

不同土壤和植被生境下生物结皮对土壤性质的影响

张健^{1,2}, 徐明¹, 邹晓¹, 许明祥²

(1. 贵州大学生命科学学院, 真菌资源研究所, 山地植物资源保护与种质创新教育部重点实验室, 贵阳 550025;
2. 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 生物结皮作为干旱和半干旱地区重要的生物组分, 对该区域生态过程中的生物地球化学循环产生重要的影响。以陕北水蚀风蚀交错区的生物结皮为研究对象, 调查该区域 2 种土壤(黄绵土和风沙土)和 3 种植被(长芒草、油蒿和小叶杨群落, 以农田为对照)生境下生物结皮对土壤性质的影响。结果表明: (1) 结皮层与结皮下层 0—10 cm 各土壤性质指标的变化存在显著差异($p < 0.05$); (2) 3 种植物群落生境下结皮层各土壤性质指标的变化差异不显著, 表明结皮层内生物结皮生态功能作用是结皮层土壤性质的主导影响因素; (3) 3 种植物群落生境 0—10 cm 土层的土壤性质如 C、N、C/N、Mg、Mn、 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 等指标变化存在显著差异($p < 0.05$), 但风沙土油蒿和小叶杨群落生境下所有调查的土壤性质指标间均无显著差异, 这表明样地间 0—10 cm 土层土壤性质差异的主要是受到土壤类型自身特性的影响; (4) 不同植被和土壤生境下的结皮层和 0—10 cm 样品间的空间排序分异明显, 表明土壤性质间的差异依赖于生境下多因素的综合作用, 生物结皮、土壤类型和植被是预测该区域表层土壤空间异质性的重要因素。

关键词: 水蚀风蚀交错区; 生物结皮; 土壤类型; 植被类型; 土壤性质

中图分类号: S152 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2019)05-0323-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.05.047

Effects of Biological Crusts on Soil Properties Under Different Soil and Vegetation Habitats

ZHANG Jian^{1,2}, XU Ming¹, ZOU Xiao¹, XU Mingxiang²

(1. Key Laboratory of Plant Resource Conservation and Germplasm Innovation in Mountainous Region (Ministry of Education), College of Life Science, Guizhou University, Guiyang 550025;

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)

Abstract: As an important biological component in arid and semi-arid regions, biological soil crusts (BSCs) have an important influence on biogeochemical cycle in the ecological process of the region. The effects of biological crust on soil properties under two soil types (loess soil and aeolian sand soil) and three vegetation communities (*Stipa bungeana*, *Artemisia ordosica* and *Populus simonii* communities, farmland as the control) were studied. The results showed that: (1) There was a significant difference among soil physical and chemical properties between BSC layer and 0—10 cm layer ($p < 0.05$). (2) There was no significant difference in soil properties under the three plant community habitats. (3) Soil properties, such as C, N, C/N, Mg, Mn, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$, and so on, showed the significant differences in the 0—10 cm soil layer under the three plant community habitats, but there no significant difference in soil properties under aeolian sand soil between *A. ordosica* community and *P. simonii* community, which indicated that the difference of soil properties in the 0—10 cm soil layer among sampling sites was mainly affected by the characteristics of the soil type itself. (4) The spatial ordering and variations between BSC layer and 0—10 cm layer samples under different vegetation community and soil type habitats were obvious, indicating that the differences in soil properties were dependent on the comprehensive effect of multiple factors in the habitat. Soil type, vegetation and biological crust were important factors for the prediction of spatial heterogeneity of surface soil in this region.

收稿日期: 2019-03-31

资助项目: 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室开放研究基金项目(A314021402-1715); 国家自然科学基金项目(31660150, 31860037); 贵州省科技厅项目(黔科合基础[2017]1059号, 黔科合支撑[2018]2773号, 黔科合平台人才[2017]5788号); 贵州省生物学一流学科建设项目(GNYL[2017]009)

第一作者: 张健(1980—), 男, 博士, 副教授, 主要从事微生物生态研究。E-mail: zhangjian12102@163.com

Keywords: wind-water erosion crisscross region; biological soil crusts; soil type; vegetation community; soil properties

生物土壤结皮(biological soil crusts,BSCs;简称生物结皮)是干旱半干旱生态系统中广泛分布的重要生物资源^[1],因其具有复杂的抗逆性和多生态功能性的生物组成,以及其所处的土壤系统与大气系统进行物质能量交换的一个重要的“生物界面”^[2],其在该区域的生物地球化学循环过程中发挥着重要作用^[3-6]。黄土高原的陕北水蚀风蚀交错区自然地理环境相对恶劣,加之长期受人类活动(农牧、采樵、矿产开发等)影响,是我国生态环境最脆弱的地区之一。生物结皮属该区域重要的生物组分,对该区域的生态过程具有重要的影响。关于该区域生物结皮的研究已有一些报道,如生物结皮的组成结构^[7]、空间分布^[8-10]、光谱特征^[11]、抗侵蚀特性^[12-14]、土壤作用效应^[15-16]等方面进行研究,但从该区域土壤类型和植物群落复合作用生境下生物结皮对土壤性质影响方面的研究却鲜有报道。本文通过对陕北水蚀风蚀交错区小流域内土壤类型和植被群落自然组合样地为“天然的试验材料”,探讨生物结皮生长在不同土壤和植被生境下,对土壤性质影响的特征,为该区域生物结皮生态服务功能研究和土壤质量评价等方面提供科学依据。

1 研究区概况

六道沟流域位于陕北神木县以西 12 km 处(东经 110°21′—110°23′,北纬 38°46′—38°51′),流域面积为 6.89 km²。主沟道呈南北走向,属窟野河二级支流。整个流域可分为东西两半,西侧是以风沙土为主多为固定沙丘,东侧大部分为黄土覆盖,二者分别约占流域总面积的 13.5%和 86.5%。流域内沟壑密度 6.45 km/km²(长度大于 100 m 沟道),海拔 1 094~1 274 m,多年平均降

水量约为 430 mm,年潜在蒸发量超过 1 000 mm,剧烈的水蚀与风蚀导致生态环境严重退化,土地沙漠化风险增高。该流域位于黄土高原向毛乌素沙地过渡区,属森林草原向典型干草原过渡的中间地带,也是我国北方农牧业过渡地区,其自然条件的过渡特征十分明显^[17]。流域内无剧烈干扰的土地上均有不同程度的生物结皮发育,藓结皮占绝对优势,芦荟藓(*Aloina rigida*)和短喙芦荟藓(*A. brevirostris*)为先锋优势种,发育稳定的生物结皮以尖叶对齿藓(*Didymodon constrictus*)为优势种^[7]。

2 材料与方法

2.1 试验设计与样地调查

试验于 2013 年 5 月中旬在神木县六道沟小流域内选取了长芒草(*Stipa bungeana* Trin.,Sb)、油蒿(*Artemisia ordosica* Krasch.,Ao)、小叶杨(*Populus simonii* Carr.,Ps)3 种典型植被群落,以农田(Farmland,Fl)为对照样地;其中长芒草和农田的土壤类型为黄土,油蒿和小叶杨的土壤类型为固定沙地的风沙土。在每块样地内,随机选取植被长势良好且具有代表性的 10 个 50 cm×50 cm 样方法进行调查。调查内容包括生物结皮组成、分布、厚度、生物结皮退化度等生物结皮指标,植物的种类、个体数、盖度、高度及枯落物的盖度、厚度、生物量等植被指标(表 1)。在每个调查样地内随机选取 10 个土壤采样点,取样点主要分布在植株间空地和植株冠幅投影的边缘到中间位置,每个土壤采样点分结皮层和结皮下层 0—10 cm 采集 10 点混合土样,每个样地共采集 2 个样品(出于农耕地受到每年耕作翻地的影响的考虑,对照样地仅采集表层 0—1 cm 土层土壤),共采集 26 个样品。

表 1 样地基本信息

样地	东经	北纬	海拔/ m	坡向/ (°)	坡度/ (°)	土壤	主要 植被	植被 盖度/%	结皮 盖度/%
Fl1	110°21′31.3″	38°47′44.4″	1164	0	0		玉米		
Fl2	110°21′43.1″	38°47′39.7″	1188	332	12		玉米		
Sb1	110°21′54.5″	38°47′22.0″	1222	362	13	黄土	长芒草、茵陈蒿	60	84
Sb2	110°21′52.6″	38°47′22.1″	1217	5	20		长芒草、茵陈蒿	65	82
Sb3	110°21′51.8″	38°47′21.1″	1220	227	20		长芒草、早熟禾	75	65
Ao1	110°21′20.4″	38°47′43.8″	1184	218	16		油蒿、砂珍棘豆	65	70
Ao2	110°21′21.4″	38°47′44.2″	1187	240	15		油蒿、砂珍棘豆	70	70
Ao3	110°21′23.2″	38°47′44.5″	1184	155	15		油蒿、砂珍棘豆	75	75
Ao4	110°21′13.6″	38°47′42.8″	1181	200	15		油蒿、砂珍棘豆	70	70
Ao5	110°21′35.0″	38°47′49.1″	1177	177	10	风沙土	油蒿、砂珍棘豆	70	65
Ao6	110°21′43.3″	38°47′0.30″	1210	124	13		油蒿、砂珍棘豆	80	75
Ps1	110°21′28.4″	38°47′55.4″	1192	230	15		小叶杨、油蒿	75	82
Ps2	110°21′44.4″	38°47′95.3″	1194	85	15		小叶杨、油蒿	75	85
Ps3	110°21′32.3″	38°47′54.3″	1181	140	5		小叶杨、油蒿	75	86

注:长芒草(*Stipa bungeana* Trin.),茵陈蒿(*Artemisia capillaries* Thunb.),油蒿(*A. ordosica* Krasch.),砂珍棘豆(*Oxytropis psammocharis* Hance),小叶杨(*Populus simonii* Carr.),玉米(*Zea mays* L.)。

2.2 土壤样品理化分析

碳和氮元素采用碳氮元素分析仪(SUMIGRAPH NC-900,Sumika Chemical Analysis Service, Ltd.)测定;电导率(Electrical conductivity, *EC*)采用水土比 1:5 电极法测定;pH 采用水土比 1:2.5 电极法测定;土壤颗粒组成分析采用 MS2000 型激光粒度测量仪(英国马尔文公司,Malvern Mastersizer 2000 particle size analyzer)测定,该仪器测量范围 0.02~2 000 μm,重复测量误差<2%。水溶性金属离子 Na、K、Mg、Ca、Fe、Mn 测定采用去离子水浸提(水土比 1:5),浸提液经 0.45 μm 水系滤膜过滤,原子吸收分光光度计测定(日本岛津公司,AA6800F/GFA-EX7);叶绿素组分测定采用 95%酒精(水土比 1:9)浸提,浸提液经 0.45 μm 滤膜过滤,采用岛津 UV2600 紫外分光光度计测定光合色素质量浓度,95%乙醇作为空白,分别测定浸提液在 470,649,665 nm 波长下的吸收值(Abs 值),利用公式(1)~公式(4)分别计算叶绿素 a(Chl-a)、叶绿素 b(Chl-b)、类胡萝卜素(Caro),光合色素含量(μg/g)^[18],计算公式为:

$$\rho_{\text{Chl-a}} = 13.95 A_{665\text{nm}} - 6.88 A_{649\text{nm}} \tag{1}$$

$$\rho_{\text{Chl-b}} = 24.96 A_{649\text{nm}} - 7.32 A_{665\text{nm}} \tag{2}$$

$$\rho_{\text{Caro}} = \frac{1000 A_{470\text{nm}} - 2.05 \rho_{\text{Chl-a}} - 114.8 \rho_{\text{Chl-b}}}{245} \tag{3}$$

$$\text{光合色素含量}(\text{mg/g}) = \rho \times \frac{V}{1000} \times \frac{N}{m} \times 1000 \tag{4}$$

式中: ρ 为浸提液中色素浓度含量(mg/L); V 为浸提液体积(mL); N 为稀释倍数; m 为样品重量(g)。

稳定性同位素碳($\delta^{13}\text{C}$)和氮($\delta^{15}\text{N}$)测定采用元素分析仪和同位素质谱联用仪(Delta V Advantage, Thermo-Fisher Scientific, 德国)。同位素比率用样品的同位素比值相对于标准样品的同位素比值,计算公式^[19]为:

$$\delta^{13}\text{C}(\text{‰}) = [(R_{\text{样品}} - R_{\text{标准}}) / R_{\text{标准}}] \times 1000 \tag{5}$$

$$\delta^{15}\text{N}(\text{‰}) = [(R_{\text{样品}} - R_{\text{标准}}) / R_{\text{标准}}] \times 1000 \tag{6}$$

式中: $R_{\text{样品}}$ 和 $R_{\text{标准}}$ 分别为样品和标准的 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 和

$^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ 的自然丰度比值,其中碳同位素标准采用国际通用标准样品美国南卡罗来纳州碳酸盐陨石 PDB (Pee Dee Belemnite),氮同位素标准采用国际通用标准样品空气中氮气。

2.3 数据统计

运用 SPSS 22.0 软件单因素 ANOVA 对土壤性质指标进行单因素方差分析和 LSD 多重比较;采用配对样本 T 检验进行结皮层与 0-10 cm 土层间的土壤理化性质差异显著性检验;采用独立样本 T 检验对不同植被或不同土壤类型间土壤理化性质差异显著性检验。应用 R 3.5.0 语言的 Vegan 软件包进行基于不同样品土壤性质的冗余分析(Redundancy Analysis,RDA),对样品进行空间排序及各指标相关显著性检验,并运用 SigmaPlot 12.5 软件进行作图。

3 结果与分析

3.1 不同土壤和植被生境下生物结皮土壤指标的统计分析

研究区域不同土壤和植物群落生境下生物结皮土壤性质各指标变化存在一定差异,统计分析结果表明,这种差异是受到土壤本身性质差异的显著影响;同时,生物结皮可显著地改善结皮层的土壤性质(表 2)。独立样本 T 检验结果表明,黄土区的长芒草群落(Sb)与风沙土区的油蒿群落(Ao)和小叶杨群落(Ps)间土壤性质的土壤颗粒组成、土壤碳氮元素的总量、碳氮比、以及 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 均有极显著差异,结果一方面反映出土壤类型是土壤指标间差异的重要背景因素,同时,生物结皮的生态功能也可显著影响不同土壤类型的土壤性质,如相对于 0-10 cm 土壤理化性质的极显著差异($p<0.05$),Sb 与 Ao 在结皮层的黏粒含量,土壤的 C、N、C/N 及 $\delta^{15}\text{N}$,水溶性金属元素 Mg 间差异不显著,这表明生物结皮对 2 种土壤性质的改善作用显著,可消除土壤类型本身性质的背景差异。

表 2 不同植物群落和土壤类型生境下生物结皮土壤指标的独立样本和配对样本 T 检验

统计方法	分组	土层深度/cm	Clay	Salt	Sand	EC	pH	C	N	C/N	Na	K	Mg	Ca	Mn	Fe	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{15}\text{N}$
独立样本 T 检验	Sb vs. Ao	结皮层	0.094	<u>0.006</u>	<u>0.012</u>	0.096	0.209	0.107	0.326	0.364	0.513	0.809	0.270	0.200	0.055	<u>0.028</u>	<u>0.002</u>	0.096
		0-10 cm	<u>0.035</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	0.084	0.392	<u>0</u>	<u>0.027</u>	<u>0.003</u>	0.585	0.793	<u>0.021</u>	0.172	0.108	<u>0.019</u>	<u>0</u>	<u>0</u>
	Sb vs. Ps	结皮层	<u>0.013</u>	<u>0.025</u>	<u>0.014</u>	0.453	0.070	0.549	0.382	0.542	0.935	0.937	0.097	0.127	0.139	0.665	0.053	<u>0.001</u>
		0-10	<u>0.003</u>	<u>0.001</u>	<u>0</u>	<u>0.047</u>	<u>0.174</u>	<u>0</u>	0.148	<u>0.025</u>	0.271	0.724	<u>0.029</u>	0.614	0.321	0.061	<u>0</u>	<u>0</u>
配对样本 T 检验	Ao vs. Ps	结皮层	0.310	0.678	0.611	0.450	0.935	0.093	0.071	0.819	0.405	0.750	0.445	0.704	0.563	<u>0.049</u>	0.216	0.724
		0-10	0.380	0.667	0.372	0.998	0.630	0.429	0.958	0.299	0.439	0.543	0.385	0.228	0.232	0.605	0.868	0.063
		结皮层 vs. 0-10	0.421	<u>0.001</u>	<u>0.007</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	0.214	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>0</u>

注:带下划线的 T 检验结果的显著水平 $p<0.05$ 。

3.2 不同土壤和植被生境下生物结皮土壤叶绿素含量和粒径组成的变化

不同植被群落生境下生物结皮土壤叶绿素含量和粒径组成都存在明显差异;农田和生物结皮下层 0—10 cm 的土壤未检测到叶绿素含量,不同植被群落生境下生物结皮结皮层的叶绿素含量变化范围在 14.0~61.7 μg/g,呈现出长芒草群落((44.8±15.8)

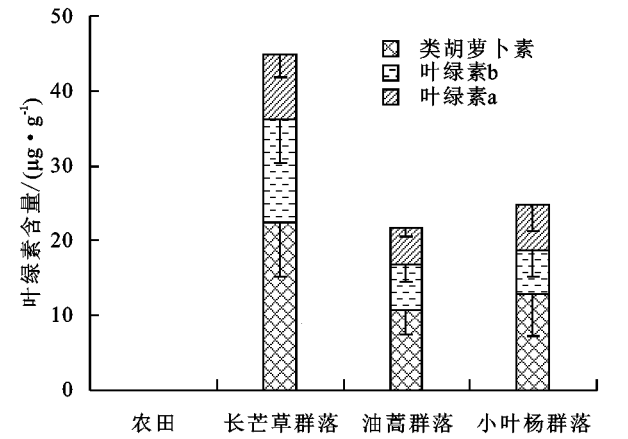


图 1 不同植被群落生境下生物结皮的叶绿素含量和土壤颗粒组成

3.3 不同土壤和植被生境下生物结皮土壤化学性质的变化

不同植被群落生境下生物结皮的结皮层与 0—10 cm 土层间各土壤化学性质指标均存在显著差异 ($p<0.05$),同一土层不同植物群落间各土壤化学指标变化差异主要体现在生物结皮对结皮层的影响以

μg/g)>小叶杨群落((24.8±12.8) μg/g)>油蒿群落((21.8±6.3) μg/g)(图 1)。由于对照(农田)和长芒草群落的土壤类型均为黄土,而小叶杨群落和油蒿群落的土壤类型均为风沙土,不同植被群落生境下生物结皮土壤粒径组成呈现出明显差异;总体上不同植被群落生境下生物结皮结皮层的土壤黏粒和粉粒含量高于结皮下层 0—10 cm。

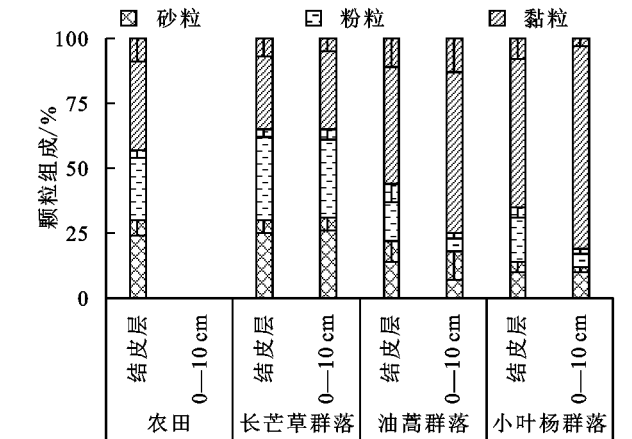


表 3 不同土壤和植被生境下生物结皮土壤化学指标的变化

指标	土层深度/cm	农田	长芒草群落	油蒿群落	小叶杨群落
EC (mS · M ⁻¹)	结皮层	14.75±5.16a	26.47±2.80b	21.48±3.97ab	23.85±4.69b
	0—10		7.06±0.05	5.78±1.07	5.78±0.78
pH	结皮层	8.57±0.31a	7.47±0.13b	7.29±0.20b	7.28±0.02b
	0—10		8.87±0.03	8.39±0.89	8.08±0.83
C (g · kg ⁻¹)	结皮层	10.52±5.46a	34.76±3.72b	28.60±5.06b	39.93±9.17b
	0—10		7.86±0.54a	1.67±0.44b	1.38±0.58b
N (g · kg ⁻¹)	结皮层	1.32±0.82a	2.46±0.41ab	2.20±0.33ab	2.99±0.84b
	0—10		0.90±0.42a	0.46±0.03 b	0.46±0.09b
C/N	结皮层	8.27±1.03a	14.31±2.90b	12.95±1.46 b	13.17±0.67b
	0—10		9.64±3.27a	3.64±1.01b	2.90±0.66b

注:表中数据为平均值±标准差;同一行内不同小写字母表示不同样地间存在显著性差异($p<0.05$)。下同。

3.4 不同植被群落生境下生物结皮土壤水溶性金属离子含量的变化

不同植被群落生境下生物结皮的结皮层与 0—10 cm 土层间各土壤水溶性金属离子含量均存在显著差异 ($p<0.05$),同一土层不同植物群落间各土壤水溶性金属离子含量变化存在一定差异(表 4)。其中,生物结皮层水溶性金属离子 Na、K、Mg 和 Ca 的结皮含量明显高于 0—10 cm 土层;但水溶性金属离子 Fe 则表现出 0—10 cm 土层高于结皮层,水溶性金属离子 Mn 随不同群落生境下变化规律不同一致。

3.5 不同土壤和植被生境下生物结皮土壤 δ¹³C、δ¹⁵N 的变化

不同植被群落生境下在结皮层与 0—10 cm 土层间土壤 δ¹³C 和 δ¹⁵N 的变化存在显著差异 ($p<0.05$);生物结皮层土壤 δ¹³C 和 δ¹⁵N 要显著低于对照农耕地表层土壤。其中,不同植被群落生境下结皮层的 δ¹³C 变化范围在 -25.55~-19.83‰,呈现出长芒草群落((-21.75±1.82)‰)>小叶杨群落((-24.79±0.67)‰)>油蒿群落((-25.18±0.22)‰)。不同植被群落生境下结皮层的 δ¹⁵N 变化范围在 -4.87‰~-0.46‰,呈现出长芒草群落

((-1.18±0.29)‰)>油蒿群落((-2.70±1.30)‰)>小叶杨群落((-2.98±0.12)‰)。不同土壤类型 0—10 cm 土层土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 存在明显差异($p<0.05$),表现出黄土的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 均较风沙土偏正。

3.6 不同土壤和植被生境下生物结皮土壤性质特征

基于样品土壤性质的冗余分析(RDA)结果(图 3)显示,不同植被和土壤生境下的结皮层和 0—10

cm 样品间,以及 2 个土层样品间的空间排序分异明显,且第 1 轴和第 2 轴能够解释 97.66% 的变异(第 1 轴:90.75%,第 2 轴:6.91%)。经 envfit 函数对各土壤指标对土壤样品间进行显著性检验,除土壤水溶性 Na、Mn 和 K 外,各土壤性质指标与不同植被和土壤生境下生物结皮土壤样品具有极显著相关($p<0.01$)。

表 4 不同植被群落生境下生物结皮土壤水溶性金属离子含量

指标	土层深度/cm	农田	长芒草群落	油蒿群落	小叶杨群落
Na/(mg·kg ⁻¹)	结皮层	9.89±0.81	7.40±4.85	5.94±1.78	7.14±2.17
	0—10		2.80±0.98	3.37±1.54	4.31±1.79
K/(mg·kg ⁻¹)	结皮层	17.26±5.50	10.53±3.22	9.84±4.11	10.75±3.23
	0—10		6.05±1.41	5.74±1.69	6.43±1.00
Mg/(mg·kg ⁻¹)	结皮层	26.70±18.93a	40.51±3.69ab	44.78±5.49b	47.77±4.52b
	0—10		13.20±1.61a	19.16±3.22b	21.42±3.98b
Ca/(mg·kg ⁻¹)	结皮层	115.12±26.94a	243.75±26.37b	207.46±39.59b	196.88±32.93b
	0—10		68.45±1.49	57.48±12.05	84.31±50.28
Mn/(mg·kg ⁻¹)	结皮层	0.01±0.02a	0.04±0.04b	0.14±0.07b	0.18±0.12b
	0—10		0.04±0.02a	0.36±0.13b	0.13±0.13b
Fe/(mg·kg ⁻¹)	结皮层	1.90±1.74	1.55±0.58	2.62±1.01	1.76±0.51
	0—10		4.69±0.12a	9.90±5.73b	6.67±6.16b

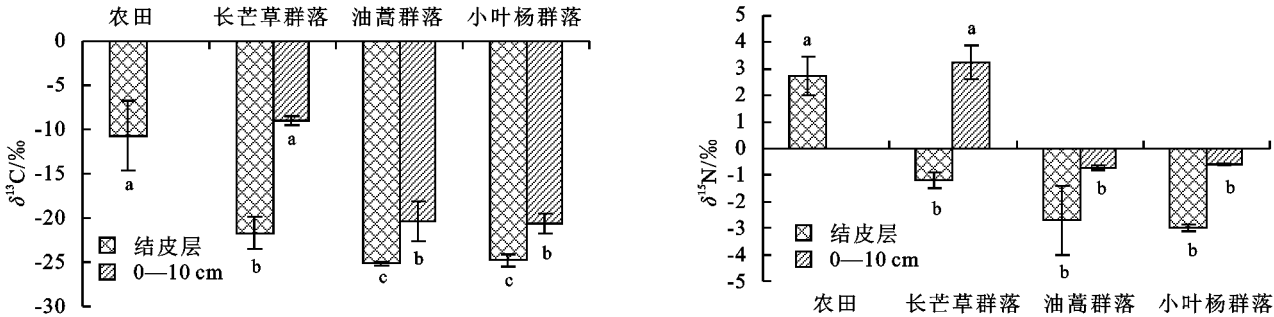
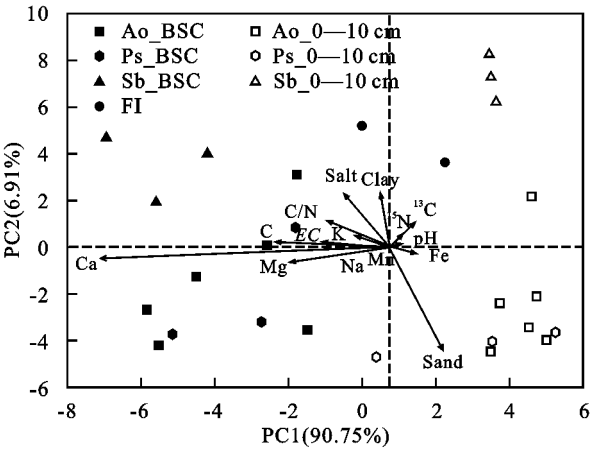


图 2 不同植被群落生境下生物结皮稳定同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 自然丰度值



注: Ao_BSC 为油蒿群落结皮层, Ao_0—10 cm 为油蒿群落 0—10 cm 土层, Ps_BSC 为小叶杨+油蒿群落结皮层, Ps_0—10 cm 为小叶杨+油蒿群落 0—10 cm 土层, Sb_BSC 为长芒草群落结皮层, Sb_0—10 cm 为长芒草群落 0—10 cm 土层, FI 为农田表层土壤。

图 3 基于样品土壤性质的相关排序

4 讨论与结论

陕北风蚀水蚀交错区六道沟小流域内土壤和植

被群落组合的天然空间分布格局,为研究土壤和植物群落生境下生物结皮对土壤性质影响提供了天然的试验材料。研究结果表明:首先,该区域生物结皮可以显著地改善结皮层的土壤理化性质,并且生物结皮的生态功能作用对结皮层土壤性质的影响是具有主导地位的关键因素;其次,由于生物结皮生态功能作用在垂直空间上有限性,结皮下层 0—10 cm 土层的土壤性质差异主要受到土壤类型本身性质的影响(如土壤黏粒、碳、氮元素等);最后,本研究中植被群落因子对表层(0—10 cm)土壤理化性质变化的影响作用有限,且未达到显著程度;这可能由于研究区域风蚀作用比较显著,进而影响到植被群落凋落物对地表养分归还作用的有限,以及半干旱气候条件导致维管束植物根系深层分布明显等多方面生物与环境因素的综合作用影响^[20]。

本研究中,2 种土壤类型(黄土与风沙土)0—10 cm 土层的土壤颗粒组成、C、N、C/N、 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$,

以及水溶性金属 Mg、Fe 和 Mn 的含量变化差异显著 ($p<0.05$);而 EC 和 pH、水溶性金属 Na、K 和 Ca 的含量变化差异则不显著,这表明 2 种土壤类型本身性质的显著差异。另外,尽管本研究并未对生物结皮群落物种的组成和结构进行调查,但不同土壤和植被生境下结皮层的叶绿素含量差异以及碳氮元素总量及其 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 自然丰度变化来看,长芒草群落生境下结皮层的叶绿素含量明显高于风沙土的油蒿和小叶杨群落生境下结皮层的叶绿素含量 ($p<0.05$),这表明长芒草群落生境下生物结皮中光合生物成分高于风沙土油蒿和小叶杨群落生境下生物结皮的光合生物成分;同时,从 3 种植被群落生境下结皮层相对于 0—10 cm 土层的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 自然丰度变化幅度来看,长芒草群落生境下生物结皮生物组分对 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 的生物同位素分馏与风沙土的油蒿和小叶杨群落生境下生物结皮存在明显差异。因此,可以推测不同土壤和植被生境下生物结皮群落物种组成结构(或者功能多样性)可能存在显著差异^[21-22],这有待于通过生物结皮群落物种组成结构测定来进一步验证。

致谢:野外试验承蒙中国科学院神木侵蚀与环境试验站的大力支持,在此表示诚挚的谢意!

参考文献:

[1] Belnap J, Lange O L. Biological soil crusts: Structure, function and management [M]. Berlin: Springer-Verlag,2003.

[2] Castillo-Monroy A P, Maestre F T, Rey A, et al. Biological soil crust microsites are the main contributor to soil respiration in a semiarid ecosystem [J]. *Ecosystems*,2011,14:835-847.

[3] Zhao H L, Guo Y R, Zhou R L, et al. The effects of plantation development on biological soil crust and topsoil properties in a desert in northern China [J]. *Geoderma*,2011,160:367-372.

[4] Zhang J, Liu G B, Xu M X, et al. Influence of vegetation factors on biological soil crust cover on rehabilitated grassland in the hilly loess plateau, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013,68:1099-1105.

[5] 高丽倩,赵允格,许明祥,等.生物土壤结皮演替对土壤生态化学计量特征的影响[J].*生态学报*,2018,38(2): 678-688.

[6] 张健,刘国彬,许明祥.黄土丘陵区退耕地生物结皮影响下的土壤腐殖质分异特征[J].*土壤*,2010,42(4):541-547.

[7] 李金峰,孟杰,叶菁,等.陕北水蚀风蚀交错区生物结皮的形成过程与发育特征[J]. *自然资源学报*,2014,29(1):67-79.

[8] Bu C F, Zhang P, Wang C, et al. Spatial distribution of biological soil crusts on the slope of the Chinese loess plateau based on canonical correspondence analysis [J]. *Catena*,2016,137:373-381.

[9] 卜崇峰,张朋,叶菁,等.陕北水蚀风蚀交错区小流域苔藓结皮的空间特征及其影响因子[J].*自然资源学报*. 2014,29(3):490-499.

[10] 袁方,张振师,张朋,等.陕北小流域生物结皮空间分布影响因子的通径分析[J].*水土保持研究*,2015,22(6): 30-35.

[11] 田园盛,张玥,孙文义,等.黄土高原水蚀风蚀交错区不同类型生物土壤结皮光谱特征[J]. *光谱学与光谱分析*,2018,38(7):2215-2220.

[12] Bu C, Zhao Y, Hill R L, et al. Wind erosion prevention characteristics and key influencing factors of bryophytic soil crusts [J]. *Plant and Soil*,2015,397:163-174.

[13] 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 and Biochemistry*,2017,105: 49-58.

[14] 叶菁,卜崇峰,杨永胜,等.翻耙干扰下生物结皮对水分入渗及土壤侵蚀的影响[J].*水土保持学报*,2015,29(3):22-26.

[15] 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):1-8.

[16] 王浩,张光辉,刘法,等.黄土丘陵区生物结皮对土壤入渗的影响[J].*水土保持学报*,2015,29(5):117-123.

[17] 马瞳宇,李谭宝,张平仓,等.近 20 年水蚀风蚀交错区小流域侵蚀及坡—沟产沙演变的粒径对比分析[J].*水土保持学报*,2013,27(4):83-87.

[18] Lan S B, Wu L, Zhang D L, et al. Ethanol outperforms multiple solvents in the extraction of chlorophyll-a from biological soil crusts [J]. *Soil Biology & Biochemistry*,2011,43:857-861.

[19] Liu X Y, Xiao H Y, Liu C Q. Physiological and isotopic signals in epilithic mosses for indicating anthropogenic sulfur on the urban-rural scale [J]. *Ecological Indicators*,2011,11(5):1245-1250.

[20] 赵明,王文科,王周锋,等.半干旱区沙地沙蒿生物量及根系分布特征研究[J].*干旱区地理*,2018,41(4):786-792.

[21] Craine J M, Brookshire E N J, Cramer M D, et al. Ecological interpretations of nitrogen isotope ratios of terrestrial plants and soils [J]. *Plant and Soil*,2015,396: 1-26.

[22] Concostrina-Zubiri L, Matos P, Giordani P, et al. Biocrust tissue traits as potential indicators of global change in the Mediterranean [J]. *Plant and Soil*,2018, 429:159-174.