

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*

王世杰¹ 卢红梅^{1,2} 周运超¹ 谢丽萍^{1,2} 肖德安^{1,2}

(1 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)

(2 中国科学院研究生院,北京 100039)

摘要 茂兰原生林中 20 m × 30 m 研究样地存在着 7 类小生境:石面、土面、石土面、石沟、石缝、石坑、石洞。样地内土壤有机碳的含量范围为 40.1 ~ 203.5 g kg⁻¹,样点与小生境间土壤有机碳含量的变异系数分别为 43% 和 41%;同类型小生境间为 22% ~ 42%;小生境内为 14% ~ 57%;说明样地内土壤有机碳含量具有高度的空间变异性。为了促进岩溶山区土壤退化研究中数据之间的可比性,文中建议以土壤面积权重确定的小生境土样组成样地代表性土样的方法。选取样地内面积之和超过样地总土壤面积 95% 以上的几类小生境,由面积权重确定组成样地土壤代表样的各类小生境土样品量,而各类小生境土样则分别由以面积权重确定的同类小生境样品量混合构成。利用该方法计算的研究样地土壤有机碳含量的面积权重值为 92.1 g kg⁻¹。

关键词 土壤有机碳;空间变异性;代表性土样;喀斯特;原始森林;茂兰
中图分类号 S153.6 **文献标识码** A

长期以来,土壤的异质性一直是土壤学的研究热点^[1~5],与土壤的异质性相关联,土壤样品的采集方法存在相当大的差异^[6],而土壤样品的采集方法一直是土壤学研究中重要而又极富争议的内容^[6,7]。土壤样品的分析测试结果能否代表研究样地的真实涵义取决于土壤样品采集的典型性和代表性^[8,9]。当前,有关土壤样品采集方法也随着研究的目的而变化^[10]。然而,前述所有这些研究都集中在土被完整连片、土壤深厚的地区。在岩溶山区生态系统土壤退化研究中,样地代表性土样的采集一般借鉴非岩溶地区的采样方法,即对设置样地随机取 3 个重复,每个样品(重复)又是样点附近多点的混合^[11];或在每个样地选取 5 ~ 8 个点的混合样^[12];或采用 S 型或梅花型取样法取 3 ~ 5 点混合样^[13]。该方法对于地貌变化较平缓、小尺度上土壤性质空间变异较小地区是适合的,但对于具有复杂小生境组合的岩溶山区,这样的方法采集的土样能否代表某一样地是一个值得

探讨的问题。

已有资料表明,岩溶生境土壤有机质含量空间变异性较大,如笔者在贵州不同地区阔叶林地、灌木林地、灌丛草地和稀疏草地测定的土壤有机质含量范围分别为 87.9 ~ 198.8 g kg⁻¹、32.8 ~ 147.5 g kg⁻¹、38.1 ~ 84.3 g kg⁻¹和 17.4 ~ 33.9 g kg⁻¹^[12];重庆市有代表性的岩溶山地中自然林地和灌草坡的土壤有机质含量范围为 10.4 ~ 198.6 g kg⁻¹和 20.6 ~ 58.0 g kg⁻¹^[14];同样是茂兰原生林下土壤有机质含量,不同研究者所得结果差异很大:75.5 g kg⁻¹^[13], 105.0 g kg⁻¹^[15], 244.6 g kg⁻¹^[16], 380 g kg⁻¹^[17];重庆金佛山的不同自然林地上测定的土壤有机质含量范围为 60.6 ~ 198.6 g kg⁻¹^[14];即使在同一地区,同一种土地利用方式下灌丛和草本系统土壤有机质含量的变化也较大,分别为 18.2 ~ 41.9 g kg⁻¹和 14.6 ~ 28.2 g kg⁻¹^[18]。这些结果间的差异可能是由于岩溶生境中土壤空间变异性较大引起的,也可能是由于所采土样对复杂小生境组合样地是否具有代表性而

* 中国科学院创新团队国际合作伙伴计划和科技支黔工程项目以及知识创新前沿领域项目联合资助

作者简介:王世杰(1966~),男,博士,研究员,从事岩溶环境与地球化学研究。E-mail:wangshijie@vip.skleg.cn

收稿日期:2005-11-30;收到修改稿日期:2006-05-08

引起的。为了便于岩溶生态系统土壤退化问题横向比较研究的深入开展,有必要对该问题展开详细的研究。本文以茂兰国家自然保护区原生性喀斯特森林生态系统的土壤有机碳为研究对象,探讨岩溶生境中土壤的空间变异性及其土样的代表性问题。

1 研究区概况

茂兰喀斯特原始森林区位于贵州高原南部向广西丘陵平原过渡的斜坡地带,岩石类型为纯质石灰岩及白云岩,基岩裸露率在 70%~80% 以上,属于裸露型喀斯特地貌类型。林区年均温 15.3℃,年降水量 1 752 mm,属于中亚热带季风湿润气候地区。夏季半年(4~9 月)的降水量多达 1 420 mm,占全年总降水量的 81%。雨量较为集中的夏季(6~8 月)高达 96%~97%。该区是目前世界上同纬度地区残存下来的仅有的、原生性强、相对稳定的岩溶森林生态系统,也是岩溶区原生性森林分布面积最大的地区^[17]。

在荔波凉风洞原生性森林内(地理位置为东经 107°22'29",北纬 25°16'21"),选择该山体地形地貌典型地段设置面积为 20 m × 30 m 的样地一个。根据样地内微地貌形态、岩石裸露率、土壤分布面积等特征,可将其划分为 7 类小生境^[19]:石面、土面、石土面、石沟、石缝、石坑、石洞(图 1)。石面即几乎完全为岩石裸露面积较大的区域,较平坦或凹陷处可积累枯枝落叶,土壤极少;土面是岩石裸露率低于 30%,土壤覆盖均匀,面积相对较大的小型台地(长宽均大于 2m);石土面为岩石裸露率大于 30%,类似土面的小型台地;石沟为深宽比小于 2 的岩石侵蚀沟,沟底沉积有厚薄不一的土壤,同时,凋落物容易聚集;石缝的深宽比大于 2,缝底有少量土壤,并形成枯枝落叶堆积;石坑(石槽)为不规则形状的侵蚀洼地,土壤面积在 0.1~1 m²;石洞为溶蚀作用形成的大小不一的管状孔道。样地内主要分布黄色石灰土,但随着土壤厚度变薄,淀积层厚度逐渐减小甚至少数区域该层次不明显。样区内土体构型表现为 A-R 型向 A-B-R 型逐渐过渡。



图 1 样地内小生境类型斑块结构图(图中样品号的描述见文中表 2)

Fig. 1 Microhabitat patch structure map of the plot (Sample description see Table 2)

根据野外实测数据(表 1),样地内小生境总数为 90 个,土壤面积 170 m²,占样地面积的 28.4%,岩石裸露率大于 70%。石面类小生境数量最多,面积最大,几乎占总小生境数和总面积的 1/2;土面和石土面类小生境的面积较大,为 11 个,但面积较大,约

占总面积的 40%;其他小生境除石沟类占总面积约 8%外,剩余 3 类相加也不到 4%。从样地土壤面积考虑,5 类小生境(土面、石土面、石沟、石洞和石坑)占 99%以上,其中土面、石土面、石沟 3 类小生境约占 95%。

表 1 样地内各类小生境数目、面积、土壤面积及比例

Table 1 Number, area, soil area and proportion of each type of microhabitat in the plot

小生境类型 Microhabitat type	小生境数量 Number of microhabitat	所占比例 Ratio (%)	小生境面积 Microhabitat area (m ²)	所占比例 Ratio (%)	小生境内土壤面积 Microhabitat soil area A (m ²)	所占比例 Ratio (%)
石面 Rocky surface	46	51.1	291.1	48.5	0	0
石沟 Rocky gully	14	15.6	49.7	8.4	26.5	15.6
土面 Soil surface	5	5.6	117.0	19.5	93.0	54.7
石土面 Rocky-soil surface	6	6.7	120.6	20.1	41.5	24.4
石坑 Stone pit	3	3.3	5.1	0.8	2.3	1.4
石缝 Rocky crevice	11	12.2	10.9	1.8	1.1	0.6
石洞 Stone cave	5	5.5	5.6	0.9	5.6	3.3
总计 Total	90	100	600	100	170	100

2 研究方法

根据小生境类型的不同进行土壤采样。石面上几乎没有土壤覆盖,石缝、某些石沟和石土面类小生境,因其上土壤太零碎无法采到足够的样而未采样;对能采样的小生境,采集的样品数与坡度、土壤厚度、凋落物厚度等环境因子的均一程度有关。针对枯枝落叶层厚薄相对一致,坡度缓而平整相对均一的小生境采一个样作为代表;坡度较大,枯枝落叶层厚薄差异也大,土壤变化较大的小生境采 3 个平行样。采样前测定采样点的凋落物层厚度和土壤厚度(3~5 个点),然后将凋落物覆盖层除掉,尤其注意刨除与土表接触的基本完全分解的有机质层,采样深度为 0~20 cm,在样点附近采集 3~5 个点的土柱混合成一个样。样品量重约 1 kg。本次工作在 5 类小生境(土面、石土面、石沟、石坑和石洞)中共采集 38 个样品(表 2)。

新鲜土样自然风干后,用四分法取一定量样品,挑出石砾及可见凋落物及根系,植物碎片太小时用

塑料棒的摩擦静电法去除。过 2 mm 筛,再取少量土样研磨过 0.25 mm 筛。采用重铬酸钾外加热法测定土壤有机碳含量。

3 结果与讨论

3.1 样地土壤有机碳的空间变异性

样地内土壤有机碳含量较高,变化范围大:40.1~203.5 g kg⁻¹(表 2),总体上与目前文献报道的茂兰原始森林喀斯特区土壤有机质含量的变化范围一致。岩溶动力条件下,原生林内易形成润湿、富钙的土壤环境,微生物活动异常活跃,残落的有机物不断分解形成腐殖质,并与钙、镁离子络合,形成高度缩合、稳定的腐殖质钙而获得积累,因而石灰土的土壤有机碳含量普遍高于其他土类^[20]。按样点(38 个)计,样地土壤有机碳含量的变异系数为 43%(表 3),较非岩溶区同样尺度下大得多,如在新疆阿克苏地区进行的供试土壤为 625 m²灌淤土的表层土有机质变异系数为 17.84%^[5]。

表 2 采样点有机碳含量与环境因数指标

Table 2 SOC contents and indices of environmental factors at sampling sites

小生境类型 Microhabitat type	小生境编号 Microhabitat serial No.	样号 Sample No.	有机碳 SOC B (g kg ⁻¹)	土壤厚度 Soil depth (cm)	凋落物厚度 Litter depth (cm)	小生境面积 Microhabitat area C (m ²)	土壤所占比例 Percentage of soil area D (%)
土面 Soil surface	3~6	3~6	91.1	34.5	4.0	20.5	90
	3~10	3~10s	99.2	39.3	1.0	14.1	70
		3~10z	75.6	20.8	1.0		
		3~10x	106.9	30.0	3.0		
	3~12	3~12	107.2	17.5	4.0	49.9	80
	3~25	3~25s	65.0	48.0	4.0	10.1	90
		3~25z	70.7	31.0	4.0		
		3~25x	51.5	34.0	5.0		
	3~40	3~40s	57.7	20.5	4.0	22.4	70
		3~40z	40.1	42.8	3.0		
3~40x		61.3	54.8	3.0			
石土面 Rocky-soil surface	3~17	3~17s	165.8	13.8	2.5	14.6	35
		3~17z	107.5	24.0	2.0		
		3~17x	148.3	37.8	4.0		
	3~34	3~34s	98.9	4.0	4.0	23.2	50
		3~34z	139.2	9.5	4.0		
		3~34x	91.4	12.5	4.0		
石沟 Rocky gully	3~36	3~36	86.9	25.0	4.0	12.6	30
	3~2	3~2	203.5	5.0	10.0	3.4	20
		3~15	3~15	99.3	18.0		
	3~16	3~16s	71.0	37.8	5.0	7.8	90
		3~16z	61.3	47.3	6.5		
		3~16x	98.0	31.3	10.0		
	3~21	3~21s	176.5	14.0	0.0	2.9	50
		3~21z	170.8	30.7	2.5		
		3~21x	134.2	26.7	2.5		
		3~32	3~32	80.3	15.0		
3~50	3~50s	169.3	50.0	4.0	17.3	50	
	3~50z	47.3	9.5	10.0			
	3~50x	103.2	11.3	3.0			
石洞 Stone cave	3~36	3~36	72.0	21.5	3.0	1.1	100
	3~36	3~36	57.8	20.0	0.0	1.0	100
	3~40	3~40	49.3	20.0	1.0	1.2	100
	3~42	3~42	68.8	14.0	1.0	0.8	100
	3~50	3~50	41.0	30.0	0.0	0.5	100
石坑 Stone pit	3~9	3~9	154.7	15.0	5.0	1.6	50
	3~53	3~53	117.3	21.5	7.0	2.4	38
	3~54	3~54	102.5	21.0	7.0	1.1	50

注:表中字母 s、z、x 表示同一小生境中上、中、下的不同位置,、符号表示与土面、石沟样在邻近位置的石洞样品,因被岩石遮住而在图 1 中未能表示出 Note: Letters s, z and x stand for upper, middle, lower positions in the same microhabitat, respectively. The symbols of and means sampling points in stone caves obscured under neighboring soil surface or rocky gully in Fig. 1

研究样地内,不仅土壤有机碳含量存在着空间变异性,而且环境因子也存在着强烈的空间变异性。小生境土壤面积在 0.5 m^2 和 39.9 m^2 之间,平均为 6.7 m^2 ,变异系数高达 137% (表 3),说明各小生境中土壤面积离散程度非常高,样地内土被零星不连续,是产生岩溶山区土壤性质空间变异性的主要原因之一。各样点间土壤厚度的变化范围为 $4.0\sim 54.8\text{ cm}$,小于或等于 30 cm 的有 25 个,占 67%,各样点与小生境的平均土壤厚度及变异系数分别为 25.2 cm 和 23.0 cm 与 51% 和 40% (表 3)。原始森林地面的生物量丰富,土体浅薄时,有机质集中在少

量的土壤中;土体深厚时,有机质被分散到较大的范围内,因此,岩溶生境中土壤厚度与土壤质量密切相关。在凋落物厚度方面,各样点间的变化范围在 $0\sim 10\text{ cm}$,平均厚度为 4.0 cm ,变异系数分别为 65% (按采样点计) 和 64% (按小生境计)。凋落物的生化降解是土壤有机碳的主要来源,直接影响土壤有机碳的含量。两者之间成正比关系。总的来说,表 3 中除按小生境计时平均土厚的变异系数与土壤有机碳的变异系数接近,其余各环境因子的变异系数都大于或远大于土壤有机碳的变异系数。

表 3 样地土壤有机碳及环境因素的变异性

Table 3 Variability of the SOC and environment factors in the plot

计算方法 Counting method	指标 Index	数量 No. (个)	平均值 Average value	标准差 Standard error	变异系数 Coefficient of variation (%)
按采样点计 Count by sampling sites	有机碳 SOC (g kg^{-1})	38	98.5	42.4	43
	土壤厚度 Soil depth (cm)	38	25.2	12.9	51
	凋落物厚度 Litter depth (cm)	38	4.0	2.6	65
按小生境计 Count by microhabitats	有机碳 SOC (g kg^{-1})	22	97.1	40.1	41
	土壤厚度 Soil depth (cm)	22	23.0	9.2	40
	凋落物厚度 Litter depth (cm)	22	4.4	2.8	64
	土壤面积 Soil area (m^2)	22	6.7	9.1	137

注:采样点为表 2 中的所有样,小生境包括表 2 中的 5 个土面、3 个石土面、6 个石沟、5 个石洞、3 个石坑 Note: Sampling points were the same in Table 2, and microhabitats included 5 soil surfaces, 3 rocky-soil surfaces, 6 rocky gullies, 5 stone caves, 3 stone pits in Table 2

3.2 小生境土壤有机碳的变异性

研究样地中占土壤面积 99% 以上的土面、石土面、石沟、石洞和石坑 5 类小生境的土壤有机碳含量变化范围依次为: $40.1\sim 107.2\text{ g kg}^{-1}$ 、 $86.9\sim 165.8\text{ g kg}^{-1}$ 、 $47.3\sim 203.5\text{ g kg}^{-1}$ 、 $41.0\sim 72.0\text{ g kg}^{-1}$ 、 $102.5\sim 154.7\text{ g kg}^{-1}$ (表 2)。除石沟类小生境土壤有机碳变异系数为 42% 外,其余 4 类小生境均在 22%~28% 之间 (表 4),明显小于按小生境计的样地土壤有机碳的变异系数值 41% (表 3)。另一方

面,小生境类型间土壤有机碳的平均含量差异较大,从大到小依次为石坑 (124.8 g kg^{-1})、石沟 (121.1 g kg^{-1})、石土面 (112.4 g kg^{-1})、土面 (81.5 g kg^{-1}) 和石洞 (57.8 g kg^{-1}),尤其是占样地土壤面积 95% 的 3 类小生境 (土面、石土面和石沟) 间也存在着较大的差别,说明不同类小生境间土壤性质存在着较大的差异,不能用某一类小生境的土样来代表研究样地。

表 4 同类小生境土壤有机碳变异性

Table 4 SOC variability in the same type of microhabitats

小生境类型 Microhabitat type	土面 Soil surface	石土面 Rocky-soil surface	石沟 Rocky gully	石洞 Stone cave	石坑 Stone pit
小生境数量 Microhabitat No.	5	3	6	5	3
平均值 Average (g kg^{-1})	81.5	112.4	121.1	57.8	124.8
标准差 Standard error	22.8	26.9	50.3	13.0	26.9
变异系数 Coefficient of variation (%)	28	24	42	23	22

表 5 中,土面、石土面和石沟 3 类小生境内土壤有机碳的变异系数除 3~50 石沟小生境为 57.32% 外,其余均处于 14%~25% 之间,略小于前面提到的同类型小生境的变异系数 22%~28% 之间。表明岩溶生境的高度异质性,不仅表现在同类小生境间土壤有机碳含量存在着空间变异性,而且小生境内也存在较大的差别。同时也说明在岩溶生境中石沟类小生境的空间变异性最大。表 5 中 38 个小生

境的面积在 2.9~23.2 m² 之间,其中土壤面积在 1.5~15.7 m² 之间,与同尺度非岩溶区相比,岩溶小生境土壤有机碳含量的变异系数要大得多,如在类似尺度下内蒙古锡林河流域 50 m² 样地中表土有机碳的变异系数为 11.20%,该样地内 4 m² 表土有机碳的变异系数为 6.25%^[4]。因此,岩溶小生境内应采多点的混合样,才能作为该小生境的代表土样。

表 5 小生境内土壤有机碳的变异性

Table 5 SOC variability in the same microhabitat

小生境类型 Microhabitat type	小生境编号 Microhabitat serial No.	样点数 Number of sampling site	平均值 Average (g kg ⁻¹)	标准差 Standard error	变异系数 Coefficient of variation (%)
土面 Soil surface	3~10	3	93.9	16.3	17
	3~25	3	62.4	9.8	16
	3~40	3	53.0	11.3	21
石土面 Rocky-soil surface	3~17	3	140.6	29.9	21
	3~34	3	109.8	25.7	23
石沟 Rocky gully	3~16	3	76.7	19.0	25
	3~21	3	160.5	22.9	14
	3~50	3	106.6	61.1	57

3.3 样地土壤有机碳含量的代表值

如前所述,样地、不同类型和同类型小生境间以及小生境内土壤有机碳存在高度的空间变异性,显然不能用任一样点、小生境与小生境类型的值代表该样地土壤有机碳含量。因此,对于高度异质性的岩溶生境,笔者认为只有考虑样地内各类型小生境土壤面积的权重,样地土壤有机碳的面积权重值才能代表样地土壤有机碳含量,也有利于形成统一的比较标准。用公式表示为:

$$SOC = \sum_{j=1}^m \left[\sum_{i=1}^n \left(S_i \times \frac{A_i}{A_j} \right) \times \frac{A_j}{A} \right]$$

式中,SOC 表示样地土壤有机碳含量的面积权重值(g kg⁻¹);在有 j 个小生境类型共 i 个小生境的样地中,S_i 表示第 i 个小生境的土壤有机碳平均含量(g kg⁻¹);A_i 表示第 i 个小生境的土壤面积(m²);A_j 表示第 j 个小生境类型的土壤面积(m²);A 表示样地土壤面积之和(m²)。

根据上述公式,计算出不同类型小生境的土壤有机碳的面积权重值和样地土壤有机碳的面积权重值,结果见表 6。研究样地表层土壤有机碳含量的代表值为 95.6 g kg⁻¹,与各类小生境有机碳的面积权重值(其范围在 56.7~126.8 g kg⁻¹ 之间)相差较大。占研究样地土壤面积 95% 的 3 类小生境(土面、石土面和石沟)的土壤有机碳面积权重值为 91.1 g kg⁻¹,是样地代表值 95.6 g kg⁻¹ 的 95.3%,说明采自这 3 类小生境的土壤混合样能代表样地的土壤。若研究样地仅以这 3 类小生境的土壤面积作为样地土壤面积,土壤有机碳面积权重平均值为 92.1 g kg⁻¹,与按所有小生境类型计算时的代表值 95.6 g kg⁻¹ 仅相差 3.7% (表 6)。因此在样地小生境类型较多的情况下,可以只考虑样地内占绝大部分(95% 以上)土壤面积的小生境类型,其结果与考虑所有小生境类型的样地土壤代表值接近,可节省大量的工作量。

表 6 不同类小生境和样地土壤有机碳的面积权重值

Table 6 Area weighted values of soil organic carbon contents of various types of microhabitats and plot

小生境类型 Microhabitat type	小生境编号 Microhabitat serial No.	小生境有机碳 Microhabitat SOC E(g kg ⁻¹)	小生境面积权重 Microhabitat surface area-weighted value F (%)	各类型小生境 有机碳面积权重	各类型小生境 面积权重	样地有机碳面积 权重 Plot SOC area- weighted value ²⁾ I (g kg ⁻¹)	简化样地有机 碳面积权重 Simplified plot SOC area-weighted value ³⁾ J (g kg ⁻¹)
				Area-weighted value of SOC of different microhabitats ¹⁾ G (g kg ⁻¹)	Area-weighted value of different microhab- itat type H (%)		
土面 Soil surface	3~6	91.1	19.8	89.1	57.2	95.6	92.1
	3~10	93.9	10.6				
	3~12	107.2	42.9				
	3~25	62.4	9.8				
	3~40	53.0	16.9				
石土面 Rocky-soil surface	3~17	140.6	15.0	112.9	20.9		
	3~34	109.8	34.0				
	3~36	86.9	11.1				
	未取样处 ⁴⁾	112.4	39.9				
石沟 Rocky gully	3~15	99.3	20.0	100.8	16.5		
	3~16	76.7	26.3				
	3~21	160.5	5.5				
	3~32	80.3	7.2				
	3~2	203.5	2.5				
	3~50	106.6	32.2				
石坑 Stone pit	3~53	117.3	41.0	126.8	1.4		
	3~54	102.5	24.0				
	3~9	154.7	35.0				
石洞 Stone cave	3~50	41.0	19.6	56.7	3.4		
	3~42	68.8	17.9				
	3~40	49.3	21.4				
	3~36	72.0	14.3				
	3~36	57.8	26.8				
石缝 Rocky crevice				126.8 ⁵⁾	0.7		

注:1) 表示各类型小生境;2) 包含样地所有有土类小生境类型而求出的样地有机碳面积权重;3) 表示仅以土面、石土面、石沟 3 类小生境土壤面积之和代替样地土壤面积而求出的样地有机碳面积权重;4) 未取样处有机碳以该类小生境土壤有机碳的平均值计;5) 该类型小生境未采样,根据其中的土壤特点用石坑类小生境的值代替。E = $\sum B/n$, B 为表 2 中样点有机碳数据, n 为小生境内采样个数; F = C × D/A, C 和 D 分别为表 2 中的小生境面积和小生境内土壤所占的面积比, A 为表 1 中同类小生境的总面积; G = $\sum E_i \times F_i$, E_i 和 F_i 分别为本表中各小生境有机碳含量和面积权重; H = A' / A; I = $\sum G_i \times H_i$, G_i 和 H_i 分别为本表中各类型小生境有机碳面积权重和面积权重; J 的计算为当 A 等于(土面 + 石土面 + 石沟)面积和时, 换算出这三项的 H 值, 然后按 I 的公式计算得出。Note: 1) All types of microhabitats, 2) Surface area-weighted value of SOC of the plot including all types of microhabitats with soil, 3) Surface area-weighted value of SOC of the plot only counting 3 types of microhabitats, soil surface, rocky-soil surface, and rocky gully, 4) SOC of areas not sampled is counted by averaging SOC of the type of microhabitat, 5) For the microhabitat where no sample was taken, its SOC could use the value of the microhabitat of stone pits as substitute, according to soil characteristics. In formula E = $\sum B/n$, where B stands for the SOC values of the sampling sites in Table 2, n for the number of samples in one microhabitat; C and D for microhabitat area and percentage of microhabitat area to the total soil area in Table 2; A for soil area of the same type of microhabitats in Table 1; E_i and F_i for SOC value and Surface area-weighted values of microhabitats; G_i and H_i for SOC and surface area-weighted value of different types of microhabitats; For calculation of J, figure out H values of soil surface, rocky-soil surface, and rocky gully, separately, and then calculate by following the equation I when A equals to the sum of the areas of soil surface, rocky-soil surface and rocky gully.

4 构建岩溶山区样地代表性土样的方法建议

根据前面对茂兰喀斯特原始森林区样地土壤有机碳含量代表值的实证研究,笔者建议岩溶山区样地代表性土样的构建方法如下:首先对设置样地划分小生境类型,由面积权重确定组成样地土壤代表样的各类小生境土样样品量,而各类小生境土样则分别由以面积权重确定的同类小生境样品量混合构成,小生境土样则由多点混合样组成。在样地小生境类型数量较多的情况下,可以只考虑面积之和超过样地总土壤面积 95% 以上的几类小生境,按土壤面积权重考虑各小生境及各类小生境的样品比例,所得的混合样基本上能代表样地。这样,不仅可以减少工作量,更为重要的是,增大岩溶山区土壤退化研究中数据之间的可比性。

参考文献

- [1] Boerner R E J, Scherzer A J, Brinkman J A. Spatial patterns of inorganic N, P availability, and organic C in relation to soil disturbance: A chronosequence analysis. *Applied Soil Ecology*, 1998, 7: 159 ~ 177
- [2] Park S J, Vlek P L G. Environmental correlation of three-dimensional soil spatial variability: A comparison of three daptive techniques. *Geoderma*, 2002, 109: 117 ~ 140
- [3] Jhorara R K, Damb J C V, Bastiaanssen W G M, *et al.* Calibration of effective soil hydraulic parameters of heterogeneous soil profiles. *Journal of Hydrology*, 2004, 285: 233 ~ 247
- [4] 王其兵,李凌浩,刘先华,等. 内蒙古锡林河流域草原土壤有机碳及氮素的空间异质性分析. *植物生态学报*, 1998, 22(5): 409 ~ 414. Wang Q B, Li L H, Liu X H, *et al.* Spatial heterogeneity of soil organic carbon and total nitrogen in an Xilin River basin grass land, Inner Mongolia (In Chinese). *Acta Phytocologica Sinica*, 1998, 22(5): 409 ~ 414
- [5] 杨玉玲,田长彦,盛建东,等. 灌淤土壤有机质、全量氮磷钾空间变异性初探. *干旱地区农业研究*, 2002, 20(3): 26 ~ 30. Yang Y L, Tian C Y, Sheng J D, *et al.* Spatial variability of soil organic matter, total nitrogen phosphorus and potassium in cotton field (In Chinese). *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2002, 20(3): 26 ~ 30
- [6] Theocharopoulos S P, Wagner U G, Sprengart J, *et al.* European soil sampling guidelines for soil pollution studies. *The Science of the Total Environment*, 2001, 264: 51 ~ 62
- [7] Barahona E, Iriarte A. An overview of the present state of standardization of soil sampling in Spain. *The Science of the Total Environment*, 2001, 264: 169 ~ 174
- [8] Myeong H Y, Seung J J, Katsuyuki S, *et al.* Spacial variability of soil respiration in a larch plantation: Estimation of the number of sampling points required. *Forest Ecology and Management*, 2003, 175: 585 ~ 588
- [9] Kulmatiski A, Beard K H. Reducing sampler error in soil research. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, 36: 383 ~ 385
- [10] Fernando A, Fernandes J P A, Oliveira J F S. Comparative evaluation of European methods for sampling and sample preparation of soils-The Portuguese contribution. *The Science of the Total Environment*, 2001, 264: 181 ~ 186
- [11] 龙健,黄昌勇,李娟. 喀斯特山区土地利用方式对土壤质量演变的影响. *水土保持学报*, 2002, 16(1): 76 ~ 79. Long J, Huang C Y, Li J. Effects of land use on soil quality in karst hilly area (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 16(1): 76 ~ 79
- [12] 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.* The changes of soil quality in the process of karst rocky desertification and its evaluation of ecological environmental impact (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(3): 639 ~ 644
- [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): 598 ~ 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): 598 ~ 602
- [14] 李阳兵,高明,魏朝富,等. 土地利用对岩溶山地土壤质量形状的影响. *山地学报*, 2003, 21(1): 40 ~ 49. Li Y B, Gao M, Wei C F, *et al.* Differences of soil water characteristics under different land use patterns in karst mountain (In Chinese). *Chinese Journal of Mountain Research*, 2003, 21(1): 40 ~ 49
- [15] 陈建庚. 茂兰保护区喀斯特生态环境类型划分及特征分析. *贵州环保科技*, 2002, 6(2): 8 ~ 16. Chen J G. The type division of karst ecosystem environment and characteristics in Maolan Sanctuary (In Chinese). *Guizhou Environmental Protection Science and Technology*, 2002, 6(2): 8 ~ 16
- [16] 朴河春,刘启明,余登利,等. 用天然¹³C丰度法评估贵州茂兰喀斯特森林区玉米地土壤中有机碳的来源. *生态学报*, 2001, 21(3): 434 ~ 439. Piao H C, Liu Q M, Yu D L, *et al.* Origins of soil organic carbon with the method of natural ¹³C abundance in maize fields (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(3): 434 ~ 439
- [17] 周政贤主编. 茂兰喀斯特森林科学考察集. 贵阳: 贵州人民出版社, 1987. 1 ~ 23. Zhou Z X. ed. Scientific Investigation Report of Maolan Karst Forest (In Chinese). Guiyang: Guizhou People's Press, 1987. 1 ~ 23
- [18] 何尧启. 主成分分析在喀斯特土壤环境退化研究中的初步运用. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 1999, 17(1): 12 ~ 19. He R Q. The tentative application of the method of main ingredient analysis in the research of retrogradation of karst soil environment with special reference to Zhongdi township Zhiyun county in Guizhou Province (In Chinese). *Journal of Guizhou Normal University (Natural Science Edition)*, 1999, 17(1): 12 ~ 19

- [19] 朱守谦主编. 喀斯特森林生态研究(D). 贵阳: 贵州科技出版社, 1993. 52 ~ 62. Zhu S Q. ed. Ecological Research on Karst Forest (D) (In Chinese). Guiyang: Guizhou Science and Technology Press, 1993. 52 ~ 62.
- [20] 何子平, 蒋忠诚, 吕维莉. 岩溶动力系统对典型石灰岩土肥力特征的影响. 中国岩溶, 2001, 20(3): 231 ~ 235. He Z P, Jiang Z C, Lu W L. Effect of karst dynamic system on fertility of typical calcareous soils (In Chinese). Carsologica Sinica, 2001, 20(3): 231 ~ 235.

SPATIAL VARIABILITY OF SOIL ORGANIC CARBON AND REPRESENTATIVE SOIL SAMPLING METHOD IN MAOLAN KARST VIRGIN FOREST

Wang Shijie¹ Lu Hongmei^{1,2} Zhou Yunchao¹ Xie Liping^{1,2} Xiao De'an^{1,2}

(1 State Key Laboratory of Environment Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China)

(2 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract A plot (20 m ×30 m) was delineated for study in the Maolan karst virgin forest, containing 7 types of microhabitats: rocky surface, soil surface, rocky soil surface, rocky gullies, rocky crevices, stone pits and stone caves. The soil organic carbon (SOC) contents in the plot ranged from 40.1 g kg⁻¹ to 203.5 g kg⁻¹. The variation coefficients of SOC contents of the plot and the microhabitats were 43% and 41%, respectively, 22% ~ 42% between microhabitats of the same, and 14% ~ 57% within a microhabitat, suggesting high spatial variation of the SOC contents in the plot. In order to improve comparability of the data available for the study of soil degradation in the karst ecosystem, a representative sampling method is advanced for collecting samples in a sampling site formed of sampling points of the same microhabitat, which is delineated based on soil area weight. It goes like this: select several types of microhabitats whose respective sum of land areas exceeds 95% of the total soil area of the sample plot, determine quantity of the soil sample of each microhabitat that forms the representative soil sample of the plot by area weight, and the soil sample of each selected microhabitat is mixed out of soil samples from land patches of the same type of microhabitat, and their quantities are determined by area weight. Using this method, the surface area-weighted value of the SOC content in this plot was figured out to be 92.1 g kg⁻¹.

Key word Soil organic carbon; Spatial variability; Representative soil sample; Karst; Virgin forest; Maolan