

喀斯特森林生态系统的小生境及其土壤异质性*

刘方^{1,2} 王世杰² 罗海波¹ 刘元生¹ 刘鸿雁³

(1 贵州大学环境与资源研究所, 贵阳 550025)

(2 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002)

(3 教育部喀斯特环境与地质灾害防治重点实验室, 贵阳 550003)

摘要 通过对贵州南部茂兰喀斯特森林生态系统中小生境的土壤进行调查及采样分析, 探讨喀斯特微地貌的土壤多样性及土壤性质的变化。结果表明: 在小生境地表微形态和微地貌空间变异的影响下, 石坑、石沟、石缝、石洞和土面的土壤分布及其性质出现明显的水平空间变异。石洞土壤砂粒含量、>5 mm 团聚体数量、容重明显高于石坑、石沟、石缝和土面的土壤, 而 <1 mm 团聚体数量、通气孔隙度及腐殖酸、全氮、全磷、有效氮的含量则相反; 石坑土壤 <1 mm 团聚体数量、通气孔隙度及有机碳、腐殖酸、全氮、有效磷、有效钾、有效铜、有效锌的含量显著高于石洞、石沟、石缝和土面的土壤, 而黏粒含量、>5 mm 团聚体数量、容重则明显低于土面、石沟和石缝的土壤; 石沟土壤的黏粒含量显著低于土面和石缝的土壤, 而 <1 mm 团聚体数量及有机碳、腐殖酸、全氮的含量则相反; 石缝土壤有机碳、有效钾的含量明显低于土面、石沟的土壤。初步将喀斯特微地貌的土壤类型分为石洞型、石缝型、土面-石沟型和石坑型, 其中土面-石沟型土壤分布最多, 其次为石缝型。

关键词 喀斯特; 森林生态系统; 小生境; 土壤性质; 异质性

中图分类号 S156.1; S157.1 **文献标识码** A

西南地区碳酸盐岩类岩石出露面积占全国的80%以上, 其中贵州的分布面积占全国的25.8%, 喀斯特地貌发育良好、类型多样。南方喀斯特森林是一种特殊森林生态系统, 其顶级群落为常绿落叶阔叶混交林, 生态系统的组成和结构复杂, 生态系统的物种多样性和结构多样性较高^[1-3]。由石灰岩、白云岩和含有其他杂质的碳酸盐岩类岩石发育的喀斯特森林土壤呈中性至微碱性, 土体不连续, 土层浅薄, 土壤的剖面形态、理化性质等都不同于地带性土壤^[4-10]。喀斯特地貌类型主要有峰林、峰丛与峰丛洼地和峰丛漏斗, 由于基岩出露面积较大, 且起伏多变, 喀斯特微地貌十分复杂, 有以出露的整体基岩为主体构成的石面、石台, 有以岩石裂隙为主体构成的石缝及以岩石溶蚀沟为主体构成的石沟、石槽, 有以岩石溶蚀凹地为主体构成的石坑, 有以岩层或岩石水平突出构成的石洞, 还有土体不连续的土面, 这些小生境类型及其组合构成了

喀斯特生境的多样性^[3]。不同小生境的生态因子差异大, 小生境植物分布复杂多样, 植被的差异不仅影响森林生态系统的养分和水分循环, 而且造成喀斯特溶蚀过程发生变化^[11,12]。

喀斯特岩层具有彼此独立而又互相联系的裂隙系统、管道系统和地下洞穴系统, 使地表和地下空间形成一个有序统一的整体。喀斯特生境的复杂性主要体现在地表出露岩石的非均匀性与地下岩石裂隙结构的多样性形成的多层生态空间结构, 而土壤是岩石、大气、水、生物等圈层的敏感交汇地带, 土壤环境与植被演替和地下水运动之间存在明显的互动响应, 其变化对喀斯特生态环境变迁与演化有着重要的影响。土壤空间的异质性不仅改变土壤养分和水分的空间分布, 同时造成植物分布格局与生长过程的变化。目前对喀斯特森林土壤的形成及其特征进行了一些研究^[4-10], 对喀斯特土壤退化机理与过程也开展了较多的研究工作^[13-16], 但

* 国家重点基础研究发展规划项目(2006CB403200)和中国科学院知识创新工程方向性项目(kzcx2-yw-306)和创新团队国际合作伙伴计划共同资助

作者简介: 刘方(1964~), 男, 贵州省天柱县人, 博士, 教授, 主要从事土壤生态学的研究。E-mail: lfang123@tom.com; 通信地址: 贵阳市贵州大学蔡家关校区环境与资源研究所; 邮编: 550025; 电话: 13595032904

收稿日期: 2007-05-17; 收到修改稿日期: 2007-11-16

对喀斯特森林生态系统中不同小生境下土壤分布及其理化性质变化方面还缺乏系统的研究。因此,本研究选择茂兰喀斯特森林区作为研究对象,将生态系统的植物-土壤-岩石作为一个整体,系统地研究喀斯特森林生态系统中不同小生境下土壤性质的水平空间变化及土壤多样性,为喀斯特地区土壤资源保护、生态环境恢复以及土地资源的可持续利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

贵州茂兰国家级喀斯特自然保护区,地理位置为东经 $107^{\circ}37' \sim 108^{\circ}18'$, 北纬 $25^{\circ}07' \sim 25^{\circ}39'$, 位于贵州高原南部斜坡,为贵州高原与桂东丘陵的过渡地带。地貌类型主要是峰丛、峰丛洼地和峰丛漏斗,平均海拔 758 m。年平均气温 18.3°C , $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温 $5\ 768^{\circ}\text{C}$, 多年平均降水量为 1 320 mm, 降雨集中分布于 4~10 月,属中亚热带季风湿润气候。贵州茂兰喀斯特森林区是目前世界上同纬度地区残存下来的一片分布集中、原生性强、相对稳定的森林生态系统,森林总面积超过 20 000 hm^2 , 具有南方喀斯特森林的代表性。调查区喀斯特森林主要的常绿和落叶种群多是混生格局,主要树种有:中华蚊母树 (*Distylium chinensrs*)、青岗栎 (*Cyclobalanopsis glauca*)、圆果化香 (*Platycarya longipes*)、多脉榆 (*Uimus castaneifolra*)、黄连木 (*Prstacia chrnensrs*)、掌叶木 (*Handeliadendron bodrnieri*)、翅荚香槐 (*Cladrastis platycarpa*) 香叶树 (*Lindera communis*)、云贵鹅耳枥 (*Carpinus pubescens*)、橙木 (*Loropetalure chinense*)、朴树 (*Celtis tetrandra*)、香椿 (*Toona sinensis*)、圆叶乌桕 (*Sapium rotundifolium*)、密花树 (*Rapanea neriifolia*)、构树 (*Broussonetia papyrifera*)、香港四照花 (*Dendrobenthamia*)、枫香 (*Liquidambar formosana*) 等,乔灌层盖度达 0.85~0.95,群落高度一般在 8~12 m。出露地层主要是下石炭系的厚层石灰岩和白云岩组成,溶蚀强烈,溶蚀作用导致石芽、溶沟、溶蚀裂隙十分发育,基岩出露率(有植被覆盖情况下岩石出露的面积占土地面积的百分率)达 30%~60%,出露的岩石起伏多变,且有大块岩石崩塌和堆积,复杂的岩石形态组合的微地形组成了石面、石台、石沟、石洞、石槽、石缝、石坑、土面等多种小生境。多数风化残余物或坡积物存在于岩石构造裂隙或出露岩石形成的沟地或凹地中,发育

的土壤以黑色石灰土、黄色石灰土为主,土层浅薄且不连续,土壤剖面构型多为 A_0 -A-R 型、A-C-R 型。

1.2 研究方法

本研究采用野外调查的方法,在地形地貌相对一致山坡中下部,选择由石灰岩发育的土壤地段进行调查。在选取 5 个代表性乔木群落上,分别设置 20 m \times 20 m 样地,采用常规群落调查方法,调查每个样地内的主要木本植物种类、胸径、树高、冠幅、株数、基岩出露率以及群落所处的坡度、坡向、坡位等;并在样地内设置样方进行草本植物调查,草本植物仅调查种类、高度、盖度。同时,在每块样地上按石面(出露基岩的岩石表面)、石沟(出露的岩石溶蚀沟或侵蚀沟)、石坑(出露的岩石溶蚀凹地)、石洞(出露的岩层或岩石水平突出构成的半开放洞穴)、石缝(出露的岩石裂隙或溶蚀裂隙)、土面(局部连续的土体表面)六种小生境类型对植被、枯落物以及土层厚度、土体构型等进行调查;在此基础上考虑土壤样品的采集。由于石面或石台上土壤稀少,未进行样品采集,在每个样地内分别对石洞、石沟、石坑、石缝、土面五种小生境的土壤采集 0~15 cm 厚的表层混合样品(每种小生境类型选取 3~5 个样点),并选择典型小生境类型用环刀法测定土壤容重。对以上每种小生境类型分别采集了 5 个土样,取回的土壤样品及时处理后在室内风干,一部分供土壤团聚体测定,另一部分磨细过 2 mm 和 0.25 mm 筛后供土壤理化分析测试。

1.3 分析测试

土壤测定项目有土壤团聚体、土壤颗粒组成、土壤孔隙度、pH、有机碳(SOC)、腐殖酸(HA)、全氮(TN)、全磷(TP)、碱解氮(N)、有效磷(P)、有效钾(K)、有效钙(Ca)和镁(Mg)以及有效铜(Cu)和锌(Zn)。其中土壤 pH 采用酸度计法,有机碳采用重铬酸钾容量法,腐殖酸采用 NaOH 溶液提取 - K_2CrO_4 溶液氧化 - FeSO_4 滴定法,全氮采用开氏定氮法,全磷采用 H_2SO_4 - HClO_4 消煮-钼蓝比色法,碱解氮采用扩散吸收法,有效磷采用 Olsen 法(NaHCO_3 溶液浸提),有效钾采用 NH_4OAc 浸提-火焰光度法,有效钙和镁采用 NH_4OAc 浸提 - EDTA 滴定法,有效铜和锌采用原子吸收分光光度法,土壤团聚体采用团粒分析仪(干筛法)测定,土壤颗粒组成采用简易比重计法测定^[17]。

1.4 数据处理

实验数据采用 DPS 软件进行统计分析。

2 结果与讨论

2.1 喀斯特森林生态系统中小生境类型及其土壤景观的变化

喀斯特森林垂直结构比较简单,乔木层多数分化为两个亚层,灌木层通常只有一层^[1,3,18]。由于喀斯特森林的小生境分布不均匀性和不连续性,与之相适应的是喀斯特森林个体与种群的分布具有极大的随机性,使水平结构极具复杂性,不同小生境在光照条件、热量条件,水分的接受、贮存、蒸发等方面有较大的差异,它们对植物分布、生长、发育的制约程度也不同,使不同的植物种类分别占领与其特性相应的小生境。受小生境地表微形态和微地貌空间变异的影响,小生境的成土条件和成土过程出现差异,形成的土壤在空间上

的分布也出现明显地变化。石洞阴暗、干燥,生长少量耐阴旱生性植物,植物根系少,枯落物少,以岩石风化残积为主,淋溶强度弱,腐殖化程度低,腐殖层不明显,土体干燥、紧实,通透性差,土层浅薄。石缝透光、较干燥,生长较多喜光旱生性植物,植物根系较多,枯落物较多,以岩石风化堆积和腐殖化为主,淋溶作用较大,有明显的腐殖层,土体较干燥、紧实,通透性较好,土层较浅薄。石沟阴蔽、湿润,生长较多喜阴湿生性植物,以岩石风化搬运堆积和腐殖化为主,枯落物数量较多,淋溶作用较弱,腐殖层较厚,土体较湿润、疏松,通透性好,土层较厚。石坑阴蔽、潮湿、肥沃,生长较多耐阴喜肥湿生性植物,植物根系多,枯落物多,以腐殖化为主,淋溶强度弱,腐殖化程度较高,腐殖层厚,土体湿润、疏松,通透性较好,土层较厚,土壤肥沃。不同小生境的土壤景观详见表 1。

表 1 喀斯特森林生态系统中不同小生境下土壤景观的变化

Table 1 Variation of soil landscape with the micro-habitat in the karst forest ecosystem

小生境 Habitat	岩体 Rock body	植被 Vegetation	枯落物 Litter fall	土壤分布 Soil distribution	土体 Soil body	土壤水 Soil water
石洞 Stone cavern	出露高度 30 ~ 100 cm, 单体面积 1 ~ 3 m ² , 总比例 5% ~ 10%	有少量蕨类, 株高 10 ~ 30 cm, 洞口边缘有灌木, 树高 0.5 ~ 1 m	少, 分布在洞口边缘, 一般厚度 1 ~ 2 cm	土壤多呈椭圆状、多边状分布在出露基岩形成的半开放的小洞穴中	成土过程以岩石风化为主, 母质为残积物, 土层厚度一般为 10 ~ 30 cm, 砾石量 20% ~ 40%, 土体为 A-C-R 型	降雨时径流水汇集, 雨后以水分蒸发为主, 常年较干燥
石缝 Crevice	出露高度 100 ~ 300 cm, 单体面积 1 ~ 3 m ² , 总比例 5% ~ 15%	有较多蕨类, 株高 20 ~ 50 cm, 乔木层较发达, 有灌木, 树高 2 ~ 5 m	较多, 厚度一般为 3 ~ 5 cm, 半分解物较多	土壤多呈深沟状分布在出露岩层形成的大裂隙中	成土过程以岩石风化和腐殖化为主, 母质为残积物和堆积物, 土层厚度一般为 50 ~ 150 cm, 砾石量 10% ~ 30%, 土体为 A-B-C、A-C-R 型	降雨、径流水及枯落物层渗透水, 以水分下渗运动为主, 常年较湿润
石沟 Gully	下降深度 30 ~ 50 cm, 单体面积 3 ~ 5 m ² , 总比例 15% ~ 30%	乔木层、灌木层较发达, 树高 2 ~ 8 m, 有草本植物和蕨类	多, 厚度一般为 5 ~ 8 cm, 半分解物多	土壤多呈浅沟状、槽状分布在出露基岩形成的斜面凹地中	成土过程以腐殖化为主, 母质为堆积物, 土层厚度一般为 20 ~ 50 cm, 砾石量 3% ~ 10%, 土体为 A ₀ -A-R、A ₀ -C-R 型	降雨、径流水及枯落物层渗透水, 以水分侧渗运动为主, 常年湿润
石坑 Pit	下降深度 50 ~ 100 cm, 单体面积 5 ~ 8 m ² , 总比例 5% ~ 10%	乔木层、草本层较发达, 树高 5 ~ 15 m, 有灌木, 植物茂盛	多, 厚度一般为 5 ~ 8 cm, 半分解物多	土壤多呈漏斗多边状分布在出露基岩形成的近水平的凹地中	成土过程以腐殖化为主, 母质为堆积物, 土层厚度一般为 30 ~ 60 cm, 砾石量 1% ~ 5%, 土体为 A ₀ -A-R、A ₀ -R 型	降雨、径流水及枯落物层渗透水, 以水分汇集为主, 旱季湿润, 雨季水分饱和
土面 Earth flatland	岩体被土层覆盖, 单体面积 10 ~ 30 m ² , 总比例 20% ~ 30%	乔木层、灌木层比较发达, 树高 5 ~ 10 m, 有草本植物	中, 厚度一般为 3 ~ 6 cm, 半分解物较多	以不连续的土层为主体, 土壤呈多边状分布在出露的岩石中间	成土过程以岩石风化和腐殖化为主, 母质为残积物, 土层厚度一般为 20 ~ 80 cm, 砾石量 10% ~ 30%, 土体为 A ₀ -A-C、A-C-R 型	降雨、径流水及枯落物层渗透水, 以水分下渗运动为主, 雨季湿润, 旱季较干燥
石面 Rocky flatland	出露高度 50 ~ 300 cm, 单体面积 2 ~ 15 m ² , 总比例 10% ~ 30%	有较多苔藓和少量蕨类植物, 株高 5 ~ 20 cm	极少, 厚度一般为 1 cm 左右	以连续的岩石为主体, 土壤呈浅沟状分布在岩石表面的小缝隙中	以苔藓残体、枯落物分解为主形成的腐殖质性土, 土层厚度一般 5 ~ 10 cm, 砾石量极少, 土体为 A ₀ -R 型	降雨和苔藓层积水, 旱季干燥, 雨季湿润

2.2 喀斯特森林生态系统中不同小生境下土壤性质的变化

喀斯特森林生态系统中小生境的多样性使土壤物理性质发生了明显的变化,从表 2 看出,不同小生境下土壤砂粒(2 ~ 0.02 mm)、粉粒(0.02 ~ 0.002 mm)和黏粒(<0.002 mm)含量的变化范围分别达 23.4% ~ 64.8%、24.7% ~ 61.3%、9.4% ~ 35.3%;石洞土壤砂粒含量明显高于石坑、石缝、石沟和土面的土壤,石坑土壤黏粒含量显著低于土面、石沟和石缝土壤,石沟土壤黏粒含量明显低于土面和石缝土壤。不同小生境下土壤中 >5 mm、5 ~ 2 mm、2 ~ 1 mm 和 <1 mm 团聚体数量的变化范围分别在 9.3% ~ 70.6%、14.6% ~ 39.6%、5.6% ~ 15.3% 和

9.1% ~ 52.4%;石洞土壤 >5 mm 团聚体数量显著高于石坑、石缝、石沟和土面的土壤,<1 mm 团聚体数量则明显低于石坑、石缝、石沟和土面的土壤,而石坑土壤团聚体数量与石洞土壤正好相反,石沟土壤 <1 mm 的团聚体数量明显多于土面和石缝的土壤。不同小生境下土壤容重的变化范围为 0.91 ~ 1.42 g cm⁻³,土壤毛管孔隙度和通气孔隙度的变化范围分别为 37.7% ~ 53.4%、4.6% ~ 25.3%;石洞土壤容重显著大于石坑、石缝、石沟和土面的土壤,土壤通气孔隙度则明显小于石坑、石缝、石沟和土面的土壤,而石坑土壤则与石洞土壤相反;石沟、石缝和土面土壤之间的容重和通气孔隙度未出现显著性差异。

表 2 喀斯特森林生态系统中不同小生境下土壤物理性质的变化¹⁾

Table 2 Variation of the soil physical properties with the micro-habitat in the karst forest ecosystem

小生境 Habitat	粒径分布 Size distribution							孔隙度 Porosity (%)		容重 Bulk density (g cm ⁻³)
	土粒 Mineral particle (%)			团聚体 Aggregates (%)				毛管孔隙 ^⑥	通气孔隙 ^⑦	
	2 ~ 0.02 mm	0.02 ~ 0.002 mm	<0.002 mm	>5 mm	5 ~ 2 mm	2 ~ 1 mm	<1 mm			
石洞 ^①	51.6 ± 10.2a	34.9 ± 7.6a	13.5 ± 4.2a	58.7 ± 9.7a	19.8 ± 5.2a	8.4 ± 1.9a	13.1 ± 13.7a	44.0 ± 2.2ab	7.5 ± 2.7a	1.30 ± 0.08a
石缝 ^②	31.9 ± 3.5b	40.3 ± 5.3a	27.9 ± 2.1b	26.8 ± 4.1bd	32.9 ± 5.1b	10.6 ± 1.9bc	29.6 ± 1.5b	46.0 ± 3.5ab	12.3 ± 3.4b	1.17 ± 0.13b
石沟 ^③	29.4 ± 3.9b	48.5 ± 2.4b	22.0 ± 1.9c	21.7 ± 4.5b	30.1 ± 4.5bc	10.4 ± 1.6bc	37.8 ± 8.0c	45.4 ± 4.2ab	14.0 ± 3.1b	1.10 ± 0.09b
石坑 ^④	31.2 ± 2.4b	54.0 ± 4.3b	14.8 ± 3.5a	13.1 ± 3.1c	26.0 ± 2.6ac	12.4 ± 2.8c	48.5 ± 2.9d	47.9 ± 4.6a	21.1 ± 3.1c	0.97 ± 0.07c
土面 ^⑤	34.3 ± 5.2b	38.4 ± 2.0a	27.3 ± 5.8b	29.4 ± 3.4d	30.2 ± 6.1bc	9.8 ± 1.7bc	30.6 ± 2.3b	41.8 ± 4.2b	14.9 ± 5.8b	1.18 ± 0.06b

1)表中数字为平均值 ± 标准差,字母为多重比较(SSR)结果,同一列中字母不同的处理之间达到 p 为 0.05 的显著性水平 Mean ± SD, and different letters in the same column mean significance in difference at $p < 0.05$ level based on multiple comparisons by SSR. ①Stone cavern; ②Crevice; ③Rocky gully; ④Stone pit; ⑤Earthy flatland; ⑥Capillary porosity; ⑦Aeration porosity

表 3 喀斯特森林生态系统中不同小生境下土壤化学性质的变化¹⁾

Table 3 Variation of soil chemical properties with the micro-habitat in the karst forest ecosystem

小生境 Habitat	pH (H ₂ O)	SOC					N					P				
		HA	TN	TP	N	P	K	Ca	Mg	Cu	Zn					
		(g kg ⁻¹)					(mg kg ⁻¹)									
石洞 ^①	7.61 ± 0.19a	56.4 ± 21.5a	27.3 ± 6.6a	3.73 ± 1.17a	0.98 ± 0.12a	228 ± 106a	0.8 ± 0.2a	76 ± 25a	458 ± 77a	348 ± 109ac	0.63 ± 0.25a	22.8 ± 8.6a				
	7.30 ± 0.24ab	69.0 ± 25.3a	40.1 ± 8.6b	6.28 ± 2.03b	1.30 ± 0.13b	466 ± 70b	3.5 ± 2.2ab	118 ± 21a	578 ± 123ab	208 ± 81b	1.49 ± 0.61ab	23.7 ± 6.0a				
石缝 ^②	7.13 ± 0.29bc	136.7 ± 22.7b	75.0 ± 6.2c	11.27 ± 1.56c	1.26 ± 0.07b	700 ± 112cd	5.4 ± 3.1b	165 ± 58b	747 ± 76bc	288 ± 102ab	2.05 ± 0.83b	31.6 ± 9.3a				
	6.91 ± 0.37c	183.3 ± 26.1c	102.0 ± 16.4d	15.8 ± 1.45d	1.45 ± 0.18b	733 ± 172d	12.6 ± 4.5c	233 ± 19c	825.6 ± 226e	435 ± 122c	2.99 ± 0.92c	55.2 ± 25.4b				
石坑 ^④	7.41 ± 0.27ab	100.6 ± 9.7d	49.2 ± 5.1b	7.96 ± 0.92b	1.27 ± 0.16b	564 ± 92bc	5.6 ± 3.0b	180 ± 36b	757 ± 94bc	177 ± 33b	1.33 ± 0.49ab	27.1 ± 4.4a				
	7.41 ± 0.27ab	100.6 ± 9.7d	49.2 ± 5.1b	7.96 ± 0.92b	1.27 ± 0.16b	564 ± 92bc	5.6 ± 3.0b	180 ± 36b	757 ± 94bc	177 ± 33b	1.33 ± 0.49ab	27.1 ± 4.4a				

1)SOC:土壤有机碳 Soil organic carbon; HA:腐殖酸 Humic acid; TN:全氮 Total N; TP:全磷 Total P; 表中数字为平均值 ± 标准差,字母为多重比较(SSR)结果,同一列中字母不同的处理之间达到 p 为 0.05 的显著性水平. Mean ± SD, and different letters in the same column mean significance at $p < 0.05$ level based on multiple comparisons by SSR. ①Stone cavern; ②Crevice; ③Rocky gully; ④Stone pit; ⑤Earthy flatland

由表 3 可知,喀斯特森林生态系统中不同小生境下土壤 pH 的变化范围为 6.29 ~ 7.81,石坑土壤 pH 明显小于石缝、土面、石洞的土壤,而石洞 pH

显著高于石坑、石沟的土壤。土壤有机碳和腐殖酸含量的变化范围分别达到 29.4 ~ 229.3 g kg⁻¹ 和 18.1 ~ 127.8 g kg⁻¹,土壤全氮含量的变化范围

达到 2.48 ~ 17.9 g kg⁻¹, 而 C/N 比值变化范围为 9.97 ~ 17.53, 土壤全磷含量的变化范围为 0.84 ~ 1.52 g kg⁻¹; 不同小生境的土壤有效养分的含量也出现明显的变化, 其中碱解氮的变化范围在 109 ~ 868 mg kg⁻¹, 有效磷、有效钾的变化范围分别在 0.6 ~ 18.0 mg kg⁻¹ 和 50 ~ 264 mg kg⁻¹, 有效钙、有效镁的变化范围为 365 ~ 1 104 mg kg⁻¹ 和 134 ~ 556 mg kg⁻¹, 有效铜、有效锌的变化范围在 0.25 ~ 4.25 mg kg⁻¹ 和 12.2 ~ 99.3 mg kg⁻¹; 石坑土壤有机碳、腐殖酸、全氮、有效磷、有效钾、有效铜、有效锌的含量明显高于石坑、石缝、石沟和土面的土壤, 石洞土壤腐殖酸、全氮、全磷、有效氮的含量显著低于石坑、石缝、石沟和土面的土壤; 石沟有机碳、腐殖酸、全氮的含量明显高于土面和石缝的土壤; 石缝土壤有机碳、有效钾的含量显著低于土面、石沟的土壤。

综上所述, 不同小生境下土壤性质的差异主要表现在黏粒、微团聚体、有机碳和有效养分数量上的变化, 这种变化与小生境植被类型、枯落物数量及岩石风化物的搬运过程及成土过程密切相关。喀斯特小生境的多样性一方面主要影响土壤的形成过程, 石坑成土过程以腐殖化为主, 淋溶强度弱, 腐殖酸含量高, 土壤 pH 趋向微酸性, 黏粒含量较少, 有机碳含量、微团聚体数量和多数有效养分含量明显高于其他小生境的土壤。石洞成土过程以岩石风化为主, 淋溶强度弱, 土壤 pH 趋向微碱性, 砂粒含量高, 有机碳和腐殖酸含量、微团聚体数量和有效氮含量明显低于其他小生境的土壤。石沟、石缝、土面的成土过程以岩石风化和腐殖化为主, 但微地形出现差异, 石沟以物质堆积为主, 淋溶作用弱, 有机碳含量和微团聚体数量明显高于土面、石缝的土壤, 而石缝以物质迁移为主, 淋溶作用大, 有机碳和有效钾含量明显低于土面、石沟的土壤。另一方面, 喀斯特小生境的多样性主要影响土壤有机质含量, 其对团聚体数量(与 > 5 mm、5 ~ 2 mm、2 ~ 1 mm 和 < 1 mm 团聚体数量的相关系数分别为 -0.799、0.124、0.511、0.875, n = 25)、土壤质地(与砂粒、粉粒、黏粒含量相关系数分别为 -0.599、0.859、-0.187)和土壤孔隙度(与通气孔隙、毛管孔隙数量的相关系数分别为 0.750、0.310)产生影响, 同时影响到土壤的酸碱度(相关系数为 0.650)和有效的养分数量(与有效态的氮、磷、钾、钙、镁、铜、锌含量的相关系数分别为 0.764、0.782、0.773、0.533、0.279、0.804、0.778), 从而造成喀斯特小生

境的土壤性质多样化。

2.3 喀斯特微地貌的土壤类型及土壤异质性

调查区土层浅薄, 土壤剖面层次分化不明显, 多数土壤有明显的腐殖质层, 在垂直方向上空间变异较小, 土壤分布和性质主要受各种小生境空间变异的影响, 在水平方向上的土壤异质性更为突出。以表 2 中 10 个土壤物理性参数和表 3 中 12 个土壤化学参数作为评价指标, 采用 DPS 软件对数据进行中心化转换, 计算距离系数(欧氏距离), 然后选择最短距离法对不同小生境的土壤(n = 25)进行聚类分析, 结果(图 1)表明喀斯特微地貌的土壤类型可分为 4 类(1 ~ 5 号土壤为一类, 均由石洞土样组成; 6 ~ 10 号和 22 号土壤为一类, 除 22 号为土面土样外, 均由石缝土样组成; 11、16、12、13、15、21、24、25、23 土壤为一类, 除 16 号为石坑土样外, 均由石沟土样和土面土样组成; 14、18、17、19、20 号土壤为一类, 除 14 号为石沟土样外, 均由石坑土样组成), 在去除特殊土样(22、16、14 号土样)下对 4 类小生境土壤类型的主要理化指标测定值进行统计, 得出不同土壤类型的主要土壤指标的数值变化范围(表 4)。

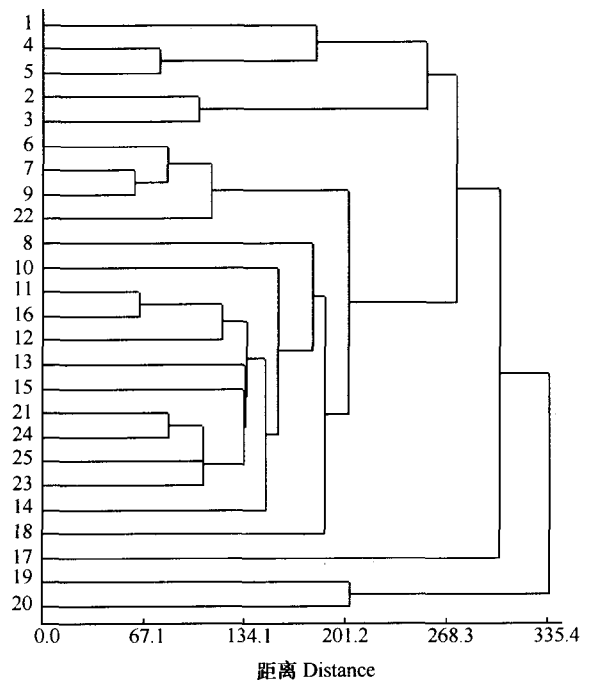


图 1 喀斯特微地貌的土壤类型聚类分析结果

Fig. 1 Cluster analysis of soil types in karst microreliefs

1 ~ 5: 石洞土壤 1 ~ 5 号 Stone cavern soil NO. 1 ~ 5; 6 ~ 10: 石缝土壤 6 ~ 10 号 Swallet soil NO. 6 ~ 10; 11 ~ 15: 石沟土壤 11 ~ 15 号 Rocky ditch soil NO. 11 ~ 15; 16 ~ 20: 石坑土壤 16 ~ 20 号 Stone pit soil NO. 16 ~ 20; 21 ~ 25: 土面土壤 21 ~ 25 号 Mill dust soil NO. 21 ~ 25

表 4 喀斯特微地貌的土壤类型及其理化指标变化范围¹⁾

Table 4 Soil types and range of soil property indexes of the soils in karst micro-relieves

类别 Category	样本数 ^⑤	pH	OM (g kg ⁻¹)	C/N	N	P	K	Ca (mg kg ⁻¹)	Cu	Zn	容重 ^⑥ (g cm ⁻²)	通气孔 隙 ^⑦ (%)	团聚体 ^⑧ <1 mm (%)	黏粒 ^⑨ <0.002 mm (%)
石洞型 ^①	5	7.35 ~ 7.81 (7.61)	50.6 ~ 136.9 (94.1)	11.8 ~ 17.5 (14.4)	109 ~ 374 (228)	0.6 ~ 1.0 (0.8)	50 ~ 115 (76)	365 ~ 520 (458)	0.25 ~ 0.9 (0.6)	12.2 ~ 31.3 (22.8)	1.20 ~ 1.42 (1.30)	4.6 ~ 11.7 (7.5)	9.1 ~ 19.2 (13.1)	9.4 ~ 18.5 (13.5)
石缝型 ^②	5	7.05 ~ 7.61 (7.30)	73.3 ~ 186.3 (118.9)	10.8 ~ 11.6 (10.9)	392 ~ 579 (466)	0.6 ~ 6.0 (3.5)	90 ~ 148 (118)	493 ~ 756 (578)	0.9 ~ 2.3 (1.5)	15.0 ~ 30.4 (22.8)	0.96 ~ 1.29 (1.17)	9.3 ~ 18.1 (12.3)	27.7 ~ 31.3 (29.6)	25.4 ~ 30.2 (27.9)
土面石 沟型 ^③	8	6.67 ~ 7.60 (7.26)	154.3 ~ 296.4 (211.5)	11.4 ~ 14.1 (12.6)	477 ~ 778 (635)	1 ~ 1.0 (4.9)	80 ~ 232 (170)	703 ~ 865 (782)	1.0 ~ 2.7 (1.6)	18.3 ~ 39.7 (29.6)	0.99 ~ 1.20 (1.12)	9.8 ~ 20.4 (15.9)	27.5 ~ 47.8 (33.6)	19.4 ~ 35.3 (25.2)
石坑型 ^④	4	6.89 ~ 7.21 (7.07)	286.2 ~ 395.4 (319.3)	10.6 ~ 12.8 (11.6)	432 ~ 868 (720)	6 ~ 18 (13)	215 ~ 264 (237)	608 ~ 1 104 (758)	1.7 ~ 4.2 (3.0)	36.0 ~ 99.3 (56.6)	0.91 ~ 1.06 (0.98)	18.7 ~ 25.3 (21.5)	46.1 ~ 52.4 (48.8)	10.6 ~ 18.6 (15.3)

1) 括号内的数字为平均值 Values in parentheses are average. ①Cavern soil; ②Crevice soil; ③Gully-earthly flatland soil; ④Pit soil; ⑤Sample number; ⑥Bulk density; ⑦Aeration porosity; ⑧Aggregate; ⑨Clay content

根据上述微地貌的土壤类型聚类分析结果,结合土壤形成环境和微域分布的差异,初步将喀斯特微地貌的土壤类型分为以下 4 类:

(1) 石洞型。以岩石风化的残积物为主形成有明显母质层的土壤,土壤分布在由出露基岩形成的半开放洞穴中。土层厚度一般在 20 ~ 50 cm,土体结构一般为 A-C-R,淋溶作用弱。土壤微碱性,砾石含量较高,质地偏砂,土壤较紧实,有机质平均含量小于 100 g kg⁻¹,碳氮比较高,养分含量较低,有效氮平均含量为 200 mg kg⁻¹,而有效磷钾的平均含量分别小于 1 和 100 mg kg⁻¹,这类土壤分布面积少。

(2) 石缝型。以岩石风化的残积物和堆积物形成具有明显淋溶层和淀积层或母质层的土壤,土壤分布在出露岩体的大裂缝中间。土层厚度一般在 50 ~ 150 cm,土体结构一般为 A-B-C 或 A-C-R,土壤渗透性强,淋溶强度大,土粒或养分随流水沿岩石裂隙、岩溶管道向下迁移。土壤微酸性至中性,质地偏黏但砾石含量较高,土壤较疏松,土壤有机质平均含量达 100 g kg⁻¹,碳氮比低,养分含量较高,有效氮磷钾平均含量分别达 400、3 和 100 mg kg⁻¹,这类土壤分布面积较多。

(3) 土面-石沟型。以岩石风化残积物或堆积物与枯枝落叶分解物形成有明显腐殖质层和淋溶层或母质层的土壤,土壤交错分布在出露基岩形成的坡地和斜面凹地中。岩石间距离短,石多土少,土壤呈沟状分布;岩石间距离较远,土多石少,土壤呈多边形的土面分布。土层厚度一般在 20 ~

80 cm,土体结构一般为 A₀-A-C 或 A₀-A-R,淋溶强度较大。土壤微酸性至中性,砾石含量变化较大,质地偏黏,土壤较疏松,土壤有机质平均含量达 200 g kg⁻¹,碳氮比较高,养分含量较高,有效氮磷钾平均含量分别达 600、5 和 150 mg kg⁻¹,这类土壤分布面积广。

(4) 石坑型。以岩石风化堆积物与枯枝落叶分解物形成有厚腐殖层的土壤,土壤分布在由出露基岩形成的近水平的凹地中。土层厚度一般在 30 ~ 60 cm,土体结构一般为 A₀-R 或 A₀-A-R,淋溶作用较弱。土壤微酸性,砾石含量低,壤土质地,土壤疏松多孔,土壤有机质平均含量达 300 g kg⁻¹,碳氮比较低,养分含量高,有效氮磷钾平均含量分别达 700、10 和 200 mg kg⁻¹,这类土壤分布面积较少。

从上可知,由于喀斯特微地貌的小尺度空间出现明显差异,相应地土壤景观复杂多样,土壤性质的水平差异十分明显,微地貌的土壤差异与喀斯特生境异质性存在密切的相关性。喀斯特地区宏观的地貌景观为峰林、峰丛、洼地,但在宏观一致的峰林峰丛地貌中,由于碳酸盐岩的溶蚀性,造成了微小尺度的异质性,具体的体现就是溶蚀景观,在宏观景观上又存在微观景观造成的异质性,这是影响喀斯特微地貌土壤异质性的最主要因素。因此,对于喀斯特山区来说,生境异质性是本质问题,随着喀斯特森林的退化,生境逐步从湿润、空气湿度大的中性生境向干旱、空气湿度小的

严酷生境发展,植物群落向旱生群落方向演变,这种变化也改变了小生境的土壤环境空间结构。由于不同小生境的土壤生态因子变化并不一致,小生境的土壤退化差异造成喀斯特土壤退化的非均一性,使喀斯特土壤退化也出现时空变异,在评价喀斯特生态系统的土壤退化或恢复时,选择最具有代表性小生境的土壤作为研究对象,是研究喀斯特土壤演变的核心。从本研究来看,土面和石沟的土壤是最普遍的,在采集土壤样品时以土面和石沟的土壤代表喀斯特土壤是可行的,这方面还需要进行深入的研究。

3 结论

1) 喀斯特生境是由石面、石沟、石洞、石坑、石缝、土面等多种小生境类型镶嵌构成的复合体,小生境多样性导致群落组成物种的复杂性及生态类型的多样性。受小生境地表微形态和微地貌空间变异的影响,小生境的成土条件和成土过程出现明显的变化,特别是石洞、石坑、石缝、石面,土壤分布及其性质在水平方向上表现出明显的空间异质性;不同小生境的土壤剖面层次分化不明显,多数土壤有明显的腐殖质层,在垂直方向上土壤的空间变异较小。

2) 不同小生境土壤的性质出现明显的差异,石洞土壤砂粒含量、 $>5\text{ mm}$ 团聚体数量、土壤容重明显高于土面、石坑、石沟和石缝的土壤,而 $<1\text{ mm}$ 团聚体数量、通气孔隙度及腐殖酸、全氮、全磷、有效氮的含量则显著低于土面、石坑、石沟和石缝的土壤。石坑土壤 $<1\text{ mm}$ 团聚体数量、通气孔隙度及有机碳、腐殖酸、全氮、有效磷、有效钾、有效铜、有效锌的含量明显高于土面、石洞、石沟和石缝的土壤,而黏粒含量、 $>5\text{ mm}$ 团聚体数量、土壤容重显著低于土面、石沟和石缝的土壤。石沟土壤黏粒含量明显低于土面和石缝的土壤,而 $<1\text{ mm}$ 团聚体数量及有机碳、腐殖酸、全氮的含量则显著高于土面和石缝的土壤。石缝土壤有机碳、有效钾的含量明显低于土面、石沟的土壤。

3) 初步将喀斯特微地貌的土壤类型分为石洞型、石缝型、土面-石沟型和石坑型,其中土面-石沟型土壤分布面积最多,其次是石缝型。石洞型土壤分布在由出露基岩形成的半开放洞穴中,土层厚度一般在 $20\sim 50\text{ cm}$,土体结构一般为A-C-R,土壤微碱性,质地偏砂,土壤较紧实,养分含量较

低。石缝型土壤分布在出露岩体的大裂缝中间,土层厚度一般在 $50\sim 150\text{ cm}$,土体结构一般为A-B-C或A-C-R,土壤微酸性至中性,质地偏黏,土壤较疏松,养分含量较高。土面-石沟型土壤交错分布在出露基岩形成的坡地和斜面凹地中,土层厚度一般在 $20\sim 80\text{ cm}$,土体结构一般为 A_0 -A-C或 A_0 -A-R,土壤微酸性至中性,质地偏黏,土壤较疏松,养分含量较高。石坑型土壤分布在由出露基岩形成的近水平的凹地中,土层厚度一般在 $30\sim 60\text{ cm}$,土体结构一般为 A_0 -R或 A_0 -A-R,土壤微酸性,壤土质地,土壤疏松多孔,养分含量高。

参考文献

- [1] 周政贤. 茂兰喀斯特森林科学考察集. 贵阳: 贵州科学技术出版社, 1987. 1~23. Zhou Z X. Scientific Investigation Report of Maolan Karst Forest (In Chinese). Guiyang: Guizhou Science and Technology Press, 1987. 1~23
- [2] 朱守谦, 何纪星, 魏鲁明, 等. 茂兰喀斯特森林小生境特征研究. 见: 朱守谦主编. 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 S Q, He J X, Wei L M, et al. Study on the features of micro-habitats in Maolan karst forest. In: Zhu S Q. ed. Ecological Research on Karst Forest (III) (In Chinese). Guiyang: Guizhou Science and Technology Press, 2003. 24~29
- [3] 周游游, 黎树式, 黄天放. 我国喀斯特森林生态系统的特征及其保护利用——以西南地区茂兰、木论、弄岗典型喀斯特森林区为例. 广西师范学院学报(自然科学报), 2003, 16(3): 67~72. Zhou Y Y, Li S S, Huang T F. Features of barst forest ecosystem in China and its conservation in utilisation-A case study on Maolan, Mulun, Nonggang typical karst forests in Southwest China (In Chinese). Journal of Guangxi Teachers Education University (Natural Science Edition), 2003, 16(3): 67~72
- [4] 曹建华, 袁道先, 潘根兴. 岩溶生态系统中的土壤. 地球科学进展, 2003, 18(1): 37~44. Cao J H, Yuan D X, Pan G X. Some soil features in karst ecosystem (In Chinese). Advances in Earth Science, 2003, 18(1): 37~44
- [5] 李景阳, 王朝富, 樊廷章. 试论碳酸盐岩与喀斯特成土作用. 中国岩溶, 1991, 10(1): 29~38. Li J Y, Wang C F, Fan T Z. Preliminary study on carbonate rock and karst soil formation (In Chinese). Carsologica Sinica, 1991, 10(1): 29~38
- [6] 张美良, 邓自强. 我国南方喀斯特地区的土壤及其形成. 贵州工学院学报, 1994, 23(1): 67~75. Zhang M L, Deng Z Q. The soils in karst areas of South China and its formation (In Chinese). Journal of Guizhou Industry College, 1994, 23(1): 67~75
- [7] 韦启藩, 陈鸿昭, 吴志东. 广西弄岗自然保护区石灰土的地球化学特征. 土壤学报, 1983, 20(1): 30~41. Wei Q F, Chen H Z, Wu Z D. The geochemical characteristics of limestone soil in Nonggang area, Guangxi (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1983, 20(1): 30~41

- [8] 王世杰,季宏军,欧阳自远,等. 碳酸盐岩风化成土的初步研究. 中国科学 D 辑,1999,29(5):441~449. Wang S J, Ji H J, Ouyang Z Y, *et al.* Preliminary study on carbonate rock weathering and soil formation (In Chinese). Science in China (Series D),1999,29(5):441~449
- [9] 周运超,周习会,周玮. 贵州岩溶土壤形成及其可持续利用. 山地农业生物学报,2005,24(5):419~425. Zhou Y C, Zhou X H, Zhou W. Guizhou karst soil formation and its sustainable utilization (In Chinese). Journal of Mountain Agriculture and Biology,2005,24(5):419~425
- [10] 赵斌军,文启孝. 石灰性母质对土壤腐殖质组成和性质的影响. 土壤学报,1988,25(3):243~251. Zhao B J, Wen Q X. Effect of calcareous parent materials on the composition characteristics of soil humus (In Chinese). Acta Pedologica Sinica,1988,25(3):243~251
- [11] 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. 中国岩溶,1999,18(4):287~296. Pan G X, Cao J H. Karstification in epikarst zone: The earth surface ecosystem processes taking soil as a medium-Case of the Yiji karst experiment site, Guilin (In Chinese). Carsologica Sinica,1999,18(4):287~296
- [12] 李阳兵,谢德体,魏朝富. 岩溶生态系统土壤及表生植被某些特性变异与石漠化的相关性. 土壤学报,2004,41(2):196~202. Li Y B, Xie D T, Wei C F. Correlation between rock desertification and variations of soil and surface vegetation in karst ecosystem (In Chinese). Acta Pedologica Sinica,2004,41(2):196~202
- [13] 龙健,李娟,江新荣. 贵州茂兰喀斯特森林土壤微生物活性的研究. 土壤学报,2004,41(4):597~602. Long J, Li J, Jiang X R. Soil microbial activities in Maolan karst forest, Guizhou Province (In Chinese). Acta Pedologica Sinica,2004,41(4):597~602
- [14] 赵中秋,后立胜,蔡运龙. 西南喀斯特地区土壤退化过程与机理探讨. 地学前缘,2006,13(3):185~189. Zhao Z Q, Hou L S, Cai Y L. The process and mechanism of soil degradation in karst area in Southwest China (In Chinese). Earth Science Frontiers,2006,13(3):185~189
- [15] 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. 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 (In Chinese). Acta Ecologica Sinica,2005,25(3):639~644
- [16] Zhang P J, Li L Q, Pan G X, *et al.* Soil quality changes in land degradation as indicated by soil chemical, biochemical and microbiological properties in a karst area of southwest Guizhou, China. Environmental Geology,2006,51(4):609~619
- [17] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京:中国农业科技出版社,2000. Lu R K. Analytical Methods for Soil and Agro-chemistry (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press,2000
- [18] 龙翠玲,余世孝,熊志斌. 茂兰喀斯特森林林隙的植物多样性与更新. 生物多样性,2005,13(1):43~50. Long C L, Yu S X, Xiong Z B. Species diversity and regeneration in forest gaps of the karst forest in Maolan National Nature Reserve, Guizhou Province (In Chinese). Biodiversity Science,2005,13(1):43~50

MICRO-HABITATS IN KARST FOREST ECOSYSTEM AND VARIABILITY OF SOILS

Liu Fang^{1,2} Wang Shijie² Luo Haibo¹ Liu Yuansheng¹ Liu Hongyan³

(1 Institute of Environment and Resource, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

(2 State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Geochemistry Institute of Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China)

(3 The Key Laboratory of Karst Environment and Geological Disaster Prevention of Education Ministry, Guiyang 550003, China)

Abstract Diversity of the soils and variability of the soil properties of karst microrelieves were explored through survey and sampling analysis of the soils in micro-habitats of the karst forest ecosystem of Maolan, South Guizhou. Results show that soil distribution and soil properties varied sharply spatially with the micro-habitats, like pit, gully, crevice, cavern and flat land. Cavern was obviously higher than pit, gully, crevice and flat land in sand content, >5 mm aggregate content and bulk density of the soil, but lower in <1 mm aggregate content, aeration porosity, humic acid, total nitrogen, total phosphorus and available N; Pit was higher than the others in <1 mm aggregate content, aeration porosity, organic carbon, humic acid, total nitrogen, available P, available K, available Cu and Zn, but lower in clay content, >5 mm aggregate content, and bulk density than earthy flat land, gully, and crevice. Gully was markedly lower than flatland and crevice in clay content, but higher in 1 mm aggregate content, organic carbon, humic acid and total N. Crevice was obviously lower than earthy flatland, and gully in organic carbon and available K. Therefore, the soils in microrelieves of the karst region can primarily be divided into four types, i. e. cavern soil, crevice soil, earthy-flatland-gully soil, and pit soil, of which flatland-gully soil is most extensively distributed and followed by crevice soil.

Key words Karst; Forest ecosystem; Micro-habitats; Soil properties; Variability