

黄土高原地下啮齿类动物挖掘对土壤侵蚀的贡献

白晓亮^{1,2}, 耿豪鹏^{1,2}, 刘茹^{1,2}, 程维明³, 潘保田^{1,2}

(1. 兰州大学资源环境学院, 兰州 730000; 2. 兰州大学西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000;
3. 中国科学院地理科学与资源研究所 地理信息科学与技术全国重点实验室, 北京 100101)

摘要: 地下啮齿类动物挖掘活动是影响坡面土壤再分配和土壤侵蚀的因素之一, 对其进行深入研究有助于理解土壤侵蚀的复杂机制。为探究黄土高原地下啮齿类动物挖掘活动的空间分布特征及对土壤侵蚀的影响, 本文对位于黄土高原中部的庆阳市环县平顶山一处典型坡面(665 m²)进行了为期6个月的定点重复监测, 采用无人机航测结合野外调查, 追踪了地下啮齿类动物挖掘活动的空间分布, 分析了挖掘活动对土壤性质的影响, 并量化了研究坡面内挖掘活动引起的土壤侵蚀量。结果显示: ① 地下啮齿类动物采食活动和掘穴活动均偏好于分布在坡度较缓、水分分散区和凸形坡区域。② 与未扰动土壤相比, 挖掘活动产生的土丘容重降低了14% ($P < 0.05$), 孔隙度和饱和导水率均增加了11% ($P < 0.05$)。③ 观测期内地下啮齿类动物的挖掘活动将0.13 t的土壤翻覆至地表, 土壤再分配对应的坡面搬运通量约为2.18 cm³/(cm·a)。如果全部转化为土壤侵蚀, 其侵蚀模数约为397 t/(km²·a)。上述结果表明挖掘活动是黄土高原坡面土壤再分配的重要营力之一, 大约贡献了土壤侵蚀总量的10.1%, 需要在今后的水土流失评估与模型计算中予以关注。

关键词: 地下啮齿类动物; 挖掘活动; 土壤侵蚀; 黄土高原

DOI: 10.11821/dlxb202505011

1 引言

土壤侵蚀是世界上最严重的环境问题之一^[1], 不仅威胁着全球陆地生态系统的稳定^[2], 而且对人类社会的可持续发展构成了巨大挑战。黄土具有大孔隙、质地疏松以及抗蚀性差等特性^[3], 这些特性使黄土极易受到水蚀和风蚀的影响^[4], 从而造成严重的土壤侵蚀问题。特别是黄土高原地区, 因其特有的地貌、土壤性质和气候条件, 成为了世界上土壤侵蚀和水土流失最为严重的地区之一^[5]。20世纪50年代以来, 黄土高原地区针对水土流失等严重的生态环境问题, 实施了一系列水土保持措施, 包括建设淤地坝、梯田等工程治理措施, 以及植树造林、退耕还林还草、植被自然恢复等生态治理措施^[6]。这些举措提高了黄土高原生态环境质量, 取得了显著的成效^[7-8]。然而, 随着植被的逐步恢复和生态环境的改善, 一些地区地下啮齿类动物因获得更丰富的食物资源和更优越的栖息环境, 导致数量呈现出急剧增加的趋势, 这引发了人们的关注和担忧^[9-10]。

地下啮齿类动物是一种终生营地下生活的穴居动物, 其挖掘活动主要分为2类: 一类是以挖掘居住洞穴为主的掘穴活动; 另一类是以采食植物根系为主的采食活动, 这些活

收稿日期: 2024-05-07; 修订日期: 2024-12-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(42322101, 42130110) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.42322101, No.42130110]

作者简介: 白晓亮(1997-), 女, 甘肃平凉人, 硕士生, 研究方向为生物地貌过程研究。E-mail: 220220949280@lzu.edu.cn

通讯作者: 耿豪鹏(1985-), 男, 河南襄城人, 博士, 教授, 研究方向为地表过程与数值模拟研究。

E-mail: hpgeng@lzu.edu.cn

动对土壤具有显著影响。从一般意义上看,其影响主要体现在以下3个方面:一是掘穴活动和采食活动形成的土丘和洞道系统改变了土壤的理化性质^[11];二是挖掘活动会影响土壤微生物,并使草地出现大量异质性斑块^[12];三是其挖掘产生的土丘作为松散沉积物来源,更易受到风蚀和水蚀的影响^[13-14]。此外,它们挖掘的洞穴还会诱发黄土洞穴的形成,进而直接或间接地促进土壤侵蚀的发生^[15]。尽管已经有一些研究关注了地下啮齿类动物挖掘活动对土壤性质和侵蚀的影响,但其对土壤侵蚀的定量研究仍相对较少。Gabet^[16]已经对穴居动物挖掘活动搬运的沉积物进行了定量研究并建立了量化方法,但这一方法在黄土高原地区尚未得到充分应用。目前,黄土高原地区的土壤侵蚀研究主要集中在风蚀和水蚀等物理侵蚀过程^[17],对于动物挖掘活动,尤其是地下啮齿类动物的挖掘活动,与坡面沉积物搬运及其对土壤侵蚀的贡献研究较少。

基于上述因素,本文选取庆阳市环县平顶山一处典型坡面为研究靶区,利用无人机航测和差分GPS定位技术获取地形影像和洞穴位置,分析地下啮齿类动物挖掘活动的空间分布特征及其对土壤性质的影响,并对坡面内挖掘活动的土壤搬运通量及对土壤侵蚀的贡献进行了量化研究。研究结果将有助于理解和评价地下啮齿类动物对土壤侵蚀的贡献程度,为鼠害治理及生态系统的改善提供科学依据。同时,这也将为黄土高原地区的土壤侵蚀问题提供新的视角和研究思路,推动该地区生态环境的保护与可持续发展。此外,本文通过追踪黄土高原地下啮齿类动物挖掘活动的空间分布,并探究挖掘活动对土壤性质的影响以及对土壤侵蚀的贡献,有助于深入了解该地区土壤侵蚀过程中地下啮齿类动物挖掘活动的作用机制,也能为制定黄土高原生态系统恢复与保护策略提供参考依据。

2 研究区概况

本文研究区位于甘肃省庆阳市环县平顶山的一处典型坡面(36°38′22″N~36°38′23″N, 107°33′51″E~107°33′52″E)(图1),研究地块海拔高度范围为1531~1540 m,总面积约为665 m²,平均坡度为13.16°。研究地块的土壤类型为栗钙土,土壤质地为粉砂壤土。植被类型为天然半干旱草地,优势植物主要有长芒草(*Stipa Bungeana*)、赖草(*Leymus Secalinus*)以及茵陈蒿(*Artemisia Capillaris*)等,草地植物4月开始返青,10月陆续枯黄。研究地块有明显的地下啮齿类动物挖掘痕迹,且人类活动较少。

依据《黄土高原地区综合治理规划大纲(2010—2030年)》^①,研究地块位于黄土高原沟壑区。研究地块的气候类型为温带大陆性气候,年平均降水量为400~500 mm,年平均温度为8.5~9.2 °C,黄土厚度范围为150~200 m^[18]。研究地块的土壤质地松散,具有较高的侵蚀敏感性,处于强度侵蚀状态5000~8000 t/(km²·a)^[19]。

3 研究方法

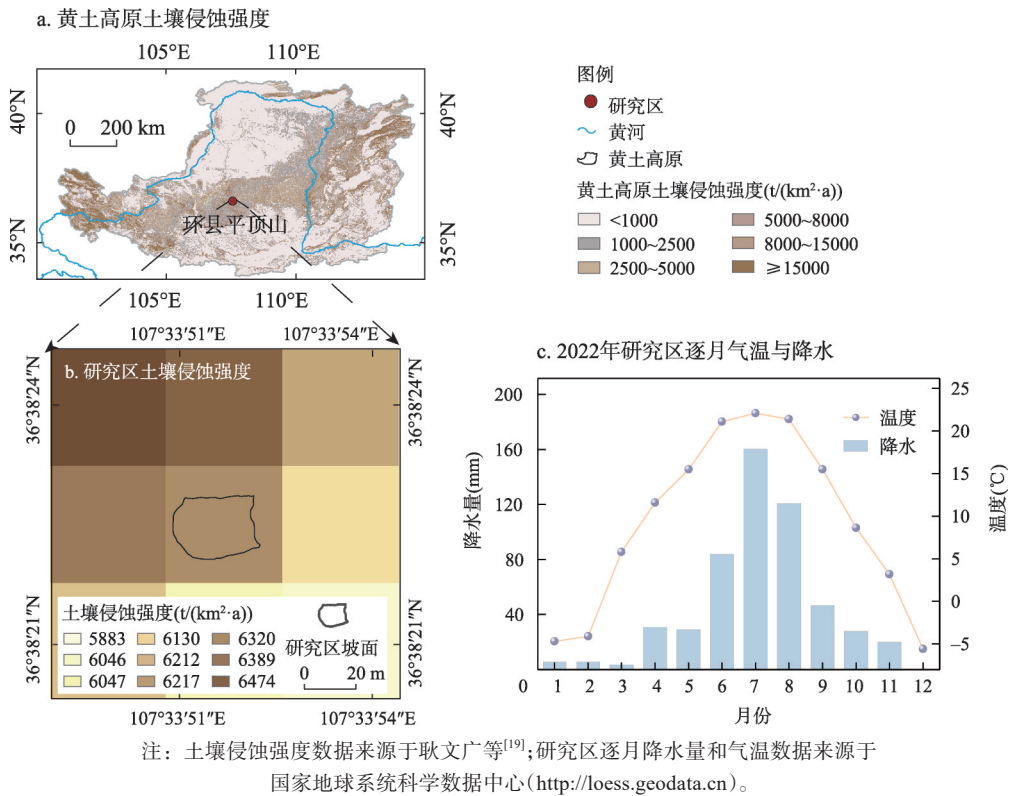
3.1 土壤搬运通量、扩散系数及侵蚀模数计算

对于坡面土壤搬运通量的计算,本文使用Gabet^[16]建立的地下啮齿类动物挖掘活动的沉积物搬运通量公式:

$$A' = A \times \cos \alpha \times \cos \theta \quad (1)$$

$$B' = B \times \cos \theta \quad (2)$$

① 国家发展改革委,水利部,农业农村部,国家林业和草原局.《黄土高原地区综合治理规划大纲(2010—2030年)》. <https://www.gov.cn/gzdt/att/att/site1/20110117/001e3741a2cc0e9e318c01.pdf>.



注：土壤侵蚀强度数据来源于耿文广等^[19]；研究区逐月降水量和气温数据来源于国家地球系统科学数据中心 (<http://loess.geodata.cn>)。

图1 黄土高原土壤侵蚀强度及研究区概况

Fig. 1 The intensity of soil erosion on the Loess Plateau and an overview of the study area

$$q_s = MPR \times V \times (A' + B') \quad (3)$$

式中： A' 是从洞穴质心到洞口的搬运距离的水平分量 (m)； A 是地下最短搬运距离 (m)； α 是挖掘角度 ($^\circ$)； θ 是坡度 ($^\circ$)； B' 是地表搬运距离的水平分量 (m)； B 是地表搬运距离，即从洞口到土丘质心的距离 (m)； q_s 是土壤搬运通量 ($m^3/(m \cdot a)$)； MPR 是土丘产生速率 (个/ $(m^2 \cdot a)$)； V 是平均土丘体积 (m^3) (图2)。

坡面扩散系数为土壤搬运通量与坡度正切值的比值^[20]，即：

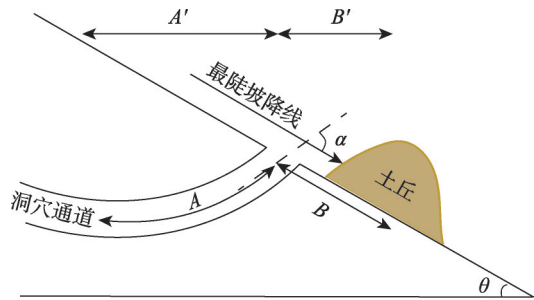
$$D = \frac{q_s}{s} \quad (4)$$

式中： D 为扩散系数 (m^2/a)； q_s 为土壤搬运通量 ($m^3/(m \cdot a)$)； s 是坡面的坡度正切值 (无量纲)。

侵蚀模数反映了土壤侵蚀强度，即：

$$q = \frac{\rho_s \times V'}{A \times T} \quad (5)$$

式中： q 为土壤侵蚀模数 ($t/(km^2 \cdot a)$)； ρ_s 是坡面土壤容重 (g/cm^3)； V' 是指挖掘活动搬运的土丘总体积 (cm^3)； A 是研究区的面积 (km^2)； T 是监测时间 (a)。



注：修改自 Gabel^[16]。

图2 地下啮齿类动物洞穴和土丘剖面示意

Fig. 2 Diagram of burrow and mound profiles of subterranean rodents

3.2 野外数据获取

为满足繁殖和获取食物的需要,地下啮齿类动物在每年4—5月和9—10月期间造丘活动频繁^[21],因此野外工作分别于2023年4月和10月在环县平顶山的一处坡面进行。使用无人机(DJI Phantom 4 Pro V2.0)对研究区进行航拍,并利用Pix4Dmapper拼接影像获得高分辨率正射影像(Digital Orthophoto Model, DOM)和数字表面模型(Digital Surface Model, DSM)。Pix4Dmapper软件处理生成的DSM与影像空间分辨率一致,均为0.1 m。对处理后的DSM用ArcGIS进行填洼处理,并提取坡度、平面曲率和剖面曲率等地形参数。平面曲率与流经坡面水流的汇聚与分散有关;剖面曲率反映了坡型,影响着水流速度^[22]。根据曲率数值将平面曲率划分为汇聚(<0)、直线(0)、发散(>0)3种类型,将剖面曲率划分为凸形坡(<0)、直线坡(0)、凹形坡(>0)3种类型^[22]。

野外地下啮齿类动物洞穴分为采食洞和居住洞。采食洞较浅,洞壁较粗糙且无拐弯;居住洞较深,洞壁较光滑且有拐弯。为获取洞穴的空间分布特征,本文使用差分GPS定位2次野外观测的居住洞和采食洞,在ArcGIS中进行对比,获得6个月内新增洞穴的空间分布。同时,测量洞穴的长短半径、深度、挖掘角度以及土丘的长短半径、高度和地表搬运距离,将所有参数进行记录用于挖掘数据分析和土壤搬运通量的计算。

3.3 土壤性质测定

为了探究地下啮齿类动物挖掘活动对土壤性质的影响,在研究区使用环刀采样器($\varphi=5\text{ cm}$ 、 $H=5\text{ cm}$ 、 $V=100\text{ cm}^3$)采集了土丘样品和未扰动土壤样品。土丘样品取自地下啮齿类动物挖掘产生的新鲜土丘,这些新鲜土丘的选择标准为:土丘是位于洞穴口处的单独的丘、高度大于15 cm(确保使用环刀采集的土壤为土丘土壤,避免混合土样)且无植被生长。未扰动的土壤样品取自距离新鲜土丘1~2 m范围内、未被地下啮齿类动物扰动的土壤。由于在筛选所有土丘后仅有5个符合标准的土丘样品,这些土丘样品在坡面随机分布,因此共采集了5个土丘样品和5个用于对照的未扰动土壤样品。所采集的样品用于土壤容重、土壤孔隙度、土壤饱和导水率以及粒度组成等土壤性质的实验测定和分析。实验均在兰州大学资源环境学院西部环境教育部重点实验室进行。

将采集的土壤样品置于装有清水的容器中浸泡至少24 h以达到饱和状态,土壤样品在浸泡之前,需在环刀底部放置与底盖相同大小的滤纸以避免样品中的土壤颗粒在后续实验过程中流失。土壤样品完成浸泡之后,使用恒定水头法测定土壤的饱和导水率^[23]。随后将土壤样品放置于100 °C烘箱内烘干24 h。土壤容重可通过烘干后的土样质量与烘干前的土样体积的比值计算得出。土壤孔隙度即单位体积土样内土壤孔隙所占的体积,可通过土壤容重和土壤比重(2.65 g/cm^3)^[24]计算得出。土壤粒度组成由Mastersizer 2000激光粒度仪测得,并将测得的粒度按照美国制土壤分级标准进行划分:砂粒为0.050~2.000 mm,粉粒为0.002~0.050 mm,黏粒为 $<0.002\text{ mm}$ ^[25]。

4 结果与分析

4.1 洞穴空间分布特征

在ArcGIS中提取采食活动和掘穴活动所处位置的坡度、平面曲率和剖面曲率。采食活动的地形条件分布频率如图3a~3c。采食洞分布在 $5^\circ\sim 25^\circ$ 坡度范围内,其中81%的采食洞分布在 $10^\circ\sim 20^\circ$ 坡度范围内(图3a)。57%的采食洞分布在平面曲率 >0 的区域(图3b),表明地下啮齿类动物的采食活动偏好于分布在流水分散区。采食洞在剖面曲率 >0 和 <0 的区域均有分布,但分布在剖面曲率 <0 区域的采食洞略多(图3c),说明采食活动更偏向于凸形坡。

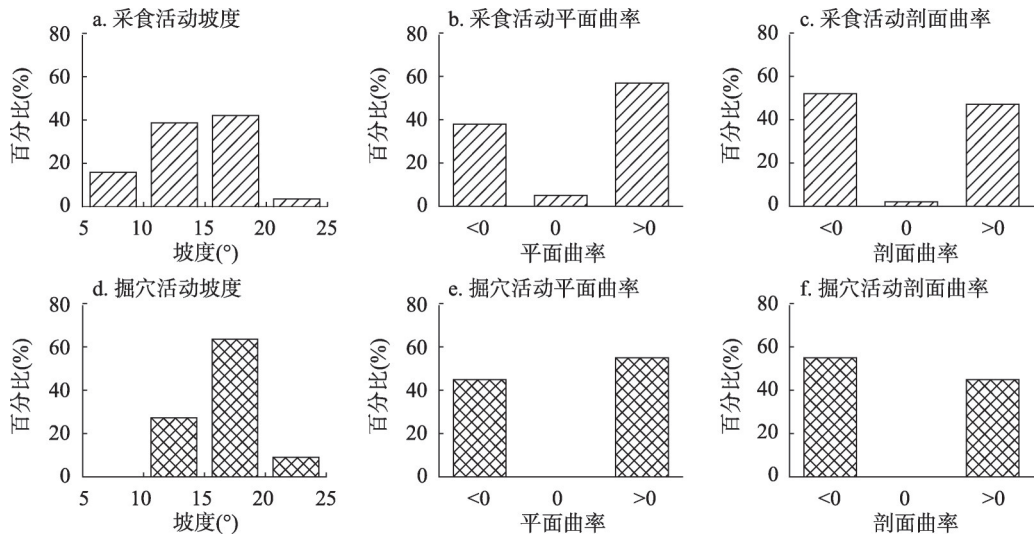


图3 采食活动和掘穴活动地形条件分布频率

Fig. 3 Frequency distribution of topographic conditions for foraging and burrowing activities

掘穴活动的地形条件分布频率如图3d~3f。居住洞分布在10°~25°坡度范围内,其中91%的居住洞分布在10°~20°坡度范围内(图3d)。分布在平面曲率>0(图3e)和剖面曲率<0(图3f)区域的居住洞均占55%,说明地下啮齿类动物的掘穴活动偏好于分布在流水分散区和凸形坡区域。

4.2 土丘性质与机械组成

在SPSS软件中,通过对未扰动土壤和地下啮齿类动物挖掘活动产生的新鲜土丘进行比较分析,可以观察到土壤性质的变化(表1)。实验结果显示,新鲜土丘相比于未扰动土壤容重降低了13.91% ($P < 0.05$),孔隙度增加了10.60% ($P < 0.05$),饱和导水率增加了11.49% ($P < 0.05$)。新鲜土丘容重降低说明地下啮齿类动物挖掘活动会使土壤松散化,进而导致土丘孔隙度和饱和导水率增加。此外,与未扰动土壤相比,新鲜土丘黏粒、粉粒和砂粒的含量变化并不显著 ($P > 0.05$),这表明地下啮齿类动物挖掘活动并未显著改变土壤的机械组成。

表1 土丘与未扰动土壤性质对比

Tab. 1 Comparison of soil properties between mounds and undisturbed soil

样品	容重(g/cm ³)	孔隙度(%)	饱和导水率(cm/s)	机械组成(%)		
				砂粒 (0.05~2 mm)	粉粒 (0.002~0.05 mm)	黏粒 (<0.002 mm)
新鲜土丘	0.99±0.07 ^b	62.6±2.46 ^a	0.000922±0.000027 ^a	22.84±7.84 ^a	70.20±6.33 ^a	6.94±1.55 ^a
未扰动土壤	1.15±0.06 ^a	56.6±2.32 ^b	0.000827±0.000028 ^b	24.23±8.29 ^a	68.56±6.84 ^a	7.02±1.79 ^a

注:表中实验数据为平均值±标准误差,同列不同小写字母表示不同组间差异显著($P < 0.05$)。

4.3 挖掘活动的土壤搬运通量

4—10月这6个月观测期内,在665 m²的研究坡面共记录新增采食洞穴58个,新增居住洞穴11个。对研究区新增的采食洞和居住洞的洞穴参数进行统计(表2)。采食洞洞穴直径为5~10 cm,洞穴深度为8~40 cm,平均洞穴深度为19 cm,通过采食活动产生的平均土丘体积为1037 cm³。居住洞洞穴直径为6~15 cm,洞穴深度为72~123 cm,平均洞穴深度为104 cm,通过掘穴活动产生的平均土丘体积为6610 cm³。通过采食活动和掘穴活

表2 采食洞和居住洞洞穴参数

Tab. 2 Parameters of foraging burrows and dwelling burrows

洞穴类型	数量(个)	洞穴直径(cm)	洞穴深度(cm)	平均洞穴深度(cm)	平均土丘体积(cm ³)	土丘总体积(cm ³)
采食洞	58	5~10	8~40	19	1037	60146
居住洞	11	6~15	72~123	104	6610	72710

动分别产生的土丘体积空间分布如图4。结果表明,通过采食活动产生的土丘体积小但数量多,而通过掘穴活动产生的土丘体积大但数量少。观测期内,地下啮齿类动物通过挖掘活动搬运至地表的土丘总体积为132833 cm³,实验测得的土丘容重为0.99 g/cm³,意味着地下啮齿类动物的挖掘活动将0.13 t的土壤翻覆至地表。

对用于计算观测期内研究坡面地下啮齿类动物采食活动和掘穴活动的土壤搬运通量参数值分别进行统计(表3)。根据公式(1)~(3),计算得到4—10月这6个月内地下啮齿类动物采食活动土壤搬运通量 q_{s1} 和掘穴活动土壤搬运通量 q_{s2} 分别为0.30 cm³/(cm·a)和1.88 cm³/(cm·a),研究区地下啮齿类动物挖掘活动的总土壤搬运通量为2.18 cm³/(cm·a)。根据公式(4)计算得到土壤扩散系数为9.4 cm²/a。如果将土壤搬运通量全部转化为土壤侵蚀,根据公式(5)得到地下啮齿类动物挖掘活动的土壤侵蚀模数为397 t/(km²·a)。

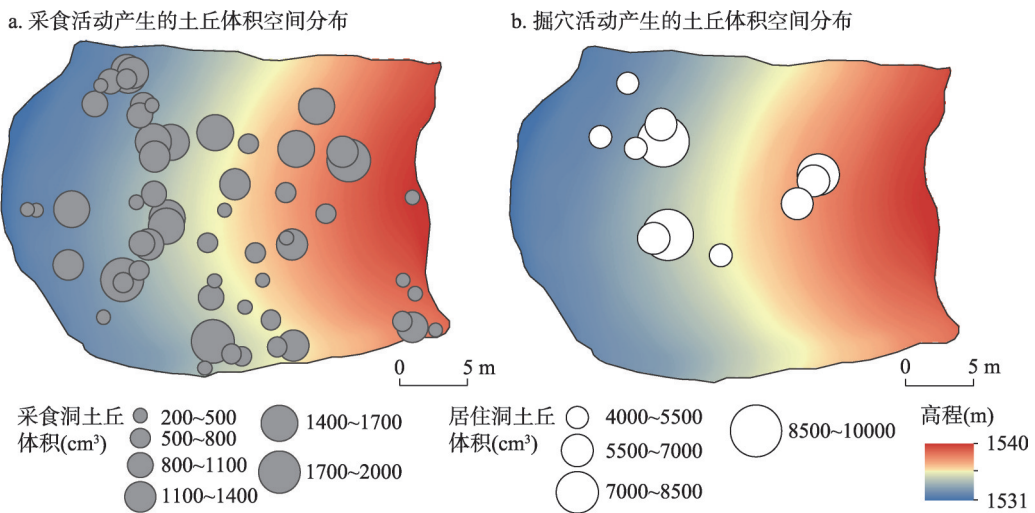


图4 挖掘活动土丘体积空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of volume of excavation mounds

表3 4—10月地下啮齿类动物挖掘活动的土壤搬运通量参数值

Tab. 3 Parameter values of soil transport flux for excavation activities of subterranean rodents from April to October

采食洞		居住洞		备注
参数	数值及单位	参数	数值及单位	
MPR_1	0.0872 个/m ²	MPR_2	0.0165 个/m ²	土丘产生速率
V_1	1037 cm ³	V_2	6610 cm ³	平均土丘体积
A_1	8.50 cm	A_2	59.89 cm	地下搬运距离
B_1	8.50 cm	B_2	29.50 cm	地表搬运距离
α_1	0°	α_2	10°	挖掘角度
θ	13.16°	θ	13.16°	坡度
A_1'	8.28 cm	A_2'	57.43 cm	地下搬运距离水平分量
B_1'	8.28 cm	B_2'	28.73 cm	地表搬运距离水平分量

5 讨论

5.1 地下啮齿类动物挖掘活动的空间分布成因

栖息地的选择对于地下啮齿类动物尤为重要。地下啮齿类动物洞穴的空间分布特征反映了其对栖息环境的选择性,这种选择不仅可以有效防御极端天气、火灾以及捕食者的威胁^[26],还能获取更多食物资源和安全稳定的栖息环境。同时,也体现了其在长期自然选择中形成的风险规避策略^[27]和利用最小能耗获取最大效益的挖掘策略^[28]。

在地形选择方面,结果表明地下啮齿类动物的采食洞和居住洞倾向于分布在较平坦的地形。平坦地形通常具有更稳定的土壤结构,减少了洞穴坍塌的风险^[29],从而提高了地下啮齿类动物的生存概率,有助于它们在多变的环境中保持栖息地的安全和稳定。此外,地下啮齿类动物倾向于在流水分散区域和凸形坡上挖掘洞穴,这也体现了其在地形选择过程中对环境风险的规避能力。流水分散区减少了雨水直接流入洞穴的风险,能有效减少隧道系统在降雨期间坍塌的概率^[30]。凸形坡可以有效地引导水流远离洞穴入口,进一步降低了积水对洞穴稳定性的威胁。因此,地下啮齿类动物的挖掘活动会充分考虑地形和水流的综合影响,从而选择有利于洞穴安全性和稳定性的地形。

在能量利用方面,地下啮齿类动物的挖掘活动具有显著的能量成本^[31]。地下啮齿类动物挖掘一单位的洞穴所消耗的能量是在地表移动相同距离的360~3400倍^[31],因此,能量的保存对穴居动物尤为重要。本文发现,地下啮齿类动物的采食洞数量较多但相对较浅,而居住洞穴数量较少但相对较深。这种洞穴结构和分布策略与其能量利用模式密切相关。一般而言,采食洞用于短时间内获取食物,较浅的洞穴有助于减少地下啮齿类动物在觅食过程中的能量消耗;而居住洞需要满足长期居住和生活的需求,地下啮齿类动物需要消耗更多的能量来挖掘更深的洞穴,以保证洞穴的稳定性和安全性。这一挖掘策略符合“能量最小化原则”,即通过优化能量投入来获得最大效益^[28]。

5.2 挖掘活动对土壤性质和侵蚀的影响

地下啮齿类动物的挖掘活动会改变土壤性质,这也是影响土壤侵蚀的重要内因^[14, 32]。本文发现,相较于未扰动的土壤,地下啮齿类动物挖掘形成的新鲜土丘具有较低的容重、较高的孔隙度和饱和导水率。这与王红兰等^[14]的研究结果一致。挖掘活动降低了土壤的中小孔隙体积,增大了中大孔隙体积^[14],从而破坏了土壤的原本结构,导致饱和导水率增加。同时,挖掘活动使土壤变得疏松,松散的地表沉积物通常会降低土壤的侵蚀阈值^[33-34]。

在干旱和半干旱的黄土高原地区,风蚀是一种常见的现象^[35]。已有研究^[13]表明,地下啮齿类动物挖掘产生的新鲜土丘土壤结构松散,且含有大量细小土壤颗粒,在风力作用下,这些细小颗粒极易在短时间内被剥蚀或运移。此外,挖掘活动多发生在每年的4—10月^[21],这一时期也是黄土高原地区的降雨多发期^[5]。因此,这些裸露在地表的松散土丘在短期内缺乏植被覆盖^[36],土壤颗粒容易被风和流水侵蚀^[13, 30],加剧水土流失。

随着时间的推移,植被可能在良好的生长条件下重新覆盖这些土丘,从而减少侵蚀。然而,Li等^[37]通过模拟降雨实验表明,在5 mm/h的降雨强度和20°的坡度条件下,啮齿类动物挖掘的新鲜土丘的土壤流失率可达361.69 g/h。而其挖掘形成的土丘裸地植被恢复周期至少需要3~4 a^[38]。因此,在黄土高原这一水土流失严重的地区,松散的土壤颗粒在风蚀、雨滴溅蚀和流水侵蚀的综合作用下,在短期内易发生显著侵蚀^[5, 39]。本文进行了为期6个月的观测,但未来需要更长期的观测,以准确地评估地下啮齿动物通过挖掘活动疏松的土壤与植被之间的反馈关系。

5.3 挖掘活动的土壤侵蚀贡献量估算及管理对策

地下啮齿类动物挖掘活动所形成的土丘是土壤侵蚀的主要来源之一^[40]。研究^[41]表明,相较于黑熊和野猪等大型动物,体型较小的地下啮齿类动物能够挖掘更多的沉积物,在地表形成更多的土丘。在高寒草甸的模拟降雨实验中,土丘较多区域的土壤流失总量是土丘较少区域的1.80~17.7倍^[37]。因此,地下啮齿类动物挖掘活动对土壤侵蚀的贡献不可忽视。

本文对研究坡面进行了为期6个月的观测,结果显示观测期内地下啮齿类动物挖掘活动的土壤搬运通量约为2.18 cm³/(cm·a),这属于已有研究^[42]报道的穴居动物挖掘活动搬运的土壤通量范围0.48~6.31 cm³/(cm·a)。尽管相对较小,但考虑到地下啮齿类动物活动的广泛性和持续性,其对土壤扰动的累积效应不容忽视。本文中地下啮齿类动物挖掘活动的土壤扩散系数为9.40 cm²/a,属于已有研究^[20]统计的沉积物扩散系数范围(0.1~1000.0 cm²/a)。

基于黄土高原土壤侵蚀模数分布图^[19]显示,研究坡面所在区域的总土壤侵蚀模数约为6217 t/(km²·a)(图1)。研究坡面地下啮齿类动物挖掘活动引起的土壤侵蚀模数为397 t/(km²·a),不同坡度梯度下地下啮齿类动物挖掘的土丘体积与坡度的关系如图5所示,则基于公式(5)可以得到坡面所在区域的地下啮齿类动物挖掘活动引起的土壤侵蚀模数为628 t/(km²·a)(图6)。这表明地下啮齿类动物挖掘活动对该区域土壤侵蚀的直接贡献占比约为10.1%。

研究结果表明,在研究地块内地下啮齿类动物的生物扰动对土壤侵蚀有着显著的影响,这一影响在黄土高原地区具有广泛的适用性。黄土高原地区以其厚厚的黄土层、干旱和半干旱的气候条件而著称,该地区水土流失严重,土壤侵蚀问题长期存在^[3]。并且,中华鼯鼠等一些地下啮齿类动物在该地区广泛分布,其挖掘活动显著增加了土壤的松散程度,并促进了土壤侵蚀^[30]。

鉴于地下啮齿类动物挖掘活动对土壤侵蚀的显著贡献,亟需有效的管理措施以减轻这一影响。例如通过药物防控和天敌防控,适当控制地下啮齿类动物的种群密度和活动范围^[43],可以减少它们对土壤的扰动。此外,改良土壤结构,提高其抗侵蚀能力,例如通过增加有机质含量和土壤团聚体稳定性^[44],可以减少地下啮齿类动物活动对土壤的负面影响。

本文结果表明,地下啮齿类动物的生物扰动对土壤侵蚀有显著影响。这一发现不仅

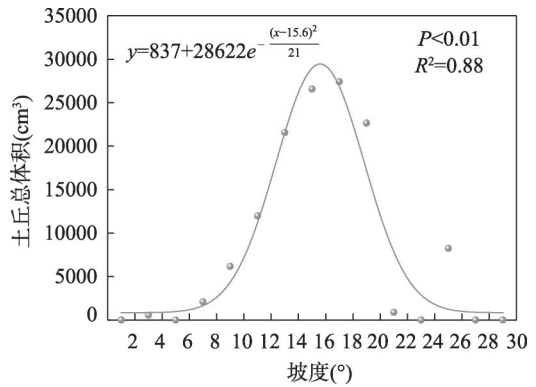


图5 土丘体积与坡度拟合曲线

Fig. 5 Fitted curve for total volume of mounds and slope gradient

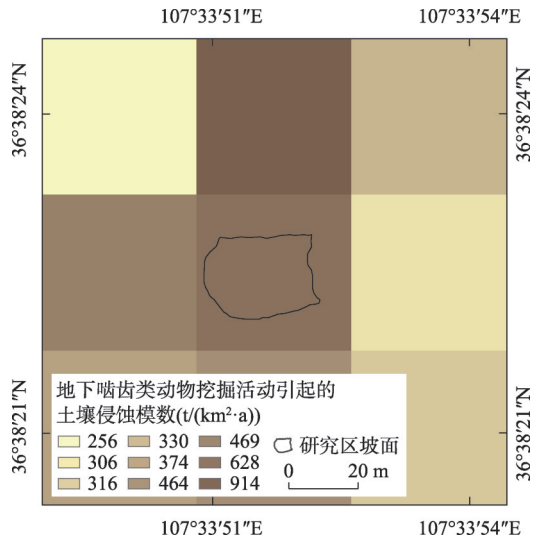


图6 区域尺度地下啮齿类动物挖掘活动引起的土壤侵蚀模数

Fig. 6 Soil erosion modulus for regional-scale excavation activities of subterranean rodents

为将生物扰动纳入黄土高原水土流失评估和土壤景观演化模型^[45-46]提供了新的视角,也为生态保护和管理策略的制定提供了重要参考。

总体而言,本文采用了无人机航测和野外调查相结合的方法,这是一种用来追踪地下啮齿类动物的挖掘活动的创新且有效的方法。然而,本文仅对地下啮齿类动物的挖掘活动进行了为期6个月的观测,这可能限制了对其长期影响的全面了解。此外,本文观测了4—10月地下啮齿类动物活跃时期的挖掘活动,并通过这6个月活跃期的观测数据来估算1年的土壤侵蚀模数,导致对地下啮齿类动物对土壤侵蚀贡献量的估算值可能偏大。

6 结论

本文通过无人机航测结合野外调查的方法,追踪了地下啮齿类动物挖掘活动的空间分布,探究了挖掘活动对土壤性质的影响,并定量评估了地下啮齿类动物挖掘活动引起的土壤侵蚀量。研究揭示了地下啮齿类动物挖掘活动在土壤侵蚀过程中的重要作用,并强调了在今后的水土流失评估与土壤侵蚀模型计算中,应对地下啮齿类动物这一生物扰动因子予以考虑和关注。具体结论如下:

(1) 地下啮齿类动物挖掘活动具有一定的地形偏好,采食活动和掘穴活动更多地发生在 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 坡度范围,且平面曲率 >0 、剖面曲率 <0 的区域,说明地下啮齿类动物挖掘活动偏好于分布在坡度较缓、流水分散区和凸形坡区域。

(2) 相比于未扰动土壤,地下啮齿类动物挖掘活动产生的新鲜土丘容重降低了14% ($P<0.05$),孔隙度和饱和导水率均增加了11% ($P<0.05$)。挖掘活动疏松了土壤,为土壤侵蚀提供了松散沉积物来源。

(3) 研究区地下啮齿类动物采食活动产生的土丘多但体积小,掘穴活动产生的土丘少但体积大。在6个月的观测期内,地下啮齿类动物挖掘活动将0.13 t的土壤翻覆至地表,土壤再分配对应的坡面搬运通量为 $2.18\text{ cm}^3/(\text{cm}\cdot\text{a})$,如果全部转化为土壤侵蚀,其侵蚀模数为 $397\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 。表明地下啮齿类动物挖掘活动在土壤侵蚀中有着重要贡献,大约贡献了土壤侵蚀总量的10.1%,是造成土壤流失的重要因素之一。

参考文献(References)

- [1] Wang Y, Sun X H, Miao L C, et al. State-of-the-art review of soil erosion control by MICP and EICP techniques: Problems, applications, and prospects. *Science of the Total Environment*, 2024, 912: 169016. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.169016.
- [2] Borrelli P, Robinson D A, Panagos P, et al. Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015-2070). *PNAS*, 2020, 117(36): 21994-22001.
- [3] Zhao G, Mu X, Wen Z, et al. Soil erosion, conservation, and eco-environment changes in the Loess Plateau of China. *Land Degradation & Development*, 2013, 24(5): 499-510.
- [4] Zhou P, Wen A B, Zhang X B, et al. Soil conservation and sustainable eco-environment in the Loess Plateau of China. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 68(3): 633-639.
- [5] Chen H, Zhang X P, Abila M, et al. Effects of vegetation and rainfall types on surface runoff and soil erosion on steep slopes on the Loess Plateau, China. *Catena*, 2018, 170: 141-149.
- [6] Li Xiangru, Jin Zhao, Zhang Xinbao, et al. Analysis of ecosystem management of the Loess Plateau during the past 60 years and suggestions for the future development. *Journal of Earth Environment*, 2015, 6(4): 248-254. [李相儒, 金钊, 张信宝, 等. 黄土高原近60年生态治理分析及未来发展建议. *地球环境学报*, 2015, 6(4): 248-254.]
- [7] Gao Haidong, Li Zhanbin, Li Peng, et al. Influences of terrace construction and check dam silting-up on soil erosion. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(5): 599-608. [高海东, 李占斌, 李鹏, 等. 梯田建设和淤地坝淤积对土壤侵蚀影响的定量分析. *地理学报*, 2012, 67(5): 599-608.]

- [8] Liu Wenchao, Liu Jiyuan, Kuang Wenhui. Spatiotemporal patterns of soil protection effect of the Grain for Green Project in northern Shaanxi. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(9): 1835-1852. [刘文超, 刘纪远, 匡文慧. 陕北地区退耕还林还草工程土壤保护效应的时空特征. *地理学报*, 2019, 74(9): 1835-1852.]
- [9] Yang Xuejun, Han Chongxuan, Li Jiguang, et al. Study on the economic threshold value for zokor control of economic forest in Guyuan replacing agriculture by afforestation. *Scientia Silvae Sinicae*, 2006, 42(9): 74-78. [杨学军, 韩崇选, 李继光, 等. 固原退耕还林区经济林木甘肃鼯鼠防治经济阈值研究. *林业科学*, 2006, 42(9): 74-78.]
- [10] Wu Xiaomin, Liu Chuguang, Zhang Hongfeng, et al. Rodent pest issues in returning to forest and grassland region of China Loess Plateau. *Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition)*, 2007, 35(Suppl.1): 133-137. [吴晓民, 刘楚光, 张洪峰, 等. 黄土高原退耕还林(草)区的鼠害治理问题. *陕西师范大学学报(自然科学版)*, 2007, 35(Suppl.1): 133-137.]
- [11] Lindtner P, Gömöröyová E, Gömöröy D, et al. Development of physico-chemical and biological soil properties on the European ground squirrel mounds. *Geoderma*, 2019, 339: 85-93.
- [12] 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. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(7): 2949-2958. [宋梓涵, 李希来, 苏晓雪, 等. 高原鼠兔和高原鼯鼠种群暴发区干扰斑块空间分布格局与演替规律. *生态学报*, 2023, 43(7): 2949-2958.]
- [13] Li Guorong, Li Xilai, Li Jinfang, et al. Soil wind erosion law in Ochotona Curzoniae mound of alpine meadow in the Yellow River. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(2): 110-114, 168. [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. *水土保持学报*, 2019, 33(2): 110-114, 168.]
- [14] Wang Honglan, Jiang Shunyu, Cui Junfang, et al. Hydraulic properties of zokor mounds with different forming time in Zoige grassland. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(3): 180-184, 190. [王红兰, 蒋舜媛, 崔俊芳, 等. 不同形成时间鼯鼠丘土壤水力学性质的对比. *水土保持学报*, 2018, 32(3): 180-184, 190.]
- [15] Geng H P, Liu R, Zheng W S, et al. Interaction between animal burrowing and loess cave formation in the Chinese Loess Plateau. *Frontiers in Earth Science*, 2021, 9: 806921. DOI: 10.3389/feart.2021.806921.
- [16] Gabet E J. Gopher bioturbation: Field evidence for non-linear hillslope diffusion. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2000, 25(13): 1419-1428.
- [17] Bai Ruru, Zhang Jiaqiong, Deng Xinxin, et al. Influence of wind erosion on water erosion characteristics of sandy loam on windward loess slopes in the wind-water erosion crisscross region of Loess Plateau. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(3): 30-36, 43. [白茹茹, 张加琼, 邓鑫欣, 等. 黄土高原水蚀风蚀交错带风蚀对砂质壤土迎风坡水蚀特征的影响. *水土保持学报*, 2022, 36(3): 30-36, 43.]
- [18] Wang T M, Wu J G, Kou X J, et al. Ecologically asynchronous agricultural practice erodes sustainability of the Loess Plateau of China. *Ecological Applications*, 2010, 20(4): 1126-1135.
- [19] Geng Wenguang, Zhu Yunqiang, Chen Pengfei. 1-km raster dataset of annual soil erosion modulus on the Loess Plateau (2001-2015). *Journal of Global Change Data & Discovery*, 2022, 6(1): 85-92. [耿文广, 诸云强, 陈鹏飞. 黄土高原逐年土壤侵蚀模数1-km栅格数据集(2001—2015). *全球变化数据学报*, 2022, 6(1): 85-92.]
- [20] Richardson P W, Perron J T, Schurr N D. Influences of climate and life on hillslope sediment transport. *Geology*, 2019, 47(5): 423-426.
- [21] Bao Gensheng, Wang Hongsheng, Wang Yuqin, et al. Effects of plateau zokor burrowing activity on soil nutrient spatial heterogeneity in alpine grasslands. *Acta Prataculturae Sinica*, 2016, 25(7): 95-103. [鲍根生, 王宏生, 王玉琴, 等. 高原鼯鼠造丘活动对高寒草地土壤养分空间异质性的影响. *草业学报*, 2016, 25(7): 95-103.]
- [22] Geng H P, Xu W Y, Zheng W S, et al. A hybrid mechanism for the initiation and expansion of loess caves across the Chinese Loess Plateau. *Land Degradation & Development*, 2023, 34(11): 3329-3339.
- [23] Hu W, Shao M A, Si B C. Seasonal changes in surface bulk density and saturated hydraulic conductivity of natural landscapes. *European Journal of Soil Science*, 2012, 63(6): 820-830.
- [24] Blanco-Canqui H, Lal R, Post W M, et al. Organic carbon influences on soil particle density and rheological properties. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70(4): 1407-1414.
- [25] Wu Kening, Zhao Rui. Soil texture classification and its application in China. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(1): 227-241. [吴克宁, 赵瑞. 土壤质地分类及其在我国应用探讨. *土壤学报*, 2019, 56(1): 227-241.]
- [26] Mukherjee A, Pilakandy R, Kumara H N, et al. Burrow characteristics and its importance in occupancy of burrow dwelling vertebrates in Semiarid area of Keoladeo National Park, Rajasthan, India. *Journal of Arid Environments*, 2017, 141: 7-15.

- [27] Nemati F, Kolb B, Metz G A. Stress and risk avoidance by exploring rats: Implications for stress management in fear-related behaviours. *Behavioural Processes*, 2013, 94: 89-98.
- [28] Tian Yongliang, Jiang Yongmei, Wang Guizhen, et al. A review of habitat environment and survival strategy of subterranean rodents. *Sichuan Journal of Zoology*, 2018, 37(3): 343-350. [田永亮, 蒋永梅, 王贵珍, 等. 地下啮齿动物栖息环境及其生存策略研究. *四川动物*, 2018, 37(3): 343-350.]
- [29] Kinlaw A. A review of burrowing by semi-fossorial vertebrates in arid environments. *Journal of Arid Environments*, 1999, 41(2): 127-145.
- [30] Chen M Y, Ma L, Shao M A, et al. Chinese zokor (*Myospalax fontanierii*) excavating activities lessen runoff but facilitate soil erosion: A simulation experiment. *Catena*, 2021, 202: 105248. DOI: 10.1016/j.catena.2021.105248.
- [31] Vleck D. The energy cost of burrowing by the pocket gopher *Thomomys bottae*. *Physiological Zoology*, 1979, 52(2): 122-136.
- [32] 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. *Geoderma*, 2017, 297: 1-9.
- [33] Fécan F, Marticorena B, Bergametti G. Parametrization of the increase of the aeolian erosion threshold wind friction velocity due to soil moisture for arid and semi-arid areas. *Annales Geophysicae*, 1998, 17: 149-157.
- [34] Li J R, Okin G S, Alvarez L, et al. Effects of wind erosion on the spatial heterogeneity of soil nutrients in two desert grassland communities. *Biogeochemistry*, 2008, 88: 73-88.
- [35] Zhang Z C, Dong Z B. Characteristics of aeolian sediment transport over different land surfaces in northern China. *Soil and Tillage Research*, 2014, 143: 106-115.
- [36] Yang Yingbo, Xin Xiaojuan, Aidexiecuo, et al. Plant diversity variations in zokor-mound communities along a successional stage in sub-alpine meadow. *Acta Prataculturae Sinica*, 2010, 19(1): 14-20. [杨莹博, 辛小娟, 艾得协措, 等. 鼯鼠土丘植被恢复演替过程中的物种多样性变化. *草业学报*, 2010, 19(1): 14-20.]
- [37] 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. *Water*, 2019, 11(11): 2258. DOI: 10.3390/w11112258.
- [38] He Junling, Zhang Jinsha, Yang Yingbo, et al. The study of patterns and characteristics of plateau zokor mound. *Acta Prataculturae Sinica*, 2006, 15(1): 107-112. [何俊龄, 张金沙, 杨莹博, 等. 高原鼯鼠土丘空间格局及主要特征研究. *草业学报*, 2006, 15(1): 107-112.]
- [39] Jin F M, Yang W C, Fu J X, et al. Effects of vegetation and climate on the changes of soil erosion in the Loess Plateau of China. *Science of the Total Environment*, 2021, 773: 145514. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145514.
- [40] Reichman O J, Seabloom E W. The role of pocket gophers as subterranean ecosystem engineers. *Trends in Ecology & Evolution*, 2002, 17(1): 44-49.
- [41] Haussmann N S. Soil movement by burrowing mammals: A review comparing excavation size and rate to body mass of excavators. *Progress in Physical Geography*, 2017, 41(1): 29-45.
- [42] Black T A, Montgomery D R. Sediment transport by burrowing mammals, Marin county, California. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1991, 16(2): 163-172.
- [43] Hua Limin, Chai Shouquan. Rodent pest control on grasslands in China: Current state, problems and prospects. *Journal of Plant Protection*, 2022, 49(1): 415-423. [花立民, 柴守权. 中国草原鼠害防治现状、问题及对策. *植物保护学报*, 2022, 49(1): 415-423.]
- [44] Wen X, Zhen L. Soil erosion control practices in the Chinese Loess Plateau: A systematic review. *Environmental Development*, 2020, 34: 100493. DOI: 10.1016/j.envdev.2019.100493.
- [45] Meng X, Kooijman A M, Temme A J A M, et al. The current and future role of biota in soil-landscape evolution models. *Earth-Science Reviews*, 2022, 226: 103945. DOI: 10.1016/j.earscirev.2022.103945.
- [46] Larsen A, Nardin W, van de Lageweg W I, et al. Biogeomorphology, quo vadis? On processes, time, and space in biogeomorphology. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2021, 46: 12-23.

The contribution of subterranean rodent excavation to soil erosion in the Loess Plateau

BAI Xiaoliang^{1,2}, GENG Haopeng^{1,2}, LIU Ru^{1,2}, CHENG Weiming³, PAN Baotian^{1,2}

(1. College of Earth and Environmental Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

2. Key Laboratory of Western China's Environmental Systems, Ministry of Education, Lanzhou 730000, China;

3. State Key Laboratory of Geographic Information Science and Technology, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Subterranean rodent excavation activities constitute one of the factors influencing soil redistribution and erosion on hillslopes. Investigating these activities in depth contributes to a better understanding of the complex mechanisms of soil erosion. To explore the spatial distribution characteristics of subterranean rodent excavation activities and their impact on soil erosion in the Loess Plateau, this study conducted six months of fixed-point repeated monitoring on a typical hillslope (665 m²) in Pingdingshan, Huanxian county, located in the central part of the Loess Plateau. Utilizing unmanned aerial vehicle (UAV) surveying combined with field investigations, the study tracked the spatial distribution of subterranean rodent excavation activities, analyzed their effects on soil properties, and quantified the soil erosion generated by excavation activities on the study hillslope. The results indicate that: (1) Subterranean rodents exhibit a preference for feeding and burrowing activities in areas with gentle slopes, dispersed flow, and convex slope regions. (2) Excavation activities decrease the bulk density of fresh soil mounds by 14% ($P < 0.05$) compared to undisturbed soil, while porosity and saturated hydraulic conductivity increase by 11% ($P < 0.05$). (3) Over the observation period, subterranean rodent excavation activities overturned 0.13 t of soil onto the surface, with an associated slope transport flux of approximately 2.18 cm³/(cm·a). If all these fluxes were converted into soil erosion, the erosion modulus would be approximately 397 t/(km²·a). These results highlight the significant role of excavation activities in soil redistribution on hillslopes of the Loess Plateau, contributing to approximately 10.1% of the total soil erosion, which warrants attention in future assessments and modeling of soil erosion and loss.

Keywords: subterranean rodents; excavation activities; soil erosion; Loess Plateau