

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.05.052.

翟辉, 李国荣, 李进芳, 等. 草地覆盖度和鼠丘对高寒草地表层土壤颗粒特征的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(5): 122-129.

ZHAI Hui, LI Guorong, LI Jinfang, et al. Influences of Vegetation Coverage and Rodent Mounds on Topsoil Particle Characteristics of Alpine Grassland[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(5): 122-129.

草地覆盖度和鼠丘对高寒草地表层土壤颗粒特征的影响

翟辉¹, 李国荣^{1,2}, 李进芳¹, 童生春^{1,2}, 赵健赞^{1,2},

朱海丽^{1,2}, 刘亚斌^{1,2}, 李希来³, 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; 3.青海大学 农牧学院, 西宁 810016)

摘要: [目的]揭示黄河源区高寒草地表层土壤颗粒粒径组成的变化特征, 阐明影响草地土壤退化的因素, 并进而为黄河源区退化草地的综合治理提供一定的指导作用。 [方法]以青海省河南县禁牧区自然条件下不同覆盖度(0%, 5%, 25%, 50%, 75%和100%)和2类鼠丘的新旧表层土壤作为研究对象, 通过野外调查和室内试验, 分析黄河源区不同盖度草地及鼠丘分布对草地土壤颗粒粒径组成的影响。 [结果](1) 高寒草地表面土壤平均粒径随草盖度的降低而增加, 其中粒径小于2 μm 的土壤粒径含量变化幅度最小, 20~50 μm 和 50~250 μm 的粒径含量变化幅度最大, 粒径为20~50 μm 的土粒是土壤侵蚀相对敏感的颗粒。(2) 黄河源区未退化草地表层土壤粒径组成主要以粉粒为主, 黏粒、粉粒含量和盖度间呈线性正相关, 砂粒含量与盖度间呈线性负相关。裸地砂粒含量较原生草地增加了21.96%, 高原鼢鼠和高原鼠兔鼠丘分别增加了27.86%和33.14%。(3) 形成时间相同的2类鼠丘土壤粒径组成特征差异性不明显, 高原鼠兔和高原鼢鼠旧鼠丘的黏粒含量较新生鼠丘分别减少了5.85%, 6.32%, 粉粒分别减少了28.99%, 23.01%, 砂粒分别增加了34.84%, 29.33%, 土壤平均粒径增加了近2倍, 鼠丘表层土壤呈现出明显的土壤粗粒化和沙化现象。 [结论]提高草地覆盖度到50%以上时和降低新生鼠丘密度能有效防治高寒草地土壤粗粒化。

关键词: 高寒草地; 自然退化区; 鼠丘; 粒径组成; 土壤退化

中图分类号: S152.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)05-0122-08

Influences of Vegetation Coverage and Rodent Mounds on Topsoil Particle Characteristics of Alpine Grassland

ZHAI Hui¹, LI Guorong^{1,2}, LI Jinfang¹, TONG Shengchun^{1,2}, ZHAO Jianyun^{1,2},

ZHU Haili^{1,2}, LIU Yabin^{1,2}, LI Xilai³, 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; 3. College of Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xining 810016, China)

Abstract: [Objective] The aim of this study is to explore the variation characteristics of topsoil particle size composition in the alpine grassland in the source region of the Yellow River, as well as main influencing factors on soil degradation in the grassland, and then to provide certain guidance. [Methods] The topsoil with different coverage (0%, 5%, 25%, 50%, 75%, and 100%) and two types of new and old rodent mounds in the forbidden grazing area of Henan County, Qinghai Province were used as research objects. The influences of different coverage of grassland and rodent mounds distribution on topsoil particle size composition in the source region of the Yellow River were analyzed. [Results] (1) The average soil particle size on the surface of

收稿日期: 2022-09-18

修回日期: 2022-10-14

资助项目: 青海省科技厅基础研究项目(2021-ZJ-701); 国家自然科学基金项目(41662023, 42161068)

第一作者: 翟辉(1997—), 男, 河南永城人, 硕士研究生, 研究方向为草地土壤风蚀及地质灾害防治。E-mail: 1838334135@qq.com

通信作者: 李国荣(1979—), 男, 青海贵德人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事生态环境保护及地质灾害防治研究。E-mail: qdliugorong@163.com

<http://stbcyj.paperonice.org>

alpine grassland increased with the decrease of grass coverage, and the variation range of soil particle size less than $2\text{ }\mu\text{m}$ was the smallest, and the variation range of soil particle size between $20\text{ }\mu\text{m}$ and $50\text{ }\mu\text{m}$ and $250\text{ }\mu\text{m}$ was the largest. The soil particle size between $20\text{ }\mu\text{m}$ and $50\text{ }\mu\text{m}$ was relatively sensitive to soil erosion. (2) The surface soil particle size composition of undegraded grassland was mainly composed of silt, clay and silt contents and coverage showed a linear positive correlation, and sand content and coverage showed a linear negative correlation. Compared with the primary grassland, the content of sand in bare land increased by 21.96%, that of *Eospalax baileyi* mound increased by 27.86% and that of *Ochotona curzoniae* mound increased by 33.14%. (3) There was no obvious difference in soil particle size composition between the two types of mounds formed at the same time. Compared with the new mounds, the clay content of old mounds of *Ochotona curzoniae* and *Eospalax baileyi* decreased by 5.85% and 6.32%, the silt content decreased by 28.99% and 23.01%, and the sand content increased by 34.84% and 29.33%, respectively. The mean grain size of soil increased by nearly 2 times, and the soil erosion of rodent mounds showed the phenomenon of soil coarse-grained and desertification. [Conclusion] Increasing grassland coverage to more than 50% and decreasing new rodent mounds density could effectively control soil coarser granulation in alpine grassland.

Keywords: alpine grassland; natural degradation area; rodent mounds; particle size composition; soil degradation

黄河源区土地类型主要为高寒草地,在涵养水源和生态系统保护中具有重要的意义^[1-2]。早期人类过度放牧活动对草地退化产生了巨大的影响^[3],近年来虽然加强了放牧管理,但在气候和人为因素等影响下,高寒草甸依旧出现不同程度的退化现象^[4-6],退化区草地土壤不仅在物理力学性质发生显著的变化^[7-10],也会导致植被盖度的降低,而植被在抑制草地土壤流失发挥着重要的作用,研究表明,提高植被盖度能够明显降低土壤侵蚀,除此之外,高原啮齿类动物数量激增也对高寒草地退化和水土流失产生重要的影响^[11-13],高寒草地鼠类掘土造穴活动改变了原生草地性质,加速了草地土壤流失^[14-16]。黄河源地区特殊的高原气候环境,各种侵蚀作用较其他草地更加显著,尤其在植被低覆盖度区域与小型啮齿动物鼠丘区土壤颗粒流失严重,而研究表明风蚀作用是导致土壤流失最重要的侵蚀作用^[17-18],众多学者围绕风蚀作用与土壤流失的关系开展了诸多研究,如张正偲等^[19]研究表明风蚀强度越高,土壤粗粒化程度也越高。

土壤侵蚀伴随着土壤粒径组成的改变,尤其对退化区表层土壤的粒度参数影响更大,闫玉春等^[20]研究表明草地退化区土壤粒径会比未退化围封草地增大一倍。与此同时,草地恢复也伴随着土壤粒径的变化,张继义等^[21]研究表明随着恢复程度提高,粗颗粒比重不断下降,细颗粒含量会逐步增加。土壤粒径组成变化对草地退化评价具有很好的指示作用,目前很多学者通过研究粒径组成的变化来反映草地退化的程度,如黄昕等^[22]将土壤颗粒粒径大于 0.84 mm 百分比含量作为判断草地退化程度的标准。相比于其他区域草地,黄河源区由于其独特的自然气候条

件,高寒草地更易遭到侵蚀作用,也更容易出现大面积荒漠化现象^[23-25]。尽管目前有关黄河源区高寒草地退化区物理力学性质开展的研究较多^[26-28],但关于不同草地覆盖度和鼠丘对高寒草地表层土壤颗粒特征的影响等需要进一步研究。本文通过研究黄河源区不同盖度草地和鼠丘表层土壤的粒径组成特征,分析不同退化区土壤颗粒粒径组成及小型啮齿类动物对土壤退化的影响,这对揭示黄河源区水土流失和草地退化机理具有重要的意义。

1 研究区概况

研究区选择在黄河源区的黄南州河南县南旗村,地理位置为 $101^{\circ}47'E$, $34^{\circ}44'N$,海拔约 $3\ 600\text{ m}$,年降雨量 $597.1\sim 615.5\text{ mm}$,属于典型的高原大陆性季风气候,大风天气频繁^[29-30],历史最大风速可达 20 m/s ,年平均风速 2.6 m/s 。研究区草地为 4 a 以上禁牧高寒草地,未退化的原生草地植被主要为矮嵩草(*Kobresia humilis*)、线叶嵩草(*Kobresia capillifolia*)和高山嵩草(*Kobresia pygmaea*)等,在退化草地区分布有黄花棘豆(*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。该地区广泛分布着大量的高原鼠兔(*Ochotona curzoniae*)和高原鼯鼠(*Eospalax baileyi*),伴随着小型啮齿类动物的活动,草地表面形成大量的鼠丘(图 1),通过在野外划定的 $100\text{ m}\times 100\text{ m}$ 的试验区内鼠丘和鼠洞的数量进行计数统计,鼠丘分布平均密度可达 $370\text{ 个}/\text{hm}^2$,鼠洞平均密度可达 $950\text{ 个}/\text{hm}^2$,在气候及鼠类活动等因素的持续

影响下,地表出现大量的退化斑块(图2),从而造成草地和土壤的严重退化,对区域草地生态环境的稳定和可持续发展带来较大影响。



图1 啮齿动物活动形成的鼠丘



图2 草地表面的退化斑块

2 试验材料与方法

2.1 野外调查与取样

试验中植被盖度采用样方进行调查,通过对样方内的植被盖度统计,可将植被盖度分为6个等级,即盖度为0的裸地,1%~10%为超低盖度,11%~30%为低盖度,31%~60%为中盖度,61%~90%为中高盖度,>90%为高盖度,在每个盖度分级的草地上分别选取盖度为0%,5%,25%,50%,75%和100%的样方作为取样对象。小型啮齿类动物活动破坏草地的形式主要是掘穴造丘,鼠丘为堆积的松散土体,草地土壤结构几乎完全遭到破坏,鼠丘土壤表层无植被覆盖,按照鼠丘类型可以划分为高原鼠兔鼠丘和高原鼢鼠鼠丘,按照其形成时间可以划分为新老两类,由于鼠丘在形成后在一定时间内会不断扩大洞穴,源源不断地向鼠丘表层输送新鲜土体,经过野外观察,这一活动持续一周左右,因此将形成时间为一周以内的视为新鼠丘(鼠丘表层保持新鲜状态的土体),新鼠丘由于土质极其疏松,初期鼠丘土壤颗粒流失最为明显,而后土壤流失速率随时间逐渐降低,经过野外观察发现,鼠丘形成两个月后,表层将会出现

明显的结皮,土壤颗粒流失速率显著降低,因此将形成时间超过两个月且其表层未出现植被恢复的鼠丘视为旧鼠丘。

试验于2021年8月进行,首先通过目测估计确定6个不同盖度分级的样地,在每个盖度分级样地布置20个1 m×1 m的样方,测定每个样方内的植被覆盖度,并分别选取盖度接近0%,5%,25%,50%,75%和100%的各5个重复样方进行取样。鼠丘样地的选择是在未退化草地区域,选取其中的高原鼠兔和高原鼢鼠新旧鼠丘各5个作为重复取样对象,在取样的过程中,采用取土刀对以上6种覆盖度土壤和2类鼠丘土壤在其表层1 cm范围的深度范围内进行采集,装入自封袋后带回实验室以备测试使用。

2.2 土壤粒度参数计算

对采集的土壤样品进行烘干过筛,并用化学试剂除去其中有机质后,采用英国马尔文公司生产的MS 2000型激光粒度分析仪进行土壤粒度测量^[31],测定完成后结果输出以美国制土壤粒径分级标准输出,并同时输出相应的土壤颗粒累积体积分数^[32]。

为方便计算,对粒径进行对数转换为对应的粒级,其数学式如下:

$$\Phi = -\log_2 d \quad (1)$$

式中: d 为颗粒直径。

基于粒级的中值粒径、平均粒径、峰态、偏度、分形维数的计算公式如下:

(1) 中值粒径(d_m),是指对应于体积百分比为50的粒径。

(2) 平均粒径。反映粒径的平均情况。

$$d_0 = \frac{1}{3}(\Phi_{16} + \Phi_{50} + \Phi_{84}) \quad (2)$$

式中: Φ_x 为累积体积分数为X%所对应的颗粒直径。下同。

(3) 峰态 K_0 。

$$K_0 = \frac{(\Phi_{95} - \Phi_5)}{2.44(\Phi_{75} - \Phi_{25})} \quad (3)$$

(4) 偏度 SK。

$$SK = \frac{(\Phi_{16} + \Phi_{84} - 2\Phi_{50})}{2(\Phi_{84} - \Phi_{16})} + \frac{(\Phi_5 + \Phi_{95} - 2\Phi_{50})}{2(\Phi_{95} - \Phi_5)} \quad (4)$$

(5) 分形维数 D ^[33]。

$$\frac{M(r < R_i)}{M_T} = \left(\frac{R_i}{R_L}\right)^{3-D} \quad (5)$$

式中: r 为颗粒直径; R 为粒度分析中的筛孔直径; D 为土壤粒径分形维数; $M(r < R_i)$ 为直径小于 R_i 的累积质量; M_T 为进行粒径分析的土颗粒总质量; R_L 为最大粒径土粒的直径。

3 结果与分析

3.1 不同盖度的粒径组成变化规律

黄河源区未退化草地表层土壤粒径组成主要以粉粒为主,含量超过 60%,土壤粒径组成偏细,粒径大于 250 μm 的含量较低。通过对比不同植被覆盖度草地土壤粒径组成发现,不同覆盖度草地土壤粒径组成呈现出有规律的变化,即粒径大于 50 μm 的

土壤颗粒含量随盖度的降低逐渐增加,而粒径小于 50 μm 土壤颗粒含量随盖度的降低而逐渐降低(表 1)。由此可见,植被盖度对土壤粒径组成具有一定的影响,分析认为这对土壤侵蚀产生抑制作用,尤其在分布大量鼠丘的区域,在外力侵蚀作用下将造成细粒土壤颗粒不断流失,致使土壤裸露的草地表层土壤颗粒趋于粗粒化,最终改变土壤的粒径组成,导致土壤退化。

表 1 高寒草地不同盖度土壤粒度组成 %

盖度/%	1000~500 μm	500~250 μm	250~100 μm	100~50 μm	50~20 μm	20~2 μm	<2 μm
0	3.31a	16.91a	12.13b	18.32a	24.98 e	17.67d	6.68b
5	2.57bc	15.35bc	14.71a	13.69c	27.32d	18.71d	7.65b
25	2.22c	14.19c	8.58d	17.69ab	29.47c	20.42c	7.43b
50	0.27d	10.06d	9.84cd	15.37c	31.82c	23.96ab	8.68a
75	0.18d	8.58e	8.87d	14.89c	35.24ab	23.35ab	8.89a
100	0.17d	7.68e	10.39c	10.47d	37.41a	24.45a	9.43a

注:同列数据后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盖度之间差异显著($p<0.05$),下同。

从图 3 看出,土壤粒径组成与植被盖度密切相关,植被盖度越低,细微颗粒含量越低。6 种覆盖度的草地土壤中粒径小于 2 μm 的土壤粒径含量变化最小,2~20 μm 的粒径含量变化次之,20~50 μm 和 50~250 μm 的粒径含量最大,且随草地盖度的降低而增加,其中粒径在 20~50 μm 范围内的土壤颗粒是土壤侵蚀过程中被运移的相对敏感的颗粒。此外,从野外观测和调查结果与分析,粒径小于 20 μm 的颗粒往往分布在粗颗粒的孔隙中,即在土壤侵蚀过程中粗颗粒对细小颗粒的流失起到一定的防护作用,因此细小颗粒是伴随着大颗粒的流失而相继流失,这也是粒径小于 20 μm 的颗粒随盖度变化幅度较小的原因之一。

草地表层土壤砂粒含量逐渐与粉粒含量趋近,而裸地表层土壤中的砂粒含量超过了粉粒含量,说明草地退化加剧土壤沙化现象。与未退化的原生草地土壤相比,植被覆盖度为 0% 的裸地土壤黏粒含量降低了 2.75%,粉粒含量降低了 19.21%,砂粒含量增加了 21.96%(表 2)。不同植被覆盖度下平均粒径也呈现一定的变化规律,即随着盖度的降低,平均土壤粒径逐渐增大,其中裸地土壤平均粒径增加了 93.73 μm。此外,草地退化不仅反映在植被盖度上,也表现在土壤粒径组成上,峰态表示土壤粒径组成分布在平均两侧的集中程度,较为集中。偏度反映土壤颗粒粒度频率曲线的对称性,呈现正偏,随着盖度的降低,分形维数先降低后增加。

由图 4 可知,黏粒、粉粒和砂粒含量和盖度间呈现线性关系,其中黏粒与盖度的相关关系为 $y = -0.5349x + 9.999$, $R^2 = 0.9283$;粉粒与盖度的相关关系为 $y = -3.9891x + 66.429$, $R^2 = 0.9905$,砂粒与盖度的相关关系为 $y = 4.524x + 23.573$, $R^2 = 0.9889$ 。随着植被盖度的降低,草地表层土壤中的黏粒和粉粒含量逐步减低,而砂粒含量呈现上升趋势,土壤表层粒径组成与草地植被盖度关系显著($p<0.05$)。这也表明植被对土壤流失具有明显的抑制作用,尤其是当盖度提高到 50% 以上时能有效降低土壤细颗粒的流失。在黄河源区高寒自然退化草地上的土壤粒径组成特点在一定程度上反映出草地退化与土壤退化存在明显的相关性,草地土壤的退化会引起草地退化,高寒草地一旦遭受破坏,依靠植被和土壤的自然恢复速度极其缓慢,也很难恢复到原生草地的健康状态。

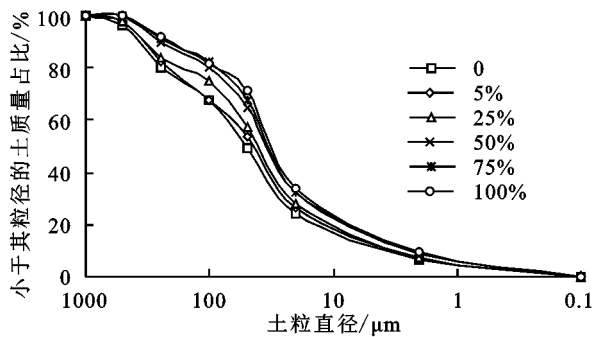


图 3 不同覆盖度土壤粒径组成变化

根据 FAO/USDA 分类系统,将土壤颗粒有效球面直径 $>50 \mu\text{m}$, $50\sim 2 \mu\text{m}$ 和 $<2 \mu\text{m}$ 的分别划分为砂粒、粉粒和黏粒^[34]。研究结果表明,不同盖度高寒草地表层土壤的粒度组成和粒度参数均会发生改变,在未经退化的高寒草地表层土壤中,粉粒含量是砂粒含量的 2.15 倍。随着草地植被盖度降低,不同盖度

表2 高寒草地不同盖度土壤粒径参数

盖度/%	黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%	平均 粒径/ μm	中值 粒径/ μm	峰态	偏度	分形 维数
0	$6.68 \pm 0.28\text{d}$	$42.65 \pm 0.47\text{f}$	$50.67 \pm 0.46\text{a}$	144.96	89.11	1.41	0.52	2.87
5	$7.65 \pm 0.56\text{c}$	$46.03 \pm 0.63\text{e}$	$46.32 \pm 0.52\text{b}$	127.09	42.03	1.33	0.78	2.84
25	$7.43 \pm 0.14\text{c}$	$49.89 \pm 0.34\text{d}$	$42.68 \pm 0.38\text{c}$	125.03	39.57	1.38	0.80	2.81
50	$8.68 \pm 0.43\text{b}$	$55.78 \pm 0.40\text{c}$	$35.54 \pm 0.58\text{d}$	54.67	34.47	1.44	0.66	2.83
75	$8.89 \pm 0.28\text{b}$	$58.59 \pm 0.19\text{b}$	$32.52 \pm 0.37\text{e}$	53.19	33.90	1.47	0.66	2.85
100	$9.43 \pm 0.29\text{a}$	$61.86 \pm 0.34\text{a}$	$28.71 \pm 0.55\text{f}$	51.23	32.17	1.51	0.67	2.87

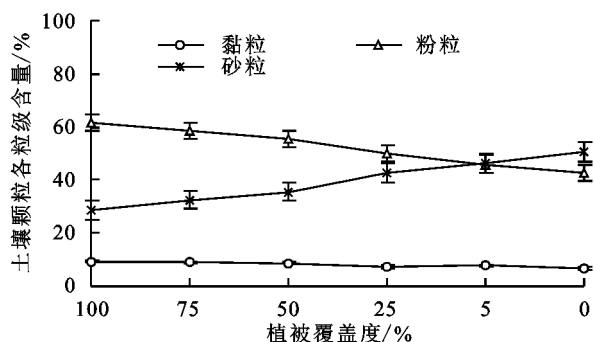


图4 黏粒、粉粒、砂粒含量随覆盖度的变化

3.2 鼠丘土壤粒径组成变化

高寒草地出现较严重的退化,与区域内啮齿动物活动有密切关系,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,土壤疏松裸露,

进而激发土壤风蚀作用。对比高原鼠兔和高原鼢鼠各自新旧状态两种鼠丘表层土壤粒径组成可知,高原鼠兔新鼠丘和高原鼢鼠新鼠丘表层土壤粒径组成几乎一致($p>0.05$),且其细微颗粒含量略低于未经扰动的草地表层土壤,分析认为组成新鼠丘土壤特征主要取决于鼠类掘穴活动从高寒草地底部带出的土壤性质,这也与高寒草地土壤随深度增加,细颗粒含量逐渐增多的结论一致^[35]。相比之下,形成时间较长的旧鼠丘经受了持续的侵蚀作用,其土壤粒径组成发生了显著的变化,旧鼠丘表层土壤粒径表现出大于 $50\mu\text{m}$ 的含量大幅度增加,粒径低小于 $50\mu\text{m}$ 的土壤颗粒含量明显降低,且高原鼠兔和高原鼢鼠旧鼠丘粒径组成也存在一定的差异(表3)。

表3 草地退化区2类鼠丘土壤粒度组成

鼠丘土壤类型	1000~50 μm	500~250 μm	250~100 μm	100~50 μm	50~20 μm	20~2 μm	<2 μm
鼠兔新鼠丘	0.36c	7.57c	7.39c	11.69c	38.24a	25.37a	9.38ab
鼢鼠新鼠丘	0.17c	7.22c	7.21c	12.64b	37.02ab	25.21ab	10.53a
鼠兔旧鼠丘	2.72b	20.84a	22.90a	15.39a	18.59d	16.03d	3.53c
鼢鼠旧鼠丘	3.24a	18.12b	19.93b	15.28a	20.73c	18.49c	4.21c

注:同列数据后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鼠丘类型之间差异显著($p<0.05$),下同。

从图5可以看出,2类新生鼠丘的土壤粒径组成差异性不大,而经过侵蚀的旧鼠丘粒径小于 $50\mu\text{m}$ 的土壤颗粒含量显著降低,尤其是粒径在 $20\sim 50\mu\text{m}$ 范围内的颗粒含量降低幅度较大,而粒径大于 $50\mu\text{m}$ 的土壤颗粒含量不断增高,且高于完全退化草地,说明在后期的土壤侵蚀过程中,细颗粒土壤的流失最为严重。除此之外,高原鼠兔旧鼠丘的土壤粒径细微颗粒含量略低于高原鼢鼠旧鼠丘,分析认为2类旧鼠丘颗粒含量的差异性与2类啮齿动物的活动方式以及对土层的机械扰动程度有关,与地下活动的高原鼢鼠相比,尽管高原鼠兔的体型较小,但其掘穴活动对土壤的扰动破坏程度大,而且高原鼠兔在地下挖掘的深度较浅,并频繁出没洞穴,对堆积的鼠丘土壤造成反复的踩踏和扰动,致使鼠丘土壤团聚体的破碎程度加剧,结构更加疏松,在风水等外力侵蚀作用下细粒土更易遭受侵蚀和流失。

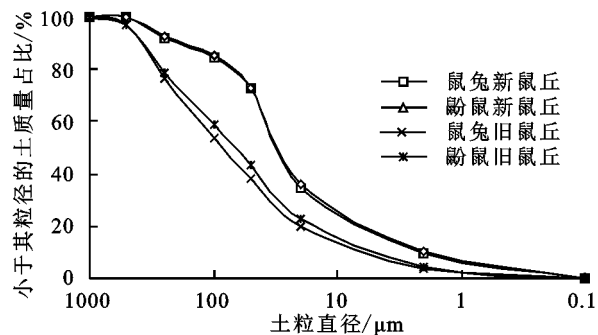


图5 不同鼠丘类型土壤粒径组成变化

对新旧鼠丘表层土壤3种粒级颗粒分析可知,经受侵蚀的高原鼠兔和高原鼢鼠旧鼠丘的黏粒含量较新鼠丘分别减少了5.85%,6.32%,粉粒分别减少了28.99%,23.01%,砂粒分别增加了34.84%,29.33%。侵蚀后2类鼠丘表层土壤的中值粒径较侵蚀前分别增加了 $72.12\mu\text{m}$ 和 $64.65\mu\text{m}$,侵蚀前后2类鼠丘表层土壤平均粒径增加了近2倍,鼠丘土壤粗粒化现象

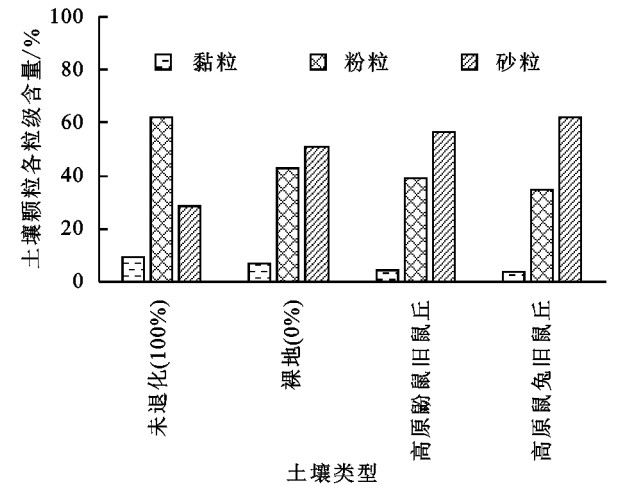
明显(表 4)。此外,土壤粒径组成在两侧分布较为集中,偏度上呈现正偏;侵蚀后鼠丘表层土壤分形维数的增加幅度不明显。

为进一步阐明草地退化区土壤粒径含量的变化,对 2 类旧鼠丘、未退化的原生草地和裸地的土粒含量进行对比分析,结果见图 6。从图中可以看出,裸地、2 类旧鼠丘的表层土壤砂粒含量均显著明显高于未

退化原生草地表层土壤砂粒含量($p<0.05$),土壤砂粒含量由大到小依次为高原鼠兔鼠丘>高原鼯鼠鼠丘>裸地>未退化区,其中裸地砂粒含量较未退化区提高了 21.96%,高原鼯鼠和高原鼠兔鼠丘的砂粒含量分别增加了 27.86%和 33.14%。这一结果说明鼠丘的形成与土壤侵蚀导致草地土壤粗粒化,从而加剧了高寒草地土壤的退化。

表 4 草地退化区鼠丘土壤粒径参数

鼠丘类型	黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%	平均粒径/ μm	中值粒径/ μm	峰态	偏度	分形维数
高原鼠兔新鼠丘	9.38 \pm 0.52ab	63.61 \pm 0.75a	27.01 \pm 0.33c	50.52	31.40	1.53	0.68	2.87
高原鼯鼠新鼠丘	10.53 \pm 0.34a	62.23 \pm 0.59ab	27.24 \pm 0.41c	50.21	31.01	1.52	0.68	2.86
高原鼠兔旧鼠丘	3.53 \pm 0.27c	34.62 \pm 0.43d	61.85 \pm 0.27a	153.37	103.52	1.25	0.47	2.90
高原鼯鼠旧鼠丘	4.21 \pm 0.63c	39.22 \pm 0.47c	56.57 \pm 0.64b	148.82	95.66	1.32	0.50	2.91



注:不同大写字母表示同一粒径分级不同土壤类型间含量差异显著($p<0.05$)。

图 6 裸地、未退化草地与 2 类旧鼠丘土壤粒径含量的对比

4 讨论

(1) 植被盖度对土壤的影响。通过图 4 可以发现土壤颗粒组成与植被盖度存在明显的相关关系,植被盖度越低,细颗粒含量越低,植被盖度的变化可以在一定程度上反映其土壤颗粒组成变化。分析认为,植被在抵抗土壤细颗粒流失发挥着重要的作用,植被具有良好的抑制水分蒸发的作用,植被盖度越高,土壤含水量也就越高,一定含量的水分可以促进颗粒间相互黏结作用,高盖度植被根系也更发达,根与土体相互作用可以形成根—土复合土,根—土复合土的强度随根系含量的增加其强度也更大^[36],其在抵抗侵蚀能力上也会发挥着重要的作用。植被在抵抗水力侵蚀发挥着重要的作用,植被可以拦截水流和土壤颗粒,降低水土流失,同样植被在抵抗风蚀方面也发挥着重要的作用,植被覆盖减弱了风对地表的直接吹

蚀,提高了地表砂粒的起动风速^[37],其空气动力学粗糙度随着植被增加而增加。结合野外调查和气象数据资料得知,黄河源高寒草地区域每年有近 4 个月的时间遭受集中降雨不间断侵蚀,并伴有近 4 个月的冻融交替作用,冻融的反复交替作用加剧土壤的风力、水力侵蚀率,在众多的侵蚀作用中,风蚀是改变土壤颗粒组成的最主要因素^[38-39],在以风蚀为主的各种侵蚀作用下,细颗粒不断流失,邢恩德等^[40]研究表明输沙量随着植被盖度的增加而减少。除此之外,高盖度草地土壤有机质含量也越高,而有机质含量与土壤抗风蚀强度呈正相关关系^[41]。孙悦超等^[42]研究表明在 30 cm 残茬高度、50%植被盖度下保护性耕作农田的平均抗风蚀效率可达 80.55%,这也与本文提高植被盖度到 50%以上能够有效抑制土壤流失的研究结论一致。

(2) 鼠类活动对植被退化及草地土壤的影响。黄河源区生态价值极高,是重点的生态保护区,在 20 世纪,在该区存在的主要的生态问题是过度放牧,进入 21 世纪以来,随着加强放牧管理,人与自然的矛盾得到缓解,生态环境不断恢复,但与此同时,良好的生态环境也为野生小型啮齿类动物繁衍提供了有利的条件,鼠类种群能够快速增长。适量的小型啮齿类动物活动对高寒草地生态系统具有积极作用,如促进生态系统的群落演化和能量交换等。然而,小型啮齿类动物活动对高寒草地脆弱生态系统造成的危害也不容小觑,尤其是当小型啮齿类动物活动超过草地承载力时,会对草地产生巨大的破坏现象,其中最主要的是鼠类大肆啃食草地,降低了植被覆盖度,其掘土造穴活动对土层的稳定性和及土壤团粒结构产生直接的机械扰动作用^[43],致使地表受扰动的地表

松散细粒土壤不断流失,使粒度较大的砂粒聚集(图6)。可见,啮齿动物活动是引起草地土壤和植被的退化一个重要因素。从草地退化的机理分析,土壤退化是引起草地退化的先决条件,植被遭受破坏和草地稳定性失衡是最直接的表现形式,尤其在恶劣气候条件下的啮齿动物活动区,地表大量鼠丘和退化斑块的发育加剧了土壤及其养分流失^[44-45],而且高寒地区的植被自然恢复的速度极其缓慢,无法在短时间内形成植被的固土作用和生态恢复,地表土壤受外力持续侵蚀的时间较长,从而加剧了土壤的粗粒化和沙化。

5 结论

(1) 高寒草地表面土壤平均粒径随盖度的降低而增加,其中粒径小于 $2\ \mu\text{m}$ 的土壤粒径含量变化幅度最小, $2\sim 20\ \mu\text{m}$ 的粒径含量变化次之, $20\sim 50\ \mu\text{m}$ 和 $50\sim 250\ \mu\text{m}$ 的粒径含量变化幅度最大,粒径在 $20\sim 50\ \mu\text{m}$ 范围内的土粒是土壤侵蚀过程中相对敏感的颗粒。

(2) 草地表层土壤粒径组成主要以粉粒为主,黏粒、粉粒含量和盖度间呈线性正相关,砂粒含量与盖度间呈线性负相关。与未退化的原生草地土壤相比,裸地砂粒含量增加了 21.96%,高原鼯鼠和高原鼠兔鼠丘的砂粒含量分别增加了 27.86% 和 33.14%。

(3) 形成时间相同的 2 类鼠丘土壤粒径组成特征差异性不明显,而新旧鼠丘间存在明显差异,高原鼠兔和高原鼯鼠旧鼠丘的黏粒含量较新生鼠丘分别减少了 5.85%, 6.32%, 粉粒分别减少了 28.99%, 23.01%, 砂粒分别增加了 34.84%, 29.33%, 中值粒径分别增加了 $72.12\ \mu\text{m}$, $64.65\ \mu\text{m}$, 土壤平均粒径增加了近 2 倍,鼠丘土壤的侵蚀呈现出土壤粗粒化和沙化现象。

参考文献:

- [1] Lu C X, Yu G, Yu X, et al. Wind tunnel simulation and evaluation of soil conservation function of alpine grassland in Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Ecological Economics*, 2013, 86: 16-20.
- [2] 赵志平, 吴晓蕾, 李果, 等. 黄河源区高寒草地 NDVI 格局与梯度变化[J]. *草业科学*, 2013, 245(12): 1917-1925.
- [3] Huang X Z, Liu S S, Dong G H. Early human impacts on vegetation on the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau during the middle to late Holocene [J]. *Progress in Physical Geography*, 2017, 41: 286-301.
- [4] Chen B X, Zhang X Z, Tao J, 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.
- [5] Jiang C, Li D Q, Wang D W, et al. Quantification and assessment of changes in ecosystem service in the Three-River Headwaters Region, China as a result of climate variability and land cover change [J]. *Ecological Indicators*, 2016, 66(2): 199-211.
- [6] Pan T, Zou X T, Liu Y J, et al. Contributions of climatic and non-climatic drivers to grassland variations on the Tibetan Plateau [J]. *Ecological Engineering*, 2017, 108: 307-317.
- [7] 杨元武, 李希来, 周华坤. 高寒草甸退化草地土壤特性分析[J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(24): 14687-14690.
- [8] 魏强, 王芳, 陈文业, 等. 黄河上游玛曲不同退化程度高寒草地土壤物理特性研究[J]. *水土保持通报*, 2010, 30(5): 16-21.
- [9] 杨永胜, 张莉, 未亚西, 等. 退化程度对三江源泽库高寒草甸土壤理化性质及持水能力的影响[J]. *中国草地学报*, 2017, 39(5): 54-61.
- [10] 舒向阳, 胡玉福, 蒋双龙, 等. 川西北草地沙化对土壤颗粒组成和土壤磷钾养分的影响[J]. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(8): 173-179.
- [11] 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 Range-land Journal*, 2017, 39(2): 133-144.
- [12] 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.
- [13] Chen J J, Yi S H, Qin Y. The contribution of plateau pika disturbance and erosion on patchy alpine grassland soil on the Qinghai-T-144 Tibetan Plateau: Implications for grassland restoration [J]. *Geoderma*, 2017, 297: 1-9.
- [14] 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.
- [15] 曾鹏, 赵燕兰, 彭云煦, 等. 高原鼠兔扰动作用下高寒沙化草地土壤特性变化特征[J]. *草原与草业*, 2018, 30(1): 50-53.
- [16] 刘文玲, 马育军, 吴艺楠, 等. 青海湖流域高原鼠兔扰动对不同地表类型土壤水分特征的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2017, 15(2): 62-69.
- [17] 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.
- [18] 何京丽, 李锦荣, 邢恩德, 等. 半干旱草原潜在土壤风力侵蚀空间格局研究[J]. *水土保持研究*, 2012, 19(5): 12-15.
- [19] 张正德, 董治宝. 土壤风蚀对表层土壤粒度特征的影响

- [J].干旱区资源与环境,2012,26(12):86-89.
- [20] 闫玉春,唐海萍,张新时,等.基于土壤粒度分析的草原风蚀特征探讨[J].中国沙漠,2010,30(6):1263-1268.
- [21] 张继义,赵哈林.退化沙质草地恢复过程土壤颗粒组成变化对土壤—植被系统稳定性的影响[J].生态环境学报,2009,18(4):1395-1401.
- [22] 黄昕,蒙仲举,汪季,等.希拉穆仁草原退化评价及地表风蚀颗粒表征[J].水土保持研究,2016,23(5):141-146.
- [23] 赵哈林,周瑞莲,赵学勇,等.呼伦贝尔沙质草地土壤理化特性的沙漠化演变规律及机制[J].草业学报,2012,21(2):1-7.
- [24] 高君亮,高永,罗风敏,等.表土粒度特征对风蚀荒漠化的响应[J].科技导报,2014,32(25):20-25.
- [25] Wang X M, Lang L L, Yan P, et al. Aeolian processes and their effect on sandy desertification of the Qinghai-Tibet Plateau: A wind tunnel experiment [J]. Soil and Tillage Research, 2016, 158: 67-75.
- [26] 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.
- [27] 王保辉,朱连奇.同布根形式对草本植物根土复合体抗剪强度试验[J].水土保持学报,2018,32(6):118-122.
- [28] 李本锋,朱海丽,谢彬山,等.黄河源区河岸带高寒草甸植物根—土复合体抗拉特性研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39(2):424-432.
- [29] 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.
- [30] 姚慧茹,李栋梁.1971—2012年青藏高原春季风速的年际变化及对气候变暖的响应[J].气象学报,2016,74(1):60-75.
- [31] 游波,王保田,赵辰洋.激光粒度仪在土工颗粒分析中的应用研究[J].人民长江,2012,43(24):50-54.
- [32] 蒙仲举,王猛,高永,等.基于土壤粒度参数的荒漠草原地表粗粒化过程[J].水土保持研究,2017,24(6):22-28.
- [33] 董智今,展秀丽,丁小花.毛乌素沙地西南缘不同土地利用类型土壤颗粒分形特征[J].水土保持研究,2022,29(3):43-48,56.
- [34] 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.
- [35] 申紫雁,刘昌义,胡夏嵩,等.黄河源区高寒草地不同深度土壤理化性质与抗剪强度关系研究[J].干旱区研究,2021,38(2):392-401.
- [36] 张学宁,王德成,尤泳,等.草地切根下根土复合体本构关系研究[J].农业机械学报,2022,53(7):337-346.
- [37] 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.
- [38] 杨钦,郭中领,王仁德,等.河北坝上不同土地利用方式对土壤风蚀的影响[J].干旱区资源与环境,2017,31(2):185-190.
- [39] 孙传龙,张卓栋,邱倩倩,等.锡林郭勒草地表层土壤粒度分形特征及其与风蚀的关系[J].中国沙漠,2017,37(5):978-985.
- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] 孙悦超,麻硕士,陈智,等.植被盖度和残茬高度对保护性耕作农田防风蚀效果的影响[J].农业工程学报,2010,26(8):156-159.
- [43] 谈静,才文代吉,王海春,等.青藏高原高寒草甸鼠丘蚀蚀特征及影响因素[J].中国草地学报,2020,42(1):147-153.
- [44] 鲍根生,王宏生,曾辉,等.不同形成时间高原鼯鼠鼠丘土壤养分分配规律[J].生态学报,2016,36(7):1824-1831.
- [45] Li G R, Li X L, Li J F, 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.