

DOI: 10.5846/stxb201408151620

吴敏, 刘淑娟, 叶莹莹, 张伟, 王克林, 陈洪松. 喀斯特地区坡耕地与退耕地土壤有机碳空间异质性及其影响因素. 生态学报, 2016, 36(6): - .
Wu M, Liu S J, Ye Y Y, Zhang W, Wang K L, Chen H S. Spatial variability of surface soil organic carbon and its influencing factors in cultivated slopes and abandoned lands in a Karst peak-cluster depression area. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(6): - .

喀斯特地区坡耕地与退耕地土壤有机碳空间异质性及其影响因素

吴 敏^{1,2,3}, 刘淑娟^{1,2,3}, 叶莹莹^{1,2}, 张 伟^{1,2,*}, 王克林^{1,2}, 陈洪松^{1,2}

1 中国科学院亚热带农业生态研究所, 亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125

2 中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站, 环江 547100

3 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 利用网格采样 (10 m×10 m), 对比分析了典型喀斯特坡耕地 (长期耕作) 和退耕地 (自然恢复) 表层 (0—15 cm) 土壤有机碳 (SOC) 的空间变异特征, 以期探究退耕恢复 20 年后 SOC 的空间异质性及其主要影响因素的变化。结果表明退耕地 SOC 含量 (75.5 g/kg) 显著高于坡耕地 (15.1 g/kg), 为坡耕地的 5.0 倍, 说明自然恢复能显著提高 SOC 积累量; 半变异函数分析结果表明退耕地基台值 (521.7) 为坡耕地 (25.7) 的 14.9 倍, 说明退耕地 SOC 空间异质性远大于坡耕地。坡耕地和退耕地 SOC 的主要影响因子存在较大差异, 土地覆盖类型、坡位、岩石出露率以及三者的交互作用显著控制着坡耕地 SOC 的空间格局, 其贡献率分别为 9.1 %、6.3 %、4.6 % 以及 17.0 %; 土壤水分、坡度、岩石出露率以及三者的交互作用显著控制退耕地 SOC 的空间格局, 其贡献率分别为 26.0 %、10.7 %、7.2 % 以及 3.6 %; 尽管岩石出露率对坡耕地和退耕地 SOC 的空间格局均有显著影响, 但坡耕地 SOC 的主要控制因子为土地覆盖类型以及各因子的交互作用, 而退耕地的主要控制因子为土壤水分。以上研究表明随着植被恢复和物种多样性增加, 喀斯特坡地 SOC 的累积量和空间异质性增强, 自然因素对 SOC 空间格局影响凸显, 而岩石出露率始终控制 SOC 空间格局。

关键词: 喀斯特; 土壤有机碳; 空间异质性; 冗余分析

Spatial variability of surface soil organic carbon and its influencing factors in cultivated slopes and abandoned lands in a Karst peak-cluster depression area

WU Min^{1,2,3}, LIU Shujuan^{1,2,3}, YE Yingying^{1,2,3}, ZHANG Wei^{1,2,*}, WANG Kelin^{1,2}, CHEN Hongsong^{1,2}

1 Key Laboratory of Subtropical Agriculture Ecology, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China

2 Huanjiang Observation and Research Station for Karst Ecosystems, Chinese Academy of Science, Huanjiang 547100, China

3 University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China

Abstract: Soil organic carbon (SOC) content and its spatial heterogeneity are important components of regional and global carbon sequestration. However, the spatial variability of SOC in karst areas is poorly understood, especially in southwest China in areas of severe land degradation. In the present study, we selected isolated areas in the closest possible proximity to cultivated slopes in order to ensure similar soil and microclimate conditions. The spatial heterogeneity of cultivated slopes under long-term cultivation and abandoned lands under natural restoration in a karst peak-cluster depression area were analyzed by using the grid sampling method at 10 m × 10 m. A total of 230 soil samples were collected, including 123 from the cultivated slopes and 107 from abandoned lands. We used a one-way analysis of variance (ANOVA) to evaluate the

基金项目: 973 计划项目课题 (2015CB452703); 中国科学院战略性先导科技专项子课题 (XDA05070403); 国家自然科学基金项目 (31270555); 中国科学院“西部之光”人才培养计划

收稿日期: 2014-08-15; **网络出版日期:** 2015- -

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangw@isa.ac.cn

differences between the plots. The results showed that the average SOC content in the abandoned lands was —5 times greater than that in the cultivated slopes, which indicates that vegetation recovery significantly improved the SOC content. The estimate of the spatial pattern and scaling of the studied SOC was performed by geostatistical analyses using semivariograms to determine the average variance between samples collected at increasing distances. The results showed that all semivariograms of the two plots were fitted to an exponential model. The sill values of the semivariogram functions for the abandoned lands were —15 times greater those of the cultivated slopes, which indicates that the spatial variation of SOC in the abandoned lands was higher than that in the cultivated slopes. Stepwise regression and redundancy analysis showed that factors influencing the spatial distributions of SOC in the cultivated slopes and abandoned lands were different. In particular, land cover type, slope position, rock ratio, and their interaction explained 9.1%, 6.3%, 4.6%, and 17.0% of the total variance of SOC in the cultivated slopes, respectively. Soil water content, slope gradient, rock ratio, and their interaction explained 26.0%, 10.7%, 7.2%, and 3.6% of the total variance of SOC in the abandoned lands, respectively. We conclude that land abandonment increased both the SOC content and its spatial heterogeneity in karst areas in southwest China. In addition, the degree of human disturbance and soil water content are the primary factors in determining the spatial variation of SOC in the cultivated slopes and abandoned lands, respectively. Moreover, the rock ratio is an important factor for controlling the spatial variation of SOC in both the cultivated slopes and abandoned lands. Our findings can provide a better understanding of the relationships between ecosystem restoration and SOC recovery and can give scientific basis for karst ecosystem restoration.

Key Words: karst; soil organic carbon; spatial heterogeneity; redundancy analysis

陆地生态系统生物或非生物因子普遍存在空间异质性。在小尺度,生态系统的异质化过程首先表现为植物的异质化,植物的异质化导致土壤某些元素的异质化,土壤元素异质化的过程首先表现为土壤有机碳的异质化过程^[1]。而表层土壤有机碳空间异质格局与区域气候、植被、地形、土壤水分、土壤温度、人类活动等密切相关,如橡树林生态系统中树周半径 8 m 范围内,植物与表层土壤有机碳储量空间分布显著相关,且树荫区土壤有机碳含量比非树荫区高^[2]。而在喀斯特生态系统,地形、人类活动被认为是影响表层土壤有机碳空间分布的关键性因子^[3]。此外国内外多数研究认为土地利用变化是影响土壤碳动态平衡的最主要人为因素,在相同的母质和气候下,土地利用类型相比于区域环境因子(海拔、坡度、坡向等)对 SOC 的影响更为深刻^[4-6]。因此,在多种因素控制下,SOC 的空间异质性研究能有效反映土壤碳收支的主要控制环境因子。1983 年国际景观生态学研讨会明确提出空间异质性研究与生态学空间格局、过程、尺度研究有着非常重要的关系^[7]。Ettema 和 Wardle^[8]进一步指出土壤属性空间异质性的研究是各种生态模型构建必须考虑的基础要素,而地统计学理论为这一研究提供了一系列的工具和方法。

喀斯特地区土壤环境具有基岩裸露、土壤存量少、分布不连续、微地貌复杂多样等基本特征。不少学者对喀斯特地区小生境、土壤养分、土壤水分等的空间异质性进行了研究,认为地统计学能有效地分析该区生态因子的空间变异规律^[9-12]。同时,其土壤形成背景的一致性使土壤属性变化在空间上具有连续性,因而可以用地统计学方法研究该地区非连续土壤的空间异质性。石漠化是喀斯特地区最主要的生态环境问题,为此国家于 20 世纪 90 年代在桂西北实施生态移民工程,该区部分岩石裸露率高的坡耕地弃耕后自然恢复,部分坡耕地由留居农户继续耕种,形成了退耕地和坡耕地两种典型的土地利用类型。然而政策性推动植被演替后,两种土地利用类型土壤有机碳空间异质性的对比研究报道甚少。而探索土壤空间变异特征,有助于了解土壤的形成过程,物种多样性的维持和土壤对植物更新过程的影响。此外,表层土壤有机碳变化与次生植被的恢复年限显著相关,而与其与原生植被群落的本底特征不相关^[13],可见土壤有机碳与环境因子的关系因土地利用方式的不同而不同。然而,在喀斯特地区由于其独特的生境条件,退耕后土壤有机碳与植被及其他环境因子的关系还缺乏清晰认识。

为此,本文对比研究了坡耕地和退耕地土壤有机碳的空间异质性特征,探讨土地覆盖类型、土壤水分及地形等环境因子对有机碳含量及其空间异质性格局的影响,研究结果可为当地退化土地的生态恢复和可持续管理提供科学依据。

1 研究区域概况

研究区位于广西环江毛南族自治县的下南乡古周村(107°55′ E,24°50′ N),为典型的岩溶峰丛洼地,属亚热带季风气候区,多年平均气温 16.5—20.5 ℃,多年平均降雨量为 1380 mm。区内最低点海拔为 376 m,与最高点海拔相差 440 m。土地总面积 186.7 hm²,其中耕地 17.3 hm²,主要分布在洼地。研究区以山地为主,25°以上坡地占总面积的 80%以上,平均土层深度为 20—30 cm(表 1)。发育土壤主要是石灰土,土质较黏重,土被分布极不均匀,基岩广泛出露,特别是坡面平均岩石出露率达 70 %以上。自然植被以灌丛为主,森林覆盖率仅有 13 %,水土流失、石漠化严重,属于国家移民迁出区和西部退耕还林还草区。上世纪 90 年代末,研究区开始实施生态移民和退耕还林还草工程,部分岩石出露率高坡耕地由于土地利用收益低,采取退耕后自然恢复的模式,经过近 20 年演替为灌木林。因此本研究以坡耕地(长期耕作)和退耕地(自然恢复)为研究对象,通过在典型坡地建立长宽 100 m×100 m 的长期监测样地,对比研究了两者土壤有机碳(SOC)的空间异质性特征。

采样前对样地进行了详细的环境信息(包括地形、微地貌等)和土地利用历史调查,其详细信息见表 1。坡耕地样地有超过 50 年的耕作历史,土地覆盖类型以玉米(*Zea Mays L.*)为主,但部分岩石出露率高的地段分布有乔木、草丛、灌丛及牧草等其他四种土地覆盖类型。退耕地样地恢复之前曾有多年的耕种历史,种植玉米,退耕还林政策实施后,干扰较少。群落优势种为红背山麻杆(*Alchornea trewioides*)、灰毛浆果楝(*Cipadessa cinerascens*)、盐肤木(*Rhus chinensis*)等。

表 1 峰丛洼地坡耕地和退耕地的样地特征
Table 1 Plot characteristics of cultivated slopes and abandoned lands in peak-cluster depression (mean±SD)

种类 Types	海拔 Altitude /m	坡度 Slope/ °	坡向 Aspect	主要优势种 Dominant species	岩石出露率 Rock exposure/ %	土层厚度 Soil thickness/ cm	土壤水分 Soil water content/ %	植被覆盖度 Canopy cover/ %	干扰历史 Disturbance history
坡耕地 Cultivated slopes	565—610	14.3±6.4A	东南坡	玉米 <i>Zea Mays L.</i>	16.8±25.5A (上坡位 15.8 % 中坡位 26.1 % 下坡位 10.3 %)	29.7±13.3A	19.3±2.9A	——	有超过 50 年 以上耕种历史 (玉米)
退耕地 Abandoned lands	438—507	43.1±3.3B	东北坡	红背山麻杆 <i>Alchornea trewioides</i> 灰毛浆果楝 <i>Cipadessa cinerascens</i> 盐肤木 <i>Rhus chinensis</i>	70.6±16.8B (上坡位 76.8 % 中坡位 72.4 % 下坡位 64.3 %)	20.6±5.6B	43.8±8.7B	70.7±17.2	有多年的耕种历史(玉米),上 世纪 90 年代 封育

不同大写字母表示极显著差异($P<0.01$),——:表示未调查。

2 研究方法

2.1 采样方法与实验分析

2011 年 11 月,利用全站仪(南方,NTS-302R)在上述两个典型样地布设采样网格,其中退耕地采样范围为 100 m×100 m。为与耕地形状保持一致,坡耕地采样范围为 120 m×90 m。采用采样间距为 10 m 的标准网格进行取样,坡耕地样地内有 7 个网格点分布在出露面积较大的基岩上,未采取土壤样品。退耕地样地岩石出露率较高,一半左右网格节点分布在裸岩上,为了反映 SOC 在样地内的空间分布特征,详细调查了该样地小生境和土壤斑块的分布,并对每一个土壤斑块单独取样,同时用全站仪记录了每个土壤斑块的中心坐标,因而其采样点不是规则网格。采样前,调查并记录了每个样点的植被覆盖类型、覆盖度、岩石出露率、土层厚度、

土壤水分含量等环境信息(表 1)。植被覆盖度和岩石出露率的估算以样点周围 2 m×2 m 范围内植被覆盖面积百分比和岩石出露面积百分比表示,土层厚度以测钎在样点周围 2 m×2 m 范围内测定 8—10 个点土层厚度的平均值表示。土壤水分含量采用土壤质量含水量表示。采样时,以采样定位点为中心,在 2 m×2 m 范围内随机采取 5—10 个 0—15 cm 的表层土壤样品,混合后代表该采样点土样,坡耕地样地共采集样品 123 个,退耕地样地共采集样品 107 个(图 1)。采样结束后,土壤样品及时带回实验室风干过筛,利用重铬酸钾容量法—外加热法(油浴)(GB7857—87)测定土壤有机碳含量(SOC)^[14]。

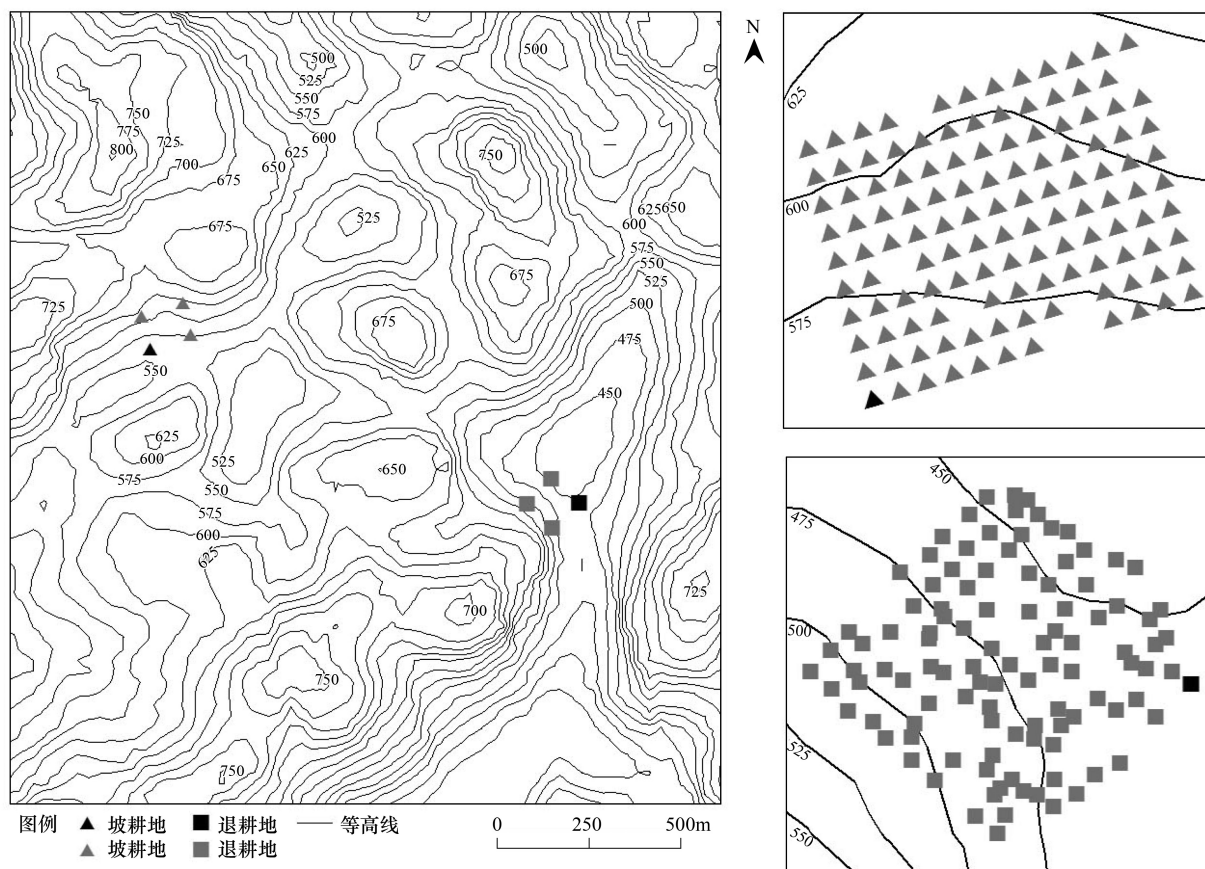


图 1 研究区样地和土壤采样点分布图

Fig. 1 The location of sampling area and distribution of soil sampling points

CS: 坡耕地 cultivated slopes, AL: 退耕地 abandoned lands

2.2 数据处理

本文采用地统计学方法分析喀斯特地区 SOC 的空间变异特征和空间分布格局,前期研究表明,高程因子、立地因子以及人为干扰与 SOC 空间异质性显著相关^[15],为此本文利用冗余分析和偏冗余分析探讨 SOC 与立地因子、高程因子等环境因子之间的定量关系。地统计学方法已广泛用于土壤空间异质性的研究,其相关原理和方法见文献王政权^[16]和 Webster 等^[17],本文不再赘述。利用 GS+ Version 7.0 和 ArcGIS 10.1 进行数据的地统计学分析,利用 SPSS 16.0 和 Origin 8.5 进行数据的描述性统计分析、ANOVA 分析和 LSD 检验,利用 R 3.1.0 进行数据的冗余分析和偏冗余分析(redundancy analysis and partial redundancy analysis)。冗余分析和偏冗余分析的数据处理步骤为,首先利用 SPSS 16.0 对各样地 SOC 的环境因子(坡位、坡度、岩石出露率、土层厚度、土壤水分、植被盖度、小生境类型、样地土地覆盖类型)进行逐步回归分析,然后挑选显著性($P < 0.05$)环境因子(其中坡耕地的显著性环境因子为岩石出露率、坡位及样地土地覆盖类型,而退耕地的显著性环境因子为岩石出露率、坡度及土壤水分),最后分别对这些显著因子进行方差分解,方差分解过程基于 R 3.1.0 中 Vegan 2.0-10 软件包实现^[18-20]。

3 统计结果分析

3.1 描述性统计分析

坡耕地 SOC 含量的范围为 5.9—28.7 g/kg,均值为 15.1 g/kg,变异系数为 32.4 % (图 2)。退耕地 SOC 含量的范围为 34.3—156.1 g/kg,均值为 75.5 g/kg,变异系数为 30.6 % (图 2)。ANOVA 分析结果表明,两者 SOC 含量存在极显著差异 ($P < 0.01$),退耕地 SOC 为坡耕地的 5.0 倍,说明退耕后自然恢复能显著增加喀斯特地区 SOC 的含量。依据变异系数 (C_v) 大小可判断坡耕地 (32.4 %) 和退耕地 (30.6 %) SOC 皆呈中等程度变异^[21]。本文采用样本均值加减 3 倍标准差来识别特异值,在此区间外的数据均判定为特异值,分别用区间最大值和最小值代替。退耕地 SOC 含量存在一个特异值,用区间最大值代替。两者 SOC 数据的单样本 K-S 检验结果均超过 5 % 显著水平,符合正态分布 (图 2),因而不需对原始数据进行转换就可进行地统计学分析。

3.2 空间自相关分析

SOC 在坡耕地和退耕地均呈现一定的空间结构性 (图 3),表现为滞后距离较小的点对呈正空间相关,随着滞后距离的增大,自相关系数逐渐向负方向增长。坡耕地 SOC 在 0—39.5 m 尺度范围内呈正空间相关 (0.065—0.256),在 39.5—70.7 m 尺度范围内呈负空间相关 (−0.081—−0.031)。退耕地 SOC 在 0—44.7 m 尺度范围内呈正空间自相关 (0.001—0.206),44.7—70.7 m 尺度范围内呈现负相关 (−0.114—−0.013)。正空间自相关的距离大致反映了性质相似斑块的平均半径,而负空间自相关则反映了性质相反的斑块间的平均距离,可见退耕地与坡耕地 SOC 相似斑块的空间尺度相差不大。

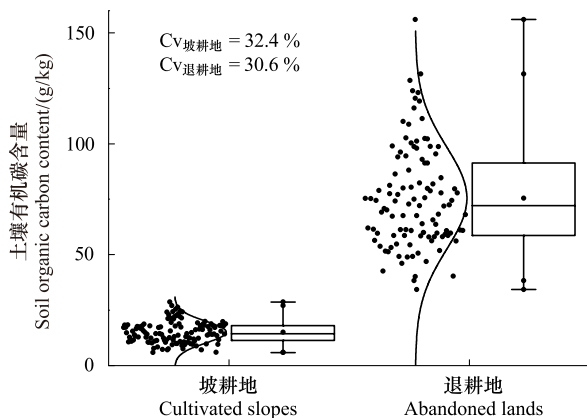


图 2 土壤有机碳描述性统计

Fig. 2 Descriptive statistics of soil organic carbon

CS: 坡耕地 cultivated slopes, AL: 退耕地 abandoned lands

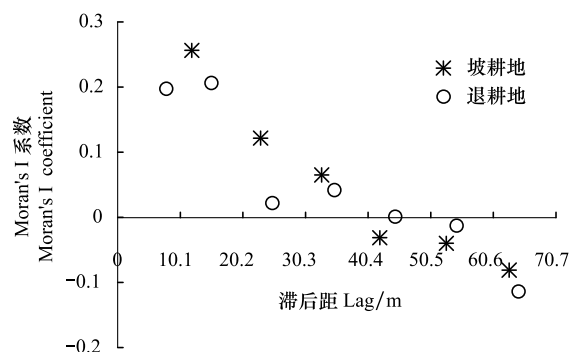


图 3 土壤有机碳空间自相关性图

Fig. 3 Spatial correlogram of soil organic carbon

CS: 坡耕地 cultivated slopes, AL: 退耕地 abandoned lands

3.3 半变异函数结构分析

坡耕地和退耕地半变异函数最优拟合模型皆为指数模型 (图 4),理论模型的决定系数均较高,分别为 0.979 和 0.841 (表 2),说明理论模型能很好的反映各样地 SOC 的空间结构特征。退耕地 SOC 半变异函数块金值 (260.8) 为坡耕地 (7.2) 的 36.4 倍。块金值表示随机变异的大小,说明退耕地样地随机变异远远大于坡耕地。退耕地半变异函数基台值 (521.7) 为坡耕地 (25.7) 的 14.9 倍,基台值表示总的变异程度,说明退耕地的总变异程度远远大于坡耕地,其空间异质性更强。退耕地 SOC 的块基比为坡耕地的 1.8 倍,说明退耕地随机变异对其空间变异的贡献大,而坡耕地结构变异对空间变异的贡献大。两者 SOC 的块基比皆处于 25 %—75 % 之间,均呈中等空间相关性^[22]。此外退耕地变程 (52.5 m) 略大于坡耕地 (43.8 m),变程为相似斑块的空间连续性范围,说明两者的空间连续范围差异不大。

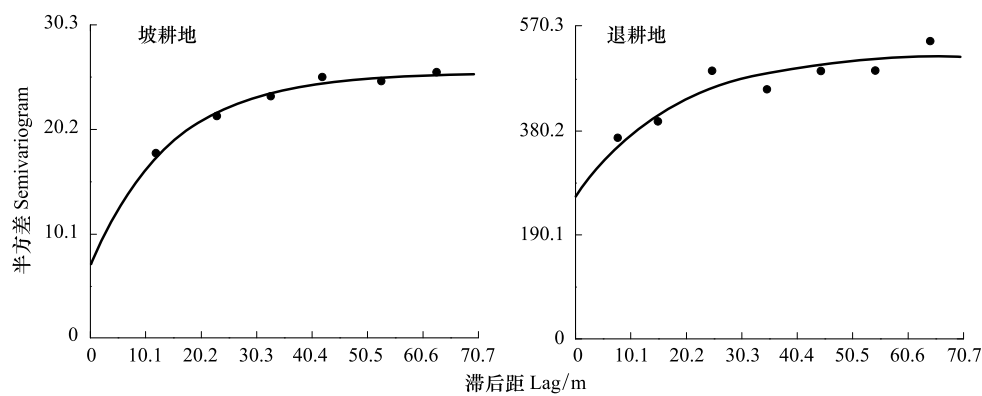


图 4 土壤有机碳半变异函数图

Fig. 4 Semivariograms of soil organic carbon

CS:坡耕地 cultivated slopes, AL: 退耕地 abandoned lands

表 2 土壤有机碳半变异函数理论模型及其结构参数

Table 2 Best-fitted semivariogram model of soil organic carbon and its structure parameters							
种类 Types	模型类型 Model type	块金值 C_0	基台值 C_0+C	变程 Range (m)	块金值/基台值 C_0/C_0+C (%)	RSS	R^2
坡耕地	Exponential	7.2	25.7	43.8	28.0	0.969	0.979
退耕地	Exponential	260.8	521.7	52.5	50.0	3642	0.841

3.4 kriging 空间插值分析

kriging 空间插值图结果表明,坡耕地和退耕地 SOC 在空间格局上存在较大的差异(图 5),坡耕地样地内 SOC 呈 1 个高峰中心和多个低峰中心的空间格局,且上坡位和下坡位 SOC 含量低于中坡位;退耕地 SOC 的空间分布呈凸型,顺坡纵向对角线为高值区呈双峰型,向两侧降低,呈现出中坡位和上坡位 SOC 含量高于下坡位的空间格局。坡耕地空间格局与退耕地相比较为破碎,而退耕地较为连续。

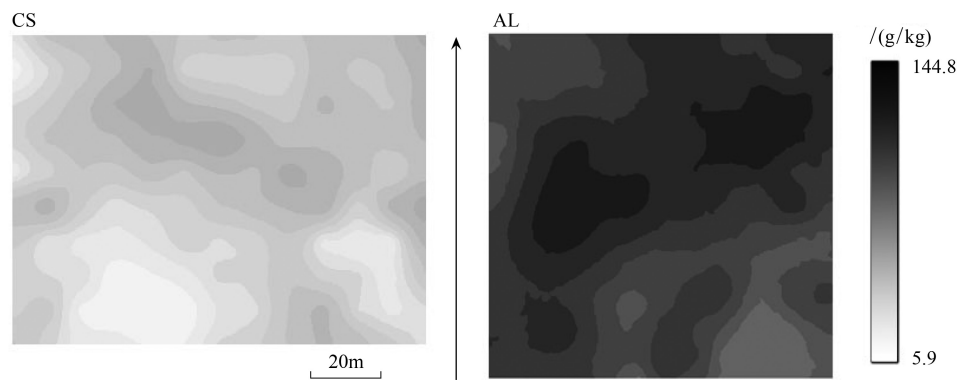


图 5 土壤有机碳空间分布图

Fig. 5 Spatial distribution map of soil organic carbon

CS:坡耕地 cultivated slopes, AL: 退耕地 abandoned lands 箭头方向表示上坡位 The direction of the arrows indicates uphill position

3.5 冗余分析

冗余分析结果表明,土地覆盖类型、坡位、岩石出露率以及三者之间的交互作用对坡耕地 SOC 空间异质性的解释贡献率分别为 9.1 %、6.3 %、4.6 %以及 17.0 % ($P<0.01$),总的方差解释为 37.0 %,未解释的方差比例为 63.0 %(图 6)。土壤水分、坡度、岩石出露率以及三者之间的交互作用对退耕地 SOC 空间异质性的解释

贡献率分别为 26.0 %、10.7 %、7.2 % 以及 3.6 % ($P < 0.01$), 总的方差解释率为 57.5 %, 未解释的贡献率为 52.5 % (图 6)。

4 讨论

Chang 等^[23]在黄土高原地区的研究表明, 退耕还林之后土壤 SOC 储量显著提高, 这主要与退耕后生态系统碳输入高、土壤粘粒增加、SOC 分解率降低等有关。本研究退耕地样地退耕近 20 年, 植被和土壤的耦合协调发展^[24], 凋落物归还量大, SOC 积累量显著高于坡耕地。坡耕地土壤时常受到人为扰动, 而该区土壤主要通过有机结合态 Ca 维持团聚体稳定性, 其团聚体结合的 SOC 并不稳定, 受到干扰之后极易矿化丢失^[25], 因而其 SOC 累积量低, 退耕地 SOC 含量为坡耕地的 5.0 倍, 表明退耕后自然恢复能有效促进 SOC 的积累^[26]。

就 SOC 的空间异质性而言, 尽管坡耕地和退耕地变程范围和相似斑块半径差异不大, 但退耕地样地内取

土样点周围岩石出露率 (70.6 %) 为坡耕地 (16.8 %) 的 4.2 倍, 岩石出露率越高, 其 SOC 空间随机变异越大, 这造成退耕地块金值为坡耕地的 36.4 倍, 同时也造成退耕地块基比 (50.0 %) 明显高于坡耕地 (28 %)。植物群落的物种组成和群落中植物个体的分布格局制约着土壤元素的异质化过程^[27], 退耕地生态系统中植被经过 20 年演替, 群落物种多样性及功能群多样性较高, 易形成“肥岛效应”, 加上多种小生境发育, 导致其 SOC 空间异质性强, 而坡耕地长期以玉米为主的耕作措施导致其 SOC 空间异质性较弱。这导致退耕地基台值为坡耕地的 14.9 倍, 此与胡忠良等的研究结果一致^[28]。

就 SOC 的空间格局而言, 地形在很大程度上控制了水分、溶质和沉积物的迁移方向和通量, 从而决定了土壤性质空间发育的梯度和格局^[29-30]。未受人为干扰的喀斯特坡地, SOC 的空间分布主要受地形影响, 随坡位升高而降低^[31], 但本研究坡耕地和退耕地 SOC 皆存在“倒置”现象, 主要与不同坡位岩石出露率大小不一而人为干扰的强度不同有关。冗余分析表明岩石出露率和坡位显著控制坡耕地 SOC 空间分布格局, LSD 检验表明坡耕地岩石出露率中坡位 (26.1 %) 高于上坡 (15.8 %) 以及显著高于下坡 (10.3 %) ($P < 0.05$) (表 1), 岩石出露率高的中坡位地段土地覆盖类型主要以草地、矮灌丛为主, 玉米种植密度和耕作管理强度较低, 导致 SOC 在样地中坡位呈现出单个高值中心, 而上坡位和下坡位玉米种植密度和耕作强度较大, 呈现有多个低值中心。

岩石出露率也显著控制退耕地 SOC 空间分布格局, LSD 检验表明样地岩石出露率中坡位 (72.4 %) 与上坡位 (76.8 %) 显著高于下坡位 (64.3 %) ($P < 0.05$) (表 1), 而样地退耕前曾具有长期耕作历史, 岩石出露率高的坡位耕作困难而耕作强度低, 因而呈现出 SOC 中坡和上坡高于下坡的“倒置”格局。需要注意的是, 由于坡位与样地土壤水分存在协同性, 在土壤水分影响下, 坡位对退耕地 SOC 空间格局的方差解释没有达到显著水平。以往研究认为喀斯特地区土层厚度与土壤有机碳呈显著负相关^[15], 但本研究并未发现土层厚度直接决定 SOC 的空间分布格局。同时, 植被通过凋落物归还, 改变树下温度和湿度等微环境, 影响土壤发育和土壤有机碳积累^[32]。但退耕地生态系统中植被盖度对 SOC 空间分布格局影响并不显著, 主要因为退耕地基岩广泛出露, 造成凋落物和营养元素在石面和土面间的再次分配, 掩盖了植被盖度对 SOC 的影响。

土地覆盖类型对坡耕地 SOC 空间异质性的单独贡献率最高, 为坡位与岩石出露率的 1.4 倍和 2.0 倍, 而各因子的交互作用对坡耕地 SOC 空间异质性的贡献率为样地土地覆盖类型、坡位、裸岩率单独贡献率的 1.9 倍、2.7 倍和 3.7 倍, 说明各环境因子中土地覆盖类型及各因子的交互作用对坡耕地 SOC 空间格局的影响占主

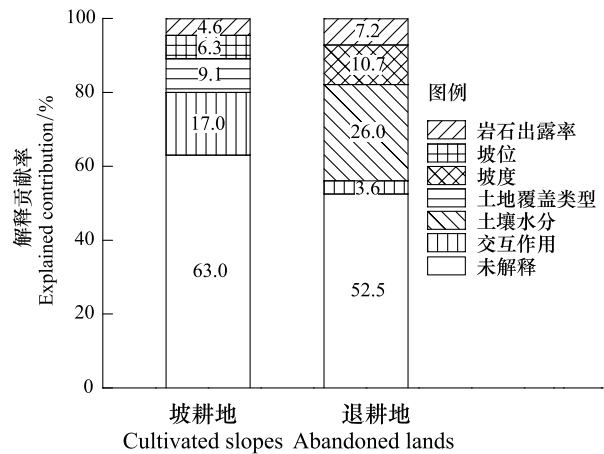


图 6 环境因子方差分解结果柱状图

Fig. 6 Results of variation partitioning for environment factors

CS: 坡耕地 cultivated slopes, AL: 退耕地 abandoned lands

导。在 SOC 空间分布格局方面,坡耕地长期的耕作管理导致 SOC 空间分布不连续,高强度的人为干扰使整个空间格局较破碎,这一结果与同一研究区农业耕作干扰样地 SOC 空间分布格局相似^[33]。退耕地土壤水分对 SOC 空间格局单独贡献率为坡度与岩石出露率的 2.4 倍和 3.6 倍,说明各环境因子中土壤水分对退耕地 SOC 空间格局占主导,经过近 20 年的植被恢复,其整个空间格局呈现凸形,此与喀斯特木论自然保护区次生林样地 SOC 的空间分布格局相似^[33]。此外,冗余分析和偏冗余分析表明各环境因子对坡耕地和退耕地未解释的方差比例分别为 63 % 和 52.5 %,说明仍有其他未被选入的环境因子控制 SOC 的空间格局。

5 结论

本研究对比分析了典型喀斯特地区退耕地和坡耕地 SOC 空间异质特征并定量解析了 SOC 的主要环境影响因子,结果表明尽管喀斯特地区土壤具有土层薄且不连续,多种小生境发育等特点,但 SOC 含量仍具有明显的空间结构和空间连续性。两者的拟合模型皆为指数模型,相似斑块的平均半径和变程差异不大,但 SOC 的异质性结构存在明显差异,退耕地的块金值与块基比分别为坡耕地的 36.4 倍与 1.8 倍,说明在样地尺度内退耕地 SOC 的随机变异较高,其对空间变异的贡献率也较高。退耕地的基台值为坡耕地的 14.9 倍,说明退耕地空间异质性较强,表明随着植被恢复和物种多样性的增加, SOC 空间异质性增强。冗余分析和偏冗余分析结果表明坡耕地和退耕地 SOC 空间格局的主要影响因子存在较大差异,土地覆盖类型、坡位、岩石出露率以及三者的交互作用显著控制着坡耕地 SOC 的空间格局,土壤水分、坡度、岩石出露率以及三者的交互作用显著控制退耕地 SOC 的空间格局。以上结果表明,在生态恢复过程中应注重小尺度上的生态过程以及基岩的空间出露特征,结合小生境发育特点和分布格局,进行多种功能型植物的复合配置,以实现退化土壤的快速修复和土壤生态功能整体提升。

参考文献 (References):

- [1] 程晓莉, 安树青, 李远, 卓元午, 管永健, 刘世荣. 鄂尔多斯草地退化过程中个体分布格局与土壤元素异质性. 植物生态学报, 2003, 27(4): 503-509.
- [2] Simón N, Montes F, Díaz-Pinés E, Benavides R, Roig S, Rubio A. Spatial distribution of the soil organic carbon pool in a Holm oak dehesa in Spain. Plant and Soil, 2013, 366(1/2): 537-549.
- [3] 袁海伟, 苏以荣, 郑华, 黄道友, 吴金水. 喀斯特峰丛洼地不同土地利用类型土壤有机碳和氮素分布特征. 生态学杂志, 2007, 26(10): 1579-1584.
- [4] Rodríguez A, Durán J, Covelo F, Fernández-Palacios J M, Gallardo A. Spatial pattern and variability in soil N and P availability under the influence of two dominant species in a pine forest. Plant and soil, 2011, 345(1/2): 211-221.
- [5] 陈朝, 吕昌河, 范兰, 武红. 土地利用变化对土壤有机碳的影响研究进展. 生态学报, 2011, 31(18): 5358-5371.
- [6] Rezaei S A, Gilkes R J. The effects of landscape attributes and plant community on soil chemical properties in rangelands. Geoderma, 2005, 125(1/2): 167-176.
- [7] Wu J G. Key concepts and research topics in landscape ecology revisited: 30 years after the Allerton Park workshop. landscape Ecology, 2013, 28(1): 1-11.
- [8] Ettema H C, Wardle A D. Spatial soil ecology. Trends in Ecology & Evolution, 2002, 17(4): 177-183.
- [9] 苏松锦, 刘金福, 何中声, 洪伟, 张金彪. 格氏栲天然林土壤养分空间异质性. 生态学报, 2012, 32(18): 5673-5682.
- [10] 刘方, 王世杰, 罗海波, 刘元生, 刘鸿雁. 喀斯特森林生态系统的小生境及其土壤异质性. 土壤学报, 2008, 45(6): 1055-1062.
- [11] 张伟, 陈洪松, 王克林, 张继光. 喀斯特地区典型峰丛洼地旱季表层土壤水分空间变异性初探. 土壤学报, 2006, 43(4): 554-562.
- [12] 张伟, 王克林, 陈洪松, 张继光. 典型喀斯特峰丛洼地土壤有机碳含量空间预测研究. 土壤学报, 2012, 49(3): 601-606.
- [13] Ecclesia R P, Jobbagy E G, Jackson R B, Biganzoli F, Piñeiro G. Shifts in soil organic carbon for plantation and pasture establishment in native forests and grasslands of South America. Global Change Biology, 2012, 18(10): 3237-3251.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2002.
- [15] 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.
- [16] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用. 北京: 科学出版社, 1999.

- [17] Webster R, Oliver M A. Geostatistics for Environmental Scientists. 2nd ed. Chichester: John Wiley and Sons, 2007.
- [18] Oksanen J, Blanchet F G, Kindt R, Legendre P, Minchin P R, O'Hara R B, Simpson G L, Solymos P, Stevens M H H, Wagner H. Community ecology package. 2013-12-12. <http://cran.r-project.org>, <http://vegan.r-forge.r-project.org/>.
- [19] Viketoft M. Determinants of small-scale spatial patterns: Importance of space, plants and abiotics for soil nematodes. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 62: 92-98.
- [20] Husson F, Le S, Pages J. Exploratory multivariate analysis by example using R. Boca Raton: CRC Press Inc, 2011.
- [21] Cambardella C A, Moorman T B, Parkin T B, Karlen D L, Novak J M, Turco R F, Konopka A E. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58(5): 1501-1511.
- [22] 王绍强, 朱松丽, 周成虎. 中国土壤土层厚度的空间变异性特征. *地理研究*, 2001, 20(2): 161-169.
- [23] Chang R Y, Fu B J, Liu G H, Wang S, Yao X L. The effects of afforestation on soil organic and inorganic carbon: A case study of the Loess Plateau of China. *Catena*, 2012, 95: 145-152.
- [24] 彭晚霞, 宋同清, 曾馥平, 王克林, 杜虎, 鹿士杨. 喀斯特峰丛洼地退耕还林还草工程的植被土壤耦合协调度模型. *农业工程学报*, 2011, 27(9): 305-310.
- [25] 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.
- [26] 刘淑娟, 张伟, 王克林, 陈洪松, 舒世燕, 谭卫宁. 桂西北喀斯特峰丛洼地表层土壤养分时空分异特征. *生态学报*, 2011, 31(11): 3036-3043.
- [27] Breshears D D, Barnes F J. Interrelationships between plant functional types and soil moisture heterogeneity for semiarid landscapes within the grassland/forest continuum: a unified conceptual model. *Landscape Ecology*, 1999, 14(5): 465-478.
- [28] 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.
- [29] McKenzie N J, Ryan P J. Spatial prediction of soil properties using environmental correlation. *Geoderma*, 1999, 89(1/2): 67-94.
- [30] Herbst M, Diekkrüger B, Vereecken H. Geostatistical coregionalization of soil hydraulic properties in a micro-scale catchment using terrain attributes. *Geoderma*, 2006, 132(1/2): 206-221.
- [31] 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.
- [32] Gea-Izquierdo G, Montero G, Cañellas I. Changes in limiting resources determine spatio-temporal variability in tree-grass interactions. *Agroforestry Systems*, 2009, 76(2): 375-387.
- [33] 欧阳资文, 彭晚霞, 宋同清, 曾馥平, 王克林, 关欣, 吴海勇. 喀斯特峰丛洼地土壤有机质的空间变化及其对干扰的响应. *应用生态学报*, 2009, 20(6): 1329-1336.