

黄河源区高寒退化草地鼠丘对土壤风蚀作用的影响

翟辉¹, 李国荣^{1,2}, 李进芳¹, 朱海丽^{1,2}, 赵健赞^{1,2}, 刘亚斌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:为阐明高寒草地鼠丘土壤风蚀特征和规律,以青海省河南县退化草地区域内的鼠丘为研究对象,采用野外人工模拟风力侵蚀试验方法,对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作用的影响进行了研究。结果表明:高寒草地鼠丘土壤的风蚀量随着风速的增加而增加,风速从 6 m/s 逐步增加到 12 m/s 时,鼠丘土壤流失量增加 1.22~1.79 倍,且土壤流失量与风速和鼠丘大小呈正比。同等条件下,鼠丘形状不同时其土壤风蚀量也不同,3 种类型的鼠丘土壤风蚀量的大小依次为半球型>凸凹型>平缓型,其中半球型鼠丘土壤流失量比凸凹型和平缓型鼠丘分别增加了 35.5%,92.6%,且侵蚀前 5 min 是土壤风蚀速率最敏感的时期。土壤流失量随植被根系和土壤含水量的增加而减小,说明鼠丘内的植被根系以及土壤含水量对土壤风蚀量具有抑制作用,是鼠丘土壤风蚀的重要抗蚀因子。

关键词:黄河源区; 高寒草地; 鼠丘; 土壤风蚀; 土壤流失量

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)06-0014-07

Effects of Rodent mounds on Soil Wind Erosion in Alpine Degraded Grassland of the Yellow River Source Zone

ZHAI Hui¹, LI Guorong^{1,2}, LI Jinfang¹, ZHU Haili^{1,2},
ZHAO Jianyun^{1,2}, LIU Yabin¹, HU Xiasong^{1,2}

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

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

Abstract: In order to clarify the characteristics and rules of rodent mound soil under wind erosion in alpine grasslands of the Yellow River Source Zone, the rodent mounds in the degraded grasslands area of Henan County in Qinghai Province was taken as the research object. The effects of the wind on the size, shape, soil water content and root content due to wind erosion on rodent mound soil under different wind speeds were carried out by field artificial simulated wind erosion tests. The results showed that the amount of soil wind erosion increased with the increase of wind speed on rodent mounds in alpine grasslands. The amount of soil loss was proportional to wind speed and the size of the rodent mound, and it increased 1.22~1.79 times when wind speed gradually increased from 6 m/s to 12 m/s. The amount of soil loss and the amount of soil wind erosion is different with the shape of rodent mounds under the same conditions. The degree of wind erosion on each of the three shapes of rodent mounds is in the order of hemispherical shape>concave-convex shape>flat shape, and the amount of soil loss of the hemispherical mounds was 35.5% and 92.6% higher than that of the concave-convex mounds and flat mounds respectively. The most sensitive period of the soil wind erosion rate on rodent mounds is the first 5 minutes. The amount of soil loss decreased with the increase of vegetation roots and soil water content, which indicates that these factors have an inhibitory effect on the amount of soil wind erosion, and they are important anti-erosion factors of the rodent mounds.

Keywords: Yellow River source zone; alpine grassland; rodent mound; soil-wind erosion; soil loss

收稿日期:2021-11-09

修回日期:2021-12-07

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(41662023,42161068)

第一作者:翟辉(1997—),男,河南永城人,硕士研究生,研究方向为地质灾害及其防治。E-mail:1838334135@qq.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

黄河源区位于青藏高原东北部,是我国重要的水资源涵养区,生态地位极其重要^[1-2]。由于该区域独特的地理位置及生态环境特点,在诸多因素的综合影响下高寒草地发生了不同程度的退化^[3-4]。目前造成黄河源区高寒草地退化的原因主要包括气候因素以及放牧和啮齿类动物活动,其中以高原鼠兔(*Ochotona curzoniae*)和高原鼢鼠(*Eospalax baileyi*)为主的小型啮齿动物活动是造成草地退化最主要的原因^[5-6]。啮齿动物掘穴造丘活动改变了原生草地的土壤理化性质,并在地表堆积形成大量的松散鼠丘^[7]。风力是导致高寒草地退化的重要侵蚀动力^[8-9],在长期的风蚀作用中,啮齿动物活动以及产生的大量鼠丘在草地退化过程中发挥着重要的作用,鼠类不仅啃食草根直接破坏植被,而且使地表植被因鼠丘土壤的掩埋而死亡^[10],导致草地出现大量退化斑块^[11-13],大面积裸露的鼠丘土壤极易产生风蚀作用,从而加剧了草地退化。有关土壤风蚀研究方面,有学者指出影响土壤风蚀强度的因素主要有风力、植被盖度、土壤质地、土壤含水量、地形因素等^[14-17],且土壤抗蚀因子的不同导致土壤风蚀特征和规律也存在一定的差异^[18-21]。鼠丘作为高寒草地啮齿动物扰动形成的特殊堆积体,其在影响土壤风蚀强度方面存在特殊性。因此,研究鼠丘对土壤风蚀作用的影响,对于揭示高寒草地退化机理具有重要意义。

目前诸多学者针对草地退化区水土流失和植被恢复进行了研究^[22-26],也有学者针对高寒草地鼠丘特征及土壤侵蚀等进行调查和研究,如王红兰等^[27]研究认为鼠类活动使地表土壤保水能力降低,将对草地植被生长和水土流失产生影响。马素洁等^[28]对高原鼢鼠鼠丘水土流失特征进行研究,认为新生土丘属于次生裸地,容易导致水土流失。李国荣等^[29]分析不同风速梯度下鼠丘土壤风力侵蚀的基本特征和规律,并讨论了啮齿

动物活动对水土流失的影响。尽管诸多学者针对鼠丘土壤开展相关研究,但有关黄河源草地退化区不同鼠丘土壤的风蚀规律等的研究较少,尤其是在不同影响因素下鼠丘对土壤风蚀作用的影响方面有待深入研究。为此,本文以黄河源高寒草地小型啮齿动物活动堆积的鼠丘为研究对象,通过开展土壤风蚀原位模拟试验,重点分析不同风速下,鼠丘形状大小、植被根系及土壤含水量等抗蚀因子作用下鼠丘土壤的风蚀特征和规律,为揭示高寒草甸退化的成因机理以及草地植被恢复、生态环境改善等提供科学依据。

1 试验材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于青海省黄南州河南县,属黄河源高寒草甸区,地理位置为东经 101°47',北纬 34°44',区内海拔约 3 600 m。年均气温为 -1.3~1.6℃,年降雨量 597.1~615.5 mm^[30]。该地区每年 11 月至次年 4 月份为寒冷、干燥、多大风天气,最大风速达到 23.7 m/s^[31]。该地区地势复杂,气候恶劣,在诸多因素影响下原生草地出现大面积退化现象。该区域主要的啮齿动物类型为高原鼠兔和高原鼢鼠,啮齿动物强烈的掘穴活动使地表出现大量的鼠丘和洞穴。根据野外调查,同一区域内均分布着两种鼠丘,鼠丘平均密度可达 370 个/hm²,鼠洞平均密度可达 950 个/hm²,其中高原鼠兔因地表活动频繁而产生大量的鼠洞(图 1),且在部分鼠洞周围产生相对平缓或凹凸不平的鼠丘,其土壤颗粒较细小;高原鼢鼠主要在地下活动,其掘穴过程中在地表堆积形成半球型鼠丘(图 2),土壤颗粒相对较粗,其鼠洞在鼠丘底部。小型啮齿动物活动对草地造成极其严重的破坏现象,而且堆积形成了大量疏松鼠丘,从而加剧了干旱期土壤的风蚀作用,使该地区成为高寒草地典型的鼠丘土壤风蚀区域。



图 1 高原鼠兔活动产生的鼠洞



图 2 高原鼢鼠活动堆积的鼠丘

1.2 研究方法

在圈定的 300 m×300 m 的禁牧试验区,随机选取 100 个未结皮的鼠丘(高原鼯鼠和高原鼠兔堆积的鼠丘各 50 个),测量其高度、直径、鼠丘土壤含水量等,调查鼠丘外部形态特征及根系数量,然后采用人工模拟风蚀试验装置开展相应的试验。

人工模拟风蚀试验装置由风箱、风速调节器、蓄电池和数据线组成(图 3),该装置的风速范围为 3~18 m/s,共分 11 档风速(每差 1.5 m/s 为 1 档),迎风横截面积约 2 m²,风速误差约±0.3 m/s,可将鼠丘置于 2 mm 厚的风蚀盘(无边壁)中心进行吹蚀,并通过测定吹蚀前后风蚀盘上土壤的重量,以此获得土壤风蚀量。试验时风箱口与鼠丘距离为 50 cm,每个试验从风箱启动开始计时,每隔 5 min 测量其土壤流失量 1 次,每次试验吹蚀 60 min。为了避免天然风力对模拟试验的影响,试验时用挡风板阻隔干扰模拟风速的自然风。

(1) 不同鼠丘大小和形状的风蚀试验。根据反复调查,研究区分布的鼠丘外部形状大致可以分为半球型、平缓型和凸凹型(似“M”)3 种类型(图 4),平均直径为 35 cm,平均高度为 12 cm。为分析不同大小和形状的

鼠丘对土壤风蚀量的影响,根据野外调查结果,试验中鼠丘大小的选择分别设定为大(直径约 40 cm,高度 16 cm)、中(直径约 35 cm,高度 12 cm)、小(直径约 30 cm,高度 8 cm)3 种,在风蚀盘上模拟堆积上述 3 种形态大小的鼠丘,然后采用风蚀试验装置分别开展 3 级风速梯度的恒风试验。模拟风蚀试验中的风速等级设定为 6,9,12 m/s 共 3 个等级(据研究区气象站近 3 年季风期的风速监测结果设定),风蚀历时为 60 min,每级风速下的侵蚀试验均各重复 5 次。



图 3 野外人工模拟风蚀试验装置



A 半球型



B 平缓型



C 凸凹型(M型)

图 4 研究区鼠丘外部形状

(2) 不同鼠丘根系数量的风蚀试验。为调查鼠丘内植被根系的分布数量,将鼠丘土壤放入 2 mm 孔径的土壤筛,然后将鼠丘内的植被根系分离后统计数量(图 5),根据统计结果,在鼠丘中配备的根系数量分别设定为 200,400,600,800,1 000,1 200 根共 6 个处理,以直径 35 cm、高度 12 cm 的中等半球型鼠丘为例,对均匀混合植被根系的鼠丘进行恒定风速 9 m/s 的风蚀试验。为了使模拟鼠丘的土壤量相同,且便于对比植被根系对鼠丘土壤风蚀作用的影响,试验时将相同体积和重量的土壤按鼠丘形状模拟堆积在风蚀盘上进行试验。此外,模拟试验中在风蚀盘底部铺设表面相对粗糙的一块布(图 6),以模拟自然草地表面的粗糙度。

(3) 不同含水量条件下的风蚀试验。以直径 35 cm、高度 12 cm 的中等半球形鼠丘为例,将不同含水

量的天然鼠丘土壤放置在风蚀盘上,并在 9 m/s 风速条件下采用上述相同的方法开展恒风侵蚀试验。依据野外调查和统计,选择鼠丘土壤含水量的梯度为 0,3%,6%,9%,12%,15%,18%共 7 种,每种含水量的鼠丘各重复 3 次,重点测试含水量对鼠丘土壤风蚀作用的影响。

2 结果与分析

(1) 鼠丘大小对土壤风蚀的影响。试验结果表明,模拟鼠丘土壤的风蚀量随着风速的增加而逐步增加(图 7)。如在鼠丘大小相同的情况下,风速从 6 m/s 增加到 9 m/s 和 12 m/s 时,大鼠丘的土壤流失量分别增加了 1.22,1.86 倍,中等鼠丘的土壤流失量分别增加了 1.20,1.84 倍,小鼠丘的土壤流失量分别增加了 1.18,1.79 倍。此外,在风速相同的情况

下,鼠丘越大时土壤流失量越大,如风速 6 m/s 时,大鼠丘和中等鼠丘的流失量分别比小鼠丘增加 2.71, 1.70 倍,当风速增加到 9 m/s 时其流失量分别增加 1.85,2.78 倍,风速增加到 12 m/s 时其分别增加

1.91,2.95 倍。分析认为鼠丘越大时接触风蚀的表面积越大,而且细小颗粒的相对比例也增大,因此在同等条件下大鼠丘的土壤流失量随风速的增加而出现显著的增长趋势($p<0.05$)。



图 5 筛分法统计鼠丘内植被根系



图 6 鼠丘风蚀盘底部铺设的粗糙布

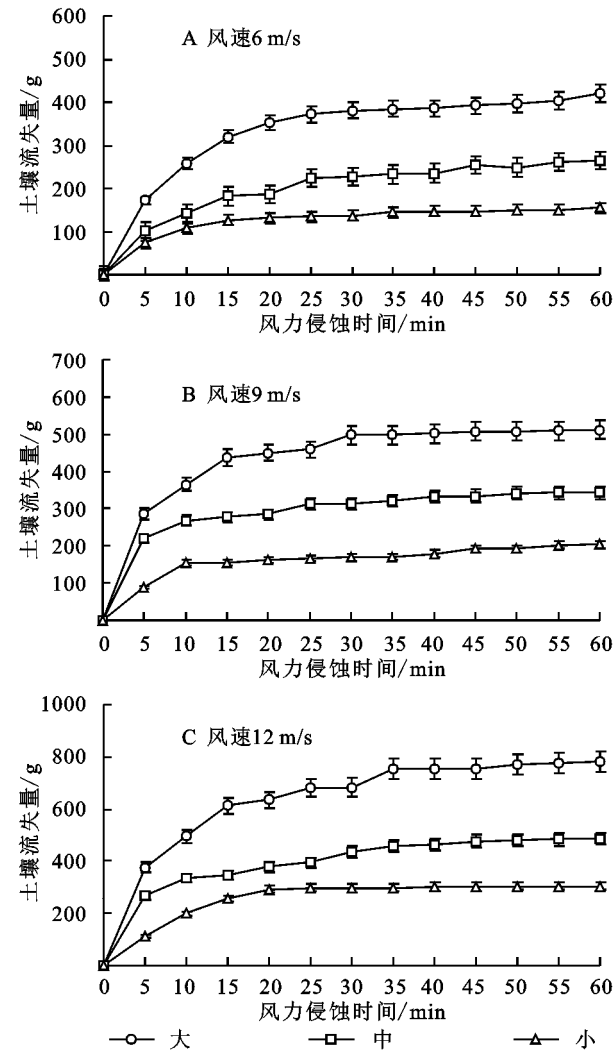


图 7 鼠丘大小与风蚀量的关系

(2) 鼠丘形状对土壤风蚀的影响。3 种不同形状的鼠丘在风力侵蚀作用下(风速 9 m/s),其土壤的流失量也存在显著差异($p<0.05$)。试验结果表明,啮齿动物堆积的鼠丘越高,鼠丘表面越平坦,土壤的

流失量就越大,即试验中 3 种鼠丘土壤风蚀量的大小依次为半球型>凸凹型>平缓型(图 8)。分析结果显示,经过 60 min 的恒风风蚀后,半球型的鼠丘表面的土壤流失量比凸凹型鼠丘增加 35.5%,比平缓型鼠丘增加 92.6%;凸凹型鼠丘土壤流失量比平缓型鼠丘增加 42.2%。图 9 是 3 种鼠丘表面土壤风蚀量随风蚀时间的变化规律,从图中也可以看出不同形状的鼠丘土壤风蚀作用在前 5 min 内较敏感,且土壤风蚀量随风蚀时间的增加而增大,分析认为这与鼠丘表面细小颗粒的瞬时流失有密切关系,即在风蚀作用下,细小颗粒在 5 min 内瞬间被吹蚀,鼠丘表面可被风运移的土壤颗粒急剧减小,导致风蚀初期流失量迅速增加,并随风力的持续吹蚀,流失量变化缓慢。

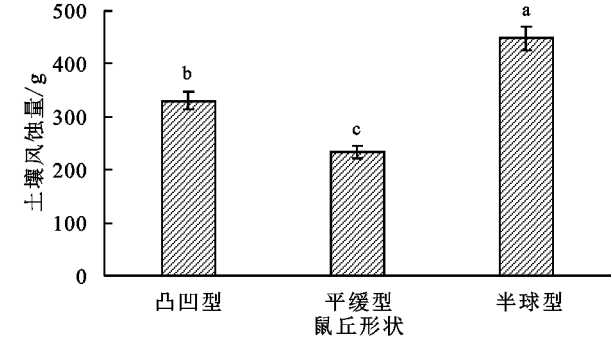


图 8 鼠丘形状与风蚀量的关系

(3) 鼠丘内根系数量对土壤风蚀的影响。鼠丘内植被根系数量的控制试验数据得出,土壤中的植被根系对土壤风蚀具有抑制作用,即根系越多,土壤流失量越小,如鼠丘中根系含量为 1 200 根时的土壤流失量比含根 200 条时减少近 66.51%(图 10)。图 11 既反映出土壤流失量随根系数量的增加而减小的变化规律,也反映出鼠丘土壤风蚀作用在前 5 min 内较敏感和土壤风蚀量随风蚀时间的增加而增大的特征。

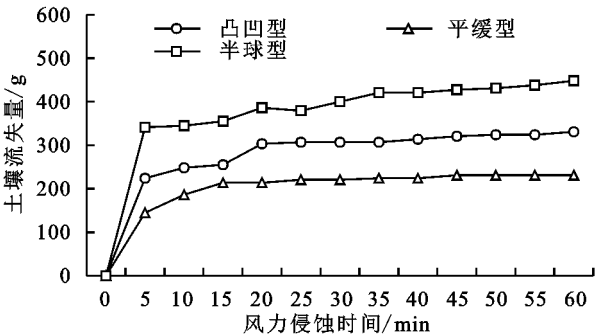


图 9 不同形状鼠丘土壤风蚀量随风蚀时间的变化规律

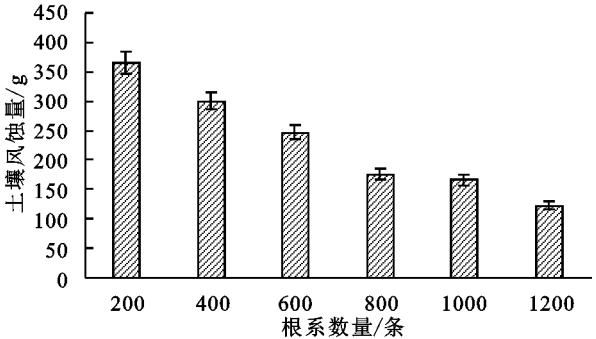


图 10 植被根系数量与风蚀量的关系

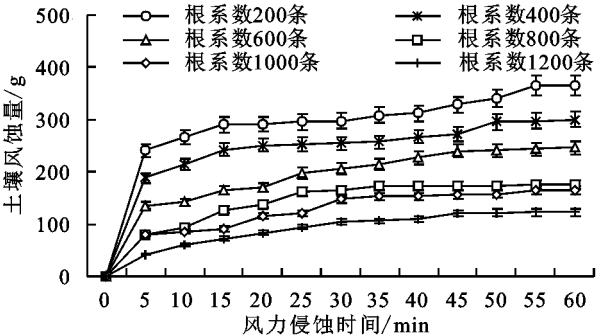


图 11 风蚀量随根系数量和侵蚀时间的变化规律

(4) 土壤含水量变化对土壤风蚀的影响。通过野外实地调查发现,土壤含水量对土壤风力侵蚀具有很强的抑制作用。当退化区产生降水后,土壤中的含水量急剧增加,地表将会出现大量的水力侵蚀作用,尽管风力侵蚀对水力侵蚀产生间接辅助作用,但此时几乎不存在风力对土壤流失的直接影响。模拟试验及数据分析结果表明,随着含水量的增加,土壤的风蚀量急剧降低(图 12—13),如干燥、松散的鼠丘在风速 9 m/s 时,吹蚀 60 min 后土壤流失量达 448.1 g,当含水量增加到 3%,6% 时,流失量减小到 342.6,214.3 g,其减小幅度分别为 23.6%,52.2%;当含水量为 9% 时,土壤流失量减小到 87.4g,其减小幅度为 80.5%;至含水量增加到 18% 时,土壤风蚀量仅为 8.4 g,减少幅度为 98.1%,而且此时流失的少量土壤颗粒是经过持续吹蚀后,土壤含水量降低所致。由图 13 可知,5 min 是土壤风蚀速率增长幅度最大的时期,因此土壤含水量是影响松散土壤区土壤颗粒流失的重要影响因素。

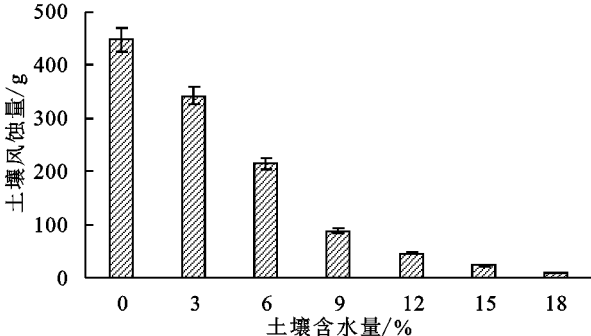


图 12 土壤风蚀量与土壤含水量的关系

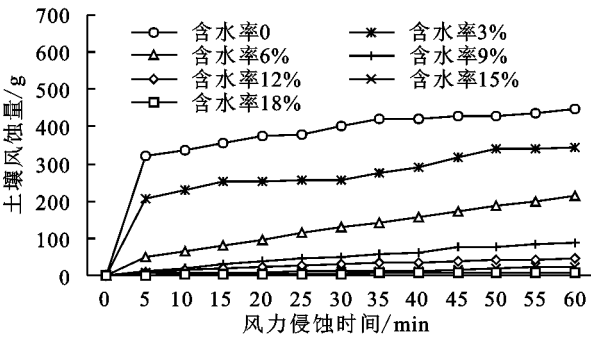


图 13 土壤风蚀量与风蚀时间的关系

3 讨论

为查明不同影响因素对鼠丘土壤风蚀的影响,在前期试验中重点对不同风速、鼠丘形态大小、根系数量和含水量等因素进行了分别探究。为分析上述因素对鼠丘土壤风蚀强度的影响程度,采用灰色关联分析法进行了统计分析^[32-33]。分析结果表明,鼠丘大小和风速与土壤流失量的关系最密切,其关联度分别是 0.864,0.849,其次是土壤含水量,其关联度为 0.805,含根量与土壤风蚀量的关联度相对较小,其关联度为 0.722(表 1),上述分析结果说明风速和鼠丘大小的变化对鼠丘土壤风蚀作用的影响程度较大,结合野外调查和试验结果,风速和鼠丘大小是鼠丘土壤风蚀作用的促进因素,且鼠丘大小对土壤风蚀量的影响略大于风速,含水量和含根量对土壤流失量具有一定的抑制因素,其中含根量的抑制作用略小于土壤含水量,分析认为尽管根系经啮齿动物啃咬后破坏了原来根-土复合体的整体性,但在风蚀作用中根系依然发挥重要的抑制作用。

表 1 风蚀强度因子贡献度分析

风蚀因子	风速	形态大小	含水量	含根量
关联度	0.849	0.864	0.805	0.722

鼠丘是受啮齿类动物强烈的机械扰动形成的,土壤具有其特殊性和复杂性,这也就决定了影响鼠丘土壤风蚀因素的多元性和复杂性。为便于定量分析不同因素对鼠丘土壤风蚀作用的影响,在风蚀试验中针对不同影响因素下鼠丘土壤风蚀特征进行了独立的

控制试验,然而在野外鼠丘土壤风蚀有可能受多种因素的影响,为深入分析多因素综合作用及各因素间的相互作用和相互制约等对高寒草地鼠丘土壤风蚀的影响,则需要设计更加细致的综合性试验方案和长期监测。此外,此次试验中涉及高原鼠兔和高原鼢鼠2种小型啮齿类动物活动堆积的鼠丘,由于动物类型和生活习性不同致使鼠丘形态、内部结构以及土壤颗粒等存在差异性,其对土壤风蚀作用的影响也存在一定的差异,如不同鼠丘间土壤风蚀强度差异、流失土壤的粒径范围及其运移规律、风速和风向变化与鼠丘土壤流失的关系、鼠丘长期堆积对植被及其草地退化的影响等,将是今后有待深入研究的科学问题。

经实地调查,降水对土壤侵蚀的抑制作用比较明显,而且降雨后随着水分的蒸发,鼠丘表面在短时间内将会形成机械结皮,其对鼠丘土壤风蚀产生极大的抗蚀作用。此外,野外调查还发现,经过长期风蚀作用后天然鼠丘表面相对细小的土壤颗粒急剧减少,即不同时间段形成的鼠丘土壤具有较为明显的差异性,这也是本研究中选择新鲜的、未结皮的鼠丘土壤进行模拟试验的重要原因。

4 结论

(1) 高寒草地鼠丘土壤的风蚀量不仅与风速有关,也与鼠丘大小和形状有密切关联。鼠丘土壤的风蚀量随着风速的增加而逐步增加,风速从6 m/s逐步增加12 m/s时,大鼠丘土壤流失量增加了1.86倍,小鼠丘增加了1.79倍。风速6 m/s时,与小鼠丘相比,大鼠丘和中鼠丘的土壤流失量分别增加了2.71,1.70倍,风速增加到9 m/s时其分别增加1.85,2.78倍,风速增加到12 m/s时其分别增加1.91,2.95倍,表现出鼠丘大小与土壤流失量呈正比例关系。

(2) 鼠丘形状是土壤风蚀作用的影响因素,同等条件下3种不同形状的鼠丘土壤风蚀量大小依次为半球型>凸凹型>平缓型,其中半球型鼠丘土壤流失量比凸凹型和平缓型鼠丘分别增加了35.5%,92.6%,且风力作用的前5 min是土壤风蚀速的敏感期。

(3) 鼠丘土壤中的植被根系数量和土壤含水量均对土壤风蚀作用具有明显的抑制作用。根系1200根时的土壤流失量比含根200根时减少近66.51%;当土壤含水量从0逐步增加到18%时,鼠丘表面的土壤流失量降低23.6%~98.1%。根系数量和土壤含水量与土壤风蚀量呈反比,说明啮齿动物活动堆积形成的鼠丘,其中的植被根系数量和土壤含水量均是土壤风蚀的重要抗蚀性因子。

参考文献:

- [1] Sills J, Liu J, Milne R I, et al. Protect Third Pole's fragile ecosystem[J]. Science, 2018,362:1368.
- [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: 72-80.
- [3] Brierly G, Li X L. Geomorphology and environmental management of the Yellow River source zone[J]. Journal of Mountain Science, 2013,10(4):628-631.
- [4] 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, 2020,187:1-9.
- [5] Bardgett D, Bullock M, Sandra L, et al. Combatting global grassland degradation[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2021,2(10):720-735.
- [6] Chen J J, Yi S H, Qin Y. 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Guo Z L, Huang N, Dong Z B, et al. Wind erosion induced soil degradation in Northern China: Status, measures and perspective[J]. Sustainability, 2014,6(12):8951-8966.
- [10] 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.
- [11] Li X L, Perry G L W, Brierley G, et al. Quantitative assessment of degradation classifications for degraded alpine meadows (heitutan), Sanjiangyuan, Western China[J]. Land Degrad. Dev., 2014,25(5):417-427.
- [12] Wu R X, Chai Q, Zhang J Q. Impacts of burrows and mounds formed by plateau rodents on plant species diversity on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. the Rangeland Journal, 2015,37:117-123.
- [13] Pang X P, Guo Z G. Plateau pika disturbances alter plant productivity and soil nutrients in alpine meadows of the Qinghai-Tibetan Plateau, China[J]. the Rangeland Journal, 2017,39:133-144.
- [14] 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.
- [15] 尚润阳,祁有祥,赵廷宁,等.植被对风及土壤风蚀影响的野外观测研究[J].水土保持研究,2006,13(4):37-39.
- [16] 毛蓉,孟广涛,周跃.植物根系对土壤侵蚀控制机理的

- 研究[J].水土保持研究,2006,13(2):241-243.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 宗玉梅,俎瑞平,王睿,等.库布齐沙漠含水率对风沙运动影响的风洞模拟[J].水土保持学报,2016,30(6):61-66.
- [20] Meng Z J, Dang X H, Gao Y, et al. Interactive effects of wind speed, vegetation coverage and soil moisture in controlling wind erosion in a temperate desert steppe, Inner Mongolia of China[J]. Journal of Arid Land, 2018,10(4):534-547.
- [21] 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.
- [22] Li X L, Perry G L W, Brierley G, et al. Restoration prospects for Heitutan degraded grassland in the San-jiangyuan[J]. Journal of Mountain Science, 2013,10: 687-698.
- [23] 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.
- [24] 魏卫东,李希来.三江源区高寒草甸退化草地土壤侵蚀模型与模拟研究[J].环境科学与管理,2013,38(7):26-30.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 王红兰,蒋舜媛,崔俊芳,等.不同形成时间鼢鼠鼠丘土壤水力学性质的对比[J].水土保持学报,2018,32(3): 180-184,190.
- [28] 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(5):58-63.
- [29] 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.
- [30] 陆阿飞.三江源区河南县草地植被退化状况及解决措施[J].青海畜牧兽医杂志,2014,44(6):57-58.
- [31] 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.
- [32] 田民,刘思峰,卜志坤.灰色关联度算法模型的研究综述[J].统计与决策,2008(1):24-27.
- [33] 张和平,解晓龙.基于灰色关联度的组合优化模型研究[J].统计与决策,2019,35(9):19-23.

~~~~~

(上接第13页)

- [16] Chen L D, Lu Y H, Fu B J, et al. A framework on landscape pattern analysis and scale change by using pattern recognition approach [J]. Acta Ecologica Sinica, 2006,26(3):663-670.
- [17] 宋小龙,米文宝,李陇堂,等.宁夏旅游经济与生态环境耦合协调过程与格局[J].中国沙漠,2021,41(5):1-10.
- [18] 谢余初,巩杰,赵彩霞.甘肃白龙江流域水土流失的景观生态风险评价[J].生态学报,2014,33(3):702-708.
- [19] 中华人民共和国水利部.土壤侵蚀分类分级标准 SL190—2007[S].北京:中国水利水电出版社,2008.
- [20] 章文波,付金生.不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力[J].资源科学,2003(1):35-41.
- [21] Chen T, Niu R Q, Li P X, et al. Regional soil erosion risk mapping using RUSLE, GIS, and remote sensing: A case study in Miyun Watershed, North China [J]. Environmental Earth Sciences, 2011,63:533-541.
- [22] 田浩,刘琳,张正勇,等.天山北坡经济带关键性生态空间评价[J].生态学报,2021,41(1):401-414.
- [23] 康紫薇,张正勇,位宏,等.基于土地利用变化的玛纳斯河流域景观生态风险评价[J].生态学报,2020,40(18):6472-6485.
- [24] 刘春艳,张科,刘吉平.1976—2013年三江平原景观生态风险变化及驱动力[J].生态学报,2018,38(11): 3729-3740.
- [25] 何君,李月臣,朱康文,等.重庆市土壤侵蚀敏感性时空分异特征研究[J].重庆师范大学学报:自然科学版,2016,33(6):45-53.
- [26] 莫建飞,陈燕丽,莫伟华.岩溶生态系统水土流失敏感性关键指标和评估模型比较[J].水土保持研究,2021,28(2):256-266.
- [27] 冉涛,邓伟.北方生态脆弱区土壤侵蚀敏感性空间分异[J].水土保持研究,2017,24(4):182-186,190.