

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.05.046.

童生春, 李国荣, 李进芳, 等. 土壤结皮对高寒草甸鼠丘土壤基本特征及水力侵蚀的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(5): 76-84.

TONG Shengchun, LI Guorong, LI Jinfang, et al. Effects of Soil Crust on Basic Characteristics and Water Erosion of Zokor Mound Soil in Alpine Meadow[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(5): 76-84.

# 土壤结皮对高寒草甸鼠丘土壤基本特征及水力侵蚀的影响

童生春<sup>1,2</sup>, 李国荣<sup>1,2</sup>, 李进芳<sup>1</sup>, 翟辉<sup>1</sup>, 李希来<sup>3</sup>,  
刘亚斌<sup>1,2</sup>, 朱海丽<sup>1,2</sup>, 赵健赟<sup>1</sup>, 陈文婷<sup>1</sup>, 胡夏嵩<sup>1,2</sup>

(1.青海大学 地质工程系, 西宁 810016; 2.青藏高原北缘新生代资源环境重点实验室,  
西宁 810016; 3.青海大学 农牧学院, 西宁 810016)

**摘要:**[目的]阐明土壤结皮对高寒草甸鼠丘土壤基本特征及其水力侵蚀的影响,为高寒草甸鼠丘土壤的水力侵蚀特征评价及今后当地生态植被的修复和保护提供理论依据。[方法]以青海省河南县鼠害退化区高原鼢鼠鼠丘表面发育的物理结皮、地衣结皮和苔藓结皮为研究对象,并以原生草甸和未结皮的新鲜鼢鼠鼠丘作对照,结合野外调查和原位模拟降雨侵蚀试验,对不同鼠丘结皮土壤的物理力学特征、水力侵蚀规律及土壤侵蚀量与可蚀性因子间的关联度和相关性等进行了分析和讨论。[结果](1)鼠丘表层不同结皮土壤的含水率大小依次为:苔藓结皮>地衣结皮>物理结皮,并与原生草甸和新鲜鼢鼠鼠丘之间存在显著性差异( $p<0.05$ );0—2 cm内土壤紧实度和黏聚力的排序依次为:原生草甸>物理结皮>苔藓结皮>地衣结皮>新鲜鼢鼠鼠丘;较未结皮的新鲜鼢鼠鼠丘相比,土壤结皮的发生可通过改造土壤基本特性进而提升鼠丘土壤的保水固土能力。(2)土壤总流失量由高到低依次为:新鲜鼢鼠鼠丘>物理结皮>地衣结皮>苔藓结皮>原生草甸,且与降雨强度具一定的正相关关系;降雨侵蚀的10~15 min是不同鼠丘结皮土壤降雨侵蚀的敏感期,土壤流失率均呈先增后减的变化趋势;较未结皮的新鲜鼢鼠鼠丘相比,不同类型鼠丘结皮土壤均会提高土壤的抗侵蚀能力,土壤抗侵蚀能力优异性排序为:原生草甸>苔藓结皮>地衣结皮>物理结皮>新鲜鼢鼠鼠丘。(3)基于关联度和相关性分析双重检验方法,土壤结皮主要通过改变鼠丘表层土壤的基本物理力学特性指标,从而导致土壤侵蚀状况出现了差异性,其中土壤含水率、密度和孔隙比是影响土壤侵蚀量的关键影响因子。[结论]土壤结皮通过促进土壤基本物理力学特性,从而可不同程度地抑制高寒草甸鼠丘土壤的水力侵蚀。

**关键词:**高寒草甸; 鼠害退化区; 土壤结皮; 土壤基本特征; 水力侵蚀

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2023)05-0076-09

## Effects of Soil Crust on Basic Characteristics and Water Erosion of Zokor Mound Soil in Alpine Meadow

TONG Shengchun<sup>1</sup>, LI Guorong<sup>1,2</sup>, LI Jinfang<sup>1</sup>, ZHAI Hui<sup>1</sup>, Li Xilai<sup>3</sup>, LIU Yabin<sup>1,2</sup>,  
ZHU Haili<sup>1,2</sup>, ZHAO Jianyun<sup>1</sup>, CHEN Wenting<sup>1</sup>, HU Xiasong<sup>1,2</sup>

(1.Department of Geological Engineering, Qinghai University, Xining 810016, China;  
2.Key Lab of Cenozoic Resource & Environment in North Margin of the Tibetan Plateau, Xining 810016,  
China; 3.College of Agriculture and animal Husbandry, Qinghai University, Xining 810016, China)

**Abstract:**[Objective] The aims are to clarify the effect of soil crust on the basic characteristics and water erosion of alpine meadow mound soil, and to provide a theoretical basis for the evaluation of water erosion characteristics and the restoration and protection of local ecological vegetation in the future. [Methods] The

收稿日期:2022-09-25

修回日期:2022-10-25

资助项目:青海省科技厅基础研究项目(2021-ZJ-701);国家自然科学基金项目(41662023,42161068)

第一作者:童生春(1998—),男(土族),青海互助人,硕士研究生,研究方向为地质灾害及其防治。E-mail:tong\_shengchun@163.com

通信作者:李国荣(1979—),男,青海贵德人,博士,教授,硕士生导师,主要从事生态环境保护及地质灾害防治研究。E-mail:qdliguorong@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

physical crusts, lichen crusts and moss crusts on the surface of plateau zokor mounds in the rodent degradation area of Henan County, Qinghai Province were taken as the research samples, and the fresh zokor mounds with native meadow and without crust were taken as the control. The physical and mechanical characteristics of different types of soil crusts, the rule of water erosion and the correlation between soil erosion and erodibility factors were analyzed and discussed by combining field investigation and in-situ simulated rainfall erosion test. [Results] (1) The soil moisture contents of different crusts on the surface of mound decreased in the order: moss crust > lichen crust > physical crust, and there was significant difference between native meadow and fresh zokor mound ( $p < 0.05$ ). The order of soil compactness and cohesion within 0—2 cm was native meadow > physical crust > moss crust > lichen crust > fresh zokor mound. Compared with fresh zokor mounds without crusts, the occurrence of soil crusts could improve the water and soil conservation capacity of mound soil by modifying the basic characteristics of soil. (2) The total amount of soil loss decreased in the order: fresh zokor mound > physical crust > lichen crust > moss crust > native meadow, and had a positive correlation with rainfall intensity. The 10~15 minutes of rainfall erosion was the sensitive period of rainfall erosion in different soil crusts, and the soil loss rate increased first and then decreased. Compared with fresh mounds without crusts, different types of mound crusts could improve the soil erosion resistance. The order of soil erosion resistance is: native meadow > moss crust > lichen crust > physical crust > fresh zokor mound. (3) Based on the double test method of correlation degree and correlation analysis, soil crust mainly changed the basic physical and mechanical properties of the surface soil of the mound, which led to the difference of soil erosion. Among them, soil moisture content, density and void ratio were the key factors affecting soil erosion. [Conclusion] Soil crusts can inhibit the water erosion of alpine meadow mound soil to varying degrees by promoting the basic physical and mechanical properties of soil.

**Keywords:** alpine meadow; rodent degradation area; soil crusts; basic soil characteristics; water erosion

黄河源区地处青藏高原腹地,是我国涵养水源的重要区域<sup>[1]</sup>,覆有近 80% 的高寒草甸草地<sup>[2]</sup>。高寒草甸作为青海省占地面积最大、分布区域最广的草地类型,对于促进高寒干旱草地稳定性和生态环境的可持续发展均具有十分重要的生态价值和战略意义<sup>[3]</sup>。但是,近年来由于鼠害活动、过度放牧以及气候环境变迁等因素的长期影响,致使黄河源高寒草甸呈加剧退化态势,且区内土壤侵蚀、沙化及荒漠化现象频发<sup>[4-7]</sup>。据报道,黄河源区分布的小型啮齿动物主要有高原鼠兔(*Ochotona curzoniae*)和高原鼯鼠(*Eospalax baileyi*)<sup>[8]</sup>,由它们行为活动所导致的退化草甸面积占当地草地退化总面积的 23.29%,部分区域内高原鼯鼠鼠丘密度数高达 374 个/hm<sup>2</sup>,而每只高原鼯鼠平均每年在高寒草甸土壤表层至少翻掘土壤 1 024 kg<sup>[9]</sup>。此外,经由啮齿动物扰动后压覆在健康草甸上的松散鼠丘也会直接导致植被枯死,从而在高寒草甸地表分布数量众多的鼠丘裸地<sup>[10]</sup>。而这些裸露的鼠丘由于土壤结构疏松、养分贫瘠、颗粒细小,因此在风水、冻融及其他因素作用下引发较严重的土壤侵蚀<sup>[11-13]</sup>。降雨条件作为土壤侵蚀最主要也是最直接的动力因子之一<sup>[14]</sup>,雨水的溅蚀及冲刷作用在加剧退化区草甸土壤侵蚀的同时,鼠丘土壤也会在反复

降雨及太阳照射耦合作用下为土壤结皮的发生创造环境条件和物质来源<sup>[15-16]</sup>。经野外调查发现,土壤结皮现象在高寒草甸退化草地区分布广泛,尤其在鼠害退化区极为明显,不同历时堆积的鼠丘表面普遍存在土壤物理结皮或生物结皮<sup>[17-19]</sup>。土壤结皮作为地表的致密保护层<sup>[20]</sup>,其中不论是土壤物理结皮还是生物结皮,均会通过改变土质结构和土体特性从而抑制土壤的侵蚀状况<sup>[21-23]</sup>,另外不同类型土壤结皮的生长环境、发育性状、形态数量分布及其土壤理化特性等也是影响土壤侵蚀状况的重要因素<sup>[24-27]</sup>。鉴于高寒草甸鼠丘表面土壤结皮方面的研究相对较浅,因此开展土壤结皮对高寒草甸鼠丘土壤基本特征及其水力侵蚀的影响研究,对于深入分析高寒退化草甸区土壤侵蚀机理等方面具有重要意义。

目前诸多学者针对不同类型结皮土壤的基本特性及其水力侵蚀研究方面有了一定的进展,如都军等<sup>[28]</sup>通过研究腾格里沙漠地区不同类型土壤结皮的基本特性,得出结皮层厚度、孔隙度和田间持水量均表现为:藓类结皮 > 混生结皮 > 地衣结皮。程琴娟等<sup>[29]</sup>提出黄土表土结皮对溅蚀、入渗、产流和产沙均会产生明显的影响作用。高丽倩等<sup>[30]</sup>认为生物结皮覆盖能提升土壤抗冲性,且土壤抗溅蚀性与结皮形成时间、表层土壤质地和

地形坡度等有关。Joanna 等<sup>[31]</sup>研究发现土壤物理结皮和蓝藻结皮在雨滴撞击成坑、颗粒迁移和土壤流失等方面存在差异性,但土壤物理结皮和蓝藻结皮均有抑制土壤侵蚀的作用。钟香艳等<sup>[22]</sup>认为物理结皮和生物结皮均会通过降低土壤的累积入渗量和平均入渗速率从而减少降雨侵蚀过程的土壤流失量,但生物结皮的抗侵蚀能力则大于物理结皮。综上,尽管许多学者已经对不同类型结皮土壤的基本特征及水力侵蚀规律等方面进行了相关研究,但是针对高寒草甸鼠丘表面结皮后土壤的物理力学特性发生何种变化、对水力侵蚀和草甸退化产生何种影响等方面的研究却鲜有报道。为此,本文以黄河源高寒草甸害退化区鼠丘表面发育的物理结皮、苔藓结皮和地衣结皮为研究对象,并以原生草甸和未结皮的新鲜鼢鼠丘作对照,结合野外调查及原位模拟水力侵蚀试验,定量分析土壤结皮对高寒草甸鼠丘土壤基本特性及其水力侵蚀的影响作用。研究结果可为评价高寒草甸鼠害退化区鼠丘土壤的水力侵蚀特征及为今后当地生态植被的修复和保护提供理论依据。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 研究区基本概况

研究区位于青海省黄南州河南县南旗村(图1),属黄河源高寒草甸区,地理位置为东经 $101^{\circ}47'$ 、北纬 $34^{\circ}44'$ ,平均海拔约3600 m,属典型的高原大陆性气

候,年均气温 $-1.3\sim 1.6^{\circ}\text{C}$ ,年均降雨量约615.5 mm,降雨主要集中在每年6—9月份<sup>[32]</sup>。



图1 研究区地理位置图

由于当地鼠害活动猖獗,草甸地表堆积有大量的新鲜鼢鼠鼠丘(图2),并伴随土壤侵蚀和草甸退化的逐年加剧,堆积鼠丘与秃斑草甸之间也会相互连通,从而形成明显的鼠害退化区。鼠害退化区广泛分布的松散鼠丘表层土壤在降水、太阳照射或在菌藻类和低等植物的生长条件下普遍发生土壤结皮现象,其中在反复降雨作用下裸露的鼢鼠鼠丘表面极易出现土壤物理结皮(图3),而部分鼢鼠鼠丘表面也存在苔藓、地衣和微生物等与表土层复合形成的土壤生物结皮,如苔藓结皮(图4)、地衣结皮(图5)。



图2 新鲜鼢鼠鼠丘



图3 鼠丘物理结皮

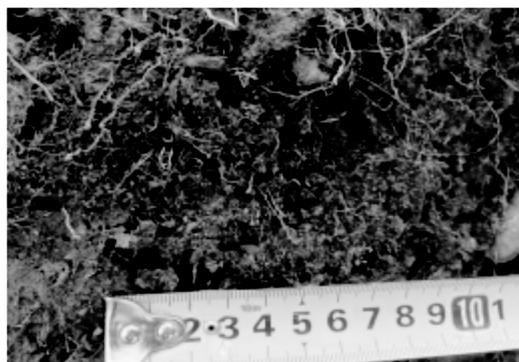


图4 鼠丘苔藓结皮



图5 鼠丘地衣结皮

## 1.2 试验设计与方法

此次研究的鼠丘为高原鼯鼠活动堆积而成的鼠丘,根据其表面土壤结皮类型,分为物理结皮、地衣结皮和苔藓结皮 3 种鼠丘结皮类型,并以原生健康草甸和未结皮的新鲜鼯鼠鼠丘作为对照。将上述 3 种天然表层结皮土壤和相同深度的对照区土壤作为测试对象(0—2 cm),分别原位测试其在降雨前表层土壤的初始基本物理力学特性(各重复 10 次),测试指标主要包括土壤的含水率(采用烘干法)、密度(采用称重法)、孔隙比(采用比重计法)、紧实度(采用紧实度仪)和黏聚力(采用直接剪切试验),取其平均值作参数指标值,以此来对比分析不同结皮土壤基本物理力学特性与原生草甸、新鲜鼠丘之间的差异性。然后另外选取鼠丘形状、大小等相同的各类结皮鼠丘、新鲜鼠丘,以发育不同土壤结皮的独立鼠丘为中心,分别选定坡度为 20°、面积为 2 m × 2 m 的试验小区开展水力侵蚀模拟试验,并选择同等坡度和面积的原生草甸区开展对照试验。

从试验区小型气象站 2018—2020 年度降雨强度实时监测数据得知,该区域 7—8 月份的平均降雨量占年平均降雨量的 72.1%,最大降雨强度接近 15 mm/h,而当降雨强度小于 2 mm/h 时草甸表面很难形成径流现象。因此,在水力侵蚀模拟试验中将降雨强度设为 5 mm/h,10 mm/h 和 15 mm/h 共 3 个梯级(各类小区及同级降雨强度试验均各重复 3 次)。水力侵蚀试验采用人工模拟降雨试验装置<sup>[33]</sup>。该装置由抽水泵、实心伞形喷头、降雨强度调节器、导水槽、烧杯等组成,喷头距小区中心的垂直距离为 2 m,向下喷水有效半径为 1.25 m,模拟降雨精度为 ±0.5 mm/min。正式降雨前在试验小区外围调节好降雨强度使之达到稳定降雨状态,然后再将喷头延伸到试验小区上方进行降雨试验。试验中降雨历时设定为 60 min,每 5 min 收集小区内产生的径流样品(含泥沙)。降雨侵蚀试验结束后,将野外每隔 5 min 收集的所有径流样品带回实验室,并放置到 105℃烘箱,恒温烘干至 24 h 后采用称重法得到土壤流失量(流失干土重)。

## 1.3 数据分析及处理

土壤侵蚀产沙率是表征土壤抗侵蚀能力大小的指标,其计算公式如下:

$$S_r = \frac{Q}{A \cdot T}$$

式中: $S_r$  表示土壤侵蚀产沙率 [ $\text{g} \cdot /(\text{m}^2 \cdot \text{min})$ ];  $Q$  表示土壤侵蚀量 (g);  $A$  表示产流面积,即试验样方的表面积 ( $\text{m}^2$ );  $T$  表示产流时间 (min)。采用 Microsoft Excel 2019 软件作数据统计与分析、绘制相应图表等,采用 SPSS 软件作相关和统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同类型鼠丘结皮土壤的基本物理力学特性

由表 1 看出,试验小区内不同类型鼠丘结皮土壤的基本物理力学特性均存在显著差异 ( $p < 0.05$ )。其中物理结皮、地衣结皮和苔藓结皮土壤的含水率较原生草甸分别减少 77.3%,38.0%,25.2%,而比未结皮的新鲜鼠丘分别减少 34.3%和增加 79.6%,116.7%。由于物理结皮发挥的缩水夯实效应,致使其土壤的密度比新鲜鼠丘增加了 126.3%外,生物结皮土壤的密度则偏近于原生草甸,而不同类型鼠丘结皮土壤的孔隙比大小变化情况却与密度持相反态势。不同类型鼠丘结皮土壤的紧实度和黏聚力优异性排序依次为:物理结皮 > 苔藓结皮 > 地衣结皮,它们的黏聚力分别比新鲜鼠丘增长了 91.6%,46.2%和 22.9%,而比原生草甸减少 32.9%,48.8%和 56.9%。此外,物理结皮土壤的含水率、密度、孔隙比、紧实度和黏聚力分别是苔藓结皮土壤的 30.3%,107.5%,75.1%,163.9%,131.1%,是地衣结皮土壤的 36.6%,110.2%,64.7%,200.3%,155.9%。统计分析结果表明,上述 5 类试验土壤的基本物理力学特性均差异显著,其中原生草地和物理结皮土壤的孔隙比显著低于其他土壤类型,而其他的物理力学特性指标值均显著增加 ( $p < 0.05$ )。这一结果也进一步印证了啮齿动物对草甸土壤的机械破坏作用和不同类型土壤结皮生长对鼠丘土壤的稳固作用。

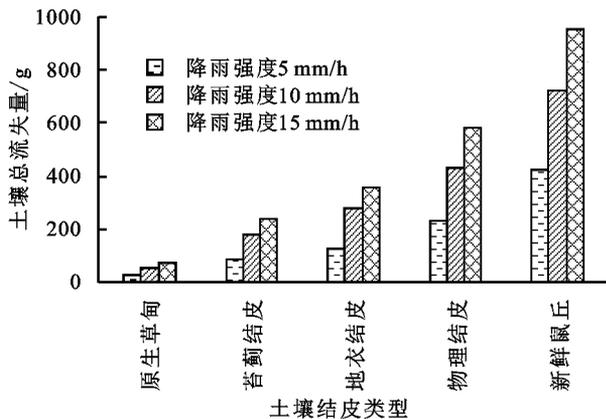
表 1 不同类型鼠丘结皮土壤的基本物理力学特性

土壤类型	含水率/%	密度/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	孔隙比/%	紧实度/kPa	黏聚力/kPa
原生草甸	38.25 ± 2.16a	1.68 ± 0.08a	4.75 ± 0.07cd	153.50 ± 5.18a	35.86 ± 3.53a
苔藓结皮	28.62 ± 1.87b	1.60 ± 0.16b	7.56 ± 0.24bc	68.92 ± 5.34c	18.36 ± 2.32c
地衣结皮	23.73 ± 2.36c	1.55 ± 0.12c	8.78 ± 0.38b	56.39 ± 4.28d	15.44 ± 1.76cd
物理结皮	8.68 ± 0.26e	1.72 ± 0.14a	5.68 ± 0.16c	112.94 ± 6.72b	24.07 ± 2.56b
新鲜鼠丘	13.21 ± 1.93d	0.76 ± 0.11d	19.43 ± 0.46a	10.22 ± 2.15e	12.56 ± 1.12d

注:表中不同小写字母表示同一物理力学指标间差异显著 ( $p < 0.05$ )。

## 2.2 高寒草甸鼠害退化区不同类型鼠丘结皮土壤的水力侵蚀规律

2.2.1 不同类型鼠丘结皮土壤的总流失量对比 由图6看出,在分设的3种降雨强度下,60 min内土壤总流失量由高到低依次为:新鲜鼠丘>物理结皮>地衣结皮>苔藓结皮>原生草甸,且随降雨强度的增加,不同类型结皮土壤的总流失量出现持续递增的变化趋势。较未结皮的新鲜鼠丘和原生草甸相比,鼠丘土壤结皮均有利于提高土壤的抗侵蚀性能,以降雨强度10 mm/h为例,物理结皮、地衣结皮和苔藓结皮土壤的总流失量比原生草甸分别增长6.8倍、4.0倍和2.2倍,而比新鲜鼠丘分别降低40.3%、61.8%和75.3%。分析得出同一降雨强度不同土壤结皮类型间鼠丘土壤总流失量均差异显著( $p < 0.05$ ),不同降雨强度同一土壤结皮类型间除原生草甸无明显差异外,其余土壤结皮类型的土壤总流失量也呈现显著差异( $p < 0.05$ )。这一结果说明鼠丘土壤结皮类型不同时,其土壤物理力学特性具有明显的差异性,从而导致其土壤抗侵蚀能力大小不一。



注:不同大写字母表示同一降雨强度不同土壤结皮类型间差异显著( $p < 0.05$ );不同小写字母表示相同结皮土壤不同降雨强度间差异显著( $p < 0.05$ )。

图6 3种降雨强度下不同类型鼠丘结皮土壤总流失量的对比

2.2.2 不同类型鼠丘结皮土壤累积流失量随降雨侵蚀时间的变化规律 研究表明,在3种降雨强度下,不同类型土壤累积流失量的增长幅度依次为:新鲜鼠丘>物理结皮>地衣结皮>苔藓结皮>原生草甸,并且土壤累积流失量均随降雨侵蚀时间和降雨强度的增加呈持续增加的变化趋势(图7)。相较于新鲜鼠丘和原生草甸,3类鼠丘结皮土壤在降雨侵蚀10~15 min内土壤流失量的增加幅度较大,说明这一时间段是不同鼠丘结皮土壤运移最明显的时期,以10 mm/h的降雨强度为例,苔藓结皮、地衣结皮和物理结皮在此期间产生的土壤流失量分别占其总流失量的19.3%、23.8%、24.3%。统计分析得出,降雨强度

的增加可显著增大土壤流失量,在降雨前10 min内,新鲜鼠丘表面土壤流失量显著高于其他鼠丘结皮土壤,3种鼠丘结皮土壤流失量差异不显著( $p > 0.05$ )。在同一降雨强度下降雨10~15 min后,原生草甸土壤流失量变化不大,新鲜鼠丘和鼠丘物理结皮土壤流失量显著高于地衣结皮和苔藓结皮( $p < 0.05$ ),且新鲜鼠丘土壤流失量与其他鼠丘结皮土壤间呈极显著( $p < 0.01$ ),地衣结皮与苔藓结皮间的差异不显著。

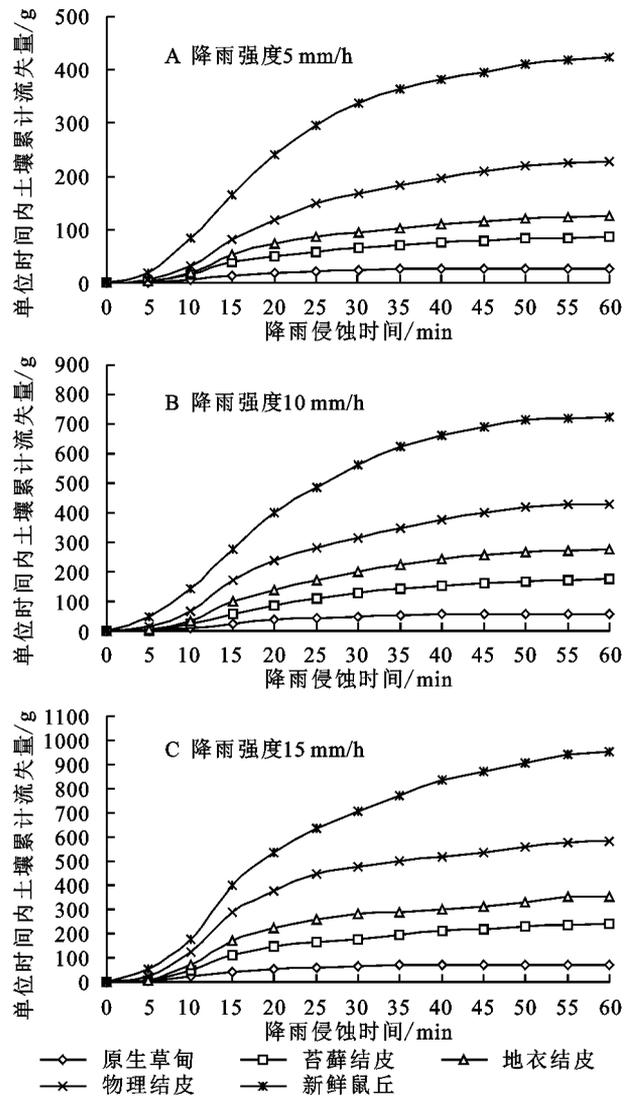


图7 不同类型鼠丘结皮土壤累积流失量随降雨侵蚀时间的变化规律

2.2.3 不同类型鼠丘结皮土壤流失量的变化量对比 从图8可以看出,3种降雨强度下不同鼠丘结皮土壤的流失率均表现为先增后减的变化趋势,并在15 min左右达到峰值,且不同鼠丘结皮土壤流失率在10~15 min内处于显著增大的阶段( $p < 0.05$ ),由此说明降雨侵蚀的10~15 min是不同鼠丘结皮土壤流失的敏感期。土壤流失率变化幅度由高到低依次为:新鲜鼠丘>物理结皮>地衣结皮>苔藓结皮>原生草甸,且不同鼠丘结皮土壤的流失率均随降雨强度的

增加而增大。另外,通过对比土壤流失率的变化情况发现,原生草甸土壤侵蚀率变化不明显,新鲜鼠丘和物理结皮土壤的流失率变化幅度显著高于其他鼠丘结皮土壤( $p < 0.05$ ),且新鲜鼠丘土壤流失率的变化与其他鼠丘结皮土壤相比表现出极显著差异( $p < 0.01$ ),侵蚀 40 min 后土壤流失率变化均逐渐趋于平缓。分析认为在水力侵蚀过程中,土壤侵蚀率变化与降雨强度、降雨持续时间和土壤结皮类型有关,在持续、高强度的降雨条件下,除未结皮的新鲜鼠丘可激发活跃的土壤侵蚀现象外,物理结皮由于其空间结构更容易遭到破坏,因此也会发生明显的土壤剥离现象。

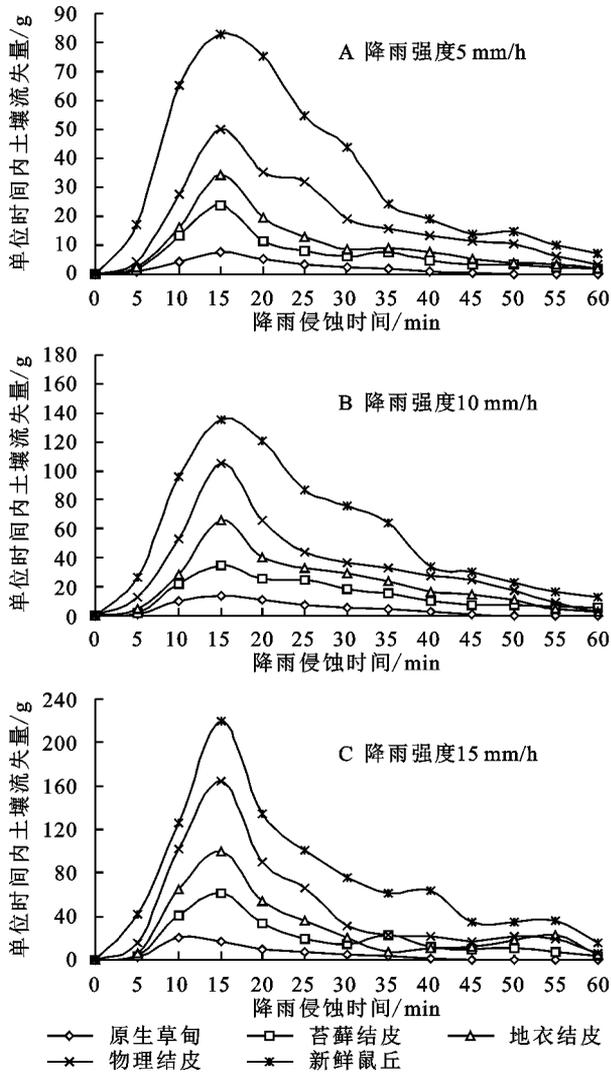


图 8 不同类型鼠丘结皮土壤流失量随降水侵蚀时间的变化规律

2.2.4 降雨强度对不同类型鼠丘结皮土壤侵蚀量的影响 通过建立不同鼠丘结皮土壤的侵蚀量与降雨强度之间的回归方程发现,土壤侵蚀量与降雨强度之间均具有良好的函数关系。由表 2 看出,原生草甸和苔藓结皮的土壤侵蚀量分别与降雨强度呈指数函数的正相关关系,地衣结皮的土壤侵蚀量与降雨强度呈

线性函数的正相关关系,物理结皮和新鲜鼠丘的土壤侵蚀量与降雨强度呈幂函数的正相关关系。研究表明不同鼠丘结皮土壤的侵蚀量随降雨强度的增加而增加,而且土壤结皮的发育类型也会引起土壤侵蚀状况的差异性。

2.2.5 不同类型鼠丘结皮土壤侵蚀产沙率的对比 土壤侵蚀产沙率是决定土壤抗侵蚀性能的重要指标之一。由表 3 可知,土壤侵蚀产沙率由高到低依次为:新鲜鼠丘>物理结皮>地衣结皮>苔藓结皮>原生草甸,且随着降雨强度的增加而增加。以 10 mm/h 的降雨强度为例,新鲜鼠丘土壤侵蚀产沙率分别是物理结皮的 1.67 倍、地衣结皮的 2.62 倍、苔藓结皮的 4.06 倍、原生草甸的 13.09 倍。统计分析得出,新鲜鼠丘土壤侵蚀产沙率与各类鼠丘结皮土壤相比表现出极显著差异( $p < 0.01$ ),而 3 种不同类型鼠丘结皮土壤的侵蚀产沙率显著高于原生草甸( $p < 0.05$ )。分析认为鼠丘土壤侵蚀状况与其表面土壤结皮的发育类型、植被生长情况及降雨强度等有关,鼠丘土壤结皮虽然具有提高抗侵蚀能力的作用,但是与原生草甸相比,其土壤侵蚀产沙率依然较大。另外从分析结果也能够看出不同等级降雨强度下土壤抗侵蚀能力由高到低依次为:原生草甸>苔藓结皮>地衣结皮>物理结皮>新鲜鼠丘。

表 2 不同类型鼠丘结皮土壤侵蚀量与降雨强度之间的函数关系

结皮土壤类型	回归方程	$R^2$
原生草甸	$Q = 39.19 \ln(P) - 35.53$	0.998
苔藓结皮	$Q = 138.2 \ln(P) - 136.9$	0.998
地衣结皮	$Q = 23.04P + 8.376$	0.999
物理结皮	$Q = 57.86P^{0.859}$	0.997
新鲜鼠丘	$Q = 130.0P^{0.739}$	0.999

注:表中  $Q$  为土壤侵蚀量; $P$  为降雨强度。

表 3 不同类型鼠丘结皮土壤侵蚀产沙率的对比  $g/(m^2 \cdot min)$

降雨强度/ ( $mm \cdot h^{-1}$ )	原生 草甸	苔藓 结皮	地衣 结皮	物理 结皮	新鲜 鼠丘
5	0.11cE	0.36cD	0.52cC	0.95cB	1.78cA
10	0.23abE	0.74bD	1.15bC	1.8bB	3.01bA
15	0.27aE	0.99aD	1.48aC	2.41aB	3.94aA

注:不同大写字母表示同一行相同降雨强度下不同土壤结皮类型间差异显著( $p < 0.05$ );不同小写字母表示同一列相同结皮土壤不同降雨强度间差异显著( $p < 0.05$ )。

### 2.3 鼠丘结皮土壤侵蚀量与可蚀性因子间的关联度和相关性分析

不同鼠丘结皮土壤侵蚀量与可蚀性因子间的关联度分析结果中,当降雨强度依次为 5 mm/h, 10

mm/h 和 15 mm/h 时,各可蚀性因子对土壤侵蚀量的关联度均较为明显,其中土壤密度、紧实度和黏聚力的关联度相对最高,关联度值均在 0.646 以上,而土壤含水率对土壤侵蚀量的关联度相对较小,则介于 0.543~0.581 之间(表 4)。从表中还可以看出,在不同降雨强度下,鼠丘结皮土壤侵蚀量与其土壤含水率和密度之间存在显著负相关,与其土壤孔隙比之间存在显著正相关,而与其土壤紧实度和黏聚力之间存在不显著正相关。关联度和相关性分析结果表明不同降雨强度下鼠丘结皮土壤侵蚀量与其土壤基本物理力学特性具有一定的相互影响作用,其中土壤含水率、密度和孔隙比是影响高寒草甸鼠丘结皮土壤水力侵蚀状况的关键影响因子。分析认为鼠丘表面土壤结皮的发生可通过增进土壤基本物理力学特性,从而起到提高土壤抗侵蚀能力、抑制鼠丘土壤水力侵蚀的作用,这也进一步印证了啮齿动物活动导致高寒草甸退化的内在关联性。

表 4 鼠丘结皮土壤侵蚀量与可蚀性因子间的关联度和相关性分析

可蚀性因子类型		含水率/%	密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	孔隙比/ %	紧实度/ kPa	黏聚力/ kPa
		关联度	0.543	0.646	0.756	0.675
5 mm/h	相关性	-0.808*	-0.847*	0.865*	-0.713	-0.633
	Sig(单尾)	0.049	0.035	0.029	0.029	0.126
	关联度	0.571	0.682	0.832	0.684	0.698
10 mm/h	相关性	-0.846*	-0.817*	0.846*	-0.730	-0.673
	Sig(单尾)	0.035	0.046	0.035	0.081	0.107
	关联度	0.552	0.657	0.805	0.674	0.679
15 mm/h	相关性	-0.855*	-0.806*	0.836*	-0.720	-0.666
	Sig(单尾)	0.032	0.050	0.039	0.085	0.110

注:表中“\*”为相关性显著( $0.01 < p < 0.05$ )。

### 3 讨论

#### 3.1 鼠丘表面不同结皮土壤物理力学特性差异的原因分析

分析上述土壤基本物理力学特性出现差异性的原因主要在于原生草甸受高原啮齿动物活动干扰,土体结构才会遭到破坏,导致土壤物理力学特性劣势化发展,而新鲜鼢鼠鼠丘正是基于此才表现出显著的差异特性。此外,鼠丘表面的土壤结皮也会在接连的降雨侵蚀过程中通过改变孔隙结构、水分入渗和养分循环来影响土壤基本物理力学特性,从而导致不同类型鼠丘结皮土壤与原生草甸和未结皮的新鲜鼢鼠鼠丘土壤的基本物理力学特性出现差异性。本次研究得

出生物结皮的土壤含水率明显大于物理结皮土壤的含水率,这与周虹等<sup>[34]</sup>通过测定高寒沙区土壤结皮层的基本物理性质后得出的结果一致。另外苔藓结皮和地衣结皮土壤的基本物理力学特性也具明显差异( $p < 0.05$ ),这可能与啮齿动物的破坏程度及其表层植被的分布特征和凋落物盖度等有关<sup>[35]</sup>。本研究分析不同类型鼠丘结皮土壤的基本力学特性后,得出其紧实度和黏聚力大小依此为:原生草甸>物理结皮>苔藓结皮>地衣结皮>新鲜鼢鼠鼠丘,而土壤侵蚀量的大小变化趋势却与之相反,并且土壤总流失量随降雨强度的逐级递增而持续增大,土壤流失速率呈先增后减的变化趋势,这一结果与秦宁强<sup>[36]</sup>、路培等<sup>[37]</sup>诸多学者研究的结果基本一致。此外,通过对不同鼠丘结皮土壤的基本特性与其土壤侵蚀量的关联度和相关性分析得出,土壤侵蚀量与土壤基本物理力学特性指标之间具有一定的相互作用<sup>[38]</sup>,如鼠丘物理结皮土壤的侵蚀量与土壤含水率呈显著负相关,而与土壤紧实度呈极显著正相关。然而,结皮土壤微观结构、结皮厚度发育特征及其物理力学特性的变化规律等也是评价高寒草甸退化区土壤侵蚀的重要内在因素,这将是今后需要深入思考和探究的科学问题。

#### 3.2 鼠丘土壤侵蚀状况与其表面发育物理结皮的厚度有关

土壤结皮厚度是研究结皮发育状况的重要指标之一,其不仅与水力侵蚀力度、太阳辐射、近地表风速和地表层温度等外界因素有关<sup>[39-40]</sup>,还与土壤理化特性、土体空间结构和土质类型等内部因素有关<sup>[41-42]</sup>。野外调查中发现,鼠丘是啮齿动物机械扰动健康草甸后土壤颗粒发生重组并堆积而成的松散土丘,伴随自然降雨过程其表层土壤首先会被雨滴浸润和夯实,并在太阳照射等作用下可导致土壤水分迅速蒸发,由于降雨前后土壤团聚体发生物理变化明显,因此鼠丘表层易形成结构性物理结皮<sup>[15]</sup>;当二次降雨发生时,水分可通过孔隙入渗至结皮层下部,细微颗粒的局部团聚作用会导致结皮层土壤的微观结构在水力侵蚀作用下出现略微的分层现象,从而影响到物理结皮厚度的变化。并随着降雨频次的不断累增,土壤分层现象会愈加趋于明显,最终引起物理结皮层厚度的不断增加。当然,受降雨入渗、地下水、土壤水分等的影响,高寒退化草甸区域的土壤物理结皮厚度总会有阈值。此外,本研究中也发现随着鼠丘土壤结皮厚度的变化,其土壤物理力学特性也会发生变化。鉴于土壤基本物理力学特性与土壤侵蚀状况之间存

在一定的相互影响作用,其必将对土壤的侵蚀乃至生物结皮的发育和植被恢复等产生影响。但是关于物理结皮厚度发育是如何影响土壤侵蚀状况、对退化草甸的植被恢复和生态治理等方面产生何种效应,这也是今后需要深入调查和研究的方向之一。

### 3.3 啮齿动物活动对鼠丘土壤结皮的影响

黄河源高寒草甸区啮齿动物分布广泛且数量众多,它们的掘穴啃食等活动可以使大面积的土壤直接裸露于地表,这不仅破坏了原生草甸土壤的理化特性和空间结构,而且翻出地表的土壤也会直接导致草甸植被腐烂枯萎,从而在草甸表面形成大面积的斑块状次生裸地<sup>[43]</sup>,这与原生草甸之间发生了明显区别。土壤结皮作为土层特殊的致密性结构,经由啮齿动物活动后堆积的松散鼠丘可创造土壤结皮发生的环境条件和物质来源,在持续降雨及太阳照射条件下鼠丘土壤表面极易发生土壤物理结皮,且降雨历时和降雨强度均会通过影响土壤表层孔隙和挟沙水流的沉积效应<sup>[44]</sup>,从而决定土壤物理结皮的发育性状。此外,由于啮齿动物活动的频次、啃食植被和挖掘土层的程度也不尽相同,部分草甸会出现高度退化现象<sup>[45]</sup>,鼠害退化区植被恢复早期在没有其他植物种竞争条件下,菌藻类和低等植物可作为植被恢复生长过程中的先锋种,在鼠丘表层最先通过截获养分颗粒和大气水分来促进土壤生物结皮的发育生长,最终在鼠丘表面出现由点及面的扩张现象。高寒草甸鼠害退化区土壤结皮的发育演替是一个极其复杂且缓慢的自然过程,不仅涉及气象水文、物理力学作用对土壤性质的改造,还与鼠害退化区啮齿动物的破坏程度和地形地貌等密切相关,有关啮齿动物活动对土壤结皮的影响作用将是今后有待深入探究的科学问题。

## 4 结论

(1) 土壤结皮的发生可改变鼠丘土壤水分含量的变化,不同类型鼠丘结皮土壤的含水率大小依次为:苔藓结皮>地衣结皮>物理结皮,受土壤结皮颗粒间挤压及胶结作用,3种鼠丘结皮土壤的紧实度和黏聚力大小依次为:物理结皮>苔藓结皮>地衣结皮,并与原生草甸和新鲜鼠丘之间存在显著性差异( $p < 0.05$ ),而且鼠丘表面物理结皮和生物结皮土壤的基本物理力学特性指标之间也存在一定的差异。

(2) 在3种降雨强度下,60 min内土壤总流失量由高到低依次为:新鲜鼠丘>物理结皮>地衣结皮>苔藓结皮>原生草甸。不同鼠丘结皮土壤的流失量

随降雨强度的增加而增加,且土壤流失率始终呈先增后减的变化趋势;降雨侵蚀的10~15 min是不同类型结皮土壤流失的敏感期,鼠丘土壤结皮对水力侵蚀起到一定的抑制作用,且土壤生物结皮的抗侵蚀能力大于物理结皮。

(3) 鼠丘结皮土壤侵蚀量与其土壤含水率和密度之间存在显著极强负相关,与土壤孔隙比之间存在显著极强正相关,而与土壤紧实度和黏聚力之间存在正相关,但差异不显著。结皮类型不同使土壤物理力学特性产生差异,是导致土壤水力侵蚀差异的重要原因,其中鼠丘含水率、密度和土壤孔隙比是影响土壤水力侵蚀的关键影响因子。

### 参考文献:

- [1] 殷宝库,曹夏雨,张建国,等.1999—2018年黄河源区水土流失动态变化[J].水土保持通报,2020,40(3):216-220,325.
- [2] 李国荣,李希来,陈文婷,等.降雨侵蚀对退化草地土壤养分含量的影响[J].水土保持研究,2018,25(2):40-45.
- [3] 赵新全.三江源退化草地生态系统恢复与可持续管理[M].北京:科学出版社,2011:85-90.
- [4] Li X L, Gao J, Zhang J. A topographic perspective on the distribution of degraded meadows and their changes on the Qinghai-Tibet Plateau, West China[J]. Land Degradation and Development, 2018,29:1574-1582.
- [5] Li X L, Gao J, Zhang J, et al. Natural and anthropogenic influences on the spatiotemporal change of degraded meadows in southern Qinghai Province, West China:1976-2015[J]. Applied Geography, 2018,97:176-183.
- [6] 马素洁,周建伟,王福成,等.高寒草甸区高原鼯鼠新生土丘水土流失特征[J].水土保持学报,2019,33(5):58-63,71.
- [7] 李成阳,张文娟,赖焯敏,等.黄河源区不同退化程度高寒草原群落生产力、物种多样性和土壤特性及其关系研究[J].生态学报,2021,41(11):4541-4551.
- [8] 张兴禄,李广.高原鼠兔和高原鼯鼠在高寒草甸生态系统的作用[J].草业科学,2015,32(5):816-822.
- [9] 韩东,马琛林,格拉海.黄河源区生态保护与可持续发展[J].内蒙古林业调查设计,2006(4):14-15,33.
- [10] 周延山,花立民,楚彬,等.祁连山东段高原鼯鼠对高寒草甸危害评价[J].生态学报,2016,36(18):5922-5930.
- [11] 鲍根生,王宏生,曾辉,等.不同形成时间高原鼯鼠鼠丘土壤养分分配规律[J].生态学报,2016,36(7):1824-1831.
- [12] 李国荣,李希来,李进芳,等.黄河源高寒草甸高原鼠兔土丘的土壤风力侵蚀规律[J].水土保持学报,2019,33(2):110-114,168.
- [13] Li G R, Li X L, Li J F, et al. Influences of plateau

- zokor burrowing on soil erosion and nutrient loss in alpine meadows in the yellow river source zone of west China[J]. *Water*, 2019,11(11):2258.
- [14] 余长洪,李就好,陈凯,等.砖红壤区降雨因子对产流产沙的影响[J].*水土保持研究*,2015,22(1):17-20.
- [15] 李浩宏,王占礼,申楠,等.土壤结皮研究进展[J].*人民黄河*,2015,37(10):92-98.
- [16] 冉启华,钱群,许月萍.降雨因素对土壤表面结皮发育的影响[J].*清华大学学报:自然科学版*,2011,51(6):770-776.
- [17] 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.
- [18] 刘江,张立欣,徐先英.不同退化程度的人工梭梭林地土壤理化特征[J].*西北林学院学报*,2019,34(4):36-42,144.
- [19] 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.
- [20] 吴发启,范文波.土壤结皮与降雨溅蚀的关系研究[J].*水土保持学报*,2001,15(3):1-3.
- [21] 高燕,郑粉莉,王彬,等.土壤结皮对黑土区坡面产流产沙的影响[J].*水土保持研究*,2014,21(4):17-20.
- [22] 钟香艳,石辉,李旋,等.物理结皮和生物结皮的斥水特征及其对水分入渗的影响[J].*应用生态学报*,2022,6(15):1-13.
- [23] Burga B, Uta B, Elisabeth, et al. Bacterial soil communities affected by water-repellency[J]. *Geoderma*, 2010,158(3):343-351.
- [24] 马金龙,许欢欢,王兵,等.黄土高原坡耕地土壤物理结皮对坡面产流产沙过程的影响[J].*水土保持学报*,2022,36(1):45-49.
- [25] Ji J Y, Zhao Y J, Yang Kai, et al. Effects of the distribution of biological soil crust on the hydrodynamic characteristics of surface runoff[J]. *the Journal of Applied Ecology*, 2021,32(3):1015-1022.
- [26] 李小娟,张莉,张紫萍,等.高寒草甸生物结皮发育特征及其对土壤水文过程的影响[J].*水土保持研究*,2019,26(6):139-144.
- [27] 谢申琦,高丽倩,赵允格,等.模拟降雨条件下生物结皮坡面产流产沙对雨强的响应[J].*生态学杂志*,2019,30(2):391-397.
- [28] 都军,李宜轩,杨晓霞,等.腾格里沙漠东南缘生物土壤结皮对土壤理化性质的影响[J].*中国沙漠*,2018,38(1):111-116.
- [29] 程琴娟,蔡强国.模拟降雨下黄土表土结皮的侵蚀响应[J].*水土保持学报*,2013,27(4):73-77.
- [30] 高丽倩.黄土高原生物结皮土壤抗水蚀机理研究[D].陕西杨凌:中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心,2017.
- [31] Joanna E. Annie, Ockelford, Craig S, et al. Bullard, et al. Effects of Cyanobacterial Soil Crusts on Surface Roughness and Splash Erosion[J]. *Journal of Geophysical Research:Biogeosciences*, 2018,123(12):3697-3712.
- [32] Li G R, Li X L, Chen W T, et al. Effects of degradation severity on the physical, chemical and mechanical properties of topsoil in alpine meadow on the Qinghai-Tibet Plateau, west China[J]. *Catena*, 2019,187(C):104370-104370.
- [33] 李国荣,李希来,陈文婷,等.黄河源区退化草地水土流失规律[J].*水土保持学报*,2017,31(5):51-55,63.
- [34] 周虹,刘雲祥.高寒沙区土壤结皮对浅层土壤理化性质的影响[J].*干旱区资源与环境*,2022,36(8):154-160.
- [35] 孙华方.生物土壤结皮对黄河源人工草地稳定性的影响[D].西宁:青海大学,2019.
- [36] 秦宁强.黄土丘陵区生物土壤结皮对降雨侵蚀力的响应及影响[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2012.
- [37] 路培,王林华,吴发启.不同降雨强度下土壤结皮强度对侵蚀的影响[J].*农业工程学报*,2017,33(8):141-146.
- [38] 吴秋菊.基于不同耕作措施下土壤结皮的形成及其对侵蚀的影响研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2015.
- [39] 刘法,张光辉,杨海龙,等.风向及油蒿植株对生物结皮分布特征的影响[J].*中国水土保持科学*,2014,12(4):100-105.
- [40] 张健,刘国彬,许明祥,等.黄土丘陵区影响生物结皮退化因素的初步研究[J].*中国水土保持科学*,2008,6(6):14-20.
- [41] Zhu X C, Liang Y, Zhu L L, et al. Quantification of physical soil crust thickness and its effects on runoff and sediment yield[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2022,86(3):630-642.
- [42] 刘涛涛,王勇辉,阿迪拉·阿布力米提,等.艾比湖湿地不同厚度盐结皮与土壤物理性质的相互关系及其影响因素[J].*中山大学学报:自然科学版*,2021,60(6):91-101.
- [43] 徐剑波,宋立生,赵之重,等.近15 a来黄河源地区玛多县草地植被退化的遥感动态监测[J].*干旱区地理*,2012,35(4):615-622.
- [44] 陈正发,夏清,史东梅,等.基于模拟降雨的土壤表土结皮特征及坡面侵蚀响应[J].*水土保持学报*,2011,25(4):6-11.
- [45] 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.