

DOI:10.13870/j.cnki.stbcb.2025.01.009

CSTR:32310.14.stbcb.2025.01.009

涂纯,覃星铭,李发东,等.典型岩溶县域土壤有机碳的空间分异及主控因素[J].水土保持学报,2025,39(1):

TU Chun, QIN Xingming, LI Fadong, et al. Study on the spatial variation of soil organic carbon and its control factors in a typical karst county[J].
Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(1):

典型岩溶县域土壤有机碳的空间分异及主控因素

涂纯^{1,2,3}, 覃星铭⁴, 李发东^{5,6}, 罗为群^{1,2,3}

(1.中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西 桂林 541004; 2.广西平果喀斯特生态系统国家野外科学观测研究站, 百色平果喀斯特生态系统广西野外科学观测研究站, 广西 平果 531406; 3.自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室, 联合国教科文组织国际岩溶研究中心, 广西 桂林 541004; 4.南宁师范大学北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室, 南宁 530001; 5.中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 6.中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100190)

摘要: [目的]探究岩溶与非岩溶区土壤有机碳(SOC)的空间分异及其主控因素差异。[方法]以滇东南典型岩溶县域云南省文山市为例,采用网格采样法,调查研究文山市表层(0~20 cm)和深层(0~200 cm)土壤 SOC 质量分数和空间差异,并运用半变异函数和地理探测器分析外部环境要素对文山市 SOC 空间分异的影响。[结果]文山市表层和深层土壤 SOC 质量分数平均值分别为 17.80、5.18 g/kg,总储量为 $3\ 770.89 \times 10^4$ t,其中,表层土 SOC 呈西部高、中北部低,深层土 SOC 呈中西部高、东北部低的分布格局。在非岩溶区,表层和深层土壤 SOC 质量分数分别为 20.88、6.12 g/kg,比岩溶区高 27.94%和 32.75% ($p < 0.01$)。半变异函数模型显示,SOC 块金效应值为 14.62%~59.93%,表明结构性影响因素主导文山市 SOC 的空间分异。地理探测器分析表明,气温和海拔是影响岩溶区表层土 SOC 的主控因素;随着温度降低、海拔升高,文山市 SOC 质量分数呈增加趋势;而岩溶区海拔较低,石漠化严重和植被生长相对较差,SOC 质量分数总体低于非岩溶区。在深层土,降水是影响岩溶区 SOC 的主控因素,其产生的淋溶作用可能使溶解性钙与有机质结合形成腐殖酸钙,促进深层土 SOC 累积;地层年代在非岩溶区起主导作用,二叠系玄武岩母质发育的土壤可能具有较高的土壤黏粒和大团聚体质量分数,有助于维持深层土壤 SOC 的物理保护和稳定。[结论]研究结果将为西南岩溶地区 SOC 的精准评估和土壤碳库调控提供参考。

关键词: 岩溶县域; 土壤有机碳(SOC); 空间分异; 地理探测器; 影响因素

中图分类号:S154.3

文献标识码:A

文章编号:1009-2242-(2025)01-0000-00

Study on the Spatial Variation of Soil Organic Carbon and Its Control Factors in a Typical Karst County

TU Chun^{1,2,3}, QIN Xingming⁴, LI Fadong^{5,6}, LUO Weiqun^{1,2,3}

(1. Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. Pingguo Guangxi, Karst Ecosystem, National Observation and Research Station, Pingguo Baise, Karst Ecosystem, Guangxi Observation and Research Station, Pingguo, Guangxi 531406, China; 3. Key Laboratory of Karst Dynamics Ministry of Natural Resources, Guangxi, International Research Center on Karst under the Auspices of United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Guilin, Guangxi 541004, China; 4. Environmental Evolution and Resources Utilization in Beibu Gulf under Ministry of Education, Nanning Normal University, Nanning 530001, China; 5. Institution of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 6. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences Beijing 100190, China)

Abstract: [Objective] Exploring the spatial variability of soil organic carbon (SOC) and the differences in its main controlling factors between karst and non-karst areas. [Methods] Taking Wenshan County, a typical

收稿日期:2024-07-29

修回日期:2024-09-14

录用日期:2024-10-04

网络首发日期(www.cnki.net):

资助项目:国家重点研发计划课题(2022YFF1300702);广西自然科学基金项目(2022GXNSFAA026471);桂林市重大专项计划项目(20220102-1);中国地质调查局地质调查项目(DD20160324, DD20230453)

第一作者:涂纯(1986—),男,博士,助理研究员,主要从事岩溶生态系统碳循环研究。E-mail:tuc.13b@igsnr.ac.cn

通信作者:罗为群(1980—),男,硕士,研究员,主要从事岩溶生态保护修复与水土资源调控利用研究。E-mail:125639802@qq.com

<http://stbcb.alljournal.com.cn>

karst county in southeast Yunnan Province, as an example, a grid sampling method was employed to conduct the spatial differences in SOC content and storage in top soil (0~20 cm) and deep soil (0~200 cm). Furthermore, we used the semi-variogram function and geographical detector to analyze the impact of external environmental factors on the spatial differentiation of SOC. [Results] The average SOC content in the top soil and deep soil was 17.80 g/kg and 5.18 g/kg, respectively, with a total storage of 3770.89×10^4 t. The distribution pattern revealed higher SOC content in the topsoil of the western region and lower SOC content in the central and northern regions, while the deep soil exhibited higher SOC content in the central and western regions and lower SOC content in the northeastern region in Wenshan County. In non-karst areas, the SOC content in the topsoil and deep soil was 20.88 g/kg and 6.12 g/kg, respectively, which was 27.94% and 32.75% higher ($p < 0.01$) than that in karst areas. The semi-variogram model showed that the nugget effect value of SOC ranged from 14.62% to 59.93%, indicating that structural factors dominate the spatial differentiation of SOC in Wenshan County. According to the analysis of the geographical detector, temperature and altitude were the main controlling factors affecting SOC in the top soil layer in karst areas. As the temperature decreased and the altitude increased, the SOC content in Wenshan County showed an increasing trend. However, the SOC content in karst areas was generally lower than that in non-karst areas due to their lower altitudes, severe rocky desertification, and relatively poor vegetation growth. For the deep soil, precipitation was the main controlling factor affecting SOC in karst areas. The leaching effect caused by precipitation might combine dissolved calcium with organic matter to form humic acid calcium, promoting the accumulation of SOC in deep soil. In non-karst areas, stratigraphic chronology played a leading role. The soil developed from Permian basalt parent material may have higher soil clay and macro-aggregate contents, which helps to maintain the physical protection and stability of SOC in deep soil. [Conclusion] This study will provide a reference for precise assessment of SOC and the regulation of soil carbon pools in southwestern karst region.

Keywords: karst county area; soil organic carbon (SOC); spatial heterogeneity; geographic detector; influence factors

Received: 2024-07-29

Revised: 2024-09-14

Accepted: 2024-10-04

Online(www.cnki.net):

土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)是指示土壤健康与肥力水平的重要指标,也是陆地土壤碳库的重要组成部分,其微小变化影响着大气 CO₂ 浓度和全球气候变化^[1],SOC 的数量、分布、成因和稳定性成为陆地生态系统碳循环研究的热点问题。滇黔桂地区是我国石漠化最为严重、生态环境极为脆弱的地区,按照碳酸盐岩出露面积占国土面积 30% 的标准划分,该地区 80% 以上的县为岩溶县^[2]。强烈的岩溶作用塑造该地区地表-地下二元水文结构和复杂多样的微地貌形态,导致其土壤分布不连续、破碎化严重,相比非岩溶地区,岩溶地区 SOC 分布存在更为强烈的空间异质性^[2-3]。因此,精确评估县域尺度 SOC 质量分数、空间变异特征及主控因素,对于全面掌握岩溶地区土壤碳汇潜力、制定土壤碳库调控措施具有重要的现实意义。

目前,针对省域尺度、流域尺度和样地尺度的岩溶 SOC 分布及主控因素研究已有广泛报道^[4-6],基于土地

利用方式、植被恢复、石漠化生态修复等随机性因素对 SOC 空间分布的影响显著,黄先飞等^[6]研究表明,实施退耕还林、人工造林等石漠化治理措施明显促进 SOC 的积累,灌木林地、乔灌木林地的表层 SOC 显著高于坡耕地;张穗粒等^[7]研究表明,长期植被修复显著改善 SOC 及其组分积累,人造乔木、灌木和藤本显著提升 SOC 储量。退耕还林、封山育林、植树造林等随机性因素能显著提升岩溶区植物地上地下生物量,增加土壤碳的外源输入,促进有机碳累积;但研究多集中在表层土壤,深层土壤 SOC 质量分数、来源及受控因素研究还较少涉及^[8-9]。有研究^[10]表明,深层土壤由于受到人为干扰的影响较少,其质量分数的变化更多受成土母质和所处的土壤环境等结构性因素影响。成土母质是土壤形成的基础,其特性影响土壤的理化性质及其矿物组成,从而导致区域土壤类型和有机碳质量分数存在差异^[8]。在滇黔桂岩溶区,成土母质以灰岩、白云岩等碳酸盐岩为主,同时分布有砂页岩、花岗岩

等非碳酸盐岩母质,形成岩溶与非岩溶区交错分布的格局^[11]。因此,充分考虑成土母质等结构性因素的影响,对准确把握岩溶地区 SOC 空间变异特征、掌握 SOC 调控的关键机制具有重要意义。选择云南文山市典型岩溶县,结合成土母质、土壤类型、气候、海拔、地层年代和土地利用方式等影响因素,对文山市 SOC 空间变异的主控因素进行定量研究,以期为滇黔桂岩溶县域 SOC 库的精确评估和科学调控提供参考。

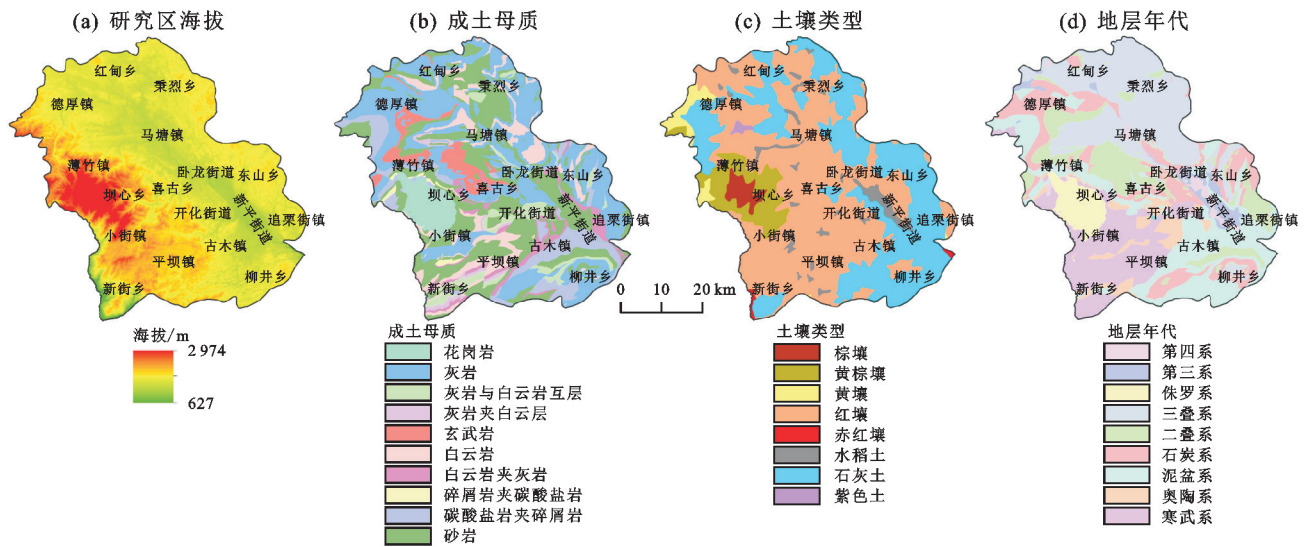
1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区位于云南省东南部文山壮族苗族自治州文山市,地理位置为 103°43'~104°27'E,23°06'~23°44'N,全市总面积 2 967.17 km²,总体地势西南高、东南低,最高海拔 2 974 m,最低海拔 627 m。文山市岩溶地貌广泛分布,属滇东南典型的岩溶峰丛洼地地貌;本研究使用 1:20 万区域地质图提取裸露型碳酸盐数据,确定文山市岩溶区面积为 2 126.31 km²,占国土面积的 71.66%,属于滇东南地区典型岩溶县;非岩溶

区面积 840.86 km²,占国土面积的 28.34%,主要分布在文山市西部。区内年平均气温 18.40 °C,年平均降雨量 1 187.80 mm,处于中亚热带季风气候区。

文山市内成土母质包括寒武纪、泥盆纪、石炭纪、二叠纪和三叠纪的灰岩、白云岩风化物,主要分布于文山市东中部和北部地区;侏罗纪花岗岩和二叠纪玄武岩风化物主要分布在文山市西南部,奥陶纪、泥盆纪、寒武纪形成砂岩风化物分布在南部和中部地区(图 1)。参考已有研究^[12],将岩溶区成土母质划分为灰岩、白云岩、灰岩夹白云岩、白云岩夹灰岩、灰岩与白云岩互层、碎屑岩夹碳酸盐岩、碳酸盐岩夹碎屑岩,非岩溶区成土母质划分为砂岩、花岗岩和玄武岩。根据第二次全国土壤普查数据,文山市分布有棕壤、黄棕壤、黄壤、红壤、赤红壤、水稻土、石灰土、紫色土等 8 个土类,其中,红壤和石灰土面积分别为 1 540.60、985.88 km²,共占文山市国土面积的 85.15%。土地利用类型主要是耕地和林地,面积占文山市国土面积的 80%以上。



注:根据自然资源部标准地图服务网站绘制底图,审图号:云 S(2024)128 号。

图 1 研究区概况

Fig.1 Distribution map of in the study area

1.2 样品采集与分析

根据《多目标区域地球化学调查规范(1:250 000)》(DZ/T 0258—2014)^[13],2016—2017 年,采用双层网格法开展土壤调查;其中,表层(0~20 cm)土壤样品按照 1 km×1 km 网格采集,采样密度为 1 个点/km²;深层(0~200 cm)土壤样品按照 2 km×2 km 网格采集,采样密度为 1 个点/4 km²;四分法留取 1.00~1.50 kg 土壤样品,并记录采样点的经纬度坐标、海拔等信息。调查共采集表层土壤样品 2 921 个,深层土壤样品 746 个。样品采集后进行自然风干,挑出肉眼可见的石子、植物残体等杂质后,碾碎过

20 目孔筛,装瓶在阴凉环境下保存;之后将采集的表层和深层样品分别按照 4、16 km²大格样品等量组合成 1 个分析样,共形成表层土分析样 796 个,深层土分析样 216 个。

分析样品测试由安徽省地质试验研究所完成,采用重铬酸钾氧化还原容量法测定 SOC 质量分数,测试前将分析样研磨过 200 目孔筛,每个样品称取 0.20~0.30 g 放入 25 mL 试管,加入 5 mL 0.8 mol/L 的重铬酸钾标准溶液后,再加入 5 mL 1.84 g/mL 浓硫酸,摇匀后放入 190 °C 油浴锅内煮沸 5 min,冷却后倒入锥形瓶,并用水洗净试管,加入 3~5 滴邻菲罗啉

指示溶液,用 0.2 mol/L 硫酸亚铁铵标准溶液滴定,并计算 SOC 质量分数。

1.3 其他数据来源及处理

土壤类型数据来源于国家地球系统科学数据中心(<https://www.geodata.cn>),原数据来自全国第二次土壤普查数据;成土母质和地层年代数据来源于 1:20 万区域地质图;土地利用、年均气温和降水数据来源于中国科学院资源环境科学数据平台;坡度和坡向数据从 30 m 空间分辨率 DEM 数据中提取,该 DEM 数据来源于地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/>)。

SOC 密度计算公式为^[13]:

$$\text{SOCD} = D \times \rho \times C / 10 \quad (1)$$

式中:SOCD 为 SOC 密度,kg/m²;D 为土层深度,cm; ρ 为土壤体积质量,g/cm³;C 为 SOC 质量分数,%。因调查缺少土壤体积质量数据,本研究使用国家地球系统科学数据中心提供的云南省 250 m 分辨率土壤体积质量数据代替。

SOC 储量计算公式为:

$$\text{SOCR} = \sum_{i=1}^n \text{SOCD}_i \times A_i \times 1000 \quad (2)$$

式中:SOCR 为 SOC 储量,t;SOCD_i 为采样点 *i* 有机碳密度,kg/m²;A_i 为采样点所在网格面积,m²。

采用 Excel 2010 和 SPSS 13.0 软件对数据进行处理,由于表层和深层土 SOC 数据不符合正态分布,因此对其分别进行对数和平方根转换。SOC 质量分数数据在岩溶区与非岩溶区比较时,使用 SPSS 13.0 软件中的 *T* 检验法检验其差异是否显著($p < 0.05$);为探讨研究区 SOC 空间变异的结构性和随机性,利用 GS+9.0 软件进行半变异函数分析,通过比较拟合系数 *R*² 和残差 *RSS* 得出 SOC 空间拟合的最优理论模型。同时,为进一步分析结构性因素和随机因素对 SOC 的影响,采用地理探测器中的因子探测和交互作用探测,分析土地利用、土壤类型、海拔、坡度、坡向、气温、降水、成土母质、地层年代等因素对 SOC 空

间分异的影响;在因子探测时,采用自然断点法对单个影响因子进行分级,并通过 *q* 大小来度量单个影响因子对研究区 SOC 空间分异的驱动力;交互作用探测用于识别 2 个影响因子的交互作用对 SOC 的解释力强弱,可分为非线性减弱、单因子非线性较弱、双因子增强、独立和非线性增强 5 类^[14]。使用 SPSS 13.0 软件中最小显著差异法(least significant difference method, LSD)分析各影响因子分级间的差异性($p < 0.05$),Pearson 分析 SOC 与海拔、气温和降水等影响因子的相关性;ArcGIS 10.6 软件中的克里金插值法绘制 SOC 质量分数、密度和储量的空间分布图,Origin 2022 软件绘制影响因子交互作用图。

2 结果与分析

2.1 SOC 描述性统计及半变异函数分析

数据统计表明,文山市表层土 SOC 质量分数为 5.71~83.37 g/kg,平均值 17.80 g/kg;深层土 SOC 质量分数为 0.27~22.13 g/kg,平均值 5.18 g/kg(表 1)。与我国西南岩溶区 SOC 质量分数基本一致(10.65~61.74 g/kg)^[4,6,15]。无论表层土还是深层土,岩溶区 SOC 质量分数均低于非岩溶区,其中,岩溶区表层土平均 SOC 质量分数低于非岩溶区 27.95%,深层土低 13.99%,表明随着土层深度增加,岩溶与非岩溶区 SOC 差异减小。数据变异系数为 48.93%~61.46%,属于中等变异水平,岩溶区变异系数总体低于非岩溶区,随着土层深度增加,变异系数逐渐增大,表明文山市深层土 SOC 空间分布存在较强的空间异质性。

半变异函数分析(表 2)显示,文山市 SOC 空间分布拟合最优模型为球状模型,总体 *R*² > 0.970,拟合效果较好;块金效应值为 14.62%~59.93%,其中,表层土块金效应值低于深层土,表明表层土 SOC 呈较强的空间相关性,其受结构性因素引起的空间变异程度大于随机性因素^[4];模型中变程为 18.87~50.49 km,表明 SOC 的空间自相关范围较小,与文山复杂的岩溶地貌特征相符合。

表 1 文山市 SOC 质量分数描述性统计特征

Table 1 Descriptive statistical characteristics of SOC content in Wenshan County

土层深度/cm	研究区	样本数	最小值/(g·kg ⁻¹)	最大值/(g·kg ⁻¹)	平均值/(g·kg ⁻¹)	中位值/(g·kg ⁻¹)	标准差	变异系数/%
0~20	岩溶区	537	7.05	62.53	16.32	15.11	5.88	36.00
	非岩溶区	259	5.71	83.37	20.88	17.75	12.17	58.28
	合计	796	5.71	83.37	17.80	15.85	8.71	48.93
0~200	岩溶区	135	0.27	11.73	4.61	4.35	2.16	46.79
	非岩溶区	81	1.22	22.13	6.12	4.95	4.24	69.25
	合计	216	0.27	22.13	5.18	4.37	3.18	61.46

2.2 SOC 库的分布特征

统计显示,文山市 0~200 cm 土层 SOC 储量为

3 770.89 × 10⁴ t,其中,表层土(0~20 cm)SOC 储量为 1 257.41 × 10⁴ t,占总储量的 33.35%(表 3),表明

表层土壤在维持有机碳储量稳定具有重要作用。岩溶区 SOC 储量高于非岩溶区,在 0~200 cm 土层增加 635.61×10^4 t,但主要是岩溶区面积较大,其占文山市国土面积的 71.66%,因此,计算出的 SOC 储量较高。

基于半变异函数模型拟合结果,使用克里金插值法得到文山市 SOC 质量分数、密度和储量的空间分布(图2)显示,表层土 SOC 库较高的区域主要分布在西部地区,SOC 储量为 $3.92 \times 10^4 \sim 5.53 \times 10^4$ t,其中,薄竹镇和小街镇 SOC 储量分别占表层土总储量的

13.70%和 10.49%;此地区植被覆盖率高,来源于地表凋落物和根系输入的生物量较多,受人为活动干扰较少,有助于 SOC 储量累积。低值区由东南向西北延伸,SOC 储量为 $0.58 \times 10^4 \sim 1.41 \times 10^4$ t,该区海拔较低,工农业活动频繁,对土壤扰动较大,不利于有机碳储存。相比表层土,深层土 SOC 高值区由文山市西南向中部扩展,其 SOC 储量为 $29.64 \times 10^4 \sim 64.21 \times 10^4$ t;其中,薄竹镇、马塘镇和小街镇深层土 SOC 储量分别占文山市总 SOC 储量的 11.84%、10.10%、10.02%;低值区主要分布在东北部,为 $6.22 \times 10^4 \sim 14.40 \times 10^4$ t。

表 2 文山市 SOC 半变异函数模型及其参数

Table 2 SOC semi-variance model and its parameters in Wenshan County

土层深度/cm	理论模型	块金值 (C_0)	基台值 (C_0+C)	块金效应 [$C_0/(C_0+C)$, %]	变程/km	拟合系数 (R^2)	残差 (RSS)
0~20	球状模型	0.036	0.169	21.23	32.10	0.973	7.05 E-04
	线性模型	0.062	0.191	32.39	38.43	0.850	3.89 E-03
	指数模型	0.028	0.191	14.62	50.49	0.943	7.05 E-03
	高斯模型	0.054	0.171	31.54	27.92	0.968	8.40 E-04
0~200	球状模型	0.220	0.454	48.46	24.85	0.974	1.19 E-03
	线性模型	0.295	0.493	59.93	37.50	0.974	0.011
	指数模型	0.079	0.453	17.44	18.87	0.961	1.89 E-03
	高斯模型	0.228	0.456	49.89	19.04	0.963	2.56 E-03

表 3 文山市土壤 SOC 库统计

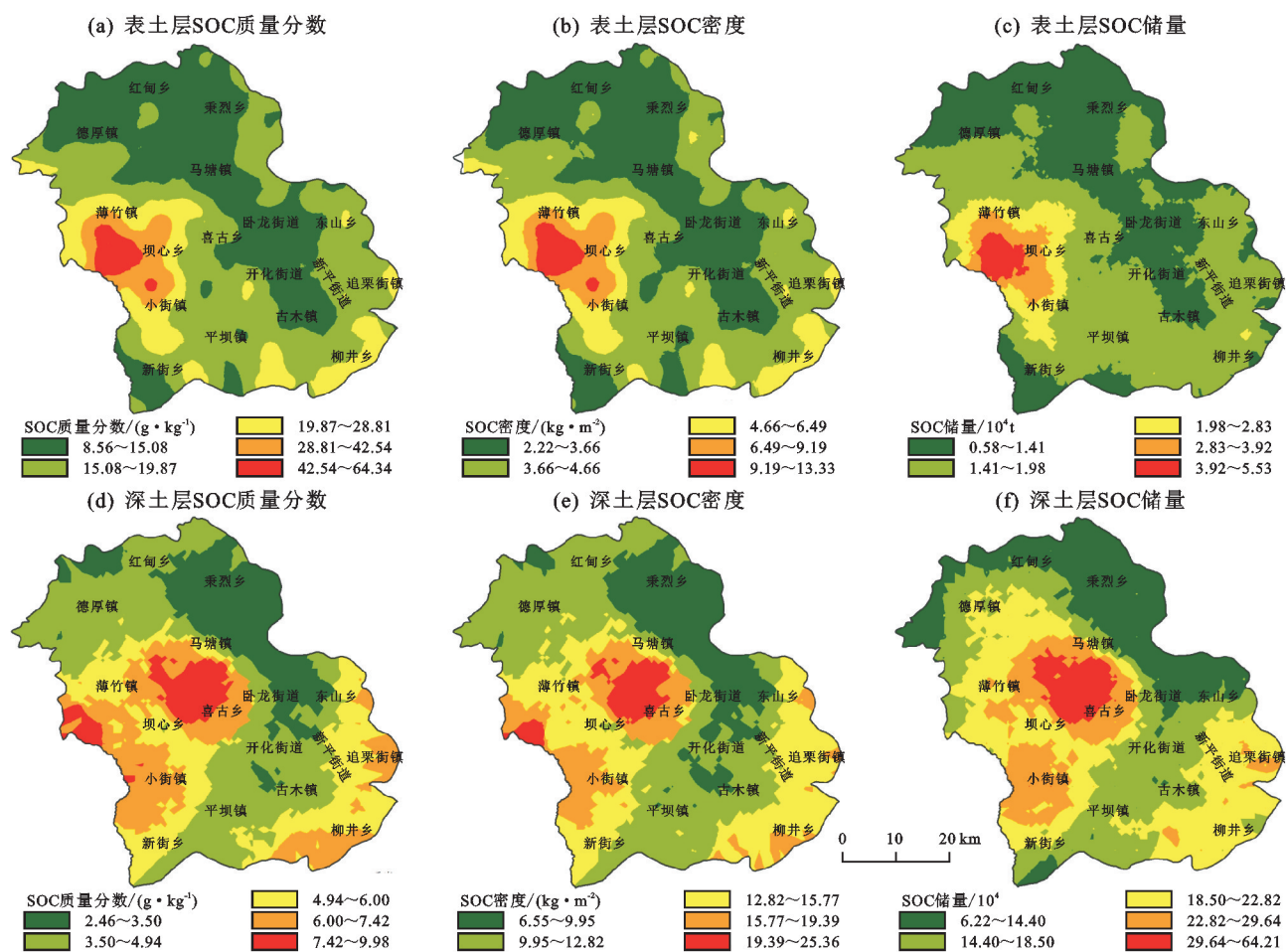
Table 3 Statistics of the SOC pool in Wenshan County

乡镇	面积/ km ²	表层土 SOC 质量分数/(g·kg ⁻¹)			表层土 SOC 储量/(10 ⁴ t)			深层土 SOC 质量分数/(g·kg ⁻¹)			深层土 SOC 储量/(10 ⁴ t)		
		非岩溶区	岩溶区	合计	非岩溶区	岩溶区	合计	非岩溶区	岩溶区	合计	非岩溶区	岩溶区	合计
坝心乡	126.93	25.08	25.05	25.07	63.41	19.08	82.49	5.78	5.86	5.81	123.11	45.16	168.27
薄竹镇	294.95	25.45	21.38	23.31	96.32	75.92	172.24	7.15	5.44	6.25	252.66	193.95	446.61
秉烈乡	285.24	11.89	15.29	14.02	31.75	66.65	98.40	2.49	3.47	3.10	69.97	159.71	229.67
德厚镇	321.33	15.70	14.28	14.68	35.51	77.64	113.15	3.66	4.37	4.17	90.81	255.28	346.09
东山乡	157.89	15.43	16.72	16.56	7.49	55.13	62.62	2.62	4.57	4.33	13.18	153.64	166.82
古木镇	172.17	16.74	15.94	16.20	24.20	41.06	65.26	4.13	4.56	4.42	63.58	125.19	188.77
红甸乡	89.57	12.74	13.38	13.17	10.02	19.41	29.43	3.97	4.14	4.08	32.66	63.62	96.28
开化街道	64.31	16.20	14.22	14.93	10.99	12.24	23.23	4.26	4.26	4.26	29.42	38.07	67.48
柳井乡	164.11	19.19	19.47	19.41	16.59	58.97	75.56	5.44	6.32	6.13	48.74	204.18	252.92
马塘镇	285.69	14.64	13.41	13.96	40.54	56.34	96.88	6.95	4.19	5.41	197.01	183.69	380.70
平坝镇	261.78	17.48	17.06	17.19	38.33	66.79	105.12	4.54	4.88	4.77	104.15	205.59	309.74
卧龙街道	118.47	12.88	13.54	13.31	13.89	25.06	38.95	3.06	3.68	3.46	33.75	71.40	105.15
喜古乡	87.32	15.96	15.35	15.65	17.50	15.43	32.93	10.06	7.35	8.69	121.83	77.79	199.62
小街镇	214.73	26.47	18.72	22.84	97.19	34.71	131.91	7.06	6.82	6.95	241.34	136.37	377.71
新街乡	141.72	17.90	16.73	17.09	18.92	37.45	56.37	4.98	4.73	4.81	57.73	115.39	173.12
新平街道	88.84	16.47	15.70	16.21	21.20	13.90	35.10	5.42	4.87	5.24	72.65	45.19	117.84
追栗街镇	92.12	20.08	16.76	17.16	5.17	32.60	37.77	5.84	6.06	6.03	15.07	129.04	144.10
合计	2 967.17	18.59	16.59	17.32	549.02	708.39	1 257.41	5.50	4.95	5.15	2 203.25	1 567.64	3 770.89

2.3 SOC 空间分异的影响因素分析

使用地理探测器中的单因子和交互因子探测发现,气温、土壤类型、海拔、降水、地层年代和成土母质是影响文山市 SOC 分布的主要影响因子(图 3)。在表层土,气温、土壤类型、海拔和地层年代作为单因子对 SOC 空间分异的解释力为 0.40~0.66;其次为降水和成土母质,对其解释力为 0.13~0.29。交互作用

探测结果显示,气温、土壤类型、海拔与其他影响因子交互作用对 SOC 的解释力维持在 0.41 以上,表明气温等结构性因素对表层土 SOC 的空间分异有重要影响。相比表层土,各因子对深层土壤 SOC 的解释力均减弱,其中,地层年代和降水作为单因子或与其他因子交互作用对 SOC 的解释力为 0.17~0.52,是深层土 SOC 空间分异的主控因子。



注:根据自然资源部标准地图服务网站绘制底图,审图号:云S(2024)128号。

图2 文山市土壤SOC含量、密度及储量空间分布

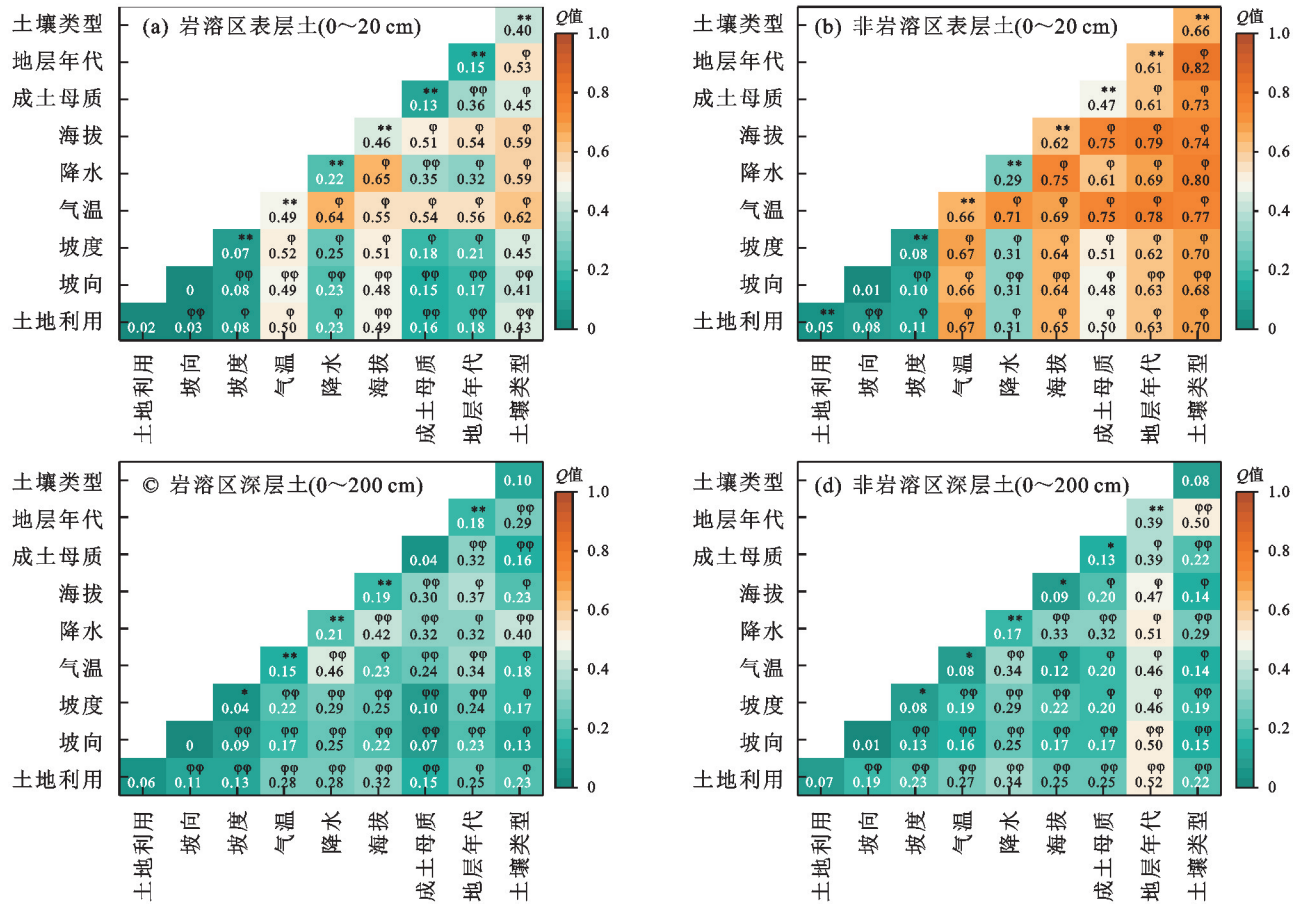
Fig.2 Spatial distribution of SOC content, density and storage in soil in Wenshan County

对比非岩溶区,岩溶区各影响因子对SOC空间分异的解释力明显减弱;影响SOC的主控因素在岩溶与非岩溶区也各不相同。在表土层,影响岩溶区SOC空间分异的主控因素是气温和海拔,其作为单因子或与其他因子交互作用对SOC的解释力为0.46~0.65;而在非岩溶区的主要因素是气温、土壤类型、海拔,其对SOC的解释力为0.62~0.82。对于深层土,降水是影响岩溶区SOC的主控因素,其作为单因子或与其他因子交互作用对SOC的解释力为0.21~0.46;而地层年代是影响非岩溶区SOC的主控因素,其SOC的解释力为0.39~0.52。

2.3.1 土壤类型 文山市棕壤和黄棕壤表层土平均SOC质量分数分别为48.94、32.12 g/kg,显著高于其他土壤类型区(图4);棕壤和黄棕壤主要分布在文山市西部的高海拔山区,森林覆盖率高,来源于植物和根系凋落物的腐殖质较多,同时高海拔区气候冷凉,有机质分解慢,有助于SOC累积;随着土层深度增加,不同土壤类型区SOC质量分数下降至4.53~6.22 g/kg,但棕壤、黄棕壤区SOC质量分数仍然高于其他土壤类型区,表明深层土延续表层土较强的有机碳固持能力。石灰土虽然在文山市分布广泛,但表层和深层土壤

SOC分别为16.34、4.75 g/kg,比最高的棕壤分布区SOC低64.60%和23.57%,同时也低于广西(17.98~42.52 g/kg)^[4]、贵州(21.49~25.07 g/kg)等^[6]其他岩溶区,表明文山市石灰土固碳能力较弱。

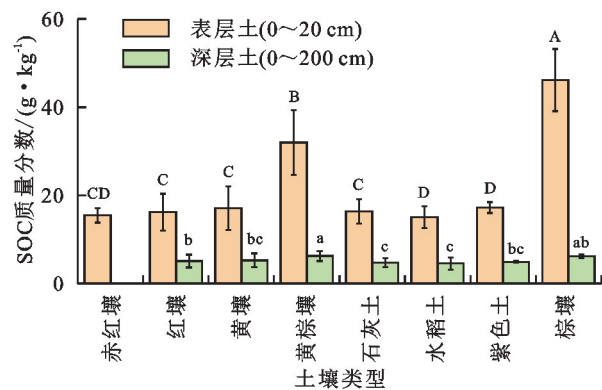
2.3.2 气温、降水和海拔 气温和降水对表层土和深层土SOC有显著影响(图5)。气温对SOC的影响呈负效应,随着温度升高,文山市SOC质量分数显著降低,其中,在18~22℃区域,表层土SOC平均值为14.11 g/kg,比10~14℃区低1.72倍。随着土层深度增加,温度对深层土壤SOC的影响减弱,高温区SOC仅比低温区低27.81%。相反,降水增加可提高SOC质量分数,其中,在1060~1320 mm区域,表层土壤SOC平均值为21.95 g/kg,比720~880 mm高66.09%;深层土壤1120~1290 mm降水区域SOC为5.54 g/kg,比730~860 mm降水区域高37.66%,表明降水的增加可能造成土壤孔隙被雨水堵塞形成厌氧或缺氧环境,致使微生物活性因此而利于SOC的积累^[16]。与降水相似,海拔升高SOC质量分数也随之增加,表层土和深层土在高海拔区SOC分别为35.66、6.47 g/kg,比低海拔(710~1390 m)高143.71%和38.45%。



注:φ表示水平轴与垂直轴对应的两因子交互作用对 SOC 呈双因子增强影响;φφ表示非线性增强影响;* 和 ** 分别表示单因子对 SOC 的解释度在 $p < 0.05$ 和 $p < 0.01$ 水平显著。

图 3 SOC 影响因子探测结果

Fig.3 Detection results of the influencing factors of SOC



注:图柱上方不同大写和小写字母分别表示表层和深层土壤 SOC 含量在不同土壤类型间差异显著 ($p < 0.05$)。

图 4 不同土壤类型 SOC 质量分数统计

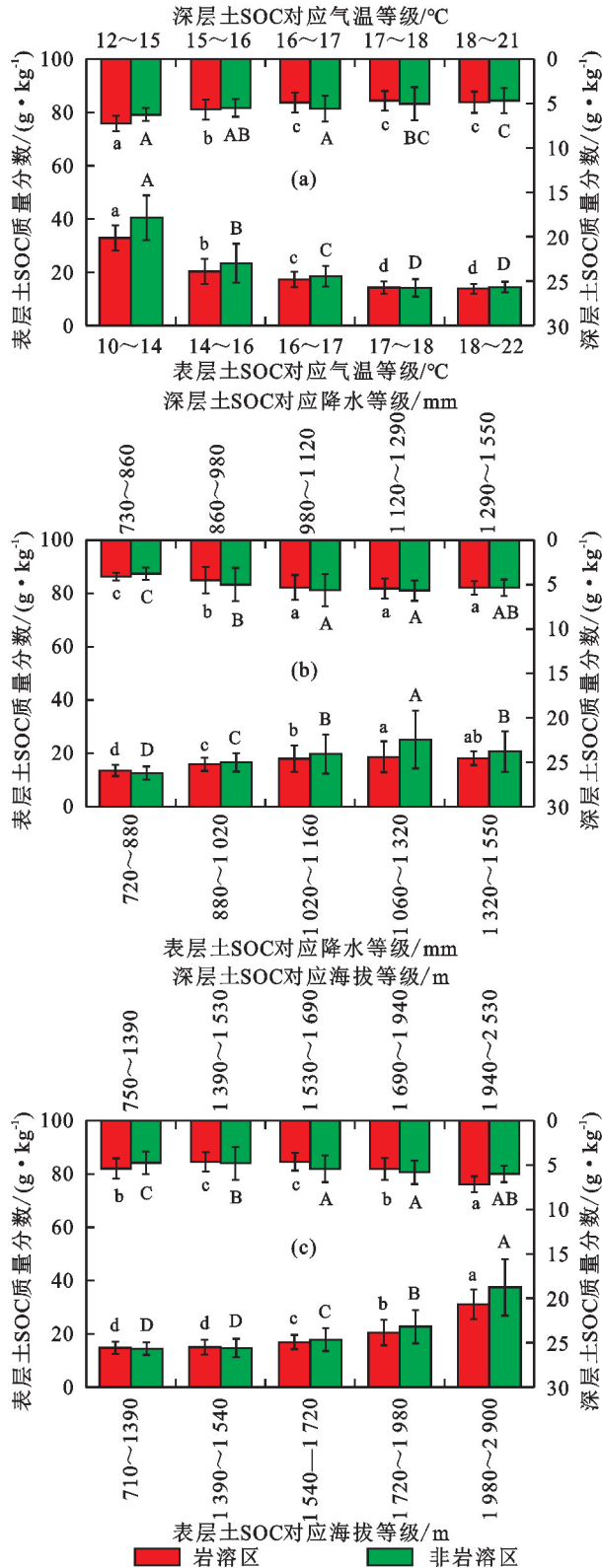
Fig.4 Statistics of the SOC contents of different soil types

从岩溶和非岩溶区考虑,气候和海拔对其 SOC 的一致性影响主要体现在表层土,随着温度降低,非岩溶区相比岩溶区 SOC 的增加量逐步扩大,在 10~14 °C 低温区,非岩溶区 SOC 比岩溶区高 23.12%。同时,降水和海拔升高也扩大非岩溶区和岩溶区 SOC 的差异,在 1 060~1 320 mm 降水区和 1 980~2 900 m 海拔区,非岩溶区 SOC 分别比岩溶区高

35.22% 和 20.85%。而在深层土,气候和海拔对岩溶和非岩溶区 SOC 的影响并不一致,表明深层土 SOC 可能受到其他因素制约。

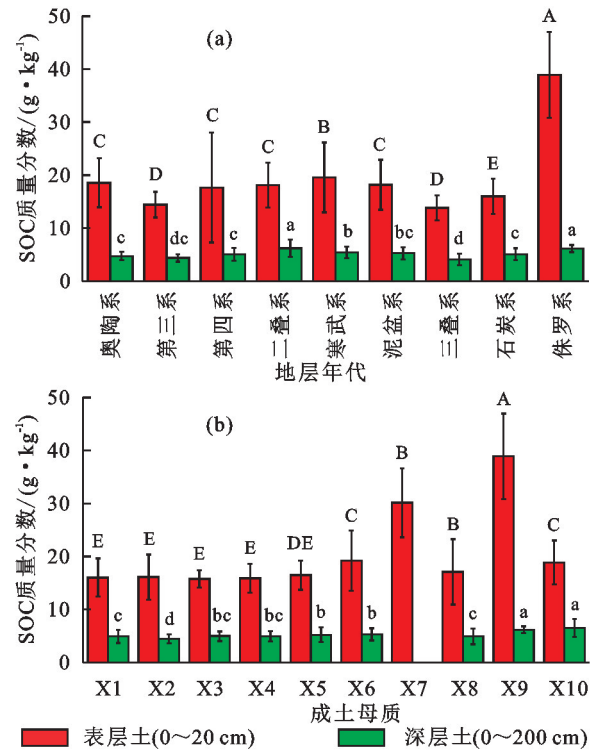
2.3.3 地层年代和成土母质 由图 6 可知,不同地层年代分布区 SOC 差异显著,侏罗系总体表现最高,其表层土壤 SOC 质量分数为 38.91 g/kg,比三叠系高 1.82 倍。深层土以二叠系 SOC 最高,其值为 6.20 g/kg,比三叠系高 24.01%。表明不同地层年代对 SOC 有显著影响。按照成土母质比较,花岗岩发育的土壤其表层土 SOC 质量分数均值为 38.91 g/kg,显著高于其他母质区;其次为碎屑岩夹碳酸盐岩,SOC 质量分数平均值为 30.12 g/kg;灰岩、白云岩作为岩溶区典型的碳酸盐岩,其发育的 SOC 质量分数仅为 16.02、16.09 g/kg,相比花岗岩区低 1.43、1.42 倍。花岗岩具有较高的 SOC 质量分数,原因可能是花岗岩主要分布在文山市西部国家自然保护区,该地植被丰富,土类以林地为主;有研究^[8]表明,花岗岩母质下的林地土壤成酸性,其非晶态氧化物具有较大比表面积和更密的酸羧基位点,其对 SOC 的固持能力较强。对于深层土而言,碳酸盐岩发育的 SOC 仍然低于非

碳酸盐岩,其中,玄武岩区 SOC 为 6.50 g/kg,显著高于其他母质区,说明成土母质的特性可能更多决定深层土 SOC 的数量和状态。



注:图柱上方不同大写和小写字母分别表示岩溶和非岩溶区 SOC 质量分数在不同等级间差异显著($p < 0.05$)。

图 5 气温、降水和海拔在不同等级下 SOC 质量分数统计
Fig.5 Statistics of the SOC contents at different grades of temperature, precipitation and altitude



注:不同大写和小写字母分别表示表层和深层土壤 SOC 质量分数在不同地层年代或岩性间差异显著($p < 0.05$);X₁~X₁₀分别为灰岩、白云岩、灰岩夹白云岩、灰岩与白云岩互层、白云岩夹灰岩、碳酸盐岩夹碎屑岩、碎屑岩夹碳酸盐岩、砂岩、花岗岩、玄武岩。

图 6 不同地层年代和成土母质 SOC 质量分数统计
Fig.6 Statistics of the SOC contents in different strata ages and parent materials

3 讨论

3.1 文山市 SOC 空间分异特征

文山市是我国西南地区典型的岩溶县,区内岩溶与非岩溶区交错分布。通过网格化采样发现,文山市西部地区的表层土壤 SOC 质量分数较高,中部和北部较低,平均 SOC 质量分数为 17.80 g/kg,总体与西南其他地区的研究相似^[4,6];但岩溶区平均 SOC 质量分数为 16.32 g/kg,低于非岩溶区(20.88 g/kg),与已有研究^[4,17]相反。与表层土相似,深层土 SOC 总体分布特征表现为中部和西南部高、东北部低的分布格局,总体 SOC 平均值为 4.61 g/kg,其中,岩溶区 5.18 g/kg,低于非岩溶区的 6.12 g/kg。文山市岩溶区 SOC 质量分数低于非岩溶区,原因可能是文山市岩溶区分布在北部和中东部,海拔较低,且部分采样点位于石漠化较为严重和植被生长较差的地区;有研究^[18]表明,石漠化地区地表植被遭到破坏,外源有机碳输入减少,同时石漠化加剧土壤侵蚀,将加强表层土壤有机质和养分流失。而文山市非岩溶区主要分布在西部地区,海拔较高,植被覆盖较好,凋落物和根系大量富集在表层土,为土壤提供相对充足的外源碳,利于表层土 SOC 累积。

半变异函数模型显示,文山市表层和深层土壤 SOC 均存在一定程度的空间异质性,其中,块金效应值(即块金值与基台值的比例)为 14.62%~59.93%。有研究^[4,19]显示,块金效应可指示系统变量的空间相关性程度,当比值<25%时,说明系统具有强烈的空间相关性,气候、地形、土壤类型等结构性因素可导致土壤养分较强的空间相关性;比值为 25%~75%时,系统具有中等空间相关性,耕作措施、土地利用等人为活动形成的随机因素与结构因素共同作用土壤养分的空间分布。本研究中的块金效应值处于中等偏低的水平,说明气候、海拔、土壤类型等结构性影响因素可能主导文山市 SOC 的空间变异。

3.2 SOC 空间分异的主控因素

气温、海拔等结构性因素对表层土 SOC 的解释力最为突出,但其影响在岩溶与非岩溶区具有差异。在岩溶区,气温和海拔是 SOC 空间分异的主控因素;而在非岩溶区,气温、土壤类型、海拔成为主控因素。Person 相关分析表明,气温与 SOC 的相关系数为-0.82~-0.71,呈显著负相关;而海拔与 SOC 的相关系数为 0.63~0.79,呈显著正相关。气温的影响主要体现在其对微生物活动和 SOC 分解,在一定范围内,温度升高加快微生物自身活动及其对 SOC 的分解和矿化。相反,温度降低导致微生物活动受到抑制,SOC 以腐殖化作用为主,表层土壤 SOC 逐步积累^[20]。海拔对土壤所处区域的水热条件具有调控作用,海拔越高,土壤温度越低、湿度越大,有机质的矿化速率和微生物活性变慢,利于有机质质量分数提升^[21]。

对比岩溶区,非岩溶区土壤类型也是影响表层 SOC 的主控因素,其中,棕壤和黄棕壤区 SOC 质量分数高于石灰土等其他土壤类型区,其原因是棕壤和黄棕壤主要分布在文山市西部的非岩溶山区,该区海拔较高、森林覆盖率高,来源于植物和根系凋落物的腐殖质较多,同时高海拔区气候冷凉,有机质分解慢,有助于 SOC 累积;另外,棕壤和黄棕壤的土壤质地黏重、黏粒体积分数高,土壤结构一般呈团粒状,其黏土矿物以蛭石、伊利石、绿泥石为主,2:1 型矿物占主导地位,其比表面积和内表面积较大,有利于有机碳固定储存^[22]。而在岩溶区,石灰土由热带、亚热带地区的石灰岩经溶蚀风化形成,其主要化学成分为碳酸钙、碳酸镁等可溶性盐类,酸不溶物体积分数低,风化成土速率缓慢^[23]。虽然石灰土中的有机物可以与钙、镁离子结合形成高度缩合而稳定的腐殖酸钙,对 SOC 的维持和稳定有一定促进作用^[24],但本研究区水热同期,石漠化相对严重,石灰土成土母质碳酸盐类风化物中钙、镁元素可能大量淋失,导致 SOC 流失。

深层土壤 SOC 的主控因素在岩溶与非岩溶区也不同,降水在岩溶区起主导作用,其与 SOC 的 Person 相关系数为 0.38,呈显著正相关,相关系数高于非岩溶区(0.29)。一般认为,降水破坏土壤团聚体结构,其形成的地表径流冲刷土壤造成 SOC 流失,适度的降水也利于微生物的生长繁殖,加速 SOC 的分解。不过降水过多也造成土壤孔隙被雨水堵塞形成厌氧环境,导致微生物活性降低进而利于 SOC 累积^[16]。在岩溶区,由于土壤的高钙特性及淋溶脱钙和富集复钙同时进行,降水导致的淋溶作用可能使土壤中的溶解性钙在深层土中重新与有机质结合形成腐殖酸钙,促进 SOC 形成^[24]。本研究显示,在 730~860 mm 降水区域,岩溶区 SOC 为 4.11 g/kg,显著高于非岩溶区 9.02% ($p < 0.01$),表明岩溶区较低的降水环境可能有利于钙离子在深层土中与土壤有机质结合。在非岩溶区,地层年代是解释深层土 SOC 空间分析的主控因素,与其他影响因子交互作用对 SOC 的解释力也最为显著。SOC 高值区位于二叠系地层,其成土母质为玄武岩,有研究^[25]表明,玄武岩发育的土壤具有由于较高的土壤黏粒和大团聚体含量,有助于其对深层土 SOC 的物理保护并降低其矿化,从而维持 SOC 稳定。因此,在分析岩溶与非岩溶区深层土 SOC 空间分异的主控因素时,应考虑岩溶区的富钙特性和非岩溶区地层与成土母质的差异。

4 结论

1)文山市 0~20 cm 土层 SOC 质量分数分布特征表现为西部高、中北部低,0~200 cm 土层 SOC 分布表现为中西部高、东北部低。半变异函数分析显示,文山市 SOC 空间拟合的块金效应值在中等偏低的水平,表明结构性因素导致 SOC 具有较强的空间相关性。

2)地理探测器研究结果显示,气温、海拔和土壤类型是影响文山市表层土 SOC 空间分异的主控因素,随着温度降低、海拔升高,文山市 SOC 质量分数呈增加趋势;而岩溶区海拔较低,石漠化严重和植被生长相对较差,SOC 质量分数总体低于非岩溶区;棕壤和黄棕壤土壤因其质地黏重、黏粒体积分数高,黏土矿物比表面积和内表面积较大,SOC 质量分数显著高于其他土壤类型区。降水导致的淋溶作用可能使溶解性钙在深层土中重新与有机质结合,成为影响岩溶区深层土 SOC 的主控因素。地层年代在非岩溶区起主导作用,二叠系玄武岩母质发育的土壤可能具有较高的土壤黏粒和大团聚体质量分数,有助于维持深层土 SOC 的物理保护和稳定。

参考文献:

[1] SCHIMMEL D S. Terrestrial ecosystems and the carbon

- cycle[J].*Global Change Biology*,1995,1(1):77-91.
- [2] 曹建华,袁道先,章程,等.受地质条件制约的中国西南岩溶生态系统[J].*地球与环境*,2004,32(1):1-8.
CAO J H, YUAN D X, ZHANG C, et al. Karst ecosystem constrained by geological conditions in southwest China[J].*Earth and Environment*,2004,32(1):1-8.
- [3] 张信宝,王世杰,曹建华,等.西南喀斯特山地水土流失特点及有关石漠化的几个科学问题[J].*中国岩溶*,2010,29(3):274-279.
ZHANG X B, WANG S J, CAO J H, et al. Characteristics of water loss and soil erosion and some scientific problems on karst rocky desertification in Southwest China karst area [J]. *Carsologica Sinica*,2010,29(3):274-279.
- [4] 钟聪,李小洁,何园燕,等.广西土壤有机质空间变异特征及其影响因素研究[J].*地理科学*,2020,40(3):478-485.
ZHONG C, LI X J, HE Y Y, et al. Spatial variation of soil organic matter and its influencing factors in Guangxi, China[J].*Scientia Geographica Sinica*,2020,40(3):478-485.
- [5] 张珍明,周运超,田潇,等.喀斯特小流域土壤有机碳空间异质性及储量估算方法[J].*生态学报*,2017,37(22):7647-7659.
ZHANG Z M, ZHOU Y C, TIAN X, et al. Study on spatial heterogeneity and reserve estimation of soil organic carbon in a small karst Catchment [J]. *Acta Ecologica Sinica*,2017,37(22):7647-7659.
- [6] 黄先飞,周运超,张珍明.喀斯特石漠化区不同土地利用方式下土壤有机碳分布特征[J].*水土保持学报*,2017,31(5):215-221.
HUANG X F, ZHOU Y C, ZHANG Z M. Distribution characteristics of soil organic carbon under different land uses in a karst rocky desertification area[J].*Journal of Soil and Water Conservation*,2017,31(5):215-221.
- [7] 张穗粒,盛茂银,王霖娇,等.西南喀斯特长期植被修复对土壤有机碳组分的影响[J].*生态学报*,2023,43(20):8476-8492.
ZHANG S L, SHENG M Y, WANG L J, et al. Effects of long term vegetation restorations on soil organic carbon fractions in the karst rocky desertification ecosystem, Southwest China[J].*Acta Ecologica Sinica*,2023,43(20):8476-8492.
- [8] 覃智莲,杨孝民,宋照亮,等.成土母质和土地利用方式对土壤有机碳化学组成的影响[J].*土壤通报*,2020,51(3):621-629.
QIN Z L, YANG X M, SONG Z L, et al. Effects of parent materials and land uses on soil organic carbon fractions[J].*Chinese Journal of Soil Science*,2020,51(3):621-629.
- [9] 肖伟,苏以荣,梁士楚,等.广西典型喀斯特地区深层土壤有机碳矿化及其影响因素[J].*生态学杂志*,2012,31(4):981-986.
XIAO W, SU Y R, LIANG S C, et al. Organic carbon mineralization in deep soil layers in typical karst region of Guangxi, South China and related affecting factors [J].*Chinese Journal of Ecology*,2012,31(4):981-986.
- [10] 王兴富,黄先飞,胡继伟,等.喀斯特石漠化过程中小生境及岩性的演替对土壤有机碳的影响[J].*水土保持学报*,2020,34(4):295-303.
WANG X F, HUANG X F, HU J W, et al. Relationship among soil organic carbon and small environment and lithology in the rocky desertification process in different karst landforms[J].*Journal of Soil and Water Conservation*,2020,34(4):295-303.
- [11] HUANG X F, ZHANG Z M, ZHOU Y C, et al. Characteristics of soil organic carbon under different karst landforms[J].*Carbonates and Evaporites*,2021,36(3):e40.
- [12] 凡非得,王克林,熊鹰,等.西南喀斯特区域水土流失敏感性评价及其空间分异特征[J].*生态学报*,2011,31(21):6353-6362.
FAN F D, WANG K L, XIONG Y, et al. Assessment and spatial distribution of water and soil loss in karst regions, southwest China [J]. *Acta Ecologica Sinica*,2011,31(21):6353-6362.
- [13] 中华人民共和国国土资源部.多目标区域地球化学调查规范: DZ/T 0258—2014[S].北京:中国标准出版社,2015.
Ministry of Land and Resources, People's Republic of China. Specification of multi-purpose regional geochemical survey; DZ/T 0258—2014[S]. Beijing: Standards Press of China,2015.
- [14] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].*地理学报*,2017,72(1):116-134.
WANG J F, XU C D. Geodetector: Principle and prospective[J].*Acta Geographica Sinica*,2017,72(1):116-134.
- [15] CHEN H S, ZHANG W, WANG K L, et al. Soil organic carbon and total nitrogen as affected by land use types in karst and non-karst areas of northwest Guangxi, China[J].*Journal of the Science of Food and Agriculture*,2012,92(5):1086-1093.
- [16] 黄凯文.贵州山地土壤有机碳空间变异性及主控因素研究[D].贵阳:贵州师范大学,2023.
HUANG K W. Study on spatial variability and main controlling factors of soil organic carbon in Guizhou mountainous area [D]. Guiyang: Guizhou Normal University,2023.
- [17] ZHU X C, MA M G, TATENO R, et al. Effects of vegetation restoration on soil carbon dynamics in Karst and non-karst regions in Southwest China: A synthesis of multi-source data[J].*Plant and Soil*,2022,475(1):45-59.

- [18] 刘方,王世杰,刘元生,等.喀斯特石漠化过程土壤质量变化及生态环境影响评价[J].生态学报,2005,25(3):639-644.
LIU F, WANG S J, LIU Y S, et al. Changes of soil quality in the process of karst rocky desertification and evaluation of impact on ecological environment[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(3): 639-644.
- [19] 王小艳,冯跃华,李云,等.黔中喀斯特山区村域稻田土壤理化特性的空间变异特征及空间自相关性[J].生态学报,2015,35(9):2926-2936.
WANG X Y, FENG Y H, LI Y, et al. Spatial variability of soil physiochemical properties and their autocorrelations at village-region in karst mountainous area, Guizhou Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(9): 2926-2936.
- [20] 李孝良,陈效民,周炼川,等.贵州省喀斯特地区石漠化土壤有机碳和全氮变异特征[J].南京农业大学学报,2010,33(4):75-80.
LI X L, CHEN X M, ZHOU L C, et al. Soil organic carbon and nitrogen variability in the process of rocky desertification in karst region, Guizhou Province[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2010, 33(4): 75-80.
- [21] 尚斌,邹焱,徐宜民,等.贵州中部山区植烟土壤有机质含量与海拔和成土母质之间的关系[J].土壤,2014,46(3):446-451.
SHANG B, ZOU Y, XU Y M, et al. Relationship between SOM contents of tobacco fields and elevation and parent materials in central region of Guizhou Province[J]. *Soils*, 2014, 46(3): 446-451.
- [22] 鲍丽然,李瑜,张风雷,等.重庆市表层土壤有机碳空间分布、影响因素及对碳减排的贡献[J].中国地质,2023, Doi:10.12029/gc20230505002.
BAO L Y, LI Y, ZHANG F L, et al. Spatial distribution, influencing factors and contribution to carbon emission reduction of topsoil organic carbon in Chongqing, China[J]. *Geology in China*, 2023, Doi:10.12029/gc20230505002.
- [23] 王世杰,李阳兵,李瑞玲.喀斯特石漠化的形成背景、演化与治理[J].第四纪研究,2003,23(6):657-666.
WANG S J, LI Y B, LI R L. Karst rocky desertification: formation background evolution and comprehensive taming[J]. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(6): 657-666.
- [24] 杨慧,梁影,徐觉明,等.岩溶区钙与土壤有机碳关系的研究进展[J].广西科学,2018,25(5):505-514.
YANG H, LIANG Y, XU J M, et al. Research progress of the relationship between soil calcium and soil organic carbon in karst area[J]. *Guangxi Sciences*, 2018, 25(5): 505-514.
- [25] 毛霞丽,邱志腾,张爽,等.不同母质发育土壤团聚体分布对外源输入秸秆的响应及其与有机碳矿化的关系[J].环境科学,2020,41(6):2842-2851.
MAO X L, QIU Z T, ZHANG S, et al. Response of aggregate distribution to input straw and their linkages to organic carbon mineralization in soils developed from five different parent materials [J]. *Environmental Science*, 2020, 41(6): 2842-2851.