

DOI: 10.20103/j.stxb.202308101722

杨军刚, 张玲卫, 郭星, 陆永兴, 郭浩, 张元明, 周晓兵. 古尔班通古特沙漠生物土壤结皮下土壤有机碳垂直分布特征及影响因素. 生态学报, 2024, 44(7): 2946–2954.

Yang J G, Zhang L W, Guo X, Lu Y X, Guo H, Zhang Y M, Zhou X B. Vertical distribution characteristics and influencing factors of soil organic carbon under biological soil crusts in the Gurbantunggut Desert. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(7): 2946–2954.

古尔班通古特沙漠生物土壤结皮下土壤有机碳垂直分布特征及影响因素

杨军刚^{1,2}, 张玲卫³, 郭 星^{1,4}, 陆永兴^{1,4}, 郭 浩^{1,4}, 张元明¹, 周晓兵^{1,*}

1 中国科学院新疆生态与地理研究所, 荒漠与绿洲生态国家重点实验室/干旱区生态安全与可持续发展重点实验室, 乌鲁木齐 830011

2 新疆农业大学, 资源与环境学院, 乌鲁木齐 830052

3 新疆农业大学, 生命科学学院, 乌鲁木齐 830052

4 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 为了探究沙漠不同生物土壤结皮类型覆盖下土壤有机碳 (SOC) 垂直分布特征及与土壤理化因素的关系, 解析影响因素, 以古尔班通古特沙漠腹地藻类、藓类生物土壤结皮和裸沙三种不同地被覆盖类型为研究对象, 通过野外采集不同类型结皮样品及其下层 0—2 cm、2—5 cm、5—10 cm、10—20 cm、20—30 cm、30—50 cm、50—70 cm 以及 70—100 cm 土层土壤 (裸沙对照), 测定不同土层的 SOC 含量及土壤理化指标, 开展相关研究。结果表明: (1) 不同地被类型下 0—100 cm SOC 含量随着土壤深度增加呈减小的趋势, 在 10—30 cm 土层存在 SOC 含量升高的现象, 藓类、藻类和裸沙三种地被类型 0—100 cm 土层 SOC 含量范围分别在: 1.61—2.70、1.41—2.56、1.21—1.92 g/kg; (2) 不同地被类型下同一土层 SOC 含量在 0—5 cm 土层存在显著差异, 5—100 cm 土层 SOC 整体无显著差异, 同层 SOC 含量均表现为: 藓类>藻类>裸沙对照; (3) Pearson 法分析结果表明不同地被覆盖下 SOC 含量与养分 (全氮、全磷) 呈现正相关关系, 与 pH 和电导率 (EC) 呈现负相关关系。通过结构方程模型结果表明, 土壤养分和粒径 (砂粒占比) 是影响垂直分布的主要因子, 其中粒径是裸沙和藻类的最主要影响因子, 藓类最重要的影响因子是养分 (全磷)。生物土壤结皮的发育会逐步提高土壤碳的积累, 改变 SOC 的垂直分布特征, 对 SOC 的影响主要集中在 5 cm 以上土层, 土壤理化特征对垂直分布特征具有调控作用。

关键词: 生物土壤结皮; 土壤有机碳; 理化性质; 古尔班通古特沙漠; 垂直分布特征

Vertical distribution characteristics and influencing factors of soil organic carbon under biological soil crusts in the Gurbantunggut Desert

YANG Jungang^{1,2}, ZHANG Lingwei³, GUO Xing^{1,4}, LU Yongxing^{1,4}, GUO Hao^{1,4}, ZHANG Yuanming¹, ZHOU Xiaobing^{1,*}

1 Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology/Key Laboratory of Ecological Safety and Sustainable Development in Arid Lands, Urumqi 830011, China

2 Xinjiang Agricultural University, College of Resources and Environment, Urumqi 830052, China

3 Xinjiang Agricultural University, College of Life Sciences, Urumqi 830052, China

4 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: In order to investigate the vertical distribution characteristics of Soil Organic Carbon (SOC) under different Biological Soil Crust (BSC) types in the Gurbantunggut Desert and analyze their influencing factors, this study focused on three different ground cover types: Moss, Cyanobacterial, and Bare Sand. Field samples of different BSC types and the underlying 0—2 cm, 2—5 cm, 5—10 cm, 10—20 cm, 20—30 cm, 30—50 cm, 50—70 cm, and 70—100 cm soil layers

基金项目: 国家自然科学基金 (42377358); 新疆维吾尔自治区自然科学基金重点项目 (2022D01D083); 天山英才计划 (2022TSYCCX0001); 新疆维吾尔自治区基金杰青项目 (2021D01E03)

收稿日期: 2023-08-10; **网络出版日期:** 2024-01-12

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhoubx@ms.xjbu.ac.cn

(Bare Sand control) were collected. The SOC content and soil physicochemical properties in different soil layers were measured for further analysis. The results revealed that: (1) The SOC content in the 0—100 cm soil layers generally decreased with the increasing soil depth across different ground cover types. However, there was an increase of SOC content in the 10—30 cm soil layer. The SOC content ranged from 1.61 to 2.70 g/kg in Moss, 1.41 to 2.56 g/kg in Cyanobacterial, and 1.21 to 1.92 g/kg in Bare Sand. (2) The significant differences in SOC content were observed among different ground cover types in the 0—5 cm soil layer, while there were no significant differences for SOC content in the 5—100 cm soil layers. SOC content within the same layer followed the order: Moss > Cyanobacterial > Bare Sand control. (3) Pearson correlation analysis indicated that SOC content was positively correlated with nutrients (total nitrogen and total phosphorus) and negatively correlated with pH and electrical conductivity (EC) under different ground cover types. Structural Equation Modeling (SEM) results demonstrated that soil nutrients and particle size (percentage of sand) were main factors affecting the vertical distribution of SOC. Particle size was the primary influencing factor for Bare Sand and Cyanobacterial, while nutrients (total phosphorus) played more significant role in Moss BSC. The development of BSC gradually enhanced the accumulation of soil carbon, altered the vertical distribution characteristics of organic carbon, and had the most pronounced impact on SOC in soil layers above 5 cm. It played a regulatory role in the vertical distribution characteristics in conjunction with soil physicochemical properties.

Key Words: biological soil crust; soil organic carbon; physicochemical property; the Gurbantunggut Desert; vertical distribution characteristics

土壤碳库是陆地生态系统中最大、最活跃的碳库,其碳储量分别约是植被和大气碳库碳储的 3 倍和 2 倍左右,因此土壤对缓解 CO₂ 等气体增加具有巨大潜力^[1-4]。据估计,全球土壤的最大固碳潜力约为每年 0.45—0.9 Pg C^[3,5]。土壤碳库主要由有机碳库和无机碳库组成,其中有机碳库相对较活跃,是土壤碳库的主要来源^[1]。土壤有机碳库的微小变化可能极大地影响土壤碳库,导致大气 CO₂ 浓度的显著变化,进而影响全球陆地生态系统的碳循环^[6-7]。植物源碳是土壤有机碳(SOC)主要的来源,植物通过光合作用固定的同化碳以根系沉积物、凋落物等形式进入土壤中,不间断的输入植物源碳。SOC 的积累受物种类型、植物生活史、微生物群落、土壤深度及土壤理化性质等因素的影响^[3,8]。因此,准确的估计土壤有机碳库动态及影响因素对于研究全球环境变化下陆地生态系统碳循环具有重要的作用。

全球旱区约占全球陆地总面积的 45.4%^[9],阐明旱区土壤有机碳的分布特征对评估旱区生态系统功能及稳定性具有重要的意义。生物土壤结皮是由苔藓、地衣、藻类、蓝细菌、细菌和真菌与土壤表面颗粒相互作用形成的特定表层土壤结构^[10-11]。生物土壤结皮可在高温干旱等极端环境快速繁衍,约占全球陆地面积的 12%^[12],主要分布于干旱区和半干旱区,覆盖率约为 30%^[13]。生物土壤结皮在涵养水源、保持地表稳定、促进陆地生态系统碳氮循环、对种子库的影响等方面已有大量的研究报道^[14-17]。据统计,生物土壤结皮每年可以固定约 3.9 Pg C^[18]。因此,生物土壤结皮是 SOC 的重要来源,生物土壤结皮的覆盖对于荒漠生态系统碳固存可能至关重要。

生物土壤结皮不同演替阶段下 SOC 的垂直分布格局特征与差异,是研究不同生物土壤结皮类型碳储量和动态亟需回答的问题。生物土壤结皮发育经历不同的演替阶段,从裸沙发育为藻类结皮,进一步演替发育成地衣结皮和藓类结皮,光合固碳能力逐渐提高,养分不断积累,从而增加 SOC 含量。荒漠生态系统已有的研究主要集中于土壤表层(0—20 cm)SOC 分布特征,深层(20 cm 以下)的 SOC 含量特征研究相对匮乏。研究不同生物土壤结皮覆盖下 SOC 含量的垂直分布特征对深入了解荒漠生态系统碳储及碳循环具有重要意义。因此,本文拟通过研究不同类型生物土壤结皮覆盖下不同土层 SOC 的分布特征,并分析 SOC 的影响因素,为荒漠生态系统碳储量的精确评估和碳循环的驱动机制研究提供数据支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于古尔班通古特沙漠腹地(45°26' N, 88°30' E)。该沙漠是我国第二大沙漠,也是最大的固定和半固定沙漠。沙漠地区常年干旱少雨,年均温 6—10℃,极端高温高于 40℃,年潜在蒸发量超过 2000 mm。该地区近一半的降水主要集中在 4—7 月份,年均降水为 70—150 mm。冬季降雪约 20 cm 覆盖在沙漠表层,持续时间为 11 月份到次年 3 月份^[19]。春季积雪融化和气温回升可以为荒漠短命植物提供正常发育所需的水热条件,同样促进生物土壤结皮的生长和发育。古尔班通古特沙漠地表覆盖有发育良好的不同生物土壤结皮类型,从沙丘的顶部到丘间坡底依次主要由藻类结皮、地衣结皮及藓类结皮^[20],齿肋赤藓(*Syntrichia canivervis*)是藓类结皮主要的物种之一。

1.2 样品采集

于 2021 年 6 月进行样品采集,在采样区选择地势平坦、生物土壤结皮分布相对均匀的区域设定 3 个 30 m×30 m 的大样方,大样方之间相距 50 m。每个大样方中随机选取裸沙、藻类结皮和藓类结皮覆盖的 3 个 1 m×1 m 的小样方,即为裸沙、藻类结皮和藓类结皮各 3 个重复。对裸沙、藻类结皮和藓类结皮挖取 1 m 土壤剖面进行土壤样品采集,采样时避免植物和结皮斑块边缘影响。采样主要分地上结皮层和地下土壤层 0—2 cm、2—5 cm、5—10 cm、10—20 cm、20—30 cm、30—50 cm、50—70 cm 和 70—100 cm 8 个土层。使用容积为 100 cm³的环刀采集各层土壤,带回实验室测定土壤容重。采集的结皮层和土壤样品带回实验室进行实验前预处理,用 2 mm 筛子进行筛选剔除石子、植物根系与凋落物的影响。将处理完的样品置于通风遮阴处,进行自然风干后进行有机碳和相关土壤理化指标测定。

1.3 指标测定

土壤有机碳(SOC)含量测定采用盐酸-干烧法测定(*Analytik Jena: multi N/C 3100 TOC analyzer*, 德国);土壤全氮(TN)和全磷(TP)含量测定采用高氯酸-硫酸消化法测定(*SEAL Auto Analyzer 3*, 德国);土壤容重采用环刀法测定;土壤 pH 和电导率(EC)分别采用水土比 2.5:1 和 5:1 浸提电位法测定;土壤粒径以美国制土壤粒径分级标准采用过筛法测定粗砂(0.5—2 mm)、中砂(0.25—0.5 mm)及细砂(0.05—0.25 mm)(表 1)。

1.4 数据分析

使用单因素方差分析对 SOC 含量及理化指标进行分析,用双因素方差分析对生物土壤结皮类型、土层深度及其交互作用进行分析,用 Pearson 法对不同生物土壤结皮覆盖下 SOC 和土壤理化性质进行相关分析。使用 R 4.2.2 中 *ggpubr* 和 *car* 包完成上述分析。利用结构方程模型构建 SOC 含量与土壤理化特征的关系,解析直接和间接影响作用及路径。使用 *lavaan* 包构建结构方程模型,多次筛选指标后,得到最优解释模型。

2 结果与分析

2.1 不同生物土壤结皮覆盖下 SOC 的垂直分布特征

双因素方差分析结果表明,结皮类型对 SOC、pH、全氮、全磷和粗砂、中砂含量影响显著,对土壤容重、电导率和细砂含量不存在显著影响。土层深度可显著影响 SOC 和土壤理化性质各指标。除 pH 和全磷外,结皮类型和土层深度的交互作用对 SOC 和所有理化性质指标影响显著(表 2)。

本研究结果表明,裸沙、藻类和藓类三种类型中,SOC 含量分别为位于 1.21—1.92 g/kg、1.41—2.56 g/kg 和 1.61—2.70 g/kg 之间,整体表现为藓类结皮(M)>藻类结皮(A)>裸沙(S)。研究区 SOC 含量随着土层深度增加整体呈现下降的趋势,0—2 cm 土层 SOC 含量均为最高,70—100 cm 土层最低,在 10—30 cm 有异常升高趋势(图 1)。不同地被类型下 SOC 在垂直剖面 5 cm 以上土层差异显著($P<0.05$),5 cm 以下土层 SOC 含量虽有变化,但整体没有差异显著,10—30 cm 土层以下,各结皮类型下 SOC 的含量趋于稳定。土壤表层(0—20 cm)中裸沙各层 SOC 无显著差异,藻类和藓类覆盖下 SOC 含量在 0—5 cm 和 5—20 cm 之间存在显著差异($P<0.05$)。

表 1 不同生物土壤结皮覆盖类型下不同土层土壤理化性质

Table 1 Soil physicochemical properties of different soil depths under different Biological Soil Crust types									
类型 Type	土层 Soil Depth/cm	土壤容重 BD/(g/cm ³)	粗砂含量 CS/%	中砂含量 MS/%	细砂含量 FS/%	酸碱度 pH	电导率 EC/(ms/cm)	全氮 TN/(mg/kg)	全磷 TP/(mg/kg)
裸沙 Bare Sand(S)	0—2	1.51±0.05Aa	19.02±1.65Aa	4.03±0.83Ad	73.83±1.08Ba	8.09±0.26Aa	1.10±0.21Aa	93.64±12.97Aab	22.90±2.62Aa
	2—5	1.51±0.05Aa	12.45±0.85Bb	6.39±1.34Ac	74.07±0.89Aa	8.03±0.27Aa	1.12±0.22Aa	100.38±5.74Ba	19.66±2.87Cab
	5—10	1.42±0.14Aa	8.82±1.28Cc	9.28±1.09Aab	73.00±4.90ABab	8.08±0.28Aa	1.28±0.20Aa	70.45±4.79Cc	22.12±3.02Bab
	10—20	1.47±0.07Aa	16.90±2.24Ba	2.31±0.38Be	73.41±2.21Bab	8.21±0.19Aa	1.05±0.20Ab	89.95±6.72Ab	18.98±1.53Cb
	20—30	1.51±0.06Aa	17.70±1.87Ba	2.67±0.41Cde	75.97±5.61Aa	8.27±0.23Aa	1.14±0.19Aa	61.63±1.10Bcd	19.25±2.74Bab
	30—50	1.48±0.05Aa	17.93±2.13Aa	3.50±0.64Bde	69.59±1.67Abe	8.35±0.14Aa	1.06±0.13Bb	68.68±3.36Bc	18.78±3.56Bb
	50—70	1.44±0.10Aa	16.55±2.21Aa	10.49±1.53Aa	67.79±2.43Be	8.33±0.26Ba	1.01±0.16Bb	61.12±6.33Bcd	19.59±2.21Aab
	70—100	1.42±0.07Aa	18.36±1.62Aa	8.23±1.00Ab	67.26±1.55Cc	8.11±0.31Ba	1.38±0.31Aa	56.46±7.58Bd	20.62±1.35Aab
藻类 Cyanobacterial(A)	0—2	1.52±0.03Aa	15.56±1.94Ba	1.80±0.25Be	80.38±1.82Aabc	8.08±0.19Ad	0.99±0.17Abe	108.23±20.25Aa	25.40±2.81Aa
	2—5	1.52±0.03Aa	13.00±1.13Bb	2.87±0.25Bd	77.44±2.67Acd	8.15±0.21Acd	0.97±0.12Abe	112.26±13.42Ba	24.87±1.29Ba
	5—10	1.56±0.02Aa	14.49±1.37Bab	2.80±0.66Bd	75.80±2.12Ad	8.39±0.28Abe	0.93±0.16Be	99.16±5.03Ba	23.17±1.28Bab
	10—20	1.44±0.09Aa	8.52±0.85Cc	4.61±0.39Ac	82.22±1.08Aa	8.41±0.19Abe	1.22±0.30Aabc	46.24±7.56Bc	22.68±1.80Bab
	20—30	1.51±0.06Aa	9.56±1.15Cc	4.69±0.67Ac	81.42±1.10Aab	8.46±0.13Aab	1.16±0.25Aabc	64.34±6.29Bb	22.67±1.96ABab
	30—50	1.53±0.06Aa	14.08±1.73Bab	8.68±0.73Aa	72.40±1.14Ae	8.47±0.12Aab	1.31±0.20Aa	74.07±5.97Bb	20.31±2.19ABb
	50—70	1.46±0.09Aa	13.04±1.04Bb	8.98±0.84Aa	75.12±5.44Ade	8.70±0.23Aa	1.08±0.18ABabc	64.31±6.40Bb	20.73±1.88Ab
	70—100	1.53±0.08Aa	10.31±1.80Cc	7.57±0.72Ab	78.42±1.90Abcd	8.60±0.24Aab	1.23±0.20ABab	64.46±6.13Bb	21.08±2.69Ab
藓类 Moss(M)	0—2	1.48±0.06Aa	21.09±3.03Ab	2.11±0.25Bd	65.32±3.30Cb	8.16±0.12Aa	1.09±0.15Aab	91.98±9.44Acd	26.71±2.68Aab
	2—5	1.48±0.06Aa	20.83±2.42Ab	3.01±0.69Bcd	66.66±3.44Bb	8.14±0.22Aa	0.89±0.13Ab	135.06±22.58Aa	27.90±1.95Aa
	5—10	1.56±0.02Aa	18.61±2.85Ab	3.00±0.72Bcd	69.35±4.62Bab	8.26±0.19Aa	0.95±0.17Bb	107.86±4.88Ab	26.37±1.18Aab
	10—20	1.53±0.07Aa	30.63±2.47Aa	4.09±0.60Ab	59.33±3.50Cc	8.29±0.28Aa	0.96±0.20Ab	85.05±4.54Ad	25.18±1.89Aab
	20—30	1.56±0.01Aa	30.42±1.41Aa	3.70±0.47Bbc	60.57±4.25Bc	8.31±0.27Aa	0.94±0.19Ab	83.15±5.44Ad	23.92±2.99Ab
	30—50	1.52±0.04Aa	15.25±2.53ABc	3.96±0.64Bbc	71.68±3.33Aa	8.37±0.15Aa	1.07±0.16Bab	103.61±9.30Abe	24.09±3.35Aab
	50—70	1.55±0.03Aa	15.58±1.60Ac	4.61±1.05Bb	72.24±3.09ABa	8.44±0.21ABa	1.28±0.22Aa	93.13±10.12Acd	23.22±4.37Abe
	70—100	1.50±0.03Aa	13.00±0.97Bc	8.55±1.15Aa	71.54±1.92Ba	8.39±0.19ABa	1.04±0.18Bab	112.58±9.10Ab	20.08±1.43Ac

pH: 酸碱度 Potential of hydrogen; EC: 电导率 Electric conductivity; BD: 容重 Bulk density; TN: 全氮 Total nitrogen; TP: 全磷 Total phosphorus; CS: 粗砂 Coarse sand; MS: 中砂 Medium sand; FS: 细砂

表 2 结皮类型和土层深度对有机碳及土壤理化性质影响的双因素方差分析(F 值)

Table 2 Two-way analysis of variance of soil crust type and soil depths on soil physicochemical properties (F value)

数据来源 Data sources	F 值								
	有机碳 SOC/(g/kg)	容重 BD/ (g/cm ³)	pH	电导率 EC/ (ms/cm)	全氮 TN/ (mg/kg)	全磷 TP/ (mg/kg)	粗砂 CS/%	中砂 MS/%	细砂 FS/%
结皮类型 Type	34.87 ***	1.10	5.71 ***	1.75	41.89 ***	6.65 ***	20.54 ***	98.04 ***	0.749
土层深度 Depth	35.17 ***	7.37 ***	10.33 ***	3.68 *	89.72 ***	32.87 ***	202.79 ***	48.99 ***	129.21 ***
结皮类型×土层深度 Type×Depth	1.81 *	2.26 **	0.74	2.38 **	11.65 ***	1.56	35.62 ***	37.52 ***	12.62 ***

*, **, *** 分别在 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 、 $P<0.001$ 处表示显著影响水平

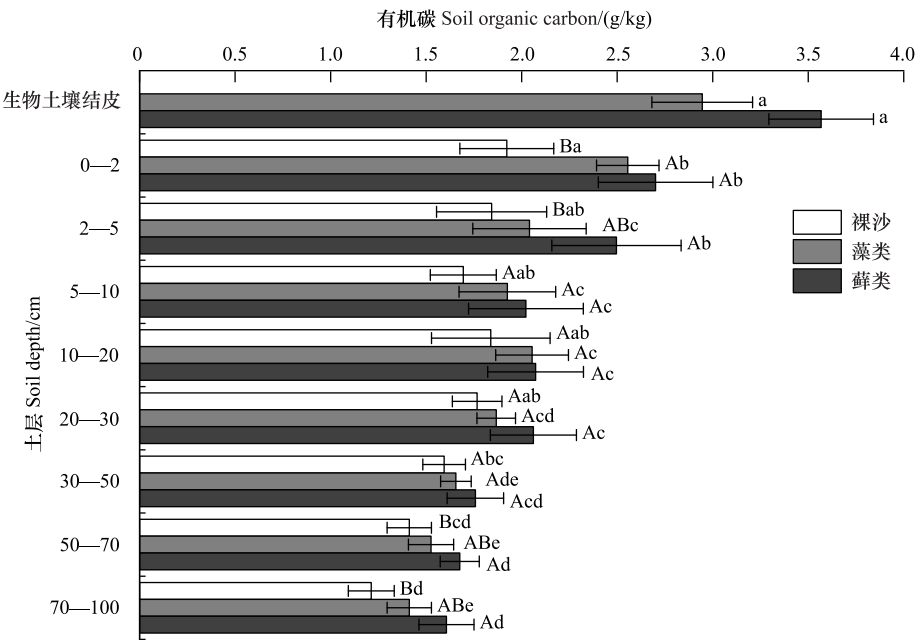


图 1 不同生物土壤结皮类型下土壤有机碳(SOC)垂直分布特征

Fig.1 Vertical distribution characteristics of Soil Organic Carbon (SOC) under different types of Biological Soil Crusts (BSC)

2.2 SOC 与土壤理化因子的关系

通过相关分析发现,SOC 和土壤理化性质在不同生物土壤结皮类型相关关系具有差异性。土壤不同砂粒粒径与 SOC 含量存在显著的相关性,表现为中砂与藻类和藓类 SOC 呈显著负相关,细砂与裸沙和藻类 SOC 呈正相关,与藓类 SOC 含量为负相关。养分对土壤 SOC 均表现出促进作用,但是裸沙与全磷、藓类与全氮皆不存在显著正相关。其余指标间也存在上述现象,表明生物土壤结皮的存在可能改变了土壤理化因子与 SOC 含量的相关性。

利用 SEM 法分析探究了土壤理化性质对不同生物土壤结皮类型 SOC 的影响,SEM 模型表明,裸沙、藻类和藓类结皮的测定变量分别解释了 63%、60%和 39%的 SOC 含量变化(图 3)。土壤理化因子与 SOC 的直接、间接和总效应(直接效应和间接效应之和)如图 4 所示。在裸沙模型中,SOC 含量主要受容重影响最大(0.37),其次是细砂(-0.35)、全磷(0.33)等理化因子,三者对 SOC 总效应都为正效应。细砂通过显著影响 pH 而间接影响裸沙 SOC 含量,pH 和 EC 对 SOC 含量影响极弱(图 3、4)。藻类模型中,细砂和粗砂是 SOC 的主要影响因子。全氮通过间接影响 pH 而影响 SOC 含量,pH 对 SOC 含量为负效应。因 EC 的直接效应与间接效应相互抵消(-0.009),导致对 SOC 含量不存在影响(图 3、4)。藓类模型中,全磷是 SOC 含量的最大影响因子,pH、EC 和容重对 SOC 含量具负效应(3、4)。

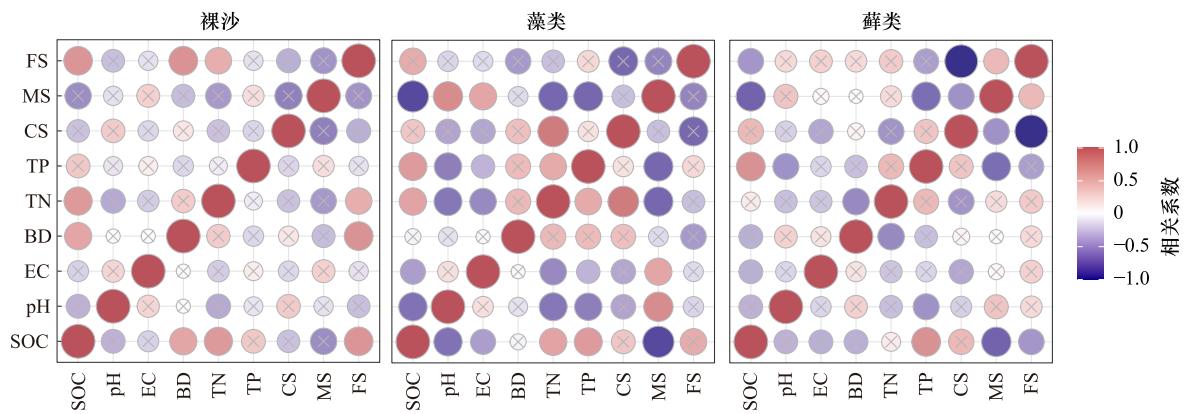


图2 不同生物土壤结皮覆盖下 SOC 与理化因子的相关关系

Fig.2 Correlation between SOC and Physicochemical Factors under BSC Covers

图中实心圈表示 $P < 0.05$, 画叉代表 $P > 0.05$; pH: 酸碱度 Potential of hydrogen; EC: 电导率 Electric conductivity; BD: 容重 Bulk density; TN: 全氮 Total nitrogen; TP: 全磷 Total phosphorus; CS: 粗砂 Coarse sand; MS: 中砂 Medium sand; FS: 细砂 Fine sand

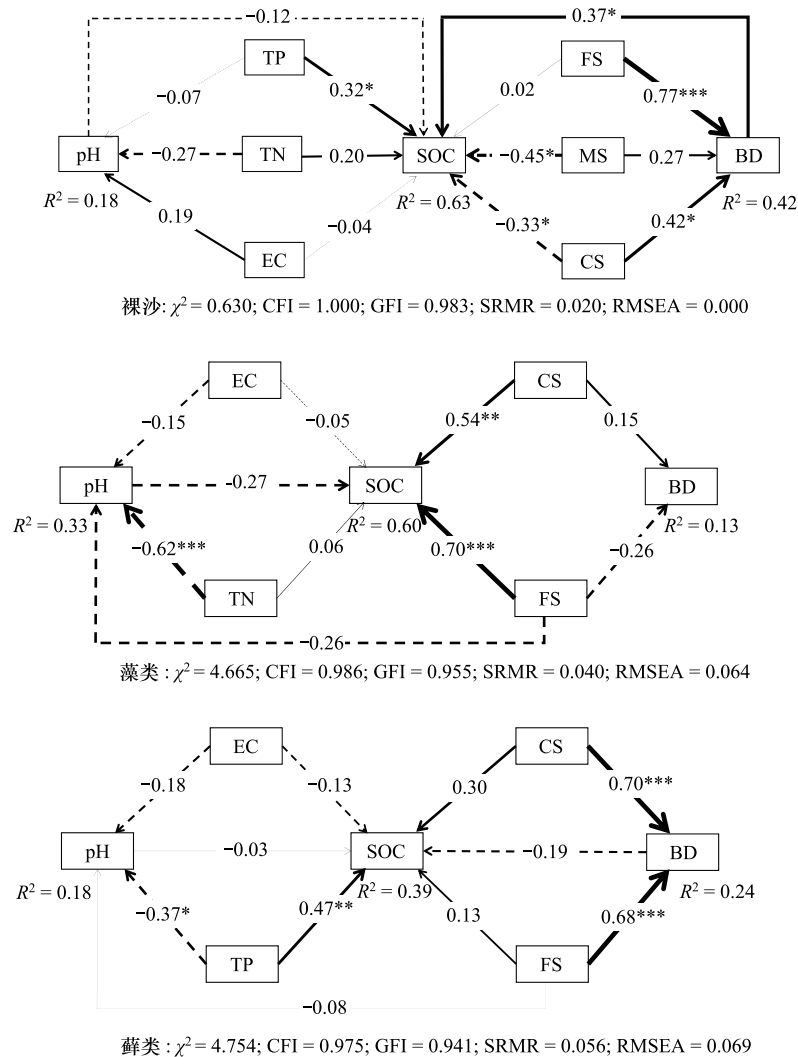


图3 土壤理化性质对裸沙 ($\chi^2 = 1.705$; SRMR = 0.020; RMSEA = 0.000)、藻类 ($\chi^2 = 4.665$; SRMR = 0.040; RMSEA = 0.064) 和藓类覆盖下 SOC ($\chi^2 = 4.754$; SRMR = 0.056; RMSEA = 0.069) 的结构方程模型 (SEM)

Fig.3 Structural Equation Models (SEM) depicting the influence of soil physicochemical properties on SOC under Bare Sand ($\chi^2 = 1.705$; SRMR = 0.020; RMSEA = 0.000), Cyanobacterial ($\chi^2 = 4.665$; SRMR = 0.040; RMSEA = 0.064), and Moss ($\chi^2 = 4.754$; SRMR = 0.056; RMSEA = 0.069) covers

实线和虚线分别表示正相关和负相关

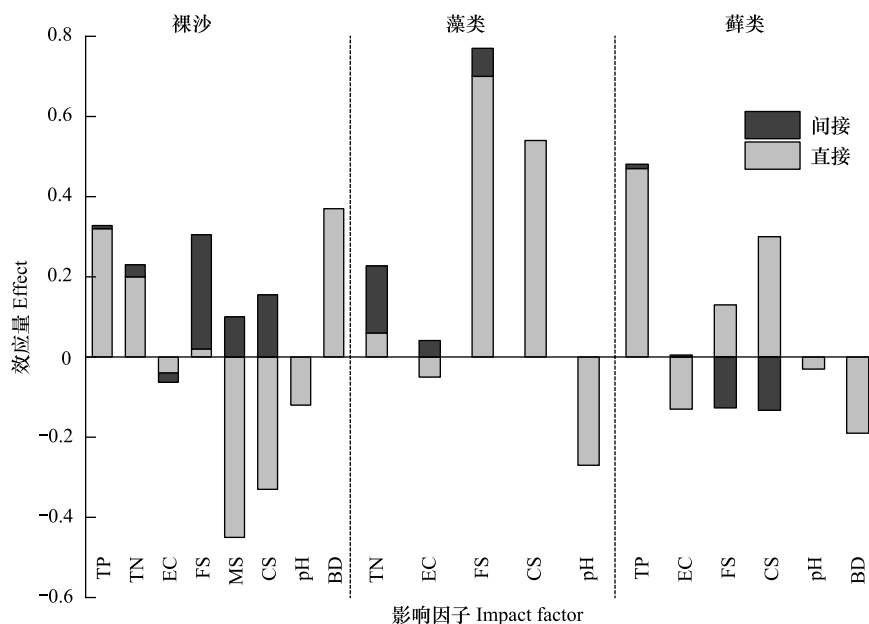


图 4 裸沙、藻类和藓类模型中各影响因子的直接与间接效应

Fig.4 Direct and indirect effects of various influencing factors in Bare Sand, Cyanobacterial, and Moss models

3 讨论

3.1 不同生物土壤结皮覆盖下土壤有机碳的垂直分布特征

本研究发现,生物土壤结皮区 0—100 cm 土壤有机碳含量随土壤深度增加而呈现下降的趋势。这种垂直变化的趋势与许多其他研究结果一致。对准噶尔盆地南缘荒漠区 0—200 cm 土壤碳分布和新疆 5 种荒漠群落 0—100 cm 土壤有机碳的研究均得到一致的结果^[21—22]。SOC 形成主要是植物凋落物(主要来源)和土壤微生物残体(次要来源)的贡献^[23—24]。植物一方面通过养分输入(根际沉积、凋落物等)增加了土壤 SOC 含量,另一方面植被覆盖抵御风蚀、淋溶等作用减少土壤表层养分流失,增加了 SOC 的积累。生物土壤结皮中的藻类和藓类可以进行光合作用,增加植物碳输入,促进土壤有机碳的积累。因而,生物土壤结皮对荒漠土壤有机碳的贡献也至关重要。

不同生物土壤结皮类型也影响 SOC 含量的积累变化。本研究结果发现,由于生物土壤结皮类型的不同,同一土层 SOC 含量也存在差异,但显著差异只存在于 5 cm 以上土层。同一土层不同类型下 SOC 含量表现为:藓类>藻类>裸沙。一方面,藓类和藻类可以进行光合作用吸收固定光合同化碳,同化碳会以根系分泌物和凋落物等方式输入到土壤中,进而增加了土壤有机碳的来源,因此提高了土层中 SOC 的含量^[25]。对毛乌素沙地生物土壤结皮 SOC 研究表明,藓类结皮和下层土壤 SOC 含量是相应藻类和裸沙的 5.5 倍和 2.1 倍^[26]。另一方面,生物土壤结皮的固氮作用为覆盖下土壤微生物群落提供了充足氮源,提高了可利用氮含量及微生物的碳利用效率,增加微生物碳产出进而增加 SOC 含量^[27—29]。本研究中,在 10—30 cm 处土壤 SOC 含量均存在升高的现象,可能是由于生物土壤结皮的存在改变了水分运动和养分转移速率,从而造成了 10—30 cm 土层的富集现象。在古尔班通古特沙漠,大量草本植物发育,如短命植物在春季的盖度可以达到 40% 甚至更高^[30—31],其根系生物量在 10—30 cm 分配较高,可能造成此层 SOC 的大量分布^[32]。也有研究发现,10—15 cm 土层植物凋落物分解率较高,凋落物的高分解率可以增加微生物活性,进而影响 SOC 的积累^[33—34]。上述的研究也为本研究发现的 10—30 cm 土层 SOC 含量升高现象提供证据支持,10—30 cm SOC 含量增加可能是由于微生物活性增强,一方面加速了凋落物分解,另一方面提高了微生物产物的贡献。

3.2 不同生物土壤结皮覆盖下土壤有机碳垂直分布的影响因素

SOC 主要受自然因素(土壤理化性质、降水和植被等)、人为干扰(放牧、耕作、围封等)和气候变化(温室气体浓度升高)等因素影响^[2,35]。在小尺度上,土壤理化性质的关联度更高。土壤粒径会通过影响养分、水分的传导和微生物活性的方面,进一步影响 SOC 的积累^[36]。本研究同样发现荒漠土壤的不同粒径砂含量与 SOC 含量关系密切。细砂与藻类和裸沙 SOC 含量呈显著正相关,与藓类呈显著负相关,粗砂与藻类和藓类 SOC 含量呈正相关,但是只有和藓类是显著正相关。藻类和藓类可通过分泌胞外多糖与土壤颗粒结合^[14],固定沙面,提高土壤稳定性^[37],从而增加粗砂含量。生物土壤结皮的覆盖可稳固沙面,减少养分流失,进一步提高了 SOC 含量。氮和磷是土壤重要的营养元素,同时也是 SOC 重要的影响因子。本研究中,SOC 含量与全氮、全磷其中之一或二者皆呈正相关,与 pH 和 EC 则呈负相关,表明高 pH 和 EC 可能抑制 SOC 的积累。养分元素在循环过程中存在耦合关系,单一元素的变化会导致其他元素的变化,即在不同的尺度维持生态化学计量关系的稳定^[38]。氮沉降研究中发现,氮沉降的增加可以通过影响植物光合固碳、凋落物分解及微生物活性等方面影响 SOC 和全磷的含量。本研究与杨昊天等对腾格里沙漠荒漠草地 SOC 和土壤理化因子相关性研究结果基本相同,即 SOC 与全氮、全磷呈正相关,与 pH 表现负相关关系^[36]。

SEM 分析发现,土壤理化性质对不同生物土壤结皮类型覆盖下 SOC 的作用路径与影响强度存在差异性。容重和细砂是裸沙 SOC 含量的主要影响因子,细砂和全磷分别是藻类和藓类覆盖下 SOC 含量的主要影响因子,细砂主要是通过影响 pH 而影响 SOC 含量(图 3)。研究表明,高 pH 值的土壤 SOC 含量较低^[39]。一方面是盐碱抑制植物正常生长,植物源碳输入相对减少,另一方面盐碱会加强土壤有机质的解吸,形成更多可溶性有机碳随水分运输导致 SOC 损失^[39-40]。土壤粒级占比的变化能够改变土壤结构,进而对 SOC 的固存与周转产生影响。pH 对微生物的活性影响较大,细砂间接通过对 pH 影响进而影响了 SOC 含量。本研究中 SEM 模型对 SOC 影响因素的研究与相关性分析的结果基本相同。不同生物土壤结皮的覆盖可能影响土壤理化因子及其与 SOC 含量的相关关系,进而改变了不同类型下 SOC 积累。

4 结论

古尔班通古特沙漠生物土壤结皮覆盖显著增加了 SOC 含量,其差异主要集中于表层 0—5 cm 土壤,间接影响 5—100 cm SOC 含量。同一土层土壤 SOC 含量随生物土壤结皮发育积累增多,垂直方向 SOC 含量与土壤深度呈负相关的趋势,在 10—30 cm 有增加的趋势,之后趋于平稳。不同生物土壤结皮覆盖下土壤 SOC 含量与土壤理化性质的相关关系存在差异,受理化特性不同程度的调控作用。SEM 模型发现,容重和细砂含量是裸沙 SOC 含量的主要影响因子,而藻类和藓类覆盖下 SOC 的主要因子分别是细砂和全磷。生物土壤结皮覆盖有利于荒漠生态系统土壤碳的固存及碳循环,增加旱区土壤碳储量,同时生物土壤结皮发育也可能改变 SOC 垂直分布格局。

参考文献(References):

- [1] 张治国, 胡友彪, 郑永红, 陈孝扬. 陆地土壤碳循环研究进展. 水土保持通报, 2016, 36(4): 339-345.
- [2] Wang Z W, Huang L M, Shao M A. Spatial variations and influencing factors of soil organic carbon under different land use types in the alpine region of Qinghai-Tibet Plateau. CATENA, 2023, 220: 106706.
- [3] Zhang L, Zhao W, Zhang R, Cao H, Tan W F. Profile distribution of soil organic and inorganic carbon following revegetation on the Loess Plateau, China. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(30): 30301-30314.
- [4] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. Science, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [5] Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. Geoderma, 2004, 123(1/2): 1-22.
- [6] Wan Q Z, Zhu G F, Guo H W, Zhang Y, Pan H X, Yong L L, Ma H Y. Influence of vegetation coverage and climate environment on soil organic carbon in the Qilian Mountains. Scientific Reports, 2019, 9: 17623.
- [7] Zhou Y, Chen S C, Zhu A X, Hu B F, Shi Z, Li Y. Revealing the scale- and location-specific controlling factors of soil organic carbon in Tibet. Geoderma, 2021, 382: 114713.
- [8] Deng L, Liu G B, Shangguan Z P. Land-use conversion and changing soil carbon stocks in China's 'Grain-for-Green' Program: a synthesis. Global Change Biology, 2014, 20(11): 3544-3556.

- [9] Lal R. Carbon cycling in global drylands. *Current Climate Change Reports*, 2019, 5(3): 221-232.
- [10] West N E. Structure and function of microphytic soil crusts in wildland ecosystems of arid to semi-arid regions. *Advances in Ecological Research*, 1990, 20: 179-223.
- [11] Bowker M A, Eldridge D J, Val J, Soliveres S. Hydrology in a patterned landscape is co-engineered by soil-disturbing animals and biological crusts. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 61: 14-22.
- [12] Rodriguez-Caballero E, Belnap J, Büdel B, Crutzen P J, Andreae M O, Pöschl U, Weber B. Dryland photoautotrophic soil surface communities endangered by global change. *Nature Geoscience*, 2018, 11(3): 185-189.
- [13] Chen N, Yu K L, Jia R L, Teng J L, Zhao C M. Biocrust as one of multiple stable states in global drylands. *Science Advances*, 2020, 6(39): eaay3763.
- [14] 周晓兵, 张丙昌, 张元明. 生物土壤结皮固沙理论与实践. *中国沙漠*, 2021, 41(1): 164-173.
- [15] 岳艳鹏, 成龙, 孙迎涛, 庞营军, 吴波, 石麟, 何金军, 贾晓红. 毛乌素沙地生物结皮覆盖区土壤水分收支变化特征. *应用生态学报*, 2022, 33(7): 1861-1870.
- [16] Díaz-Martínez P, Panettieri M, García-Palacios P, Moreno E, Plaza C, Maestre F T. Biocrusts modulate climate change effects on soil organic carbon pools: insights from a 9-year experiment. *Ecosystems*, 2023, 26(3): 585-596.
- [17] 邢旭明, 马晓东, 张元明. 古尔班通古特沙漠生物土壤结皮对土壤种子库多样性与分布特征的影响. *生态学杂志*, 2016, 35(3): 612-620.
- [18] Elbert W, Weber B, Burrows S, Steinkamp J, Büdel B, Andreae M O, Pöschl U. Contribution of cryptogamic covers to the global cycles of carbon and nitrogen. *Nature Geoscience*, 2012, 5(7): 459-462.
- [19] Zhou X B, Zhang Y M, Yin B F. Divergence in physiological responses between cyanobacterial and lichen crusts to a gradient of simulated nitrogen deposition. *Plant and Soil*, 2016, 399(1): 121-134.
- [20] 张元明, 王雪芹. 荒漠地表生物土壤结皮形成与演替特征概述. *生态学报*, 2010, 30(16): 4484-4492.
- [21] 王娜, 许文强, 徐华君, 冯昇星, 李超凡. 准噶尔盆地南缘荒漠区土壤碳分布及其稳定同位素变化. *应用生态学报*, 2017, 28(7): 2215-2221.
- [22] 田晓龙, 田思惠, 张乾, 汪依妮, 柳鑫, 金宝成, 赵学春. 三工河流域 5 种荒漠群落土壤有机碳动态. *应用与环境生物学报*, 2020, 26(3): 658-666.
- [23] Kögel-Knabner I. The macromolecular organic composition of plant and microbial residues as inputs to soil organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(2): 139-162.
- [24] Lorenz K, Lal R. The depth distribution of soil organic carbon in relation to land use and management and the potential of carbon sequestration in subsoil horizons. *Advances in Agronomy*, 2005, 88: 35-66.
- [25] Yan-Gui S, Xin-Rong L, Ying-Wu C, Zhi-Shan Z, Yan L. Carbon fixation of cyanobacterial-algal crusts after desert fixation and its implication to soil organic carbon accumulation in desert. *Land Degradation & Development*, 2013, 24(4): 342-349.
- [26] 庞景文, 卜崇峰, 郭琦, 鞠孟辰, 江嫚, 莫秋霞, 王鹤鸣. 毛乌素沙地区域尺度生物结皮有机碳空间分布特征及其影响因素. *应用生态学报*, 2022, 33(7): 1755-1763.
- [27] Knorr M, Frey S D, Curtis P S. Nitrogen additions and litter decomposition: a meta-analysis (vol 86, pg 3252, 2005). *Ecology*, 2008, 89(3): 888.
- [28] Francesca M C, Wallenstein M D, Boot C M, Denef K, Paul E. 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?. *Global Change Biology*, 2013, 19(4): 988-995.
- [29] Liu J, Wu N N, Wang H, Sun J F, Peng B, Jiang P, Bai E. Nitrogen addition affects chemical compositions of plant tissues, litter and soil organic matter. *Ecology*, 2016, 97(7): 1796-1806.
- [30] 王雪芹, 蒋进, 雷加强, 张伟民, 钱亦兵. 古尔班通古特沙漠短命植物分布及其沙面稳定意义. *地理学报*, 2003, 58(4): 598-605.
- [31] 钱亦兵, 吴兆宁, 张立运, 赵锐锋, 王小燕, 李有民. 古尔班通古特沙漠短命植物的空间分布特征. *科学通报*, 2007, 52(19): 2299-2306.
- [32] Yin J F, Zhou X B, Yin B F, Li Y G, Zhang Y M. Species-dependent responses of root growth of herbaceous plants to snow cover changes in a temperate desert, Northwest China. *Plant and Soil*, 2021, 459(1): 249-260.
- [33] Gill R, Burke I C, Milchunas D G, Lauenroth W K. Relationship between root biomass and soil organic matter pools in the shortgrass steppe of eastern colorado. *Ecosystems*, 1999, 2(3): 226-236.
- [34] Yu H Y, Zha T G, Zhang X X, Ma L M. Vertical distribution and influencing factors of soil organic carbon in the Loess Plateau, China. *Science of The Total Environment*, 2019, 693: 133632.
- [35] Wang Y Q, Han X W, Jin Z, Zhang C C, Fang L C. Soil organic carbon stocks in deep soils at a watershed scale on the Chinese Loess Plateau. *Soil Science Society of America Journal*, 2016, 80(1): 157-167.
- [36] 杨昊天, 王增如, 贾荣亮. 腾格里沙漠东南缘荒漠草地不同群落类型土壤有机碳分布及储量特征. *植物生态学报*, 2018, 42(3): 288-296.
- [37] 孙华方, 李希来, 金立群, 李成一, 张静. 生物土壤结皮对黄河源区人工草地植被与土壤理化性质的影响. *草地学报*, 2020, 28(2): 509-520.
- [38] Elser J J, Fagan W F, Kerkhoff A J, Swenson N G, Enquist B J. Biological stoichiometry of plant production: metabolism, scaling and ecological response to global change. *New Phytologist*, 2010, 186(3): 593-608.
- [39] Amini S, Ghadiri H, Chen C R, Marschner P. Salt-affected soils, reclamation, carbon dynamics, and biochar: a review. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 16(3): 939-953.
- [40] Post W M, Kwon K C. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. *Global Change Biology*, 2000, 6(3): 317-327.