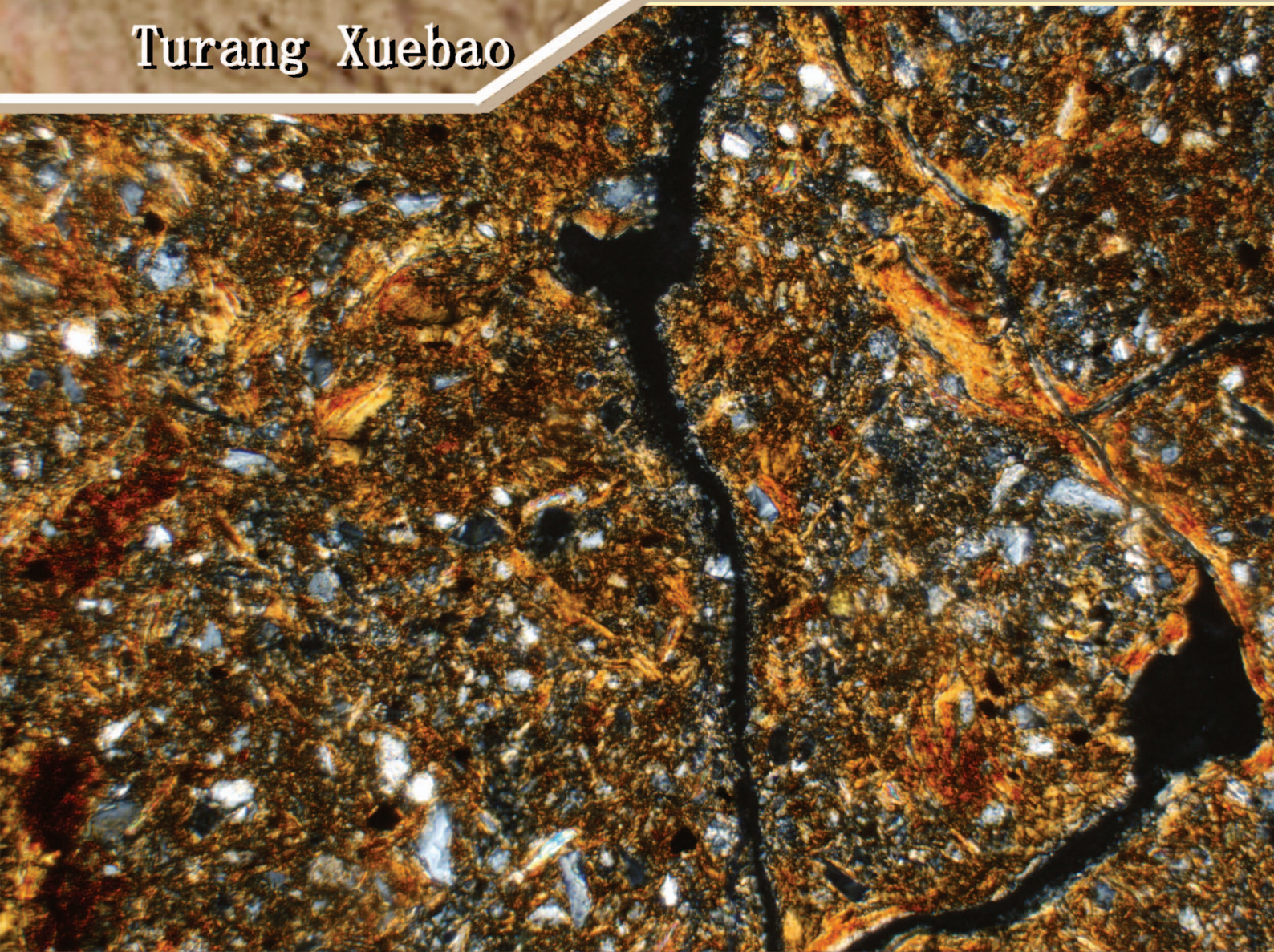


ISSN 0564-3929

Acta Pedologica Sinica 土壤学报

Turang Xuebao



中国土壤学会 主办
科学出版社 出版

2015

第 52 卷 第 2 期

Vol.52 No.2

《土壤学报》编辑委员会

主 编: 史学正

执行编委: (按姓氏笔画为序)

丁维新	巨晓棠	王敬国	王朝辉	史 舟	宇万太	朱永官
李永涛	李芳柏	李保国	李 航	吴金水	沈其荣	张玉龙
张甘霖	张福锁	陈德明	邵明安	杨劲松	杨明义	杨林章
林先贵	依艳丽	周东美	周健民	金继运	逢焕成	胡 锋
施卫明	骆永明	赵小敏	贾仲君	徐国华	徐明岗	徐建明
崔中利	常志州	黄巧云	章明奎	蒋 新	彭新华	雷 梅
窦 森	廖宗文	蔡祖聪	蔡崇法	潘根兴	魏朝富	

编辑部主任: 陈德明

责任编辑: 汪枏生 卢 萍 檀满枝

土 壤 学 报

Turang Xuebao

(双月刊, 1948年创刊)

第52卷 第2期 2015年3月

ACTA PEDOLOGICA SINICA

(Bimonthly, Started in 1948)

Vol. 52 No. 2 Mar., 2015

编 辑 《土壤学报》编辑委员会
地址: 南京市北京东路71号 邮政编码: 210008
电话: 025 - 86881237
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

Edited by Editorial Board of Acta Pedologica Sinica
Add: 71 East Beijing Road, Nanjing 210008, China
Tel: 025 - 86881237
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

主 编 史学正
主 管 中国科学院
主 办 中国土壤学会
承 办 中国科学院南京土壤研究所

Editor-in-Chief Shi Xuezheng
Superintended by Chinese Academy of Sciences
Sponsored by Soil Science Society of China
Undertaken by Institute of Soil Science,
Chinese Academy of Sciences

出 版 科 学 出 版 社
地址: 北京东黄城根北街16号 邮政编码: 100717

Published by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

印刷装订 北京中科印刷有限公司
总 发 行 科 学 出 版 社
地址: 北京东黄城根北街16号 邮政编码: 100717
电话: 010 - 64017032
E-mail: journal@mail.sciencep.com

Printed by Beijing Zhongke Printing Limited Company
Distributed by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China
Tel: 010 - 64017032
E-mail: journal@mail.sciencep.com

国外发行 中国国际图书贸易总公司
地址: 北京399信箱 邮政编码: 100044

Foreign China International Book Trading Corporation
Add: P. O. Box 399, Beijing 100044, China

国内统一刊号: CN 32-1119/P

国内邮发代号: 2-560

国外发行代号: BM45

定价: 60.00元

国 内 外 公 开 发 行



ISSN 0564-3929



9 770564 392156

DOI: 10.11766/trxb201404180183

退化喀斯特森林植被自然恢复中土壤 有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 值特征*

黄宗胜^{1,2} 喻理飞^{1†} 符裕红^{1,3} 杨 瑞¹

(1 贵州大学林学院, 贵阳 550025)

(2 贵州大学建筑与城市规划学院, 贵阳 550025)

(3 贵州师范学院化学与生命科学学院, 贵阳 550018)

摘 要 采用空间代替时间与稳定性碳同位素技术相结合的方法,研究了茂兰喀斯特森林自然恢复中土壤有机碳(SOC) $\delta^{13}\text{C}$ 值特征。结果表明:整体上 SOC $\delta^{13}\text{C}$ 值随恢复进展 0~20 cm 土层(-25.72‰~-19.91‰)趋正、>20 cm 土层(-23.76‰~-18.13‰)先趋正后趋负。随土层加深除草灌、灌乔外其他阶段均趋正,草灌阶段上层土与乔木、顶极阶段底层土 SOC 为 C_4 碳, SOC $\delta^{13}\text{C}$ 值变化受地带性和喀斯特环境的双重影响。群落优势种凋落叶 $\delta^{13}\text{C}$ 值(-31.79‰~-16.76‰)随恢复进展趋负,说明生境日益改善,其与 0~20 cm 土层 SOC $\delta^{13}\text{C}$ 值呈极显著正相关($R^2 > 0.96, p < 0.01$)、而与 >20 cm 土层极不相关,说明 0~20 cm 土层主要为新碳;SOC 周转速率随恢复进展递增、随土层加深递减,土壤生化反应具较强表聚性;SOC $\delta^{13}\text{C}$ 值与土壤可矿化碳、易氧化碳含量呈显著的负相关关系($R^2 > -0.50, p < 0.05$),与微生物生物量碳具有一定的负相关关系($R^2 = -0.389$),SOC $\delta^{13}\text{C}$ 值在一定程度上可以指示 SOC 的活性;喀斯特森林自然恢复是复杂多变、多途径的统一,其中 C_4 植物在恢复中具有重要意义;碳同位素方法与“空间代替时间”方法相结合能较好地重现喀斯特植被更替的历史。

关键词 土壤有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 值;凋落叶 $\delta^{13}\text{C}$ 值;土壤活性有机碳;自然恢复;退化喀斯特森林

中图分类号 Q14 **文献标识码** A

土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)的动态变化、周转规律等成为当今生态学、生物地球化学和地理学研究的共同热点,研究结果可以为 SOC 循环动力学模型和 SOC 管理提供理论基础和数据储备^[1]。稳定性碳同位素技术常被用来进行 SOC 来源、周转速率、气候与植被重建等方面的研究,是一种研究 SOC 动态的有效方法^[2]。已有许多学者利用碳同位素组成变化有效地揭示了土壤有机质的分解程度、SOC 动态和含量的微小迁移与转换、评估新老 SOC 对碳储量的相对贡献等^[1,3]。在喀斯特地区,微生物生物量碳同位素组成与 SOC 同位素效应、棕色石灰土稳定碳同位素组成差异、坡地 SOC $\delta^{13}\text{C}$ 值组成差异、典型 SOC 同位素组成、应用 $\delta^{13}\text{C}$ 值探讨林地 SOC 分异、碳同位素示踪农林生态系统转换中 SOC 来源、变化等方面开展了研究^[3-9],较

好地揭示了 SOC $\delta^{13}\text{C}$ 在石灰土与黄壤等典型土壤及坡地中的分异、生态系统中 SOC 来源、农林生态系统转换对土壤有机质的影响、土壤有机碳同位素效应是微生物对 ^{13}C 的分馏和对有机质的选择性利用等,但对喀斯特森林植被自然恢复中 SOC $\delta^{13}\text{C}$ 值变化等相关研究却未见报道,喀斯特森林植被自然恢复中 SOC $\delta^{13}\text{C}$ 特征、地上植被与 SOC $\delta^{13}\text{C}$ 关系、SOC 库与 SOC $\delta^{13}\text{C}$ 的关系等没有被揭示出来。因此本研究通过分析喀斯特森林植被自然恢复中 SOC $\delta^{13}\text{C}$ 值特征及其与 SOC、群落优势种凋落叶 $\delta^{13}\text{C}$ 值、土壤微生物生物量碳(Soil microbial biomass carbon, SMBC)、土壤可矿化碳(Soil mineralizable carbon, SMC)、土壤易氧化碳(Soil readily oxidizable carbon, SROC)等因子的关系,探讨该区域森林植被恢复中 SOC 组成、来源、周转规律、植被更替等,进

* 国家“十二五”科技支撑计划项目(2011BAC02B02, 2011BAC09B01)、贵州省社会发展攻关项目(黔科合 SY 字(2012)3012)和贵州省农业攻关项目(黔科合 NY(2013)3055 号)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,博士,副教授,研究方向为退化生态系统恢复、景观规划设计。E-mail: hzsjh@126.com

收稿日期:2014-04-18;收到修改稿日期:2014-09-29

而揭示植被与 SOC $\delta^{13}\text{C}$ 关系、SOC 库与 SOC $\delta^{13}\text{C}$ 的关系,为进一步揭示喀斯特森林 SOC 库特征、植被恢复重建和石漠化治理等提供参考依据。

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)内进行。该保护区面积 212.85 km²,森林覆盖率达 87.3%,地势西北高东南低,最高海拔 1 078.6 m,最低海拔 430 m,平均海拔在 550 ~ 850 m 之间,山峰与洼地相对高差为 150 ~ 300 m。该地区属中亚热带南部季风湿润气候,年均气温 18.30 °C, ≥ 10 °C 积温 5 767.9 °C,年均降水量 1 320.5 mm,年均相对湿度 80%,全年日照时数 1 272.8 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,pH 6.15 ~ 8.00,有机质含量 75.5 ~ 380 g kg⁻¹。多数地段为中亚热带原生性喀斯特森林,即常绿阔叶混交林,也有不同退化程度的演替群落,现有维管束植物 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^[10]。

1.2 研究方法

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-乔阶段(GQ)、乔木阶段(Q)和顶极阶段(D)6个恢复阶段。各阶段群落的基本概况为,草本阶段:坡度 30° ~ 40°,海拔 840 m,坡向 NW,岩石裸露率 77.52%,生境有土面、石缝、石沟,优势种有密毛蕨(*Pteridium revolutum*)、白茅(*Imperata cylindrical*)、金丝草(*Pogonatherum crinitum*)、三毛草(*Trisetum bifidum*),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,枯枝落叶层 3 ~ 6 cm。草灌阶段:坡度 30° ~ 40°,海拔 820 m,坡向 SW,岩石裸露率 75.61%,生境有土面、石缝、石沟,优势种有盐肤木(*Rhus chinensis*)、野牡丹(*Mlastoma candidum*)、腊莲绣球(*Hydrangea strigosa*)、芒(*Miscanthus sinensis*)、五节芒(*Miscanthus floridulus*)、白茅,群落由草本和灌木共同组成一层,盖度达 80% 以上,草本、灌木盖度约各占 1/2,高度 1.5 ~ 2 m,地表有少量藤刺,枯枝落叶层 2 ~ 5 cm。灌木阶段:坡度 30° ~ 40°,海拔 820 m,坡向 SW,岩石裸

露率 73.22%,生境有石面、土面、石缝、石沟,优势种有火棘(*Pyracantha fortuneana*)、南天竹(*Nandina domestica*)、香叶树(*Lindera communis*)、齿叶铁仔(*Myrsine semiserrata*),垂直结构单一,无或有少量乔木,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,枯枝落叶层 2 ~ 4 cm;灌乔过渡阶段,坡度 30° ~ 40°,海拔 820 m,坡向 SW,岩石裸露率 73.94%,生境有石面、土面、石缝、石沟,优势种有圆果化香(*Platycarya longipes*)、香叶树、天鵝槭(*Acer wangchii*)、鸡仔木(*Sinoadina racemosa*),林分层次结构分化,高 7 ~ 12 m,木本植物盖度达 80% 以上,草本层盖度较低,地表有较多藤刺,枯枝落叶层 1 ~ 3 cm。乔木阶段:坡度 30° ~ 40°,海拔 840 m,坡向 SW,岩石裸露率 72.81%,生境有土面、石面、石缝、石沟,优势种有光皮楸木(*Cornus wilsoniana*)、黔桂润楠(*Machilus chienkweiensis*)、香叶树、翅荚香槐(*Cladrastis polycarpa*),林分层次结构分化明显,乔木层、灌木层较发达,高 14 ~ 18 m,乔木层覆盖度达 80% 以上,灌木层 2 ~ 3 m,盖度 10% 左右,地表有少量藤刺、蕨类、地衣苔藓等分布,枯枝落叶层 1 ~ 3 cm。顶极阶段:坡度 30° ~ 40°,海拔 850 m,坡向 SW,岩石裸露率 71.20%,生境有石面、石缝、土面、石沟,优势种有光皮楸木、短萼海桐(*Pittosporum brevicalyx*)、多脉青冈栎(*Cyclobalanopsis multinervis*)、天鵝槭,乔木层、灌木层和草本层植物之间分化清晰,以乔木为主,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%,枯枝落叶层 1 ~ 3 cm。^[11-13]

分别于草本阶段(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)6个恢复阶段设置典型样地,典型样地设置时同一恢复阶段坡地部位基本一致,样地面积为 30 m × 30 m,3个重复,共计 18 块。

土壤样品采集与处理:各恢复阶段样地土壤类型为石灰土,土壤平均深 20 ~ 40 cm。于 2011 年 10 月中旬,在 18 个样地中沿正方形样地的两条对角线进行两次相对的采用“S”型五点混合采样法^[14]混合采样,按 0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm、> 20 cm 3 层采样,同层土壤混合,每个样地 3 个混合样品,各恢复阶段混合样品 9 个,共计混合样品 54 个。采样时去除地表凋落物,采样混合后挑出肉眼可见的石子和根,

装入密封塑料袋中带回实验室,分两份处理:一份风干供土壤有机碳等的测定,一份保存在 4 °C 冰箱中供微生物、矿化培养等用。

群落优势种凋落叶样品收集与处理:于 2011 年 10 月中旬用厚 1 mm、宽 10 cm 的薄铁皮长条制成面积为 1.0 m²的正方形取样框,分别在每个样地中随机选取 30 个小样方进行凋落物现存量取样,取样时正方形取样框放置水平,对正方形取样框内的群落优势种未分解的凋落叶进行收集,装入密封塑料袋中带回实验室,经清洗、烘干待用。

试验方法:SOC $\delta^{13}\text{C}$ 值和 SOC 测定:将风干土壤样品适当粉碎,用 1 mol L⁻¹的盐酸(需 6 h,每 1 h 搅拌一次)除去土壤中的无机碳,再用去离子水充分洗净过量盐酸,然后在 60°C 左右的干燥箱进行干燥,24 ~ 48 h 后冷却、粉碎,过 60 目筛密封保存。叶片样品带回实验室,经清洗、烘干、冷却、粉碎后,过 20 目筛密封保存。处理后的样品送至国家海洋局第三海洋研究所稳定同位素质谱实验室进行 $\delta^{13}\text{C}$ 值和有机碳测定,仪器及型号为 Gasbench-IRMS (Delta V advantage),采用 PDB (Pee Dee Belemnite) 标准, $\delta^{13}\text{C}$ 值依据国际通用标准形式^[15]:

$$\delta^{13}\text{C} = \left[\left(\frac{{}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}}{\text{sample}} - \left(\frac{{}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}}{\text{standard}} \right) \right) \times 1000\% \right] / \left(\frac{{}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}}{\text{standard}} \right)$$

有机碳的周转采用 SOC $\delta^{13}\text{C}$ 值与 SOC 含量 (g kg⁻¹) 进行线性拟合^[16],拟合直线方程为:

$$Y = b + kx$$

式中, Y 为 SOC $\delta^{13}\text{C}$ 值, x 为对应 SOC 含量,斜率 k 的绝对值表示碳含量每增加 1 倍引起的同位素分差,值越大表明由微生物矿化导致的 SOC 周转速率越快。

土壤微生物生物量碳采用氯仿熏蒸浸提法测定^[17];土壤可矿化碳采用密闭培养碱液吸收法测

定^[17-18],培养 5 周,每周末测出 CO₂-C 的释放量(单位 mg kg⁻¹,每 1 000 g 干土);土壤易氧化碳采用袁可能法^[19]。

C₄植物群落调查方法:通过查阅国内现有 C₄植物名录^[20],对照研究区现有植物名录^[10],确定研究区现有 C₄植物,对现有 C₄植物群落进行常规群落学调查^[12]。

1.3 数据处理

所有数据采用 SPSS17.0 软件进行分析。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,用 Pearson 相关系数评价不同因子间的相关性;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有机碳(SOC) $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化

表 1 表明:总体上随自然恢复 0 ~ 20 cm 土层 SOC $\delta^{13}\text{C}$ 值由恢复早期(C、CG),经中期(G、GQ)至后期(Q、D)呈偏轻趋势;> 20 cm 土层则由恢复早期(C、CG),经中期(G、GQ)趋负,而至后期(Q、D)趋正,说明底层土 SOC $\delta^{13}\text{C}$ 值与表层土变化规律不一致;随土层加深除 CG、GQ 外 SOC $\delta^{13}\text{C}$ 值趋正,说明除过渡阶段外随土层加深具¹³C 富集作用。随恢复,0 ~ 20 cm 土层 SOC $\delta^{13}\text{C}$ 值在恢复早期的 C、CG、后期的 D 之间及其与其他阶段之间差异显著;而恢复中期(G、GQ)和恢复后期的 Q 之间则差异不显著。主要原因可能是喀斯特生境和地上植被类型不同所致,恢复早期地上生境恶劣适生植物复杂多变,同时土壤侵蚀严重,输入的 SOC 类型变化较大,而恢复中期生境较好、植被结构类型较一致、群落

表 1 不同恢复阶段 SOC $\delta^{13}\text{C}$ 值

Table 1 SOC $\delta^{13}\text{C}$ at different restoration stages (mean \pm SD, %)

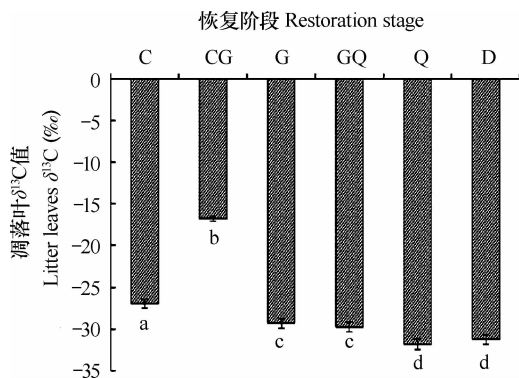
土层 Soil layer (cm)	恢复阶段 Restoration stage					
	C	CG	G	GQ	Q	D
0 ~ 10	-23.26 \pm 0.20Aa	-19.91 \pm 0.01Ba	-24.03 \pm 0.13Ca	-24.51 \pm 0.19Ca	-24.42 \pm 0.47Ca	-25.72 \pm 0.15Da
10 ~ 20	-22.58 \pm 0.10Ab	-19.93 \pm 0.42Ba	-23.58 \pm 0.53Ca	-23.53 \pm 0.12Cb	-23.86 \pm 0.12Ca	-24.64 \pm 0.42Db
> 20	-22.48 \pm 0.05Ab	-20.13 \pm 0.06Ba	-23.41 \pm 0.17Aa	-23.76 \pm 0.18Ab	-18.13 \pm 1.84Cb	-19.20 \pm 0.41BCc

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。同行不同大写字母表示不同恢复阶段差异显著($p < 0.05$)。同列不同小写字母表示不同土层差异显著($p < 0.05$)。Note: C: Grass stages; CG: Grass-shrub stages; G: Shrub stages; GQ: Shrub to arbor stages; Q: Arbor stages; D: Climax stages. The same below. Different capital letters in the same row mean significant difference between different restoration stages at 0.05 level. Different lowercase letters in the same column mean significant difference between different soil layers at 0.05 level

优势种较稳定且光合效应较一致,输入土壤的 SOC 类型变化不大。恢复后期的 Q 则可能是受恢复中期 SOC 的影响较大而与其较一致,但 D 由于处于演替的最后阶段,生境优越,且其群落的时间空间上均与其他阶段不同,故输入的 SOC 类型与其他阶段也不同;在恢复早期的 CG 中三个土层 SOC $\delta^{13}\text{C}$ 值均较高,且实际调查发现群落的优势种中有芒、五节芒等 C_4 植物,表明本阶段 SOC 由 C_4 -C 和 C_3 -C 共同构成。综上所述,随植被自然恢复表层土 SOC $\delta^{13}\text{C}$ 值具有一定的规律性,底层土具有较强的特殊性,说明 SOC $\delta^{13}\text{C}$ 值随植被自然恢复的变化具有较强的复杂性,反映出地上植被更替也具有较复杂的复杂性。

2.2 植被自然恢复中群落优势种凋落叶 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化

图 1 表明:随恢复进展群落优势种凋落叶 $\delta^{13}\text{C}$ 值由恢复早期(C、CG),经中期(G、GQ)至后期(Q、D)趋负,有研究^[21-22]表明在高资源(水分、养分等)可利用条件下的植物具有较小的 $\delta^{13}\text{C}$ 值即较低的 WU 值,而在低资源可利用性条件下具有较高的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,这就说明随恢复群落优势种对水分的利用效率减小、生境日益完善;恢复早期的 C、CG 之间凋落叶 $\delta^{13}\text{C}$ 值差异显著,而中期和后期则反之,但早、中、后各时期之间差异仍然显著,这主要是优势种组成不同所致,实际调查的各阶段群落基本概况发现恢复早期群落结构简单、优势种类型多样,中期结构较复杂、优势种次之,后期结构复杂、优势种则更简单,反映出群落自然恢复对策的变化,即由早期的更新对策向中期的结构调整对策至后期的结



注:不同小写字母表示差异显著 ($p < 0.05$) Note: Different lower-case letters mean significant difference at different restoration stages at 0.05 level

图 1 不同恢复阶段优势种凋落叶 $\delta^{13}\text{C}$ 值

Fig. 1 $\delta^{13}\text{C}$ in litter leaves of dominant tree species at different restoration stages (mean \pm SD)

构功能协调完善对策更替。

2.3 SOC $\delta^{13}\text{C}$ 值与群落优势种凋落叶 $\delta^{13}\text{C}$ 值的关系

表 2 显示:0 ~ 20 cm 土层 SOC $\delta^{13}\text{C}$ 值与群落优势种凋落叶 $\delta^{13}\text{C}$ 值相互之间呈较强的、极显著的正相关关系,而 > 20 cm 土层 SOC $\delta^{13}\text{C}$ 值与他们之间则关系极弱且不显著。这总体上说明在喀斯特森林植被自然恢复中 0 ~ 20 cm 土层 SOC 主要来源于现有植被凋落物有机质,即新碳,而 > 20 cm 土层 SOC 主要来源于历史群落凋落物有机质,即老碳。反映了在喀斯特森林植被自然恢复中新老 SOC 时空分布界线基本分明。

表 2 各土层有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 值与群落优势种凋落叶 $\delta^{13}\text{C}$ 值的相关关系

Table 2 Pearson correlation between SOC $\delta^{13}\text{C}$ in soil layers and $\delta^{13}\text{C}$ in litters of dominant tree species

	a	b	c	LA
a	1			
b	0.994 *	1		
c	0.002	-0.026	1	
LA	0.969 *	0.980 *	0.001	1

* Correlation is significant at the 0.01 level

注:a:0 ~ 10 cm 土层; b:10 ~ 20 cm 土层; c: > 20 cm 土层; LA: 凋落叶。Note:a:0 ~ 10 cm soil layer; b:10 ~ 20 cm soil layer; c: > 20 cm soil layer; LA: litters

2.4 植被自然恢复中土壤有机碳的周转速率

表 3 和表 4 表明:总体上随恢复进展回归方程系数 K 绝对值由早期(C、CG),经中期(G、GQ)至后期(Q、D)呈增大趋势、随土层加深则变小,说明 SOC 周转速率随恢复进展递增、随土层加深递减;CG 阶段 K 绝对值最小且显著性 p 较大,说明该阶段 SOC 周转速率最小且最不稳定;0 ~ 10 cm 土层 K 绝对值(0.954)分别是 10 ~ 20 cm 土层(0.664)、> 20 cm 土层(0.567)的 1.45 和 1.70 倍,反映出喀斯特森林土壤的生化反应具有较强的表聚性。

2.5 植被自然恢复中 SOC $\delta^{13}\text{C}$ 值与活性有机碳含量的关系

SMBC、SMC、SROC 可以作为土壤活性有机碳的指示因子^[23]。表 5 表明:SOC $\delta^{13}\text{C}$ 值与 SMC、SROC 含量具有显著的较强的负相关关系,与 SMBC 具有一定的负相关关系,说明 SOC $\delta^{13}\text{C}$ 值与土壤活性有机碳具有较好的内在关系,在一定程度上 SOC $\delta^{13}\text{C}$ 值也可以指示 SOC 的活性。

表 3 不同恢复阶段 SOC $\delta^{13}\text{C}$ 值 (Y) 与 SOC 含量 (x) 的关系方程Table 3 Relationship between SOC $\delta^{13}\text{C}$ (Y) and content of soc (x) at different restoration stages

恢复阶段 Restoration stages	方程 Equation	R^2	p
C	$Y = -21.15 - 0.506x$	0.953	0.001
CG	$Y = -20.23 - 0.122x$	0.103	0.399
G	$Y = -22.37 - 0.458x$	0.735	0.003
GQ	$Y = -22.21 - 0.429x$	0.618	0.012
Q	$Y = -1.40 - 3.703x$	0.826	0.001
D	$Y = -11.88 - 2.377x$	0.332	0.105

表 4 不同土层 SOC $\delta^{13}\text{C}$ 值 (Y) 与其 SOC 含量 (x) 的关系方程Table 4 Relationship between SOC $\delta^{13}\text{C}$ (Y) and content of soc (x) relative to soil layer

土层 Soil layer (cm)	方程 Equation	R^2	p
0 ~ 10	$Y = -19.14 - 0.954x$	0.520	0.001
10 ~ 20	$Y = -20.58 - 0.663x$	0.445	0.003
> 20	$Y = -23.30 - 0.567x$	0.165	0.095

表 5 土壤有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 值与 SMC、SMBC、SROC 含量的相关关系Table 5 Pearson correlation of SOC $\delta^{13}\text{C}$ with soil mineralizable carbon, microbial biomass carbon

	SMC	SMBC	SROC	$\delta^{13}\text{C}$
SMC	1			
SMBC	0.857 **	1		
SROC	0.840 **	0.717 **	1	
$\delta^{13}\text{C}$	-0.506 *	-0.389	-0.513 *	1

注:SMC:土壤可矿化碳;SMBC:土壤微生物量碳;SROC:土壤易氧化碳; $\delta^{13}\text{C}$:土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值;下同 Note: SMC: Soil mineralizable carbon; SMBC: Soil microbial biomass carbon; SROC: Soil readily oxidizable carbon; $\delta^{13}\text{C}$: Soil $\delta^{13}\text{C}$ value. The same below. * Correlation is significant at the 0.05 level; ** Correlation is significant at the 0.01 level

3 讨论

3.1 喀斯特森林植被自然恢复中 SOC $\delta^{13}\text{C}$ 值特征及其影响因素

本研究显示,总体上 0 ~ 20 cm 土层 SOC $\delta^{13}\text{C}$ 值随恢复进展趋负,反映出土壤生境日益改善。总体上随恢复群落优势种凋落叶 $\delta^{13}\text{C}$ 值趋负,这与植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值随森林群落逆向演替即石漠化的进程而增大^[15]的结论基本对应,进一步说明生境日益改善。SOC $\delta^{13}\text{C}$ 值从初始值(凋落叶 $\delta^{13}\text{C}$ 值)到土壤表层发生变化,通常显示有 1 ‰ ~ 2 ‰ 的快速升幅,然后在土壤内固有的碳同位素分馏过程又能使土壤剖面 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变幅在 1 ‰ ~ 3 ‰ 之间^[24-26]。本研究 SOC $\delta^{13}\text{C}$ 值由 C 至 D 分别为: -23.26‰ ~ -22.48‰ (C)、-20.13‰ ~ -19.91‰ (CG)、-24.03‰ ~ -23.41‰ (G)、-24.51‰ ~ -23.53‰

(GQ)、-24.42‰ ~ -18.13‰ (Q)、-25.72‰ ~ -19.20‰ (D),而群落优势种凋落叶 $\delta^{13}\text{C}$ 值由 C 至 D 则分别为: -26.97‰、-16.76‰、-29.32‰、-29.89‰、-31.79‰、-31.25‰,由此可知从凋落物到土壤表层 SOC $\delta^{13}\text{C}$ 值的增幅由 C 至 D 分别为: 3.71 ‰、3.37‰、5.29 ‰、5.38 ‰、7.37‰、5.53‰,升幅均大于 2‰,并且随群落恢复呈增大趋势,表明喀斯特区凋落物分解作用期间 SOC 同位素效应较常态地貌要强,其内在的原因是喀斯特区凋落物的分解作用较常态地貌要强。有机碳碳素的转化速率较高,土壤的有机养分总量少,植物对土壤有机养分的需求强烈。随恢复同位素效应呈增强趋势,反映出喀斯特区林地微生物活动较常态地貌要强烈,而且随群落恢复进展呈增强趋势,魏媛^[27]研究揭示出土壤细菌、真菌、放线菌三大微生物数量随喀斯特森林植被恢复进展而增加、且后期增幅大的结论对此作了较好的解释。Q、D 两阶段土壤内部的 SOC

$\delta^{13}\text{C}$ 值变幅大于 3‰, 表明 Q、D 两阶段 SOC 是 C_3 -C 和 C_4 -C 的混合物。其原因是植被在恢复的正演替或者退化的逆演替过程中相邻的某一个或多个时期出现过优势种为 C_4 植物的群落, 因此喀斯特森林植被自然恢复中 SOC $\delta^{13}\text{C}$ 值变化是由 C_3 -C 与 C_4 -C 共同贡献的结果。

林地 SOC $\delta^{13}\text{C}$ 值随土层加深趋正被认为是普遍现象^[1], 本研究也得出 C、G、Q、D 4 个阶段 SOC $\delta^{13}\text{C}$ 值随土层加深趋正, 与刘启明等^[8]、朴河春等^[4] 研究同一地区林地、涂成龙等^[9] 研究喀斯特黄色石灰土灌丛的结果一致, 也与多数常态地貌^[11] 研究结果一致, 但与部分喀斯特石灰土林地^[6]、喀斯特坡地^[7] SOC $\delta^{13}\text{C}$ 值随土层加深“先趋正后趋负”不一致, 也与部分黑色石灰土阔叶混交林^[9] SOC $\delta^{13}\text{C}$ 值随土层加深呈“之”型变化不一致, 而且本研究 CG、GQ 阶段 SOC $\delta^{13}\text{C}$ 值随土层加深也不趋正。这就表明喀斯特林地 SOC $\delta^{13}\text{C}$ 值随土层加深既具有普遍性规律, 也具有自身的特殊性。其可能的主要原因是喀斯特地区因其特殊的生态环境, 对其上发育的土壤、植被发生深刻的影响, 使土壤的理化性质(如土壤侵蚀、生化反应等)和植被的组成、结构、功能、演替途径等均有别于地带性土壤和植被, 其直接的原因可能是土壤侵蚀^[7]、植被在退化或恢复过程中出现了 C_4 植物群落。同时本研究各阶段 C_3 植物群落优势种凋落叶 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-31.79\text{‰} \sim -26.97\text{‰}$, 而从世界范围看 C_3 植物, 植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的范围在温带为 $-29.5\text{‰} \sim -26.2\text{‰}$ 、亚热带为 $-31.1\text{‰} \sim -30.5\text{‰}$ 、热带为 $-32.1\text{‰} \sim -31.8\text{‰}$ ^[28], 由此可得本研究区虽然处于亚热带地区, 但群落优势种凋落叶 $\delta^{13}\text{C}$ 值几乎涵盖了温带、亚热带和热带, 从而也反映出非地带性因素的强烈作用。因此喀斯特林地 SOC $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化是地带性因素和非地带性因素共同作用的结果。由此表明研究区植物为应对高度异质的生境(包括土壤)采取了相匹配的多样性的植物应对策略, 这为人工林恢复带来有益的启示, 即相应的生境采用相应的植物。

3.2 喀斯特森林植被自然恢复中 SOC $\delta^{13}\text{C}$ 值所揭示的土壤有机碳库特征

由 SOC $\delta^{13}\text{C}$ 值与其 SOC 含量的关系可得, 随恢复进展由微生物矿化导致的 SOC 周转速率变大、随土层加深则减小, 这与 SMC 矿化速率^[29] 一致, 进一步证实 SOC 库的质量随恢复进展提高、随土层加深则降低。SOC 周转速率变化还显示喀斯特森林土壤生化反应具有较强的表聚性, 加之喀斯特区土层

瘠薄, 因此在喀斯特森林植被自然恢复中更应该加强表土层的保护, 以促进喀斯特土壤生化反应良性发展。

本研究表明在喀斯特森林植被自然恢复中 SOC 在 CG、Q、D 三个阶段是具有明显的 C_3 -C 和 C_4 -C 的混合物, 其可能的原因是 C_4 植物较 C_3 植物更易于适合恶劣的生境^[30], 而这刚好适应了喀斯特恶劣的生态环境, 因此在喀斯特森林植被恢复或退化中的某些时期, 植物会以 C_4 策略来适应较恶劣的喀斯特环境。本研究显示喀斯特森林植被 0~20 cm 土层土壤有机碳主要为新碳, 而 >20 cm 土层土壤有机碳主要为老碳, 这就为喀斯特森林土壤的生化反应具有较强的表聚性作了较好的解释。之前研究^[31] 表明 0~20 cm 土层碳储量占整个土壤碳储量的 76.56% 以上, 说明新碳对土壤碳储量的贡献要远大于老碳。SOC $\delta^{13}\text{C}$ 值与 SMC、SROC 含量具有显著的负相关关系, 与 SMBC 具有一定的负相关关系, 总体上随植被自然恢复 SOC $\delta^{13}\text{C}$ 值趋负、随土层加深趋正, 表明 SMC、SROC、SMBC 含量总体上也随植被自然恢复增加、随土层加深减小, 这与之前的研究^[29,31-32] 结果基本一致, 也进一步表明土壤肥力、SOC 质量、土壤固碳能力随恢复而提高。综本研究所及结合之前研究^[29,31-32], 研究区随喀斯特森林植被自然恢复 SOC 库质量提高的机理是: 生态系统(尤其是植被系统)结构、功能的完善是前提或内因, 自然或人为干扰(有利或有害)是外因, 生物(包括植物、动物、微生物等)的恢复是关键的动力因素, 土壤微生物活性的增强是最直接的动力因素, 土壤 C_3 -C 和 C_4 -C 的共存是植物对生境适应策略在 SOC 库上的重要表现, SOC、SMC、SROC、SMBC、水溶性有机碳^[32] 等质与量的提高是过程, 其他土壤理化性质与生物学特性^[32] 的改善是协同演化因素。这就反映出在喀斯特区森林 SOC $\delta^{13}\text{C}$ 值在一定程度上可以指示 SOC 的活性, 但具体的指示程度、量化关系还有待继续深入。

3.3 喀斯特森林植被自然恢复生态学过程的特征

根据 SOC $\delta^{13}\text{C}$ 值可以重现植被演替的历史。基于以下几个方面可得喀斯特森林植被自然恢复演替系列图(见图 2): 本研究各恢复阶段 SOC $\delta^{13}\text{C}$ 值及其现有地上优势种凋落叶 $\delta^{13}\text{C}$ 值; 喻理飞等学者确定的演替系列^[12]; 同一研究区其他学者研究所得灌木林有 C_4 土壤特征、乔林下典型的 C_3 土壤特征^[4,9]; 同一研究区现有 C_4 植物群落的调查, 现有调查所得研究区有 C_4 草本群落(优势种为茅、芒、五

节芒等 C_4 植物)、 C_3 灌木 C_4 草本群落、 C_3 乔木 C_4 草本群落(乔木较稀疏、灌木极稀疏、芒、五节芒等 C_4 草本植物较多)。图 2 表明:总体上群落沿着由 C 至 D 方向进行正向演替,但在恢复早期(C、CG)中群落类型较多,GQ 至 Q 的过渡期也出现了一种特殊类型的群落即 C_3 乔木 C_4 草本群落,以至于在 C、CG、G 之间以及 GQ、Q 之间演替途径复杂多变,说明在恢复早期及恢复过渡阶段的生境变化剧烈、早期群落初始适生植物物种组成复杂多变、退化原因各不相同,从而使退化喀斯特森林植被自然恢复的生态学过程复杂多变; C_4 草本 C_3 灌木(乔木萌生)群落直接向乔木阶段演替、草本阶段可以直接向灌木阶段发展,但最终均向顶极群落发展,这大大地缩短了群落结构恢复的时间,其原因是人为干扰(如火烧、樵采、放牧等)下退化的喀斯特森林群落难以除尽原有的繁殖体^[12]。因此在喀斯特植被恢复中应加强原有繁殖体的维护,缩短群落结构恢复时间,

为群落的功能恢复提前做好准备;生境干旱、普遍存在着水分亏损是喀斯特地区最显著的特点,在演替中的 C、CG、Q 三阶段出现了 C_4 植物,而 C_4 植物更易于适合干旱缺水、恶劣的生境^[30],进一步表明喀斯特植被恢复中 C_4 植物具有重要的现实意义和广泛的应用前景,同时也表明“空间代替时间”方法在喀斯特区不能很好地揭示植被更替的历史。因此喀斯特区森林植被自然恢复是多途径的统一,在恢复的顺向发展下最终均会统一于顶极群落,这种多途径的统一也就决定了 SOC $\delta^{13}C$ 值的复杂性。图 2 主要是依据 SOC $\delta^{13}C$ 值,对前人演替研究成果^[12]进行了细化,较好地表现了退化喀斯特森林植被自然恢复中植被更替的历史,反映出生境复杂多变的喀斯特植被恢复演替研究中土壤稳定性碳同位素方法能弥补“空间代替时间”方法的不足,二者相结合能较好地表现植被自然恢复的生态学过程。

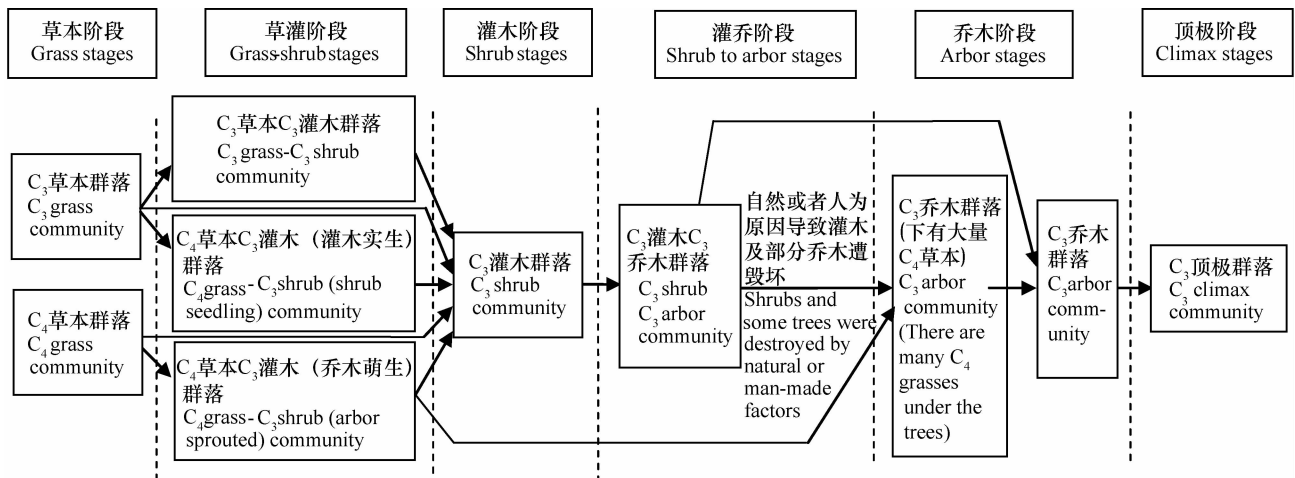


图 2 退化喀斯特森林植被自然恢复演替系列

Fig. 2 A chart of vegetation succession in natural restoration of degenerative forest in karst regions

4 结 论

土壤 0~20 cm 土层 SOC $\delta^{13}C$ 、群落优势种凋落叶 $\delta^{13}C$ 值随恢复进程趋负,生境日益改善。喀斯特森林植被自然恢复中 SOC 同位素效应较常态地貌要强,且随群落恢复呈增强趋势,SOC $\delta^{13}C$ 值变化是由 C_3-C 与 C_4-C 、地带性因素和非地带性因素共同作用的结果。SOC 周转速率随恢复进程变大、随土层加深减小,SOC 库的质量随恢复进展提高、随土层加深降低,土壤生化反应具有较强的表聚性而应该加强表土层的保护。土壤新老有机碳分界

明显,0~20 cm 土层主要为新碳、>20 cm 土层主要为老碳,新碳对土壤碳储量的贡献远大于老碳。SOC $\delta^{13}C$ 值与土壤活性有机碳具有较好的内在关系,可以指示土 SOC 的活性。退化喀斯特森林植被自然恢复的生态学过程复杂多变,其中 C_4 植物在恢复中意义重大、应加以推广应用。碳同位素方法与“空间代替时间”方法相结合,在喀斯特植被恢复研究中具有较好效果。

参 考 文 献

[1] 于贵瑞,王绍强,陈泮勤,等. 碳同位素技术在土壤碳循环研究中的应用. 地球科学进展, 2005, 20(5): 568—577. Yu G R, Wang S Q, Chen P Q, et al. Isotope tracer approaches in

- soil organic carbon cycle research (In Chinese). *Advances in Earth Science*, 2005, 20(5): 568—577
- [2] Ehleringer J R, Buchmann N, Flanagan L B. Carbon isotope ratios in belowground carbon cycle processes. *Ecological Applications*, 2000, 10(2): 412—422
- [3] 李龙波, 刘涛泽, 李晓东, 等. 贵州喀斯特地区典型土壤有机碳垂直分布特征及其同位素组成. *生态学杂志*, 2012, 31(2): 241—247. Li L B, Liu T Z, Li X D, et al. Vertical distribution patterns of organic carbon and its isotopic composition in typical soil types in Guizhou karst areas of Southwest China (In Chinese). *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(2): 241—247
- [4] 朴河春, 刘启明, 余登利, 等. 用天然 $\delta^{13}\text{C}$ 丰度法去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. *生态学报*, 2001, 21(3): 433—439. Piao H C, Liu Q M, Yu D L, et al. Origins of soil organic carbon with the method of natural $\delta^{13}\text{C}$ abundance in maize fields (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(3): 433—439
- [5] 朴河春, 朱建明, 余登利, 等. 贵州山区土壤微生物生物量的碳同位素组成与有机碳同位素效应. *第四纪研究*, 2003, 23(5): 546—556. Piao H C, Zhu J M, Yu D L, et al. Carbon isotope composition in soil microbial biomass and organic carbon isotope effect (In Chinese). *Quaternary Sciences*, 2003, 23(5): 546—556
- [6] 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
- [7] 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 $\delta^{13}\text{C}$ 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
- [8] 刘启明, 朴河春, 郭景恒, 等. 应用 $\delta^{13}\text{C}$ 值探讨土壤中有有机碳的迁移规律. *地质地球化学*, 2001, 29(1): 32—35. Liu Q M, Piao H C, Guo J H, et al. Investigation into the rules of transport of soil organic carbon by using $\delta^{13}\text{C}$ values (In Chinese). *Geology-Geochemistry*, 2001, 29(1): 32—35
- [9] 涂成龙, 刘丛强, 武永锋, 等. 应用 $\delta^{13}\text{C}$ 值探讨林地土壤有机碳的分异. *北京林业大学学报*, 2008, 30(5): 1—6. Tu C L, Liu C Q, Wu Y F, et al. Discussing variance of forest soil organic carbon by analysis of $\delta^{13}\text{C}$ (In Chinese). *Journal of Beijing Forestry University*, 2008, 30(5): 1—6
- [10] 周政贤. 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
- [11] 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 Sinica*, 2000, 36(6): 12—19
- [12] 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, 86. 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, 86
- [13] 安明志. 茂兰喀斯特植被恢复过程的群落结构与健康评价. 贵阳: 贵州大学林学院, 2008. An M T. Community structure and forest health assessment in natural restoration of Maolan degraded karst vegetation (In Chinese). Guiyang: Forest College, Guizhou University, 2008
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 1999. Bao S D. Soil agricultural chemistry analysis (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 1999
- [15] 容丽, 王世杰, 杜雪莲, 等. 喀斯特峡谷石漠化区 6 种常见植物叶片解剖结构与 $\delta^{13}\text{C}$ 值的相关性. *林业科学*, 2008, 44(10): 29—34. Rong L, Wang S J, Du X L, et al. The relationship of the six common plant anatomical structure of leaves and the $\delta^{13}\text{C}$ value in Karst gorge stone desertification area (In Chinese). *Scientia Silvae Sinica*, 2008, 44(10): 29—34
- [16] 方华军, 杨学明, 张晓平, 等. 坡耕地黑土剖面有机碳的分布和 $\delta^{13}\text{C}$ 值研究. *土壤学报*, 2005, 42(6): 957—964. Fang H J, Yang X M, Zhang X P, et al. Profile distribution of organic carbon and $\delta^{13}\text{C}$ in a black soil at a sloping field (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(6): 957—964
- [17] 中国科学院南京土壤研究所微生物室. 土壤微生物研究法. 北京: 科学出版社, 1985. Department of Microorganism, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Research methods for soil microorganism (In Chinese). Beijing: Science Press, 1985
- [18] Núñez S, Martínez-Yrizar A, Búrquez A, et al. Carbon mineralization in the southern Sonoran Desert. *Acta Oecologica*, 2001, 22(5/6): 269—276
- [19] 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
- [20] 殷立娟, 李美荣. 中国 C_4 植物的地理分布与生态学研究 I. 中国 C_4 植物及其与气候环境的关系. *生态学报*, 1997, 17(4): 350—363. Yin L J, Li M R. A study on the geographic distribution and ecology of C_4 plants in China I. C_4 plants in China and their relation with regional climatic condition (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 17(4): 350—363
- [21] Schuster W S F, Sandquist D R, Phillips S L, et al. Comparisons of carbon isotope discrimination in populations of arid land plant species differing in lifespan. *Oecologia*, 1992, 91: 332—337
- [22] Ehleringer J R. Gas-exchange implications of isotopic variation in arid-land plants // Smith J A C, Griffiths H. *Water deficits: Plant responses from cell to community*. Oxford: Bios Scientific Publishers, 1993: 265—284

- [23] 沈宏, 曹志洪, 胡正义. 土壤活性有机碳的表征及其生态效应. 生态学杂志, 1999, 18(3): 32—38. Shen H, Cao Z H, Hu Z Y. Characteristics and ecological effects of the active organic carbon in soil (In Chinese). Chinese Journal of Ecology, 1999, 18(3): 32—38
- [24] Boutton T W, Archer S R, Midwood A J, et al. $\delta^{13}\text{C}$ values of soil organic carbon and their use in documenting vegetation change in a subtropical savanna ecosystem. Geoderma, 1998, 82: 5—41
- [25] Farquhar G D, Ehleringer J R, Hubick K Y. Carbon isotope discrimination and photosynthesis. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1989, 40: 503—637
- [26] Buchmann N, Kao W Y, Ehleringer J. Influence of stand structure on carbon-13 of vegetation, soils, and canopy air within deciduous and evergreen forests in Utah, United States. Oecologia, 1997, 110: 109—119
- [27] 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 Resources and Environment, Nanjing Forestry University, 2008
- [28] 渠春梅, 韩兴国, 苏波, 等. 云南西双版纳片断化热带雨林植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的特点及其对水分利用效率的指示. 植物学报, 2001, 43(2): 186—192. Qu C M, Han X G, Su B, et al. The characteristics of foliar $\delta^{13}\text{C}$ values of plants and plant water use efficiency indicated by $\delta^{13}\text{C}$ values in two fragmented rainforests in Xishuangbanna, Yunnan (In Chinese). Acta Botanica Sinica, 2001, 43(2): 186—192
- [29] 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. 应用生态学报, 2012, 23(8): 2165—2170. Huang Z S, Yu L F, Fu Y H. Characteristics of soil mineralizable carbon pool in natural restoration process of karst forest vegetation (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(8): 2165—2170
- [30] 殷丽娟, 王萍. 中国东北草原植物中的 C_3 和 C_4 光合作途径. 生态学报, 1997, 17(2): 113—123. Yin L J, Wang P. Distribution of C_3 and C_4 photosynthetic pathways of plants on the steppe of Northeast China (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 1997, 17(2): 113—123
- [31] 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. 土壤学报, 2013, 50(2): 306—314. Huang Z H, Fu Y H, Yu L F. Characteristic evolution of soil organic carbon pool with the process of natural restoration of karst forest vegetation (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(2): 306—314
- [32] 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. 应用生态学报, 2012, 23(10): 2715—2720. Huang Z H, Fu Y H, Yu L F. Characteristics of soil microbial biomass carbon and soil water soluble organic carbon in the process of natural restoration of karst forest (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(10): 2715—2720

CHARACTERISTICS OF $\delta^{13}\text{C}$ VALUE OF SOIL ORGANIC CARBON UNDER NATURALLY RESTORING DEGENERATIVE KARST FOREST

Huang Zongsheng^{1,2} Yu Lifei^{1†} Fu Yuhong^{1,3} Yang Rui¹

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

(2 City Plan and Architecture College of Guizhou University, Guiyang 550025, China)

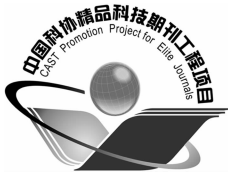
(3 School of Chemistry and Life Science, Guizhou Normal College, Guiyang 550018, China)

Abstract To explore characteristics of $\delta^{13}\text{C}$ value of soil organic carbon (SOC $\delta^{13}\text{C}$) under naturally restoring degenerative forest in the karst region of Maolan, the technique of stable carbon isotopes coupled with the concept of space substituting time was adopted. Results show that as a whole, SOC $\delta^{13}\text{C}$ in the 0 ~ 20 cm soil layer (- 25.72‰ ~ - 19.91‰) increased along with the restoration in process, turning gradually towards positive, but SOC $\delta^{13}\text{C}$ in soil layers > 20 cm (- 23.76‰ ~ - 18.13‰) in depth turned towards positive at early stages and then backwards at later stages; SOC $\delta^{13}\text{C}$ turned towards positive increased with soil depth at all stages except at the grass-shrub and shrub-arbor stages; SOC in the upper soil layer at the grass-stage and in the lower soil layer at the arbor and climax stages was dominated with C_4 ; SOC $\delta^{13}\text{C}$ were jointly affected by zonality and karst environment; $\delta^{13}\text{C}$ in litters of dominant species (- 31.79‰ ~ - 16.76‰) turned towards negative along with the restoring process, indicating that the habitat was improving, and besides, it was significantly and positively related to SOC $\delta^{13}\text{C}$ in the 0 ~ 20 cm soil layer ($R^2 > 0.96, p < 0.01$), but negatively to that in the soil layers > 20 cm in depth, indicating that the carbon in the upper layer was new; the turn-over rate of SOC increased with the restoring process, but decreased with soil depth; soil biochemical reaction occurred mainly on

the surface of the soil; SOC $\delta^{13}\text{C}$ exhibited significant negative relationships with contents of mineralizable carbon and readily oxidizable carbon ($R^2 > -0.50$, $p < 0.05$), and certain negative relationship with microbial biomass carbon ($R^2 = -0.389$), indicating that SOC $\delta^{13}\text{C}$ can, to a certain extent, be used as indicator of SOC activity; natural restoration of karst forest vegetation was a complicated and variable integration of multi ways, among which C_4 plants played a role of important significance in process of natural restoration. The stable carbon isotope technique coupled with the concept of “space substituting time” can be used to rehearse the history of vegetation succession in karst regions.

Key words Soil organic carbon $\delta^{13}\text{C}$ value; Litter leaves $\delta^{13}\text{C}$; Active soil organic carbon; Natural restoration; Degenerated karst forest vegetation

(责任编辑:汪枫生)



土壤学报

(Turang Xuebao)



第 52 卷 第 2 期 2015 年 3 月

目 次

综述与评论

- 理论施氮量的改进及验证——兼论确定作物氮肥推荐量的方法 巨晓棠(249)
- 森林土壤氧化亚氮排放对大气氮沉降增加的响应研究进展 方华军 程淑兰 于贵瑞等(262)

研究论文

- 商丹盆地黄土母质发育土壤的微形态特征及其诊断意义 庞奖励 黄春长 查小春等(272)
- 基于土壤氮素平衡的氮肥推荐方法——以水稻为例 宁运旺 张永春(281)
- 三峡库区紫色土的碎石分布特征 王小燕 王天魏 蔡崇法等(293)
- 黄土区坡耕地土壤结皮对入渗的影响 吴秋菊 吴 佳 王林华等(303)
- 基于局部加权回归的土壤全氮含量可见-近红外光谱反演 陈颂超 冯来磊 李 硕等(312)
- 五价砷在中国南方两类典型土壤中的迁移特征 李璐璐 张 华 周世伟等(321)
- 柠檬酸盐对黑云母表面溶解及微结构变化的影响 李继福 张文君 鲁剑巍等(329)
- 活化过硫酸钠氧化土壤对挥发性有机污染物吸附特性的影响 丁浩然 王 磊 龙 涛等(336)
- 退化喀斯特森林植被自然恢复中土壤有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 值特征 黄宗胜 喻理飞 符裕红等(345)
- 缓释复合肥对茄子产量和不同采果期品质的影响 王 菲 李银科 王正银等(355)
- 氮肥和秸秆施用对稻麦轮作体系下土壤剖面 N_2O 时空分布的影响 潘晓健 刘平丽 李 露等(364)
- 应用 ^{15}N 示踪法研究咸水滴灌棉田氮肥去向 张 文 周广威 闵 伟等(372)
- 中国南方基础工程建设中土壤生态修复技术体系与实践 徐国钢 程 睿 赖庆旺等(381)
- 黑土农田施加 AM 菌剂对大豆根际菌群结构的影响 宋福强 程 蛟 常 伟等(390)
- 自生固氮菌对土壤钾的活化作用 张 亮 袁 玲 黄建国(399)
- 长期保护性耕作对纤维素降解基因 *cbh 1* 多样性的影响 陈 坤 李传海 朱安宁等(406)
- 模拟条件下土壤硝化作用及硝化微生物对不同水分梯度的响应 刘若萱 张丽梅 白 刃等(415)
- 水力侵蚀影响下土壤有机碳和微生物数量动态变化特征 喻 为 李忠武 黄金权等(423)

研究简报

- 土壤制图中土壤类型配色模型构建与应用 徐爱国 张维理 张怀志等(431)
- 土壤专题图中采样点点位标识模型的构建 张怀志 张维理 徐爱国等(440)
- 非对称混合电解质体系中恒电荷颗粒表面与 Stern 电位的测定 樊会敏 赵 艳 刘新敏等(446)
- 植被重建下露天煤矿排土场边坡土壤碳储量变化 李俊超 党廷辉 薛 江等(453)
- 滨海盐渍化土壤理化性质与小麦生产间的关系 谢文军 张衍鹏 张 森等(461)

信息

- 第 20 届国际土壤与耕作研究组织大会 (414)
- 《土壤学报》2014 年度审稿专家名录 (467)

封面图片: 陕西丹凤盆地土壤黏化层典型微形态(由庞奖励提供)

CONTENTS

Reviews and Comments

- Improvement and validation of theoretical N rate (TNR)—Discussing the methods for N fertilizer recommendation Ju Xiaotang(261)
- Study on the responses of nitrous oxide emission to increased nitrogen deposition in forest soils; A review Fang Huajun, Cheng Shulan, Yu Guirui, et al. (270)

Research Articles

- Micromorphological features of soils derived from loess in Shangdan Basin and their significance in soil diagnosis Pang Jiangli, Huang Chunchang, Zha Xiaochun, et al. (279)
- Soil nitrogen balance based recommendation of nitrogen fertilization; A case study of rice ... Ning Yunwang, Zhang Yongchun(292)
- Spatial distribution of rock fragments in purple soil in Three Gorges Reservoir Area Wang Xiaoyan, Wang Tianwei, Cai Chongfa, et al. (301)
- Effects of soil crusts on infiltration in slope land in the Loess Area Wu Qiuju, Wu Jia, Wang Linhua, et al. (311)
- Vis-NIR spectral inversion for prediction of soil total nitrogen content in laboratory based on locally weighted regression Chen Songchao, Feng Lailei, Li Shuo, et al. (319)
- Migration of pentavalent antimony in two types of soils typical to South China Li Lulu, Zhang Hua, Zhou Shiwei, et al. (327)
- Effects of citrate dissolving surface and altering microstructure of biotite Li Jifu, Zhang Wenjun, Lu Jianwei, et al. (335)
- Effect of soil oxidation with reactivated sodium persulfate on sorption of volatile organic contaminants Ding Haoran, Wang Lei, Long Tao, et al. (343)
- Characteristics of $\delta^{13}\text{C}$ value of soil organic carbon under naturally restoring degenerative karst forest Huang Zongsheng, Yu Lifei, Fu Yuhong, et al. (353)
- Effects of slow-release compound fertilizer on yield and quality of eggplant relative to timing of harvest Wang Fei, Li Yinke, Wang Zhengyin, et al. (362)
- Spatial and temporal distributions of soil profile N_2O as affected by N fertilization and straw incorporation in the rice-wheat rotation system Pan Xiaojian, Liu Pingli, Li Lu, et al. (371)
- Fate of fertilizer N in saline water drip-irrigated cotton field using ^{15}N tracing method Zhang Wen, Zhou Guangwei, Min Wei, et al. (379)
- Soil ecology remediation technical system and its practice in infrastructure construction in South China Xu Guogang, Cheng Rui, Lai Qingwang, et al. (389)
- Impact of inoculation with AM fungi on microbial community structure in soybean rhizosphere in farmland of black soil Song Fuqiang, Cheng Jiao, Chang Wei, et al. (397)
- Mobilization of potassium in soils by *Azotobacter* Zhang Liang, Yuan Ling, Huang Jianguo(404)
- Effects of long-term conservation tillage on diversity of cellulose degradating gene *cbh I* in Fluvo-aquic soil Chen Kun, Li Chuanhai, Zhu Anning, et al. (413)
- Response of nitrification and nitrifier to change in soil moisture content under simulated conditions Liu Ruoxuan, Zhang Limei, Bai Ren, et al. (421)
- Dynamics of soil microbial population and organic carbon under water erosion Yu Wei, Li Zhongwu, Huang Jinquan, et al. (430)

Research Notes

- Construction of a color matching model for soil types and its application to soil mapping Xu Aiguo, Zhang Weili, Zhang Huaizhi, et al. (439)
- Development of soil sampling point labeling model for the matic soil maps Zhang Huaizhi, Zhang Weili, Xu Aiguo, et al. (445)
- Principle for determination of surface potential and Stern plane potential of constant charged particles in asymmetric mixed electrolyte solutions Fan Huimin, Zhao Yan, Liu Xinmin, et al. (452)
- Variability of soil organic carbon storage in dump slope of opencast coal mine under revegetation Li Junchao, Dang Tinghui, Xue Jiang, et al. (460)
- Relationships between soil physicochemical properties and wheat production in coastal saline soil Xie Wenjun, Zhang Yanpeng, Zhang Miao, et al. (466)

Cover Picture: Typical micromorphological photos in Horizon Bt of the soil profile in Danfeng Basin, Shaanxi Province, China (by Pang Jiangli)