

藓结皮对陕北黄土高原两种质地土壤呼吸的影响

赵东阳¹ 肖波^{2,3*} 郭成久¹ 贾玉华¹

(¹沈阳农业大学水利学院, 沈阳 110866; ²中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; ³中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要 使用 LI-840 便携式土壤碳通量分析仪, 测定了黄土高原典型小流域砂土(风沙土)和砂质壤土(黄土)上典型藓结皮与无结皮的呼吸速率, 分析两种质地土壤上藓结皮对土壤呼吸的影响。结果显示, 在小时尺度上, 砂土和砂质壤土上有无藓结皮的呼吸速率均呈单峰型曲线, 峰值出现在 14:00 时, 大小分别为 2.49 和 2.66 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; 相较于无结皮, 有藓结皮的两种质地土壤的呼吸速率峰值分别降低了 8.6% 和 5.8%。在日尺度上, 有藓结皮的砂土和砂质壤土的日均呼吸速率分别较无结皮降低了 9.1% 和 5.3%, 且有藓结皮的砂土日均呼吸速率比有藓结皮的砂质壤土低 7.1%。此外, 两种质地土壤的呼吸速率与表层 2 cm 土壤温度均呈显著线性相关, 表明表层土壤温度是影响生物结皮土壤呼吸的主要因素; 同时, 藓结皮使表层土壤温度降低 0.3~0.5 $^{\circ}\text{C}$, 因此推测藓结皮可能会通过降低土壤温度进而影响土壤呼吸速率。研究表明, 黄土高原两种质地土壤上广泛发育的藓结皮均能显著降低土壤呼吸速率, 其中砂土上的藓结皮更为突出, 因此在区域碳通量估算和碳循环研究中应予以充分重视。

关键词 生物结皮; 土壤质地; 黄土; 风沙土; 土壤呼吸速率; 土壤温度

Effects of moss-dominated biological soil crusts on soil respiration in two types of soil in the Loess Plateau of Northern Shaanxi Province, China. ZHAO Dong-yang¹, XIAO Bo^{2,3*}, GUO Cheng-jiu¹, JIA Yu-hua¹ (¹College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China; ²College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China; ³State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling 712100, Shaanxi, China).

Abstract: The soil respiration rates of sandy soil (Ust Sandic Entisols) and sandy loam soil (Lorthic Entisols) with and without the coverage of moss-dominated biological soil crusts (moss crusts) were measured by a portable CO₂ analyzer (LI-840) in a small watershed on the Loess Plateau of China. The effects of moss crusts on soil respiration were determined by the differences of soil respiration rates with and without moss crusts. The results showed that, on hourly scale, the soil respiration rates of the two soils without moss crusts had similar peak values at 14:00, which were 2.49 and 2.66 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, respectively. The presence of moss crusts decreased the soil respiration rates of the two soils by 8.6% and 5.8%, respectively. On daily scale, the daily soil respiration rates of the sandy soil and sandy loam soil were 9.1% and 5.3% lower with moss crusts than those without moss crusts, respectively; while with the presence of moss crusts, the daily soil respiration rate of the sandy soil was 7.1% lower than that of the sandy loam soil. In addition, the soil respiration rates of the two types of soil had a significant relationship with surface (2 cm) soil temperature, implying that surface soil temperature had important influences on the respiration of the two soils with and without moss crusts. Therefore, we speculated that the moss crusts possibly decreased the soil respiration rate through their effect of decreasing soil surface temperature, with an average reduction of 0.3–0.5 $^{\circ}\text{C}$ during the experiment. In conclusion,

国家自然科学基金项目(41001156)和黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金(A314021402-1513)资助。

收稿日期: 2016-08-24 接受日期: 2016-03-01

* 通讯作者 E-mail: xiaobo@cau.edu.cn; xiaoboxb@gmail.com

the moss crusts, especially developed on sandy soil, significantly decreased soil respiration on the Loess Plateau of China. Thus, biological soil crusts should be considered in the regional estimation of CO₂ flux and carbon cycling in the Loess Plateau of China and other similar environments.

Key words: biological soil crust; soil texture; loess soil; aeolian soil; soil respiration rate; soil temperature.

在温室效应和全球变暖的背景下,CO₂作为最重要的温室气体,其源、汇以及排放过程受到广泛关注(Cox *et al.*, 2000; 尹飞虎等, 2011)。土壤呼吸是土壤异养微生物和植物根系生命活动的表征,也是碳素由陆地生态系统返回大气的主要途径(Castillo-Monroy *et al.*, 2011)。土壤呼吸在时间和空间上受多种物理和生物过程影响,其影响因素包括生物因子(植被类型、生物量、叶面积指数、凋落物等)、非生物因子(降水、土壤温度、湿度、质地、C/N等)以及人类活动三方面(刘绍辉等, 1997; Boone *et al.*, 1998; 张东秋等, 2005)。研究表明,地表覆被变化和土地利用方式改变(草地、农地、撂荒地、裸地等)能显著影响土壤呼吸和CO₂排放通量(汤洁等, 2012)。

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(Belnap, 2003)。有研究表明,生物结皮能显著改变地表生态过程,可固持碳氮(吴楠等, 2007; Grote *et al.*, 2010; 刘艳梅等, 2012)、提高土壤有机质含量(张元明等, 2005)、改善土壤养分状况(肖波等, 2007)、减少水土流失(肖波等, 2007)。影响土壤呼吸是生物结皮诸多生态功能中非常重要的一个方面(Lunge *et al.*, 2007),通过土壤呼吸速率可以判定生物结皮的发育阶段、组成成分以及生态功能(Zaady *et al.*, 2000)。但由于生物结皮的结构复杂,同时土壤呼吸的影响因素众多,因此目前对于生物结皮影响土壤呼吸尚无定论,针对不同气候区和不同类型生物结皮的研究结果差异较大。例如:在内蒙古科尔沁沙地,李玉强等(2008)研究发现,苔藓结皮和藻结皮极显著地降低了土壤呼吸速率,且在湿润和低温条件下抑制作用更为明显;在黄土高原不同侵蚀区,王爱国等(2013)研究表明,以苔藓和藻类为主的生物结皮会降低土壤呼吸强度和CO₂通量;但在毛乌素沙地东北部,藻结皮的土壤呼吸速率在生长季显著高于裸地,且对表层土壤水分响应更为敏感(齐玉春等, 2010)。

土壤质地是影响生物结皮分布、发育以及演替的重要因素。一方面,土壤质地是影响物理结皮形

成的重要因素,而物理结皮所提供的稳定土表是生物结皮发育的先决条件和重要基础(Bowker *et al.*, 2008);另一方面,不同质地土壤的水、肥、气、热特性不同,其所营造的土壤微环境差异较大,因此,不同质地土壤上发育形成的生物结皮具有不同的结构和微生物组成(吴楠等, 2004);此外,由于可利用程度不同,不同质地土壤通常对应于不同的土地利用方式和不同的人为扰动强度,扰动可使生物结皮快速退化或逆向演替,且扰动恢复难度较大、历时漫长(Xiao *et al.*, 2014, 2015)。据研究报道,在黄土高原水蚀风蚀交错区的同一小流域,砂土上发育形成的藓结皮显著好于砂质壤土,且前者对土壤理化性质的影响程度显著大于后者(肖波等, 2008)。土壤质地不仅是生物结皮的重要影响因素,同时也是土壤呼吸的关键影响因素(骆亦其, 2007)。在同一地区,不同质地土壤通常对应于不同的生物因子、非生物因子以及人类活动强度,继而可通过多种方式直接或间接影响土壤呼吸速率(Lohila *et al.*, 2003)。通常情况下,土壤质地越粘,其呼吸速率相应越高(Dilustro *et al.*, 2005)。综上,对于生物结皮土壤呼吸而言,土壤质地是非常重要的影响因素,它不仅可直接影响土壤呼吸,而且还可能通过影响生物结皮间接影响土壤呼吸,但已有的这些研究尚未对其进行明确区分和充分考虑。

本研究以黄土高原典型小流域为例,使用LI-COR LI-840便携式土壤碳通量分析仪,测定了砂土(风沙土)和砂质壤土(黄土)上典型藓结皮与无结皮的呼吸速率,对比分析了两种质地土壤上藓结皮对土壤呼吸的影响。研究结果可揭示黄土高原典型藓结皮的呼吸特征,明确藓结皮对土壤呼吸速率的影响,量化生物结皮对CO₂通量和碳排放的贡献,为黄土高原以及其他干旱、半干旱地区的区域碳通量估算和碳循环研究提供参考。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于黄土高原北部的陕西省神木县六道沟流域(38°46' N—48°51' N, 110°21' E—110°23' E)。

流域面积 6.89 km², 海拔 1094~1273 m, 属于黄土丘陵区向鄂尔多斯高原过渡的水蚀风蚀交错带, 也是黄土高原水土流失最为严重的区域(唐克丽, 2000)。该流域属中温带半干旱气候, 地形特点为典型的盖沙黄土丘陵区, 盛行西北风, 年均气温 7~9℃, 多年年均降雨量约 400 mm, 降雨集中在 5—9 月, 占全年降雨量的 70%~80%。流域分为东西两个部分, 西边以风沙土(质地为砂土)为主, 东边大部分为黄土(质地为砂质壤土)覆盖(贾恒义等, 1993)。

1.2 实验设计

实验设土壤质地和生物结皮有无 2 因素, 其中土壤质地因素设砂土和砂质壤土 2 水平, 生物结皮有无因素设藓结皮和无结皮 2 水平。即实验共 4 种处理, 每处理重复 5 次。

1.3 测定指标和方法

根据实验设计, 于 2015 年 6 月在砂土和砂质壤土上分别选取发育良好的藓结皮样地和临近无结皮样地, 并在每个样地中随机均匀选取 5 个样点, 为重复。所选样地为林地, 以人工种植的稀疏灌木为主, 包括柠条(*Caragana korshinskii*)、沙柳(*Salix psammophila*)、沙蒿(*Artemisia ordosica*)等。使用样方法测定样地中藓结皮的盖度, 使用数显游标卡尺测定藓结皮层的厚度(土壤较为干燥时施加外力能够使藓结皮层完整自然剥离的厚度, 包括藓结皮层及所黏附土壤层), 使用筛分、烘干、称重法测定苔藓结皮的生物量(单位面积内藓的总干重), 研究结果得出, 两种质地土壤上发育形成的苔藓结皮其藓种类相同(表 1), 均为极地真藓(*Bryum arcticum*)、真藓(*Bryum argenteum*)、土生扭口藓(*Barbula vinealis*)、细叶扭口藓(*Barbula perobtusata*)。选择天气晴好的观测日, 于 08:00—18:00, 使用便携式土壤碳通量分析仪(LI-840, 美国 LI-COR 公司), 对 4 种处理的土壤呼吸速率进行持续观测, 间隔时间为 1 h。测量前, 清理藓结皮和无结皮的地表, 选取的样点土壤表

层, 草本植物均较少, 清理过程中, 在保证不破坏土表的情况下, 用剪刀剪掉草本植物的地上部分, 使其不会影响土壤呼吸, 提前 30 min 将测量气室(直径 20 cm, 不透明)插入待测样点的土表, 并保证藓结皮的结构完整。测量时, 设定测量时间为 2 min, 待仪器数值稳定后开始读数。此外, 使用便携式土壤碳通量分析仪自带的土壤水分和温度传感器同步测定表层 2 cm 土壤的含水量和温度。由于测量期间土壤水分变化较小, 基本稳定在 4% 左右, 因此, 本研究不考虑土壤含水量对土壤呼吸的影响。

1.4 数据处理

使用 Microsoft Excel 2013 计算每种处理的平均值和标准误差, 比较苔藓结皮和无结皮的土壤呼吸差异。同时, 使用 SPSS 22.0 进行 *t* 检验和单因素方差分析, 分析不同处理之间的差异显著性。使用 OriginPro 9.2 进行绘图和拟合。

2 结果与分析

2.1 藓结皮和无结皮的土壤呼吸速率的日变化规律

砂土上藓结皮的生长发育状况明显好于砂质壤土。由表 1 可见, 砂土上藓结皮的盖度($t = 16.97, P < 0.01$)、厚度($t = 4.43, P < 0.05$)、生物量($t = 24.15, P < 0.05$)、藓植株密度($t = 17.06, P < 0.05$)均显著高于砂质壤土, 前者分别为后者的 2.1、1.2、1.7、1.9 倍。然而, 与砂土上的藓结皮相比, 砂质壤土上藓结皮中的植株更为粗壮、地上部分更高, 吸水湿润或失水干燥后的颜色更深。在小时尺度上, 有无结皮的砂土和砂质壤土土壤呼吸速率具有相似的日变化规律, 均为单峰型曲线(图 1)。自早上 08:00 开始, 土壤呼吸速率随时间推移而逐渐升高, 至中午 14:00 达到峰值, 其后逐渐下降, 但下降速率要比上升速率缓慢。藓结皮砂土、无结皮砂土、藓结皮砂质壤土以及无结皮砂质壤土的呼吸速率在不同时段之间均差异显著($P < 0.01$), 表明两种质地土壤上藓结皮和无

表 1 两种质地土壤上藓结皮的基本特征及差异

Table 1 Characteristics of moss crusts and their differences between the two types of soil

结皮	土壤质地	盖度 (%)	厚度 (%)	生物量 (g · m ⁻²)	苔藓植株密度 (Count · cm ⁻²)	苔藓种
砂土藓结皮	砂土	95	20.23±2.56 a	152.99±7.52 a	55.9±3.9 a	极地真藓 (<i>Bryum arcticum</i>)、真藓 (<i>Bryum argenteum</i>)、土生扭口藓 (<i>Barbula vinealis</i>)、细叶扭口藓 (<i>Barbula perobtusata</i>)
砂质壤土藓结皮	砂质壤土	47	16.25±1.23 b	89.49±3.55 b	29.8±2.8 b	极地真藓、真藓、土生扭口藓、细叶扭口藓

同列不同字母表示两种藓结皮之间差异显著($P < 0.05$)。

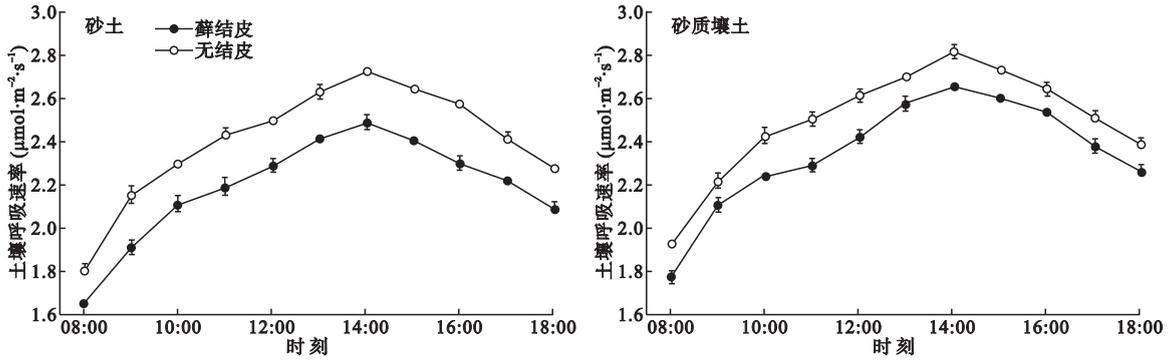


图1 两种质地土壤上藓结皮和无结皮呼吸速率的日变化规律

Fig.1 Diurnal change of soil respiration rate of two types of soil with moss crusts and without crust

结皮的呼吸速率均有显著的日变化过程。在所测定时段内(08:00—18:00),两种质地土壤上藓结皮的呼吸速率均不同程度地低于无结皮,且土壤呼吸速率越高则二者差异越大。在土壤呼吸速率最高时(14:00时),砂土和砂质壤土上藓结皮的呼吸速率峰值分别为 2.49 和 2.66 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,而砂土和砂质壤土上无结皮的呼吸速率分别为 2.73 和 2.82 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。与无结皮相比,两种质地土壤上藓结皮的呼吸速率峰值分别降低了 8.6% 和 5.8%。同时,藓结皮砂土的呼吸速率比砂质壤土低 6.4%,无结皮的砂土的呼吸速率比砂质壤土低 3.2%,表明土壤质地越粘则呼吸速率越高。

2.2 藓结皮对日土壤呼吸总量的影响

在日尺度上,两种质地土壤上藓结皮的日土壤呼吸总量(每日 08:00—18:00 的总量)显著低于无结皮(图 2, $P < 0.01$)。在所测定的 10 d 里,砂土和砂质壤土上藓结皮的日均土壤呼吸总量分别为 78.89 和 85.43 $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2}$,无结皮的日均土壤呼吸总量分别为 86.81 和 90.25 $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2}$ 。与无结皮相比,砂土和砂质壤土上藓结皮的呼吸速率分别比无结皮减少了 9.1% 和 5.3%。同时,与砂质壤土相

比,砂土上藓结皮和无结皮的呼吸速率分别减少了 7.7% 和 3.8%。在 10 d 内,藓结皮和无结皮的呼吸速率相对较稳定。砂土和砂质壤土上藓结皮的日土壤呼吸总量最大值分别为 83.65 和 89.57 $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2}$,无结皮的日土壤呼吸总量最大值分别为 91.17 和 94.35 $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

2.3 土壤呼吸速率与表层土壤温度的关系

两种质地土壤上藓结皮和无结皮的表层土壤温度在太阳升起前较低,其后逐渐升高,至 14:00 达到最大值并开始逐渐降低(图 3)。在两种质地土壤上,藓结皮和无结皮具有相似的单峰型土壤温度日变化曲线(图 3),且该曲线与图 1 中的土壤呼吸速率日变化曲线高度一致,表明土壤呼吸速率与表层土壤温度具有高度的相关性。线性回归分析结果(图 4)显示,藓结皮和无结皮的土壤呼吸速率均与表层土壤温度呈线性正相关关系($R^2 > 0.81$, $P < 0.01$),表明无论对藓结皮还是无结皮而言,表层土壤温度均是影响土壤呼吸速率的重要因素。此外,由图 3 可见,两种质地土壤上苔藓结皮的土壤温度均一致低于无结皮。在日尺度上,砂土上藓结皮的表层土壤温度平均比无结皮低 0.5 $^{\circ}\text{C}$,而砂质壤

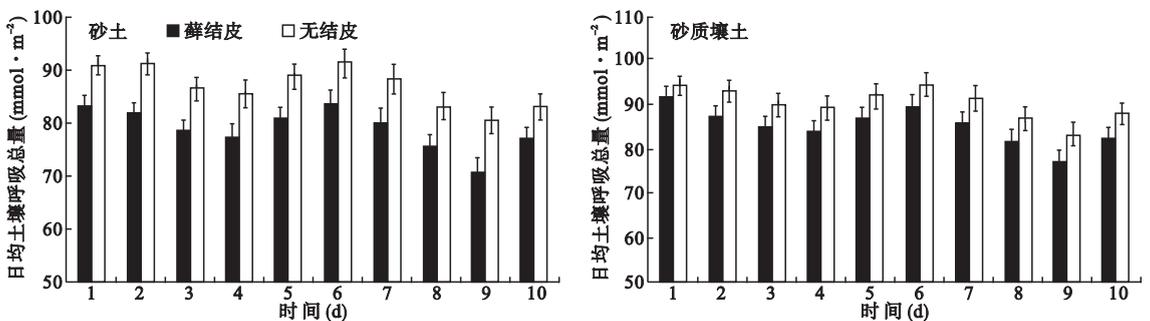


图2 两种质地土壤上藓结皮和无结皮的日土壤呼吸总量

Fig.2 Daily value of soil respiration rate of two types of soil with moss crusts and without

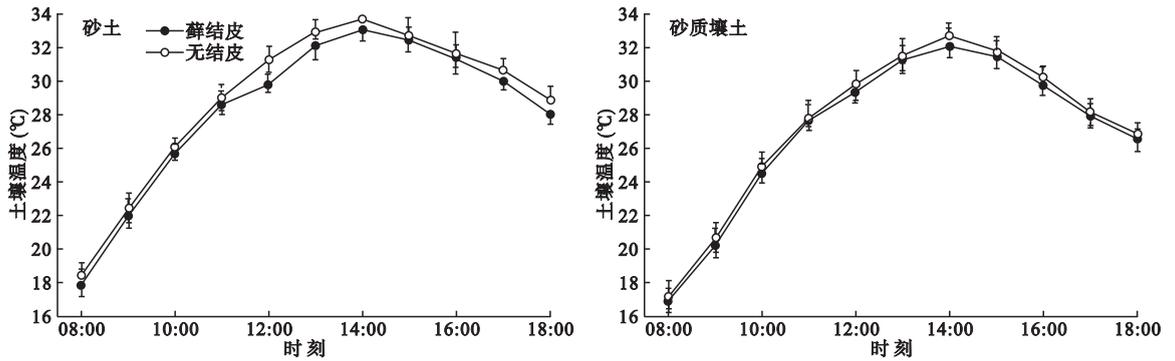


图3 两种质地土壤上苔藓结皮和无结皮的表层土壤温度日变化规律

Fig.3 Diurnal change of soil surface temperature of two types of soil with moss crusts and without crust

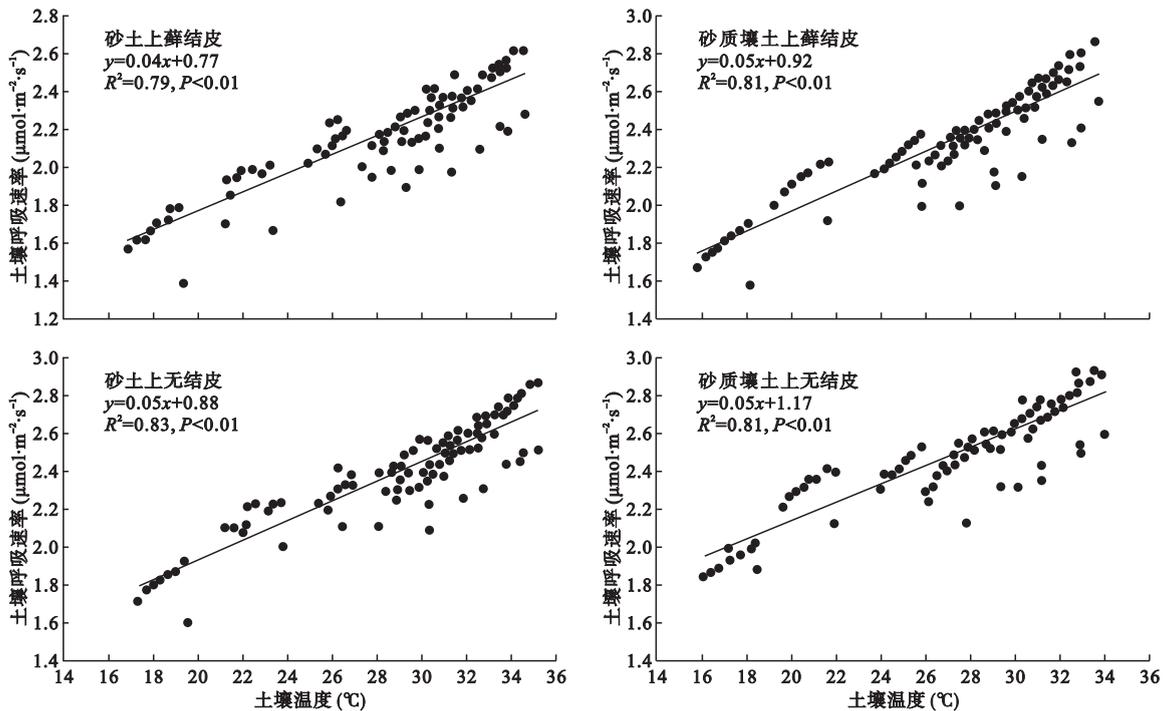


图4 藓结皮和无结皮的土壤呼吸速率与表层土壤温度的关系

Fig.4 Relationship between soil respiration rate and surface soil temperature with moss crusts and without crust

土藓结皮的表层土壤温度平均比无结皮低 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。结合上述藓结皮和无结皮的土壤温度差异以及表层土壤温度与土壤呼吸速率的关系可以推测,藓结皮可能会通过影响土壤温度来影响土壤呼吸速率。

3 讨论

本研究表明,黄土高原两种质地土壤上的藓结皮均会降低土壤呼吸速率,表现出对土壤呼吸的抑制作用。这一结果与王爱国等(2013)以及李玉强等(2008)的研究结果基本吻合,但对于生物结皮降低土壤呼吸的程度,则不同研究的结果差异较大。例如:在本研究的陕西榆林地区(年均降雨量 409

mm),砂土上的藓结皮使土壤呼吸速率降低了 9.1%,砂质壤土上的藓结皮使土壤呼吸速率降低了 5.3%,二者的峰值分别为 2.49 和 $2.66\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$;在内蒙古科尔沁沙地(年均降雨量 364.6 mm),李玉强等(2008)研究得出,风沙土上的苔藓结皮使土壤呼吸速率降低了 46%,峰值为 $1.86\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$;而在陕西西安塞等地区(年均降雨量 500~550 mm),王爱国等(2013)等研究发现,黄绵土上的藻结皮使土壤呼吸速率降低了 92%,峰值为 $1.64\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,尽管多数研究结果表明生物结皮会降低土壤呼吸速率,但也有少量研究发现生物结皮会增加土壤呼吸速率(齐玉春等,2010),这可能缘

于以下4个方面:(1)土壤呼吸速率表征了土壤微生物活性,其本身具有较强的时间和空间异质性。(2)不同研究区具有不同的气候特征和降雨格局,这在很大程度上决定了土壤中微生物的数量和多样性,例如半干旱地区的土壤呼吸速率通常显著高于干旱地区以及荒漠化地区。(3)不同演替阶段和不同类型的生物结皮其微生物组成差异极大,演替阶段越高则相应的土壤呼吸速率越高,例如苔藓结皮的土壤呼吸作用通常要强于地衣结皮和藻结皮。(4)土壤质地不仅决定了土壤微生物的生长环境,还在一定程度上决定了该土壤上所形成生物结皮的类型(本研究中砂土上的苔藓结皮的发育状况显著好于砂质壤土),通常壤土的土壤呼吸速率高于砂土。综上,生物结皮的发育使得土壤微生物组成和土壤呼吸过程更为复杂,其直接和间接影响因素更为多样。

对于生物结皮影响土壤呼吸的途径和机理,通常认为生物结皮可通过以下两方面抑制土壤呼吸:(1)生物结皮粘结细颗粒土壤后,堵塞、封闭了表层土壤原有孔隙,所形成的致密生物结皮层阻碍了土壤呼吸生成的 CO_2 向大气排放,从而降低土壤呼吸速率(Verrecchia *et al.*, 1995)。这一推测得到了Wang等(2014)的研究证实。Wang等(2014)在黄土高原测定了苔藓结皮(3~7 a)和去除苔藓结皮的导气率,发现苔藓结皮的土壤导气率在任意含水量条件下均显著低于去除苔藓结皮,表现出对气体传输和交换的阻碍作用;(2)生物结皮增加了土壤热容量和土壤蒸发速率,因此在雨季土壤含水量较高时生物结皮会降低土壤温度(杨永胜等, 2012; Xiao *et al.*, 2010, 2013)。本研究中,两种质地土壤上的藓结皮使表层土壤温度降低了 $0.3\sim 0.5\text{ }^\circ\text{C}$;而土壤呼吸速率与土壤温度有显著的线性正相关关系(齐玉春等, 2010; 王爱国等, 2013),在一定范围内土壤温度越低则土壤微生物活性越弱,相应的土壤呼吸速率越低。因此,研究推测生物结皮可能会通过降低土壤温度继而影响土壤呼吸速率。与此相似,生物结皮促进土壤呼吸的途径同样包括两个方面:(1)生物结皮的土壤微生物数量和多样性显著高于无结皮,且生物结皮可以沟通过改变土壤有机碳含量来影响其土壤呼吸速率,因此其土壤呼吸速率理应高于无结皮;(2)生物结皮较深的颜色降低了地表反射率,在冬季或特定条件下会增加土壤温度(Xiao *et al.*, 2013),继而促进土壤呼吸。

4 结 论

在陕北黄土高原,砂土和砂质壤土上藓结皮的土壤呼吸速率均呈单峰型曲线,峰值出现在14:00时,分别为 2.49 和 $2.66\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$;相较于无结皮,两种质地土壤上藓结皮的呼吸速率峰值分别降低了 8.6% 和 5.8% 。在日尺度上,砂土和砂质壤土上藓结皮的日均呼吸速率分别较无结皮降低了 9.1% 和 5.3% ,且砂土上苔藓结皮的日均呼吸速率比砂质壤土低 7.1% 。此外,两种质地土壤的呼吸速率与表层 2 cm 土壤温度均成显著线性相关;同时,藓结皮可使表层土壤温度降低 $0.3\sim 0.5\text{ }^\circ\text{C}$,因此,藓结皮除了通过改变土壤有机碳含量、土壤微生物活性及土壤透气性等因素来影响土壤呼吸速率,还可能通过降低土壤温度来影响土壤呼吸速率。此外,需要指出的是,生物结皮除了通过抑制土壤呼吸减少 CO_2 排放外,结皮微生物还可通过光合作用固持部分 CO_2 ,因此两方面作用叠加后,生物结皮对碳通量和碳循环的影响应更为显著。

参考文献

- 贾恒义, 雍绍萍, 王富乾, 等. 1993. 神木试质地的土壤资源. 中国科学院西北水土保持研究所集刊, **18**(2): 36-46.
- 李玉强, 赵哈林, 赵 玮, 等. 2008. 生物结皮对土壤呼吸的影响作用初探. 水土保持学报, **22**(3): 106-109.
- 刘绍辉, 方精云. 1997. 土壤呼吸的影响因素及全球尺度下温度的影响. 生态学报, **17**(5): 469-476.
- 刘艳梅, 李新荣, 何明珠, 等. 2012. 生物结皮土壤对微生物碳的影响. 中国沙漠, **32**(3): 670-673.
- 骆亦其. 2007. 土壤呼吸与环境. 北京: 高等教育出版社.
- 齐玉春, 董云社, 金 钊, 等. 2010. 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, **30**(6): 899-903.
- 汤 洁, 韩 源, 刘 森, 等. 2012. 吉林西部不同土地利用方式下的生长季土壤 CO_2 排放通量日变化及影响因素. 生态环境学报, **21**(1): 33-37.
- 唐克丽. 2000. 黄土高原水蚀风蚀交错区治理的重要性与紧迫性. 中国水土保持, (11): 11-17.
- 王爱国, 赵允格, 许明祥, 等. 2013. 黄土丘陵区不同演替阶段生物结皮对土壤 CO_2 通量的影响. 应用生态学报, **24**(3): 659-666.
- 吴 楠, 潘伯荣, 张元明, 等. 2004. 土壤微生物在生物结皮形成中的作用及生态学意义. 干旱区研究, **21**(4): 443-450.
- 吴 楠, 张元明, 王红玲, 等. 2007. 古尔班通古特沙漠生物结皮固氮活性. 生态学报, **27**(9): 3758-3793.
- 肖 波, 赵允格, 邵明安. 2007. 陕北水蚀风蚀交错区两种

- 生物结皮对土壤饱和和导水率的影响. 农业工程学报, **23**(12): 35-40.
- 肖波, 赵允格, 许明详, 等. 2008. 陕北黄土区生物结皮条件下土壤养分的积累及流失风险. 应用生态学报, **19**(5): 1019-1026.
- 杨永胜, 卜崇峰, 高国雄. 2012. 毛乌素沙地生物结皮对土壤温度的影响. 干旱区研究, **29**(1): 352-359.
- 尹飞虎, 李晓兰, 董云社, 等. 2011. 干旱半干旱地区 CO₂ 浓度升高对生态系统的影响及碳氮耦合研究进展. 地球科学进展, **26**(2): 236-244.
- 张东秋, 石培礼, 张宪洲, 等. 2005. 土壤呼吸主要影响因素的研究进展. 地球科学进展, **20**(7): 778-785.
- 张元明, 杨维康, 王雪芹, 等. 2005. 生物结皮影响下的土壤有机质分异特征. 生态学报, **25**(12): 3420-3425.
- Belnap J. 2003. The world at your feet: Desert biological soil crusts. *Frontiers in Ecology and the Environment*, **1**: 181-189.
- Boone RD, Nadelhoffer KJ, Canary JD, et al. 1998. Roots exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration. *Nature*, **396**: 570-572.
- Bowker MA, Mark EM, Belnap J, et al. 2008. Prioritizing conservation effort through the use of biological soil crusts as ecosystem function indicators in an arid region. *Conservation Biology*, **22**: 1533-1543.
- Castillo-Monroy AP, Maestre FT, Rey A, et al. 2011. Biological soil crust microsites are the main contributor to soil respiration in a semiarid ecosystem. *Ecosystems*, **14**: 835-847.
- Cox PM, Betts RA, Jones CD, et al. 2000. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature*, **408**: 184-187.
- Dilustro JJ, Collins B, Duncan L, et al. 2005. Moisture and soil texture effects on soil CO₂ efflux components in southeastern mixed pine forests. *Forest Ecology and Management*, **204**: 85-95.
- Grote EE, Belnap J, Housman DC, et al. 2010. Carbon exchange in biological soil crust communities under differential temperatures and soil water contents: Implications for global change. *Global Change Biology*, **16**: 2763-2774.
- Lohila A, Aurela M, Regina K, et al. 2003. Soil and total ecosystem respiration in agricultural fields: Effect of soil and crop type. *Plant and Soil*, **251**: 303-317.
- Lunge OL, Green TGA, Meyer A, et al. 2007. Water relations and carbon dioxide exchange of epiphytic lichens in the Namib fog desert. *Flora*, **202**: 479-487.
- Verrecchia E, Yair A, Kidron GJ, et al. 1995. Physical properties of the psammophile cryptogamic crust and their consequences to the water regime of sandy soils, North-western Negev Desert Israel. *Journal of Arid Environments*, **29**: 427-437.
- Wang WH, Wang QJ. 2014. Effects of biological soil crusts on soil air permeability in semi-arid environment on the Loess Plateau of China. *Food, Agriculture and Environment*, **12**: 1025-1029.
- Xiao B, Wang QH, Fan J, et al. 2013. Biological soil crusts decrease soil temperature in summer and increase soil temperature in winter in semiarid environment. *Ecological Engineering*, **58**: 52-56.
- Xiao B, Zhao YG, Shao MA. 2010. Characteristics and numeric simulation of soil evaporation in biological soil crusts. *Journal of Arid Environments*, **74**: 121-130.
- Xiao B, Zhao YG, Wang QH, et al. 2014. Natural recovery of moss-dominated biological soil crusts after surface soil removal and their long-term effects on soil water conditions in a semi-arid environment. *Catena*, **120**: 1-11.
- Xiao B, Zhao YG, Wang QH, et al. 2015. Development of artificial moss-dominated biological soil crusts and their effects on runoff and soil water content in a semi-arid environment. *Journal of Arid Environments*, **117**: 75-83.
- Zaady E, Kuhn U, Wilske B, et al. 2000. Patterns of CO₂ exchange in biological soil crusts of successional age. *Soil Biology and Biochemistry*, **32**: 959-966.

作者简介 赵东阳,男,1991年生,硕士,研究方向为荒漠化防治。E-mail: 1071687071@qq.com

责任编辑 魏中青
