014,42(12):85-90.
- [8] 段文标,陈立新,颜永强.莲花湖库区红松水源涵养林土壤水分—物理性质的空间分布特征[J].自然资源学报,2011,26(7):1227-1235.
- [9] 韦仕川,熊昌盛,栾乔林,等.基于耕地质量指数局部空间自相关的耕地保护分区[J].农业工程学报,2014,30(18):249-256.
- [10] 庞凤,陶晓秋,张英,等.会理县新植烟区土壤速效钾含量空间变异特征及其影响因子[J].中国烟草科学,2012,33(1):32-36.
- [11] 何平,刘健,余坤勇,等.南方竹林地土壤有机碳空间异质性研究[J].土壤通报,2016,47(2):278-286.
- [12] 陈洋,齐雁冰,王茜茜,等.秦巴中部山区耕地土壤速效钾空间变异及其影响因素[J].环境科学研究,2017,30(2):257-266.
- [13] 曹祥会,龙怀玉,周脚根,等.河北省表层土壤有机碳和全氮空间变异特征性及影响因子分析[J].植物营养与肥料学报,2016,22(4):937-948.
- [14] 熊昌盛,谭荣,岳文泽.基于局部空间自相关的高标准基本农田建设分区[J].农业工程学报,2015,31(22):276-284.
- [15] 刘彦伶,李渝,张雅蓉,等.长期氮磷钾肥配施对贵州黄壤玉米产量和土壤养分可持续性的影响[J].应用生态学报,2017,28(11):3581-3588.
- [16] 吴昊.秦岭山地松栎混交林土壤养分空间变异及其与地形因子的关系[J].自然资源学报,2015,30(5):858-869.
- [17] 刘昀东,高广磊,丁国栋,等.风蚀荒漠化地区土壤质量演变研究进展[J].南京林业大学学报(自然科学版),2017,41(5):161-168.
- [18] 赵新风,徐海量,张鹏,等.养分与水分添加对荒漠草地植物群落结构和物种多样性的影响[J].植物生态学报,2014,38(2):167-177.