

毛乌素沙地生物结皮覆盖土壤碳通量 日动态特征及其影响因子

李炳垠¹, 卜崇峰^{1,3}, 李宜坪², 李新凯³

(1. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学

水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 3. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要:生物结皮是干旱半干旱地区重要的地表景观,它能够进行光合作用和呼吸作用,对荒漠生态系统的碳循环具有重要影响。研究以毛乌素沙地广泛分布的藓类、藻类结皮为研究对象,采用 Li-8100 土壤碳通量观测系统,探讨了不同类型生物结皮日变化特征及其与环境因子之间关系。结果表明:(1) 生物结皮具有较高生理活性时,能够显著降低土壤 CO₂ 通量,藓类结皮的土壤呼吸速率和光合速率均显著($p < 0.01$)高于藻类结皮。(2) 生物结皮光合速率日变化趋势近似为双峰曲线,峰值出现在 9:00,16:00 左右;生物结皮土壤呼吸速率的日变化趋势呈单峰曲线,于 12:00 左右达到峰值。(3) 相关分析表明,2 cm 深度处的土壤含水量和空气湿度对生物结皮光合速率影响最为显著;2 cm 处的土壤温度和含水量对生物结皮土壤呼吸速率影响最为显著。

关键词:毛乌素沙地; 生物结皮; 土壤碳通量; 环境因子

中图分类号:X171.1; S154.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)04-0174-07

Diurnal Dynamic Characteristics and Influencing Factors of the Carbon Flux in Biocrusted Soil in Mu Us Sandland

LI Bingyin¹, BU Chongfeng^{1,3}, LI Yiping², LI Xinkai³

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Biocrust, a community of cyanobacteria, lichens, and mosses that live on the soil surface, is a critical part of land cover types in most arid and semi-arid regions. It can play a significant role in carbon fluxes and exchange in desert ecosystems through their own photosynthesis and respiration. In the present study, we used two dominant biocrust types (moss and algae) found in the Mu Us Sandland. The diurnal dynamic of soil carbon flux under the effects of biocrusts at different succession stages was measured by using a modified LI-8100 automated CO₂ flux system, and the effects of environmental factors on photosynthesis and respiration of biocrust were analyzed. The main results include: (1) the biocrust with physiological activity can significantly reduce CO₂ flux of soil and both the photosynthetic rate (P_n) and respiration rate (DR) of moss crust were significantly higher ($p < 0.01$) than those of the algae crust; (2) the diurnal variation of photosynthetic rate of biocrust was a typical bimodal curve, with the peaks appearing at 9:00 and 16:00; and the diurnal variation of soil respiration rate followed a single-peak curve, with the peaks appearing at 12:00; (3) the correlation analysis result indicated that the soil water content in the depth of 2 cm and air humidity had the most significant effect on the photosynthetic rate of the biocrust; the soil temperature and water content in the depth of 2 cm had the most significant effect on the respiration rate.

Keywords: Mu Us Sandland; biocrust; carbon flux; environmental factors

收稿日期: 2017-08-06

修回日期: 2017-08-16

资助项目: 国家自然科学基金应急管理项目(41541008); 国家重点研发计划项目(2017YFC0504700); 杨凌示范区协同创新项目(2017CXY-08); 中科院西部之光项目(2014-91)

第一作者: 李炳垠(1992—), 男, 陕西榆林人, 硕士研究生, 研究方向为生物结皮及风蚀防治。E-mail: 656335387@qq.com

通信作者: 卜崇峰(1977—), 男, 陕西榆林人, 博士, 主要从事生物土壤结皮和水土保持工程研究。E-mail: buchongfeng@163.com

生物结皮是由隐花植物如蓝藻、绿藻、苔藓、地衣和其他土壤微生物通过菌丝体、假根和分泌物等与土壤表层颗粒胶结而成的复合体^[1],广泛分布于寒区和旱区的严酷环境中,覆盖度可达 60%~70%^[2]。它的存在可以改善土壤肥力,提高土壤抗蚀性,改变土壤水文过程,影响土壤—大气之间的水分、气体交换等^[3]。作为土壤—大气界面层具有光合活性的一部分,生物结皮可以通过光合作用,增加土壤表层有机碳,并影响土壤呼吸作用^[4-5],成为干旱半干旱地区生态系统碳循环的重要组成部分。

荒漠生态系统作为干旱、半干旱地区的重要组成部分,对维持局地生态系统健康和安全有着不可替代的作用,不仅对整个生态系统的碳循环有影响,也是重要的碳库^[6]。生物结皮是荒漠生态系统重要的碳源,其最大净光合速率与同一生物气候区旱生灌木的光合速率相当^[7-8]。以具鞘微鞘藻为主的结皮光合速率较低约为 1 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,而地衣和苔藓结皮光合速率高达 10 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ^[9-10]。已开展的研究多集中于苔原地区、美国西南部莫哈维沙漠以及以色列内盖夫沙漠和我国的古尔班通古特沙漠、腾格里沙漠等地区^[11-13]。毛乌素沙地是我国旱区一个重要的地貌单元,盛产煤炭、石油、天然气、牧业较为发达,人为生产活动干扰强烈,生态脆弱。该区生物结皮广泛分布,部分地区覆盖度达到了 70%。但相关研究工作起步较晚,主要集中在基于地块试验的生物结皮培育恢复、发育特征、风蚀和水蚀效应方面。我们发现,有关该区域生物结皮土壤 CO₂ 通量方面的研究报道^[14-15]中,缺乏对不同类型生物结皮土壤呼吸速率、光合速率差异、日变化特征及其与环境因子之间的关系研究。此外,传统的遮光测定 CO₂ 通量方法忽略了生物结皮的光合活性,无法测定自然状况下生物结

皮土壤 CO₂ 通量值,而光照条件下测定的 CO₂ 通量,能够客观地反映生物结皮覆盖下土壤碳通量的真实状况^[16]。

本研究在野外自然条件下,以藻类、藓类结皮为研究对象,研究毛乌素沙地不同类型生物结皮土壤呼吸速率、光合速率差异、日变化特征及其与环境因子之间的关系,旨在理解生物结皮在荒漠生态系统碳循环中的作用,通过碳通量的观测为今后区域碳储量的计算服务,进而为区域碳平衡中“源—汇”关系的研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区地处毛乌素沙地西南部,位于内蒙古自治区鄂托克前旗敖勒召其镇,地理坐标为东经 107°50′40.51″,北纬 38°05′53.39″,海拔 1 344 m。该区气候干旱少雨,风大沙多,日照充足,属中温带温暖型干旱、半干旱大陆性气候。年均气温 7.1℃,最低月平均气温 -10.2℃,最高月平均气温 22.4℃。降水年际变率大,地区、季节分布不均匀。年平均降水量 265 mm,主要集中在 6—9 月,占全年降雨量的 70%,年均蒸发量 2 514.8 mm。样地位于固定沙丘顶部,样地内生物结皮发育良好,分布广泛,主要有藓类和藻类两种典型阶段生物结皮。土壤类型为风沙土,植被种类较少,主要为沙蒿 (*Artemisia ordosica*)、沙柳 (*Salix cheilophila*)。样地生物结皮概况及土壤理化性质见表 1—2。

表 1 研究区生物结皮概况

结皮类型	盖度/%	厚度/mm	生物量/(mg·cm ⁻²)
藓类结皮	>85	11.51±0.34	4.85±0.37
藻类结皮	>80	8.61±0.27	3.64±0.24

表 2 研究区土壤理化性质

类型	土层	有机质/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	全钾/ (g·kg ⁻¹)	速效磷/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)	pH 值
藓类结皮	结皮层	23.20	0.96	0.28	2.15	6.35	156.20	8.31
	0—5 cm 层	5.52	0.28	0.15	1.32	5.13	113.15	8.65
藻类结皮	结皮层	19.50	0.57	0.16	1.79	4.76	76.85	8.03
	0—5 cm 层	3.33	0.12	0.09	1.15	4.14	53.42	8.12
裸地	0—5 cm 层	4.86	0.15	0.12	0.77	3.63	40.65	9.12

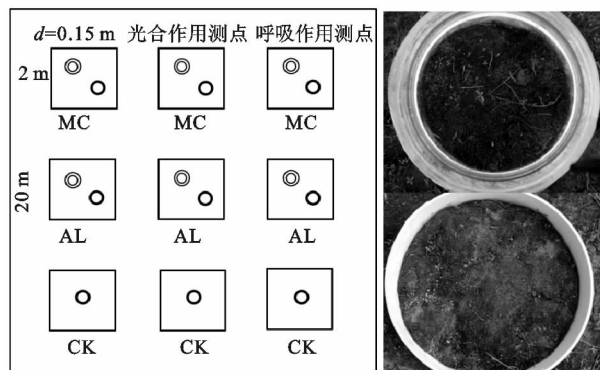
1.2 研究方法

1.2.1 样地布设 试验于 2016 年 7—10 月进行,根据生物结皮的演替过程,结合野外调查生物结皮的发育状况,选择人为扰动少、发育良好的藓类、藻类两种典型阶段生物结皮为试验对象,其中藓类结皮的盖度约为 85%,藻类结皮盖度约为 80%(表 1)。对于藓、

藻类结皮分别设置 3 个 2 m×2 m 的样方(图 1),以裸地为对照。在每个样方内,根据测量的指标不同,分别设置 1 个 PVC 土壤环和 1 个有机玻璃土壤环,用来测定土壤呼吸速率和生物结皮光合速率,放置时保证环内结皮完整。

1.2.2 土壤碳通量测定 选取藓类结皮、藻类结皮,

以裸地为对照,在天气晴朗的3个连续观测日内分别对各样方生物结皮土壤呼吸速率和净碳通量进行连续观测,测定时间为7:00—19:00,观测频次为每2 h一次,同步测定2,5,10 cm处土壤温度和湿度、近地面气温、空气湿度以及太阳有效辐射。



注:MC—藓类结皮、AL—藻类结皮、CK—裸地对照、下同。

图1 样方布设

土壤 CO_2 通量测定采用 Li-8100 土壤碳通量系统连接便携测量室 8100-103 和有机玻璃气室(透光率为 95%)^[17]。其中,呼吸速率(DR)即在遮光条件下,采用便携式测量室 8100-103(金属外罩,保证测定在黑暗条件下进行)测定,测定的 CO_2 通量值为生物结皮呼吸值与下层土壤呼吸值总和。净碳通量(NCF)即在光照条件下,采用自制的有机玻璃气室测定,测定的 CO_2 通量值为生物结皮的光合值、呼吸值与下层土壤的呼吸值的总和。根据呼吸速率(DR)和净碳通量(NCF)可以计算得到生物结皮光合速率(P_n)^[18]。

$$P_n = \text{DR} - \text{NCF} \quad (1)$$

式中: P_n 为正值, P_n 越大,光合速率越大,碳吸收能力越强。

1.2.3 环境因子的测定 利用数字式地温计(Man-nix™ USA)测定土壤 2,5,10 cm 处的温度;用 TDR (TRIME PICO32)测定土壤 2,5,10 cm 处的土壤水分;同时利用数字式温湿度计(GM1361)测定气温和空气湿度;测定太阳有效辐射用 CMP3 总辐射表。

1.3 数据处理与分析

数据分析和图表绘制分别在 Excel, SPSS 和 Origin 中进行,利用单因素方差分析,分析不同处理之间的差异显著性,用 Pearson 相关系数分析生物结皮土壤 CO_2 通量与环境因子之间的相关性。

2 结果与分析

2.1 不同活性生物结皮土壤净碳通量的差异

试验选取 7:00(湿润期),15:00(干燥期)的净碳通量数据进行分析,此时空气湿度分别为 66.4%,16.9%,太阳有效辐射分别为 400,1 250 $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

结果表明(图 2),藓类结皮(MC)、藻类结皮(AL)和裸地(CK)的土壤 CO_2 通量在湿润条件下较干燥条件下,分别降低 191.7%,150.6%和 30.9%。早晨 7:00 空气湿度较高,太阳辐射较弱,此时生物结皮生理活性较高,能够通过光合作用固定 CO_2 ,从而显著降低土壤 CO_2 通量($p < 0.01$),表现为 CO_2 的净吸收;下午 15:00 时,空气湿度较低,太阳辐射较强,生物结皮进入休眠状态,表现为 CO_2 的净释放。因此,生物结皮在具有较高生理活性时,能够显著降低土壤 CO_2 通量。

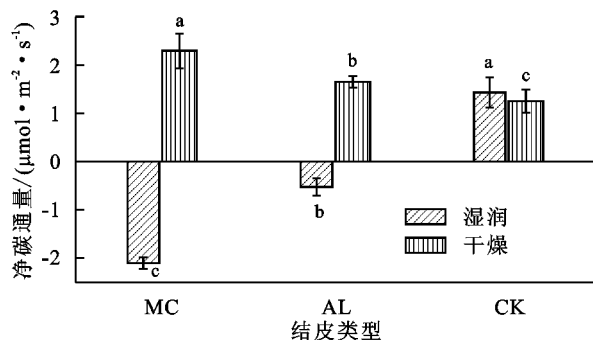


图2 不同活性生物结皮土壤净碳通量的差异

2.2 不同演替阶段生物结皮土壤碳通量差异

试验选取藓类、藻类结皮、裸地 3 种处理的日均土壤碳通量数据进行分析,结果表明(图 3),藓、藻类结皮覆盖的土壤日均呼吸速率(DR)较裸地显著增加($p < 0.05$),分别为 1.83,1.55 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,表明生物结皮覆盖的土壤呼吸速率随着结皮演替逐渐增加。生物结皮的光合作用逐渐增强,藓类结皮的日均光合速率(P_n)达 0.42 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,藻类结皮光合作用较弱。藓、藻类结皮的日均净碳通量(NCF)分别为 1.38,1.28 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,表现为 CO_2 的净释放。因此,随着生物结皮的发育演替,生物结皮覆盖的土壤呼吸速率和光合速率都呈现递增趋势。

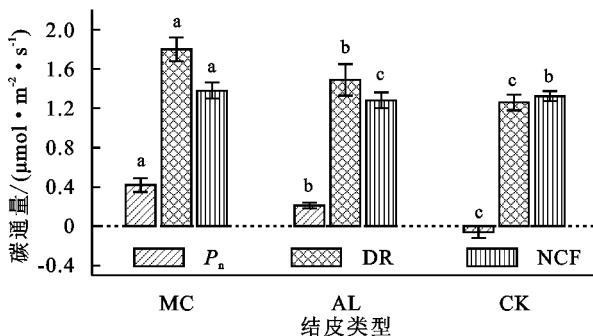


图3 不同类型生物结皮土壤碳通量差异

2.3 生物结皮覆盖土壤碳通量的日动态特征

由图 4 可以看出,生物结皮覆盖土壤呼吸速率和光合速率均具有明显日变化规律。光合速率日变化趋势近似为双峰曲线(图 4A),藓、藻类结皮在上午 9:00 左右出现第一次峰值,分别为 0.72,0.54 $\mu\text{mol}/$

($\text{m}^2 \cdot \text{s}$);第二次峰值出现在 16:00 左右,分别为 0.19,0.04 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,光合速率最小值出现在 13:00—17:00。生物结皮光合速率的日变化总体呈现先升高后下降再升高的趋势。土壤呼吸速率的日变化趋势呈现单峰曲线(图 4B),12:00 左右达到峰值,此时,藓、藻类结皮的土壤呼吸速率分别为 2.03,1.81 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;裸地土壤呼吸速率日变化趋势也呈单峰曲线,在 14:00 左右达到峰值为 1.52 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。生物结皮覆盖土壤呼吸速率较裸地在不同时段均显著增加($p<0.01$),呈现:藓类结皮>藻类结皮>裸地。净碳通量呈现单峰曲线的变化趋势(图 4C),峰值出现在 15:00 左右,此时,藓、藻类结皮分别为 1.91,2.06 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

2.4 生物结皮覆盖土壤碳通量和环境因子的关系

图 5A—5C 分别是藓、藻类结皮和裸地的 2,5,10 cm 土壤水分含量的日变化趋势。生物结皮覆盖的 2 cm 土壤水分随时间推移逐渐减少,在各个时段,生物结皮的土壤水分含量均显著高于裸地($p<0.05$),表明生物结皮具有一定保水能力。由图 5D—5I 可知,生物结皮覆盖土壤温度和近地面气温日变化趋势均为单峰曲线,峰值出现在 15:00,13:00 左右,裸地的最高温度显著高于生物结皮($p<0.05$)。太阳有效辐射在 14:00 左右至峰值 1 740 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,空气湿度呈现“V”形变化,在 15:00 左右达到最低值(16.8%),之后开始回升。

相关分析表明(表 3),生物结皮的光合速率与 2,5,10 cm 处的土壤温度以及近地面气温均呈显著($p<0.05$)或极显著($p<0.01$)负相关,与 2,5 cm 处的土壤含水量以及空气湿度呈显著正相关,其中 2 cm 处的土壤含水量影响最为显著,其次是空气湿度。生物结皮土壤呼吸速率与 2,5 cm 处的土壤温度以及 2 cm 处的土壤含

水量呈显著正相关关系,其中,2 cm 处的土壤温度影响最显著,其次是 2 cm 处的土壤含水量。

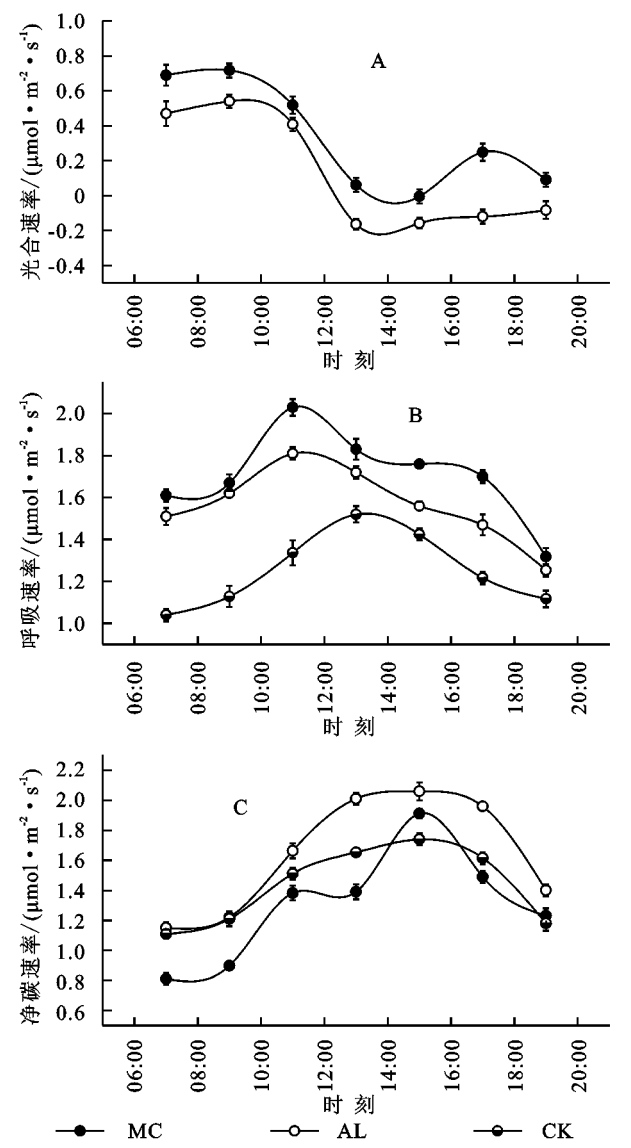


图 4 生物结皮覆盖土壤碳通量的日动态特征

表 3 生物结皮覆盖土壤碳通量与环境因子的相关性

类型		土壤温度/℃			土壤含水量/%			空气	近地面
		2 cm	5 cm	10 cm	2 cm	5 cm	10 cm	湿度/%	气温/℃
土壤呼吸速率	MC	0.528*	0.479*	0.468	0.415*	0.174	0.132	-0.144	0.367
	AL	0.673*	0.435*	0.341	0.774*	0.632*	0.372	-0.142	0.497
	CK	0.824**	0.730*	0.504	0.562	0.179	0.143	0.745*	0.568
生物结皮光合速率	MC	-0.853**	-0.814**	-0.785**	0.866*	0.617*	0.595	0.658*	-0.755*
	AL	-0.794*	-0.862*	-0.83*	0.787*	0.769*	0.652	0.742*	-0.627

注: * 代表 $p<0.05$, ** 代表 $p<0.01$, 自由度为 7。

3 讨论

土壤水分是影响荒漠地区植物种类以及生理活性的关键因素,对于生物结皮而言,水分能够直接影响其光合作用和呼吸作用。本研究表明,生物结皮土壤 CO_2 通量在湿润条件下较干燥条件下平均减少了

171%;干燥条件下,生物结皮土壤 CO_2 通量较裸地显著增加,这与王爱国等^[19]的研究结论一致。生物结皮在湿润条件下具有生理活性,能够通过光合作用固定 CO_2 ,从而显著的降低土壤 CO_2 通量($p<0.05$),表现为 CO_2 的净吸收;在干燥情况下,生物结皮生理活动停止,处于休眠状态,此时生物结皮土壤 CO_2 通量显著高于裸地,表现为 CO_2 的净释放。

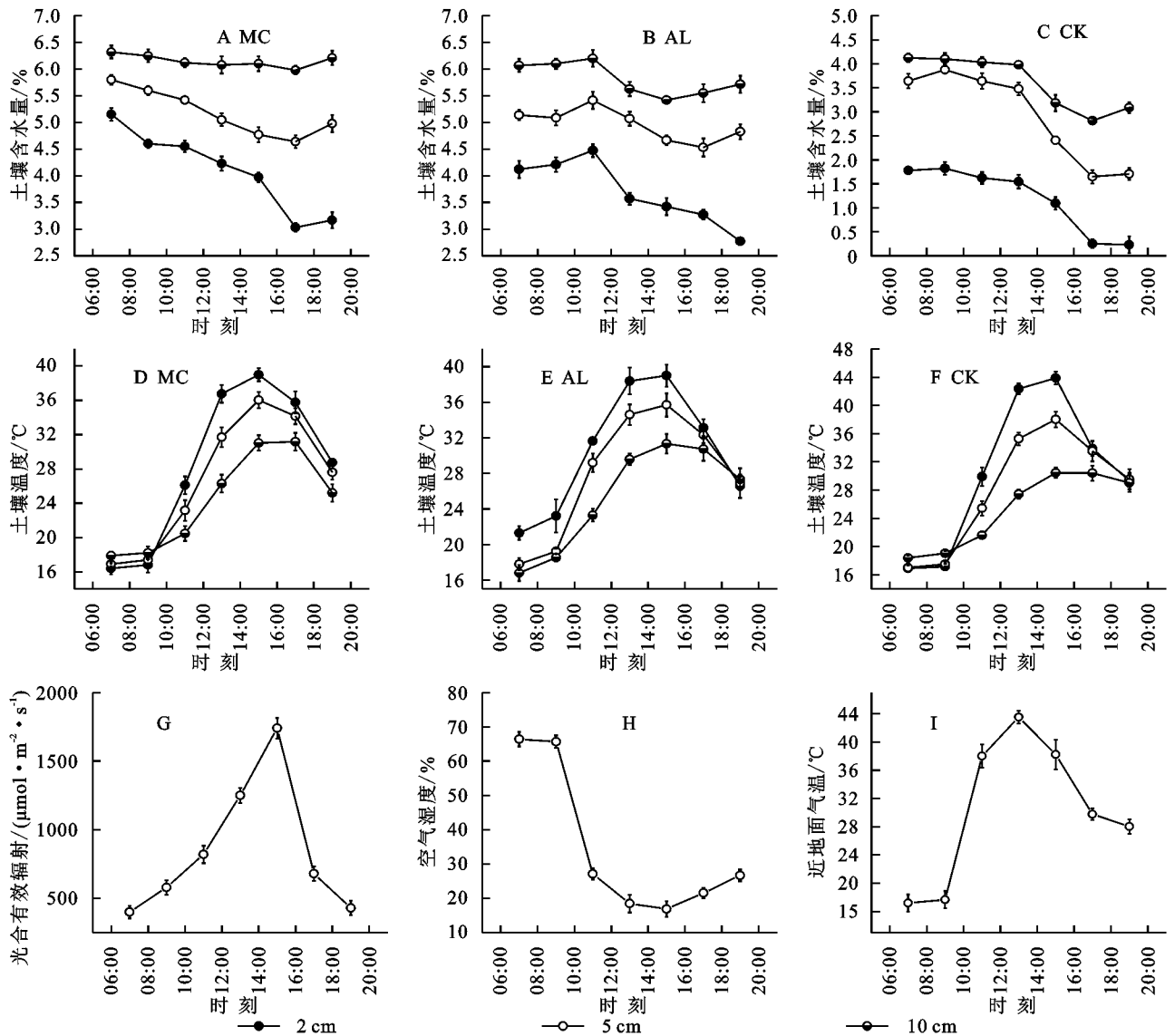


图 5 生物结皮覆盖土壤碳通量和环境因子的关系

多数研究表明生物结皮中藓类、地衣类、藻类结皮的构成比例能反映其发育程度,存在着裸地—藻类结皮—藓类结皮的明显发育演替过程^[20-21],不同发育类型生物结皮的光合速率和呼吸速率存在明显差异,演替后期生物结皮的光合速率较前期增加 2.4~2.8 倍,呼吸速率增加了 0.32~0.5 倍^[19,22]。本研究发现,随着生物结皮的发育演替,生物结皮的土壤呼吸速率和光合速率都呈现递增趋势。在夏季晴朗天气,植物光合速率日变化多呈现“双峰”曲线,并在正午时出现“午休”现象^[23]。饶本强等^[24]研究表明,蓝藻结皮光合速率在 9:00—9:30, 15:00—15:30 分别出现峰值和明显的“午休”现象,本研究同样发现生物结皮光合速率呈现类似的“双峰”曲线。生物结皮光合速率出现双峰值和明显的“午休”现象可能是由于在夏季晴朗天气情况下,生物结皮光合作用出现在大气湿度较高、光强较低的清晨和下午,由于正午的时候光照最强、温度最高、湿度最低,生物结皮光合速

率急速下降,出现光合“午休”现象,光合“午休”可能是生物结皮应对沙漠极端气候的一种自我调节行为。土壤呼吸速率和净碳通量的日变化趋势均呈“单峰”曲线,与王爱国等^[16]的研究结果基本一致。生物结皮土壤呼吸需要适宜的水分和土壤温度,分析表明,生物结皮土壤呼吸速率和土壤水分含量呈现正相关关系,沙地土壤水分含量在一天之中处于不断下降趋势。生物结皮的土壤呼吸最适温度约为 20~30℃,超过最适温度,呼吸速率随着土壤温度的增加呈现递减趋势。图 4 中生物结皮的最大呼吸速率位于 11:00 左右,此时的土壤温度介于 20~30℃,土壤温度最大值出现在 15:00 左右。因此,生物结皮土壤呼吸速率日变化呈现“单峰”曲线是土壤水分以及土壤温度等综合作用的结果。15:00 之前,土壤温度起主导作用,土壤呼吸速率先增大后减小;15:00 之后,土壤温度开始回落,但土壤水分含量持续降低,导致呼吸速率持续降低。生

物结皮净碳通量受到光合速率和呼吸速率变化的综合影响,但光合速率对光照、水分等变化较为敏感,且易于出现午休现象,因此,生物结皮净碳通量的日变化趋势和呼吸速率类似,呈现“单峰”曲线。

生物结皮光合作用受到多种环境因素影响,尤其是水分和温度的影响。水分是影响生物结皮光合作用最重要的因子,由于水分限制,荒漠生态系统中的生物结皮大约90%的时间处于休眠状态^[25]。本研究发现土壤2,5,10 cm处土壤含水量变化趋势基本一致,均为单峰曲线,峰值出现在13:00—15:00,生物结皮光合速率与土壤水分(2,5 cm)以及空气湿度呈显著正相关,主要是因为生物结皮新陈代谢活动所需水分主要来源于表层土壤水分和空气中的水汽^[10]。当生物结皮具有生理活性时,温度是其光合速率主要限制因子,藓类结皮和藻类结皮光合作用的最适温度范围分别是20~25,15~20℃^[26-27],当土壤温度超过光合最适温度,生物结皮光合速率随着温度的升高逐渐降低。本研究表明,生物结皮光合速率和土壤温度以及近地面气温、呈显著负相关关系,可能是由于夏季沙地平均气温显著高于生物结皮光合最适温度,过高的温度对光合活性起到抑制作用。赵东阳^[28]、karsten^[29]等研究表明,当水分充足并且不成为限制因素的前提下,土壤温度与土壤呼吸速率呈显著正相关关系。本研究同样发现,在一定范围内,生物结皮覆盖土壤呼吸速率与土壤温度(2,5 cm)、土壤含水量(2 cm)呈现显著正相关关系,与空气湿度、近地面气温、太阳有效辐射等环境因子相关性不大。而管超等^[30]研究表明,随着土壤温度增高生物结皮土壤呼吸速率逐渐降低,可能是由于增温降低土壤水分含量,而土壤水分含量对土壤呼吸的影响大于土壤温度。因此,土壤表层温度和含水量是影响生物结皮覆盖土壤呼吸速率和光合速率的主要环境因子。

4 结论

生物结皮在具有生理活性时,能够显著降低土壤CO₂通量。随着生物结皮从藻类主导向藓类主导发育演替,光合速率和土壤呼吸速率都呈现递增趋势。光合速率日变化趋势近似为双峰曲线,藓、藻类结皮在上午9:00左右出现第一次峰值,分别为0.72,0.54 μmol/(m²·s);第二次峰值出现在16:00左右,分别为0.19,0.04 μmol/(m²·s);土壤呼吸速率的日变化趋势呈现单峰曲线,于12:00左右达到峰值,分别为2.03,1.81 μmol/(m²·s)。相关分析表明,表层土壤(0—5 cm)的温度和含水量是影响生物结皮覆盖土壤呼吸速率和光合速率的主要环境因子。

参考文献:

- [1] Guo Y, Zhao H, Zuo X, et al. Biological soil crust development and its topsoil properties in the process of dune stabilization, Inner Mongolia, China [J]. *Environmental Geology*, 2008, 54(3): 653-662.
- [2] 肖波,赵允格,邵明安. 陕北水蚀风蚀交错区两种生物结皮对土壤理化性质的影响[J]. *生态学报*, 2007, 27(11): 4662-4670.
- [3] 张鹏,李新荣,张志山,等. 腾格里沙漠东南缘生物土壤结皮的固氮潜力[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(8): 2157-2164.
- [4] Su Y, Zhao X, Li A, et al. Nitrogen fixation in biological soil crusts from the Tengger desert, northern China [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2011, 47(3): 182-187.
- [5] 李玉强,赵哈林,赵玮,等. 生物结皮对土壤呼吸的影响作用初探[J]. *水土保持学报*, 2008, 22(3): 106-109.
- [6] 房世波,冯凌,刘华杰,等. 生物土壤结皮对全球气候变化的响应[J]. *生态学报*, 2008, 28(7): 3312-3321.
- [7] 苏延桂,李新荣,张志山,等. 干旱人工植被区藻结皮光合固碳的时间效应研究[J]. *土壤学报*, 2011, 48(3): 570-577.
- [8] Elbert W, Weber B, Büdel B, et al. Microbiotic crusts on soil, rock and plants: neglected major players in the global cycles of carbon and nitrogen[J]. *Biogeosciences Discussions*, 2009, 6(4): 6983-7015.
- [9] Garcia-Pichel F, Belnap J. Microenvironments and microscale productivity of cyanobacterial desert crusts [J]. *Journal of Phycology*, 1996, 32(5): 774-782.
- [10] Lange O L. Photosynthetic productivity of the epilithic lichen *Lecanora muralis*: long-term field monitoring of CO₂ exchange and its physiological interpretation—III. Diel, seasonal, and annual carbon budgets[J]. *Flora*, 2003, 198(4): 277-292.
- [11] Yu J, Glazer N, Steinberger Y. Carbon utilization, microbial biomass, and respiration in biological soil crusts in the Negev Desert [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2014, 50(2): 285-293.
- [12] 李刚,刘立超,高艳红,等. 降雪对生物土壤结皮光合及呼吸作用的影响[J]. *中国沙漠*, 2014, 34(4): 998-1006.
- [13] 吴林,苏延桂,张元明. 模拟降水对古尔班通古特沙漠生物结皮表观土壤碳通量的影响[J]. *生态学报*, 2012, 32(13): 4103-4113.
- [14] Feng W, Zhang Y, Jia X, et al. Impact of environmental factors and biological soil crust types on soil respiration in a desert ecosystem[J]. *Plos One*, 2014, 9(7): e102954.
- [15] 齐玉春,董云社,金钊,等. 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*, 2010(6): 898-903.
- [16] 王爱国,赵允格,许明祥,等. 黄土高原不同侵蚀区生物

- 结皮土壤 CO₂ 通量日动态特征及其温度敏感性[J]. 环境科学学报, 2013(9):2605-2611.
- [17] Guevara M L D, Lázaro R, Quero J L, et al. Easy-to-make portable chamber for in situ, CO₂, exchange measurements on biological soil crusts[J]. *Photosynthetica*, 2015, 53(1):72-84.
- [18] 辜晨, 贾晓红, 吴波, 等. 高寒沙区生物土壤结皮覆盖土壤碳通量对模拟降水的响应[J]. 生态学报, 2017, 37(13):1-11.
- [19] 王爱国, 赵允格, 许明祥, 等. 黄土丘陵区不同演替阶段生物结皮对土壤 CO₂ 通量的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(3):659-666.
- [20] 胡春香, 刘永定. 土壤藻生物量及其在荒漠结皮的影响因子[J]. 生态学报, 2003, 23(2):284-291.
- [21] Belnap J. Nitrogen fixation in biological soil crusts from southeast Utah, USA [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35(2):128-135.
- [22] Housman D C, Powers H H, Collins A D, et al. Carbon and nitrogen fixation differ between successional stages of biological soil crusts in the Colorado Plateau and Chihuahuan Desert[J]. *Journal of Arid Environments*, 2006, 66(4):620-634.
- [23] 童贯和. 不同供钾水平对小麦旗叶光合速率日变化的影响[J]. 植物生态学报, 2004, 28(4):547-553.
- [24] 饶本强, 王文欣, 吴易雯. 库布齐沙漠蓝藻结皮早期发育过程净光合速率变化特征及其影响因素[J]. 信阳师范学院学报:自然科学版, 2013, 26(2):230-235.
- [25] Lange O L, Meyer A, Zellner H. Photosynthesis and water relations of lichen soil crusts: field measurements in the coastal fog zone of the Namib Desert[J]. *Functional Ecology*, 1994, 8(2):253-264.
- [26] 韩旭, 张鹏, 赵洋, 等. 生物土壤结皮光合固碳活性对水热因子的响应[J]. 兰州大学学报:自然科学版, 2016, 52(4):510-515.
- [27] Grote E E, Belnap J, Housman D C, et al. Carbon exchange in biological soil crust communities under differential temperatures and soil water contents: implications for global change[J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(10):2763-2774.
- [28] 赵东阳, 肖波, 郭成久, 等. 藓结皮对陕北黄土高原两种质地土壤呼吸的影响[J]. 生态学杂志, 2016, 35(5):1219-1225.
- [29] Karsten U, Holzinger A. Light, temperature, and desiccation effects on photosynthetic activity, and drought-induced ultrastructural changes in the green alga *Klebsormidium dissectum* (Streptophyta) from a high alpine soil crust [J]. *Microbial Ecology*, 2012, 63(1):51-63.
- [30] 管超, 张鹏, 李新荣. 腾格里沙漠东南缘生物结皮土壤呼吸对水热因子变化的响应[J]. 植物生态学报, 2017, 41(3):301-310.

~~~~~

(上接第 173 页)

- [15] 董满宇, 吴正方. 近 50 年来东北地区气温变化时空特征分析[J]. 资源科学, 2008, 30(7):1093-1099.
- [16] 任国玉, 初子堂, 周雅清, 等. 中国气温变化研究最新进展[J]. 气候与环境研究, 2005, 10(4):701-716.
- [17] 齐冬梅, 周长艳, 李跃清, 等. 西南区域气候变化原因分析[J]. 高原山地气象研究, 2012, 32(1):35-42.
- [18] 李聪, 肖子牛, 张晓玲. 近 60 年中国不同区域降水的气候变化特征[J]. 气象, 2012, 38(4):419-424.
- [19] 周秀华. 我国西南及周边地区气候的模拟和预估[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2014:55-56.
- [20] 杨毅, 武伟, 刘洪斌. 贵阳市近 40 年气候变化趋势分析[J]. 西南师范大学学报:自然科学版, 2007, 32(2):82-87.
- [21] 韩翠华, 郝志新, 郑景云. 1951—2010 年中国气温变化分区及其区域特征[J]. 地理科学进展, 2013, 32(6):888-894.
- [22] Nan L I, Sun P L, Han X L, et al. Spatio-temporal characteristics of temperature change in recent 52 years in Luxi Plain [J]. *Modern Agricultural Science & Technology*, 2015, 20:207-210.
- [23] Qin N, Wang J, Yang G, et al. Spatial and temporal variations of extreme precipitation and temperature events for the Southwest China in 1960—2009 [J]. *Geoenvironmental Disasters*, 2015, 2(1):1-14.
- [24] 丁一汇, 王会军. 近百年中国气候变化科学问题的新认识[J]. 科学通报, 2016, 61(10):1029-1041.
- [25] 周秀华, 肖子牛. 我国西南周边地区夏秋季节降水变化及相应环流特征分析[J]. 大气科学, 2015, 39(4):653-666.
- [26] 蒋兴文, 李跃清. 西南地区冬季气候异常的时空变化特征及其影响因子[J]. 地理学报, 2010, 65(11):1325-1335.