

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.04.022.

童生春, 李国荣, 李进芳, 等. 黄河源高寒草甸退化秃斑地土壤基本特征及其风蚀规律[J]. 水土保持研究, 2023, 30(4): 10-17.

TONG Shengchun, LI Guorong, LI Jinfang, et al. Soil Basic Characteristics and Wind Erosion in Degraded Barren Patches of Alpine Meadow in the Source of Yellow River[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(4): 10-17.

黄河源高寒草甸退化秃斑地土壤 基本特征及其风蚀规律

童生春¹, 李国荣^{1,2}, 李进芳¹, 翟辉¹, 朱海丽^{1,2}, 刘亚斌^{1,2}, 陈文婷¹, 胡夏嵩^{1,2}

(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)

摘要: [目的] 阐明高寒草甸不同类型退化秃斑地的土壤基本特征及其风蚀规律, 揭示土壤物理力学特性与土壤风蚀之间的交互影响作用, 进而为黄河源区生态植被的修复和保护提供理论依据。 [方法] 以黄河源 7 种草甸退化秃斑地及高原鼯鼠鼠丘为研究对象, 结合野外调查和原位试验, 对不同秃斑地土壤物理力学特征、土壤风蚀规律的差异性及土壤风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) 不同退化秃斑地土壤基本物理力学特性指标差异较显著, 7 种秃斑地的平均土壤含水率、密度、紧实度和黏聚力分别是高原鼯鼠鼠丘的 1.3 倍、2.6 倍、14.2 倍和 5.0 倍, 秃斑地中风毛菊的恢复生长对土壤的保水固土能力最强, 香薷草和臭蒿相对较弱。 (2) 风蚀 60 min 后高原鼯鼠鼠丘土壤的总流失量是退化秃斑地的 1.3~4.4 倍; 风蚀量的增加幅度随风蚀时间呈先增后减的趋势, 风蚀作用的前 5~10 min 是土壤风蚀的敏感期; 不同退化秃斑地土壤风蚀量与植被恢复类型有关, 且与土壤物理力学指标值之间呈反比例关系。 (3) 退化秃斑地土壤风蚀量与植被覆盖度、土壤含水率和土壤紧实度之间均呈线性负相关关系, 与土壤黏聚力间呈指数函数负相关关系; 土壤风蚀量与覆盖度、含水率、紧实度和黏聚力间存在极显著负相关, 与土壤密度和土壤平均粒径分别存在显著负相关和显著正相关。 [结论] 不同类型的退化秃斑地均可通过提升土壤基本物理力学特性, 从而对土壤风蚀产生抑制效应, 其中风毛菊抑制效果最佳、香薷草和臭蒿相对较弱。

关键词: 黄河源区; 高寒草甸; 退化秃斑地; 土壤基本特征; 土壤风蚀

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)04-0010-08

Soil Basic Characteristics and Wind Erosion in Degraded Barren Patches of Alpine Meadow in the Source of Yellow River

TONG Shengchun¹, LI Guorong^{1,2}, LI Jinfang¹, ZHAI Hui¹,
ZHU Haili^{1,2}, LIU Yabin^{1,2}, CHEN Wenting¹, HU Xiasong^{1,2}

(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)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to clarify the basic characteristics of soil and the pattern of wind erosion in different types of degraded bare patches in alpine meadow, reveal the interaction between soil physical and mechanical properties with soil wind erosion, then provide a theoretical basis for the restoration and protection of ecological vegetation in the source region of the Yellow River. [Methods] Based on the field investigation and in-situ test, the physical and mechanical characteristics of soil, the difference of soil wind erosion pattern and correlation between soil wind erosion and erodibility factors were analyzed and discussed in seven kinds of meadow degraded barren land and plateau zokor mound in the Yellow River source. [Results] (1) There were significant differences in the basic physical and mechanical properties of soils in

收稿日期: 2022-06-06

修回日期: 2022-06-28

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

different degraded bald land. The average soil moisture content, density, compactness and cohesion of seven bald land were 1.3 times, 2.6 times, 14.2 times and 5.0 times of plateau zokor hill, respectively. The restoration and growth of *Saussurea eopygmaea* in bald land had the strongest ability to retain water and soil, while *Elsholtzia densa* and *Artemisia hedinii* were relatively weak. (2) After 60 min of wind erosion, the total soil loss of plateau zokor mound was 1.3~4.4 times that of degraded barren land; the increment of wind erosion amount increased first and then decreased with the wind erosion time. The first 5~10 min of wind erosion was the sensitive period of soil wind erosion. Soil wind erosion in different degraded bald spots was related to vegetation restoration types, and was inversely proportional to soil physical and mechanical index values. (3) There was a linear negative correlation between soil wind erosion and vegetation coverage, soil moisture content and soil compaction, and an exponential negative correlation between soil wind erosion and soil cohesion. Soil wind erosion was significantly negatively correlated with soil cover, moisture content, compactness and cohesion, and significantly negatively correlated with soil density and soil average particle size, respectively. [Conclusion] Different types of degraded bare lands have an inhibitory effect on soil wind erosion by improving the basic physical and mechanical properties of soil. Among them, the inhibition effect of *Saussurea eopygmaea* is the best, and the inhibition effect of *Elsholtzia densa* and *Artemisia hedinii* are relatively weak.

Keywords: source region of the Yellow River; alpine meadow; degraded barren patch; basic soil characteristics; soil wind erosion

黄河源区地处青藏高原腹地,是黄河上游主要产流区、水源涵养区,也是黄河流域生态环境保护重点区域^[1]。受季节性气候影响,区内植被生长季节性变化显著,该地区广泛分布的高寒草甸对于维护生态环境的稳定性和可持续性具有十分重要的生态价值和战略意义^[2]。近年来在气候变化、过度放牧以及啮齿动物穴居活动等的影 响下,部分草甸出现了不同程度的退化,并产生大面积的退化秃斑,进而加剧了土壤的侵蚀作用^[3-5]。据报道,黄河源区近 1/3 的草地发生了退化,其中严重退化草地面积占退化草地面积的 26.79%,退化区土壤的年均侵蚀速率达 16.5 t/hm²^[6-8],因此研究黄河源区草地的退化程度和土壤的侵蚀状况,对于整个黄河流域和青藏高原环境生态系统的演变具有重大意义^[9]。秃斑地是高寒草甸草地退化过程中由于草皮脱落、植物死亡、表层土壤逐渐裸露和剥蚀而形成的特殊微地貌^[10],而处于退化阶段的秃斑地在气候变迁、过度放牧、太阳辐射及外力侵蚀作用下,可发生进一步的恶化和扩张^[11],最终引起土壤性质和植物群落等的空间动态变化,进而导致植被演替的时空不连续性和异质性^[12],这对高寒干旱地区草甸稳定性和生态环境的可持续发展产生了极大的影响^[13]。

黄河源区部分草甸出现退化秃斑地的其中一个重要原因在于该地区分布有大量的 小型啮齿动物,此类动物不仅与牛羊争食,消耗大量牧草,而且反复挖掘啃食掩埋草地,形成明显的斑块状次生裸地^[14],其中最常见的是高原鼢鼠(*Eospalax baileyi*)和高原鼠兔(*Ochotona*

curzoniae)^[15]。啮齿类动物活动不仅可改变原生草甸的土壤理化性质,而且松散鼠丘的堆积、掩埋以及鼠类动物的啃食作用会直接导致植被被枯死,从而加快了退化秃斑地的形成。此外,受季节性气候作用的影响,黄河源每年约有 7~8 个月的时间内高寒草甸地表处于干旱、半干旱状态^[16],致使风蚀作用在土壤侵蚀中占主导作用,成为草地退化区土壤侵蚀的主要原因之一^[17]。有学者研究认为,啮齿动物活动形成的鼠丘及秃斑地极易发生土壤风蚀,其与土壤性质、土体结构、植被类型与盖度、地形微地貌等密切相关^[18-20]。如 Jouquet 等^[21]提出啮齿动物的掘穴行为导致土壤团聚体稳定性降低、有机质含量贫乏,为土壤风蚀的发生创造条件。李国荣等^[22]研究认为鼠丘分布区土壤流失量与风速关系密切,土壤养分流失是加剧啮齿动物活动区秃斑地形成的主要原因,且风蚀作用下土壤流失量均呈先快后慢的变化规律。马素洁等^[23]研究认为高原鼢鼠新生土丘属于次生裸地,在风力和水力作用下极易导致高寒草甸风蚀和水蚀发生,且不同地形和不同大小的土丘水土流失情况各异。刘艳萍等^[24]认为退化草原植被恢复类型是影响秃斑地土壤风蚀的重要自然因素,随着植物种丰度和植被盖度的增大土壤风蚀量会迅速减少,且风速越大时植被对地表的保护作用越明显。尽管目前有诸多学者针对草甸退化区土壤风蚀及其影响因子等进行了研究,但是针对啮齿动物活动后形成的退化秃斑区,结合不同土壤特性和植被类型差异性对比分析风蚀作用方面的研究有待于

深入。本文以黄河源区高寒草甸 7 种退化秃斑地和高原鼯鼠丘为研究对象,开展相应的野外调查及原位风蚀试验,为揭示高寒草甸退化秃斑地的形成机理、土壤风蚀规律以及为今后开展秃斑地人工植被修复和生态环境保护提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于黄河源区黄南州河南县南旗村,平均



图1 啮齿动物活动堆积的鼠丘

本研究中的退化秃斑地主要是针对高原鼯鼠的掘穴造丘行为导致土壤分散堆积、掩埋原生草甸,因植被腐烂枯萎后形成的草甸退化斑块,秃斑地内植被的自然恢复往往从较单一的优势物种逐步恢复生长。因此以短期恢复生长的优势植被种类作为秃斑地类型的划分依据,将退化秃斑地大致分为 7 类(图 3),即矮丛风毛菊型(*Saussurea eopygmaea*)、兰石草型(*Lancea tibetica*)、细叶亚菊型(*Ajania tenuifolia*)、臭蒿型(*Artemisia hedinii*)、甘肃雪灵芝型(*Arenaria kansuensis*)、密穗香薷型(*Elsholtzia densa*)、鹅绒委

海拔约 3 600 m,地理坐标为东经 101°47',北纬 34°44',年气温范围 9.2~14.6℃,属高原亚寒带湿润气候。该地区季节性吹风明显,风动时间主要集中在每年的 11 月—翌年 4 月,总体呈现大风时期集中现象,年均风速为 2.6 m/s,最大风速可达 23.7 m/s^[25]。该区域分布大量的高寒草甸,且诸多区域内啮齿动物掘穴活动猖獗,导致草甸原有的土壤结构和群落特征遭到破坏,最终在地表形成大量的鼠丘及秃斑地,加剧草甸退化和土壤风蚀(图 1—2)。



图2 高寒草甸退化秃斑地

陵菜型(*Potentilla anserine*)。此外,野外调查还发现原生草甸表面很难发生土壤风蚀,而秃斑地的发育过程总会伴随优势植物种的恢复生长,即很难形成完全裸露的秃斑地,因此无法实现以裸露秃斑地为对照进行对比分析。相比之下,鼠丘是遭到啮齿动物扰动后堆积形成的近半球形松散裸露土丘,其在土壤物理力学特性、植被生长状况以及外部形态等方面均具有可比性,在野外试验中以裸露的高原鼯鼠鼠丘作为对照可以更好地对比分析不同秃斑地土壤物理力学特性及其土壤风蚀规律的差异性。

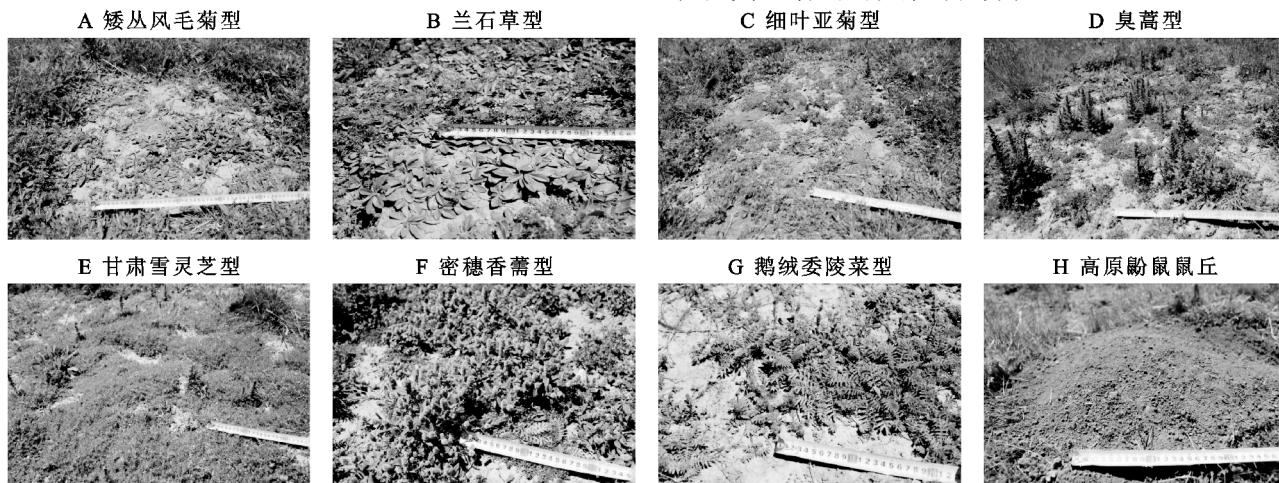


图3 研究区退化秃斑类型

1.2 试验设计与方法

以上述 7 种植物生长型退化秃斑地和高原鼯鼠鼠丘作为研究对象,鉴于土壤风力侵蚀主要发生在土

壤表层范围内,而植被根系也会对土壤特性产生影响,试验中分别对不同秃斑地 0—2 cm 的地表含根原状土壤的基本物理力学特性进行测试(各重复 10

次),测试指标主要包括土壤密度、含水率、颗粒级配分析、土壤紧实度和黏聚力等,然后对比分析 8 类秃斑样地土壤基本物理力学特性的差异性。其次分别设定面积为 80 cm×80 cm 的试验小区,采用野外风蚀试验装置分别对各秃斑地土壤风蚀量进行测试,原位风蚀试验装置主要由风箱、风速调节器、蓄电池、数据线以及土壤收集器组成,其轴心调控风速范围为 3.0~18 m/s(每差 1.5 m/s 为 1 个风速梯度),迎风横截面积约 2 m²,轴心吹风高度约 10 cm。试验时将风箱和土壤颗粒收集器分布安置在待测小区两侧,即吹风口对准秃斑地,土壤颗粒收集器安置在鼠丘另一侧,与试验小区的水平距离为 50 cm。模拟风洞试验的风蚀时间设定为 60 min,模拟轴心风速大小为 9 m/s(据试验区据地面高度 1.5 m 的气象站获取的风速数据和近地面风速仪测定数据核算设定),每隔 5 min 一次测定秃斑地土壤风蚀量。

上述试验在 2021 年 11—12 月份进行,期间基本无降水天气,避免了雨水对风蚀试验的影响,同时为了防止天然风速对模拟试验产生误差,试验时用挡风板阻隔土壤收集器两侧的自然风。此外,本研究将不同秃斑地和鼠丘土壤含水率、密度、土壤粒径、紧实度和黏聚力以及秃斑地植被覆盖度作为影响土壤风蚀的可蚀性因子,应用 Excel 软件和 SPSS 软件对土壤风蚀量与可蚀因子之间的关联程度和相关性进行分析,以此评价秃斑地土壤风蚀和各可蚀性因子间的相互影响作用。

2 结果与分析

2.1 不同退化秃斑地土壤物理力学基本特征

研究结果表明,试验区 7 类退化秃斑地和高原鼯鼠鼠丘土壤含水率、密度、紧实度、黏聚力的变化趋势基本一致,整体上由高到低依次为风毛菊型>细叶亚菊型>兰石草型>鹅绒委陵菜型>甘肃雪灵芝型>臭蒿型>香薷草型>高原鼯鼠鼠丘(表 1)。其中风毛菊型、细叶亚菊型、兰石草型、鹅绒委陵菜型、甘肃雪灵芝型、臭蒿型和香薷型退化秃斑地土壤含水率分别比高原鼯鼠鼠丘增加 54.1%,41.1%,33%,34.3%,32.1%,24.6%,17.9%,黏聚力较高原鼯鼠鼠丘增大 9.3 倍、5.8 倍、5.5 倍、4.8 倍、3.8 倍、3.4 倍和 2.3 倍。总体而言,7 种退化秃斑地土壤的平均含水率比高原鼯鼠鼠丘增加 34.0%,平均土壤密度比高原鼯鼠鼠丘增加 154.7%,平均土壤紧实度比高原鼯鼠鼠丘增加 1324.3%。不同秃斑地土壤含水率、密度、紧实度、黏聚力均随覆盖度的降低而减小,以风毛菊型秃斑地为例,其土壤含水率比高原鼯鼠鼠丘增加 54.1%,密

度增加 173.4%,紧实度增加 2023.0%,黏聚力增加 825.0%。相比之下,高原鼯鼠鼠丘土壤结构和稳定性等均遭到破坏,导致其土壤密度降低到 0.64 g/cm³,其他物理力学特性指标均有明显的降低趋势。这一结果也印证了啮齿动物对草甸土壤的机械破坏作用和植被恢复生长对表层土壤的稳固作用。

表 1 不同退化秃斑地土壤物理力学特征值

秃斑地 类型	植被 覆盖度/%	含水率/ %	密度/ (g·cm ⁻³)	紧实度/ kPa	黏聚力/ kPa
风毛菊型	46.3f	41.3e	1.75cd	267.5d	44.4f
细叶亚菊型	34.8e	37.8cd	1.70c	198.6c	27.7e
兰石草型	32.6e	35.7c	1.63bc	197.2c	26.4e
鹅绒委陵菜型	27.4d	36.0c	1.63bc	191.7c	23.1d
甘肃雪灵芝型	21.8c	35.4c	1.62bc	188.9c	18.3c
臭蒿型	16.2bc	33.4bc	1.58bc	180.6c	16.5c
香薷草型	12.2b	31.6b	1.52b	31.7b	11.1b
高原鼯鼠鼠丘	0.0a	26.8a	0.64a	12.6a	4.8a

注:表中不同小写字母表示同一物理力学指标间差异显著($p<0.05$)。

研究结果表明,8 种试验区土壤颗粒级配曲线表现出不同的粒径分布特征(图 4)。不同秃斑地土壤的平均粒径由大到小依次为高原鼯鼠鼠丘>香薷草型>甘肃雪灵芝型>鹅绒委陵菜型>臭蒿型>兰石草型>细叶亚菊型>风毛菊型。其中高原鼯鼠鼠丘土壤平均粒径为 2.35 mm,比其他 7 种秃斑地的土壤平均粒径高出 199.6%;而风毛菊型秃斑地土壤平均粒径仅为 0.48 mm,比高原鼯鼠鼠丘土壤平均粒径低 389.6%。其次甘肃雪灵芝型的土壤颗粒级配最好,高原鼯鼠鼠丘型土壤颗粒级配最差。从不同退化秃斑地土壤颗粒级配数据可推断草地退化程度和土壤颗粒级配有关,即退化程度越严重的土壤颗粒级配越差,退化程度越轻的土壤颗粒级配越好。同时,颗粒级配与秃斑地土壤的密度、含水率等物理性质之间存在一定的相关性。由于原生草地被扰动后,土壤的稳定状态随即也会被破坏,导致其相关物理力学性质发生较大变化,在风力侵蚀作用下容易造成土壤流失。

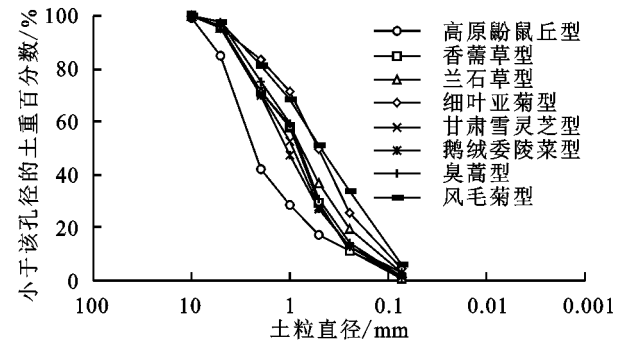


图 4 不同秃斑地土壤颗粒级配曲线

2.2 高寒草甸不同退化秃斑地土壤风蚀规律

2.2.1 不同退化秃斑地土壤总流失量对比 经对比分析,8种秃斑地土壤流失总量从大到小依次为:高原鼯鼠鼠丘>香薷草型>臭蒿型>甘肃雪灵芝型>鹅绒委陵菜型>兰石草型>细叶亚菊型>风毛菊型(图5)。高原鼯鼠鼠丘土壤风力侵蚀最为严重,侵蚀60 min后土壤总流失量高达59.5 g,显著高于其他植被恢复生长退化秃斑地的土壤流失量($p<0.05$)。其中风毛菊型秃斑地土壤流失量最少,仅为13.4 g,高原鼯鼠鼠丘土壤总流失量比其高出344.0%。风蚀60 min后高原鼯鼠鼠丘土壤的总流失量是风毛菊型土壤的4.4倍、细叶亚菊型土壤的2.4倍、兰石草型土壤的2.0倍、鹅绒委陵菜型土壤的1.9倍、甘肃雪灵芝型土壤的1.4倍、臭蒿型土壤的1.4倍、香薷草型土壤的1.3倍。试验结果表明,土壤风蚀与土壤物理力学特性具有一定的相关性,具体表现为土壤裸露程度越严重,土壤含水率、密度、紧实度和黏聚力越小的秃斑地,其土体结构稳定性和土壤抗侵蚀能力越低,导致地表土壤流失量越大。

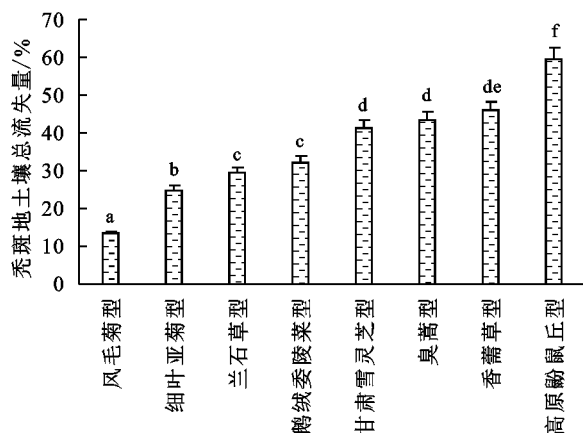


图5 不同秃斑地土壤总流失量对比

2.2.2 不同退化秃斑地土壤累计风蚀量随时间的变化规律 试验结果表明,退化秃斑地的土壤累计风蚀量均随风蚀时间的增加呈现出先快后慢的增长趋势(图6)。风蚀前5~10 min是各类秃斑地土壤流失的敏感期,产生的土壤流失量对土壤流失总量贡献最大,10 min时高原鼯鼠鼠丘的土壤流失量比风毛菊型土壤流失量高出371.4%。随着风蚀作用的持续进行,由于单颗粒及细小颗粒最先被吹蚀,单位时间内的土壤侵蚀量会出现逐渐减少的变化规律。结合秃斑地土壤物理力学特性测试结果,植被的恢复生长可对秃斑地土壤的物理力学特性进行改良优化,从而使不同退化秃斑地土壤抗风蚀能力出现差异性。试验结果反映出啮齿动物的掘穴造丘行为会严重破坏

土壤结构,进一步为土壤风蚀提供物源,增加了土壤的风蚀可蚀性。风毛菊型植株生长对地表土壤具有更好的防护作用,通过对比发现其对抑制土壤风蚀的效果最为显著,而其他型植株的恢复生也具有一定的保水固土作用。

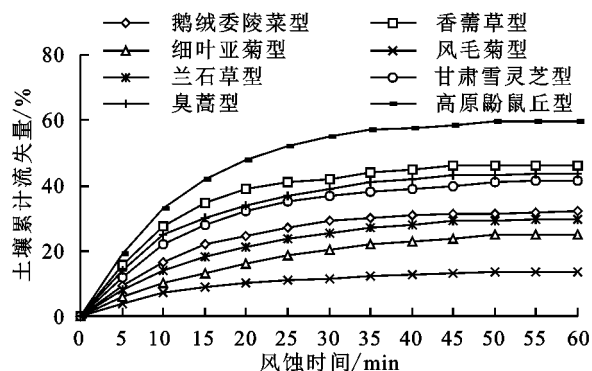


图6 土壤累计流失量随风蚀时间的变化规律

2.2.3 不同退化秃斑地土壤流失量的变化量对比 从图7可以看出,单位时间内不同类型的退化秃斑区土壤风蚀率呈先增后减的趋势。在风蚀前5 min内,除细叶亚菊型的土壤流失量占其总流失量的24%最低外,其他类型秃斑地均在30%左右。由于土壤表层的细粒松散物质最易先被吹蚀,5 min时刻左右各类退化秃斑地土壤流失速率均达到峰值。5 min后不同类型退化秃斑地土壤流失率均呈下滑趋势,风蚀30 min后各秃斑地的土壤流失率均趋于平缓,即单位时间内土壤的侵蚀量变化稳定。风蚀60 min后,高原鼯鼠鼠丘土壤总流失量达59.5 g,比风毛菊型秃斑地高出344%,说明风毛菊的恢复生长对土壤风蚀的抑制作用更显著,有助于促进草甸退化区生态环境的自然恢复效应。

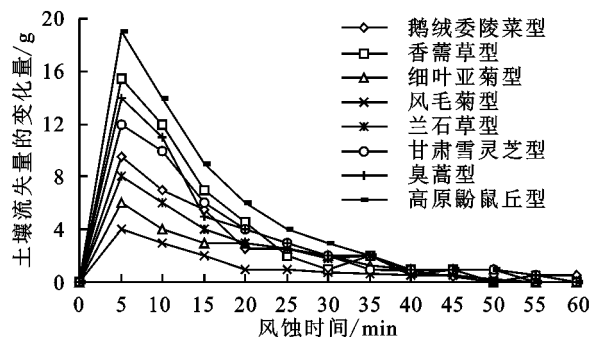


图7 不同秃斑地土壤流失量随风蚀时间的变化规律

2.2.4 土壤风蚀量与可蚀性因子间的回归方程 结合7种秃斑区物理力学特征值和土壤风蚀量的测试结果,分析得出退化秃斑地土壤风蚀量与植被覆盖度、土壤含水率和土壤紧实度之间均呈线性负相关关系,而其土壤风蚀量与土壤黏聚力之间呈指数函数的负相关关系(图8—11),土壤风蚀量与土壤密度之间未呈现明显的规律性变化。

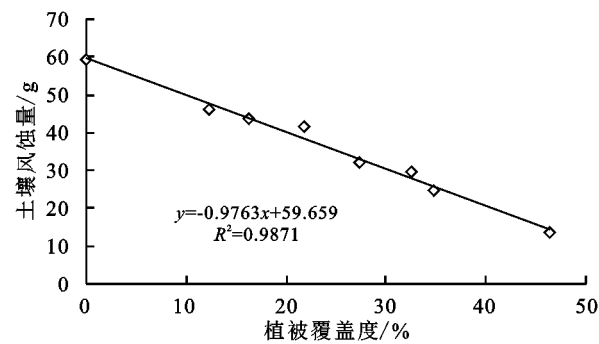


图 8 秃斑地土壤风蚀量与植被覆盖度的关系

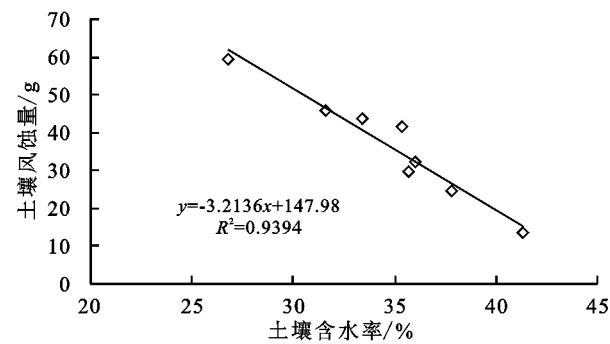


图 9 秃斑地土壤风蚀量与含水率的关系

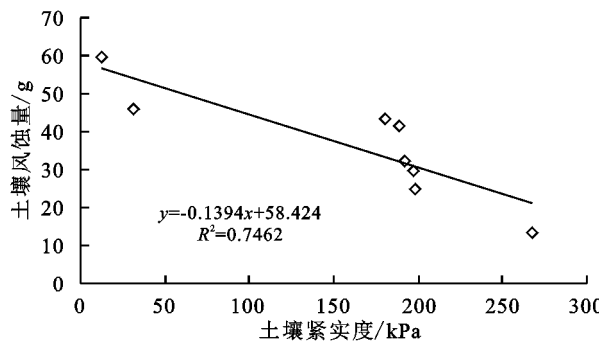


图 10 秃斑地土壤风蚀量与紧实度的关系

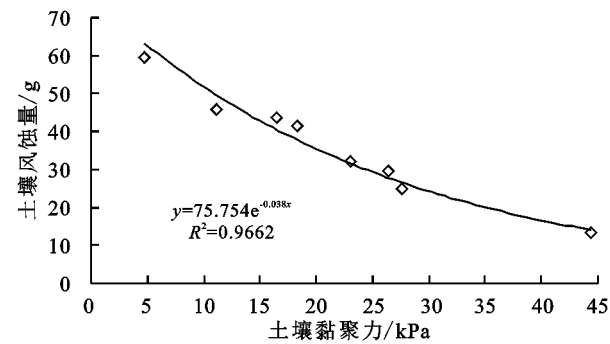


图 11 秃斑地土壤风蚀量与黏聚力的关系

2.3 秃斑地土壤风蚀量与各可侵性因子的关联度和显著性分析

秃斑地土壤风蚀量与可蚀性因子间的关联度分析结果中,各可蚀性因子对土壤风蚀量的关联度均较为明显,其中土壤平均粒径、土壤密度对秃斑地土壤风蚀的关联度较高,关联度值分别为 0.799,0.740;其次为含水率、紧实度和黏聚力,而植被覆盖度对土壤风蚀的关联度相对较小(表 2)。

从表 2 中还可以看出,土壤风蚀量与地表植被覆盖度、含水率、紧实度和黏聚力之间存在极显著负相关,与土壤密度和土壤颗粒的平均粒径之间分别存在显著负相关和显著正相关。秃斑地土壤流失量与可蚀性因子间的关联度和相关性分析结果反映出秃斑地的形成与土壤物理力学特性的变化和植被退化有关,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 2 秃斑地土壤风蚀量与各可蚀性因子关联度和显著性分析

可蚀性因子	植被覆盖度/%	含水率/%	密度/(g·cm ⁻³)	土粒平均粒径/mm	紧实度/kPa	黏聚力/kPa
关联度	0.587	0.738	0.740	0.799	0.653	0.613
显著性	-0.994**	-0.983**	-0.782*	0.779*	-0.867**	-0.978**
Sig.(双尾)	0	0	0.022	0.023	0.005	0

注:表中*为相关性显著(0.01<p<0.05);**为相关性极显著(p<0.01)。

3 讨论

3.1 不同退化秃斑地出现土壤抗蚀性差异的原因

7 种退化秃斑地均是由于啮齿动物活动和鼠丘堆积形成的,经过野外调查和数据分析,各秃斑地土壤特性和风蚀量出现差异的原因较多,其中最重要的原因是与啮齿动物机械破坏的程度有关,因为啮齿动物在活动中必将啃食植被、掘穴等,致使表层土壤结构发生重组,而且土壤疏松裸露,进而激发土壤风蚀作用。啮齿动物活动的频次、啃食植被和挖掘土层的程度不一样,其对土壤物理力学特性的差异性改变导致了土壤风蚀量的显著不同,在相关性分析中表现为

正相关与负相关区域相互交错,表明各因子对土壤风蚀可蚀性的影响程度具有空间异质性,间接印证了土壤风蚀和地表土壤的物理力学性质之间具有交互影响作用。受啮齿动物扰动形成的秃斑区,一般经过了从裸地到自然恢复的轻度演替过程,如本研究中 7 种秃斑小区刚开始恢复生长的大部分植物均为相对单一、能够迅速生长的优势物种,根据野外调查结果显示,高寒退化秃斑地中的风毛菊主根每年平均增粗约 1.6 mm,须根数量平均每年更替增加 9 根;细叶亚菊主根每年增粗约 1.2 mm,须根数量平均每年更替增加 6 根;兰石草主根每年增粗约 0.8 mm,须根数量平均每年更替增加 5 根,其他植物根系也存在随生长时

间呈现增粗、增量的现象。结合表1中的试验结果分析认为,不同秃斑地土壤物理力学基本特征不仅与植被类型和覆盖度有关,而且在植被恢复过程中不同植物根系的增粗、增量的生长以及保水作用等具有差异性,导致土壤含水率、密度、紧实度和黏聚力等均发生不同程度的变化。从不同植被类型地上生物量的角度分析,其地上茎叶对风蚀的抑制作用也存在差异,如风毛菊、兰石草等植株叶片相对较大,而且其叶片紧贴地面展开,导致植物叶片对地表土壤的防护作用越强,对土壤风力侵蚀具有较好的抑制作用,而香薷草和臭蒿植株地上部分生长较高,但是其覆盖度相对较低,在诸多因素的综合影响下土壤的抗蚀性出现显著差异。因此从退化秃斑地类型与土壤风蚀作用间的关系入手,厘清秃斑地不同植被恢复生长对抑制土壤风蚀的差异性,将是今后需要深入调查和研究的科学问题之一。

3.2 与已有类似研究的对比

通过原位试验发现,不同类型的退化秃斑区土壤风蚀率呈先增后减的趋势,而且在风蚀前5 min内土壤流失量急剧增加,其主要原因是未经风蚀的地表能被吹蚀的细粒土占比相对较高,即在吹风作用下短时间内发生流失,但随着持续吹蚀和细粒土含量的降低,土壤风蚀量将会逐步降低,这一结果与李国荣等^[22]研究高寒草甸高原鼠兔土丘的土壤风力侵蚀规律得出的结论基本一致,但与此文献相比,本文试验中只设定了风速为9 m/s的恒风模拟风蚀试验,有关不同风速梯度变化下草甸退化秃斑地的土壤风蚀规律有待深入。邢恩德等^[26]研究认为植被盖度是影响土壤风蚀最敏感的自然因素,土壤风蚀率随植被覆盖度的增加而减小,并提出植被覆盖也可通过改善土壤特性和土体结构从而提高地表土壤的抗侵蚀性能,这与本文中叙述的退化秃斑地土壤物理力学特性变化及其土壤风蚀量随植被覆盖变化而显著变化的结论相一致。此外就有关土壤物理力学特性和土壤风蚀之间的作用关系,部分学者也针对土壤的少数单个特性和土壤风蚀状况之间进行了相关性分析,本研究通过结合灰色关联度法和皮尔逊相关性分析方法得出退化秃斑植被覆盖度、土壤粒径、土壤基本特性与土壤风蚀量之间确实存在一定相关性(表2),并提出了土壤紧实度和黏聚力与土壤风蚀量的负相关关系。通过野外试验和调查发现,土壤的抗蚀性也与根-土结构、土壤团聚体含量和大小等均有关,这也是今后需要深入思考和探究的科学问题。

3.3 小型啮齿动物活动与退化秃斑地发育的关系

黄河源高寒草甸区由小型啮齿动物挖掘活动在地表形成的土丘和鼠洞随处可见,它们活动区的土壤和大量植被遭到破坏,并使浅层土壤翻出地表,同时鼠丘长时间的堆积和掩埋,也会导致草甸植被腐烂枯萎,最终在地表形成裸露秃斑地。经野外调查发现,啮齿动物活动区地下存在纵横交错的洞穴,在重力侵蚀作用下可发生轻微的坍塌现象,而且随着鼠丘土壤颗粒的不断流失和植被枯萎,草甸表面将逐步形成低洼的小面积裸露斑块,后期伴随着风水侵蚀和冻融侵蚀,裸露斑块不断向四周扩张,甚至造成斑块与斑块之间形成连通,致使地表的退化秃斑地面积增大,草甸退化程度和土壤侵蚀强度加剧,草地生态环境遭到破坏^[27]。高寒草甸诸多区域的秃斑地发育,不仅与啮齿动物的机械破坏和土壤流失有关,而且还与养分贫瘠有很大的关系,即土壤颗粒的流失也伴随着土壤养分的流失^[28]。秃斑地的演替过程中由于植被缺乏应有的营养物质,加之高寒干旱的恶劣气候条件,秃斑地植被自然恢复的速度极其缓慢,并在植被多样性、稳定性和可持续性等方面表现出明显差异。高寒草甸秃斑地的发育、扩张及植被自然恢复等是一个极其复杂、缓慢的过程,不仅涉及到气象水文、物理力学作用改造,还与秃斑地微地貌发育和植被更替的适应性等密切关联,有关草甸秃斑地的发育与生态演替将是今后有待深入探究的科学问题。

4 结论

(1) 不同退化秃斑地土壤基本物理力学特性指标差异显著,其中风毛菊型和细叶亚菊型秃斑地的土壤物理力学指标值相对较高,香薷草型、高原鼢鼠鼠丘的较低;与高原鼢鼠鼠丘相比,7种秃斑地的平均土壤含水率、密度、紧实度和黏聚力分别是高原鼢鼠鼠丘的1.3倍、2.6倍、14.2倍和5.0倍,秃斑地中风毛菊的恢复生长对土壤的保水固土能力最强,香薷草和臭蒿相对较弱。

(2) 不同退化秃斑地土壤风蚀量与土壤物理力学指标值之间呈反比例关系,风蚀60 min后高原鼢鼠鼠丘土壤的总流失量是秃斑地的1.3~4.4倍;风蚀量的增加幅度随风蚀时间呈先增后减的趋势,风蚀作用的前5~10 min是土壤风蚀的敏感期。秃斑地不同类型植被恢复生长可对土壤风蚀的抑制作用产生较大差异,其中风毛菊型植株生长对抑制土壤风力侵蚀的发生最为显著,而其他型植株的恢复生也具有

一定的保水固土作用。

(3) 退化秃斑地土壤风蚀量与植被覆盖度、土壤含水率和土壤紧实度之间均呈线性负相关关系,与土壤黏聚力之间呈指数函数负相关关系;土壤平均粒径、土壤密度对秃斑地土壤风蚀的关联度最大,其次是含水率、紧实度和黏聚力,植被覆盖度相对较低;土壤风蚀量与地表植被覆盖度、含水率、紧实度和黏聚力因子存在极显著负相关,与土壤密度和土粒平均粒径间分别存在显著负相关和显著正相关。

参考文献:

- [1] 管晓祥,刘翠善,鲍振鑫,等.黄河源区植被 NDVI 演变及其与降水、气温的关系[J].水土保持研究,2021,28(5):268-277.
- [2] 刘彩红,王朋岭,温婷婷,等.1960—2019 年黄河源区气候变化时空规律研究[J].干旱区研究,2021,38(2):293-302.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 孙铁军,肖春利,滕文军.不同草地建植模式对荒坡地土壤风蚀及理化性质的影响[J].水土保持学报,2011,25(3):44-48.
- [6] 李成阳,张文娟,赖焱敏,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.
- [7] Wiesmair M, Otte A, Waldhardt R. Relationships between plant diversity, vegetation cover and site conditions: Implications for grassland conservation in the Greater Caucasus[J]. Biodiversity and Conservation, 2017,26(2):273-291.
- [8] Wang Y B, Wang G X, Hu H C, et al. Erosion rates evaluated by the ¹³⁷Cs technique in the high altitude area of the Qinghai-Tibet plateau of China[J]. Environmental Geology, 2008,53(8):1743-1749.
- [9] 刘启兴,董国涛,景海涛,等.2000—2016 年黄河源区植被 NDVI 变化趋势及影响因素[J].水土保持研究,2019,26(3):86-92.
- [10] 王宝山,尕玛加,张玉.青藏高原“黑土滩”退化高寒草甸草原的形成机制和治理方法的研究进展[J].草原与草坪,2007(2):72-77.
- [11] 韩立辉,尚占环,任国华,等.青藏高原“黑土滩”退化草地植物和土壤对秃斑面积变化的响应[J].草业学报,2011,20(1):1-6.
- [12] 史丽丽,赵成章,樊洁平,等.祁连山地甘肃臭草斑块土壤水分与植被盖度空间格局[J].生态学杂志,2013,32(2):285-291.
- [13] 贺丽,黄超,陈德朝,等.不同围封方式初期川西北高寒草甸的群落结构和稳定性[J].草业科学,2022,39(2):268-277.
- [14] 徐剑波,宋立生,赵之重,等.近 15 年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.
- [15] 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.
- [16] 刘义花,王振宇,刘彩红,等.气候变暖背景下青海省春季干旱时空变化[J].干旱区研究,2020,37(2):282-290.
- [17] 翟辉,李国荣,李进芳,等.黄河源草地退化区 2 种鼠丘土壤风蚀规律[J].干旱区研究,2022,39(4):1212-1221.
- [18] Shahabinejad N, Mahmoodabadi M, Jalalian A, et al. In situ field measurement of wind erosion and threshold velocity in relation to soil properties in arid and semiarid environments[J]. Environmental Earth Sciences, 2019,78(16):1-22.
- [19] 陈泽涛,沙占江,王求贵,等.高寒草原草甸区土壤侵蚀及植被覆盖对养分空间分布的影响:以兴海盆地子科滩为例[J].水土保持研究,2019,26(6):226-234.
- [20] Chi W F, Wang Y T, Lou Y X, et al. Effect of land use/cover change on soil wind erosion in the yellow river basin since the 1990s[J]. Sustainability, 2022,14(19):12930.
- [21] Jouquet P, Bouet C, Labiadh M, et al. Bioturbation and soil resistance to wind erosion in Southern Tunisia[J]. Geoderma, 2021,403:115198.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 刘艳萍,刘铁军,蒙仲举.草原区植被对土壤风蚀影响的风洞模拟试验研究[J].中国沙漠,2013,33(3):668-672.
- [25] 杨元武,李希来,周旭辉,等.高寒草甸植物群落退化与土壤环境特征的关系研究[J].草地学报,2016,24(6):1211-1217.
- [26] 邢恩德,马少薇,郭建英,等.植被盖度对典型草原区地表风沙流结构及风蚀量影响[J].水土保持研究,2015,22(6):331-334.
- [27] 杨鼎,齐昊昊,王倩,等.青藏高原高原鼯鼠丘植被恢复过程中植物群落特征的变化[J].草业学报,2020,29(2):114-122.
- [28] 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.