

# 西南喀斯特地区典型土壤碳通量原位监测的研究

胡乐宁<sup>1,2,3</sup>, 苏以荣<sup>1,2</sup>, 何寻阳<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 亚热带农业生态研究所 亚热带农业生态过程重点实验室, 湖南 长沙 410125;  
2. 中国科学院 环江喀斯特农业生态试验站, 广西 环江 547100; 3. 广西师范大学 环境与资源学院, 广西 桂林 541004)

**摘要:** 为了研究西南喀斯特地区典型土壤碳通量特征, 以不同植被类型和不同土石界面为研究对象, 原位测定 3 种土壤(红壤、棕色石灰土和黑色石灰土)2 个界面(土面、土石面)的乔木林地和灌丛的土壤碳通量, 并用土壤碳通量的日变化和季变化指示土壤有机碳转化过程。结果表明, 在雨季各土壤碳通量均高于旱季。棕色石灰土在 2 种植被类型条件下均没有红壤土壤碳通量稳定, 受湿度影响大于红壤。黑色石灰土中, 灌丛的土石面土壤碳通量与土面差异小于乔木林地, 乔木林地中土面土壤碳通量显著大于土石面, 土面在 7 月出现最高值( $3.0 \mu\text{mol m}^2/\text{s}$ ), 土石面在 6 月出现最高值( $1.5 \mu\text{mol m}^2/\text{s}$ ); 灌丛土面土壤碳通量最高值出现在 7 月( $3.0 \mu\text{mol m}^2/\text{s}$ ), 土石面 6 月出现最高值( $1.9 \mu\text{mol m}^2/\text{s}$ )。喀斯特地区土壤碳通量的变化因土壤类型不同而存在差异, 土面和土石面的喀斯特土壤碳通量差异受气候、季节和植被的影响较大。

**关键词:** 喀斯特地区; 土壤碳通量; 原位监测; 不同植被类型

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)03-0109-05

中图分类号: S153.6

## In Situ Monitoring of Soil Carbon Fluxes for Different Typical Soils in Karst Region of Southwest China

HU Le-ning<sup>1,2,3</sup>, SU Yi-rong<sup>1,2</sup>, HE Xun-yang<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha, Hunan 410125, China;  
2. Huanjiang Observation and Research Station for Karst Eco-systems, Huanjiang, Guangxi 547100, China;  
3. Department of Resources and Environmental Science, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi 541004, China)

**Abstract:** Two karst soils(terra fusca and rendzina) and a contrast soil(red soil) were selected to study soil carbon fluxes in typical karst soils. The daily and seasonal soil carbon fluxes on different interfaces(soil surface and soil stone surface) were tested to indicate the transformation of soil organic carbon. Results shows that soil carbon flux in rainy season was higher than that in dry season. Soil carbon flux in red soil was steadier than that in terra fusca of both shrub land and forest land. Soil carbon flux in terra fusca was more sensitive to temperature and humidity than that in red soil. Soil carbon fluxes in rendzina of shrub land (soil surface and soil stone surface) were less than that of forest land. Soil carbon flux in rendzina of forest land was higher than that of the shrub land. The maximum values of soil carbon flux on soil surface occurred in July ( $3.0 \mu\text{mol m}^2/\text{s}$ ) in both the shrub land and forest land, while on soil stone surface, in June ( $1.5 \mu\text{mol m}^2/\text{s}$ ). In shrub land, the maximum value of soil carbon flux on soil stone surface occurred in June ( $1.9 \mu\text{mol m}^2/\text{s}$ ). This implied that soil carbon flux differed in soil types in karst area. Climate, season and vegetation were the most important factors which influence soil carbon flux in karst area. Soil carbon fluxes of soil surface and soil stone surface were greatly impacted by them.

**Keywords:** karst region; soil carbon flux; in situ monitoring; different vegetation types

土壤碳通量是土壤碳库的主要输出途径和大气  $\text{CO}_2$  的重要来源<sup>[1]</sup>, 占整个生态系统呼吸量的 2/3 以上, 是森林生态系统碳循环的重要组成部分<sup>[2]</sup>, 因而在整个森林生态系统碳平衡估算中具有重要意义。

收稿日期: 2012-10-13

修回日期: 2012-12-01

资助项目: 中国科学院战略性先导科技专项“喀斯特峰丛洼地型(人工种草替代型草食畜牧业)模式增值增汇试验示范”(XDA05070403); 中国科学院西部行动计划项目“喀斯特生态系统物质循环过程及其调控机制”(KZCX2-XB3-10); 国家科技支撑计划项目“喀斯特石漠化中低产土壤改良技术集成示范”(2012BAD05B03-6); 广西自然科学基金项目“碳酸钙对广西不同 pH 值喀斯特典型土壤有机碳矿化的影响”(2013GXNSFBA019080)

作者简介: 胡乐宁(1980—), 女(汉族), 河北省保定市人, 博士, 研究方向为土壤环境生态。E-mail: hulening@126.com。

土壤碳通量作为一个复杂的生物学过程,受到诸多因素的影响,其中土壤温度和湿度是影响其变化的最重要因素<sup>[3-4]</sup>。土壤碳通量是一个动态的变化过程,也受到植被种类的影响<sup>[5]</sup>。土壤碳通量的微小变化将对整个大气碳循环和热量平衡产生重要的影响<sup>[6]</sup>。对喀斯特土壤碳通量的研究较少<sup>[7]</sup>,针对喀斯特山石较多的特性,进行不同界面土壤碳通量的研究更为少见<sup>[8]</sup>。

本文选取广西壮族自治区环江毛南族自治县肯福、木论及明伦乡的红壤、棕色石灰土和黑色石灰土 3 种土壤类型,分不同植被类型(灌丛,乔木林地)的不同界面(土面、土石混合面)开展土壤表层碳通量原位监测,对喀斯特不同植被类型土壤碳通量的差异及影响因素进行研究。本文重点探讨了红壤、棕色石灰土和黑色石灰土碳通量的日、季变化及其影响因素,以期

为提高喀斯特生态系统碳贮量及碳循环的调控与管理提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于云贵高原南部边缘斜坡地带的典型喀斯特峰丛洼地——广西环江毛南族自治县,地理坐标为 107°51′—108°43′E,24°44′—25°33′N,属亚热带季风气候区。岩溶峰丛洼地的最高峰为 1 028.0 m,年平均气温 15.7℃,1 月平均气温 10.1℃,7 月平均气温 28℃,历年最低气温 -5.2℃,无霜期 290 d,年平均日照时数 1 451 h,年平均降雨量为 1 389.1 mm,集中于 4—9 月(占全年降雨量的 70%),平均蒸发量为 1 571.1 mm,相对湿度平均为 70%。供试土壤的自然概况及理化性质如表 1—2 所示。

表 1 供试土壤自然概况

编号	土壤类型	母质	来源	植被类型	海拔/m	地理位置
1	红壤	第四纪红土	环江,肯福	灌丛,乔木林地	220	24°51′914″N,108°15′991″E
2	棕色石灰土	白云岩和石灰岩	环江,木论	灌丛,乔木林地	442	25°09′876″N,108°03′047″E
3	黑色石灰土	白云岩和石灰岩	环江,明伦	灌丛,乔木林地	727	25°16′253″N,108°22′522″E

表 2 培养试验土壤基本理化性质

土壤类型	pH 值	CEC/ (mmol·kg <sup>-1</sup> )	有机碳/ (g·kg <sup>-1</sup> )	土壤碳酸钙/ (g·kg <sup>-1</sup> )	MBC/(mg·kg <sup>-1</sup> )
红壤	4.21	75.3	7.08	(未检出)	107
棕色石灰土	5.76	131.1	16.33	3.37	269
黑色石灰土	7.33	328.8	66.67	20.65	2.45×10 <sup>3</sup>

注:MBC 为微生物生物量碳。

### 1.2 土壤碳通量的原位监测

在肯福、木论、明伦乡使用美国 Li-COR 公司生产的 Li-8100 仪对样地土壤碳通量进行监测和数据的采集。分别在 2 种不同植被类型下(灌丛、乔木林地)对 3 种土壤类型的土壤碳通量进行监测,每种土壤(红壤、棕色石灰土、黑色石灰土)情况设 3 个重复,在 2 种界面下(土面、土石面)监测旱季和雨季土壤碳通量变化,共 2×3×3×2=36 个样品。每次监测时分别对样地内 2 种植被覆盖条件的变化进行观察记录。监测前严格按照操作规程对土壤隔离圈埋放和圈内植被剪切。样地监测点已做断根、去除凋落物处理,并在试验中忽略土壤动物的干扰。

1.2.1 土壤碳通量季节变化 在 2010 年 3—7 月,每月对 2 个植被覆盖条件的 3 个土壤类型分别监测 1 次土壤碳通量,选择晴天时的上午 9:00 到 11 点时间段,每个样圈每次测定 2 次。

1.2.2 土壤碳通量日变化 在旱季和雨季各选取 1

个月(3,7 月),选择晴天时连续监测 12 h,从早上 7:00 到下午 7:00 每 2 h 测 1 轮样圈,共循环 6 次,每个样圈每次测定 2 次。

土壤微生物生物量碳的测定采用熏蒸提取<sup>[9]</sup>—TOC 自动分析仪(Phoenix 8000),其余指标(土壤有机碳,土壤碳酸钙,CEC,pH 值,Ca,Fe,Mn 矿质全量等)采用常规方法测定<sup>[10]</sup>。

### 1.3 数据分析

本试验研究采用 Excel 2003 对数据进行整理,采用 SPSS 16.0 统计软件对数据进行统计分析。处理间的比较用单因素和双因素 2 种方差分析方法,多重比较用 Duncan 法(显著性水平设为 0.05)。

## 2 结果与讨论

### 2.1 旱季和雨季的土壤碳通量

在旱季 3 种土壤碳通量日变化测定结果中(图 1),红壤乔木林地的土壤碳通量比灌丛稳定,乔木林

地条件下土面 > 土石面 ( $p < 0.05$ ); 灌丛条件下土面类似于土石面, 在 9:30 和 15:30 这 2 个时刻, 土石面土壤碳通量波动较大。2 种植被条件下, 只有土石面出现灌丛土壤碳通量大于乔木林地 ( $p < 0.05$ ), 其他界面无显著差异。棕色石灰土土面和土石界面土壤碳通量均为乔木林地 ( $1.0 \mu\text{mol m}^2/\text{s}$ ) > 灌丛

( $0.6 \mu\text{mol m}^2/\text{s}$ ), 在中午 11:30 至下午 15:30 之间, 土壤碳通量逐渐增加, 15:30 之后又呈逐渐减少趋势。黑色石灰土土面土壤碳通量在灌丛覆盖下在 11:30 达到最高 ( $1.5 \mu\text{mol m}^2/\text{s}$ ), 乔木林覆盖下在 15:30 达到最高 ( $1.2 \mu\text{mol m}^2/\text{s}$ )。黑色石灰土灌丛的土壤碳通量土面和土石面无显著差异。

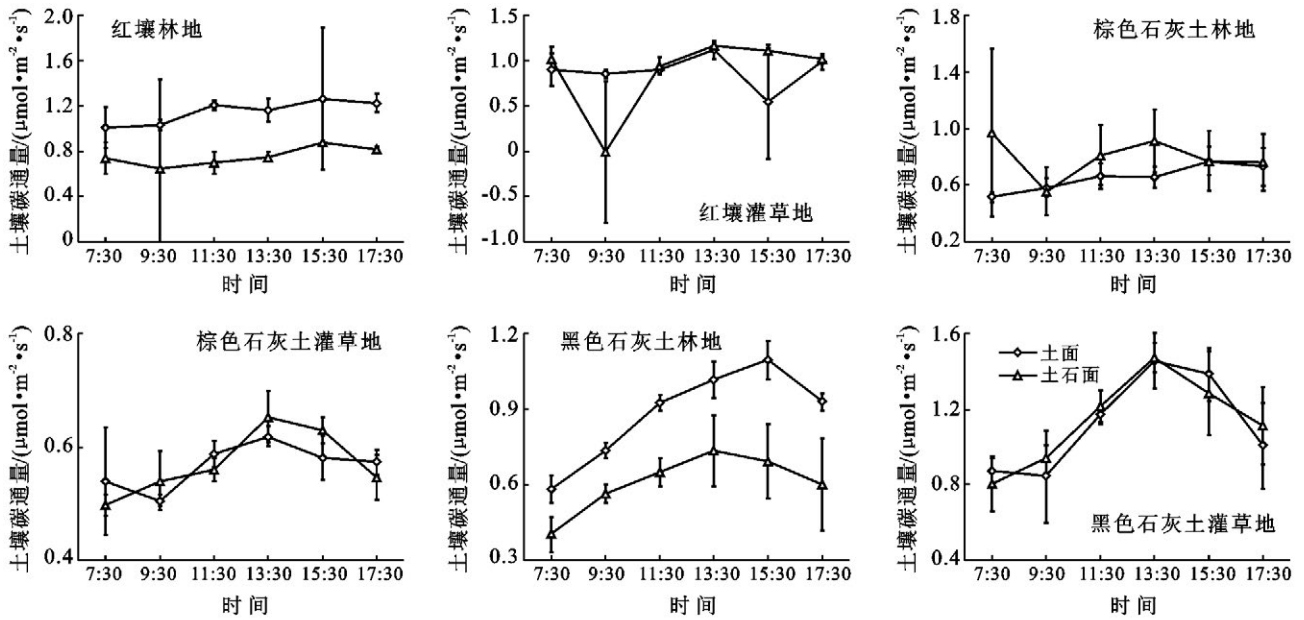


图 1 3 种土壤不同界面旱季土壤碳通量日变化

在雨季 3 种土壤碳通量日变化测定结果中 (图 2), 红壤乔木林地与旱季不同, 土壤碳通量大小为土石面 > 土面 ( $p < 0.05$ ), 灌丛土壤碳通量为土面 > 土石面 ( $p < 0.05$ ), 乔木林地在下午发生土壤碳通量先降低后升高的现象, 而灌丛发生土壤碳通量先升高后降低的现象。棕色石灰土在 2 种植被类型条件下均没有红壤土壤碳通量稳定, 受湿度影响大于红壤。三界界面土壤碳通量与红壤相反, 在乔木林地为土面 > 土石面 ( $p < 0.05$ ), 在灌丛为土石面 > 土面 ( $p < 0.05$ )。乔木林地土面的土壤碳通量最高值为  $2.0 \mu\text{mol m}^2/\text{s}$ , 大于灌丛土面的最高值  $1.0 \mu\text{mol m}^2/\text{s}$ 。黑色石灰土乔木林地日变化均有随时间延续先降低后升高的趋势, 灌丛则是随时间延续逐渐升高的趋势。3 种土壤中的土壤碳通量均高于其在旱季时的碳通量值。

土壤碳通量日变化中, 最高值出现在 13:30—15:30, 这与每天最高温出现的时间相符。唐燕飞<sup>[11]</sup>认为土壤碳通量受土壤温度的影响较大, 与地表下 5—15 cm 处土壤温度变化显著相关。在雨季, 土壤碳通量均高于旱季测定值, 这与土壤温度和水分的增加密切相关<sup>[12]</sup>。Rustad 等<sup>[13]</sup>利用元分析方法 (meta-analysis) 探讨了 32 个站点土壤碳通量对生态系统增温的响应, 研究表明, 相对于森林生态系统, 草地生态系统的土壤碳通量对试验增温的响应要小。在美国一个

高草草原, 连续 6 a (2000—2005 年) 的控制性增温试验结果表明, 增温第 1 a 土壤碳通量下降了约 5%<sup>[14]</sup>; 增温第 2, 3 a 土壤碳通量分别增加了约 15.6% 和 8.0%<sup>[14]</sup>, 而前 3 a 的增温效果只有第 2 a 的达到了显著性水平<sup>[15]</sup>; 增温第 4 a 土壤碳通量增加了约 9.9%<sup>[16]</sup>; 增温第 5, 6 a 土壤碳通量分别增加了约 7.6% 和 8.4%<sup>[17]</sup>。

红壤乔木林地与灌丛的土壤碳通量相似, 棕色石灰土乔木林地的土壤碳通量大于灌丛的土壤碳通量 (图 1)。这是因为相对于草原和荒漠环境, 森林土壤持水力较高, 并且在高大冠幅影响下林下温度较低, 因而共同造成了土壤碳通量未受到干旱的抑制。雨季中红壤、棕色石灰土和黑色石灰土林地的土壤碳通量大于灌丛, 这与乔木根系的呼吸作用和保水能力有关<sup>[18]</sup>。降水和温度的交互作用对土壤碳通量的影响机理为<sup>[9]</sup>: (1) 降水可以增加土壤含水量, 促进土壤碳通量, 增温则导致土壤含水量降低, 减少土壤碳通量; (2) 降水引起土壤温度下降, 减少土壤碳通量, 增温则使得土壤温度升高, 促进土壤碳通量; (3) 降水增多和增温引起的土壤温湿度的变化会对植被和土壤微生物活动造成影响, 进而导致土壤碳通量的变化。研究表明, 土壤水热因子交互影响森林生态系统的土壤碳通量过程, 土壤气候变化下的温度和湿度可以共同解释土壤碳通量变化的 67.5%—90.6%<sup>[19]</sup>。

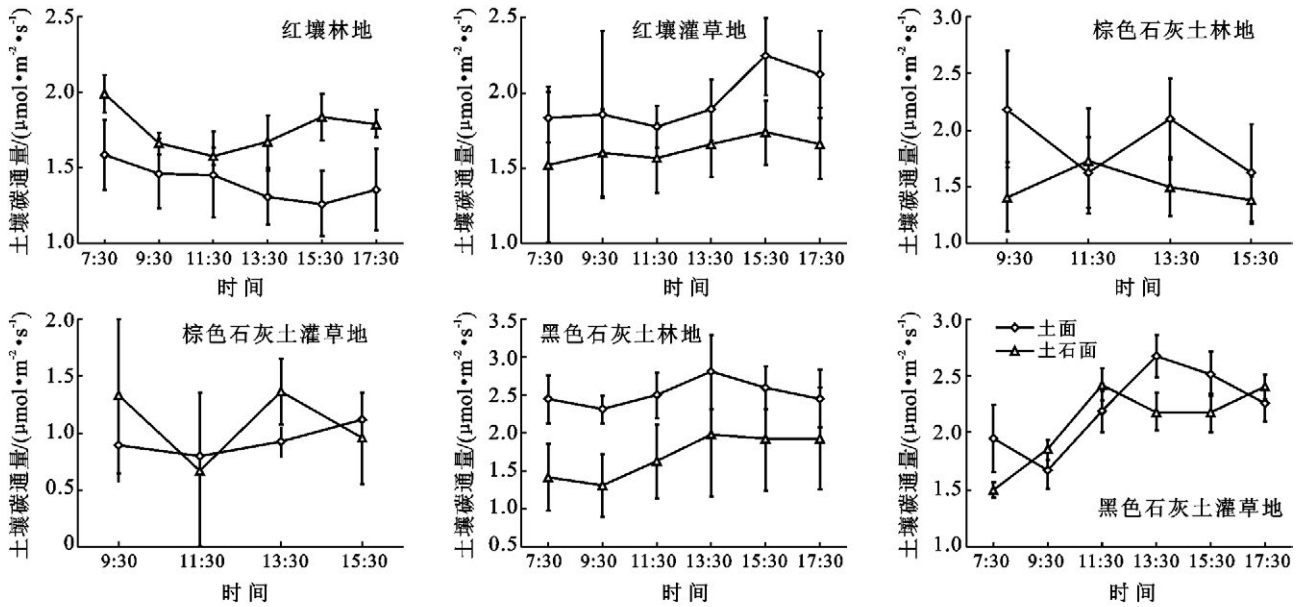


图 2 3 种土壤不同界面雨季土壤碳通量日变化

2.2 不同界面土壤碳通量季节变化

在 3 种土壤碳通量季变化测定中,土壤碳通量测定值从 3—7 月分别有所不同(图 3),均呈逐渐上升趋势。3 月土壤碳通量最低,7 月最高。红壤中土壤碳通量均为土面与土石面无显著差异,最高值出现在 7 月,且为:灌丛 ( $2.5 \mu\text{mol m}^2/\text{s}$ ) > 乔木林地

( $2.0 \mu\text{mol m}^2/\text{s}$ ) ( $p < 0.05$ )。棕色石灰土土面的土壤碳通量 5 月变化异常,乔木林地出现突然升高的现象,灌丛出现突然降低的相反现象。3 月红壤土石面土壤碳通量小于土面土壤碳通量,经过缓慢升高到 7 月时,土石面土壤碳通量与土面土壤碳通量无显著差异 ( $p < 0.05$ )。

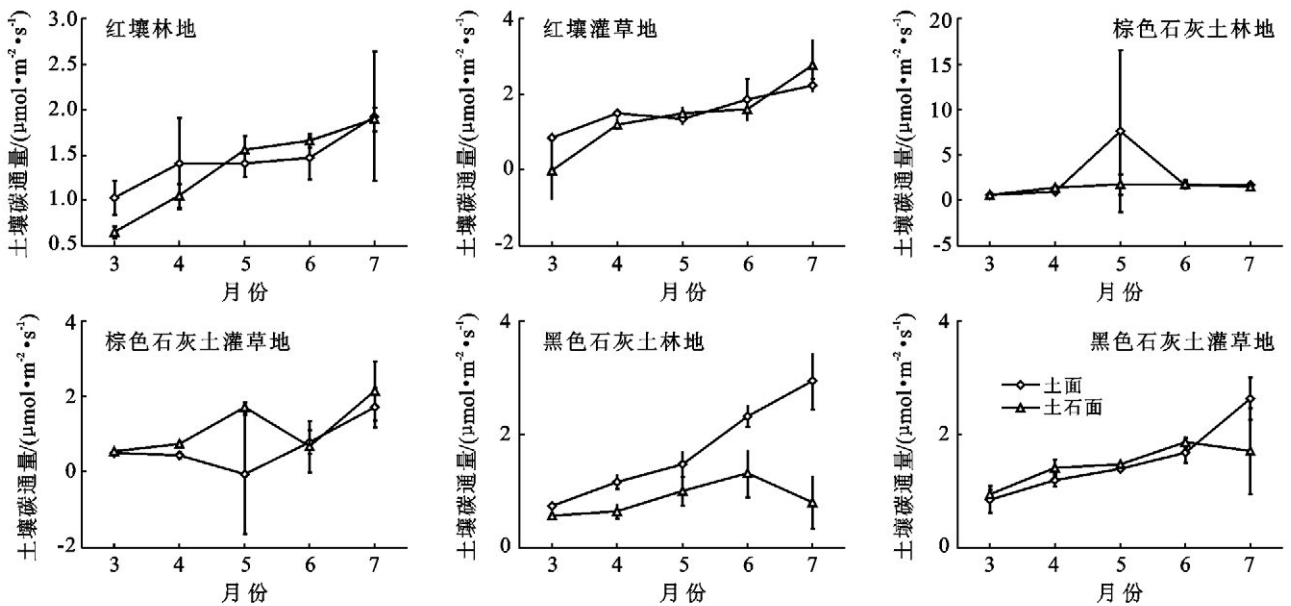


图 3 3 种土壤不同界面土壤碳通量季变化

黑色石灰土中,灌丛的土石面土壤碳通量与土面土壤碳通量差异小于乔木林地,林地中土面土壤碳通量显著大于土石面,土面在 7 月出现最高值 ( $3.0 \mu\text{mol m}^2/\text{s}$ ),土石面在 6 月出现最高值 ( $1.5 \mu\text{mol m}^2/\text{s}$ )并在 7 月呈降低趋势;灌丛土面土壤碳通量最高值出现在 7 月 ( $3.0 \mu\text{mol m}^2/\text{s}$ ),土石

面 6 月出现最高值 ( $1.9 \mu\text{mol m}^2/\text{s}$ )。3 月红壤土石面土壤碳通量小于土面土壤碳通量,缓慢升高到 7 月时,土石面土壤碳通量与土面土壤碳通量无显著差异 ( $p < 0.05$ )。这同样说明随不同气候下温度和湿度的升高以及其他条件的改变,在棕色石灰土中,5 月乔木林地土壤碳通量升高,而灌丛

土壤碳通量降低。变化均出现在5月,且3种界面都有反常的变化,可能是因为雨季来临的前期,土壤湿度突然增加,刺激土壤碳通量急性变化<sup>[20]</sup>。土石面土壤碳通量在黑色石灰土中,从3—6月缓慢升高,6—7月又呈下降趋势。这可能是石面的碳通量变化弱于土壤表面,从而减缓了土石面的碳通量。

在棕色石灰土和黑色石灰土中,灌丛的土石面土壤碳通量与土面土壤碳通量差异小于乔木林地。邹军等<sup>[7]</sup>认为,退化喀斯特植被在恢复过程中,土壤碳通量大小顺序为乔林阶段 > 灌木群落阶段 > 草本群落阶段 > 裸地阶段。这主要是受植被因素和土壤质量的影响。

2种界面碳通量相比,红壤和黑色石灰土乔木林地为土面 > 土石面( $p < 0.05$ )。喀斯特土壤中,2种植被类型下土壤碳通量相比,乔木林地 > 灌丛( $p < 0.05$ ),雨季土壤碳通量大于旱季( $p < 0.05$ )。土壤碳通量在日季变化中均有负值出现的情况,谢静霞等<sup>[21]</sup>研究推论盐碱土可能存在吸收 $\text{CO}_2$ 的无机过程。土壤 $\text{CO}_2$ 负通量的发生机制尚不明确。

### 3 结论

喀斯特土壤中碳通量为乔木林地 > 灌丛( $p < 0.05$ )。乔木林地加速了土壤碳交换过程,黑色石灰土受土壤性质变化影响最小。由土壤碳通量季节变化发现气候对土壤碳通量有直接影响,雨季会促进土壤碳通量的增加。土面和土石面的土壤碳通量差异受气候、季节和植被影响显著。本研究结果为喀斯特土壤生态修复和土壤碳循环过程提供了数据支撑。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Raich J W, Potter C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995,9(1):23-36.
- [2] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle [J]. *Biogeochemistry*, 2000(48):7-20.
- [3] 陈光水,杨玉盛. 格氏栲天然林与人工林根系呼吸季节动态及影响因素[J]. *生态学报*, 2005,25(8):1941-1947.
- [4] 肖复明,汪思龙. 杉木人工林林地土壤呼吸研究[J]. *江西农业大学学报*, 2005,27(4):580-584.
- [5] 肖胜生,叶功富,郭瑞红,等. 木麻黄人工林生态系统土壤呼吸的日变化[J]. *海峡科学*, 2008,22(10):39-41.
- [6] Kane E S, Valentine D W, Schuur E A G, et al. Soil carbon stabilization along climate and stand productivity gradients in black spruce forests of interior Alaska[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2005,35(9):2118-2129.
- [7] 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):195-201.
- [8] 朱守谦. 茂兰喀斯特森林小生境特征研究[M]//朱守谦. 喀斯特森林生态研究(Ⅲ). 贵阳:贵州科技出版社, 2003:38-48.
- [9] Wu Jinshui, Joergensen R G, Birgit Pommerening, et al. Measurement of soil microbial biomass C by fumigation-extraction-an automated procedure[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1990,22(8):1167-1169.
- [10] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海:上海科学技术出版社,1978.
- [11] 唐燕飞. 下蜀次生栎林和人工火炬松林土壤呼吸动态变化研究[D]. 南京:南京林业大学,2006.
- [12] 张丽华,陈亚宁,赵锐锋,等. 热带荒漠中温度和土壤水分对土壤呼吸的影响[J]. *植物生态学报*, 2009,33(5):936-949.
- [13] Rustad L E, Campbell J L, Marion G M, et al. A meta-analysis of the response of soil respiration, net nitrogen mineralization, and aboveground plant growth to experimental ecosystem warming [J]. *Oecologia*, 2001,126(4):543-562.
- [14] Luo Yiqi, Wan Shiqiang, Hui Dafeng, et al. Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie[J]. *Nature*, 2001,413(6856):622-625.
- [15] Wan Shiqiang, Hui Dafeng, Wallace L, et al. Direct and indirect effects of experimental warming on ecosystem carbon process in a tallgrass prairie[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005,19(2):GB2014.
- [16] Zhou Xuhui, Sherry R A, An Y, et al. Main and interactive effects of warming, clipping, and doubled precipitation on soil  $\text{CO}_2$  efflux in a grassland ecosystem [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2006, 20(1):GB1003.
- [17] Zhou Xuhui, Wan Shiqiang, Luo Yiqi. Source components and interannual variability of soil  $\text{CO}_2$  efflux under experimental warming and clipping in a grassland ecosystem[J]. *Global Change Biology*, 2007,13(4):761-775.
- [18] 汪金松,赵秀海,张春雨,等. 改变C源输入对油松人工林土壤呼吸的影响[J]. *生态学报*, 2012,32(9):2768-2777.
- [19] Bowden R D, Newkirk K M, Rullo G M. Carbon dioxide and methane fluxes by a forest soil under laboratory-controlled moisture and temperature conditions[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998,30(12):1591-1597.
- [20] 严俊霞,秦作栋,张义辉,等. 土壤温度和水分对油松林土壤呼吸的影响[J]. *生态学报*, 2009,29(12):6366-6376.
- [21] 谢静霞,翟翠霞,李彦. 盐生荒漠与绿洲农田土壤 $\text{CO}_2$ 通量的对比研究[J]. *自然科学进展*, 2008(18):262-268.