

# 高寒草甸生物结皮发育特征及其对土壤水文过程的影响

李小娟<sup>1</sup>, 张莉<sup>3</sup>, 张紫萍<sup>5</sup>, 王冬<sup>6</sup>, 李英年<sup>2,4</sup>,  
李茜<sup>2</sup>, 宋明华<sup>7</sup>, 李以康<sup>2</sup>, 周华坤<sup>2</sup>, 杨永胜<sup>2,4</sup>

(1.青海民族大学, 西宁 810007; 2.中国科学院 西北高原生物研究所 青海省寒区恢复生态学重点实验室, 西宁 810001; 3.西宁市测绘院, 西宁 810000; 4.中国科学院 高原生物适应与进化重点实验室, 西宁 810001; 5.青海省生态环境遥感监测中心, 西宁 810000; 6.河南大学, 开封 475004; 7.中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**摘 要:**为了明确不同退化程度高寒草甸生物结皮发育特征及其对土壤水文过程的影响,以三江源泽库高寒草甸生物结皮为研究对象,分析了不同退化程度(原生植被、轻度退化、中度退化及重度退化)高寒草甸生物结皮的优势种、盖度、厚度、容重及其对土壤水分入渗、蒸发的影响。结果表明:(1)不同退化程度泽库高寒草甸生物结皮以苔藓结皮为主,其优势种为土生对齿藓。原生植被至轻度退化阶段,生物结皮盖度、厚度无显著变化。至中度退化阶段,生物结皮容重无显著变化,其盖度、厚度分别较轻度退化样地分别下降 74.85%, 35.49% ( $p < 0.05$ )。至重度阶段,生物结皮完全消失。(2)生物结皮对高寒草甸土壤水分入渗、蒸发过程无显著影响。覆盖和移除生物结皮处理初始入渗速率分别为 0.20, 0.22 mm/s, 二者稳定入渗速率均为 0.03 mm/s; 覆盖和移除生物结皮处理平均土壤日蒸发量分别为 1.79, 1.78 mm/d。研究结果可为该区域其他生物结皮的相关研究提供数据基础。

**关键词:**退化程度; 高寒草甸; 生物结皮; 发育特征; 土壤水分

**中图分类号:** S812.1; S152

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2019)06-0139-06

## Characteristic of Biological Soil Crust and Its Effects on Hydrological Processes in Alpine Meadow

LI Xiaojuan<sup>1</sup>, ZHANG Li<sup>3</sup>, ZHANG Ziping<sup>5</sup>, WANG Dong<sup>6</sup>, LI Yingnian<sup>2,4</sup>, LI Qian<sup>2</sup>,  
SONG Minghua<sup>7</sup>, LI Yikang<sup>2</sup>, ZHOU Huakun<sup>2</sup>, YANG Yongsheng<sup>2,4</sup>

(1.Qinghai Nationalities University, Xining 810007, China; 2.Key Laboratory of Restoration Ecology in Cold Region of Qinghai Province, Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China; 3.Xining Institute of Surveying and Mapping, Xining 810000, China; 4.Key Laboratory of Adaptation and Evolution of Plateau Biota, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China; 5.Qinghai Remote Sensing Monitoring Center of Eco-Environment, Xining 810000, China; 6.Henan University, Kaifeng, Henan 475004, China; 7.Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

**Abstract:** In order to understand the characteristics of biological soil crusts (BSCs) and their effects on hydrological processes in different degraded alpine meadows, BSCs in Zeku alpine meadow in the headwater region of three rivers were taken as research samples, the dominant species, coverage, thickness and bulk density of BSCs of alpine meadows at different degradation degrees [native vegetation (NV), light degradation (LD), middle degradation (MD) and severe degradation (SD)] and their effects on soil water infiltration and evaporation were analyzed. The results showed that: (1) the dominant style of BSCs of alpine meadow at different degradation degrees was moss crust whose dominant species was *Didymodon vinealis* (Brid.) Zand; from NV to LD period, the coverage and thickness of BSCs had no significant difference, to MD period, the bulk densities of BSCs had no significant difference, the coverage and thickness of BSCs significantly reduced by 74.85%, 35.49%, respectively, compared that of LD ( $p < 0.05$ ). To SD period, BSCs completely disap-

收稿日期: 2019-01-01

修回日期: 2019-01-17

资助项目: 中国科学院西部之光项目(B类)“三江源退化高寒草甸恢复过程中的水分效应研究”; 国家重点研发计划子课题(2017YFA0604801, 2017YFA0604801, 2016YFC0501802); 青海省科技厅基础研究项目(2019-ZJ-7073); 青海省青年基金(2016-ZJ-923Q, 2016-ZJ-943Q); 青海省科技基础条件平台项目(2018-ZJ-T09); 青海省创新平台建设专项(2017-ZJ-Y20); 国家自然科学基金面上项目(41877547)

第一作者: 李小娟(1970—), 女, 陕西凤翔人, 硕士, 副教授, 主要从事逆境生理与分子生物学研究。E-mail: chouerli@126.com

通信作者: 杨永胜(1987—), 男, 甘肃兰州人, 博士, 助理研究员, 主要从事高寒草地土壤水分及水循环研究。E-mail: ysyang@nwipb.cas.cn

peared; (2) BSCs had no significant effects on the soil water infiltration and evaporation process in alpine meadow; the initial infiltration rates of BSC cover and removal were 0.20, 0.22 mm/s, respectively, both of these steady infiltration rates were 0.03 mm/s, and average daily evaporation amounts of BSC cover and removal was 1.79, 1.78 mm/d, respectively. These results can provide the basic data for related research about BSCs in alpine meadow.

**Keywords:** degradation degree; alpine meadow; biological soil crusts; development characteristics; soil moisture

生物土壤结皮(简称“生物结皮”)是由土壤微生物、藻类、地衣以及苔藓等植物类群与土壤颗粒胶结而成的复合体,其一般发育于地表,在干旱、半干旱地区广泛分布,部分地区盖度甚至超过 70%<sup>[1]</sup>。由于生物结皮的形成可以明显改善土壤理化性质,提高土壤稳定性及促进种子库的建立<sup>[2-3]</sup>,使生物结皮在改善土壤抗侵蚀能力、土壤肥力以及生物多样性方面起着重要作用<sup>[4-5]</sup>,对干旱、半干旱区植被恢复与重建具有重要的生态学意义。

生物结皮的形成是一个其形态、物种组成及生态功能由简单到复杂的变化过程。在水热条件合适的情况下,土壤中的微生物和一些低营养细菌分泌的大量黏性物质将土壤细颗粒粘结在一起。随着时间的增加,土壤细颗粒及土壤养分积累到一定程度之后,藻类植物,特别是丝状藻类的大量出现,逐渐形成厚度约 2~3 mm 的黑色藻结皮,其厚度往往较薄,硬而脆<sup>[6]</sup>。当土壤养分、水分及稳定性进一步改善,地衣和苔藓植物开始生长,生物结皮发育逐渐趋向稳定,形成厚度介于 8~20 mm 的苔藓结皮(遇水时呈绿色,干燥时呈黑色和褐色<sup>[7]</sup>)。由于受到诸如植被盖度、降水状况、土壤理化特征等多种生物和非生物因素的影响<sup>[8-9]</sup>,不同区域生物结皮发育特征和生态功能差异较大。目前,国内有关生物结皮发育特征及生态功能方面的研究普遍集中在沙坡头地区、毛乌素沙地、古尔班通古特沙漠和黄土高原地区等低海拔地区<sup>[3]</sup>,针对高海拔地区,尤其是涉及三江源高寒草甸生物结皮的研究相对较少。

三江源素有“中华水塔”之称,是我国最重要的生态安全和水源涵养功能区。作为青藏高原水源涵养的主体基质之一,高寒草甸分布区域广阔,发育环境多样,在维系区域经济发展、保障高原水源涵养和保持生物多样性等方面发挥着不可替代的作用<sup>[10]</sup>。近几十年间,在诸多人为和自然因素的共同影响下,三江源高寒草甸生态系统发生严重退化,对土壤和植被生产力均产生了显著影响<sup>[11]</sup>,相关学者也对退化高寒草甸生态系统的诸多方面进行了研究,并取得了一系列研究成果<sup>[12]</sup>。然而,目前有关不同退化程度高寒草甸的研究多集中在植物群落特征<sup>[13]</sup>、土壤理化特征<sup>[14]</sup>、土壤酶活性

及微生物方面<sup>[15]</sup>,而涉及生物结皮方面的报道较少。笔者在野外实地考察过程中发现生物结皮在三江源区泽库县不同退化阶段高寒草甸均有分布。为此,本研究以三江源区泽库县不同退化阶段高寒草甸生物结皮为研究对象,分析退化程度对高寒草甸生物结皮优势种、盖度、厚度、容重及土壤水分入渗、蒸发的影响,明确三江源不同退化程度高寒草甸区域生物结皮发育特征及其土壤水分效应,以期为相关领域的其他研究工作提供基础数据和理论支撑。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于青海省黄南州泽库县,境内绝大部分地区海拔在 3 500 m 以上,平均海拔 3 700 m,气候类型为高原大陆性季风气候,冷季漫长而干冷,暖季短促而润凉。年平均气温为 -2.4~2.8℃,年平均降水量为 437~511 mm,年平均蒸发量为 1 325.8 mm,年平均日照时数在 2 509~2 639 h,全年无绝对无霜期,牧草生长期仅 150 d 左右。土壤类型主要以高山草甸土、高山灌丛草甸土、山地草甸土和沼泽土为主。草地类型主要为山地草甸和高寒草甸,优势植物种有紫花针茅(*Stipa purpurea* Griseb.)、细叶苔草(*Carex stenophylloides* V. Kreczke.)、高山嵩草(*Kobresia pygmaea* C. B. Clarke.)、矮嵩草(*Kobresia capilis* (C. A. Mey.) Serg.)、线叶嵩草(*Kobresia humilis* (Deens.) C. B. Clarke.)、披碱草(*Elymus duhuricus* Turcz.)、藏嵩草(*Kobresia schoenoides* (C. A. Mey) Stend.)、冷蒿(*Artemisia frigida* Will.)等,伴生种为火绒草(*Leontopodium leontopodioides* (Willd.) Beauv.)、披针叶黄华(*Thermopsis lanceolata* R. Br.)、雪白委陵菜(*Potentilla nivea* Linn.)、马先蒿(*Pedicularis reaupinanta* L.)和兰石草(*Lancea tibetica* Hook.)等。该地区草场退化严重,退化草地面积达 25.34 万 hm<sup>2</sup>,占全县草地总面积的 38.84%。

### 1.2 研究方法

1.2.1 样地与样方 基于前期野外考察结果,在青海省黄南州泽库县选取试验样地(35°04′39.08″N, 101°29′03.58″E,海拔 3 687 m),按草甸退化的相关划

分标准<sup>[16]</sup>,选定原生植被、轻度退化、中度退化和重度退化样地(表 1),样地大小均为 5 m×5 m,样地相互间隔 200 m。每个样地原位测定生物结皮盖度、厚度,采集生物结皮样品至实验室内鉴定其生物组分、测定容重。依据生物结皮盖度的测定结果,在生物结皮盖度

最大的样地开展土壤水分入渗和蒸发试验,其中,将生物结皮盖度基本一致的区域分为两部分,一部分保留地表生物结皮层,另一部分用刀片将生物结皮层(厚度介于 1~2 mm)移除,即设置覆盖生物结皮和移除生物结皮两个处理,每个处理 3 个重复。

表 1 研究区不同退化程度样地植被状况

草地状态	植被盖度/%	平均高度/cm	物种数	植被状况
原生植被	95	2.5	14	存在明显的草毡层,优势植物种为小嵩草( <i>Kobresia pyg-maca</i> )、矮嵩草及火绒草为主
轻度退化	65	1.4	5	存在明显的草毡层,优势植物种为披针叶黄华
中度退化	45	3.2	4	存在明显的草毡层,优势植物种为兰石草,雪白委陵菜
重度退化	20	1.1	4	无草毡层,优势植物种为马先蒿和兰石草

1.2.2 测定指标与方法

(1) 生物结皮生物组分鉴定。生物结皮主要类型通过肉眼观察和经验判断。苔藓结皮生物组分的鉴定由内蒙古大学白学良教授完成。

(2) 容重、盖度和厚度。利用涂膜法<sup>[17]</sup>、针刺法<sup>[18]</sup>分别测定生物结皮容重和盖度,每个样地不少于 5 个重复。在地表较干燥的状态下,用平铲小心获取结皮层,利用游标卡尺测定生物结皮厚度,每个样地重复 20 次,取平均值。

(3) 土壤水分入渗过程的测定。利用双环法<sup>[19]</sup>测定土壤入渗速率。试验时记录水温。土壤水分入渗速率计算公式参见文献<sup>[20]</sup>。然后,利用公式<sup>[20]</sup>将不同水温的入渗速率换算为 10℃的入渗速率。

(4) 土壤水分蒸发过程的测定。在每个采样点,用橡胶锤将蒸渗计(直径为 20 cm,高度为 25 cm,材质为聚氯乙烯)缓慢打入土中,用铁锹将其周边土壤挖开,取得原状土柱,用透明胶布将均匀分布直径为 3 mm 小孔的聚氯乙烯板粘在蒸渗计下端。将所有原状土柱收集好后开展土壤水分蒸发过程的测定,具体测定方法参见参考文献<sup>[20]</sup>。

1.3 数据处理

试验数据运用 Microsoft Excel 2010 进行处理、分析及作图,数据表达为平均值±标准差(Means±SE)。利用 SPSS 12.0 中的 One-way ANOVA 模块实现各处理间指标的差异性检验。

2 结果与分析

2.1 生物结皮发育特征

2.1.1 生物组成和盖度 由表 2 可知,三江源不同退化程度高寒草甸生物结皮以苔藓结皮为主,其优势种主要为土生对齿藓(*Didymodon vinealis* (Brid.) Zand.),伴生种为条纹细丛藓(*Microbryum starckeanum* (Hedw.) Zand.)和细叶对齿藓(*Didymodon perobtus* Broth.)。

表 2 不同退化程度生物结皮类型及种类

退化程度	生物结皮类型	生物结皮主要组成种类
原生植被	以苔藓结皮为主,伴有零星地衣结皮	土生对齿藓、条纹细丛藓、细叶对齿藓
轻度退化	苔藓结皮	土生对齿藓、条纹细丛藓
中度退化	苔藓结皮	土生对齿藓、条纹细丛藓
重度退化	无	无

不同退化程度高寒草甸生物结皮盖度差异明显(图 1),原生植被至轻度退化阶段,生物结皮盖度无显著变化,基本维持在 19%上下。随着退化程度的进一步加剧,生物结皮盖度显著下降。与轻度退化样地相比,中度退化样地生物结皮盖度下降 74.85%( $p<0.05$ )。至重度退化阶段,生物结皮完全消失。

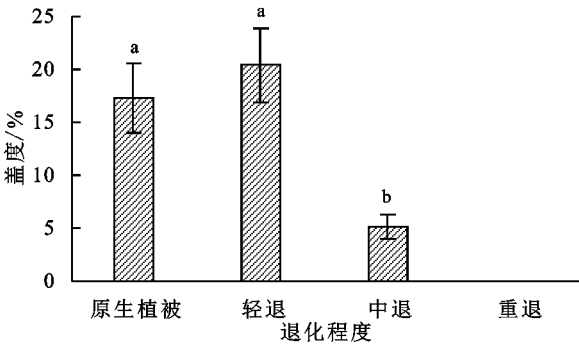


图 1 不同退化程度高寒草甸生物结皮盖度( $n \geq 5$ )

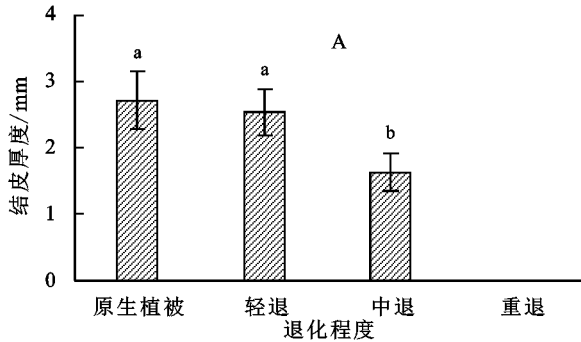
2.1.2 生物结皮厚度和容重 随着退化程度的增加,高寒草甸生物结皮厚度呈先稳定后降低的趋势(图 2A),原生植被和轻度退化阶段,生物结皮厚度维持在 2.6 mm 左右。至中度退化阶段,生物结皮厚度显著下降,中度退化阶段生物结皮厚度比轻度退化阶段下降 35.49%( $p<0.05$ )。与生物结皮厚度的变化趋势不同,高寒草甸生物结皮容重随退化程度的加剧并无明显变化(图 2B),从原生植被至中度退化阶段,生物结皮容重基本维持在 0.52 g/cm<sup>3</sup>左右。

2.2 生物结皮对土壤水文过程的影响

2.2.1 入渗 依据前述试验结果,轻度退化样地生



物结皮盖度最大,入渗及蒸发试验在轻度退化样地开展。图 3 展示了覆盖和移除生物结皮条件下土壤水分入渗速率随时间的变化,可以看出生物结皮覆盖与否对土壤水分入渗速率无明显影响,二者均随着时间的增加呈先降低后逐渐稳定的趋势。其中,覆盖和移



除生物结皮区域初始入渗速率(60 s 时的入渗速率)分别为 0.20,0.22 mm/s。二者入渗速率在 210 s 后逐渐趋于稳定,覆盖和移除生物结皮区域土壤水分稳定入渗速率(420~4 200 s 时间段内的入渗速率平均值)十分接近,均为 0.03 mm/s。

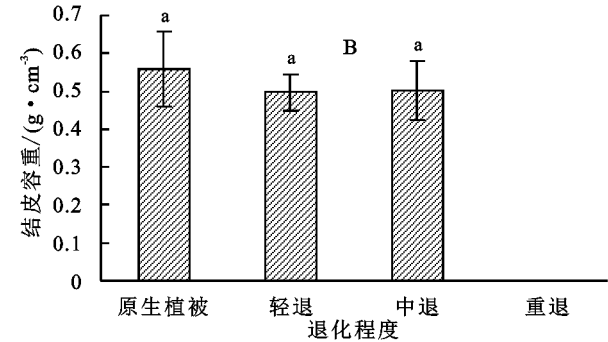


图 2 不同退化程度高寒草甸生物结皮厚度(n=20)和容重(n=5)

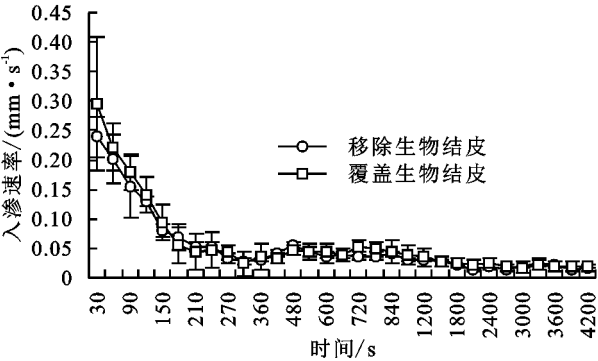


图 3 移除和覆盖生物结皮条件下土壤入渗速率随时间的变化(n=3)

2.2.2 蒸发 与生物结皮对土壤水分入渗过程的影响一致,生物结皮对高寒草甸土壤蒸发也无显著影响,覆盖与移除生物结皮区域土壤日蒸发量变化趋势和绝对值基本一致,无显著差异(图 4)。其中,移除和覆盖生物结皮平均土壤日蒸发量分别为 1.78,1.79 mm/d。

### 3 讨论

#### 3.1 退化程度对高寒草甸生物结皮发育特征的影响

生物结皮是生态系统的重要一环,特别是在干旱半干旱生态系统,其形成和发育会影响许多生态过程,同时环境变化也影响到生物结皮的演变。来自海北高寒草甸的研究<sup>[21]</sup>认为 BSCs 的物质组成和丰富度会随着高寒草甸退化演替而发生变化,这与本研究结果一致:从原生植被至中度退化阶段,BSCs 优势种、厚度及盖度均明显不同,至重度退化阶段,BSCs 完全消失。其中,从原生植被至中度退化阶段,地表均有较高盖度的植被,且均保持一定厚度的草毡层(表 1),使地表环境较为稳定,为生物结皮的发育提供了有利环境,其优势种、厚度及盖度方面的差异可能主要来自植被群落结构的不同<sup>[9]</sup>。高寒草甸退化至重度退化阶段,植被盖度急剧下降,地表草毡层消

失。此外,研究区多大风天气<sup>[14]</sup>,造成地表环境多变,生物结皮消失。李以康等<sup>[21]</sup>在高寒草甸生物结皮的研究过程中,将地表出现的“黑斑”认为是藻类结皮,在本试验过程中,笔者在不同退化程度样地地表也发现了面积不等的“黑斑”,将其用镊子轻轻剥下,通过显微镜观察,其下并无藻结皮中常出现的藻丝体。因此,本研究中并未将这些“黑斑”归为藻结皮。鉴于高寒草甸土壤有机质含量较高,降雨后极易形成土壤物理结皮,这类“黑斑”应为土壤物理结皮而非藻结皮,关于这层土壤物理结皮的相关特征还需进一步深入研究。

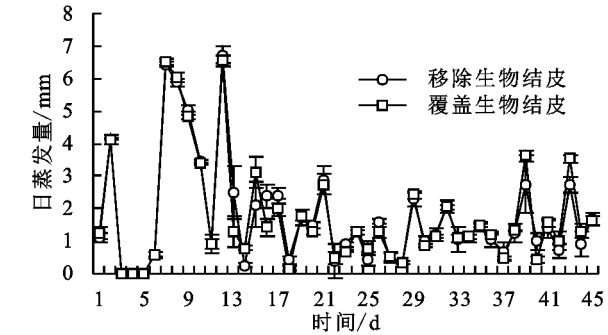


图 4 移除和覆盖生物结皮条件下土壤日蒸发量随时间的变化(n=3)

#### 3.2 生物结皮对高寒草甸土壤水分过程的影响

来自黄土高原及荒漠地区<sup>[20]</sup>的研究表明,生物结皮的形成和发育,深刻地影响着土壤水文过程,使水分分配格局发生改变,进而影响区域生态系统植被的恢复和演替。目前,针对生物结皮对水文过程的影响已有报道,存在以下 3 种观点<sup>[22-23]</sup>:(1) 提高入渗速率、促进入渗过程或增加入渗量;(2) 降低入渗速率或减少入渗量;(3) 对入渗过程无影响。本研究结果显示,生物结皮对高寒草甸土壤水分入渗和蒸发过程无明显影响,支持了第 3 种观点。与本研究结果不

同,来自沙区的研究认为,生物结皮降低了土壤水分入渗速率和入渗深度<sup>[20]</sup>,抑制<sup>[24]</sup>或促进<sup>[25]</sup>了土壤蒸发。产生这种差异的原因有以下几点:(1) 相比于沙区生物结皮,高寒草甸生物结皮盖度相对较小,降低了其对土壤水文过程的影响程度。(2) 与沙区无生物结皮层区域(裸沙)相比,沙区生物结皮层是一个致密层,其增加了表层土壤黏粉粒含量、土壤容重,降低了土壤孔隙度<sup>[3]</sup>,随之显著影响了沙区土壤水分运移过程。而在高寒草甸,由于无生物结皮区域表层土壤被孔隙度较大的草毡层覆盖<sup>[26]</sup>,生物结皮层的发育并未对地表土壤结构产生影响。(3) 土壤质地是影响土壤水文过程的重要因素<sup>[27]</sup>,其中,黏粉粒含量对水分状况的影响较大<sup>[28]</sup>。高寒草甸区域土壤黏粉粒含量(占比介于25%~65.80%<sup>[29]</sup>)明显不同于黄土高原地区(土壤黏粉粒占比介于54.25%~78.72%<sup>[30]</sup>)和沙区(土壤黏粉粒占比介于0.05%~31.75%<sup>[28]</sup>),这也可能是造成高寒草甸、黄土高原及沙区生物结皮对土壤水文过程影响结果不同的原因。可以看出,所选对照、研究区域不同,生物结皮对土壤入渗和蒸发的研究结果会出现一定的差异,这与 Zhang<sup>[31]</sup>和李新荣<sup>[32]</sup>等的观点一致。

青藏高原高寒草甸区域植被覆盖度较高,植物根系发达且多为须根系,其中,大部分分布于0—20 cm的浅层土壤中<sup>[33]</sup>,这些植物根系相互缠绕形成厚度约1~4 cm的草毡层<sup>[26]</sup>,其土壤容重较小,土壤孔隙较大<sup>[29]</sup>。这些因素造成高寒草甸土壤水分入渗速率较高<sup>[34]</sup>。本研究结果显示,轻度退化高寒草甸土壤稳定入渗速率为0.03 mm/s,即108 mm/h,明显大于高寒草甸区域的降雨强度<sup>[35]</sup>,与毛乌素沙地的情况相似<sup>[20]</sup>,这也就解释了高寒草甸平缓区域径流产生较少的原因。

## 4 结论

(1) 不同退化程度泽库高寒草甸生物结皮以苔藓结皮为主,其优势种为土生对齿藓。原生植被至轻度退化阶段,生物结皮盖度、厚度无显著变化,二者分别维持在19%,2.6 mm上下。至中度退化阶段,生物结皮盖度、厚度分别较轻度退化样地下降74.85%,35.49%( $p < 0.05$ )。从原生植被至中度退化阶段,生物结皮容重无显著变化,基本维持在0.52 g/cm<sup>3</sup>上下。至重度阶段,生物结皮完全消失。

(2) 生物结皮对高寒草甸土壤水分入渗、蒸发过程无显著影响。覆盖和移除生物结皮处理入渗速率随着时间增加呈先降低后逐渐稳定的趋势,其中,初始入渗速率分别为0.20,0.22 mm/s,二者稳定入渗速率均为0.03 mm/s;覆盖和移除生物结皮处理土壤

日蒸发量变化趋势和绝对值基本一致,平均日蒸发量分别为1.79,1.78 mm/d。

### 参考文献:

- [1] 魏江春.沙漠生物地毯工程:干旱沙漠治理的新途径[J].干旱区研究,2005,22(3):287-288.
- [2] 杨凯.黄土丘陵区生物结皮对土壤结构体稳定性的影响[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2013.
- [3] 周小泉,刘政鸿,杨永胜,等.毛乌素沙地3种植被下苔藓结皮的土壤理化效应[J].水土保持研究,2014,21(6):340-344.
- [4] Gao L Q, Matthew A B, Xu M X. Biological soil crusts decrease erodibility by modifying inherent soil properties on the Loess Plateau, China[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2017,105:49-58.
- [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] 李守中,郑怀舟,李守丽,等.沙坡头植被固沙区生物结皮的发育特征[J].生态学杂志,2008,27(10):1675-1679.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 吴永胜,尹瑞平,田秀民,等.毛乌素沙地南缘人工植被区生物结皮发育特征[J].中国沙漠,2018,38(2):339-344.
- [10] 孙鸿烈,郑度,姚檀栋,等.青藏高原国家生态安全屏障保护与建设[J].地理学报,2012,67(1):3-12.
- [11] 周华坤,赵新全,周立,等.青藏高原高寒草甸的植被退化与土壤退化特征研究[J].草业学报,2005,14(3):31-40.
- [12] 范月君,侯向阳.三江源区高寒草甸退化与水塔功能的关系[J].西南民族大学学报:自然科学版,2016,42(1):8-13.
- [13] 陈宁,张扬建,朱军涛,等.高寒草甸退化过程中群落生产力与物种多样性的非线性响应机制研究[J].植物生态学报,2018,42(1):50-65.
- [14] 杨永胜,张莉,未亚西,等.退化程度对三江源泽库高寒草甸土壤理化性质及持水能力的影响[J].中国草地学报,2017,39(5):54-61.
- [15] 展鹏飞,肖德荣,闫鹏飞,等.藏猪扰动作用下的高寒草甸土壤退化特征及微生物群落结构变化[J].环境科学,2018,39(4):1840-1850.
- [16] 王启基.高寒草甸中、轻度退化草地植被恢复技术规程 DB63/T608-2006[Z].青海:青海省质量技术监督局,2006.
- [17] 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.
- [18] Li X R, He M Z, Stefan Z. Micro-geomorphology determines community structure of biological soil crusts at

- small scale[J]. Earth Surface Process and Landform, 2010, 35(8): 932-940.
- [19] 朱良君, 张光辉, 任宗萍. 4种土壤入渗测定方法的比较[J]. 水土保持通报, 2012, 32(6): 163-167.
- [20] Yang Y S, Bu C F, Mu X M, et al. Effects of differing coverage of moss-dominated soil crusts on hydrological processes and implications for disturbance in the Mu Us Sandland, China[J]. Hydrological Process, 2015, 29(14): 3112-3123.
- [21] 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.
- [22] Chamizo S, Canton Y, Rodriguez-Caballero E, et al. Biocrusts positively affect the soil water balance in semiarid ecosystems[J]. Ecohydrology, 2016, 9(7): 1208-1221.
- [23] 石薇, 王新平, 张亚峰. 腾格里沙漠人工固沙植被区浅层土壤水分对降水和生物结皮的响应[J]. 中国沙漠, 2018, 38(3): 600-609.
- [24] 周丽芳, 阿拉木萨. 生物结皮发育对地表蒸发过程影响机理研究[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(4): 193-200.
- [25] 刘立超, 李守中, 宋耀选, 等. 沙坡头人工植被区微生物结皮对地表蒸发影响的试验研究[J]. 中国沙漠, 2005, 25(2): 191-195.
- [26] 李婧, 杜岩功, 张法伟, 等. 草毡表层演化对高寒草甸水源涵养功能的影响[J]. 草地学报, 2012, 20(5): 863-841.
- [27] 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.
- [28] 吴丽, 陈晓国, 张高科, 等. 人工生物结皮的发育演替及表土持水特性研究[J]. 环境科学, 2014, 35(3): 1138-1143.
- [29] 苏培玺, 周紫鹃, 侍瑞, 等. 高寒草毡层基本属性与固碳能力沿水分和海拔梯度的变化[J]. 生态学报, 2018, 38(3): 1040-1052.
- [30] 茹豪, 张建军, 李玉婷, 等. 黄土高原土壤粒径分形特征及其对土壤侵蚀的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 176-182.
- [31] Zhang Z S, Liu L C, Li X R, et al. Evaporation properties of a revegetated area of the Tengger Desert, North China[J]. Journal of Arid Envoriments, 2008, 72: 964-973.
- [32] 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.
- [33] 岳广阳, 赵林, 王志伟, 等. 多年冻土区高寒草甸根系分布与活动层温度变化特征的关系[J]. 冰川冻土, 2015, 37(5): 1381-1387.
- [34] 杨思维, 张德罡, 牛钰杰, 等. 短期放牧对高寒草甸表层土壤入渗和水分保持能力的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(4): 96-101.
- [35] 柴雯. 高寒草甸覆盖变化洗啊土壤水分动态变化研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2007.

(上接第138页)

- [29] 刘元保, 唐克丽, 查轩, 等. 坡耕地不同地面覆盖的水土流失试验研究[J]. 水土保持学报, 1990(1): 25-29.
- [30] 张光辉, 梁一民. 黄土丘陵区人工草地盖度季动态及其水保效益[J]. 水土保持通报, 1995(2): 38-43.
- [31] 郭百平, 王子科, 阎晋民. 天然沙棘林减水减沙效益试验研究[J]. 沙棘, 1996(4): 32-36.
- [32] 石生新. 高强度人工降雨条件下地面坡度、植被对坡面产沙过程的影响[J]. 山西水利科技, 1996(3): 77-80.
- [33] 袁建平, 蒋定生, 甘淑. 不同治理度下小流域正态整体模型试验: 林草措施对小流域径流泥沙的影响[J]. 自然资源学报, 2000, 15(1): 91-96.
- [34] 张建军, 毕华兴, 魏天兴. 晋西黄土区不同密度林分的水土保持作用研究[J]. 北京林业大学学报, 2002, 24(3): 50-53.
- [35] 陈洪松, 邵明安, 张兴昌, 等. 野外模拟降雨条件下坡面降雨入渗、产流试验研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(2): 5-8.
- [36] 孙飞达, 王立, 龙瑞军, 等. 黄土丘陵区不同降雨强度对农地土壤侵蚀的影响[J]. 水土保持研究, 2007, 14(2): 16-18.
- [37] 李广, 黄高宝. 雨强和土地利用方式对黄土丘陵区水土流失的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 85-90.
- [38] 张冠华, 刘国彬, 王国梁, 等. 黄土丘陵区两种典型灌木群落坡面侵蚀泥沙颗粒组成及养分流失的比较[J]. 水土保持通报, 2009, 29(1): 1-6.
- [39] 张冠华. 模拟降雨条件下柠条群落坡面产流产沙及养分流失特征研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
- [40] Zhang G H, Liu G B, Wang G L. Effects of *Caragana Korshinskii* Kom. cover on runoff, sediment yield and nitrogen loss [J]. International Journal of Sediment Research, 2010, 25(3): 245-257.
- [41] 刘钦. 纸坊沟流域暴雨侵蚀与坡面人工降雨产流产沙试验研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2016.
- [42] 温永福, 高鹏, 穆兴民, 等. 野外模拟降雨条件下径流小区产流产沙试验研究[J]. 水土保持研究, 2018, 25(1): 23-29.