

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.20220427.001.

杨娥女, 王宝荣, 姚宏佳, 等. 黄土高原生物土壤结皮发育过程中颗粒态和矿物结合态有机碳变化特征[J]. 水土保持研究, 2023, 30(1): 25-33.
YANG Enü, WANG Baorong, YAO Hongjia, et al. Dynamics of Particulate and Mineral-Associated Organic Carbon During the Development of Biological Soil Crusts in the Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(1): 25-33.

黄土高原生物土壤结皮发育过程中颗粒态和矿物结合态有机碳变化特征

杨娥女¹, 王宝荣^{2,3}, 姚宏佳¹, 黄懿梅⁴, 安韶山^{1,3}

(1.西北农林科技大学 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; 2.中国科学院 水利部 水土保持与生态环境研究中心, 陕西 杨凌 712100; 3.中国科学院大学, 北京 100049; 4.西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:土壤颗粒态有机碳(POC)和矿物结合态有机碳(MAOC)是重要的土壤碳库,其比例的变化决定土壤有机碳的周转速率及稳定性。探讨沙地生物土壤结皮发育过程中颗粒态有机碳和矿物结合态有机碳的含量、分配比例和差异性特征,对于深刻认识初始土壤形成过程中有机碳库形成、稳定机制具有重要意义。选择神木市六道沟流域生物土壤结皮4个发育阶段(藻结皮、藻结皮+少量藓结皮、藓结皮+少量藻结皮、藓结皮)为研究对象,裸沙作为对照,研究生物结皮层及结皮层下层0—2 cm, 2—10 cm, 10—20 cm土层土壤颗粒态和矿物结合态有机碳的变化特征。结果表明:(1)在BSCs土层,POC的增加速率大于MAOC,MAOC处于饱和状态;(2)在BSCs和0—2 cm土层,以微生物源有机碳为主导的MAOC主要贡献有机碳积累,在2—10 cm和10—20 cm土层,以植物源有机碳为主导的POC主要贡献有机碳积累;(3)POC和MAOC含量随土层增加而降低,随着生物土壤结皮发育而增加;(4)POC和MAOC与SOC均有显著的正相关关系,表明结皮定殖和发育显著促进了土壤有机碳积累。这些结果表明生物土壤结皮的定殖和发育能够显著促进POC和MAOC增加进而贡献土壤有机碳的固存。在土壤早期发育过程中,MAOC对SOC的贡献占主导地位。然而由于沙土黏粒含量的缺乏导致MAOC趋于饱和时,SOC的增加或主要由POC的积累来实现。

关键词:沙土;发育阶段;生物土壤结皮;颗粒态有机碳;矿物结合态有机碳

中图分类号:S154.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2023)01-0025-09

Dynamics of Particulate and Mineral-Associated Organic Carbon During the Development of Biological Soil Crusts in the Loess Plateau

YANG Enü¹, WANG Baorong^{2,3}, YAO Hongjia¹, HUANG Yimei⁴, AN Shaoshan^{1,3}

(1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4.College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract:Particulate organic carbon (POC) and mineral-associated organic carbon (MAOC) are important soil organic carbon pools, and changes in their proportions determine the turnover and stability of soil organic carbon (SOC). Studying the content and proportion of POC and MAOC under the development of biological soil crusts in sandy land is important for deep understanding of the formation and stabilization mechanism of organic carbon during initial soil formation. The field experiment was performed in the Liudaogou, Shenmu

收稿日期:2021-10-09

修回日期:2021-10-25

资助项目:国家自然科学基金项目(41877074);国家自然科学基金项目(42077072)

第一作者:杨娥女(1993—),女,甘肃定西人,硕士研究生,主要研究方向:土壤生态。E-mail:2215003728@qq.com

通信作者:安韶山(1972—),男,宁夏平罗人,研究员,博士生导师,主要从事土壤生态与植被恢复研究。E-mail:shan@ms.iswc.ac.cn

<http://stbcj.paperonice.org>

(northern of the Loess Plateau), Shaanxi Province, China. All sites have similar orientation and inclination. Bare sand and four biocrusts formation stages include algae, algae-moss, moss-algae, and moss. Algae-moss and moss-algae stages refer to algae-dominated biocrusts (the coverage of algae > 80% and moss < 0%) and moss-dominated biocrusts (the coverage of moss > 80% and algae < 20%), respectively. The changes of POC and MAOC in BSCs, 0—2 cm, 2—10 cm, and 10—20 cm soil layers were studied, respectively. The results showed that: (1) the rate of increase of POC was greater than MAOC in BSCs soil layer, and MAOC was in a saturated state; (2) microbe-derived organic carbon mainly contributed to organic carbon accumulation in BSCs and 0—2 cm soil layer, and plant-derived organic carbon mainly contributed to organic carbon accumulation in 2—10 cm and 10—20 cm soil layers; (3) the concentrations of POC and MAOC decreased with the increase of soil layer, and increased with the development of crust; (4) POC and MAOC had a significant positive correlation with SOC, indicating that crust colonization and development could significantly promote the accumulation of soil organic carbon. These results indicate that the establishment and development of biological soil crusts can significantly promote the increase of POC and MAOC, and they contribute to the sequestration of soil organic carbon. The contribution of MAOC to SOC dominates in the early soil development process. However, when the MAOC tends to be saturated due to the lack of clay content in sandy soil, the increase of SOC may be mainly realized by the accumulation of POC.

Keywords: sandy soil; development stage; biological soil crust; particulate organic carbon; mineral-associated organic carbon

土壤有机碳库作为陆地生态系统最大的碳库^[1],其微小波动将可能对大气二氧化碳(CO₂)浓度甚至全球碳平衡产生重大影响^[2]。最近的研究表明土壤有机碳在很大程度上其实是微生物残体、植物分子聚合物以及它们的降解产物所组成的复杂混合物。植物源有机碳和微生物源有机碳主要贡献有机碳的积累过程^[3]。由于植物源有机碳和微生物源有机碳在形成、周转时间和功能方面的差异,最近的研究将土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)划分为颗粒态有机碳(Particulate organic carbon, POC)和矿物结合态有机碳(mineral-associated organic carbon, MAOC)两种形式^[4-6]。POC以植物大分子物质为主,具有高的C:N比和较快的周转速率,而MAOC则以微生物源组分为主,具有较低的C:N和较慢的周转速率^[5]。由于这两种碳库的有机碳来源不同及物理保护机制的差异,POC和MAOC的变化特征影响土壤有机碳的稳定性。POC和MAOC含量及其比例受植被类型影响。例如,Cotrufo等^[4]关于欧洲草地和森林生态系统土壤POC和MAOC的研究表明,MAOC占土壤总有机碳的比例超过50%,草地和丛枝菌根林在MAOC中储存了更多的土壤有机碳,而外生菌根林在POC中储存了更多的土壤有机碳。而MAOC吸附的有机碳分子主体来源为微生物产物及其残体物质。土壤黏粒和粉粒对SOM的吸附作用是土壤有机质稳定的主要因素^[7]。森林生态系统枯落叶是土壤有机碳的主体来源^[8],不易分解的植物残体以物理迁移方式

进入土壤主要贡献POC的增加。草地生态系统由于地上植物组分低的生物量,地下植被组分(如根系分泌物和细根)成为土壤有机碳的主体来源^[9]。这些小分子的根系分泌物被微生物利用进而直接形成一系列MAOC主要贡献土壤有机碳的增加过程。

生物土壤结皮(Biological soil crusts, BSCs)是由藻类、地衣、苔藓等隐花植物、细菌、真菌与土壤表层颗粒胶结形成的复杂有机复合体,占沙漠生态系统活体覆盖的40%以上^[10]。结皮定殖和发育过程有效地改善了土壤的物理、化学和生物学特性^[11-12],主要由于BSCs中固碳微生物和初等绿色植物可以固定大气中的碳氮和捕获空气中悬浮的细土壤颗粒稳定地表,进而促进土壤发育^[13]。从最初的CO₂微生物碳固定过程到随后的初等维管植物发育进而贡献土壤有机碳和养分增加过程。随着国家退耕还林还草政策的实施,更有利于黄土高原BSCs定殖、发育和分布^[14-16]。主要由微生物组成的生物土壤结皮成为退耕地上普遍存在的地被物,广泛分布于草原区,森林草原区,森林区,其中在草原区的盖度可以达到60%~70%^[17],BSCs在提高土壤表面稳定性、增强土壤抵抗水蚀风蚀能力、改善土壤养分和促进土壤发育等方面发挥着重要作用^[11]。

目前,关于BSCs对干旱和半干旱区生态系统功能作用已有大量研究^[18],然而,在植被生产力受限和黏粒含量缺乏的沙地生物土壤结皮中POC和MAOC变化特征尚不清楚。本研究将土壤有机碳库划分为POC(>

53 μm)和 MAOC($<53\ \mu\text{m}$),探究黄土高原 BSCs 发育过程中 POC 和 MAOC 的变化特征及其对有机碳积累的相对贡献。试图阐明 BSCs 发育中沙质土壤 POC 和 MAOC 的形成过程,丰富干旱半干旱生态系统 SOC 形成和稳定过程的理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区地处陕西省榆林神木六道沟流域($38^{\circ}46' - 38^{\circ}51' \text{N}$, $110^{\circ}21' - 110^{\circ}23' \text{E}$)。流域面积 $6.89\ \text{km}^2$,海

拔 $1\ 081 \sim 1\ 274\ \text{m}$,主沟道长 $4.21\ \text{km}$, $100\ \text{m}$ 以上的沟道密度达 $6.45\ \text{km}/\text{km}^2$,沟谷面积占流域面积的 $38.1\%^{[19]}$ 。年平均气温 $9 \sim 14^{\circ}\text{C}$,属于干旱半干旱季风气候,寒暑分明,气候比较干燥,年潜在蒸发量超过 $1\ 000\ \text{mm}$,降水年际变化较大,多年平均降水量为 $437\ \text{mm}$,且 $5 - 10$ 月占全年降水的 $65\% \sim 85\%$ 。在该地区,生物结皮分布广泛,由藻类和以苔藓为主的结皮组成。土壤黏粒($<0.002\ \text{mm}$),粉粒($0.002 \sim 0.05\ \text{mm}$)和砂粒($0.05 \sim 2.0\ \text{mm}$)的含量分别为 $0.33\% \sim 0.78\%$, $9.81\% \sim 21.68\%$ 和 $77.54\% \sim 88.96\%$ 。

表 1 研究区沙地基本信息

发育阶段	海拔/m	经度 E	纬度 N	坡度/($^{\circ}$)	优势植物
裸沙	1207~1243	$110^{\circ}20'33.22'' - 110^{\circ}21'44.57''$	$38^{\circ}47'3.98'' - 38^{\circ}46'59.49''$	1~6	
藻结皮	1210~1241	$110^{\circ}21'1.77'' - 110^{\circ}21'32.99''$	$38^{\circ}45'55.76'' - 38^{\circ}47'7.45''$	2~10	藻结皮 Alage
多藻少藓	1215~1240	$110^{\circ}21'0.52'' - 110^{\circ}21'43.05''$	$38^{\circ}45'18.73'' - 38^{\circ}47'3.98''$	4~21	藻结皮 Alage($>80\%$)
多藓少藻	1210~1217	$110^{\circ}21'15.99'' - 110^{\circ}21'25.82''$	$38^{\circ}46'51.00'' - 38^{\circ}46'52.97''$	2~10	藓结皮 Moss($>80\%$)
藓结皮	1211~1242	$110^{\circ}21'6.86'' - 110^{\circ}21'45.41''$	$38^{\circ}45'57.64'' - 38^{\circ}47'7.73''$	2~17	藓结皮 Moss

1.2 样品的采集和处理

选择神木六道沟流域采集不同发育阶段的生物土壤结皮样品,包括藻结皮(algae),藻结皮(algae $>80\%$) + 少量藓结皮(moss $<20\%$),藓结皮(moss $>80\%$) + 少量藻结皮(algae $<20\%$),藓结皮(moss)4 个发育阶段的生物土壤结皮和裸沙(Bare sand)作为研究对象。在每个结皮发育阶段随机选择 5 个 $40\ \text{m} \times 40\ \text{m}$ 的样方(即 5 个野外重复),每个样方按“S”点选取 12—15 点,多点收集生物土壤结皮层,结皮层下 $0 - 2\ \text{cm}$, $2 - 10\ \text{cm}$, $10 - 20\ \text{cm}$ 共 4 个土壤层次的土壤样品。混合均匀带回实验室,剔除植物残体和其他杂物过 $2\ \text{mm}$ 筛,在室内风干后过 $0.15\ \text{mm}$ 筛。

1.3 颗粒态有机碳和矿物结合态有机碳的测定

颗粒态有机碳和矿物结合态有机碳分离采用六偏磷酸钠分散法^[20],即称取过 $2\ \text{mm}$ 筛的风干土样 $20\ \text{g}$ 于 $100\ \text{ml}$ 的塑料瓶中,加入 $60\ \text{ml}$ 六偏磷酸钠(质量/体积 $=5\%$),手动摇匀后在摇床上震荡 $18\ \text{h}$ 。将混浊液过 $53\ \mu\text{m}$ 筛子,反复用去离子水冲洗,直至水流清澈为止。筛上粗质部分为 POC($>53\ \mu\text{m}$),筛下细质部分为 MAOC($<53\ \mu\text{m}$),用已知质量的 $500\ \text{ml}$ 烧杯收集上下组分,经 60°C 烘干称重并记录,计算其所占全土的质量占比。将烧杯中烘干土壤收集研磨过 $0.15\ \text{mm}$ 筛,用重铬酸钾—外加热法测量其 SOC 含量^[21]。土壤中 POC, MAOC 含量及质量占比($\%$)计算公式如下:

$$\text{POC 质量分离比} = m_{\text{颗粒态}} / m$$
$$\text{POC} = \text{SOC}_{\text{颗粒态}} \times \text{POC 质量分离比}$$

$$\text{POC 绝对量} = \text{SOC}_{\text{颗粒态}} \times m_{\text{颗粒态}}$$

式中: $m_{\text{颗粒态}}$ 表示分离后颗粒态有机碳组分的质量; m 表示分离前的总土壤质量; $\text{SOC}_{\text{颗粒态}}$ 表示颗粒态组分测得的土壤有机碳;MAOC 计算将上述 POC 替换为 MAOC 即可。

1.4 黏粒含量测定

本研究采用 USDA 分类系统标准(砂粒范围 $0.05 \sim 2\ \text{mm}$,粉粒范围 $0.002 \sim 0.05\ \text{mm}$,黏粒范围 $<0.002\ \text{mm}$)进行土壤砂粒、粉粒、黏粒的划分。具体的操作步骤为:将土壤样品风干后磨碎通过 $2\ \text{mm}$ 筛,用烘干法测定风干土壤的吸湿水含量。用万分之一天平称取 $10\ \text{g}$ 土样,倒入 $500\ \text{ml}$ 的三角瓶中,后加入 $10\ \text{ml}$ 的浓度为 $0.5\ \text{mol/L}$ 的六偏磷酸钠,并加蒸馏水至 $250\ \text{ml}$,充分摇匀,盖上小漏斗,放到 205°C 沙浴锅中煮沸 $1\ \text{h}$,煮沸过程中用玻璃棒经常搅拌。冷却后全部洗入 $1\ 000\ \text{ml}$ 的量筒中,最后将量筒内的悬浮液加蒸馏水至 $1\ 000\ \text{ml}$ 。根据室内温度分别确定 $<0.05\ \text{mm}$, $<0.02\ \text{mm}$ 和 $<0.002\ \text{mm}$ 的取样深度及沉降时间。在对应时间用吸管吸取对应的悬浊液后,移入铝盒,烘箱烘干后用万分之一天平测定其质量,最后得到各粒级土粒的比例。

1.5 统计分析

用 Excel 和 SPSS 22.0 软件进行统计分析,采用 SPSS 22.0 进行单因素和双因素方差分析,确定生物土壤不同发育阶段土壤颗粒态有机碳、矿物结合态有机碳的显著性($p < 0.05$)及双因素的交互作用,文中所有柱状图、散点图均由 Origin 2018 绘制,图表中数据为平均值 \pm 标准差。

2 结果与分析

2.1 生物土壤结皮发育过程中颗粒态有机碳和矿物结合态有机碳变化特征

BSCs 中颗粒态组分($>53\ \mu\text{m}$)质量占比远大于矿物结合态组分($<53\ \mu\text{m}$)质量占比(图 1),4 个发育阶段的颗粒态组分均小于 Bare sand 对照,而矿物结合态组分均大于 Bare sand 对照。在相同发育阶段,颗粒态组分质量占比随着土壤土层加深而增加;而矿物结合态组分质量占比随着土壤土层加深而降低。

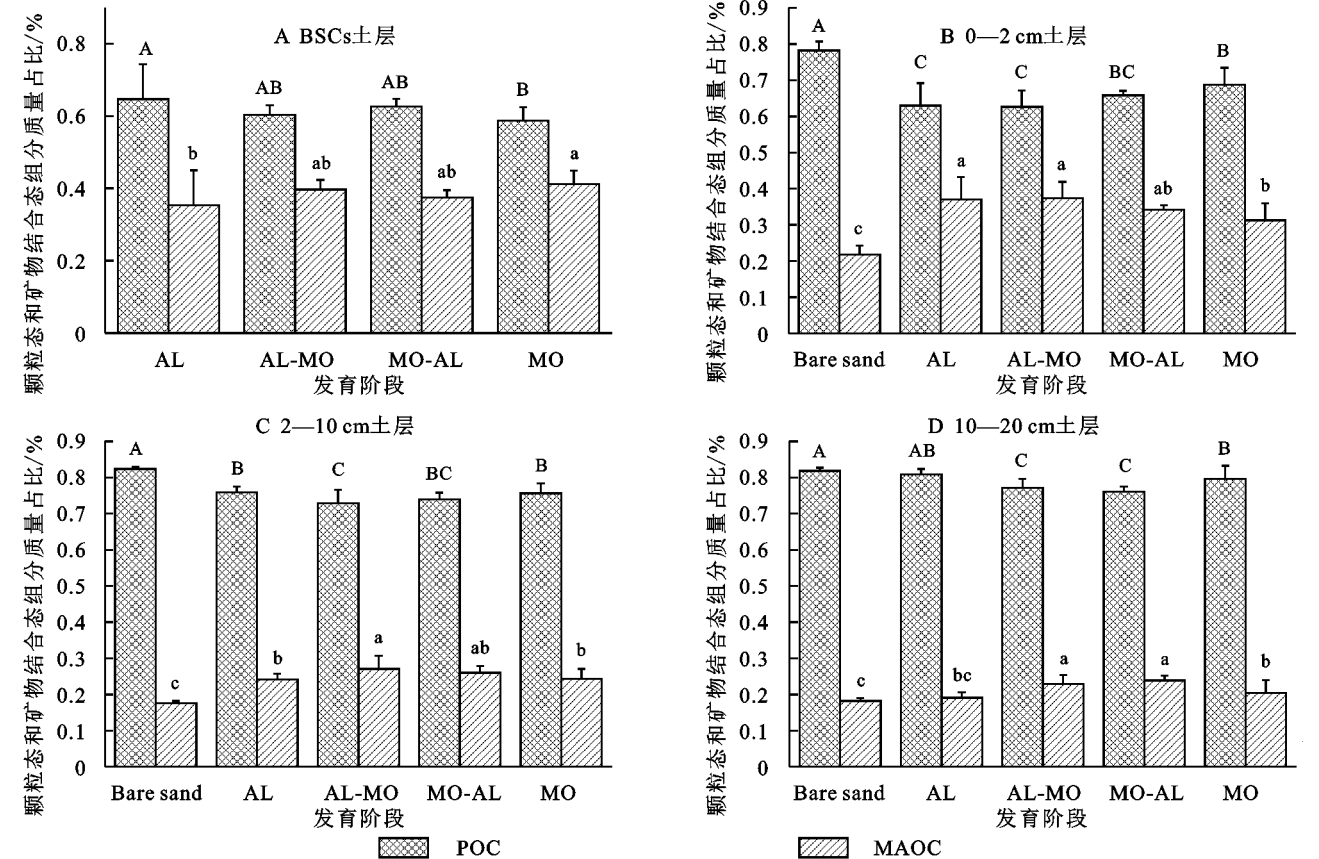
POC 含量随着土层深度而降低(图 2)。其中,在 BSCs 土层,随着 BSCs 发育,POC 含量由大到小为 MO (9.47 g/kg) $>$ MO-AL(6.39 g/kg) $>$ AL(6.31 g/kg) $>$ AL-MO(3.56 g/kg)(图 2A)。0—2 cm 土层中,4 个发育阶段 POC 含量都显著高于 Bare sand 对照(0.63 g/kg),其中 AL 阶段 POC 含量最高,为 2.67 g/kg(图 2B)。

MAOC 含量随土层增加而降低(图 2)。其中,在 BSCs 土层,MAOC 含量由大到小为 MO(12.57 g/kg) $>$ AL(7.40 g/kg) $>$ MO-AL(7.23 g/kg) $>$ AL-MO(5.27 g/

kg)(图 2A)。与 Bare sand 对照相比,2—10 cm 和 10—20 cm 土层,各发育阶段的 MAOC 含量都有所增加,在 2—10 cm 土层,MO-AL,MO,AL 和 AL-MO 比 Bare sand 对照分别增加了 82.6%,75.4%,74.9%和 65.2%(图 2C);在 10—20 cm 土层中,MO-AL,AL-MO,MO 和 AL 比 Bare sand 对照分别增加了 84.0%,55.5%,35.9%和 25.7%。

在 BSCs 和 0—2 cm 土层,MAOC 绝对量高于 POC 绝对量(图 3A、图 3B),在 2—10 cm 和 10—20 cm 土层,除 MO-AL 外,其他发育阶段 POC 绝对量高于 MAOC 绝对量(图 3C、图 3D),表明在 BSCs 层和结皮层下 0—2 cm 土层,微生物源有机碳-MAOC 主要贡献 SOC 的积累;而在结皮层下 2—10 cm 和 10—20 cm 土层,植物源有机碳-POC 主要贡献 SOC 的积累。

在 BSCs 土层,MO 发育阶段 POC 和 MAOC 绝对量均显著高于其他发育阶段,随着生物土壤结皮发育,POC 和 MAOC 绝对量是一个增加的过程(图 3A);说明 BSCs 的定殖和发育促进了 SOC 的积累。随着土层加深,各发育阶段 POC 和 MAOC 绝对量趋于稳定(图 3C、3D)。



注:Bare, AL, AL-Mo, Mo-AL 和 Mo 分别表示裸沙、藻结皮、藻结皮+少量藓结皮、藓结皮+少量藻结皮和藓结皮,误差线表示标准差;大写字母表示不同发育阶段 POC 的显著性,小写字母表示不同发育阶段 MAOC 的显著性(邓肯法, $p<0.05$),下同。

图 1 生物土壤结皮发育阶段颗粒态和矿物结合态组分质量占比

2.2 生物土壤结皮发育过程中颗粒态有机碳、矿物结合态有机碳与 SOC 的关系

随着 BSCs 发育,在 BSCs 土层,POC 随黏粒含量增

加而增加,拟合函数为 $y=3.91+1.65x$, $R^2=0.06$ (图 4A);MAOC 随着黏粒含量增加而减少,拟合函数为 $y=12.17-2.66x$, $R^2=0.15$ (图 4B)。说明 MAOC 趋于饱和

状态,随着黏粒含量增加,MAOC 的增加速率变慢,而 POC 没有饱和。在 BSCs 和 0—2 cm 层土壤中,POC/MAOC 与 SOC 的线性拟合斜率大于零(图 5A),而在 2—10 cm 和 10—20 cm 层土壤中,它们的线性拟合小于

零(图 5B),表明与下层土壤相比,POC 在表层土壤中增加更快,然而 MAOC/POC 与 SOC 的线性拟合趋势与 POC/MAOC 相反,表明在有机物输入相对较少的下层,MAOC 增加量大于 POC(图 5C,5D)。

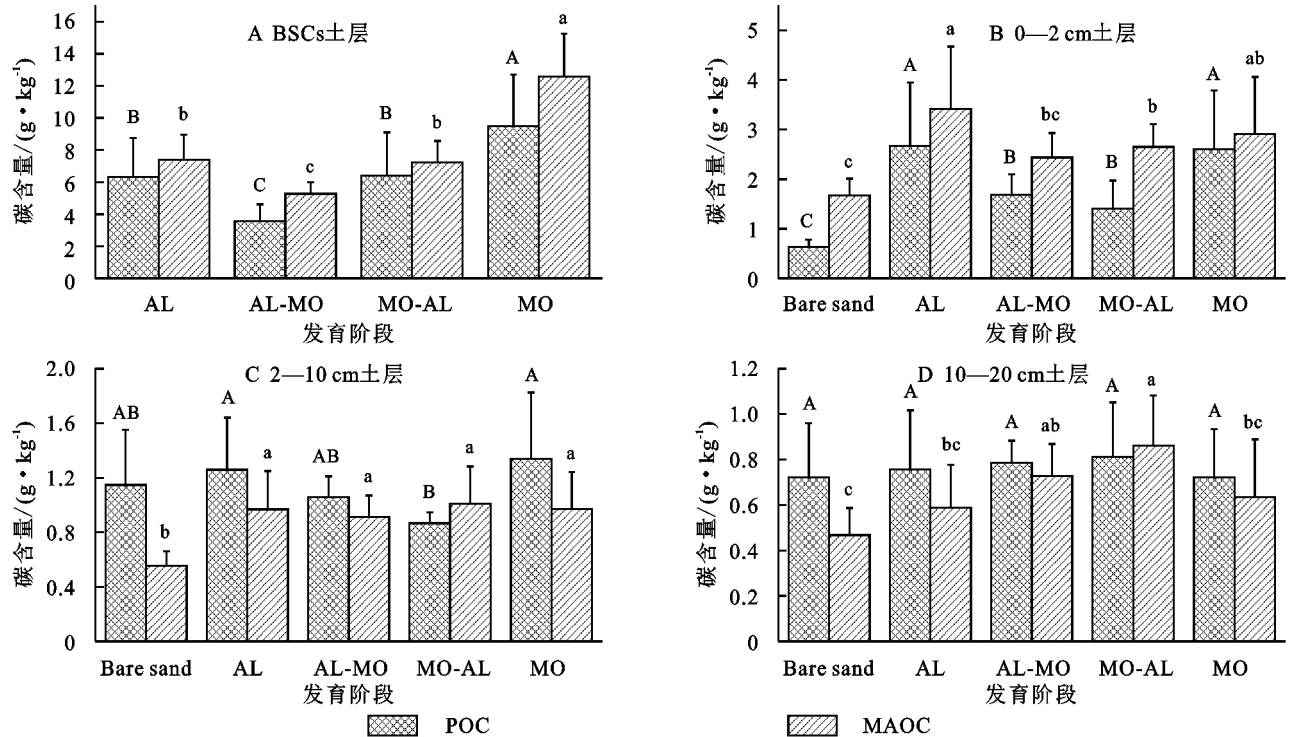


图 2 生物土壤结皮发育阶段颗粒态有机碳和矿物结合态有机碳含量

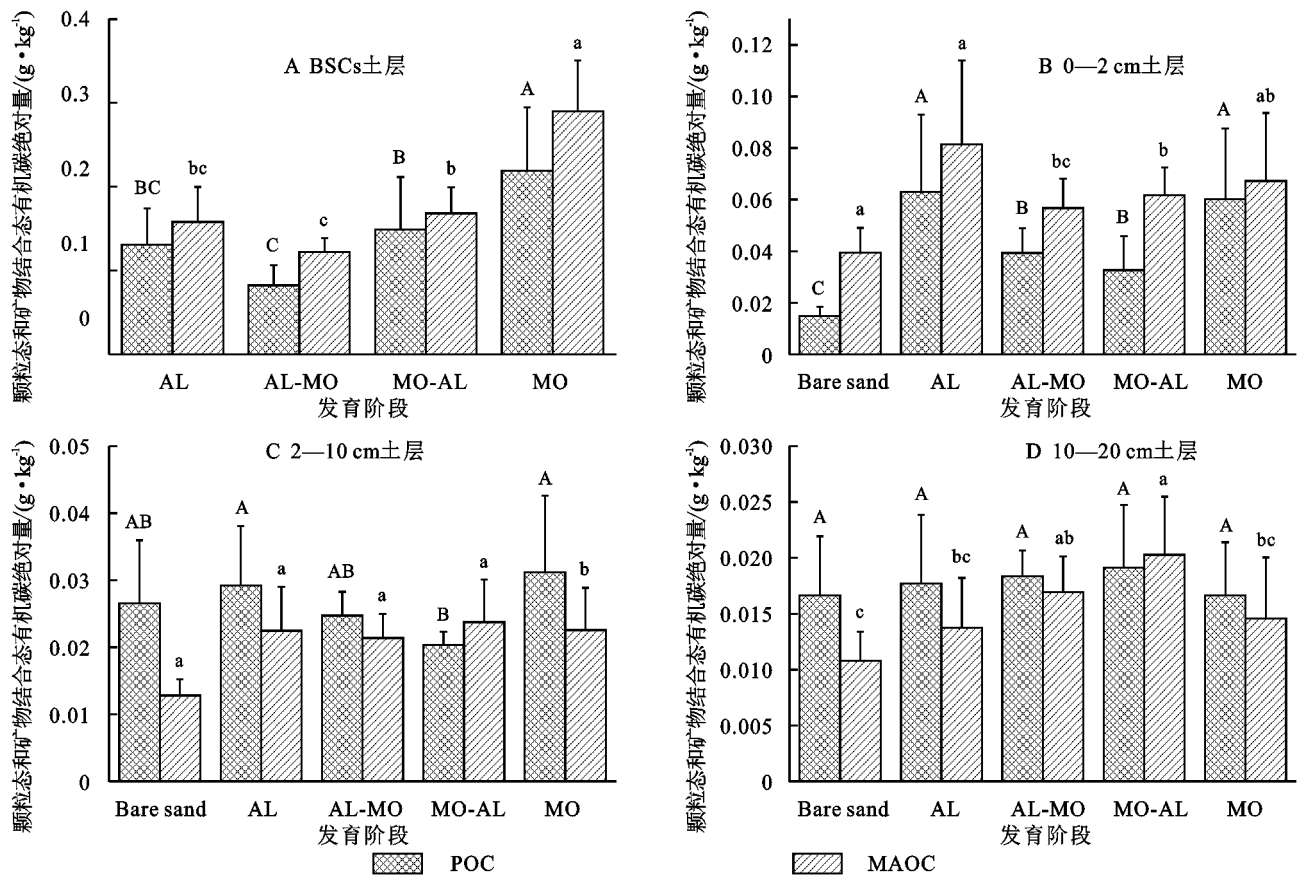


图 3 生物土壤结皮发育阶段颗粒态有机碳和矿物结合态有机碳绝对量

表层土壤黏粒受限制,吸附在黏粒表面的 MAOC 饱和,不再吸附,更多的碳进入 POC,所以 POC 随着黏粒增加而增加。POC/MAOC 在表层随着 SOC 增加而增加,表明 POC 增加速率比 MAOC 快,因此在 BSCs 和 0—2 cm 土层,MAOC 饱和,POC 主要贡献 SOC 的增加(图 4)。

在 BSC_s 土层中,随着 BSCs 发育,POC/SOC 和 MAOC/SOC 比值均先减少后增加。在 0—2 cm 土层,与 Bare sand 对照相比,POC/SOC 的值在各发育阶段都有所增加,MO 阶段增加最快;而 MAOC/SOC 的值都低

于 Bare sand 对照,但随着发育进行(AL→AL—MO→MO—AL→MO),MAOC/SOC 一直缓慢增加。2—10 cm 土层,各发育阶段 POC/SOC 和 MAOC/SOC 值均低于 Bare sand 对照(表 2)。线性拟合分析发现,在 BSCs 发育过程中 POC 和 MAOC 与 SOC 均存在显著的正相关关系,说明 POC 和 MAOC 的增加促进了土壤有机碳的积累(图 6)。随着 SOC 含量增加,碳含量相对较低的土壤中,MAOC 对 SOC 的贡献占主导地位,然而,MAOC 有饱和的趋势,不再随 SOC 增加而增加。此时,SOC 的增加通过 POC 的累积来实现。

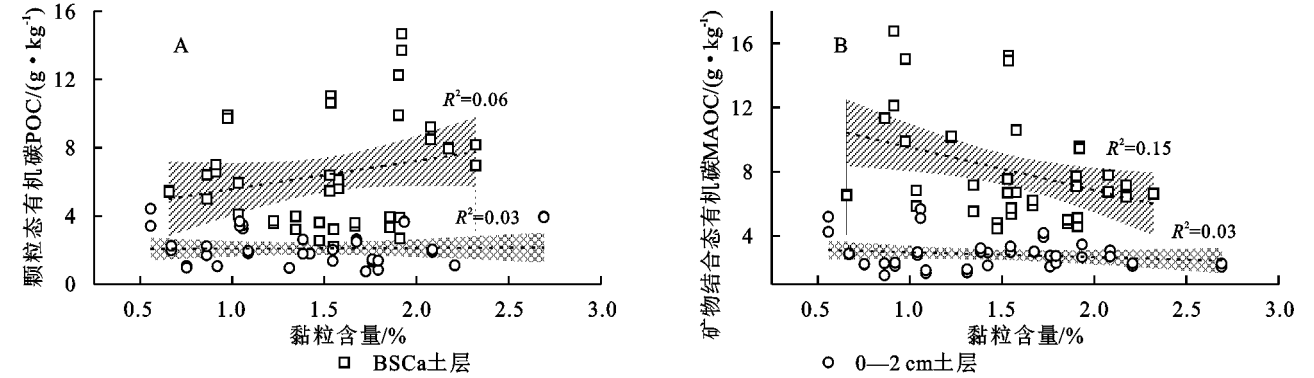


图 4 颗粒态有机碳和矿物结合态有机碳随黏粒含量的变化特征

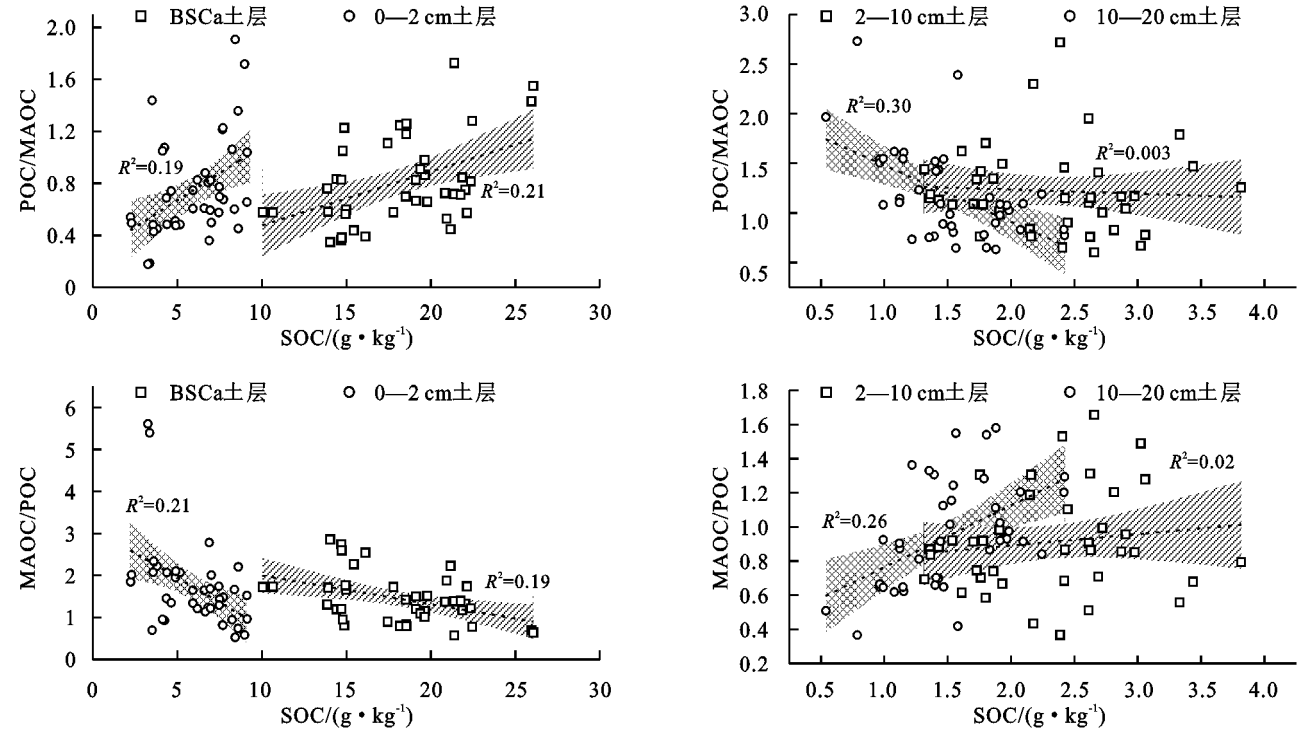


图 5 颗粒态有机碳和矿物结合态有机碳的比值与土壤有机碳的关系

2.3 生物土壤结皮发育阶段、土层及其交互作用对 POC 和 MAOC 的影响

为了探究生物土壤结皮发育阶段、土层及它们的交互作用对 POC 和 MAOC 的影响,我们进行了双因素方差分析。由表 3 可知,发育阶段、土层及发育阶段×土层交互作用的 F 值都大于 p ($p<0.05$),说明发育阶段、

土层及发育阶段×土层交互作用对 POC 和 MAOC 的影响均为显著,三者中土层的影响显著程度最高。其中,对 POC 影响的显著程度由大到小为土层 ($F=193.16$)>发育阶段 ($F=12.56$)>发育阶段×土层交互作用 ($F=9.83$);对 MAOC 影响的显著程度由大到小为土层 ($F=391.34$)>发育阶段 ($F=19.30$)>

发育阶段×土层交互作用($F=12.92$)。

表 2 颗粒态和矿物结合态有机碳与土壤有机碳的比值关系

土壤 层次/cm	发育 阶段	POC/SOC		MAOC/SOC	
		平均值	标准差	平均值	标准差
BSC _s	AL	0.41	0.10	0.50	0.14
	AL-MO	0.20	0.06	0.31	0.07
	MO-AL	0.32	0.12	0.37	0.08
	MO	0.47	0.07	0.66	0.20
	Bare	0.26	0.06	0.69	0.14
0—2	AL	0.37	0.11	0.59	0.37
	AL-MO	0.32	0.08	0.45	0.06
	MO-AL	0.24	0.07	0.47	0.11
	MO	0.43	0.08	0.52	0.16
	Bare	0.75	0.17	0.38	0.09
2—10	AL	0.53	0.14	0.40	0.08
	AL-MO	0.49	0.14	0.41	0.02
	MO-AL	0.46	0.16	0.49	0.06
	MO	0.54	0.07	0.41	0.10
	Bare	0.59	0.24	0.37	0.07
10—20	AL	0.69	0.43	0.48	0.12
	AL-MO	0.48	0.14	0.43	0.05
	MO-AL	0.52	0.15	0.53	0.09
	MO	0.51	0.12	0.43	0.08

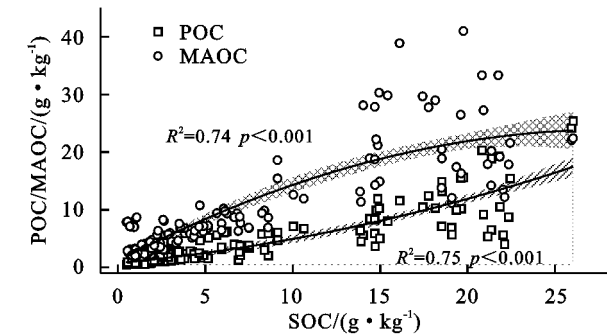


图 6 生物土壤结皮发育过程中颗粒态和矿物结合态有机碳与土壤有机碳的关系

表 3 双因素方差分析

来源	POC			MAOC		
	df	F	p	df	F	p
发育阶段	4	12.560	<0.001	4	19.297	<0.001
土层	3	193.158	<0.001	3	391.343	<0.001
发育阶段×土层	11	9.832	<0.001	11	12.921	<0.001

3 讨论

3.1 生物土壤结皮发育对颗粒态有机碳和矿物结合态有机碳的影响

同一发育阶段相同土层 MAOC 含量大于 POC 含量,这是由于 MAOC 受矿物保护,不易被微生物分解,是有机碳库中相对稳定的组分^[22],这与梁爱珍等关于东北黑土区颗粒态有机碳和矿物结合态有机

碳的研究结果相同^[23]。而 POC 组分质量占比要远高于 MAOC 组分质量占比(图 1),这是因为沙地中沙粒含量很高,大多数土壤颗粒粒径大于 53 μm,小于 53 μm 的土壤颗粒占比较小,因此 POC 组分质量占比显著高于 MAOC 组分质量占比。

BSCs 是荒漠生态系统的重要组成部分,也是干旱区碳积累和释放的关键因素^[24-25]。BSCs 的发育首先是抗干旱胁迫和干扰能力强的蓝藻拓殖并形成藻结皮,藻结皮的定殖改变了土壤的微环境,增加了土壤的持水能力,进而为喜湿的藓结皮发育创造条件。在 BSCs 层土壤中,随着结皮发育,POC 和 MAOC 含量呈增加趋势,在 MO 阶段 POC 和 MAOC 含量最高(图 2A,图 3A)。其他研究结果也发现,BSCs 的发育有利于 SOC 的积累^[26-28]。Dümig 等^[29]发现由藻类结皮演替到藓类结皮,结皮层有机碳含量增加了 1.8 倍;Liu 等^[30]的研究发现随着 BSCs 的演替,土壤微生物丰度和多样性呈逐渐增加趋势。其次,结皮层作为空气和土壤连通的介质,其捕获大气降尘和颗粒及通过光合作用固定碳的能力随着结皮发育而增强^[25,29]。此外,不同发育阶段生物土壤结皮的结构、功能和生物量存在显著差异,导致进入土壤的凋落物数量和质量存在差异^[31],藓结皮阶段是生物结皮演替的高级阶段,输入的有机物多。吴丽等^[32]研究了 BSCs 演替过程中生物量的变化,发现随着结皮的发育演替,结皮中的光合生物量呈逐步增加。

3.2 不同土层生物土壤结皮发育下颗粒态有机碳和矿物结合态有机碳

土壤有机碳的垂直分布与土壤质地和气候密切相关,SOC 随黏粒含量和水分含量的增加而增加,随温度增加而降低;然而,植被覆盖对 SOC 的影响大于土壤质地和气候条件,覆盖植被凋落物在地上地下及根际之间的分配决定了 SOC 的垂直分布特征。本研究结果表明,POC 和 MAOC 随着土层深度而降低。在 BSCs 层含量最高,0—2 cm 土层含量次之,2—10 cm 和 10—20 cm 土层含量要远少于 BSCs 和 0—2 cm 土层,POC 和 MAOC 含量在不同土层间存在显著差异($p<0.05$)(图 2,图 3)。因为生物结皮形成后,改善了 BSCs 层土壤的理化性质,使土壤有机质含量剖面分布呈表聚现象^[33-34]。其次,结皮形成后,隐花植物和一些浅根系植物大量繁殖,他们的残体、分泌物等被微生物分解成腐殖质,导致该层有机碳的积累^[35]。BSCs 对表层 SOC 影响显著,对深层土壤影响不显著。而许多研究也有类似结果^[14,36-37]。

BSCs 和 0—2 cm 土层中 MAOC 绝对量高于 POC 绝对量,由以微生物源有机碳为主要来源的

MAOC 贡献 SOC 积累;而 2—10 cm 和 10—20 cm 土层 POC 绝对量高于 MAOC 绝对量,由以植物源有机碳为主要来源的 POC 贡献 SOC 积累(图 3)。这是因为 BSCs 层和结皮层下 0—2 cm 土层微生物和土壤动物含量高^[28],微生物和动物通过自身新陈代谢、坏死等残体累积有机碳,这也解释了 MAOC 主要是微生物源有机碳^[38]。POC 主要贡献 2—10 cm 和 10—20 cm 土层有机碳的原因是,一些小分子随水淋溶到下层土壤中,吸附在 POC 和 MAOC,然而下层 MAOC 饱和和导致更多的碳分子吸附在 POC 上。

3.3 颗粒态有机碳和矿物结合态有机碳与有机碳的关系

在干旱半干旱区,生物结皮广泛分布,改善了干旱半干旱的微环境,提高土壤养分,而土壤养分又促进结皮发育演替^[39-40]。生物结皮在全球碳氮循环中扮演者重要角色,是干旱半干旱地区重要的碳、氮源^[41-42],生物结皮层固 N 被认为是干旱区和 N 限制生态系统土壤 N 输入的主要来源^[43],生物结皮中的隐花植物如蓝藻、地衣、苔藓等都可以固定大气中的 N^[44],隐花植物还通过光合作用将空气中的 CO₂ 固定在生物结皮土壤中^[45]。

我们将 POC/SOC 和 MAOC/SOC 做了对比,发现在不同的发育阶段和不同土层深度,POC/SOC 和 MAOC/SOC 没有明显的变化规律(表 2)。这可能是随着生物土壤结皮发育,土壤的微环境逐渐改善,不同发育阶段的不同土层养分含量、微生物数量等分布不均匀导致的^[32,39],同时,随着生物结皮发育,结皮厚度增加,结皮颜色加深,表面更加粗糙,输入土壤的凋落物数量和质量不同,所以 POC/SOC 和 MAOC/SOC 在不同发育阶段和不同土层深度没有明显的变化规律。

在我们的研究中,POC,MAOC 和 SOC 均有显著的正相关关系(图 5),表明生物土壤结皮定殖和发育显著促进了 SOC 积累,这与许多研究结果相似^[23,46]。POC 随着 SOC 的增加而增加,而 MAOC 随着 SOC 的增加会饱和。由于微生物生物量的生态限制(例如竞争,捕食等),土壤可能出现 SOC 饱和状态,随着土壤 C 输入增加,与矿物相关的有机碳形成率降低,矿物相关的有机碳由微生物直接产生的化合物(即微生物细胞和细胞外化合物)组成^[47]。MAOC 主要吸附在矿物表面,随着黏粒含量受限,矿物比表面积有限,矿物表面吸附的 MAOC 处于饱和状态。因此随着 SOC 的增加,MAOC 有饱和的趋势,不再随 SOC 增加而增加。此时,SOC 的增加通过 POC 的累积来实现。Cotrufo 等^[4]在欧洲草地和森林生态

系统土壤研究中也得出了相同结果。因此,沙地土壤 POC 和 MAOC 与总 SOC 显著关系也体现了沙土 POC 和 MAOC 对 SOC 的积累和保持的重要贡献。

4 结论

生物土壤结皮的定殖和发育能够显著增加土壤有机碳含量,在最初的土壤发育过程中,MAOC 对 SOC 的贡献占主导地位,然而由于沙土黏粒含量的缺乏,当 MAOC 趋于饱和时,SOC 的增加主要由 POC 的积累来实现,这表明黏粒含量是这种黄土高原砂质土壤中稳定碳积累的重要限制因素。在 BSCs 土层,由于 MAOC 的增加受到低粘土含量的限制,POC 的累积速率比 MAOC 更快,MAOC 处于饱和状态。在 BSCs 和 0—2 cm 土层,以微生物源有机碳为主导的 MAOC 主要贡献有机碳积累,在 2—10 cm 和 10—20 cm 土层,以植物源有机碳为主导的 POC 主要贡献有机碳积累。

参考文献:

- [1] Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change [J]. *Geoderma*, 2004,123:1-22.
- [2] Houghton R A, Skole D L, Nobre C A, et al. Annual fluxes of carbon from deforestation and regrowth in the Brazilian Amazon[J]. *Nature*, 2000,403:301-304.
- [3] Kleber M, Lehmann J. The contentious nature of soil organic matter[J]. *Nature*, 2015,528:60-68.
- [4] Cotrufo M F, Ranalli M G, Haddix M L, et al. Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter[J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12:989-994.
- [5] Lavallee J M, Soong J L, Cotrufo M F. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century [J]. *Global Change Biology*, 2020,26:261-273.
- [6] Sokol N W, Kuebbing S E, Ayala E K, et al. Evidence for the primacy of living root inputs, not root or shoot litter, in forming soil organic carbon[J]. *New Phytologist*, 2019,221:233-246.
- [7] 梁爱珍,张晓平,杨学明,等.土壤细颗粒对有机质的保护能力研究[J].*土壤通报*,2005,36(5):748-752.
- [8] Cotrufo M F, Wallenstein M D, Boot C M, et al. The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: Do labile plant inputs form stable soil organic matter? [J]. *Global Change Biology*, 2013,19:988-995.
- [9] Sokol N W, Sanderman J, Bradford M A. Pathways of mineral-associated soil organic matter formation;

- Integrating the role of plant carbon source, chemistry, and point of entry[J]. *Global Change Biology*, 2018,25: 12-24.
- [10] Belnap J, Weber B, Büdel B. Biological soil crusts as an organizing principle in drylands. *Biological Soil Crusts: An Organizing Principle in Drylands*[J].2016, 226:3-13. Doi 10.1007/978-3-319-30214-0_1.
- [11] 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):11-24.
- [12] He M, Hu R, Jia R L. Biological soil crusts enhance the recovery of nutrient levels of surface dune soil in arid desert regions[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 106;doi. org/10.1016/j. ecolind.2019.105497.
- [13] Belnap J, Lange O L. Biological soil crusts:Structure, function, and management. Berlin, Heidelberg: Springer[M], *Geoderma*, 2002;03. <https://blog.sciencenet.cn/blog-93995-886075.html>
- [14] Gao L Q, Bowker M A, Xu M X, et al. Biological soil crusts decrease erodibility by modifying inherent soil properties on the Loess Plateau, China[J]. *Soil Biology Biochemistry*, 2017,105:49-58.
- [15] Yang X Q, Xu M X, Zhao Y G, et al. Moss-dominated biological soil crusts improve stability of soil organic carbon on the Loess Plateau, China[J]. *Plant Soil and Environment*, 2019,65:104-109.
- [16] Li X R, Xiao H L, Zhang J G, et al. Long-term ecosystem effects of sand-binding vegetation in the Tengger Desert, northern China[J]. *Restoration Ecology*, 2010,12:376-390.
- [17] Zhao Y G, Xu M X. Runoff and soil loss from revegetated grasslands in the hilly loess plateau region, China: influence of biocrust patches and plant canopies [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2013,18:387-393.
- [18] 张冠华,胡甲均.生物结皮土壤—水文—侵蚀效应研究进展[J].*水土保持学报*,2019,33(1):3-10.
- [19] 查轩,唐克丽.水蚀风蚀交错带小流域生态环境综合治理模式研究[J].*自然资源学报*,2000,15(1):97-100.
- [20] Cambardella C A, Elliott E T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992,56:777-783.
- [21] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3 版.北京:中国农业出版社,2000.
- [22] Ashagrie Y, Zech W, Guggenberger G, et al. Soil aggregation, and total and particulate organic matter following conversion of native forests to continuous cultivation in Ethiopia[J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 94:101-108.
- [23] 梁爱珍,张晓平,杨学明,等.黑土颗粒态有机碳与矿物结合态有机碳的变化研究[J].*土壤学报*,2010,47(1): 153-158.
- [24] Lan S B, Wu L, Zhang D L, et al. Successional stages of biological soil crusts and their microstructure variability in Shapotou region (China) [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012,65:77-88.
- [25] Zhao Y, Zhang Z S, Hu Y G, et al. The seasonal and successional variations of carbon release from biological soil crust-covered soil [J]. *Journal of Arid Environments*, 2016,127:148-153.
- [26] Drahorad S, Eckhardt K U, Felix-Henningsen P, et al. Spatial carbon and nitrogen distribution and organic matter characteristics of biological soil crusts in the Negev desert (Israel) along a rainfall gradient [J]. *Journal of Arid Environments*, 2013,94:18-26.
- [27] Pietrasiak N, Regus J U, Johansen J R, et al. Biological soil crust community types differ in key ecological functions[J]. *Soil Biology Biochemistry*, 2013,65:168-171.
- [28] 李新荣,周海燕,王新平,等.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[J].*中国沙漠*,2016,36(2):247-264.
- [29] Dümig A, Veste M, Hagedorn F, et al. Organic matter from biological soil crusts induces the initial formation of sandy temperate soils[J]. *Catena*, 2014,122: 196-208.
- [30] Liu Y B, Zhao L N, Wang R. Changes in functional gene structure and metabolic potential of the microbial community in biological soil crusts along a revegetation chronosequence in the Tengger Desert[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018,126:40-48.
- [31] Chamizo S, Cantón Y, Lázaro R, et al. Crust composition and disturbance drive infiltration through biological soil crusts in semiarid ecosystems [J]. *Ecosystems*, 2012,15:148-161.
- [32] 吴丽,张高科,陈晓国,等.生物结皮的发育演替与微生物生物量变化[J].*环境科学*,2014,35(4):1479-1485.
- [33] 肖波,赵允格,许明祥,等.陕北黄土区生物结皮条件下土壤养分的积累及流失风险[J].*应用生态学报*,2008, 19(5):1019-1026.
- [34] 杨建振,卜崇峰,张兴昌.陕北毛乌素沙地生物结皮发育特征的初步研究[J].*水土保持学报*,2009,23(6): 162-165,189.
- [35] 都军,李宜轩,杨晓霞,等.腾格里沙漠东南缘生物土壤结皮对土壤理化性质的影响[J].*中国沙漠*,2018,38 (1):111-116.
- [36] 张元明.荒漠地表生物土壤结皮的微结构及其早期发育特征[J].*科学通报*,2005,50(1):42-47.
- [37] 闫德仁,王素英,吕景辉,等.生物结皮层土壤微生物含量的变化[J].*内蒙古林业科技*,2008,2(34):1-5.

- [7] Noy-Meir I. Compensating growth of grazed plants and its relevance to the use of rangelands [J]. *Ecological Applications*, 1993, 3(1): 32-34.
- [8] 闫玉春, 唐海萍, 辛晓平, 等. 围封对草地的影响研究进展[J]. *生态学报*, 2009, 29(9): 5039-5046.
- [9] Cowles H C. The ecological relations of the vegetation on the sand dunes of Lake Michigan (concluded) [J]. *Botanical Gazette*, 1899, 27(5): 361-391.
- [10] Olson J S. Rates of succession and soil changes on southern Lake Michigan sand dunes [J]. *Botanical Gazette*, 1958, 119(3): 125-170.
- [11] 朱志梅, 杨持. 沙漠化过程中植物的变化和适应机理研究概述[J]. *内蒙古大学学报: 自然科学版*, 2003, 34(1): 103-114.
- [12] 张龙生. 毛乌素沙地东南部人工植被演替研究[J]. *中国沙漠*, 1994, 14(1): 79-82.
- [13] 陈永生. 沙地植被演替研究成果综述[J]. *山西水土保持科技*, 2001(4): 23-26.
- [14] 辛晓平, 徐斌, 单保庆, 等. 恢复演替中草地斑块动态及尺度转换分析[J]. *生态学报*, 2000, 20(4): 587-593.
- [15] 徐彩琳, 李自珍. 干旱荒漠区人工植物群落演替模式及其生态学机制研究[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(9): 1451-1456.
- [16] 陈云云, 谢应忠. 退化草地恢复过程中植被与环境动态特征研究[J]. *农业科学研究*, 2004(1): 21-24.
- [17] 王占军, 蒋齐, 潘占兵, 等. 宁夏毛乌素沙地退化草原恢复演替过程中物种多样性与生产力的变化[J]. *草业科学*, 2005, 22(4): 5-8.
- [18] 闫玉春, 唐海萍. 围栏禁牧对内蒙古典型草原群落特征的影响[J]. *西北植物学报*, 2007, 27(6): 1225-1232.
- [19] 李永强, 许志信. 典型草原区撂荒地植物群落演替过程中物种多样性变化[J]. *内蒙古农业大学学报: 自然科学版*, 2002, 23(4): 26-31.
- [20] 许志信, 李永强, 额尔德尼, 李华. 草原弃耕地植物群落特征和植被演替情况的调查研究[J]. *内蒙古草业*, 2002(03): 10-13.
- [21] 张金屯. 植被数量生态学方法[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1995.
- [22] 张大勇. 理论生态学研究[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [23] 赵凌平, 谭世图, 白欣, 等. 封育和放牧对黄土高原典型草原繁殖更新的影响[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2016, 44(9): 27-34.
- [24] 蔡飞, 宋永昌. 武夷山木荷种群结构和动态的研究[J]. *植物生态学报*, 1997, 21(2): 138-148.

~~~~~

(上接第33页)

- [38] Liang C, Schimel J P, Jastrow J D. The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage [J]. *Nature Microbiology*, 2017, 2: 1-6.
- [39] 饶本强, 王伟波, 兰书斌, 等. 库布齐沙地三年生人工藻结皮发育特征及微生物分布[J]. *水生生物学报*, 2009, 33(5): 937-944.
- [40] 吴楠, 潘伯荣, 张元明, 等. 古尔班通古特沙漠生物结皮中土壤微生物垂直分布特征[J]. *应用与环境生物学报*, 2005, 11(3): 349-353.
- [41] Isabelle B, Fiona E. Regulation of carbon and nitrogen exchange rates in biological soil crusts by intrinsic and land use factors in the Sahel area [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 72: 133-144.
- [42] Evans R D, Lange O L. Biological Soil Crusts and Ecosystem Nitrogen and Carbon Dynamics [M] // Belnap J, Lange O L. *Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management*. Ecological Studies: Analysis and Synthesis, Springer, Berlin, Heidelberg, 2001.
- [43] 李云飞, 马晓俊, 李小军. 固沙植被演替过程中藓类结皮及其表层土壤理化性质变化[J]. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2020, 56(4): DOI: 10.13885/j.issn.0455-2059.2020.04.005.
- [44] Lan S B, Wu L, Zhang D L, et al. Assessing level of development and successional stages in biological soil crusts with biological indicators [J]. *Soil Microbiology*, 2013, 66: 394-403.
- [45] Beymer R J, Klopatek J M. Potential contribution of carbon by microphytic crusts in pinyon-juniper woodlands [J]. *Arid Soil Research & Rehabilitation*, 1991, 5: 187-198.
- [46] 方华军, 杨学明, 张晓平, 等. 黑土坡耕地侵蚀和沉积对物理性组分有机碳积累与损耗的影响[J]. *土壤学报*, 2007, 44(3): 467-474.
- [47] Craig M E, Mayes M A, Sulman B N, et al. Biological mechanisms may contribute to soil carbon saturation patterns [J]. *Global Change Biology*, 2021, 27: 2633-2644.
- [48] Tian Q X, Wang D Y, Li D, et al. Variation of soil carbon accumulation across a topographic gradient in a humid subtropical mountain forest [J]. *Biogeochemistry*, 2020, 149: 337-354.
- [49] Chen J, Xiao W, Zheng C, et al. Nitrogen addition has contrasting effects on particulate and mineral-associated soil organic carbon in a subtropical forest [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 142: 107708. <http://www.elsevier.com/locate/soilbio>.