

黄河源鼠害退化区鼠丘土壤的风蚀特征

翟辉¹, 李国荣^{1,2}, 李进芳¹, 童生春²,

赵健赞^{1,2}, 朱海丽^{1,2}, 刘亚斌^{1,2}, 陈文婷^{1,2}, 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)

摘要: [目的] 研究鼠丘土壤风蚀特征, 揭示黄河源鼠害退化区鼠丘土壤风蚀机理, 为进一步科学评判高寒草地鼠害退化区土壤流失特征提供科学依据。[方法] 以黄河源区广泛分布的高原鼠兔和高原鼯鼠 2 类鼠丘为研究对象, 并依据鼠丘土壤质地特征将其划分为草甸土鼠丘、沙化土鼠丘以及含砾石土鼠丘 3 类, 在 3~15 m/s 风速范围内采用小型原位风蚀试验装置在 9 组风速试验(梯度为 1.5 m/s)下探究鼠丘土壤风蚀量随风速变化的关系。[结果] ①当风速超过 9 m/s 时, 沙化土鼠丘土壤风蚀量的风蚀量最大, 含砾石土鼠丘土壤风蚀量最小, 且沙化土鼠丘土壤风蚀量与风速大小间呈幂函数的正相关, 草甸土和含砾石土鼠丘土壤风蚀量与风速间呈指数函数的正相关, 砾石对土壤风蚀的抑制作用明显。②高原鼠兔鼠丘土壤风蚀量大于高原鼯鼠鼠丘, 且鼠丘土壤风蚀率随着风速的增加幅度较大, 同等风速下鼠丘土壤风蚀率随风蚀时间的增加呈现先快后慢的趋势。③通过对流失的鼠丘土壤颗粒粒径分析, 沙化土鼠丘土壤风蚀颗粒以砂粒为主, 草甸土和含砾石土鼠丘土壤颗粒均以粉粒为主, 流失颗粒组成与鼠丘土壤质地条件有关。[结论] 黄河源鼠害退化区鼠丘土壤风蚀量随风速大小的变化关系与土壤质地条件、啮齿动物活动习性及其对土壤团聚体的破坏和土壤重组特征有关。

关键词: 黄河源区; 高寒草地; 鼠害退化区; 鼠丘; 土壤风蚀

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)06-0097-09

中图分类号: S157.1

文献参数: 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. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.06.013; 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.

Wind Erosion Characteristics of Rodent Mounds at a Degraded Area in Source Area of Yellow River

Zhai Hui¹, Li Guorong^{1,2}, Li Jinfang¹, Tong Shengchun²,

Zhao Jianyun^{1,2}, Zhu Haili^{1,2}, Liu Yabin^{1,2}, Chen Wenting^{1,2}, Hu Xiasong^{1,2}

(1. Geological Engineering Department of Qinghai University, Xining, Qinghai 810016, China;

2. Key Lab of Cenozoic Resource & Environment in North Margin of the Tibetan Plateau, Xining, Qinghai 810016, China)

Abstract: [Objective] The mechanism of wind erosion of soil in rodent mounds in a degraded area of the source area of the Yellow River were determined by studying the characteristics of soil particle loss in order to provide significant guidance for further scientific evaluation of soil loss characteristics in a degraded alpine grassland area. [Methods] We studied rodent mounds that are widely distributed in the source area of the Yellow River which were creased by two rodent species, namely *Ochotona curzoniae* and *Eospalax baileyi*. According to soil texture characteristics, the rodent mounds were divided into three types: meadow, sand, and gravel-bearing. A small in-situ wind erosion test device was used to investigate the relationship between wind erosion and wind speed in the wind speed range of 3~15 m/s under nine wind speed tests with an

收稿日期: 2022-07-12

修回日期: 2022-09-16

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“黄河源区退化草地水土流失冻融机理研究”(41662023); 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: 翟辉(1997—), 男(汉族), 河南省永城市人, 硕士研究生, 研究方向为地质灾害及其防治。Email: 1838334135@qq.com。

通讯作者: 李国荣(1979—), 男(汉族), 青海省贵德县人, 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。Email: qdl-iguorong@163.com。

interval of 1.5 m/s. [Results] ① When wind speed was greater than 9 m/s, the wind erosion amount of the *Ochotona curzoniae* mounds was the largest, and the wind erosion amount of the *Eospalax baileyi* mounds was the smallest. A power function relationship was found between wind erosion amount of the *Ochotona curzoniae* mounds and wind speed. There was a positive correlation between the amount of wind erosion and wind speed in meadow soil and gravel-containing soil. Gravel had a significant inhibitory effect on soil wind erosion. ② The wind erosion of soil in *Ochotona curzoniae* mounds was greater than in *Eospalax baileyi* mounds, and the wind erosion rate of soil in rodent mounds increased greatly with increasing wind speed. The wind erosion rate of soil in rodent mounds showed a trend of first increasing and then decreasing with increasing wind erosion time. ③ According to an analysis of soil particle size, the wind erosion particles of sand-dune soil were dominated by sand, while meadow soil and gravel-bearing soil were dominated by silt. The composition of erosion particles was related to the soil texture of rodent mounds. [Conclusion] The relationship between soil loss and wind speed was related to soil texture, rodent activity, soil aggregate damage, and soil reorganization in a degraded area of source area of the Yellow River.

Keywords: the source area of the Yellow River; alpine grassland; rodent degradation area; rodent mounds; soil wind erosion

土壤风蚀是导致干旱区和半干旱区土壤流失的最重要的因素之一^[1-2],尤其在青藏高原部分地区风蚀作用极其强烈,导致裸露区土壤流失加剧,对高寒干旱区草地和土壤的退化产生较大影响,也引起诸多学者的关注和重视^[3-6]。土壤风蚀强度不仅与植被盖度、团聚体大小^[7]、风速大小、有机质含量^[8]、含根量等有关,也与土壤质地和草地的退化程度密切相关,影响风蚀强度的因素已成为研究土壤风蚀的重要内容^[9-10]。有研究^[11-13]结果表明,随着风蚀作用的加强,地表土壤侵蚀量明显增加。有学者^[14-16]提出农田、草地和沙漠地区土壤风蚀量与风速大小间呈指数函数或幂函数的递增关系,说明风速对土壤风蚀量的影响极为明显。植被是抑制地表土壤风蚀的重要因子,然而在气候、啮齿动物干扰等影响下,草地植被遭到一定的破坏,植被退化越严重,土壤风蚀强度越大^[17],其不仅改变了土壤质地和组成结构^[18],也影响了土壤退化和生态系统的稳定^[19]。因此研究高寒地区土壤风蚀特征对揭示草地退化机理,保护和修复草地生态环境具有重要意义。

黄河源区地处青藏高原东北部,属于典型的高原大陆性气候,高寒、干旱少雨的气候环境使该地区草地生态环境更加脆弱,且受高原地区各种地质作用频繁,侵蚀作用强烈^[20-21],再加上多风、大风等气象条件的影响,风蚀作用是导致其草地退化和土壤退化的重要因素^[22],部分地区草地土壤因此而出现沙化现象^[23-26]。研究资料表明,黄河源区 70% 的土地类型为高寒草地^[27],且广泛分布着以高原鼠兔和高原鼢鼠为主的小型啮齿类动物^[28],这些鼠类活动使原本脆弱的高寒草地遭受严重的破坏,致使部分地区草地

退化严重^[29-31],尤其是因小型啮齿动物的掘穴、堆积鼠丘等,鼠类活动不仅破坏植被,也使得地表土层遭受机械扰动,从而激发草地退化和土壤流失^[32-33]。针对黄河源区的上述现状,目前诸多学者开始高度关注鼠类爆发后的土壤风蚀和草地退化现象,也逐渐开展了相应的研究,如冯筱等^[34]研究了鼠丘土壤堆积对草地沙漠化的影响,谈静等^[35]采用风蚀盘法对鼠丘风蚀量进行了长期监测,马素洁等^[36]选用风蚀桥法测定高原鼢鼠土壤随时间的流失特征。李国荣等^[37]对高原鼠兔鼠丘在不同风速下土壤风蚀量随时间的变化等开展了研究,尽管上述研究对鼠丘土壤风蚀量与风速的关系进行了总结,但是围绕不同土壤质地、不同类型的鼠丘土壤在不同风速梯度下的对比分析等尚未得到更深入的调查和分析。为此,本研究采用野外人工模拟风蚀试验的方法,以黄河源区不同类型、不同大小以及不同土壤质地的鼠丘作为研究对象,探究鼠丘土壤风蚀量与风速大小的变化关系等,研究结论将为深入认识黄河源区鼠丘土壤风蚀特征和规律提供依据,也对揭示鼠害退化区鼠丘土壤流失和风蚀机理具有重要的意义。

1 试验材料与方法

1.1 研究区概况

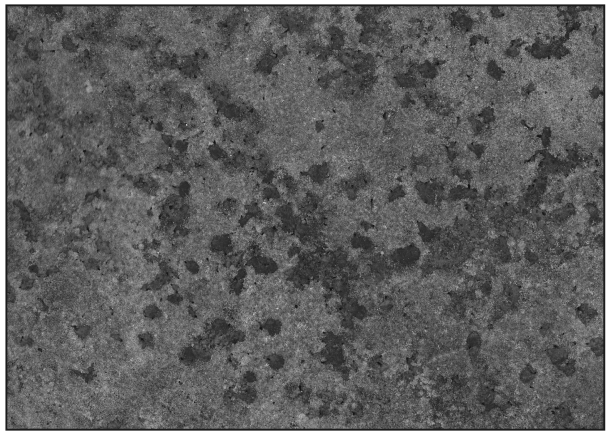
研究区域设在黄河源区的黄南州河南县,地理位置为东经 101°47',北纬 34°44',海拔约 3 600 m。该地区因特殊的地理位置和高海拔,常年气候相对比较恶劣,干旱少雨,属于典型的高原大陆性季风气候,年平均气温在 -1.3~1.6℃,年降雨量 597.1~615.5 mm,且年降雨量有逐年降低的趋势,但冬季略呈增加趋势。目前该地区的草地已经出现了不同程

度的草地退化和土壤荒漠化现象,尤其是在鼠类活动比较频繁区域,通过在野外划定的 100 m×100 m 的样方对鼠丘和鼠洞的数量进行计数统计,鼠丘分布平均密度可达 370 个/hm²,鼠洞平均密度可达 950 个/hm²(图 1),且该区域大风天气频繁且强烈,

历史最大风速可达 20 m/s,年平均风速 2.6 m/s,根据现场的风蚀试验可知,鼠害退化区鼠丘土壤起沙风速(0.5 m 高度)小于 3 m/s,属于典型的风蚀强烈作用区域,风蚀作用加剧了啮齿动物活动区土壤流失和草地退化。



密集分布的高原麴鼠鼠丘



高原鼠兔鼠丘与鼠洞(俯瞰)

图 1 鼠害退化区鼠丘分布

1.2 试验设计与方法

根据研究区分布的小型啮齿动物类型,将鼠丘大类分为高原鼠兔鼠丘和高原麴鼠鼠丘,并根据草地表面的鼠丘土壤质地类型及含沙砾的情况,将研究区的鼠丘类型划分为草甸土鼠丘、沙化土鼠丘和含砾石土鼠丘,其中草甸土鼠丘为原生草甸区土壤堆积形成的鼠丘,黏粒和粉粒含量较高;沙化土鼠丘为草地重度退化区堆积形成的含沙鼠丘,其土壤沙化明显,通过干筛法测得粗砂含量大于 50%;含砾石土鼠丘为原

生草甸区由啮齿类动物活动堆积的鼠丘,鼠丘中夹杂着直径超过 1 cm 的砾石,单个鼠丘平均砾石个数为 30~50。

野外调查发现,高原鼠兔鼠丘和高原麴鼠鼠丘在形状上多呈半球型,按照鼠丘平均直径和高度分别设置为大中小 3 个梯度(表 1)。为避免其他因素的干扰,鼠丘选择未结皮、未受扰动的新生鼠丘,然后采用人工模拟风蚀试验装置分别对不同鼠丘土壤进行恒定风速的风蚀试验。

表 1 高原鼠兔鼠丘和高原麴鼠鼠丘大小参数

鼠丘类型	大鼠丘		中鼠丘		小鼠丘	
	高度/cm	直径/cm	高度/cm	直径/cm	高度/cm	直径/cm
高原鼠兔鼠丘	10	60	8	45	6	40
高原麴鼠鼠丘	16	40	12	35	8	30

人工模拟风蚀试验主要由风洞箱、蓄电池、电线以及土壤收集器等组成,风速可调节幅度为 3.0~18 m/s,每 1.5 m/s 可调 1 个风级梯度值,平均风速脉动约为 0.3 m/s,迎风横截面积约 2 m²,吹蚀高度为 0~1.2 m/s,电池组蓄电充足后最大风速时可持续恒定吹风约 6 h。试验时将风箱和土壤颗粒收集器分布安置在鼠丘两侧,即吹风口对准鼠丘,土壤颗粒收集器安置在鼠丘另一侧,与鼠丘的水平距离均为 50 cm,风速设定为 3~15 m/s,每隔 1.5 m/s 为一个梯度,每个风速梯度下每种类型鼠丘重复 3 次,每类

鼠丘风蚀时间设定为 60 min,待吹蚀 60 min 后,将收集器中收集到的土壤颗粒装入密封袋后带回实验室用电子天平称重(精度为 0.001 g)。

此外,试验中以 9 m/s 风速下两种中度鼠丘为例,风蚀试验中每隔 5 min 测试其土壤风蚀量,分析土壤风蚀量随风蚀时间的变化规律,并对被吹蚀的不同鼠丘土壤颗粒组成进行了分析。该试验在 2021 年 8—9 月进行,所有试验数据均采用 SPSS 统计分析软件进行数据分析和处理,并对不同鼠丘类型的土壤风蚀量测试结果进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 高原鼠兔鼠丘风蚀量与风速的关系

研究表明,随着风速的增加,3 种鼠丘土壤风蚀量增加幅度呈现出先慢后快的变化趋势,土壤流失总变化量大小依次为:沙化土鼠丘>草甸土鼠丘>含砾石土鼠丘(图 2)。

对于高原鼠兔的小鼠丘,当风速低于 10.5 m/s 时,沙化土鼠丘土壤风蚀量与草甸土鼠丘接近,而当风速高于 10.5 m/s 时,沙化土小鼠兔鼠丘土壤风蚀量显著大于草甸土鼠丘。当风速达到 15 m/s 时,沙化土鼠丘土壤风蚀量比草甸土鼠丘多 26.472 g,含砾石土鼠丘土壤风蚀量最少,比沙化土鼠丘少 84.826 g。对于高原鼠兔的中鼠丘而言,含砾石土鼠丘土壤风蚀量均低于其他两种类型的鼠丘,当风速小于

6 m/s 时,草甸土鼠丘土壤风蚀量大于沙化土鼠丘,当风速大于 6 m/s 时,沙化土鼠丘土壤风蚀量明显高于草甸土中鼠兔鼠丘。对于大鼠丘而言,含砾石土鼠丘土壤风蚀量也始终低于其他两种类型鼠丘,当风速低于 7.5 m/s 时,草甸土鼠丘土壤风蚀量高于同风速下的沙化土鼠丘,当风速大于 7.5 m/s 时,沙化土鼠丘的土壤风蚀量明显大于其他两种土壤质地类型鼠丘。对不同大小和不同土壤质地的高原鼠兔鼠丘风蚀量与风速大小增长关系的统计分析得出,当风速小于 4.5 m/s 时,风速的增加不会显著增加高原鼠兔鼠丘土壤的风蚀量($p>0.05$),当风速在 4.5~7.5 m/s 之间时,风速的增加会显著增加高原鼠兔鼠丘土壤的风蚀量($p<0.05$),当风速大于 7.5 m/s 时,高原鼠兔鼠丘土壤的风蚀量的增加随风速的增加极显著($p<0.01$)。

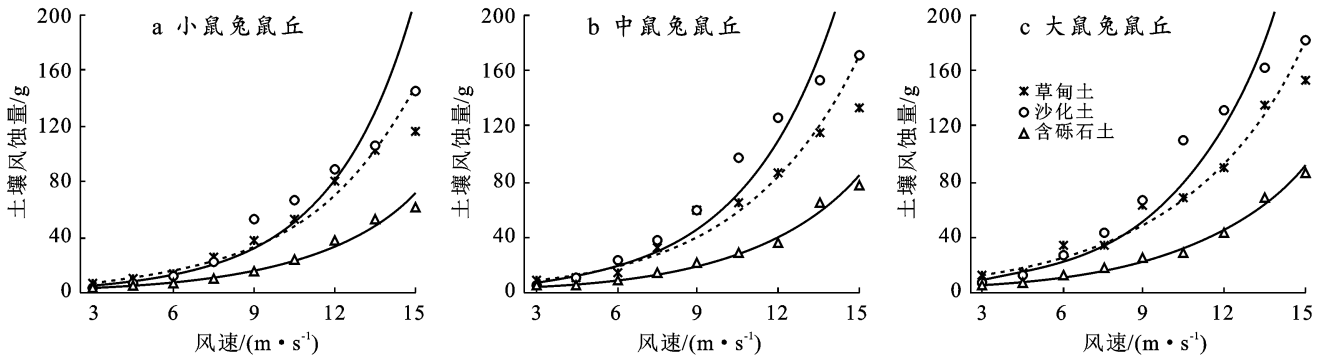


图 2 高原鼠兔 3 种鼠丘土壤风蚀量随风速的变化规律

根据土壤颗粒流失量与风速间的拟合关系可知,相同土壤质地条件下草甸土和含砾石土土壤风蚀量与风速间呈指数函数的递增关系,而沙化土鼠丘土壤风蚀量与风速间呈幂函数的递增关系,拟合度高于 0.95(表 2)。

表 2 高原鼠兔 3 种鼠丘土壤风蚀量与风速的拟合关系		
鼠丘类型	拟合公式	R^2
草甸土小鼠丘	$Q=3.533\ 9e^{0.249V}$	0.984 3
沙化土小鼠丘	$Q=0.189\ 8V^{2.456\ 9}$	0.987 1
含砾石土小鼠丘	$Q=1.707\ 5e^{0.248\ 5V}$	0.992 0
草甸土中鼠丘	$Q=4.461\ 9e^{0.243\ 3V}$	0.956 0
沙化土中鼠丘	$Q=0.388\ 6V^{2.292\ 1}$	0.994 6
含砾石土中鼠丘	$Q=2.060\ 1e^{0.248\ 1V}$	0.983 2
草甸土大鼠丘	$Q=6.755\ 4e^{0.219\ 5V}$	0.959 7
沙化土大鼠丘	$Q=0.505\ 9V^{2.218\ 1}$	0.993 0
含砾石土大鼠丘	$Q=2.710\ 6e^{0.235\ 2V}$	0.989 7

根据 3 种土壤质地类型的鼠丘土壤风蚀量对比结果可知,当风速 15 m/s 时沙化土小鼠丘土壤风蚀量分别是草甸土和含砾石土小鼠丘的 1.25,2.39 倍,沙化土鼠兔中鼠丘分别是草甸土和含砾石土中鼠丘的 1.28,2.21 倍,沙化土鼠兔大鼠丘分别是草甸土和含砾石土大鼠丘的 1.19,2.10 倍(图 3)。此外,当风速从 9 m/s 增加到 15 m/s 时,草甸土大、中、小鼠丘土壤风蚀量分别增加 2.46,2.23,3.15 倍,沙化土鼠丘土壤风蚀量分别增加 2.73,2.83,2.72 倍,含砾石土鼠丘土壤风蚀量分别增加 3.38,3.47,4.00 倍。分析得出,土壤质地对土壤风蚀量的影响较显著,鼠丘体积越大时土壤风蚀量越大。统计分析结果表明,在风速为 9 m/s 的情况下,沙化土鼠丘土壤风蚀量与草甸土鼠丘土壤风蚀量差异性显著($p<0.05$),与含砾石土鼠丘土壤风蚀量差异性极显著($p<0.01$),当风速为 15 m/s 时,3 种土壤质地鼠丘土壤风蚀量呈现相同的统计结果。

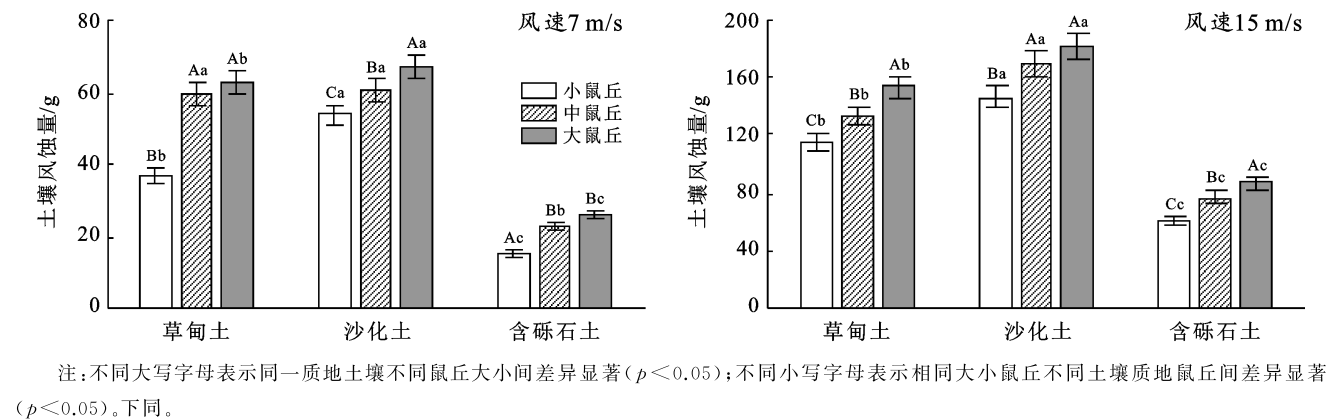


图 3 不同大小高原鼠兔鼠丘土壤风蚀量对比

以高原鼠兔中等鼠丘为例,每隔 5 min 统计土壤风蚀量后可知,当风速为 9 m/s 时 3 种不同类型的鼠丘土壤风蚀量变化规律相似,均表现为前 15 min 土壤颗粒快速流失(图 4),反映出鼠丘土壤风蚀率的敏感期,且草甸土和沙化土鼠丘土壤风蚀量及风蚀规律基本一致,但其风蚀量明显高于含砾石土鼠丘($p < 0.05$)。

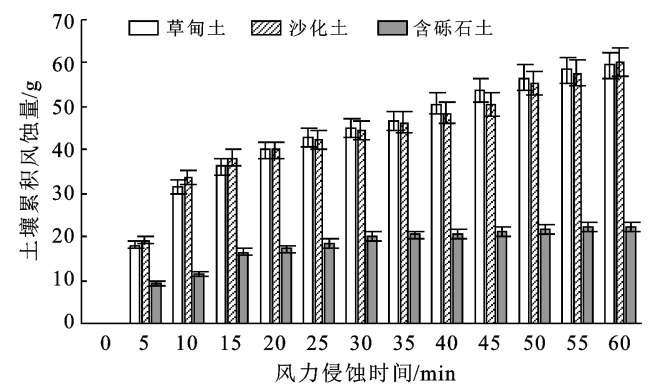


图 4 在 9 m/s 风速下高原鼠兔中等鼠丘土壤风蚀量随风蚀时间的关系

2.2 高原鼢鼠鼠丘风蚀量与风速的关系

由图 5 可知,3 种不同土壤质地高原鼢鼠鼠丘土壤风蚀量随风速的增加也呈先慢后快的变化趋势,在流失总量上也与高原鼠兔鼠丘相同,即,沙化土鼠丘

> 草甸土鼠丘 > 含砾石土鼠丘。对于高压鼢鼠鼠丘而言,当风速小于 9 m/s 时,草甸土小鼠丘土壤风蚀量略高于沙化土鼠丘,当风速大于 9 m/s 时,沙化土小鼠丘土壤风蚀量显著大于草甸土小鼠丘鼠丘。当风速达到 15 m/s 时,沙化土小鼠丘土壤风蚀量达到了草甸土小鼠丘流失量的 1.56 倍,含砾石土小鼠丘除 3 m/s 的风速下流失量高于沙化土小鼠丘外,其余流失量均低于同等条件下其他两种鼠丘。沙化土中鼠丘除 3 m/s 的风速下流失量低于草甸土中鼠丘外,其余流失量均大于同等条件的其他两种鼢鼠。在风速为 15 m/s 时,沙化土中土壤风蚀量分别是草甸土中鼠丘和含砾石土中鼠丘的 1.63, 2.39 倍。当风速大于 7.5 m/s 时,3 种土壤质地的中鼠丘土壤风蚀量均会随风速增加快速地增加,其增加幅度为沙化土鼠丘最大,含砾石土鼠丘增加幅度最小。对不同大小和不同土壤质地的高原鼢鼠鼠丘风蚀量与风速大小增长关系的统计分析得出,当风速小于 6 m/s 时,风速的增加不会显著增加高原鼢鼠鼠丘土壤的风蚀量 ($p > 0.05$),当风速在 6~9 m/s 之间时,风速的增加会显著增加高原鼢鼠鼠丘土壤的风蚀量 ($p < 0.05$),当风速大于 9 m/s 时,高原鼢鼠鼠丘土壤的风蚀量的增加随风速的增加极显著 ($p < 0.01$)。

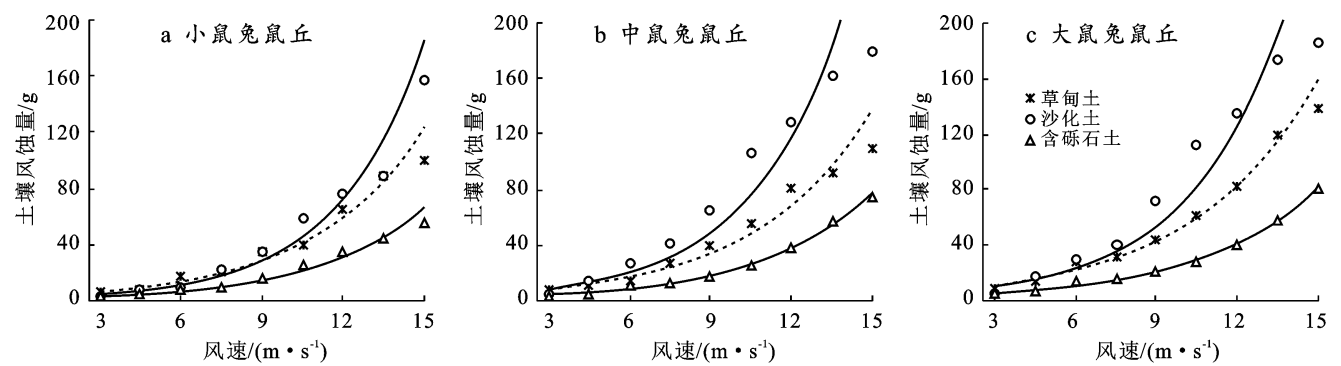


图 5 高原鼢鼠 3 种鼠丘不同质地土壤风蚀量随风速的变化规律

由高原鼯鼠鼠丘土壤风蚀量与风速的拟合关系可知,高原鼯鼠鼠丘与高原鼠兔鼠丘具有相似的规律,草甸土和含砾石土土壤风蚀量与风速大小间呈指数函数关系,沙化土鼠丘土壤风蚀量与风速间呈幂函数关系,拟合度均在 0.97 以上(表 3)。

表 3 高原鼯鼠 3 种鼠丘土壤风蚀量与风速的拟合关系		
鼠丘类型	拟合公式	R^2
草甸土小鼠丘	$Q=3.216\ 2e^{0.243\ 1V}$	0.980 4
沙化土小鼠丘	$Q=0.182\ 4V^{2.420\ 4}$	0.985 4
含砾石土小鼠丘	$Q=1.508\ 9e^{0.252\ 7V}$	0.987 1
草甸土中鼠丘	$Q=4.255\ 6e^{0.231\ 8V}$	0.975 5
沙化土中鼠丘	$Q=0.384\ 4V^{2.328\ 2}$	0.993 5
含砾石土中鼠丘	$Q=2.053\ 3e^{0.242\ 3V}$	0.985 5
草甸土大鼠丘	$Q=5.795\ 7e^{0.221\ 0V}$	0.981 0
沙化土大鼠丘	$Q=0.523\ 3V^{2.227\ 0}$	0.990 3
含砾石土大鼠丘	$Q=2.710\ 3e^{0.227\ 3V}$	0.984 5

研究结果表明,当风速为 15 m/s 时高原鼯鼠沙化土小鼠丘的土壤风蚀量分别是草甸土和含砾石土小鼠丘的 1.56,2.84 倍,中鼠丘分别是草甸土和含砾石土鼠丘的 1.63,2.39 倍,大鼠丘分别是草甸土和含砾石土大鼠丘的 1.34,2.32 倍(图 6)。风速对土壤风蚀量的影响也较大,如风速从 9 m/s 增加到 15 m/s 时,草甸土大、中、小鼠丘土壤风蚀量分别增加 3.15,2.74,2.94 倍,沙化土大、中、小鼠丘土壤风蚀量分别增加 2.57,2.78,4.52 倍,含砾石土大、中、小鼠丘土壤风蚀量分别增加 3.91,4.48,3.48 倍。总体风蚀特征与高原鼠兔鼠丘类似,即土壤质地类型间的土壤风蚀量差异显著,且土壤风蚀量与风速和鼠丘大小之间呈正相关。统计分析结果表明,在风速为 9 m/s 和 15 m/s 的情况下,与高原鼠兔鼠丘一致,高原鼯鼠沙化土鼠丘土壤风蚀量与草甸土鼠丘土壤风蚀量差异性显著($p<0.05$),与含砾石土鼠丘土壤风蚀量差异性极显著($p<0.01$)。

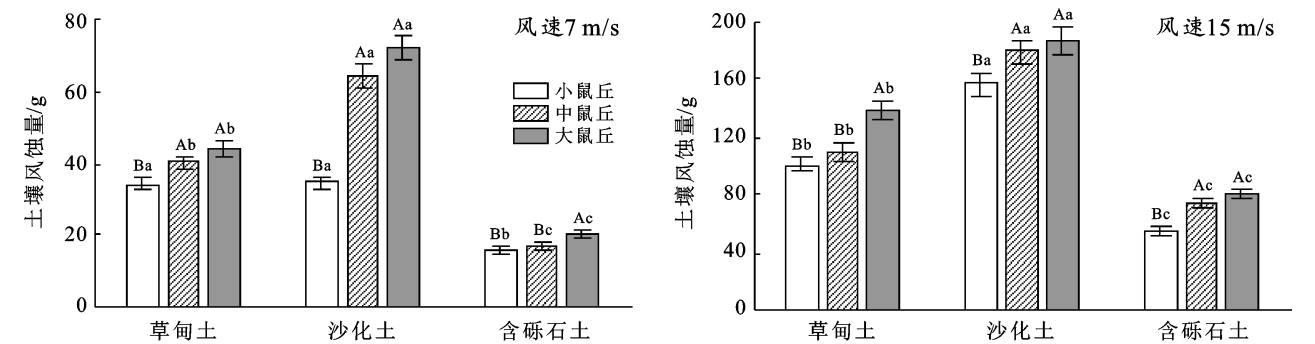


图 6 高原鼯鼠不同大小鼠丘不同质地土壤风蚀量的对比

高原鼯鼠 3 种土壤质地鼠丘土壤风蚀量随风蚀时间的变化规律也与高原鼠兔鼠丘相似,以风速 9 m/s 时的高原鼯鼠中等鼠丘为例(图 7)。

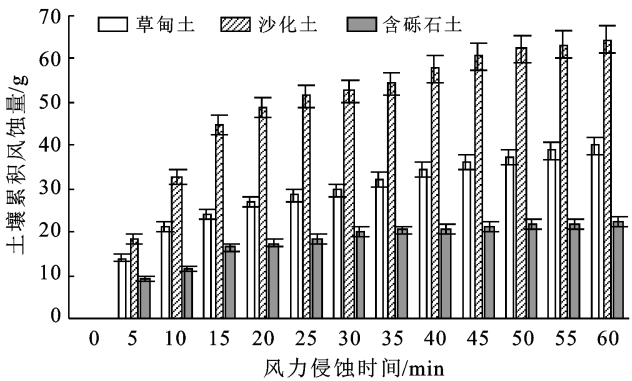


图 7 在 9 m/s 风速下高原鼯鼠中等鼠丘不同质地土壤风蚀量随风蚀时间的关系

高原鼯鼠 3 种类型的鼠丘间以及与高原鼠兔鼠丘土壤风蚀量的变化规律基本相似,均表现出土壤风

蚀量先快后慢的变化趋势即风蚀,即前 15 min 为土壤风率的敏感期,3 种土壤质地鼠丘土壤风蚀量的大小依次为:沙化土鼠丘>草甸土鼠丘>含砾石土鼠丘。

2.3 两种鼠丘土壤风蚀量和风蚀规律的对比
同等条件下,高原鼯鼠鼠丘土壤风蚀量随风速的变化规律与高原鼠兔鼠丘的类似,2 种鼠丘土壤风蚀量大小上存在一定的差异。对于草甸土和含砾石土的鼠丘来说,高原鼠兔鼠丘的流失量一般要大于高原鼯鼠鼠丘的风蚀量,而对于沙化土鼠丘,高原鼯鼠土壤的风蚀量明显大于高原鼠兔鼠丘的土壤风蚀量,如当风速 15 m/s 时草甸土高原鼠兔鼠丘土壤风蚀量是草甸土高原鼯鼠鼠丘土壤风蚀量的 1.11~1.21 倍,含砾石土高原鼠兔鼠丘土壤风蚀量是含砾石土高原鼯鼠鼠丘土壤风蚀量的 1.03~1.10 倍,沙化土高原鼯鼠鼠丘土壤风蚀量是含砾石土高原鼠兔鼠丘土壤风蚀量的 1.02~1.08 倍(图 8)。分析认为,对于草甸土和

含砾石土来说,高原鼠兔活动对土壤结构的破坏更为严重,因此流失量略大于高原鼢鼠鼠丘;对于沙化土来说,由于其土质松散,颗粒间的黏结性较差,但是高

原鼢鼠鼠丘土壤的堆积量相对较大,因此此类鼠丘土壤的风蚀量表现出高原鼢鼠鼠丘略大于高原鼠兔鼠丘。

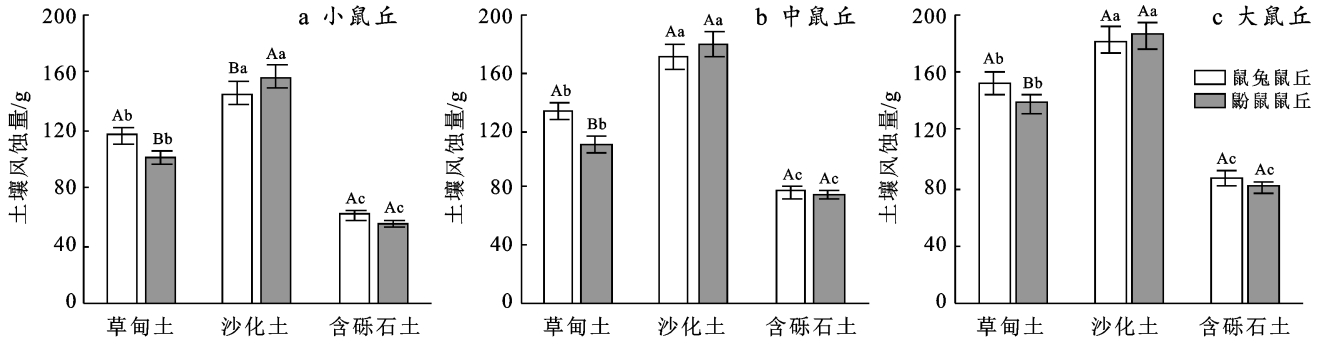


图 8 在 15 m/s 风速下 2 种鼠丘不同质地土壤风蚀量的对比

2.4 鼠丘土壤风蚀物颗粒组成

根据 FAO/USDA 分类系统,将土壤颗粒有效球面直径 $>50\text{ }\mu\text{m}$ 、 $50\sim2\text{ }\mu\text{m}$ 和 $<2\text{ }\mu\text{m}$ 的分别划分为砂粒、粉粒和黏粒^[38]。从被吹蚀土壤颗粒的粒径组成分析结果可知,含砾石土鼠丘和草甸土鼠丘土壤风蚀物颗粒组成相似,均以粉粒为主,砂粒次之,黏粒含量最少;沙化土鼠丘土壤风蚀物以砂粒为主,砂粒含量为 78.57%,约是含砾石土鼠丘和草甸土鼠丘砂粒含量的 3 倍,沙化土鼠丘土壤风蚀物黏粉粒含量较低(表 4)。3 种土壤质地的鼠丘不仅在风蚀量上存在差异,风蚀物颗粒组成也存在差异。

表 4 鼠丘土壤风蚀物不同粒级颗粒组成 %			
土壤质地	黏粒含量	粉粒含量	砂粒含量
含砾石土	9.96±0.63	62.92±0.49	27.12±0.41
草甸土	12.32±0.27	61.83±0.34	25.85±0.36
沙化土	2.17±0.16	19.26±0.57	78.57±0.45

注:表中数值为平均值±标准差。

3 讨论

(1) 不同鼠丘表面土壤风蚀量存在差异的原因。试验结果表明,影响鼠丘土壤风蚀量大小的因素有鼠丘种类、鼠丘大小以及组成鼠丘的土壤质地等,本研究中由于 2 种鼠类体型大小和生活习性的不同致使堆积的鼠丘形态、土壤重组结构以及对土壤团粒结构的破坏等存在明显差异性^[39],因此对土壤风蚀作用的影响也存在差异。野外调查发现,相比于地下活动的高原鼢鼠,高原鼠兔主要在地表在洞口或鼠丘周围活动,其体型较小,而且其爪子较小,在掘穴过程中对于土壤团聚体的破坏程度远大于高原鼢鼠,致使高原鼠兔堆积形成的鼠丘中土壤粗团聚体组成低于高原

鼢鼠鼠丘,因此高原鼠兔鼠丘土壤更易遭受风蚀作用。野外调查还发现,鼠丘越大时接受风蚀的表面积越大,易侵蚀的土壤细颗粒数量越多,因此土壤风蚀量也就越大。此外,与草甸土和含砾石土鼠丘相比,沙化土鼠丘中的细颗粒含量较少,当风速较小时土壤风蚀量小于其他两种鼠丘,但由于沙化土鼠丘土壤颗粒相对独立,结构松散干燥,当风速增加到 9 m/s 以上时,沙化土鼠丘土壤达到起沙风速的颗粒明显高于草甸土鼠丘和含砾石土鼠丘,因此其土壤风蚀量明显大于草甸土鼠丘和含砾石土鼠丘(见图 2 和图 5)。

(2) 影响鼠丘土壤风蚀的因素分析。小型啮齿动物在掘穴过程中土壤层原来的结构和物理力学特性发生了重大变化,因此鼠丘是受干扰的土壤颗粒及其团聚体与植被根系混合重组后形成的裸露土丘,是加剧土壤风蚀作用的特殊疏松土体^[37]。本研究种草甸土鼠丘来源于啮齿动物挖掘原生草甸层后堆积产生的土丘,土壤中根系含量较高,由此形成的根—土复合堆积体对抑制土壤风蚀发挥着重要的作用。其次,草甸土鼠丘土壤的黏粒和粉粒含量较高,且具有较好的储水能力,土壤含水量相对较高,从而对土壤风蚀也产生一定的抑制作用^[40]。此外,未退化草地养分含量较高^[41],而养分有助于颗粒形成土壤团聚体^[42]。如野外调查发现草甸土易形成大量的团聚体,即使在小型啮齿动物干扰,大部分土壤团聚体并未遭到破坏,由此将增加土壤的抗蚀性。对于含砾石土鼠丘而言,其表面分布大小不一的砾石,砾石的覆盖不仅降低了土壤的受风接触面,而且鼠丘表面可蚀土壤颗粒的比例较少,从而对土壤风蚀产生抑制作用^[43]。综合上述特征后分析认为,鼠丘土壤风蚀量不仅与风速有关,而且与土壤质地条件、啮齿动物活动习性及其对土壤团聚体的破坏和土壤重组特征等

均有密切关联。

(3) 3 种鼠丘土壤风蚀量随风速变化关系的差异分析。由于土壤团聚体、植被根系、水分或砾石等对风蚀的抑制作用,当风速较低时,草甸土和含砾石土鼠丘表面的土壤风蚀量相对较低,而当风速持续增加后,达到起沙风速的颗粒含量快速增多,即随着风速的增加,其鼠丘表面土壤风蚀量增加幅度先慢后快,因此草甸土鼠丘和含砾石土鼠丘土壤风蚀量与风速间呈指数函数的递增关系,这与王仁德^[14]、孙悦超等^[44]在农田和草地研究结果基本一致,草甸土鼠丘和含砾石土鼠丘均不可视为充足物源的侵蚀体。沙化土鼠丘分布在经长期风化后土壤沙化严重的区域,土壤中砂粒含量较高,颗粒间缺乏黏结性,多以单颗粒形式存在,水分蒸发作用强烈,储水能力较差,当风速略有增大时表面颗粒极易被吹蚀,这与沙漠风蚀相近。通过野外调查发现,在黄河源干燥的气候条件下,当表层的颗粒被吹蚀后裸露的颗粒仍会源源不断地继续遭受侵蚀作用,因此沙化土鼠丘的土壤风蚀随风速增大持续增强,可视为有充足物源的侵蚀体,因此沙化土鼠丘土壤风蚀量与风速间呈现幂函数关系。在物源充分情况下土壤颗粒流失量一般与风速的 3 次方成正比,在本研究中沙化土鼠丘土壤风蚀量随风速的 2.218 1~2.456 9 次方成正比,这也表明风蚀作用下沙化土鼠丘土壤流失严重,随着风速的增加,沙化土鼠丘土壤风蚀量的增加速度要明显大于草甸土鼠丘和含砾石土鼠丘。

4 结 论

(1) 草甸土和含砾石土鼠丘土壤风蚀量与风速间呈指数函数的正相关,砾石对土壤风蚀的抑制作用明显。草甸土鼠丘土壤和含砾石土鼠丘土壤在侵蚀过程中并不能视为有充足物源的侵蚀体,在侵蚀的过程中随着侵蚀程度不断加深,侵蚀难度也在不断地增加。

(2) 沙化土鼠丘土壤草流失量随风速梯度呈现幂函数关系,土壤风蚀量与风速的 2.218 1~2.456 9 次方成正比,沙化土鼠丘土壤可视为有充足物源的侵蚀体,当风速超过 7.5 m/s 时,沙化土鼠丘土壤风蚀量最大。

(3) 高原鼠兔鼠丘和高原鼯鼠鼠丘在同等条件下仅在流失量存在差距,除沙化土鼠丘外,高原鼠兔鼠丘土壤风蚀量大于高原鼯鼠鼠丘,鼠丘土壤风蚀率随着风速的增加幅度较大,同等风速下鼠丘土壤风蚀率随风蚀时间的增加呈现先快后慢的趋势。

(4) 被吹蚀的鼠丘土壤风蚀颗粒粒径组成特征

与鼠丘土壤质地类型有关,其中草甸土和含砾石土鼠丘土壤风蚀颗粒以粉粒为主,而沙化土鼠丘土壤风蚀颗粒以砂粒为主,这与组成鼠丘的土壤质地有关。

[参 考 文 献]

- [1] 南岭,杜灵通,展秀丽.土壤风蚀可蚀性研究进展[J].土壤,2014,46(2):204-211.
- [2] 刘艳萍,刘铁文,邢恩德.内蒙古乌兰察布荒漠草原土壤风力侵蚀机理研究[J].安徽农业科学,2010,38(12):6362-6364.
- [3] Zhang Chunlai, Li Qiang, Shen Yaping, et al. Monitoring of aeolian desertification on the Qinghai-Tibet Plateau from the 1970s to 2015 using Landsat images [J]. Science of the Total Environment, 2018,619:1648-1659.
- [4] Teng Yanmin, Zhan Jinyan, Liu Wen, et al. Spatiotemporal dynamics and drivers of wind erosion on the Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. Ecological Indicators, 2021, 123: 1-12.
- [5] 刘斌涛,陶和平,史展,等.青藏高原土壤可蚀性 K 值的空间分布特征[J].水土保持通报,2014,34(4):11-16.
- [6] 张春来,宋长青,王振亭,等.土壤风蚀过程研究回顾与展望[J].地球科学进展,2018,33(1):27-41.
- [7] 丁延龙,蒙仲举,高永,等.荒漠草原风蚀地表颗粒空间异质特征[J].水土保持通报,2016,36(2):59-64.
- [8] 袁晓宇,海春兴,刘广通.阴山北麓不同用地土壤有机质含量对抗风蚀的作用研究[J].水土保持研究,2007,14(6):302-304.
- [9] 翟子宁,苏备.土壤可蚀性研究进展[J].土壤通报,2016,47(1):253-256.
- [10] 高广磊,殷小琳,丁国栋,等.土壤风蚀可蚀性研究进展评述[J].中国水土保持科学(中英文),2022,20(1):143-150.
- [11] Sirjanian E, Samenia A, Moosavia A A, et al. Portable wind tunnel experiments to study soil erosion by wind and its link to soil properties in the Fars Province, Iran [J]. Geoderma, 2018,333:69-80.
- [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, 2021,114:1-22.
- [13] 邹学勇,张春来,程宏,等.土壤风蚀模型中的影响因子分类与表达[J].地球科学进展,2014,29(8):875-889.
- [14] 王仁德,肖登攀,常春平,等.农田风蚀量随风速的变化[J].中国沙漠,2015,35(5):1120-1127.
- [15] 荣姣凤,张海涛,毛宁.土壤风蚀量随风速的变化规律研究[J].干旱地区农业研究,2004,22(2):149-153.
- [16] 刘铁军,赵显波,赵爱国,等.东北黑土地土壤风蚀风洞模拟试验研究[J].水土保持学报,2013,27(2):67-70.

- [17] 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].水土保持学报,2015,22(6):331-334.
- [18] Li Xilai, Perry L W, Brierley G. Restoration prospects for Heitutan degraded grassland in the Sanjiangyuan [J]. Journal of Mountain Science, 2013,10(4):687-698.
- [19] 龙瑞军,董世魁,胡自治.西部草地退化的原因分析与生态恢复措施探讨[J].草原与草坪,2005(6):3-7.
- [20] Chen Baoxiong, Zhang Xianzhou, Tao Jian, et al. The impact of climate change and anthropogenic activities on alpine grassland over the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2014,189:11-18.
- [21] 谢胜波,屈建军,韩庆杰.青藏高原冻融风蚀形成机理的试验研究[J].水土保持通报,2012,32(2):64-68.
- [22] 吴成永,陈克龙,曹广超,等.近30年来青海省风蚀气候侵蚀力时空差异及驱动力分析[J].地理研究,2018,37(4):717-730.
- [23] 李庆,张春来,周娜,等.青藏高原沙漠化土地空间分布及区划[J].中国沙漠,2018,38(4):690-700.
- [24] 刘蓉,苏志珠,马义娟,等.晋西北沙化土地粒度特征及其可蚀性研究[J].水土保持通报,2018,38(6):1-8.
- [25] 安志山,史博源,谭立海,等.玛曲高寒草甸风沙环境与沙化类型研究[J].干旱区研究,2021,38(4):1058-1064.
- [26] Wang Xunming, Lang Lili, Yan Ping, et al. Aeolian processes and their effect on sandy desertification of the Qinghai-Tibet Plateau: A wind tunnel experiment [J]. Soil & Tillage Research, 2016,158:67-75.
- [27] 吴喜芳,李改欣,潘学鹏,等.黄河源区植被覆盖度对气温和降水的响应研究[J].资源科学,2015,37(3):512-521.
- [28] 张兴禄,李广.高原鼠兔和高原鼢鼠在高寒草甸生态系统的作用[J].草业科学,2015,32(5):816-822.
- [29] 陈同德,焦菊英,王颢霖,等.青藏高原土壤侵蚀研究进展[J].土壤学报,2020,57(3):547-564.
- [30] Bardgett D, Bullock M, Lavorel S, et al. Combatting global grassland degradation [J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2021,10(2):720-735.
- [31] 徐田伟,赵新全,耿远月,等.黄河源区生态保护与草牧业发展关键技术及优化模式[J].资源科学,2020,42(3):508-516.
- [32] Li Guorong, Li Xilai, Li Jinfang, 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):1-16.
- [33] Chen Jianjun, Yi Shuhua, Qin Yu. The contribution of plateau pika disturbance and erosion on patchy alpine grassland soil on the Qinghai-Tibetan Plateau: Implications for grassland restoration [J]. Geoderma, 2017, 297:1-9.
- [34] 冯筱,屈建军,范庆斌,等.鼠兔(*Ochotona curzoniae*)洞穴堆积体对草地沙化的影响及防治[J].中国沙漠,2020,40(3):168-176.
- [35] 谈静,才文代吉,王海春,等.青藏高原高寒草甸鼠丘剥蚀特征及影响因素[J].中国草地学报,2020,42(1):147-153.
- [36] 马素洁,周建伟,王福成,等.高寒草甸区高原鼢鼠新生土丘水土流失特征[J].水土保持学报,2019,33(2):110-114.
- [37] 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.
- [38] 曹樱子,王小丹.藏北高寒草原土壤粒径分布分形维数特征[J].山地学报,2014,32(4):438-443.
- [39] 张兴禄,李广.高原鼠兔和高原鼢鼠在高寒草甸生态系统的作用[J].草业科学,2015,32(5):816-822.
- [40] 陈银萍,曹雯婕,余沛东,等.土壤含水率对风沙流结构及风蚀量的影响[J].中国沙漠,2021,41(2):173-182.
- [41] 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.
- [42] 张玉琪,吴玉鑫,李强,等.东祁连山不同退化程度高寒草甸土壤氮素与团聚体特征及关系研究[J].草地学报,2021,29(10):2286-2293.
- [43] Li Huiru, Zou Xueyong, Zhang Chunlai, et al. Effects of gravel cover on the near-surface airflow field and soil wind erosion [J]. Soil & Tillage Research, 2021,214:1-13.
- [44] 孙悦超,麻硕士,陈智,等.阴山北麓干旱半干旱区地表土壤风蚀测试与分析[J].农业工程学报,2007,23(12):1-5.