

# 喀斯特森林植被自然恢复过程中土壤有机碳库特征演化\*

黄宗胜<sup>1,2</sup> 符裕红<sup>1,3</sup> 喻理飞<sup>1†</sup>

(1 贵州大学林学院, 贵阳 550025)

(2 贵州大学土木建筑工程学院, 贵阳 550025)

(3 贵州师范学院化学与生命科学学院, 贵阳 550018)

**摘要** 采用空间代替时间的方法,研究了茂兰喀斯特森林自然恢复过程中土壤有机碳库特征,结果表明:土壤容重(0~10 cm 土层 0.94~1.15 g cm<sup>-3</sup>, >30 cm 土层 0.98~1.19 g cm<sup>-3</sup>)、石砾含量(0~10 cm 土层 19.93~26.61%, >30 cm 土层 20.36~32.11%)随恢复进展而减少,随土层加深而增加;土壤容积(0~10 cm 土层 20.13~22.02 m<sup>3</sup>, >30 cm 土层 4.16~6.87 m<sup>3</sup>)、有机碳含量(0~10 cm 土层 21.14~52.67 g kg<sup>-1</sup>, >30 cm 土层 11.15~25.93 g kg<sup>-1</sup>)、有机碳密度[(0~10 cm 土层 1.91~4.03 kg m<sup>-2</sup>, >30 cm 土层 0.39~1.96 kg m<sup>-2</sup>)、有机碳储量(900m<sup>2</sup>样地 0~10 cm 土层 0.538~0.883 t, >30 cm 土层 0.039~0.137 t)、易氧化碳含量(0~10 cm 土层 5.28~33.25 g kg<sup>-1</sup>, >30 cm 土层 5.98~14.13 g kg<sup>-1</sup>)均随恢复进展而增加,随土层加深而减少;随恢复进展 0~20 cm 土层有机碳稳定性增强、活性降低, >20 cm 土层则相反;随土层加深有机碳稳定性增强、活性降低;土壤有机碳随恢复进展总体上具碳汇效应,且早期其量少质低、表聚性强、碳汇效应不显著、固碳潜力大,后期则相反。加强保护喀斯特森林,使其自然恢复,有利于土壤质量的提高和有机碳的累积。

**关键词** 总有机碳;易氧化碳;土壤容积;自然恢复;喀斯特森林

**中图分类号** Q14

**文献标识码** A

土壤是一个巨大的碳库,当前土壤有机碳已成为全球变化研究的三大热点之一<sup>[1]</sup>。森林土壤有机碳是土壤肥力的重要组成部分,直接或间接地影响森林生物量,有研究表明全球森林土壤有机碳储量为 402~787 Gt,占全球陆地土壤中碳储量的 25%~50%<sup>[2-4]</sup>。在喀斯特区,由于喀斯特生态系统的特殊性,土壤不仅是大气圈、岩石圈、水圈和生物圈相互作用的产物,而且通过水分的吸持、土壤有机质的保持及相关的土壤生物化学过程等影响着岩溶作用的进行,土壤有机碳是土壤环境中联系全球碳循环和岩溶作用的枢纽<sup>[5]</sup>。近年来,在喀斯特地区许多学者针对有机碳采样方法、小生境有机碳、有机碳估算、坡面有机碳特征、人工恢复林土壤有机碳、表层土壤有机碳等方面开展了研究<sup>[6-15]</sup>,并取得了满意成果,但对整个自然恢复系列中土壤有机碳库特征进行的研究尚鲜有报道。本文对喀斯

特森林植被自然恢复过程中土壤有机碳库特征进行研究,旨在揭示土壤有机碳的时空分布特征、稳定性变化规律等,为喀斯特森林土壤碳库估算提供数据支持,为进一步揭示喀斯特区森林土壤有机碳循环和植被恢复、石漠化治理等提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.2 研究区概况

本研究在贵州茂兰国家级自然保护区(25°09'~25°20'N, 107°52'~108°05'E)进行。保护区面积 213 km<sup>2</sup>,森林覆盖率 87.3%,地势西北高东南低,最高海拔 1 079 m,最低海拔为 430 m,平均海拔为 550~850 m,山峰与洼地相对高差为 150~300 m。属中亚热带南部季风湿润气候,年均温 18.3℃,≥10℃积温 5 768℃,年降水量 1 321 mm,年均相对

\* “十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAC02B02, 2011BAC09B01)、“211 工程”三期重点学科建设项目(Kst200904)和贵州省社会发展攻关项目(黔科合 SY 字(2012)3012)资助

† 通讯作者:喻理飞,男,教授,博士生导师,主要从事喀斯特退化生态系统恢复研究。E-mail: gdyulifei@163.com

作者简介:黄宗胜(1973—),男,副教授,博士研究生,研究方向为退化生态系统恢复、景观规划设计。Tel:13595076372, E-mail: hzxsjh@126.com

收稿日期:2012-04-04;收到修改稿日期:2012-08-03

湿度 80%, 全年日照时数 1 271 h。属裸露型喀斯特地貌。土壤以黑色石灰土为主, 上层浅薄且不连续, 剖面多为腐殖质-淋溶-母岩层 (AF-D) 构型、腐殖质-母岩层 (A-D) 构型, 地表水缺乏, 土体持水量较低, 土壤富钙和富盐基化, pH6.15 ~ 8.00, 有机质含量 75.5 ~ 380.0 g kg<sup>-1</sup>。多数地段为中亚热带原生性喀斯特森林, 为常绿落叶阔叶混交林, 也有不同退化程度的演替群落, 现统计有维管束植物 154 科 514 属 1 203 种, 对喀斯特森林植被自然恢复的

研究有很强的代表性<sup>[16]</sup>。

## 1.2 研究方法

**1.2.1 样地选择及依据** 本研究区退化群落自然恢复过程分为草本阶段 (C)、草灌阶段 (CG)、灌丛灌木阶段 (G)、灌乔过渡阶段 (GQ)、乔木阶段 (Q) 和顶极阶段 (D) 6 个恢复阶段<sup>[17-18]</sup>。分别于各阶段设置典型样地, 样地面积为 30 m × 30 m, 4 个重复, 共计 24 块。各恢复阶段样地土壤类型均为石灰土。样地的基本概况见表 1。

表 1 各恢复阶段群落的基本概况

Table 1 Basic features of the vegetation at various restoration stages

恢复阶段 Restoration stages	坡度、海拔 Slope, elevation	坡向 Slope direction	植被特征 <sup>[17-18]</sup> Vegetation characteristics	优势种 Dominant species	岩石裸露率 Bare rock ratio	生境 Habitat
C	30 ~ 40°、 840 m	NW	群落层次只有草本层, 高约 1 m, 盖度达 80% 以上, 有极少数先锋树种, 群落下覆盖有 3 ~ 6 cm 枯枝落叶层	密毛蕨、白茅、金丝草、三毛草 <i>Pteridium revolutum</i> , <i>Imperata cylindrical</i> var. <i>major</i> , <i>Pogonatherum crinitum</i> , <i>Trisetum bifidum</i>	77.52%	土面、石缝、石沟 Earth flatland, Crevice, Gully
CG	30 ~ 40°、 820 m	SW	群落层次一层, 由草本和灌木共同组成, 盖度达 80% 以上, 草本、灌木盖度约各占一半, 高度 1.5 ~ 2 m, 地表有少量藤刺, 群落下覆盖有 2 ~ 5 cm 枯枝落叶层	盐肤木、野牡丹、腊莲绣球、算盘子、密毛蕨、白茅、金丝草 <i>Rhus chinensis</i> , <i>Mlas-toma candidum</i> , <i>Hydrangea strigosa</i> , <i>Glochidionpuberum</i> , <i>Pteridium revolutum</i> , <i>Im-perata cylindrical</i> var. <i>major</i> , <i>Pogonatherum crinitum</i>	75.61%	土面、石缝、石沟 Earth flatland, Crevice, Gully
G	30 ~ 40°、 820 m	SW	林分垂直结构简单, 无或有少量乔木, 主要以灌木层为主, 高度 2 ~ 4 m, 覆盖度达 80% 以上, 地表有较多藤刺, 林下覆盖的枯枝落叶层约 2 ~ 4 cm	火棘、南天竹、香叶树、齿叶铁仔、齿叶黄皮、榔榆 <i>Pyracantha fortuneana</i> , <i>Nandina domestica</i> , <i>Lindera communis</i> , <i>Myrsine semiserrata</i> , <i>Clausena dunniana</i> , <i>Ulmus par-vifolia</i>	73.22%	石面、石缝、土面、石沟 Rocky flatland, Crevice, Earth flatland, Gully
GQ	30 ~ 40°、 820 m	SW	林分层次结构分化, 高 7 ~ 12 m, 木本植物盖度达 80% 以上; 林下草本盖度较低, 地表有较多藤刺, 林下枯枝落叶层厚 1 ~ 3 cm	圆果化香、香叶树、天鹅槭、鸡仔木、川钓樟、青冈栎 <i>Platycarya longipes</i> , <i>Lindera communis</i> , <i>Acer wangchii</i> , <i>Sinoadina racemosa</i> , <i>Lindera pulcherima</i> var. <i>hemsleyana</i> , <i>Cyclobalanopsis glauca</i>	73.94%	石面、石缝、土面、石沟 Rocky flatland, Crevice, Earth flatland, Gully
Q	30 ~ 40°、 840 m	SW	林分层次结构分化明显, 乔木层、灌木层比较发达, 高 14 ~ 18 m, 乔木层覆盖度达 80% 以上; 灌木层高 2 ~ 3 m, 盖度 10% 左右, 地表有少量藤刺、蕨类、地衣苔藓等分布, 林下枯枝落叶层厚 1 ~ 3 cm	光皮栎木、黔桂润楠、香叶树、翅荚香槐、南酸枣、短萼海桐 <i>Cornus wilsoniana</i> , <i>Machilus chienkueiensis</i> , <i>Lindera communis</i> , <i>Cladrastis polycarpa</i> , <i>Choerospondias axillaris</i> , <i>Pittosporum brevicalyx</i>	72.81%	土面、石面、石缝、石沟 Earth flatland, Rocky flatland, Crevice, Gully
D	30 ~ 40°、 850 m	SW	乔木层、灌木层和草本层植物之间分化清晰, 以乔木层为主, 高 15 ~ 20 m, 乔木层覆盖率达 80% 以上; 灌木层高 4 ~ 7 m, 盖度 10 ~ 20%; 林下覆盖有 1 ~ 3 cm 枯枝落叶层	光皮栎木、短萼海桐、多脉青冈栎、天鵝槭、云贵鹅耳枥、粗柄楠 <i>Cornus wilsoniana</i> , <i>Pittosporum brevicalyx</i> , <i>Cyclobalanopsis multinervis</i> , <i>Acer wangchii</i> , <i>Carpinus pubescens</i> , <i>Phoebe crassipedicella</i>	71.20%	石面、石缝、土面、石沟 Rocky flatland, Crevice, Earth flatland, Gully

注: C: 草本阶段; CG: 草灌阶段; G: 灌木阶段; GQ: 灌乔阶段; Q: 乔木阶段; D: 顶极阶段。下同 Note: C: Herb stages; CG: Herb to shrub stages; G: Shrub stages; GQ: Shrub to arbor stages; Q: Arbor stages; D: Climax stages. The same below

**1.2.2 土壤容积测定、样品采集与处理** 因喀斯特地区土层薄、土层空间异质性高,岩石裸露率、土壤容积、土壤有机碳含量差异大,有机碳密度难以客观地反映出不同样地间的碳储量,因而用常态地貌的研究方法难以准确获取科学数据<sup>[6]</sup>,本研究采用土壤容积实测法对土壤有机碳含量、有机碳密度、有机碳储量、易氧化碳含量等进行测算。于2011年9月中旬至10月中旬,在草本阶段(25°16'13"N, 108°01'22"E)、草灌阶段(25°16'14"N, 108°01'26"E)、灌丛灌木阶段(25°18'21"N, 107°56'21"E)、灌乔阶段(25°18'20"N, 107°56'23"E)、乔木阶段(25°17'37"N, 107°56'39"E)和顶极阶段(25°12'35"N, 107°59'55"E) 24个样地中,采用方格网对样地内有土面积进行小样方划分,小样方面积为2 m×2 m(四周为岩石,且面积不足4 m<sup>2</sup>土块亦作为一个小样方),因岩石裸露率在71.20%以上,故每900 m<sup>2</sup>样地设置小样方约70个,每个小样方视具体情况布置4~8个测点,依据测点对小样方土壤深度及其对应面积进行三维实测,分0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、>30 cm四层进行土壤容积统计,每个测点最底层按实际深度及其对应面积计算土壤容积(并将其归并为所在土层的土壤容积)。土壤样品采集按每个小样方中实测的土壤深度数据最大的测点对应的土壤剖面进行采样,按0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、>30 cm四层进行收集,并将所有小样方的相同土层样品混合,即一个样地共采集四个混合样品。采样混合后装入密封的塑料袋中带回实验室,风干供土壤有机碳等的测定。用环刀取样供容重测定。

**1.2.3 指标测定及计算** 土壤容重测定采用环刀法<sup>[19]</sup>;有机碳含量测定采用重铬酸钾-外加热法<sup>[20]</sup>;石砾含量测定采用过2 mm土壤筛<sup>[19]</sup>;土壤易氧化碳采用袁可能法<sup>[21]</sup>。

土壤有机碳密度<sup>[8,22]</sup>: $SOC_i = C_i D_i E_i (1 - G_i) \times 10^{-6}$  (1)

式中, $i$ 分别代表0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、>30 cm四个土层, $SOC_i$ 为对应土层的土壤有机碳密度(kg m<sup>-2</sup>), $C_i$ 为对应土层土壤有机碳含量(g kg<sup>-1</sup>), $D_i$ 为对应土层的容重(g m<sup>-3</sup>), $G_i$ 为对应土层>2 mm石砾含量(%), $E_i$ 为对应土层土层厚度(m)。

有机碳储量(900 m<sup>2</sup>样地): $CS_i = C_i V_i D_i (1 - G_i) \times 10^{-9}$  (2)

式中, $CS_i$ 为对应土层的有机碳储量(t), $V_i$ 为对应土层中实测统计所得的土壤容积(m<sup>3</sup>)。

氧化稳定系数<sup>[21,23]</sup>: $K_{os} = (TOC - ROC) / ROC$  (3)

式中, $K_{os}$ 为氧化稳定系数, $TOC$ 为土壤有机碳含量, $ROC$ 为土壤易氧化碳含量。

有机碳活化度<sup>[23]</sup>: $AOC = ROC / TOC$  (4)

### 1.3 数据处理

通过Excel、SPSS17.0软件对数据进行统计分析。采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)比较不同数据组间的差异,显著性水平设定为 $\alpha = 0.05$ 。

## 2. 结果

### 2.1 植被自然恢复中土壤容重、石砾含量、容积

植被自然恢复中土壤容重、石砾含量、容积变化见表2。表2表明:土壤容重、石砾含量随恢复进展而减少,恢复前期变化幅度较大,恢复后期变化幅度较小,且随土壤深度增加而增加;土壤容积随恢复进展而增加,但随土壤深度增加而减少,0~10 cm土层与10~20 cm土层土壤体积大,20~30 cm土层与>30 cm土层土壤容积小且差距较大,这反映喀斯特生境中土壤分布具较强的表聚性。

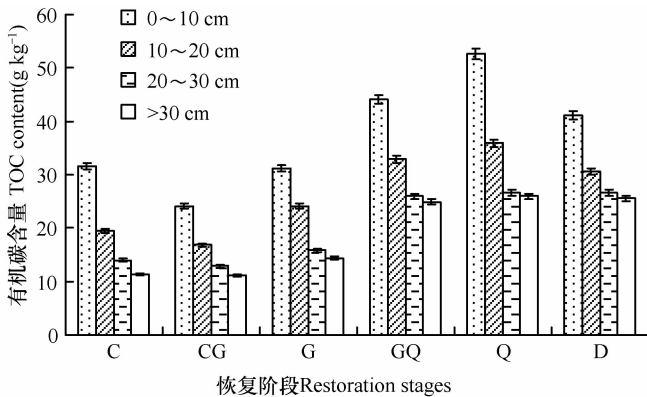
表2 不同恢复阶段土壤容重、>2 mm石砾含量、容积(样地面积900 m<sup>2</sup>)

Table 2 Soil bulk density, >2 mm rock fragment content and soil volume at various restoration stages (Sample lot 900 m<sup>2</sup> in area)

恢复阶段 Restoration stages	容重 Bulk density (g cm <sup>-3</sup> )				石砾含量 Rock fragment content (%)				土壤容积 Soil volume (m <sup>3</sup> )			
	0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm	>30 cm	0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm	>30 cm	0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm	>30 cm
C	1.15	1.18	1.19	1.19	26.61	28.12	31.04	32.11	20.13	18.01	7.37	4.16
CG	1.12	1.14	1.16	1.16	29.33	30.43	31.51	31.6	20.33	18.13	7.45	4.17
G	1.10	1.13	1.15	1.16	21.95	22.67	23.08	23.08	20.95	18.30	7.51	4.71
GQ	1.07	1.09	1.10	1.13	20.36	21.65	20.98	21.69	20.99	18.43	7.62	4.77
Q	0.96	0.98	1.01	1.02	20.22	20.23	20.76	20.78	21.90	19.01	7.97	5.01
D	0.94	0.97	0.97	0.98	19.93	19.98	20.19	20.36	22.02	19.33	10.28	6.87

## 2.2 植被自然恢复中土壤有机碳含量 (TOC)

植被自然恢复中土壤有机碳含量 (TOC) 见图 1。图 1 表明: 四个土壤层次 TOC 以早期阶段 (C、CG) 最低, 中期阶段 (G、GQ) 其次, 后期阶段 (Q、D) 最高; 0~10 cm 土层的 TOC 最高, 其次为 10~20 cm 土层, 然后为 20~30 cm 土层, 最低为 >30 cm 土层; 反映出土壤总有机碳含量随恢复进展而增加, 随土壤深度增加而减少的趋势。表层土中 TOC 向下层土壤转移状况, 采用表层土以下各层土壤 TOC 与表层土 (0~10 cm) TOC 的比例反映。从早期阶段 (C、CG) 经中期阶段 (G、GQ) 至后期阶段 (Q、D), >30 cm 土层与 0~10 cm 土层 TOC 之比分别为 0.36、0.36、0.46、0.56、0.50、0.62; 20~30 cm 土层与 0~10 cm 土层 TOC 之比分别为 0.44、0.53、0.51、0.58、0.51、0.65; 10~20 cm 土层与 0~10 cm 土层 TOC 之比分别为 0.62、0.69、0.77、0.75、0.68、0.75, 早期、中期、后期的下层 TOC 所占比重呈增加趋势, 表明 TOC 有向下层转移富集的趋势。



注: 图中误差线为标准差。

下同 Note: Vertical bars denote standard deviation. The same below

图 1 不同恢复阶段土壤有机碳含量

Fig. 1 Content of soil TOC at various restoration stages

## 2.3 植被自然恢复中土壤有机碳密度 (SOC)

植被自然恢复中土壤有机碳密度 (SOC) 见图 2。图 2 表明: 四个土壤层次 SOC 以早期阶段 (C、CG) 最低, 中期阶段 (G、GQ) 其次, 后期阶段 (Q、D) 最高; 0~10 cm 土层的 SOC 最高, 其次为 10~20 cm 土层, 然后为 20~30 cm 土层, 最低为 >30 cm 土层; 说明 SOC 随恢复进展而增加, 随土壤深度增加而减少。反映出恢复前期土壤固碳能力弱, 吸碳潜力大; 后期固碳能力强, 吸碳潜力小。

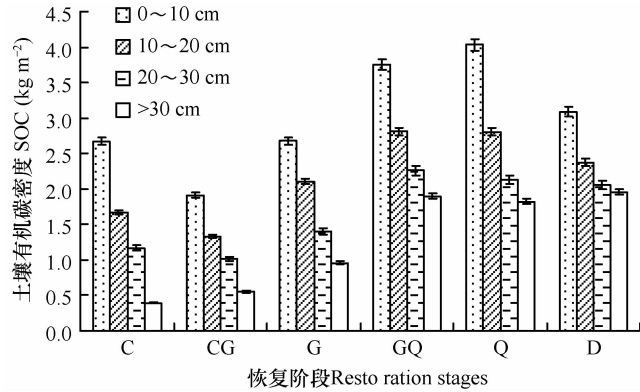


图 2 不同恢复阶段土壤有机碳密度

Fig. 2 SOC at various restoration stages

## 2.4 植被自然恢复中土壤有机碳储量 (CS) 及其分配

植被自然恢复中土壤有机碳储量 (CS) 及其分配见表 3。表 3 表明: 四个土壤层次 CS 以早期阶段 (C、CG) 最低, 中期阶段 (G、GQ) 其次, 后期阶段 (Q、D) 最高; 0~10 cm 土层的 CS 最高、分配比重达 45.71%~55.79%, 其次为 10~20 cm 土层、分配比重为 30.85%~34.67%, 然后为 20~30 cm 土层、分配比重为 8.9%~14.22%, 最低为 >30 cm 土层、分配比重低于 10%; 随恢复进展下层土壤 CS 分配比重有变大趋势。说明 CS 随恢复进展而增加, 随土壤深度增加而减少, CS 具有较强的表聚性, 土壤有机碳随群落恢复有向下层转移富集的趋势。反映出随群落恢复表现出碳汇作用, 早期碳储量低、表聚性强、固碳不均匀、能力不稳定、碳汇效应不显著、土壤贫瘠、固碳潜力大, 后期碳储量大、表聚性下降、均质性加强、固碳能力强而稳定、碳汇效应显著、土壤肥沃、固碳潜力小。

## 2.5 植被自然恢复中土壤易氧化碳含量 (ROC)

植被自然恢复中土壤易氧化碳含量 (ROC) 见图 3。图 3 表明: 四个土壤层次 ROC 以早期阶段 (C、CG) 最低, 中期阶段 (G、GQ) 其次, 后期阶段 (Q、D) 最高; 0~10 cm 土层的 ROC 最高, 其次为 10~20 cm 土层, 然后为 20~30 cm 土层, 最低为 >30 cm 土层。说明 ROC 有随恢复进展而增加, 随土壤深度增加而减少的趋势, 反映出随群落恢复土壤肥力日趋提高。

表3 不同恢复阶段各层次土壤有机碳储量及其分配(样地面积 900 m<sup>2</sup>)Table 3 CS and its distribution in various soil layers at various restoration stages (Sample lot 900 m<sup>2</sup>)

恢复阶段 Restoration stages	0~10 cm		10~20 cm		20~30 cm		>30 cm		合计 Total CS(t)
	碳储量 CS(t)	占合计碳储量的比值 Percent of total(%)	碳储量 CS(t)	占合计碳储量的比值 Percent of total(%)	碳储量 CS(t)	占合计碳储量的比值 Percent of total(%)	碳储量 CS(t)	占合计碳储量的比值 Percent of total(%)	
C	0.538	55.79	0.301	31.23	0.086	8.9	0.039	4.07	0.964
CG	0.388	52.29	0.242	32.52	0.076	10.23	0.037	4.96	0.743
G	0.561	50.47	0.386	34.67	0.105	9.44	0.060	5.41	1.112
GQ	0.789	49.80	0.518	32.69	0.172	10.88	0.105	6.63	1.584
Q	0.883	52.21	0.534	31.56	0.170	10.03	0.105	6.21	1.692
D	0.680	45.71	0.459	30.85	0.212	14.22	0.137	9.21	1.488

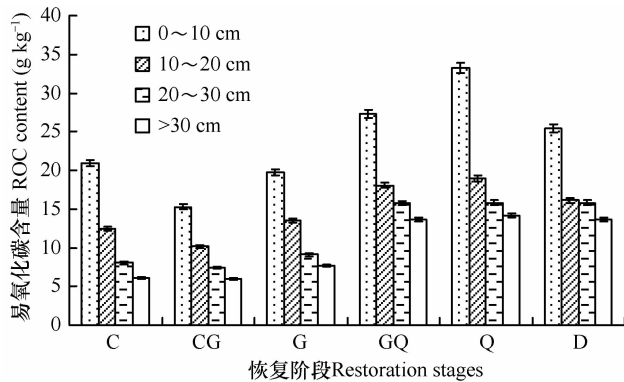


图3 不同恢复阶段土壤易氧化碳含量

Fig. 3 Content of soil ROC at various restoration stages

## 2.6 植被自然恢复中土壤有机碳氧化稳定系数 ( $K_{os}$ )与活化度(AOC)

土壤有机碳的稳定性与活性可以分别用土壤有机碳的氧化稳定系数( $K_{os}$ )和活化度(AOC)来表征。植被自然恢复中土壤有机碳氧化稳定系数( $K_{os}$ )与活化度(AOC)见图4。图4表明:0~10 cm与10~20 cm土层  $K_{os}$ 以早期阶段(C、CG)最低,中期

阶段(G、GQ)其次,后期阶段(Q、D)最高;20~30 cm与>30 cm土层  $K_{os}$ 以C、CG、G阶段较高,GQ、Q、D阶段较低;早期阶段(C、CG)  $K_{os}$ 随土壤深度增加而增加、且规律性强,中期阶段(G、GQ)与后期阶段(Q、D)规律性不强;反映了0~10 cm与10~20 cm土层有机碳稳定性随群落恢复而增强、而20~30 cm与>30 cm土层有机碳稳定性随群落恢复则减弱,恢复早期(C、CG)有机碳稳定性随土壤深度加深而增强、而中期(G、GQ)与后期(Q、D)则规律不明显。0~10 cm与10~20 cm土层AOC(ROC/TOC)以早期阶段(C、CG)最高,中期阶段(G、GQ)其次,后期阶段(Q、D)最低;20~30 cm与>30 cm土层AOC以C、CG、G阶段较低,GQ、Q、D阶段较高;早期阶段(C、CG)AOC随土壤深度增加而降低、且规律性强,中期阶段(G、GQ)与后期阶段(Q、D)规律性不强;反映了0~10 cm与10~20 cm土层有机碳活性随群落恢复而减弱、而20~30 cm与>30 cm土层有机碳活性随群落恢复则增强,恢复早期(C、CG)有机碳稳定性随土壤深度加深而减弱、而中期(G、GQ)与后期(Q、D)则规律不明显。

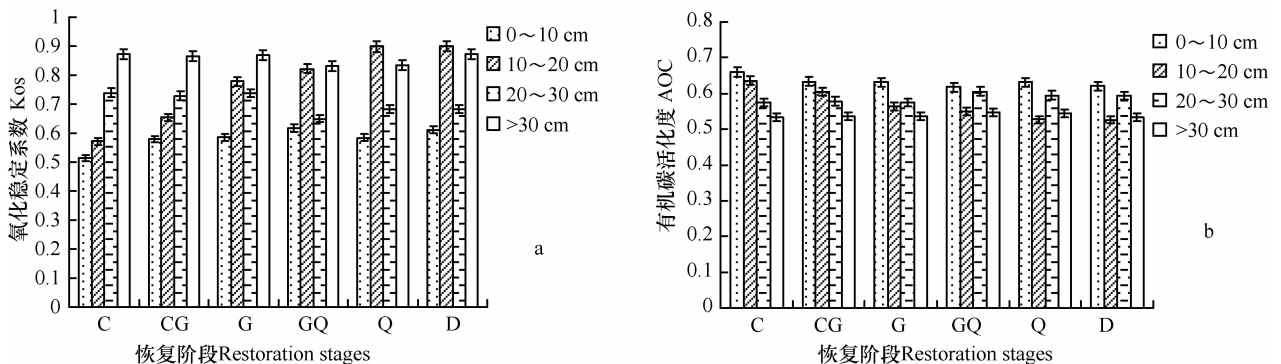


图4 不同恢复阶段土壤有机碳氧化稳定系数(a)与活化度(b)

Fig. 4  $K_{os}$  (a) and AOC (b) at various restoration stages

### 3 讨 论

喀斯特群落恢复过程中,土壤具表聚性,表层土壤容积大、下层土壤容积小,但随恢复进展表层土变化不大而下层土壤容积略有增加。可能原因是喀斯特基岩漏水,水分垂直方向运动较强,随着植被恢复,盖度增加,地表径流减少,更加增加垂直运动,使得上层土壤迁移至下层,下层土壤容积增加。因此恢复进展并没有较大地增加土壤容积,但改变了土壤在垂直方向的分配格局。与常态地貌发育土壤相比,土壤的数量因子影响重大,但不能用常用的土层厚度来表征,因此,本文采用土壤容积来表征土壤的数量,可较好地反映喀斯特地貌上特有的土壤特征,更客观体现出土壤有机碳库特征。

喀斯特群落恢复过程中,土壤有机碳含量(TOC)逐渐增加趋势。C、CG、G、GQ、Q、D 六阶段 0~20 cm 土层 TOC 分别为 27.85、20.94、27.65、38.51、44.29、35.82 g kg<sup>-1</sup>,与龙健等<sup>[24]</sup>结论相似,即 TOC 为草地 20.89 g kg<sup>-1</sup>、灌丛 25.84 g kg<sup>-1</sup>、灌木林 39.48 g kg<sup>-1</sup>、森林 43.64 g kg<sup>-1</sup>,也与王世杰等<sup>[6]</sup>研究同一区域原生乔林小生境有机碳含量(40.1~203.5 g kg<sup>-1</sup>)接近。与贵州花江(25°38'N, 105°38'E)草地 12.68 g kg<sup>-1</sup>、灌木林 18.06 g kg<sup>-1</sup>、森林 20.96 g kg<sup>-1</sup>有机碳含量变化规律一致,但数值要高,这主要是花江为人工恢复的森林、茂兰为原生林所导致<sup>[25]</sup>。

喀斯特群落恢复过程中,土壤有机碳密度(SOC)呈逐渐增加趋势。C、CG、G、GQ、Q、D 六阶段 0~20 cm 土层 SOC 分别为 43.42、32.42、47.85、65.68、68.41、54.65 t hm<sup>-2</sup>。其中恢复后期与周文龙等<sup>[26]</sup>研究得出的贵州典型喀斯特示范区无明显石漠化的森林土壤有机碳密度(关岭花江 50.8 t hm<sup>-2</sup>、清镇红枫湖 72.7 t hm<sup>-2</sup>、毕节鸭池 60.1 t hm<sup>-2</sup>)相当,但明显低于我国森林土壤平均有机碳密度 193.55 t hm<sup>-2</sup>和世界土壤平均有机碳密度 189.00 t hm<sup>-2</sup><sup>[27]</sup>。这说明喀斯特环境对有机碳密度的影响较大。

喀斯特群落恢复过程中,有机碳储量随恢复进展而增加,总体上表现出碳汇效应,早期其量少质低、表聚性强、碳汇效应不显著、固碳潜力大,后期则反之。土壤容重随恢复进展而减少。这说明喀斯特森林植被的自然恢复有利于土壤碳的累积和土壤质量的提高,因此促使喀斯特森林植被自然恢复是提高喀斯特森林土壤有机碳储量的重要的

途径。

土壤易氧化碳量(ROC)多少表征着土壤能释放的有效肥力的多少,而土壤有机碳的稳定与活性则分别用土壤有机碳的氧化稳定系数(K<sub>os</sub>)和活化度(AOC)来表征。喀斯特群落恢复过程中,ROC呈逐渐增加趋势,表明土壤能释放的有效肥力呈逐渐增加,反映出随群落恢复土壤肥力日趋提高;随群落恢复 0~20 cm 土层 K<sub>os</sub>呈增加趋势、AOC呈减少趋势,但 >20 cm 土层 K<sub>os</sub>呈减少趋势、AOC呈增加趋势,表明随群落恢复 0~20 cm 土层土壤有机碳稳定性增强、活性降低,>20 cm 土层则相反,这可能是由于恢复中后期木本植物根系深入 >20 cm 土层,根系活动使得土壤有机碳稳定性减弱、活性升高。本研究 AOC 在 52.62%~66.04% 之间变动,较浙江玲珑山(常绿阔叶林、马尾松林和人工杉木林土壤 AOC 7.03%~29.52%)、福建武夷山(常绿阔叶林、针叶林、亚高山矮林、高山草甸土壤 AOC 8.69%~14.73%)、浙江湖州市(常绿阔叶林、马尾松林和人工杉木林、楠竹林土壤 AOC 45.74%~52.40%)均要高<sup>[28-30]</sup>,说明除去地理位置及测定方法有部分影响外,喀斯特森林土壤有机碳活性较常态地貌森林土壤有机碳活性要高,这可能是由于喀斯特地貌土壤容积小,且土壤容积、碳含量、碳密度、碳储量、易氧化碳等均有很强的表聚性,土壤更易受到外界的影响,同时要维持地上群落的正常生长,土壤的生化活动必然要保持较高的水平。这说明喀斯特土壤非常脆弱,外部干扰更容易造成土壤碳损失,因此这需要维护好表土层的生态平衡,也需要促使植被顺向演替而使表聚性减弱、均质性加强,从而达到积累更多的有机碳。

### 4 结 论

在喀斯特林区基于土壤容积来表征土壤的数量,可较好地体现喀斯特区森林土壤及其有机碳库的特征。随喀斯特森林植被自然恢复的进程,土壤容重、土壤易氧化碳、土壤有机碳密度、土壤有机碳储量、土壤有机碳含量、土壤有机碳的氧化稳定系数(K<sub>os</sub>)和活化度(AOC)等的时空变化均有所改善,总体上土壤有机碳随恢复进展具碳汇效应,且早期其量少质低、表聚性强、碳汇效应不显著、固碳潜力大,后期则相反。因此应加强保护喀斯特森林,使其自然恢复,有利于土壤质量的提高和有机碳的累积。喀斯特森林植被自然恢复土壤有机碳

密度比喀斯特森林植被人工恢复要高。喀斯特自然森林土壤有机碳密度低于我国森林土壤平均有机碳密度和世界土壤平均有机碳密度,属于低土壤有机碳密度区域。

## 参考文献

- [1] 周广胜,王玉辉,蒋延玲,等.陆地生态系统类型转变与碳循环.植物生态学报,2002,26(6):250—254. Zhou G S, Wang Y H, Jiang Y L, et al. Conversion of terrestrial ecosystems and carbon cycling (In Chinese). Acta Phytocologica Sinica, 2002, 26(6):250—254
- [2] Lai R. World soils and greenhouse effect. Global Change Newsletter, 1999, 37:4—5
- [3] Scholes B. Will the terrestrial carbon sink saturate soon. Global Change Newsletter, 1999, 37:2—3
- [4] 任军,郭金瑞,边秀芝,等.土壤有机碳研究进展.中国土壤与肥料,2009(6):1—7. Ren J, Guo J R, Bian X Z, et al. The research progress soil organic carbon (In Chinese). Soil and Fertilizer Sciences in China, 2009(6):1—7
- [5] 潘根兴,曹建华,何诗意,等.土壤碳作为湿润亚热带表层岩溶作用的动力机制:系统碳库及碳转移特征.南京农业大学学报,1999,22(3):49—52. Pan G X, Cao J H, He S Y, et al. Soil carbon as dynamic mechanism for epikarstification in humid subtropical region; Evidence of carbon reservoirs and transfer in the system (In Chinese). Journal of Nanjing Agricultural University, 1999, 22(3):49—52
- [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.土壤学报,2007,44(3):475—483. Wang S J, Lu H M, Zhou Y C, et al. Spatial variability of soil organic carbon and representative soil sampling method in Maolan Karst virgin forest (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(3):475—483
- [7] 罗海波,刘方,刘永生,等.喀斯特石漠化地区不同植被群落的土壤有机碳变化.林业科学,2009,45(9):25—28. Luo H B, Liu F, Liu Y S, et al. Variation of forest soil organic carbon in karst rocky desertification area (In Chinese). Scientia Silvae Sinicae, 2009, 45(9):24—28
- [8] 倪九派,袁道先,谢德体,等.重庆岩溶区土壤有机碳库的估算及其空间分布特征.生态学报,2009,29(11):6292—6301. Ni J P, Yuan D X, Xie D T, et al. Estimation of soil organic carbon storage and the characteristic of carbon spatial distributions in Karst area, Chongqing, China (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(11):6292—6301
- [9] 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.土壤学报,2007,44(1):169—173. Zhu S F, Liu C Q, Tao F X, et al. Difference in stable carbon isotope composition and profile distribution of soil organic matter between brown limestone soil and yellow soil in Karst areas of Guizhou Province (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(1):169—173
- [10] 刘涛泽,刘丛强,张伟,等.喀斯特地区坡地土壤有机碳的分布特征和 $\delta^{13}C$ 值组成差异.水土保持学报,2008,22(5):115—118. Liu T Z, Liu C Q, Zhang W, et al. Spatial distribution characteristics of soil organic carbon and difference in stable carbon isotope composition in slopes of Karst areas (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(5):115—118
- [11] 李新爱,肖和艾,吴金水,等.喀斯特地区不同土地利用方式对土壤有机碳、全氮以及微生物生物量碳和氮的影响.应用生态学报,2006,17(10):1827—1831. Li X A, Xiao H A, Wu J S, et al. Effects of land use type on soil organic carbon, total nitrogen, and microbial biomass carbon and nitrogen contents in Karst region of South China (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(10):1827—1831
- [12] 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.生态学报,2011,31(11):3036—3043. Liu S J, Zhang W, Wang K L, et al. Spatiotemporal heterogeneity of topsoil nutrients in Karst peak-cluster depression area of Northwest Guangxi, China (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(11):3036—3043
- [13] 田大伦,王新凯,方晰,等.喀斯特地区不同植被恢复模式幼林生态系统碳储量及其空间分布.林业科学,2011,47(9):7—14. Tian D L, Wang X K, Fang X, et al. Carbon storage and spatial distribution in different vegetation restoration patterns in Karsts area, Guizhou Province (In Chinese). Scientia Silvae Sinicae, 2011, 47(9):7—14
- [14] 廖洪凯,龙健,李娟,等.喀斯特地区不同植被下小生境土壤矿物组成及有机碳含量空间异质性初步研究.中国岩溶,2010,29(4):434—439. Liao H K, Long J, Li J, 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 (In Chinese). Chinese Karst, 2010, 29(4):434—439
- [15] 李孝良,陈效民,周炼川,等.贵州省喀斯特地区石漠化土壤有机碳和全氮变异特征.南京农业大学学报,2010,33(4):75—80. Li X L, Chen X M, Zhou L C, et al. Soil organic carbon and nitrogen variability in the process of rocky desertification in Karst region, Guizhou Province (In Chinese). Journal of Nanjing Agricultural University, 2010, 33(4):75—80
- [16] 周致贤.茂兰喀斯特森林科学考察.贵阳:贵州人民出版社,1987. Zhou Z X. Scientific survey of the Maolan Karst forest (In Chinese). Guiyang: Guizhou People's Publishing House, 1987
- [17] 喻理飞,朱守谦,叶镜中,等.退化喀斯特森林自然恢复评价研究.林业科学,2000,36(6):12—19. Yu L F, Zhu S Q, Ye J Z, et al. A study on evaluation of natural restoration for degraded Karst forest (In Chinese). Scientia Silvae Sinicae, 2000, 36(6):12—19
- [18] 喻理飞,朱守谦,魏鲁明,等.退化喀斯特群落自然恢复过程研究-自然恢复演替系列.山地农业生物学报,1998,17(2):71—77. Yu L F, Zhu S Q, Wei L M, et al. Study on the natural restoration process of degraded Karst communities-successional sere (In Chinese). Journal of Mountain Agriculture and Biology, 1998, 17(2):71—77
- [19] 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化分析.上海:上海科学技术出版社,1978. Institute of Soil Science, Chinese Academy

- of Sciences. Soil physical and chemical analysis (In Chinese). Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 1999. Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 1999
- [21] 袁可能, 张友军. 土壤腐殖质氧化稳定性的研究. 浙江农业科学, 1964(7): 345—349. Yuan K N, Zhang Y J. Study on the oxidation stability of soil humus (In Chinese). Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 1964(7): 345—349
- [22] Brown S, Pearson T, Walker S M, et al. Methods manual for measuring terrestrial carbon. Arlington, Virginia, USA: Winrock International, 2005
- [23] 徐华君, 殷志刚. 阿尔泰山区土壤有机碳组成及分布规律研究. 干旱地区农业研究, 2008, 26(1): 33—36. Xu H J, Yin Z G. Study on soil organic carbon composition and distribution law in Altai Mountains, Xinjiang, China (In Chinese). Agricultural Research in the Arid Areas, 2008, 26(1): 33—36
- [24] 龙健, 李娟, 江新荣, 等. 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, et al. Soil microbial activities in Maolan Karst forest, Guizhou Province (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(4): 597—602
- [25] 魏媛. 退化喀斯特植被恢复过程中土壤生物学特性研究——以贵州花江地区为例. 南京: 南京林业大学森林资源与环境学院, 2008. Wei Y. The soil biological characteristics in successional sequence of degraded karst area—A case study at Huajiang of Guizhou (In Chinese). Nanjing: College of Forest Re-
- sources and Environment, Nanjing Forestry University, 2008
- [26] 周文龙, 熊康宁, 龙健, 等. 喀斯特石漠化综合治理区表层土壤有机碳密度特征及区域差异. 土壤通报, 2011, 42(5): 1131—1137. Zhou W L, Xiong K N, Long J, et al. Organic carbon density features and regional variation of the topsoil in Karst demonstration areas of rocky desertification integrated rehabilitation (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(5): 1131—1137
- [27] 周玉荣, 于振良, 赵士洞. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡. 植物生态学报. 2000, 24(5): 518—522. Zhou Y R, Yu Z L, Zhao S D. Carbon storage and budget of major Chinese forest types (In Chinese). Acta Phytocologica Sinica, 2000, 24(5): 518—522
- [28] 姜培坤. 不同林分下土壤活性有机碳库研究. 林业科学, 2005, 41(1): 10—13. Jiang P K. Soil active carbon pool under different types of vegetation (In Chinese). Scientia Silvae Sinicae, 2005, 41(1): 10—13
- [29] 徐侠, 王丰, 栾以玲, 等. 武夷山不同海拔植被土壤易氧化碳. 生态学杂志, 2008, 27(7): 1115—1121. Xu X, Wang F, Luan Y L, et al. Soil readily oxidizable carbon along an elevation gradient of Wuyi Mountains in southeastern China (In Chinese). Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(7): 1115—1121
- [30] 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. 林业科学研究, 2006, 19(4): 523—526. Zhu Z J, Jiang P K, Xu Q F. Study on the active organic carbon in soil under different types of vegetation (In Chinese). Forest Research, 2006, 19(4): 523—526

## CHARACTERISTIC EVOLUTION OF SOIL ORGANIC CARBON POOL WITH THE PROCESS OF NATURAL RESTORATION OF KARST FOREST VEGETATION

Huang Zongsheng<sup>1,2</sup> Fu Yuhong<sup>1,3</sup> Yu Lifei<sup>1†</sup>

(1 Forestry College of Guizhou University, Guiyang 550025, China)

(2 Civil Engineering and Architecture College of Guizhou University, Guiyang 550025, China)

(3 School of Chemistry and Life Science, Guizhou Normal College, Guiyang 550018, China)

**Abstract** To study evolution of the characteristics of the soil organic carbon pool in the Karst region of Maolan with the process of natural restoration of karst forest vegetation, the concept of space as a substitute for time was adopted. Results show that soil bulk density ( $0.94 \sim 1.15 \text{ g cm}^{-3}$  in  $0 \sim 10 \text{ cm}$  soil layer and  $0.98 \sim 1.19 \text{ g cm}^{-3}$  in  $> 30 \text{ cm}$  soil layer) and rock fragment content ( $19.93 \sim 26.61\%$  in  $0 \sim 10 \text{ cm}$  soil layer and  $20.36 \sim 32.11\%$  in  $> 30 \text{ cm}$  soil layer) increased with soil depth and decreased along with the process of the restoration; soil volume ( $20.13 \sim 22.02 \text{ m}^3$  in  $0 \sim 10 \text{ cm}$  soil layer and  $4.16 \sim 6.87 \text{ m}^3$  in  $> 30 \text{ cm}$  soil layer), soil organic carbon content ( $21.14 \sim 52.67 \text{ g kg}^{-1}$  in  $0 \sim 10 \text{ cm}$  soil layer and  $11.15 \sim 25.93 \text{ g kg}^{-1}$  in  $> 30 \text{ cm}$  soil layer), soil organic carbon density ( $1.91 \sim 4.03 \text{ kg m}^{-2}$  in  $0 \sim 10 \text{ cm}$  soil layer and  $0.39 \sim 1.96 \text{ kg m}^{-2}$  in  $> 30 \text{ cm}$  soil layer), soil organic carbon storage ( $0.538 \sim 0.883 \text{ t}$  in  $0 \sim 10 \text{ cm}$  soil layer and  $0.039 \sim 0.137 \text{ t}$  in  $> 30 \text{ cm}$  soil layer in a sample lot  $900 \text{ m}^2$  in area) and readily oxidizable carbon ( $5.28 \sim 33.25 \text{ g kg}^{-1}$  in  $0 \sim 10 \text{ cm}$  soil layer and  $5.98 \sim 14.13 \text{ g kg}^{-1}$  in  $> 30 \text{ cm}$  soil layer) increased with the process of the restoration and decreased with soil depth; soil organic carbon became more stable and less active with the process of the natural restoration in the  $0 \sim 20 \text{ cm}$  soil layer, but went reversely in the  $> 20 \text{ cm}$  soil layer and it increased in stability



and decreased in activity with soil depth. The variation of soil organic carbon with the process of the natural restoration generally demonstrates that soil plays a role as a sink of atmospheric carbon dioxide. At the early restoration stages, soil organic carbon in the soil was low in quantity, poor in quality, and high in surface accumulation tendency, showing that the sink effect of the soil was not significant and that the soil was high in carbon sequestration potential, however, at the late stages, all went reversely. It is, therefore, essential to take strong measures to preserve karst forests and let them restore naturally, which helps improve soil quality and accumulate organic carbon.

**Key words** Total organic carbon (TOC); Readily oxidizable carbon (ROC); Soil volume; Natural restoration; Karst forest vegetation

(责任编辑:卢 萍)