

# 喀斯特森林植被自然恢复中土壤团聚体有机碳含量与团聚体分形特征

黄宗胜<sup>1,2</sup>, 符裕红<sup>1,3</sup>, 喻理飞<sup>1\*</sup>, 杨 瑞<sup>1</sup>

(1. 贵州大学林学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州大学建筑与城市规划学院, 贵州 贵阳 550025;  
3. 贵州师范学院化学与生命科学学院, 贵州 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中土壤团聚体有机碳含量与团聚体分形特征。结果表明:同一恢复阶段的同一土层中1~2 mm、0.5~1 mm团聚体质量百分比(4.74%~52.37%)与其质量百分比有机碳贡献率(2.87%~59.98%)均高于0.25~0.5 mm、<0.25 mm团聚体;相同土层中的相同粒级团聚体土壤有机碳含量(0~10 cm土层23.47~55.82 g·kg<sup>-1</sup>, >20 cm土层14.36~36.80 g·kg<sup>-1</sup>)与其质量百分比有机碳含量(0~10 cm土层1.34~22.12 g·kg<sup>-1</sup>, >20 cm土层0.57~11.93 g·kg<sup>-1</sup>)均随植被自然恢复呈增加趋势;同一恢复阶段的相同粒级团聚体土壤有机碳含量(0~10 cm土层23.47~55.82 g·kg<sup>-1</sup>, >20 cm土层14.36~36.80 g·kg<sup>-1</sup>)与其质量百分比有机碳含量(0~10 cm土层1.34~22.12 g·kg<sup>-1</sup>, >20 cm土层0.57~11.93 g·kg<sup>-1</sup>)随土层加深呈减少趋势;同一恢复阶段的同一土层团聚体中1~2 mm团聚体中有机碳含量(16.90~53.43 g·kg<sup>-1</sup>)最低但其质量百分比有机碳含量(5.24~22.12 g·kg<sup>-1</sup>)最高;随植被自然恢复土壤团聚体分形维数在0~10 cm土层(2.01~2.16)呈增加趋势、在>20 cm土层(2.04~2.24)呈减小趋势;喀斯特森林植被自然恢复中土壤结构演化的核心可能是上层土壤细化和下层土壤粗化;喀斯特森林植被自然恢复中土壤结构有所改善;土壤团聚体分形维数可以作为喀斯特植被自然恢复中土壤有机碳质量评价的指标;加强保护喀斯特森林使其自然恢复,既有利于土壤结构的改善与减少侵蚀,也有利于土壤有机碳循环和累积。

**关键词:**土壤团聚体;有机碳含量;分形;自然恢复;喀斯特森林

中图分类号:S714

文献标识码:A

## Studies on Organic Carbon Content and Fractal Features of Soil Aggregates with the Process of Natural Restoration of Karst Forest Vegetation

HUANG Zong-sheng<sup>1,2</sup>, FU Yu-hong<sup>1,3</sup>, YU Li-fei<sup>1</sup>, YANG Rui<sup>1</sup>

(1. Forestry College of Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou, China; 2. Architecture and City Plan College of Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou, China; 3. School of Chemistry and Life Science, Guizhou Normal College, Guiyang 550018, Guizhou, China)

**Abstract:** To study evolution of the characteristics of the soil aggregates organic carbon content and its fractal 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. The results are as follows. The soil aggregate mass percentage(4.74%~52.37%) and its organic carbon contribution rate(2.87%~59.98%) in 1~2 mm and 0.5~1 mm soil aggregate were higher than that in 0.25~0.5 mm, <0.25 mm soil aggregate in the same soil layer at the same restoration stage. The organic

收稿日期: 2014-08-05

基金项目: “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)、贵州省社会发展攻关项目(黔科合SY字(2012)3012)、贵州省农业攻关项目(黔科合NY(2013)3055号)和贵大人基合字(2013)02号资助

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

\* 通讯作者: 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

carbon content and its mass percentage in soil aggregate in 0~10 cm layer (23.47~55.82 g·kg<sup>-1</sup>, 1.34~22.12 g·kg<sup>-1</sup>) were more than that >20 cm layer (14.36~36.80 g·kg<sup>-1</sup>, 0.57~11.93 g·kg<sup>-1</sup>) and increased with the process of the restoration and decreased with soil depth at the same restoration stage. The organic carbon content in 1~2 mm soil aggregate (16.90~53.43 g·kg<sup>-1</sup>) was the lowest but the organic carbon content of 1~2 mm soil aggregate mass percentage (5.24~22.12 g·kg<sup>-1</sup>) was the highest among all soil aggregates. The soil aggregate fractal dimension increased in the surface layer (0~10 cm layer, 2.01~2.16) but decreased in the low layer (>20 cm layer, 2.04~2.24) along with the process of the restoration. The evolution of soil structure may be that the surface layer soil aggregates turned thin but the low layer soil aggregates turned thicken along with the process of the restoration. The soil structure was improved along with the process of the restoration. The soil aggregate fractal dimension can be used as a comprehensively quantitative index to evaluate the soil organic carbon during the process of natural restoration; It is, therefore, essential to take strong measures to preserve karst forests and let them restore naturally, which can help improve the soil structure, less soil erosion and accumulate organic carbon.

**Key words:** soil aggregates; organic carbon content; fractal; natural restoration; karst forest

土壤团聚体有机碳(Soil aggregates organic carbon, SAOC)是从土壤结构入手,探讨土壤有机碳迁移、损耗和积累的规律<sup>[1-4]</sup>。土壤团聚体分形维数(Soil aggregates fractal dimension, SAFD)可以表征土壤结构和土壤肥力等特性<sup>[5-6]</sup>。上世纪80年代以来已经对非喀斯特区土壤的SAOC含量、SAFD进行了较广泛的研究<sup>[7-8]</sup>。在喀斯特区主要对石漠化土壤理化性质及分形特征、植被破坏前后SAFD、土壤分形特征及其与土壤性质的关系、低山丘陵次生林恢复过程中不同坡度、坡向、坡位、海拔等环境背景的5个典型阶段0~15 cm土层土壤(主要为黄壤)分形特征、峰丛洼地SAOC的剖面分布、坡地草本与灌木群落土壤颗粒有机碳分布等方面展开了研究<sup>[9-14]</sup>,对喀斯特森林植被自然恢复中坡度、坡向、坡位、海拔等环境背景基本相同的6个典型阶段林下土壤总有机碳<sup>[15]</sup>、土壤微生物生物量碳<sup>[16]</sup>、土壤可矿化碳<sup>[17]</sup>开展了研究,但对这6个典型阶段林下SAOC含量、SAFD的研究鲜有报道,也没有进行土壤结构、团聚体有机碳时空分布特征及二者的关系等进行探讨,因而研究这些内容有助于揭示喀斯特森林土壤有机碳碳循环规律。因此,本研究以茂兰自然保护区退化喀斯特森林植被自然恢复中6个典型阶段林下的土壤(黑色石灰土)为研究对象,探讨喀斯特森林植被自然恢复中SAOC含量、SA质量组成、SAFD特征,旨在进一步揭示喀斯特森林植被自然恢复中土壤结构、有机碳时空分布特征及二者的关系等规律,为进一步揭示喀斯特区森林生态系统恢复过程及植被重建提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 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<sup>[18]</sup>,土层浅薄且不连续,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,pH值6.15~8.00,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>[18]</sup>。

### 1.2 研究方法

1.2.1 样地选择及依据 本研究区退化植被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>[19-20]</sup>。分别于各阶段设置典型样地,样地面积为30 m×30 m,3个重复,共计18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。

1.2.2 土壤样品采集与处理 于2011年9月中旬,在草本阶段、草灌阶段、灌丛灌木阶段、灌乔阶段、

表1 各恢复阶段植被的基本概况

恢复阶段	坡度、海拔	坡向	植被特征 <sup>[19-20]</sup>	优势种	岩石裸露率	生境
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( <i>Pteridium revolutum</i> (Bl.) Nakai)、白茅( <i>Imperata cylindrical</i> var. <i>major</i> (Nees) C. E. Hubb.)、金丝草( <i>Pogonatherum crinitum</i> (Thunb.) Kunth)、三毛草( <i>Trisetum bifidum</i> (Thunb.) Ohwi)	77.52%	土面、 石缝、 石沟
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( <i>Rhus chinensis</i> Mill)、野牡丹( <i>Melastoma candidum</i> D. Don)、腊莲绣球( <i>Hydrangea strigosa</i> Rehd.)、算盘子( <i>Glochidion puberum</i> (Linn.) Hutch.)、密毛蕨、白茅、金丝草	75.61%	土面、 石缝、 石沟
G	30~40°、 820 m	SW	林分垂直结构单一,无或有少量乔木,主要以灌木层为主,高度2~4 m,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( <i>Pyracantha fortuneana</i> (Maxim.) Li)、南天竹( <i>Nandina domestica</i> Thunb.)、香叶树( <i>Lindera communis</i> Hemsl.)、齿叶铁仔( <i>Myrsine semiserrata</i> Wall.)、齿叶黄皮( <i>Clausena dunniana</i> Levl.)、榔榆( <i>Ulmus parvifolia</i> Jacq.)	73.22%	石面、 石缝、 土面、 石沟
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( <i>Platycarya longipes</i> Wu)、香叶树、天峨槭( <i>Acer wangchii</i> Fang)、鸡仔木( <i>Sinoadina racemosa</i> Ridsd.)、川钓樟( <i>Lindera pulcherima</i> var. <i>hemsleyana</i> )、青冈栎( <i>Cyclobalanopsis glauca</i> (Thunb.) Oerst.)	73.94%	石面、 石缝、 土面、 石沟
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	光皮柞木( <i>Cornus wilsoniana</i> Wanger)、黔桂润楠( <i>Machilus chienkueiensis</i> S. Lee)、香叶树、翅荚香槐( <i>Cladrastis platycarpa</i> Makino)、南酸枣( <i>Choerospondias axillaris</i> Butt et Hill)、短萼海桐( <i>Pittosporum brevicalyx</i> Gagnep.)	72.81%	土面、 石面、 石缝、 石沟
D	30~40°、 850 m	SW	乔木层、灌木层和草本层植物之间分化清晰,以乔木林为主,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。	光皮柞木、短萼海桐、多脉青冈栎( <i>Cyclobalanopsis multinervis</i> Cheng et T. Hong)、天峨槭、云贵鹅耳枥( <i>Carpinus pubescens</i> Burkill)、粗柄楠( <i>Phoebe crassipedicella</i> )	71.20%	石面、 石缝、 土面、 石沟

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。

乔木阶段和顶极阶段6个典型恢复阶段的3个重复18个样地中,每个样地采用S型5点混合采样法<sup>[21]</sup>,分0~10 cm、10~20 cm、>20 cm 3层采样,同层土混合,即一个样地两次S型采样中分3层采集,每层10个样点混合成1个样品,则每个样地3个混合样品,一种恢复阶段样地采集9个混合样品,6个阶段共采集混合样品54个。采集样品时去除地表凋落物,采样混合后挑出肉眼可见的石子和根,装入密封的塑料袋中带回实验室,风干供有关指标的测定。

1.2.3 指标测定及计算 SA分级用干筛法<sup>[22-23]</sup>,研究区因土层浅薄(平均厚度20~40 cm<sup>[18]</sup>),样品风干过2 mm筛后,>2 mm SA较少,且>2 mm SA中碎石较多,干筛法难以分离出来,故本研究只分为1~2 mm、0.5~1 mm、0.25~0.5 mm、<0.25 mm四级粒级SA。所有风干土样品过2 mm筛并称其总

质量,然后用不同孔径土壤筛,筛孔直径从小到大依次为:0.25 mm、0.5 mm、1 mm,把混合的土样,放在最大孔径筛上,盖上顶盖,用振荡式机械筛分仪(上下振幅3 cm,30次·min<sup>-1</sup>)筛5 min,分离出1~2 mm、0.5~1 mm、0.25~0.5 mm、<0.25 mm SA。分离出来后,依次称出每一粒级得到的土壤质量,算出各粒级SA质量占总质量的百分数。分别把1~2 mm、0.5~1 mm、0.25~0.5 mm土壤研磨过0.25 mm土筛,注意每次研磨完上一粒级的土壤清理干净残土,称取过筛后的SA 0.1~0.2 g封袋,最后采用重铬酸钾外加热法<sup>[21]</sup>测定SAOC含量。0~10 cm、10~20 cm、>20 cm 3层土壤总有机碳测定亦采用重铬酸钾外加热法<sup>[21]</sup>。

用粒径质量分布表征土壤分形模型来计算SAFD<sup>[5]</sup>,计算公式为:

$$(R_i' / R_{max})^{3-D} = W(r < R_i') / W_0 \quad (1)$$

式(1)中,  $R_i'$  为两筛分粒级  $R_i$  与  $R_{i+1}$  间粒径的平均值,  $R_{max}$  为最大粒级的平均粒径,  $D$  为分形维数,  $W(r < R_i')$  为粒级小于  $R_i$  的累积土粒质量,  $W_0$  为土壤各粒级质量的总和, 最后用  $\lg(R_i' / R_{max})$ 、 $\lg(W / W_0)$  为横、纵坐标, 用回归分析计算分形维数( $D$ )。

SA 质量百分比有机碳含量 ( $g \cdot kg^{-1}$ ) = SAOC 含量 ( $g \cdot kg^{-1}$ )  $\times$  SA 质量占总质量的百分比 (%)

$$(2)$$

SA 质量百分比有机碳贡献率 = SA 质量百分比有机碳含量 ( $g \cdot kg^{-1}$ ) / 土壤总有机碳的含量 ( $g \cdot kg^{-1}$ )  $\times 100\%$

$$(3)$$

由上述公式算出 SAOC 含量和植被自然恢复中不同粒级 SA 质量百分比有机碳含量贡献率。

### 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  $\alpha = 0.05$ 。用 Pearson 相关系数评价不同因子间的相关性。

## 2 结果与分析

### 2.1 植被自然恢复中 SA 质量组成

表2显示: 总体上, 就3层平均来说, 除CG阶段, 随自然恢复1~2 mm SA质量百分比呈增加趋势, 而<0.25 mm SA质量百分比则呈减少趋势; 各恢复阶段同层土中1~2 mm、0.5~1 mm的SA质量百分比高于0.25~0.5 mm、<0.25 mm SA, 其中<0.25 mm SA质量百分比仅为3.97%~8.94%, 这一方面说明自然植被土壤中凋落物有机质的胶结作用可能较明显, 从而有利于大粒级SA的形成, 另一方面表明整体上研究区小粒级SA所占比重较少, 可能是小粒级SA随水土流失而损失, 反映了喀斯特区水土流失严重。

表2 SA 质量百分比

土层/cm	0~10				10~20				>20				3层平均			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
土壤粒级																
C	34.21	35.15	21.70	8.94	31.98	36.92	22.52	8.58	36.77	36.76	20.23	6.24	34.49	36.11	21.48	7.92
CG	44.79	32.92	16.57	5.72	52.37	29.84	13.05	4.74	51.20	30.58	14.25	3.97	49.45	31.12	14.62	4.81
恢复																
G	41.51	32.33	19.73	6.43	32.29	37.41	23.64	6.66	31.00	36.79	25.41	6.80	36.94	32.91	23.53	6.62
阶段																
GQ	44.24	30.97	19.32	5.47	31.98	35.62	24.84	7.56	36.14	31.96	25.38	6.52	37.45	32.84	23.18	6.53
Q	41.40	30.52	21.57	6.51	38.41	33.52	22.23	5.84	37.78	35.28	21.33	5.61	39.20	33.11	21.71	5.98
D	39.93	32.34	21.85	5.88	44.56	31.56	19.11	4.77	32.18	33.16	26.24	8.42	38.89	32.35	22.40	6.36

注: I~2 mm; II: 0.5~1 mm; III: 0.25~0.5 mm; IV: <0.25 mm; 表中数据为均值, 经统计分析标准误差在5%以内, 下同。

### 2.2 植被自然恢复中 SAOC 含量的变化

2.2.1 各粒级 SAOC 含量 表3表明: 总体上同一土层各粒级 SAOC 含量由恢复早期(C、CG)、经中期(G、GQ)至后期(Q、D)呈增加趋势, 说明自然恢复有利于 SAOC 含量增加; 随土层加深同一恢复阶段各粒级 SAOC 含量呈较强的递减趋势, 说明土壤有机碳含量具有较强的表聚性; 同一恢复阶段的同一

土层中1~2 mm SA有机碳含量最低, 恢复前半阶段(C、CG、G)0.5~1 mm SAOC含量最高, 恢复后半阶段(GQ、Q、D)0.25~0.5 mm SAOC含量最高, 而总体上<0.25 mm SA中有机碳含量在整个自然恢复中居于次高的位置, 说明小粒级 SAOC 含量较高, 有利于土壤有机碳的稳定。

表3 SAOC 含量

土层/cm	0~10				10~20				>20				3层平均			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
土壤粒级																
C	37.53	43.04	44.06	43.96	28.83	39.46	29.33	27.62	20.94	20.83	20.42	30.61	29.10	34.44	31.27	34.06
CG	30.16	39.22	30.84	23.47	21.21	17.49	22.93	23.21	23.30	16.51	16.42	14.36	24.89	24.41	23.40	20.34
恢复																
G	29.95	35.34	33.28	38.75	29.02	27.19	25.59	21.62	16.90	21.67	20.70	21.91	25.29	28.06	26.53	27.43
阶段																
GQ	45.80	42.46	51.81	48.08	34.37	35.17	37.24	36.11	28.00	34.20	36.80	31.44	36.05	37.28	41.95	38.54
Q	53.43	52.26	55.82	52.31	45.27	41.80	44.37	45.38	28.90	30.90	33.47	35.65	42.54	41.65	44.56	44.45
D	47.38	47.02	52.22	46.94	37.05	38.47	35.13	36.27	28.62	32.80	30.95	29.33	37.68	39.43	39.43	37.51

2.2.2 SA 质量百分比有机碳含量 表4表明: 总体上各恢复阶段的同一土层中 SA 质量百分比有机碳

含量1~2 mm、0.5~1 mm SA 高于0.25~0.5 mm、<0.25 mm SA, 这说明土壤有机碳主要储存在大粒级

SA 中;总体上随土层加深同一恢复阶段各粒级 SA 质量百分比有机碳含量呈递减趋势,说明土壤有机碳含量具有较强的表聚性;随恢复进展大粒级 SA (>0.25

mm)质量百分比有机碳含量逐渐显著地高于小粒级 SA (<0.25 mm)质量百分比有机碳含量,说明植被自然恢复有利于大粒级 SAOC 的累积。

表4 SA 质量百分比有机碳含量

g · kg<sup>-1</sup>

土层/cm 土壤粒级	0~10				10~20				>20				3层平均				
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	
C	12.84	15.13	9.56	3.93	9.22	14.37	6.60	2.37	7.70	7.66	4.13	1.91	9.92	12.39	6.76	2.74	
CG	13.51	12.91	5.11	1.34	11.11	5.22	2.99	1.10	11.93	5.05	2.34	0.57	12.18	7.73	3.48	1.00	
恢复 阶段	G	14.24	11.53	6.60	2.48	9.37	10.17	6.05	1.44	5.24	7.97	5.26	1.49	9.62	9.89	5.97	1.80
	GQ	20.26	13.15	10.01	2.63	10.99	12.52	9.25	2.73	10.12	10.93	9.34	2.05	13.79	12.20	9.53	2.47
	Q	22.12	15.95	12.04	3.40	17.39	14.01	9.86	2.65	10.92	10.90	7.14	2.00	16.81	13.62	9.68	2.68
	D	18.92	15.20	11.41	2.76	16.51	12.14	6.71	1.73	9.21	10.88	8.12	2.47	14.88	12.74	8.75	2.32

2.2.3 SA 质量百分比有机碳贡献率 表5显示:随植被自然恢复同一土层各粒级 SA 质量百分比有机碳贡献率变化不明显;随土层加深<0.25 mm SA 质量百分比有机碳贡献率总体上以>20 cm 土层较

高、10~20 cm 土层较小、0~10 cm 土层居中;随土壤粒级变小,总体上同一恢复阶段的同一土层 SA 质量百分比有机碳贡献率总体上呈减少趋势,说明土壤有机碳的增加主要是大粒级 SA 的贡献。

表5 SA 质量百分比有机碳贡献率

%

土层/cm 土壤粒级	0~10				10~20				>20				3层平均				
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	
C	30.97	36.49	23.06	9.48	28.32	44.13	20.27	7.28	35.98	35.79	19.30	8.93	31.76	38.8	20.88	8.56	
CG	41.10	39.28	15.55	4.08	54.41	25.56	14.64	5.39	59.98	25.39	11.76	2.87	51.83	30.08	13.98	4.11	
恢复 阶段	G	40.86	33.08	18.94	7.12	34.67	37.62	22.38	5.33	26.25	39.93	26.35	7.46	33.93	36.88	22.56	6.64
	GQ	44.00	28.56	21.74	5.71	30.97	35.28	26.06	7.69	31.20	33.69	28.79	6.32	35.39	32.51	25.53	6.57
	Q	41.34	29.81	22.50	6.35	39.60	31.90	22.46	6.04	35.27	35.21	23.06	6.46	38.74	32.31	22.67	6.28
	D	39.18	31.48	23.63	5.72	44.51	32.73	18.09	4.66	30.02	35.46	26.47	8.05	37.9	33.22	22.73	6.14

### 2.3 植被自然恢复中 SAFD 特征的变化

表6表明:随植被恢复,总体上0~10 cm 土层SAFD由恢复早期(C、CG, 2.01~2.15)、经中期(G、GQ, 2.10~2.16)、至后期(Q、D, 2.15~2.16)呈增加趋势,>20 cm 土层由恢复早期(C、CG, 2.14~2.24)、经中期(G、GQ, 2.13~2.13)、至后期(Q、D, 2.04~2.15)呈减小趋势,10~20 cm 土层则处于二者之间而变化不明显;随土层加深,总体上SAFD在恢复前半阶段(C、CG、G)呈增加趋势、后半

阶段(GQ、Q、D)呈减小趋势。说明恢复前半阶段(C、CG、G)土壤表层(0~10 cm)小粒级SA数量较少而大粒级SA较多,土壤下层(>20 cm)则相反;恢复后半阶段(GQ、Q、D)土壤表层(0~10 cm)小粒级SA数量较多而大粒级SA较少,土壤下层(>20 cm)则相反。反映了随植被自然恢复地表径流得到有效控制、小粒级SA数量越来越多、同时下层(>20 cm)土壤结构略有改善。表6土壤团聚体分维数。

表6 不同恢复阶段土壤分维数

恢复阶段	C	CG	G	GQ	Q	D
0~10 cm	2.01 ± 0.003Aa	2.15 ± 0.026Ab	2.10 ± 0.036Ac	2.16 ± 0.009Ab	2.16 ± 0.009Ab	2.15 ± 0.002Ab
分维数 10~20 cm	2.03 ± 0.006Aa	2.20 ± 0.036Bb	2.13 ± 0.010Ac	2.08 ± 0.026Bd	2.16 ± 0.003Ac	2.20 ± 0.003Bb
>20 cm	2.14 ± 0.013Ba	2.24 ± 0.007Cb	2.13 ± 0.011Aa	2.13 ± 0.010Ca	2.15 ± 0.006Aa	2.04 ± 0.004Cc

注:同列不同大写字母表示差异显著;同行不同小写字母表示差异显著

### 2.4 SAFD 与 SA 质量百分比有机碳贡献率的相关关系

表7表明:SAFD与1~2 mm SA 质量百分比有机碳贡献率呈较强的正相关关系、与0.5~1 mm、

0.25~0.5 mm SA 质量百分比有机碳贡献率呈较强的负相关关系、与<0.25 mm SA 质量百分比有机碳贡献率呈极强的负相关关系,说明SAFD能较好地表征SA质量百分比有机碳贡献率,反映了土壤有

机碳与土壤的形状、结构等物理特性存在较强的内在关系;但相关分析表明 SAFD 与 SAOC 含量、土壤总有机碳的相关关系未达到显著性水平,说明 SAFD 表征土壤有机碳的综合特性较好,而表征土壤有机碳的某单项特性较差。

表 7 SAFD 与 SA 质量百分比有机碳贡献率的相关关系

项目	SA 质量百分比有机碳贡献率				
		I	II	III	IV
SAFD	$R^2$	0.70	-0.49	-0.64	-0.99
显著性	$p$	0.00	0.04	0.00	0.00

### 3 讨论

#### 3.1 喀斯特植被自然恢复中 SAOC 含量特征

本研究中,总体上随植被自然恢复各粒径级 SAOC 含量、各粒径 SA 质量百分比有机碳含量呈增加趋势、随土层加深呈减少趋势,这与土壤总有机碳<sup>[15]</sup>、土壤微生物生物量碳<sup>[16]</sup>、土壤可矿化碳<sup>[17]</sup>的变化规律一致,这从土壤的物理结构上也说明恢复有利于有机碳的累积、且有机碳的表聚性极强,因此在喀斯特区应该加强植被的自然恢复、避免土壤表层物理结构遭受破坏而使有机碳损失,这样土壤才能起到大气 CO<sub>2</sub> 汇的作用。随植被自然恢复同一土层中各粒径 SA 中,1~2 mm SAOC 含量最低,而恢复前半阶段(C、CG、G)0.5~1 mm SAOC 含量最高、恢复后半阶段(GQ、Q、D)0.25~0.5 mm SAOC 含量最高、且<0.25 mm SAOC 含量在恢复中一直较高,这表明土壤有机碳随植被自然恢复有从大粒径 SA 转移至小粒径 SA 的趋势,有利于有机碳的稳定和富集,这与安韶山等<sup>[24]</sup>研究黄土地貌、卢凌霄等<sup>[13]</sup>研究喀斯特地貌的研究结果基本一致。尽管大粒径 SA(1~2 mm)有机碳含量较低,但其质量百分比有机碳含量却较高,且随 SA 粒径变小 SA 质量百分比有机碳含量呈减少趋势,这主要是由于大粒径 SA 所占质量百分比(91.06%~96.03%)较大所造成的,由此表明大粒径团聚体(0.25~2 mm)有机碳含量在整个自然恢复中占住了主导地位。随植被自然恢复各粒径 SA 质量百分比有机碳贡献率变化规律也表明了大粒径 SAOC(0.25~2 mm)占主导地位,大粒径 SA(0.25~2 mm)质量百分比有机碳贡献率达 91.44%~95.89%、小粒径 SA(<0.25 mm)质量百分比有机碳贡献率仅为 4.11%~8.56%。这与相关学者<sup>[25-27]</sup>研究所得“土壤碳存储主要发生在 0.25~2 mm SA”的结论基本一致。

#### 3.2 喀斯特森林植被自然恢复中土壤结构演化特征

土壤的结构特征可以用 SAFD 来表征。本研究中,随恢复进展,总体上 0~10 cm 土层 SAFD 呈增加趋势,>20 cm 土层呈减小趋势,10~20 cm 土层则处于二者之间而变化不明显,表土层(0~10 cm)与王培将<sup>[12]</sup>所得结果一致,说明植被恢复有利于土壤结构改善,也暗示喀斯特区随植被自然恢复总体上土壤结构演化的核心可能是表土层 SA 的细化过程和下层(>20 cm)土壤 SA 的粗化过程的共同作用,该结论是否存在普遍性?则需要进一步扩大采样区域进行进一步的广度和深度的研究,如该结论存在普遍性则与龙健等<sup>[9]</sup>研究得出的“喀斯特山区石漠化演变的核心是土壤颗粒的粗化”的结论既有相似之处也有不同之处,相似之处在于石漠化与自然恢复是正反方向的演替过程,而土壤的粗化与细化也是正反方向的变化过程,这种正反变化基本相同,但不同之处在于喀斯特植被自然恢复还伴随有下层(>20 cm)土壤粗化过程。这反映了喀斯特植被自然恢复土壤结构变化的复杂性,也反映了喀斯特生态环境恢复的艰巨性。因此要保护好现有的喀斯特自然植被,一旦人为破坏,土壤恢复相当艰巨。本研究中,SAFD 为 2.01~2.20 间,比龙健等<sup>[9]</sup>研究石漠化过程中的 SAFD(2.04~2.87)总体上要低,这一方面表明龙健等把 SA 的粒径别分得要多而存在一些差异,另一方面也表明喀斯特区植被自然恢复中土壤结构总体上要比石漠化过程中土壤结构要好。

#### 3.3 SAFD 在表征 SAOC 特征中的意义

喀斯特区 SAFD 既可以反映土壤结构特征、又可以作为土壤肥力和土壤侵蚀指标<sup>[9,12]</sup>。本研究中,SAFD 与 1~2 mm SA 质量百分比有机碳贡献率呈较强的正相关关系、与 0.5~1 mm、0.25~0.5 mm SA 质量百分比有机碳贡献率呈较强的负相关关系、与<0.25 mm SA 质量百分比有机碳贡献率呈极强的负相关关系,且均达到显著性水平( $P < 0.05$ )。首先这说明 SA 质量百分比有机碳的贡献与土壤形状、结构等物理特性存在较强的内在关系,SAFD 越高,小粒径 SA 个体数越多、大粒径 SA 个体数越少,而小粒径 SA 质量百分比有机碳贡献率越低、大粒径 SA 质量百分比有机碳贡献率越高,演替越处于后期,其原因主要是随植被自然恢复小粒径 SA 数目变多但质量百分比变小、而大粒径 SA 数目变少但所占质量百分比变大;其次 SA 质量百分比有机碳贡献率

与土壤侵蚀强弱也存在较强的内在关系,随植被自然恢复土壤侵蚀得到遏制,各粒级 SA 的空间分布、数目、质量等发生变化,由此 SAFD 也发生了变化,同时各粒级 SA 质量百分比有机碳贡献率亦发生变化,因而 SA 质量百分比有机碳贡献率在表征土壤侵蚀上也具有重要意义;再次 SAFD 也可以表征土壤有机碳的活性与稳定性,大多数研究<sup>[28-29]</sup>表明大粒级 SAOC (0.25 ~ 2 mm) 活性强、稳定性差,而小粒级 SAOC (<0.25 mm) 活性差、稳定性强,例如本研究中随植被自然恢复土壤表层 SAFD 变大、1 ~ 2 mm SA 数目变少而 <0.25 mm SA 数目则变多,与之对应土壤有机碳活性降低而稳定性变强<sup>[15]</sup>。因此,SAFD 可以作为喀斯特植被自然恢复土壤有机碳质量评价的一项综合指标。

## 4 结论

喀斯特区同一恢复阶段的同一土层中 1 ~ 2 mm、0.5 ~ 1 mm SA 质量百分比与其质量百分比有机碳贡献率均高于 0.25 ~ 0.5 mm、<0.25 mm SA; 相同土层中的相同粒级 SAOC 含量与其质量百分比有机碳含量均随植被自然恢复呈增加趋势;同一恢复阶段的相同粒级 SAOC 含量与其质量百分比有机碳含量随土层加深呈减少趋势;随植被自然恢复 SAFD 在 0 ~ 10 cm 土层呈增加趋势、在 >20 cm 土层呈减小趋势;喀斯特森林植被自然恢复中,土壤结构演化的核心可能是上层土壤细化和下层土壤粗化,SAOC 演化特征与土壤结构、侵蚀等具有较强的内在关系,SAFD 可以表征土壤有机碳质量;加强喀斯特植被的恢复保护,有利于土壤结构的改善、减少土壤侵蚀、土壤有机碳循环和累积。

## 参考文献:

[1] 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):2176-2183.

[2] 史奕,陈欣,沈善敏. 土壤团聚体的稳定机制及人类活动的影响[J]. 应用生态学报,2002,13(11):1491-1494.

[3] 苏永中,赵哈林. 农田沙漠化过程中土壤有机碳和氮的衰减及其机理研究[J]. 中国农业科学,2003,36(8):928-934.

[4] 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):2847-2854.

[5] 杨培岭,罗远培,石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. 科学通报,1993,38(20):1896-1899.

[6] 吴承洪,洪伟. 不同经营模式土壤团粒结构的分形特征研究[J]. 土壤学报,1999,36(2):163-167.

[7] 黄冠华,詹卫华. 土壤颗粒的分形特征及其应用[J]. 土壤学报,2002,39(4):490-487.

[8] 窦森,李凯,关松. 土壤团聚体中有机质研究进展[J]. 土壤学报,2011,48(2):412-418.

[9] 龙健,李娟,邓启琼,等. 贵州喀斯特山区石漠化土壤理化性质及分形特征研究[J]. 土壤通报,2006,37(4):635-639.

[10] 李阳兵,魏朝富,谢德体,等. 岩溶山区植被破坏前后土壤团聚体分形特征研究[J]. 土壤通报,2006,37(1):51-55.

[11] 张治伟,傅瓦利,朱章雄,等. 石灰岩区土壤分形特征及其与土壤性质的关系[J]. 土壤,2009,41(1):90-96.

[12] 王佩将,戴全厚,丁贵杰,等. 喀斯特植被恢复过程中的土壤分形特征[J]. 水土保持学报,2012,26(4):178-182.

[13] 卢凌霄,宋同清,彭晚霞,等. 喀斯特峰丛洼地原生林土壤团聚体有机碳的剖面分布[J]. 应用生态学报,2012,23(5):1167-1174.

[14] 刘涛泽,刘丛强,张伟,等. 植被恢复中坡地土壤颗粒有机碳分布特征和  $\delta^{13}C$  值组成[J]. 生态环境,2008,17(5):2031-2036.

[15] 黄宗胜,符裕红,喻理飞. 喀斯特森林植被自然恢复过程中土壤有机碳库特征演化[J]. 土壤学报,2013,50(2):306-314.

[16] 黄宗胜,符裕红,喻理飞. 喀斯特森林自然恢复中土壤微生物生物量碳与水溶性有机碳特征[J]. 应用生态学报,2012,23(10):2715-2720.

[17] 黄宗胜,喻理飞,符裕红. 喀斯特森林植被自然恢复过程中土壤可矿化碳库特征[J]. 应用生态学报,2012,23(8):2165-2170.

[18] 周政贤. 茂兰喀斯特森林科学考察[M]. 贵阳:贵州人民出版社,1987.

[19] 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[J]. 林业科学,2000,36(6):12-19.

[20] 安明志. 茂兰喀斯特植被恢复过程的群落结构与健康评价[D]. 贵阳:贵州大学,2008.

[21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,1999.

[22] 文倩,赵小蓉,张书美,等. 半干旱地区不同土壤团聚体中微生物量磷的分布特征[J]. 中国农业科学,2005,38(2):327-332.

[23] Singh R A. Soil Physical Analysis[M]. New Delhi - Ludhiana: Kalyani Publishers,1980:52-56.

[24] 安韶山,张玄,张扬,等. 黄土丘陵区植被恢复中不同粒级土壤团聚体有机碳分布特征[J]. 水土保持学报,2007,21(6):109-113.

[25] Wright A L, Hons F M. Carbon and nitrogen sequestration and soil aggregation under sorghum cropping sequences[J]. Biology and Fertility of Soils, 2004, 43: 265-272.

[26] 华娟,赵世伟,张扬,等. 云雾山草原区不同植被恢复阶段土壤团聚体活性有机碳分布特征[J]. 生态学报,2009,29(9):4614-4619.

[27] 李恋卿,潘根兴,张旭辉. 退化红壤植被恢复中表层土壤微团聚体及有机碳分布变化[J]. 土壤通报,2000,31(5):193-195.

[28] Cambardella C A, Elliott E T. Carbon and nitrogen distribution in aggregates from cultivated and native grassland soils[J]. Soil Sci. i Soc Am J,1993,57:1071-1076.

[29] 谢锦升,杨玉盛,陈光水,等. 植被恢复对退化红壤团聚体稳定性及碳分布的影响[J]. 生态学报,2008,28(2):0702-0709.