

黄土丘陵区不同演替阶段生物结皮对土壤 CO₂ 通量的影响*

王爱国^{1,2} 赵允格² 许明祥^{1,2**} 杨丽娜^{2,3} 明 姣^{2,3}

(¹西北农林科技大学林学院, 陕西杨凌 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, 陕西杨凌 712100; ³中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要 生物结皮是土壤表面具有光合活性的致密复合层,是土-气界面 CO₂通量的影响因子之一. 本文采用改进的 Li-8100 土壤碳通量测量系统,研究了黄土丘陵区退耕地上不同演替阶段生物结皮对土壤 CO₂通量的影响. 结果表明:光照条件下,生物结皮土壤 CO₂通量较除去生物结皮显著下降,其中藻结皮和藓结皮分别下降了92%和305%;生物结皮对土壤 CO₂通量的降低程度与其生物组成和生物量有关,深色藻结皮和藓结皮土壤 CO₂通量较裸地分别降低了141%和484%. 生物结皮土壤 CO₂通量的日变化呈降低-升高-降低的趋势,而裸地 CO₂通量日变化趋势为单峰曲线,藻结皮、藓结皮的碳吸收峰值分别出现在8:00和9:00前后,其 CO₂通量分别为0.13和-1.02 μmol CO₂ · m⁻² · s⁻¹;藻结皮24 h CO₂通量排放总量较裸地增加7.7%,而藓结皮减少了29.6%. 生物结皮对土壤 CO₂通量的影响显著,在评价退耕地土壤碳循环时,应考虑生物结皮的影响.

关键词 生物结皮 土壤 CO₂ 通量 演替 黄土丘陵区

文章编号 1001-9332(2013)03-0659-08 **中图分类号** Q148; S154.1 **文献标识码** A

Effects of biological soil crust at different succession stages in hilly region of Loess Plateau on soil CO₂ flux. WANG Ai-guo^{1,2}, ZHAO Yun-ge², XU Ming-xiang^{1,2}, YANG Li-na^{2,3}, MING Jiao^{2,3} (¹College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; ²State 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, Shaanxi, China; ³Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2013, 24(3): 659-666.

Abstract: Biological soil crust (biocrust) is a compact complex layer of soil, which has photosynthetic activity and is one of the factors affecting the CO₂ flux of soil-atmosphere interface. In this paper, the soil CO₂ flux under the effects of biocrust at different succession stages on the re-vegetated grassland in the hilly region of Loess Plateau was measured by a modified LI-8100 automated CO₂ flux system. Under light condition, the soil CO₂ flux under effects of cyanobacteria crust and moss crust was significantly decreased by 92% and 305%, respectively, as compared with the flux without the effects of the biocrusts. The decrement of the soil CO₂ flux by the biocrusts was related to the biocrusts components and their biomass. Under the effects of dark colored cyanobacteria crust and moss crust, the soil CO₂ flux was decreased by 141% and 484%, respectively, as compared with that in bare land. The diurnal curve of soil CO₂ flux under effects of biocrusts presented a trend of 'drop-rise-drop', with the maximum carbon uptake under effects of cyanobacteria crust and moss crust being 0.13 and -1.02 μmol CO₂ · m⁻² · s⁻¹ and occurred at about 8:00 and 9:00 am, respectively, while that in bare land was unimodal. In a day (24 h), the total CO₂ flux under effects of cyanobacteria crust was increased by 7.7%, while that under effects of moss crust was decreased by 29.6%, as compared with the total CO₂ flux in bare land. This study suggested that in the hilly

* 国家自然科学基金项目(41171422, 40971174)、中国科学院战略性先导专项(XDA05050504)和中国科学院知识创新工程重要方向性项目(KZCX2-YW-443)资助.

** 通讯作者. E-mail: xumx@nwsuaf.edu.cn

2012-06-11 收稿, 2012-12-21 接受.

region of Loess Plateau, biocrust had significant effects on soil CO₂ flux, which should be taken into consideration when assessing the carbon budget of the ‘Grain for Green’ eco-project.

Key words: biological soil crust; soil CO₂ flux; succession; hilly region of Loess Plateau.

土壤 CO₂ 通量是调控陆地生态系统碳循环的关键过程,也是评价土壤-大气碳平衡的一个重要指标^[1-2]. 生物土壤结皮(简称生物结皮)是由生长于土壤表层或表面的藻类、藓类植物及土壤微生物等与土壤相互作用形成的有机致密复合体,具有增强土壤稳定性、维持土壤和植被之间水分平衡、影响维管植物种子萌发、增加土壤养分等重要生态功能^[3-5]. 同时,作为土壤与大气之间的界面层,生物结皮可能影响着土壤呼吸作用^[6-8],成为干旱半干旱生态系统土壤 CO₂ 通量的影响因子之一^[9].

目前有关生物结皮对土壤 CO₂ 通量影响的研究,主要开展于极地苔原区^[10]、以色列的内盖夫沙漠^[11]、美国西部的科罗拉多高原以及西南部的莫哈维沙漠^[12-13]等极地和干旱荒漠等地区. 多数研究侧重于单一的生物结皮有机体而非复杂的生物结皮群落^[4,13-15],所得结论也不尽相同. 一些学者认为,生物结皮增加了土壤对大气的碳排放^[6-7],另一些学者则认为,生物结皮减少了土壤的碳排放^[16-19]. 此外,干旱半干旱生态系统土壤 CO₂ 通量的研究多数是在忽略或除去地表覆盖层后在遮光条件下测定的^[20-21]. 然而,作为一种有光合活性的重要地表覆盖层,生物结皮在光照条件下可能对土-气界面碳交换存在重要的影响^[16-19,22],传统土壤呼吸的遮光处理可能忽略了其光合固碳活性^[23-25],不能客观地反映生物结皮土壤 CO₂ 通量的实际状况.

黄土丘陵区退耕还林(草)工程实施以来,大面积坡耕地退耕为林-灌-草地,区域生态环境发生显著变化^[26],对区域碳平衡和气候变化可能产生重大影响^[27-29]. 在植被恢复重建过程中,随着人为扰动的减少和地表微环境的改善,生物结皮大面积发育,覆盖度在 60%~70%^[30-31],有可能成为影响该区退耕地土壤 CO₂ 通量的重要因子. 目前,有关黄土高原土地利用变化、植被恢复对土壤呼吸的影响已有一些研究报道^[32-33],但生物结皮对土-气界面 CO₂ 交换的影响研究却鲜有关注.

本文以黄土丘陵地区具有生理活性的生物结皮为对象,研究了生物结皮在裸地-藻结皮-藓结皮这一演替过程中对土壤 CO₂ 通量的影响,旨在为深入理解生物结皮在区域碳循环中的作用,为干旱半干旱地区碳平衡研究提供参考.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

本研究主要在位于黄土高原典型梁峁状丘陵沟壑区的中国科学院安塞水土保持综合试验站(简称安塞站)进行,地理坐标 36°51'16" N, 109°18'52" E, 海拔 1288 m. 该地区属于暖温带半干旱季风性气候,年均气温 8.8 °C,年日照时数 2300~2400 h, ≥10 °C 积温为 3282 °C;多年平均降水量 505 mm,其中 6—9 月平均降水量占全年降水量的 60%~70%. 土壤以黄土母质上发育的黄绵土为主. 植物群落以中旱生草本植物为主,分布有茵陈蒿(*Artemisia capillaris*)、长芒草(*Stipa bungeana*)、铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、苦苣菜(*Sonchus oleraceus*)、狗尾草(*Setaria viridis*)等. 研究区内生物结皮大面积发育,覆盖度为 60%~70%. 其中,藓结皮主要以短叶扭口藓(*Didymodon tectorum*)为优势种;藻结皮的常见种有具鞘微鞘藻(*Microcoleus vaginatus*)、点形粘球藻(*Gloeocapsa punctata*)和具翼翅线藻(*Petalonema alatum*)等.

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置 试验于 2011 年 9—11 月在安塞站山地试验场进行. 在样地调查的基础上,选择人为扰动少、能够代表研究区不同发育阶段的 5 个生物结皮试验小区(25 m×10 m)为样地,根据生物结皮演替过程将其划分为:浅色藻结皮、深色藻结皮、藻+少量藓结皮、藓+少量藻结皮和藓结皮等类型. 每类生物结皮设 3 次重复,并以裸地为对照,样地生物结皮生长状况见图 1.

1.2.2 试验设计 选取具有生理活性的藓结皮、藓+藻结皮和藻结皮 3 种结皮类型,每种类型均设置保留与去除两种处理,共 6 个处理. 在天气晴朗的 9:00—11:00,分别在遮光和光照条件下观测土壤 CO₂ 通量.

以裸地为对照,选取浅色藻结皮、深色藻结皮、藻+少量藓结皮、藓+少量藻结皮、藓结皮 5 种结皮类型,分别代表研究区生物结皮的典型阶段,在光照条件下观测其土壤 CO₂ 通量的变化. 此外,选择裸地、藻结皮和藓结皮为研究对象,分别在光照和遮光条件下观测其土壤 CO₂ 通量 24 h 日变化特征,以

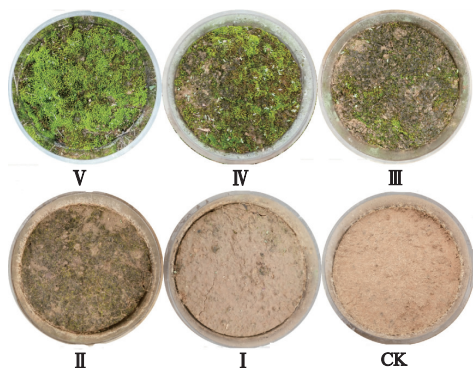


图1 生物土壤结皮生长状况

Fig.1 General growth of the growth of biological soil crusts.

CK:裸地 Bare soil; I:浅色藻结皮 Light cyanobacteria crust; II:深色藻结皮 Dark cyanobacteria crust; III:藻+少量藓结皮 Cyanobacteria and little moss crust; IV:藓+少量藻结皮 Moss and little cyanobacteria crust; V:藓结皮 Moss crust. 下同 The same below.

明确不同生理活性的生物结皮对土壤 CO₂ 通量的影响. 观测时间为 6:00 至次日 6:00, 观测频率每次 2 h.

以上试验各处理均设置 3 个观测点, 每点重复测量 3 次, 同步记录土壤温度、含水量.

1.2.3 土壤 CO₂ 通量的测定 土壤 CO₂ 通量采用 LI-8100 土壤碳通量自动测量系统 (LI-COR, Lincoln, NE, USA) 进行测定. 根据研究需要, 参照文献 [34–35] 自制有机玻璃透明气室 (透光率 95%), 规格为直径 15 cm、高 38.5 cm、容积 2160.8 cm³. 气室顶部设有进气口和出气口与 LI-8100 连接, 气室内顶安装小风扇 (12V, 0.15A, 直径 6 cm) 以混匀室内气体. 测量基座为内径 13.5 cm、高 8 cm 的透明有机玻璃管, 基座上端高出地表 3 cm. 测量前 24 h 安置基座, 气室与基座间用密封圈密封, 以保证气室的气密性.

有研究表明, 光照条件下, 测量 2 min 内透明气室内温度会有小幅度 (0.5 ~ 1 ℃) 的升高, 但对 CO₂ 释放影响不明显 [36–37]. 为了尽可能使 CO₂ 通量的测量值与真实值相接近, 本试验在气室内顶部安装小风扇、设定每次的测量时间为 2 min, 以减少气室关闭和气路的影响, 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 CO₂ 变化速率.

1.2.4 环境温、湿度的测定 为研究土壤温湿度以及近地气温与 CO₂ 通量的关系, 在测定 CO₂ 通量的同时, 利用数字式地温计 (Mannix™, USA) 测定土壤 2.5 和 10 cm 的温度; 用烘干法测定土壤 0 ~ 2 cm 含水量; 用 ML2x 土壤水分仪 (Delta-T Devices Ltd., UK) 测定 0 ~ 6 cm 土壤含水量; 近地面气温由 Li-

8100 仪器在每次测量时自动记录.

1.3 数据处理

采用 SPSS 13.0 和 Excel 2003 软件完成所有数据的处理及统计分析, 对不同处理下生物结皮土壤 CO₂ 通量、土壤温度和水分进行差异显著性分析 (α=0.05). 用 Pearson 相关系数分析土壤 CO₂ 通量与土壤因子的相关性. 采用 SigmaPlot 10.0 软件作图.

2 结果与分析

2.1 不同光照条件下生物结皮对土壤 CO₂ 通量的影响

由图 2 可以看出, 传统遮光方法测定时, 生物结皮土壤 CO₂ 通量显著高于去除生物结皮土壤的 CO₂ 通量. 其中藓结皮、藻+藓结皮和藻结皮的土壤 CO₂ 通量分别为 1.95、1.50 和 1.47 μmol CO₂ · m⁻² · s⁻¹, 较去除生物结皮增加了 125%、112% 和 53%; 而光照条件下, 具有生理活性的藓结皮、藻+藓结皮和藻结皮的土壤 CO₂ 通量分别为 -1.62、-0.36 和 0.07 μmol CO₂ · m⁻² · s⁻¹, 较去除生物结皮分别减少了 305%、147% 和 92%.

2.2 不同演替阶段生物结皮对土壤 CO₂ 通量的影响

黄土丘陵区的生物结皮存在着藻类-地衣/藓类结皮的演替过程 [4]. 期间, 生物结皮的组成及生物量均发生显著变化, 可能对土壤 CO₂ 通量产生影

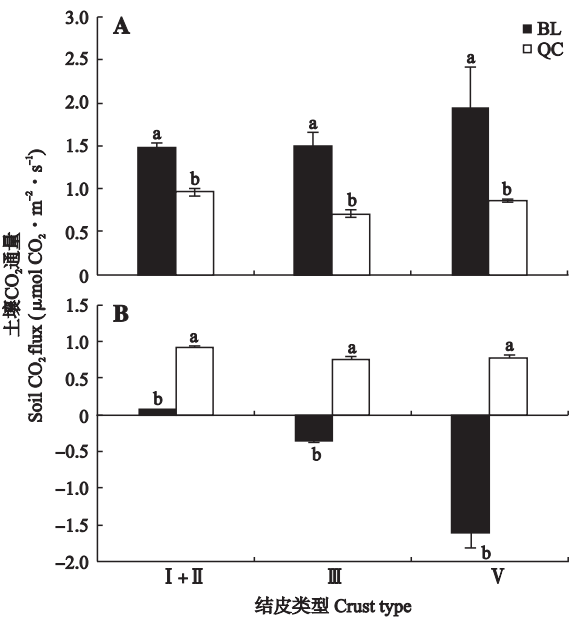


图2 不同光照条件下生物结皮对土壤 CO₂ 通量的影响

Fig.2 Effect of biological soil crusts on soil CO₂ flux under different light conditions.

A:遮光 Dark; B:光照 Light; BL:保留结皮 Remaining biocrusts; QC:去除结皮 Removing biocrusts.

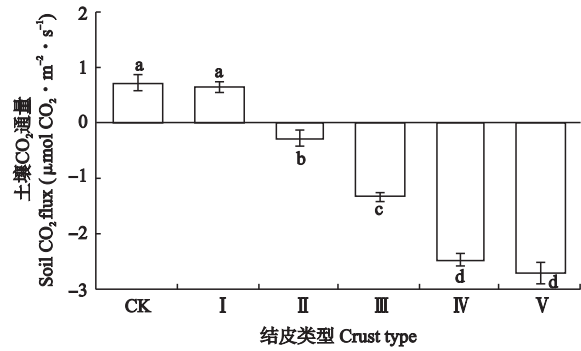


图3 不同演替阶段生物结皮对土壤 CO₂ 通量的影响
Fig.3 Effect of biological soil crusts on soil CO₂ flux at different successional stages.

响. 由图3可以看出,光照条件下,裸地的土壤 CO₂ 通量为 0.71 μmol CO₂ · m⁻² · s⁻¹,表现为 CO₂ 的净释放;而深色藻结皮和藓结皮的土壤 CO₂ 通量分别为 -0.29 和 -2.71 μmol CO₂ · m⁻² · s⁻¹,分别减少了 141% 和 484%,均表现为 CO₂ 的净吸收. 另外,随着生物结皮的演替发育,土壤 CO₂ 通量呈现递减趋势,大小依次为:藓结皮<藓+少量藻结皮<藻+少量藓结皮<深色藻结皮<浅色藻结皮<裸地. 表明随着生物结皮的演替,通过光合作用固定 CO₂ 的能力逐渐增强.

2.3 生物结皮土壤 CO₂ 通量的日变化

生物结皮对土壤 CO₂ 通量的影响具有明显的日变化特征. 由图4可以看出,在遮光和光照条件下,裸地的日变化趋势为单峰曲线,在 12:00 左右出现峰值,为 2.03 μmol CO₂ · m⁻² · s⁻¹. 在遮光条件下,藻结皮和藓结皮土壤 CO₂ 通量日变化趋势与裸地相似,在 12:00 左右达到峰值,为 1.95 和 1.57 μmol CO₂ · m⁻² · s⁻¹;而在光照条件下,藓结皮和藻结皮土壤 CO₂ 通量日变化总体上表现为先下降后升高再下降的趋势.

在 6:00—12:00 时段,藻结皮和藓结皮均可以吸收 CO₂,具有一定的光合能力,分别在 8:00 和 9:00 前后碳吸收最强,其 CO₂ 通量分别为 0.13 和 -1.02 μmol CO₂ · m⁻² · s⁻¹,为日最小值. 随后,碳吸收强度逐渐降低,藓结皮在 10:00 以后,土壤 CO₂ 通量逐渐变为正值,由碳的净吸收转变为净释放,在 12:00 左右达到峰值. 12:00 以后,随着表层土壤水分减少,藻结皮和藓结皮逐渐失去生理活性,进入休眠状态,此时光照条件下土壤 CO₂ 通量与遮光条件下无显著差异. 夜间裸地、藻结皮和藓结皮土壤 CO₂ 通量变化幅度均较弱,维持在 0.05 ~ 0.5 μmol CO₂ · m⁻² · s⁻¹ 范围内.

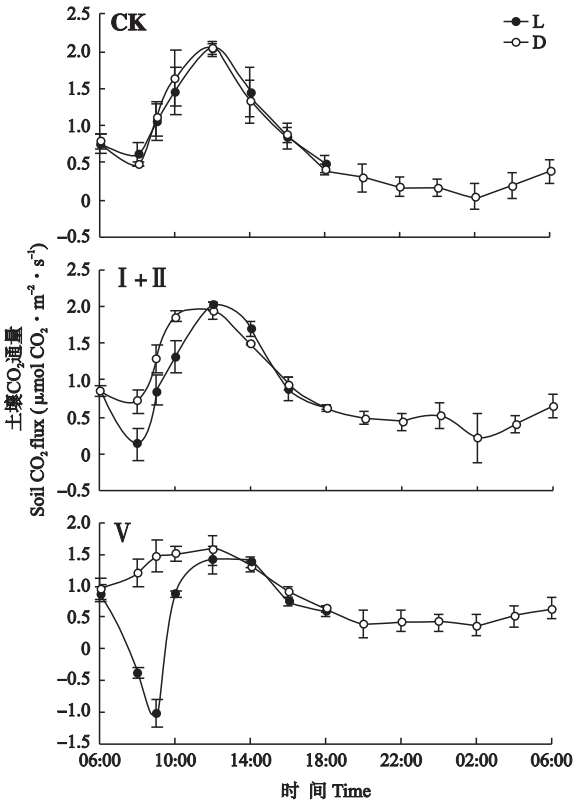


图4 生物结皮土壤 CO₂ 通量的日动态
Fig.4 Diurnal change of soil CO₂ flux of biological soil crusts.
L:光照 Light; D:遮光 Dark.

3 讨 论

3.1 生物结皮土壤-大气界面 CO₂ 交换过程

生物结皮属于变水植物,其生理代谢通常在结皮层湿润后才得以显现,其光合固碳能力的高低与结皮类型密切相关. Housman 等^[25]发现,在科罗纳多高原地区 (Colorado Plateau) 和奇瓦瓦沙漠地区 (Chihuahua Desert),演替后期生物结皮的光合速率较演替早期分别提高了 1.2 ~ 1.3 倍和 2.4 ~ 2.8 倍. 本研究发现,随着生物结皮发育演替,其碳吸收能力逐渐增强,土壤 CO₂ 通量逐渐减少,这与前人的研究结果一致.

然而,有关生物结皮对土壤碳交换的研究结果不尽相同. 齐玉春等^[6]利用静态暗箱对内蒙古沙地灌丛草地的研究表明,生物结皮增加了土壤的碳排放. Maestre 等^[7]对地中海半干旱草原的研究表明,生物结皮覆盖的土壤呼吸速率高于裸地土壤. Andrea 等^[38]对欧洲西南部伊比利亚半岛地区的研究发现,生物结皮对干旱生态区土壤碳排放有着重要贡献. 李玉强等^[8]对科尔沁沙地的研究表明,生物结皮可以抑制土壤呼吸. 但以上研究测定的气室均

为暗箱,疏漏了生物结皮的光合生理特性,特别是忽略了白天光照条件下有生理活性的生物结皮对土壤 CO₂ 通量的影响.生物结皮不仅是土壤与大气之间的一个界面层,还可以通过光合作用固定一定的 CO₂.本文结果表明,白天部分时段内采用透明气室法测定的生物结皮土壤 CO₂ 通量显著低于暗箱法测量的生物结皮土壤 CO₂ 通量(图 2),初步解释了这一现象.

3.2 生物结皮土壤 CO₂ 通量与环境因子的关系

不同环境下的生物结皮土壤 CO₂ 通量波动很大,光合速率的变化与温度、土壤含水量密切相关^[19,39-41].本研究表明,藓结皮、藻结皮和裸地土壤温度(2、5、10 cm)与近地面气温日变化趋势基本相同,均为单峰曲线,峰值出现在 12:00—14:00(图 5).土壤 0~2 cm 含水量的日变化趋势为先降低,在 16:00 后有小幅升高趋势;而土壤 6 cm 含水量无明显变化.其中,藻结皮土壤 2 cm 含水量在 14:00 左右已经达到最低值,为 1.8%;而藓结皮和裸地的最低值出现于 16:00 左右,分别为 2.2%、2.3%.其原因可能是在 6:00—8:00,空气湿度较大,藓结皮可以吸收空气中水分,增加土壤含水量、减少水分散失;而藻结皮表面颜色较深,随着土壤温度的升高,能够吸收大量热量,加之结皮层较薄,表层土壤水分散失较快.

土壤 CO₂ 通量与土壤温度、水分的相关分析表明,裸地、藻结皮和藓结皮土壤 CO₂ 通量与土壤 2、5

和 10 cm 温度(除裸地外)、近地面气温、土壤 2 cm 含水量之间均呈极显著或显著相关,其中裸地土壤 CO₂ 通量与土壤 2 cm 含水量呈极显著正相关,藓结皮、藻结皮土壤 CO₂ 通量与土壤 2 cm 含水量呈显著负相关.裸地、藻结皮、藓结皮土壤 CO₂ 通量与土壤 20 cm 温度、土壤 6 cm 含水量无显著相关性(表 1).说明土壤表层温度和含水量是生物结皮土壤 CO₂ 通量变化的主要影响因子^[38-41].

3.3 生物结皮对土壤 CO₂ 通量的影响

表 2 列出了生物结皮土壤在白天(6:00—18:00)和夜间(18:00—06:00)土壤 CO₂ 通量的累积量以及 24 h 内土壤呼吸总量.与裸地相比,在白天,藓结皮和藻结皮土壤 CO₂ 累计排放通量低于裸地,分别减少了 6.37 和 0.53 μmol CO₂ · m⁻² · s⁻¹;在夜间,藓结皮和藻结皮累计排放通量高于裸地,分别增加了 2.39 和 2.30 μmol CO₂ · m⁻² · s⁻¹.主要原因是在夜间,由于地表湿度逐渐增加,生物结皮逐渐复苏、恢复生理活性,通过呼吸作用增加了一部分碳排放.加之藻结皮颜色较深、表面吸热水分散失快,在 10:00 左右已经失去生理活性,藻结皮表面温度的迅速升高又促进了土壤微生物等的呼吸作用(图 4).总的来说,一天中 24 h 藻结皮的呼吸总量较裸地增加 7.7% 左右,而藓结皮较裸地减少了 29.6%.表明当生物结皮演替到以藓类植物为主的稳定期时,可以减少土壤碳排放.

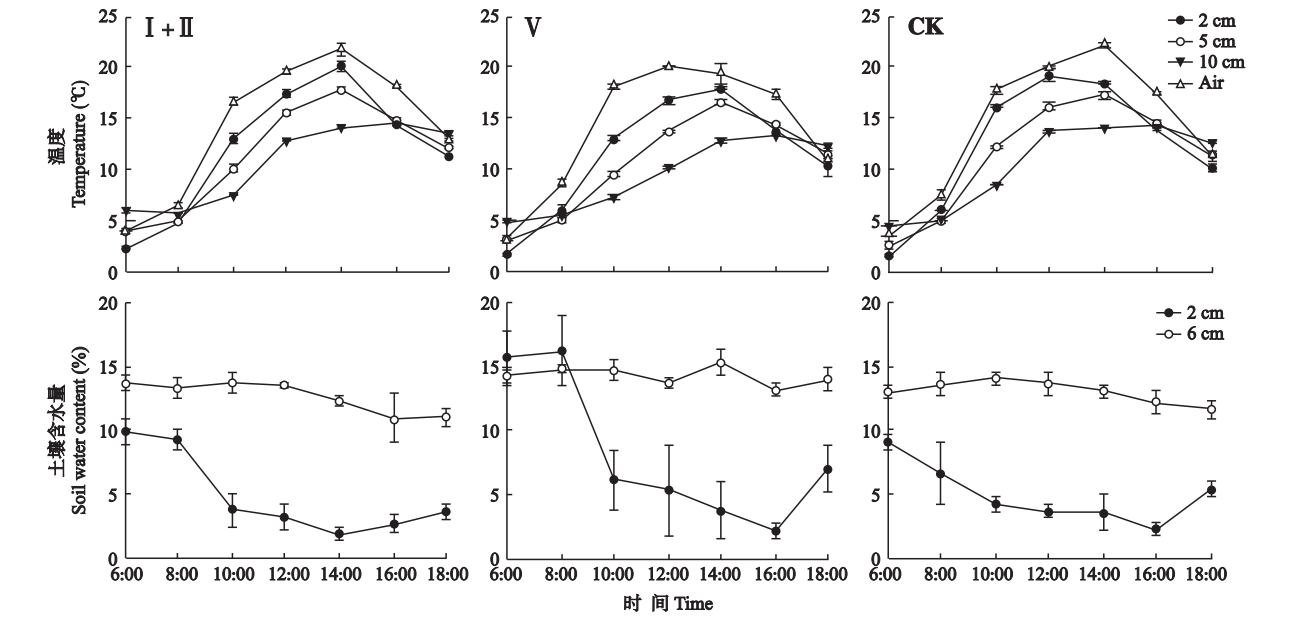


图 5 不同类型生物结皮的土壤温、湿度和近地面气温日变化
Fig. 5 Diurnal change of soil temperature and soil moisture, surface air temperature of different types of biological soil crusts.

表 1 土壤 CO₂ 通量与温度、水分的相关性
Table 1 Relativity between soil CO₂ flux with temperature and water contents

类型 Type	土壤温度 Soil temperature (℃)				土壤含水量 Soil moisture (%)		近地面气温 Surface air temperature (℃)
	2 cm	5 cm	10 cm	20 cm	2 cm	6 cm	
CK	0.584 **	0.445 **	0.021	-0.236	0.487 **	-0.327	0.648 **
I	0.747 **	0.625 **	0.415 *	-0.110	-0.441 *	0.326	0.714 **
II	0.640 **	0.651 **	0.556 **	0.289	-0.582 **	-0.176	0.628 **

CK:裸地 Bare soil; I :藻结皮 Cyanobacteria crust; II :藓结皮 Moss crust. 下同 The same below. * $P<0.05$; ** $P<0.01$.

表 2 生物结皮土壤 CO₂ 通量日动态
Table 2 Diurnal change of soil CO₂ flux of biological soil crusts in 24 hours ($\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

类型 Type	白天 Daytime		夜间 Nighttime		日均呼吸速率 Mean diurnal respiration rate	日呼吸总量 Total diurnal flux
	平均呼吸速率 Mean respiration rate	累积通量 Total flux	平均呼吸速率 Mean respiration rate	累积通量 Total flux		
CK	1.09	13.08	0.26	3.16	0.74	17.66
I	1.05	12.55	0.46	5.46	0.79	19.03
II	0.56	6.71	0.46	5.54	0.52	12.43

4 结 论

光照条件下,生物结皮较除去生物结皮显著降低了土壤 CO₂ 通量,其中藻结皮和藓结皮分别下降了 92% 和 305%,生物结皮对土壤 CO₂ 通量的减小程度与生物组成及生物量有关,其中深色藻结皮和藓结皮的土壤 CO₂ 通量分别较裸地减少了 141%、484%。

生物结皮土壤 CO₂ 通量日变化呈降低-升高-降低的趋势,而裸地 CO₂ 通量日变化趋势呈单峰曲线;藻结皮、藓结皮分别在 8:00 和 9:00 前后出现碳吸收高峰,其 CO₂ 通量分别为 0.13 和-1.02 $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,一天中藻结皮的碳排放较裸地增加 7.7%,而藓结皮较裸地减少了 29.6%。

致谢 本研究得到中国科学院安塞水土保持综合试验站的支持,特此致谢。

参考文献

[1] Chang Z-Q (常宗强), Feng Q (冯 起), Si J-H (司建华), *et al.* Influence of soil moisture-temperature conditions on surface CO₂ efflux in desert steppe of the Qilian Mountains, the Northwest of China. *Arid Land Geography* (干旱区地理), 2007, **30**(6): 812–819 (in Chinese)

[2] Fu G (付 刚), Shen Z-X (沈振西), Zhang X-Z (张宪洲), *et al.* Respondence of grassland soil respiration to global change. *Progress in Geography* (地理科学进展), 2010, **29**(11): 1391–1399 (in Chinese)

[3] Thomas AD, Hoon SR, Linton P. Carbon dioxide fluxes from cyanobacteria crusted soils in the Kalahari. *Applied*

Soil Ecology, 2008, **39**: 254–263

[4] Li X-R (李新荣), Zhang Y-M (张元明), Zhao Y-G (赵允格). A study of biological soil crusts: Recent development, trend and prospect. *Advances in Earth Science* (地球科学进展), 2009, **24**(1): 11–24 (in Chinese)

[5] Belnap J, Phillips SL, Flint S, *et al.* Global change and biological soil crusts: Effects of ultraviolet augmentation under altered precipitation regimes and nitrogen additions. *Global Change Biology*, 2008, **14**: 670–686

[6] Qi Y-C (齐玉春), Dong Y-S (董云社), Jin Z (金钊), *et al.* Effects of biological soil crust on soil respiration characteristics in sandy shrubland in Inner Mongolia, China. *Scientia Geographica Sinica* (地理科学), 2010, **6**(6): 898–903 (in Chinese)

[7] Maestre FT, Cortina J. Small-scale spatial variation in soil CO₂ efflux in a Mediterranean semiarid steppe. *Applied Soil Ecology*, 2003, **23**: 199–209

[8] Li Y-Q (李玉强), Zhao H-L (赵哈林), Zhao W (赵玮), *et al.* The influence of soil bio-crust on soil respiration. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2008, **22**(3): 106–109 (in Chinese)

[9] Beymer RJ, Klopatek JM. Potential contribution of carbon by microphytic crusts in pinyon juniper woodlands. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 1991, **5**: 187–198

[10] Eldridge DJ, Koen TB. Cover and floristics of microphytic soil crusts in relation to indices of landscape health. *Vegetatio*, 1998, **137**: 101–114

[11] Karnieli A, Gabai A, Ichoku C, *et al.* Temporal dynamics of soil and vegetation spectral responses in a semi-arid environment. *International Journal of Remote*

- Sensing*, 2002, **23**: 4073–4087
- [12] Belnap J, Phillips SL. Soil biota in an ungrazed grassland: Response to annual grass (*Bromus tectorum*) invasion. *Ecological Applications*, 2001, **11**: 1261–1275
- [13] Belnap J. Nitrogen fixation in biological soil crusts from southeast Utah, USA. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, **35**: 128–135
- [14] Delgado-Baquerizo M, Castillo-Monroy AP, Maestre FT, *et al.* Plants and biological soil crusts modulate the dominance of N forms in a semi-arid grassland. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, **42**: 376–378
- [15] Su Y-G (苏延桂), Li X-R (李新荣), Chen Y-W (陈应武), *et al.* Effects of elevated temperature and CO₂ on desert algal crust photosynthesis. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21** (9): 2217–2222 (in Chinese)
- [16] Lange OL, Green TGA, Meyer A, *et al.* Water relations and carbon dioxide exchange of epiphytic lichens in the Namib fog desert. *Flora: Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 2007, **202**: 479–487
- [17] Thomas AD, Hoon SR. Carbon dioxide fluxes from biologically-crusts Kalahari Sands after simulated wetting. *Journal of Arid Environments*, 2010, **74**: 131–139
- [18] Wilske B, Burgheimer J, Karnieli A, *et al.* The CO₂ exchange of biological soil crusts in a semiarid grass-shrubland at the northern transition zone of the Negev Desert, Israel. *Biogeosciences*, 2008, **5**: 1411–1423
- [19] Grote EE, Belnap J, Housman DC, *et al.* Carbon exchange in biological soil crust communities under differential temperatures and soil water contents: Implications for global change. *Global Change Biology*, 2010, **16**: 2763–2774
- [20] Chen S-Q (陈四清), Cui X-Y (崔骁勇), Zhou G-S (周广胜), *et al.* Study on the CO₂ release rate of soil respiration and litter decomposition in *Stipa grandis* Steppe in Xilin River basin, Inner Mongolia. *Acta Botanica Sinica* (植物学报), 1999, **41** (6): 645–650 (in Chinese)
- [21] Zhao Y-G (赵允格), Xu M-X (许明祥), Wang Q-J (王全九), *et al.* Physical and chemical properties of soil bio-crust on rehabilitated grassland in hilly Loess Plateau of China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2006, **17** (8): 1429–1434 (in Chinese)
- [22] Wang W (王 妮), Guo J-X (郭继勋). Contribution of CO₂ emission from soil respiration and from litter decomposition in *Lymus chinensis* community in northeast Songnen Grassland. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2002, **5** (5): 655–660 (in Chinese)
- [23] Zaady E, Kuhn U, Wilske B, *et al.* Patterns of CO₂ exchange in biological soil crusts of successional age. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, **32**: 959–966
- [24] Lange OL. Photosynthesis of soil-crust biota as dependent on environmental factors// Belnap J, Lange OL, eds. *Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management*. Berlin: Springer, 2003: 217–240
- [25] Housman DC, Powers HH, Collins AD, *et al.* Carbon and nitrogen fixation differ between successional stages of biological soil crusts in the Colorado Plateau and Chihuahuan Desert. *Journal of Arid Environments*, 2006, **66**: 620–634
- [26] Chang RY, Fu BJ, Liu GH, *et al.* Soil carbon sequestration potential for ‘grain for green’ project in Loess Plateau, China. *Environmental Management*, 2011, **48**: 1158–1172
- [27] Post WM, Kwon KC. Soil carbon sequestration and land-use change: Processes and potential. *Global Change Biology*, 2000, **6**: 317–327
- [28] Chen LD, Gong J, Fu BJ, *et al.* Effect of land use conversion on soil organic carbon sequestration in the loess hilly area, Loess Plateau of China. *Ecological Research*, 2007, **22**: 641–648
- [29] Wang YF, Fu BJ, Liu YH, *et al.* Effects of vegetation restoration on soil organic carbon sequestration at multiple scales in semi-arid Loess Plateau, China. *Catena*, 2011, **85**: 58–66
- [30] Zhao Y-G (赵允格), Xu M-X (许明祥), Belnap J. Response of biocrusts photosynthesis to environmental factors: A possible explanation of the spatial distribution of biocrusts in the hilly Loess Plateau region of China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2010, **30** (17): 4668–4675 (in Chinese)
- [31] Xiao B (肖 波), Zhao Y-G (赵允格), Xu M-X (许明祥), *et al.* Soil nutrients accumulation and their loss risk under effects of biological soil crust in Loess Plateau of northern Shaanxi Province, China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2008, **19** (5): 1019–1026 (in Chinese)
- [32] Huang Y-M (黄懿梅), An S-S (安韶山), Liu L-J (刘连杰), *et al.* Soil basal respiration response to grass vegetation restoration and its affecting factors in the loess hilly-gully region. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 2009, **17** (25): 862–869 (in Chinese)
- [33] Li H-S (李红生), Liu G-Q (刘广全), Wang H-Z (王鸿喆), *et al.* Seasonal changes in soil respiration and the driving factors of four woody plant communities in the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2002, **28** (9): 4099–4106 (in Chinese)
- [34] Liu F (刘 芳), Wang W (王 炜), Piao S-J (朴顺

- 姬), *et al.* New method for measuring evapotranspiration and CO₂ absorption in grassland communities using Li-6262 CO₂/H₂O analyser. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2007, **31**(5): 892–896 (in Chinese)
- [35] Li X-B (李熙波), Yang Y-S (杨玉盛), Zeng H-D (曾宏达), *et al.* Comparison of CO₂ net exchange rate by different methods in subtropical manilagrass lawn ecosystem. *Journal of Subtropical Resources and Environment* (亚热带资源与环境学报), 2008, **3**(4): 16–22 (in Chinese)
- [36] Zhang H-X (张红星), Wang X-K (王效科), Song S-Y (宋淑亚), *et al.* Multi-channel automated chamber system for continuously monitoring CO₂ exchange between agro-ecosystem or soil and the atmosphere. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2007, **27**(4): 1273–1282 (in Chinese)
- [37] Yuan F-H (袁凤辉), Guan D-X (关德新), Wu J-B (吴家兵), *et al.* Gas exchange measurement system based on chamber method and its applications in gas exchange research of plant ecosystems. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2009, **20**(6): 1495–1404 (in Chinese)
- [38] Andrea P, Fernando T, Ana R, *et al.* Biological soil crust microsites are the main contributor to soil respiration in a semiarid ecosystem. *Ecosystems*, 2011, **14**: 835–847
- [39] Tang Y-F (唐燕飞), Wang G-B (王国兵), Ruan H-H (阮宏华). A review on the sensitivity of soil respiration to temperature. *Journal of Nanjing Forestry University* (Natural Sciences) (南京林业大学学报·自然科学版), 2008, **32**(1): 124–128 (in Chinese)
- [40] Liu S-H (刘绍辉), Fang J-Y (方精云). Effect factors of soil respiration and the temperature's effects on soil respiration in the global scale. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 1997, **17**(5): 469–476 (in Chinese)
- [41] Chen Q-S (陈全胜), Li L-H (李凌浩), Han X-G (韩兴国), *et al.* Influence of temperature and soil moisture on soil respiration of a degraded steppe community in the Xilin River basin of Inner Mongolia. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 2003, **27**(2): 202–209 (in Chinese)

作者简介 王爱国,男,1985年生,硕士研究生.主要从事干旱生态系统碳通量研究. E-mail: wag815@nwsuaf.edu.cn

责任编辑 李凤琴
