

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2021.0143

MING Jiao, SHENG Yu, JIN Huijun, et al. The impact of the biological soil crusts on the frozen soil properties in the frozen ground region[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(2):601-609. [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.]

高寒冻土区生物结皮对土壤理化属性的影响

明 姣, 盛 煜, 金会军, 张 泽, 杜玉霞

(中国科学院 西北生态环境资源研究院 冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 生物结皮是高寒地区地被层的重要组成部分之一。其作为地表特殊的结构层,能够改变地表结构及土壤理化属性,从而影响冻土环境。迄今为止,关于青藏高原高寒生态系统中生物结皮对土壤理化属性的影响尚不清楚。以青藏高原高寒冻土区生物结皮为研究对象,初步研究了生物结皮的特征及其对土壤理化属性的影响。结果表明:生物结皮在高寒草甸退化过程中广泛发育,主要以藻结皮为主,其盖度可达37.3%~51.7%,结皮层平均厚度为12.6 mm。由于生物结皮的发育,高寒地区5~20 cm土层粉粒含量有所增加,但差异不显著,而结皮层土壤田间持水量相比于裸地表层(2 cm)增加了10%~40%,结皮层容重较裸地降低了30%;两种类型藻结皮均显著增加了结皮层及其下0~20 cm土层土壤有机质,而深色藻结皮增加了结皮层及其下0~20 cm土层土壤全氮含量,浅色藻结皮仅增加了结皮层土壤全氮含量,对其下0~20 cm土层土壤全氮含量没有显著影响;生物结皮对土壤pH没有显著影响;生物结皮是高寒生态系统植被退化过程中的关键环节。研究结果为揭示生物结皮在高寒生态系统中发挥重要生态功能提供依据。

关键词: 高寒冻土区; 生物结皮; 土壤容重; 土壤理化属性

中图分类号: P314.5; S154.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2021)02-0601-09

0 引言

生物结皮是由生长在表层土壤的微生物、藻类、苔藓和地衣等个体微小的生物成分与土壤相互作用形成的复合层^[1]。其广泛分布于干旱、半干旱区和极地、亚极地等脆弱生态区^[2-3]。近年来,关于生物结皮生态功能的研究已详细展开,研究表明生物结皮的形成可以改善土壤理化性质,提高土壤稳定性,改善土壤肥力等,对于干旱半干旱地区植被恢复与重建具有重要的生态学意义^[3-4]。目前关于生物结皮生态功能的研究已有很多,但这些研究主要集中在干旱半干旱的沙漠地区^[5-14],例如美国科罗拉多沙漠及其西南部的莫哈维沙漠^[6-7],以色列南部的内盖夫沙漠^[8],阿根廷的蒙特沙漠^[9]以及干旱半干旱的西班牙地中海地区^[10]。国内关于生物结皮的研究也主要集中在沙漠及干旱半干旱地区,如黄土丘陵沟壑区^[11-12]、腾格尔沙漠地区^[13-14]、西北及新

疆沙漠区^[15-16]。我国青藏高原素有“世界屋脊”、“第三极”之称,其海拔高,气温低,辐射强烈,日照多,黄河源区也源自于此^[17]。黄河源区是我国青藏高原重要的水源涵养区,也是该区域最主要的畜牧业基地之一。源区内独特的气候条件及其丰富的自然生态资源为该区经济发展及生态平衡发挥了生态安全屏障的作用^[17-18]。然而,20世纪70年代以来,随着气候的逐渐干旱化和人口、牲畜数量的迅速增加,该区生态环境急剧恶化,大面积植被退化,20世纪末,植被退化面积占源区草地总面积1/3^[19]。2005年以来,随着三江源地区实施草地“生态保护和建设”过程的具体实施(围栏封育、退牧还草、沙漠化治理、湿地保护等)^[19-20],生物结皮开始在该地区逐渐发育。笔者在野外实地考察过程中发现,生物结皮在黄河源区不同退化程度的草地斑块中均有较大面积的分布。黄河源区平均气温-5.38~4.14℃,

收稿日期: 2019-04-17; 修订日期: 2019-07-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(41601072); 冻土工程国家重点实验室自主研究项目(Y452F11001)资助

作者简介: 明姣, 工程师, 主要从事高寒生物结皮生态功能研究. E-mail: mingjiaowodeshijie@126.com

年降水量 262.2~772.8 mm^[20],在如此相对湿润且温度极低的条件下,生物结皮的发育特征与干热的沙漠地区是否一样,目前还不得而知。生物结皮作为地表特殊的结构层,其属于变水生物^[21],在湿润时才能够进行新陈代谢活动^[22]。而青藏高原高黄河源区属于高原亚寒带半干旱区,仅有冷暖两季,冷季漫长,从每年10月初至次年4月之间地表处于冻结状态^[23],降水主要以固态降雪为主,生物结皮呈现休眠状态。在半干旱低温环境条件下,生物结皮的理化性状如何,这一问题也尚不明晰。

为此,本文以青藏高原黄河源区玛多县附近的生物结皮为研究对象,借助野外调查采样和室内试验方法的结合,来进行定量研究,以探知高寒冻土区内存在的生物结皮对土壤理化属性的影响,为深入研究高寒地区生物结皮生态功能提供理论基础。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

黄河源区玛多县隶属果洛藏族自治州,地理位置为 95°30′~103°30′ E, 32°30′~30°30′ N,位于青海省南部,巴颜喀拉山北麓,土地面积 12.2×10⁴ km²。

该地属于平原地区,平均海拔 4 200 m。植被类型以草地为主,约占 88%。区域气候类型属于青藏高原亚寒带半干旱半湿润型气候^[24-25],昼夜温差大,年平均气温 -1.6℃;年内降水多集中在 5—9 月,年内累积降水量 407~582 mm;年累积蒸发量为 484~584 mm^[25]。该地区特有的地理位置和地形、地貌、水文、干寒的气候条件决定了该区为季节冻土区,并镶嵌着不连续多年冻土、零星高温多年冻土和季节冻土^[26-27]。我们的采样观测场地位于玛多县野马滩,位于 38°34′ N, 98°00′ E,海拔 4 320 m,属于季节冻土区,研究场地景观如图 1 所示。

1.2 研究方法

1.2.1 野外调查及采样

在玛多县野马滩禁牧场地内每隔 2 km 分别选取分别选取人为干扰较少、地形地貌呈现较高一致性、生物结皮发育稳定的 5~6 块(每块 400 m²)的禁牧地作为调查样地。每个样地中随机设定 4 个 5 m×5 m 的调查样方(大样方),每个大样方中随机选择 10 个 25 cm×25 cm 的小样方,调查生物结皮物种组成、盖度及样地植被等。然后在每个样地中,分别选择两种(浅色藻结皮和深色藻结皮)不同类

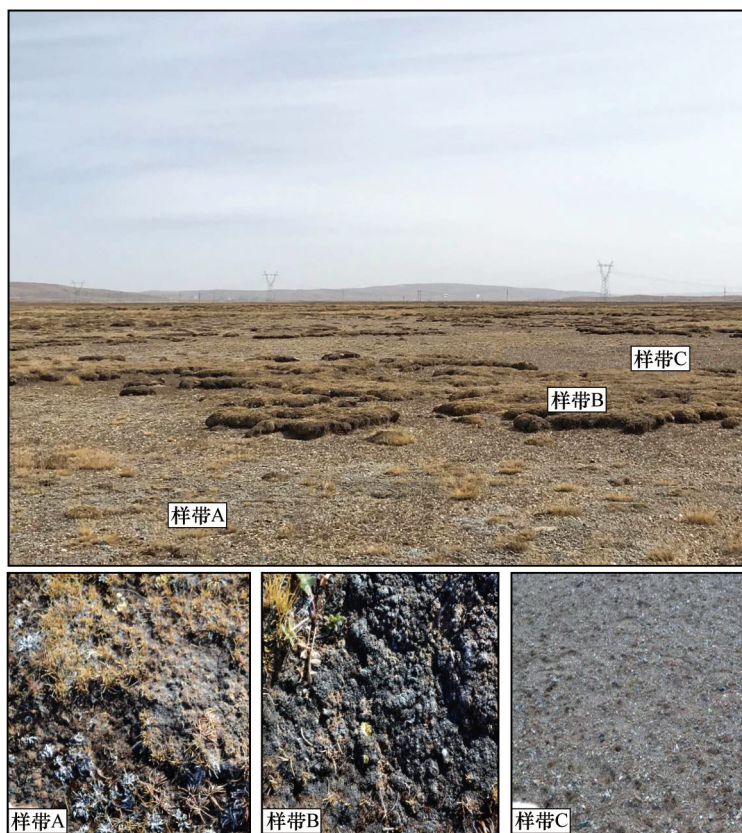


图 1 研究区地表生物结皮状况(样带 A 为浅色藻结皮, B 为深色藻结皮, C 为裸地)

Fig. 1 Biocrusts in the study region: light cyanobacteria biocrust (A); dark cyanobacteria biocrust (B); bare soil (C)

型生物结皮斑块与裸土斑块(5 m×5 m),随机选取4个点,用铲子剥离结皮层和下层的分层处土壤,作为结皮层土壤样品。再依次采集下层分层土壤,即0~5 cm、5~10 cm、10~20 cm、20~30 cm的土壤样品,

4点同层混合作为1个分析样品,即每个斑块类型采集5~6份土壤样品。采集到的样品经过风干后,剔除下层土壤中肉眼可见的植物残渣,磨细过筛备用。样点的具体情况见表1。

表1 土壤采样点基本情况
Table 1 Characters of sampling sites

地点	多年平均 温度	土地利用 方式	植被群落	样带	生物结皮 类型	植被 盖度	藻类 盖度	藓类 盖度	地衣 盖度	结皮 总盖度
玛多县 野马滩	-1.6℃	围栏禁牧草地	藏嵩草、小嵩草、唐古特红 景天、火绒草、团垫雪灵芝	A	浅色,藻结皮	60.5%	36.9%	4.0%	4.0%	44.9%
				B	深色,藻结皮	35.5%	22.5%	4.0%	8.0%	34.5%
				C			裸地			

1.2.2 测定项目及方法

(1) 生物结皮覆盖度

采用25点样点法(小样方的长宽均为25 cm),在设置的每个5 m×5 m的样方内,以之字状沿对角线设定10个小样方,调查生物结皮种类和盖度,同时记录样方中苔藓、地衣、藻、裸土、小石砾、高等植物等出现的频率,以各物种与调查总点数的百分比表示其相应覆盖度。同时,调查记录下采样点的海拔、经纬度及植被状况等。

(2) 土壤物理性质

土壤颗粒组成:由马尔文MS2000激光粒度分析仪测定。由于生物结皮层土壤有机质呈现出较大含量,为了达到分散土壤颗粒的目的,进行样品先期处理,处理方式如下:用不同浓度(先用10%浓度,后用30%浓度)的过氧化氢(H₂O₂)溶液浸泡土壤,达到去除有机质的目的。然后剔除土壤中携带的碳酸盐,剔除过程用到了0.20 mol·L⁻¹的HCl溶液进行土壤的浸泡,最后用0.05 mol·L⁻¹的HCl溶液浸泡,直到没有气泡出现才结束土壤的浸泡,再进行上机测试。

田间持水量:将原装生物结皮放在具孔小筛上(孔径为1 mm),然后把结皮连同小筛一起,放在盛薄层的托盘上,当结皮充分饱和时,将结皮和小筛取出来,放置在定性滤纸(5层),吸水5 min后,进行结皮湿重的称量,后再将生物结皮的烘干,并称量得到其干重,计算质量含水量,以此作为相对田间持水量^[28]。

容重:结皮层容重与生物结皮层下土壤容重的测定采取的方法分别是涂膜法^[29]和环刀法。

(3) 土壤化学性质

全氮(TN)用开氏法测定^[30],有机质(SOC)使用重铬酸钾氧化法测定^[31],pH值用电极法测定^[32-33]。

1.2.3 数据处理

借助于Origin 9.0和SPSS 17.0完成数据处理和统计分析,针对各种类型的生物结皮及裸地土壤导热系数及其理化属性分别进行单因素方差分析,用LSD法进行多重比较,处理间差异均达5%显著水平。

2 结果与分析

2.1 高寒地区生物结皮发育特征

随着三江源地区禁牧工程实施,生物结皮在黄河源区大面积发育,在黄河源区玛多县调查结果表明,该地主要以藻类结皮为主,生物结皮总覆盖度可达37.3%~51.7%,厚度为6~22 mm,平均厚度为12.6 mm。生物结皮中各组分所在百分比如表1所示。根据其鲜明的颜色特征,分为浅色藻类结皮和深色藻类结皮,分别如图1(a)和1(b)所示。生物结皮物种分布与植被密切相关,在未退化的草地斑块中,植被主要有藏嵩草(*Kobresia tibetica*)和团垫雪灵芝(*Arenaria pulvinata*),主要以深色藻结皮为主,其厚度较厚为6~22 mm(平均13.7 mm);在半退化的草地斑块中,主要植被为垂头菊(*Cremanthodium reniforme*),该区域则生物结皮以浅色藻结皮为主,其厚度为6~19 mm(平均11.5 mm)。

2.2 生物结皮对土壤物理性质的影响

研究区内两种类型生物结皮与对照组裸地及下层(0~30 cm)土壤粒级分布如图2所示,按照美国制颗粒分级标准,将整个粒径分为黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.002~0.050 mm)和砂粒(0.050~1.000 mm)。由图2可见,两种生物结皮及对照组裸地各层土壤的颗粒组成均以粉粒(0.002~0.050 mm)和砂粒(0.05~1.00 mm)为主,占到所有颗粒组分的70.0%~80.0%左右,而黏粒(<0.002 mm)仅占25%

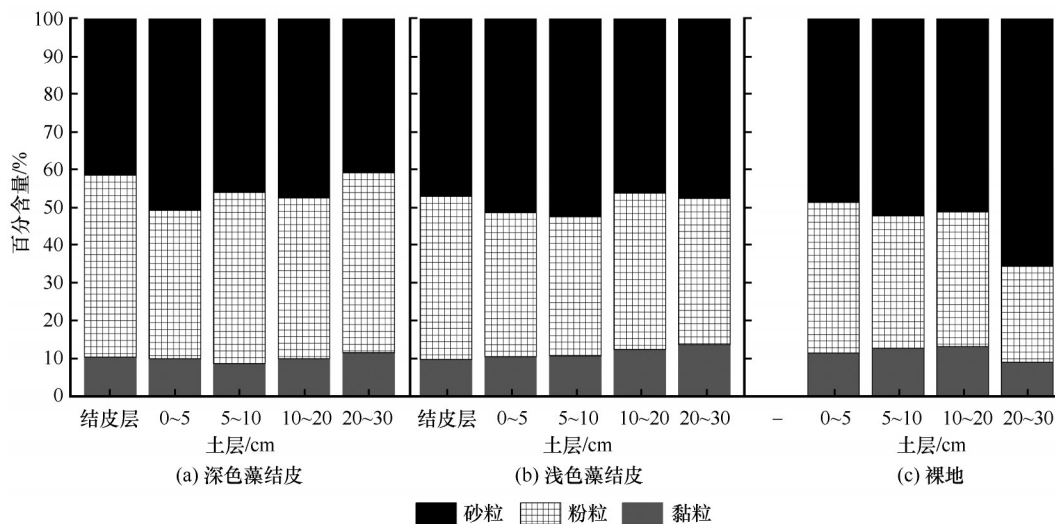


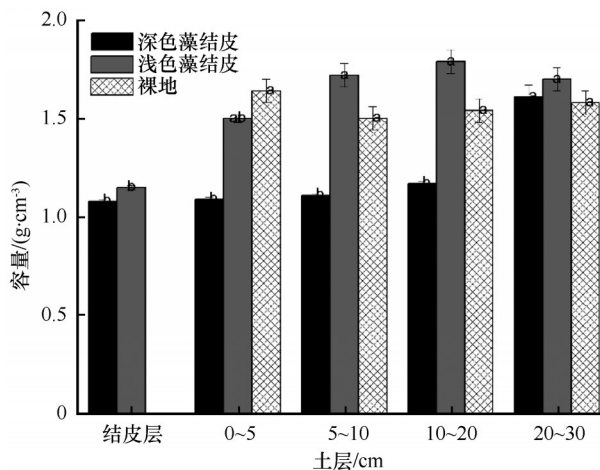
图2 不同类型地表覆盖下土壤颗粒组成

Fig. 2 Soil particle composition of two types of cyanobacteria biocrusts and bare soil

左右。两种类型生物结皮结皮层黏粒、粉粒及砂粒均没有显著差异。两种类型结皮层下0~5 cm土层土壤黏粒、粉粒和砂粒含量与裸地相比也没有显著性差异。5~10 cm、10~20 cm土层中粉粒含量有所不同,表现为深色藻结皮>浅色藻结皮>裸地,但差异并不显著。而深色藻结皮覆盖下20~30 cm土层中粉粒含量高于浅色藻结皮,同时均显著高于裸地。生物结皮对土壤颗粒含量的影响作用显著表现在20~30 cm土层,这可能与青藏高原强烈的冻融作用及水热迁移有关。

土壤容重是反映土壤结构、透水性能以及保水能力的一个指标,其与土壤密度、孔隙以及有机质含量等因素有关。因此生物结皮的形成可能影响了土壤孔隙度以及土壤有机质含量等,从而可能影响土壤容重的大小。不同土层土壤在生物覆盖和无生物结皮覆盖情况下各土层土壤容重变化情况如图3所示。由图3可见,研究区域深色藻结皮和浅色藻结皮层容重分别为 $1.15 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、 $1.08 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,均显著低于下层0~30 cm土层土壤容重($1.65 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)。深色藻结皮覆盖下0~20 cm土层土壤容重显著低于浅色藻结皮和裸地,浅色藻结皮覆盖下0~20 cm土层土壤容重与裸地没有显著差异。20 cm土层两种类型生物结皮和裸地土壤容重均没有显著差异。

土壤田间持水量可反映土壤保水能力。由于生物结皮的发育,其结皮层孔隙度、容重及其他指标较下层土壤有显著变化。因此生物结皮层的保水能力显著影响下层土壤水分传输。故测量结皮层这一特殊结构与裸地表土(2 cm)土壤田间持水



注: 字母a、b表示同一土层两种类型生物结皮与裸地之间土壤容重差异显著 ($P<0.05$)

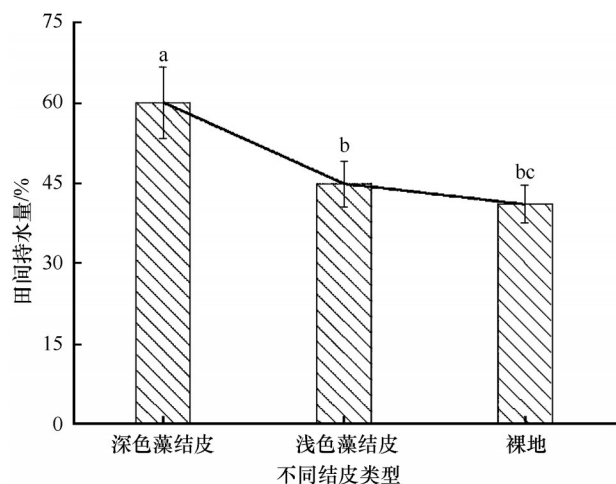
图3 不同土层土壤容重随地表覆盖变化

Fig. 3 The soil bulk density of different soil layers with different land cover

量变化情况见图4。由图可知,深色藻结皮结皮层田间持水量为60.3%,显著高于浅色藻结皮层(45.0%)和裸地表层(41.2%)土壤田间持水量,浅色藻结皮层土壤田间持水量略高于裸地,但两者之间差异不显著($P<0.05$)。

2.3 生物结皮对土壤养分含量的影响

土壤有机质、全氮及酸碱度是评价土壤质量的重要化学指标。表2为不同类型生物结皮及裸地各层土壤有机质、全氮含量及pH值。由表中可见,深色藻结皮结皮层土壤有机质和全氮含量与浅色藻结皮没有显著差异。两种类型生物结皮结皮层土壤有机质和全氮含量均显著高于0~20 cm土壤层。0~20 cm土层土壤有机质和全氮含量为深色藻结皮



注: 字母 a、b 和 c 表示两种类型生物结皮与裸地之间土壤田间持水量差异显著 ($P < 0.05$)

图 4 不同藻类生物结皮层及裸地表层土壤田间持水量

Fig. 4 The field water holding capacity of two kinds of cyanobacteria biocrusts and bare surface soil

表 2 不同类型生物结皮各土层土壤养分含量

Table 2 Soil total nitrogen content in different soil layers of different types of biocrusts

土壤养分	不同结皮类型	结皮层	0~5 cm	5~10 cm	10~20 cm
有机质/%	D-BSC	4.87Aa	4.58Aa	4.52Aa	3.96Ab
	L-BSC	4.18Aa	3.54Bb	3.07Bb	2.64Bc
	NONE		1.22Cc	1.33Cc	1.52Cc
全氮/(g·kg ⁻¹)	D-BSC	2.66Aa	2.25Bab	2.59Ba	2.45Bab
	L-BSC	2.16Aa	1.72Ab	1.66Ab	1.47Ab
	NONE		1.37Ac	1.35Ac	1.33Ac
pH	D-BSC	7.22Aab	7.21Aab	7.38Ba	7.32Aa
	L-BSC	7.15Aab	7.25Aa	7.26Aa	7.37Aa
	NONE		7.39Ba	7.41Ba	7.37Aa

注: 大写字母 A、B 和 C 表示同层深色藻结皮 (D-BSC)、浅色藻结皮 (L-BSC) 及裸地 (NONE) 之间土壤养分含量差异显著性 ($P < 0.05$) 小写字母 a、b 和 c 表示同一地表覆盖下不同深度土壤养分含量差异显著性 ($P < 0.05$)。

覆盖下含量最高, 浅色藻结皮次之, 裸地最低, 且三者之间含量差异显著。生物结皮的形成显著影响了土壤 pH 大小。两种类型生物结皮结皮层土壤 pH 值均显著低于 0~20 cm 土层土壤 pH 值, 而在 0~20 cm 土层中, 两种类型生物结皮之间土壤 pH 没有显著性差异。结皮层 pH 略低于裸地, 但与裸地之间相比, 差异性也不显著。

3 讨论

生物结皮可以在各种气候条件下广泛发育^[1], 国内外关于生物结皮的研究主要集中在荒漠地区

及干旱半干旱的黄土高原等地区^[4-16], 关于青藏高原高寒冻土区生物结皮的发育特点鲜有报道。本研究结果表明冻土区生物结皮主要是以藻为主的生物结皮, 结皮层厚度大约为 6~22 mm。其在厚度上大于干旱的荒漠地区藻类结皮厚度 (1~5 mm)^[16]。这与该地区特殊的生态环境条件密切相关, 由于冻土区常年温度低, 生物结皮活性较弱, 呼吸等生理活性缓慢^[4,21], 其中积累的物质不易分解, 因此, 生物结皮层厚度较大。同时, 生物结皮的厚度与生物结皮的发育年限密切相关^[29]。因此, 该区域植被退化区域生物结皮 (浅色藻结皮) 较未退化区生物结皮 (深色藻结皮) 发育年限短, 故其深色藻结皮厚度大于浅色藻结生物结皮小。

生物结皮对土壤理化属性具有显著影响^[1,3,14-15,28]。关于生物结皮对土壤颗粒组成的影响, 在不同的研究区域所得的研究结论存在一定分歧。有些研究结果表明, 生物结皮的存在, 能够细化土壤颗粒^[28,34-35]。也有研究表明, 生物结皮对土壤颗粒组成并没有显著影响^[36]。本研究结果表明, 由于生物结皮的发育可增加土壤中粉粒含量, 5~20 cm 土层中粉粒表现为深色藻结皮 > 浅色藻结皮 > 裸地, 但差异并不显著。来自沙区的研究结果表明, 生物结皮能够黏化土壤, 捕捉土壤中细颗粒, 使得表层土壤中黏粒和粉粒含量呈显著增加趋势。在黄土区的研究结果也表明, 随着生物结皮的发育, 结皮层土壤细颗相对增加^[28]。这些研究结果均表明生物结皮对土壤颗粒组成的影响集中在结皮层及其下 0~5 cm 左右, 细颗粒呈现明显的表聚现象^[28]。而本研究结果发现由于结皮层的覆盖土壤粉粒在 20~30 cm 土层显著增加, 这可能与该区域强烈的冻融过程及水热迁移有关。由于该区域早晚、四季之间温差较大, 呈现明显的冻融循环作用^[24-25], 因此生物结皮层细颗粒可能由于冻融作用及水分迁移随之向下移动, 聚集在其下 20~30 cm 土层。这种迁移作用可能随着水分含量以及发育年限的不同而发生相应的变化。与此同时, 本研究结果表明, 冻土区生物结皮层土壤容重也显著低于下层土壤, 同时深色藻结皮不仅显著降低了自身容重, 也影响到了其下 0~20 cm 土层土壤容重。而浅色藻结皮则对下层土壤容重影响不明显。本研究区海拔高于 4 200 m, 海拔高、风力大, 与沙漠区域不同, 生物结皮在形成过程中, 并没有显著的捕捉细颗粒的作用, 使结皮层土壤细化从而降低结皮层土壤容

重。生物结皮在形成过程中,通过菌丝体、藻丝、假根或分泌的多糖来捆绑、黏结土壤颗粒,使得土壤形成许多团聚结构,土壤中孔隙增大,土壤容重降低^[34],而深色藻结皮发育年限较长,厚度较厚,其孔隙度高,因此,容重较浅色藻结皮小,田间持水量显著高于浅色藻结皮及裸地。

生物结皮的形成,不仅可以改善土壤结构^[28,37],也可显著影响表层土壤的养分累积^[9,11,15,21]。生物结皮中的固氮蓝藻的存在,可将大气中的氮固定从而输入到表层土壤中^[38]。同时生物结皮中的微生物能够进行固碳作用,可以增加表层土壤有机质含量^[1,14,28],增加土壤肥力。虽然生物结皮对土壤养分积累效应已经形成一致结论,但其作用程度在不同区域还有所不同^[14,28,40]。本研究结果表明该区两种类型生物结皮均显著增加了结皮层及其下 0~20 cm 土层土壤有机质含量。藻类是生物结皮发育初期的先锋物种,它的形成能够向体外分泌以多糖为主的物质,从而形成生物结皮^[41]。同时,在给予充足的水分和光照条件下,生物结皮能够进行固碳作用,其固碳潜力主要取决于生物结皮的生物组成,研究已表明藓结皮的固碳能力高于藻结皮^[42]。该区域两种类型生物结皮,均以藻类结皮为主,因此其固碳能力可能没有显著差异。同时死亡的藻体又成为土壤有机物,为其他异氧微生物提供碳源^[1],因此两种类型生物结皮均依靠显著增加了结皮层及其下 0~20 cm 土层土壤有机质含量。然而,两种生物结皮对土壤全氮含量的影响则有所不同。深色藻结皮的形成同时也提高了结皮层及其下 0~20 cm 土层土壤全氮含量,浅色藻结皮则仅提高了结皮层土层土壤全氮含量,对其下 0~20 cm 土层土壤全氮含量没有显著影响。生物结皮有机体在湿润状态下才能够进行生理代谢活动,进行相应的固氮作用,并且不同的物种固氮所需最佳水温条件不同^[6]。生物结皮在湿润后,其固氮活性强烈受制于水分^[43]。以上研究也表明,深色藻结皮的结皮层田间持水量显著高于浅色藻结皮,因此其固氮持续时间可能较长,故其固氮作用较强,向土壤中输入的氮素较多。氮素在水热交换作用下,向下层输入。而浅色藻结皮持水量较低,固氮作用较弱,因此其固定的氮素仅仅存留在结皮层。同时,生物结皮的存在降低了结皮层 pH,但其对结皮层及下层土壤 pH 并没有显著影响。由于生物结皮某些藻类和地衣能够在湿润状态下进行生理活动,释放有机酸,

使土壤 pH 降低^[43],青藏高原黄河源区这一高寒地区气温常年低下,并且降水多以固态或暴雨的形式^[44],并且在低温条件下,生物结皮有机体产生的有机酸较少也不易挥发释放出来,因此对土壤 pH 影响较小。高寒地区生物结皮对土壤养分影响过程及机理还需进一步研究。

4 结论

本文初步研究了青藏高原黄河源区生物结皮对土壤理化属性的影响,主要结论如下:

(1)生物结皮是青藏高原黄河源区植被退化的一个关键环节,其盖度在该区可达 37.3%~51.7%,该区生物结皮主要以藻结皮为主,且厚度较干旱荒漠地区(1~5 mm)厚,其厚度平均可达 12.6 mm。

(2)该区生物结皮的发育对土壤颗粒组成具有一定的影响,可增加其下覆土层土壤粉粒(0.002~0.050 mm)含量,但粉粒增加主要集中在 5~20 cm 土层;生物结皮的发育显著降低了结皮层土壤容重,增加了该层土壤田间持水量。

(3)高寒地区藻类型生物结皮均显著增加了结皮层及其下 0~20 cm 土层土壤有机质含量;而深色藻结皮的形成同时也提高了结皮层及其下 0~20 cm 土层土壤全氮含量,浅色藻结皮则仅提高了结皮层土层土壤全氮含量,其下 0~20 cm 土层土壤全氮含量有所增加,但差异不显著。研究区生物结皮的形成降低了结皮层土壤 pH,对其下 0~20 cm 土壤 pH 没有显著性影响。

参考文献(References):

- [1] Belnap J, Lange O L. Biological soil crusts: structure, function, and management[M]. Berlin: Springer, 2003.
- [2] Fang Shibo, Feng Ling, Liu Huajie, et al. Response of biological soil crusts (BSC) from arid-semiarid and polar region to global climate change[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(7): 3312-3320. [房世波, 冯凌, 刘华杰, 等. 生物土壤结皮对全球气候变化的响应[J]. 生态学报, 2008, 28(7): 3312-3320.]
- [3] Wu Yuhuan, Gao Qian, Cheng Guodong. Ecological function of biological soil crusts[J]. Chinese Journal of Ecology, 2002, 21(4): 41-45. [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.]
- [4] Weber B, Büdel B, Belnap J. Biological soil crusts: an organizing principle in drylands[M]. Berlin: Springer, 2016.
- [5] Belnap J. Impacts of off-road vehicles on nitrogen cycles in biological soil crusts: resistance in different U. S. deserts[J]. Journal of Arid Environments, 2002, 52: 155-165.
- [6] Billings S A, Schaeffer S M, Evans R D. Nitrogen fixation by biological soil crusts and heterotrophic bacteria in an intact Mojave Desert ecosystem with elevated CO₂ and added soil carbon[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2003, 35: 634-649.

- [7] Brostoff W N, Rasoul S M, Rundel P W. Photosynthesis of crypto biotic soil crusts in a seasonally inundated system of pans and dunes in the western Mojave Desert, CA: Field studies [J]. *Flora*, 2005, 200: 592-600.
- [8] Kidron G J, Vonshak A, Abeliovich A. Recovery rates of macrobiotic crusts within a dune ecosystem in the Negev Desert [J]. *Geomorphology*, 2008, 100: 444-452.
- [9] Gómez D A, Aranibar, J N, Tabeni S, et al. Biological soil crust recovery after long-term grazing exclusion in the Monte Desert (Argentina). Changes in coverage, spatial distribution, and soil nitrogen [J]. *Acta Oecologica*, 2012, 38: 33-40.
- [10] Miralles I, Trasar-Cepeda C, Leirós M C, et al. Labile carbon in biological soil crusts in the Tabernas desert, SE Spain [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 58: 1-8.
- [11] Zhao Yunge, Xu Mingxiang, Wang Quanjiu, et al. Impact of biological soil crust on soil physical and chemical properties of rehabilitated grassland in Hilly Loess Plateau, China [J]. *Journal of Natural Resources*, 2006, 32(3), 441-448. [赵允格, 许明祥, 王全九, 等. 黄土丘陵区退耕地生物结皮对土壤理化性状的影响 [J]. *自然资源学报*, 2006, 21(3): 441-448.]
- [12] Gao Liqian, Zhao Yunge, Xu Mingxiang, et al. The effects of biological soil crust succession on soil ecological stoichiometry characteristics [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(2): 678-688. [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.]
- [13] Li Xinrong, Wang Xinping, Zhang Jingguang, et al. Microbiotic soil crust and its effect on vegetation and habitat on artificially stabilize desert dunes in Tengger Desert, North China [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2012, 35: 147-154.
- [14] Li Xinrong, Jia Xiaohong, Long Liqun, et al. Effects of biological soil crusts on seed bank, germination and establishment of two annual plant species in the Tengger Desert (N China) [J]. *Plant and Soil*, 2005, 277: 375-385.
- [15] Zhang, Yuanming, Wu Nan, Zhang Bingchang, et al. Species composition, distribution patterns and ecological functions of biological soil crusts in the Gurbantunggut Desert [J]. *Journal of Arid Land*, 2010, 2(3): 180-189.
- [16] Zhang Yuanming, Chen Jin, Wang Xueqin, et al. The Distribution Patterns of Biological Soil Crust in Gurbantunggut Desert [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(1): 53-60. [张元明, 陈晋, 王雪芹, 等. 古尔班通古特沙漠生物结皮的分布特征 [J]. *地理学报*, 2005, 60(1): 53-60.]
- [17] Yin Yunhe, Wu Shaohong, Zhao Dongsheng, et al. Ecosystem water conservation changes in response to climate change in the source region of the Yellow River from 1981 to 2010 [J]. *Geographical Research*, 2016, 35(1): 49-57. [尹云鹤, 吴绍洪, 赵东升, 等. 过去 30 年气候变化对黄河源区水源涵养量的影响 [J]. *地理研究*, 2016, 35(1): 49-57.]
- [18] Zhang Ying, Zhang Chaobin, Wang Zhaoqi, et al. Spatiotemporal dynamics of grassland coverage in response to climate change from 1982 to 2012 in the Three Rivers Source Region [J]. *Pratacultural Science*, 2017, 34(10): 1977-1990. [张颖, 章超斌, 王钊齐, 等. 三江源 1982-2012 年草地植被覆盖度动态及其对气候变化的响应 [J]. *草业科学*, 2017, 34(10): 1977-1990.]
- [19] Xue Xian, Guo Jian, Zhang Fang, et al. Development and cause of aeolian desertification in alpine region: in case of Maduo County in Yellow River Source Area [J]. *Journal of Desert Research*, 2007, 27: 725-732. [薛娴, 郭坚, 张芳, 等. 高寒草甸地区沙漠化发展过程及成因——以黄河源区玛多县为例 [J]. *中国沙漠*, 2007, 27(5): 725-732.]
- [20] Yin Jianpeng, Gao Jinlong, Feng Qisheng, et al. Simulation and evaluation of forage height in alpine meadow grassland in headwaters of Yellow River [J]. *Prataculture Science*, 2018, 35(4): 737-748. [殷建鹏, 高金龙, 冯琦胜, 等. 黄河源区高寒草甸群落高度遥感模拟与评价 [J]. *草业科学*, 2018, 35(4): 737-748.]
- [21] Nash T H III. *Lichen Biological* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.
- [22] Belnap J, Phillips S L, Miller M E. Response of desert biological soil crusts to alterations in precipitation frequency [J]. *Oecologia*, 2004, 141(2): 106-316.
- [23] Luo Dongliang, Jin Huijun, Lü Lanzhi, et al. Temporal and spatial characteristics of permafrost active layer and freezing-thawing process of seasonal permafrost in the source area of the Yellow River [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59(14): 1327-1336. [罗栋梁, 金会军, 吕兰芝, 等. 黄河源区多年冻土活动层和季节冻土冻融过程时空特征 [J]. *科学通报*, 2014, 59(14): 1327-1336.]
- [24] Li Kaiming, Li Xuan, Wang Cuiyun, et al. Research on the environmental effect caused by climate change in the source region of the Yellow River [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(5): 1183-1192. [李开明, 李绚, 王翠云, 等. 黄河源区气候变化的环境效应研究 [J]. *冰川冻土*, 2013, 35(5): 1183-1192.]
- [25] Wang Zhigui, Wang Suping, Wang Jianbing, et al. Study on the variation characteristics of reference crop evapotranspiration in recent 40 years in source region of Yellow River [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2013, 30(6): 169-173. [汪治桂, 王素萍, 王建兵, 等. 黄河源区近 40 年参考作物蒸散量变化特征研究 [J]. *干旱地区农业研究*, 2013, 30(6): 169-173.]
- [26] Luo Dongliang, Jin Huijun, Wu Qingbai, et al. Thermal regime of warm-dry permafrost in relation to ground surface temperature in the Source Areas of Yangtze and Yellow rivers on the Qinghai-Tibet Plateau, SW China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 618: 1003-1045.
- [27] Zhang Peng. Spatial distribution characteristics of biological soil crusts and its impact factors and modeling on slope scale in small watershed of northern Shaanxi [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2015. [张朋. 陕北小流域坡面尺度生物结皮空间分布特征及其影响因子与建模 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.]
- [28] Gao Liqian, Zhao Yunge, Qin Ningqiang, et al. Impact of biological soil crust on soil physical properties in the Hilly Loess Plateau region, China [J]. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(8): 1316-1324. [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): 1316-1324.]
- [29] Fan Wenbo, Li Xiaojuan. Determination the bulk density of biological soil crust by the method of coatings [J]. *Soil and Water Conservation Science and Technology in Shanxi*, 2001, 3: 9-10. [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.]
- [30] Bremner J M, Mulvaney C S. Nitrogen-Tatal [M]//Page A L, Miller R H, Keeney D R. *Methods of soil analysis*, Part 2. 2nd ed. Madison L American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, 1982: 595-617.
- [31] Nelson D W, Sommers E. Total carbon, organic carbon, and organic matter [M]//Page A L, Miller R H, Keeney D R. *Methods of soil analysis*, Part 2. Chemical Analysis. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy and Soil Science Society

- of America, 1996, 961-1110.
- [32] Deng Lei, Zhang Zhinan, Shangguan Zhouping, et al. Long-term fencing effects on plant diversity and soil properties in China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2014, 137: 7-15.
- [33] Deng Lei, Liu Guobin, Shangguan Zhouping. Land-use conversion and changing soil carbon stocks in China's grain-for-green program: a synthesis[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(11): 3544-3556.
- [34] Xiao Bo, Zhao Yunge, Shao Mingan. Effects of biological soil crust on soil physiochemical properties in water-wind erosion crisscross region, northern Shaanxi Province, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(11): 4662-4670. [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.]
- [35] Bu Nan. Study on the soil and water conservation function of microbilitic soil crusts on loess area of northern Shaanxi Province [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2009. [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.]
- [36] Guo Yirui, Zhao Halin, Zuo Xiaolan, et al. Biological soil crust development and its topsoil properties in the process of dune stabilization, Inner Mongolia, China[J]. *Environmental Geology*, 2008, 54: 653-662.
- [37] Belnap J. Comparative structure of physical and biological soil crusts[M]//Belnap J, Lange O L. *Biological soil crusts: structure, function, and management*. Berlin: Springer, 2003.
- [38] Belnap J. Nitrogen fixation in biological soil crusts from south-east Utah, USA[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35: 128-135.
- [39] Cui Yan, Lü Yizhong, Li Baoguo. Physico-chemical properties of soil microbiotic crusts on Erdos Plateau[J]. *Soil*, 2004, 36(2): 197-202. [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.]
- [40] Zhang Yuanming, Yang Weikang, Wang Xueqin, et al. Influence of cryptogamic soil crusts on accumulation of soil organic matter in Gurbantunggut Desert, northern Xinjiang, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(12): 3420-3425. [张远明, 杨维康, 王雪芹, 等. 生物结皮影响下的土壤有机质分异特征[J]. *生态学报*, 2005, 25(12): 3420-3425.]
- [41] Zhao Yunge, Xu Mingxiang, Belnap J. Response of biocrusts photosynthesis environmental factors: a possible explanation of the spatial distribution of biocrusts in the Hilly Loess Plateau region of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(17): 4668-4675. [赵允格, 许明祥, Jayne Belnap. 生物结皮光合作用对光温水响应及其对生物结皮空间分布格局的解译[J]. *生态学报*, 2010, 30(17): 4668-4675.]
- [42] Su Yangui, Li Xinrong, Zhao Xin, et al. The nitrogenase activity of biological soil crusts and their responses to environmental factors[J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(3): 332-338. [苏延桂, 李新荣, 赵昕, 等. 不同类型生物结皮固氮活性对环境因子的响应研究[J]. *地球科学进展*, 2011, 26(3): 332-338.]
- [43] Leão P N, Engene N, Antunes A, et al. The chemical ecology of cyanobacteria[J]. *Natural Product Reports*, 2012, 29(3): 372-391.
- [44] Jin Huijun, Wang Shaoling, Lü Lanzhi, et al. Features and degradation of frozen ground in the sources area of the Yellow River, China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, 32(1): 10-17. [金会军, 王绍令, 吕兰芝, 等. 黄河源区冻土特征及退化趋势[J]. *冰川冻土*, 2010, 32(1): 10-17.]

The impact of the biological soil crusts on the frozen soil properties in the frozen ground region

MING Jiao, SHENG Yu, JIN Huijun, ZHANG Ze, DU Yuxia

(State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources,
Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: BSCs (biological soil crusts), as ubiquitous living covers on soil surface of the enclosure grassland in the frozen ground region of the Qinghai-Tibet Plateau. However, studies on the influence of biocrusts on soil properties in the frozen ground region were fresh. Objective of the paper was to determine the influence of the biological soil crusts on soil physicochemical properties of the surface frozen soil. Field investigation was conducted and physicochemical properties of two kinds of BSCs from this region was analyzed. The results showed that BSCs occupy 37.3%~51.7% of the soil surface and the cyanobacteria crust is dominant across the study area, with a thickness of up to 12.6 mm, which was higher than the hot arid desert regions. At the same time, BSCs increase the silt particle content of 5~20 cm, but the impact is not significant, while it had remarkable effect on water holding capacity and soil bulk density. Water holding capacity of the BSCs layers increased by 10.0%~40.0% compared to the bare soils, while soil bulk density of the BSCs layer was 30.0% lower than bare soils. Both types of BSCs (dark cyanobacteria crusts and light cyanobacteria crusts) remarkably increased soil organic carbon content (TOC) of BSC layer and 0~20 cm soil layers. While both BSCs have different impact on soil total nitrogen (TN) content, dark cyanobacteria crusts had significant increase on TN in the BSCs layers and below 20 cm soil layers, but light cyanobacteria crusts only increased BSCs layer TN had no impact on the below 20 cm soil layers. Meanwhile the BSCs have no significant impact on the soil pH. Biological crust is very important in the process of vegetation degradation in alpine ecosystem. The research results provide a theoretical basis for revealing the ecological functions of biological crust in alpine ecosystem.

Key words: frozen ground region; biological soil crusts; soil bulk density; soil physicochemical properties

(责任编辑: 陈拓; 编辑: 庞瑜, 周成林)