

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.05.008.

王迪, 钱嘉鑫, 朱妮, 等. 高原鼠兔洞穴对土壤入渗的影响及机制[J]. 水土保持研究, 2024, 31(5): 243-249.

Wang Di, Qian Jiaxin, Zhu Ni, et al. Effect of Plateau Pika Caves on Soil Infiltration and Mechanism[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(5): 243-249.

高原鼠兔洞穴对土壤入渗的影响及机制

王迪^{1,2,3}, 钱嘉鑫⁴, 朱妮⁴, 李珂欣⁴, 毛佳怡⁴, 赵理荣⁴, 刘玉^{2,3,4}

(1.中国科学院 教育部水土保持与生态环境研究中心, 陕西 杨凌 712100;

2.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3.中国科学院大学, 北京 100049;

4.西北农林科技大学 水土保持科学与工程学院, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的]探究高原鼠兔洞穴对高寒草甸土壤入渗性能及其相关因素的影响,以揭示其对高寒草甸生态系统水分循环和土壤水文功能的潜在作用。[方法]以高寒草甸高原鼠兔洞穴不同部位作为研究对象,包括洞口(PE)与洞道(PB),对照为无高原鼠兔洞穴分布的未扰动高寒草甸(AM),用单环法对土壤入渗速率进行测定。[结果](1)高原鼠兔洞穴促进高寒草甸土壤入渗速率,相比于未扰动高寒草甸,洞口和洞道初始入渗速率分别升高 377.63% 和 189.47%,稳定入渗速率分别升高 314.29% 和 220.00% ($p < 0.05$); (2)高原鼠兔洞穴破坏高寒草甸土壤结构,相比于原生高寒草甸,洞口表层土壤总孔隙度和毛管孔隙度分别显著降低 4.69% 和 16.27%,但非毛管孔隙度显著升高 22.47%,洞口和洞道团聚体平均重量直径分别显著降低 20.09% 和 9.45%,土壤有机质含量显著降低,各部位大小依次为未扰动高寒草甸 > 洞道 > 洞口 ($p < 0.05$); (3)高原鼠兔洞穴主要通过影响高寒草甸草毡层根系促进土壤入渗,根系生物量是影响初始入渗速率和稳定入渗速率的主导因子,标准化总效应分别为 -0.717 和 -0.539。[结论]鼠兔洞穴一定程度上有利于高寒草甸生态系统的水分循环,但同时也破坏了高寒草甸原本的土壤结构,加剧高寒草甸退化风险。

关键词:高原鼠兔洞穴; 土壤性质; 土壤入渗; 高寒草甸; 三江源区

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)05-0243-07

Effect of Plateau Pika Caves on Soil Infiltration and Mechanism

Wang Di^{1,2,3}, Qian Jiaxin⁴, Zhu Ni⁴, Li Kexin⁴, Mao Jiayi⁴, Zhao Lirong⁴, Liu Yu^{2,3,4}

(1. Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Ministry of Education,

Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and

Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences,

Beijing 100049, China; 4. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to investigate the effects of plateau sage grouse burrows on the infiltration performance of alpine meadow soils and its related factors, and to reveal its potential role on water cycling and soil hydrological functions in alpine meadow ecosystems. [Methods] Soil infiltration rates were measured by the single-loop method in different parts of alpine meadow plateau pika burrows, including the entrance (PE) and the burrow pathway (PB), and the control was an undisturbed alpine meadow (AM) with no distribution of plateau pika burrows. [Results] (1) Compared with the native alpine meadow, the total porosity and capillary porosity of surface soil at the plateau pika cave entrance were significantly reduced by 4.69% and 16.27%, respectively, while the non-capillary porosity was significantly increased by 22.47%, and the mean weight diameters of aggregates at the entrance and burrow were significantly decreased by

收稿日期: 2023-10-03

修回日期: 2023-10-11

资助项目: 青海省三江源二期工程科研项目(2019-S-1); 国家自然科学基金项目(41907058)

第一作者: 王迪(1999—), 女, 陕西西安人, 在读硕士研究生, 主要从事高寒地区水土保持研究。E-mail: wangdidi@nwafu.edu.cn

通信作者: 刘玉(1988—), 男, 陕西洛南人, 博士, 副研究员, 主要从事植被恢复与水土保持研究。E-mail: kingliuyu@nwafu.edu.cn

<http://stbcyj.paperonice.org>

20.09% and 9.45%, respectively. The soil organic matter content decreased significantly, and soil organic matter content of each part followed the order: native alpine meadow > burrow > entrance ($p < 0.05$), (2) Compared with native alpine meadow, the initial infiltration rate of the cave entrance and burrow increased by 377.63% and 189.47%, respectively, and the stable infiltration rate increased by 314.29% and 220.00% ($p < 0.05$). (3) Plateau pika caves promoted the soil infiltration performance mainly through the destruction of mastic layer roots, and root biomass was the dominant factor affecting initial and stable infiltration rates, with the standardized total effects of -0.717 and -0.539 , respectively. To some extent, pika caves were conducive to the water conservation of alpine meadow ecosystem. [Conclusion] Sage-grouse burrows favor water circulation in alpine meadow ecosystems to a certain extent, but also damage the original soil structure of alpine meadows and exacerbate the risk of alpine meadow degradation.

Keywords: plateau pika cave; soil properties; soil infiltration; alpine meadow; Sanjiangyuan area

高原鼠兔(*Ochotona curzoniae*)是青藏高原常见的小型啮齿类动物,广泛分布于高寒地区,是高寒生态系统的重要组成部分。高原鼠兔通过建造洞穴、排泄粪便和尿液以及采食植物等方式改变植物和土壤性质,从而影响诸如物种多样性、初级生产力、碳循环和水源涵养等生态系统功能服务^[1-4]。高原鼠兔一直被认为是导致高寒草地退化的主要原因之一,因为其生命活动扰动土壤结构,破坏草毡层,加速土壤侵蚀和植被退化,最终形成大面积的裸露斑块^[5]。然而,有研究表明高原鼠兔为高寒生态系统带来许多有益之处,比如通过采食和排泄行为,降低优势物种的主要地位,并为种子的沉积和萌发提供场所,从而增加植物物种多样性^[6];通过挖掘行为改变土壤通气状况^[7],促进微生物活动及矿化作用,加速养分循环^[8-9]。另外,高原鼠兔及其洞穴可以为其他动物提供食物和庇护所,有助于维持整个生态系统食物链的完整性^[10]。因此,高原鼠兔在高寒生态系统中的功能与角色需要更全面的认识。

小型穴居哺乳动物通常被认为是“生态系统工程师”,因为其在物理上创造、维持和改变生活环境,对生态系统产生不可替代的影响^[2]。先前的研究已被证实,田鼠和野兔对土壤结构的扰动可以促进水分的入渗,减少径流产生^[11]。在青藏高原,Wilson等^[4]证明高原鼠兔活动对土壤水分入渗有积极影响,刘文玲等^[12]进一步发现高原鼠兔扰动初期促进水文循环,而后期水文循环受到抑制。由于高寒草甸莎草科植物草根相互交织形成致密的“草毡层”,水分无法及时入渗,因此,高原鼠兔等小型哺乳动物活动对高寒草甸降雨入渗补给、径流产生和植物生长等过程具有重要影响。

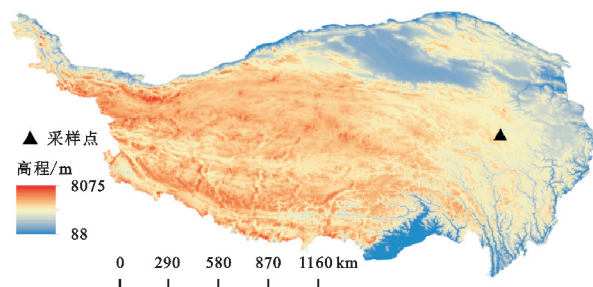
目前对高原鼠兔洞穴的研究仅集中于其对高寒草甸植物群落、土壤理化性质的影响,而对高寒草甸土壤入渗性能的影响及驱动因子尚未得到全面的研

究。青藏高原作为“亚洲水塔”,其入渗、径流和地下水储存等水文过程关系到黄河流域生态系统保护与居民的用水安全。本研究以高寒草甸的高原鼠兔洞穴为研究对象,通过野外采样和单环入渗试验,探究高寒草甸高原鼠兔洞穴不同部位土壤入渗性能的差异及影响因素,研究结果对进一步认识高原鼠兔对高寒草甸生态系统水文循环的影响有重要意义。

1 研究数据与方法

1.1 研究区概况

研究区位于青海省果洛藏族自治州达日县窝赛乡直却村(33°40'1"N, 99°43'6"E),海拔为4 250 m,气候为高山和亚湿润气候,年平均温度为 -4°C 。月最低和最高温度为 -12.9°C (1月)和 9.1°C (7月)。年平均降雨量为474~540.9 mm,大部分集中在5—9月,占年全年降雨量的85%。非生长季节干燥寒冷,持续7~8个月,而生长季节较短,仅持续4~5个月。主要植被类型为高寒草甸,优势植物为高山嵩草(*Kobresia pygmaea*)。根据中国土壤分类系统,土壤为高寒草甸土壤。图1为研究样地地理位置。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号GS(2016)2923号的标准地图制作,底图未做修改。

图1 研究样地地理位置

Fig. 1 Geographic location of study site

1.2 样地选取与采样

野外试验于2022年7—10月进行,本研究以高寒草甸高原鼠兔洞穴不同部位作为研究对象,包括洞

口(PE)与洞道(PB),对照为无高原鼠兔洞穴分布的未扰动高寒草甸(AM)。洞穴洞口选择土堆基本夷平,上有部分植物生长,已达到较稳定状态的洞口。洞道的位置选择在距离洞口 0.5~1 m 处,未扰动高寒草甸取距离洞口 1 m 以上无高原鼠兔洞穴分布的区域。由于高原鼠兔偏好选择阳坡作为栖息地^[13],并且在中度退化草地中活动最为频繁^[14],因此选取

坡向为南坡或西南坡的轻中度退化的高寒草甸区域建立 3 个 25 m×25 m 的样地,为保证样地间植物、土壤和放牧强度等立地条件相似,样地之间的距离不超过 200 m,每个样地中建立 3 个 10 m×10 m 的大样方,采用堵洞法连续三天调查高原鼠兔有效洞口数^[15]。在选定洞道影响的区域向下挖掘至洞道,用直尺测量洞道深度。表 1 为研究样地基本信息。

表 1 研究样地基本信息
Table 1 Basic information of the study site

编号	海拔/m	坡度/(°)	坡向	植物盖度/%	有效洞口/(个/100 m ²)	平均洞道深度/cm
样地 1	4156	21	西南 266	70	23.78±2.91	13.73±1.58
样地 2	4142	21	西南 242	55	23.44±5.07	9.13±2.69
样地 3	4118	26	西南 238	65	29.44±4.57	19.2±1.95

在挖掘洞道测量洞道深度前,对高原鼠兔洞穴不同部位进行土壤入渗速率测定。由于青藏高原野外试验条件所限,使用大直径的双环和更多的用水实现困难,因此采用单环法进行测定,用以比较不同处理间入渗速率的差异,每块样地中每个处理各 3 个重复。将入渗试验前 3 min 的水头落差用于计算初始入渗速率,最后 15 min 的水头落差用于计算稳定入渗速率^[16]。

土壤入渗速率测定结束后,在每个测定位置附近选择 2 个相似样点对 0—30 cm 植物根系与土壤进行取样。将地面清理干净,每个样点处挖掘一个 30 cm 深的剖面,每 10 cm 一层分三层各挖取一个 10 cm×10 cm×10 cm 大小的根土复合体土块,先用干筛分离大部分土壤,剩余部分用清水漂洗获取植物的根系,装入信封于 65 ℃下恒温烘干至重量不变,称重获得根系生物量。用环刀采集 0—30 cm 原状土,每 10 cm 一层,采用环刀法测定土壤总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度。用方形铝盒分 3 层(0—10 cm, 10—20 cm 和 20—30 cm)采集原状土样,采用湿筛法测定土壤团聚体平均重量直径。另外各处理 0—30 cm 土层每 10 cm 取一次土样,去掉植物根系和大块砾石,带回室内自然风干,风干后的土样过 0.15 mm 筛,用以测定土壤有机质含量。

1.3 数据处理
原始数据在 Excel 2021 中进行初步整理,在 SPSS 26.0 中对高原鼠兔洞穴不同部位根系特征、土壤性质和土壤入渗速率进行单因素方差分析和 Duncan 多重比较用以比较不同处理间差异性,通过 Amos 软件构建高原鼠兔洞穴对土壤入渗速率的影响的结构方程模型,在 Excel 2021 进行作图。

2 结果与分析

2.1 高原鼠兔洞穴对土壤入渗速率的影响

高原鼠兔洞穴不同部位影响下的高寒草甸土壤入渗速率随入渗时间的增加而减小,运用 Kostiaikov 入渗经验模型对土壤入渗率(i)和入渗时间(t)进行拟合,可以看出本研究土壤水分入渗过程均呈幂函数 $Y=ax^b$ 分布。高原鼠兔洞穴显著改变高寒草甸土壤入渗速率。未扰动高寒草甸的初始入渗速率和稳定入渗速率均最低,分别为 0.76 mm/min,0.35 mm/min,洞口土壤入渗速率分别为 3.63 mm/min,1.45 mm/min,相比于未扰动高寒草甸分别显著升高 2 377.63%和 314.29% ($p<0.05$)。洞道部位的初始入渗速率和稳定入渗速率分别为 2.20 mm/min,1.12 mm/min,分别是未扰动高寒草甸的 2.89,3.20 倍($p<0.05$,图 2)。

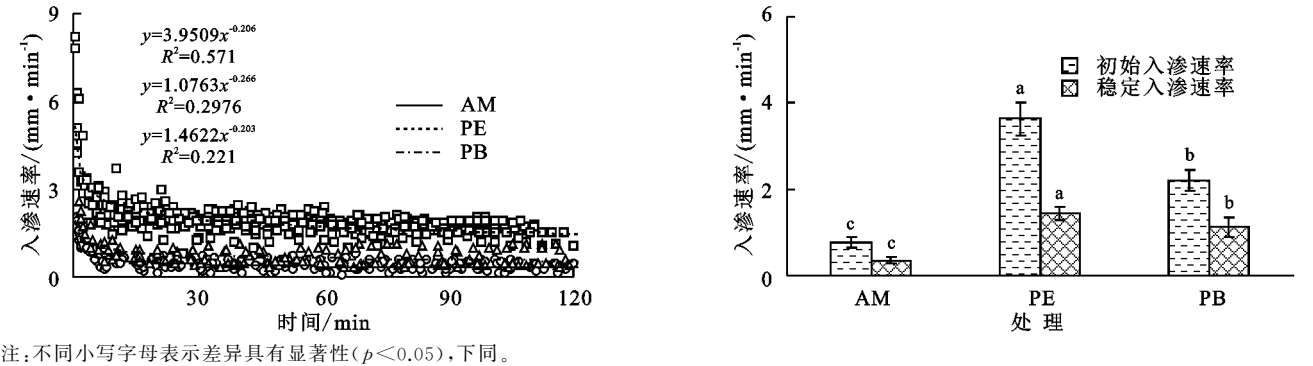


图 2 高原鼠兔洞穴影响下高寒草甸土壤入渗速率
Fig. 2 Soil infiltration rate of alpine meadow under the influence of plateau pika cave

2.2 高原鼠兔洞穴对土壤性质和根系生物量的影响

高原鼠兔挖掘洞穴过程中对土壤造成扰动,改变土壤孔隙结构。相比于未扰动高寒草甸,洞口0—10 cm土层的土壤总孔隙度和毛管孔隙度分别显著降低4.69%和16.27%,土壤非毛管孔隙度显著增加22.47%,洞口深层土壤总孔隙度和非毛管孔隙度均显著升高($p < 0.05$)。高原鼠兔洞穴降低高寒草甸土壤有机质含量,各部位土壤有机质含量大小依次为:未扰动高寒草甸>洞道>洞口。相比于未扰动高寒草甸,洞口和洞道0—10 cm土层中土壤有机质含量分别显著降低26.17%和19.12%,10—20 cm土层有机质含量分别降低10.47%和7.18%,各部位20—30 cm土层有机

质含量无显著差异($p < 0.05$)。

总体来看,高原鼠兔洞穴主要影响土壤表层0—10 cm的土壤有机质含量,对20—30 cm深度有机质含量影响较小。高原鼠兔洞穴导致高寒草甸土壤团聚体稳定性降低,洞口各土层团聚体平均重量直径分别显著降低22.58%,18.61%和18.36%,洞道分别降低8.59%,8.75%和11.05%,洞口土壤团聚体稳定性小于洞道($p < 0.05$)。高寒草甸根系生物量主要集中于0—10 cm深度土层,且随土层深度增加而减少,高原鼠兔洞口根系生物量显著降低,仅为未扰动高寒草甸的37.10%,洞道处根系生物量与未扰动高寒草甸无显著差异(图3)。

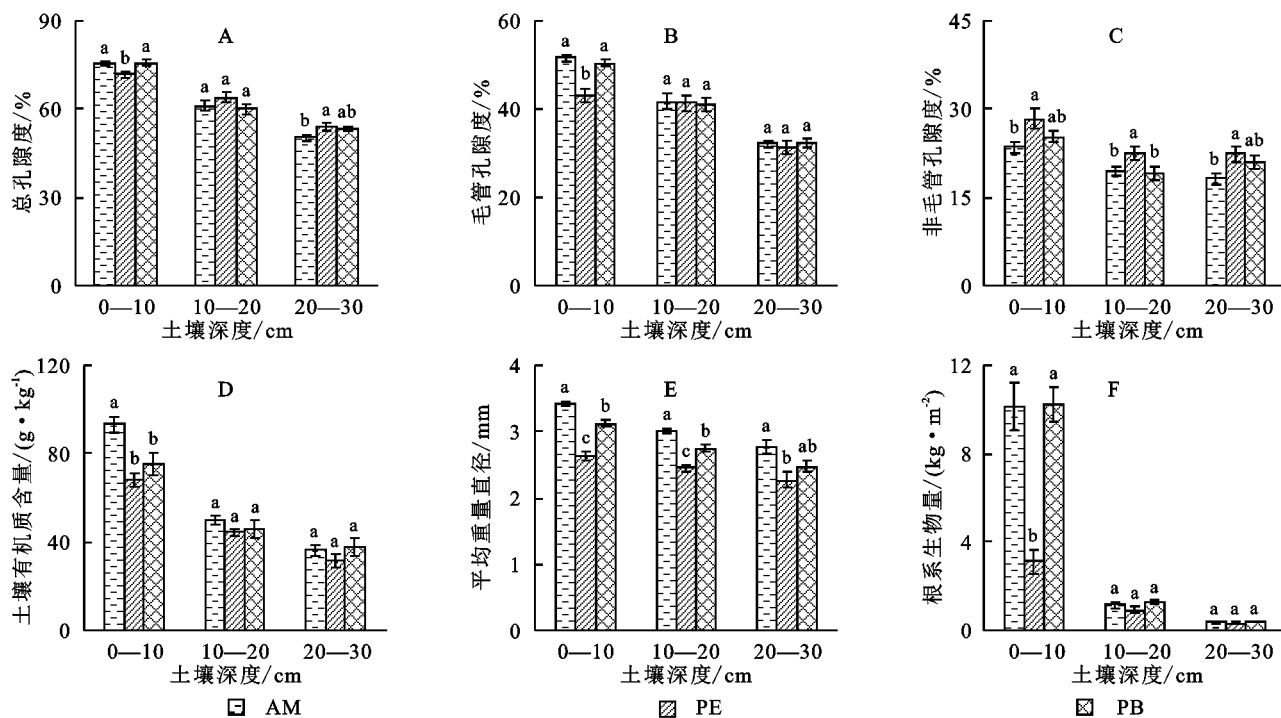


图3 高原鼠兔洞穴影响下高寒草甸土壤性质及根系生物量

Fig. 3 Soil properties and root biomass of alpine meadow under the influence of plateau pika cave

2.3 鼠兔洞穴土壤水分入渗速率的影响因素

采用结构方程模型(SEM)分析根系生物量、洞道深度及土壤性质对土壤入渗速率的影响。土壤初始入渗速率和稳定入渗速率主要由根系生物量、毛管和非毛管孔隙度、平均重量直径、土壤有机质含量以及洞道深度共同影响,毛管孔隙度、非毛管孔隙度和洞道深度对土壤入渗速率有促进作用,根系生物量、土壤有机质含量和团聚体平均重量直径与土壤入渗速率呈负相关关系(图4)。其中根系生物量和洞道深度对初始入渗速率具有显著影响,通径系数为-0.45,0.29($p < 0.05$)。洞道深度对稳定入渗速率影响显著,通径系数为0.42($p < 0.01$)。

表2展示了根系、洞道深度及土壤性质对初始和稳定入渗速率的总效应,对初始入渗速率的标准化总

效应绝对值大小依次为:根系生物量(-0.717)>非毛管孔隙度(0.412)>土壤有机质含量(-0.322)>毛管孔隙度(0.321)>洞道深度(0.290)>平均重量直径(-0.223);对稳定入渗速率的标准化总效应绝对值大小依次为:根系生物量(-0.539)>非毛管孔隙度(0.473)>土壤有机质含量(-0.418)>洞道深度(0.417)>毛管孔隙度(0.234)>平均重量直径(-0.10)。根系生物量对初始入渗速率和稳定入渗速率标准化总效应绝对值均最大且均为负效应,说明高原鼠兔洞穴通过减少根系生物量促进土壤入渗。

3 讨论

土壤动物通过建造洞穴活动来改变土壤结构和栖息地环境条件,因此被认为是土壤生态系统的工程

师^[2]。与其他生态系统中的穴居动物一样,高原鼠兔挖掘活动会增加景观异质性,对高寒草甸根系生物量和土壤结构产生影响^[17]。本研究中原鼠兔挖掘及维护洞道对高寒草甸土壤结构造成直接破坏,原有孔隙结构改变,表层土壤总孔隙度与毛管孔隙度降低,非毛管孔隙度增加,从而增强土壤入渗性能,并且改善土壤透气条件^[18]。高原鼠兔挖掘洞穴过程中同样破坏团聚体结构^[19],导致深层土壤团聚体稳定性降低,影响高寒草甸局部土壤的肥力状况以及结构稳定性^[20]。高原鼠兔洞穴建造过程中埋压或损伤根系,造成大部分植物

根系死亡,同样影响对土壤孔隙度和团聚体稳定性产生影响^[21]。因为植物根系通过产生根系分泌物,对土壤颗粒进行缠绕和重新组合,有利于土壤结构稳定^[22],并且根系衰老死亡后经过腐烂、分解有利于土壤孔隙度增加^[23]。在本研究中,高原鼠兔洞穴加剧了土壤有机质含量分布的空间异质性,原因可能是:(1) 高原鼠兔洞穴减少植物生物量,对土壤有机碳的输入降低^[24];(2) 土壤通气条件改善,微生物活性促进,矿化速率提高造成有机质损失^[8,25];(3) 高原鼠兔挖掘洞穴时将深层贫瘠的土壤转移到地表^[26]。

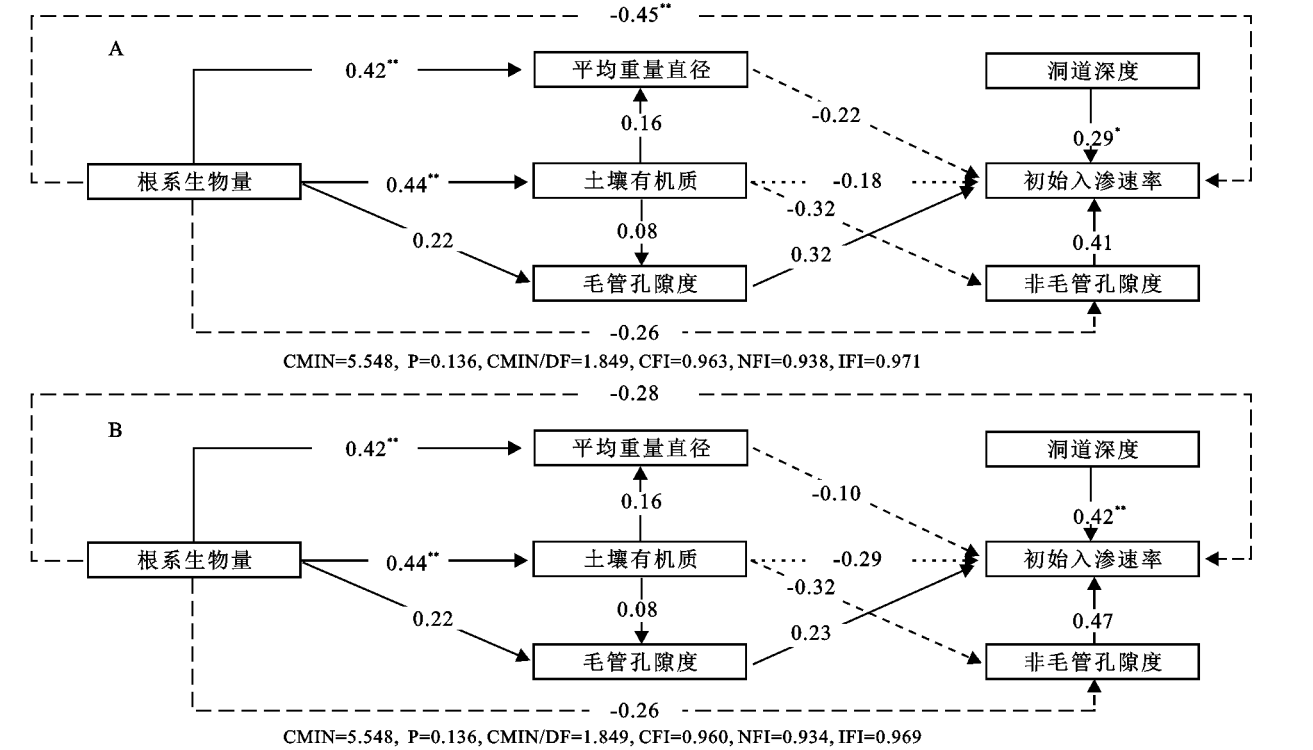


图 4 基于结构方程模型(SEM)的根系生物量、洞道深度及土壤性质对土壤入渗速率的影响

Fig. 4 Effects of root biomass, burrow depth and soil properties on soil infiltration rate based on structural equation model (SEM)

表 2 基于结构方程模型的根系生物量、洞道深度及土壤性质对土壤入渗速率的标准化总效应

Table 2 Standardized total effects of root biomass, burrow depth and soil properties on soil infiltration rate based on structural equation model (SEM)						
入渗速率	根系生物量	有机质	洞道深度	平均重量直径	毛管孔隙度	非毛管孔隙度
初始入渗速率	-0.717	-0.322	-0.223	0.290	0.412	0.321
稳定入渗速率	-0.539	-0.418	-0.100	0.417	0.473	0.234

土壤入渗能力一般由植物和土壤共同影响^[27]。土壤性质如土壤孔隙度、团聚体稳定性和有机质等,是影响土壤入渗速率的关键因素^[23]。本研究表明高原鼠兔洞穴能够促进水分入渗,与 Wilson 等^[4]结果一致。高原鼠兔对土壤结构的直接扰动,增加土壤非毛管孔隙度,降低团聚体平均重量直径,加速重力水丧失,降低土壤持水能力,水分更容易下渗^[28]。本研究认为高原

鼠兔洞穴主要通过降低根系生物量促进土壤入渗速率,这与其他入渗相关研究相反^[29],原因可能是不同于其他地区(如黄土高原),高寒草甸的特点是拥有莎草科植物草根相互交织形成致密的“草毡层”,使得水分无法及时入渗,导致土壤入渗能力降低^[30]。高原鼠兔洞穴洞口堆积土壤埋压植物造成植物根系死亡,形成更多大空隙,有利于优先流产生,从而破坏草毡

层的不透水性^[12,28]。另外,洞道本身对水分入渗可能有直接的影响,由于洞道周围土壤液态水与洞道内部空气中的气态水之间存在蒸发—凝结平衡,水分刚刚抵达洞道壁时,洞道内相对干燥的空气对水分有强烈的蒸发吸引作用,最终吸引水分向洞道内流动,一部分水会在洞道蓄存,因此有吸引水分的作用。

4 结论

(1) 高原鼠兔洞穴洞口相比于未扰动高寒草甸入渗速率提高近3倍,洞道的初始入渗速率和稳定入渗速率分别为未扰动高寒草甸的1.97倍和2.48倍,说明高原鼠兔洞道存在改变高寒草甸水文过程,加速水分向土壤中入渗,减少径流形成,一定程度上有利于三江源地区水源涵养。

(2) 高原鼠兔洞穴降低高寒草甸根系生物量,改变高寒草甸土壤性质,洞口土壤总孔隙度、团聚体平均重量直径分别降低4.69%和22.58%,土壤非毛管孔隙度分别增加22.47%和7.59%,并显著降低土壤有机质含量,洞口和洞道土壤有机质含量分别减少19.39%和10.21%,洞口较洞道对根系和土壤性质影响更大,高原鼠兔洞道整体增加高寒草甸土壤空间异质性,造成根系生物量和土壤有机质减少可能增加高寒草甸退化风险。

(3) 根系生物量与初始入渗速率极显著负相关($p < 0.01$),洞道深度与初始入渗速率和稳定入渗速率均显著正相关($p < 0.01$),且根系生物量对初始入渗速率和稳定入渗速率的总效应绝对值均最大,说明高原鼠兔洞穴主要通过对高寒草甸植物根系的破坏促进土壤水分入渗,同时洞道本身可能对水分入渗存在影响。

综上所述,高原鼠兔洞穴对高寒草甸水源涵养具有一定积极意义,但同时也破坏了高寒草甸原本的土壤结构,加剧高寒草甸退化风险,因此,应该将高原鼠兔种群维持在适当密度水平,在涵养水源和保护高寒草甸生态系统权衡间获取最大生态效益。

参考文献(References):

- [1] Smith A T, Foggin J M. The plateau pika(*Ochotona curzoniae*) is a keystone species for biodiversity on the Tibetan Plateau[J]. *Animal Conservation*, 1999, 2(4): 235-240.
- [2] Davidson A D, Detling J K, Brown J H. Ecological roles and conservation challenges of social, burrowing, herbivorous mammals in the world's grasslands[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2012, 10(9): 477-486.
- [3] Liu Y S, Fan J W, Shi Z J, et al. Relationships between plateau pika(*Ochotona curzoniae*) densities and biomass and biodiversity indices of alpine meadow steppe on the Qinghai-Tibet Plateau China[J]. *Ecological Engineering*, 2017, 102: 509-518.
- [4] Wilson M C, Smith A T. The pika and the watershed: The impact of small mammal poisoning on the ecohydrology of the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Ambio*, 2015, 44(1): 16-22.
- [5] Niu Y J, Zhu H M, Yang S W, et al. Overgrazing leads to soil cracking that later triggers the severe degradation of alpine meadows on the Tibetan Plateau[J]. *Land Degradation & Development*, 2019, 30(10): 1243-1257.
- [6] Wu R X, Chai Q, Zhang J Q, et al. Impacts of burrows and mounds formed by plateau rodents on plant species diversity on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *The Rangeland Journal*, 2015, 37(1): 117-123.
- [7] Qin Y, Chen J J, Yi S H. Plateau pikas burrowing activity accelerates ecosystem carbon emission from alpine grassland on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Ecological Engineering*, 2015, 84: 287-291.
- [8] Yu C, Pang X P, Wang Q, et al. Soil nutrient changes induced by the presence and intensity of plateau pika(*Ochotona curzoniae*) disturbances in the Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. *Ecological Engineering*, 2017, 106: 1-9.
- [9] Pang X P, Wang Q, Guo Z G. The impact of the plateau pika on the relationship between plant aboveground biomass and plant species richness[J]. *Land Degradation & Development*, 2021, 32(3): 1205-1212.
- [10] Smith A T, Badingqiuying, Wilson M C, et al. Functional-trait ecology of the plateau pika *Ochotona curzoniae* in the Qinghai-Tibetan Plateau ecosystem[J]. *Integrative Zoology*, 2019, 14(1): 87-103.
- [11] Eldridge D J, Myers C A. The impact of warrens of the European rabbit (*Oryctolagus cuniculus* L.) on soil and ecological processes in a semi-arid Australian woodland[J]. *Journal of Arid Environments*, 2001, 47(3): 325-337.
- [12] 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.
- Liu W L, Ma Y J, Wu Y N, et al. Effects of plateau pika's disturbance on soil moisture characteristics of different land surface types in Qinghai Lake watershed[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2017, 15(2): 62-69.

- [13] 卫万荣,张灵菲,杨国荣,等.高原鼠兔洞系特征及功能研究[J].草业学报,2013,22(6):198-204.
Wei W R, Zhang L F, Yang G R, et al. A study on the burrow features and functions of plateau pika[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2013,22(6):198-204.
- [14] Qian D W, Li Q, Fan B, et al. Characterization of the spatial distribution of plateau pika burrows along an alpine grassland degradation gradient on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Ecology and Evolution, 2021, 11(21):14905-14915.
- [15] 孙飞达,龙瑞军,蒋文兰,等.三江源区不同鼠洞密度下高寒草甸植物群落生物量和土壤容重特性研究[J].草业学报,2008,17(5):111-116.
Sun F D, Long R J, Jiang W L, et al. Alpine meadow plant community biomass and soil bulk density characteristics in different burrowing rodent density plots in the 'Three-River Headwaters' region[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2008,17(5):111-116.
- [16] Liu Y F, Huang Z, Meng L C, et al. Understory shading exacerbated grassland soil erosion by changing community composition[J]. Catena, 2022, 208:105771.
- [17] Whicker A D, Detling J K. Ecological consequences of prairie dog disturbances[J]. Bioscience, 1988,38(11):778-785.
- [18] Edwards W M, Norton L D, Redmond C E. Characterizing macropores that affect infiltration into nontilled soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 1988,52(2):483-487.
- [19] 翟辉,李国荣,李进芳,等.黄河源区高寒退化草地鼠丘对土壤风蚀作用的影响[J].水土保持研究,2022,29(6):14-20.
Zhai H, Li G R, Li J F, et al. Effects of rodent mounds on soil wind erosion in alpine degraded grassland of the Yellow River source zone[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(6):14-20.
- [20] 季波,时龙,徐金鹏,等.宁夏典型天然草地土壤团聚体稳定性及其有机碳分布特征[J].生态学报,2021,41(19):7669-7678.
Ji B, Shi L, Xu J P, et al. Distribution characteristics of soil aggregates and its organic carbon in typical natural grassland of Ningxia[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(19):7669-7678.
- [21] Pech R P, Arthur A D, Yanming Z, et al. Population dynamics and responses to management of plateau pikas *Ochotona curzoniae*[J]. Journal of Applied Ecology, 2007,44(3):615-624.
- [22] Gyssels G, Poesen J, Bochet E, et al. Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: A review[J]. Progress in Physical Geography: Earth and Environment, 2005,29(2):189-217.
- [23] Wu G L, Yang Z, Cui Z, et al. Mixed artificial grasslands with more roots improved mine soil infiltration capacity[J]. Journal of Hydrology, 2016,535:54-60.
- [24] Wu J Q, Wang H Y, Li G, et al. Vegetation degradation impacts soil nutrients and enzyme activities in wet meadow on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Scientific Reports, 2020,10(1):21271.
- [25] Pang X P, Wang Q, Zhang J, et al. Responses of soil inorganic and organic carbon stocks of alpine meadows to the disturbance by plateau pikas [J]. European Journal of Soil Science, 2020,71(4):706-715.
- [26] 魏兴琥,李森,杨萍,等.高原鼠兔洞口区侵蚀过程高山草甸土壤的变化[J].中国草地学报,2006,28(4):24-29.
Wei X H, Li S, Yang P, et al. Changes of soil physical and chemical property of alpine *Kobresia* meadow around the plateau pika entrances in the process of erosion[J]. Chinese Journal of Grassland, 2006, 28(4):24-29.
- [27] Leung A K, Garg A, Coe J L, et al. Effects of the roots of *Cynodon dactylon* and *Schefflera heptaphylla* on water infiltration rate and soil hydraulic conductivity [J]. Hydrological Processes, 2015,29(15):3342-3354.
- [28] Liu Y S, Fan J W, Harris W, et al. Effects of plateau pika (*Ochotona curzoniae*) on net ecosystem carbon exchange of grassland in the Three Rivers Headwaters Region, Qinghai-Tibet, China [J]. Plant and Soil, 2013,366(1):491-504.
- [29] Van Schaik N. Spatial variability of infiltration patterns related to site characteristics in a semi-arid watershed [J]. Catena, 2009,78(1):36-47.
- [30] Bonneau J, Fletcher T D, Costelloe J F, et al. Where does infiltrated stormwater go? Interactions with vegetation and subsurface anthropogenic features[J]. Journal of Hydrology, 2018,567:121-132.