

Response of Biological Soil Crusts Carbon Release to Hydrothermic Factors

Yuzhe Wu¹, Qinggong Lin¹, Zhishan Zhang², Yang Zhao^{2*}

¹Zhongwei Permanent Way Department, Lanzhou Railway Bureau, Zhongwei Ningxia

²Shapotou Desert Research and Experiment Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou Gansu

Email: ^{*}zhaoyang66@126.com

Received: Dec. 12th, 2017; accepted: Dec. 27th, 2017; published: Jan. 3rd, 2018

Abstract

The carbon release of different types of biological soil crusts (BSC) covered soil was measured under different temperatures condition (15°C, 25°C and 35°C) and different soil water content conditions (3%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% and 30%) in fixed sand dunes at the re-vegetated area in Tengger Desert, Northern China. In the same soil water content condition, the carbon release rate of BSCs and sand were increased with temperature increasing, the highest carbon release rate occurred at 35°C. The carbon release rate of moss crust was significantly higher than other soil types. Q_{10} value of moss crust was 1.40 - 3.17, algae crust was 0.81 - 3.07, mixed crust was 0.55 - 3.84 and sand was 1.19 - 2.16. BSCs types, soil water content and temperature were significantly affected on carbon release rate ($P < 0.001$). The results showed that the respiration rate of the algal crust and mixed crust were significantly restrained by higher soil water content; however, moss crust was not significantly influenced.

Keywords

Biological Soil Crusts, Carbon Release, Soil Water Content, Temperature, Tengger Desert

生物土壤结皮碳释放对水热因子的响应

吴玉哲¹, 林庆功¹, 张志山², 赵洋^{2*}

¹兰州铁路局中卫工务段, 宁夏 中卫

²中国科学院西北生态环境资源研究院, 沙坡头沙漠研究试验站, 甘肃 兰州

Email: ^{*}zhaoyang66@126.com

收稿日期: 2017年12月12日; 录用日期: 2017年12月27日; 发布日期: 2018年1月3日

^{*}通讯作者。

摘要

在室内控制条件下,以腾格里沙漠东南缘1964年人工固沙植被区藻类、混生和藓类结皮为对象,研究了3个温度梯度(15℃、25℃和35℃)和7个水分梯度(3%、5%、10%、15%、20%、25%和30%质量含水量)条件下其碳释放特征。在相同水分条件下, BSCs和流沙呼吸速率随着温度的增加而增加, 35℃时 BSCs和流沙呼吸速率达到最大值。藓类结皮的呼吸速率显著高于其他土壤类型土壤呼吸。藓类结皮 Q_{10} 为1.40~3.17, 藻类结皮为0.81~3.07, 混生结皮为0.55~3.84, 流沙为1.19~2.16。BSCs类型、水分和温度显著影响BSCs碳释放量($P < 0.001$)。水分含量较高的条件下, 藻类和混生结皮的呼吸速率受到了明显抑制, 而对藓类结皮的呼吸速率影响不显著。

关键词

生物土壤结皮, 碳释放, 土壤含水量, 温度, 腾格里沙漠

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

生物土壤结皮(Biological Soil Crust, BSCs)是由藻类、地衣、藓类等隐花植物及土壤中的微生物和相关的其他生物体与土壤表层颗粒等非生物体胶结形成的十分复杂的复合体,是荒漠生态系统组成和地表景观的重要特征[1] [2]。大多数荒漠生态系统是由非生物因素调控和胁迫的系统,尤其因受水分的限制,地表不可能支撑大面积、相对均一而连续分布的维管束植物群落;植物群落斑块状的分布为 BSCs 的拓殖和覆盖提供了空间和适宜的生态位,使 BSCs 的覆盖在干旱区占活体覆盖面积的 40% [3]。BSCs 在不同生物气候区的荒漠景观过程,土壤生态、水文、生物过程,地球化学循环过程,以及干旱、半干旱地区的生态修复过程中发挥着重要作用[4] [5]。

BSCs 在荒漠地区碳循环中所起的作用得到了研究者的广泛的认可[3] [4] [5]。Wolfgang 等人[6]对全球范围内 BSC 覆盖地区净碳固定量(光合固碳量 - 呼吸碳释放量)进行了估算,结果表明, BSCs 每年能够固定 3.9 P g C y^{-1} ($2.1 \sim 7.4 \text{ P g C y}^{-1}$),相当于陆生植物净初生产力的 7% (56 P g C y^{-1}); BSCs 生物体中的碳含量为 4.9 P g ($3.0 \sim 8.2 \text{ P g}$),相当于陆生植物碳含量的 1% ($470 \sim 650 \text{ P g}$)。碳周转率方面, BSCs 的周转率约为 1.2 年,远远低于陆生植物的 10 年。Elbert 等人[7]同样对全球范围内 BSCs 覆盖地区净碳固定量(光合固碳量 - 呼吸碳释放量)进行了估算,结果表明, BSCs 每年能够固定 3.6 P g C y^{-1} ,相当于陆生植物净初生产力的 6%; BSCs 生物体中的碳含量为 10 P g ,相当于陆生植物碳含量的 2%。在 Iberian Peninsula ($40^{\circ}02'N \sim 3^{\circ}37'W$)干旱、半干旱地区, Castillo-Monroy 等[9]对不同盖度 BSC 覆盖条件下,土壤碳释放特征进行了研究,结果表明, BSCs 覆盖土壤每年释放 $240.4 \sim 322.6 \text{ g C m}^{-2} \cdot \text{y}^{-1}$; 在这一生态系统中, BSCs 的碳释放量占到碳释放总量的 42% (植被占 37%)。因此, BSCs 作为干旱、半干旱地区碳循环的重要参与者和主要贡献者已得到广泛共识[4] [5] [8] [9]。

尽管, BSCs 在荒漠地区碳循环中起着重要的作用,与生态要求的强调 BSCs 光合碳固定作用研究相比较,其在碳释放方面的研究却被长期忽视[4] [10] [11]。而目前已有的研究多集中在热带荒漠,对温带荒漠的研究鲜见报道。土壤呼吸温度敏感性一般用 Q_{10} 表示,即温度每升高 10°C ,呼吸速率增加的倍数。

从区域到全球尺度,多数生态系统模型(如 Roth-C、PnET、TEM 等)采用 Q_{10} 函数来估算温度对土壤异养呼吸影响的量,但 Q_{10} 常被视为常数 2 [12]。目前,仍鲜见 BSCs 温度敏感性及其影响因子的相关报道[4]。因此,加强 BSCs 碳释放对碳循环贡献和影响的研究是全面解析荒漠地区碳循环不可或缺的重要环节,是全面认知我国温度荒漠生态系统碳循环的重要基础和相关研究的重要补充,以及进一步研究荒漠生态系统如何适应和响应全球变化机制、提出区域科学对策的重要前提。

2. 研究方法

2.1. 研究区概况

中国科学院沙坡头沙漠研究试验站地处宁夏回族自治区,位于腾格里沙漠东南缘(37°32'N, 105°02'E, 海拔 1340 m)。1 月的平均气温为-6.9℃, 7 月为 24.3℃。年均降水量仅为 180 mm, 降雨主要集中在 5~9 月, 降雨量小于 2 mm 的降雨占总降雨的 80% 以上, 年潜在蒸发量高达 2800 mm。土壤基质疏松、贫瘠, 属于典型的灰钙土、风蚀土壤。土壤稳定含水量介于 3%~4%。地下水埋深 80 m, 不能为植物直接利用, 降雨是该区植物生长的唯一水分来源。天然植被主要包括花棒(*Hedysarum scoparium*)和沙米(*Agriophyllum squarrosum*), 其盖度仅 1%。

始建于 1956 年的沙坡头人工固沙植被区经过 50 余年的演化, 已由原来的以流动沙丘为主的景观演变成了复杂的人工—天然的荒漠生态系统, 其中最为显著的变化是 BSC 的拓殖与发育。目前, 在 1956 年始建的植被区, BSC 盖度已经超过 80%, 盖度较大且发育较好的结皮类型有藻类和藓类结皮[4] [5] [13]。

2.2. 试验方法

2013 年 10 月, 在腾格里沙漠东南缘沙坡头地区 1964 年始建的人工固沙植被区选择发育良好的藻类结皮、藓类结皮及混生(藻类、地衣和藓类等隐花植物混生)结皮(本研究中将某优势种盖度大于 70% 的定义为该类型的结皮)。为避免微地形环境和植被对结皮发育的影响, 取样点选择在植被间的地势平坦的开阔地, 用内径 10.4 cm、高 20 cm 的 PVC 管取原状土。将采来的 BSCs 样品放置在阴凉通风处, 待到样品重量恒定不变时开始试验。

在 3 个温度梯度(15℃、25℃和 35℃)和 7 个水分梯度(3%、5%、10%、15%、20%、25%和 30%质量含水量)测定土壤呼吸速率。采用 Li-6400-09 土壤呼吸室(Li-COR, INC, USA)测定土壤呼吸速率。水分添加采用喷壶喷洒的方法, 均匀的喷洒在样品表面; 每个水分梯度在设定的温度条件下培养 2 h, 开始土壤呼吸的测定。试验在人工气候室中进行, 每处理设 6 次重复。

2.3. 数据分析

数据分析和图表绘制分别在 SPSS16.0 和 Origin8.0 中进行。

3. 结果与分析

3.1. 温度和水分对不同类型 BSC 呼吸速率的影响

图 1 描述了 3 个土壤温度和 7 个水分梯度条件下, 不同类型 BSC 和流沙呼吸速率变化特征。在相同水分条件下, BSCs 和流沙呼吸速率随着温度的增加而增加, 35℃时 BSCs 和流沙呼吸速率达到最大值。而在相同温度条件下, 不同类型 BSCs 和流沙呼吸速率随着水分的变化表现出不同的变化趋势。藓类结皮呼吸速率表现为随着水分增加而逐渐增加的趋势, 15℃和 35℃条件下, 最大值均出现在 25%含水量条件下为 1.33 和 3.38 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; 25℃条件下, 最大值出现在 20%含水量条件下为 1.65 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。藻类结皮呼吸速率在 15℃和 25℃条件下表现为随着水分增加先急剧增加而后逐渐下降的趋势, 最大值均

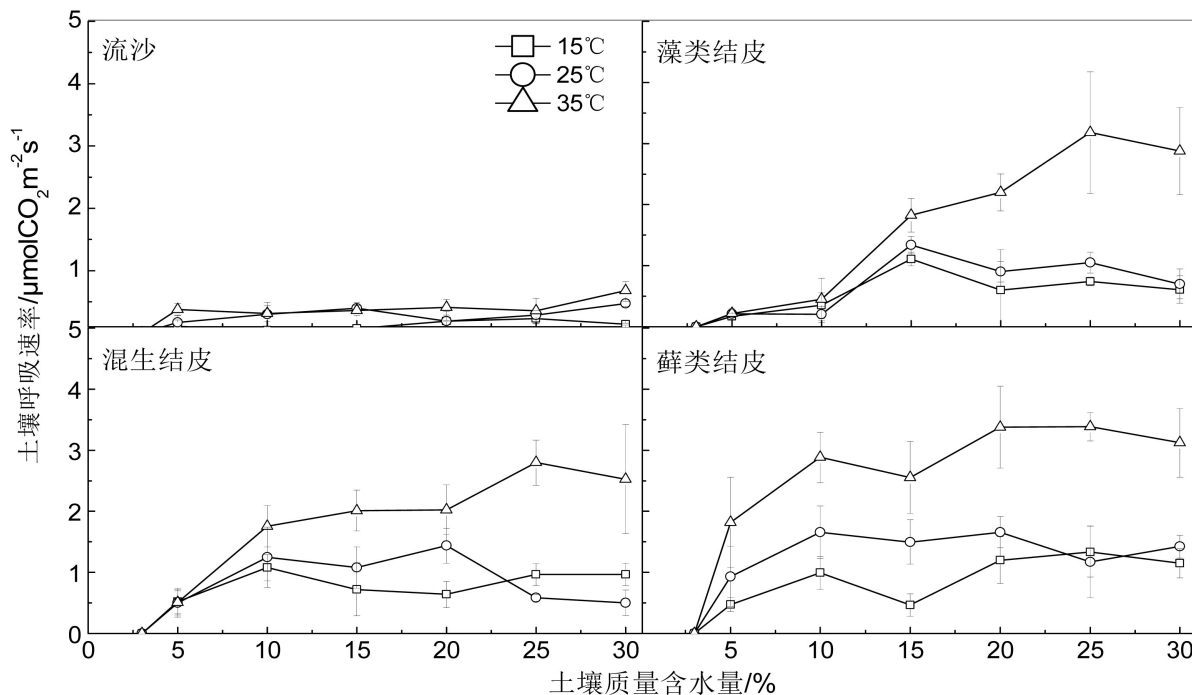


Figure 1. Effects of soil temperature and soil water content on BSC respiration rate (Mean ± SE)

图 1. 土壤温度和水分对 BSC 呼吸速率(Mean ± SE)的影响

出现在 8%含水量条件为 1.10 和 1.34 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ；而在 35°C条件下，呼吸速率表现为随着水分增加而逐渐增加的趋势，最大值出现在 20%含水量条件下为 3.18 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。混生结皮呼吸速率在 15°C条件下表现出随着水分增加先急剧增加而后逐渐下降的趋势，最大值均出现在 6%含水量条件，为 1.07 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ；而在 25°C和 35°C条件下，呼吸速率表现为随着水分增加而逐渐增加的趋势，最大值出现在 15%和 20%含水量条件下为 1.44 和 2.80 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。流沙呼吸速率表现出随着水分增加而逐渐增加的趋势，15°C条件下，最大值出现在 15%含水量条件下，为 0.23 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ；而在 25°C和 35°C条件下，最大值均出现在 17%含水量条件下分别为 0.47 和 0.68 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

3.2. 不同温度和水分条件下不同类型 BSC 呼吸速率差异性分析

对 3 个温度梯度下不同类型 BSC 间进行差异性分析表明，藓类结皮呼吸速率在 3 个温度梯度下均显著高于其他类型的 BSC ($P < 0.05$)，而流沙呼吸速率在 3 个温度梯度下均显著低于其他类型的 BSC ($P < 0.05$ ，表 1)。对 7 个水分梯度不同类型 BSC 间进行差异性分析表明，除了第 1 和 6 水分条件下，藓类结皮呼吸速率均显著高于其他类型的 BSC ($P < 0.05$)；3、4 和 5 水分条件下，流沙呼吸速率均显著低于 BSC 的呼吸速率($P < 0.05$ ，表 2)。

不同温度和水分条件下对相同类型 BSC 呼吸速率进行差异性分析表明，在相同温度(15°C、25°C和 35°C)条件下，水分含量大于 10%时，藓类结皮呼吸速率显著高于其他含水量时的呼吸速率($P < 0.05$)。15°C和 25°C、含水量为 8%时，藻类结皮呼吸速率显著高于其他含水量时的呼吸速率；35°C、含水量为 20%~25%时，呼吸速率显著高于其他含水量时的呼吸速率。15°C和 25°C、含水量为 5%~16%时，混生结皮呼吸速率显著高于其他含水量时的呼吸速率；35°C、含水量为 20%~25%时，呼吸速率显著高于其他含水量时的呼吸速率。5°C和 25°C、含水量为 1%时，流沙呼吸速率显著低于其他含水量时的土壤呼吸速率；35°C、含水量为 16%时，土壤呼吸速率显著高于其他含水量时的土壤呼吸速率($P < 0.05$) (表 3)。

Table 1. Significant analysis of BSC dark respiration rate in the same soil temperature
表 1. 相同土壤温度条件下不同类型 BSC 呼吸速率差异显著性分析

BSC 类型	15℃	25℃	35℃
藓类	a	a	a
藻类	b	b	b
混生	a	b	b
流沙	c	c	c

注：表中相同小写字母表示差异不显著 $P > 0.05$ 水平。

Table 2. Significant analysis of BSC dark respiration rate in the same soil water content
表 2. 相同土壤水分条件下不同类型 BSC 呼吸速率差异显著性分析

水分梯度	藓类结皮	藻类结皮	混生结皮	流沙
1	a	a	a	a
2	a	b	b	b
3	a	b	b	c
4	a	b	ab	c
5	a	b	b	c
6	a	a	a	b
7	a	b	b	c

注：表中相同小写字母表示差异不显著 $P > 0.05$ 水平。

Table 3. Significant analysis of BSC dark respiration rate in the different soil temperature and soil water content
表 3. 不同温度、水分条件下相同类型 BSC 呼吸速率差异显著性分析

BSC 类型	温度	水分梯度						
		1	2	3	4	5	6	7
藓类	15℃	bA	bB	aC	bC	aB	aB	aB
	25℃	cA	bB	aB	abB	aB	abB	abB
	35℃	cA	bA	abA	abA	aA	aA	aA
藻类	15℃	cA	abA	aB	abC	bB	bC	bB
	25℃	fA	eA	aB	bB	cB	bcB	dB
	35℃	cA	cA	bA	bA	bA	aA	aA
混生	15℃	dA	cA	aB	abcB	bcC	abB	abA
	25℃	cA	bA	aB	aB	aB	bC	bB
	35℃	dA	dA	cA	bcA	bcA	aA	abA
流沙	15℃	bA	abB	abA	abB	abB	aAB	abC
	25℃	cA	bB	abA	aA	bB	abAB	aB
	35℃	cA	bA	bA	bA	bA	bA	aA

注：表中小写和大写字母分别表示相同类型 BSC 相同温度不同水分(横向)和相同水分不同温度(纵向)条件下差异显著性分析；相同小写和大写字母表示差异不显著 $P > 0.05$ 水平。

在相同水分梯度条件下，藓类结皮，35℃条件下的呼吸速率显著高于15℃和25℃条件下的呼吸速率；10%~15%含水量，25℃条件下的呼吸速率显著高于15℃的呼吸速率。藻类结皮，当含水量大于7%时，35℃条件下的呼吸速率显著高于15℃和25℃条件下的呼吸速率；含水量在10%和20%时，25℃条件下的呼吸速率显著高于15℃条件下的呼吸速率。混生结皮，当含水量大于5%时，35℃条件下的呼吸速率显著高于15℃和25℃条件下的呼吸速率；含水量在15%时，25℃条件下的呼吸速率显著高于15℃条件下的呼吸速率。流沙，当含水量大于10%时，35℃条件下的呼吸速率显著高于15℃和25℃条件下的呼吸速率；水分含量在5%和16%时，25℃条件下的呼吸速率显著高于15℃条件下的呼吸速率。

3.3. 不同温度和水分条件下不同类型 BSC 呼吸速率差异性分析

对模拟试验结果用一般线性模型(General Linear Model, GLM)进行多因素方差分析。结果表明，BSC呼吸速率在BSC类型、土壤温度和土壤含水量均存在显著差异($P < 0.01$)，它们之间的二维和三维互作也存在着显著差异($P < 0.01$)。整个一般线性模型结果可以解释88.2%的差异(表4)。

3.4. 不同类型 BSC 温度敏感性(Q₁₀)

分别在15℃~25℃和25℃~35℃2个温度梯度、7个水分梯度条件下计算了不同类型BSC的Q₁₀。结果表明，藓类结皮Q₁₀在1.40~3.17间，藻类结皮在0.81~3.07间，混生结皮在0.55~3.84间，流沙在1.19~2.16间，各类型BSC和流沙25℃~35℃的Q₁₀大于15℃~25℃。随着土壤水分含量的不断增加，藓类结皮Q₁₀值不断增加；藻类和混生结皮，表现出先增加后降低的特征，当土壤含水量大于15%时，Q₁₀迅速降低。根据平均值计算，Q₁₀的大小顺序为藓类结皮 > 混生结皮 > 藻类结皮 > 流沙(图2)。

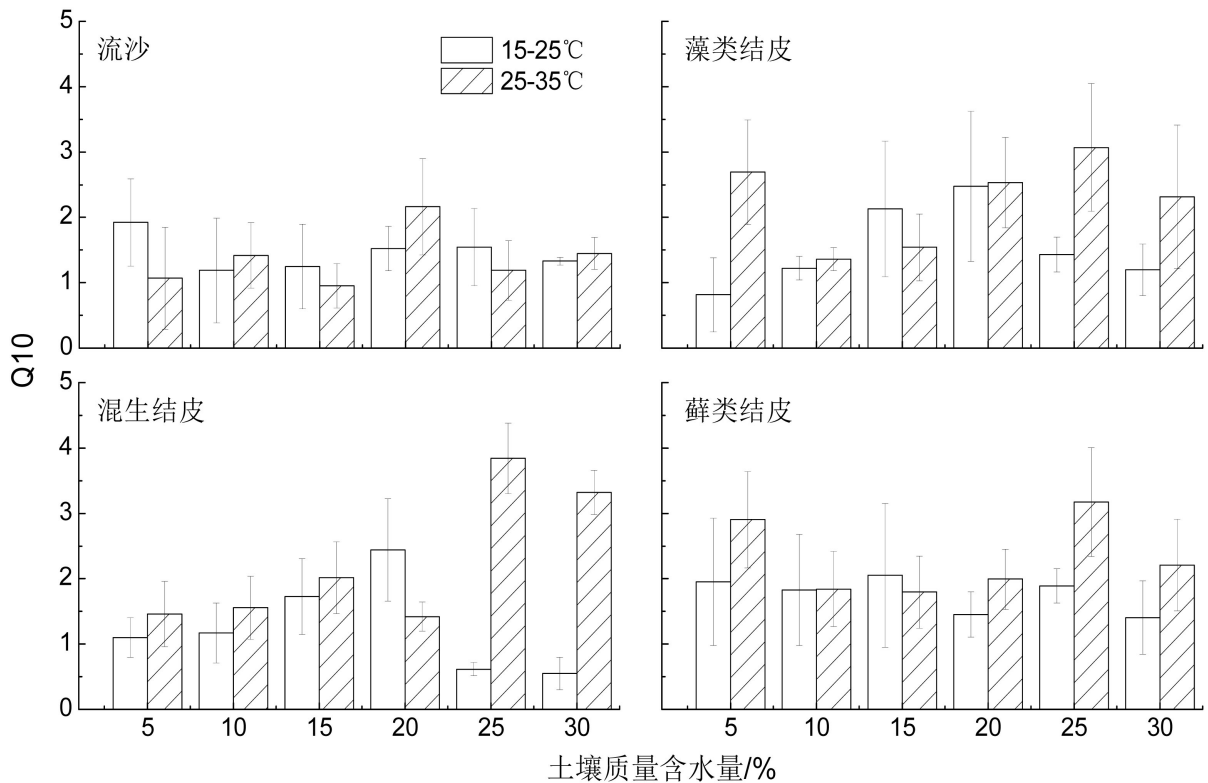


Figure 2. Q₁₀ values of different BSC types (Mean ± SE)
图2. 不同类型 BSC 温度敏感性(Q₁₀)

Table 4. Three way-ANOVA analyses on effects of BSC types, soil temperature and soil water content on BSC dark respiration rate**表 4.** BSC 类型(BSC)、土壤温度(ST)和土壤含水量(SWC)对 BSC 呼吸速率影响的多因素方差分析

变异来源	平方和	均方	F	P
结皮类型	67.96	22.66	158.30	0.000
温度	79.07	39.53	276.23	0.000
土壤含水量	87.03	14.51	101.35	0.000
结皮类型 × 温度	18.79	3.13	21.88	0.000
结皮类型 × 土壤含水量	20.88	1.16	8.11	0.000
温度 × 土壤含水量	31.61	2.63	18.40	0.000
结皮类型 × 温度 × 土壤含水量	14.26	0.40	2.77	0.000

注: $R^2 = 0.882$ (校正 $R^2 = 0.851$)。

4. 讨论

4.1. 影响 BSCs 碳释放的因素分析

4.1.1. BSC 类型对土壤呼吸碳释放量的影响

本研究结果表明, 演替后期的藓类结皮碳释放量高于演替初期的藻类结皮, 即藓类结皮 > 混生结皮 > 藻类结皮 > 流沙, 与 Belnap and Lange [3]和 Evans and Lange [10]研究结果相似。Grote 等人[11]分别在野外和试验室条件下证明了, 处于演替后期的深色结皮暗呼吸速率大于演替初期浅色结皮的暗呼吸速率。综上所述, 处于演替后期的 BSCs 是碳释放的主要贡献者。BSC 有机体的生物量差异是造成其碳释放差异的主要原因。通常 BSCs 有机体的生物量用叶绿素 a + b 表示, Li 等人[13]对该试验区 BSCs 叶绿素 a + b 进行了测定, 结果表明藓类结皮, 藻类结皮和混生结皮的叶绿素 a + b 含量分别为 7.34、3.80 和 5.45 $\mu\text{g C m}^{-2}$, 即藓类结皮 > 混生结皮 > 藻类结皮, 叶绿素 a + b 含量随着演替阶段的推进而不断的增加。综上所述, BSCs 有机体的生物量影响 BSC 的碳释放量。

4.1.2. 水分对土壤呼吸碳释放量的影响

土壤水分是影响干旱、半干旱地区土壤碳释放的重要因素[14] [15]。在干旱、半干旱地区, 土壤水分主要来源于降雨。土壤水分过多或不足均会抑制土壤呼吸, 土壤呼吸的最大速率出现在土壤水分含量适中时[16]。在农田和草原上对强降雨的研究指出, 强降雨迅速降低或抑制了土壤呼吸。张红星等人研究发现[17], 土壤呼吸在强降雨中和雨后分别下降了 33%和 15%。一些来自室内模拟的研究同样表明, 强降雨显著抑制了土壤呼吸[18]。从以上的大量研究可以看出, 土壤含水量是影响土壤呼吸的重要因素, 雨量和强度较大的降雨使得土壤表层的含水量增加, 进而影响土壤碳的释放。大量研究表明, 中等水平的自然降雨量能够促进土壤呼吸[14], 于此同时, 大量针对不同生态系统的模拟试验也取得了和野外试验类似的结果[19]。本研究结果表明, 水分含量较高的条件下, 藻类和混生结皮的呼吸速率受到了明显抑制, 而对藓类结皮的呼吸速率影响不明显。水分取代了土壤中 CO_2 占据的位置的同时也使土壤的通透性变差, CO_2 在土壤中的扩散阻力因此增大, 是导致土壤 CO_2 排放量减少的主要原因[20]。藻类结皮和藓类结皮对水分的拦截能力不同。藻类在生长季节能够分泌大量胞外多聚糖, 随这种多糖物质浓度的提高, 土壤持水性能增大, 土壤水分蒸发速率降低, 水分在土壤中的运动速率降低, 这使得降水过后水分大量集中在土壤表层。藓类植物叶子的季节变化也会影响土壤水文特性, 许多藓类植物长有一定长度的尖梢, 可以把水分引入植物体中间去, 水分通过植物体向土壤深层入渗, 降水过后水分不会大量的集中在土壤表层[13]。因此, 处于演替高级阶段的藓类结皮能够很好地应对短期的极端降雨事件。

4.1.3. 温度对土壤呼吸碳释放量的影响

温度是影响 BSC 碳释放的重要环境因子。土壤呼吸随土壤温度变化呈现出日变化、季节变化和年际变化特征[21]。Castillo-Monroy 等人[9]和 Thomas and Hoon [22]的研究证明了温度对 BSC 碳释放的影响,即 BSC 碳释放量随着温度的变化而变化。本研究结果表明,在相同水分条件下,BSC 和流沙呼吸速率也随着温度的增加而增加。

4.2. 温度和水分对 BSCs 碳释放 Q_{10} 的影响

4.2.1. 温度对 BSCs 碳释放 Q_{10} 的影响

多数研究表明温度显著影响土壤呼吸 Q_{10} 。Sjögersten 和 Wookey 对瑞典 Lapland 北部山地苔原土壤和附近山地白桦林土壤研究发现,7°C~12°C 温度范围内的 Q_{10} 值高于 2°C~7°C 温度范围内的 Q_{10} 值[23]。Nadelhoffer 等对阿拉斯加 North Slope 的土壤进室内培养实验,发现温度在 3°C~9°C 时, Q_{10} 约为 1; 当温度为 9°C~15°C 时, Q_{10} 约为 3.1 [24]。Howard 和 Howard 发现英格兰泥炭土壤和渍水灰壤在不同水分条件,0°C~20°C 温度范围内, Q_{10} 随温度升高而增加[25]。对不同季节 Q_{10} 差异也揭示类似规律性。Lipson 等将夏季和冬季取的高山干旱草甸土壤置于 0°C 和 22°C 温度下进行室内培养,发现冬季土壤 Q_{10} 值(2.3) 低于夏季土壤 Q_{10} 值(3.6)。Castillo-Monroy 等人[9]的研究表明,在相同水分不同温度条件下不同盖度 BSCs 覆盖土壤的 Q_{10} 在 1.65~1.80 之间变化。Jia 等[26]在 5°C~40°C 范围内,对腾格里沙漠东南缘 3 种藓类结皮 Q_{10} 值进行了测定。研究发现, Q_{10} 值随着水分增加而增加。土生对齿藓结皮 Q_{10} 值为 2.23~2.79,刺叶赤藓结皮 Q_{10} 值为 2.08~2.71,真藓结皮 Q_{10} 值为 1.84~2.45。而在相同水分条件下,3 种藓类结皮 Q_{10} 值为土生对齿藓结皮 > 刺叶赤藓结皮 > 真藓结皮。本研究结果表明 25°C~35°C 条件下的 Q_{10} 值高于 15°C~25°C 条件下,即 Q_{10} 随温度升高而升高,与上述研究结果相似。因此,温度显著影响 BSCs 呼吸温度敏感性。

4.2.2. 温度对 BSCs 碳释放 Q_{10} 的影响

大量研究表明水分影响土壤呼吸 Q_{10} [27] [28]。对南极洲附近 Marion 岛屿土壤进行室内培养研究发现,温度在 5°C~20°C 间,水分含量在 20%~100% 间, Q_{10} 值与土壤水分含量成正相关关系[28]。在亚利桑那州对荒漠土壤的室内培养研究发现,温度在 5°C~35°C 范围内,土壤水势从 -1.5 MPa 增至 -0.03 MPa, Q_{10} 从 2.1 增加到 3.2 [28]。Howard 等将英格兰 8 种土壤类型表层 10 cm 土壤,在土壤含水量在 10%~100% 和温度 0°C~20°C 条件下培养,发现 Q_{10} 随水分增加而升高[25]。张志山[29]对腾格里沙漠东南缘人工植被沙区土壤呼吸研究表明,温度对土壤呼吸的影响表现在只改变量的大小,而不引起质的变化。只有在水分充足的条件下,土壤呼吸速率才表现出与气温和地表温度一致的季节和日变化趋势。本研究结果发现,随着土壤水分含量的不断增加,藓类结皮 Q_{10} 值不断增加;藻类和混生结皮,表现出先增加后降低的特征,当土壤含水量大于 15% 时, Q_{10} 迅速降低,与多数研究结果相似。因此,水分条件显著影响 BSCs 呼吸温度敏感性。

5. 结论

BSCs 类型、水分和温度显著影响 BSCs 碳释放量。水分含量较高的条件下,藻类和混生结皮的呼吸速率受到了明显抑制,而对藓类结皮的呼吸速率影响不显著。因此,在全球变化大背景条件下,处于演替高级阶段的藓类结皮能够很好地应对短期的极端降雨事件。

基金项目

中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDJ-SSW-SMC011); 国家自然科学基金(41501270 和 41471434)资助。

参考文献 (References)

- [1] West, N.E. (1990) Structure and Function of Micro-Phytic Soil Crusts in Wild-Land Ecosystems of Arid to Semi-Arid Regions. *Advances in Ecological Research*, **20**, 179-223. [https://doi.org/10.1016/S0065-2504\(08\)60055-0](https://doi.org/10.1016/S0065-2504(08)60055-0)
- [2] Eldridge, D.J. and Greene, R.S.B. (1994) Micro-Biotic Soil Crusts: A View of Their Roles in Soil and Ecological Processes in the Rangelands of Australia. *Australian Journal of Soil Research*, **32**, 389-415. <https://doi.org/10.1071/SR9940389>
- [3] Belnap, J. and Lange, O.L. (2003) *Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management*. Springer-Verlag, Berlin. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-56475-8>
- [4] 李新荣. 荒漠生物土壤结皮生态与水文学研究[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012.
- [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[J]. 地球科学进展, 2009, 24(1): 11-25.
- [6] Wolfgang, E., Bettina, W., Burrows, S., et al. (2012) Contribution of Cryptogamic Covers to the Global Cycles of Carbon and Nitrogen. *Nature Geoscience*, **3**, 1-4.
- [7] Elbert, W., Weber, B., Büdel, B., et al. (2009) Microbiotic Crusts on Soil, Rock and Plants: Neglected Major Players in the Global Cycles of Carbon and Nitrogen. *Biogeosciences Discuss*, **6**, 6983-7015. <https://doi.org/10.5194/bgd-6-6983-2009>
- [8] 贾荣亮, 李新荣, 谭会娟, 等. 沙埋干扰去除后生物土壤结皮光合生理恢复机制[J]. 中国沙漠, 2005, 30(6): 1299-1305.
- [9] Castillo-Monroy, A.P., Maestre, F.T., et al. (2011) Biological Soil Crust Micro-Sites Are the Main Contributor to Soil Respiration in a Semiarid Ecosystem. *Ecosystems*, **14**, 835-847. <https://doi.org/10.1007/s10021-011-9449-3>
- [10] Evans, R.D. and Lange, O.L. (2001) Biological Soil Crusts and Ecosystem Nitrogen and Carbon Dynamics. Biological Soil Crusts: Characteristics and Distribution. In: Belnap, J. and Lange, O.L., Eds., *Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management*, Springer-Verlag, New York, 263-279. https://doi.org/10.1007/978-3-642-56475-8_20
- [11] Grote, E.E., Belnap, J., Housman, D.C., et al. (2010) Carbon Exchange in Biological Soil Crust Communities under Differential Temperatures and Soil Water Content: Implications for Global Change. *Global Change Biology*, **16**, 2763-2774. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02201.x>
- [12] Kirschbaum, M.U.F. (1995) Temperature Dependence of Soil Organic Matter Decomposition, and the Effect of Global Warming on Soil Organic C Storage. *Soil Biology & Biochemistry*, **27**, 753-760. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(94\)00242-S](https://doi.org/10.1016/0038-0717(94)00242-S)
- [13] Li, X.R., Tian, F., Jia, R.L., et al. (2010) Do Biological Soil Crusts Determine Vegetation Changes in Sandy Deserts? Implications for Managing Artificial Vegetation. *Hydrological Processes*, **24**, 3621-3630. <https://doi.org/10.1002/hyp.7791>
- [14] Huxman, T., Snyder, K., Tissue, D., et al. (2004) Precipitation Pulses and Carbon Fluxes in Semiarid and Arid Ecosystems. *Oecologia*, **141**, 254-268. <https://doi.org/10.1007/s00442-004-1682-4>
- [15] Sponseller, R.A. (2007) Precipitation Pulses and Soil CO₂ Flux in a Sonoran Desert Ecosystem. *Global Change Biology*, **13**, 426-436. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01307.x>
- [16] 卫伟, 陈利顶, 傅伯杰, 等. 黄土丘陵沟壑区极端降雨事件及其对径流泥沙的影响[J]. 干旱区地理, 2007, 30(6): 896-901.
- [17] 张红星, 王效科, 冯宗炜, 等. 干湿交替格局下黄土高原小麦田土壤呼吸的温湿度模型[J]. 生态学报, 2009, 28(6): 6189-6196.
- [18] McIntyre, R.E.S., Adams, M.A., Ford, D.J., et al. (2009) Rewetting and Litter Addition Influence Mineralisation and Microbial Communities in Soils from a Semi-Arid Intermittent Stream. *Soil Biology and Biochemistry*, **41**, 92-101. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.09.021>
- [19] Norton, U., Mosier, A.R., Morgan, J.A., et al. (2008) Moisture Pulses, Trace Gas Emissions and Soil C and N in Cheat Grass and Native Grass-Dominated Sage-Brush-Steppe in Wyoming, USA. *Soil Biology and Biochemistry*, **40**, 1421-1431. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.12.021>
- [20] Kursar, T.A. (1989) Elevation of Soil Respiration and Soil CO₂ Concentration in a Low Land Moist Forest in Panama. *Plant and Soil*, **113**, 21-29. <https://doi.org/10.1007/BF02181917>
- [21] Phillips, R. and Fahey, T. (2007) Fertilization Effects on Fineroot Biomass, Rhizosphere Microbes and Respiratory Fluxes in Hardwood Forest Soils. *New Phytologist*, **176**, 655-664. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.02204.x>
- [22] Thomas, A.D. and Hoon, S.R. (2010) Carbon Dioxide Fluxes from Biologically-Crusted Kalahari Sands after Simulated Wetting. *Journal of Arid Environments*, **74**, 131-139. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2009.07.005>
- [23] Sjögersten, S. and Wookey, P.A. (2002) Climatic and Resource Quality Controls on Soil Respiration across a For-

est-Tundra Ecotone in Swedish Lapland. *Soil Biology & Biochemistry*, **34**, 1633-1646.

[https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(02\)00147-5](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(02)00147-5)

- [24] Nadelhoffer, K.J., Giblin, A.E., Shaver, G.R., *et al.* (1991) Effects of Temperature and Substrate Quality on Element Mineralization in Six Arctic Soils. *Ecology*, **72**, 242-253. <https://doi.org/10.2307/1938918>
- [25] Howard, D.M. and Howard, P.J.A. (1993) Relationships between CO₂ Evolution, Moisture Content and Temperature for a Range of Soil Types. *Soil Biology & Biochemistry*, **25**, 1537-1546. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(93\)90008-Y](https://doi.org/10.1016/0038-0717(93)90008-Y)
- [26] Jia, R.L., Li, X.R., Liu, L.C., *et al.* (2008) Responses of Biological Soil Crusts to Sand Burial in Vegetated Area of the Tengger Desert, Northern China. *Soil Biology and Biochemistry*, **40**, 2827-2834. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.07.029>
- [27] Smith, V.R. (2005) Moisture, Carbon and Inorganic Nutrient Controls of Soil Respiration at a Sub-Antarctic Island. *Soil Biology & Biochemistry*, **37**, 81-91. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.07.026>
- [28] Conant, R.T., Dalla-Betta, P., Klopatek, C.C., *et al.* (2004) Controls on Soil Respiration in Semiarid Soil. *Soil Biology & Biochemistry*, **36**, 945-951. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.02.013>
- [29] 张志山. 固沙植被生态系统演替中的土壤生物学和呼吸特征研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2009.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2329-7255, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: hjss@hanspub.org