

王爱国 赵允格 许明祥 等. 2013. 黄土高原不同侵蚀区生物结皮土壤 CO<sub>2</sub> 通量日动态特征及其温度敏感性[J]. 环境科学学报, 33(9): 2605-2611  
Wang A G , Zhao Y G , Xu M X , *et al.* 2013. Diurnal dynamic characteristics and temperature sensitivity of soil CO<sub>2</sub> flux of biocrusts in different erosion regions on the Loess Plateau[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 33(9): 2605-2611

# 黄土高原不同侵蚀区生物结皮土壤 CO<sub>2</sub> 通量日动态特征及其温度敏感性

王爱国<sup>1,2</sup>, 赵允格<sup>2</sup>, 许明祥<sup>1,2,\*</sup>, 王一贺<sup>2,3</sup>, 杨丽娜<sup>2,3</sup>, 明姣<sup>2,3</sup>

1. 西北农林科技大学林学院 杨凌 712100
2. 西北农林科技大学水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室 杨凌 712100
3. 中国科学院大学 北京 100049

收稿日期: 2012-12-12 修回日期: 2013-03-20 录用日期: 2013-03-21

**摘要:** 利用 LI-8100 土壤碳通量自动观测系统监测了黄土高原不同侵蚀区(水蚀区、水蚀风蚀交错区、风蚀区)生物结皮土壤 CO<sub>2</sub> 通量的日变化, 分析了土壤呼吸的温度敏感性. 结果表明: 以去除生物结皮为对照, 具有生理活性的生物结皮降低了土壤 CO<sub>2</sub> 通量, 其中水蚀区、交错区和风蚀区土壤日平均 CO<sub>2</sub> 通量分别降低了 5.0%、8.9% 和 20.5%. 水蚀区、交错区和风蚀区生物结皮土壤 CO<sub>2</sub> 通量日动态均呈单峰型曲线, 峰值出现在 12:00—14:00 左右, 大小分别为 1.64、1.64 和 1.37 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, 但日变化幅度差异明显. 土壤呼吸速率随温度的升高呈上升趋势, 指数函数能够较好地描述二者的关系. 生物结皮土壤呼吸的温度敏感性指数 Q<sub>10</sub> 在空间尺度上存在一定变异, 其中水蚀区、交错区 Q<sub>10</sub> 值变化范围为 1.93~2.43, 而风蚀区 Q<sub>10</sub> 值变化范围为 4.80~5.56, 说明风蚀区生物结皮土壤呼吸对温度的敏感性大于水蚀区和交错区. 本研究表明确在探求黄土高原地区土壤碳交换时, 应当考虑生物结皮的影响及不同侵蚀区生物结皮土壤 CO<sub>2</sub> 通量的差异性.

**关键词:** 生物结皮; 土壤 CO<sub>2</sub> 通量; 温度敏感性; Q<sub>10</sub>; 侵蚀区

文章编号: 0253-2468(2013)09-2605-07 中图分类号: X171.1, S154.1 文献标识码: A

## Diurnal dynamic characteristics and temperature sensitivity of soil CO<sub>2</sub> flux of biocrusts in different erosion regions on the Loess Plateau

WANG Aiguo<sup>1,2</sup>, ZHAO Yunge<sup>2</sup>, XU Mingxiang<sup>1,2,\*</sup>, WANG Yihe<sup>2,3</sup>, YANG Lina<sup>2,3</sup>, MING Jiao<sup>2,3</sup>

1. College of Forest, Northwest A&F University, Yangling 712100
2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry-land Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Received 12 December 2012; received in revised form 20 March 2013; accepted 21 March 2013

**Abstract:** Biological soil crusts (biocrusts), as ubiquitous living covers on soil surface in arid and semi-arid regions, exerted a potential effect on soil CO<sub>2</sub> flux. In the study, the diurnal dynamic of soil CO<sub>2</sub> flux of biocrusts in different erosion regions (water erosion region, water-wind alternated erosion region and wind erosion region) on the Loess Plateau was measured by LI-8100 automated soil CO<sub>2</sub> flux system and the temperature sensitivity of soil respiration was analyzed. The results showed that CO<sub>2</sub> flux of soil with activated biocrusts decreased compared with the flux without biocrusts in the three regions. The daily soil CO<sub>2</sub> flux with biocrusts was reduced by 5.0%, 8.9% and 20.5% in the water erosion region, water-wind alternated erosion region and wind erosion region, respectively. The soil CO<sub>2</sub> fluxes in the daytime showed a simple peak curve. The peak fluxes were observed during 12:00—14:00. The value of CO<sub>2</sub> flux in the water erosion region, the water-wind alternated erosion region and the wind erosion region was 1.64, 1.64 and 1.37 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, respectively. Soil respiration rate increased along with the rising temperature, and the relationship can be described by an exponent model. The range of temperature sensitivity quotients (Q<sub>10</sub>) was changed between 1.93 and 2.43 in the water erosion region and in the water-wind

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 41171422, 40971174); 中国科学院战略性先导科技专项(No. XDA05050504); 中国科学院知识创新工程重要方向性项目(No. KZCX2-YW-443)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41171422, 40971174), the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (No. XDA05050504) and the Knowledge Innovation Program of Chinese Academy of Sciences (No. KZCX2-YW-443)

作者简介: 王爱国(1985—) 男, E-mail: wag815@nwsuaf.edu.cn; \* 通讯作者(责任作者), E-mail: xumx@nwsuaf.edu.cn

Biography: WANG Aiguo (1985—) male, E-mail: wag815@nwsuaf.edu.cn; \* Corresponding author, E-mail: xumx@nwsuaf.edu.cn

erosion region while the range of  $Q_{10}$  values was 4.80 ~ 5.56 in the wind erosion region, which indicated that the effect of temperature on biocrusts soil respiration in the wind erosion region was more sensitive than that in the water erosion region and the water-wind erosion region. The study suggested that the effect of biocrusts on soil  $CO_2$  flux should be taken into consideration when discussing the soil carbon exchange on the Loess Plateau.

**Keywords:** biocrusts; soil  $CO_2$  flux; temperature sensitivity;  $Q_{10}$ ; erosion region

## 1 引言( Introduction)

土壤  $CO_2$  通量, 又称土壤呼吸( Castillo-Monroy *et al.* 2011), 是陆地生态系统土壤异养微生物和植物根系生命活动的标志( Fang *et al.* 1998), 也是碳循环的重要组成部分. 全球每年通过土壤呼吸作用排放到大气中的  $CO_2$  约为 68 ~ 100 Pg(以 C 计), 是化石燃料释放碳量的 10 倍左右( Raich *et al.* 1992). 土壤  $CO_2$  通量具有明显的时空变异性, 但多数研究集中于其时间变异方面, 而对其空间异质性的研究较少, 难以对土壤  $CO_2$  释放量进行科学估算( Xu *et al.* 2001; Raich *et al.* 1992). 同时, 土壤  $CO_2$  通量对温度变化的敏感性(  $Q_{10}$ ) 在很大程度上决定着全球气候变化与碳循环之间的反馈关系( 杨庆朋等 2011), 在不同的生物气候带和土壤生态系统中可能有显著差别( Kirschbaum, 1995; Boone *et al.* 1998).

黄土高原地区退耕还林(草)和封山禁牧等生态工程实施以来, 由藻类、藓类、地衣等生命体与土壤复合形成的生物土壤结皮(简称生物结皮)大面积发育, 覆盖度可达 60% ~ 70%(赵允格等 2006; 肖波等 2008). 生物结皮具有增加土壤养分、减少土壤侵蚀及影响水分分配等重要生态功能(赵允格等 2006; Belnap *et al.* 2008; Thomas *et al.* 2008; 李新荣等 2009). 作为具有生物活性的有机复合层, 生物结皮可以通过光合固碳作用增加土壤碳累积量( Lange *et al.* 2007; Wilske *et al.* 2008; Grote *et al.* 2010); 同时, 作为土壤与大气之间的致密界面层, 生物结皮显著影响着土壤呼吸作用( Maestre *et al.* 2003; 李玉强等 2008; 齐玉春等 2010), 可能是地表碳素循环的重要影响因子之一( Post *et al.* 2000; Chen *et al.* 2007). 近年来, 人们在黄土高原地区开展了不少有关土地利用变化、植被恢复等措施对土壤呼吸的影响研究工作(李红生等 2002; 黄懿梅等 2009; 谢慧慧等 2010; 张宏等 2011), 但依然存在不足. 一方面, 该地区土壤与大气之间碳交换的相关研究很少考虑生物结皮的影响; 另一方面 20 世纪 70—80 年代, 唐克丽(1993) 根据不同区

域侵蚀营力的不同将黄土高原划分为水蚀区、水蚀风蚀交错区(简称交错区)及风蚀区, 生物结皮由于不同侵蚀区水热条件分布不均衡, 导致其组成及分布存在差异, 可能对土壤  $CO_2$  通量的影响不尽相同, 有关这方面的研究鲜有报道.

因此, 本文以黄土高原不同侵蚀区生物结皮土壤为研究对象, 探讨生物结皮土壤  $CO_2$  通量的日变化特征, 分析其温度敏感性的变化特点. 以期定量地描述生物结皮在不同侵蚀类型区地表碳素循环中的作用, 为准确估算该地区生态系统碳收支状况研究提供理论依据和数据支撑.

## 2 材料与方法( Materials and methods)

### 2.1 研究区概况

黄土高原位于北纬  $32^\circ \sim 41^\circ$ 、东经  $107^\circ \sim 114^\circ$  之间, 东起太行山, 西至乌鞘岭, 南连秦岭, 北抵长城, 地跨陕、甘、宁、晋、豫等省区, 总面积 64.87 万  $km^2$ , 海拔 1500 ~ 2000 m. 其中, 交错区位于北纬  $35^\circ 20' \sim 40^\circ 10'$ 、东经  $103^\circ 33' \sim 113^\circ 53'$  之间, 其范围大致自水蚀地区北部的神池、灵武、兴县、绥德、吴起、庆阳、固原、定西、东乡一线以北到长城沿线以南一带, 面积约 17.8 万  $km^2$ . 该区以北为风蚀区, 其面积占总面积的 25.08%; 以南为水蚀区, 其面积占总面积的 46.36%(唐克丽, 1993; 2000).

### 2.2 样地选择

试验于 2012 年 8—9 月进行, 选取黄土高原不同土壤侵蚀区的典型代表县, 分别为陕西安塞县(水蚀区)、陕西吴起县(交错区)、宁夏盐池县(风蚀区). 在各侵蚀区选择封禁良好、人为干扰少的撂荒地或退耕地作为试验样区, 每个样区选择 6 个试验样地(重复), 在每个样地内随机设置 4 个  $5\text{ m} \times 5\text{ m}$  的调查样方, 调查地上植被状况. 每个调查样方中随机选择 10 个  $25\text{ cm} \times 25\text{ cm}$  的小样方, 调查生物结皮物种组成、盖度等状况, 各样点生物结皮群落的主要生境特征和土壤理化性质分别见表 1 和表 2.

在野外调查基础上, 分别在 3 个侵蚀区选择典型生物结皮试验区, 结皮类型以发育稳定期的藻类

与藓类混生结皮为主。随机选择 6 个试验样地, 每个样地选择 3 个观测点。以去除生物结皮为对照(提前一天完成结皮去除), 在天气晴好的 2 个连续观

测日内对多样地生物结皮土壤 CO<sub>2</sub> 通量的日变化进行循环观测, 观测时间为 8:00—18:00, 观测频次为每 2 h 一次。

表 1 不同侵蚀区生物结皮群落的主要生境特征

Table 1 The major ecology niche characteristics of biocrusts communities in different erosion regions

侵蚀类型	地点	海拔/m	年均气温/°C	地形特征	土壤类型	年降雨量/mm	结皮盖度
水蚀区	安塞县山地试验场	1200 ~ 1220	8.8	丘陵地区	黄绵土	500 ~ 550	75.2%
交错区	吴起县铁边城镇	1350 ~ 1390	7.8	丘陵地区	黄绵土	400 ~ 450	69.4%
风蚀区	盐池县城北草原封育区	1380 ~ 1410	7.7	缓坡丘陵、沙丘地	风沙土、灰钙土	200 ~ 250	82.9%
侵蚀类型	代表植物群系			生物结皮优势种			
水蚀区	茵陈蒿( <i>Artemisia capillaris</i> )、长芒草( <i>Stipa bungeana</i> )、铁杆蒿( <i>Artemisia gmelinii</i> )			短叶扭口藓( <i>Didymodon tectorum</i> )、点形粘球藻( <i>Gloeocapsa punctata</i> )、含钙席藻( <i>Phormidium calciola</i> )、小席藻( <i>Phormidium tenue</i> )			
交错区	铁杆蒿( <i>Artemisia gmelinii</i> )、胡枝子( <i>Lespedeza bicolor</i> )、长芒草( <i>Stipa bungeana</i> )			银叶真藓( <i>Bryum argenteum</i> ) 阿氏鞘丝藻( <i>Lyngbya allorgei</i> )、狭细席藻( <i>Phormidium angustissimum</i> )			
风蚀区	沙蒿( <i>Artemisia desteroorum</i> )、甘草( <i>Radix glycyrrhiza</i> )			短叶扭口藓( <i>Didymodon tectorum</i> )、颗粒颤藻( <i>Oscillatoria granulata</i> )、具鞘微鞘藻( <i>Microcolus vaginatus</i> )			

表 2 不同侵蚀区生物结皮土壤理化性质

Table 2 Physical and chemical properties of biocrusts soil in different erosion regions

类型	土层	有机质/(g·kg <sup>-1</sup> )	全氮/(g·kg <sup>-1</sup> )	全磷/(g·kg <sup>-1</sup> )	C/N	pH	容重/(g·m <sup>-3</sup> )
水蚀区	结皮层	29.50	1.27	0.63	14.66	8.07	—
	0~10 cm 表层	7.42	0.44	0.53	10.10	8.57	1.26
交错区	结皮层	26.00	0.93	0.26	16.28	8.46	—
	0~10 cm 表层	11.31	0.55	0.26	12.06	8.72	1.21
风蚀区	结皮层	24.30	1.17	0.28	11.70	7.89	—
	0~10 cm 表层	4.80	0.43	0.22	9.94	9.07	1.42

## 2.3 研究方法

2.3.1 土壤 CO<sub>2</sub> 通量的测定 采用动态密闭气室法测定土壤 CO<sub>2</sub> 通量, 所用仪器为 LI-8100 土壤碳通量自动测量系统(LI-COR, Lincoln, NE, USA), 连接自制的透明气室。参照相关文献(刘芳等, 2007; 李熙波等, 2008)中设计透明通量箱的方法, 自制有机玻璃透明气室规格为直径 15 cm, 容积 2160.8 cm<sup>3</sup>, 透光率 95%, 气室顶部设有进气口和出气口并与 LI-8100 连接, 气室内顶部安装小风扇(12 V, 0.15 A, 直径 6 cm)以混匀气室内气体。为减少安放基座对土壤表层的干扰, 测量前 24 h 安置基座, 基座上端高出地表 3 cm, 尽量保证不破坏生物结皮土壤的结构特征。测量时气室与基座间用密封圈密封, 保证气室的气密性。为减少因气室开闭对测量值的影响, 设定测量时间为 2 min·次<sup>-1</sup>, 设定气室关闭指令发出 30 s 后, 由 LI-8100 仪器自动测定及计算 CO<sub>2</sub> 变化速率。

2.3.2 环境温、湿度的测定 测定土壤 CO<sub>2</sub> 通量

时, 利用数字式地温计(Mannix<sup>TM</sup>, USA)测定土壤 2、5 和 10 cm 深度处的温度; 用 ML2x 土壤水分仪(Delta-T Devices Ltd., UK)测定 0~5 cm 土壤含水量; 用便携式 WSB-1 型温湿仪(郑州博洋仪器仪表有限公司)测定近地表气温和空气湿度。

## 2.4 数据处理

用  $Q_{10}$  值来表示土壤呼吸速率对温度变化的敏感程度。由于土壤呼吸速率的观测集中在 8:00—18:00 时段, 因而将文中温度敏感性指数  $Q_{10}$  定义为白天的  $Q_{10}$ , 利用 Van't Hoff 模型描述土壤呼吸对温度变化的响应(陈全胜, 2004), 公式如下:

$$R_s = a \cdot e^{bT} \quad (1)$$

$$Q_{10} = e^{10b} \quad (2)$$

式中  $R_s$  为土壤呼吸速率( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $T$  为温度( $^{\circ}\text{C}$ );  $a$  为温度为 0  $^{\circ}\text{C}$  时的土壤呼吸速率( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ), 又称为基础呼吸速率;  $b$  为温度反应系数。

统计分析采用 SPSS 13.0 和 Excel 2003 软件进行,用 SigmaPlot 10.0 软件分析土壤 CO<sub>2</sub> 通量和温度间的关系,拟合土壤 CO<sub>2</sub> 通量对温度的响应模型并作图。

### 3 结果与分析 (Results and analysis)

#### 3.1 生物结皮土壤 CO<sub>2</sub> 通量日变化规律

水蚀区、交错区和风蚀区保留与去除生物结皮土壤 CO<sub>2</sub> 通量具有明显的日变化特征,均呈单峰型曲线,碳排放峰值出现在 12:00—14:00 之间(图 1),但峰值大小存在一定差异。其中,水蚀区、交错区和风蚀区保留生物结皮土壤 CO<sub>2</sub> 通量峰值大小依次为 1.64、1.64 和 1.37  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,去除生物结

皮土壤 CO<sub>2</sub> 通量峰值依次为 1.60、1.49 和 1.02  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。从 8:00 开始,土壤 CO<sub>2</sub> 通量随时间的推移开始大幅度升高,在 8:00—12:00 时段内 3 个侵蚀区保留结皮土壤 CO<sub>2</sub> 通量均不同程度低于去除结皮土壤 CO<sub>2</sub> 通量,说明此时段土-气界面之间生物结皮层的存在一定程度减少了土壤 CO<sub>2</sub> 的排放,这可能与结皮生物藓类、藻类等属于变水植物,其生理代谢通常在结皮层湿润后才得以显现有关。而在 12:00 以后,由于生物结皮逐渐失水变干,处于休眠状态,其自身的光合、呼吸等生理作用均很微弱,3 个侵蚀区保留与去除结皮土壤 CO<sub>2</sub> 通量差异不显著,土壤 CO<sub>2</sub> 通量呈逐渐减小趋势。

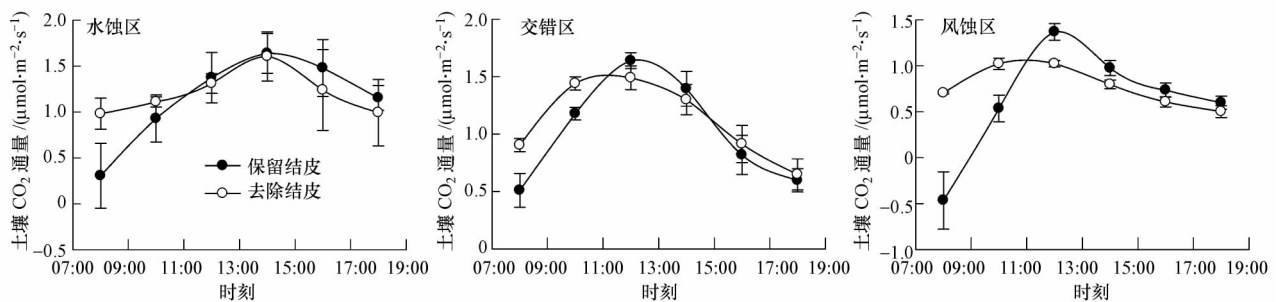


图 1 生物结皮土壤 CO<sub>2</sub> 通量的日变化

Fig. 1 The diurnal change of soil CO<sub>2</sub> flux of biocrusts

#### 3.2 不同侵蚀区生物结皮土壤日均 CO<sub>2</sub> 通量比较

图 2 为 3 个侵蚀区去除与保留生物结皮土壤日均 CO<sub>2</sub> 通量的比较。由图 2 可知 3 个侵蚀区保留与

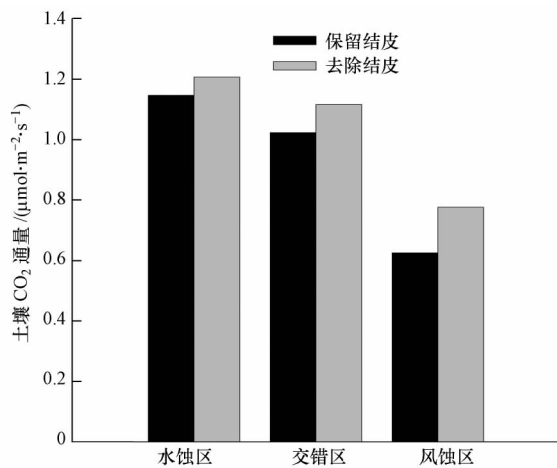


图 2 3 个侵蚀区生物结皮土壤日均 CO<sub>2</sub> 通量

Fig. 2 Daily average soil CO<sub>2</sub> flux of biocrusts in three erosion regions

去除生物结皮土壤日均 CO<sub>2</sub> 通量大小均表现为水蚀区 > 交错区 > 风蚀区。其中,水蚀区、交错区和风蚀区保留结皮日均 CO<sub>2</sub> 通量分别为 1.15、1.02 和 0.62  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,去除结皮日均 CO<sub>2</sub> 通量依次为 1.21、1.12 和 0.78  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。也就是说,在日尺度上,水蚀区、交错区和风蚀区生物结皮土壤日均 CO<sub>2</sub> 通量较去除生物结皮分别减少 5.0%、8.9% 和 20.5%。

#### 3.3 不同侵蚀区环境温度和湿度日变化特征

图 3 为水蚀区、交错区和风蚀区不同土层(2、5、10 cm) 温度、土壤 5 cm 含水量(以质量含水量表示)以及近地面气温和空气湿度的日变化状况。从图 3 可见,与 3 个侵蚀区生物结皮土壤 CO<sub>2</sub> 通量日动态特征相似,近地面气温( $T_{\text{air}}$ )、2 cm 土温( $T_2$ )、5 cm 土温( $T_5$ )、10 cm 土温( $T_{10}$ ) 的日变化均表现为单峰曲线。随着时间的推移, $T_{\text{air}}$ 、 $T_2$ 、 $T_5$  日变化幅度较为明显,在 14:00 左右达到峰值,而  $T_{10}$  随时间变化不明显,在 16:00 左右出现峰值,之后有小幅度的

降低. 3 个侵蚀区  $T_{air}$ 、 $T_2$ 、 $T_5$ 、 $T_{10}$  大小依次为交错区 > 风蚀区 > 水蚀区. 近地表空气湿度日变化呈“V”形特征, 在中午 12:00—14:00 左右达到最低值, 之

后出现小幅度升高; 而土壤含水量随着时间的推移和温度的升高逐渐减小, 但变化复杂, 无明显规律.

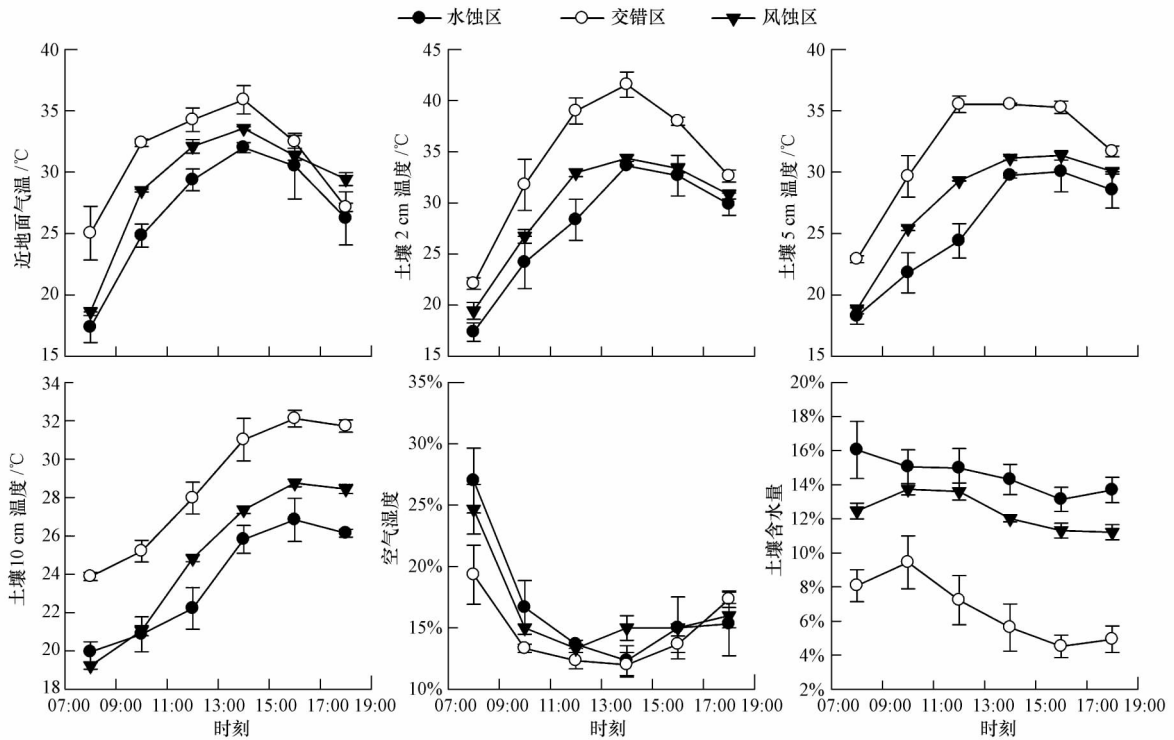


图 3 土壤温度、土壤含水量、近地面气温日变化

Fig. 3 The diurnal change of soil temperature, soil water content and surface air temperature

### 3.4 不同侵蚀区土壤呼吸温度敏感性特征

$Q_{10}$  值是衡量土壤呼吸的温度敏感性指数, 即温度每升高 10 °C, 土壤呼吸速率增加的倍数 (Kirschbaum, 1995). 这一指标反映了温度变化后, 土壤呼吸作用的变化规律, 对了解未来气候变化条件下陆地生态系统碳通量的变化规律具有一定的参考意义.

为对比分析不同侵蚀区土壤呼吸温度敏感性特征, 本文分别对 3 个侵蚀区生物结皮土壤 CO<sub>2</sub> 通量与近地面气温、2 cm 土温、5 cm 土温的关系建立了指数回归模型. 结果表明, 温度对土壤呼吸有极显著的影响 ( $p < 0.01$ )  $R^2$  范围为 0.44 ~ 0.72, 指数函数较好地描述了土壤 CO<sub>2</sub> 通量与温度之间的关系 (图 4 表 3).

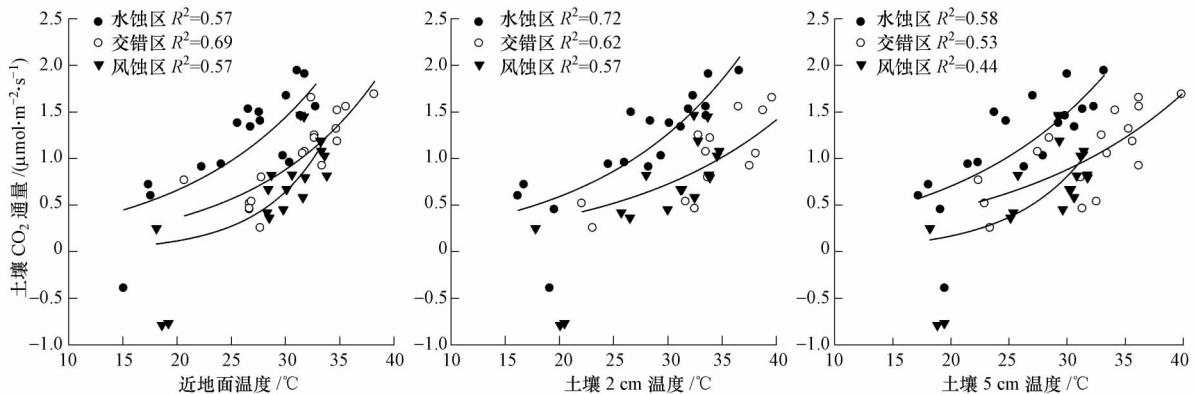


图 4 土壤 CO<sub>2</sub> 通量与环境温度的回归关系

Fig. 4 Regression relationship of soil CO<sub>2</sub> flux and environment temperature

由表 3 可知,同一侵蚀区不同土层条件  $Q_{10}$  值不同,同一土层条件不同侵蚀区  $Q_{10}$  值也不同. 其中,水蚀区、交错区、风蚀区近地面气温 ( $T_{\text{air}}$ )、2 cm 土温 ( $T_2$ ) 及 5 cm 土温 ( $T_5$ ) 的  $Q_{10}$  值大小依次为  $Q_{10}(T_{\text{air}}) > Q_{10}(T_2) > Q_{10}(T_5)$ ; 不同侵蚀区  $T_{\text{air}}$  的  $Q_{10}$  值大小为风蚀区 > 交错区 > 水蚀区; 不同侵蚀区  $T_2$ 、 $T_5$  的  $Q_{10}$  值大小为风蚀区 > 水蚀区 > 交错区. 上述结果说明,在黄土高原不同侵蚀区域土壤呼吸对温度的敏感性 ( $Q_{10}$  值) 在空间尺度上有较大的变异,风蚀区显著高于水蚀区和交错区.

表 3 土壤  $\text{CO}_2$  排放通量与温度间的日动态关系及  $Q_{10}$  值比较  
Table 3 Relationship between diurnal dynamics of soil  $\text{CO}_2$  flux and temperature as well as  $Q_{10}$  values

处理	温度参数	回归方程	$R^2$	$Q_{10}$	$p$
水蚀区	$T_{\text{air}}$	$R_s = 0.1411e^{0.0776T}$	0.57**	2.17	0.0002
	$T_2$	$R_s = 0.1276e^{0.0763T}$	0.72**	2.14	<0.0001
	$T_5$	$R_s = 0.1364e^{0.0751T}$	0.57**	2.12	<0.0001
交错区	$T_{\text{air}}$	$R_s = 0.0614e^{0.0888T}$	0.69**	2.43	<0.0001
	$T_2$	$R_s = 0.0982e^{0.0667T}$	0.62**	1.95	0.0003
	$T_5$	$R_s = 0.1220e^{0.0659T}$	0.53**	1.93	0.0010
风蚀区	$T_{\text{air}}$	$R_s = 0.0038e^{0.1716T}$	0.57**	5.56	0.0003
	$T_2$	$R_s = 0.0035e^{0.1683T}$	0.57**	5.38	0.0003
	$T_5$	$R_s = 0.0073e^{0.1568T}$	0.44**	4.80	0.0026

## 4 讨论 (Discussion)

### 4.1 生物结皮土壤 $\text{CO}_2$ 通量时空变异

受温度、水分等环境因子和呼吸作用的生化过程及土壤中  $\text{CO}_2$  气体的运输等影响,土壤  $\text{CO}_2$  通量具有明显的时空变异特征 (Xu *et al.* 2001). 生物结皮土壤  $\text{CO}_2$  通量日变化特征与 Thomas 等 (2007)、Wilske 等 (2008) 的研究结果相类似. 3 个侵蚀区生物结皮土壤  $\text{CO}_2$  通量日变化均为单峰曲线特征,但在同一观测时间呼吸值的大小存在一定差异 (图 1). 其中,生物结皮土壤日均  $\text{CO}_2$  通量大小与各侵蚀区测量时间 10:00 的呼吸值最为接近,这与以往多数研究 (姜运生等, 2004; 汤洁等, 2012) 用 9:00—11:00 测量的土壤  $\text{CO}_2$  通量值代表土壤呼吸日均值的结论相吻合.

空间尺度上,不同生态系统类型之间土壤  $\text{CO}_2$  通量差异很大,这种空间变异反映了生态系统内在的、起主导作用的环境和生物活动的特征有较大区别 (Rament *et al.* 2000). 这种差异同样存在于黄土高原地区,由于 3 个侵蚀区水热条件及土壤养分状况的不同,生物结皮的物种组成及生长状况的差

异,土壤日平均  $\text{CO}_2$  通量大小表现为水蚀区 > 交错区 > 风蚀区,其中,保留生物结皮日均土壤  $\text{CO}_2$  通量比去除结皮日均土壤  $\text{CO}_2$  通量分别减少了 5.0%、8.9% 和 20.5%. 也就是说生物结皮在减少土壤  $\text{CO}_2$  排放方面具有一定贡献,这一特点与许多研究者的结果一致. 李玉强等 (2008) 的研究结果表明,生物结皮的形成可以有效减弱土壤中  $\text{CO}_2$  向大气的排放. 同样,Belnap 等 (2008) 认为,生物结皮是干旱、半干旱地区荒漠系统碳固定的重要贡献者之一.

### 4.2 生物结皮土壤 $\text{CO}_2$ 通量的温度敏感性

土壤  $\text{CO}_2$  通量是个复杂的生物地球化学过程,表现为气候、植物、土壤 3 因素的共同作用 (Bond-Lamberty *et al.* 2010). 多数研究表明,温度是影响土壤  $\text{CO}_2$  排放的主要因素,土壤呼吸与表层土壤温度、近地面气温显著正相关 (Smith *et al.*, 1993; Qi *et al.* 2002; 陈全胜等, 2004; Bond-Lamberty *et al.*, 2010). 本研究也显示,生物结皮土壤呼吸作用与表层土壤温度、近地面气温之间存在显著的相关关系. 从表 3 可见,水蚀区、交错区土壤呼吸对温度的敏感性指数  $Q_{10}$  值 (变化范围 1.93 ~ 2.43) 与全球的平均水平相当 (2.4),而风蚀区  $Q_{10}$  值 (变化范围 4.80 ~ 5.56) 略高于全球平均水平.  $Q_{10}$  值不只是对温度敏感性的一种量度,而是对温度、根生物量、根系活性、土壤水分状况、植被类型等因素响应的综合结果 (Yuste *et al.* 2004). 尽管温度作为影响土壤呼吸的最主要因素,本研究中温度的指数模型可以解释 44% ~ 72% 左右的土壤  $\text{CO}_2$  通量的日变化情况,但由于本研究忽略了诸如土壤含水量、土壤理化性质等因素对温度敏感性指数  $Q_{10}$  的影响,因而关于土壤呼吸温度敏感性的研究还有待深入探讨.

## 5 结论 (Conclusions)

1) 相对于去除生物结皮,具有生理活性的生物结皮降低了土壤  $\text{CO}_2$  通量,其中,水蚀区、交错区和风蚀区土壤日均  $\text{CO}_2$  通量分别降低 5.0%、8.9% 和 20.5%.

2) 水蚀区、交错区和风蚀区生物结皮土壤  $\text{CO}_2$  通量具有明显的日变化格局,均呈单峰曲线,峰值出现在 12:00—14:00 左右,大小分别为 1.64、1.64 和 1.37  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,但日变化幅度存在明显差异.

3) 生物结皮土壤呼吸的温度敏感性指数 ( $Q_{10}$ )

在空间尺度上有一定的变异,水蚀区、交错区  $Q_{10}$  值变化范围为 1.93 ~ 2.43,而风蚀区  $Q_{10}$  值变化范围为 4.80 ~ 5.56,即风蚀区生物结皮土壤呼吸对温度的敏感性大于水蚀区和交错区。

责任作者简介:许明祥(1972—),男,副研究员,博士生导师,主要从事侵蚀环境土壤质量演变及土壤-植被互动效应研究。

#### 参考文献(References):

- Belnap J, Phillips S L, Flint S, *et al.* 2008. Global change and biological soil crusts: effects of ultraviolet augmentation under altered precipitation regimes and nitrogen additions [J]. *Global Change Biology*, 14(3): 670-686
- Bond-Lamberty B, Thomson A. 2010. Temperature-associated increases in the global soil respiration record [J]. *Nature*, 464(25): 579-582
- Boone R D, Nadelhoffer K J, Canary J D, *et al.* 1998. Roots exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration [J]. *Nature*, 396(6711): 570-572
- Castillo-Monroy A P, Maestre F T, Rey A, *et al.* 2011. Biological soil crust microsites are the main contributor to soil respiration in a semiarid ecosystem [J]. *Ecosystems*, 14(5): 835-847
- Chen L D, Gong J, Fu B J, *et al.* 2007. Effect of land use conversion on soil organic carbon sequestration in the loess hilly area, loess plateau of China [J]. *Ecological Research*, 22(4): 641-648
- 陈全胜,李凌浩,韩兴国,等. 2004. 典型温带草原群落土壤呼吸温度敏感性与土壤水分的关系 [J]. *生态学报*, 24(4): 831-836
- Fang C, Moncrieff J B, Gholz H L, *et al.* 1998. Soil CO<sub>2</sub> efflux and its spatial variation in a Florida slash pine plantation [J]. *Plant and Soil* 205: 135-146
- Grote E E, Belnap J, Housman D C, *et al.* 2010. Carbon exchange in biological soil crust communities under differential temperatures and soil water contents: implications for global change [J]. *Global Change Biology*, 16(10): 2763-2774
- 黄懿梅,安韶山,刘连杰,等. 2009. 黄土丘陵区土壤基础呼吸对草地植被恢复的响应及其影响因素 [J]. *中国生态农业学报*, 17(25): 862-869
- Kirschbaum M U F. 1995. The temperature dependence of soil organic matter decomposition and the effect of global warming on soil organic C storage [J]. *Soil Biology and Biochemistry* 27(6): 753-760
- Lange O L, Green T G A, Meyer A, *et al.* 2007. Water relations and carbon dioxide exchange of epiphytic lichens in the Namib fog desert [J]. *Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 202(6): 479-487
- 李红生,刘广全,王鸿喆,等. 2002. 黄土高原四种人工植物群落土壤呼吸季节变化及其影响因子 [J]. *生态学报*, 28(9): 4099-4106
- 李熙波,杨玉盛,曾宏达,等. 2008. 亚热带马尼拉草坪生态系统呼吸昼夜变化研究初报 [J]. *亚热带资源与环境学报* 3(4): 16-22
- 李新荣,张元明,赵允格. 2009. 生物土壤结皮研究: 进展、前沿与展望 [J]. *地球科学进展* 24(1): 11-24
- 李玉强,赵哈林,赵玮,等. 2008. 生物结皮对土壤呼吸的影响作用初探 [J]. *水土保持学报* 22(3): 106-109
- 刘芳,王炜,朴顺姬,等. 2007. LI-6262 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 分析仪接气室法在草原群落蒸散量与 CO<sub>2</sub> 交换量测定中的应用 [J]. *植物生态学报* 31(5): 892-896
- 姜运生,李忠佩,张桃林. 2004. 不同利用方式对红壤 CO<sub>2</sub> 排放的影响 [J]. *生态学报* 24(5): 978-983
- Maestre F T, Cortina J. 2003. Small-scale spatial variation in soil CO<sub>2</sub> efflux in a Mediterranean semiarid steppe [J]. *Applied Soil Ecology*, 23(3): 199-209
- Post W M, Kwon K C. 2000. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential [J]. *Global Change Biology* 6: 317-327
- Qi Y, Xu M, Wu J G. 2002. Temperature sensitivity of soil respiration and its effects on ecosystem carbon budget: nonlinearity begets surprises [J]. *Ecological Modelling*, 153(1/2): 131-142
- 齐玉春,董云社,金钊,等. 2010. 生物结皮对内蒙古沙地灌丛草地土壤呼吸特征的影响 [J]. *地理科学* 30(6): 898-903
- Raich J W, Schlesinger W H. 1992. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate [J]. *Tellus* 44B: 81-99
- Rament M B, Jarvis P G. 2000. Temporal and spatial variation of soil CO<sub>2</sub> efflux in a Canadian boreal forest [J]. *Soil Biology and Biochemistry* 32: 35-45
- Smith T M, Cramer W P, Dixon R K, *et al.* 1993. The global terrestrial carbon-cycle [J]. *Water Air and Soil Pollution* 70(1/4): 19-37
- 唐克丽. 1993. 黄土高原水蚀风蚀交错带和神木试区的环境背景及整治方向 [J]. *中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊(神木水蚀风蚀交错带生态环境整治技术及试验示范研究论文集)*, 2: 2-15
- 唐克丽. 2000. 黄土高原水蚀风蚀交错区治理的重要性与紧迫性 [J]. *中国水土保持* 22(11): 11-12, 17
- 汤洁,韩源,刘森,等. 2012. 吉林西部不同土地利用方式下的生长季土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量日变化及影响因素 [J]. *生态环境学报* 21(1): 33-37
- Thomas A D, Hoon S R, Linton P. 2008. Carbon dioxide fluxes from cyanobacteria crusted soils in the Kalahari [J]. *Applied Soil Ecology* 39(3): 254-263
- Wilske B, Burgheimer J, Kamieli A, *et al.* 2008. The CO<sub>2</sub> exchange of biological soil crusts in a semiarid grass-shrubland at the northern transition zone of the Negev desert, Israel [J]. *Biogeosciences*, 5(5): 1411-1423
- 肖波,赵允格,许明祥,等. 2008. 陕北黄土区生物结皮条件下土壤养分的积累及流失风险 [J]. *应用生态学报* 19(5): 1019-1026
- 谢慧慧,樊军,齐丽彬,等. 2010. 黄土高原水蚀风蚀交错区典型植被下土壤呼吸季节变化特征与影响因素 [J]. *环境科学* 31(12): 2995-3003
- Xu M, Qi Y. 2001. Soil surface CO<sub>2</sub> efflux and its spatial and temporal variations in a young Ponderosa Pine plantation in northern California [J]. *Global Change Biology* 7: 667-677
- Yuste J C, Janssens I A, Carrara A, *et al.* 2004. Annual  $Q_{10}$  of soil respiration reflects plant phenological patterns as well as temperature sensitivity [J]. *Global Change Biology* 10(2): 161-169
- 张宏,黄懿梅,祁金花,等. 2011. 温度和水分对黄土丘陵区 3 种典型土地利用方式下土壤释放 CO<sub>2</sub> 潜力的影响 [J]. *中国生态农业学报* 19(04): 731-737
- 赵允格,许明祥,王全九,等. 2006. 黄土丘陵区退耕地生物结皮对土壤理化性状的影响 [J]. *自然资源学报* 21(03): 441-448