

黄河源高寒草甸高原鼠兔土丘的土壤风力侵蚀规律

李国荣^{1,2}, 李希来^{3,4}, 李进芳^{1,2}, 朱海丽^{1,2},
陈文婷^{1,2}, 赵健赟^{1,2}, 胡夏嵩¹, 崔云鹏¹, 李存良¹

(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; 4. 中国科学院西北高原生物研究所青海省寒区恢复生态学重点实验室, 西宁 810008)

摘要: 为阐明高寒草甸退化区土壤风力侵蚀作用及土壤流失规律, 以青海省河南县退化高寒草甸高原鼠兔土丘为研究对象, 通过开展野外人工模拟风蚀试验, 对不同风速下鼠丘土壤流失量及其养分流失规律进行分析和讨论。结果表明: (1) 风蚀作用下土壤流失量均呈先快后慢的变化规律, 风速从 6.0 m/s 逐步增加到 12.0 m/s 时, 土壤流失量增长约 6.3 倍。 (2) 风蚀过程中鼠丘高度和直径随风蚀时间的变化较明显, 其变化速率与土壤流失速率相对应, 且风蚀促进土壤水分的蒸发速率, 从而促进鼠丘的土壤可蚀量。 (3) 鼠丘土壤养分随风速和土壤流失量的增大而增大, 即养分流失规律与土壤流失量的变化规律相同, 其中土壤有机质、全钾、速效钾和碱解氮的流失量相对较大。研究结果表明风力侵蚀是加剧退化高寒草甸高原鼠兔爆发区土壤流失和养分贫瘠的重要因素之一。

关键词: 高寒草甸; 高原鼠兔土丘; 风力侵蚀; 土壤流失; 养分含量

中图分类号: S157.1; 812.6 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2019)02-0110-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.02.018

Soil Wind Erosion Law in *Ochotona Curzoniae* Mound of Alpine Meadow in the Yellow River

LI Guorong^{1,2}, LI Xilai^{3,4}, LI Jinfang^{1,2}, ZHU Haili^{1,2},

CHEN Wenting^{1,2}, ZHAO Jianyun^{1,2}, HU Xiasong¹, CUI Yunpeng¹, LI Cunliang¹

(1. Geological Engineering Department of Qinghai University, Xining 810016; 2. Key Lab of Cenozoic Resource & Environment in North Margin of the Tibetan Plateau, Xining 810016; 3. College of Agriculture and Animal Husbandry of Qinghai University, Xining 810016; 4. Key Laboratory of Restoration Ecology in Cold Regions of Qinghai Province, Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008)

Abstract: In order to clarify the wind erosion effect and soil loss law in the degraded area of alpine meadow, the outbreak area of the *Ochotona Curzoniae* mound in the degraded alpine meadow of Henan County in Qinghai Province was taken as the research object. The field artificial simulated wind erosion tests were carried out with different wind speeds. The law of the soil loss and nutrient loss of the rodent mound was analyzed and discussed. The results showed that: (1) The amount of soil loss under wind erosion take a tendency of initiated fast followed by slow. When the wind speed was gradually increased from 6.0 m/s to 12.0 m/s, the amount of soil loss increased by about 6.3 times. (2) The heights and diameters of the rodent mound were significantly different with time during the wind erosion process. Their changing rates corresponded to the rates of soil loss. Wind erosion promoted the evaporation rates of soil moisture, thereby promoting the soil erosion of the rodent mound. (3) The soil nutrient loss in the *Ochotona Curzoniae* mound increased with the increases of wind speed and soil loss, indicating that the law of nutrient loss and soil loss were the same. The loss of organic matter, total potassium, available potassium and alkali nitrogen was relatively large. These findings show that wind erosion is one of the important factors that aggravate the soil loss and nutrient

收稿日期: 2018-11-23

资助项目: 青海省科技厅项目(2016-ZJ-728, 2017-HZ-802); 国家自然科学基金项目(41662023, 41762023, 31872999); 高等学校学科创新引智计划项目(D18013)

第一作者: 李国荣(1979—), 男, 青海贵德人, 博士研究生, 副教授, 主要从事生态环境保护及地质灾害防治的教学与研究工作。E-mail: qdli-guorong@163.com

通信作者: 李希来(1964—), 男, 河南孟津人, 博士生导师, 教授, 主要从事高原生态修复与环境模拟研究。E-mail: xilai-li@163.com

infertility in the *Ochotona Curzoniae* outbreak area of degraded alpine meadows.

Keywords: alpine meadow; *Ochotona Curzoniae* mound; wind erosion; soil loss; nutrient content

黄河源区地处青藏高原腹地,是我国重要的水源涵养区。该地区广泛分布着占据青藏高原绝大部分面积的高寒草甸,是黄河源地区最重要的覆被类型,约占源区面积的 80%^[1],其环境的变化影响到整个流域的生态安全和社会经济的可持续发展。由于该区域独特的地理位置及生态环境特点,在气候变化、啮齿动物和人类活动等的综合影响下,黄河源区的高寒草地发生了不同程度的退化^[2-5],中度以上的退化草地面积占可利用草地面积的 50%~60%,并有逐年加快退化的趋势^[6]。

风是影响干旱半干旱草地系统动力学的一个关键非生物因素,风力侵蚀和土壤运移是退化草地养分流失的主要原因^[7],且风蚀率、土壤养分流失等与植被覆盖有密切关系,植被覆盖度越低,风蚀作用越强。风蚀使地表裸露的土壤发生运移,加剧草地土壤的流失,且随着风蚀作用的加强,植被覆盖的降低明显增加地表的侵蚀量^[8-9]。土壤表面输沙量的大小取决于风速和胶结体覆盖度^[10],风蚀强度越低,风蚀量及风蚀面积减少^[11],说明风蚀是土壤退化的主要途径之一。

啮齿动物活动影响草地植被和营养物质流失,扰乱区域生态平衡。造成草甸退化的啮齿动物主要是高原鼠兔和高原鼠兔等^[12],其对草地的破坏作用极其严重,啮齿动物活动后在草地表面堆积疏松土层,并使土壤特性发生一系列变化,为水土流失和草地退化创造条件^[13]。目前有学者^[14-15]针对高原鼠兔活动造成的水土流失和植被恢复进行研究,也有学者^[16-17]开展土壤风蚀试验研究,但有关高寒草甸高原鼠兔土丘的土壤风蚀试验方面,现有的文献资料相对较少,尤其有关高原鼠兔活动作用下土壤流失特征方面有待深入研究。本研究以黄河源区河南县高寒草甸高原鼠兔土丘为研究对象,开展土壤风蚀规律的模拟试验,其目的是评价高寒草甸高原鼠兔土丘土壤及其养分流失随风速和风蚀时间的变化规律,研究结果将有助于分析和评价高原鼠兔活动与土壤风蚀的关系,对揭示高寒草甸退化的成因机理以及草地植被恢复和生态环境改善等提供科学依据。

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县南旗村,属黄河源高寒草甸区,平均海拔 3 600 m,年均气温 $-1.3 \sim -1.6$ °C,年降水量 597.1~615.5 mm^[18]。常年气候相对

比较恶劣,季节性吹风比较明显,寒冷风季多集中在冬季 11 月至翌年 4 月,风力侵蚀相对集中,历史最大风速可达 20 m/s。该区域原生植被主要为矮嵩草(*Kobresia humilis*)、线叶嵩草(*Kobresia capillifolia*)和高山嵩草(*Kobresia pygmaea*)等,但草甸退化区分布有黄花棘豆(*Oxytropis ochrocephala*)、鹅绒委陵菜(*Potentilla anserina*)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、乳白香青(*Anaphalis lactea*)和高原毛茛(*Ranunculus tanguticus*)等。研究区分布大量的高原鼠兔(*Ochotona curzoniae*),周边部分地区分布高原鼠兔(*Eospalax baileyi*),鼠害较为猖獗,其对土壤的挖掘破坏和堆积在地表形成大小不一的松散鼠丘,为风蚀作用及土壤流失创造条件,从而加速草地退化,给区域生态环境和畜牧业发展带来重要影响。

1.2 试验方法

试验区设在青海省河南县南旗村高原鼠兔爆发区,在鼠丘分布的样地内(200 m×200 m)选取形状、高度、直径和含水量等基本一致、未结皮的独立鼠丘,将风蚀盘(厚度为 2 mm 的圆形平盘)沿鼠丘底部轻轻插入,使鼠丘土壤置于风蚀盘中心,将受扰动较大的土壤进行人为修复,称重并测量其初始高度、直径及初始土壤含水量和养分含量后,采用风蚀试验装置对风蚀盘上的鼠丘开展模拟恒风侵蚀试验。试验中的风速等级设定为 6.0,7.5,9.0,10.5,12.0 m/s 共 5 个等级(据研究区气象站近 3 年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。

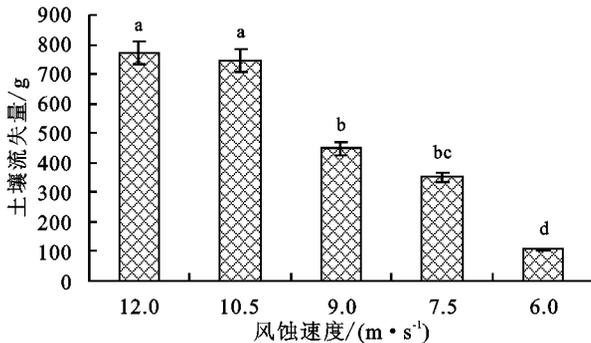
人工模拟风蚀试验装置由风箱、风速调节器、蓄电池和数据线组成,试验时风箱口与鼠丘距离为 50 cm,每个试验从风箱启动开始计时,前 0~5 min 内每隔 1 min 测量 1 次,5 min 后每隔 5 min 测量 1 次,30 min 后每隔 10 min 测量 1 次,每次测定的主要指标是土壤及其养分流失量、鼠丘高度、直径和含水量。为避免天然风力对模拟试验的影响,试验时用挡风板阻隔干扰模拟风速的自然风。

养分含量的流失主要根据土壤流失量和初始养分含量进行计算,确定不同风速下单位时间内土壤养分流失量。养分测试指标包括有机质、全氮、全磷、全钾、速效氮、速效磷、速效钾和碱解氮,测试方法参照王金贵等^[19]采用的测定方法。上述试验在 2017 年 4 月 9—20 日完成,设定该时间段完成试验主要是考虑此时试验区风力相对较大,干旱、少雨,而且是风力侵蚀作用相对集中的时期。

2 结果与分析

2.1 高原鼠兔土丘土壤风力侵蚀规律

2.1.1 土壤流失量随风力侵蚀时间的变化特征 由图 1 可知,鼠丘表面土壤风蚀作用较强,在各级恒风作用下土壤流失量呈先快后慢的变化规律,风速越大土壤流失量越大,即风速从 6.0 m/s 逐步增加到 12.0 m/s 时,鼠丘土壤流失量从 106.2 g 增加到 773.9 g,增长约 6.3 倍($P < 0.05$)。此外,从图 2 可以看出,土壤流失递减量随着风蚀时间的增加而急剧减小,其中风蚀开始后的前 3 min 内,由于高原鼠兔活动堆积的土壤结构比较松散,且具有大量的细小土颗粒,在风力作用下直径 < 1 mm 的颗粒极易在短时间内被剥蚀或运移,风蚀 3 min 后土壤流失量随风蚀时间的平均变化幅度在 10 g 以内,其主要原因是在风力的持续影响下,鼠丘表层细小颗粒越来越少,土壤结构趋于稳定,土壤流失量也很快趋于稳定,这不仅与土壤粒径有关,也与土壤含水量、土壤团聚体等均密切相关。



注:图中不同字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)。

图 1 土壤总流失量随风速的变化规律

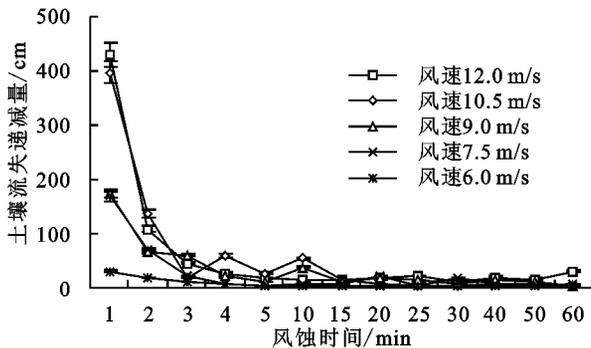


图 2 土壤流失量随风蚀时间的递减规律

2.1.2 鼠丘高度和直径随风蚀时间的变化规律 试验过程中鼠丘高度测量结果表明,在 60 min 的持续吹蚀下鼠丘高度的下降幅度呈先快后慢的变化规律($P < 0.05$)(图 3),且在风蚀 3 min 内,高度迅速下降,说明鼠丘顶部颗粒向周围的运移及土壤流失较为迅速,3 min 后高度下降趋势趋于平缓。此外,鼠丘直径随风力侵蚀时间出现增大的趋势,0~3 min 内风速越大时鼠丘直径增量越大($P < 0.05$),且鼠丘直径的变化幅度也随风速

和風蚀时间的增加而减小(图 4)。主要原因为鼠丘顶部的临空面较大,受到风的作用也较大,且由于高原鼠兔活动后堆积的土壤不仅颗粒细小,而且结构松散,极易在风力和重力作用下产生滚动和搬运,在风蚀初期造成鼠丘高度迅速下降,且直径增大;而随着风蚀持续作用,可剥蚀的土壤颗粒逐步减少,鼠丘土壤也逐步稳定,间接反映风对鼠丘形态的改造和土壤流失规律,也说明风蚀过程中鼠丘土壤覆盖面积随风蚀时间不断扩大,这也是鼠害秃斑面积扩张和草地退化的重要特征之一。

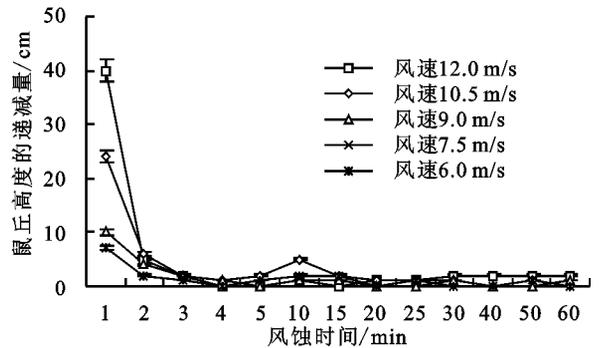


图 3 不同风速下高原鼠兔鼠丘高度的递减规律

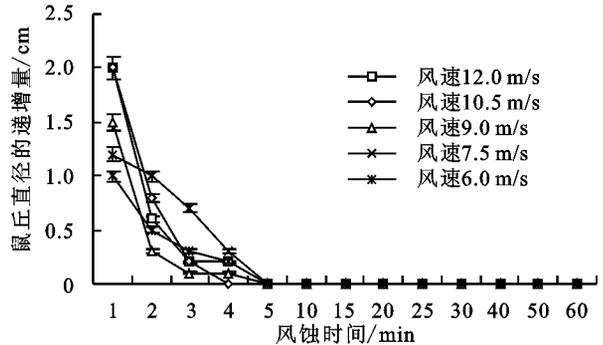


图 4 不同风速下高原鼠兔鼠丘直径的递增规律

2.1.3 风蚀作用下鼠丘表面土壤含水量变化规律 野外调查和试验数据结果表明,风蚀作用不仅产生土壤流失,也对鼠丘表面土壤含水量产生一定的影响。为阐明风蚀作用下土壤含水量的变化规律,对比分析风速为 6.0, 12.0 m/s 条件下鼠丘表层土壤含水量的变化特征。从图 5 可以看出,2 种风速条件下鼠丘表层含水量均随风蚀时间的增加而逐渐降低,其中风速为 12.0 m/s 时的鼠丘表层含水量下降速度比 6.0 m/s 状态下快($P < 0.05$),说明风力控制着土壤水分的蒸发速率。此外,风速较低时鼠丘土壤含水量下降曲线出现波动现象,可能原因是风速较小时短时间内土壤含水量的变化不明显,且鼠丘内部水汽的上升对低风速条件下的土壤含水量产生一定的影响。

2.2 不同风蚀条件下土壤养分流失规律

2.2.1 不同风速下鼠丘土壤养分流失特征 在风蚀的作用下,啮齿动物爆发区的土壤大量流失,土壤中的养分也随之流失。试验结果显示,在不同风速的风蚀作用下,鼠丘土壤养分在 0~3 min 内流失较大,尤其是土

壤有机质、全钾、速效钾和碱解氮的流失递减量相对较大($P < 0.05$), 3 min 后各养分流失递减量趋于稳定, 这与土壤流失随风蚀时间的递减规律相一致(图 6)。同等条件下土壤全钾的流失率远大于全氮和全磷, 土壤速效磷的递减量相对小于碱解氮和速效钾, 主要的原因是前期鼠丘上覆土壤颗粒细小且干燥松弛, 在风力侵蚀作用下鼠丘表面细小颗粒及其养分会迅速流失; 其次, 鼠丘土壤是啮齿动物掘穴时堆积的地表草甸土壤, 由于在植被的反复更替作用下积累大量的养分, 风蚀作用中土壤的流失过程也反映土壤养分的流失规律。

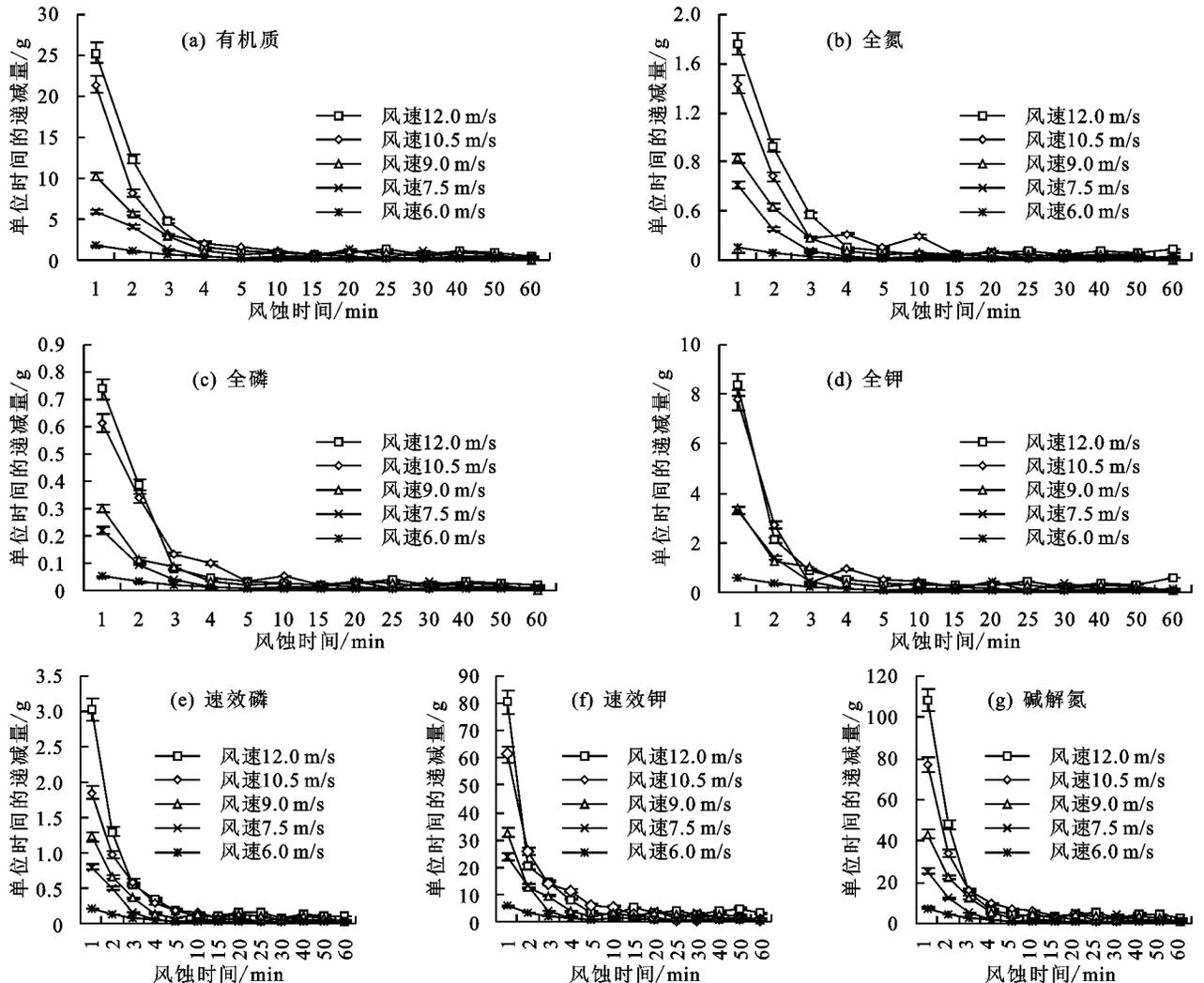


图 6 高原鼠兔土丘土壤养分随风蚀时间的递减规律

2.2.2 高原鼠兔爆发区不同风速下土壤养分流失量

由表 1 可知, 风力侵蚀 60 min 后, 在不同风速下养分的流失量也不同, 即风速 12.0 m/s 的养分流失量最大, 其次是风速为 10.5, 9.0, 7.5 m/s, 风速为 6.0 m/s 的养分含量流失最小; 各养分指标中土壤全钾的流失量最大, 全磷和速效磷的流失量相对较小($P < 0.05$)。风速越大, 土壤养分流失量越大, 由此可知风蚀作用既是啮齿动物爆发区土壤流失的重要因素, 也是养分流失和土壤贫瘠的激发条件之一, 恢复和保护该地区的生态环境, 必须加强水土流失的防治。

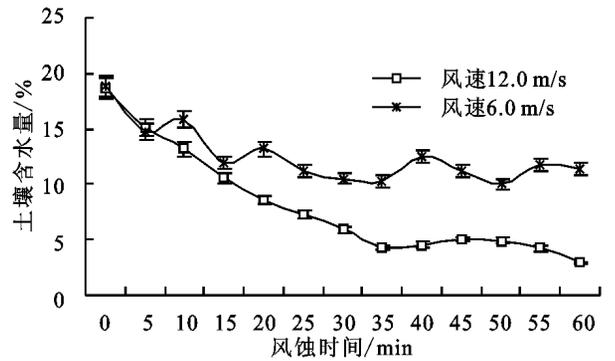
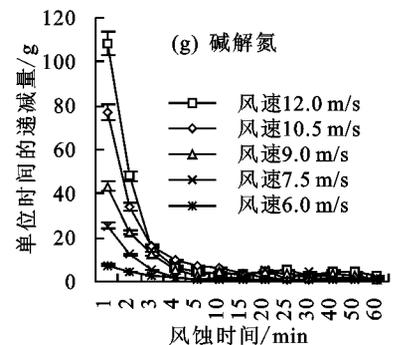
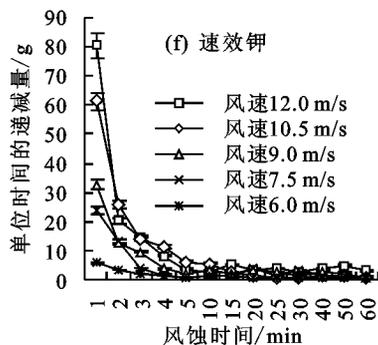
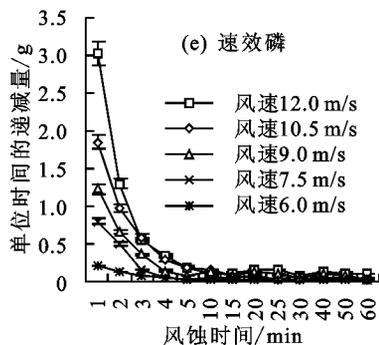
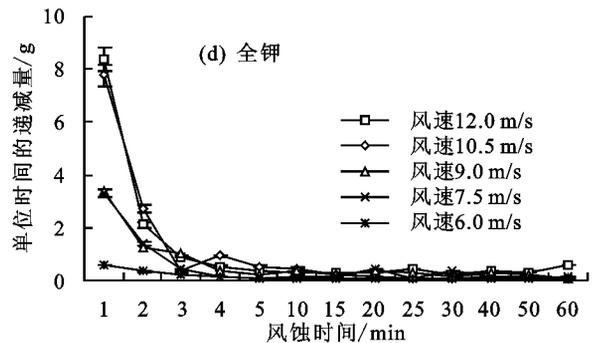
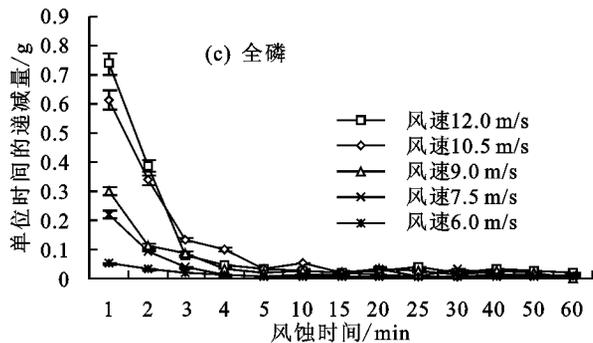
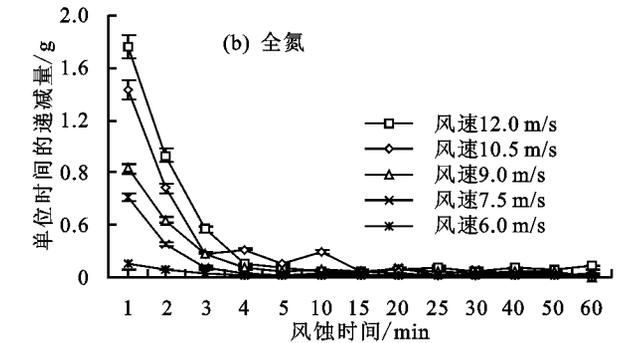


图 5 2 种风速下高原鼠兔鼠丘表面土壤含水量的变化规律



3 讨论

3.1 高原鼠兔活动对土壤侵蚀的贡献

引起黄河源区高寒草甸退化的影响因素很多, 而高原鼠兔爆发后对草地的挖掘活动导致草地退化^[20]。研究区分布的啮齿动物主要是高原鼠兔, 这些高原鼠兔种群啃咬植被, 导致植被根系枯死; 掘穴活动使下层土壤翻出地表形成裸露土丘, 草地原有的土壤结构和群落特征遭到破坏^[21], 在地表形成大小不一的松散鼠丘, 使土丘的可蚀性明显增加^[22], 从而为风蚀作用和土壤流失创造条件, 在风力集中的时期

极易造成土壤及其养分流失。因此,高原鼠兔爆发已 成为高寒草甸水土流失的重要驱动力之一。

表 1 不同风速下鼠丘土壤养分总流失量

风速/ ($m \cdot s^{-1}$)	全氮/ g	全磷/ g	全钾/ g	碱解氮/ mg	速效磷/ mg	速效钾/ mg	有机质/ g
6.0	0.38±0.08e	0.18±0.04c	2.08±0.38d	26.39±2.12e	0.75±0.11c	19.91±0.92d	6.26±0.52d
7.5	1.27±0.24d	0.60±0.13bc	6.88±0.44c	87.40±3.34d	2.48±0.16b	65.94±1.06bc	20.74±0.73bc
9.0	1.51±0.36c	0.72±0.07b	8.17±0.37b	103.85±5.03c	2.95±0.21b	78.36±1.57b	24.65±0.86b
10.5	2.69±0.47ab	1.28±0.25a	14.56±0.65a	185.08±6.15ab	5.25±0.35a	139.65±2.24a	43.93±1.06a
12.0	2.79±0.42a	1.33±0.18a	15.13±0.49a	192.31±5.47a	5.46±0.46a	145.11±2.18a	45.64±0.93a

注:表中数据为平均值±标准误;同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)。

3.2 野外风力侵蚀规律及风蚀机理有待深入研究

模拟土壤风蚀试验中风速设计根据研究区近 3 年内检测的风力大小设定,试验过程中阻隔自然风是为了避免天然风力对模拟风蚀试验的影响,能够较准确地检测不同恒定风速下土壤及养分流失量,可以获得高原鼠兔爆发区土壤侵蚀率随风速和风蚀时间的变化规律,但是风蚀量的量化测试也难免对鼠丘造成人为轻微扰动,且自然风速是不恒定的,如果掌握原位土壤风蚀规律,也需要定位监测天然风力作用下鼠丘形态及土壤流失率。此外,啮齿动物爆发区土壤风蚀作用与鼠丘形成时间、土壤含水量、表面结皮、植被根系分布、风速与风向转变及地貌与降水特征等均有很大关系,野外风力侵蚀规律和风蚀机理等有待深入研究。

4 结论

(1) 风力侵蚀过程中鼠丘土壤流失量呈先快后慢的变化规律,其中风蚀 3 min 内表层细粒土壤迅速流失,3 min 后土壤流失量较少,且土壤递减量随风蚀时间的变化趋于稳定;土壤流失量与风速呈正相关,风速从 6.0 m/s 逐步增加到 12.0 m/s 时,鼠丘土壤流失量从 106.2 g 增加到 773.9 g,土壤流失量增长约 6.3 倍。

(2) 随着风蚀作用和土壤流失,鼠丘高度逐渐降低,鼠丘直径逐渐增大,且随风蚀作用历时呈现先快后慢的变化规律;风蚀作用促进鼠丘土壤的水分蒸发速率,土壤含水量随着风蚀时间的增加而逐渐降低。

(3) 在风蚀 0~3 min 内,鼠丘土壤有机质、全钾、速效钾和碱解氮的流失递减量相对较大,3 min 后各养分指标的流失量趋于稳定,且土壤养分的流失量随风速的增大而增大,这与土壤流失量的变化规律相一致,说明风蚀作用既是高原鼠兔爆发区土壤流失重要因素,也是养分流失和土壤贫瘠的激发条件之一。

参考文献:

[1] 张德铨,刘林山,摆万奇,等. 黄河源地区草地退化空间特征[J]. 地理学报,2006,61(1):3-14.
[2] Li X L, Gao J, Zhang J, et al. Natural and anthropogenic influences on the spatiotemporal change of degrad-

ed meadows in southern Qinghai Province, West China: 1976—2015[J]. Applied Geography,2018,97:176-183.
[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] Gao J, Li X L. Degradation of frigid swampy meadows on the Qinghai-Tibet Plateau: Current status and future directions of research[J]. Progress in Physical Geography,2016,40(6):794-810.
[5] Gao J, Li X L. A knowledge-based approach to mapping degraded meadows on the Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. International Journal of Remote Sensing, 2017,38(22):6147-6163.
[6] Martin W, Annette O, Rainer W. 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.
[7] Yan Y C, Wang X, Guo Z J, et al. Influence of wind erosion on dry aggregate size distribution and nutrients in three steppe soils in northern China[J]. Catena, 2018, 170:159-168.
[8] 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.
[9] 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.
[10] Zhou J, Lei J, Li S, et al. A wind tunnel study of sand-cemented bodies on wind erosion intensity and sand transport [J]. Natural Hazards,2016,82(1):25-38.
[11] Jiang L, Xiao Y, Zheng H, et al. Spatio-temporal variation of wind erosion in Inner Mongolia of China between 2001 and 2010 [J]. Chinese Geographical Science,2016,26(2):155-164.
[12] 安雪香. 甘肃省肃南县天然草地生态现状调查研究 [J]. 甘肃畜牧兽医,2017,47(5):105-108.
[13] 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.

- [7] 汤洁, 荣广智, 张勇, 等. 吉林西部盐碱区农田土壤盐碱程度与碳的稳定同位素比值的关 系[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(7): 68-74.
- [8] 安占林. 松原市前郭县地下水资源的现状研究与分析[J]. 科技与创新, 2017(24): 120-121.
- [9] 刘彩虹. 吉林西部苏打盐渍土区土壤水氮空间分布特征及行为模拟[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- [10] Zhao Q, Tang J, Li Z Y, et al. The influence of soil physico-chemical properties and enzyme activities on soil quality of saline-alkali agroecosystems in Western Jilin Province, China[J]. Sustainability, 2018, 10(5): 1529-1530.
- [11] 郭振, 王小利, 段建军, 等. 长期施肥对黄壤性水稻土有机碳矿化的影响[J]. 土壤学报, 2018, 55(1): 225-235.
- [12] 赵仁竹. 吉林西部盐碱水田不同土壤质地酶活性与有机碳的变化规律及关系研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- [13] 贾红丽. 黄河三角洲典型湿地表观土壤呼吸通量及有机碳矿化动态模拟[D]. 北京: 中国海洋大学, 2014.
- [14] 李顺姬, 邱莉萍, 张兴昌. 黄土高原土壤有机碳矿化及其与土壤理化性质的关系[J]. 生态学报, 2010, 30(5): 1217-1226.
- [15] 陈吉, 赵炳梓, 张佳宝, 等. 长期施肥潮土在玉米季施肥初期的有机碳矿化过程研究[J]. 土壤, 2009, 41(5): 719-725.
- [16] Raj S, Petra M, David C. Relationships between carbon dioxide emission and soil properties in salt affected landscapes[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43(3): 667-674.
- [17] 王金满, 白中科, 叶驰驱, 等. 脱硫石膏与微生物菌剂联合施用对盐碱化土壤特性的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2015, 23(6): 1080-1087.
- [18] Tang J, Liang S, Li Z Y, et al. Emission laws and influence factors of greenhouse gases in saline-alkali paddy fields[J]. Sustainability, 2016, 8(2): 163.
- [19] Hagemann N, Subdiaga E, Orsetti S, et al. Effect of biochar amendment on compost organic matter composition following aerobic composting of manure[J]. Science of The Total Environment, 2018, 613/614: 20-29.
- [20] 廖畅, 田秋香, 汪东亚, 等. 外源碳输入对中亚热带森林深层土壤碳矿化和微生物决策群落的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(9): 2848-2854.
- [21] 杨添, 戴伟, 安晓娟, 等. 天然林土壤有机碳及矿化特征研究[J]. 环境科学, 2014, 35(3): 1105-1110.
- [22] 罗先香, 张贺, 贾红丽, 等. 黄河三角洲滨海湿地土壤有机碳矿化过程模拟研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2017, 47(6): 1-7.
- [23] Olsson A, Campana P E, Lind M, et al. Potential for carbon sequestration and mitigation of climate change by irrigation of grasslands[J]. Applied Energy, 2014, 136(9): 1145-1154.
- [24] Ma J, Wang Z Y, Stevenson B A, et al. An inorganic CO₂ diffusion and dissolution process explains negative CO₂ fluxes in saline/alkaline soils[J]. Scientific Reports, 2013, 2025(3): 1-5.
- [25] Keshri J, Mishra A, Jha B. Microbial population index and community structure in saline-alkaline soil using gene targeted metagenomics[J]. Microbiological Research, 2013, 168(3): 165-173.

(上接第 114 页)

- [14] Li X L, Perry G L W, Brierley G, et al. Restoration prospects for Heitutan degraded grassland in the Sanjiangyuan[J]. Journal of Mountain Science, 2013, 10: 687-698.
- [15] 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.
- [16] 樊瑞静, 李生字, 周杰, 等. 不同外形粗糙元覆盖沙床面抗风蚀效益的风洞模拟实验[J]. 地球科学进展, 2017, 32(1): 83-89.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 王金贵, 李希来, 李宗仁, 等. 青海超净区高寒草甸土壤有机碳及养分分布特征[J]. 生态环境学报, 2018, 27(2): 232-238.
- [20] Li X L, Gao J, Brierley G, et al. Rangeland degradation on the Qinghai-Tibet Plateau: Implications for rehabilitation[J]. Land Degradation and Development, 2013, 24: 72-80.
- [21] Li X L, Perry G L W, Brierley G. A spatial simulation model to assess controls upon grassland degradation on the Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. Applied Geography, 2018, 98: 166-176.
- [22] 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.