

# 贵州喀斯特区域土壤有机质的分布与演化特征

邱欣月<sup>1,2</sup>, 安显金<sup>1,2</sup>, 董慧<sup>1,2</sup>, 汤海明<sup>1,2</sup>, 肖保华<sup>1,\*</sup>

(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 550081; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**中国西南喀斯特区域是全球最大的喀斯特生态区域之一, 该区生态环境脆弱, 水土流失严重, 石漠化趋势严峻。土壤有机质是极为重要的保持土壤结构与质量的物质, 深刻认识喀斯特区域土壤有机质的特征与演化是防治和改善我国西南喀斯特区域石漠化现状的迫切需求。本文以贵州省为例, 总结归纳前人的研究成果, 阐述了该区土壤有机质的分布规律与演化特征, 探讨了影响该区土壤有机质分布的因素, 以期提出更好的石漠化防治策略。中国西南喀斯特区域土壤受该区多山地形的限制, 具有水平地带性以及垂直地带性特征, 同时受到喀斯特地质地貌的控制, 发育各种非地带性土壤, 本区土壤类型多、成因复杂; 土壤有机质的分布、演化特征与土壤类型密切相关, 具有明显的区域特点。贵州省分布广泛的主要土壤有黄壤、石灰土、红壤、紫色土、黄棕壤、棕壤以及水稻土等。其中, 棕壤有机质含量最高, 原因可能是棕壤存在区域海拔高, 气温低, 抑制微生物活动, 土壤有机质分解过程比较缓慢; 石灰土有机质含量高, 原因可能是土壤中钙的含量较高, 有机质的保存可能受益于腐殖酸钙及碳酸盐沉淀的包裹保护; 而黄壤和红壤等酸性土壤有机质主要是与  $R_2O_3$  结合, 有机质的活性高于石灰土; 黄棕壤有机质含量介于棕壤和黄壤之间; 紫色土由于土壤质地的原因, 有机质含量最低。

**关键词:**喀斯特区域, 土壤, 土壤有机质, 分布与演化, 影响因素

中图分类号: S153 文献标识码: A 文章编号: 1672-9250(2015)06-0697-12 doi: 10.14050/j.cnki.1672-9250.2015.06.014

广义的土壤有机质(SOM)指的是存在于土壤中的一切含碳有机物, 它包括土壤中破碎的动植物残体, 微小生命体和其分解、合成的各种有机物质, 也包括微小的异源有机物质<sup>[1]</sup>。通常, 土壤有机质可用土壤有机碳(SOC)来指示。土壤有机碳与土壤团聚体的形成和稳定有紧密联系<sup>[2-3]</sup>, 土壤有机碳能够团聚土壤颗粒, 形成特定土壤结构, 并维持土壤结构的稳定。研究表明, 土壤有机碳含量降低, 土壤结构稳定性降低<sup>[4-7]</sup>。由于人类不合理的利用, 中国西南喀斯特生态系统土壤结构逐步退化, 水土流失严重, 部分地区石漠化强烈。土壤有机碳是岩溶系统中碳流通的主要环节和途径<sup>[8-10]</sup>, 在土壤侵蚀与退化过程中扮演十分重要的角色<sup>[11]</sup>。因此, 研究喀斯特区域土壤有机质的分布与演化特征对防治水土流失、土壤侵蚀具有重要的现实意义。

中国西南喀斯特区域(包括滇、黔、桂喀斯特区)是全球最大的石灰岩连片出露的喀斯特生态区, 总面积达  $54 \times 10^4 \text{ km}^2$ <sup>[12]</sup>。其中贵州省作为该区域的

中心地带, 碳酸盐岩山地面积约为  $12.95 \times 10^4 \text{ km}^2$ <sup>[13]</sup>, 占全省山地总面积的 73.6%<sup>[8, 13-14]</sup>。西南喀斯特地区独特的气候条件与地质地貌特征, 影响了该区土壤和植被的发育<sup>[4]</sup>, 造成该区土壤发育缓慢, 形成 1 cm 厚的土层, 往往需要几万年<sup>[15]</sup>, 极易受到不可逆转的破坏<sup>[16]</sup>, 属于典型的生态脆弱区<sup>[11]</sup>, 受到亚热带季风气候的冲击以及近年来人为活动的强烈影响, 原本脆弱的生境石漠化加剧<sup>[17]</sup>, 水土流失和土地退化严重。

西南喀斯特区域土壤有机质分布与演化与我国其它地区相比更为复杂, 一个重要的原因是西南喀斯特地区土壤的成土母质和来源具有多样性。前人研究表明, 本区土壤主要有以下成土来源: 下覆碳酸盐岩风化酸不溶物原位堆积<sup>[18-27]</sup>, 碳酸盐岩上覆及附近碎屑岩<sup>[28-29]</sup>、风成沉积物、火山灰的风化残余以及下覆碳酸盐岩与硅质碎屑岩混合源<sup>[30-34]</sup>, 还有地下水的溶蚀和交代<sup>[35-36]</sup>等。成土来源及成土过程的复杂性是喀斯特区域土壤的重要特点, 而成土

收稿日期: 2014-12-09; 改回日期: 2015-03-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(41273149); 贵州省科技项目(2011]3109); 中科院百人计划项目。

第一作者简介: 邱欣月(1986-), 女, 博士研究生, 从事土壤环境科学研究。E-mail: di\_xinyue@163.com。

\* 通讯作者: 肖保华(1970-), 研究员, 从事环境科学研究。E-mail: xiaobaohua@vip.skleg.cn。

来源的多样性可能导致土壤中矿质元素及粘土颗粒类型呈现不同,并影响喀斯特区域土壤有机质分布与演化特征,造成土壤有机质分布与演化的复杂性。

由于西南喀斯特区域地质、地貌环境以及成土过程的复杂性,该区土壤及其有机质分布与演化特征与其它地区土壤差异显著,土壤有机质总体分布特征、物理分组及化学分组有机质组分的分布与演化与其他地区土壤不同,喀斯特区内部不同种类土壤之间也有差异。本文将从土壤有机质的特征出发,以贵州省喀斯特区域土壤有机质分布与演化规律为例,总结中国西南喀斯特区域土壤有机质的总体分布以及有机质化学分组与物理分组组分的分布与演化特征,系统分析影响该区土壤有机质分布与演化特征的影响因素,为喀斯特脆弱生境有机质保持提供有用的信息。

## 1 贵州喀斯特区域土壤有机质的分布特征

土壤有机质的分布与土壤类型有关。贵州喀斯特地区土壤发育既受该区多山地形的限制,具有水平地带性以及垂直地带性特征,又受到该区喀斯特地质地貌的影响,形成各种非地带性土壤。贵州省土壤受大阶梯地形西高东低的限制,海拔 1 900 m 以上的西部地区属于凉亚热带,形成黄棕壤和棕壤,中部海拔 800~1 400 m 属温亚热带,发育有大面积的黄壤,东部地区海拔 700~500 m 属暖亚热带,发育红壤,这些都属于地带性土壤。贵州喀斯特区还发育有非地带性土壤,石灰土、紫色土以及人为土壤水稻土。喀斯特区域岩溶土壤由于其特殊的地质地貌,生态系统中  $\text{Ca}^{2+}$  含量一般较非岩溶区高<sup>[37]</sup>,土壤中  $\text{Ca}^{2+}$  含量也显著高于非岩溶土壤<sup>[38]</sup>。其土壤有机质的分布与演化除了具有一般土壤演化特征外,还有其自己的特点。

### 1.1 土壤有机质的总体分布特征

总体来说,贵州省耕层土壤有机质含量较为丰富<sup>[39-40]</sup>。贵州省土壤有机质的总体分布受地形地势的影响,地域、地形及土壤类型与有机质含量变化基本一致。地形上较高海拔的中部偏北及西北有机质含量明显比海拔较低的中部偏东高,西部和中部有机质含量呈现中等水平的特点。地形地势及气候的影响是造成土壤类型不同的主要原因,也有研究者认为施肥是农耕土壤类型分异的重要原因<sup>[41]</sup>。贵州省西部发育的土壤以黄棕壤为主,耕作土壤为

灰泡土和黄泥土<sup>[42]</sup>,耕层有机质含量为 80~85 g/kg;北部成土母质复杂,有机质含量为 85~40 g/kg,土壤类型主要为紫泥土和黄泥土<sup>[42]</sup>;东南部发育的土壤以黄、红壤为主,有机质含量低(一般低于 10 g/kg)<sup>[42]</sup>。在地域变化上,贵州省耕层土壤有机质含量丰富的耕地主要分布在六盘水、黔东南、黔南一带,中等含量的耕地主要分布在贵阳地区,含量最低的地带为铜仁和遵义地区,分别为 27.30 g/kg 和 30.79 g/kg<sup>[39, 43]</sup>。

土壤有机质含量受气候、植被、母岩、海拔、耕种等多种因素的影响。表 1 和表 2 均为贵州省不同利用方式下土壤有机质含量及不同土壤类型之间土壤有机质含量的对比。两表格数据显示,喀斯特区域土壤有机质含量沿剖面向下均降低,且林草地土壤有机质含量普遍高于旱地。林草地土壤有机质含量高于旱地可能是由于土壤耕种熟化过程中破坏了土壤原有结构,并且耕种过程促进氧气交换,促进土壤有机质的氧化分解。总体上说,棕壤有机质含量最高,其中 A 层达 10.79%,B 层为 6.07%,而 C 层为 3.27%;有机质含量最低的是紫色土,紫色土未发育 B 层,只有 A、C 层,A 层只有 2.56%。王晖等<sup>[44]</sup>对紫色土的研究也表明紫色土有机质含量较低。天然条件下的紫色土有机质含量属于中上水平<sup>[46]</sup>,自然肥力高,但开垦较为严重时土壤有机质水平急剧下降。石灰土剖面有机质含量一般高于黄壤剖面<sup>[45]</sup>。

耕地土壤经过长期的耕种熟化,耕层土壤有机质含量稳定,耕作使有机质含量略微下降,但降幅不大。以贵州省为例,童倩倩等<sup>[47]</sup>对贵州省耕地土壤养分进行统计分析时指出,贵州省耕地土壤有机质含量集中在 26~42 g/kg,平均值为 35.38 g/kg;高雪等<sup>[39]</sup>统计贵州省耕层土壤有机质含量为 35.52 g/kg,耕作土壤有机质变化范围在 1.4~116.8 g/kg。对比 1986 年贵州省第二次土壤普查<sup>[48]</sup>测定的耕层有机质含量 38.7 g/kg,贵州省耕地经过近 30 年的耕作,有机质含量下降幅度不大。而尹迪信等<sup>[40]</sup>发表的数据显示贵州省土壤有机质含量平均为 33.5 g/kg,在 6.9~73.5 g/kg 范围内变动,低于同时间贵州省的普查结果,这可能与贵州省地形地势复杂,采样点随机性较高有关。

不同淋溶程度的石灰土其土壤有机质含量不同。据贵州省土壤调查统计<sup>[49]</sup>,黑色石灰土有机质的平均含量为 5.425%,棕色石灰土的有机质平均含量为 3.478%,黄色石灰土的有机质平均含量为

表 1 贵州省几种土壤林草地及旱地土壤有机质含量分布<sup>[48]</sup>Table 1 Distribution of organic matter in soil under forests/grasses and dry lands in Guizhou Province, China<sup>[48]</sup>

土层	总体/%			林草地/%			旱地/%		
	A	B(AC)	C	A	B(AC)	C	A	B(AC)	C
黄壤	3.50	1.86	1.13	5.00	1.88	1.06	3.09	1.85	1.52
石灰土	3.71	—	—	5.18	—	—	3.32	—	—
红壤	3.93	1.65	1.08	4.40	1.75	1.13	2.66	1.40	0.92
黄棕壤	6.62	3.03	2.19	9.00	4.14	2.74	4.56	2.09	1.72
棕壤	10.70	6.07	3.27	—	—	—	—	—	—
紫色土	2.56	1.37	0.95	3.09	1.39	0.89	3.21	1.36	0.99
粗骨土	3.87	—	1.34	5.08	—	1.36	3.33	—	1.32

表 2 喀斯特区域同纬度石灰土与同纬度红、黄壤有机质含量对比<sup>[50]</sup>Table 2 Comparison of soil organic matter contents between limestone soils and red/yellow soils in the same latitude of Karst region<sup>[50]</sup>

土层	红壤 /%	黄壤 /%	石灰土/%				
			红色石灰土	黄色石灰土	棕色石灰土	黑色石灰土	
林 草 地	A 层	4.518	5.002	5.122	5.225	4.462	8.169
	样品数/个	44	346	15	123	6	58
	B 层	1.755	1.876	2.046	2.077	2.160	3.79
	样品数/个	44	334	15	126	11	35
旱 地	A 层	3.058	3.089	4.142	2.925	4.748	5.690
	样品数/个	17	948	5	722	4	31
	B 层	1.553	1.850	2.066	1.847	4.540	4.050
	样品数/个	17	761	5	442	4	28

3.193%, 红色石灰土有机质的平均含量为 3.444%, 都比贵州省黄壤(有机质平均含量为 2.945%)和红壤(有机质平均含量为 2.721%)高。这说明随着石灰土淋溶程度的增加,其土壤有机质含量有降低的趋势。朱明秋等<sup>[50]</sup>对石灰土与同纬度红黄壤有机质含量的总结(表 2)也表明这一点。

## 1.2 土壤有机质化学分组组分的分布特征

按照化学分组特征,土壤有机质主要包括非腐殖物质和腐殖质。腐殖质是一种具有特异性的多相分布的类高分子化合物<sup>[51-54]</sup>,占土壤有机质的 60%~90%<sup>[55]</sup>,可与金属离子、金属水合物络合,或者与粘土矿物结合,形成水溶性化合物及水不溶性化合物<sup>[56]</sup>。一般依据腐殖质的水溶性,将土壤腐殖质分为三类:既溶于酸又溶于碱,黄色至棕红色的富里酸(FA);溶于碱不溶于酸,棕黑至黑色的胡敏酸(HA);既不溶于酸又不溶于碱的胡敏素(HM)<sup>[56-60]</sup>。

腐殖质对土壤肥力具有重要作用。20 世纪 60 年代以前,对土壤有机质的研究主要集中于对腐殖质元素组成、官能团结构和性质等方面的研究<sup>[11,52]</sup>,对土壤腐殖质与区域环境生态的相关性研究较少。腐殖质是土壤结构和质量的重要控制因

素,深入研究喀斯特生态脆弱区土壤腐殖质对防治区域水土流失,指导区域环境生态的可持续发展具有重要意义。

李孝良等<sup>[61]</sup>通过测定贵州省喀斯特地区土壤腐殖质的组分指出,贵州喀斯特地区(荔波和普定县)的土壤有机质组成以胡敏素最高,约占土壤有机质总量的 56.9%~89.8%,其次为富里酸,约占有机质总量的 8.0%~36.0%,胡敏酸含量最低,仅占有机质的 2.2%~8.8%,HA/FA 值在 0.10~0.46 之间。他们认为贵州喀斯特地区土壤腐殖质组成与同纬度其它地区土壤腐殖质组成基本一致,一般表现为胡敏素含量最高,胡敏酸含量最低。但石灰土与同纬度黄壤、黄棕壤腐殖质相比,其 HA/FA 值明显较高<sup>[50]</sup>(表 3);另有研究报道西南喀斯特地区石灰土的 HA/FA 值可以大于 1<sup>[48,50,62]</sup>。石灰土中 HA/FA 值较高的原因可能是石灰土中的胡敏酸主要以胡敏酸钙的形式存在,导致胡敏酸较为稳定不易分解<sup>[50]</sup>。黄壤与黄棕壤土壤腐殖质主要与 R<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 结合成活性胡敏酸<sup>[11,48,50,62]</sup>。此外,贵州黄壤富含铁铝,属于铁铝土纲。研究表明,铁铝土表面的植物残体降解(矿化)产生的前腐殖物质可通过水的渗滤转移至下层,形成的 HA 较少<sup>[57]</sup>,导致黄壤 HA/

FA 值较小。

喀斯特岩溶区不同类型石灰土之间的 HA/FA 值也存在差异(见表 2)。谢传维等<sup>[63]</sup>对广西岩溶区土壤类型及特性的研究中指出,几种石灰土 HA/FA 值的顺序为,黑色石灰土>棕色石灰土>红色石灰土。这表明土壤腐殖质的 HA/FA 值与淋溶程度有关,淋溶程度越高,HA/FA 越低。

表 3 喀斯特区域土壤腐殖质的组成与同纬度黄壤和黄棕壤的对比<sup>[50]</sup>

Table 3 Composition of humic substance fractions among limestone soils, yellow soils and yellow-brown soils in the same latitude of karst region<sup>[50]</sup>

土壤类型	全碳/%	占全碳/%		胡敏酸/富里酸(HA/FA)	占胡敏酸总量/%	
		胡敏酸	富里酸		活性	钙结合
黄棕壤	13.44	5.90	31.20	0.19	99.00	1.00
黄壤	1.73	6.70	33.60	0.20	94.70	5.30
黑色石灰土	6.64	15.2	17.10	0.88	14.58	85.42
棕色石灰土	5.07	14.0	20.51	0.68	—	—

### 1.3 土壤有机质物理分组组分的分布特征

农业耕作导致我国土壤有机质含量水平日趋下降。研究表明,基于物理分组(主要包括粒径分组与密度分组)的有机质对耕作的响应不同<sup>[64-69]</sup>。相对化学分组方法,物理分组方法对土壤有机质化学结构破坏较小,能较直观的反映土壤有机质的原状结构和功能,在揭示土壤有机碳的周转特征<sup>[8, 70-71]</sup>等方面颇具优势,土壤有机质的物理分组方法也成为土壤有机质研究的热点。土壤有机质物理分组的方法以 50  $\mu\text{m}$ <sup>[72]</sup>或 53  $\mu\text{m}$ <sup>[8]</sup>为分界点,将土壤有机碳分为颗粒有机碳和矿物结合态有机碳,其中,颗粒有机碳是与土壤砂粒相结合的有机碳(即土壤颗粒直径>50  $\mu\text{m}$ 或 53  $\mu\text{m}$ 的颗粒中含有的有机碳)代表正在腐解的微生物体和植物残体<sup>[11, 64]</sup>。

研究表明,颗粒有机碳比其他土壤有机碳更易分解<sup>[73]</sup>。Christensen<sup>[74]</sup>的研究结果表明,大部分土壤有机碳与粘粒和粉粒相结合,这部分有机碳约占土壤总有机碳的 50%。如对丹麦一系列土壤的 Ap 层进行的研究发现:48%~69%的土壤有机碳与粘粒结合,21%~43%的土壤有机碳与粉粒结合,只有 2%~10%的土壤有机碳以颗粒有机碳存在<sup>[11]</sup>。贵州省土壤中颗粒有机碳含量显著高于 Christensen 的研究结果。廖洪凯和龙健<sup>[8]</sup>研究贵州省安顺地区小流域有机碳的变化时指出各个植被类型下砂粒有机碳(即颗粒有机碳)的含量高达

30%以上,粉砂粒分布在 28%以上;李阳兵等<sup>[75]</sup>对贵州黔灵山自然林地和灌草地的研究中发现,表层土壤中砂粒有机碳含量可占总有机碳的 50%以上。这都说明喀斯特土壤有机碳赋存形式主要为砂粒和粉砂粒有机碳。砂粒有机碳对环境变迁较为敏感,这可能是贵州省土壤环境脆弱的原因之一。但是,这个结论还有待更多的研究来支持和检验。比如,朱书法<sup>[11]</sup>就认为贵州土壤有机碳物理分组的研究结果可能与选取的采样点有关。

## 2 贵州喀斯特区域土壤有机质分布及演化的影响因素

### 2.1 气候的影响

温度和水分是主要的气候因子,影响着土壤地表植被特征,在土壤有机质转化过程中起多方面作用<sup>[76]</sup>,是决定土壤有机碳降解的重要因子<sup>[77-79]</sup>,也是控制非保护性土壤有机碳降解的主要因子<sup>[71]</sup>。温度对土壤有机质周转主要体现在其对微生物过程的控制<sup>[71, 80-81]</sup>,直接影响与土壤有机质分解转化相关的微生物的活动强度。许多的证据表明,年均温度及降雨量直接影响着土壤有机碳,但是,尚无法确定其是影响土壤有机碳生成还是降解,或是对二者都有影响<sup>[77, 82]</sup>。气候对土壤有机质的影响不仅仅在有机质含量方面,也可能影响土壤胡敏酸的结构<sup>[83]</sup>。

### 2.2 植被的影响

植被对土壤有机质影响显著。研究表明土壤有机碳的含量主要取决于植被凋零物的释归量<sup>[8, 84]</sup>。自然植被下,土壤有机质主要来源于地表植被的枯枝落叶<sup>[17]</sup>以及根系分泌物<sup>[11, 85-86]</sup>。植被通过植被类型<sup>[87]</sup>、植物种类<sup>[76, 88-89]</sup>、覆盖度<sup>[61]</sup>、凋零物量等影响土壤有机质的组成和含量。同一气候条件下,植被类型是土壤有机碳含量深度分布的一个主要控制因子<sup>[87]</sup>。

喀斯特地区由于生态环境退化,很多研究集中于植被演替对土壤有机质的影响。结果表明,乔木林下土壤有机质含量最高。如胡忠良<sup>[90]</sup>对贵州中部喀斯特山区的研究表明乔木林下土壤有机质含量大于灌木丛和灌草丛,灌木林与灌草丛在凋零物输入较少的情况下,土壤有机质含量维持在较高水平,可能是由于草本植物的生物归还和石灰性土壤有利于累积土壤有机质<sup>[49, 90-91]</sup>;王韵等<sup>[92-93]</sup>的研究表明土壤有机质含量按草地、灌草地、灌丛及乔木林的

顺序升高,微生物生物量在乔木林下最高;罗海波等<sup>[94]</sup>研究结果显示阔叶林地下土壤有机碳含量最高,其次为灌丛、灌丛草地,稀疏草地有机碳含量最低,并且对有机碳的质量也产生显著影响,腐殖酸总碳、胡敏酸碳和富里酸碳的分布规律与土壤总有机碳的分布相类似。表 2 中也显示,林草地土壤有机质含量显著高于旱地。土壤有机质的剖面演化均随土壤深度的增加有机碳含量降低,但是不同生态类型递减幅度不同,灌丛和林地土壤递减的幅度比旱地和果园中大<sup>[95]</sup>。

喀斯特地区土壤有机碳含量与植被覆盖度呈显著相关<sup>[96-97]</sup>。随着森林覆盖率的增加,生物累积增加,归还土壤的有机残体增多,有机碳含量增加<sup>[97]</sup>。朱书法<sup>[11]</sup>对龙里地区 3 个黄壤剖面进行研究发现,3 个剖面颗粒有机碳的分配比例不同,可能是因为上覆植被的不同造成的。森林覆盖度的变化伴随凋零物量的变化,影响土壤有机质输入土壤的量。李孝良等<sup>[61]</sup>研究石漠化过程中有机质的变化时指出,随石漠化程度的加深,森林覆盖度减小,土壤有机质的含量也减少。

植被凋零物的分解是土壤有机质形成的关键环节,凋零物质量和 SOM 累积量有直接联系,并广泛应用于土壤有机碳(SOC)模型<sup>[98]</sup>。植被年凋零物量大,喀斯特区域土壤有机碳含量较高<sup>[99-100]</sup>。凋零物中木质素的转化和缩合对土壤有机质中腐殖质的形成和累积有重要的作用<sup>[58]</sup>,不同植被凋零物的木质素含量的差异可能导致所形成的腐殖质的碳含量出现差别。放射性同位素<sup>14</sup>C 示踪木质素向胡敏酸的转变,表明胡敏酸中 34.2% 的碳来自于木质素<sup>[101-102]</sup>。凋零物的质量仅仅控制短期土壤碳分解和累积动态,长期 SOC 累积和稳定性受凋零物输入质量与土壤基质相互作用的控制<sup>[103-104]</sup>。

### 2.3 土壤质地的影响

土壤质地对土壤有机质的分布有一定的影响。土壤理化性状在很大程度上影响土壤有机碳含量<sup>[105]</sup>,而土壤有机碳的稳定性受土壤金属氧化物、粘粒含量及粘土矿物种类的影响<sup>[106]</sup>。黄壤和红壤属于酸性土壤,土壤中钙、镁元素淋失较多<sup>[17]</sup>,腐殖质主要是与  $R_2O_3$  型矿物结合<sup>[49,62]</sup>。多元回归分析表明,交换性  $Ca^{2+}$  是喀斯特林地土壤有机碳的主要控制因素<sup>[104]</sup>。石灰土上覆植被钙含量显著高于黄壤和红壤区的植被<sup>[38]</sup>,植被凋落物中的  $Ca^{2+}$  不易淋溶,植物凋零并腐殖化后的胡敏酸易与  $Ca^{2+}$  形成

不易分解的胡敏酸钙<sup>[17]</sup>,该化合物能稳定土壤有机质<sup>[107]</sup>,降低有机质的分解程度<sup>[17,108]</sup>,有利于土壤有机质的累积<sup>[14,61]</sup>。石灰土中钙与有机质的作用可能不仅仅体现在腐殖酸钙的形成,土壤孔隙水中的溶解碳酸钙还可能在土壤有机质表面覆盖一层碳酸钙结壳,从而抑制腐殖化有机质的分解<sup>[109]</sup>,被碳酸钙结壳包裹的有机质主要是物理保护的活性有机碳,其化学稳定性较差<sup>[110]</sup>。还有研究认为, $Ca^{2+}$  可在 SOM 与土壤矿物之间形成离子键桥,形成粒径较大的有机无机复合体,并促使颗粒态有机碳(POC;53~2 000  $\mu m$ )在 8~9 mm 的大团聚体中累积<sup>[111]</sup>。

Feller 和 Beare<sup>[112]</sup>研究表明低活性黏土为主的土壤黏土含量与 SOM 显示线性关系,且黏粒对土壤微生物有保护作用,因此,黏粒含量高的土壤有机物分解后加入微生物的比例也较高<sup>[113-115]</sup>。Neufeldt 等<sup>[116]</sup>认为黏质土壤中的有机质含量是壤土的 2 倍以上。喀斯特地区土壤有机质含量也与黏粒含量呈现正相关关系<sup>[104,117]</sup>。但也有研究者发现,喀斯特地区土壤砂粒中 SOC 平均含量最高,其次是粉粒,黏粒 SOC 含量最低<sup>[118]</sup>,这可能与喀斯特地区土壤砂粒含量较高有关,也可能与喀斯特地区土壤  $Ca^{2+}$  含量较高有关。

### 2.4 海拔的影响

贵州喀斯特地区地处云贵高原,总体海拔在 1 000~2 000 m 之间,部分地区海拔可达 3 000 m。高海拔低温高湿的气候条件有利于有机质积累,加上岩溶环境对土壤有机质累积的作用,造成该区土壤有机质含量普遍高于同纬度其它地区的土壤<sup>[40]</sup>。

海拔对土壤有机质含量影响在高海拔地区和低海拔地区大致相同,但也有研究发现了一些小的差别。大多数研究者认为随海拔高度的增加土壤有机质含量上升<sup>[11,119-121]</sup>,该结果有多种原因。首先,高海拔地区的温度及湿度因素不利于微生物对植物有机残体的分解,同时也不利于土壤有机质的微生物降解,从而有利于土壤中有有机质的累积<sup>[91,122-123]</sup>,研究结果显示,有机残体分解向土壤的输入量及土壤有机质分解量比率沿海拔升高;其次,高海拔地区人类活动干扰相对小,有利于有机质保存;再次,高海拔区的峰丛洼地等特殊水文化学过程区,坡面上往往发育有石隙土、石碗土等土体形式,土层厚,周围裸岩的存在会增加水分和风化凋零物的输入,有机质含量较高。但喀斯特地区海拔与土壤有机质含量

的关系也存在不同的观点,如李孝良等<sup>[61]</sup>对荔波茂兰喀斯特原始森林不同海拔的土壤有机质组分含量分析结果表明,土壤有机碳总量和有机碳组分含量均呈现山中下部出现峰值,向两端呈递减的趋势;王晶等<sup>[124]</sup>的研究则认为,随海拔的升高,土壤有机质及腐殖质含量均呈现先升高后降低的趋势。喀斯特地区土壤有机质化学分组组分 HA/FA 值的研究结果也存在不一致,比如,李孝良等<sup>[61]</sup>等研究结果表明从山顶至山脚呈递增趋势,但徐跃等<sup>[83]</sup>结果表明对土壤腐殖质组分的相对含量影响不大。

## 2.5 土壤 pH 的影响

土壤有机质不同组分的含量与土壤 pH 值密切相关<sup>[17,125]</sup>。酸性的黄壤和红壤 pH 一般小于 5.5,细菌及放线菌的活性明显下降,低 pH 能够促进土壤中酸性水解反应的进行,从而去除土壤中的蛋白质、核酸和多糖等组分<sup>[17,126]</sup>,而且在这种 pH 条件下,真菌活跃<sup>[127]</sup>,可将有机质彻底分解。石灰土呈现中性或微碱性,真菌活性受到抑制,造成土壤中的木质素分解不完全;虽然有研究表明石灰土中微生物生物量及细菌多样性较高<sup>[110]</sup>,但糖类和蛋白质等易分解化合物的酸性水解反应受到抑制,影响到细菌对糖类和蛋白质等的利用,所以,黄壤等酸性土中的有机质含量低于石灰土<sup>[11]</sup>。表 1 也显示林草地植被下石灰土土壤有机质含量高于黄壤和红壤。

## 2.6 土壤微生物的影响

土壤微生物与土壤有机物之间有复杂的相互关系<sup>[76,128-130]</sup>。土壤微生物的存在可促进有机物料降解,增加团聚体的稳定性,促进土壤粘粒矿物的形成,从而间接影响土壤有机碳的稳定程度<sup>[131]</sup>。其中,真菌对大团聚体的稳定性和形成有重要作用<sup>[132]</sup>,表现为真菌菌根可提高土壤团聚体的稳定性<sup>[133]</sup>,其菌丝与其他根际微生物联合产生的有机物使微团聚体进一步胶结成大团聚体<sup>[131]</sup>,增加有机碳的储存能力<sup>[134]</sup>。石灰土呈现中性或碱性,石灰土真菌活性受到抑制(见 2.5 章节),与真菌菌丝胶结的大团聚体含量可能相对减少,影响与大团聚体胶结及物理保护有关的有机质的含量。石灰土中的有机质可能更多的为腐殖酸钙<sup>[17]</sup>或者碳酸钙“包裹”的有机质<sup>[109]</sup>;酸性的黄壤和红壤等地带性土壤可能包含较多的物理保护较好的真菌菌丝形成的团聚有机质,但目前还没有这部分的观测证据。土壤微生物还可从营养学角度影响土壤有机质的分布,如 2.5 章节的描述。

## 2.7 石漠化小生境的影响

中国西南喀斯特区域地表岩基出露面积大,地形起伏多变,溶蚀作用导致微地貌发育多变,形成了石面、石沟、石缝、石坑等多种小生境<sup>[135]</sup>。这些小生境外部形态的差异导致光照、热量以及水分运移等不同<sup>[136]</sup>,与贵州所在的气候大区存在较大的差别<sup>[8,137]</sup>,使喀斯特地貌的生态气候丰富多变<sup>[138]</sup>。不同小生境的土壤有机质的保存与演化有自己的特点。廖洪凯和龙健<sup>[8]</sup>研究表明,同一植被类型下,与周围土壤相比石坑中的砂粒有机碳更易累积,这是由于密度较小的砂粒随水流失后累积到石坑中,从而使石坑中富集砂粒有机碳<sup>[8]</sup>。陈祖拥<sup>[140]</sup>等研究表明,喀斯特原始森林中石缝及石坑中土壤有机质含量高于石沟、石洞和土面土壤。

## 2.8 土地利用方式改变的影响

土地利用方式的变化不仅可直接改变土壤有机质含量与分布<sup>[76,141]</sup>,而且可通过影响与有机碳形成转化相关的因子而间接改变土壤有机质含量与分布<sup>[76]</sup>。一般认为毁林开荒会降低土壤有机质的总含量,且颗粒有机碳(活性易降解组分)的降低更为显著。对贵州荔波喀斯特原始森林保护区内农林生态系统发生转变区域的研究发现,森林土壤有机碳含量(1.81%~16.00%)普遍高于农田土壤有机碳含量(0.43%~2.22%),这可能是由于毁林造田加速了土壤有机质的降解,从而降低了土壤有机质的含量<sup>[107]</sup>。刘启明等<sup>[107]</sup>用稳定碳同位素示踪农林生态转换系统中土壤有机质含量变化时指出,农林生态系统发生转变时,降解易矿化的组分,积累难矿化组分,造成土壤中活性有机质的比例降低。当岩溶植被破坏、土地开垦后,土壤有机碳组分中分解相对较快的部分(轻组有机碳和颗粒有机碳)将在 30~40 年内耗尽<sup>[8,73,75]</sup>。土地利用方式的改变也可改变土壤有机质化学分组组分的相对比例,尹毅萍<sup>[95]</sup>研究表明,林地及灌丛土壤开发为果园及旱地后,胡敏酸、胡敏素和富里酸含量均减少。与毁林造田相反,退耕还林还草可增加土壤有机质的含量<sup>[142]</sup>。

## 2.9 石漠化程度的影响

石漠化是指青藏高原隆升过程中诱发的生态灾害问题<sup>[143-144]</sup>,是喀斯特山区土壤遭受强烈侵蚀导致基岩大面积裸露、自然植被景观严重破坏、土壤生产力下降的土壤退化现象。石漠化与人类不合理的活动有关,喀斯特地区石漠化土壤流失比一般地区荒漠化更为强烈,因此喀斯特石漠化造成的社会危

害也更大<sup>[145]</sup>。随石漠化程度加重,上覆植被覆盖率发生变化,植被类型由乔木逐渐向灌丛及草地过渡,含水量也会逐渐减小<sup>[146]</sup>,土壤 $<0.005\text{ mm}$ 的粘粒含量减少<sup>[117]</sup>,这些都与土壤有机质的分布与演化有关,覆盖率及植被类型对有机质的影响见2.2章节,粘粒对有机质的影响见2.3章节,而土壤含水率对土壤有机质有影响可能是因为土壤含水量减小后,导致土壤通气性增加,提高了好氧微生物对有机质的分解。研究表明,强度石漠化区域土壤有机质含量变异性最大,与中度及非石漠化区域土壤有机质含量相比,采样点最高有机质含量及最低有机质含量均分布于最高石漠化地区,可能与石漠化区域复杂地质地貌引起小生境有关<sup>[147]</sup>。但石漠化进行恢复后,在自然样地中随着恢复年限的增加,SOM也相应的有所增加<sup>[119]</sup>。

一般情况下,黄壤和红壤等地带性土壤有机质分布与演化情况与其它地区相同,而非地带性的石灰土和紫色土有机质的分布与演化分别有其特殊性。土壤有机质保存及演化的影响因素多且关系复杂,各因素间相互的联系,除了上述影响因素外,还有一些因素可影响喀斯特区域土壤有机质的含量及分布特征,如刘涛津等<sup>[148]</sup>研究认为不同地形部位(坡肩、坡背、坡腰和坡脚)对溶解有机碳(DOC)含量有影响,沿坡面向下DOC含量升高。这些因素或多或少都与上述列举的因素有一定的联系。

### 3 问题与展望

喀斯特区域土壤有机质对区域水土保持有重要的作用,但是,对于喀斯特区域土壤有机质的储存机

制及物理化学性质的研究还有待增加。很多研究者认为石灰土胡敏酸与 $\text{Ca}^{2+}$ 形成胡敏酸钙,胡敏酸被降低了活性而得以保存,但也有研究者认为与 $\text{Ca}^{2+}$ 键合的有机质主要是被物理保护的活性有机碳部分,化学稳定性较差<sup>[110]</sup>,因此与 $\text{Ca}^{2+}$ 结合的有机质可能分为两种,一种是离子键或者共价键结合的胡敏酸钙,这种形式的有机质化学稳定性较强;第二种是钙团聚作用引起的物理稳定的有机质,一旦 $\text{Ca}^{2+}$ 遭受淋溶,物理结构破坏,这种形式的有机质由于活性较强,很容易矿化分解。喀斯特区域土壤与肥力水平可能与这两种有机质在土壤中的相对比例有关。该区域土壤有机质的储存机制大多停留在胡敏酸钙,对其它可能的有机质存在形式研究较少。喀斯特区域土壤有机质的储存机制研究有助于喀斯特区域水土保持策略的提出,而对喀斯特区域土壤有机质性质进行系统研究有助于揭示喀斯特区域环境脆弱性的原因。

目前,对中国西南喀斯特地区土壤有机质的研究大多集中于SOM或SOC含量以及微生物量碳,对SOC再次进行细分,如分成胡敏酸、富里酸、胡敏素等几种组分研究较少,利用现代化学分析手段,如红外光谱和核磁共振等研究土壤有机质官能团的资料则更少。此外,土壤有机质研究大多集中于表层土壤,这可能是因为表层土壤与农业生产联系更为紧密,但喀斯特水土流失影响的不仅仅是表层,当表层流失后下层更快侵蚀,有必要对土壤下层有机质进行研究,为水土流失发生后,及时实施有效的补救和治理提供理论基础。

### 参 考 文 献

- [1] 李学垣. 土壤化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [2] Huang S, Peng X X, Huang Q R, *et al.* Soil aggregation and organic carbon fractions affected by long-term fertilization in a red soil of subtropical China[J]. *Geoderma*, 2010, 154(3-4): 364-369.
- [3] Tisdall J M, Oades J M. Organic-matter and water-stable aggregates in soils[J]. *Journal of Soil Science*, 1982, 33(2): 141-163.
- [4] Rasoo I R, Kukal S S, Hira G S. Soil organic carbon and physical properties as affected by long-term application of FYM and inorganic fertilizers in maize-wheat system[J]. *Soil & Tillage Research*, 2008, 101(1-2): 31-36.
- [5] LeBissonnais Y, Arrouays D. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility. 2. Application to humic loamy soils with various organic carbon contents[J]. *European Journal of Soil Science*, 1997, 48(1): 39-48.
- [6] Filho C C, Lourenco A, Guimaraes M D F, *et al.* Aggregate stability under different soil management systems in a red latosol in the state of Parana, Brazil[J]. *Soil & Tillage Research*, 2002, 65(1): 45-51.
- [7] Paz A. Influence of long-term cultivation on soil physical properties and compaction of an umbric horizon[A]. In Sustainable land management-environmental protection: A soil physical approach[M]. Pagliai M and Jones R J A. Catena Verlag: Reiskirchen, Germany. 2002: 387-396.

- [8] 廖洪凯, 龙健. 喀斯特山区不同植被类型土壤有机碳的变化[J]. 应用生态学报, 2011, 22(9): 2 253—2 258.
- [9] 段正锋, 傅瓦利, 甄晓君, 等. 岩溶区土地利用方式对土壤有机碳组分及其分布特征的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(2): 109—114.
- [10] Dalal R C, Henderson P A, Glasby J M. Organic-matter and microbial biomass in a Vertisol after 20-yr of zero-tillage[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1991, 23(5): 435—441.
- [11] 朱书法. 贵州典型陆地生态系统土壤中有有机碳含量及碳同位素组成[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2006.
- [12] 张信宝, 王世杰, 孟天友, 等. 农耕驱动西南喀斯特地区坡地石质化的机制[J]. 地球与环境, 2010, 38(2): 123—128.
- [13] 龙健, 李娟, 滕应, 等. 贵州高原喀斯特环境退化过程土壤质量的生物学特性研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(2): 47—50.
- [14] 杨明德. 论喀斯特环境的脆弱性[J]. 云南地理环境研究, 1990, 2(1): 21—29.
- [15] 杨胜天, 朱启疆. 论喀斯特环境中土壤退化的研究[J]. 中国岩溶, 1999, 18(2): 69—75.
- [16] 苏广实, 王世杰, 胡宝清, 等. 喀斯特小流域不同土地利用方式对土壤物理性状和微生物的影响——以广西都安澄江小流域为例[J]. 地球与环境, 2013, 41(1): 29—36.
- [17] 朱书法, 刘丛强, 陶发祥, 等. 贵州喀斯特地区棕色石灰土与黄壤有机质剖面分布及稳定碳同位素组成差异[J]. 土壤学报, 2007, 44(1): 169—173.
- [18] 袁道先, 蔡桂鸿. 岩溶环境学[M]. 重庆: 重庆出版社, 1988.
- [19] Wang S J, Ji H B, Ouyang Z Y, *et al.* Preliminary study on weathering and pedogenesis of carbonate rock[J]. Science in China Series D-Earth Sciences, 1999, 42(6): 572—581.
- [20] 孙承兴, 王世杰, 刘秀明, 等. 碳酸盐岩风化壳岩-土界面地球化学特征及其形成过程——以贵州花溪灰岩风化壳剖面为例[J]. 矿物学报, 2002, 22(2): 126—132.
- [21] 季宏兵, 欧阳自远, 王世杰, 等. 白云岩风化剖面的元素地球化学特征及其对上陆壳平均化学组成的意义——以黔北新蒲剖面为例[J]. 中国科学(D辑:地球科学), 1999, 29(6): 504—513.
- [22] 王世杰, 孙承兴, 冯志刚, 等. 发育完整的灰岩风化壳及其矿物学与地球化学特征[J]. 矿物学报, 2002, 22(1): 19—29.
- [23] 孙承兴, 王世杰, 季宏兵. 碳酸盐岩风化成土过程中 REE 超常富集及 Ce 强烈亏损的地球化学机理[J]. 地球化学, 2002(2): 119—128.
- [24] 王世杰, 季宏兵, 欧阳自远, 等. 碳酸盐岩风化成土作用的初步研究[J]. 中国科学(D辑:地球科学), 1999, 29(5): 441—449.
- [25] Plaster R W, Sherwood W C. Bedrock weathering and residual soil formation in central virginia[J]. Geological Society of America Bulletin, 1971, 82(10): 2813—&.
- [26] Bronger A, Ensling J, Gutlich P, *et al.* Rubification of terrae rossae in Slovakia—A mössbaure-effect study[J]. Clays and Clay Minerals, 1983, 31(4): 269—276.
- [27] Isphording W C. Mineralogical and physical properties of gulf coast limestone soils[J]. Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions, 1978, 28: 201—214.
- [28] Olson C G, Ruhe R V, Mausbach M J. The Terra Rossa limestone contact phenomena in karst, southern Indiana[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 1 075—1 079.
- [29] 符必昌, 黄英. 试论碳酸盐岩上覆红土的形成模式及演化趋势[J]. 地质科学, 2003, 38(1): 128—136.
- [30] Ballagh T M, Runge E C A. Clay-rich horizons over limestone—Illuvial or residual[J]. Soil Science Society of America Proceedings, 1970, 34(3): 534—&.
- [31] Danin A, Gerson R, Garty J. Weathering patterns on hard limestone and dolomite by endolithic lichens and cyanobacteria: Supporting evidence for eolian contribution to terra rossa soil[J]. Soil Science, 1983, 136(4): 213—217.
- [32] Muhs D R, Bush C A, Stewart K C, *et al.* Geochemical evidence of Saharan dust parent material for soils developed on Quaternary limestones of Caribbean and western Atlantic islands[J]. Quaternary Research, 1990, 33(2): 157—177.
- [33] Borg L E, Banner J L. Neodymium and strontium isotopic constraints on soil sources in Barbados, West Indies[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1996, 60(21): 4 193—4 206.
- [34] Muhs D R, Crittenden R C, Rosholt J N, *et al.* Genesis of marine terrace soils, Barbados, West Indies—Evidence from mineralogy and geochemistry[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1987, 12(6): 605—618.
- [35] 李景阳, 王朝富, 樊廷章. 试论碳酸盐岩风化壳与喀斯特成土作用[J]. 中国岩溶, 1991, 10(1): 32—41.
- [36] 李景阳, 朱立军, 梁风. 碳酸盐岩红土风化壳主要特征及红土成因探讨——以贵州典型剖面为例[J]. 水文地质工程地质, 2001, (5): 7—11+16.
- [37] 梁建宏. 岩溶动力系统土壤钙元素迁移机理初步研究[D]. 南宁: 广西师范大学, 2010.
- [38] 卢玖桂, 曹建华, 何寻阳. 桂林毛村石灰土和红壤元素生物地球化学特征研究[J]. 广西科学, 2006, 13(1): 58—64.
- [39] 高雪, 陈海燕, 董倩倩. 贵州耕地耕层土壤养分状况评价[J]. 贵州农业科学, 2013, 41(12): 87—91+96.

- [40] 尹迪信. 贵州省土壤有机质含量及其影响因素[J]. 土壤, 1988, (3): 141-143.
- [41] 秦钟立, 秦松, 刘洪斌. 贵州省植烟区土壤 pH 值和养分空间变异特征的研究[J]. 土壤通报, 2007, 38(6): 1 046-1 051.
- [42] 刘茜茜. 简析贵州自然地理环境特征及其对农业生产的影响[J]. 黔东南民族师专学报, 2000, 18(3): 34-36.
- [43] 翟琨, 向东山, 陈佳勃. 贵州省土壤养分状况与培肥措施[J]. 甘肃农业科技, 2004, (12): 36-38.
- [44] 王晖, 丁伟, 许自成, 等. 贵州烟区紫色土与其它土壤类型养分特点的差异[J]. 贵州农业科学, 2006, 34(3): 22-25.
- [45] 朱书法, 刘丛强, 陶发祥, 等. 喀斯特地区土壤有机质的稳定碳同位素地球化学特征[J]. 地球与环境, 2006, 34(3): 51-58.
- [46] 黄景, 李志先, 银秋玲, 等. 广西紫色土系统分类研究[J]. 广西农业科学, 2010, 41(9): 947-950.
- [47] 董倩倩, 何腾兵, 高雪, 等. 贵州省耕地土壤的养分状况[J]. 贵州农业科学, 2011, 39(2): 82-84.
- [48] 贵州省土壤普查办公室. 贵州省土壤[M]. 贵阳: 贵州科学技术出版社, 1994.
- [49] 曹建华, 袁道先, 潘根兴. 岩溶生态系统中的土壤[J]. 地球科学进展, 2000, 3(1): 37-44.
- [50] 朱明秋, 曹建华, 郭芳. 基于碳酸盐岩风化的碳源分析及土壤的影响作用机制[J]. 中国岩溶, 2007, 26(3): 202-206.
- [51] Dubach P, Mehta N. The chemistry of soil humic substances[J]. Soils Fert, 1963, 26: 293-300.
- [52] Kononova M M. Soil organic matter: Its nature, its role in soil formation and in soil fertility[M]. Press Ltd. Headington Hill Hall, Oxford, England, 1966.
- [53] Schnitzer M, Khan S U. Humic substances in the environment[M]. Marcel Dekker. Inc., New York, 1972: 327
- [54] 朱祖祥. 土壤学(上)[M]. 北京: 农业出版社, 1983.
- [55] 奚森. 土壤有机质[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 71-87.
- [56] Schnitzer M, Khan S U. Soil organic matter[M]. Access Online via Elsevier, 1975.
- [57] Cunha T J F, Madari B E, Canellas L P, *et al.* Soil organic matter and fertility of anthropogenic dark earths (Terra Preta de Indio) in the Brazilian Amazon Basin[J]. Revista Brasileira De Ciencia Do Solo, 2009, 33(1): 85-93.
- [58] Steenvson F. Humus chemistry: Genesis, composition, reactions[M]. John Wiley & Sons, New York, 1982.
- [59] Rice J A, Maccarthy P. Statistical evaluation of the elemental composition of humic substances[J]. Organic Geochemistry, 1991, 17(5): 635-648.
- [60] 张晋京, 奚森. 土壤胡敏素研究进展[J]. 生态学报, 2008, 28(3): 1 229-1 239.
- [61] 李孝良, 陈效民, 周炼川, 等. 西南喀斯特石漠化过程中土壤有机质组分及其影响因素[J]. 山地学报, 2010, 28(1): 56-62.
- [62] 全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.
- [63] 谢传维. 广西岩溶地区土壤类型及特性[J]. 广西农学院学报, 1982, (1): 83-93.
- [64] Tiessen H, Stewart J W B. Particle-size fractions and their use in studies of soil organic-matter. 2. Cultivation effects on organic-matter composition in size fractions[J]. Soil Science Society of America Journal, 1983, 47(3): 509-514.
- [65] Anderson D W. Processes of humus formation and transformation in soils of the canadian great plains[J]. Journal of Soil Science, 1979, 30(1): 77-84.
- [66] Dalal R C, Mayer R J. Long-term trends in fertility of soils under continuous cultivation and cereal cropping in southern queensland. 4. Loss of organic-carbon from different density-functions[J]. Australian Journal of Soil Research, 1986, 24(2): 301-309.
- [67] Dalal R C, Mayer R J. Long-term trends in fertility of soils under continuous cultivation and cereal cropping in southern queensland. 3. Distribution and kinetics of soil organic-carbon in particle-size fractions[J]. Australian Journal of Soil Research, 1986, 24(2): 293-300.
- [68] Dalal R C, Mayer R J. Long-term trends in fertility of soils under continuous cultivation and cereal cropping in southern queensland. 6. Loss of total nitrogen from different particle-size and density fractions[J]. Australian Journal of Soil Research, 1987, 25(1): 83-93.
- [69] Gregorich E G, Ellert B H, Monreal C M. Turnover of soil organic-matter and storage of corn residue carbon estimated from natural C-13 abundance[J]. Canadian Journal of Soil Science, 1995, 75(2): 161-167.
- [70] Christensen B T. Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover[J]. European Journal of Soil Science, 2001, 52(3): 345-353.
- [71] Garten C T, Post W M, Hanson P J, *et al.* Forest soil carbon inventories and dynamics along an elevation gradient in the southern Appalachian Mountains[J]. Biogeochemistry, 1999, 45(2): 115-145.
- [72] Gregorich E, Ellert B. Light fraction and macroorganic matter in mineral soils[A]. In Soil sampling and methods of analysis[M]. Carter M R and Ellert B H, Lewis Publ., Boca Raton, FL. 1993: 397-407.
- [73] 朴河春, 刘启明, 余登利, 等. 用天然<sup>13</sup>C 丰度法评估贵州茂兰喀斯特森林区玉米地土壤中有有机碳的来源[J]. 生态学报, 2001, 21(3): 434-439.
- [74] Christensen B T. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates[A]. In Advances in soil science[M]. Stewart B A, Springer, New York, 1992: 1-90.

- [75] 李阳兵, 杨霞, 宋晓利, 等. 岩溶生态系统土壤非保护性有机碳含量研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(2): 402-406.
- [76] 王艳芬, 陈佐忠. 人类活动对锡林郭勒地区主要草原土壤有机碳分布的影响[J]. 植物生态学报, 1998, 22(6): 66-72.
- [77] Atkinson C J, Fitzgerald J D, Hipsley N A. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: A review[J]. Plant and Soil, 2010, 337(1-2): 1-18.
- [78] Jenkinson D S, Ayanaba A. Decomposition of  $^{14}\text{C}$ -labeled plant material under tropical conditions[J]. Soil Science Society of America Journal, 1977, 41(5): 912-915.
- [79] Sorensen L H. Rate of decomposition of organic-matter in soil as influenced by repeated air drying-rewetting and repeated additions of organic material[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1974, 6(5): 287-292.
- [80] Insam H. Are the soil microbial biomass and basal respiration governed by the climatic regime[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1990, 22(4): 525-532.
- [81] Winkler J P, Cherry R S, Schlesinger W H. The Q10 relationship of microbial respiration in a temperate forest soil[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1996, 28(8): 1 067-1 072.
- [82] Glaser B, Guggenberger G, Zech W, *et al.* Soil organic matter stability in Amazonian Dark Earths[A]. In Amazonian dark earths: Origin, properties, management[M], Lehmann J, Kern D C, Glaser B, *et al.* Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 2003:141-158.
- [83] 徐跃, 姚天全, 永镇男. 气候因素对土壤有机质组成和性质的影响[J]. 山地研究, 1994, 12(3): 163-168.
- [84] 赵丽娟, 韩晓增, 王守宇, 等. 黑土长期施肥及养分循环再利用的作物产量及土壤肥力变化. IV. 有机碳组分的变化[J]. 应用生态学报, 2006, 17(5): 817-821.
- [85] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [86] Kogel-Knabner I. The macromolecular organic composition of plant and microbial residues as inputs to soil organic matter[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2002, 34(2):139-162.
- [87] Jobbagy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation[J]. Ecological Applications, 2000, 10(2): 423-436.
- [88] Yin C J, Huang D H. A model of litter decomposition and accumulation in grassland ecosystems[J]. Ecological Modelling, 1996, 84(1-3): 75-80.
- [89] 陈佐忠. 内蒙古草原土壤的植被特征及其对土壤形成过程的影响[A], 见:北京土壤学会土壤资源利用与科学施肥:北京土壤学会第六次代表大会及学术年会论文集[C]. 北京:北京科学技术出版社, 1991: 185-188.
- [90] 胡忠良. 贵州中部喀斯特山区不同植被下土壤养分与微生物功能变化研究[D]. 南京:南京农业大学, 2009.
- [91] 杨成, 刘丛强, 宋照亮, 等. 贵州喀斯特山区植物土壤 C、N、S 的分布特征[J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(1): 45-51.
- [92] 王韵. 喀斯特地区土壤质量对植被演替的响应特征研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2007.
- [93] 王韵, 王克林, 邹冬生, 等. 广西喀斯特地区植被演替对土壤质量的影响[J]. 水土保持学报, 2007, 21(6): 130-134.
- [94] 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): 24-28.
- [95] 严毅萍. 典型岩溶区不同土地利用方式对土壤有机碳库及周转时间的影响[D]. 桂林: 广西师范大学, 2012.
- [96] 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.
- [97] 吴海勇. 喀斯特峰丛洼地土壤养分空间变异特征及土壤宜茶性分析[D]. 南京:南京农业大学, 2009.
- [98] Austin A T, Ballare C L. Dual role of lignin in plant litter decomposition in terrestrial ecosystems. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America[J], 2010, 107(10): 4 618-4 622.
- [99] 肖德安, 罗维均, 王世杰, 等. 喀斯特地区浅层地下水对植被退化的水文地球化学响应——以贵州荔波拉桥小流域为例[J]. 地球与环境, 2012, 40(3): 297-304.
- [100] 刘玉杰, 王世杰, 刘秀明, 等. 茂兰喀斯特植被演替中土壤微生物量碳氮研究[J]. 地球与环境, 2011, 39(2): 188-195.
- [101] 陈华葵, 李阜棣, 陈文新, 等. 土壤微生物学[M]. 上海: 上海科学出版社, 1961.
- [102] 边文骅. 腐植酸形成的生物学机理研究概况[J]. 河北师范大学学报, 2000, 24(4): 526-530.
- [103] Gentile R, Vanlauwe B, Six J. Litter quality impacts short-but not long-term soil carbon dynamics in soil aggregate fractions[J]. Ecological Applications, 2011, 21(3): 695-703.
- [104] 张伟, 刘淑娟, 叶莹莹, 等. 典型喀斯特林地土壤养分空间变异的影响因素[J]. 农业工程学报, 2013, 29(1): 93-101.
- [105] Puget P, Angers D A, Chenu C. Nature of carbohydrates associated with water-stable aggregates of two cultivated soils[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1999, 31(1): 55-63.
- [106] Bossuyt H, Six J, Hendrix P F. Protection of soil carbon by microaggregates within earthworm casts[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2005, 37(2): 251-258.
- [107] 刘启明, 王世杰, 朴河春, 等. 稳定碳同位素示踪农林生态转换系统中土壤有机质的含量变化[J]. 环境科学, 2002, 23(3): 75-78.

- [108] 贵州省农业厅和中国科学院南京土壤研究所. 贵州土壤[M]. 贵阳: 贵州人民出版社, 1980.
- [109] Chouliaras N, Jacquin F. Biodegradation and humification. II. Organic matter development in a rendzina and in an acid mull enriched or non enriched in  $\text{CaCO}_3$ [J]. Bulletin de l'Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie et des Industries Alimentaires, Nancy, 1976, 18: 71-79.
- [110] 葛云辉. 喀斯特土壤有机碳矿化与微生物对外源碳酸钙和有机物质的响应[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2012.
- [111] Briedis C, Sa J C D, Caires E F. Soil organic matter pools and carbon-protection mechanisms in aggregate classes influenced by surface liming in a no-till system[J]. Geoderma, 2012, 170:80-88.
- [112] Feller C, Beare M H. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics[J]. Geoderma, 1997, 79(1-4): 69-116.
- [113] 孙波, 林心雄. 土壤有机质的生物学稳定性及其转化模型[J]. 土壤学进展, 1994, 22(1): 18-25.
- [114] Ladd J, Amato M, Parsons J W. Studies of nitrogen immobilization and mineralization in calcareous soils. III. Concentration and distribution of nitrogen derived from the soil biomass[A]. In Soil Organic Matter Studies[M]. International Atomic Energy Agency, International Atomic Energy Agency, Vienna, 1977:301-312.
- [115] Ladd J N, Oades J M, Amato M. Microbial biomass formed from C-14, N-15-labeled plant-material decomposing in soils in the field [J]. Soil Biology & Biochemistry, 1981, 13(2): 119-126.
- [116] Neufeldt H, Resck D V S, Ayarza M A. Texture and land-use effects on soil organic matter in Cerrado Oxisols, Central Brazil[J]. Geoderma, 2002, 107(3-4): 151-164.
- [117] 彭琴, 林昌虎, 何腾兵. 贵州省喀斯特山区不同石漠化等级土壤粒级特征研究[J]. 水土保持通报, 2007, 27(2): 29-32+45.
- [118] 刘涛泽, 刘丛强, 张伟. 植被恢复中坡地土壤颗粒有机碳分布特征和  $\delta^{13}\text{C}$  值组成[J]. 生态环境, 2008, 17(5): 2 031-2 036.
- [119] 刘旭辉, 覃勇荣, 邹振旺, 等. 不同植被对广西石漠化地区土壤有机质的影响[J]. 中国农学通报, 2009, 25(18): 394-398.
- [120] 覃勇荣, 王燕, 刘旭辉, 等. 马尾松对喀斯特石漠化地区土壤有机质的影响[J]. 中国农学通报, 2009, 25(5): 104-109.
- [121] 张伟, 陈洪松, 王克林, 等. 典型喀斯特峰丛洼地坡面土壤养分空间变异性研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(1): 68-73.
- [122] 王琳, 欧阳华, 周才平, 等. 贡嘎山东坡土壤有机质及氮素分布特征[J]. 地理学报, 2004, 159(6):1 012-1 019.
- [123] 王长庭, 龙瑞军, 曹广民, 等. 三江源地区主要草地类型土壤碳氮沿海拔变化特征及其影响因素[J]. 植物生态学报, 2006, 30(3): 441-449.
- [124] 王晶, 何忠俊, 王立东, 等. 高黎贡山土壤腐殖质特性与团聚体数量特征研究[J]. 土壤学报, 2010, 47(4): 723-733.
- [125] Guggenberger G, Christensen B T, Zech W. Land-use effects on the composition of organic-matter in particle-size separates of soil. I. lignin and carbohydrate signature[J]. European Journal of Soil Science, 1994, 45(4): 449-458.
- [126] Krull E S, Skjemstad J O.  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  profiles in  $^{14}\text{C}$ -dated oxisol and vertisols as a function of soil chemistry and mineralogy[J]. Geoderma, 2003, 112(1-2): 1-29.
- [127] Jean-Marc Bollag, Stotzky G. Soil Biochemistry[M]. Marcel Dekker, New York, 1990.
- [128] Ryan M C, Aravena R, Gillham R W. The use of  $^{13}\text{C}$  natural abundance to investigate the turnover of the microbial biomass and active fractions of soil organic matter under two tillage treatments[A]. In Soils and Global Change[M]. Lal R, Kimble J, Levine E, CRC Press, Florida. 1995: 351-360.
- [129] 科诺诺娃. 土壤有机质[M]. 北京: 科学出版社, 1962.
- [130] 柳丽萍, 廖仰南. 羊草草原和大针茅草原不同牧压下的土壤微生物生物特性及其多样性[A]. 见: 草原生态系统研究[M]. 北京: 科学出版社, 1995: 17-22.
- [131] 吴晓丽, 李林, 史喜林, 等. 土壤有机碳稳定机制及影响因素研究进展[J]. 吉林农业科学, 2014, 39(3):42-45+78.
- [132] Guggenberger G, Elliott E T, Frey S D, et al. Microbial contributions to the aggregation of a cultivated grassland soil amended with starch[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1999, 31(3):407-419.
- [133] Bearden B N, Petersen L. Influence of arbuscular mycorrhizal fungi on soil structure and aggregate stability of a vertisol[J]. Plant and Soil, 2000, 218(1-2): 173-183.
- [134] Six J, Frey S D, Thiet R K, et al. Bacterial and fungal contributions to carbon sequestration in agroecosystems[J]. Soil Science Society of America Journal, 2006, 70(2): 555-569.
- [135] 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): 1 083-1 090.
- [136] 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[J]. 广西师范学院学报(自然科学版), 2003, 20(3): 1-7.
- [137] 邹军, 崔迎春, 刘延惠, 等. 退化喀斯特植被恢复过程中春季土壤呼吸特征研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(2): 195-197+201.
- [138] 杜雪莲, 王世杰. 喀斯特石漠化区小生境特征研究——以贵州清镇王家寨小流域为例[J]. 地球与环境, 2010, 38(3): 255-261.
- [139] 方华军, 杨学明, 张晓平, 等. 东北黑土区坡耕地表层土壤颗粒有机碳和团聚体结合碳的空间分布[J]. 生态学报, 2006, 26(9): 2 847-2 854.

- [140] 陈祖拥. 贵州喀斯特森林退化对土壤质量的影响及评价[D]. 贵阳: 贵州大学, 2009.
- [141] 彭新华, 张斌, 赵其国. 红壤侵蚀裸地植被恢复及土壤有机碳对团聚体稳定性的影响[J]. 生态学报, 2003, 23(10): 2 176—2 183.
- [142] 罗勇. 贵州中部喀斯特山区退耕还林还草对土壤肥力的影响[J]. 农技服务, 2012, 29(5): 567—569.
- [143] 葛佳杰, 顾尚义, 吴攀, 等. 贵州威宁麻窝山地区近五万年来土壤侵蚀速率研究[J]. 地球与环境, 2011, 39(2): 156—160.
- [144] 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.
- [145] 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.
- [146] 周炼川, 陈效民, 李孝良, 等. 西南喀斯特地区典型石漠化阶段土壤水肥关系研究[J]. 南京农业大学学报, 2011, 34(2): 97—100.
- [147] 涂成龙, 何腾兵, 林昌虎, 等. 贵州西部喀斯特石漠化地区草地土壤有机质和氮素变异特征初步研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(2): 50—53.
- [148] 刘涛洋, 刘丛强, 张伟, 等. 喀斯特地区坡地土壤可溶性有机碳的分布特征[J]. 中国环境科学, 2009, 29(3): 248—253.

## The Distribution and Evolution of Soil Organic Matter in the Karst Region, Guizhou Province, Southwestern China

DI Xinyue<sup>1,2</sup>, AN Xianjin<sup>1,2</sup>, DONG Hui<sup>1,2</sup>, TANG Haiming<sup>1,2</sup>, XIAO Baohua<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550180, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The karst region in Southwestern China is one of the famous karst regions in the world. This region is considered to be an extremely fragile ecological environment due to its thin and coarse texture of soil, and how to protect the soil resource in this region has become an urgent concern for the local government and public. Soil organic matter (SOM) plays an important role in stabilizing the structure, and is considered to be a key factor for soil rehabilitation in karst areas. In this paper, we reviewed the recent literature studies on SOM in the study region, especially in Guizhou Province, China, summarized the characteristics and distribution of SOM in this area, and discussed the evolution regulations and their controlling factors. Many types of soil are found in the karst region of Guizhou Province, and both of climate condition and karst landform play the important role in the soil development. The broadly distributed soils in Guizhou Province include yellow soil, limestone soil, red soil, purple soil, yellow-brown soil, brown soil, and paddy soil. Brown soil owns the highest SOM content among seven soils, which may due to suppressed microbial activities caused by low temperature and high altitude. The high content of  $\text{Ca}^{2+}$  plays an important role in the evolution of SOM in limestone soil. It has been suggested that forming of calcium humus and secondary calcium carbonate coating are the favor mechanisms for SOM conserving in limestone soil. SOMs in yellow and red soils may associate to  $\text{R}_2\text{O}_3$  minerals, and these SOMs are more labile compared with that of limestone soil. The SOM content of yellow-brown soil falls between that of brown soil and yellow soil. The SOM content in purple soil is the lowest due to its sandy texture.

**Key words:** karst region; soil; soil organic matter; characteristics; influence factor