

干旱区不同降雨模式对藻结皮覆被区 土壤碳释放的影响

王黎黎, 曹晓明

(中国林业科学研究院 荒漠化研究所, 北京 100091)

摘要: [目的] 探究干旱区不同降雨模式对藻结皮覆被区土壤碳释放的影响, 为精确估算干旱区生态系统土壤碳释放量提供科学依据。[方法] 以乌兰布和沙漠为例, 通过人工增雨和改变降雨频率来模拟全球气候变化, 对藻结皮覆被区土壤碳释放量进行长期野外监测。[结果] 降雨能够刺激藻结皮覆被区土壤呼吸速率迅速大幅度提升, 并在 1 h 内达到峰值, 12 h 左右降至较低水平。但随着干湿交替次数的不断增大, 土壤再湿润后所产生的呼吸脉冲逐渐减弱, 最后 1 次降雨与第 1 次相比土壤呼吸峰值降低了 40%~60%。在降雨后 16 h 累积碳释放量、总碳释放量都随着降雨量的增大而增大, 但当降雨量增大到一定程度后, 其对土壤碳释放量的促进作用不再明显。就单次降雨而言, 低频率、大雨量的降雨事件所引起的碳释放量明显高于高频率、小雨量的降雨事件。但总降雨量一致的情况下, 则是高频率的小降雨事件所释放的总碳量最高, 其次为低频率的大降雨事件, 正常降雨频率下最小。[结论] 气候变化所引起的降雨量增加和降雨频率的变化将会增加藻结皮覆被区的碳排放量, 在预测碳收支时, 也应将藻结皮的碳排放量变化作为考虑因素之一。

关键词: 土壤碳通量; 藻结皮; 降雨量; 降雨频率

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2020)04-0039-06

中图分类号: S154.36

文献参数: 王黎黎, 曹晓明. 干旱区不同降雨模式对藻结皮覆被区土壤碳释放的影响[J]. 水土保持通报, 2020, 40(4): 39-44. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2020.04.006; Wang Lili, Cao Xiaoming. Effects of different precipitation patterns on carbon emission of cyanobacteria crust covered soil in arid regions [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(4): 39-44.

Effects of Different Precipitation Patterns on Carbon Emission of Cyanobacteria Crust Covered Soil in Arid Regions

Wang Lili, Cao Xiaoming

(Institute of Desertification Studies, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: [Objective] The effects of different precipitation patterns on carbon emission of cyanobacteria crust covered soil were explored in order to provide scientific basis for accurate estimation of carbon emission of ecosystems in arid regions. [Methods] Taking Ulan Buh Desert as a study area, the global climate change was simulated by artificial precipitation enhancement and frequency change. Long-term field monitoring was conducted for soil respiration rate of cyanobacteria crust covered soil. [Results] Precipitation could stimulate the release fluxes of CO₂ immediately. The soil respiration rate reached maximum within 1 hour after rainfall, and fell to a low level in about 12 hours. With the increasing of dry-wet alternation times, the respiration pulse gradually weakened. Compared with the first rainfall, the peak of soil respiration rate was decreased by 40% to 60% after the last rainfall. The 16-hour cumulative release fluxes of CO₂ and the total cumulative release fluxes of CO₂ all increased along with the increase of precipitation size. However, when the precipitation size increased to a certain extent, it had no obvious acceleration effect on soil carbon

收稿日期: 2020-03-26

修回日期: 2020-05-08

资助项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金重点项目“干旱区不同降水模式下苔藓结皮碳通量过程”(CAFYBB2017QA038); 国家自然科学基金面上基金(41971398); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金重点项目(CAFYBB2020ZB007)

第一作者: 王黎黎(1986—), 女(汉族), 辽宁省抚顺市人, 博士, 助理研究员, 主要从事荒漠化防治方面的研究。Email: wanglili@caf.ac.cn.

emission. For a single precipitation, the release fluxes of CO_2 caused by low-frequency heavy precipitation were significantly greater than that of high-frequency light precipitation. With the total precipitation size constant, the release fluxes of CO_2 caused by high-frequency light precipitation was the highest, the low-frequency heavy precipitation was the second, the normal frequency precipitation was the minimum. [Conclusion] Increased precipitation size and changes in frequency caused by global climate change will increase carbon emission of cyanobacteria crust covered soil, suggesting that cyanobacteria should be considered in projections of future carbon budget.

Keywords: carbon flux; cyanobacteria crust; precipitation; frequency

全球气候变化,尤其是其与陆地生态系统的相互作用已成为当今生态研究的焦点问题^[1]。多个气候模型预测的结果一致显示,未来气候变化背景下,全球或局部地区的降雨格局将发生变化,高纬地区和热带太平洋区域降雨将增加,许多中纬度的地区平均降水也将增加^[2-3];在一些地区,降雨格局可能进一步改变,表现为强降水和干旱等极端气候事件增多。 CO_2 作为最重要的温室气体之一,其源、汇以及排放过程受到广泛关注^[4]。

生物土壤结皮(biological soil crusts, BSCs, 简称生物结皮)是干旱环境下自然发育的一种微生物共生体,它是由细菌、真菌等微生物和藻类、地衣以及苔藓与表层土壤颗粒进行复合作用而形成的特殊致密层并覆盖于地表^[5],是荒漠生态系统组成和地表景观的重要特征。在干旱半干旱区,生物结皮的盖度占地表面积的 40%^[6],在一些受干扰较少的地区,其盖度可达 70%^[7],具有重要的生态功能^[8]。生物结皮作为具有光合固碳活性的土壤与大气系统界面层,通过光合作用固定空气中的 CO_2 ,又以呼吸作用消耗土壤碳,同时伴随着生物体的分解矿化而影响着荒漠系统的碳循环^[9],成为干旱半干旱生态系统土壤 CO_2 通量的影响因子之一。生物结皮对外界环境尤其是水分因子的变化非常敏感,降水格局的改变势必会在一定程度上影响生物结皮的碳释放过程,进而影响其覆被下的土壤呼吸过程,乃至影响整个生态系统的碳循环过程。目前,国内外关于生物结皮碳释放的研究主要集中在生物结皮的碳释放速率^[10-11]、生物结皮对土壤呼吸的影响^[12-14]、生物结皮碳释放与温度、水分、土壤理化性质等环境因子的关系^[8-11,15-18]等方面。干旱区土壤呼吸对降雨的响应已取得部分研究进展,特别是在降雨强度如何影响碳输入和输出方面。相比较而言,较大程度上忽略了碳过程对降雨时间分布响应的相关研究。藻结皮是生物结皮发育的初级阶段,是荒漠地区的拓荒植物和先锋植物,以适应极端环境条件、忍耐干旱、适应强辐射和适应贫瘠的土壤生境为特点,广泛分布在旱区严酷环境中,是乌兰布和沙漠

重要地表覆盖景观特征之一。本研究以乌兰布和沙漠藻结皮为研究对象,探究 3 个降雨量水平 \times 3 种降雨频率的 9 种降雨模式下,藻结皮覆盖土壤的碳释放过程,以期精确估算干旱区生态系统土壤碳释放量提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区自然概况

研究区位于内蒙古西部河套平原源头,乌兰布和沙漠东部边缘,隶属于巴彦淖尔市磴口县,地处东经 $106^{\circ}9'$ — $107^{\circ}10'$,北纬 $40^{\circ}9'$ — $40^{\circ}57'$ 之间。该县东西长约 92 km,南北宽约 65 km,总面积 4 167 km^2 。地势东南高、西北低,海拔最高 2 046 m,最低 1 030 m。气候属温带大陆性季风气候,年平均气温为 7.6 $^{\circ}\text{C}$,年平均降雨量 144.5 mm,年均蒸发量 2 397.6 mm。土壤类型以灰漠土、棕钙土和风沙土为主,整体表现出退化趋势。该地区为荒漠与干草原的过渡地带,植被类型为荒漠区沙生植被,主要物种为梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、白刺(*Nitraria tangutorum*)、油蒿(*Artemisia ordosica*)、怪柳(*Tamarix chinensis*)、杨柴(*Hedysarum mongolicum*)、花棒(*Hedysarum scoparium*)、盐爪爪(*Kalidium foliatum*)、旋覆花(*Inula britanica*)等。研究区内生物结皮广泛分布,主要包括藻类结皮、地衣结皮和苔藓结皮,其优势种分别为具鞘微鞘藻(*Microcoleus vaginatus*)、胶衣(*Collema tenax*)和拟双色真藓(*Bynum argentum*),其盖度一般都在 30%以上。其中地衣结皮和苔藓结皮大部分分布于植物覆被下,而在植物覆被外的绝大部分沙地上,藻结皮的分布占比最大^[19]。

1.2 研究方法

1.2.1 试验设计 根据气候评估报告^[2],预计到 21 世纪末,中国西北地区年降雨量将增加 10%~60%,许多地方的降雨强度和降雨时间分布变化将进一步增加。基于此,本研究设计 3 种降雨量水平,以 1986—2015 年 30 a 间 8 月份的平均降雨量(5.26

mm)为基准(对照),设增雨 30%(6.84 mm)和增雨 60%(8.12 mm)两个增雨处理(见表 1)。在以上 3 个降雨量水平下,各设置 3 种降雨频率,分别是基于 1986—2015 年 30 a 间 8 月份的平均降雨频率(6 次,该地区 8 月平均降雨次数为 5 次,由于本试验从 7 月末开始,故增加 1 次)为基准(对照),设增加降雨频率 50%(12 次)和减少降雨频率 50%(3 次)两个处理。研究共 9 种降雨模式(3 个降雨量水平×3 种降雨频率),每种处理 3 个重复。增加降雨频率 50%:将单次降雨平均分为两次降雨,减少降雨频率 50%:将相邻两次的降雨叠加。保证同一降雨量水平下不同降雨频率处理下的总降雨量不变。为避免自然降雨对试验的干扰,用透明塑料布在样品上方搭建遮雨棚。

表 1 试验设计			
项 目	30 a 平均降雨量	增雨 30%	增雨 60%
30 a 平均频率	模式 1	模式 2	模式 3
频率减 50%	模式 4	模式 5	模式 6
频率加 50%	模式 7	模式 8	模式 9

1.2.2 采集样品 2017 年 7 月,选取地势平坦、远离植物、藻结皮发育良好的区域为采样区域。利用直径为 20.3 cm(面积 0.032 m²),高为 20 cm 的 PVC 自制采样器采集藻结皮覆盖原状土 27 个。样品采集前,用蒸馏水湿润结皮表面,以保证采集样品的完整性。

1.2.3 藻结皮覆被区土壤呼吸监测 为确保样品稳定性,采集后的样品按照算好的降雨量开始模拟降雨,但不测量土壤呼吸速率,待降雨一轮后,于 2017 年 7 月末至 8 月末,测定土壤呼吸速率。模式 1,模式 2,模式 3 共进行 6 次降雨试验,每次测定土壤呼吸速率。模式 4,模式 5,模式 6 共进行 3 次降雨试验,每次测定土壤呼吸速率。模式 7,模式 8,模式 9 共进行 12 次降雨试验,共测定 9 次土壤呼吸速率(另外 3 次只降雨,未测量)。降雨日上午 6:00,利用 LI-8150(LI-COR)土壤呼吸测量系统连接不透明气室测定降雨前的土壤呼吸速率。7:00 开始,将计算好的水分用喷壶缓慢、均匀地喷洒在藻结皮土柱内,尽量避免产生径流,加水后立即开始测量,第 0,1,2,4,8,12,16 h 各测一次。

1.2.4 数据处理 采用时间加权法,计算不同降雨模式下藻结皮覆被区 16 h 土壤累计碳释放量和总累积碳释放量。采用单因素方差分析(one-way ANOVA)进行土壤呼吸月平均峰值、16 h 土壤累计碳释放量差异性分析。采用双因素方差分析(two-way

ANOVA)进行总累积碳释放量差异性分析。采用 SPSS 20.0,Excel 2010 软件进行数据的统计分析、制图。

2 结果与分析

2.1 不同降雨模式对藻结皮覆被区土壤呼吸速率的影响

降雨能够显著地激发土壤呼吸,各降雨模式下,土壤呼吸速率均在降雨后大幅度提升,并在 1 h 内达到峰值,之后逐步下降,到降雨后 12 h 左右基本恢复到雨前水平。其中,部分土壤呼吸速率曲线呈双峰或多峰波动,在降雨后 4~8 h 左右形成另一个小高峰,之后再逐渐下降至雨前水平(见图 1)。随着降雨试验次数的不断增加,即随着干湿交替次数的不断增大,9 种模式下藻结皮覆被区土壤呼吸速率的峰值逐渐降低,土壤呼吸速率曲线逐渐趋于平缓。第一次降雨试验,9 种降雨模式下藻结皮覆被区土壤呼吸速率的峰值分别为 3.82,3.98,4.38,4.29,6.52,7.18,2.51,3.42,4.20 μmol/(m²·s),最后一次降雨试验,9 种降雨模式下藻结皮覆被区土壤呼吸速率的峰值分别为 2.32,1.89,2.08,2.17,2.66,5.66,1.40,1.27,2.23 μmol/(m²·s),与第一次相比分别降低了 40%~60%。

对比 9 种降雨模式月平均峰值大小依次为:模式 6>模式 5>模式 1>模式 4>模式 3≥模式 2>模式 9>模式 8>模式 7(见图 2),可以看出,降雨频率越低且单次降雨量越大,其土壤呼吸速率的峰值越高。

2.2 不同降雨模式对藻结皮覆被区降雨后 16 h 累积碳释放量的影响

9 种降雨模式下,藻结皮覆被区降雨后 16 h 累积碳释放量总体上是随着单次降雨量的增大而增加。总体上来看,降雨频率减 50%的 3 种处理>正常降雨频率的 3 种处理>降雨频率加 50%的 3 种处理(见图 3)。在正常降雨频率下,增雨 30%(模式 2)和增雨 60%(模式 3)显著大于正常降雨量(模式 1)($p<0.05$),但模式 2 和模式 3 之间差异不显著($p>0.05$);在降雨频率减 50%的情况下,增雨 30%(模式 5)和增雨 60%(模式 6)显著大于正常降雨量(模式 4)($p<0.05$),但模式 6 和模式 5 之间差异不显著($p>0.05$);在降雨频率加 50%的情况下,增雨 60%(模式 9)显著大正常降雨量(模式(7)($p<0.05$),但模式 7 和模式 8 之间,模式 8 和模式 9 之间差异不显著($p>0.05$)。

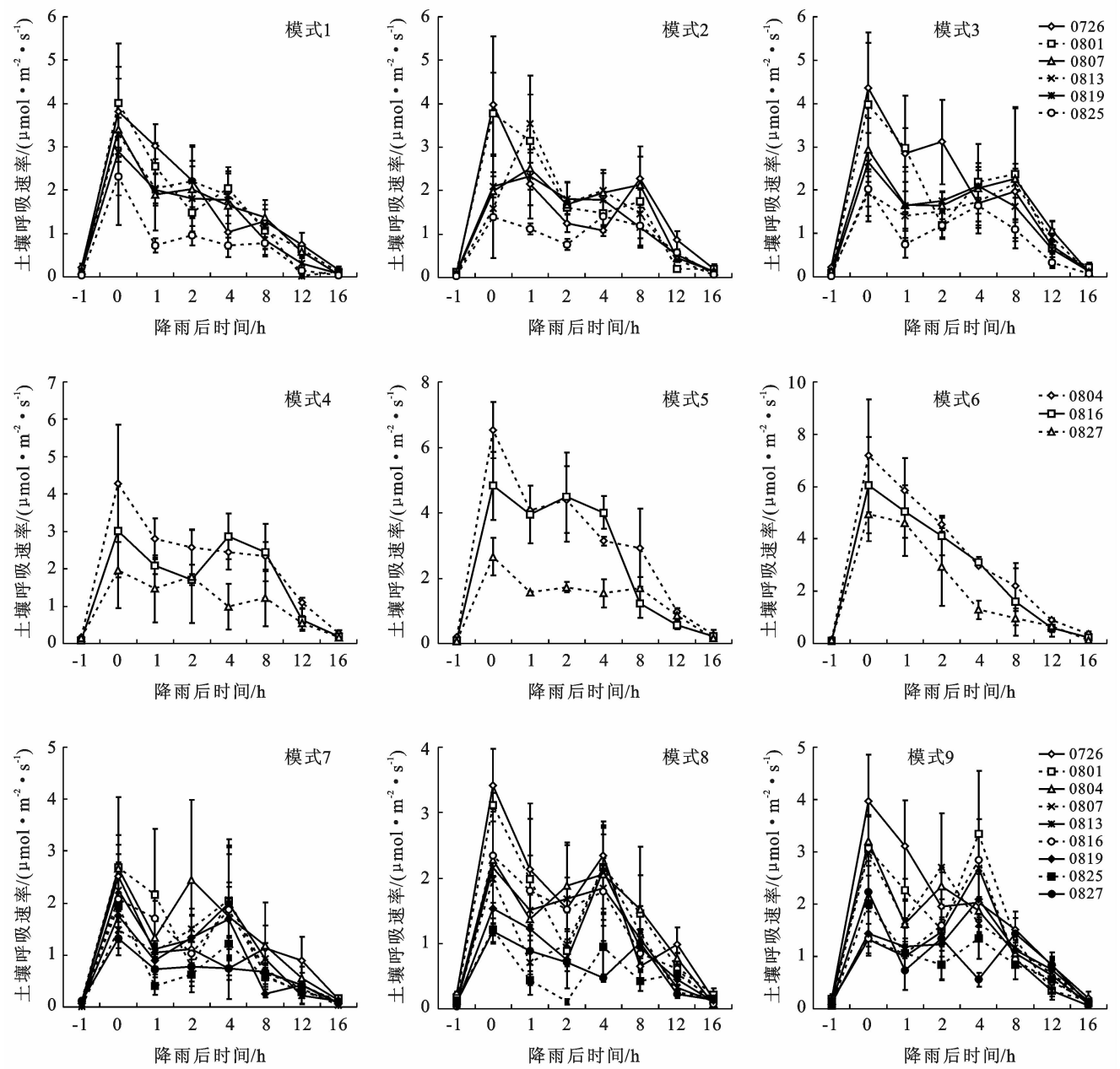


图 1 藻结皮覆被区土壤呼吸速率

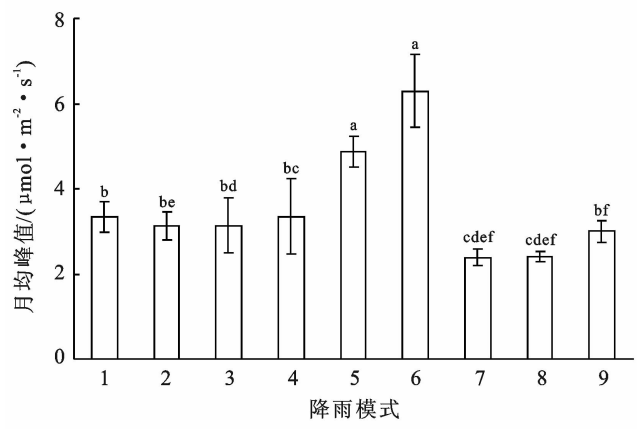


图 2 藻结皮覆被区土壤呼吸速率月均峰值

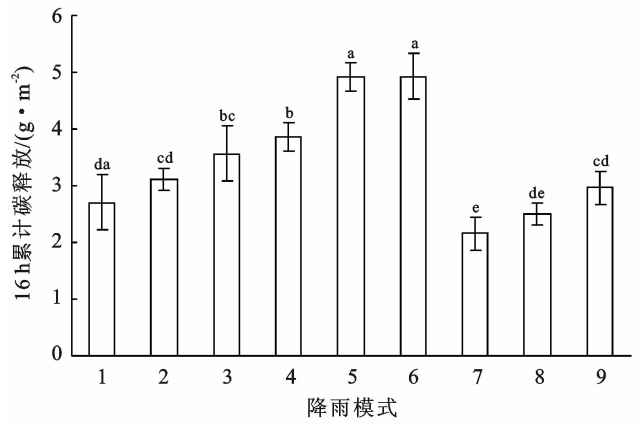
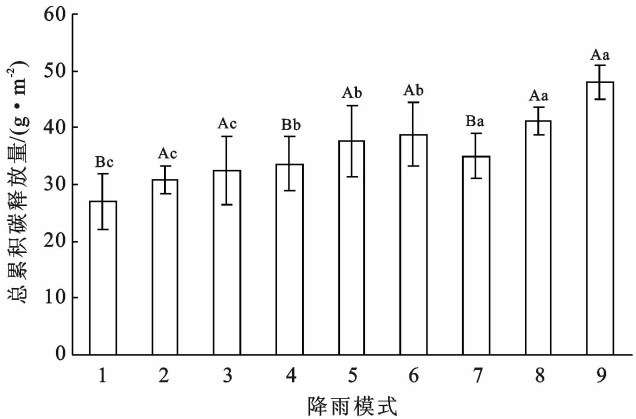


图 3 藻结皮覆被区降雨后 16 h 累积碳释放量

注:不同字母表示不同降雨模式之间差异显著($p<0.05$)。下同。

2.3 不同降雨模式对藻结皮覆被区测定期总累积碳释放量的影响

降雨量和降雨频率都显著影响着藻结皮覆被区总累积碳释放量($p<0.05$),但降雨量和降雨频率对藻结皮覆被区总累积碳释放量不存在交互影响($p>0.05$)(见表 2)。从整体上看,3 种降雨频率下土壤总累积碳释放量表现为:降雨频率加 50%>降雨频率减 50%>降雨频率正常,且 3 种频率间差异显著($p<0.05$)。总累积碳释放量随着降雨量水平的增大而增加,其中增雨 30%和增雨 60%情况下的总累积碳释放量显著大于正常降雨量水平($p<0.05$),但增雨 30%和增雨 60%间的差异不显著($p>0.05$)。在正常降雨频率下,正常降雨量(模式 1)、增雨 30%(模式 2)、增雨 60%(模式 3)总累积碳释放量分别为 26.97, 30.78, 32.39 g/m²,增雨 30%(模式 2)和增雨 60%(模式 3)总累积碳释放量较正常降雨量(模式 1)分别增加了 14%和 20%;在减少 50%降雨频率下,增雨 30%(模式 5)和增雨 60%(模式 6)总累积碳释放量较正常降雨量(模式 4)分别增加了 12%和 15%;增加 50%降雨频率下,增雨 30%(模式 5)和增雨 60%(模式 6)总累积碳释放量较正常降雨量(模式 4)分别增加了 18%和 37%。在正常降雨量水平下,降雨频率减 50%(模式 4)和降雨频率加 50%(模式 7)比正常降雨频率(模式 1)总累积碳释放量分别大了 25%和 30%;在增雨 30%水平下,正常降雨频率(模式 2)、降雨频率减 50%(模式 5)、降雨频率加 50%(模式 8)总累积碳释放量分别为 30.78, 37.65, 41.20 g/m²;在增雨 60%水平下,正常降雨频率减 50%(模式 6)、降雨频率加 50%(模式 9)总累积碳释放量分别 38.76 和 47.99 g/m²,是正常降雨频率(模式 3)的 1.2 和 1.5 倍(见图 4)。



注:不同大写字母表示不同降雨量之间的差异显著($p<0.05$),不同小写字母代表不同降雨频率之间的差异显著($p<0.05$)。

图 4 藻结皮覆被区降雨后总累积碳释放量

表 2 降雨量和降雨频率对总累积碳释放量影响方差分析

误差来源	Ⅲ型平方和	自由度 df	均方	F	p
降雨频率	585.993	2	292.996	13.775	0.000
降雨量	280.899	2	140.449	6.603	0.007
降雨频率—降雨量	62.535	4	15.634	0.735	0.580

3 讨论

在干旱区,水分是生态系统生物活动的主要限制因子,降雨可通过改变土壤的干湿状况直接影响土壤的生态过程,继而引起土壤碳库的变化。生物结皮中几乎所有的生物都是变水性^[20],对水极度敏感。本研究表明,降雨能够刺激藻结皮覆被区土壤呼吸速率迅速大幅度提升,之后随着时间的推移逐渐降低至较低水平。这与前人的研究结果一致^[21-22]。这可能由以下几个原因所导致:首先,在干旱环境中,生物结皮一般呈干燥休眠状态,降雨后,结皮能够在短时间能迅速恢复生理活性,进行呼吸作用。其次,干旱区土质松散,干旱少雨,土壤空隙中可能积累了一定量的 CO₂,雨水的渗入将这部分 CO₂ 排出^[23]。此外,还与土壤呼吸底物数量、微生物的活性状态等密切相关。但随着干湿交替次数的不断增大,藻结皮覆被区土壤呼吸速率的峰值逐渐变小,即土壤再湿润后所产生的呼吸脉冲逐渐减弱^[24]。对比 9 种降雨模式月平均峰值大小,减少降雨频率 50%并增雨 60%(模式 6)的峰值最大,其次为减少降雨频率 50%并增雨 30%(模式 5),说明,在一定的时间范围和降雨量水平下,降雨间隔时间越长,单次降雨量越大,所产生的呼吸脉冲越强。这可能是由于经过不断地干湿交替过程,土壤中可利用的有机质、土壤中微生物生物量、微生物群落结构的变化所导致的。呼吸脉冲的大小直接影响着降雨有效期内的累积碳释放量。本研究中,9 种降雨模式下藻结皮覆被区降雨后 16 h 累积碳释放量即随着单次降雨量的增加而增大。低频率、大雨量的降雨事件所引起的碳释放量明显高于高频率、小雨量的降雨事件。主要是由于干旱区蒸发量大,小雨量的降雨事件仅能湿润土壤表面,短时间内就会被蒸发掉。但将时间尺度延长到月,在相同的总降雨量下,高频率的小降雨事件所产生的总碳量最高,其次为低频率的大降雨事件,正常降雨频率下最小。在一定时间内,低频率的大降雨事件所产生的总碳量大于正常降雨频率,这与赵荣^[25]等的研究结果一致。但高频率的小降雨事件所产生的总碳量最高,说明降雨频率对总碳量的影响是呈“V”字形的。同样在月的时间尺度上,相同的降雨频率下,生物结皮覆被区的碳释放量

随着降雨量的增大而逐渐增加^[26-29],但当降雨量增大到一定程度后,其对土壤呼吸的促进作用不再明显。本研究中,相同降雨频率下,增雨 30%和增雨 60%情况下的总累积碳释放量显著大于正常降雨量水平,但增雨 30%和增雨 60%间的差异不显著。有研究表明,土壤水分过多会抑制土壤呼吸^[30-31],因此,降雨量过大可能会对土壤呼吸起到抑制作用,关于这部分问题,有待将来进一步研究。

4 结论

(1) 降雨对藻结皮覆被区土壤呼吸速率具有显著的激发作用,土壤呼吸速率在降雨后立即大幅度增加,之后逐渐降低至较低水平。但随着干湿交替次数的增加,土壤呼吸速率的峰值逐渐变小,土壤呼吸速率曲线逐渐趋于平缓。

(2) 藻结皮覆被区降雨后 16 h 累积碳释放量总体上是随着单次降雨量的增大而增加,但当降雨量增大到一定程度后,其对土壤碳释放量的促进作用不再明显。

(3) 降雨量和降雨频率都显著影响着藻结皮覆被区总累积碳释放量,但降雨量和降雨频率对藻结皮覆被区总累积碳释放量不存在交互影响。在相同降雨频率下,总碳释放量随着降雨量的增加而增大。在相同的总降雨量下,高频率的小降雨事件所产生的总碳量最高,其次为低频率的大降雨事件,正常降雨频率下最小。因此,由气候变化所引起的降雨量增加和降雨频率的变化将会增加藻结皮覆被区的碳排放量,在预测碳收支时,也应将生物结皮的碳排放量变化作为考虑因素之一。

【参 考 文 献】

- [1] Zaehle S, Dalmonech D. Carbon-nitrogen interactions on land at global scales: Current understanding in modelling climate biosphere feedbacks [J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2011, 3(5):311-320.
- [2] IPCC. Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]//Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al. UK: Cambridge University Press, 2013.
- [3] Feng S, Fu Q. Expansion of global drylands under a warming climate [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, 13(10):10081-10094.
- [4] 尹飞虎,李晓兰,董云社,等. 干旱半干旱区 CO₂ 浓度升高对生态系统的影响及碳氮耦合研究进展[J]. *地球科学进展*, 2011, 26(2):235-244.
- [5] Belnap J. The world at your feet: Desert biological soil crusts [J]. *Frontiers in Ecology & the Environment*, 2003, 1(4):181-189.
- [6] Bowker M A. Biological soil crust rehabilitation in theory and practice: An underexploited opportunity [J]. *Restoration Ecology*, 2007, 15(1):13-23.
- [7] Belnap J. Cryptobiotic soil crusts: Basis for arid land restoration (Utah) [J]. *Restoration & Management Notes*, 1994, 12:85-86.
- [8] 赵允格,许明祥, Belnap J. 生物结皮光合作用对光温水的响应及其对结皮空间分布格局的解译:以黄土丘陵区为例[J]. *生态学报*, 2010, 30(17):4668-4675.
- [9] 李新荣,龙利群,王新平,等. 干旱半干旱地区土壤微生物结皮的生态学意义及若干研究进展[J]. *中国沙漠*, 2001, 21(1):4-11.
- [10] 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.
- [11] 赵洋,齐欣林,陈永乐,等. 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[C]. 北京:中国地理学会沙漠分会 2012 年学术研讨会, 2012.
- [12] 齐玉春,董云社,刘立新,等. 内蒙古锡林河流域主要针茅属草地土壤呼吸变化及其主导因子[J]. *中国科学:地球科学*, 2010, 40(3):341-351.
- [13] Maestre F T, Cortina J. Small-scale spatial variation in soil CO₂ efflux in a Mediterranean semiarid steppe [J]. *Applied Soil Ecology*, 2003, 23(3):199-209.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 侯琳,雷瑞德,王得祥,等. 森林生态系统土壤呼吸研究进展[J]. *土壤通报*, 2006, 37(3):589-594.
- [17] Coe K K, Belnap J, Sparks J P. Precipitation-driven carbon balance controls survivorship of desert biocrust mosses [J]. *Ecology*, 2012, 93(7):1626-1636.
- [18] Zhang Z S, Li X R, Nowak R S, et al. Effect of sand-stabilizing shrubs on soil respiration in a temperate desert [J]. *Plant and Soil*, 2013, 367(1):449-463.
- [19] 李柏. 不同荒漠生态系统生物结皮分布及水文特征研究[D]. 北京:北京林业大学, 2015.
- [20] Belnap J, Lange D H C O L. Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management [M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2003.
- [21] Sponseller R A. Precipitation pulses and soil CO₂ flux in a Sonoran Desert ecosystem [J]. *Global Change Biology*, 2007, 13:426-436.

- [22] 付广军, 廖超英, 孙长忠, 毛乌素沙地土壤结皮对水分运动的影响[J]. 西北林学院学报, 2010, 25(1): 7-10.
- [23] 杜好田, 焦峰, 姚静, 等. 黄土丘陵区降水变化对退耕草地土壤水分特征的影响[J]. 水土保持研究, 2019, 26(5): 81-88.
- [24] Fu Chaofeng, Bian Zihao, Xi Jianjian, et al. Spatial distribution characteristics of soil moisture in different types of sand dune in the Mu Us sandy land, adjacent to north of Chinese Loess Plateau [J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77(4): 151.
- [25] 伍永秋, 张健枫, 杜世松, 等. 毛乌素沙地南缘不同活性沙丘土壤水分时空变化[J]. 中国沙漠, 2015, 35(6): 1612-1619.
- [26] 郝振纯, 吕美霞, 吕美朝, 等. 坡度作用下土壤水分时空异质性研究[J]. 水文, 2012, 32(2): 5-10.
- [27] 张思琪, 周秋文, 韦小茶, 等. 喀斯特峰丛山体土壤水分变异特征及其与地形因子的关系[J]. 人民珠江, 2018, 39(12): 10-19.
- [28] 贺美娜, 童永平, 王云强, 等. 黄土区坡面尺度微地形和次降雨对 5 m 土壤水分影响的典型个例分析[J]. 地球环境学报, 2017, 8(4): 357-366.
- [29] 王锴, 杨泽元, 黄金廷, 等. 毛乌素沙地风沙滩区降水入渗响应研究[J]. 世界地质, 2019, 38(2): 565-573.
- [30] 景观阳, 邸利, 王安民, 等. 甘肃泾川不同林龄人工刺槐林的土壤水分—物理特性及渗透性研究[J]. 四川农业大学学报, 2017, 35(2): 193-198.
- [31] 曹瑞致, 周自云, 靳鹏博, 等. 黄土丘陵区不同立地条件下人工杜仲林土壤水分变化和生长规律研究[J]. 西北林学院学报, 2007, 32(1): 12-18.
- [32] Jia Ruiliang, Zhou Jinlong, Gao Yexin, et al. Preliminary analysis on evaporation rules of high-salinity phreatic water in arid area [J]. Advances in Water Science, 2015, 31(4): 62-63.
- [33] 张友焱, 周泽福, 程金花, 等. 毛乌素沙地不同沙丘部位几种灌木地土壤水分动态[J]. 东北农业大学学报, 2010, 41(6): 79-84.
- [34] 郭忠升, 邵明安. 人工柠条林地土壤水分补给和消耗动态变化规律[J]. 水土保持学报, 2007, 21(2): 119-123.

(上接第 44 页)

- [22] 贾晓红, 辜晨, 吴波, 等. 干旱沙区生物土壤结皮覆盖土壤 CO₂ 通量对脉冲式降雨的响应[J]. 中国沙漠, 2016, 36(2): 423-432.
- [23] 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): 4423-4433.
- [24] 赵蓉, 李小军, 赵洋, 等. 固沙植被区土壤呼吸对反复干湿交替的响应[J]. 生态学报, 2015, 35(20): 6720-6727.
- [25] 赵蓉, 李小军, 赵洋, 等. 固沙植被区两类结皮斑块土壤呼吸对不同频率干湿交替的响应[J]. 生态学杂志, 2014, 34(1): 138-144.
- [26] Thomas A D, Hoon S R, Linton P E. Carbon dioxide fluxes from cyanobacteria crusted soils in the Kalahari [J]. Applied Soil Ecology, 2008, 39(3): 254-263.
- [27] Castillo-Monroy A P, Maestre F T, Rey A, et al. Biological soil crust microsites are the main contributor to soil respiration in a semiarid ecosystem [J]. Ecosystems, 2011, 14(5): 835-847.
- [28] 吴林, 苏延桂, 张元明, 等. 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.
- [29] Feng Wei, Zhang Yuqing, Wu Bin, et al. Influence of disturbance on soil respiration in biologically crusted soil during the dry season [J]. Scientific World Journal, 2013, 2013: 1-6.
- [30] Harper C W, Blair J M, Fay P A, et al. Increased rainfall variability and reduced rainfall amount decreases soil CO₂ flux in a grassland ecosystem [J]. Global Change Biology, 2005, 11(2): 322-334.
- [31] McIntyre R E, Adams M A, Ford D J, et al. Rewetting and litter addition influence mineralisation and microbial communities in soils from a semi-arid intermittent stream [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41(1): 92-101.