

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

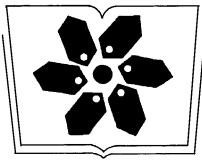
Acta Ecologica Sinica



第32卷 第13期 Vol.32 No.13 **2012**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

中国科学院科学出版基金资助出版

第 32 卷 第 13 期 2012 年 7 月 (半月刊)

目 次

砂质潮间带自由生活海洋线虫对缺氧的响应——微型受控生态系研究.....	华 尔, 李 佳, 董 洁, 等 (3975)
植物种群自疏过程中构件生物量与密度的关系	黎 磊, 周道玮, 盛连喜 (3987)
基于景观感知敏感度的生态旅游地观光线路自动选址.....	李继峰, 李仁杰 (3998)
基于能值的沼气农业生态系统可持续发展水平综合评价——以恭城县为例.....	杨 谨, 陈 彬, 刘耕源 (4007)
内蒙古荒漠草原植被盖度的空间异质性动态分析.....	颜 亮, 周广胜, 张 峰, 等 (4017)
典型草地的土壤保持价值流量过程比较.....	裴 厦, 谢高地, 李士美, 等 (4025)
长沙市区马尾松人工林生态系统碳储量及其空间分布.....	巫 涛, 彭重华, 田大伦, 等 (4034)
厦门市七种药用植物根围 AM 真菌的侵染率和多样性	姜 攀, 王明元 (4043)
Cd、低 Pb/Cd 下冬小麦幼苗根系分泌物酚酸、糖类及与根际土壤微生物活性的关系	贾 夏, 董岁明, 周春娟 (4052)
凉水保护区土壤产类漆酶-多铜氧化酶细菌群落结构	赵 丹, 谷惠琦, 崔岱宗, 等 (4062)
盐渍化土壤根际微生物群落及土壤因子对 AM 真菌的影响.....	卢鑫萍, 杜 茜, 闫永利, 等 (4071)
菌丝室接种解磷细菌 <i>Bacillus megaterium</i> C4 对土壤有机磷矿化和植物吸收的影响.....	张 林, 丁效东, 王 菲, 等 (4079)
闽江河口不同河段芦苇湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征.....	王维奇, 王 纯, 曾从盛, 等 (4087)
高山森林三种细根分解初期微生物生物量动态.....	武志超, 吴福忠, 杨万勤, 等 (4094)
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	吴 林, 苏延桂, 张元明 (4103)
铁皮石斛组培苗移栽驯化过程中叶片光合特性、超微结构及根系活力的变化	濮晓珍, 尹春英, 周晓波, 等 (4114)
不同产量水平旱地冬小麦品种干物质累积和转移的差异分析.....	周 玲, 王朝辉, 李富翠, 等 (4123)
基于作物模型的低温冷害对我国东北三省玉米产量影响评估.....	张建平, 王春乙, 赵艳霞, 等 (4132)
黄土高原 1961—2009 年参考作物蒸散量的时空变异.....	李 志 (4139)
莫莫格湿地芦苇对水盐变化的生理生态响应.....	邓春暖, 章光新, 李红艳, 等 (4146)
不同蚯蚓采样方法对比研究.....	范如芹, 张晓平, 梁爱珍, 等 (4154)
亚洲玉米螟成虫寿命与繁殖力的地理差异.....	涂小云, 陈元生, 夏勤雯, 等 (4160)
黑河上游天然草地蝗虫空间异质性与分布格局.....	赵成章, 李丽丽, 王大为, 等 (4166)
苦瓜叶乙酸乙酯提取物对斜纹夜蛾实验种群的抑制作用.....	骆 颖, 凌 冰, 谢杰峰, 等 (4173)
长江口中国花鲈食性分析.....	洪巧巧, 庄 平, 杨 刚, 等 (4181)
基于线粒体控制区序列的黄河上游厚唇裸重唇鱼种群遗传结构.....	苏军虎, 张艳萍, 娄忠玉, 等 (4191)
镉暴露对黑斑蛙精巢 ROS 的诱导及其蛋白质氧化损伤作用机理	曹 慧, 施蔡雷, 贾秀英 (4199)
北方草地牛粪中金龟子的多样性.....	樊三龙, 方 红, 高传部, 等 (4207)
合肥秋冬季茶园天敌对假眼小绿叶蝉和茶蚜的空间跟随关系.....	杨 林, 郭 骅, 毕守东, 等 (4215)
植被、海拔、人为干扰对大中型野生动物分布的影响——以九寨沟自然保护区为例.....	张 跃, 雷开明, 张语克, 等 (4228)
基于社会网络分析法的生态工业园典型案例研究.....	杨丽花, 佟连军 (4236)
基于生命周期的户用沼气系统可用能核算——以广西恭城瑶族自治县为例.....	齐 静, 陈 彬, 戴 婧, 等 (4246)
专论与综述	
水文情势与盐分变化对湿地植被的影响研究综述	章光新 (4254)
松嫩碱化草甸土壤种子库格局、动态研究进展	马红媛, 梁正伟, 吕丙盛, 等 (4261)
一种新的景观扩张指数的定义与实现	武鹏飞, 周德民, 官辉力 (4270)
研究简报	
华山新麦草光合特性对干旱胁迫的响应.....	李 倩, 王 明, 王雯雯, 等 (4278)
美丽海绵提取物防污损作用.....	曹文浩, 严 涛, 刘永宏, 等 (4285)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 306 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 37 * 2012-07



封面图说: 涵养水源——在长白山南坡的峭壁上, 生长在坡面上的森林所涵养的水源还在汨汨地往下流个不停, 深红色的落叶掉在了苔藓上, 这里已经是长白山的深秋了。虽然雨季已经过去了很久, 但是林下厚厚的枯枝落叶层、腐殖质层、苔藓草本层所涵养的水分还在不间断地流淌, 细细的水线在壁下汇成了溪、汇成了河。涵养水源是森林的主要生态功能之一。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201106140793

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.

Wu L., Su Y. G., Zhang Y. M. Effects of simulated precipitation on apparent carbon flux of biologically crusted soils in the Gurbantunggut Desert in Xinjiang, Northwestern China. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(13): 4103-4113.

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

吴 林^{1,2}, 苏延桂¹, 张元明^{1,*}

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 中国科学院干旱区生物地理与生物资源重点实验室, 乌鲁木齐 830011;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:水分是控制干旱区生态过程的重要环境因素,在水分受限制的生态系统中,降水通过改变土壤的干湿状态直接控制地下生物过程。生物结皮作为干旱区主要的地表覆盖物,能利用空气中有限的水分进行光合作用,其自身的碳交换是干旱区土壤碳通量的重要组成部分。通过模拟 0(对照)、2、5 mm 和 15 mm 4 个降水梯度,利用红外气体分析仪,对古尔班通古特沙漠中部生物结皮以及裸地表观土壤碳通量进行测量,探讨不同强度降水条件下生物结皮对表观土壤碳通量的影响,结果表明:(1)降水增加了生物结皮表观土壤碳释放量,2、5 mm 和 15 mm 3 种降水处理累积碳释放量分别是对照的 151.48%、274.97%、306.44%,并且随着降水后时间的延长,表观土壤碳通量逐渐减小直至达到降水前的水平;(2)生物结皮与裸地的表观土壤碳通量对降水的响应不同,对照和最大降水量下,生物结皮表观土壤碳通量大于裸地,但是 2 mm 和 5 mm 降水后,生物结皮表观土壤碳通量小于裸地,并且二者在 2 mm 降水时差异显著($P < 0.05$),而在其它降水处理下无显著差异;(3)连续两次降水事件,活性碳在初级降水后的大量释放使得二次降水后释放量下降,其中裸地碳释放量下降速率与降水强度正相关。本研究说明,在探求荒漠地区土壤碳交换对降水的响应规律时,应该考虑生物结皮的影响以及连续降水事件的差异。

关键词:表观土壤碳通量;生物结皮;降水;古尔班通古特沙漠

Effects of simulated precipitation on apparent carbon flux of biologically crusted soils in the Gurbantunggut Desert in Xinjiang, Northwestern China

WU Lin^{1,2}, SU Yangui¹, ZHANG Yuanming^{1,*}

1 Key Laboratory of Biogeography and Bioresources in Arid Land, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Water is the major driver of ecosystem functions and processes in semiarid and arid regions, Water availability is directly linked to precipitation, and variation in the productivity of desert shrublands and grasslands is well known to correspond to seasonal and inter-annual rainfall patterns. In such water-limited ecosystems, pulsed precipitation directly control the below ground processes through a series of soil drying and rewetting cycles. Precipitation events are infrequent and discrete in semiarid and arid region. Global circulation models predict a shift in precipitation patterns to growing season rainfall events that are larger in size but fewer in number. This "repackaging" of rainfall into large events with long intervening dry intervals could be particularly important in semi-arid grasslands because it is in marked contrast to the frequent but small events that have historically defined this ecosystem. In arid ecosystems, soil microbes respond to very

基金项目:国家重点基础研究发展计划(2009CB825104);国家自然科学基金青年基金(41001067)

收稿日期:2011-06-14; **修订日期:**2012-02-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangym@ms.xjb.ac.cn

limited precipitation events. However, larger precipitation pulses are required by vascular plants for photosynthetic activities. Biological soil crusts are an integral part of the soil system in arid regions worldwide, stabilizing soil surfaces and aiding vascular plant establishment. They are also significant sources of ecosystem nitrogen and carbon. Biological soil crusts can take advantage of limited moisture in the air for photosynthesis, and carbon exchange involving biological soil crusts is an important component of soil carbon fluxes in arid areas. In the Gurbantunggut Desert, about 28.7% of the area is covered by biological soil crusts dominated by lichen. In this paper, to discuss the effect of biological soil crusts on apparent soil carbon fluxes under different amounts of precipitation, CO_2 fluxes in soil covered with moss-lichen crusts and in crust-removed soil from the central Gurbantunggut Desert was measured by infrared gas analyzer after addition of simulated amounts of precipitation of 0 mm, 2 mm, 5 mm, and 15 mm. The results show that: (1) the release of CO_2 from biologically crusted soil was triggered by precipitation, with the accumulated carbon efflux under 2 mm, 5 mm, and 15 mm of simulated precipitation being 151.48%, 274.97%, and 306.44%, respectively, of that of the control. As time elapsed after rainfall, the carbon flux decreased until it reached the value equivalent to that before precipitation was applied; (2) Biologically crusted soil and soil with crusts removed had different responses to precipitation with the carbon flux being significantly different between biologically crusted soil and bare soil after addition of 2 mm of simulated water. Biologically crusted soil emitted more carbon than bare soil under 0 mm and 15 mm of simulated precipitation, although the differences were not significant; (3) A large release of activated carbon after an initial simulated precipitation event was followed by a decline in the soil carbon efflux after further simulated successive rainfall events, with the decline in the flux release rate from bare soil being positively correlated with rainfall intensity. The study shows that the effect of biological soil crusts and successive rainfall events should be taken into consideration when discussing the response of soil carbon exchange in arid lands to simulated rainfall.

Key Words: apparent carbon flux; biological soil crusts; precipitation; Gurbantunggut Desert

生物结皮作为干旱荒漠区主要的地表覆被类型,具有重要的生态功能^[1],同时生物结皮是干旱半干旱生态系统重要的碳源和氮源^[2-6]。在许多研究中生物结皮被定为判断干旱、半干旱地区土壤表面状况的指示生物和生态系统评价指标^[1, 7]。生物结皮能够充分利用大气中有限的水分进行光合作用^[8],参与碳循环。甚至有研究认为,生物结皮的出现是干旱区影响土壤碳汇功能的主要原因之一^[9-10]。

受全球变化的影响,干旱地区降水频率和幅度都正在发生变化,而水分的时空变异是干旱、半干旱生态系统生物过程中最基本的驱动力^[11]。虽然研究人员对土壤呼吸与降水、温度等环境因子的关系做了大量研究^[12-19],但是生物结皮这一特殊覆被,其自身不但可以进行呼吸作用还能进行光合作用,它的存在改变表观土壤碳通量特征。目前研究其碳交换规律和降水关系的文献还很少^[20-25],个别研究表明,生物结皮层碳交换对降水响应很敏感,生物结皮在较小降水条件下,对土壤碳交换的贡献率达到了 80%,而土壤本身和根系只占到 20%^[10]。

古尔班通古特沙漠作为我国最大的固定和半固定沙漠,其间广泛发育着以地衣为主的生物结皮,地衣的分布面积占到了该沙漠的 28.7%^[26],然而研究该地区生物结皮表观土壤碳通量文章几乎未见报道,对降水响应的研究更是没有。本文以古尔班通古特沙漠的生物结皮为研究对象,通过对不同强度模拟降水下生物结皮表观土壤碳通量(NEE)和土壤体积含水量的监测,研究生物结皮表观土壤碳通量对不同强度降水的响应规律,比较有无生物结皮覆盖时表观土壤碳通量差异,同时比较初次降水事件对二次降水表观土壤碳通量的影响,为准确估算该地区的碳交换规律提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区自然概况

研究区位于古尔班通古特沙漠腹地(45°14'N, 87°36'E),海拔 540—574 m。属于我国北方中温带干旱气

候,沙漠腹地年降水量多年平均为 80 mm 左右,蒸发量却高达 1 600 mm 以上,多年年均气温为 5—5.7 ℃,1 月均温在 -20 ℃ 以下,7 月可达 28 ℃,极端最高气温达到 40 ℃ 以上。沙漠的基底是第四纪疏松冲积物,主要由 0.1—0.25 mm 粒级的沙粒组成。沙丘的高度一般均在 50 m 以下,沙丘主要是固定和半固定性质,地表植被分属小半乔木、灌木、小半灌木、多年生草本、1 年生长营养期植物和短命植物 6 种生活型,生长期植被覆盖度达 50% 以上。该地区生物结皮(包括藻结皮、地衣结皮和苔藓结皮)充分发育,主要分布于丘间低地和灌丛下。

1.2 研究方法

1.2.1 样地布置

选择地势较为平坦、远离植物灌丛、生物结皮(苔藓和地衣混生)发育良好的丘间低地(45°14'21"N, 87°36'15"E),分别设置 3 个 10 m × 10 m 的样地,3 个样地间距 5 m 以上。研究样地基本情况见表 1。在每个 10 m × 10 m 的样地内,随机选取 4 个 2 m × 2 m 的小样方,样方间的距离在 3 m 以上,4 个样方中分别进行 0 mm(对照,CK)、2 mm (PRE₂)、5 mm (PRE₅)、15 mm (PRE₁₅) 4 个降水梯度处理,其中 2 mm 为常规小量降水,5 mm 为中量降水,15 mm 为极端降水事件。在每个小样方内将 2 个自制的凹槽型不锈钢基座(内径 50 cm × 50 cm)嵌入土壤,对其中 1 个凹槽内土壤进行结皮去除处理(轻轻的剥离表层结皮,避免破坏土壤结构),1 个维持结皮表面不受破坏,并在基座临近处设置等大小的样方,供土壤体含水量和温度测定。整个样方设置分为 2 种结皮处理类型,4 种降水处理,3 个重复,共 24 个测定基座。

表 1 样地概况

Table 1 Characteristics of the study sites

海拔/m Altitude	坡度/(°) Gradient	植被盖度/% Vegetation coverage	苔藓盖度/% Moss coverage	地衣盖度/% Lichen coverage	结皮盖度/% Crust coverage	结皮厚度/cm Crust thickness	结皮生物量 Crust biomass (×10 ⁻³ mg/g 干土)
552	<5	15	<5	80	95	0.6±0.1	3.8±0.6

结皮生物组成中的苔藓是齿肋赤藓 *Syntrichia caninervis*,结皮生物量用叶绿素 a 含量表示;主要植被为蛇麻黄 *Ephedra distachya*,其它草本植物基本已经死亡

1.2.2 表观土壤碳通量测定

试验于 2010 年 8 月 18 日至 9 月 1 日进行,因为该时节降水较丰富,同时 1 年生植物和短命植物大多已死亡,土壤中活的根系很少,根系和菌根的呼吸对土壤呼吸的影响有限。样地布置后放置 3d,以保证气体交换达到平衡,然后再进行人工降水处理。整个试验期间,使用塑料布隔离样地内的自然降水。2010 年 8 月 21 日 08:30 开始进行人工模拟降水,使用喷壶喷洒,使水滴均匀撒在地表,并保证不能形成地表径流。模拟降水处理完后,分别在降水后 0、15、30 min、1、2、6、30、54 h 测量表观土壤碳通量(Net ecosystem CO₂ exchange, NEE)。测定前往基座凹槽内加足量的水,以保证测量时透明通量箱(50 cm × 50 cm × 15 cm)内气体与外界完全隔离。通量箱的两侧安装有风扇,使得通量箱内的气体均匀混合。测量表观土壤碳通量时将连接有 LI-6400(Li-Cor Inc., Lincoln, NE, USA)的通量箱盖在测定基座的凹槽上,选择自动模式,测定时间为 90 s,每 10 s 记录 1 次,共 9 次,具体方法见 Niu^[27]。土壤体含水量(SVWC)采用 TDR 测定,测量土壤深度为 10 cm,与表观土壤碳通量测定同时进行,并测定降水后第 6 天土壤体含水量。第 2 次降水处理与第 1 次相隔 6,在 8 月 27 日上午进行,模拟降水过程和试验测定与第 1 次相同。因为有研究表明 0—5 mm 的小雨量降雨占到该地区总降雨频次的 89.8%,平均降雨间隔在 6 d 左右^[28],同时发现 2 mm 降水作用下,土壤体含水量在第 6 天恢复到降水前水平。

利用 Excel 软件计算 CO₂ 的浓度变化率,为了排除因通量箱关闭对测定的影响,选取通量箱闭合后 30 s 到打开前 10 s 的 CO₂ 浓度数据,同时剔除 R²<0.95 的数据,减小偶然误差。依据公式 $A = \frac{dc}{da} \frac{V}{S} \frac{P}{RT}$ 计算表观土壤碳通量^[29],方程中,A 是单位面积上单位时间内 CO₂ 释放量(μmolCO₂·m⁻²·s⁻¹),c 是 CO₂ 摩尔浓度

($\mu\text{mol}/\text{mol}$); t 是时间(s); V 是通量箱体积(m^3); S 是通量箱底面积(m^2); P 是初始大气压(kPa); R 是气体常数($8.3 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kPa} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$); T 是通量箱内气体温度(K); dc/dt 是通量箱中 CO_2 浓度变化率, 其中 P 和 T 可通过 LI-6400 直接读出。

1.2.3 数据处理与分析

为方便比较表观土壤碳通量与降水强度之间关系, 选择两个参数进行说明, 即 AVR (前 6 h 碳通量的平均值) 和 CFLUX (54 h 累积碳释放量)。利用 Origin 8.0 (Originlab, USA) 作图分析 NEE、土壤体积含水量随时间的变化规律, 并积分计算前 54 h 内 CO_2 累积排放量(CFLUX)。利用 SAS 9.1 对各降水处理 AVR 进行方差分析和多重比较, 对降水强度和 CFLUX 做相关性分析, 对生物结皮和裸地进行 t 检验, 比较生物结皮和裸地间表观土壤碳通量差异。

2 结果与分析

2.1 降水后土壤体积含水量变化

第 1 次模拟降水试验时, 对照处理后 1 h 内土壤体积含水量为 $(0.65 \pm 0.13)\%$, 基本保持不变(图 1), 因此可以认为其它人工降水在处理之前的土壤体积含水量与对照相同, 大致为 0.65%。

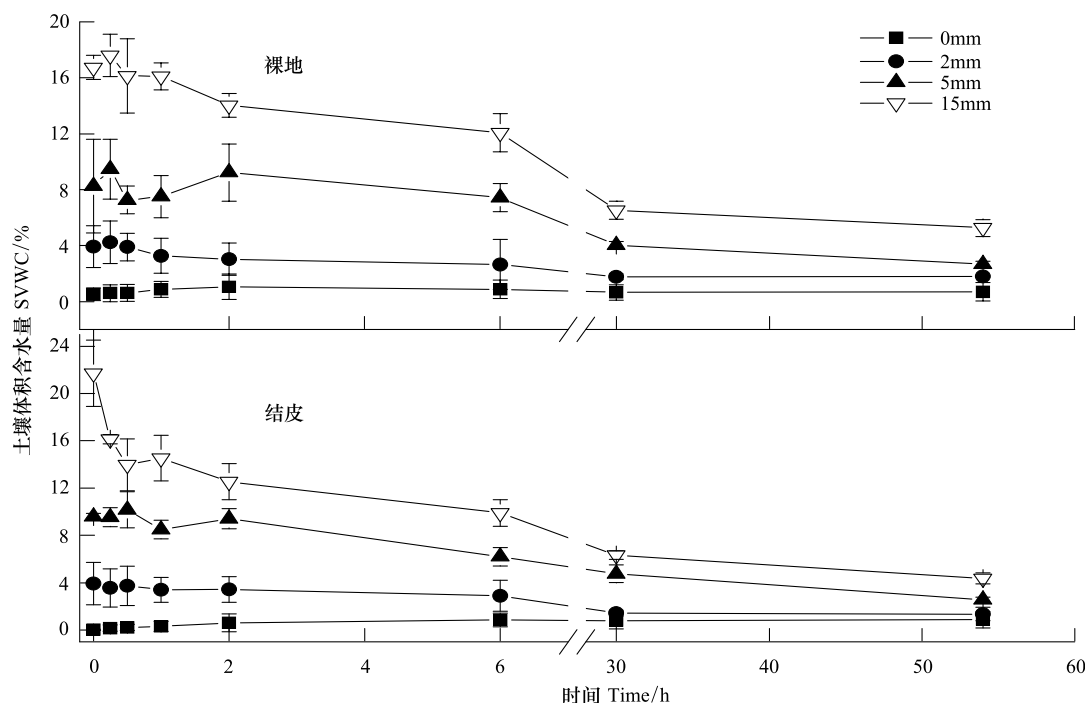


图 1 第 1 次降水后, 不同降水梯度下土壤体积含水量的变化

Fig. 1 The change of soil volume water content (SVWC) following the first rainfall simulation

2、5、15 mm 3 种降水处理后, 裸地的初始土壤体积含水量分别达到 3.90%、8.20%、16.70%, 而生物结皮土壤体积含水量分别为 3.97%、9.62%、21.70%, 降水处理显著提高了土壤体积含水量。在测量期间(54 h 内), 生物结皮土壤体积含水量始终高于对照。15 mm 处理下土壤体积含水量下降速度大于 5 mm 和 2 mm, 而且生物结皮土壤体积含水量下降速度也稍大于裸地。54 h 后, 裸地土壤体积含水量分别为 1.80%、2.67%、5.27%, 而生物结皮土壤体积含水量仅为 1.35%、2.56%、4.37%。

第 2 次降水与第 1 次相隔 6d, 在第 2 次降水前, 裸地在 0、2、5、15 mm 4 种降水处理下土壤体积含水量分别为: 0.76%、0.80%、1.77%、3.60%; 生物结皮土壤体积含水量分别为: 0.69%、0.78%、1.23%、3.13%。土壤体积含水量在对照处理下变化较小, 在 2 mm 降水后第 6 天恢复到降水前水平, 而 5 mm 和 15 mm 降水处理后第 6 天依然远高于降水前水平。显然, 第 2 次降水前, 由于第 1 次不同强度降水处理, 土壤体积含水量不同, 但是经过第 2 次降水处理后, 土壤体积含水量变化规律与第 1 次降水后变化规律相似(图 1 和图 2), 不同

的是两者在降水前的土壤体积含水量初始值不一样。

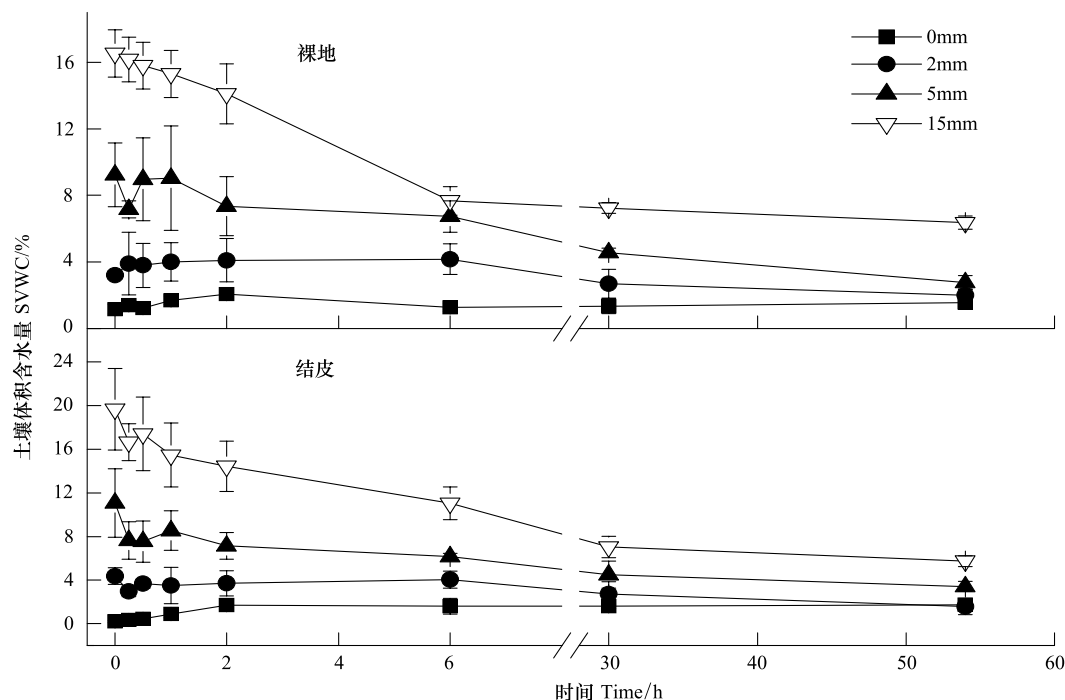


图2 第2次降水后,不同降水梯度下土壤体积含水量的变化

Fig. 2 The change of soil volume water content (SVWC) following the second rainfall simulation

2.2 表观土壤碳通量对模拟降水的响应

2.2.1 第一次模拟降水后表观土壤碳通量变化规律

试验刚开始,对照处理下,裸地表观土壤碳通量为 $0.008 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,而此时生物结皮表观土壤碳通量是一个负值($\text{NEE} = -0.1027 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)。与对照相比,降水显著增加了土壤碳的释放速率,生物结皮在2、5、15 mm 3种降水处理后表观土壤碳通量分别为 1.51 、 1.69 、 $1.36 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;裸地为 1.96 、 0.85 和 $0.74 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (图3)。

前2 h,裸地表观土壤碳通量表现为 $\text{PRE}_2 > \text{PRE}_5 > \text{PRE}_{15} > \text{CK}$,2 mm 处理下表观土壤碳通量变化最大,2 h内下降了60%。在1—6 h间,15 mm 降水下的裸地表观土壤碳通量快速下降,然后又上升,降水处理6 h后,表观土壤碳通量增加。前2 h内(0 h除外),15 mm 处理下的生物结皮表观土壤碳通量均大于5 mm 和2 mm 处理。降水2 h后,裸地和生物结皮在对照处理下的表观土壤碳通量基本不变,而5 mm、15 mm 降水处理下的表观土壤碳通量均呈现先增后减趋势,二者峰值分别出现在30 h和6 h,2 mm 降水处理呈现先减后增趋势,在第30小时表观土壤碳通量最小。

裸地在2、5、15 mm 降水处理间的AVR没有显著差异,但均与对照差异显著($F=11.36, P=0.0001$),其规律是 $\text{PRE}_2 > \text{PRE}_5 > \text{PRE}_{15} > \text{CK}$;生物结皮AVR在2、5、15 mm 3种降水处理间没差异,但与对照差异显著($F=6.21, P=0.0037$),其中15 mm 有最大AVR值。裸地与生物结皮AVR仅在2 mm 降水处理下差异显著($t=9.42, P=0.0002$),其它降水处理下无显著差异。裸地在5 mm 处理下CFLUX最大,为 $(1.75 \pm 0.25) \text{ gC/m}^2$;而生物结皮在15 mm 降水下CFLUX最大,为 $(1.89 \pm 0.23) \text{ gC/m}^2$ (图4)。

2、5、15 mm 3种降水处理下,裸地和生物结皮的CFLUX分别是对照处理的471.68%、510.14%、478.59%、151.48%、274.97%、306.44%。在对照及5 mm 降水处理下,生物结皮CFLUX大于裸地,但是2 mm 处理时,生物结皮CFLUX仅为裸地的58%。整体上,裸地和生物结皮CFLUX均随降水强度非线性增加,但相关性不显著($r^2=0.539, P=0.4608$; $r^2=0.862, P=0.138$)。

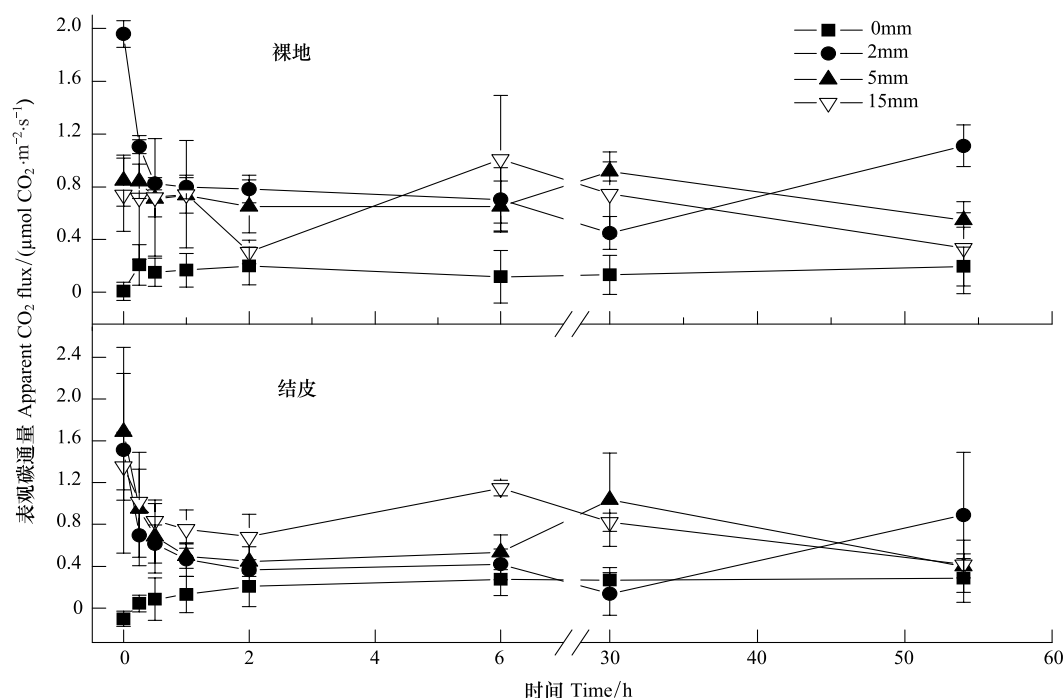


图3 第1次降水后生物结皮和裸地表现土壤碳通量的变化

Fig.3 Apparent soil CO₂ efflux following the first simulated precipitation beneath biological soil crusts and for crust-moved soils

2.2.2 第2次模拟降水后表现土壤碳通量的变化规律

第2次降水处理与第1次相隔6 d。2 mm降水处理下,第2次降水前土壤体积含水量与第1次降水前持平,而5 mm和15 mm降水处理下,第2次降水前土壤体积含水量要大于第1次降水前水平。

15 mm降水处理下,生物结皮和裸地前30 min的表观土壤碳通量均为负值,是一个碳吸收过程,其中裸地的这一过程持续了2 h(图5)。这种现象完全不同于第1次降水处理时CO₂的迅速释放。随着试验的进行,中午时分,土壤温度升高,土壤变得干燥,CO₂从空隙中大量释放出来。第2次降水后0—2 h,2 mm降水处理裸地CO₂释放速度最快,随后速度变慢,但整个试验期内(54 h),2 mm降水处理下的表观土壤碳通量一直大于5 mm,后者又大于对照。对于生物结皮而言,前1 h,2 mm降水下表观土壤碳通量最大,6 h后变得最小;5 mm降水处理表观土壤碳通量刚开始为0.239

$\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,30 h后上升到 $0.615 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;对照处理的表观土壤碳通量随时间延长而逐渐上升,但变化不大。

2.3 前后两次模拟降水对比

除了对照处理外,其它各处理下裸地和生物结皮CFLUX都是第2次小于第1次。对于裸地,第2次降水处理后,CK、PRE₂、PRE₅和PRE₁₅的CFLUX分别为0.6277、1.2155、1.1647和1.0289 gC/m²,分别是第1次的183.40%、75.30%、66.70%和62.80%;第1次降水处理时CFLUX最大的是PRE₅,而第2次是PRE₂。对

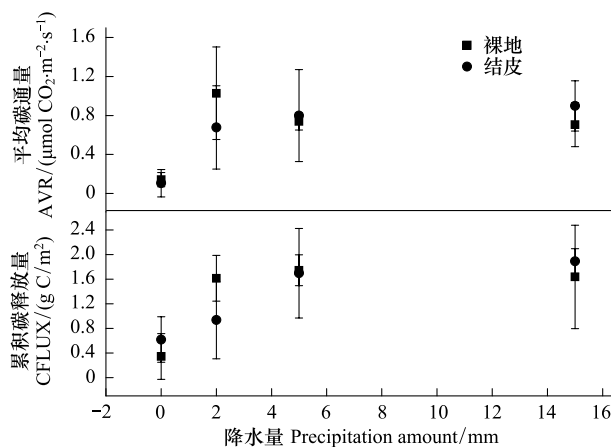


图4 生物结皮前6 h平均碳通量(AVR)和54 h内累积碳释放量(CFLUX)与降水大小关系

Fig.4 The relationships between the average CO₂ efflux rate over the first 6 h (AVR) and the total accumulated C production over the 54 h (CFLUX) and simulated rainfall amount

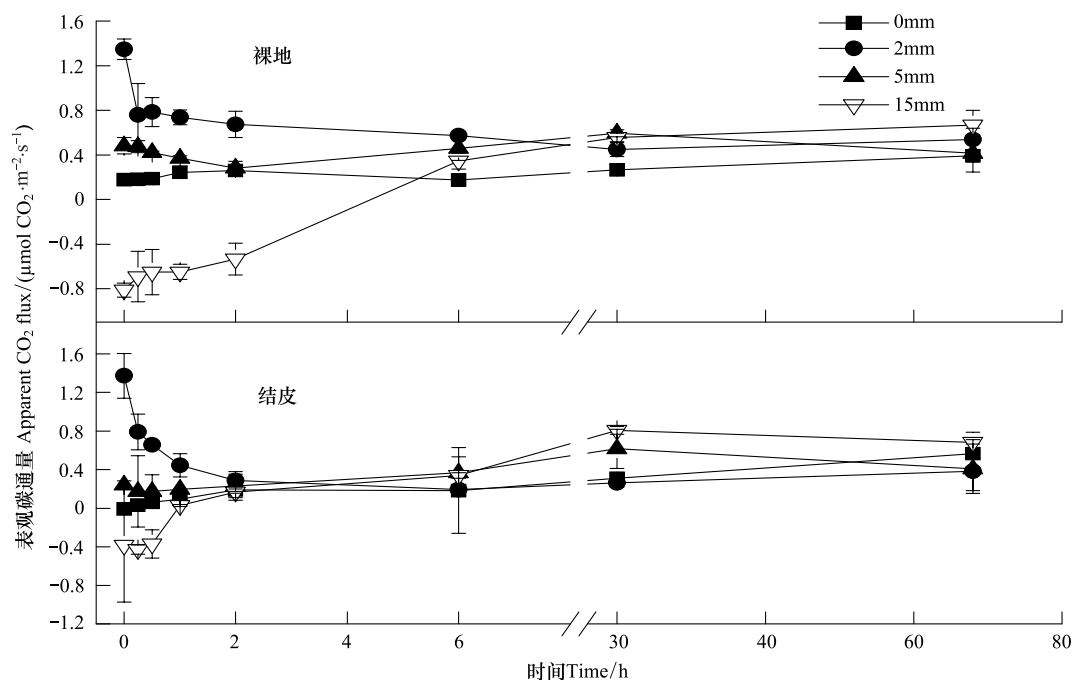


图5 生物结皮表观土壤碳通量对第2次模拟降水的响应

Fig. 5 The response of apparent soil CO₂ efflux to the second rainfall addition

于生物结皮,第2次处理分别是第1次的121.10%、70.50%、65.30%和70.0%,其中第1次降水时,各处理的CFLUX均随降水强度非线性增加,而第2次降水处理时,CFLUX随着降水强度先减小

后增加,PRE₂有最小CFLUX,PRE₁₅有最大CFLUX。第1次降水处理时,各降水处理下(CK、PRE₂、PRE₅和PRE₁₅)结皮的CFLUX分别是裸地的180.37%、57.93%、97.22%、115.50%;而第2次降水处理时,分别是119.06%、54.28%、95.14%、136.07%(图6)。

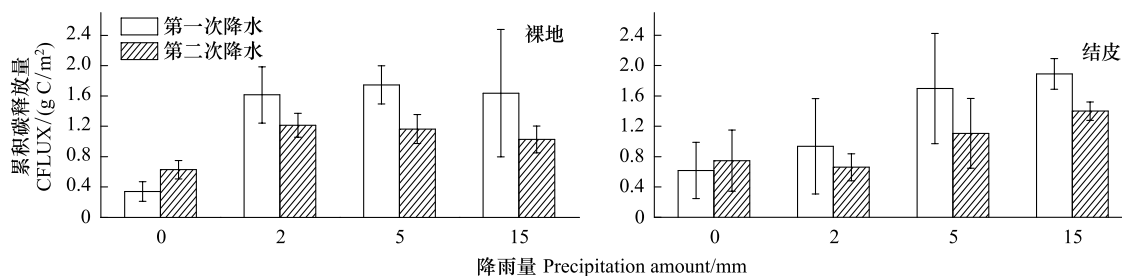


图6 两次降水处理累积碳释放量对比

Fig. 6 The comparison of the total accumulated C production between the two water addition events

对比图3和图5,可以发现,前后两次降水在2 mm和15 mm处理下表观土壤碳通量变化规律明显不同。2 mm处理下,两次降水前土壤体积含水量持平,表观土壤碳通量变化规律都是随着降水时间延长而减小,而15 mm处理下,表观土壤碳通量刚开始还会受到抑制,甚至吸收碳。裸地和生物结皮在第2次降水的体积含水量拐点值均小于第1次,第1次降水改善了土壤水分状况,表观土壤碳通量在土壤体积含水量增加后由促进变为受抑制,甚至产生了净的碳吸收(图7)。

表2反映了2次降雨前后,表观土壤碳通量对土壤体积分含水量的响应特征,二者之间的关系可以用一元二次曲线来描述。根据一元二次曲线方程可以求算出方程的拐点,其中裸地前后2次降水的土壤体积分含水量拐点值分别是11.19%、5.77%;生物结皮土壤体积分含水量拐点值为22.2%、6.46%,第2次降水土体积分含水量的拐点值明显小于第1次。当土壤体积分含水量的值小于拐点时,土壤体积分含水量的进一步增加促进CO₂的

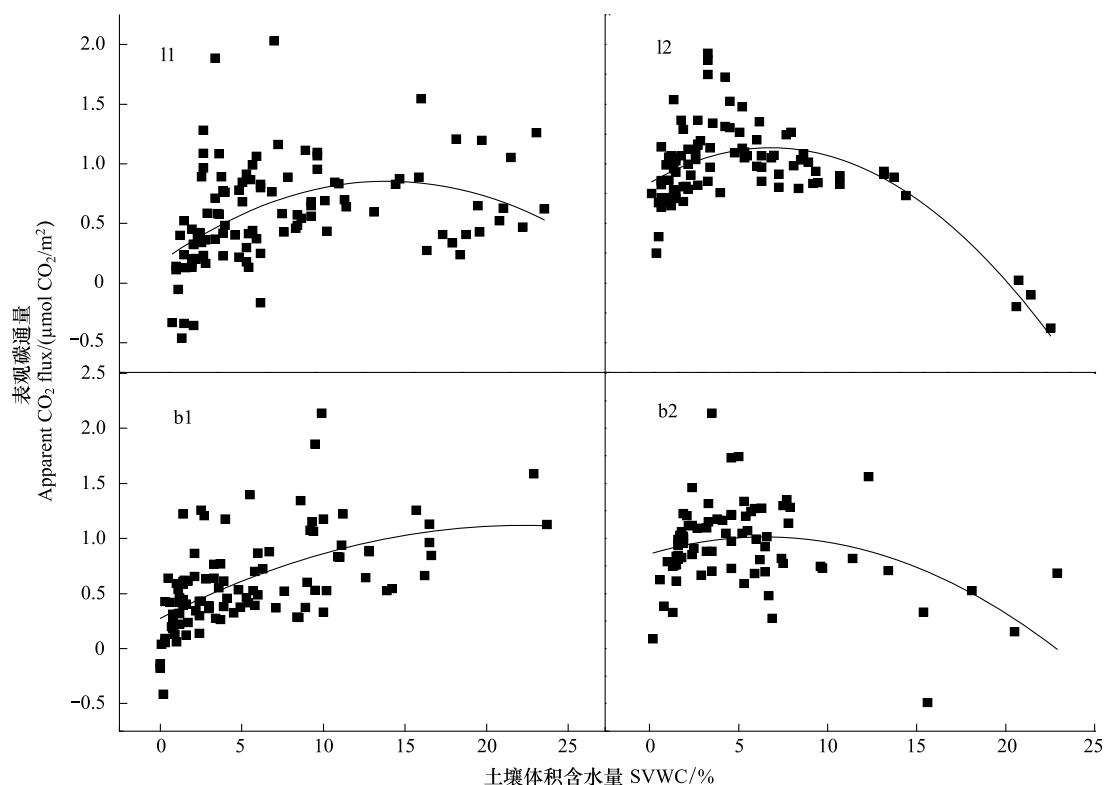


图 7 两次降水脉冲、表观土壤碳通量与土壤体积含水量间的关系

Fig. 7 The relationships between apparent soil CO₂ efflux (NEE) and soil volume water content around the two rainfalls separately

裸地第 1 次降水(l1),裸地第 2 次降水(l2),结皮第 1 次降水(b1),结皮第 2 次降水(b2)

释放;而当土壤体积含水量的值大于方程的拐点时,体积含水量的增大会抑制 CO₂ 的释放。从一元二次方程的复决定系数可知(表 2),表观土壤碳通量对降水的响应虽然可以用土壤体积含水量变化来解释,但解释量仍偏小。

表 2 两次降水脉冲、表观土壤碳通量与土壤体积含水量之间的二次曲线模拟

Table 2 The quadratic relationships between apparent soil CO ₂ efflux and soil volume water content around the two rainfalls separately					
样地 Plot	降水次数 No.	方程 Model	拐点 Inflexion	复决定系数 R ²	显著性 Significance
裸地	1	$y=0.2204+0.113x-0.00505x^2$	11.19	0.1687	$P<0.0001$
Crust-moved soil	2	$y=0.2315+0.1396x-0.0121x^2$	5.77	0.5096	$P<0.0001$
结皮	1	$y=0.2738+0.0759x-0.0017x^2$	22.20	0.3281	$P<0.0001$
Biologically crusted soil	2	$y=0.3569+0.0487x-0.0038x^2$	6.46	0.1371	$P=0.0012$

3 讨论

3.1 不同降水强度对生物结皮表观土壤碳通量的影响

本研究选取古尔班通古特沙漠腹地的生物结皮,进行人工模拟降水,观察表观土壤碳通量对降水的响应,结果表明生物结皮表观土壤碳通量在降水处理后是一个负值,表现为碳释放的过程。虽然有研究表明,生物结皮是干旱半干旱地区潜在的碳汇^[9,22,30-31],还有一些研究认为,雨季的降水和露水会激活生物结皮的光合特性,固定大气中的 CO₂,干旱区生态系统表现为碳吸收过程^[21]。但是本研究中生物结皮表观土壤碳通量对降水的响应表现为碳释放过程,这与生物结皮在夏季降水增加时会向大气中释放 CO₂ 结论一致^[32]。

在第 1 次降水前,土壤体积含水量约为 0.65%,土壤处于干旱状态,人工降水后土壤体积含水量显著升高,雨水渗入土壤,填充土壤孔隙,使 CO₂ 大量释放出来^[33],生物结皮由降水前的吸收碳转变为释放碳。同时

由于长期的干旱,土壤中活性碳累积以及微生物大量死亡,呼吸底物数量增加,水分增加后微生物生物量增加、活性增强,导致土壤 CO_2 大量释放^[34]。降水量的改变会影响土壤水分的波动模式,土壤各处理与对照相比,显著释放 CO_2 ,前 6 h 内的 AVR 和 54 h 内的 CFLUX 都与降水强度呈非线性增长关系,超过一定降水强度后,表观土壤碳通量变化越来越小甚至不再增加。而全球尺度上,土壤呼吸随降雨量增加呈线性增加^[35]。Grote 等在研究生物结皮在不同温度和土壤含水量条件下的碳交换规律时发现,不同演替系列和不同环境下的生物结皮碳交换量有很大波动,但都趋于某一适中值时达到最大净光合速率^[20]。通常情况下,中等强度降雨量对土壤呼吸的激发作用最大^[31],本研究中表观土壤碳通量在中等强度降水条件下已然接近最大值,虽然降水强度的进一步增加依旧可能增加碳的释放,但是影响甚微。温度也是影响土壤碳通量的一个因素,虽然模拟降水不同于自然降水天气条件,但是降水时间是在早上进行,同时人工降水当天是阴天,因此模拟降雨获得的数据略大于真实降雨条件下生物结皮土壤的碳通量。

3.2 生物结皮与裸地表观土壤碳通量对降水的响应差异

生物结皮有机体在湿润条件下能够迅速进行光合作用,固定空气中的 CO_2 ^[8]。在试验样地中测得每克土壤中叶绿素 a 含量约为 $3.8 \times 10^{-3} \text{ g}$,远大于张丙昌等在该沙漠南缘测得的藻结皮叶绿素含量^[36],说明该地区结皮叶绿素含量相对较高,能很好的进行光合作用。

无降水和高强度降水处理下,生物结皮和裸地表观土壤碳通量差异不显著,且都是生物结皮大于裸地。对照处理下,生物结皮表观土壤碳通量在短暂时间内小于裸地,但试验期间累积碳通量大于裸地,因为早晨空气湿度相对较大,生物结皮可以利用空气中的水分进行光合作用^[8],但是这一过程比较短暂,同时生物结皮本身有呼吸作用。高强度降水条件下,土壤孔隙很快被水填充,很长一段时间内土壤中 CO_2 不能轻易释放出来,而表层的生物结皮却能够减缓水分的下渗速率^[1],有利于土壤碳的释放。

2 mm 和 5 mm 降水下生物结皮表观土壤碳通量大于裸地,并且在 2 mm 降水处理时有显著差异性,2 mm 降水处理是二者累积碳通量出现差异的拐点。降水湿润生物结皮表面后,表层生物结皮进行呼吸作用同时,迅速的进行光合作用^[8]。由于生物结皮在较低的水分条件下就能进行光合作用,少量的降水就能满足最大光合速率的需水量。因此估计 2 mm 降水处理时表层生物结皮的光合作用大于自身的呼吸作用,生物结皮表观土壤碳通量小于裸地;5 mm 降水处理时表层生物结皮光合作用与呼吸作用相当,生物结皮表观土壤碳通量与裸地接近。另外,在试验中也发现,生物结皮表观土壤碳吸收过程几乎都发生在对照处理的早晨和傍晚,此时土壤体含水量较低,表观土壤碳通量为负值,可能此时生物结皮充分利用空气中有限的水分进行光合作用,同时较低的温度又抑制了呼吸,导致碳吸收。本研究中,通过对比生物结皮和裸地表观土壤碳通量,我们发现在较低降水条件时,生物结皮表观土壤碳通量小于裸地,说明了表层生物结皮在较低水分条件下光合作用大于自身的呼吸作用。虽然该沙漠全年降水稀少但是凝结水丰富,生物结皮能够利用有限的水分进行光合作用,但它是否是该地区一个潜在的碳汇有待我们做更细致的研究。

3.3 初次降水对二次降水表观土壤碳通量的影响

干旱地区降水零散,单次降水量大,具有脉冲式降水特点^[37]。Borken 等认为,土壤越干旱,由土壤水分的改善而引起的土壤呼吸越强^[38]。有研究表明,强降雨对土壤呼吸是促进还是抑制取决于降雨前土壤的水分状态,土壤水分相对亏缺条件下的强降雨促进土壤呼吸,而湿季的强降雨整体上抑制土壤呼吸^[39]。还有研究认为,土壤呼吸对连续降水事件的响应规律不同,高频率高强度的降水在湿润季节显著减小土壤碳释放^[39]。

研究区平均降雨间隔为 6 d 左右,而前后两次人工降水正好相隔 6 d,土壤处于一个干湿交替状态,同时不同水分处理使得土壤湿度在第 2 次降水处理前处于一个梯度状态。有研究表明,降水能够迅速改变干燥土壤的水分状况,迅速激发土壤呼吸,通常这种激发效应会持续 2—6 d^[40],连续降雨引起的反复干湿交替与单次降雨对土壤呼吸的影响存在差别,两者的影响机制也相差很大^[41]。对比两次降水,发现除了对照处理外,第 2 次表观土壤碳通量相比于第 1 次都有所下降,其中裸地表观土壤碳通量下降比例与降水强度正相关,第 1 次降水强度越大,第 2 次降水后表观土壤碳通量越小,活性碳在初级降水后的大量释放使得二次降水后释

放量下降。连续降水事件主要通过改变土壤的初始水分条件和土壤底物含量来影响土壤呼吸特征,土壤相对干旱时,降水会加速土壤呼吸,碳通量增加;土壤水分条件较好时,降水脉冲对表观土壤碳通量的促进作用减弱。本研究发现(图7),当第1次降水脉冲改善了土壤水分状况后,一元二次函数拐点左移,对表观土壤碳通量抑制作用在土壤体积含水量增大过程中提前到达。

4 结论

4.1 降水促进生物结皮表观土壤向大气释放 CO_2 ,且累积碳通量与降水强度呈非线性增长关系,其中生物结皮表观土壤累积碳释放量在 2 mm、5 mm、15 mm 3 种处理下分别是对照的 151.48%、274.97%、306.44%。

4.2 除去结皮后的裸地在中等强度降水下有最大碳通量,在无降水和高强度降水处理下,生物结皮表观土壤碳通量大于裸地,差异不明显,但裸地表观土壤碳通量在 2 mm 降水处理时显著大于生物结皮。

4.3 连续两次降水事件,活性碳在初级降水后的大量释放使得二次降水后释放量下降,其中裸地碳释放量下降速率与降水强度正相关。

References:

- [1] Belnap J, Lange O L. Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management. Berlin: Springer-Verlag, 2003: 121-128.
- [2] Beymer R J, Klopatek J M. Potential contribution of carbon by microphytic crusts in pinyon-juniper woodlands. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 1991, 5(3): 187-198.
- [3] Rao D L N, Burns R G. Use of blue-green algae and bryophyte biomass as a source of nitrogen for oil-seed rape. *Biology and Fertility of Soils*, 1990, 10(1): 61-64.
- [4] Belnap J. Nitrogen fixation in biological soil crusts from southeast Utah, USA. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35(2): 128-135.
- [5] Housman D C, Powers H H, Collins A D, Belnap J. 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(4): 620-634.
- [6] Novis P M, Whitehead D, Gregorich E G, Hunt J E, Sparrow A D, Hopkins D W, Elberling B, Greenfield L G. Annual carbon fixation in terrestrial populations of *Nostoc commune* (Cyanobacteria) from an Antarctic dry valley is driven by temperature regime. *Global Change Biology*, 2007, 13(6): 1224-1237.
- [7] Belnap J. The world at your feet: desert biological soil crusts. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2003, 1(4): 181-189.
- [8] Garcia-Pichel F, Belnap J. Microenvironments and microscale productivity of cyanobacterial desert crusts. *Journal of Phycology*, 1996, 32(5): 774-782.
- [9] Zaady E, Kuhn U, Wilske B, Sandoval-Soto L, Kesselmeier J. Patterns of CO_2 exchange in biological soil crusts of successional age. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(7): 959-966.
- [10] Cable J M, Huxman T E. Precipitation pulse size effects on Sonoran Desert soil microbial crusts. *Oecologia*, 2004, 141(2): 317-324.
- [11] Sponseller R A. Precipitation pulses and soil CO_2 flux in a Sonoran Desert ecosystem. *Global Change Biology*, 2007, 13(2): 426-436.
- [12] Cable J M, Ogle K, Williams D G, Weltzin J F, Huxman T E. Soil texture drives responses of soil respiration to precipitation pulses in the Sonoran Desert: implications for climate change. *Ecosystems*, 2008, 11(6): 961-979.
- [13] Casals P, Gimeno C, Carrara A, Lopez-Sangil L, Sanz M J. Soil CO_2 efflux and extractable organic carbon fractions under simulated precipitation events in a Mediterranean Dehesa. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(9): 1915-1922.
- [14] Chen S P, Lin G H, Huang J H, He M. Responses of soil respiration to simulated precipitation pulses in semiarid steppe under different grazing regimes. *Journal of Plant Ecology*, 2008, 1(4): 237-246.
- [15] Hao Y B, Niu H S, Wang Y F, Cui X Y, Kang X M, Wang J Z. Rainfall variability in ecosystem CO_2 flux studies. *Climate Research*, 2011, 46(1): 77-83.
- [16] Heisler-White J L, Knapp A K, Kelly E F. Increasing precipitation event size increases aboveground net primary productivity in a semi-arid grassland. *Oecologia*, 2008, 158(1): 129-140.
- [17] Inghima I, Alberti G, Bertolini T, Vaccari F P, Gioli B, Miglietta F, Cotrufo M F, Peressotti A. Precipitation pulses enhance respiration of Mediterranean ecosystems: the balance between organic and inorganic components of increased soil CO_2 efflux. *Global Change Biology*, 2009, 15(5): 1289-1301.
- [18] Chen Q S, Li L H, Han X G, Yan Z D. Effects of water content on soil respiration and the mechanisms. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(5): 972-978.
- [19] Wang Y D, Wang H M, Ma Z Q, Li Q K, Shi L L, Xu F. Review of response mechanism of soil respiration to rainfall. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(5): 601-610.
- [20] Grote E E, Belnap J, Housman D C, Sparks J P. Carbon exchange in biological soil crust communities under differential temperatures and soil water contents: implications for global change. *Global Change Biology*, 2010, 16(10): 2763-2774.
- [21] Wilske B, Burgheimer J, Karnieli A, Zaady E, Andreae M O, Yakir D, Kesselmeier J. The CO_2 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.
- [22] Jose J J S, Bravo C R. CO₂ exchange in soil algal crusts occurring in the Trachypogon savannas of the Orinoco Llanos, Venezuela. *Plant and Soil*, 1991, 135(2): 233-244.
- [23] Jeffries D L, Link S O, Klopatek J M. CO₂ fluxes of cryptogamic crusts. 2. Response to dehydration. *New Phytologist*, 1993, 125(2): 391-396.
- [24] Wilske B, Burgheimer J, Maseyk K, Karnieli A, Zaady E, Andreae M O, Yakir D, Kesselmeier J. Modeling the variability in annual carbon fluxes related to biological soil crusts in a Mediterranean shrubland. *Biogeosciences Discussions*, 2009, 6(4): 7295-7324.
- [25] Lange O L, Belnap J, Lange O L. Photosynthesis of soil-crust biota as dependent on environmental factors//Belnap J, Lange O L, eds. *Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management*. Ecological Studies. New York: Springer, 2001: 217-240.
- [26] Zhang Y M, Chen J, Wang X Q, Pan H X, Gu Z H, Pan B R. The distribution patterns of biological soil crust in Gurbantunggut Desert. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(1): 53-60.
- [27] Niu S L, Wu M Y, Han Y, Xia J Y, Li L H, Wan S Q. Water-mediated responses of ecosystem carbon fluxes to climatic change in a temperate steppe. *New Phytologist*, 2008, 177(1): 209-219.
- [28] Wang Y T, Tang L S. Responses of different life-form plants in Garbantunggut Desert to small rainfall events. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(6): 1028-1043.
- [29] Reicosky D C. Canopy gas exchange in the field: closed chambers. *Remote Sensing Reviews*, 1990, 5(1): 163-177.
- [30] Lange O L, Kidron G J, Büdel B, Meyer A, Kilian E, Abeliovich A. Taxonomic composition and photosynthetic characteristics of the 'biological soil crusts' covering sand dunes in the western negev desert. *Functional Ecology*, 1992, 6(5): 519-527.
- [31] 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.
- [32] Housman D C, Grote E E, Belnap J. Annual CO₂ flux from a biological soil crust system on the Colorado Plateau: effects of increased temperature and summer precipitation//Ecological Society of America Annual Meeting Abstracts. 2007.
- [33] Birch H F. The effect of soil drying on humus decomposition and nitrogen availability. *Plant and Soil*, 1958, 10(1): 9-31.
- [34] Gordona H, Haygarth P M, Bardgett R D. Drying and rewetting effects on soil microbial community composition and nutrient leaching. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(2): 302-311.
- [35] Rachi J W, Schlesinger W H. The Global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus B*, 1992, 44(2): 81-99.
- [36] Zhang B C, Zhao J C, Zhang Y M, Li M, Zhang J. Vertical distribution of algae in different locations of sand dunes in the Gurbantunggut Desert, Xinjiang, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2008, 32(2): 456-464.
- [37] Noy-Meir I. Desert ecosystems: environment and producers. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4(1): 25-51.
- [38] Borken W, Xu Y J, Davidson E A, Beese F. Site and temporal variation of soil respiration in European beech, Norway spruce, and Scots pine forests. *Global Change Biology*, 2002, 8(12): 1205-1216.
- [39] Zhang H X, Wang X K, Feng Z W, Song W Z, Liu W Z, Li S J, Pan J Z, Ouyang Z Y. The great rainfall effect on soil respiration of wheat field in semi-arid region of the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(12): 6189-6196.
- [40] Norton U, Mosier A R, Morgen J A, Derner J D, Ingram L J, Stah P D. Moisture pulses, trace gas emissions and soil C and N in cheatgrass and native grass-dominated sagebrush-steppe in Wyoming, USA. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(6): 1421-1431.
- [41] Xiang S R, Doyle A, Holden P A, Schimel J P. Drying and rewetting effects on C and N mineralization and microbial activity in surface and subsurface California grassland soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(9): 2281-2289.

参考文献:

- [18] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 阎志丹. 水分对土壤呼吸的影响及机理. *生态学报*, 2003, 23(5): 972-978.
- [19] 王义东, 王辉民, 马泽清, 李庆康, 施蕾蕾, 徐飞. 土壤呼吸对降雨响应的研究进展. *植物生态学报*, 2010, 34(5): 601-610.
- [26] 张元明, 陈晋, 王雪芹, 潘惠霞, 辜智慧, 潘伯荣. 古尔班通古特沙漠生物结皮的分布特征. *地理学报*, 2005, 60(1): 53-60.
- [28] 王亚婷, 唐立松. 古尔班通古特沙漠不同生活型植物对小雨量降雨的响应. *生态学杂志*, 2009, 28(6): 1028-1043.
- [36] 张丙昌, 赵建成, 张元明, 李敏, 张静. 新疆古尔班通古特沙漠南部沙垄不同部位藻类的垂直分布特征. *植物生态学报*, 2008, 32(2): 456-464.
- [39] 张红星, 王效科, 冯宗炜, 宋文质, 刘文兆, 李双江, 庞军柱, 欧阳志云. 黄土高原小麦田土壤呼吸对强降雨的响应. *生态学报*, 2008, 28(12): 6189-6196.

CONTENTS

Responses of sandy beach nematodes to oxygen deficiency: microcosm experiments	HUA Er, LI Jia, DONG Jie, et al (3975)
Allometric relationship between mean component biomass and density during the course of self-thinning for <i>Fagopyrum esculentum</i> populations	LI Lei, ZHOU Daowei, SHENG Lianxi (3987)
Automatic site selection of sight-seeing route in ecotourism destinations based on landscape perception sensitivity	LI Jifeng, LI Renjie (3998)
Emergy evaluation for sustainability of Biogas-linked agriculture ecosystem: a case study of Gongcheng county	YANG Jin, CHEN Bin, LIU Gengyuan (4007)
Spatial heterogeneity of vegetation coverage and its temporal dynamics in desert steppe, Inner Mongolia	YAN Liang, ZHOU Guangsheng, ZHANG Feng, et al (4017)
Soil conservation value flow processes of two typical grasslands	PEI Sha, XIE Gadi, LI Shimei, et al (4025)
Spatial distribution of carbon storage in a 13-year-old <i>Pinus massoniana</i> forest ecosystem in Changsha City, China	WU Tao, PENG Chonghua, TIAN Dalun, et al (4034)
Colonization rate and diversity of AM fungi in the rhizosphere of seven medicinal plants in Xiamen	JIANG Pan, WANG Mingyuan (4043)
Effects of Cd, Low Concentration Pb/Cd on the contents of phenolic acid and simple glucides exuding from winter wheat seedlings root and the relationship between them and rhizosphere soil microbial activity	JIA Xia, DONG Suiming, ZHOU Chunjuan (4052)
The community structure of laccase-like multicopper oxidase-producing bacteria in soil of Liangshui Nature Reserve	ZHAO Dan, GU Huiqi, CUI Daizong, et al (4062)
Effects of soil rhizosphere microbial community and soil factors on arbuscular mycorrhizal fungi in different salinized soils	LU Xinping, DU Qian, YAN Yongli, et al (4071)
The effects of inoculation with phosphate solubilizing bacteria <i>Bacillus megaterium</i> C4 in the AM fungal hyphosphere on soil organic phosphorus mineralization and plant uptake	ZHANG Lin, DING Xiaodong, WANG Fei, et al (4079)
Soil carbon, nitrogen and phosphorus ecological stoichiometry of <i>Phragmites australis</i> wetlands in different reaches in Minjiang River estuary	WANG Weiqi, WANG Chun, ZENG Congsheng, et al (4087)
Dynamics of soil microbial biomass during early fine roots decomposition of three species in alpine region	WU Zhichao, WU Fuzhong, YANG Wanqin, et al (4094)
Effects of simulated precipitation on apparent carbon flux of biologically crusted soils in the Gurbantunggut Desert in Xinjiang, Northwestern China	WU Lin, SU Yangui, ZHANG Yuanming (4103)
Changes in photosynthetic properties, ultrastructure and root vigor of <i>Dendrobium candidum</i> tissue culture seedlings during transplantation	PU Xiaozhen, YIN Chunying, ZHOU Xiaobo, et al (4114)
Analysis of dry matter accumulation and translocation for winter wheat cultivars with different yields on dryland	ZHOU Ling, WANG Zhaohui, LI Fucui, et al (4123)
Impact evaluation of low temperature to yields of maize in Northeast China based on crop growth model	ZHANG Jianping, WANG Chunyi, ZHAO Yanxia, et al (4132)
Spatiotemporal variations in the reference crop evapotranspiration on the Loess Plateau during 1961—2009	LI Zhi (4139)
Eco-physiological responses of <i>Phragmites australis</i> to different water-salt conditions in Momoge Wetland	DENG Chunnuan, ZHANG Guangxin, LI Hongyan, et al (4146)
Comparative study of different earthworm sampling methods	FAN Ruqin, ZHANG Xiaoping, LIANG Aizhen, et al (4154)
Geographic variation in longevity and fecundity of the Asian corn borer, <i>Ostrinia furnacalis</i> Guenée (Lepidoptera: Crambidae)	TU Xiaoyun, CHEN Yuansheng, XIA Qinwen, et al (4160)
Analysis on grasshopper spatial heterogeneity and pattern of natural grass in upper reaches of Heihe	ZHAO Chengzhang, LI Lili, WANG Dawei, et al (4166)
Inhibition effects of ethyl acetate extracts of <i>Momordica charantia</i> leaves on the experimental population of <i>Spodoptera litura</i>	LOU Ying, LING Bing, XIE Jiefeng, et al (4173)
Feeding habits of <i>Lateolabrax maculatus</i> in Yangtze River estuary	HONG Qiaoqiao, ZHUANG Ping, YANG Gang, et al (4181)
Genetic structure of <i>Gymnodontichus pachycheilus</i> from the upper reaches of the Yellow River as inferred from mtDNA control region	SU Junhu, ZHANG Yanping, LOU Zhongyu, et al (4191)
Toxicity mechanism of Cadmium-induced reactive oxygen species and protein oxidation in testes of the frog <i>Rana nigromaculata</i>	CAO Hui, SHI Cailei, JIA Xiuying (4199)
The diversity of scarab beetles in grassland cattle dung from North China	FAN Sanlong, FANG Hong, GAO Chuanbu, et al (4207)
Spatial relationships among <i>Empoasca vitis</i> (Gothé) and <i>Toxoptera aurantii</i> (Boyer) and natural enemies in tea gardens of autumn-winter season in Hefei suburban	YANG Lin, GUO Hua, BI Shoudong, et al (4215)
Effects of vegetation, elevation and human disturbance on the distribution of large- and medium-sized wildlife: a case study in Jiuzhaigou Nature Reserve	ZHANG Yue, LEI Kaiming, ZHANG Yuke, et al (4228)
Research of typical EIPs based on the social network analysis	YANG Lihua, TONG Lianjun (4236)
Exergy-based life cycle accounting of household biogas system: a case study of Gongcheng, Guangxi	QI Jing, CHEN Bin, DAI Jing, et al (4246)
Review and Monograph	
The effects of changes in hydrological regimes and salinity on wetland vegetation: a review	ZHANG Guangxin (4254)
Advances in research on the seed bank of a saline-alkali meadow in the Songnen Plain	MA Hongyuan, LIANG Zhengwei, LÜ Bingsheng, et al (4261)
A new landscape expansion index: definition and quantification	WU Pengfei, ZHOU Demin, GONG Huili (4270)
Scientific Note	
Response of photosynthetic characteristics of <i>Psathyrostachys huashanica</i> Keng to drought stress	LI Qian, WANG Ming, WANG Wenwen, et al (4278)
The antifouling activities of <i>Callyspongia</i> sponge extracts	CAO Wenhao, YAN Tao, LIU Yonghong, et al (4285)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7 国外邮发代号:M670 标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 32 卷 第 13 期 (2012 年 7 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 32 No. 13 (July, 2012)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100071	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元