

DOI: 10.5846/stxb202103310832

姜霓雯,童根平,叶正钱,程樟峰,吕永强,傅伟军.浙江清凉峰自然保护区土壤肥力指标空间变异及其影响因素.生态学报,2022,42(6):2430-2441.

Jiang N W, Tong G P, Ye Z Q, Cheng Z F, Lü Y Q, Fu W J. Spatial variability of soil fertility properties and its affecting factors of Qingliangfeng Nature Reserve, Zhejiang. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(6): 2430-2441.

浙江清凉峰自然保护区土壤肥力指标空间变异及其影响因素

姜霓雯¹,童根平²,叶正钱¹,程樟峰²,吕永强¹,傅伟军^{1,*}

1 浙江农林大学,亚热带森林培育国家重点实验室培育基地,杭州 311300

2 浙江清凉峰国家级自然保护区管理局,临安 311321

摘要:为了探究清凉峰自然保护区内华南野生梅花鹿主要栖息地千顷塘的土壤肥力指标的空间变异规律及其相关影响因子,采用经典统计学和地统计学方法对千顷塘土壤 pH、有机质、全磷、全氮、全钾含量进行了系统分析,并探讨了其主要影响因子。结果显示:千顷塘保护区内土壤整体呈酸性,区域内有机质、全磷、全氮、全钾含量均值分别为 72.44、0.45、1.91、23.16 g/kg,所有指标均呈现中等程度变异。半方差分析结果表明,指数模型为 pH、全磷、全氮、全钾的最佳拟合模型,球状模型为有机质最佳拟合模型,pH、全磷、全钾空间自相关强烈,显示其空间变异主要受结构性因素影响,有机质和全氮空间自相关程度中等,说明随机因素存在一定影响。全局 Moran's *I* 指数检验结果显示,有机质、全磷和全氮存在显著空间自相关,在空间上呈现聚集分布。所有肥力指标的空间分布较为连贯,条带状分布特征显著,总体呈现由边缘向中间降低趋势;相关性分析显示,土壤有机质、全磷、全氮、全钾与海拔、容重和植被类型呈显著相关性;回归分析表明,在所有环境因子中,容重对各类元素的方差解释最大,是影响千顷塘土壤肥力因子空间异质性的主控因素。研究可为南方丘陵地区人为扰动较小的林地土壤肥力特征及影响因子解译提供重要科学意义。

关键词:自然保护区;土壤肥力指标;空间变异;影响因子

Spatial variability of soil fertility properties and its affecting factors of Qingliangfeng Nature Reserve, Zhejiang

JIANG Niwen¹, TONG Genping², YE Zhengqian¹, CHENG Zhangfeng², LÜ Yongqiang¹, FU Weijun^{1,*}

1 The Nurturing Station for the State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, China

2 Management Office, Qingliangfeng National Nature Reserve of Zhejiang, Lin'an 311321, China

Abstract: In order to explore the spatial heterogeneity of soil fertility properties and its affecting factors in Qianqingtang, the main habitat of wild sika deer of South China, in Qingliangfeng Nature Reserve. Based on the sampling data, using traditional statistics and geostatistical methods, the soil pH, soil organic matter (SOM), total phosphorus (TP), total nitrogen (TN), and total potassium (TK) were systematically analyzed. Moreover, the importance of the environmental factors influencing the variability and accumulation of soil fertility properties were studied. The results indicated that the soil in Qianqingtang Reserve was acidic on the whole, and the average contents of SOM, TP, TN and TK in the studied area were 72.44 g/kg, 0.45 g/kg, 1.91 g/kg and 23.16 g/kg, respectively. The content of each properties is relatively high, basically in the rich level. The coefficients of variation (C.V.s) of all studied soil fertility properties were at a moderate

基金项目:浙江省自然科学基金项目(LY20C160004);浙江清凉峰国家级自然保护区管理局森林土壤资源调查编研项目(H20190328)

收稿日期:2021-03-31; 网络出版日期:2021-11-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fuweijun@zafu.edu.cn

level. The results of semi-variance analysis indicated that the exponential model was the best-fit model for pH, TP, TN and TK while spherical model was the best-fit model for SOM. In addition, pH, TP and TK had strongly spatial autocorrelations which represented that their spatial variability was mainly dominated by structural factors. SOM and TN showed moderately spatial autocorrelations which indicated that the random factors had a certain influence. The results of the global Moran's *I* index test showed that SOM, TP and TN had significant spatial autocorrelation, and presented an aggregated distribution in space which corresponded to the calculation results of the variable range. Kriging interpolation results showed the spatial distribution of all kinds of soil fertility properties were coherent and the trend of stripe distribution was obvious. The spatial distribution regularity showed a similarity of each soil fertility properties to some extent, the distribution showed a significant downward trend from the edge to the middle. The results of correlation analysis revealed that SOM, TP, TN, and TK in the study area had significant correlation with altitude, bulk density and stand types. Regression analysis showed that bulk density explained the highest variance of elements among all environmental factors, indicating that bulk density was the dominant controlling factor affecting the spatial heterogeneity of soil fertility properties in Qianqingtang Reserve. However, the overall explanatory degree of the research factors was low, indicating that the spatial variation of soil fertility properties was also affected by other factors. This study can provide important scientific information related to soil property characteristics and influencing factors in the southern hilly area with little human disturbance.

Key Words: nature reserve; soil fertility properties; spatial variation; influencing factors

自然保护区是生物多样性保护的基石^[1],在确保各类自然生态系统安全稳定、筑牢生态安全屏障、改善生态环境质量等方面发挥了重要的作用^[2]。自然保护区不仅能够最大限度长期维护生物多样性,并且还为社会提供了一系列生态系统服务效益,例如提供清洁水、木材等^[3]。其中,森林类型的自然保护区以其复杂的生态系统结构,在陆地生态系统中占据领先地位^[4]。土壤层是植被生长的基础,森林生态功能的发挥和森林植物资源的保育都依赖于土壤资源,土壤资源的探明和保护也有利于区域内土壤动物以及微生物资源的保护^[5-6]。土壤氮、磷、钾等肥力指标的空间异质性及其影响因素是近年来众多学者研究的热点之一,且多集中于对农田、经济林以及小流域的研究。如邹润彦等^[7]利用地理加权回归模型,系统分析了环鄱阳湖区农田土壤有机碳影响因子的空间分布格局,并进行了制图研究;董佳琦等^[8]探讨了香榧主产区林地土壤养分的分布规律及其主控因素;Wang等^[9]揭示了太岳山亚高山森林流域土壤有机碳和全氮的空间变异规律。但是以往研究缺少对于南方丘陵区人为扰动较小的自然保护区内天然林地土壤肥力特征的研究,深入研究自然保护区内土壤肥力指标的空间变异情况能够精确了解天然林分特别是珍贵树种的生长条件,对森林生态系统的稳定和珍稀树种的保护起着重要作用。

清凉峰自然保护区地处华东皖浙丘陵区,属森林和野生动物类型保护区,1998年扩区并经国务院批准晋升为国家级自然保护区,不仅是我国一级重点保护野生动物华南梅花鹿的重要分布区域,也是我国经济发达的长三角地区保存完好的基因库。目前对清凉峰国家级自然保护区的研究主要侧重于森林植被和动物保护方面^[10-11],对土壤养分等肥力特征缺乏全面、系统的调查研究。本研究旨在分析该区域土壤肥力指标的空间变异规律,并定量揭示地形、林分等因子对其空间变异的影响,以期为区域生态保护和森林管理提供科学参考。

1 研究区概况

清凉峰自然保护区位于浙江省杭州市临安区西北部(118°50'57"—119°13'23"E, 30°00'42"—30°19'33"N),地处华东皖浙丘陵区,由千顷塘、龙塘山和顺溪坞3块区域组成,总面积为11252 hm²,主峰清凉峰,海拔1787.4 m,系浙西第一高峰,区域内地势高差悬殊,地形复杂多样。保护区位于中亚热带季风气候区北缘,年均温12.5℃,年降水量1862.2—2331.9 mm之间。该区不同时代地层发育较为齐全,其中以侏罗系分布最广,

主要包括中酸性火山岩、紫红色层状粉砂岩、粉晶灰岩、硅质页岩以及比较大面积的岩浆岩等。研究区内植物区系组成丰富,是国家极为珍贵的生物多样性宝库,主要珍稀特色植物种群包括华榛(*Corylus chinensis*)、台湾水青冈(*Fagus hayatae*)、银缕梅(*Parrotia subaequalis*)、香果树(*Emmenopterys henryi*)、鹅掌楸(*Liriodendron chinense*)和巴山榧树(*Torreya fargesii*)等。本文研究区为千顷塘(图1),区域面积 5690 hm²,是野生华南梅花鹿(*Cervus pseudaxis*)主要栖息地,在整个保护区地位举足轻重。研究区根据华南梅花鹿的分布程度分为核心区、缓冲区和实验区 3 部分,区域内土壤肥力指标的研究与梅花鹿的主要食物来源以及珍稀植物的生长情况息息相关。

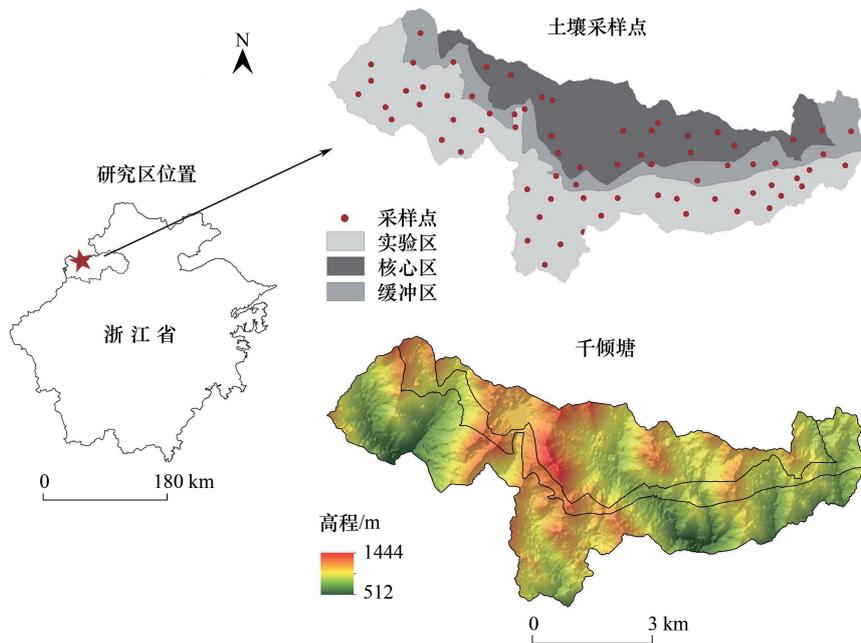


图1 研究区样点分布及海拔信息

Fig.1 Spatial distribution and elevation information map of soil sampling sites

2 研究方法

2.1 样品采集与分析

研究区表层土壤样(0—20 cm)以地形图和植被类型分布特征为辅助信息,结合样点分布的均质性和科学性原则,采用 1 km×1 km 网格法进行室内布点,于 2019 年 11 月—2020 年 4 月共实地采集土壤样品 71 个。将土壤样品及时送回实验室,风干、去杂、研磨过筛备用。采样时用 GPS 记录样点的实地坐标,以及海拔、植被种类等信息。

样品肥力指标测定:土壤有机质(SOM)用 K₂CrO₇ 氧化还原滴定法,全磷(TP)用 NaOH 碱熔-钼锑抗比色法;全氮(TN)采用半微量凯氏法;全钾(TK)用 NaOH 熔融-火焰分光光度法;pH 用 pH 酸度计测定;容重(bulk density)采用环刀法测定。

2.2 地形数据提取

研究区 12.5 m×12.5 m 数字高程模型(DEM)源于 NASA 官方网站(<https://search.asf.alaska.edu/#/>);野外采样点实地坐标、高程数据在采样同时用 GPS 测定。参照国内外相关研究成果,本文利用 ArcGIS 10.2 空间分析工具直接提取基本地形数据,包括坡度(slope)、坡向(aspect)、曲率(curvature)、平面曲率(plancurvature, *Ch*)、剖面曲率(profilecurvature, *Cv*),其余衍生地形属性包括地形起伏度(amplitude of landforms, QFD)、地表粗糙度(roughness)、地形湿度指数(topographic wetness index, TWI),均结合空间分析工

具、水文分析模块以及栅格计算器经复合计算获取。

2.3 地统计分析

半方差函数是地统计学中描述变量的定量工具,在土壤元素空间变异性研究中应用广泛,用于揭示区域化变量的随机性和结构性特征^[12]。计算公式如下:

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

式中, $\gamma(h)$ 是间距为 h 时的半方差; $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i + h)$ 分别是对应变量的在 x_i 和 $x_i + h$ 的实测值; $N(h)$ 是间距为 h 时的观测点对总数。

半方差分析的参数中,块金值(C_0)表示由采样和检测分析误差引起的随机变异,基台值(C_0+C)代表总空间变异程度,块基比($C_0/(C_0+C)$)表示随机变异的占比情况,用于衡量空间相关程度^[13],变程(a)表示空间自相关的作用范围。

2.4 空间自相关计算

土壤属性在地理空间上与相邻区域的观测值存在的相互依赖性,即空间自相关,可用全局 Moran's I 指数反应指标的空间自相关性大小,计算公式如下:

$$I_N = \frac{N \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N W_{ij} (x_i - \bar{x}) (x_j - \bar{x})}{\left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N W_{ij} \right) \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

式中, x_i 和 x_j 分别是变量在位置 i 和 j 处的实测值; \bar{x} 是平均值; W_{ij} 是空间距离权重; N 是样本数。

Moran's I 指数取值范围是 -1 — 1 , 小于 0 表示负相关,等于 0 表示不相关,大于 0 表示正相关。Moran's I 的显著性水平采用下式检验:

$$Z = [I - E(I)] / \sqrt{\text{Var}(I)} \quad (3)$$

式中, Z 为检验 Moran's I 指数的显著性的统计量; I 为 Moran's I 指数; $E(I)$ 为期望值; $\text{Var}(I)$ 为方差^[14]。| Z | ≥ 1.96 、 2.58 分别是空间自相关显著和极显著的分界值。

2.5 数据处理

对肥力指标进行统计分析前,采用三倍标准差法(阈值法)剔除异常值^[15],识别到的异常值使用新样本的最大值和最小值替代,保持原有样本量不变。应用 SPSS 20.0 软件进行土壤肥力指标的描述性统计、K-S 法检验数据正态性,方差分析用于指标间的差异显著性检验、回归分析用以定量表达环境因素对指标空间变异的影响程度;半变异函数分析和相关模型参数的计算在 GS+7.0 中完成;利用 Geoda 进行空间自相关计算;地形因子的计算和插值图的绘制均借助 ArcGIS 10.7 软件完成。

3 结果与讨论

3.1 土壤肥力指标描述性统计分析

千顷塘土壤肥力指标元素含量描述性统计结果如表 1 所示, pH 值为 4.05—6.39, 整体呈酸性;各指标含量均值对比全国第二次土壤普查属性分级标准^[16], 有机质、全氮、全钾均值含量分别为 72.44 g/kg、1.91 g/kg、23.16 g/kg, 总体含量较高, 其中有机质含量处于极丰富水平(一级), 全氮、全钾处于丰富水平(二级), 全磷含量较低, 处于中等水平(四级)。土壤各指标的变异系数介于 10.38—48.54% 之间, 根据王政权等^[17]划分标准, 所有肥力指标均属于中等程度变异, 其中 pH 变异程度较低。正态性检验结果显示 pH、全氮符合正态分布, 有机质、全磷、全钾经对数转换后符合正态分布, 满足地统计学分析的要求。

3.2 土壤肥力指标地统计分析

从图 2 和表 2 可以看出, pH、全磷、全氮、全钾的半方差理论模型均为指数模型, 有机质为球状模型; R^2 分

别为 0.72, 0.84, 0.89, 0.91 和 0.83, 能较准确地反映千顷塘土壤肥力指标的空间变异结构特征; 变程分别为 0.03, 0.99, 0.19, 0.02 km 和 7.17 km, 说明不同元素的空间自相关尺度范围存在差异。块基比是用于研究区域化变量空间变异程度的重要参数^[18], 根据 Gao 等^[19]划分标准, pH、全磷和全钾的块基比均处于 0—25% 之间, 表现为强烈空间自相关, 说明结构性因素起主要影响, 例如地形因子、成土母质等。自然状态下, 土壤中磷、钾两种元素主要来自于土壤母质的风化和枯落物的分解, 其分布与土壤的淋溶特征有关, 而地形因子较大程度上影响着土壤的淋溶作用^[20]; 有机质、全氮的块基比处于 25—75%, 均属于中等空间自相关, 表明耕作活动、种植制度等随机因素存在一定的影响。研究区内植被垂直带分异明显, 显著影响了土壤属性的异质性, 也可能与复杂地势下多样性小生境的发育有关。

表 1 千顷塘土壤肥力指标描述性统计特征/(g/kg)

Table 1 Descriptive statistical characteristics of soil fertility properties in Qianqingtang

指标 Index	最小值 Min	最大值 Max	均值 Mean	标准差 SD	变异系数 CV/%	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	K-S _p	分布类型 Distribution pattern
pH	4.05	6.39	5.12	0.53	10.38	0.68	0.64	0.2	N
有机质 Organic matter	12.9	141.09	72.44	33.12	45.72	-0.63	0.45	0.2	LN
全磷 Total phosphorus	0.21	0.86	0.45	0.18	40.19	0.22	-0.905	0.19	LN
全氮 Total nitrogen	0.42	4.07	1.91	0.84	44.07	0.33	-0.12	0.09	N
全钾 Total potassium	3.36	53.43	23.16	11.24	48.54	-0.72	0.75	0.09	LN

N: 正态分布 Normal distribution; LN: 对数正态 Logarithmic normal distribution; SD: 标准差 Standard deviation; CV: 变异系数 Coefficient variance; K-S: K-S 检验 Kolmogorov-Smirnov

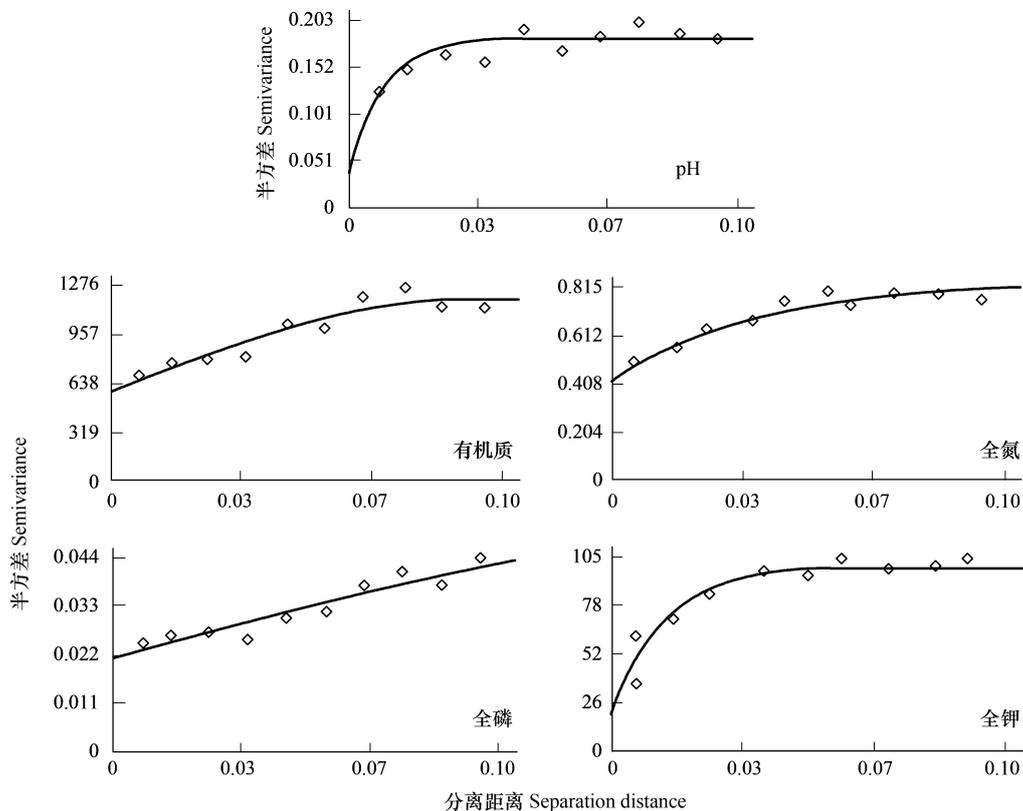


图 2 千顷塘土壤肥力指标含量半变异函数分析

Fig. 2 Semivariograms of soil fertility properties in Qianqingtang

半方差函数的变程反映了有机质的空间变异尺度范围大于 pH、全磷、全氮、全钾,表明环境因素在较大程度上控制着有机质的空间异质性,而其他指标元素的空间分布更加趋向于破碎化;通过块基比揭示 pH、全磷、全钾的空间自相关性高于有机质和全氮,其参数分析结果可以为 Kriging 插值提供依据^[21],进而对各类指标空间格局进行更准确的描述,但是无法对空间相关的显著性进行统计学检验^[22]。全局 Moran's *I* 指数能够较为直观的反映土壤属性在整个研究区域的聚集状态,采用随机条件下近似正态分布假设的标准差对数据进行标准化,置信区间双侧检验阈值为界限,得出有机质和全磷存在显著空间自相关($P<0.05$, $Z>1.96$),全氮具有极显著空间自相关性($P<0.01$, $Z>2.56$),表明这 3 种指标呈聚集分布;而 pH 和全钾的空间自相关性不显著,表明其分布离散。从变程结果可以看出,pH 和全钾变程很小,说明这两种指标在研究区内主控因素的空间连续性尺度较小,分布趋向于随机化,这与 Moran's *I* 显著性检验结果较为一致。

表 2 土壤肥力指标半变异模型参数及全局 Moran's *I* 指数Table 2 Semivariogram model parameters of soil fertility properties and global Moran's *I* index

指标 Index	模型 Model	块金值 Nugget C_0	基台值 Still (C_0+C)	块基比/% Nugget/Still $C_0/(C_0+C)$	变程/km Range	决定系数 R^2	全局 Moran's <i>I</i>	<i>Z</i>
pH	指数模型	0.03	0.18	17.90	0.03	0.72	0.03	0.485
有机质 Organic matter/(g/kg)	球状模型	0.58	1.19	48.65	7.17	0.83	0.21 *	2.382
全磷 Total phosphorus/(g/kg)	指数模型	0.02	0.10	20.40	0.99	0.84	0.19 *	2.194
全氮 Total nitrogen/(g/kg)	指数模型	0.48	0.97	49.95	0.19	0.89	0.29 **	3.123
全钾 Total potassium/(g/kg)	指数模型	19.10	99.90	19.12	0.02	0.91	-0.03	-0.213

* 代表在 0.05 水平上显著 ($|Z|>1.96$); ** 代表在 0.01 水平上显著 ($|Z|>2.58$)

3.3 土壤肥力指标空间分布格局

根据半方差分析结果参数,通过 ArcGIS 10.7 软件进行普通 Kriging 插值绘制千顷塘各肥力指标含量的空间分布图(图 3),综合来看,5 种属性在空间上分布不均,斑块特征显著,表现出较为明显的空间异质性。对照土壤属性分级标准^[16],对各级别指标含量比重进行统计(表 3),千顷塘土壤肥力整体处于丰富水平,pH 处于 4.5—5.5 的范围最大,占比达到 70.42%,弱酸性 pH 5.5—6.5 的范围次之,研究区整体生态保存完好,土壤酸性主要来自于地层中的酸性土壤母岩,以火山岩和岩浆岩为主,具体包括流纹质斑岩、花岗闪长斑岩以及石英闪长岩等;有机质含量很高,含量 >40 g/kg 的点占 87.32%,高值区分布在中偏西北部,整体呈现明显的“条带状”分布;全磷总体处于中等偏下水平,含量由西北向东南方向降低;全氮和全钾总体含量较为丰富,全氮的分布格局和全磷较为相似,全钾的高值区分布在西北部和东南部边缘地区。总体来看,研究区各类土壤肥力指标含量均较高,只有磷素含量偏低,可能与土壤酸性较强有关,相关研究显示,土壤 pH <5.5 的酸性环境下,铁铝等氧化物对磷素具有很强的固存能力^[23]。各类土壤指标分布规律存在一定的相似性,具体体现在多种肥力指标在空间上呈现“两头高,中间低”的分布特点,高低值分布较为集中,斑块较大,分布较为连贯,表明该区域空间变异较小,空间相关性高。可见,千顷塘土壤肥力条件较好,对于森林生态系统的供给水平较高,研究区处于浙西海拔最高区域,日均气温较低,有机质矿化速度较慢,人为扰动小,不利于有机质分解,相比于其他地区更容易积累。由千顷塘的 DEM 图(图 1)可以看出,千顷塘地势呈现由西北向中部地区升高,再向西南方向整体降低的趋势,与土壤肥力指标空间分布特点较为相似,相关研究也证实了地形因子导致的太阳辐射不均匀以及水分差异是造成土壤属性空间异质性的重要原因^[24—25]。

3.4 土壤肥力指标空间异质性影响因子

初步研究显示土壤肥力指标主要受结构性因素影响,其中地形因子可通过影响水热条件以及成土过程的再分配来影响土壤属性^[26]。研究区地形因子和土壤属性的相关分析结果显示(表 4),有机质和全钾与海拔有极显著的相关关系($P<0.01$),其中有机质与海拔呈正相关,表明有机质含量随着海拔的升高而增加;全钾与海拔呈负相关,其含量体现出随海拔升高而下降的趋势,这可能与钾的元素特性有关。海拔较高的低山丘

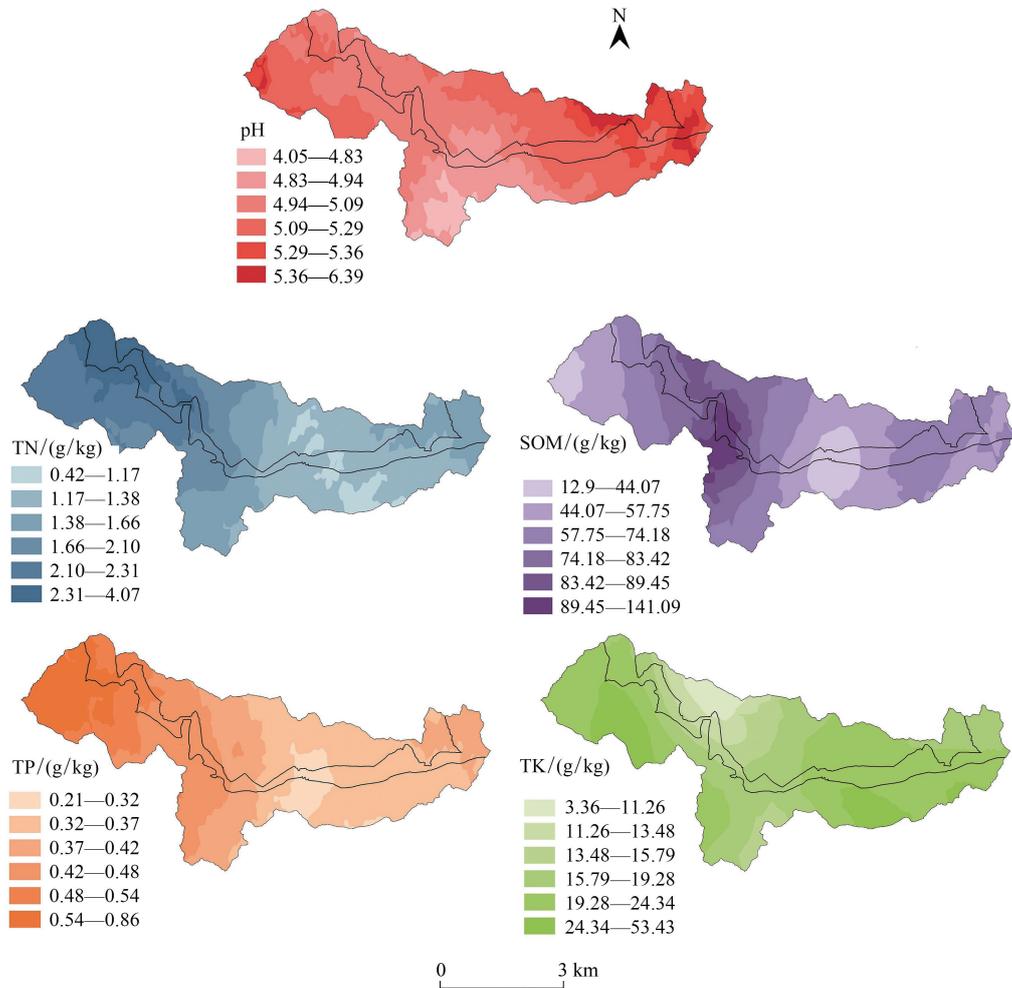


图3 千顷塘土壤肥力指标空间分布图

Fig.3 Spatial distribution map of soil fertility properties in Qianqingtang

SOM:有机质 Soil organic matter; TN:全氮 Total nitrogen; TP:全磷 Total phosphorus; TK:全钾 Total potassium

陵区,受水流的侵蚀作用较强,相比于土壤对氮磷元素较强的吸持力来说,钾元素易于淋失^[27-28],部分元

表3 土壤属性分级比例统计表

Table 3 Statistic table of soil fertility properties grading proportion

土壤肥力指标 Soil fertility properties	pH		SOM		TP		TN		TK	
	含量 Content/ (g/kg)	比例/% Ratio								
极丰富 Extremely abundant	>8.5	0	>40	87.32	>1	0	>2	47.89	>25	38.03
丰富 Abundant	7.5—8.5	0	30—40	5.63	0.8—1	4.23	1.5—2	11.27	20—25	14.08
较丰富 Rather abundant	6.5—7.5	0	20—30	5.63	0.6—0.8	16.90	1—1.5	25.35	15—20	25.35
中等 Medium	5.5—6.5	18.31	10—20	1.41	0.4—0.6	30.99	0.75—1	5.63	10—15	12.68
缺乏 Scarcity	4.5—5.5	70.42	6—10	0	0.2—0.4	47.89	0.5—0.75	7.04	5—10	8.45
极缺乏 Extremely scarcity	<4.5	12.68	<6	0	<0.2	0	<0.5	2.82	<5	1.41

SOM:有机质 Soil organic matter; TN:全氮 Total nitrogen; TP:全磷 Total phosphorus; TK:全钾 Total potassium

素随水流淋溶下渗,出现其含量与海拔呈负相关的特点。本文中坡度与全钾含量呈正相关,但未达到显著水平($P>0.05$),这与俞月凤等^[29],杨家慧等^[30]研究结果存在差异,多数研究结果显示海拔和坡度与钾素具有一

致的相关性,本研究结果可能与千顷塘的地势特点有关。千顷塘高海拔地区分布着大面积的火山天池,天池周边地势相对平坦,而陡坡险坡在低海拔处较为常见,由此出现全钾与坡度呈正相关的结果。

表 4 土壤肥力指标与环境因子的 Pearson 相关系数

Table 4 Correlation coefficient between soil fertility properties and environmental factors

环境因子 Environmental factors	pH	有机质 Organic matter	全磷 Total phosphorus	全氮 Total nitrogen	全钾 Total potassium
海拔 Altitude	-0.102	0.474 **	0.135	0.18	-0.409 **
坡度 Slope	-0.058	-0.052	-0.077	-0.014	0.115
坡向 Aspect	-0.16	0.099	0.184	0.054	-0.016
曲率 Curvature	0.137	-0.006	-0.037	-0.062	0.038
剖面曲率 Profilecurvature	-0.143	0.063	0.088	0.097	-0.098
平面曲率 Plancurvature	0.094	0.065	0.034	-0.005	-0.044
地形起伏度 QFD	0.06	-0.049	0.142	0.092	0.211
地表粗糙度 Roughness	-0.076	-0.065	-0.118	-0.022	0.078
地形湿度指数 TWI	-0.014	-0.204	0.016	-0.004	-0.015
容重 Bulk density	0.188	-0.722 **	-0.134	-0.497 **	0.436 **

* 代表在 0.05 水平上显著相关; ** 代表在 0.01 水平上显著相关; QFD: 地形起伏度 Amplitude of landforms; TWI: 地形湿度指数 Topographic wetness index

不同海拔带间湿度、温度差异会影响土壤元素的迁移、分解与累积^[31],为了进一步研究两种元素随海拔变化的规律,将海拔带划分为 500—800、800—1000、1000—1200、1200—1400 m 这 4 个等级(下文分别以 1、2、3、4 级海拔代替),对有机质和全钾在不同海拔带间的差异性进行分析,结果如图 4 所示。有机质在 4 个海拔带上的含量分别为 49.66 g/kg、65.18 g/kg、79.29 g/kg、108.34 g/kg,1、2 级海拔间,2、3 级海拔和 4 级海拔间均存在显著差异性 ($P < 0.05$),表明有机质随海拔梯度变化较快;全钾在 4 个海拔带上的含量分别为 27.50 g/kg、26.71 g/kg、19.39 g/kg、15.86 g/kg,1、2、3 级海拔和 4 级海拔间存在显著性差异 ($P < 0.05$),相比有机质,全钾变化较慢,变化趋势较为平缓,与影响全钾的主控因素空间连续性尺度较小有关。除海拔之外,其他地形因子与土壤指标之间的相关性未达到显著水平。

容重与有机质、全氮和全钾均存在极显著相关性 ($P < 0.01$),表明土壤容重在很大程度上影响着土壤属性特征。图 5 显示,有机质和全氮含量随着容重增加而减少,说明两者与容重呈反比关系,这与祁凯斌等^[32]研究结果一致。有机质下降趋势较大,含量变化较快;全氮下降趋势较小,总体变化平缓;全钾含量先增加后降低,变化幅度和全氮类似。研究显示,容重与土壤贮水能力、结构和松紧度密切相关,容重越大,表示土壤紧实度越高,透气透水性较差;反之,容重越小,土壤中团粒结构相对较多,表示土壤疏松多孔,质地较好,提高了水分入渗效率,有利于植物细根的穿插和发育,进一步提高了土壤有机质回归能力^[33]。

3.5 不同植被类型土壤肥力指标差异性

土壤肥力很大程度上也受到植物体养分的影响,最直接影响因素是通过凋落物归还土壤的形式实现的。实地调查发现千顷塘自然保护区内有落叶阔叶林、针阔叶混交林、针叶林、竹林这 4 种林地类型,高海拔处

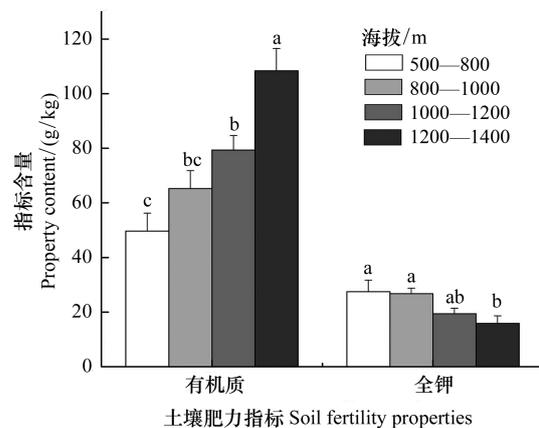


图 4 不同海拔梯度下的土壤肥力指标特征

Fig.4 Characteristics of soil fertility properties under different elevations

同元素不同字母表示不同海拔级别之间元素差异显著 ($P < 0.05$)

分布着较大面积的草甸,以及部分人为开垦的农田。对千顷塘不同植被类型下土壤肥力指标含量进行统计(图6)可知,不同林分间有机质、全氮、全磷的差异性显著,以有机质为例,有机质含量均值依次为针叶林(99.56 g/kg)>针阔叶混交林(77.00 g/kg)>草甸(75.17 g/kg)>落叶阔叶林(61.77 g/kg)>农田(45.97 g/kg)>竹林(40.45 g/kg),其中针叶林中土壤有机质含量显著高于其他林分土壤,原因在于,相比于其他林分类型,针叶林普遍分布在高海拔区域,对于有机质而言,随着海拔高度增加,气温和蒸发量下降,湿度变大,成土过程中的生物化学作用减弱,有机质易于积累,而分布在山顶区域的草甸养分含量偏低的主要原因在于植被分布较为单一,其枯落物归还量较小,这与谢红花等^[34]对云南乌蒙山、薛丽佳等^[35]对武夷山的有机质含量研究结果一致。与中亚热带其他地区的土壤林分肥力指标相比,千顷塘的土壤肥力指标处于较高水平,如黄继育等^[36]报道了浙江省安吉县毛竹林土壤有机质平均含量为

36.33 g/kg;Zeng 等^[37]对中亚热带典型常绿阔叶林的土壤营养状况进行了研究,其中常绿阔叶林中土壤有机碳含量为 41.96 g/kg。可见原生性较好的森林土壤的保肥效果较好,同时自然保护区的生态结构功能也发挥了一定优势。对于全氮、全磷、全钾元素含量的统计发现,全氮在农田土壤中的含量最高,显著高于落叶阔叶林和竹林土壤;全磷在农田中的含量也显著高于其他利用类型的土壤;全钾含量在各类土壤中虽然不存在显著差异性,但在农田土壤中也处于较高水平,由此推断千顷塘保护区内开垦的农田存在一定的施肥耕作措施,有一定的人为扰动迹象。

3.6 土壤肥力指标与环境因子的回归分析

采用回归分析方法定量表达海拔、容重以及植被类型对千顷塘土壤肥力指标的影响程度(表5),由于环境因子对 pH 的影响均不显著,因此回归分析中不纳入该指标。本文对定性分类变量采用哑变量^[38]进行赋值后采用逐步线性回归进行分析,为重点反映林分类型对土壤属性的影响,哑变量赋值时以农田为参考类别,分析结果根据德宾-沃森(D-W)值检验自变量的自相关性。

分析结果中德宾-沃森(D-W)值均接近 2,表示自变量基本不存在的一阶自相关性^[39]。海拔、容重和林分类型对有机质的影响均达到极显著水平,与有机质在空间上变程较大,其空间异质性受环境因素影响强烈的研究结果相一致。三者对有机质的空间变异的独立解释能力分别为 21.3%、51.5%、17.0%,表明容重是该地区影响有机质空间变异的最主要因素,林分类型的逐步回归分析结果中入选因子为针叶林,说明针叶林对有机质的贡献率最大。全磷的变异仅与林分类型的影响达到显著水平($P<0.05$),独立解释能力为 18.6%,这是由于土壤中的磷大部分来源于基岩的风化,而表层土壤磷直接来源于凋落物中的磷,并通过植物的表聚作用在表层土壤积累^[40]。容重对全氮、全钾的独立解释能力分别为 23.6%、17.9%,均略高于其他因素的影响,说明容重对这两种元素的影响较大,但是其解释度并不高,可见研究区土壤肥力指标还受到其他因素的影响。周晓阳等^[41]研究显示土壤养分的空间变异与土壤类型相关,且分类级别越低,反应能力越大;曹详会等^[42]对土壤中微生物的活性、氮磷钾等养分元素的淋溶迁移以及植物本身的生产力进行研究,从而发现气候因素影响土壤中养分分解与输送的途径;吕圣桥等^[43]发现土壤有机碳空间分布特征与土壤黏粒含量呈正相关。人类活动对土壤肥力的影响日渐增加,叶晶等^[44]研究发现人为的土地整理措施会降低土壤有机碳的质量分数,影响土壤生态系统的稳定性。值得注意的是,千顷塘保护区内已经出现越来越多的农田开垦现象,长

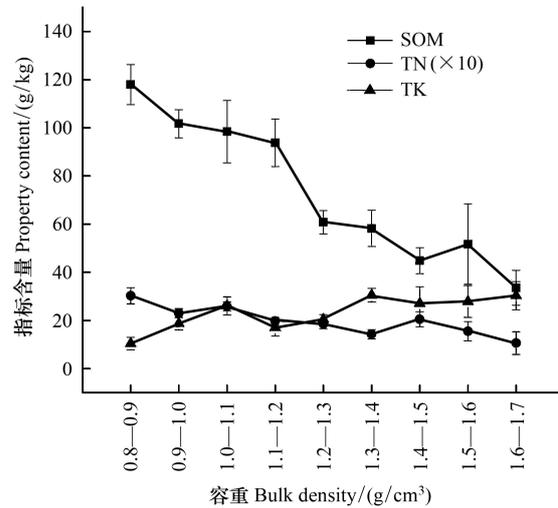


图5 不同土壤容重下的肥力指标特征

Fig. 5 Fertility properties characteristics under different soil bulk density

为统一显示,全氮含量扩大 10 倍

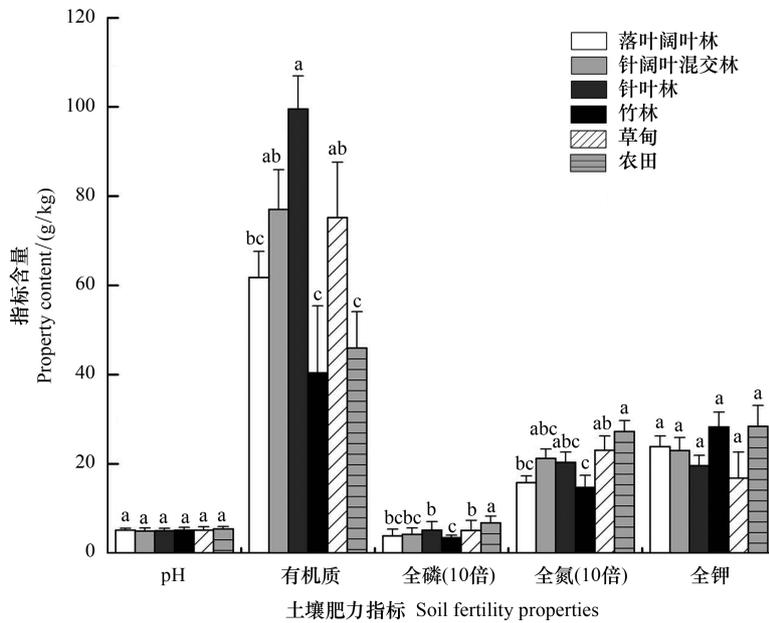


图 6 不同植被类型下土壤肥力指标特征

Fig.6 Characteristics of soil fertility properties under different vegetation types

为统一显示,全氮全磷含量扩大 10 倍

此以往,会破坏自然保护区内原生生态结构,对林区土壤肥力失衡势必造成一定的影响,严重的或将危害到野生华南梅花鹿的生境。此外,大型动物对草地的采食和践踏也直接影响着土壤理化特性^[45],在今后的分析中,可以补充考虑这一因素,建立更加科学、完善的指标体系。

表 5 不同因素对土壤肥力指标的回归分析结果

Table 5 Regression analysis results of soil fertility properties elements by different factors

影响因素 Affecting factors		海拔 Altitude	容重 bulk density	林分类型 Stand type
SOM	校正 R^2	0.213	0.515	0.17
	P	<0.01	<0.01	<0.01
	F	19.964	75.289	15.37
	D-W	1.755	2.136	1.686
TP	校正 R^2	—	—	0.186
	P	—	—	0.033
	F	—	—	4.718
	D-W	—	—	1.682
TN	校正 R^2	—	0.236	0.138
	P	—	<0.01	0.022
	F	—	22.632	5.536
	D-W	—	1.695	1.456
TK	校正 R^2	0.156	0.179	—
	P	<0.01	<0.01	—
	F	13.894	16.224	—
	D-W	1.778	1.951	—

—: 表示土壤肥力指标与影响因素相关性不显著 ($P>0.05$), 没有统计学意义; D-W: 德宾-沃森检验 Durbin-Watson test

4 结论

(1) 研究区内 pH、有机质、全磷、全氮、全钾含量平均值分别为 5.12、72.44、0.45、1.91、23.16 g/kg, 均属于中等程度变异。半方差分析结果显示 pH、全磷和全钾表现为强烈空间自相关, 有机质和全氮表现为中等空间自相关, 说明土壤肥力指标主要受结构性因素影响。有机质、全磷、全氮的空间自相关性达到显著性水平, Moran's *I* 分别为 0.21、0.19、0.29, 在空间上呈聚集分布。

(2) Kriging 插值结果显示多种指标在空间上呈现“两头高, 中间低”的分布特点, 高低值分布较为集中, 斑块较大, 分布较为连贯, 与千顷塘地势特点存在一定的相似性。

(3) 有机质、全磷、全氮、全钾与环境因子海拔、容重和林分类型的相关性达到显著水平, 回归分析显示容重相对于其他因素对有机质、全氮和全钾的解释度最高, 是影响这几种指标空间变异的主控因素, 但研究因子总体解释度较低说明肥力指标的空间变异还受其他因素影响, 在今后研究中要充分考虑。

参考文献 (References):

- [1] Bruner A G, Gullison R E, Rice R E, Da Fonseca G A B. Effectiveness of parks in protecting tropical biodiversity. *Science*, 2001, 291(5501): 125-128.
- [2] 石燕香, 叶钦良, 张蒙. 自然保护区森林生态系统服务功能评估方法与指标研究综述. *林业与环境科学*, 2019, 35(4): 123-127.
- [3] 李成惠, 柳丽霞, 郑英茂, 潘成椿. 九龙山自然保护区森林风景资源特征及效益评价. *中国林业经济*, 2020, (1): 108-110.
- [4] 王兵, 任晓旭, 胡文. 中国森林生态系统服务功能及其价值评估. *林业科学*, 2011, 47(2): 145-153.
- [5] 刘世荣, 王晖, 梁军伟. 中国森林土壤碳储量与土壤碳过程研究进展. *生态学报*, 2011, 31(19): 5437-5448.
- [6] 傅伯杰, 于丹丹, 吕楠. 中国生物多样性与生态系统服务评估指标体系. *生态学报*, 2017, 37(2): 341-348.
- [7] 邹润彦, 周宏冀, 郭熙, 但承龙, 吕添贵, 李洪义. 环鄱阳湖区农田土壤有机碳影响因素空间分布格局分析及制图研究. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(5): 1121-1131.
- [8] 董佳琦, 张勇, 傅伟军, 刘海英, 王增, 吕联江, 谢秉楼, 蒋仲龙. 香榧主产区林地土壤养分空间异质性及其肥力评价. *生态学报*, 2021, 41(6): 2292-2304.
- [9] Wang T, Kang F F, Cheng X Q, Han H R, Bai Y C, Ma J Y. Spatial variability of organic carbon and total nitrogen in the soils of a subalpine forested catchment at Mt. Taiyue, China. *Catena*, 2017, 155: 41-52.
- [10] 程樟峰, 郭瑞, 王义平, 翁东明, 姜朝阳, 刘伟, 翁华军. 浙江清凉峰弹尾虫多样性及森林土壤环境评价的初步研究. *浙江农林大学学报*, 2015, 32(1): 104-109.
- [11] 方峰. 清凉峰自然保护区森林资源调查分析. *安徽农学通报*, 2017, 23(4): 57-57, 70-70.
- [12] Fu W J, Zhao K L, Jiang P K, Ye Z Q, Tunney H, Zhang C S. Field-scale variability of soil test phosphorus and other nutrients in grasslands under long-term agricultural managements. *Soil Research*, 2013, 51(6): 503-512.
- [13] 李龙, 姚云峰, 秦富仓, 郭月峰. 赤峰市黄花甸子流域土壤有机碳含量的空间变异特征研究. *环境科学学报*, 2014, 34(3): 742-748.
- [14] 宋轩, 李立东, 寇长林, 陈杰. 黄水河小流域土壤养分分布及其与地形的关系. *应用生态学报*, 2011, 22(12): 3163-3168.
- [15] 陈涛, 常庆瑞, 刘京, 齐雁冰, 刘梦云. 黄土高原南麓县域耕地土壤速效养分时空变异. *生态学报*, 2013, 33(2): 554-564.
- [16] 张福锁. 测土配方施肥技术要览. 北京: 中国农业大学出版社, 2006.
- [17] 王政权, 王庆成. 森林土壤物理性质的空间异质性研究. *生态学报*, 2000, 20(6): 945-950.
- [18] Fu W J, Jiang P K, Zhou G M, Zhao K L. Using Moran's *I* and GIS to study the spatial pattern of forest litter carbon density in a subtropical region of southeastern China. *Biogeosciences*, 2014, 11(8): 2401-2409.
- [19] Gao Z Q, Fu W J, Zhang M J, Zhao K L, Tunney H, Guan Y D. Potentially hazardous metals contamination in soil-rice system and its spatial variation in Shengzhou City, China. *Journal of Geochemical Exploration*, 2016, 167: 62-69.
- [20] 何晓丽, 吴艳宏, 周俊, 马婷婷. 淋溶过程对亚高山针叶林土壤碳、氮海拔分布特征的影响. *华中农业大学学报*, 2021, 40(1): 187-194.
- [21] 朱青, 郭熙, 韩逸, 江叶枫, 余慧敏, 傅聪颖. 南方丘陵区土壤硒空间分异特征及其影响因素——以丰城市为例. *土壤学报*, 2020, 57(4): 834-843.
- [22] 杨静涵, 刘梦云, 张杰, 张萌萌, 曹润珊, 曹馨悦. 黄土高原沟壑区小流域土壤养分空间变异特征及其影响因素. *自然资源学报*, 2020, 35(3): 743-754.
- [23] Antoniadis V, Koliniati R, Efstratiou E, Golia E, Petropoulos S. Effect of soils with varying degree of weathering and pH values on phosphorus

- sorption. *Catena*, 2016, 139: 214-219.
- [24] Sumfleth K, Duttman R. Prediction of soil property distribution in paddy soil landscapes using terrain data and satellite information as indicators. *Ecological Indicators*, 2008, 8(5): 485-501.
- [25] 张春华, 王宗明, 居为民, 任春颖. 松嫩平原玉米带土壤碳氮比的时空变异特征. *环境科学*, 2011, 32(5): 1407-1414.
- [26] Zhang S W, Huang Y F, Shen C Y, Ye H C, Du Y C. Spatial prediction of soil organic matter using terrain indices and categorical variables as auxiliary information. *Geoderma*, 2012, 171-172: 35-43.
- [27] 刘淑娟, 张伟, 王克林, 陈洪松, 韦国富. 桂西北喀斯特峰丛洼地土壤物理性质的时空分异及成因. *应用生态学报*, 2010, 21(9): 2249-2256.
- [28] 刘丛强. 生物地球化学过程与地表物质循环——西南喀斯特土壤-植被系统生源要素循环. 北京: 科学出版社, 2009.
- [29] 俞月凤, 何铁光, 宋同清, 李丽娟, 韦彩会, 蒙炎成, 唐红琴, 李忠义, 李婷婷, 胡芳. 桂西北喀斯特地区石灰土养分空间变异特征. *生态学报*, 2018, 38(8): 2906-2914.
- [30] 杨家慧, 谭伟, 冯艳. 马尾松人工林土壤养分空间分布特征及其与地形因子的相关性分析. *西南林业大学学报*, 2020, 40(4): 23-29.
- [31] Nie X D, Guo W, Huang B, Zhuo M N, Li D Q, Li Z W, Yuan Z J. Effects of soil properties, topography and landform on the understory biomass of a pine forest in a subtropical hilly region. *Catena*, 2019, 176: 104-111.
- [32] 祁凯斌, 黄俊胜, 杨婷惠, 包维楷, 庞学勇. 亚高山森林自然与人工恢复对土壤涵水能力的影响. *生态学报*, 2018, 38(22): 8118-8128.
- [33] Guo L Y, Wu G L, Li Y, Li C H, Liu W J, Meng J, Liu H T, Yu X F, Jiang G M. Effects of cattle manure compost combined with chemical fertilizer on topsoil organic matter, bulk density and earthworm activity in a wheat - maize rotation system in Eastern China. *Soil and Tillage Research*, 2016, 156: 140-147.
- [34] 谢红花, 李超, 钱晔, 李文峰. 云南乌蒙山区土壤养分空间变异及海拔梯度分布规律. *中国农学通报*, 2019, 35(8): 52-59.
- [35] 薛丽佳, 高人, 杨玉盛, 尹云峰, 马红亮, 刘燕萍. 武夷山土壤有机碳和黑碳的分配规律研究. *林业科学研究*, 2011, 24(3): 399-403.
- [36] 黄继育, 黄勇, 张健. 浙江省安吉县毛竹笋竹两用林土壤养分分析. *世界竹藤通讯*, 2017, 15(2): 10-14.
- [37] Zeng Z Q, Wang S L, Zhang C M, Tang H, Li X Q, Wu Z J, Luo J. Soil microbial activity and nutrients of evergreen broad-leaf forests in mid-subtropical region of China. *Journal of Forestry Research*, 2015, 26(3): 673-678.
- [38] 李丽霞, 郜艳晖, 张瑛. 哑变量在统计分析中的应用. *数理医药学杂志*, 2006, 19(1): 51-53.
- [39] 沈卉卉. 自相关性的 D-W 检验与模型的改进. *统计与决策*, 2007, (23): 11-13.
- [40] 张伟, 刘淑娟, 叶莹莹, 陈洪松, 王克林, 韦国富. 典型喀斯特林地土壤养分空间变异的影响因素. *农业工程学报*, 2013, 29(1): 93-101.
- [41] 周晓阳, 周世伟, 徐明岗, Gilles C. 中国南方水稻土酸化演变特征及影响因素. *中国农业科学*, 2015, 48(23): 4811-4817.
- [42] 曹祥会, 龙怀玉, 周脚根, 邱卫文, 雷秋良, 刘颖, 李军, 穆真. 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. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(4): 937-948.
- [43] 吕圣桥, 高鹏, 耿广坡, 张杰, 夏江宝. 黄河三角洲滩地土壤颗粒分形特征及其与土壤有机质的关系. *水土保持学报*, 2011, 25(6): 134-138.
- [44] 叶晶, 何立平, 李东宾, 余敏芬, 吴家森. 土地整理对土壤微生物群落多样性的影响. *应用生态学报*, 2016, 27(4): 1265-1270.
- [45] 安玉亭, 刘彬, 王立波, 解生彬, 薛丹丹, 吴永波. 不同麋鹿干扰强度对栖息地土壤理化特性的影响. *生态学报*, 2020, 40(11): 3571-3578.