

青海省高寒草甸退化秃斑土壤风蚀规律

越大林¹, 李国荣^{1,2}, 童生春¹, 隆玉翔¹, 朱海丽^{1,2},
刘亚斌^{1,2}, 李进芳¹, 赵健赞^{1,2}, 李希来³, 胡夏嵩^{1,2}

(1. 青海大学 地质工程系, 青海 西宁 810016; 2. 青藏高原北缘新生代资源环境重点实验室,
青海 西宁 810016; 3. 青海大学省部共建三江源生态与高原农牧业国家重点实验室, 青海 西宁 810016)

摘要: [目的] 探究高寒草甸退化秃斑地土壤风蚀规律, 为退化草甸区的植被恢复和生态环境保护提供科学依据。[方法] 选取青海省河南县因高原鼠兔活动而退化形成的秃斑地作为研究对象, 在 9, 12, 15 m/s 这 3 种风速条件下, 对不同植被覆盖度(0%, 20%, 40%, 60%, 80%)的退化秃斑地进行原位模拟风力侵蚀试验, 以分析植被覆盖度在不同风速下对土壤风蚀的影响。[结果] ①退化秃斑地的土壤风蚀速率随时间推移呈现先急剧下降后趋于平缓的变化趋势($p < 0.05$)。在总时长为 60 min 的风蚀试验下, 前 10 min 是土壤风蚀速率变化的敏感期。②3 种风速下, 植被覆盖度与总输沙量之间均呈显著负相关的指数函数关系($R^2 = 0.98$), 其指数系数绝对值越大, 表明植被覆盖度对风蚀的抑制作用随风速增加而减弱。③随着植被覆盖度的增加, 0~5 cm 高度范围内输沙量显著降低, 且各植被覆盖度的输沙量均随高度增加而逐渐减少。[结论] 增加植被覆盖度能够有效降低风蚀速率和输沙高度, 但在较高风速下, 植被覆盖度对风蚀的抑制效果显著减弱, 且植被覆盖度抑制土壤风蚀的关键阈值在 40% 左右, 并随着植被覆盖度的持续增大, 风蚀减少的边际效益逐渐降低。

关键词: 高寒草甸; 高原鼠兔; 植被覆盖度; 退化秃斑地; 土壤风蚀

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)03-0036-11

中图分类号: S157.1

文献参数: 越大林, 李国荣, 童生春, 等. 青海省高寒草甸退化秃斑土壤风蚀规律[J]. 水土保持通报, 2025, 45(3): 36-46. Yue Dalin, Li Guorong, Tong Shengchun, et al. Soil wind erosion law in degraded bare patches in alpine meadows of Qinghai Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(3): 36-46. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2025.03.011; CSTR:32312.14.stbctb.2025.03.011.

Soil wind erosion law in degraded bare patches in alpine meadows of Qinghai Province

Yue Dalin¹, Li Guorong^{1,2}, Tong Shengchun¹, Long Yuxiang¹,
Zhu Haili^{1,2}, Liu Yabin^{1,2}, Li Jinfang¹, Zhao Jianyun^{1,2}, Li Xilai³, Hu Xiasong^{1,2}

(1. Department of Geological Engineering, Qinghai University, Xining, Qinghai 810016, China; 2. Key Laboratory of Cenozoic Resource & Environment in Northern Margin of the Tibetan Plateau, Xining, Qinghai 810016, China; 3. State Key Laboratory of Three-River Source Ecology and Plateau Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xining, Qinghai 810016, China)

Abstract: [Objective] The law of soil wind erosion in degraded bare patches in alpine meadows was examined to provide a scientific basis for vegetation restoration and ecological and environmental protection in degraded meadow areas. [Methods] Bare patches degraded by plateau pika activity in Henan County, Qinghai Province, China were selected as research subjects. In-situ wind erosion simulation experiments were conducted under three wind speeds of 9, 12, and 15 m/s for degraded bare patches with different vegetation cover levels (0%, 20%, 40%, 60%, and 80%) to investigate the effects of vegetation cover on soil wind erosion under varying wind speeds. [Results] ① The soil wind erosion rate for degraded bare patches showed a trend of initially sharp decline followed by stabilization over time ($p < 0.05$). During the 60 min wind erosion experiment, the first 10 min was

收稿日期: 2024-11-12

修回日期: 2025-01-09

采用日期: 2025-01-09

资助项目: 青海省科技厅基础研究项目“国家公园黄河源区高寒草原土壤风蚀机理研究”(2021-ZJ-701); 国家自然科学基金项目“多维立体观测下黄河源鼠兔干扰与高寒草甸退化的耦合关系研究”(42161068)

第一作者: 越大林(2001—), 男(汉族), 四川省邻水县人, 硕士研究生, 研究方向为地质灾害及其防治。Email: 17782282634@163.com。

通信作者: 李国荣(1979—), 男(汉族), 青海省贵德县人, 博士, 教授, 主要从事生态环境保护及地质灾害防治研究。Email: qdliguorong@163.com。

the sensitive period for changes in the soil wind erosion rate. ② Under all three wind speeds, there was a significant negative exponential relationship between vegetation cover and total sediment transport ($R^2 = 0.98$). The larger the absolute value of the exponential coefficient, the weaker the inhibitory effect of vegetation cover on wind erosion at higher wind speeds. ③ As vegetation cover increased, the sediment transport within the 0—5 cm height range significantly decreased, and sediment transport at all vegetation cover levels gradually decreased with increasing height. [Conclusion] Increasing vegetation cover can effectively reduce wind erosion rates and sediment transport heights. However, at higher wind speeds, the inhibitory effect of vegetation cover on wind erosion significantly weakened. The critical threshold for vegetation cover to inhibit soil wind erosion was approximately 40%. As vegetation cover continued to increase, the marginal benefits of reducing wind erosion gradually diminished.

Keywords: alpine meadow; plateau pika; vegetation cover; degraded bare patches; soil wind erosion

黄河源区位于中国青藏高原西北部,是国家重要的水源涵养区^[1]。该区域以高寒草甸为主要植被类型,覆盖面积约占80%^[2],这些草甸不仅对当地畜牧业具有举足轻重的作用,而且在维持区域生态平衡中扮演着关键角色^[3]。鉴于高寒草甸生态系统固有的脆弱性和对环境变化的高度敏感性,近年来受气候环境变化和人类活动等多重因素的影响,该区域出现了不同程度的退化现象^[4-5]。特别是在啮齿动物频繁活动的地区,如高原鼠兔的掘穴行为,严重破坏了高寒草甸的植被群落和土壤结构,形成了大量的裸露鼠丘和退化秃斑^[6-8]。这些秃斑地在春季干旱和强风的作用下,易产生土壤风蚀,进而加剧了生态系统的退化^[9],对当地牧民的生产生活及区域生态带来了显著的负面影响^[10]。

土壤风蚀作为一种全球性环境问题,受到了国内外学者广泛关注,尤其是在高海拔干旱地区,风蚀现象尤为显著^[11]。研究^[12-13]表明,土壤风蚀是一个受多因素共同作用的复杂过程,涉及风速、植被盖度、土壤含水量、土壤结皮形成以及可蚀性颗粒含量等多个因素。在这些因素中,植被覆盖因其在增加地表粗糙度、稳定土壤结构、拦截风能等方面的积极作用,被认为是抵御土壤风蚀的关键因素之一^[14-16]。例如,孔玲玲等^[16]的研究显示,交叉分布配置的植被在风速较大区域能够更有效地抵抗风蚀;图雅等^[17]研究指出,风速和挟沙风对植被防风蚀效果的影响尤为显著,强调了保护自然生态平衡的重要性。此外,不同类型的植被群落对土壤风蚀的抑制效果也存在显著差异。王佳庭等^[18]的研究表明,灌木群落的土壤风蚀可蚀性明显低于草本植物群落,随着沙地固定程度增加,土壤风蚀可蚀性逐渐降低。李昂等^[19]的研究进一步证实,种植甘草能够显著提高地表粗糙度和土壤含水率,从而减少土壤风蚀量。白子怡等^[20]发现,沙打旺植被盖度达到30%时,能够有效抑制20 cm高度以下约90%的风蚀量。这些研究成果

都揭示了植被覆盖度和配置方式对土壤风蚀的抑制效果具有显著影响。

植被与土壤风蚀相关的研究也取得了一定的进展。李国荣等^[21]研究了高寒草甸退化区土壤风力侵蚀作用及土壤流失规律,发现风力侵蚀是加剧退化高寒草甸高原鼠兔暴发区土壤流失和养分贫瘠化的重要因素之一。童生春等^[22]对黄河源7种草不同秃斑地土壤风蚀规律的差异性进行了分析和讨论,发现风毛菊抑制风蚀效果最佳,香薷草和臭蒿相对较弱。翟辉等^[23-24]对黄河源区两种鼠丘的土壤风蚀差异进行了对比研究,并探讨了不同风速条件下鼠丘大小、形状、土壤含水量及含根量对土壤风蚀的影响。尽管诸多学者开展了草地风蚀方面的研究,但关于黄河源区高寒草甸退化秃斑地如何影响土壤风蚀的现场试验和定量分析仍然缺乏。因此,本研究以高原鼠兔活动导致的退化秃斑地为研究对象,通过野外原位模拟风力侵蚀试验,重点分析不同风速条件下植被盖度对土壤风蚀的影响,为退化草甸区的植被恢复与生态环境保护提供科学依据,并为理解和应对高寒草甸生态系统的影响提供新的视角。

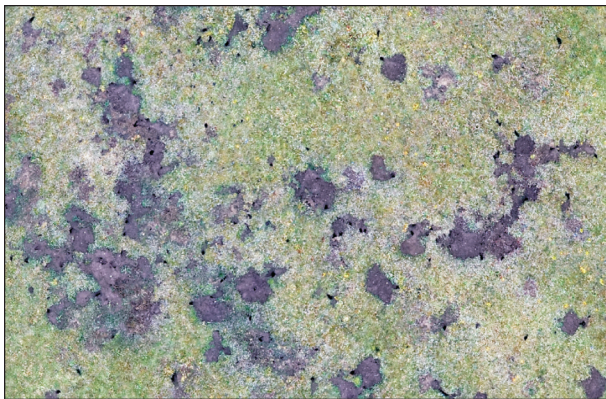
1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于青海省黄南州河南蒙古族自治县,试验地点设在黄河源河曲退化高寒草甸水土流失阈值研究站附近,地理坐标为101°47'E,34°44'N。河南县属高原亚寒带湿润气候区,平均海拔超过3 600 m,年平均风速为2.6 m/s,最大风速可达23.7 m/s。从11月至次年4月,该地区气候寒冷、干燥,且多大风天气,为风蚀提供了有利条件。该区域广泛分布的啮齿动物以高原鼠兔为主,其掘穴和啃食植被的行为,在草甸表面形成大量裸露的鼠丘和鼠洞,局部区域的鼠丘平均密度可达370个/hm²,鼠洞平均密度可达950个/hm²。在过度放牧、风水侵蚀、冻融作用和小

型啮齿动物的共同影响下,草甸表面的鼠丘和鼠洞逐步过渡为退化秃斑地,在风力强劲且干燥的冬春季节易发生土壤风蚀,从而加剧草甸退化。本研究中的退化秃斑地主要是高原鼠兔的掘穴造丘行为导致土壤分散堆积,掩埋原生草甸,引起高寒草甸植被枯萎腐烂,土壤结构受损,从而形成的裸地斑块(图1)。该地区植被类型相对较为单一,主要为密丛且根茎

较短的小嵩草和矮嵩草,伴生植物包括矮丛风毛菊(*Saussurea eopygmaea*)、兰石草(*Lancea xizangica*)、细叶亚菊(*Ajania tenuifolia*)、臭蒿(*Artemisia hedinii*)、密花香薷(*Elsholtzia densa*)和鹅绒委陵菜(*Potentilla anserine*)等。土壤类型为高寒草甸典型的草甸土,其土壤结构松散,养分指标相较于原生草甸土壤偏低。



a 无人机航拍俯视图



b 秃斑地实地拍摄图

图1 高寒草甸退化秃斑地

Fig.1 Degraded bare patches in alpine meadow

1.2 试验设计与方法

野外调查得出退化秃斑地形成后,逐步进入植被的自然恢复过程,随着恢复期的增加,植被覆盖度

逐年增大,但植被多样性相对较低,甚至当覆盖度增加至80%时,其根—土结构、草甸恢复状态、抗侵蚀能力等依然与原生草甸有较大差异(图2)。



a 裸露秃斑地

b 覆盖度40%的秃斑地

c 覆盖度80%的秃斑地

图2 不同植被盖度的退化秃斑地

Fig. 2 Degraded bare patches with different vegetation coverage

因此,在试验中以高原鼠兔干扰后的区域为试验区,选取地形相对一致的 $0.5\text{ m}\times 0.5\text{ m}$ 样方,超出选取部分采用薄膜覆盖。利用高分辨率相机拍摄样方照片,并裁剪掉薄膜覆盖部分。在 ArcGIS Pro 3.3 软件中,通过目视解译法提取植被样本,再基于像素采用最大似然法进行监督分类,最终提取出样方植被的覆盖度^[25-26]。在现场多区域对退化秃斑地进行反复测试,设置5个不同植被盖度梯度(0%,20%,40%,60%,80%),即将覆盖度较接近的($\pm 3\%$ 范围)区域视为同一植被覆盖梯度。土壤粒径测量样本采用五点法从地表向下采集土壤,取样深度为0—2 cm,

以确保收集到表层风蚀的主要土壤层。风洞试验于2023年7—8月在野外进行,试验装置主要包括风洞箱、蓄电池、风蚀盘以及积沙仪(图3)。风洞箱风速可调节范围为3~18 m/s,迎风横截面积约为 2 m^2 ,风洞模拟自然风作用的有效高度范围为0~1.2 m。风蚀盘为自制土槽,盘内规格长 \times 宽 \times 高= $0.5\text{ m}\times 0.5\text{ m}\times 0.03\text{ m}$,试验时将秃斑地原状样按风蚀盘对应规格轻轻切割,挪移至风蚀盘内后放回原地(风蚀盘内样方表面与原地面保持平整),然后将风洞箱和积沙仪分别放置在风蚀盘两侧,与风蚀盘边缘的水平间距均为50 cm。通过可升降支架将风蚀盘高度及积沙仪

调整至与风洞箱底板齐平,采用方形积沙仪收集可蚀土壤运移颗粒。根据野外调查,可蚀颗粒的近距离运移高度约在60 cm,因此积沙仪从下到上共设12层,总高度为60 cm,每层高度为5 cm,进砂截面为5 cm×80 cm,深度为100 cm。在积沙仪的其余3面设置滤网通风孔,并在背部采用纱布遮挡,以确保有效收集运移沉积的土壤颗粒,避免回旋倒流。试验中,轴心风速分别设置为9,12和15 m/s,风蚀时间设定为60 min,每隔5 min暂停吹蚀,然后分层收集不同高度范围内沉积的土壤颗粒。每次收集完颗粒后,将积沙仪分层放回原位,继续试验。收集到的土壤颗粒按不同垂直高度分层装入密封袋后带回实验室,用精密电子天平称重(精度为0.001 g)。经过反复测试,该试验装置的风速持续恒定,测试性能稳定,积沙仪能够分层收集近距离不同垂直高度的可蚀土壤颗粒,满足野外原位风蚀试验的要求。

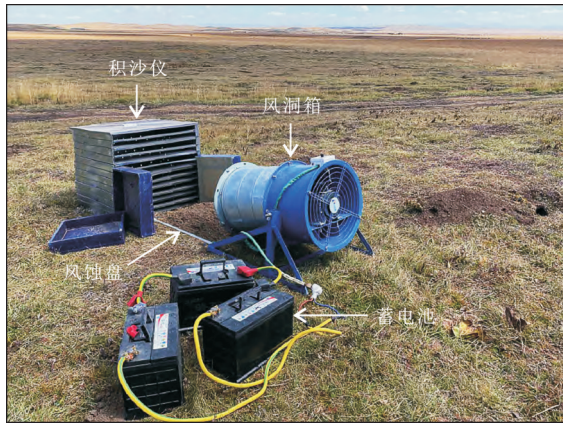


图3 风洞模拟试验装置

Fig. 3 Test device of wind tunnel simulation

1.3 数据处理

1.3.1 输沙量数据处理 将积沙仪中12个进沙口(5 cm×80 cm)在1 h内收集到的风蚀物逐一称重,计算出各高度层的输沙量。输沙量通过累积各高度层的沉积物质量(m)来计算:

$$W = \sum_{i=1}^n m_i \quad (1)$$

式中:W为输沙量(g/h); m_i 为第*i*个高度层的沉积物质量; n 为收集高度层的数量。

1.3.2 风蚀速率计算 风蚀速率是指单位时间、单位面积上的土壤风蚀量。在本试验中的风蚀速率结合称重法进行计算:

$$E = (m_a - m_b) / At \quad (2)$$

式中: E 为风蚀速率[g/(m²·min)]; m_a, m_b 分别为风蚀前风蚀盘上土壤的总质量和每风蚀10 min后风蚀盘上土壤的总质量(g); A 为试验样方的面积(m²),

本研究中为0.25 m²; t 为吹蚀时间(min),本研究中每次测量风蚀盘土壤质量的间隔时长为10 min。

最大风蚀速率是指在特定时间段内观测到的最高风蚀速率,在本次试验中为风洞试验开始后的前10 min。其计算公式为:

$$E_{\max} = (m_0 - m_{10}) / At \quad (3)$$

式中: E_{\max} 为最大风蚀速率[g/(m²·min)]; m_0, m_{10} 分别为风蚀前风蚀盘上土壤的总质量和风蚀试验开始10 min后风蚀盘上土壤的总质量(g); t 为10 min。

稳定风蚀速率是指在风蚀过程达到动态平衡后,风蚀速率趋于稳定的状态,此时风蚀和沉积作用达到平衡,风蚀速率不再有显著波动,本次试验中为风洞试验开始后的30~60 min。其计算公式为:

$$E_s = (m_{30} - m_{60}) / At \quad (4)$$

式中: E_s 为平均风蚀速率[g/(m²·min)]; t 为30 min。

1.3.3 输沙率计算 输沙率是指风沙流在单位时间内通过积沙仪单位宽度的风蚀量,计算公式为:

$$Q = W / L \cdot \Delta T \quad (5)$$

式中: Q 为输沙率[g/(m·min)]; W 为输沙量(g),本研究中输沙量 W 通过积沙仪收集后直接称重计算; L 为积沙仪进沙口宽度(m),本试验中为0.8 m; ΔT 为输沙时间(min),本研究中每次收集土壤的间隔时间为5 min。

1.3.4 风蚀抑制效率计算 风蚀抑制效率(K)是裸地(植被盖度为0%)的输沙量(F_1)和不同植被盖度下的输沙量(F_2)的差值,与裸地的输沙量(F_1)的比值,即:

$$K = (F_1 - F_2) / F_1 \times 100\% \quad (6)$$

式中: K 为风蚀抑制效率(%); F_1 为裸地的输沙量; F_2 为不同植被盖度下的输沙量。

1.3.5 贡献率计算 各因子对风蚀速率和近地表输沙率变化的贡献率基于方差分析得到:

$$PC = (SS_F - DF \cdot V_{Er}) / SS_T \times 100\% \quad (7)$$

式中:PC为因子贡献率(%); SS_T 是总离差平方和; SS_F 是各因子离差平方和; V_{Er} 是误差平方和;DF是因子的自由度。

试验数据分析利用SPSS进行单因素方差分析、偏相关分析及多元线性回归分析,并采用Excel和Origin软件进行制图。

2 结果与分析

2.1 不同植被盖度秃斑地土壤粒径组成特征

高原鼠兔的频繁活动以及风、水侵蚀显著影响了草甸表层结构和土壤物理力学特性,进而导致草甸退化和土壤颗粒组成的变化。

研究发现,退化秃斑地的表层土壤主要由细小的粉粒和黏粒组成(根据 1987 年中国标准),土壤粒径主要集中在 2~250 μm ,含量超过 70%,而粒径大于 250 μm 的颗粒含量相对较低(表 1)。随着退化秃斑地的形成和植被盖度的降低,表层土壤中粒径大于 50 μm 的颗粒含量逐渐增加,而粒径小于 50 μm 的

颗粒含量逐渐减少($p < 0.05$)。这表明随着植被盖度的降低,地表土壤呈现出粗粒化的趋势。这一变化趋势的原因在于细小颗粒容易被风力搬运,而大颗粒则更多地留存于地表。随着风蚀作用的持续,地表土壤逐渐出现粗粒化和沙化现象,这影响了秃斑地植被的自然恢复。

表 1 不同植被盖度下退化秃斑地土壤粒径组成

Table 1 Soil particle size composition of degraded bare patches under different vegetation coverage %

植被盖度	秃斑地土壤粒径组成						
	0~2 μm	2~20 μm	20~50 μm	50~100 μm	100~250 μm	250~500 μm	>500 μm
0	6.68±0.48 ^b	17.67±1.60 ^d	24.98±2.70 ^e	18.32±1.54 ^a	12.13±0.98 ^b	16.91±1.54 ^a	3.31±0.34 ^a
20	7.65±0.53 ^b	18.71±1.84 ^d	27.32±2.61 ^d	13.69±1.63 ^c	14.71±1.17 ^a	15.35±1.66 ^{bc}	2.57±0.23 ^{bc}
40	7.43±0.54 ^b	20.42±2.24 ^c	29.47±3.14 ^c	17.69±1.89 ^{ab}	8.58±0.58 ^d	14.19±1.15 ^c	2.22±0.24 ^c
60	8.68±0.60 ^a	23.96±2.36 ^{ab}	31.82±3.21 ^c	15.37±1.25 ^c	9.84±0.90 ^{cd}	10.06±0.64 ^d	0.27±0.23 ^d
80	8.89±0.61 ^a	23.35±2.64 ^{ab}	35.24±3.22 ^{ab}	14.89±1.61 ^c	8.87±0.54 ^d	8.58±0.71 ^e	0.18±0.12 ^d

注:同列数据后上角标不同小写字母表示同一粒径范围内土壤颗粒含量在不同植被盖度之间差异显著($p < 0.05$)。

2.2 植被盖度对风蚀速率和输沙量的影响

2.2.1 植被盖度对风蚀速率的影响 风洞试验结果表明(图 4),在 3 种不同风速条件下,退化秃斑地的风蚀强度随时间延长而持续降低,尤其在风蚀作用的前 10 min 内风蚀速率最高。这个时间段内,土壤对风蚀的响应最为剧烈、风蚀速率最高、土壤颗粒最易被剥离和输移,对整个风蚀过程的影响最为显著,这

可能是由于土壤表层的松散颗粒和细颗粒物容易被风蚀带走,本研究将此时间段定义为“土壤风蚀敏感期”。10~30 min 内这些易蚀物质逐渐减少,导致风蚀速率下降。30~60 min 内,随着风蚀的持续进行,风蚀盘上的细颗粒物可能被完全风蚀,导致可供风蚀的物质减少,从而出现了风蚀速率趋于平缓的现象。

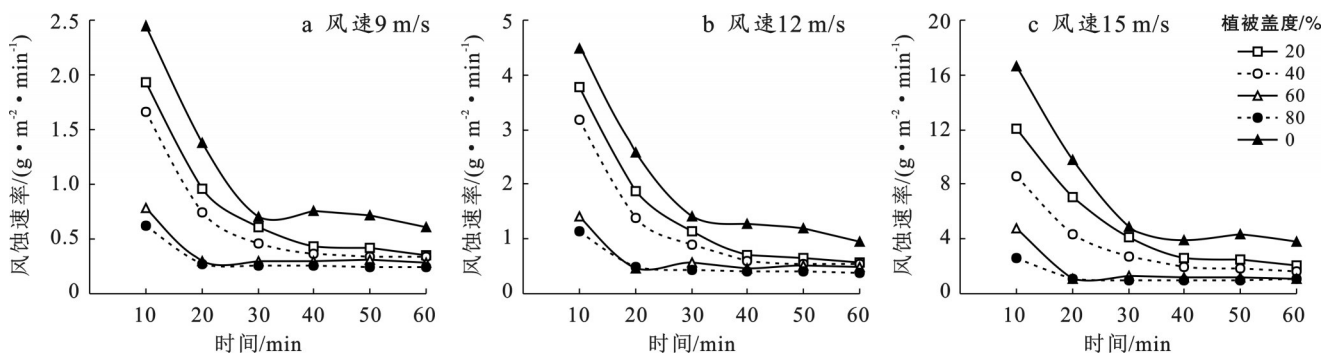


图 4 3 种风速下不同植被盖度的秃斑地风蚀速率随时间的变化

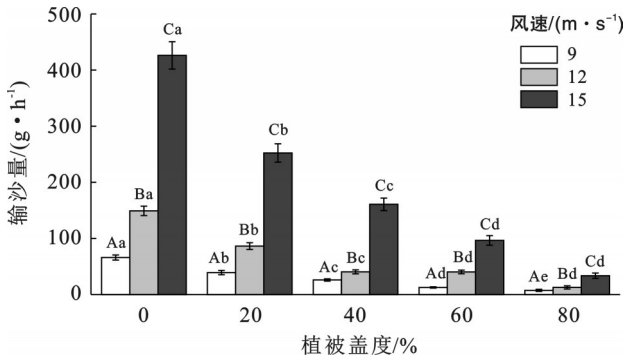
Fig.4 Change of wind erosion rate with time at bare patches with different vegetation coverage under three wind speeds

20% 和 60% 植被盖度之间的风蚀速率差异不显著,但与裸地相比则差异显著($p < 0.05$)。随着植被盖度的降低,风蚀速率增大。例如,在风速为 9 m/s 的条件下,植被盖度为 80% 时,前 10 min 内的风蚀速率为 0.62 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$,而当植被盖度分别降至 60%, 40%, 20%, 0% 时,风蚀速率分别增加了 27.05%, 167.10%, 211.95%, 293.21%; 风蚀时间达 30 min 后,不同盖度之间的风蚀速率差异逐渐缩小; 风蚀时间到 60 min 时,植被盖度为 0%, 20%, 40%, 60% 的土壤风蚀速率分别为盖度 80% 的 2.57, 1.46, 1.41 和 1.2 倍。随着风速增加,不同植被盖度下的土

壤风蚀速率均显著增大。当风速从 9 m/s 分别增至 12 和 15 m/s 时,前 10 min 内,各植被盖度下的土壤风蚀速率平均增加了 82.65% 和 477.53%; 在 60 min 内,土壤风蚀速率平均增加了 60.49% 和 396.21%,表明随着风速达到一定程度,植被盖度对土壤风蚀的影响逐渐减弱,而风速成为影响风蚀速率的主要因素之一。

2.2.2 植被盖度对输沙量的影响 通过测量积沙仪在 0—60 cm 垂直梯度内各高度层输沙量,其分布结果如图 5 所示。结果表明,输沙量随风速的增加而显著增大,且植被盖度对输沙量具有明显的抑制作用。

60 min 内的总输沙量随着植被盖度的增加呈现持续递减的趋势,并且在3种不同风速下差异显著 ($p < 0.05$)。在9 m/s 风速条件下,当植被盖度从80%降低至60%,40%,20%和0%时,输沙量分别增大了1.68,3.45,5.18和8.75倍。与裸地相比,当植被盖度从20%逐步增加到40%,60%和80%时,输沙量分别降至裸地的59.19%,37.75%,22.53%和7.91%。



注:大写字母代表同一植被盖度不同风速之间的差异显著性,小写字母代表同一风速类型不同植被盖度的差异显著性($p \leq 0.05$)。

图5 60 min 内3种风速下不同植被盖度的秃斑地风蚀量
Fig.5 Wind erosion amount of bare patches with different coverage under three wind speeds in 60 min

输沙量随植被盖度的增加呈指数函数关系递减,且风速越小时输沙量随植被盖度的递减率越小(图6)。当风速分别为9,12和15 m/s 时,其相关系数(R^2)分别为:0.9827,0.9872和0.9891。这些指数模型不仅揭示了植被覆盖度对土壤风蚀过程的显著影响,而且表明风速在调节输沙量与植被盖度关系中的关键作用。模型中的指数系数反映了不同风速下植被覆盖度对输沙量的抑制效率,系数的绝对

值越大,表明在较高风速下植被覆盖度对风蚀的抑制作用越弱。

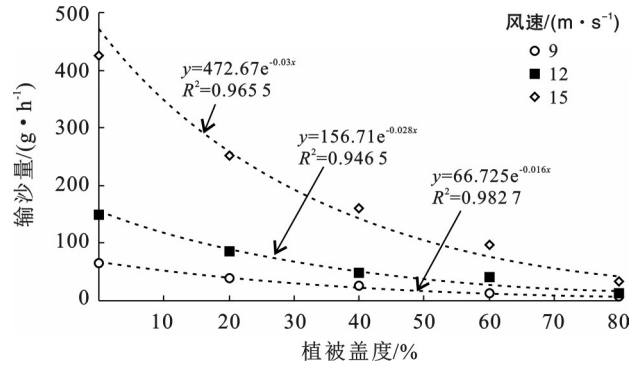


图6 不同风速下秃斑地输沙量与植被盖度的关系
Fig.6 Relationship between sediment discharge and vegetation coverage under different wind speeds

在3种不同风速条件下,不同植被盖度梯度的退化秃斑地土壤输沙率均呈现出先增后减的趋势(图7)。在前30 min 内,土壤风蚀速率较高,且输沙量占60 min 内总输沙量的比例超过70%。在第5 min 时,0% 植被盖度在15 m/s 风速下的输沙率分别为12和9 m/s 风速下输沙率的2.43倍和6.45倍。输沙率在风蚀开始后的5 min 内急剧下降,随后下降趋势逐渐减缓。在风蚀时间达到30 min 后,输沙率的减少量逐渐趋于稳定。风蚀60 min 后,在9 m/s 风速下,随着植被盖度从0% 递增至80%,平均输沙率从0.36 g/(m·min)减小到0.12 g/(m·min);在12 m/s 风速下,输沙率从0.80 g/(m·min)减小到0.28 g/(m·min);在15 m/s 风速下,输沙率从1.61 g/(m·min)减小到0.46 g/(m·min)。随着风蚀时间的增加,土壤表层细粒和土壤含水率逐渐降低,这两种因素共同作用导致输沙率在持续一段时间后仍出现小范围的不规则波动。

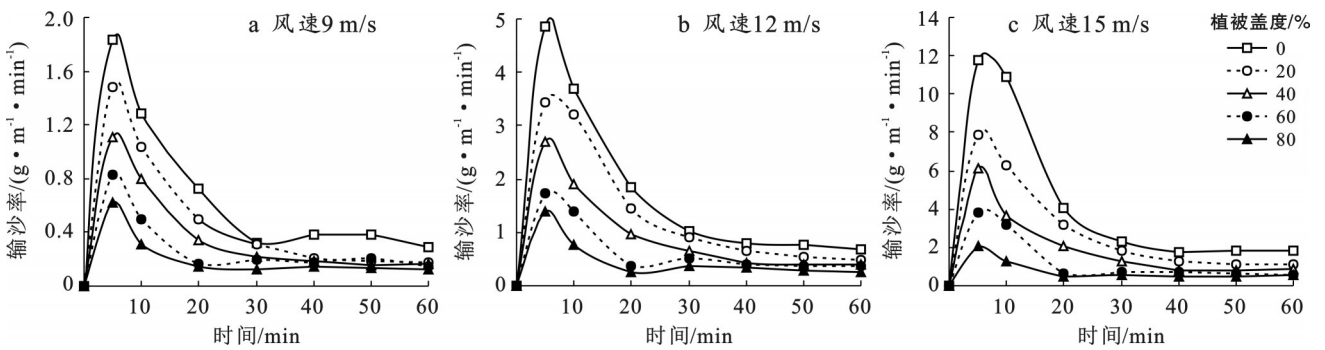


图7 3种风速下不同植被盖度下的秃斑地输沙率随风蚀时间的变化

Fig.7 Change of sand transport rate with wind erosion time under different vegetation coverage and three wind speeds

2.2.3 植被盖度对风蚀的抑制效率 在所有风速条件下,风蚀抑制效率随着植被盖度的增加而显著提高(表2)。随着斑秃地风速从9 m/s 增加到15 m/s,植被盖度为20%和40% 时,风蚀抑制效率变化较小,维持在约40%~67%。然而,当植被盖度达到

60%和80% 时,风蚀抑制效率明显提高,即使在较高风速(15 m/s)下,抑制效率仍能保持在70% 以上。尽管不同风速下的风蚀抑制效率略有波动,但总体趋势一致。例如,在40% 植被盖度下,9 m/s 风速的抑制效率为60.53%,而在12和15 m/s 风速下,抑制

效率分别为 67.46% 和 62.25%。这表明随着风速的增加,抑制效率并未显著下降,甚至在某些情况下(如 12 m/s 风速下),抑制效率略有提升。此外,当植被盖度从 0 增加到 20% 时,风蚀抑制效率平均提高了 41.21%;当植被盖度从 20% 增加到 40% 时,风蚀抑制效率平均提高了 22.21%;而植被盖度从 40% 增加到 60% 以及从 60% 增加到 80% 时,风蚀抑制效率的平均增幅分别仅为 13.60%,13.70%。

2.2.4 植被盖度对输沙量垂直分布的影响 3 种风速条件下不同植被盖度的秃斑地在不同高度范围内的累计输沙量如图 8 所示。其中同一风速下植被盖度增大时不同输沙高度范围内的累计输沙量均呈降低趋势。同一植被盖度下风速增大时不同输沙高度范围内的累计输沙量均呈增大趋势。在不同风速和植被盖度组合条件下,当输沙高度增大时累计输沙量的增长率逐渐呈现出减缓趋势。从图 8 可以看出,

不同高度范围内的输沙量在总输沙量中的占比也存在明显差异性,具体表现为植被盖度为 0% 时,9,12 和 15 m/s 风速下在 0~5 cm 高度范围内的输沙量占总输沙量的 68.66%,69.94% 和 69.91%,但随着植被盖度逐渐增大,所占比例逐渐下降,尤其当植被盖度为 80% 时,其比例分别降至 46.79%,49.15% 和 51.95%。

表 2 不同植被盖度斑秃地的风蚀抑制效率
Table 2 Wind erosion suppression efficiency of bare patches at different vegetation coverage %

风速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	植被盖度/%			
	20	40	60	80
9	40.73	60.53	80.79	88.57
12	42.09	67.46	72.90	91.45
15	40.80	62.25	77.33	92.12
平均值	41.21	63.41	77.01	90.71

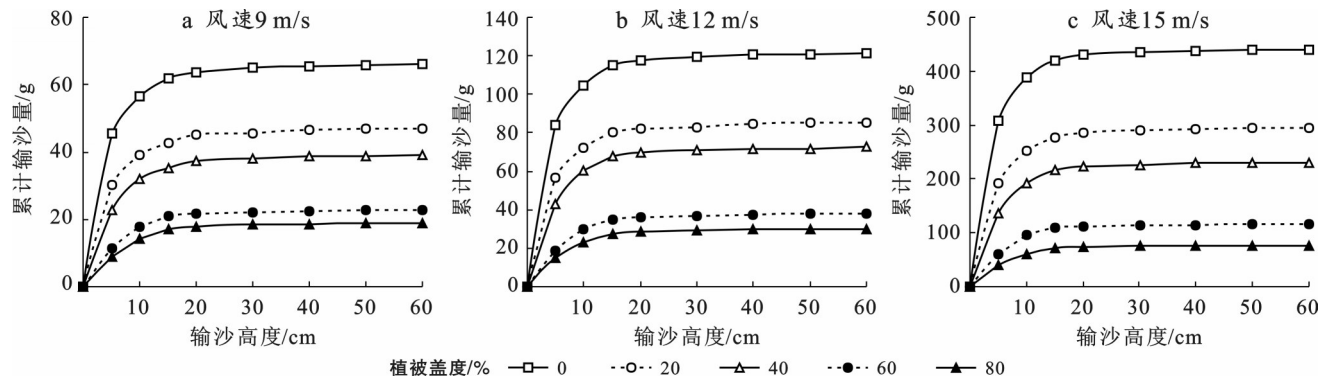


图 8 3 种风速下不同植被盖度的秃斑地不同高度范围内的累计输沙量

Fig.8 Accumulated sediment transport in different height ranges of bare patches with different vegetation coverage under three wind speeds

2.3 植被盖度与风速交互作用对风蚀速率和输沙量的影响

通过 Pearson 相关性分析得出(表 3),斑秃地植被盖度与最大风蚀速率和输沙量呈显著负相关($p < 0.05$),而与输沙量及运移方式特征呈极显著正相关($p < 0.01$)。风速与最大风蚀速率和稳定风蚀速率呈极显著正相关($p < 0.01$),与输沙量呈显著正相关($p < 0.05$),但与运移方式特征之间无显著相关性。

通过偏相关分析(表 4),当排除植被盖度对风蚀的影响后,风速与最大风蚀速率、稳定风蚀速率、输沙量及运移方式特征之间的相关性较高;排除风速对风蚀影响后,各风蚀特征之间的相关性也较高。在植被盖度和风速的交互作用下,最大风蚀速率、稳定风蚀速率及输沙量均呈显著性差异($p < 0.05$),这表明植被盖度对风蚀的抑制作用与风速大小密切相关。

表 3 斑秃地不同风蚀参数的 Person 相关性分析

Table 3 Person correlation analysis of different wind erosion parameters at bare patches

项目	风速	最大风蚀速率	稳定风蚀速率	输沙量	风沙流结构	植被盖度
风速	1.00	—	—	—	—	—
最大风蚀速率	0.682**	1.00	—	—	—	—
稳定风蚀速率	0.723**	0.974**	1.00	—	—	—
输沙量	0.595*	0.962**	0.958**	1.00	—	—
风沙流结构	-0.24	-0.540*	-0.38	-0.46	1.00	—
植被盖度	—	-0.522*	-0.43	-0.610*	0.717**	1.00

注:**表示在 0.01 级别(双尾)极显著($p < 0.01$),*表示在 0.05 级别,相关性显著($p < 0.05$)。下同。

表4 斑秃地不同风蚀参数的偏相关分析

Table 4 Partial correlation analysis of different wind erosion parameters at bare patches

控制变量	参数	风速	最大风蚀速率	稳定风蚀速率	输沙量	运移方式特征	植被盖度
植被盖度	风速	1	—	—	—	—	—
	最大风蚀速率	0.800**	1	—	—	—	—
	稳定风蚀速率	0.803**	0.972**	1	—	—	—
	输沙量	0.751*	0.953**	0.971**	1	—	—
	运移方式特征	-0.340	-0.278	-0.116	-0.044	1	—
风速	最大风蚀速率	—	1	—	—	—	—
	稳定风蚀速率	—	0.951**	1	—	—	—
	输沙量	—	0.947**	0.951**	1	—	—
	运移方式特征	—	-0.532*	-0.318	-0.411	1	—
	植被盖度	—	-0.714**	-0.630*	-0.759**	0.738**	1

通过灰色关联度分析植被盖度和风速对风蚀速率和输沙量的影响(表5),结果显示,植被盖度越高,灰色关联度越高。特别是在80%植被盖度条件下,灰色关联度最高,表明高盖度植被对风蚀和输沙具有最强的抑制作用。

表5 不同植被盖度和风速条件下斑秃地的风蚀速率、输沙量及其灰色关联度

Table 5 Wind erosion rate, sediment transport and grey correlation degree of bare patches under different vegetation coverage and wind speed conditions

风速/ ($m \cdot s^{-1}$)	植被 盖度/%	风蚀速率/ ($g \cdot m^{-2} \cdot min^{-1}$)	输沙量/ ($g \cdot h^{-1}$)	灰色 关联度
9	0	1.10	66.10	0.853
	20	0.78	39.18	0.911
	40	0.65	26.09	0.942
	60	0.38	12.70	0.984
	80	0.31	7.56	1.000
12	0	19.66	149.23	0.465
	20	14.29	86.42	0.568
	40	11.66	48.56	0.648
	60	6.30	40.44	0.741
	80	4.93	12.75	0.826
15	0	7.21	426.17	0.459
	20	4.89	252.29	0.570
	40	3.75	160.88	0.657
	60	1.84	96.59	0.783
	80	1.28	33.60	0.899

在9 m/s风速条件下,植被盖度的抑制作用最为显著,灰色关联度较高;然而,当风速增至15 m/s时,尽管植被覆盖依然存在,但其抑制效果有所减弱,灰色关联度相对降低,表明在高速条件下,植被的防护作用有限。

通过多元线性回归分析及计算基于方差分析得出,风速、植被盖度及其交互作用对土壤风蚀速率和输沙量均具有显著影响($p < 0.05$)。其中,风速、植被盖度和二者的交互作用对输沙量的贡献率分别为30.5%, 32.4%和68.1%,对风蚀速率的贡献率为42.4%, 21.7%和69.4%(表6),进一步说明植被盖度和风速对土壤风蚀的相互作用关系和影响机制。

表6 基于方差分析的各因子对输沙量和风蚀速率影响的显著性及贡献率

Table 6 Significance and contribution rate of each factors effect on sediment discharge and wind erosion rate based on variance analysis

变量	因子	自由度	F值	显著性	贡献率
输沙量	风速	1	7.138	0.019	0.305
	植被盖度	1	7.696	0.016	0.324
	风速×植被盖度	2	15.924	0.000	0.681
风蚀速率	风速	1	11.308	0.005	0.424
	植被盖度	1	4.875	0.046	0.217
	风速×植被盖度	2	16.894	0.000	0.694

3 讨论

3.1 植被盖度对土壤风蚀的影响

本研究结果表明风蚀速率和输沙量均随植被盖度的增加而显著减小,且输沙率随风蚀时间的增加呈现出先增后减的变化趋势。同时,输沙量随植被盖度的增加呈指数下降,这与余沛东等^[27]在科尔沁沙地不同植被盖度沙丘的研究结果相符,强调了植被覆盖率的增加对土壤风蚀速率的显著降低作用。

从风蚀抑制效率来看,所有风速条件下,抑制效率均随植被盖度的增加而显著提高。然而,值得注意的是,当植被盖度从20%增加到40%时,风蚀抑

制效率平均增加了22.21%；而从40%增加到60%以及从60%增加到80%时，风蚀抑制效率的增加幅度分别仅为13.60%，13.70%。结合不同风速下输沙量与植被盖度的关系可以看出，当植被盖度达到40%以上时，输沙率的下降幅度逐渐减缓(图4)。这表明植被盖度40%可能是抑制土壤风蚀的一个关键值，也可以解释为当植被盖度达到40%左右时，植被的覆盖和保护作用显著增强，足以有效减少风蚀；但随着植被盖度进一步增加，风蚀减少的边际效益逐渐降低。这一发现与孔玲玲等^[16]的研究结果相似，该研究也指出植被盖度存在关键期。然而，这一阈值在不同的土壤类型和植被种类下是否都存在上述特征还需要进一步验证和调整。另外，在灰色关联度和多元线性回归分析中，植被盖度对风蚀和输沙的抑制作用在低风速条件下表现最为显著。因此，在管理和保护高寒草甸时，应优先考虑提高植被覆盖率，特别是在风速较低的地区和季节。对于高风速区域，尽管增加植被盖度仍然有帮助，但可能需要结合其他防风措施来进一步减少风蚀和沙尘输送。

植被盖度在抑制土壤风蚀方面具有积极作用，尤其是在0—5 cm近地表高度范围内植被盖度对土壤风蚀的抑制效果最为明显，分析认为当植被盖度越高时，暴露在地表的可蚀颗粒比例越少，在风蚀作用下的土壤颗粒运移量显著减少。同等风速条件下，退化秃斑地输沙量从地表到60 cm高度的垂直方向上呈现由高到低的变化规律，经过野外调查后分析认为，越接近地表时，以滚动、跳跃式的运移颗粒比例较大，其输沙量增加，而高度越高时可蚀颗粒以粉尘颗粒为主，因此其输沙量占比相对较低，而且垂直方向上的输沙量随植被盖度增大而减小，不仅反映出植被盖度对土壤风蚀的抑制，也体现出风蚀作用下可蚀颗粒在风蚀过程中的空间分布规律，这一现象通过试验均得到了良好验证(图8)。

自然条件下不同退化秃斑地的植被覆盖度、景观格局、微地形等会存在一定的差异性，尽管本研究中将植被覆盖度在目标值上下±3%浮动的区域归类为同一覆盖梯度进行重复测试，但试验数据也可能存在微小误差。因此，考虑多因素综合影响下，通过改进试验设计和方法，将植被群落结构、微地貌形态、气象水文、风蚀颗粒分布等的相互作用作为切入点，深度探究退化秃斑地土壤风蚀规律是今后工作的重点。

3.2 退化秃斑地发育及其与土壤风蚀的关系

退化秃斑地的发育是多因素共同驱动的生态退化过程，主要涉及植被覆盖的降低、土壤退化以及生态功能失衡等方面。据相关研究报道，过度放牧、气

候变化和人类活动是导致退化秃斑地形成、发育和扩张的关键因素，并由此引发的植被退化和土壤退化问题不断加剧土壤侵蚀。在高寒草甸生态系统中，秃斑地的形成与水热空洞效应紧密相关，这一效应导致水热散失，加速草甸层的干化剥离，为毒杂草的侵入提供了条件^[5]，再加上风蚀、水蚀和冻融作用等进一步促进了秃斑地的扩大，降低了草地的生产力和生态服务功能，进而诱发草甸的退化和土壤侵蚀。此外，高原啮齿动物的活动对形成草甸斑块状和土壤风蚀影响是不容忽视的，调查发现啮齿动物通过啃食植被和挖掘洞穴，削弱了地表植被覆盖，并改变了土壤的物理和化学性质，导致土壤颗粒松散和团聚体破碎，增加了土壤对风蚀的敏感性，从而加剧了秃斑地的形成和扩张。

退化秃斑地的形成与土壤风蚀强度之间存在显著的相关性，秃斑地土壤物理力学性质变化与土壤风蚀之间的相互作用导致土壤和植被退化，这突显了生态退化过程的复杂性。尽管存在从裸地到自然恢复的演替过程，但由于植被营养匮乏和高寒干旱气候的影响，植被自然恢复速度极为缓慢^[22]。退化秃斑地一旦形成，土壤风蚀强度将长期维持在较高水平。风洞试验结果表明，在风蚀初期，不同植被盖度条件下的土壤均表现出较高的风蚀速率，且该速率随植被盖度的增加而降低(图4)。随着时间的推移，不同植被盖度间的风蚀速率差异虽有所减少，但整体风蚀强度依旧保持在较高水平。这些发现强调了在退化秃斑地恢复过程中，提高植被盖度对于降低风蚀速率和打破恶性循环的重要性。

鉴于退化秃斑地的形成、土壤侵蚀作用以及植被自然恢复是多因素综合影响的复杂过程，未来的研究需要进一步探讨气候条件、人类活动、啮齿动物活动等对土壤结构和风蚀过程的具体影响机制。通过详细的试验和现场观测，分析诸多因素如何影响土壤孔隙度、密度和团聚体稳定性，以及这些变化如何促进土壤风蚀。深入了解风蚀过程的动态变化规律，量化分析风速、植被盖度、气象水文、啮齿动物活动等条件下的土壤风蚀速率和土壤流失量，将有助于揭示风蚀过程的复杂性。此外，研究植被恢复和土壤改良措施在减缓风蚀方面的有效性，探索适合高寒草甸生态系统的恢复方案，是未来研究的重点方向之一。通过植被重建和土壤结构恢复，可以减少退化秃斑地的扩展，恢复高寒草甸的生态平衡。利用遥感技术和地理信息系统(GIS)对退化秃斑地进行长期监测和管理，有助于更好地理解 and 应对退化秃斑地的形成与风蚀过程。

4 结论

(1) 随着植被盖度的降低,退化秃斑地表层土壤中粒径大于 50 μm 的颗粒含量显著增加,土壤呈现出粗粒化的趋势。

(2) 风蚀速率和输沙量均随植被盖度的增加而减少($p < 0.05$),并且随风蚀时间呈现出先急剧下降后趋于平缓的变化趋势。随着风速达到一定程度,植被覆盖度对土壤风蚀的影响逐渐减弱,在较高风速条件下植被对土壤风蚀的抑制效应逐渐受限。

(3) 输沙量与植被盖度呈指数函数关系递减($R^2 = 0.98$),且输沙率在风蚀发生的前 5 min 急剧下降,并在 30 min 后趋于稳定($p < 0.05$)。植被盖度抑制土壤风蚀的关键阈值在 40% 左右,并且随着植被盖度的持续增大,风蚀减少的边际效益逐渐降低。

(4) 植被在降低近地表风蚀的作用显著,且各植被盖度的输沙量随高度增加而逐渐减少。植被盖度对输沙量的贡献率高于风速,风速对风蚀速率的贡献率高于植被盖度,并且植被盖度和风速的交互作用对土壤风蚀速率和输沙量均产生显著影响。

参考文献(References)

- [1] 周冰玉,李志威,田世民,等. 黄河源区水源涵养能力研究综述[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(4): 87-93.
Zhou Bingyu, Li Zhiwei, Tian Shimin, et al. A review on water conservation capacity in Yellow River source region [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(4): 87-93.
- [2] Li X L, Gao J, Brierley G, et al. Rangeland degradation on the Qinghai-Tibet plateau: Implications for rehabilitation [J]. Land Degradation & Development, 2013, 24(1): 72-80.
- [3] Li Xilai, Perry G L W, Brierley G J. A spatial simulation model to assess controls upon grassland degradation on the Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. Applied Geography, 2018, 98: 166-176.
- [4] 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.
Liu Caihong, Wang Pengling, Wen Tingting, et al. Spatio-temporal characteristics of climate change in the Yellow River source area from 1960 to 2019 [J]. Arid Zone Research, 2021, 38(2): 293-302.
- [5] Gao Qingzhu, Guo Yaqi, Xu Hongmei, et al. Climate change and its impacts on vegetation distribution and net primary productivity of the alpine ecosystem in the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Science of The Total Environment, 2016, 554: 34-41.
- [6] 宋梓涵,李希来,苏晓雪,等. 高原鼠兔和高原鼢鼠种群暴发区干扰斑块空间分布格局与演替规律[J]. 生态学报, 2023, 43(7): 2949-2958.
Song Zihan, Li Xilai, Su Xiaoxue, et al. Spatial distribution pattern and succession of disturbance patches formed by plateau pika and plateau zokor in their population outbreak areas in alpine meadow [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(7): 2949-2958.
- [7] Yu Cheng, Pang Xiaopan, Wang Qian, et al. Soil nutrient changes induced by the presence and intensity of plateau pika (*Ochotona curzoniae*) disturbances in the Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. Ecological Engineering, 2017, 106: 1-9.
- [8] 段媛媛,张静,王玲玲,等. 高原鼠兔对高寒草甸植物物种多样性和功能多样性关系的影响[J]. 草业学报, 2022, 31(11): 25-35.
Duan Yuanyuan, Zhang Jing, Wang Lingling, et al. Effects of plateau pika on the relationship between plant species diversity and functional diversity in alpine meadow [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2022, 31(11): 25-35.
- [9] 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.
Han Lihui, Shang Zhanhuan, Ren Guohua, et al. The response of plants and soil on black soil patch of the Qinghai-Tibetan Plateau to variation of bare-patch areas [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2011, 20(1): 1-6.
- [10] Yuan Qin, Yuan Quanzhi, Ren Ping. Coupled effect of climate change and human activities on the restoration/degradation of the Qinghai-Tibet Plateau grassland [J]. Journal of Geographical Sciences, 2021, 31(9): 1299-1327.
- [11] Li Zeyao, Wei Jiarong, Hao Ruifang. The constraint effect of grassland vegetation on soil wind erosion in Xilin Gol of China [J]. Ecological Indicators, 2023, 155: 111006.
- [12] 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): 501.
- [13] 毛旭芮,杨建军,曹月娥,等. 土壤结皮面积与结皮分布对风蚀影响的风洞模拟研究[J]. 水土保持学报, 2020, 34(3): 1-7.
Mao Xurui, Yang Jianjun, Cao Yue'e, et al. Wind tunnel study of soil crust area and distribution affecting on wind erosion [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(3): 1-7.
- [14] Miri A, Dragovich D, Dong Zhibao. Wind-borne sand

- mass flux in vegetated surfaces: Wind tunnel experiments with live plants [J]. *Catena*, 2019, 172: 421-434.
- [15] Zhang Baojun, Xiong Donghong, Liu Lin, et al. Wind erodibility indices of aeolian sandy soils impacted by different vegetation restoration: A case study from the Shannan valley of the Yarlung Zangbo River [J]. *Journal of Mountain Science*, 2022, 19(10): 2830-2845.
- [16] 孔玲玲,董治宝,白子怡,等.植被盖度和配置方式对土壤风蚀影响的风洞试验[J].*中国沙漠*, 2024, 44(1): 235-243.
- Kong Lingling, Dong Zhibao, Bai Ziyi, et al. Effects of vegetation cover and configuration on soil wind erosion based on wind tunnel experiments [J]. *Journal of Desert Research*, 2024, 44(1): 235-243.
- [17] 图雅,冬梅,乌达巴拉其其格.锡林郭勒盟公路沿线土壤风蚀风洞模拟研究[J].*山西农业大学学报(自然科学版)*, 2023, 43(3): 119-128.
- Tu Ya, Dong Mei, Wu D. Simulation study of soil wind erosion and blowouts along the Xilin Gol Provincial Highway [J]. *Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2023, 43(3): 119-128.
- [18] 王佳庭,于明含,杨海龙,等.乌兰布和沙漠典型植物群落土壤风蚀可蚀性研究[J].*干旱区地理*, 2020, 43(6): 1543-1550.
- Wang Jiating, Yu Minghan, Yang Hailong, et al. Soil erodibility of typical plant communities in Ulan Buh Desert [J]. *Arid Land Geography*, 2020, 43(6): 1543-1550.
- [19] 李昂,高天鹏,张鸣,等.西北风蚀区植被覆盖对土壤风蚀动态的影响[J].*水土保持学报*, 2014, 28(6): 120-123.
- Li Ang, Gao Tianpeng, Zhang Ming, et al. Influences of vegetation cover on dynamic changes of soil wind erosion in wind erosion region of northwest China [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(6): 120-123.
- [20] 白子怡,董治宝,南维鸽,等.植被盖度对风沙流结构及输沙率的影响[J].*中国沙漠*, 2024, 44(2): 25-34.
- Bai Ziyi, Dong Zhibao, Nan Weige, et al. The influence of vegetation coverage on the wind sand flow structure and sediment transport rate [J]. *Journal of Desert Research*, 2024, 44(2): 25-34.
- [21] 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.
- Li Guorong, Li Xilai, Li Jinfang, et al. Soil wind erosion law in *Ochotona curzoniae* mound of alpine meadow in the Yellow River [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(2): 110-114.
- [22] 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.
- [23] 翟辉,李国荣,李进芳,等.黄河源鼠害退化区鼠丘土壤的风蚀特征[J].*水土保持通报*, 2022, 42(6): 97-105.
- Zhai Hui, Li Guorong, Li Jinfang, et al. Wind erosion characteristics of rodent mounds at a degraded area in source area of Yellow River [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(6): 97-105.
- [24] 翟辉,李国荣,李进芳,等.黄河源区高寒退化草地鼠丘对土壤风蚀作用的影响[J].*水土保持研究*, 2022, 29(6): 14-20.
- Zhai Hui, Li Guorong, Li Jinfang, et al. Effects of rodent mounds on soil wind erosion in alpine degraded grassland of the Yellow River source zone [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(6): 14-20.
- [25] 随金明,宋乃平,薛毅,等.基于照相法的荒漠草原植被覆盖度测定方法[J].*中国草地学报*, 2019, 41(2): 58-64.
- Sui Jinming, Song Naiping, Xue Yi, et al. The method of extracting vegetation coverage in the desert steppe based on photographic [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2019, 41(2): 58-64.
- [26] 宋创业,张琳,吴冬秀.基于数码照片的植被盖度测量方法研究进展[J].*生态科学*, 2023, 42(1): 263-272.
- Song Chuangye, Zhang Lin, Wu Dongxiu. Research progress in the measurement of vegetation fractional coverage based on digital photograph [J]. *Ecological Science*, 2023, 42(1): 263-272.
- [27] 余沛东,陈银萍,李玉强,等.植被盖度对沙丘风沙流结构及风蚀量的影响[J].*中国沙漠*, 2019, 39(5): 29-36.
- Yu Peidong, Chen Yinping, Li Yuqiang, et al. Influence of vegetation coverage on sand flow structure and wind erosion yield with wind tunnel experiment as a case [J]. *Journal of Desert Research*, 2019, 39(5): 29-36.