

生物土壤结皮对东祁连山高寒草甸土壤特性的影响

卢研^{1,2,3}, 张倩^{1,2,3}, 张彩军^{1,2,3}, 孙小妹^{2,3,4}, 苏军虎^{1,2,3}

(1. 甘肃农业大学 草业学院, 草业生态系统教育部重点实验室, 甘肃省草业工程实验室, 中-美草地畜牧业可持续发展研究中心, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃农业大学-新西兰梅西大学草地生物多样性研究中心, 甘肃 兰州 730070; 3. 甘肃省祁连山草原生态系统野外科学观测研究站, 甘肃 兰州 730070; 4. 甘肃农业大学资源与环境学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要:为阐明生物土壤结皮(Biological soil crusts, BSCs)在东祁连山高寒草甸生态系统中的生态功能,分土层(0~2、2~5、5~10、10~20和20~30 cm)比较了BSCs覆盖区和草本(Herbaceous, Herbs)植物覆盖区的土壤特性(含水率、全氮、全磷、全钾、有机碳、速效氮、速效磷、速效钾、微生物量碳氮含量、脲酶、蔗糖酶和碱性磷酸酶活性)。结果表明:与Herbs覆盖区相比,1)BSCs可改善高寒草甸的土壤理化性质,土壤含水率、全氮、全磷、速效磷、速效氮和有机碳含量最高可分别提高9.83%、55.8%、23.36%、39.29%、18.64%和5.43%;2)BSCs使0~2、5~20 cm土层蔗糖酶活性升高,降低0~20 cm土层脲酶活性,且显著增加2~5 cm土层的碱性磷酸酶活性($P < 0.01$);3)BSCs降低了0~20 cm土层土壤微生物生物量氮和0~5 cm土层的微生物生物量碳含量;4)结构方程模型表明,BSCs对土壤特性的影响大于Herbs,Herbs仅对速效钾含量和脲酶活性影响显著,而BSCs对参试指标均为显著的正效影响($P < 0.01$),尤其是对土壤微生物生物量碳氮的影响。以上结果表明BSCs具有改善高寒草甸土壤环境质量的生态功能,对高寒草甸生境的恢复与改善有促进作用。

关键词:生物土壤结皮;高寒草甸;土壤特性

中图分类号:S812 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2022)01-0013-08

DOI: 10.13817/j.cnki.cyyep.2022.01.002



生物土壤结皮(Biological soil crusts, BSCs)是由非维管束植物(苔类、藓类、藻类、地衣、真菌、细菌和蓝藻)通过菌丝体、假根和微生物分泌物等与表层松散的土壤颗粒紧密结合形成的集合体,是干旱、半干旱荒漠

地表景观的重要组成成分^[1]。研究表明,BSCs在很多脆弱或受损生态系统中占据着重要的生态位^[2],在土壤生态系统的碳、氮循环中,发挥着重要的生态功能^[3]。国内外对BSCs的研究目前主要集中在干旱、半干旱地区^[4],涉及BSCs对土壤稳定性和理化性质、土壤生态水文过程的影响等方面^[1,4],同时发现BSCs的存在可改变微生境,影响菌类和土壤动物及维管植物的生存和繁衍,多层次上影响着生态系统的结构和功能,促使生态系统健康发展^[1,5]。

BSCs不仅在干旱、半干旱地区广泛分布,在高寒草甸也有着分布^[6],尤其是在过度放牧及不合理的开发利用区^[7]。作为原生演替的初始阶段,BSCs可在荒漠生态系统的裸地生存、发育^[8],提高空斑的土壤养分含量^[9]。在高寒草甸的研究发现,草地退化程度及其

收稿日期:2021-01-25; **修回日期:**2021-03-17

基金项目:国家自然科学基金项目(32060386);甘肃省陇原青年创新创业人才团队项目(LYRC2019-5);甘肃省自然科学基金项目(20JR5RA024)

作者简介:卢研(1995-),女,安徽黄山人,硕士研究生。

E-mail:527766528@qq.com

孙小妹为通信作者。

E-mail:sunxm@gsau.edu.cn;

苏军虎为通信作者。

E-mail:sujh@gsau.edu.cn

土壤状况会影响 BSCs 的生长发育^[10]。而在黄河源区人工草地的研究表明, BSCs 有利于改善土壤特性, 提高土壤速效养分和土壤有机质的含量^[6]。也就是说 BSCs 既可促进正向演替, 又是逆向演替的表征。

众所周知, 土壤酶活性和微生物量碳氮也与土壤养分含量息息相关, 土壤酶主要来源于土壤微生物的活动、植物根系分泌物和动植物残体腐解过程^[11]。其既是生态系统的生物催化剂, 也是土壤有机体的代谢动力, 在土壤物质循环和能量转化过程中起着重要作用, 是土壤生态系统变化的敏感指标^[12], 能够较全面地反映土壤环境、肥力和质量的变化^[13]。土壤微生物量可快速表征微生物的活跃性^[14], 在土壤养分循环中发挥着不可或缺的作用。那么 BSCs 对土壤酶活性和微生物量碳氮含量是否存在影响, 如果存在影响, BSCs 对土壤酶活性、微生物量碳氮和养分含量的影响率是否存在差异还有待进一步的研究。

近年来祁连山高寒草甸生态系统受人类活动干扰严重, BSCs 呈斑块状镶嵌在高寒草甸中。本研究以高寒草甸为研究对象, 比较 BSCs 覆盖和草本植物 (Herbs) 覆盖区的土壤特性, 探究 BSCs 在高寒草甸生态系统中的作用, 旨在为理解 BSCs 在高寒草甸中的生态功能提供理论依据, 助力祁连山高寒草甸退化草地的修复和管理。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于甘肃省天祝县抓喜秀龙镇甘肃省祁连山草原生态系统野外科学观测研究站, 地理位置 N 37°10' ~ 37°13', E 102°45' ~ 102°48', 平均海拔约 2 900 m。该地区气温昼夜温差大, 四季不甚分明, 气温垂直分布明显, 年均气温 -0.1 °C, 年均日照时数 2 500 ~ 2 700 h, 降水主要集中在 6—8 月, 年均降水量 416 mm, 年均蒸发量 1 600 mm, 属大陆性半干旱气候, 无绝对无霜期, 属于高寒草甸土^[15]。草地类型为高寒草甸, 优势种为矮嵩草 (*Kobresia humilis*), 伴生种为扁穗冰草 (*Agropyron cristatum*)、垂穗披碱草 (*Elymus nutans*)、二裂委陵菜 (*Potentilla bifurca*) 和鹅绒委陵菜 (*P. anserina*) 等。

1.2 样地设置及取样方法

选择试验站的 3 块围封样地, 样地面积 0.2 hm², 从 2011 年起全年围封禁牧。样地内 BSCs 呈 25 ~ 48

cm² 的斑块状分布, 以苔藓结皮为主。在每块样地沿对角线设置 3 个 0.5 m × 0.5 m 的样方, 在每个样方内采集 BSCs 覆盖区和 Herbs 覆盖区的土壤, 土样分 5 层采取, 0 ~ 2、2 ~ 5、5 ~ 10 cm (直径 5 cm 的环刀采取)、10 ~ 20 和 20 ~ 30 cm (直径 5 cm 的土钻采取), 1 个样地的土样混合成 1 个样品。土样置于自封袋带回实验室进行自然风干, 去除草根等杂物后过 1 mm 筛备用。

1.3 测定方法

土壤含水率用铝盒烘干法, pH 用蒸馏水 (1:2.5 土水比) 浸提后用酸度计测定, 全氮用半微量凯氏定氮法, 全磷用钼锑抗比色法, 全钾用火焰光度计测定, 有机质用硫酸—重铬酸钾外加热法, 速效氮用碱解扩散法测定, 速效磷用高锰酸钾氧化—葡萄糖还原法测定^[16], 速效钾采用 NH₄OAc 浸提—火焰光度法测定^[17]。土壤脲酶活性用靛酚蓝比色法测定, 土壤碱性磷酸酶活性用磷酸苯二钠法测定, 土壤蔗糖酶活性用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定^[11]。土壤微生物生物量碳 (Soil microbial biomass carbon, SMBC) 和土壤微生物生物量氮 (Soil microbial biomass nitrogen, SMBN) 含量采用氯仿熏蒸法^[15], 浸提液采用碳氮联合分析仪 (Germany, analytikjena, Multi N/C 2100s) 测定。

1.4 数据处理与分析

应用 Excel 2010 对所得数据进行简单处理并制作相关图表, 采用 SPSS 23.0 软件进行独立样本 *T* 检验, 采用 R 3.6.3 语言软件 FactoMineR 和 Factoextra 包对 0 ~ 20 cm 土层 BSCs 和 Herbs 覆盖区下的土壤指标分别进行主成分分析, lavaan 包构建结构方程模型。

2 结果与分析

2.1 BSCs 对土壤理化特性的影响

BSCs 覆盖区, 各土层 pH 均呈碱性, 0 ~ 20 cm 土层均表现为 BSCs 覆盖区的 pH 值高于 Herbs 覆盖区 (图 1-A)。0 ~ 2、2 ~ 5、5 ~ 10、10 ~ 20 和 20 ~ 30 cm 土层 BSCs 覆盖区的含水率较 Herbs 覆盖区含水率分别升高了 3.44%、1.51%、7.96%、5.70%、9.83%, 其中 0 ~ 2 cm 土层 BSCs 覆盖区的含水率最大, 为 39.13% (图 1-B)。BSCs 覆盖区的 pH 值随着土层深度增加, 逐渐上升, 含水率先降低后上升。0 ~ 10 cm 土层有机碳含量在 BSCs 覆盖区均低于 Herbs 覆盖区, 分别降低了 12.10%、5.87%、1.88%, 其中 0 ~ 2 cm 土层差异

显著($P < 0.05$), 2~5 cm 土层差异极显著($P < 0.01$), 10~30 cm 土层有机碳含量在 BSCs 覆盖区均高于 Herbs 覆盖区, 分别增加了 0.50%、5.43%(图 1-C)。

在 2~5、10~20 和 20~30 cm 土层, BSCs 覆盖区全氮含量相较于 Herbs 覆盖区分别升高了 8.26%、51.80%和 22.01%, 其中 10~20 cm 土层 BSCs 覆盖区和 Herbs 覆盖区之间差异显著($P < 0.05$)(图 1-D)。10~20 cm 土层全磷含量, BSCs 覆盖区升高了 23.36%, 与 Herbs 覆盖区间差异显著($P < 0.05$)(图 1-E)。2~5、5~10、10~20 和 20~30 cm 土层 BSCs 覆盖区全钾含量相较于 Herbs 覆盖区分别降低了 1.67%、8.62%、2.91%和 2.4%(图 1-F)。相较于

Herbs 覆盖区, 2~5、5~10 和 10~20 cm 土层 BSCs 覆盖区的速效氮含量分别降低了 7.21%、4.69%和 11.45%, 其中 10~20 cm 土层差异显著($P < 0.05$), 0~2、20~30 cm 土层的速效氮含量升高了 0.71%、18.64%(图 1-G)。0~2、10~20 和 20~30 cm 土层 BSCs 覆盖区速效磷含量相较于 Herbs, 分别升高了 33.86%、39.29%和 18.03%, 其中 0~2 cm 土层差异极显著($P < 0.01$)(图 1-H)。除 20~30 cm 土层外, 其他土层速效钾含量低于 Herbs 覆盖区, 分别降低了 11.08%、14.88%、15.77%和 7.33%(图 1-I)。BSCs 覆盖下的土壤中, 随着土层深度的增加, 土壤速效氮、速效钾和有机碳含量逐渐降低(图 1-G, 图 1-I, 图 1-C)。

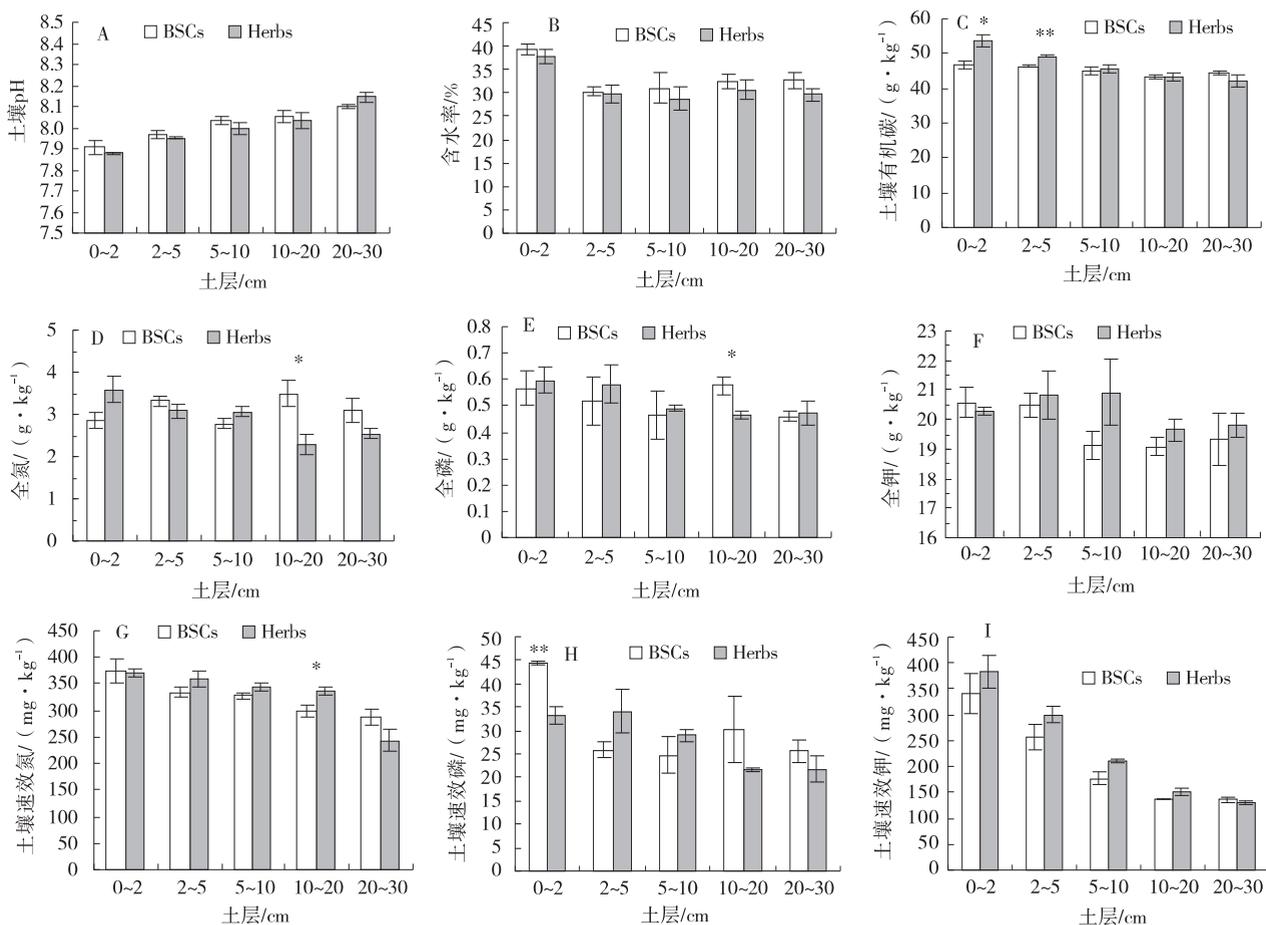


图 1 土壤理化特性

Fig. 1 Soil physical and chemical properties

注: BSCs: 生物土壤结皮; Herbs: 草本; ** 表示 BSCs 与 Herbs 之间在 0.01 水平上差异显著; * 表示 BSCs 与 Herbs 之间在 0.05 水平上差异显著。下图同

2.2 BSCs 对土壤酶活性的影响

在 0~2、5~10、10~20 cm 土层 BSCs 覆盖区蔗糖酶活性高于 Herbs 覆盖区(图 2-A), 脲酶活性在各土层均低于 Herbs 覆盖区(图 2-B), 2~5、10~20 cm

土层 BSCs 覆盖区碱性磷酸酶活性高于 Herbs 覆盖区, 其中 2~5 cm 土层差异极显著($P < 0.01$)(图 2-C)。在 BSCs 覆盖区, 随着土层深度增加, 土壤蔗糖酶活性呈逐渐升高, 脲酶活性逐渐下降, 碱性磷酸酶活性

先升高后降低(图 2-C)。

2.3 BSCs 对土壤微生物生物量碳氮的影响

相较于 Herbs 覆盖区,0~2、2~5 cm 土层 BSCs 覆盖区 SMBC 含量分别降低 6.19%、21.74%,5~10、10~20 cm 土层含量分别升高 4.65%、27.06%(图 3-A)。SMBN 含量在 0~2、2~5、5~10、10~20 cm 土

层 BSCs 覆盖区均低于 Herbs 覆盖区,分别降低了 26.26%、30.48%、30.39%、15.35%,其中 5~10 cm 土层 BSCs 覆盖区和 Herbs 覆盖区之间差异显著($P<0.05$)(图 3-B)。随着土层深度的增加,BSCs 覆盖区的 SMBC 含量先降低后升高,SMBN 含量则逐渐降低。

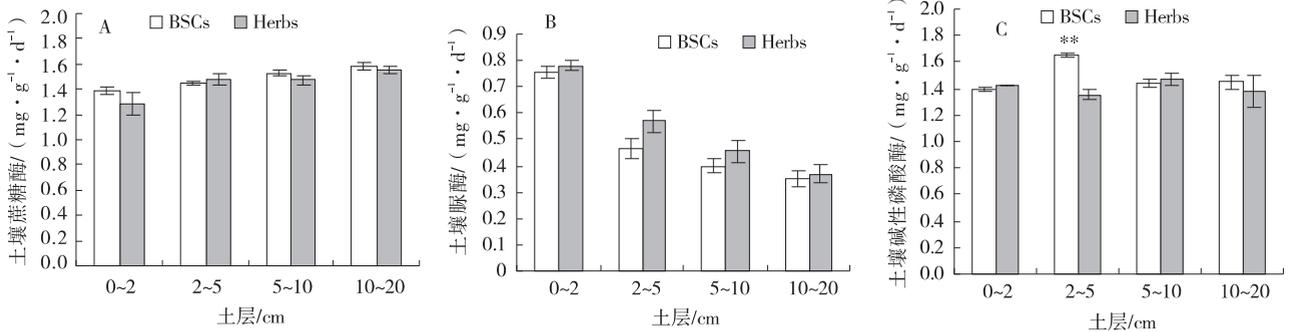


图 2 土壤酶活性

Fig. 2 Soil enzyme activity

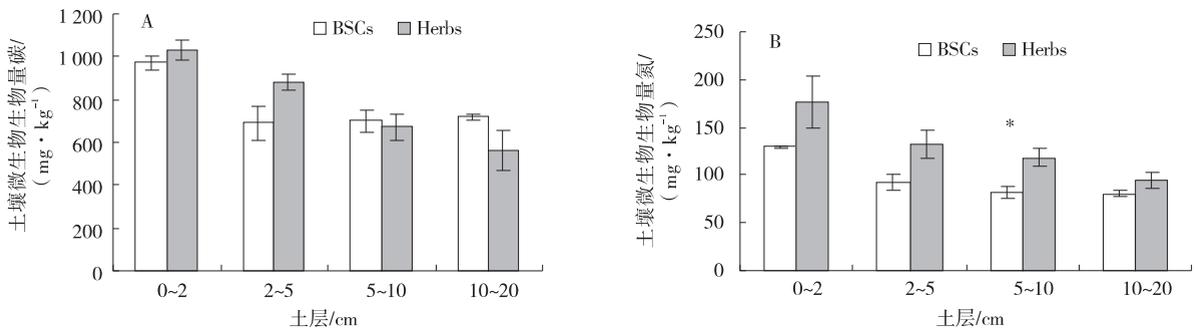


图 3 土壤微生物生物量碳氮

Fig. 3 Soil microbial biomass

2.4 土壤因子的主成分分析

BSCs 覆盖区根据特征值高于 1 的原则提取 4 个公因子,累计贡献率达 81.703%,能较全面地反映所有信息(图 4-A)。第一主成分的特征值为 6.439(表 1),微生物生物量碳(0.917)、脲酶活性(0.903)、微生物生物量氮(0.848)、速效钾(0.825)、pH(-0.740)、有机碳(0.717)、蔗糖酶活性(-0.700)载荷高,与 pH、蔗糖酶活性呈现负相关,各指标在主成分中的载荷值越大则与主成分关系越密切。Herbs 覆盖区根据特征值高于 1 的原则提取 4 个公因子,累计贡献率达 79.678%(图 4-B)。第一主成分的特征值为 4.482(表 1),高载荷因子有速效钾(0.905)、有机碳(0.795)、脲酶活性(0.788),第二主成分的特征值为 2.902,高载荷因子有 SMBN(0.927)、碱性磷酸酶活性(0.727),第三主成分的特征值为 2.508,高载荷因子有蔗糖酶活

性(0.833),与之均呈现出较强的正相关。

2.5 土壤特性对 BSCs 和 Herbs 覆盖区的响应率

由主成分分析结果筛选出代表土壤特性的指标,其中速效钾、有机碳含量、pH、脲酶活性、蔗糖酶活性、微生物生物量碳、微生物生物量氮含量代表 BSCs 覆盖区的土壤特性,速效钾、有机碳含量、脲酶活性、碱性磷酸酶活性、蔗糖酶活性、微生物生物量氮含量代表 Herbs 覆盖区的土壤特性。把 BSCs 覆盖区和 Herbs 覆盖区下土壤特性作为隐变量构建结构方程模型。结果表明,结构方程模型的拟合度指数分别为 $GFI=0.649$, $GFI=0.582$,表明此结构方程模型都能够较好的解释 BSCs 覆盖区和 Herbs 覆盖区下土壤特性的变化。通过结构方程模型可以得出 BSCs 和 Herbs 对土壤特性的影响力(图 5),BSCs 对微生物生物量碳、微生物生物量氮含量、脲酶活性和速效钾含量的影响明

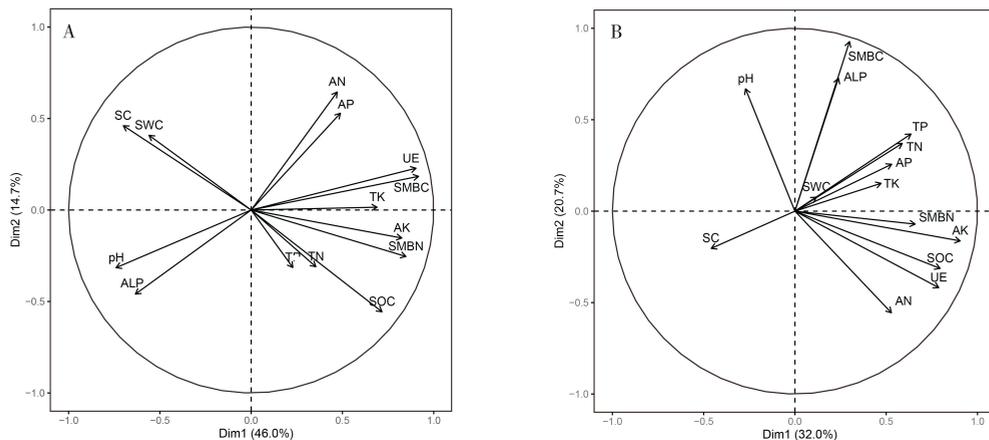


图 4 BSCs 覆盖区和 Herbs 覆盖区的土壤因子主成分分析

Fig. 4 Principal component analysis of soil factors in BSCs coverage area and Herbs coverage area

注:SWC:含水率,TN:全氮,TP:全磷,TK:全钾,AN:速效氮,AP:速效磷,AK:速效钾,SOC:有机碳,UE:脲酶,ALP:碱性磷酸酶,SC:蔗糖酶,SMBC:微生物生物量碳,SMBN:微生物生物量氮。下同

表 1 土壤因子变量的载荷及解释方差

Table 1 Loading and explanatory variance of soil factor variables

指标	BSCs 覆盖				Herbs 覆盖			
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC1	PC2	PC3	PC4
pH	-0.740	-0.315	0.336	-0.140	-0.271	0.669	0.008	0.390
含水率	-0.560	0.408	0.432	0.250	0.117	0.076	0.581	-0.412
全氮	0.354	-0.310	0.599	0.545	0.588	0.371	0.339	-0.522
全磷	0.228	-0.314	0.563	-0.629	0.636	0.422	-0.301	-0.163
全钾	0.690	0.015	-0.131	-0.147	0.472	0.152	0.585	0.472
速效氮	0.471	0.645	-0.317	0.165	0.528	-0.556	-0.212	0.185
速效磷	0.489	0.529	0.360	-0.521	0.530	0.257	0.617	0.446
速效钾	0.825	-0.153	0.085	0.110	0.905	-0.163	-0.328	-0.112
有机碳	0.717	-0.556	0.069	0.258	0.795	-0.313	0.344	-0.111
脲酶	0.903	0.228	0.029	-0.040	0.788	-0.418	0.203	-0.034
碱性磷酸酶	-0.634	-0.460	-0.483	-0.067	0.238	0.727	-0.239	-0.143
蔗糖酶	-0.700	0.461	0.364	0.334	-0.459	-0.204	0.833	-0.021
微生物生物量碳	0.917	0.184	-0.070	0.100	0.299	0.927	0.043	0.008
微生物生物量氮	0.848	-0.254	0.095	0.147	0.658	-0.071	-0.420	0.373
特征值	6.439	2.064	1.614	1.322	4.482	2.902	2.508	1.262
方差贡献率/%	45.989	14.743	11.527	9.444	32.017	20.729	17.915	9.017
累计方差贡献率/%	45.989	60.732	72.260	81.703	32.017	52.746	70.661	79.678

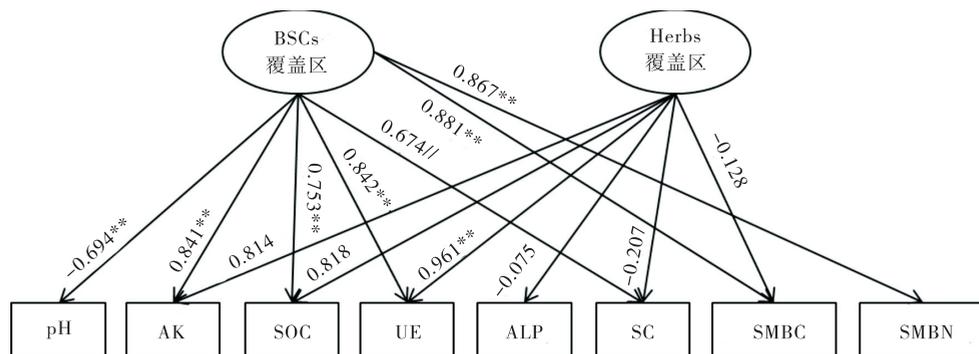


图 5 BSCs 覆盖区和 Herbs 覆盖区下的土壤特性

Fig. 5 Soil properties in BSCs coverage area and Herbs coverage area

显, 通径系数分别为 0.881、0.867、0.842、0.841。Herbs 对脲酶活性和速效钾含量的影响明显, 通径系数分别为 0.961、0.814。

3 讨论

土壤稳定性是群落稳定性恢复的前提, BSCs 通过维持土壤稳定性来恢复草地生态系统^[8], BSCs 发生在所有主要土壤类型和几乎所有阳光可以到达土壤表面的植被群落中^[4]。本研究发现在 BSCs 影响下土壤含水率有增加趋势, 这可能是因为苔藓能通过卷曲叶片、改变叶片的方向减少水分蒸发, 叶片的毛状叶尖结构能通过反射入射的光照减少水分蒸发, 苔藓植物形成垫状、丛状或毯状的生长型, 提高了毛细管系统的吸水能力, 减少了空气在叶片表面的运动, 从而减少了水分的蒸发, 保持了水分^[18]。

结构方程结果表明, BSCs 对土壤特性的影响大于 Herbs。Herbs 仅影响了速效钾含量和脲酶活性, 而 BSCs 对参试指标均为显著的正效影响, 其中对土壤微生物生物量碳氮含量的影响最大。究其原因, 可能是 BSCs 的存在改善了表层土壤的理化性质, 为微生物的生存提供了适宜的生存环境, 同时为微生物提供了重要的食物来源, 使微生物数量增加, 从而提高土壤微生物生物量碳氮含量^[19]。众所周知, 土壤碳、氮、磷、钾不仅作为土壤重要的营养元素, 更是表征土壤肥力和土壤质量的重要指标^[9]。土壤养分循环与平衡直接影响着生态系统生产力的高低, 关系到生态系统的稳定性^[20]。本研究发现 BSCs 对土壤理化性质有所改善, 使 0~2 cm 土层速效氮和速效磷含量分别增加 0.71%、33.86%, 使 10~20 cm 土层全氮(55.8%)、全磷(23.36%)、速效磷(39.29%)和有机碳(0.50%)含量增加(图 1)。孙华方等^[6]研究发现, 高寒地区 BSCs 覆盖区土壤养分含量普遍高于无 BSCs 覆盖区, 对较长建植年限人工草地土壤速效氮、速效钾积累效果显著, 能够增加土壤有机质含量。这与本研究结果相似, 可能是因为 BSCs 中微生物能够在其生命活动过程中不断同化环境中的有机碳, 同时又向外界释放碳素, 而 BSCs 又作为土壤氮素输入的重要贡献者, 在土壤碳氮循环过程中具有重要意义^[4]。微生物作为土壤生态系统中最活跃的一部分, 在养分转化过程中起重要作用,

其中有机质或全效养分被转化为速效养分有利于速效养分在土壤中积累^[20]。程才等^[21]研究也表明在石漠化生境下, BSCs 层养分含量显著高于下层土壤, BSCs 覆盖的土壤养分高于无 BSCs 覆盖的裸土。

BSCs 影响下, 随着土层的增加, 土壤蔗糖酶活性逐渐升高, 脲酶活性逐渐降低(图 2)。这与杨航宇等^[22]研究相似, 在腾格里沙漠 BSCs 能提高土壤表层碱性磷酸酶活性, 且呈明显的垂直分布, 即随着土层的加深, 酶活性逐渐减弱。这是因为表层有少量的枯枝落叶和腐殖质可以支持微生物的生长, 且温度条件和通气状况良好, 表层土壤微生物很容易从 BSCs 获得充足营养, 使表层的土壤酶活性相应提高^[13, 22]。而在 BSCs 的影响下脲酶活性低于 Herbs 覆盖区, 这可能是因为高寒草甸草地根际的影响高于 BSCs 产生的影响, 马源等^[23]研究指出, 在高寒草甸退化草地土壤中, 酶活性和微生物生物量的含量均表现为根际土壤高于非根际土壤。土壤根系可直接影响的土壤范围作为一个微生物的特殊生境, 微生物受到环境因素刺激时会不断向周围分泌酶, 表现为以植物根系为中心, 向四周逐渐减小的变化规律^[23]。但是表层土壤微生物能从 BSCs 获得充足营养和能量, 促进土壤微生物的生长与繁殖, 使得土壤微生物生物量及酶活性增加, 从而改善了表层土壤的理化性质^[24]。

4 结论

与 Herbs 覆盖区相比, BSCs 覆盖区能改善土壤特性, 使土壤含水率提高, 最高达 9.83%, 全氮、全磷、速效磷、速效氮和有机碳含量分别提高 55.8%、23.36%、39.29%、18.64% 和 5.43%, 增加土壤蔗糖酶活性(0~2、5~20 cm 土层)和表层(2~5 cm)碱性磷酸酶活性。BSCs 对土壤特性的影响大于 Herbs, Herbs 仅对速效钾含量和脲酶活性影响显著, 而 BSCs 对参试指标均为显著的正效影响, 其中对土壤微生物生物量碳氮含量的影响最大。因此, BSCs 具有改善高寒草甸土壤环境质量的生态功能, 从而促进群落结构的正向演替, 对高寒草甸生态系统的恢复具有重要的生态学意义。

参考文献:

[1] 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.
- [2] Weber B, Büdel B, Belnap J. Biological Soil Crusts as an Organizing Principle in Drylands[M]. Springer International Publishing, 2016; 3—13.
- [3] Li X R, Zhang P, Su Y G, *et al.* Carbon fixation by biological soil crusts following revegetation of sand dunes in arid desert regions of China: A four-year field study[J]. *Catena*, 2012, 97(3): 119—126.
- [4] 李新荣, 谭会娟, 回嵘, 等. 中国荒漠与沙地生物土壤结皮研究[J]. 科学通报, 2018, 63(23): 2320—2334.
- [5] Zhang Y M, Belnap J. Growth responses of five desert plants as influenced by biological soil crusts from a temperate desert, China [J]. *Ecological Research*, 2015, 30(6): 1037—1045.
- [6] 孙华方, 李希来, 金立群, 等. 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[J]. 草地学报, 2020, 28(2): 509—520.
- [7] 武高林, 杜国祯. 青藏高原退化高寒草地生态系统恢复和可持续发展探讨[J]. 自然杂志, 2007, 29(3): 159—164.
- [8] 包艳丽, 刘左军. 生物土壤结皮的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(8): 4667—4668+4691.
- [9] 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.
- [10] 李以康, 欧阳经政, 林丽, 等. 高寒草甸植被退化过程中生物土壤结皮演变特征[J]. 生态学杂志, 2015, 34(8): 2238—2244.
- [11] 关松荫. 土壤酶及其研究方法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [12] Badiane N N Y, Chotte J L, Pate E, *et al.* Use of soil enzyme activities to monitor soil quality in natural and improved fallows in semi-arid tropical regions[J]. *Applied Soil Ecology*, 2001, 18(3): 229—238.
- [13] 王理德, 王方琳, 郭春秀, 等. 土壤酶学研究进展[J]. 土壤, 2016, 48(1): 12—21.
- [14] Waid J S. Does soil biodiversity depend upon metabiotic activity and influences? [J]. *Applied Soil Ecology*, 1999, 13(2): 151—158.
- [15] 蒋永梅, 姚拓, 田永亮, 等. 不同管理措施对高寒草甸土壤微生物量季节性变化的影响[J]. 草原与草坪, 2016, 36(5): 105—110.
- [16] 张德罡, 马玉秀. 草原土壤速效磷测定方法的比较[J]. 草业科学, 1995, 12(3): 70—72.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [18] 吴玉环, 程佳强, 冯虎元, 等. 耐旱藓类的抗旱生理及其机理研究[J]. 中国沙漠, 2004, 24(1): 25—31.
- [19] Li X R, He M Z, Duan Z H, *et al.* Recovery of topsoil physicochemical properties in revegetated sites in the sand-burial ecosystems of the Tengger Desert, northern China[J]. *Geomorphology*, 2007, 88(3—4): 254—265.
- [20] 蒋婧, 宋明华. 植物与土壤微生物在调控生态系统养分循环中的作用[J]. 植物生态学报, 2010, 34(8): 979—988.
- [21] 程才, 李玉杰, 张远东, 等. 石漠化地区苔藓结皮对土壤养分及生态化学计量特征的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(24): 9234—9244.
- [22] 杨航宇, 刘艳梅, 王廷璞. 荒漠区生物土壤结皮对土壤酶活性的影响[J]. 土壤学报, 2015, 52(3): 654—664.
- [23] 马源, 张德罡, 周恒, 等. 高寒草甸退化对优势物种根际土壤微生物量及酶活性的影响[J]. 草原与草坪, 2019, 39(4): 44—52.
- [24] 刘艳梅, 杨航宇, 李新荣. 生物土壤结皮对荒漠区土壤微生物生物量的影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(2): 394—401.

Effects of biological soil crusts on soil properties of alpine meadows in eastern Qilian Mountains

LU Yan^{1,2,3}, ZHANG Qian^{1,2,3}, ZHANG Cai-jun^{1,2,3}, SUN Xiao-mei^{2,3,4},
SU Jun-hu^{1,2,3}

(1. *College of Grassland Science, Key Laboratory of Grassland Ecosystem (Ministry of Education), Pratacultural Engineering Laboratory of Gansu Province, Sino-U. S. Centers for Grazing land Ecosystem Sustainability, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China*; 2. *Gansu Agricultural University-Massey University Research Centre for Grassland Biodiversity, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China*; 3. *Gansu Qilian Mountains Grassland Ecosystem Observation and Research Station, Lanzhou 730070, China*; 4. *College of Resource and Environmental Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China*)

Abstract: In order to clarify understand the ecological function of Biological Soil Crusts (BSCs) in the alpine meadow ecosystem of the eastern Qilian Mountains, the soil properties of the BSCs coverage area were compared with those of Herbaceous coverage area (Herbs) in layers: 0~2, 2~5, 5~10, 10~20, and 20~30 cm. The soil properties included soil water content, total nitrogen, total phosphorus, total potassium, organic carbon, available nitrogen, available phosphorus, available potassium, microbial biomass carbon and nitrogen, urease activity, sucrase activity and alkaline phosphatase activity. The results showed that compared with Herbs coverage area: 1) BSCs improved the soil physical and chemical properties of alpine meadows, soil water content, total nitrogen, total phosphorus, available phosphorus, available nitrogen, and organic carbon content can be increased by 9.83%, 55.8%, 23.36%, 39.29%, 18.64%, and 5.43%, respectively; 2) BSCs significantly increased the sucrase activity in the 0~2 and 5~20cm layers, reduced the urease activity in the 0~20cm layers, and significantly increased the alkaline phosphatase activity in the 2~5cm layers ($P < 0.01$); 3) BSCs reduced the soil microbial biomass nitrogen in the 0~20cm layers and the microbial biomass carbon in the 0~5cm layers; 4) The structural equation model showed that BSCs had greater impact on soil properties than Herbs. Herbs only had significant effect on available potassium and urease, while BSCs had significant positive effect on the test indicators ($P < 0.01$), especially the impact on soil microbial biomass carbon and nitrogen. In conclusion, BSCs had demonstrated the ecological function of improving the soil environmental quality of alpine meadows, and could play positive role in the restoration and improvement of alpine meadow habitats.

Key words: biological soil crusts; alpine meadow; soil properties