

土壤质地影响生物结皮对土壤属性的作用程度

张文芳¹, 高丽倩^{1, 2*}, 欧阳文峰¹, 孙会³, 赵允格^{1, 2}

[1. 西北农林科技大学水土保持科学与工程学院(水土保持研究所), 陕西 咸阳 712100;
2. 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 咸阳 712100; 3. 西北农林科技大学林学院, 陕西 咸阳 712100]

摘要: 生物结皮广泛分布于干旱与半干旱区, 对表层土壤属性具有显著影响。然而, 不同类型或发育程度的生物结皮对不同土壤质地条件下土壤属性的影响是否相同, 以及生物结皮与土壤质地是否存在交互作用等问题仍不清楚。以黄土高原粉壤土、砂壤土和砂土上发育的不同类型生物结皮(藻结皮、混合结皮和藓结皮)为研究对象, 比较不同土壤质地条件下各类型生物结皮对土壤属性的影响差异。结果表明:(1) 粉壤土和砂壤土上生物结皮对土壤颗粒组成无明显影响, 而砂土生物结皮显著提高了黏粒、细粉粒及粗粉粒的含量。其中, 生物结皮对砂土粗粉粒含量的作用最大; 不同类型的生物结皮中, 混合结皮对砂土颗粒组成的总体影响最大, 藓结皮影响深度最深, 为生物结皮层下 5 cm。(2) 不同土壤质地的生物结皮均能降低土壤容重, 其中砂土藓结皮降低土壤容重程度最大, 降低了 17%。(3) 3 种土壤质地的生物结皮均能不同程度提高土壤有机质及全氮含量, 其中砂土生物结皮影响程度最大, 且藓结皮影响程度最显著, 其有机质含量和全氮含量分别是对照的 17.6 和 13.5 倍, 影响深度为生物结皮层下 10 cm。(4) 土壤质地和生物结皮类型对土壤容重、土壤有机质及全氮存在显著交互效应, 且单一作用均大于二者交互作用。(5) 砂土生物结皮对土壤属性影响最大, 且藓结皮影响程度更显著。综上所述, 黄土高原砂土生物结皮对土壤属性的影响程度最大, 且藓结皮对土壤属性具有更明显的改善效果。研究结果可为深化生物结皮生态功能及生态系统可持续管理提供理论依据。

关键词: 生物结皮; 土壤质地; 土壤理化属性; 黄土高原

生物土壤结皮(简称生物结皮)是由不同比例的光合自养生物(如藻类、藓类和地衣)和异养生物(如大部分细菌和真菌)等与土壤颗粒胶结形成的复合体^[1], 是干旱半干旱地区常见的地被物。近年来, 国内外学者对生物结皮的生态功能进行了广泛的研究。这些研究表明, 生物结皮能够稳定地表^[2-3]、细化土壤^[4-6]、改善土壤养分^[7-9]等。因此, 生物结皮被认为是旱地生态系统的工程师和建筑师^[10], 在维持旱地生态系统的服务和功能方面发挥着重要作用^[11-12]。

生物结皮在不同土壤质地上均能改善土壤属性, 例如: 崔燕等^[13]在砂土上的研究表明生物结

皮能够细化土壤颗粒, 提高土壤养分等; 赵允格等^[14]在粉壤土的研究证实生物结皮能显著提高有机质及全氮的含量; Kakeh 等^[15]在壤土的研究结果认为生物结皮能够降低土壤容重, 提高土壤有机质及全氮含量。土壤质地作为土壤最基本的物理属性之一, 对土壤属性及功能有重要影响^[16]。因此, 土壤质地可能会影响生物结皮对土壤属性的作用程度。对此, 肖波等^[17]以沙土和黄土上发育的藓结皮为对象进行了初步研究, 发现沙土上藓结皮对土壤属性的影响程度大于黄土。然而, 不同类型或发育程度的生物结皮对不同土壤质地条件下土壤属性的影响是否相同, 以及生物结皮与土壤质地是否存在交互作用等问题仍不清楚, 不利于生物结皮生态功能深入研究及生态系统可持续管理。

黄土高原属于典型的干旱半干旱地区, 生态环境脆弱, 退耕还林(草)工程实施以来, 退耕地上生物结皮平均盖度达 60% ~ 70%^[14], 在各质地土壤上均有分布, 是黄土高原重要的地被物, 在该区生态系统恢复中起着重要作用。因此, 明确不同类

收稿日期: 2023-09-17; 录用日期: 2023-10-26

基金项目: 宁夏回族自治区重点研发计划(2022BEG03053); 国家自然科学基金(41907056); 中国科学院“西部之光”人才培养计划(XAB2022YW01)。

作者简介: 张文芳(1999-), 硕士研究生, 研究方向为生物结皮生态功能。E-mail: 2186877408@qq.com。

通讯作者: 高丽倩, E-mail: glq@nwafu.edu.cn。

型的生物结皮在各质地土壤上的作用程度对生物结皮发育的生态系统管理具有重要意义。为此,本研究以黄土高原粉壤土、砂壤土及砂土3种土壤质地上发育的不同类型生物结皮(藻结皮、混合结皮和藓结皮)为研究对象,通过野外采样及室内分析,比较不同土壤质地上各类型生物结皮土壤理化属性差异,明确各类型生物结皮对不同质地土壤理化属性的影响程度,以期为深化生物结皮生态功能及生态系统可持续管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省延安市安塞区、陕西省榆林市靖边县和陕西省榆林市榆阳区。陕西省延安市安塞区(36° 30' 45" ~ 37° 19' 3" N, 108° 5' 44" ~ 109° 26' 18" E)属暖温带半干旱大陆性季风气候,年均气温8.8℃,年平均降水量541.2 mm,平均海拔1219 m^[18],土壤质地为粉壤土,主要植物有柠条(*Caragana korshiskii*)、铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、长芒草(*Stipa bungeana*)等。生物结皮分布较为广泛,类型主要为藻、藓混合结皮,其中,藓优势种有土生对齿藓(*Didymodon vinealis*)和细叶真藓(*Bryum capillare*),藻优势科有胶须藻科(Rivulariaceae)和伪枝藻科(Scytonemataceae)。

陕西省榆林市靖边县(36° 58' ~ 38° 03' N, 108° 17' ~ 109° 20' E)属温带半干旱大陆性季风气候,年均气温10℃,多年平均降水量443.5 mm,平均海拔1450 m^[19],土壤质地为砂壤土,主要植物有沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、油蒿(*Artemisia ordosica*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)等。生物结皮分布广泛,类型主要为藻、藓混合结皮,藓优势种有土生对齿藓和细叶真藓,藻优势科有颤藻科(Oscillatoriaceae)和席藻科(Phormidiaceae)。

陕西省榆林市榆阳区(37° 49' ~ 38° 58' N, 108° 58' ~ 110° 24' E)属温带半干旱大陆性季风气候,年均气温8.3℃,多年平均降水量365.7 mm,平均海拔1150 m^[20],土壤质地为砂土,主要植物有沙柳(*Salix cheilophila*)、沙蒿(*Artemisia desertorum*)、柠条等。生物结皮分布广泛,类型主要为藻、藓混合结皮,藓优势种有细叶真藓和银叶真藓(*Bryum argenteum*),藻优势科有颤藻科和席藻科。

1.2 样地选择及样品采集

在研究区3种质地的土壤上(表1),选取人为扰动少、生物结皮相对完整的退耕地作为研究样地,每种质地土壤上分别选择发育良好且具有代表性的藻结皮、藓结皮及藻藓混合结皮(藻:藓≈1:1)的样地,以无生物结皮的农地或裸沙为对照,每个类型设2~3个重复。每个样地使用25点样方法调查生物结皮盖度、厚度,并记录样地地理位置、高等植被盖度、优势群落、样地地形、坡向等基本情况,样地基本信息见表2。

调查结束后,每个样地选取5点分层采集生物结皮层及其下层0~2、2~5、5~10 cm的土壤样品,同层混合作为一个分析样。采样时,选取高等植被间的空地,避免植被根系影响。之后将土壤样品带回实验室风干,过2及0.25 mm筛备用。

表1 研究区土壤质地 (%)

研究区	黏粒 (<0.002 mm)	粉粒 (0.002 ~ 0.05 mm)	砂粒 (0.05 ~ 1 mm)	土壤 质地
安塞区	10.79 ± 0.52a	61.97 ± 0.45a	27.24 ± 0.97c	粉壤土
靖边县	6.69 ± 1.45b	39.40 ± 7.91b	53.91 ± 9.35b	砂壤土
榆阳区	0.39 ± 0.22c	1.71 ± 0.30c	97.90 ± 0.52a	砂土

注:不同小写字母表示各指标在不同土壤质地间差异显著($P < 0.05$)。

1.3 测定指标

生物结皮层厚度:游标卡尺测定,15点取平均值。生物结皮层容重:涂膜法^[21]。土壤容重:环刀法。土壤颗粒组成:马尔文MS2000激光粒度分析仪。土壤有机质:重铬酸钾容量法(外加热法)。土壤全氮:凯氏定氮法。

为了比较生物结皮对不同质地土壤属性的作用程度,借鉴土壤恢复指数的方法^[22],提出了生物结皮作用指数(BII),以无生物结皮的农地或裸沙为对照,土壤颗粒组成的变化采用黏砂比来表征,计算不同土壤质地不同类型生物结皮黏砂比、容重、有机质及全氮与对照的差异,最后将各属性的差异求和平均,以定量描述不同土壤质地上不同类型生物结皮对土壤属性的影响,其计算公式如下:

$$BII = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(X_i - X'_i) / X'_i] \times 100\%$$

式中, X_i 为某一类型生物结皮第*i*个土壤属性值, X'_i 为对照第*i*个土壤属性值。

表 2 样地基本信息

土壤质地	生物结皮类型	海拔 (m)	坡度 (°)	地形	植被盖度 (%)	生物结皮盖度 (%)	生物结皮厚度 (mm)
粉壤土	对照	1274 ~ 1279	15 ~ 25	梁峁坡	15 ~ 20	—	—
	藻结皮	1350 ~ 1357	13 ~ 17	梁峁坡	20 ~ 25	89.04 ± 2.15a	4.29 ± 0.12b
	混合结皮	1316 ~ 1358	10 ~ 15	梁峁坡	25 ~ 35	71.78 ± 4.53b	7.03 ± 0.18b
	藓结皮	1267 ~ 1366	3 ~ 20	梁峁坡	60 ~ 68	60.22 ± 4.37c	9.65 ± 0.39b
砂壤土	对照	1610 ~ 1615	0	平地	25 ~ 75	—	—
	藻结皮	1571 ~ 1580	5 ~ 7	梁峁坡	50	76.25 ± 3.23b	6.82 ± 0.53a
	混合结皮	1575 ~ 1600	10 ~ 15	梁峁坡	30 ~ 50	71.20 ± 5.18b	10.25 ± 0.35a
	藓结皮	1542 ~ 1634	0 ~ 2	梁峁坡	20 ~ 50	74.94 ± 2.50b	10.36 ± 0.30b
砂土	对照	1148 ~ 1207	10	沙丘	5 ~ 20	—	—
	藻结皮	1136 ~ 1202	0 ~ 10	沙丘	20 ~ 30	93.00 ± 1.71a	4.68 ± 0.32b
	混合结皮	1130 ~ 1135	0 ~ 5	沙丘	25	97.25 ± 1.45a	8.10 ± 0.41b
	藓结皮	1128 ~ 1206	0 ~ 5	沙丘、丘间地	25 ~ 35	95.33 ± 1.22a	12.50 ± 0.44a

注：不同小写字母表示生物结皮盖度及厚度在不同土壤质地间差异显著 ($P < 0.05$)。

1.4 数据处理

采用 Excel 2021 进行数据整理与计算，运用 SPSS 26.0 对同一类型不同土层及不同类型相同土层土壤理化属性进行单因素方差分析和多重比较 (LSD 法, $\alpha = 0.05$)，使用一般线性模型检验土壤质地和生物结皮类型对土壤理化属性的交互效应，利用 Origin 2022 作图。图表中数据均为平均值 ± 标准误。

2 结果与分析

2.1 生物结皮对不同质地土壤颗粒组成的影响

生物结皮对土壤颗粒组成的影响程度因土壤质地和生物结皮类型而异 (表 3)。与对照相比，除

砂壤土的藻结皮对粗粉粒影响显著外，粉壤土及砂壤土的生物结皮对土壤颗粒组成均无显著影响；砂土上，除藓结皮对黏粒、细粉粒影响不显著外，生物结皮与对照相比均显著提高了黏粒、细粉粒及粗粉粒的含量。砂土藻结皮黏粒、细粉粒及粗粉粒含量分别是对照的 5.1、3.9 和 4.2 倍，混合结皮黏粒、细粉粒及粗粉粒含量分别是对照的 5.5、4.7 和 6.6 倍，藓结皮粗粉粒含量是对照的 5.5 倍 ($P < 0.05$)。

粉壤土及砂壤土生物结皮对土壤颗粒组成均无显著影响，而砂土生物结皮显著细化土壤颗粒。砂土生物结皮下伏 0 ~ 2、2 ~ 5、5 ~ 10 cm 土壤颗粒组成如表 4 所示，砂土生物结皮对下伏土壤颗粒

表 3 生物结皮对不同质地土壤颗粒组成的影响

(%)

土壤质地	生物结皮类型	黏粒 (< 0.002 mm)	细粉粒 ($0.002 \sim 0.01$ mm)	粗粉粒 ($0.01 \sim 0.05$ mm)	细砂粒 ($0.05 \sim 0.25$ mm)	粗砂粒 ($0.25 \sim 1$ mm)
粉壤土	对照	10.79 ± 0.52a	8.03 ± 0.46a	53.93 ± 0.01a	27.24 ± 0.97a	0.00 ± 0.00a
	藻结皮	10.69 ± 0.27a	7.94 ± 0.10a	52.01 ± 0.27a	29.34 ± 0.49a	0.02 ± 0.02a
	混合结皮	9.09 ± 0.32a	6.78 ± 0.37a	54.86 ± 1.67a	29.27 ± 2.35a	0.00 ± 0.00a
	藓结皮	9.90 ± 0.60a	6.42 ± 0.38a	52.83 ± 1.66a	30.58 ± 2.41a	0.27 ± 0.27a
砂壤土	对照	6.69 ± 1.45ab	5.19 ± 1.39ab	34.21 ± 6.52a	53.91 ± 9.35ab	0.00 ± 0.00a
	藻结皮	4.10 ± 0.78b	2.99 ± 0.53b	16.69 ± 3.22b	76.20 ± 4.51a	0.03 ± 0.02a
	混合结皮	9.66 ± 0.03a	6.25 ± 0.64a	42.97 ± 0.21a	41.13 ± 0.87b	0.00 ± 0.00a
	藓结皮	5.50 ± 0.90b	4.06 ± 0.69ab	34.58 ± 3.72a	55.86 ± 5.28ab	0.00 ± 0.00a
砂土	对照	0.39 ± 0.22b	0.34 ± 0.20c	1.37 ± 0.11b	57.52 ± 5.11a	40.39 ± 4.58a
	藻结皮	1.99 ± 0.41a	1.33 ± 0.21ab	5.75 ± 0.46a	56.81 ± 2.48a	34.12 ± 2.82a
	混合结皮	2.14 ± 0.49a	1.60 ± 0.34a	9.09 ± 2.00a	60.02 ± 5.06a	27.15 ± 2.25a
	藓结皮	0.97 ± 0.31ab	0.68 ± 0.23bc	7.50 ± 1.08a	54.40 ± 4.64a	36.45 ± 5.19a

注：不同小写字母表示同一土壤质地不同类型生物结皮间差异显著 ($P < 0.05$)。

表4 砂土生物结皮对下伏不同土层土壤颗粒组成的影响

土层 (cm)	生物结皮类型	黏粒含量 (%) (<0.002 mm)	细粉粒含量 (%) ($0.002 \sim 0.01$ mm)	粗粉粒含量 (%) ($0.01 \sim 0.05$ mm)	细砂粒含量 (%) ($0.05 \sim 0.25$ mm)	粗砂粒含量 (%) ($0.25 \sim 1$ mm)
0 ~ 2	对照	0.39 ± 0.22 Ab	0.34 ± 0.20 Aa	1.37 ± 0.11 Ab	57.52 ± 5.11 Aa	40.39 ± 4.58 Aa
	藻结皮	1.04 ± 0.09 Aa	0.69 ± 0.06 Aa	2.75 ± 0.87 Ab	55.62 ± 1.53 Aa	39.90 ± 2.30 Aa
	混合结皮	1.00 ± 0.57 Aa	0.69 ± 0.40 Aa	3.25 ± 1.86 Aab	61.28 ± 6.24 Aa	33.79 ± 3.41 Aa
	藓结皮	1.18 ± 0.46 Aa	0.85 ± 0.32 Aa	6.73 ± 1.18 Aa	51.42 ± 4.76 Aa	39.82 ± 5.29 Aa
2 ~ 5	对照	0.41 ± 0.24 Aab	0.36 ± 0.21 Aa	1.03 ± 0.60 Ab	58.52 ± 2.49 Aa	39.67 ± 1.44 Aa
	藻结皮	0.12 ± 0.07 Bb	0.11 ± 0.07 Ba	1.91 ± 0.08 Ab	56.53 ± 1.33 Aa	41.33 ± 1.36 Aa
	混合结皮	0.61 ± 0.35 Aab	0.45 ± 0.26 Aa	1.60 ± 0.91 Ab	56.00 ± 6.69 Aa	41.34 ± 5.18 Aa
	藓结皮	0.90 ± 0.49 Aa	0.68 ± 0.34 Aa	4.74 ± 1.34 ABa	56.04 ± 5.15 Aa	37.64 ± 5.00 Aa
5 ~ 10	对照	0.34 ± 0.21 Aa	0.25 ± 0.16 Aa	1.15 ± 0.38 Aa	50.17 ± 1.51 Aa	48.09 ± 0.98 Aa
	藻结皮	0.00 ± 0.00 Ba	0.00 ± 0.00 Ba	1.15 ± 0.23 Aa	53.22 ± 2.57 Aa	45.64 ± 2.74 Aa
	混合结皮	0.00 ± 0.00 Aa	0.00 ± 0.00 Aa	1.11 ± 0.63 Aa	53.99 ± 4.04 Aa	44.89 ± 3.41 Aa
	藓结皮	0.58 ± 0.37 Aa	0.50 ± 0.32 Aa	1.99 ± 1.25 Ba	57.41 ± 7.53 Aa	39.52 ± 7.18 Aa

注：不同大写字母表示相同生物结皮类型不同土层间差异显著，不同小写字母表示相同土层不同生物结皮类型间差异显著 ($P < 0.05$)。

组成的影响较大，藻结皮层下 0 ~ 2 cm 土层黏粒和细粉粒含量显著高于 2 ~ 5 及 5 ~ 10 cm 土层，且 0 ~ 2 cm 土层黏粒含量显著高于对照，对土壤颗粒组成影响深度为生物结皮层下 2 cm；混合结皮下 0 ~ 2 cm 土层黏粒含量显著高于对照，而 2 ~ 5 及 5 ~ 10 cm 土层较对照无显著差异，对土壤颗粒组成的影响深度为生物结皮层下 2 cm；藓结皮 0 ~ 2 及 2 ~ 5 cm 土层粗粉粒含量显著高于对照，5 ~ 10 cm 土层粗粉粒含量较对照无显著差异，对土壤颗粒组成的影响深度为生物结皮层下 5 cm ($P < 0.05$)。

2.2 生物结皮对不同质地土壤容重的影响

生物结皮层容重均低于其下层土壤容重，表明生物结皮能在一定程度上降低土壤容重。同一土壤质地上，不同类型的生物结皮层容重均表现为藻结皮 > 混合结皮 > 藓结皮。不同土壤质地上，不同类型的生物结皮降低容重的程度不同。粉壤土上，混合结皮较其他类型生物结皮降低土壤容重程度最大，降低了 10%，而在砂壤土和砂土上，藓结皮作用程度最大，与结皮层下 5 cm 土壤容重相比分别降低了 15% 和 17% ($P < 0.05$)。见图 1。

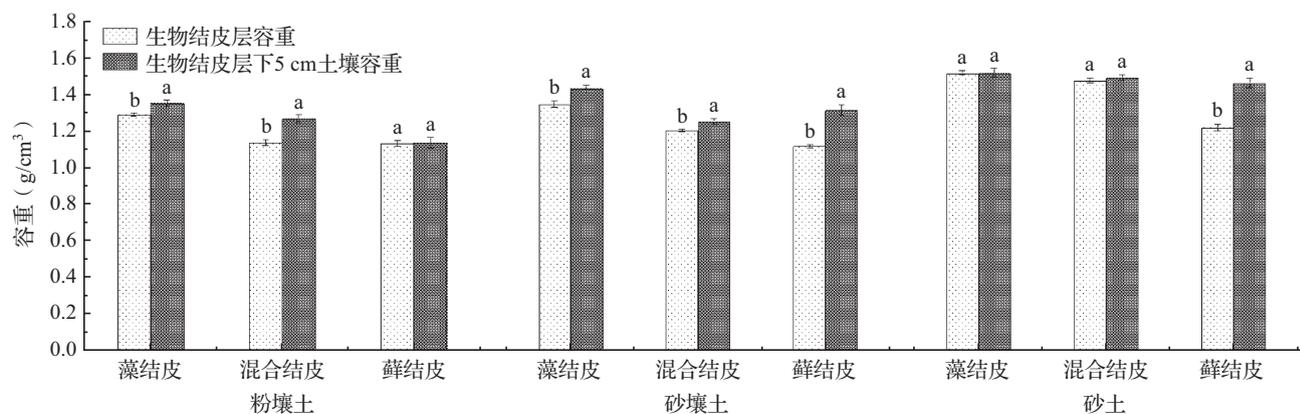


图1 生物结皮对不同质地土壤容重的影响

注：不同小写字母表示生物结皮层容重与其下层土壤容重差异显著 ($P < 0.05$)。

2.3 生物结皮对不同质地土壤有机质的影响

生物结皮显著提高了土壤有机质含量，其在不同土壤质地上影响程度不同（图2）。粉壤土上藻结皮、混合结皮及藓结皮有机质含量分别是对照的2.3、4.8及5.5倍，砂壤土上分别是对照的2.7、6.3及5.3倍，而砂土上则分别是对照的10.2、12.9及20.8倍（ $P<0.05$ ）。

3种土壤质地上均表现为生物结皮层有机质含量显著高于下层土壤，且随着土层深度加深含量降低。生物结皮在不同土壤质地上影响深度不同。粉壤土上，藻结皮有机质含量比下层0~2 cm土层增加了166%，而0~2、2~5、5~10 cm土层有机质含量无显著差异，且较对照也无显著差异，对土壤有机质的影响主要集中于生物结皮层；混合结皮及其下0~2 cm土层有机质含量较2~5 cm土层有机质含量分别提高了349%和99%，而2~5及5~10 cm土层有机质含量无显著差异，且较对照也无显著差异，对土壤有机质的影响深度为生物结皮层下2 cm；藓结皮及其下0~2、2~5、5~10 cm土层有机质含量分别较对照增加了452%、97%、45%和73%，对土壤有机质的影响深度为生物结皮层下10 cm（ $P<0.05$ ）。

砂壤土上，藻结皮有机质含量比下层0~2 cm

土层增加了76%，而0~2、2~5、5~10 cm土层有机质含量无显著差异，且较对照也无显著差异，对土壤有机质的影响主要集中于生物结皮层；混合结皮及其下0~2 cm土层有机质含量较2~5 cm土层有机质含量分别提高了325%和118%，而2~5及5~10 cm土层有机质含量无显著差异，且较对照也无显著差异，对土壤有机质的影响深度为生物结皮层下2 cm；藓结皮及其下0~2 cm土层有机质含量较对照增加了429%和132%，而2~5及5~10 cm土层有机质含量较对照无显著差异，对土壤有机质的影响深度为生物结皮层下2 cm（ $P<0.05$ ）。

砂土上，藻结皮及其下0~2 cm土层有机质含量分别是对照的10.2和3.6倍，而2~5及5~10 cm土层有机质含量较对照无显著差异，对土壤有机质的影响深度为生物结皮层下2 cm；混合结皮及其下0~2 cm土层有机质含量是对照的12.8和3.6倍，而2~5及5~10 cm土层有机质含量较对照无显著差异，对土壤有机质的影响深度为生物结皮层下2 cm；藓结皮及其下0~2、2~5、5~10 cm土层有机质含量分别是对照的20.6、9.9、4.7和3.3倍，对土壤有机质的影响深度为生物结皮层下10 cm（ $P<0.05$ ）。

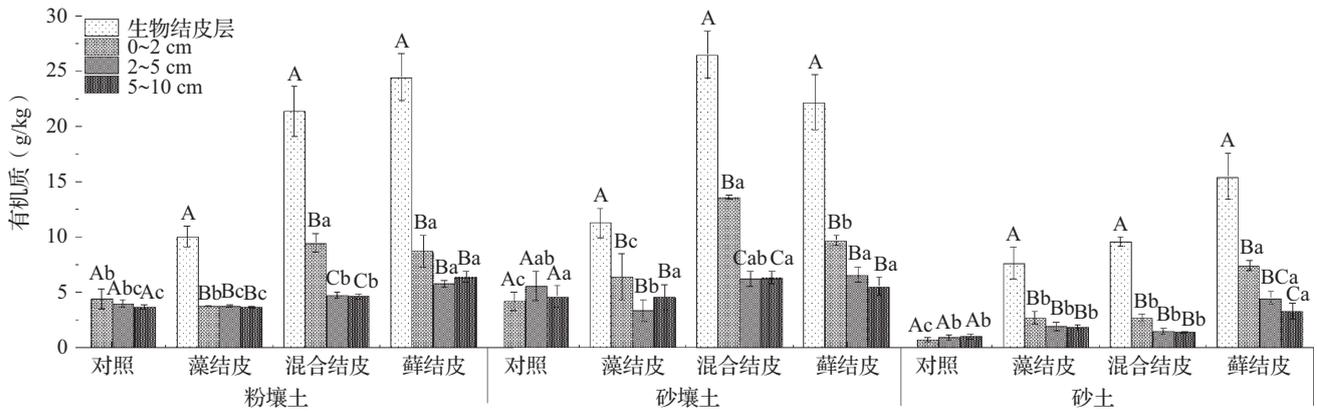


图2 生物结皮对不同土层土壤有机质的影响

注：不同大写字母表示相同生物结皮类型不同土层间差异显著，不同小写字母表示相同土层不同生物结皮类型间差异显著（ $P<0.05$ ）。下同。

2.4 生物结皮对不同质地土壤全氮的影响

与对照相比，生物结皮显著提高了土壤全氮含量，不同土壤质地上，生物结皮影响程度不同（图3）。粉壤土的藻结皮、混合结皮及藓结皮全氮含量分别是对照的3.8、3.9和4.1倍，砂壤土的藻结皮、混合结皮及藓结皮全氮含量是对照的1.9、

4.9及3.8倍，而砂土则分别是对照的5.4、8.1和13.0倍（ $P<0.05$ ）。

生物结皮层全氮含量均显著高于下伏土壤，随着土层加深，全氮含量降低。粉壤土上，藻结皮全氮含量比下层0~2 cm土层增加了135%，而0~2、2~5、5~10 cm土层全氮含量无显著差

异,且0~2 cm土层较对照也无显著差异,对土壤全氮的影响主要集中于生物结皮层;混合结皮及其下0~2 cm土层全氮含量较2~5 cm土层全氮含量分别提高了207%和63%,而2~5及5~10 cm土层全氮含量无显著差异,且较对照也无显著差异,对土壤全氮的影响深度为生物结皮层下2 cm;藓结皮及其下0~2、2~5、5~10 cm土层全氮含量分别较对照增加了307%、100%、47%和44%,对土壤全氮的影响深度为生物结皮层下10 cm ($P<0.05$)。

砂壤土上,藻结皮全氮含量比下层0~2 cm土层增加了97%,而0~2、2~5、5~10 cm土层全氮含量无显著差异,且较对照无显著差异,对土壤全氮的影响主要集中于生物结皮层;混合结皮及其下0~2 cm土层全氮含量较2~5 cm土层全氮含量分别提高了319%和95%,而2~5及5~10 cm土层全氮含量无显著差异,且较对照也无显著差异,对土壤全氮的影响深度为生

物结皮层下2 cm;藓结皮及其下0~2 cm土层全氮含量较2~5 cm土层全氮含量分别提高了210%和68%,而2~5及5~10 cm土层全氮含量无显著差异,且较对照也无显著差异,因此藓结皮对土壤全氮的影响深度为生物结皮层下2 cm ($P<0.05$)。

砂土上,藻结皮及其下0~2、2~5 cm土层全氮含量较5~10 cm土层全氮含量分别提高了295%、68%和34%,而5~10 cm土层全氮含量较对照无显著差异,对土壤全氮的影响深度为生物结皮层下5 cm;混合结皮及其下0~2 cm土层全氮含量较2~5 cm土层全氮含量分别提高了524%和37%,而2~5及5~10 cm土层全氮含量无显著差异,且较对照也无显著差异,对土壤全氮的影响深度为生物结皮层下2 cm;藓结皮及其下0~2、2~5、5~10 cm土层全氮含量分别是对照的14.5、7.0、9.0和3.0倍,对土壤全氮的影响深度为生物结皮层下10 cm ($P<0.05$)。

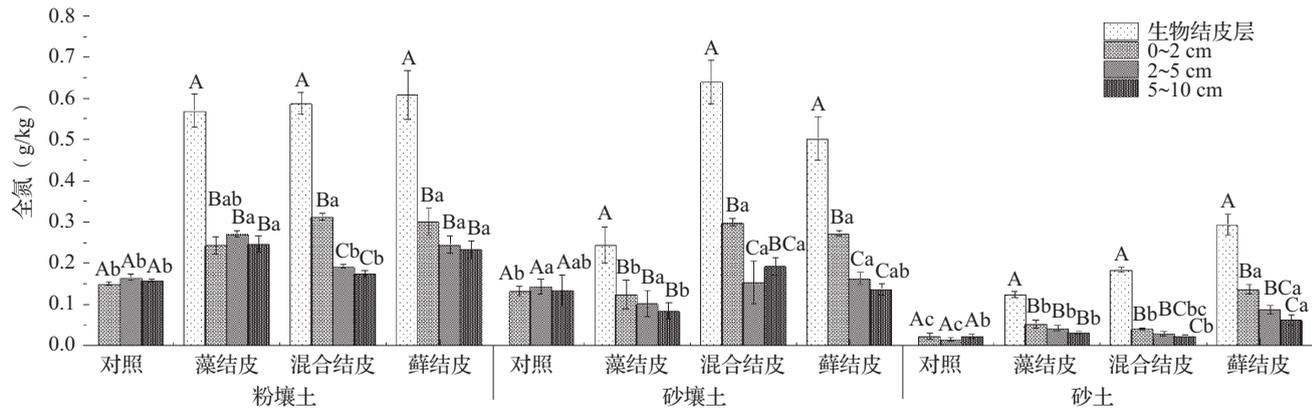


图3 生物结皮对不同土层土壤全氮的影响

2.5 土壤质地和生物结皮类型对土壤属性的交互效应

由表5可知,土壤质地、生物结皮类型均对土壤容重、有机质及全氮有极显著影响 ($P<0.01$),且存在显著的交互效应。各因素对土壤容重变异的贡献大小表现为土壤质地>生物结皮类型>二者交互作用,各因素对土壤有机质和全氮含量变异的贡献则表现为生物结皮类型>土壤质地>土壤质地×生物结皮类型,而黏砂比(土壤颗粒组成)主要取决于土壤质地的变化(偏 $\eta^2=0.819$),

远大于生物结皮类型及其与土壤质地的交互作用。

2.6 不同土壤质地生物结皮作用指数

粉壤土上藻结皮、混合结皮及藓结皮对土壤属性的作用指数分别为98%、161%及186%,砂壤土上作用指数分别为47%、244%及169%,砂土上作用指数则分别为455%、606%及834%(图4)。砂土上藻结皮、混合结皮及藓结皮对土壤属性的作用指数分别是粉壤土生物结皮的4.6、3.8及4.5倍,是砂壤土生物结皮的9.7、2.5及4.9倍。

表 5 土壤质地和生物结皮类型对土壤粘砂比、容重、有机质及全氮的交互效应

指标	因素	F	P	偏 η^2	R ²
黏砂比	土壤质地	104.301	0.000	0.819	0.794
	生物结皮类型	1.174	0.330	0.071	
	土壤质地 × 生物结皮类型	2.135	0.067	0.218	
容重	土壤质地	178.268	0.000	0.886	0.917
	生物结皮类型	65.992	0.000	0.811	
	土壤质地 × 生物结皮类型	14.511	0.000	0.654	
有机质	土壤质地	17.920	0.000	0.438	0.780
	生物结皮类型	52.236	0.000	0.773	
	土壤质地 × 生物结皮类型	2.756	0.023	0.264	
全氮	土壤质地	62.969	0.000	0.732	0.846
	生物结皮类型	50.042	0.000	0.765	
	土壤质地 × 生物结皮类型	6.074	0.000	0.442	

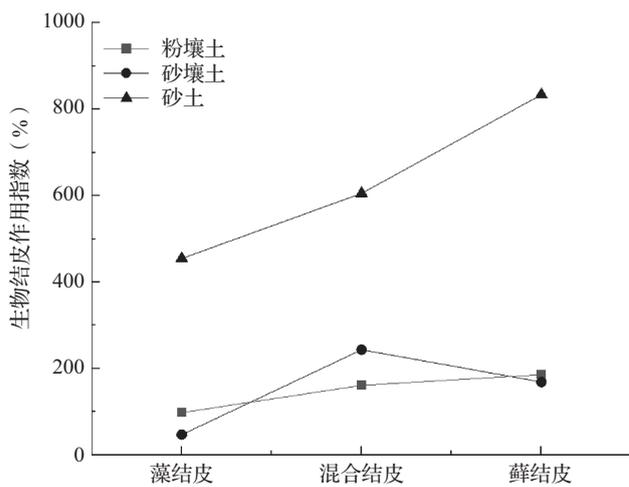


图 4 不同土壤质地生物结皮作用指数

3 讨论

生物结皮是干旱、半干旱地区地表重要的覆被物，在联系干旱、半干旱景观地表生物与非生物成分中起着无法替代的作用^[23]，显著改善土壤理化属性，如细化土壤、降低土壤容重、提高土壤养分等。本研究结果发现土壤质地会影响生物结皮对土壤属性的作用程度。

3.1 生物结皮对不同质地土壤物理性质的影响

本研究表明粉壤土及砂壤土各类型生物结皮对土壤颗粒组成无显著影响，而砂土生物结皮对土壤颗粒组成影响显著，肖波等^[17]对两种藓结皮影响土壤颗粒组成的研究与本研究结果一致。砂土上，不同类型的生物结皮对土壤颗粒组成的影响程

度及深度不同，混合结皮对土壤颗粒组成的影响程度较大，显著提高了黏粒、细粉粒及粗粉粒的含量，藓结皮影响深度较深，为生物结皮层下 5 cm。Zhao 等^[24]在沙区的研究也表明藓结皮细化土壤作用深度可达 5 cm，可能是由于植被盖度与生物结皮盖度是此消彼长的关系^[25]。砂土区植被盖度较低（本研究中调查的植被平均盖度为 26%），生物结皮成为砂土上重要的地被物，本研究调查结果显示砂土混合结皮盖度较高，藓结皮厚度较大，因此砂土混合结皮对土壤颗粒组成影响程度更大，而藓结皮影响深度更深。另外，许多研究发现，不同土壤粒级中，生物结皮增加了粉粒含量，降低了砂粒含量^[26-27]，在此基础上，本研究发现生物结皮对粗粉粒作用最大，显著增加了粗粉粒含量，而段争虎等^[28]研究表明粗粉粒含量是生物结皮形成的关键，佐证了本研究结果。土壤质地和生物结皮类型对土壤颗粒组成的交互效应表明土壤颗粒组成的变异主要取决于土壤质地，而土壤质地的土壤颗粒组成是在一定范围内变化的，因此生物结皮在一定程度上能够细化土壤颗粒，但很难改变土壤质地。在粉壤土及砂壤土质地上，粘粒含量及粉粒含量较高，因此生物结皮细化土壤作用不显著，而在细颗粒贫瘠的砂土上，由于生物结皮广泛发育，且具有显著的纳尘固土效应^[29]及水土保持功能^[30]，因此生物结皮在砂土上对土壤颗粒组成影响更显著。

不同土壤质地的生物结皮均能降低土壤容重，

不同类型的生物结皮表现为藻结皮 > 混合结皮 > 藓结皮, 其中砂土藓结皮降低土壤容重程度最大, 降低了 17%。可能是由于: (1) 随着生物结皮的发育, 生物结皮中生物成分增加, 由非生物成分主导转变为生物成分主导, 从而使得土壤容重降低^[31]; (2) 从藻结皮到藓结皮, 土壤有机质不断积累, 随着土壤有机质含量增加及土壤结构的改善, 土壤容重相应减少^[16]。

3.2 生物结皮对不同质地土壤化学性质的影响

生物结皮通过固定大气中的碳^[32]、分泌胞外聚合物增加土壤碳库^[33]、调节氮输入和损失、捕获细颗粒及减少侵蚀等增加土壤养分含量。本研究结果表明, 生物结皮覆盖对土壤有机质及全氮有显著影响, 其影响程度和深度因土壤质地及生物结皮类型而异。砂土生物结皮对土壤有机质及全氮含量的影响程度均大于其他两种质地, 且藓结皮在砂土上的影响程度及深度最大。藓结皮是生物结皮发育的高级阶段, Chamizo 等^[34]研究表明, 生物结皮越发达, 对土壤属性的影响越大, 本研究中藓结皮影响深度可达 10 cm, 王芳芳等^[35]对风沙土和黄绵土生物结皮影响土壤养分的研究同本研究结果一致。

生物结皮类型、土壤质地及其交互效应均对土壤有机质及全氮有显著影响, 但其对变异的贡献表现为生物结皮类型 > 土壤质地 > 土壤质地 × 生物结皮类型。可能是由于粘质土壤养分含量高于砂质土壤, 而砂质土壤由于水热及养分等条件较差, 对于碳氮等养分的积累更敏感, 且生物结皮在砂土上盖度更高, Issa 等^[36]研究表明高盖度生物结皮中的胞外聚合物含量为低盖度的 1.5 ~ 3 倍, 因此与其他土壤质地相比, 生物结皮对土壤有机质及全氮的影响在砂质土上尤为显著。

本研究借鉴了土壤恢复指数, 提出生物结皮作用指数, 综合比较不同土壤质地上不同类型的生物结皮对土壤属性的影响, 研究结果表明砂土生物结皮对土壤属性的影响远大于其他两种质地, 且随着生物结皮向高级阶段藓结皮演替, 其对土壤属性的影响不断增大, 砂土藓结皮作用指数约为藻结皮 2 倍。砂土区生态环境脆弱, 维管植物生长受限, 而生物结皮在砂土上广泛分布, 即使生物结皮贡献低于维管植物的贡献, 但由于高覆盖使其贡献显著^[37], 特别是在维管植物贡献有限的生态系统中, 如砂土上。由此可见, 虽然生物结皮对不同质地土

壤理化属性均有改善, 但在砂土上较其他土壤质地影响更显著, 证实了砂土生物结皮对于改善生态环境及维持生态系统的稳定起着不可或缺的作用, 为后续深化生物结皮生态功能及生态系统可持续管理提供理论依据。

4 结论

(1) 粉壤土和砂壤土上生物结皮对土壤颗粒组成无明显影响, 而砂土生物结皮显著提高了黏粒、细粉粒及粗粉粒的含量。其中, 生物结皮对砂土粗粉粒含量的作用最大; 不同类型的生物结皮中, 混合结皮对砂土颗粒组成的总体影响最大, 藓结皮影响深度最深, 为生物结皮层下 5 cm。

(2) 不同土壤质地的生物结皮均能降低土壤容重, 其中砂土藓结皮降低土壤容重程度最大, 降低了 17%。

(3) 不同土壤质地的生物结皮均能不同程度的提高土壤有机质及全氮含量, 其中砂土生物结皮影响程度最大, 且藓结皮影响程度最显著, 其有机质含量及全氮含量是对照的 17.6 和 13.5 倍, 影响深度为生物结皮层下 10 cm。

(4) 土壤质地和生物结皮类型对土壤容重、土壤有机质及全氮存在显著交互效应, 且单一作用均大于二者交互作用。

(5) 砂土生物结皮对土壤属性影响最大, 且藓结皮影响程度更显著。

综上所述, 黄土高原砂土生物结皮对土壤属性的影响程度最大, 且藓结皮对土壤属性具有更明显的改善效果。研究结果可为生物结皮科学管理及利用生物结皮进行生态环境建设提供理论依据。

参考文献:

- [1] Weber B, Belnap J, Büdel B, et al. What is a biocrust? A refined, contemporary definition for a broadening research community [J]. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 2022, 97 (5): 1768-1785.
- [2] Yang K, Zhao Y G, Gao L Q. Biocrust succession improves soil aggregate stability of subsurface after "Grain for Green" project in the hilly Loess Plateau, China [J]. *Soil & Tillage Research*, 2022, 217: 105290.
- [3] Belnap J, Büdel B. Biological soil crusts as soil stabilizers [M] // Weber B, Büdel B, Belnap J. *Biological soil crusts: an organizing principle in drylands*. Berlin: Springer, 2016.
- [4] 高丽倩, 赵允格, 秦宁强, 等. 黄土丘陵区生物结皮对土壤物理属性的影响 [J]. *自然资源学报*, 2012, 27 (8):

- 1316-1326.
- [5] 赵哈林, 郭轶瑞, 周瑞莲, 等. 植被覆盖对科尔沁沙地土壤生物结皮及其下层土壤理化特性的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(7): 1657-1663.
- [6] Gold W G, Bliss L C. Water limitations and plant community development in a polar desert[J]. *Ecology*, 1995, 76(5): 1558-1568.
- [7] 胡尧, 侯雨乐, 李懿. 红壤生物结皮对土壤侵蚀及养分的影响[J]. 贵州农业科学, 2015, 43(5): 114-119.
- [8] Bu C F, Wu S F, Xie Y S, et al. The study of biological soil crusts: hotspots and prospects[J]. *Clean-Soil Air Water*, 2013, 41(9): 899-906.
- [9] Jafari M, Tavili A, Zargham N, et al. Comparing some properties of crusted and uncrusted soils in Alagol region of Iran[J]. *Pakistan Journal of Nutrition*, 2004, 3: 273-277.
- [10] Xiao B, Bowker M A, Zhao Y G, et al. Biocrusts: engineers and architects of surface soil properties, functions, and processes in dryland ecosystems[J]. *Geoderma*, 2022, 424: 116015.
- [11] 吴玉环, 高谦, 程国栋. 生物土壤结皮的生态功能[J]. 生态学杂志, 2002, 21(4): 41-45.
- [12] Maestre F T, Bowker M A, Cantón Y, et al. Ecology and functional roles of biological soil crusts in semi-arid ecosystems of Spain[J]. *Journal of Arid Environments*, 2011, 75(12): 1282-1291.
- [13] 崔燕, 吕贻忠, 李保国. 鄂尔多斯沙地土壤生物结皮的理化性质[J]. 土壤, 2004, 36(2): 197-202.
- [14] 赵允格, 许明祥, 王全九, 等. 黄土丘陵区退耕地生物结皮理化性状初报[J]. 应用生态学报, 2006, 17(8): 1429-1434.
- [15] Kakeh J, Gorji M, Sohrabi M, et al. Effects of biological soil crusts on some physicochemical characteristics of rangeland soils of Alagol, Turkmen Sahra, NE Iran[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 181(1): 152-159.
- [16] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [17] 肖波, 赵允格, 邵明安. 陕北水蚀风蚀交错区两种生物结皮对土壤理化性质的影响[J]. 生态学报, 2007, 27(11): 4662-4670.
- [18] 谷康民, 赵允格, 高丽倩, 等. 黄土高原生物结皮对SCS-CN模型初损率的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(12): 4186-4194.
- [19] 潘悦. 基于空间自相关分析的靖边县耕地保护分区研究[D]. 西安: 长安大学, 2021.
- [20] 朱启明, 王宁, 刘俊娥, 等. 陕北生态脆弱区土壤水蚀变化及驱动因子-以榆林市为例[J]. 水土保持学报, 2023, 30(5): 41-51, 60.
- [21] 范文波, 李小娟. 涂膜法测定黄土结皮容重[J]. 山西水土保持科技, 2001(3): 9-10.
- [22] 董莉丽, 郑粉莉. 黄土丘陵沟壑区土地利用和植被类型对土壤质量的影响[J]. 兰州大学学报, 2010, 46(2): 39-44.
- [23] 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.
- [24] Zhao H L, Guo Y R, Zhou R L, et al. Biological soil crust and surface soil properties in different vegetation types of Horqin sand land, China[J]. *Catena*, 2010, 82(2): 70-76.
- [25] 王一贺, 赵允格, 李林, 等. 黄土高原不同降雨量带退耕地植被-生物结皮的分布格局[J]. 生态学报, 2016, 36(2): 377-386.
- [26] 董智今, 张呈春, 展秀丽. 宁夏河东沙地生物土壤结皮对土壤性质及入渗过程的影响[J]. 生态学报, 2022, 42(17): 7128-7136.
- [27] 明姣, 盛煜, 金会军, 等. 高寒冻土区生物结皮对土壤理化属性的影响[J]. 冰川冻土, 2021, 43(2): 601-609.
- [28] 段争虎, 刘新民, 屈建军. 沙坡头地区土壤结皮形成机理的研究[J]. 干旱区研究, 1996, 13(2): 31-36.
- [29] 曹允淞, 肖波, 李胜龙, 等. 黄土高原生物结皮的纳尘与固土效应及其影响因素[J]. 土壤学报, 2023, 60(6): 1610-1625.
- [30] 卜楠. 陕北黄土区生物土壤结皮水土保持功能研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2009.
- [31] 尹瑞平, 吴永胜, 张欣, 等. 毛乌素沙地南缘沙丘生物结皮及下层沉积物理化性质的研究[J]. 水土保持学报, 2013, 27(3): 120-124.
- [32] Beymer R J, Klopatek J M. Potential contribution of carbon by microphytic crusts in pinyon-juniper woodlands[J]. *Arid Land Research and Management*, 1991, 5(3): 187-198.
- [33] Mager D M, Thomas A D. Extracellular polysaccharides from cyanobacterial soil crusts: a review of their role in dryland soil processes[J]. *Journal of Arid Environments*, 2011, 75(2): 91-97.
- [34] Chamizo S, Canton Y, Miralles I, et al. Biological soil crust development affects physicochemical characteristics of soil surface in semiarid ecosystems[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2012, 49: 96-105.
- [35] 王芳芳, 肖波, 李胜龙, 等. 黄土高原生物结皮对土壤养分的表层聚集与吸附固持效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(9): 1592-1602.
- [36] Issa O M, Bissonnais Y L, Défarge C, et al. Role of a cyanobacterial cover on structural stability of sandy soils in the Sahelian part of western Niger[J]. *Geoderma*, 2001, 101(3-4): 15-30.
- [37] Eldridge D J, Guirado E, Reich P B, et al. The global contribution of soil mosses to ecosystem services[J]. *Nature Geoscience*, 2023, 16(5): 430-438.

Soil texture affects the effect degree of biological soil crusts on soil properties

ZHANG Wen-fang¹, GAO Li-qian^{1, 2*}, OUYANG Wen-feng¹, SUN Hui³, ZHAO Yun-ge^{1, 2} [1. College of Soil and Water Conservation Science and Engineering (Institute of Soil and Water Conservation), Northwest A & F University, Xianyang Shaanxi 712100; 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, Xianyang Shaanxi 712100; 3. College of Forestry, Northwest A & F University, Xianyang Shaanxi 712100]

Abstract: Biological soil crusts (biocrusts) are widely distributed in arid and semi-arid regions, and have a significant impact on topsoil properties. However, it is still unclear whether the effects of different types or development stages of biocrusts on soil properties under different soil texture conditions, and whether biocrusts interact with soil texture. In this study, different types of biocrusts (algal crusts, mixed crusts and moss crusts) developed on silty loam, sandy loam and sandy soils on the Loess Plateau were used as research objects, and the effects of different types of biocrusts on soil properties under different soil texture conditions were compared, and the results showed that: (1) Biocrusts on silty loam and sandy loam had no significant effect on soil particle composition, while biocrusts on sandy soil significantly increased the content of clay, fine powder and coarse powder. Among them, biocrusts had the greatest effect on the content of coarse powder on sandy soil. Among the different types of biocrusts, mixed crusts had the greatest effect on the composition of sand particles, and moss crusts had the deepest influence depth, which was 5 cm below the biocrusts. (2) Biocrusts with different soil textures could reduce soil bulk density, and moss crusts on sandy soil had the greatest reduction in soil bulk density, reducing it by 17%. (3) Biocrusts of the three soil textures could increase the soil organic matter and total nitrogen content to different degrees, among which the biocrusts of sandy soil had the greatest degree of influence, and the influence degree of moss crusts was the most significant, and the organic matter content and total nitrogen content were 17.6 and 13.5 times that of the control, and the depth of influence was 10 cm below the biocrusts. (4) There were significant interaction effects between soil texture and biocrusts type on soil bulk density, soil organic matter and total nitrogen, and the single effect was greater than the interaction between the two. (5) Biocrusts on sandy soil had the greatest influence on soil properties, and moss crusts had a more significant impact. In summary, biocrusts of sandy soil on the Loess Plateau had the greatest influence on soil properties, and the moss crusts had a more obvious effect on soil properties. The research results can provide a theoretical basis for deepening the ecological function of biocrusts and sustainable ecosystem management.

Key words: biological soil crusts; soil texture; soil physicochemical properties; the Loess Plateau