

DOI: 10.5846/stxb201907231554

赵河聚, 成龙, 贾晓红, 吴波, 李元寿, 岳艳鹏, 周虹, 赵雪彬. 高寒沙区生物土壤结皮覆盖土壤碳释放动态. 生态学报, 2020, 40(18): 6396-6404.

Zhao H J, Cheng L, Jia X H, Wu B, Li Y S, Yue Y P, Zhou H, Zhao X B. The dynamics of soil carbon release covered with biological soil crusts in Alpine sand area. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(18): 6396-6404.

高寒沙区生物土壤结皮覆盖土壤碳释放动态

赵河聚¹, 成龙¹, 贾晓红^{1,*}, 吴波¹, 李元寿², 岳艳鹏¹, 周虹¹, 赵雪彬³

1 中国林业科学研究院荒漠化研究所, 北京 100091

2 中国气象科学研究院, 北京 100081

3 青海共和荒漠生态系统国家定位观测研究站, 共和 813000

摘要:生物土壤结皮广泛分布于荒漠生态系统,能够通过自身的呼吸作用影响土壤碳释放以及区域碳循环过程。在具有典型高寒沙区气候特征的青藏高原东北部(青海共和盆地),以广泛分布于人工植被恢复区的藻类和苔藓结皮为研究对象,裸地为对照,观测了裸地与两种类型生物土壤结皮去除和覆盖土壤碳释放速率的日动态和生长季动态规律,探讨生物土壤结皮对土壤碳释放量的影响。结果表明:生物土壤结皮去除和覆盖土壤碳释放速率日动态和生长季动态特征与裸地一致,均呈“单峰”曲线。生物土壤结皮覆盖土壤的日最大碳释放速率出现于 13:00 左右,裸地与去除结皮土壤的日峰值均出现于 15:00 左右,生物土壤结皮的存在使土壤碳释放速率的日峰值出现时间提前 2h 左右,各观测类型生长季内碳释放速率最大值均出现在 8 月。在相对干旱年份(2017),藻类和苔藓结皮覆盖导致土壤碳释放量分别增加了 22.07% 和 85.61%,其中,藻类和苔藓结皮层碳释放量占增加量的 67.60% 和 25.76%;而在相对湿润年份(2018),藻类和苔藓结皮覆盖导致土壤碳释放量分别增加了 139.37% 和 290.53%,二者结皮层碳释放量分别占增加量的 69.09% 和 45.59%,生物土壤结皮发育促进了土壤的碳释放。温度对土壤碳释放变化的贡献率为 48.89%,是高寒沙区土壤碳释放日动态变化的关键驱动因子。因此,在核算荒漠生态系统碳交换过程中,应充分考虑各区域不同类型生物土壤结皮对土壤碳释放产生的影响。

关键词:高寒沙区;生物土壤结皮;碳释放;温度;水分

The dynamics of soil carbon release covered with biological soil crusts in Alpine sand area

ZHAO Heju¹, CHENG Long¹, JIA Xiaohong^{1,*}, WU Bo¹, LI Yuanshou², YUE Yanpeng¹, ZHOU Hong¹, ZHAO Xuebin³

1 Institute of Desertification Studies, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

2 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China

3 Qinghai Gonghe Desert Ecosystem Research Station, Gonghe 813000, China

Abstract: Biological soil crusts were widely distributed in desert ecosystems, which could affect soil carbon release and regional carbon cycle through their own respiration. In this study, we took the algae and moss crusts as the research object, which were widely distributed in artificial vegetation area in the northeast of Qinghai-Tibet Plateau (Gonghe basin, Qinghai). We observed the diurnal and growth seasonal dynamics of soil carbon release rate in bare land and two types of biological soil crusts covered soil. The results showed that the diurnal and growth seasonal dynamic characteristics of soil carbon release rate with and without covered biological soil crusts were consistent with that of bare land, showing a “single

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0500801);科技基础资源调查专项(2017FY100206);国家自然科学基金(41471096,41371093)

收稿日期:2019-07-23; **网络出版日期:**2020-07-12

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jiaxiaohong@caf.ac.cn

peak” curve. The maximum daily carbon release rate of covered biological soil crusts appeared at about 13:00, and the daily peak value of the bare land and the removal of soil crusts appeared at about 15:00. The existence of biological soil crusts advanced the daily peak value of soil carbon release rate appear about 2 hours, and the daily peak value of carbon release rate of each observation types all appeared in August. In the relative dry year (2017), the soil carbon emission of covered algae and moss crusts was increased by 22.07% and 85.61%, and the carbon emission of the algae and moss crusts could account for 67.60% and 25.76% of the increased amount. And in the relative wet year (2018), the soil carbon emission of covered algae and moss crusts was increased by 139.37% and 290.53%, and the surface carbon emission of the algae and moss crusts could account for 69.09% and 45.59% of the increased amount. The development of biological soil crusts promoted the carbon release of soil. Temperature was the key driving factor for the diurnal dynamic change of soil carbon release in this area. Temperature drive the contribution rate of soil carbon release reached 48.89%. Therefore, in the process of calculating carbon exchange in desert ecosystems, the effects of different biological soil crusts on soil carbon release should be fully considered.

Key Words: alpine sand area; biological soil crusts; carbon release; temperature; moisture

生物土壤结皮是由隐花植物(如蓝藻、地衣、苔藓等)和土壤中的微生物通过假根、菌丝体和胞外分泌物等与土壤表层细小颗粒胶结形成的复杂的复合体^[1-2]。生物土壤结皮能够适应极端的环境条件,通过自身的代谢方式影响和改变周围环境,在稳定表层土壤、提高土壤抵抗风蚀、水蚀能力、增加土壤肥力和促进土壤发育等方面具有重要的生态功能^[2-4]。干旱半干旱地区水资源极度匮乏,植被覆盖度与生物量低,但生物土壤结皮却能广泛分布其中,在部分荒漠生态系统中的覆盖度甚至可达到 70% 以上^[5],是干旱半干旱地区重要的地表覆盖类型之一。生物土壤结皮能够通过自身所包含的有机成分与生命体的呼吸作用向大气中释放 CO₂, 从而影响土壤碳释放以及该区生态系统的碳循环。

国外有关生物土壤结皮的研究主要分布于美国的莫哈维沙漠、以色列内盖夫沙漠和中欧一些地区^[6],国内则主要集中于腾格里沙漠^[7-8]、毛乌素沙地^[9-10]和黄土高原^[11]等温带地区。研究内容多为生物土壤结皮的类型与功能^[3,5,12]、生物土壤结皮对土壤呼吸的影响^[13-16]、生物土壤结皮呼吸与水热因子间关系等^[6,7,17,18]。但有关生物土壤结皮在高寒生态系统的研究相对不足,不同类型生物土壤结皮发育对土壤碳释放的影响亟待研究。共和盆地处于青藏高原东北部,青海南山和巴颜喀拉山之间,属于高寒干旱荒漠和半干旱草原过渡区,是黄河的上游地带,在保持水土、涵养水源、生态保护方面地位十分重要。本研究在具有典型高寒沙区气候特征的青海共和盆地,以广泛分布于人工植被恢复区内的藻类和藓类结皮为研究对象,采用野外原位测量实验方法,对裸地与不同类型生物土壤结皮去除和覆盖土壤碳释放速率的日和生长季动态进行观测,以期能揭示高寒沙区生物土壤结皮发育对土壤碳释放的影响规律及其变化机理,为区域碳平衡核算与建模分析提供一定的数据参考与科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区自然概况

研究区位于青海省共和县沙珠玉乡青海省治沙站沙珠玉试验林场(36°16'N, 100°16'E),地处青海共和盆地的中西部地区,属于高寒干旱荒漠和半干旱草原过渡区。海拔高度 2871 m,面积为 5.28×10² km²,土地沙化面积达 1.74×10² km²,春季风沙活动较多。该地区具有高寒、干旱、辐射强烈等气候特点,年均降水量为 246.3 mm,且年内分布极不均衡,降水多集中发生于生长季,以小降水事件为主,年潜在蒸发量约为 1716.7 mm。年均温度为 2.4 °C,无霜期在 91 d 左右,光照充足,年太阳辐射总量为 6.62×10⁵ KJ/cm²。

受剧烈风沙活动影响,沙珠玉地区一直是青海省土地荒漠化的多发地区之一。为治理荒漠化问题,青海省治沙实验站已经开展了近 60 年的植被恢复工作,土地荒漠化问题得到了有效的治理,生态环境逐步改善,

形成了以灌木为主的“乔-灌-草”复合植被恢复体系,同时大量的生物土壤结皮覆盖地表。该区乔木种主要有小叶杨(*Populus simonii*)、河北杨(*Populus hopeiensis*)、青杨(*Populus cathayana*)等;灌木种主要有怪柳(*Tamarix chinensis*)、柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)等;草本植物种主要有赖草(*Leymus secalinus*)、针茅(*Stipa capillata*)等。本研究选择结皮发育相对较好的1977年植被恢复区为研究样地。样地内土壤为棕钙土和栗钙土等。植被分布多以灌木为主,主要植物种有:柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*),针茅(*Stipa capillata*)等。样地内生物土壤结皮基本特征和土壤理化性质见表1—3^[19]。

表1 研究区生物土壤结皮主要特征

Table 1 Main characteristics of biological soil crusts soil in the study area

结皮类型 Crust type	结皮盖度 Coverage/%	结皮厚度 Thickness/cm	结皮生物量 Biomass/(mg/cm ²)
藻类 Algae	>51%	1.01±0.01a	3.69±0.21a
苔藓类 Moss	>41%	1.49±0.06b	4.65±0.25b

相同字母表示没有显著差异

表2 研究区生物土壤结皮土壤基本特征

Table 2 Basic characteristics of biological soil crust soil in the study area

结皮类型 Crust type	采样深度 Sampling depth	pH	有机质/(g/kg) Organic matter content	有机碳/(g/kg) Organic carbon	全氮/(g/kg) Total nitrogen	碳氮比 C/N
藻类	结皮层	9.03±0.01a	6.71±0.21a	3.89±0.12a	0.47±0.11a	8.28±0.19a
	0—5cm	9.32±0.01b	6.23±0.11b	3.61±0.06b	0.39±0.08b	9.27±0.17b
苔藓类	结皮层	8.36±0.06a	15.4±1.34a	8.93±0.78a	1.18±0.21 a	7.57±0.80a
	0—5cm	9.04±0.06b	8.04±0.30b	4.66±0.17b	0.58±0.13 b	8.04±0.51b

相同字母表示没有显著差异

表3 研究区生物土壤结皮土壤机械组成特征

Table 3 Characteristics of soil mechanical composition of biological soil crust in the study area

结皮类型	采样深度	颗粒组成百分含量 Percentage content of particle composition/%		
		砂粒 Sand	粉粒 Silt	粘粒 Clay
藻类	结皮层	67.69±0.90a	32.08±0.90a	0.23±0.00a
	0—5cm	69.74±0.47a	30.04±0.47a	0.26±0.00a
苔藓类	结皮层	61.55±1.95a	38.17±1.93a	0.28±0.02a
	0—5cm	65.72±1.28a	34.03±1.27a	0.26±0.01a

相同字母表示没有显著差异

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置

选取灌丛间发育较好的藻类结皮覆盖土壤和苔藓结皮覆盖土壤(两种类型生物结皮的盖度均保持在90%以上,且远离植株根系分布范围,距植株2 m左右)为研究对象,以裸地为对照。在样地内,设置五个2 m × 2 m的样方(藻类结皮覆盖土壤、藻类去除结皮土壤、苔藓结皮覆盖土壤、苔藓去除结皮土壤和裸地),每种观测类型分别设置三个重复。在每个样方内放置三个PVC土壤环用于土壤碳释放速率测定。放置时,先把生物土壤结皮表层湿润,然后将高10 cm、直径20 cm的PVC环垂直嵌入土壤中,使土壤环上端高出地表约4 cm左右,前期准备工作在实验开展前一个月完成。

1.2.2 土壤碳释放速率测定

实验开展于2017和2018年的生长季(6—10月),利用LI-8100土壤碳通量自动测量系统连接土壤呼吸长期监测室8100-103(该气室使用金属材质,闭合时,密闭遮光,在完全黑暗条件下测量生物土壤结皮层呼吸作用和下覆土壤呼吸作用的总和)对裸地与两种类型生物土壤结皮去除和覆盖土壤碳释放速率进行测定。测定内容包括日变化与月变化测定(每月测定一次),日变化测定:每月选取晴朗天气(测定前3天无降水事

件发生),观测时间为 8:00 至次日 8:00,每 2 h 观测一次,每次观测 3 min,包括测量时长 90 s,测量前与测量后气体平衡时间各 45 s;月变化测定:每月选取晴朗天气(测定前 3 天无降水事件发生),观测时间为 9:00—11:00,在同一时段内,将所有土壤环内样本均观测一遍,每次观测 3 min,包括测量时长 90 s,测量前与测量后气体平衡时间各 45 s。

$$R_{\text{土壤呼吸增量}} = R_{\text{生物土壤结皮覆盖土壤}} - R_{\text{裸地}}$$

$$R_{\text{生物土壤结皮层}} = R_{\text{生物土壤结皮覆盖土壤}} - R_{\text{生物土壤结皮去除土壤}}$$

1.2.3 环境因子测定

近地面空气温湿度观测采用 VP-3 水汽压温湿度和大气压传感器,0—5 cm 层土壤温湿度观测采用 GS3 水分、电导率、温度传感器,5—10 cm 层、10—20 cm 层土壤温湿度观测采用 5TM 土壤水分、温度传感器,并通过 EM50 土壤温湿度数据采集器进行数据收集。日变化测定:所有观测装置的设定时间均为 30 min 记录一次数据,月变化测定:所有观测装置的设定时间均为 1 min 记录一次数据。降水资料通过附近气象站获得。

1.2.4 数据处理与分析

日累积碳释放量计算公式如下^[20]:

$$C_{\text{daily}} = (R_8 + R_{10} + \dots + R_6) \times 24 \times 3600 \times 10^{-6}$$

式中, C_{daily} 为日累积碳释放量(以 CO_2 释放量计, $\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), $R_8 + R_{10} + \dots + R_6$ 分别为 8:00、10:00…到次日 6:00 的平均碳释放速率($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)。

月累积碳释放量 = 日累积碳释放量 × 每月天数

年生长季累积碳释放 = 生长季各月累积释放量相加

采用 Excel 2010 进行数据处理, SPSS 19.0 进行双变量相关性分析和主成分分析。并在 Origin 2017 中绘制相关图形。

2 结果与分析

2.1 各观测类型碳释放速率日动态

裸地和不同类型生物土壤结皮去除、覆盖土壤的碳释放速率日动态变化与表层(0—5 cm)土壤温度变化规律一致,均呈“单峰”曲线(图 1)。8:00 开始,各观测类型碳释放速率均迅速增高,在 13:00 左右,生物土壤结皮覆盖土壤碳释放速率达到日最大值;在 15:00 左右,裸地和生物土壤结皮去除土壤碳释放速率达到日最大值;土壤温度在 16:00 左右达到日最大值;之后碳释放速率均迅速下降,20:00—6:00,碳释放速率均逐渐稳定,且在 2:00—6:00 之间出现最小值。观测期间,同一年内,各观测类型日最大碳释放速率变化规律:苔藓结皮覆盖土壤 > 藻类结皮覆盖土壤 > 苔藓结皮去除土壤 > 藻类结皮去除土壤 > 裸地。日均碳释放速率变化规律表现为:苔藓结皮覆盖土壤 > 苔藓结皮去除土壤 > 藻类结皮覆盖土壤 > 藻类结皮去除土壤 > 裸地。不同年份间,2018 年各观测类型日最大碳释放速率和日均碳释放速率均大于 2017 年,且各观测类型日最大碳释放速率和日均碳释放速率最大值均出现在 8 月。

2.2 各观测类型碳释放速率生长季动态

各观测类型碳释放速率均存在明显的生长季动态,其年内生长季动态均呈“单峰”曲线。生长季内,各观测类型碳释放速率最大值均出现在 8 月,最小值均出现在 10 月(图 2)。同一年内,各观测类型生长季平均碳释放速率变化规律为:苔藓结皮覆盖土壤 > 苔藓结皮去除土壤 > 藻类结皮覆盖土壤 > 藻类结皮去除土壤 > 裸地(图 2)。不同年份间,2018 年各观测类型生长季平均碳释放速率均大于 2017 年。

2.3 各观测类型生长季累积碳释放量

随结皮发育,同一年内,生长季各观测类型碳释放量变化规律为:苔藓结皮覆盖土壤 > 苔藓结皮去除土壤 > 藻类结皮覆盖土壤 > 藻类结皮去除土壤 > 裸地(图 3)。在 2017 年,藻类结皮覆盖土壤碳释放量较裸地增长 22.07%,增量为 $14.35 \text{ gCO}_2/\text{m}^2$,其中,藻类结皮层碳释放量占增量的 67.60%;苔藓结皮覆盖土壤碳释放量较

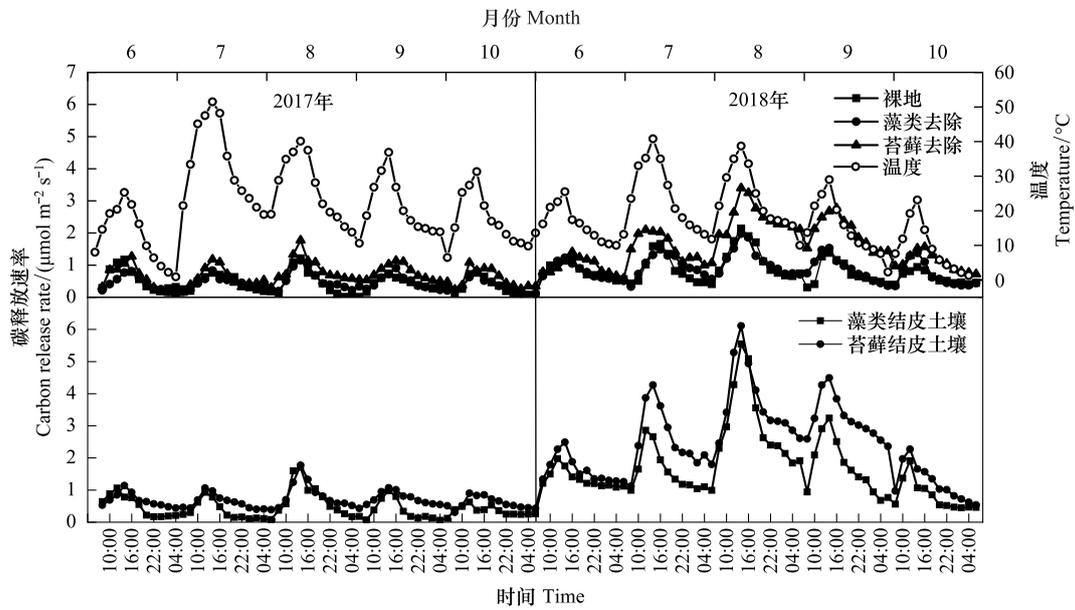


图1 裸地与不同类型生物土壤结皮去除和覆盖土壤碳释放速率(以 CO₂ 释放速率计)与表层(0—5 cm)土壤温度日动态

Fig.1 Diurnal dynamics of soil carbon release rate (in terms of CO₂ release rate) and surface (0—5 cm) soil temperature in bare land and different types of biological soil crusts removal and mulching

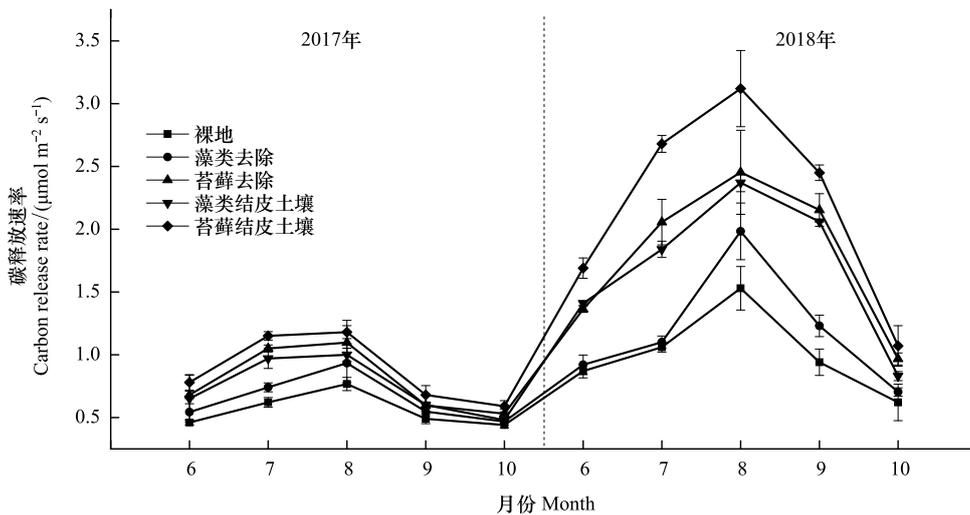


图2 裸地与不同类型生物土壤结皮去除和覆盖土壤碳释放速率(以 CO₂ 释放速率计)生长季动态

Fig.2 Growth season dynamics of carbon release rate (in terms of CO₂ release rate) in bare land and different types of biological soil crusts removal and mulching

裸地增长 85.61%, 增量为 55.63 gCO₂/m², 苔藓结皮层碳释放量占增量的 25.76%; 在 2018 年, 藻类结皮覆盖土壤碳释放量较裸地增长 139.37%, 增量为 137.87 gCO₂/m², 藻类结皮层碳释放量占增量的 69.09%; 苔藓结皮覆盖土壤碳释放量较裸地增长 290.53%, 增量为 287.39 gCO₂/m², 苔藓结皮层碳释放量占增量的 45.59%。不同年份间, 2018 年各观测类型土壤碳释放量均大于 2017 年, 2018 年各观测类型(裸地、藻类结皮去除土壤、藻类结皮覆盖土壤、苔藓结皮去除土壤和苔藓结皮覆盖土壤)土壤碳释放量增长率分别为 52.22%、103.28%、198.50%、140.21%、220.30%。

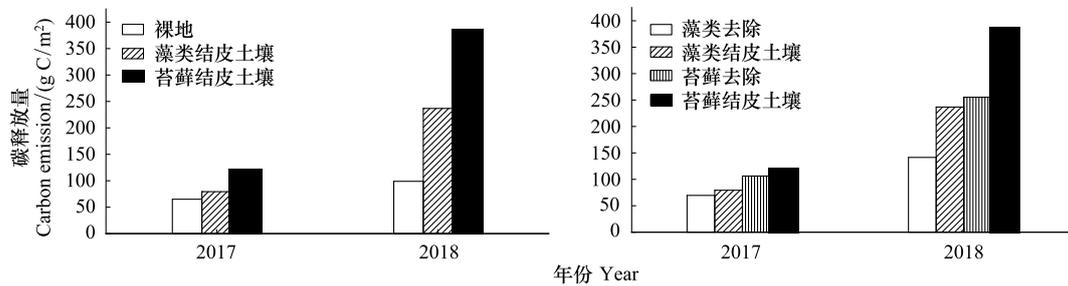


图3 裸地与不同类型生物土壤结皮去除和覆盖土壤生长季累积碳释放量(以 CO₂ 释放量计)差异

Fig.3 The differences of carbon emission (in terms of CO₂ emission) between bare land and different types of biological soil crusts removal and mulching during the growing season

2.4 各观测类型碳释放速率与温度和水分间的关系

相关性分析表明(表4),各观测类型土壤碳释放速率与空气和不同深度土壤温度均表现出显著($P < 0.05$)或极显著正相关关系($P < 0.01$);除与近地面空气湿度呈现出负相关或极显著负相关关系外($P < 0.01$),各观测类型土壤碳释放速率与不同深度土壤含水量均表现出显著($P < 0.05$)或极显著正相关关系($P < 0.01$)。可得出,0—5 cm 层土壤温度与含水量对各观测类型土壤碳释放速率的影响最大。通过主成分分析(图4)发现,影响本区生物土壤结皮土壤碳释放日动态的第一主成分主要为温度,第二主成分主要为土壤含水量,温度对土壤碳释放速率变化的贡献率为 48.89%,水分的贡献率为 31.82%。

表4 裸地与不同类型生物土壤结皮去除和覆盖土壤碳释放速率与温度和水分间的关系

Table 4 Relationship between carbon release rate, temperature and water content in bare land and different types of biological soil crusts removal and mulching

类型 Type	气象因子 Meteorological factors							
	T_{air}	T_{0-5}	T_{5-10}	T_{10-20}	RH_{air}	SWC_{0-5}	SWC_{5-10}	SWC_{10-20}
裸地 Bare land	0.649 **	0.689 **	0.570 **	0.413 **	-0.529 **	0.400 **	0.263 **	0.062 *
藻类去除 Algae removal	0.428 **	0.370 **	0.339 **	0.291 **	-0.197	0.513 **	0.423 **	0.28 **
苔藓去除 Moss removal	0.445 **	0.358 **	0.280 **	0.218 *	-0.308 **	0.308 **	0.585 **	0.543 **
藻类结皮土壤 Algae crust covered soil	0.439 **	0.399 **	0.338 **	0.300 **	-0.014	0.619 **	0.694 **	0.574 **
苔藓结皮土壤 Moss crust covered soil	0.308 **	0.233 *	0.205 *	0.210 *	-0.113	0.691 **	0.707 **	0.678 **

* 代表相关性达到 0.05 的显著性水平, ** 代表相关性达到 0.01 的显著性水平; T 为温度, RH 为空气湿度, SWC 为土壤体积含水量

3 讨论

生物土壤结皮作为一种特殊的生物与土壤的复合体,存在于土壤与大气之间的界面层,在一定程度上影响着土壤呼吸,是干旱、半干旱区生态系统 CO₂ 通量的影响因子之一^[21]。本研究发现生物土壤结皮去除和覆盖土壤碳释放速率日动态和生长季动态特征与裸地一致,均呈“单峰”曲线,这与其他区域研究结果一致^[11,22,23]。但生物土壤结皮的存在使土壤碳释放速率日峰值出现时间提前 2 h 左右,且早于土壤温度日峰值 3 h 左右。在毛乌素沙地的研究表明,生物土壤结皮覆被区的土壤呼吸日峰值出现时间为 11:00 左右,早于土壤温度日峰值 1—5 h 左右^[9]。这可能是由于生物土壤结皮中的微生物组分对水分的响应程度不同。在严重受水分胁迫的荒漠生态系统,较低的水分含量使苔藓和藻类结皮的微生物活性更容易受到限制。相对于土壤,苔藓与藻类结皮则需要更多的水分去满足其生理活性。在毛乌素地区,日尺度土壤呼吸值的变化主要与土壤含水量有关,随土壤含水量的减少,土壤呼吸速率也相应减小^[24]。故受土壤水分限制,土壤呼吸日最大值出现时间提前。但在高寒沙区,本研究发现温度是影响土壤呼吸的主要因素,温度对土壤呼吸变化的贡献

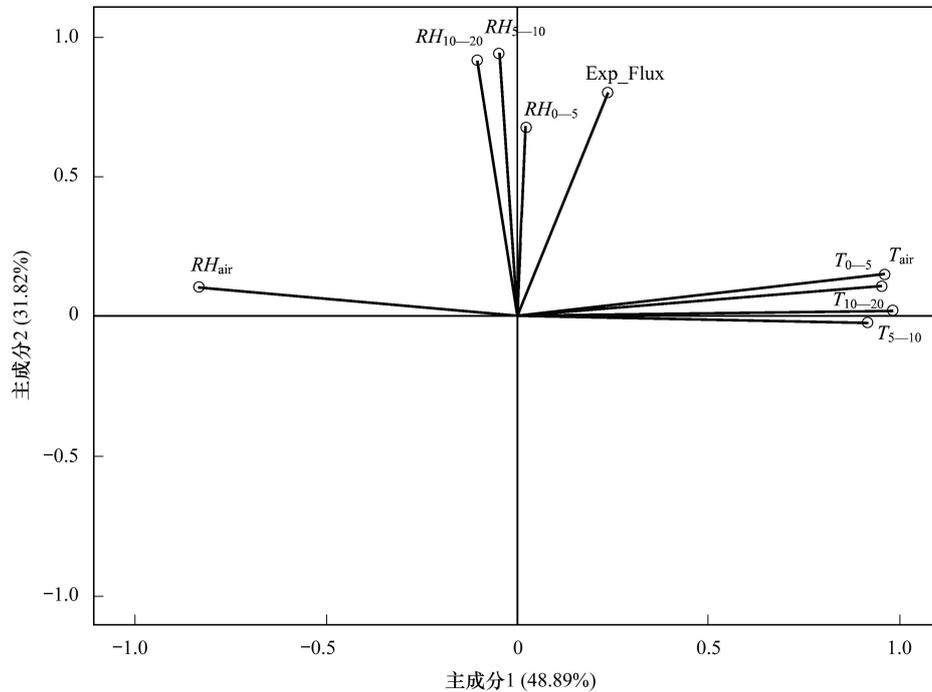


图4 裸地与不同类型生物结皮去除和覆盖土壤碳释放速率与温度、水分间的主成分分析

Fig.4 Principal component analysis of carbon release rate, temperature and water content in bare land and different types of biological soil crusts removal and mulching

T: 温度; RH: 空气湿度; SWC: 土壤体积含水量

率可达 48.89%。研究区内昼夜温差较大,可能对表层土壤中的微生物活性与土壤酶的催化作用产生了影响,从而影响了土壤的碳释放速率。另一方面,这也可能是由于所测量的土壤呼吸值没有对应最佳深度的土壤温度,或是土壤自养呼吸与异养呼吸对环境因子的响应程度不同所导致的^[18]。这还需要我们进一步去研究说明。

表5 生长季内降雨事件统计

Table 5 Statistics of rainfall events during the growing season

年份 Year	<10 mm 降水量/mm <10 mm precipitation	总降水量/mm Total precipitation	<10 mm 降水次数 <10 mm precipitation times	总降水次数 Total precipitation times
近 30 年平均 Average over the last 30 years		246.3		
2017	160.6	226.7	55	60
2018	185.8	372.4	67	78

生物土壤结皮的存在促进了土壤碳释放,随结皮发育程度增高,促进效果越明显。但藻类结皮对土壤碳释放的促进作用主要来源于其结皮层的贡献,而苔藓结皮主要是由于其下层土壤呼吸对土壤碳释放的促进作用更大。一方面,在干旱、半干旱地区,水分有效性一直是主要限制因子。随着生物土壤结皮的发育,藓类结皮的生理活性高于藻类结皮,其表层具有密集丛生的苔藓植物和柔韧的茎叶分布,能在一定时间内,减缓水分的下渗与蒸发,增加了表层土壤水分的有效性^[25]。这些表层土壤水分的有效性对生物土壤结皮生理活性的激发尤为重要^[26]。另一方面,由于两种类型生物结皮下部土壤质地、养分状况、稳定性和微生物种类、数量、活性等均存在差异^[27-28],发育程度越高的结皮下土壤粘粉粒含量与有机质含量均比较高(表2、表3),且微生物量的种类、数量与生物量也相应增多^[29],更利于土壤的碳释放,故生物土壤结皮发育程度越高,其碳释放量

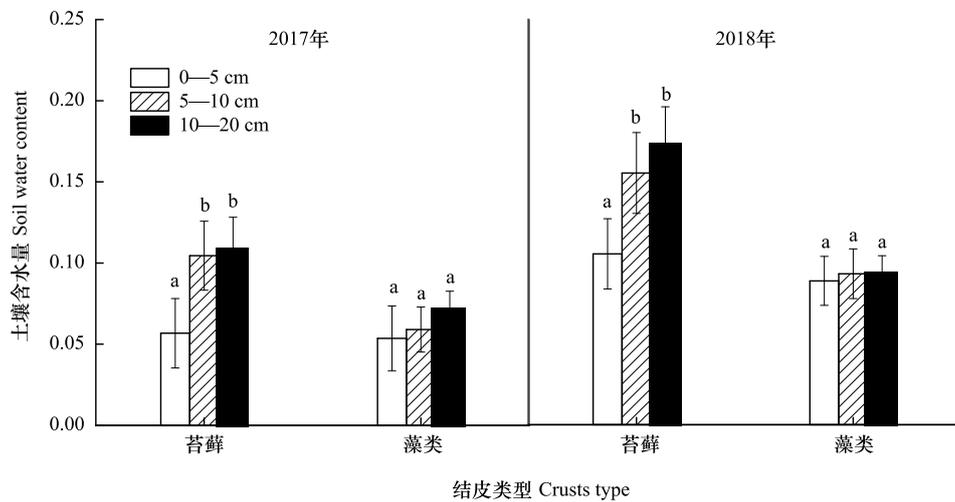


图5 生长季内(6—10月)不同类型生物土壤结皮下0—5 cm、5—10 cm和10—20 cm土壤体积含水量变化

Fig.5 Average soil water content of 0—5 cm, 5—10 cm and 10—20 cm under different types of biological soil crusts in the growing season (June to October)

增加越大。在生长季内,苔藓结皮覆盖土壤下5—10 cm的土壤含水量显著大于0—5 cm的土壤含水量,而藻类结皮覆盖土壤下5—10 cm与0—5 cm的土壤含水量没有显著差别(图5)。水分条件的改变,很大程度地影响了微生物的活性^[30],改良了苔藓结皮下层土壤的发育条件,更利于下层土壤中微生物的呼吸作用,对土壤碳释放的整体促进作用更强。相反,藻类结皮的表层与浅层土壤水分却差别不大,所以微生物数量更多的结皮层对土壤碳释放的贡献率更高。本研究还发现,降雨量的增加能够促进裸地与生物土壤结皮去除和覆盖土壤的碳释放作用。在观测期内,相对于本地区近30年年均246.3 mm的降水量,2018年增加了51.16%的降水量,2017年却减少了8%,且小降水事件(降水量<10 mm)的频度均为85.90%左右(表5)。而生物土壤结皮对水分变化十分敏感。在相对干旱的环境中,能使自身脱水进入休眠,而在相对湿润的条件下,又能迅速激发其生理活性使其恢复正常^[31]。因此水分条件的改变对苔藓和藻类结皮覆盖土壤碳释放的影响效果十分明显。同时,降水的增多,还会协同增多土壤中微生物的生物量,促进微生物的活动,加速底物分解,并导致土壤碳释放量的增加^[32]。在本区的模拟降水研究中也发现小降水对两种类型生物结皮覆盖土壤的碳释放具有极显著的激发作用,随降水量的增加,其碳释放量也相应增加^[25]。也有研究表明,中等程度的降水能够有效地增大土壤的碳释放^[33]。但极端降水情况则会抑制生物土壤结皮覆盖土壤的碳释放。这可能是由于过大的降水(强度)易堵塞土壤的通透性,从而降低土壤的碳释放^[7]。然而本区生长季以小降水为主,更有利于促进土壤的碳释放作用。

4 结论

(1) 裸地与结皮发育土壤碳释放速率日动态均呈“单峰”曲线,裸地与去除结皮土壤碳释放速率日最大值出现于15:00左右,两种类型生物土壤结皮覆盖土壤碳释放速率日最大值出现于13:00左右;日最大碳释放速率均出现于8月。

(2) 裸地与结皮发育土壤碳释放速率的年内生长季动态规律一致,均呈“单峰”曲线,最大值出现在8月,最小值出现在10月。

(3) 生物土壤结皮的存在增大了土壤的碳释放量,且结皮的发育程度越高,其增加量越大。藻类结皮层碳释放对土壤碳释放的促进作用更强,而苔藓结皮下层土壤碳释放对土壤碳释放的促进作用更强。土壤碳释放作用随降水量的增加而增强。

(4) 温度是影响土壤碳释放日动态的首要因素, 其中土壤 0—5 cm 温度和含水量对各观测类型土壤碳释放速率的影响最大。

参考文献 (References):

- [1] Eldridge D J, Greene R. Microbiotic soil crusts—a review of their roles in soil and ecological processes in the rangelands of Australia. *Australian Journal of Soil Research*, 1994, 32(3): 389-415.
- [2] Lan S B, Wu L, Zhang D L, Hu C X. Successional stages of biological soil crusts and their microstructure variability in Shapotou regin(China). *Environment Earth Sciences*, 2012, 65(1): 77-88.
- [3] 张元明, 王雪芹. 荒漠地表生物土壤结皮形成与演替特征概述. *生态学报*, 2010, 30(16): 4484-4492.
- [4] Elbert W, Weber B, Budel B, Andreae M, Poschl U. Microbiotic crusts on soil, rock and plants: neglected major players in the global cycles of carbon and nitrogen ?. *Biogeosciences Discussions*, 2009, 6(4): 6983-7015.
- [5] 李新荣, 张元明, 赵允格. 生物土壤结皮研究: 进展、前沿与展望. *地球科学进展*, 2009, 24(01): 11-24.
- [6] 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. *生态学报*, 2012, 32(13): 4103-4113.
- [7] 赵洋, 齐欣林, 陈永乐, 张志山, 贾荣亮, 胡宜刚, 张鹏. 极端降雨事件对不同类型生物土壤结皮覆盖土壤碳释放的影响. *中国沙漠*, 2013, 33(2): 543-548.
- [8] 管超, 张鹏, 陈永乐, 宋光, 周媛媛, 李新荣. 生物结皮-土壤呼吸对冬季低温及模拟增温的响应. *应用生态学报*, 2016, 27(10): 3213-3220.
- [9] 冯薇. 毛乌素沙地生物结皮光合固碳过程及对土壤碳排放的影响. 北京林业大学, 2014.
- [10] 李炳垠, 卜崇峰, 李宜坪, 李新凯. 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素. *水土保持研究*, 2018, 25(4): 174-180.
- [11] 王爱国, 赵允格, 许明祥, 王一贺, 杨丽娜, 明姣. 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. *环境科学学报*, 2013, 33(9): 2605-2611.
- [12] Bowker M A. Biological Soil Crust Rehabilitation in Theory and Practice: An Underexploited Opportunity. *Restoration Ecology*, 2007, 15(1): 13-23.
- [13] 李玉强, 赵哈林, 赵玮, 云建英, 王少昆. 生物结皮对土壤呼吸的影响作用初探. *水土保持学报*, 2008, 22(3): 106-109.
- [14] 齐玉春, 董云社, 金钊, 肖胜生, 彭琴, 何亚婷, 刘欣超. 生物结皮对内蒙古沙地灌丛草地土壤呼吸特征的影响. *地理科学*, 2010, 30(6): 898-903.
- [15] Su Y G, Wu L, Zhou Z B, Liu Y B, Zhang Y M. Carbon flux in deserts depends on soil cover type: A case study in the Gurbantungute desert, North China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 58: 332-340.
- [16] Maestre F T, Escolar C, Guevara M L, Quero L J, Lúzaro R, Baquerizo M D, Ochoa V, Berdugo M, Gozalo B, Gallardo A. Changes in biocrust cover drive carbon cycle responses to climate change in drylands. *Global Change Biology*, 2014, 19(12): 3835-3847.
- [17] Zhang Z S, Dong X J, Xu B X, Chen Y L, Zhao Y, Gao Y H, Hu Y G, Huang L. Soil respiration sensitivities to water and temperature in a revegetated desert. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2015, 120(4): 773-787.
- [18] 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. *植物生态学报*, 2017, 41(03): 301-310.
- [19] 韩海燕. 高寒沙地生物结皮碳释放及其对土壤呼吸的影响. 中国林业科学研究院, 2014.
- [20] 刘殿君. 极端干旱区泡刺群落土壤呼吸对增雨的响应. 中国林业科学研究院, 2012.
- [21] Li X R, Zhang Z S, Wang X P, Liu L C, Huang L. The ecohydrology of the soil-vegetation system restoration in arid zones: a review. *寒旱区科学: 英文版*, 2009(3): 199-206.
- [22] Wilske B, Burgheimer J, Karnieli A, Zaady E, Andreae M O, Yakir D, Kesselmeier J. 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(5): 1411-1423.
- [23] Thomas A D, Hoon S R, Linton P E. Carbon dioxide fluxes from cyanobacteria crusted soils in the Kalahari. *Applied Soil Ecology*, 2008, 39(3): 254-263.
- [24] Wang B, Zha T S, Jia X, Wu B, Zhang Y Q, Qin S G. Soil moisture modifies the response of soil respiration to temperature in a desert shrub ecosystem. *Biogeosciences*, 2014, 11(2): 259-268.
- [25] 辜晨, 贾晓红, 吴波, 成龙, 杨占武, 杨德福, 赵雪彬. 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. *生态学报*, 2017, 37(13): 1-11.
- [26] 李新荣, 周海燕, 王新平, 刘立超, 张景光, 陈国雄, 张志山, 刘玉冰, 谭会娟, 高艳红. 中国干旱沙区的生态重建与恢复: 沙坡头站 60 年重要研究进展综述. *中国沙漠*, 2016, 36(2): 247-264.
- [27] 薛英英, 闫德仁, 李钢铁. 鄂尔多斯地区沙漠生物结皮特征研究. *内蒙古农业大学学报(自然科学版)*, 2007, 28(2): 102-105.
- [28] 郭轶瑞, 赵哈林, 赵学勇, 左小安, 李玉强. 科尔沁沙地结皮发育对土壤理化性质影响的研究. *水土保持学报*, 2007, 21(1): 135-139.
- [29] 尹瑞平, 王峰, 吴永胜, 张欣, 李泽坤, 苗恒录, 仁杰, 田秀民, 王健. 毛乌素沙地南缘沙丘生物结皮中微生物数量及其影响因素. *中国水土保持*, 2014, 12: 40-44.
- [30] Wang Q, He N P, Liu Y, Li M L, Xu L. Strong pulse effects of precipitation events on soil microbial respiration in temperate forests. *Geoderma*, 2016, 275: 67-73.
- [31] 贾子毅, 吴波, 卢琦. 干旱半干旱区生物土壤结皮光合固碳研究进展. *安徽农业科学*, 2011, 39(21): 12768-12770.
- [32] Huang G, Li Y, Su Y G. Effects of increasing precipitation on soil microbial community composition and soil respiration in a temperate desert, Northwestern China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 83: 52-56.
- [33] Huxman T E, Snyder K A, Tissue D, Leffler A J, Ogle K, Pockman W T, Sandquist D R, Potts D L, Schwinning S. Precipitation Pulses and Carbon Fluxes in Semiarid and Arid Ecosystems. *Oecologia*, 2004, 141(2): 254-268.