

贵州喀斯特山区花椒林小生境类型 与土壤环境因子的关系

廖洪凯¹, 李娟^{1,2}, 龙健^{1*}, 张文娟^{1,2}, 刘灵飞¹

(1. 贵州师范大学 贵州省山地环境重点实验室, 贵阳 550001; 2. 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵阳 550001)

摘要:以贵州西南部典型喀斯特山区花椒林下不同小生境类型为研究对象,系统地研究了小生境类别与土壤环境因子的对应关系,结果表明:与一般土壤相比,石坑和石沟小生境土壤有机碳、活性有机碳、全氮、碱解氮和基质底物诱导呼吸量增加明显,并体现出良好的正向累积效应,而石洞、石缝和石槽则相反;土壤活性有机碳占总有机碳比例变幅范围在12.61%~15.73%之间,以石槽最高,石沟次之,一般土壤最低;不同小生境类型下,土壤团聚体均以大团聚体为主,<0.25 mm 粒级团聚体含量极为低下,不足5%。路径分析结果显示,影响基质诱导呼吸作用最重要的因素是土壤有机碳含量,土壤活性有机碳含量次之,其通径系数分别可达1.530和0.869。总体上,花椒林下小生境可划分沟坑型、一般土及槽缝型三类,与槽缝型相比,沟坑型生境类型土壤有机碳、底物诱导呼吸、全氮、碱解氮、活性有机碳分别可高出73.38%、110.26%、37.01%、44.44%和59.73%。沟坑型小生境对喀斯特山区生态恢复及农业生产的可持续发展具有一定现实意义。

关键词:喀斯特小生境;花椒林;土壤有机碳;基质诱导呼吸;冗余分析

中图分类号:X171 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2013)12-2429-07 **doi:**10.11654/jaes.2013.12.016

Soil Characteristics of Different Microhabitats of Chinese Prickly Ash in Karst Mountain Areas of Guizhou Province

LIAO Hong-kai¹, LI Juan^{1,2}, LONG Jian^{1*}, ZHANG Wen-juan^{1,2}, LIU Ling-fei¹

(1. Guizhou Key Laboratory of Mountain Environment, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China; 2. Department of Geography and Environment Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China)

Abstract: The Chinese prickly ash is an economically important plant for water and soil conservation. An investigation was carried out into soil characteristics of different microhabitats of the Chinese prickly ash in the typical Karst region, southwest Guizhou Province. Compared with the normal soils in the region, soil organic carbon (SOC), labile organic carbon (LOC), total nitrogen (TN), alkaline hydrolysis nitrogen (AN), and substrate-induced respiration (SIR) were all significantly higher in the stone gully and stone pit shaped microhabitats, whereas lower in stone crevice, stone cavern, and stone groove ones. The proportion of LOC to total SOC ranged from 12.61% to 15.73%, with the highest in stone groove, followed by stone gully, and lowest in normal soil. Large aggregates were dominant, while <0.25 mm aggregates was less than 5%. Path analyses showed SOC content was the most important factor affecting SIR, followed by LOC, with path coefficients of 1.530 and 0.869 for SOC and LOC, respectively. The microhabitats in Chinese prickly ash could be divided into three types, i.e. gully-pit type, normal soil, and groove-crevice. The contents of SOC, SIR, TN, AN, and LOC in soils of gully-pit shaped microhabitats significantly increased by 73.38%, 110.26%, 37.01%, 44.44%, and 59.73%, respectively, compared with those of the groove-crevice shaped ones. These results suggest that constructing gully-pit shaped microhabitats via engineering means, would be a good approach to ecological restoration and agricultural sustainability in Karst region.

Keywords: Karst microhabitat; Chinese prickly ash; soil organic carbon; substrate-induced respiration

收稿日期:2013-05-15

基金项目:国家自然科学基金(40971160, 31360121);贵州省学位与研究生教育教学改革研究项目(黔财教[2011]231号);贵州师范大学资助博士研究生项目;贵州省科技厅-贵州师范大学联合基金项目(黔科合J字LKS[2012]25号)

作者简介:廖洪凯(1987—),男,广西桂林人,硕士,助理研究员,主要从事喀斯特土壤生态学研究。E-mail:liaohongkai66@163.com

*通信作者:龙健 E-mail:longjian0022@163.com

喀斯特与黄土、沙漠、寒漠并列为我国四大生态脆弱区^[1]。喀斯特山区地表破碎,土壤浅薄,土被连续性差,且大多数土壤均留存于地表发育的石坑、石缝和石洞等小生境中,使得喀斯特地区原本有限的土壤资源显得弥足珍贵^[2]。同时,不同小生境由于土壤环境因子差异较大^[3],使土壤存在较大的空间异质性^[4],从而增加了喀斯特农业生产或生态恢复的不确定因素。近年来,针对喀斯特地区小生境广布的特点,一些学者围绕小生境土壤有机碳、土壤质量、类别划分及代表性取样方法等系统地进行了研究^[5-8],取得了一系列研究成果。然而这些研究大多只关注喀斯特原生森林生态系统,而对人为重建模式下的的小生境系统鲜有报道。随着国家退耕还林(草)政策的顺利实施,喀斯特山区大量的耕坡地弃耕,或改种水土保持经济林,势必对喀斯特山区土壤有机碳及其他土壤环境因子产生深远的影响。系统研究人为重建模式下小生境生态系统土壤环境因子的分布特征及其相互关系,有助于进一步认识喀斯特系统小生境土壤的固碳潜力及其生态有效性。

花江喀斯特峡谷位于贵州省西南部,该区域基岩出露,风化剥蚀作用剧烈,地表破碎,发育的小生境类型对整个西南喀斯特山区具有良好的代表性。由于之前土地的过度过牧、樵采以及不合理的农业土地布局,使得该区域一度处于极度石漠化边缘。自 20 世纪 90 年代以来,随着青壮年劳动力的外出务工,大量耕坡地被改种为易于管理的花椒林地,使区域的生态得以有效恢复,并在一定程度上抑制了石漠化进程,同时也为国家退耕还林(草)政策的实施提供了便利条件。花椒林作为喀斯特地区特色水土保持经济林,在驱动喀斯特石漠化地区朝良性发展以及增加农民纯收入方面意义重大^[9]。基于此,本研究以花江喀斯特峡谷花椒林下的小生境为研究对象,结合数量生态学的研究手段,系统地研究了小生境类别与土壤环境因子(土壤容重、有机碳、全氮、碱解氮、活性有机碳、基质底物诱导呼吸量、团聚体组成等)的相互关系及累积特征,旨在为巩固喀斯特水土保持成果及指导合理利用土地资源提供一定的理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于贵州省安顺地区关岭县花江干热河谷小流域内(北纬 25°38'~25°41',东经 105°43'~105°46'),海拔在 500~800 m 之间,该地区碳酸盐类岩石

占 78.45%,河谷深切,地下水深埋,光热资源丰富,降水分布极其不均,5—10 月降水量占全年降水量的 83%,气候垂直变异明显。调查区域内森林覆盖率低下,不足 5%,基岩裸露率在 50%~80%之间。区域内成土母岩以白云质灰岩、泥质灰岩为主,土壤类型多以黑色石灰土和棕黄色石灰土为主,土壤 pH 介于 6.5~8.0 之间。与常态地貌相比,研究区地表破碎,发育有完整的石缝、石坑、石沟等小生境类型。

1.2 样品采集与处理

2011 年 6 月在保证立地条件基本一致的前提下,在研究区域内设置 3 块独立的花椒林样地作为研究对象,每块花椒林内设置一个 20 m×20 m 的样方。土壤样品分为一般土壤(CK)和小生境土壤进行采集。一般土壤样品按照“S”形在每个样方中设置 5~7 个样点,取样深度在 0~20 cm 间,并混合制成 1 个土样。小生境按照刘方等^[7]的研究方法进行划分,分别选取花椒林地中石缝(SF,出露的岩石裂隙或溶蚀裂隙)、石坑(SK,出露的岩石溶蚀凹地)、石沟(SG,出露的岩石溶蚀沟或侵蚀沟)、石槽(SC,出露的岩石溶蚀或侵蚀的半开放凹槽)和石洞(SD,出露的岩层或岩石水平突出构成的半开放洞穴)共 5 种小生境为研究对象。由于小生境空间分布的规律性较弱,小生境土壤样品的采集采用随机取样法,每个样方各小生境均采集 5~7 个土壤样本,取样深度在 0~20 cm 间,并按同种小生境类别制成一个土样。土样带回实验室后,充分混匀,挑除可见的残根及凋落物,一部分过 2 mm 筛后于 4℃保存,另一部分室内风干,用于土壤有机碳、活性有机碳等指标的测试。

1.3 分析测试与计算

土壤有机碳、容重、全氮、碱解氮和团聚体组成(干筛)的测定方法依据《土壤农业化学分析方法》^[10];土壤活性有机碳测定采用高锰酸钾氧化法^[11];基质诱导呼吸量的测定采用封闭式气相色谱法^[12],具体步骤如下:称取相当于 25.0 g 烘干土重的新鲜土样 3 份,放入 250 mL 磨口三角瓶中,按每克土壤加入 6 mg 葡萄糖计算,加入葡萄糖与滑石粉混合物,充分与土壤混匀,在通风处放置约 30 min。在培养前后分别用 GC2010 型气相色谱仪测定三角瓶内 CO₂ 浓度。本研究采用平均重量直径(MWD)表示团聚体的尺寸分布,计算公式如下:

$$MWD = \sum_{i=1}^n X_i W_i$$

式中: X_i 表示各粒径的平均直径; W_i 表示留在筛子上

土壤质量占全部样品质量的比例。

1.4 数据统计分析

试验数据应用 Excel 和 DPS 6.55 软件进行处理,显著性检验用 LSD 法进行分析。运用 CANOCO 4.5.1 软件(Microcomputer Power, Ithaca, USA)对土壤环境因子与小生境样本进行冗余分析(RDA),采用 499 次的蒙特卡罗排列检验(Monte-Carlo Permutation test, 499 permutations, reduced model)进行显著性检验^[13]。

2 结果与分析

2.1 不同小生境土壤基础养分及团聚体组成特征

花椒林下不同小生境中土壤有机碳、全氮及碱解氮含量存在较大差异(表 1)。与一般土壤相比,石沟和石坑土壤有机碳含量分别增加了 12.00%和 14.06%,而石槽、石缝和石洞则分别减少了 39.94%、27.16%和 37.33%。与土壤有机碳相似,土壤全氮和碱解氮含量均表现为石沟和石坑含量最高,一般土壤相对居中,石槽、石缝和石洞相对较低,并均达到显著差异水平($P<0.05$)。不同小生境碳氮比变幅介于 10~15 之间,石坑最高,一般土壤次之,石缝最低。此外,与一般土壤相比,石沟、石坑和石缝土壤容重分别降低了 16.79%、5.34%和 11.45%,而石槽和石洞与一般土壤较为接近(表 1)。

花椒林下不同类型小生境土壤团聚体含量主要集中在>0.5 mm 粒级,其含量高达 85%以上(表 2)。与

一般土壤相比,石缝和石坑>5 mm 粒径团聚体分别增加了 28.95%和 73.83%。然而在 1~0.5 mm 粒径,石缝和石坑较一般土壤分别减少了 22.48%和 41.55%。此外,与一般土壤相比,石沟和石洞土壤主要增加了 2~1 mm 粒径团聚体含量,增幅分别为 16.99%和 33.83%。不同生境类别下,<0.5 mm 粒级团聚体占全土比例十分低,尤其以<0.25 mm 粒径团聚体最低,不足 5%。不同小生境土壤团聚体平均重量直径变化范围介于 2.63~3.77 mm 之间,大小排序为石坑>石缝>石槽=一般土壤>石沟>石洞,并达显著差异水平($P<0.05$)。

2.2 小生境对土壤活性有机碳及底物诱导呼吸的影响

不同小生境类型下土壤活性有机碳含量及底物诱导呼吸差异显著(图 1)。石沟和石坑土壤活性有机碳及底物诱导呼吸保持了相对较高的含量水平,而石缝、石槽及石洞小生境则含量较低。与一般土壤相比,石沟和石坑土壤活性有机碳含量分别增加了 38.64%和 33.64%,而石洞、石缝和石槽小生境则分别降低了 27.50%、3.41%和 13.64%。石坑土壤底物诱导呼吸大小分别显著高出石槽、石缝和石洞 1.48、1.22 和 1.42 倍,石沟和一般土壤底物诱导呼吸大小保持在 26 mL·kg⁻¹·h⁻¹ 左右,其含量大小仅次于石坑,且明显高于石槽、石缝和石洞小生境。

有研究表明,土壤活性有机碳含量占土壤有机碳的比率越高,土壤碳的活性越大、稳定性越差^[14],它比活性有机碳总量更能反映不同环境条件下土壤碳行

表 1 不同小生境下土壤养分及土壤容重
Table 1 Soil nutrients and bulk density in different microhabitats

测定项目 Items	CK	SC	SF	SG	SK	SD
SOC/g·kg ⁻¹	40.91±2.80ab	24.57±1.54c	29.80±4.08bc	45.82±6.77a	46.66±5.76a	25.64±2.75c
TN/g·kg ⁻¹	3.14±0.31abc	2.17±0.18c	3.06±0.56abc	3.61±0.28a	3.36±0.26ab	2.39±0.27bc
AN/g·kg ⁻¹	0.22±0.03ab	0.15±0.03b	0.20±0.03ab	0.23±0.05ab	0.28±0.03a	0.19±0.04ab
C/N	13.12±0.45a	11.41±0.64a	10.49±2.60a	12.67±1.42a	14.33±2.98a	10.85±1.14a
BD/g·cm ⁻³	1.31±0.05a	1.31±0.09a	1.16±0.09a	1.09±0.09a	1.24±0.17a	1.36±0.10a

注:表中数据为平均值±标准误差,同一行不同小写字母表示小生境间达显著差异水平($P<0.05$)。

表 2 不同小生境下土壤团聚体组成
Table 2 Distribution of soil aggregates in different microhabitats

小生境 Microhabitats	团聚体粒径范围 Distribution of aggregate sizes/%						平均重量直径 MWD /mm
	> 5 mm	5~2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	<0.25 mm	
CK	18.34±0.68ab	23.71±1.51a	18.83±2.59bc	25.80±1.70a	9.72±1.95a	2.19±0.62a	2.81±0.04b
SC	18.44±3.38ab	22.50±1.29a	18.01±1.05cd	26.90±1.64a	11.35±2.99a	2.49±0.80a	2.81±0.16b
SF	23.65±2.04ab	28.71±0.98a	18.78±0.70bc	20.00±1.17a	6.78±0.85a	1.95±0.41a	3.24±0.10ab
SG	17.17±3.39b	22.48±3.79a	22.03±0.23ab	27.05±3.88a	8.22±2.18a	2.56±0.83a	2.79±0.20b
SK	31.88±8.54a	26.84±4.14a	14.29±1.24d	15.08±4.99a	8.04±4.20a	3.16±1.78a	3.77±0.39a
SD	13.77±3.99b	28.81±6.70a	25.20±0.13a	23.54±7.02a	7.02±3.19a	1.17±0.43a	2.63±0.37b

注:表中数据为平均值±标准误差,同一列不同小写字母表示小生境间达显著差异水平($P<0.05$)。

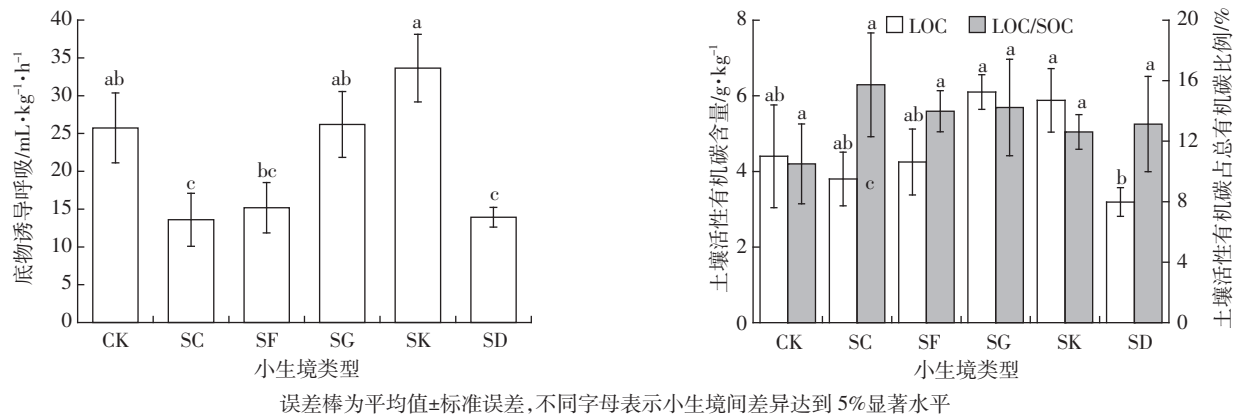


图 1 不同小生境下土壤 LOC、SIR 及 LOC/SOC 的变化

Figure 1 Soil labile organic carbon(LOC), substrate-induced respiration(SIR) and percentages of LOC over SOC in different microhabitats

为的结果^[15]。本研究中,LOC/SOC 的变化范围介于 12.61%~15.73%之间,变幅相对较小,且各小生境类别下均未达到显著差异水平,具体大小排序为石槽>石沟>石缝>石洞>石坑>一般土壤。

2.3 土壤因子对小生境土壤底物诱导呼吸的影响

各类小生境土壤因子的简单相关性分析结果表明(表 3),土壤有机碳、全氮、活性有机碳和底物诱导呼吸作用呈两两显著或极显著正相关关系,而>0.25 mm 团聚体以及土壤容重与各项土壤因子间的相关性不显著。此外,底物诱导呼吸还与碱解氮和碳氮比呈极显著或显著相关,土壤团聚体平均重量与土壤有机碳和碱解氮呈显著正相关。

采用通径分析的手段探讨了小生境土壤基质底物诱导呼吸作用的影响因子,结果表明(表 4)土壤有机碳含量影响土壤底物诱导呼吸的直接通径系数最大,土壤活性有机碳含量次之。土壤全氮、碱解氮、碳氮比和平均重量直径的直接通径系数较小,但它们通过土壤有机碳影响底物诱导呼吸作用的间接通径系

数均较大。该结果从侧面反映出土壤有机碳不仅直接影响底物诱导呼吸作用,而且在一定程度上制约了其 余土壤环境因子对底物诱导呼吸的影响。

2.4 基于冗余分析的小生境类别划分

根据不同小生境土壤环境因子的累积特点,将不同小生境进行再次归类,对于喀斯特山区合理利用有限的土地资源有重要现实意义。本研究采用冗余分析(RDA)的手段,不仅能直观反映土壤环境因子与小生境的相互关系,而且可进一步对小生境类别进行宏观划分。在冗余分析中,箭头之间的夹角代表土壤环境因子间的相关性大小,夹角越小相关程度越高。样方在箭头垂直方向上的投影代表该样方中土壤因子多度值的大小,投影长度越长,多度值越大。在本研究中,RDA 第一排序轴与土壤有机碳、活性有机碳、土壤全氮、碱解氮等土壤重要养分因子呈正相关关系(图 2),沿第一排序轴正方向,反映小生境土壤环境状况是一个逐渐改善的过程。石沟和石坑小生境样本均在 RDA 排序图第一轴的正方向,并与土壤有机碳、

表 3 小生境下土壤环境因子间的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between soil environmental factors in different microhabitats

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9
X2	0.637**								
X3	0.672**	0.648**							
X4	0.660**	-0.146	0.212						
X5	0.623**	0.479*	0.272	0.352					
X6	-0.327	-0.157	-0.414	-0.268	0.505*				
X7	-0.171	-0.185	-0.001	-0.031	-0.097	0.100			
X8	0.461*	0.337	0.515*	0.341	0.337	-0.183	0.279		
X9	-0.236	-0.352	-0.072	-0.001	0.029	0.342	-0.023	-0.180	
SIR	0.899**	0.589**	0.635**	0.570*	0.629**	-0.242	-0.353	0.394	-0.105

注:*表示 $P<0.05$,**表示 $P<0.01$;X1:土壤有机碳;X2:土壤全氮;X3:土壤碱解氮;X4:碳氮比;X5:土壤活性有机碳;X6:活性有机碳占有机碳比例;X7:>0.25 mm 团聚体比例;X8:平均重量直径;X9:土壤容重;SIR:底物诱导呼吸量。下同。

表 4 小生境土壤环境因子对底物诱导呼吸的系数
Table 4 Path coefficients of substrate-induced respiration to soil environmental factors in different microhabitats

	X1→SIR	X2→SIR	X3→SIR	X4→SIR	X5→SIR	X6→SIR	X7→SIR	X8→SIR	X9→SIR	总和
X1	1.530*	-0.734	0.034	-0.746	0.541	0.203	0.038	0.047	-0.013	0.899
X2	0.974	-1.152*	0.032	0.165	0.416	0.097	0.041	0.034	-0.019	0.589
X3	1.028	-0.746	0.050*	-0.240	0.236	0.257	0.000	0.052	-0.004	0.635
X4	1.009	0.168	0.011	-1.131*	0.306	0.167	0.007	0.034	0.000	0.570
X5	0.952	-0.551	0.014	-0.398	0.869*	-0.314	0.021	0.034	0.002	0.629
X6	-0.499	0.180	-0.021	0.303	0.439	-0.622*	-0.022	-0.019	0.018	-0.242
X7	-0.261	0.213	0.000	0.035	-0.084	-0.062	-0.221*	0.028	-0.001	-0.353
X8	0.705	-0.388	0.026	-0.385	0.293	0.114	-0.062	0.101*	-0.010	0.394
X9	-0.361	0.405	-0.004	0.001	0.025	-0.212	0.005	-0.018	0.054*	-0.105

注:* 为直接通径系数,其余为间接通径系数。

活性有机碳、全氮、碱解氮等土壤重要的养分因子相对应,体现出较高的多度值,表现出较高的生态有效性。与此相反,石槽、石缝和石洞小生境样本位于 RDA 图第一排序轴的负方向, 主要与土壤团聚体结构和容重相对应,而与土壤重要养分因子呈现反向关系。一般土壤样本位于 RDA 排序图第一排序轴的上方,其在土壤环境因子上投影的多度值表现出相对中立的特征(图 2)。基于 RDA 的排序结果,本研究将花椒林下的小生境划分为三大类,即:一般土、沟坑型和

槽缝型。均值比较结果显示(表 5),与槽缝型相比,沟坑型生境类型土壤有机碳、底物诱导呼吸、全氮、碱解氮、活性有机碳分别可高出 73.38%、110.26%、37.01%、44.44%和 59.73%。

3 讨论

贵州喀斯特山区岩溶溶蚀作用十分强烈,土壤大多留存于石缝、石沟和石槽等小生境中,土壤厚度深浅不一,由于不同小生境环境因子(光、热和水分条件)也存在着极为强烈的异质性,大大增加了喀斯特山区表层土壤在水平方向上的变异。王世杰等^[6]对贵州茂兰喀斯特原始森林不同小生境土壤有机碳的研究显示,样地内土壤有机碳的变幅范围高达 40.1~203.5 g·kg⁻¹。本研究中花椒林不同小生境土壤有机碳的变幅范围在 25.57~46.66 g·kg⁻¹ 之间,与该地区其他研究结果基本一致^[16-17]。几种小生境中,石坑和石沟小生境土壤有机碳含量相对较高,而石缝、石槽和石洞相对较低。与石缝和石洞等小生境相比,石沟和石坑由于负水平分布于地表,其生境的状态相对开放,受流水的搬运作用及近地表风的影响,使得植被凋落物极易在其内发生累积。凋落物的生物化学降解是土壤有机碳的重要来源,直接影响土壤有机碳含量。叶

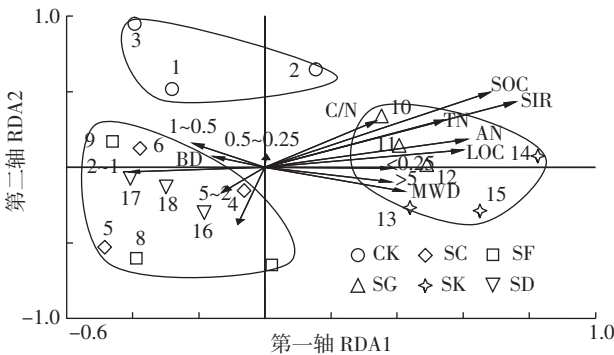


图 2 花椒林小生境样方与土壤环境因子的冗余分析排序图
Figure 2 Ordination diagram of redundancy analysis(RDA) for soil environmental factors of microhabitats in Chinese prickly ash orchard

表 5 三类小生境土壤环境因子的变幅范围
Table 5 Ranges of soil environmental factors in three types of microhabitats

类别	SOC/g·kg ⁻¹	SIR/mL·g ⁻¹ ·h ⁻¹	LOC/g·kg ⁻¹	TN/g·kg ⁻¹	AN/g·kg ⁻¹	> 0.25 mm/%	MWD/mm	BD/g·cm ⁻³
一般土	35.55~45.02 (40.91 a)	21.00~34.97 (25.73a)	2.82~7.10 (4.40ab)	2.6~3.68 (3.14ab)	0.17~0.26 (0.22a)	95.31~98.23 (96.40a)	2.72~2.85 (2.81a)	1.25~1.42 (1.31a)
沟坑型	34.50~58.18 (46.24a)	17.59~41.77 (29.92a)	4.35~7.25 (5.99a)	2.87~4.13 (3.48a)	0.17~0.33 (0.26a)	92.65~98.88 (96.54a)	2.44~4.23 (3.28a)	0.97~1.57 (1.16a)
槽缝型	21.84~35.32 (26.67b)	9.72~21.23 (14.23b)	2.51~5.22 (3.75b)	1.83~4.00 (2.54b)	0.11~0.27 (0.18a)	95.24~98.96 (97.82a)	2.03~3.31 (2.90a)	1.02~1.54 (1.28a)

注:括号内同一列不同小写字母表示小生境间达显著差异水平。

岳等^[18]证实了花江喀斯特峡谷地带三类小生境类型(石沟、土面和石槽)下,石沟小生境更有利于土壤动物的生存,从而为石沟土壤有机碳的累积起到了重要的桥梁作用。土壤活性有机碳可以表征土壤物质特征,作为土壤潜在生产力和土壤管理措施变化引起土壤有机质变化的早期指标^[19-20],主要指土壤中具有一定溶解性,在土壤中移动速度比较快、不稳定、易氧化、易分解,其形态和空间位置对植物、微生物活性较高的那一部分碳素^[21]。本研究显示,花椒林下不同小生境土壤活性有机碳变幅在 $3.19\sim 6.10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,并且与小生境土壤有机碳的变化规律相一致,表明小生境土壤活性有机碳含量很大程度上取决于土壤有机碳含量的多少。各小生境土壤活性有机碳占土壤有机碳的比例十分接近,变幅范围在 $12.61\%\sim 15.73\%$ 之间,变幅相对适中。该结果与卢红梅等^[22]对该区域研究结果基本一致,但远远低于黄宗胜等^[23]对茂兰喀斯特原始森林($52.62\%\sim 66.04\%$)以及朱志建等^[14]对浙江湖州不同森林生态系统($45.74\%\sim 52.40\%$)的研究结果。这反映了在林地生态系统下,土壤有机碳的稳定性较差,可能更易受到外界的干扰而发生有机碳损耗。

土壤底物诱导呼吸量是表征土壤微生物生物量的重要指标。本研究中,不同小生境下,石坑和石沟底物诱导呼吸量相对较高,而石缝、石槽及石洞则相对低下,反映出生境相对开放的石坑和石沟等生境类型不仅可使土壤有机碳积累,而且是微生物量的重要聚集场所。通径分析结果显示,不同生境类型下,土壤有机碳是直接影响底物诱导呼吸的土壤因子,并且土壤全氮、碱解氮、碳氮比、活性有机碳、平均重量直径也是以土壤有机碳为媒介间接影响土壤诱导呼吸。王会利等^[24]对退化红壤马尾松恢复林地的研究显示,影响微生物生物量最重要的是土壤有机碳含量。徐秋芳等^[25]对浙江临安玲珑山林场研究也表明,影响微生物生物量及其生物学性质的主要因子是土壤有机碳。由此可见,与非喀斯特地区相似,喀斯特地区保持良好的土壤有机碳含量水平,对于维护土壤肥力水平及土壤微生物生态系统平衡具有重要现实意义。

与非喀斯特地区相比,贵州喀斯特地区“石多土少”的现状严重限制了农业的发展^[2]。综合考虑各类小生境的特点,设法增加喀斯特地区小生境的农业生产贡献显得尤为重要。本研究利用数量生态学的手段从土壤环境因子的角度将花椒林下的小生境划分为三大类,即:一般土、沟坑型和槽缝型。综合本研究所涉及的土壤因子多度值及累积效应特征,三类小生境可

排序为:沟坑型>一般土>槽缝型。沟坑型生境开放,土壤有机碳、活性有机碳及养分等含量较高,具有良好的生态有效性及农业利用价值。刘方等^[7]通过聚类分析手段将茂兰喀斯特森林的小生境划分为石洞型、石缝型、土面石沟型和石坑型四种类别。虽然小生境类别划分的结果不尽一致,但其研究结果也认为土面石沟型和石坑型两大类生境土壤整体肥力水平较高。为此,结合喀斯特地区土壤浅薄不连续的特点,本研究初步设想可通过一定的工程手段人工设置一定的石沟、石坑,或者在坡面采用沟坑串连的模式作为喀斯特山区生态恢复植被或农作物生长的基本载体,从而为喀斯特山区水土保持以及农业增产增收提供保障。

4 结论

贵州喀斯特山区花椒林生态系统中,石坑和石沟小生境土壤有机碳、活性有机碳和基质底物诱导呼吸等土壤环境因子均高于石缝、石洞和石槽小生境类型,并且冗余分析显示石沟和石坑小生境下具备进一步累积的趋势,体现出更高的生态有效性,而石缝、石槽和石洞则相反。花椒林下小生境可划分为三类,根据其土壤环境因子的多度值及累积效应,总体按照沟坑型、一般土和槽缝型的梯度依次降低。为此,本研究初步认为在喀斯特山区人为设置一定的石沟或石坑,对于喀斯特山区水土保持及农业可持续发展将具有重要现实意义。

参考文献:

- [1] 龙 健,江新荣,邓启琼,等. 贵州喀斯特地区土壤石漠化的本质特征研究[J]. 土壤学报, 2005, 42(3): 419-427.
LONG Jian, JIANG Xin-rong, DENG Qi-qiong, et al. Characteristics of soil rocky desertification in the Karst region of Guizhou Province[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(3): 419-427.
- [2] 刘淑娟,张 伟,王克林,等. 桂西北喀斯特峰丛洼地表层土壤养分时空分异特征[J]. 生态学报, 2011, 31(11): 3036-3043.
LIU Shu-juan, ZHANG Wei, WANG Ke-lin, et al. Spatiotemporal heterogeneity of topsoil nutrients in Karst peak-cluster depression area of Northwest Guangxi, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(11): 3036-3043.
- [3] 朱守谦,何纪星,魏鲁明,等. 茂兰喀斯特森林小生境特征研究[M]//朱守谦. 喀斯特森林生态研究(Ⅲ). 贵阳:贵州科学技术出版社, 2003: 24-29.
ZHU Shou-qian, HE Ji-xing, WEI Lu-ming, et al. Study on the features of microhabitats in Maolan Karst forest[M]//ZHU Shou-qian. Ecological research on Karst forest(Ⅲ). Guiyang: Guizhou Science and Technology Press, 2003: 24-29.
- [4] 廖洪凯,龙 健,李 娟,等. 西南地区喀斯特干热河谷地带不同植

- 被类型下小生境土壤碳氮分布特征[J]. 土壤, 2012, 44(3):421-428.
- LIAO Hong-kai, LONG Jian, LI Juan, et al. Distribution characteristics of soil carbon and nitrogen under different vegetation types in Micro-habitats of Karst dry-hot valley region of Southwestern China[J]. *Soils*, 2012, 44(3):421-428.
- [5] 罗海波, 刘方, 刘元生, 等. 喀斯特石漠化地区不同植被群落的土壤有机碳变化[J]. 林业科学, 2009, 45(9):25-28.
- LUO Hai-bo, LIU Fang, LIU Yuan-sheng, et al. Variation of forest soil organic carbon in Karst rocky desertification area[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2009, 45(9):25-28.
- [6] 王世杰, 卢红梅, 周运超, 等. 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[J]. 土壤学报, 2007, 44(3):475-483.
- WANG Shi-jie, LU Hong-mei, ZHOU Yun-chao, et al. Spatial variability of soil organic carbon and representative soil sampling method in Maolan Karst virgin forest[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(3):475-483.
- [7] 刘方, 王世杰, 罗海波, 等. 喀斯特森林生态系统的小生境及其土壤异质性[J]. 土壤学报, 2008, 45(6):1055-1062.
- LIU Fang, WANG Shi-jie, LUO Hai-bo, et al. Micro-habitats in Karst forest ecosystem and variability of soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(6):1055-1062.
- [8] 魏源, 王世杰, 刘秀明, 等. 不同喀斯特小生境中土壤丛枝菌根真菌的遗传多样性[J]. 植物生态学报, 2011, 35(10):1083-1090.
- WEI Yuan, WANG Shi-jie, LIU Xiu-ming. Genetic diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in Karst microhabitats of Guizhou Province, China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011, 35(10):1083-1090.
- [9] 龙健, 李娟, 黄昌勇. 我国西南地区的喀斯特环境与土壤退化及其恢复[J]. 水土保持学报, 2002, 16(5):5-8.
- LONG Jian, LI Juan, HUANG Chang-yong. Soil degradation and reconstructive way on Karst environment in southwest China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 16(5):5-8.
- [10] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- LU Ru-kun. Analytical methods for soil and agro-chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [11] Saha D, Kukal S S, Sharma S. Landuse impacts on SOC fractions and aggregate stability in typic ustochrepts of Northwest India[J]. *Plant Soil*, 2011, 339:457-470.
- [12] 李振高, 骆永明, 滕应. 土壤与环境微生物研究法[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- LI Zhen-gao, LUO Yong-ming, TENG Ying. Methods of soil and environmental microbiology analysis[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [13] ter Braak C J F, Šmilauer P. CANOCO reference manual and canodraw for windows user's guide: Software for canonical community ordination (version 4.5)[M]. Ithaca: Microcomputer Power, 2002.
- [14] 朱志建, 姜培坤, 徐秋芳. 不同森林植被下土壤微生物量碳和易氧化态碳的比较[J]. 林业科学研究, 2006, 19(4):523-526.
- ZHU Zhi-jian, JIANG Pei-kun, XU Qiu-fang. Study on the active organic carbon in soil under different types of vegetation[J]. *Forest Research*, 2006, 19(4):523-526.
- [15] 荣丽, 李守剑, 李贤伟, 等. 不同退耕模式细根(草根)分解过程中C动态及土壤活性有机碳的变化[J]. 生态学报, 2011, 31(1):137-144.
- RONG Li, LI Shou-jian, LI Xian-wei, et al. Caron dynamics of root (grass root) decomposition and active soil organic carbon in various models of land use conversion from agricultural lands into forest lands[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(1):137-144.
- [16] 廖洪凯, 龙健, 李娟, 等. 喀斯特地区不同植被小生境土壤矿物组成及有机碳含量空间异质性初步研究[J]. 中国岩溶, 2010, 29(4):434-439.
- LIAO Hong-kai, LONG Jian, LI Juan, et al. Preliminary study on spatial heterogeneity of soil mineral composition and organic carbon content at different micro-habitats that under different vegetation types in Karst region[J]. *Chinese Karst*, 2010, 29(4):434-439.
- [17] 周玮, 周运超. 北盘江喀斯特峡谷区不同植被类型的土壤酶活性[J]. 林业科学, 2010, 46(1):136-141.
- ZHOU Wei, ZHOU Yun-cao. Soil enzyme activities under different vegetation types in Beipan River Karst groge district[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2010, 46(1):136-141.
- [18] 叶岳, 周运超. 喀斯特石漠化小生境对大型土壤动物群落结构的影响[J]. 中国岩溶, 2009, 28(4):413-418.
- YE Yue, ZHOU Yun-chao. Influence of microhabitat to community structure of soil macrofauna in Karst rocky desertification[J]. *Chinese Karst*, 2009, 28(4):413-418.
- [19] Blair G J, Lefroy R D B, Lisle L. Soil carbon fractions based on their deaggregation index for agricultural systems[J]. *Australian Journal of Agriculture Research*, 1995, 46:1459-1466.
- [20] Janzen H H, Campbell C A, Brandt S A, et al. Light-fraction organic matter in soils from long-term crop rotations[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56:1799-1806.
- [21] 沈宏, 曹志洪, 胡正义. 土壤活性有机碳的表征及其生态效应[J]. 生态学杂志, 1999, 18(3):32-38.
- SHEN Hong, CAO Zhi-hong, HU Zheng-yi. Characteristics and ecological effects of the active organic carbon in soil[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1999, 18(3):32-38.
- [22] 卢红梅, 王世杰. 喀斯特石漠化过程对土壤活性有机碳的影响[J]. 水土保持通报, 2009, 29(1):12-17.
- LU Hong-mei, WAN Shi-jie. Effects of active soil organic carbon on the processes of Karst rocky desertification[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2009, 29(1):12-17.
- [23] 黄宗胜, 符裕红, 喻理飞. 喀斯特森林植被自然恢复过程中土壤有机碳库特征演化[J]. 土壤学报, 2013, 50(2):84-92.
- HUANG Zong-sheng, FU Yu-hong, YU Li-fei. Characteristic evolution of soil organic carbon pool with the process of natural restoration of Karst forest vegetation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(2):84-92.
- [24] 王会利, 毕利东, 张斌. 退化红壤马尾松恢复林地土壤微生物量变化及其控制因素研究[J]. 土壤学报, 2008, 45(2):313-320.
- WANG Hui-li, BI Li-dong, ZHANG Bin. Change in microbial biomass and its controlling factors in degraded soil after reforestation of *Pinus Massoniana*[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(2):313-320.
- [25] 徐秋芳, 田甜, 吴家森, 等. 退化板栗林(套)改种茶树和毛竹后土壤生物学性质变化[J]. 水土保持学报, 2011, 25(3):180-184.
- XU Qiu-fang, TIAN Tian, WU Jia-sen, et al. Response of soil microbial properties to vegetation transformation by gradual substitution chestnut with tea and bamboo[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(3):180-184.