

DOI: 10.5846/stxb201706081043

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): - .

Yu Y F, He T G, Song T Q, Li L J, Wei C H, Meng Y C, Tang H Q, Li Z Y, Li T T, Hu F. Spatial variability of limestone soil nutrients in a Karst area of Northwestern Guangxi. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(8): - .

桂西北喀斯特地区石灰土养分空间变异特征

俞月凤¹, 何铁光^{1,*}, 宋同清², 李丽娟³, 韦彩会¹, 蒙炎成¹, 唐红琴¹, 李忠义¹, 李婷婷¹, 胡芳²

1 广西壮族自治区农业科学院农业资源与环境研究所, 南宁 530007

2 中国科学院亚热带农业生态研究所, 长沙 410125

3 广西桂江林业调查规划设计有限公司, 南宁 530022

摘要:从区域尺度出发, 将整个桂西北喀斯特地区作为研究区域, 以大面积野外调查采样和室内分析数据为基础, 采用经典统计学和地统计学方法, 探索喀斯特区域内石灰土养分的空间异质性和分布格局。结果表明: 桂西北喀斯特地区石灰土 pH 为弱变异, 其他养分变异系数为 30%—75%, 变异程度中等。石灰土各养分的空间变异特征不同, 土壤有机质(SOM)、速效磷(AP)和速效钾(AK)的最佳拟合模型依次为球状模型、高斯模型和线性模型, pH、碱解氮(AN)、全氮(TN)、全磷(TP)和全钾(TK)的最佳拟合模型均为指数模型。SOM、AP、TN 和 TP 表现为中等空间相关性, 空间差异是由随机因素和结构性因素共同作用引起的; pH、AN、AK 和 TK 呈弱空间相关性, 空间变异主要受随机因素的控制; SOM 和 TN 的空间变异尺度较大, pH、AN 和 TK 的空间变异尺度最小。SOM、TN、TP 和 AP 养分含量呈自西向东逐渐减少的趋势, pH、AN、AK 和 TK 在区域尺度上的分布没有呈现一定的规律性。相关分析结果表明, 在区域大尺度下, 地形因子(如海拔、坡度和岩石裸露率等)和植被类型是影响桂西北喀斯特石灰土空间变异特征的重要因素。

关键词:石灰土; 养分; 空间变异; 喀斯特

Spatial variability of limestone soil nutrients in a Karst area of Northwestern Guangxi

YU Yuefeng¹, HE Tieguang^{1,*}, SONG Tongqing², LI Lijuan³, WEI Caihui¹, MENG Yancheng¹, TANG Hongqin¹, LI Zhongyi¹, LI Tingting¹, HU Fang²

1 Agricultural Resources and Environment Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China

2 Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China

3 Guangxi Guijiang forestry survey and planning and designing limited company, Nanning 530022, China

Abstract: Large-scale spatial heterogeneity and distribution patterns of limestone soil nutrients in the karst areas of northwestern Guangxi were evaluated in this study, based on regional field survey and laboratory analysis combining with classical statistics and geostatistics. The results showed that pH value of limestone soil had little variation in the karst areas of Northwestern Guangxi, while the variation coefficients of soil nutrients ranged from 30% to 75%, which can be considered as moderate variation. The characteristics of spatial variability differed among soil nutrients. Spherical model, Gaussian model, and linear model were the best-fit model for soil organic matter (SOM), available phosphorus (AP), and

基金项目:国家自然科学基金项目(31460135); 广西第十八批“十百千人才工程”专项资金; 广西农业科学院科技发展基金项目(桂农科 2017JM08, 2015JZ17); 广西农业科学院基本科研业务专项项目(2015YT31, 桂农科 2016YM56)

收稿日期: 2017-06-08; 网络出版日期: 2017-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: tghe118@163.com.

available potassium (AK), respectively. However, pH, available nitrogen (AN), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), and total potassium (TK) could be best fitted by exponential model. In addition, SOM, AP, TN, and TP showed moderate spatial autocorrelation, and spatial variability was caused by both random and structural factors. On the other hand, pH, AN, AK, and TK showed weak spatial autocorrelation, and spatial variability was mainly controlled by random factors. The variation range for SOM and TN were large while that for pH, AN, and TK were small. The contents of SOM, TN, TP, and AP exhibited a decreasing trend from west to east but the distribution of pH, AN, AK, and TK did not show any regularity on a regional scale. The correlation analysis demonstrated that, on a large scale, topographic factors (i.e., altitude, slope and rock exposure rate) and vegetation type were important factors affecting the spatial variability of limestone soil nutrients in the karst areas of northwestern Guangxi.

Key Words: limestone soil; nutrients; spatial variability; Karst

土壤是在母质、气候、生物、地形及人为因素共同作用下形成的,这些因素在时空上具有不一致性,使土壤物理、化学及生物学性质也都表现出普遍的空间变异性^[1-3]。这种空间变异性在不同区域、不同尺度以及不同时间段上表现出普遍性和复杂性^[4]。土壤养分作为土壤资源中最基本的属性之一,其丰缺程度及存在形态直接决定着土壤的肥力状况,影响着植被的生长与演替^[5]。土壤养分的空间分布格局是土壤空间异质性的具体表现^[6-7]。国内外大量学者对不同尺度和不同区域的土壤养分进行了空间异质性研究^[8-11]。可见土壤养分异质性深刻影响到管理者对土壤利用相应策略和政策的制定,同时也是精准农业和精确施肥以及生态建模的信息基础^[12-13]。

桂西北喀斯特地区是中国贫困与环境退化问题最为突出的地区之一,面临环境退化、人口密集、经济与社会落后等多重难题。在喀斯特环境中,石灰岩风化作用和土壤形成过程是以土壤为媒介的生物地球化学过程^[14]。喀斯特生态系统是以碳酸盐为物质基础,具有土壤浅薄、土被不连续及土壤 pH 值高等特征的脆弱生态系统^[15]。正是这种特殊的形成基质和生态环境条件,使得喀斯特地区土壤具有高度的空间异质性^[16-17]。土壤养分作为生态系统结构与功能的重要因子,对喀斯特生态系统的稳定起着决定作用^[18]。在生态脆弱地区,土壤养分的空间分布特征直接影响该地区土壤生产力的高低和生态恢复的途径和方向,因而探明土壤养分空间变异是合理指导喀斯特地区农业生产和生态重建的关键^[17]。由于空间变异尺度效应的存在,研究尺度的选择成为土壤养分空间变异研究的关键一步^[4]。就喀斯特地区土壤养分空间异质性而言,小尺度的研究较多,主要集中在森林、坡地及不同土地利用方式下的土壤^[19-23]。小尺度区域土壤养分空间变异的研究能够直接指导生产实践,但大尺度区域的研究也必不可少,其能为决策者提供更广阔的视角和更完整的认识^[4]。然而,桂西北喀斯特区域尺度上,石灰土养分空间异质性有待进一步研究,从而为桂西北喀斯特地区石漠化综合治理中植被恢复、生态重建等宏观决策提供理论依据。因此,本研究从大尺度区域出发,将整个桂西北喀斯特地区作为研究区域,以大面积野外调查采样和室内分析测定为基础,采用经典统计学、地统计学等方法,探索喀斯特区域内石灰土养分的含量水平、空间变异特性、空间分布特征,通过克里格插值绘制整个桂西北区域各养分指标的空间分布图。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

桂西北喀斯特区位于广西壮族自治区西北部,属云贵高原山前区,地处 104°28′—109°09′E, 22°51′—25°37′N, 包括河池和百色 2 地级市 23 县(市、区)。区域内以山地、丘陵为主,岩溶地貌广泛发育,裸露石灰岩面积约 3.38 万 km², 占全区域的 48.5% (河池地区石山面积占本地区的 65.7%, 百色地区石山面积占本地的 31.2%)。区域以典型的峰丛洼地岩溶地貌为主,海拔 85.0—2062.0 m。地处亚热带季风气候区,光照充足,年均日照时数达 1968.6 h, 无霜期 315.3 d; 气候温和, 年均气温 20.3℃, ≥10℃ 积温 7130.4℃; 降水集中于 6—

8 月份,年均降雨量 1178.8 mm,年均暴雨日数 4.6 d,最大降雨强度 67.8 mm/h;干湿季明显,年均蒸发量 1298.7 mm,干旱日数 181.2 d,干旱指数 1.10。喀斯特地区土壤类型主要以石灰土为主,有黑色石灰土、红色石灰土、黄色石灰土、棕色石灰土 4 个亚类。

1.2 样品采集与分析

在对未知区域进行初探时,覆盖整个研究区的均匀网格布点法是较为常用的方法^[4]。然而,面积广大的研究区域以及喀斯特复杂多变的地形地貌使得在整个桂西北喀斯特地区完成规则的网格布点非常困难。基于喀斯特峰丛洼地景观异质性强的特点,根据裸露石灰岩分布特征及面积,确定调查网格面积为 100 km²(约为 0.1°经纬网格),网格数量为 338 个,参照《IPCC 优良做法指南》对系统随机抽样的建议,调查网格数量为 24 个,占总网格的 7%,按每个网格约布置 7—8 个样点计,整个桂西北喀斯特区域设置 175 个样点。在实际采样过程中,根据石灰土的分布图及道路系统,综合考虑植被类型及采样点的可达性和实际可操作性,采样点的选择原则是要具有随机性并且兼顾均匀分布的采样方法^[24]。所有采样点分为三种植被类型:草灌、灌丛、次生林。研究区域样点分布见图 1。

土壤样品采集于 2015 年 11 月,用手持 GPS 记录采样中心点坐标,采用“之”字形取样法,在以该点为中心的 20 m×20 m 的范围内采集 0—20 cm 深度的 5 个土壤副样本,四分法混合为 1 个土壤主样本保留 1 kg 左右。同时记录海拔高度、植被种类、植被盖度、坡度、坡向等信息。将采集的土壤样品去除石头、杂草和植物根系等非土壤成分后置于通风处自然风干,磨碎过筛,保存于自封袋中待测。土壤样品室内分析指标为有机质 SOM(重铬酸钾-外加热法)、全氮 TN(半微量开氏法)、全磷 TP(NaOH 熔融-钼锑抗显色-紫外分光光度法)、全钾 TK(NaOH 熔融-火焰光度计法)、碱解氮 AN(碱解-扩散法)、速效磷 AP(0.5 mol/L NaHCO₃浸提法)、AK 速效钾(NH₄OAc 浸提法)和 pH 值(电极电位法)。

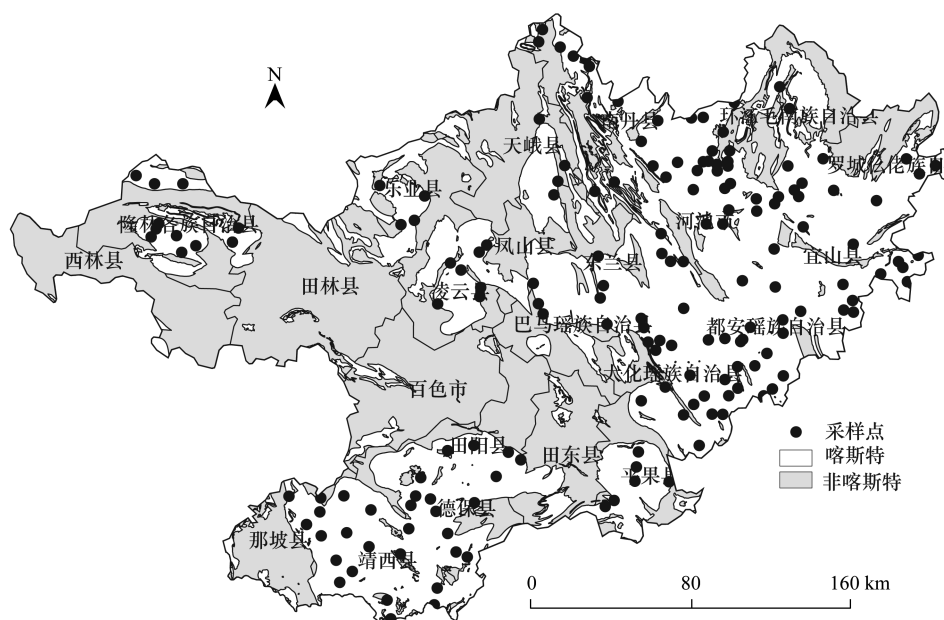


图 1 桂西北喀斯特区域及采样点分布图

Fig.1 Map of the karst area in northwestern Guangxi and distribution of soil sampling sites

1.3 数据处理

文中数据采用域法识别特异值,即样本均值加减 3 倍标准差识别特异值,在此区间外的数据均定为特异值,分别用正常的最大和最小值代替^[25]。土壤养分的描述性统计分析、K-S 检验($\alpha = 0.05$)和普通相关分析在 SPSS 18.0 软件中完成;相关分析中数值变量之间使用皮尔逊相关系数,分类变量之间以及与数值变量之间使用斯皮尔曼秩相关系数。地统计学分析在 GS+软件中完成,用理论模型对各土壤养分指标的半方差函数

进行拟合。Kriging 等值线图在 ArcGIS 10.0 中完成。

2 结果与分析

2.1 石灰土养分的描述性统计分析

石灰土养分的描述性统计特征如表 1 所示。桂西北喀斯特地区石灰土 pH 值呈微酸性至微碱性, 为 5.65—8.12, 平均值为 7.04, 呈中性; 石灰土 SOM 和养分含量均较高, 但其变异相差很大。根据 Nielsen 标准^[26], 除了 pH 呈弱变异外 ($CV < 10\%$), 其他指标均呈中度变异 ($30\% < CV < 80\%$), 其中 AP 变异最强 (71.17%), 其次是 TP (57.05%)。在 5% 的单样本 K-S 检验水平下, 除 pH 和 AP 为非正态分布, 其余的均符合正态分布。对不符合正态分布的变量进行了转换, 转换后 AP 服从自然对数正态分布, pH 服从 Cox-Box 正态分布。

表 1 石灰土养分描述性统计特征

Table 1 Descriptive statistics of limestone soil nutrients

指标 Index	最大值 Max	最小值 Min	均值 Mean	标准差 S.D.	变异系数 CV/%	K-S 检验 K-S test
pH	8.12	5.64	7.04	0.57	8.11	0.01
SOM/ (g/kg)	85.27	6.19	42.70	19.37	45.35	0.45
AN/ (mg/kg)	336.07	57.45	195.56	67.14	34.33	0.67
AK/ (mg/kg)	161.01	23.07	83.57	35.81	42.85	0.57
AP/ (mg/kg)	28.29	0.76	6.10	4.34	71.17	0.00
TN/ (g/kg)	3.46	0.31	1.47	0.72	49.11	0.12
TP/ (g/kg)	3.09	0.21	1.14	0.65	57.05	0.13
TK/ (g/kg)	25.23	6.02	14.98	4.50	30.01	0.16

SOM: 有机质, Soil organic matter; AN: 碱解氮, Available nitrogen; AK: 速效钾, Available potassium; AP: 速效磷, Available phosphorus; TN: 全氮, Total nitrogen; TP: 全磷, Total phosphorus; TK: 全钾, Total potassium

2.2 石灰土养分的空间变异特征

采用 GS+ 软件进行各养分指标半方差函数模型拟合, 获得半方差函数图 (图 2) 和结构参数 (表 2)。如果变量在采样尺度上具有空间依赖性, 半变异函数会随着滞后距的增加而增大, 并且在超过一定距离后逐渐趋近于基台值或围绕基台值上下波动^[27]。由图 2 可以看出, AK 的最佳拟合模型为线性模型, SOM 的最佳拟合模型为球状模型, AP 的最佳拟合模型为高斯模型, 其他指标的最佳拟合模型均为指数模型。决定系数 (R^2) 或残差平方和 (RSS) 用于判断模型拟合的好坏。由表 2 的拟合参数可知, AP 的高斯模型和 SOM 的球状模型拟合效果最好, 其他养分的拟合模型也可以较好地反映桂西北喀斯特石灰土养分的空间结构特征。

各土壤指标的块金值均为正值, 说明本研究存在一定的采样和试验误差。土壤指标均具有一定的基台值, 说明其受地形、坡位、土壤结构和母质等自然因素所控制。块金值与基台值的比值 $[C_0/(C_0+C)]$ 反映了土壤属性的空间依赖性, 一般认为 $< 25\%$ 时, 空间变量为强烈的空间自相关, 在 $25\%—75\%$ 之间时, 为中等空间自相关, $> 75\%$ 为弱空间自相关^[22]。SOM、AP、TN 和 TP 的 $C_0/(C_0+C)$ 值在 $50\%—55\%$ 之间, 表现为中等空间自相关性, 说明空间差异是由随机因素和结构性因素共同作用引起的; pH、AN、AK 和 TK 的 $C_0/(C_0+C)$ 值均 $> 75\%$, 表现为弱空间自相关性, 表明空间变异主要受随机因素的控制, 而结构性因素对变异的贡献很小, 同时也说明对这些指标进行研究应适当减小采样距离。A 为变程, 空间变量只有在变程以内具有空间自相关性。石灰土养分指标变程大小各异, 范围在 59.4—379.5 km 之间, TN 和 SOM 变程最大, 说明较大的范围内存在空间相关性, 其空间连续性较好, 具有较差的空间渐变性规律; AK、AP 和 TP 次之, pH、AN 和 TK 的变程最小, 为 50—70 km 之间, 说明其空间自相关的范围较小。

2.3 桂西北喀斯特地区石灰土养分的空间分布格局

喀斯特地区石灰土养分含量的空间插值图 (图 3) 所示, 在图中可以按照颜色深浅分为 8 个含量等级, 能

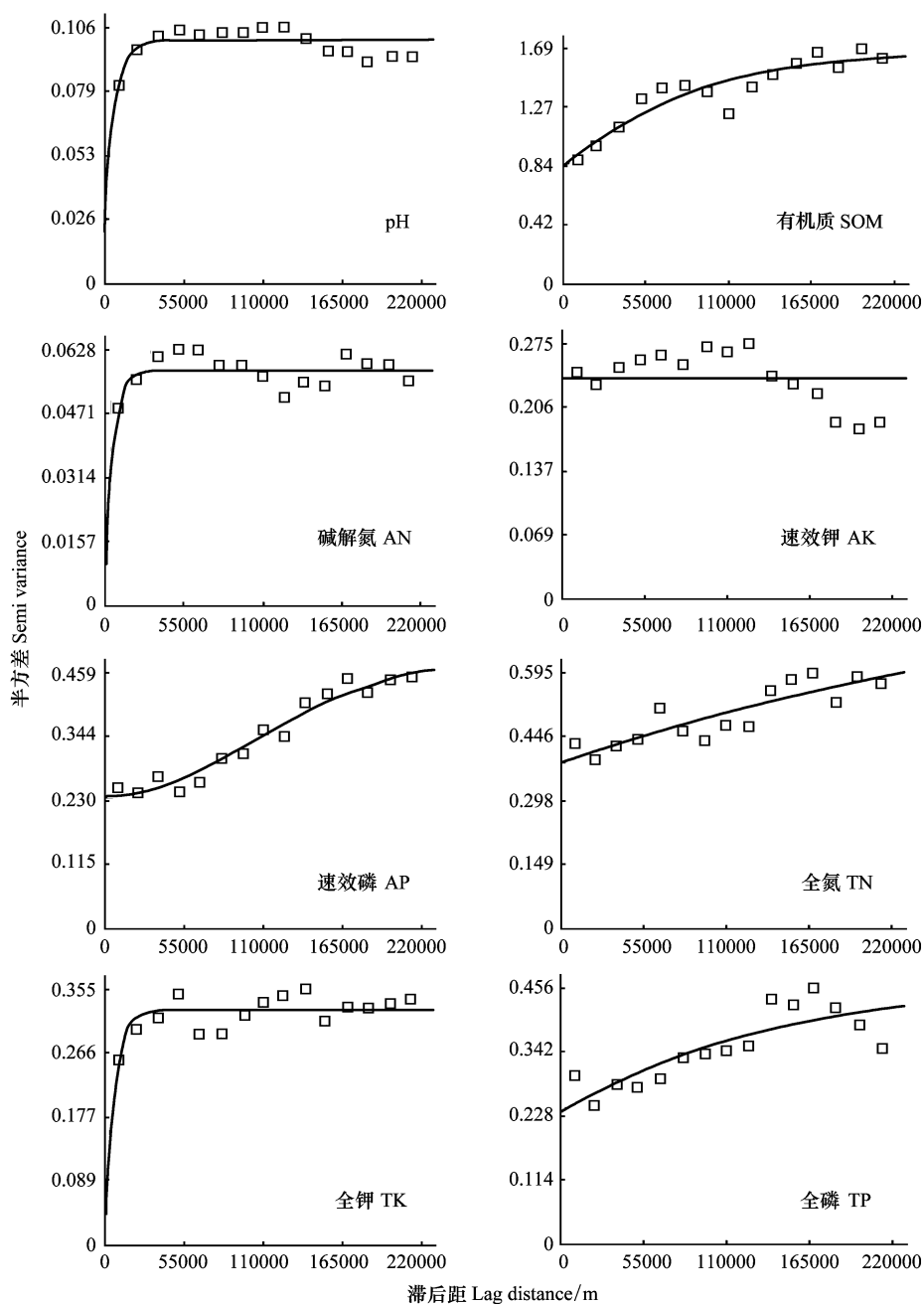


图 2 石灰土养分的半方差函数图

Fig.2 Semi-variance grams of limestone soil nutrients

SOM: 有机质, Soil organic matter; AN: 碱解氮, Available nitrogen; AK: 速效钾, Available potassium; AP: 速效磷, Available phosphorus; TN: 全氮, Total nitrogen; TP: 全磷, Total phosphorus; TK: 全钾, Total potassium

够直观清晰地反映出研究区域石灰土养分的空间分布特征。SOM、AN、AP、TN 和 TP 分布较为相似, 高值区主要分布在西北部, 由西向东逐渐递减; 其中 SOM 和 TN 斑块较大, 变化缓和, 最低值区均出现在东部偏南地区; AN 在东部地区也出现了高值区, 中值区分布的斑块最大; pH 值的分布呈中部高, 沿着四周降低的趋势, 高值区斑块相对较小, 同时可以看出 pH 值主要分布在 6.92—7.43 之间; AK 高值区出现在东北部, 斑块小, 连续性差; TK 的分布无规律性, 空间连续性差, 破碎化程度高, 在小尺度上形成强烈的变异。

2.4 石灰土养分空间异质性的影响因素分析

为了初步探明桂西北喀斯特区石灰土养分空间变异特征的影响因素, 选取了海拔、坡度、岩石出露率和植

被类型等指标,利用相关分析对上述各环境因子与石灰土养分之间的关系进行了分析。表3列出了根据原始数据计算出来的各变量之间的相关系数。区域尺度上,大多数变量之间都存在不同程度的线性相关关系。例如,SOM与石灰土养分TN、AN、TP、AK、pH之间有极显著的正相关关系,与AP、TK的相关关系并不明显。海拔与SOM、AN、TN、TP、裸岩率、坡度和植被类型之间有极显著的正相关关系,与TK正相关显著。裸岩率与AK、TK相关关系不明显,而与其他石灰土养分指标及环境因子之间均存在极显著的正相关关系。坡度与SOM、AN、TN、AK、植被类型之间变现为显著或极显著的正相关关系,与AP为极显著负相关关系。植被类型与SOM、AN、TN、AP之间为显著正相关关系。

表2 石灰土养分的半方差函数模型参数

Table 2 Parameters of the semi-variogram models for limestone soil nutrients

指标 Index	模型 Model	C_0	C_0+C	$C_0/(C_0+C)$	变程 A Variation range A/km	R^2	RSS
pH	指数模型	0.015	0.100	0.851	63.1	0.498	3.10×10^{-4}
SOM	球状模型	0.830	1.685	0.507	338.8	0.859	1.12×10^{-1}
AN	指数模型	0.006	0.058	0.891	59.4	0.337	1.64×10^{-4}
AP	高斯模型	0.236	0.481	0.509	142.1	0.961	3.64×10^{-3}
AK	线性模型	0.237	0.237	1.000	213.0	0.416	1.26×10^{-1}
TN	指数模型	0.385	0.845	0.544	379.5	0.765	1.51×10^{-2}
TP	指数模型	0.237	0.474	0.501	149.2	0.678	1.83×10^{-2}
TK	指数模型	0.022	0.326	0.932	70.0	0.483	4.96×10^{-3}

表3 石灰土养分与土壤环境因子的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between soil nutrients and environmental variables

指标 Index	SOM	AN	AK	AP	TN	TP	TK	PH	H	LYL	PD	ZB
SOM	1											
AN	0.507 **	1										
AK	0.251 **	0.256 **	1									
AP	0.021	-0.049	0.335 **	1								
TN	0.609 **	0.589 **	0.304 **	0.056	1							
TP	0.351 **	0.337 **	0.369 **	0.473 **	0.680 **	1						
TK	0.024	-0.022	0.216 **	0.006	0.171 *	0.206 **	1					
PH	0.238 **	0.276 **	0.347 **	-0.021	0.343 **	0.342 **	0.183 *	1				
H	0.405 **	0.220 **	0.049	0.042	0.292 **	0.226 **	0.159 *	-0.002	1			
LYL	0.415 **	0.254 **	0.059	0.241 **	0.454 **	0.211 **	0.048	0.322 **	0.198 **	1		
PD	0.337 **	0.191 *	0.233 **	-0.443 **	0.296 **	0.019	0.074	0.164	0.238 **	0.617 **	1	
ZB	0.436 **	0.482 **	0.108	0.201 *	0.495 **	0.049	0.059	0.148	0.120	0.304 **	0.394 **	1

* 显著相关 ($P < 0.05$), * * 极显著相关 ($P < 0.01$); H: 海拔 Altitude; LYL: 裸岩率 Rock exposed rate; PD: 坡度 Slope; ZB: 植被类型

Vegetation types

3 讨论

土壤养分空间异质性受到气候(降雨、太阳辐射等)、地形(坡度、坡向、海拔等)、土壤物理性质(机械组成、结构、孔隙等)以及植被类型等因素所影响。喀斯特地区地形地貌复杂,生境的异质性程度高,地形的变化导致了环境因子的空间变异,使得区域内土壤养分具有明显的空间变异性。地形是重要的土壤成土因子之一,它能调控着太阳辐射和降水的空间分配,影响局部生境的小气候与土壤厚度和养分的空间差异^[28-29]。本研究中,石灰土养分与地形因子的相关分析结果表明,石灰土养分的空间分布与地形特征有密切的关系。其中,SOM、AN、TN与海拔、坡度、裸岩率和植被类型极显著的正相关关系。土壤碳素和氮素在生物地球化学过

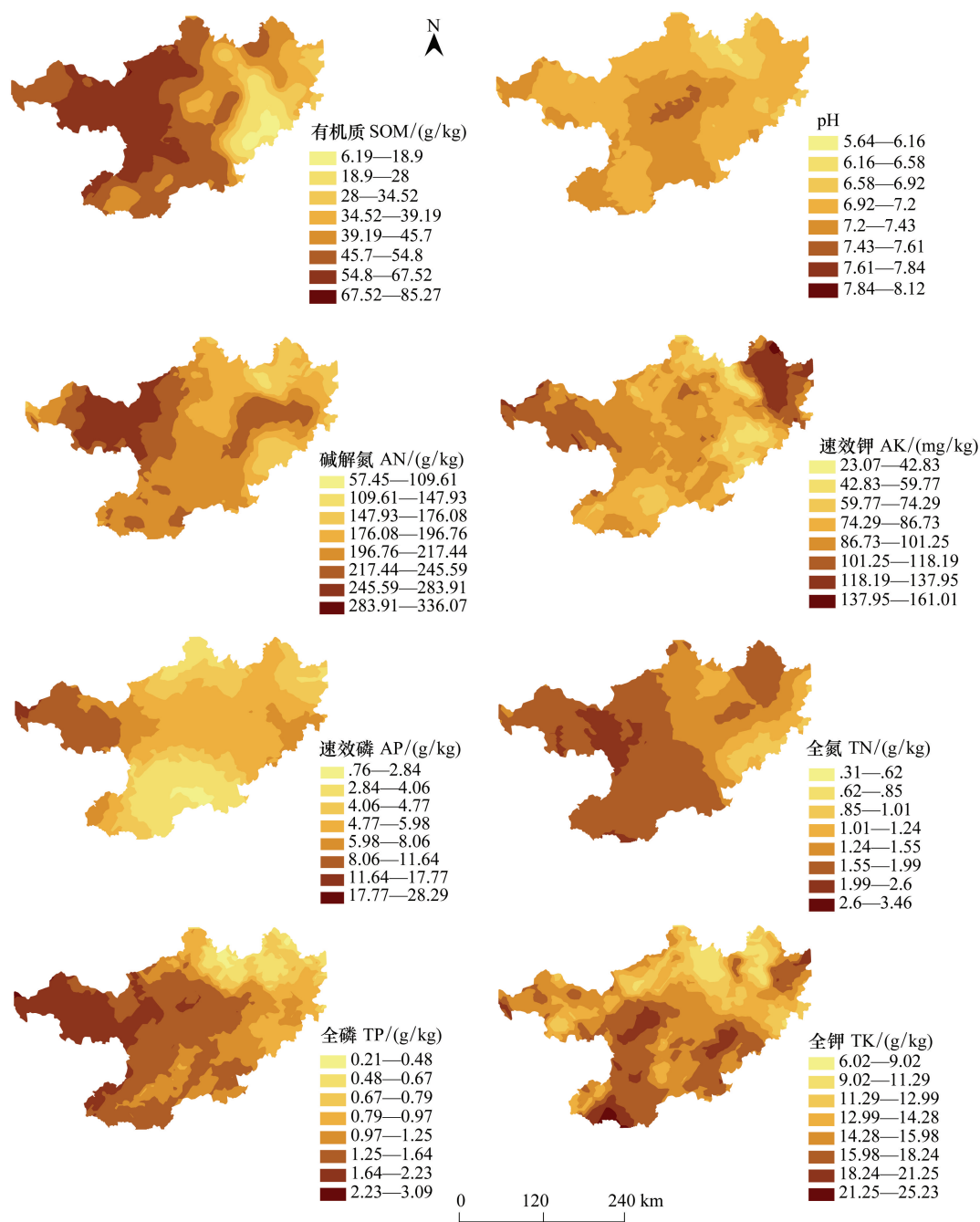


图3 石灰土养分的空间分布

Fig.3 Kriging maps showing spatial distribution of limestone soil nutrients

程中紧密联系在一起。据有关研究发现,海拔高度每上升 100 m 土壤有机碳浓度会增加 $0.75\text{—}2.10\text{ mg/g}$ ^[30]。海拔高度和坡度对土壤养分的影响通常是间接的,是通过对其他自然因素的影响而产生作用。石灰土 AK 和 TK 分别与坡度和海拔有极显著和显著的正相关关系,而与其他环境因子相关不明显。自然情况下,土壤钾素基本全部由母质风化而来,其分布特征可能与土壤的淋溶特征有关^[21]。石灰土 AP 与坡度、裸岩率、植被类型等显著相关,而 TP 与海拔和裸岩率有极显著的正相关关系,有关研究发现,植被对磷素利用能力的差异可能是导致土壤速效磷素资源空间分配异质较大的主要原因^[18]。在石灰土条件下,难溶性无机磷极易与碱性土壤中的钙结合生成 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 沉淀,不易淋失^[31]。石灰土 pH 值和裸岩率有极显著的正相关关系,这与张忠华等^[19]的研究结果相似。因此,裸岩率高的地方,土壤 pH 及钙含量增加,土壤 TP 有较明显的注积效应。在区

域大尺度下,石灰土养分含量随着海拔高度、坡度和裸岩率的增加而增加,这与其他地区明显不同。张伟等^[32]的研究结果表明立地因子较高(裸岩率大、坡度较陡、土被较薄)处的土壤养分含量较高,本文的研究结果与其基本一致。这是由于在强烈的岩溶作用下,微地貌形态的发育对土壤养分积累和循环具有重要的影响,在坡度较陡、坡位较高的地段容易形成石槽、石洞等阴暗生境,有利于有机质的积累,土壤养分含量也相对较高^[32]。植被类型对石灰土养分分布特征有着重要的影响,旺盛的生物累积过程是土壤养分形成和维持的基础,而土壤养分的空间变异又作用于植物的生长和空间分布。

在区域大尺度上,桂西北喀斯特地区石灰土 SOM、TN、TP 和 AP 呈现较为相似的分布规律,养分含量呈自西向东逐渐减少的趋势,空间变异由结构因素和随机因素共同影响。这种分布特点与区域尺度上大地形区的分布相关;桂西北喀斯特地区北与贵州接壤,西与云南毗邻,海拔高度自东向西,自南向北逐渐升高。海拔差异导致水热条件及其组合在空间上的变化,并常伴随着温度、降水、光照、土壤和植被类型等许多因子的改变,海拔梯度的大小充分反映了环境间的差异。因此,海拔、坡度、裸岩率等地形因子可能是桂西北区域尺度上石灰土养分空间分布变异的主要结构因素。当然,在区域范围内影响石灰土空间异质性的环境因素还有很多,比如气温、降雨、土壤物理和生物特征等。由于本研究区域内收集到的气象站数据较少,未能较准确提取各个采样点的气象数据,因此在分析过程没有引入气候因素。今后,需更加完善各方面因素及土壤指标的研究,揭示这些因素对石灰土养分空间变异的影响。

4 结论

桂西北喀斯特区域尺度下,石灰土养分具有不同的变异特征,变异程度依次为 $AP > TP > TN > SOM > AK > AN > TK > pH$,除 pH 为弱变异外,其他均是中等强度变异。SOM 和 TN 具有较为相似的变异特征,变程分别为 338.8 km 和 379.5 km;AK 的变异尺度相对较小,为 213.0 km;AP 和 TP 变异尺度近乎相等,变程为 142.1 和 179.2; pH、AN 和 TK 的变异程度最小,变程范围仅在 59.4—70.0 km 之间。石灰土 SOM、AP、TN 和 TP 表现为中等程度的空间自相关,分布有一定规律性,连续性较好,这是由结构性和随机性因素共同作用的结果; pH、AN、AK 和 TK 表现为弱空间相关性,在区域尺度上的分布没有呈现一定的规律性,连续性差,斑块破碎化程度较高,说明这些空间变异主要来自随机因素,同时也说明对这类养分指标进行研究时应适当减小土壤采样点的间距。桂西北喀斯特地区石灰土养分存在不同程度的空间变异性,且空间自相关范围各不相同,说明石灰土养分的空间异质性的对尺度的依赖程度各不相同。因此采样距离需要根据各养分指标的特征进行调整。相关分析结果表明,地形因子(如海拔、坡度和岩石裸露率等)和植被类型是影响桂西北喀斯特石灰土空间分布特征和变异规律的重要因素。

参考文献(References):

- [1] Jenny H. Factors of Soil Formation——A System of Quantitative Pedology. New York: Dover Publications, 1941.
- [2] Burrough P A. Soil variability: a late 20th century view. *Soil and Fertilizers*, 1993, 56(5): 529-562.
- [3] Heuvelink G B M, Webster R. Modelling soil variation: past, present, and future. *Geoderma*, 2001, 100(3/4): 269-301.
- [4] 刘志鹏. 黄土高原地区土壤养分的空间分布及其影响因素[D]. 咸阳: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2013.
- [5] 黄昌勇. 土壤学. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [6] Huggett R J. Soil chronosequences, soil development, and soil evolution: a critical review. *Catena*, 1998, 32(3/4): 155-172.
- [7] 王国梁, 刘国彬, 许明祥. 黄土丘陵区纸坊沟流域植被恢复的土壤养分效应. *水土保持通报*, 2002, 22(1): 1-5.
- [8] Tesfahunegn G B, Tamene L, Vlek P L G. Catchment-scale spatial variability of soil properties and implications on site-specific soil management in northern Ethiopia. *Soil and Tillage Research*, 2011, 117(6): 124-139.
- [9] Marchetti A, Piccini C, Francaviglia R, Mabit L. Spatial distribution of soil organic matter using geostatistics: a key indicator to assess soil degradation status in central Italy. *Pedosphere*, 2012, 22(2): 230-242.
- [10] 黄绍文, 金继运, 杨俐苹, 程明芳. 县级区域粮田土壤养分空间变异与分区管理技术研究. *土壤学报*, 2003, 40(1): 79-88.

- [11] 杨艳丽, 史学正, 于东升, 王洪杰, 徐茂, 王果. 区域尺度土壤养分空间变异及其影响因素研究. 地理科学, 2008, 28(6): 788-792.
- [12] 陈文辉, 谢高地, 卓庆卿. 农田基础环境信息空间变异性分析. 生态学报, 2004, 24(2): 347-351.
- [13] 赵永存, 史学正, 于东升, 赵彦锋, 孙维侠, 王洪杰. 不同方法预测河北省土壤有机碳密度空间分布特征的研究. 土壤学报, 2005, 42(3): 379-385.
- [14] 潘根兴, 曹建华. 表层带岩溶作用: 以土壤为媒介的地球表层生态系统过程——以桂林峰丛洼地岩溶系统为例. 中国岩溶, 1999, 18(4): 287-296.
- [15] 李阳兵, 王世杰, 李瑞玲. 岩溶生态系统的土壤. 生态环境, 2004, 13(3): 434-438.
- [16] 王世杰, 卢红梅, 周运超, 谢丽萍, 肖德安. 茂兰喀斯特原始森林土壤有机碳的空间变异性与代表性土样采集方法. 土壤学报, 2007, 44(3): 475-483.
- [17] 张伟, 陈洪松, 王克林, 张继光, 侯娅. 典型喀斯特峰丛洼地坡面土壤养分空间变异性研究. 农业工程学报, 2008, 24(1): 68-73.
- [18] 胡忠良, 潘根兴, 李恋卿, 杜有新, 王新洲. 贵州喀斯特山区不同植被下土壤 C、N、P 含量和空间异质性. 生态学报, 2009, 29(8), 4187-4195.
- [19] 张忠华, 胡刚, 祝介东, 倪健. 喀斯特森林土壤养分的空间异质性及其对树种分布的影响. 植物生态学报, 2011, 35(10): 1038-1049.
- [20] 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.
- [21] 刘璐, 曾馥平, 宋同清, 彭晚霞, 王克林, 覃文更, 谭卫宁. 喀斯特木论自然保护区土壤养分的空间变异特征. 应用生态学报, 2010, 21(7): 1667-1673.
- [22] 范夫静, 宋同清, 黄国勤, 曾馥平, 彭晚霞, 杜虎, 鹿士杨, 时伟伟, 谭秋锦. 西南峡谷型喀斯特坡地土壤养分的空间变异特征. 应用生态学报, 2014, 25(1): 92-98.
- [23] 许联芳, 王克林, 朱捍华, 侯娅, 张伟. 桂西北喀斯特移民区土地利用方式对土壤养分的影响. 应用生态学报, 2008, 19(5): 1013-1018.
- [24] 李龙, 姚云峰, 秦富仓, 高玉寒, 张美丽. 黄花甸子流域土壤全氮含量空间分布及其影响因素. 应用生态学报, 2015, 26(5): 1306-1312.
- [25] 宋同清, 彭晚霞, 曾馥平, 欧阳资文, 吴海勇. 喀斯特木论自然保护区旱季土壤水分的空间异质性. 应用生态学报, 2009, 20(1): 98-104.
- [26] Nielsen D R, Bouma J. Soil Spatial Variability. Wageningen: Pudoc, 1985.
- [27] Ettema C H, Wardle D A. Spatial soil ecology. Trends in Ecology & Evolution, 2002, 17(4): 177-183.
- [28] Enoki T, Kawaguchi H, Iwatsubo G. Topographic variations of soil properties and stand structure in a *Pinus thunbergii* plantation. Ecological Research, 1996, 11(3): 299-309.
- [29] Tateno R, Takeda H. Forest structure and tree species distribution in relation to topography-mediated heterogeneity of soil nitrogen and light at the forest floor. Ecological Research, 2003, 18(5): 559-571.
- [30] Leifeld J, Bassin S, Fuhrer J. Carbon stocks in Swiss agricultural soils predicted by land-use, soil characteristics, and altitude. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2005, 105(1/2): 255-266.
- [31] 张素霞. 黄土高原坡地不同土地利用方式下土壤剖面磷素分布及其有效性研究. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008.
- [32] Zhang W, Chen H S, Wang K L, Su Y R, Zhang J G, Yi A J. The heterogeneity and its influencing factors of soil nutrients in Peak-Cluster Depression Areas of Karst Region. Agricultural Sciences in China, 2007, 6(3): 322-329.