

不同形成时间鼯鼠鼠丘土壤水力学性质的对比

王红兰^{1,2}, 蒋舜媛¹, 崔俊芳², 唐翔宇²

(1. 四川省中医药科学院, 成都 610041; 2. 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041)

摘要: 为探寻高原鼯鼠活动对若尔盖草原土壤持水性能的影响, 通过田间原位张力入渗和室内沙箱+压力膜仪试验, 探索不同形成时间鼠丘土壤水力学参数以及土壤大孔隙度的差异。结果表明: 与草地对照相比, 鼠丘土壤中易于流失的结构性孔隙水(θ_{str})含量增加, 而能被植物有效利用的基质性孔隙水(θ_{txt})含量下降(由对照组 $(0.14 \pm 0.02) \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 降低至 $(0.10 \pm 0.02) \text{ cm}^3/\text{cm}^3$)。新鼠丘和 1 年鼯鼠鼠丘中半径 $>250 \mu\text{m}$ 中大孔隙的有效孔隙度较草地对照组分别平均增加 30% 和 11%, 饱和导水率分别平均增加 38% 和 21%。高原鼯鼠活动改变了土壤水力学特征, 降低了土壤有效水的持水量, 提高了土壤饱和导水率, 使草地保水能力下降, 易出现水分亏缺, 增加草地退化和逐步沙化的风险。

关键词: 若尔盖草地; 鼠丘; 水分特征曲线; 导水率; 孔隙度

中图分类号: S152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2018)03-0180-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.03.028

Hydraulic Properties of Zokor Mounds with Different Forming Time in Zoige Grassland

WANG Honglan^{1,2}, JIANG Shuanyuan¹, CUI Junfang², TANG Xiangyu²

(1. Sichuan Academy of Chinese Medicine Sciences, Chengdu 610041;

2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041)

Abstract: Application of Disc permeameter in field and sandbox-pressure chamber in door was used to determine hydraulic parameters and pore size distribution for soil samples of various aged plateau zokor mounds on Zoige grassland. Compared to the control grassland soil, the water content in structural pores (θ_{str}) of mounds increased, while the water content in soil textural pores (θ_{txt}) decreased from $(0.14 \pm 0.02) \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ to $(0.10 \pm 0.02) \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, indicating a potential of a quicker water infiltration through mound soil via soil structural pores. In soil with newly-formed mound and one-year-old mound, the effective porosity of soil pores with size $r > 250 \mu\text{m}$ increased by 30% and 11%, and the saturated hydraulic conductivity increased by 38% and 21%, respectively, compared to the control soil. Therefore, it can be concluded that the excessive activity of zokor has changed soil pore structure, caused a decrease in soil's capacity to hold plant-available water and thus may accelerate the degradation and desertification of Zoige grassland.

Keywords: Zoige grassland; mound; water characteristic curve; hydraulic conductivity; soil porosity

若尔盖草原作为我国最重要的水源涵养地和重点生态功能区^[1], 正在经历严重的沙化与退化过程。季节性冻结土壤深度的减小、土壤黏粒和有机质含量的显著降低均是草地沙化与退化的重要表现^[2-4]。已有研究^[5]发现, 草原鼠虫害和过度放牧是造成若尔盖草地沙化的重要影响因子。其中, 若尔盖草原鼠虫害主要以高原鼠兔、中华鼯鼠、草原毛虫为主, 分布面积高达 5 363 350 hm^2 , 占可利用草原面积的 81.9%; 洞穴数量达 2 500~4 200 个/ km^2 ^[6]。由于害鼠的挖掘和啃食活动, 致使草场植被严重破坏, 造成大量水土流失, 形成大片次生裸地和寸草不生的“黑土滩”。据

统计, 全县草地沙化面积高达 80 803 hm^2 , 占草原总面积的 10%(808 030 hm^2), 且以 5.32% 的速度不断扩展和蔓延。大量鼠虫害的存在, 不仅降低了草地的载畜能力, 给畜牧业生产造成了极大的危害^[7]; 也严重破坏了土壤结构, 造成大量的水土流失, 严重威胁长江、黄河中下游地区的生态安全^[8-9]。

近年来, 如何有效恢复若尔盖高寒草地的生态系统环境已成为一个研究热点。研究报道多集中于草原鼠害现状与治理方案^[7,10]、草地植被群落结构特征^[11-12]和土壤碳矿化及固氮^[13-14]等领域, 而有关草原鼠害活动对土壤持水性能的研究报道却很少。因

收稿日期: 2017-12-21

资助项目: 国家自然科学基金项目(41501237, 41471268)

第一作者: 王红兰(1987—), 女, 广西来宾人, 博士, 助理研究员, 主要从事土壤生态环境研究。E-mail: honglanwang2010@126.com

通信作者: 崔俊芳(1983—), 女, 山东平原人, 博士, 助理研究员, 主要从事土壤物理研究。E-mail: jfcui@imde.ac.cn

此,本文通过田间原位张力入渗试验和室内沙箱十压力膜仪试验,对不同形成时间鼠丘的土壤水力学参数、土壤大孔隙度以及不同孔径大孔隙对饱和导水率的贡献率进行研究,试图探明若尔盖鼠害活动对土壤结构及水力学性能的影响。该研究结果对开展草原生态修复,改善草原生态环境具有重要的科学价值和实践指导意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

若尔盖县位于青藏高原南缘,海拔3 400~3 900 m,东部地区为大陆性山地中温带半湿润季风气候,西部地区属大陆性季风高原气候^[15]。地形上,西部地区为丘状高原,气候严寒,四季不明,冬长无夏,年绝对最低气温-33.7℃,年平均气温只有1℃,年日照时间2 400 h,无绝对无霜期。该地区年降水量650 mm,其中86%集中降于4月下旬至10月中旬。

1.2 材料与方法

试验于2015年8月在若尔盖县日尔郎小流域附近的高原草地进行,分别选取具有代表性的新鼢鼠鼠丘、1年鼢鼠鼠丘、2年鼢鼠鼠丘和对照草地进行试验,每个处理设置3个重复,共选择9个鼠丘,3个对照草地样地。采用圆盘入渗法(张力入渗仪,2800K1,SEC公司)分别测定表层土壤(2—3 cm)不同压力水头下(0, -1, -3, -6, -12 cm)的稳定入渗率,利用Wooding模型计算土壤非饱和导水率及饱和导水率^[16]。结合以上两者计算结果,联合公式(1)、公式(2)最终计算得到土壤有效孔隙度和不同半径的孔隙尺寸对饱和导水率的贡献。具体计算方法参考文献^[17]。

$$R_i = \frac{\sigma K_i}{\rho g M_i} \quad i=1,2,3,\dots,n \quad (1)$$

$$N_i = \frac{8\mu K_i}{\rho g \pi R_i^4} \quad i=1,2,3,\dots,n \quad (2)$$

$$\phi_i = N_i \times \pi R_i^2 \quad i=1,2,3,\dots,n \quad (3)$$

$$\varphi_i = \frac{K_i - K_{i-1}}{K_{fs}} \times 100\% \quad i=1,2,3,\dots,n \quad (4)$$

式中: R_i 为土壤平均孔隙半径(cm); σ 为水表面张力(g/s^2); ρ 为水密度(g/cm^3); g 为重力加速度(cm/s^2); K_i 为土壤导水率(cm/s); M_i 为土壤基质流势,为 $\ln K$ 与 α 的斜率(cm^2/s); N_i 为单位面积上平均孔隙半径的数量(cm^{-2}); μ 为水的黏滞系数,1.307 $g/(cm \cdot s)$; ϕ_i 为土壤有效孔隙度(cm^3/cm^3); φ_i 为不同半径孔隙尺寸对饱和导水率流的贡献率,无量纲单位; K_i, K_{i-1} 分别为相邻压力水头下的导水率(cm/s); K_{fs} 为田间饱和导水率(cm/s)。

同时,采用环刀采样器(Eijkelkamp公司,荷兰)在圆盘入渗测定点附近取表层原状环刀土样($\varphi=5$ cm, $H=5$ cm, $V=100$ cm^3),每个鼠丘上取1个环刀土样,共计12个环刀样品。于2015年9月在中国科学院盐亭紫色土农业生态试验站实验室采用沙箱法(水头压力分别为-1, -2.5, -31.6, -63.1, -100 cm H_2O)和压力膜仪法(水头压力依次为-330, -500, -1 000, -5 000, -15 300 cm H_2O)测定不同压力下的土壤体积含水量,从而绘制土壤水分特征曲线。土壤水分特征曲线的拟合同时考虑结构性孔隙和基质性孔隙的双孔隙模型(BE)^[18],计算公式为:

$$\theta = \theta_r + \theta_{\text{txt}} e^{-\frac{h}{h_{\text{txt}}}} + \theta_{\text{str}} e^{-\frac{h}{h_{\text{str}}}} \quad (5)$$

式中: θ, θ_r 分别为体积含水量和滞留含水量(cm^3/cm^3); $\theta_{\text{txt}}, \theta_{\text{str}}$ 分别为基质性孔隙和结构性孔隙对应的体积含水量(cm^3/cm^3); $h_{\text{txt}}, h_{\text{str}}$ 分别为基质性孔隙和结构性孔隙对应的进气压力(cm); h 为压力水头(cm)。

有效饱和度 S^* 的计算公式为:

$$S^* = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (6)$$

式中: θ_s 为饱和体积含水量(cm^3/cm^3)。

计算 S^* 时 θ_s, θ_r 分别采用0, -15 300 cm H_2O 压力下所对应的土壤体积含水量。通过公式(6)将 θ 转化为 S^* ,拟合 $S^* \sim \log h$ 关系曲线^[19]。根据 $S^* \sim \log h$ 关系曲线得到其衍生曲线 $dS^*/(\log h)/d(\log h \sim \log h)$ 。基于毛细管方程,孔隙半径 $r(\mu m)$ 与压力水头 $h(cm)$ 的关系式为 $r=1490/h$ ^[20]。通过换算,衍生曲线 $dS^*/(\log h)/d(\log h \sim \log h)$ 变为 $dS^*/(\log h)/d(\log h \sim \log r)$ 。衍生曲线 $dS^*/(\log h)/d(\log h \sim \log r)$ 代表了不同负压水头所对应的孔隙分布特征。

此外,在测定点附近取适量分散土样带回实验室,将土样自然风干,并于2015年9月在中国科学院盐亭紫色土农业生态试验站实验室开展土壤基本理化性质的测定。一部分风干样品过2 mm筛,采用吸管法测定土壤颗粒组成^[21](按照美国制土壤分级标准:砂粒2~0.05 mm,粉粒0.05~0.002 mm和黏粒 <0.002 mm);另一部分风干样品过0.25 mm筛后,用重铬酸钾一外加热法测定土壤有机质含量^[21]。

1.3 数据处理与分析

应用Origin 8.0进行数据处理、制图;采用SPSS 17.0统计软件进行数据的显著性分析,显著度水平设为0.05。

2 结果与分析

2.1 不同形成时间鼠丘土壤理化性质

由表1可知,与对照草地相比,新鼢鼠鼠丘的砂

粒和黏粒含量分别减少 7%, 31%, 粉粒含量增加 17% ($P < 0.05$), 表明鼯鼠打洞挖掘土丘的活动改变了土壤粒级组成, 使得黏粒含量明显减低, 粉粒含量明显增加。由于土壤黏粒含量被认为是维持和稳固土壤团聚结构的重要组成部分之一^[22], 鼯鼠活动导致土壤黏粒含量降低易造成土壤随水流移动, 增加土壤

水土流失风险。对于土壤容重, 新鼯鼠鼠丘容重值低于对照草地, 说明鼯鼠活动直接疏松了土壤, 降低了土壤容重。新鼯鼠鼠丘的有机质含量明显低于对照草地的对应值, 说明鼯鼠活动降低了土壤肥力, 可能会导致草地牧草营养动态失衡, 从而影响牧草再生和牧场产草量。

表 1 不同类型鼠丘土壤理化性质

类别	容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	有机质/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	机械组成/%		
			砂粒 (0.05~2 mm)	粉粒 (0.002~0.05 mm)	黏粒 (< 0.002 mm)
新鼯鼠鼠丘	0.76±0.03	88.81±7.91	287.29±62.76	574.66±35.22	138.05±97.98
1年鼯鼠鼠丘	0.86±0.04	76.16±11.54	308.10±27.51	473.71±5.06	218.19±32.57
2年鼯鼠鼠丘	0.67±0.05	103.09±25.91	252.47±72.69	574.18±75.07	173.34±2.38
草地对照	0.87±0.09	105.11±13.62	309.77±52.63	489.34±34.08	200.89±32.14

注: 表中数据为平均值±标准误差。下同。

2.2 不同形成时间鼠丘土壤水分特征曲线

采用 Origin 8.0 软件对沙箱及压力膜仪法的试验数据进行双指数(BE)模型拟合^[16](表 2), 获得双

孔域土壤水分特征曲线(SWRC)及孔径分布(图 1、图 2)。双指数模型拟合效果采用均方根误差 RMSE(θ)来衡量, 其值越小说明拟合效果越好。

表 2 土壤水分特征曲线双指数模型参数拟合值

类别	滞留含水量 θ_r /	结构性孔隙含水量 θ_{str} /	结构性孔隙	基质性孔隙含水量 θ_{ixt} /	基质性孔隙	均方根误差 RMSE(θ)/
	($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	水头 h_{str}/cm	($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	水头 h_{ixt}/cm	
新鼯鼠鼠丘	0.28±0.05	0.47±0.11	14.87±0.84	0.10±0.02	731.32±58.53	0.002
1年鼯鼠鼠丘	0.30±0.04	0.30±0.04	16.22±3.31	0.11±0.00	652.28±150.05	0.005
2年鼯鼠鼠丘	0.31±0.05	0.38±0.14	13.43±0.14	0.12±0.00	601.14±85.78	0.002
草地对照	0.34±0.05	0.24±0.03	44.34±4.44	0.14±0.02	5198.59±1371.69	0.003

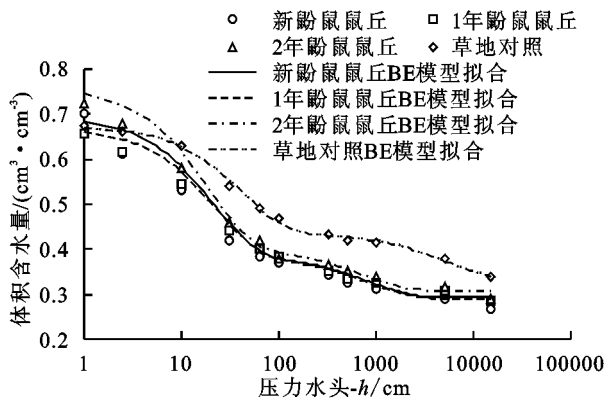


图 1 双指数型土壤水分特征曲线

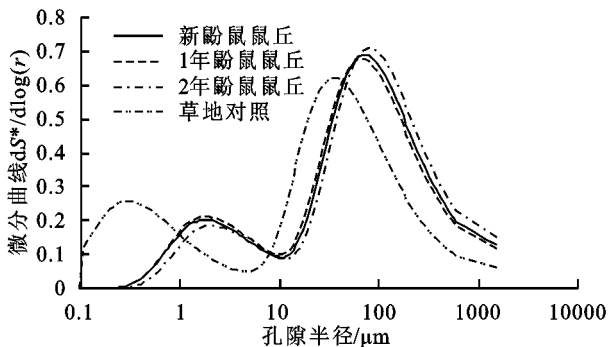


图 2 相对饱和度的微分曲线

由表 2 可知, 不同形成时间鼠丘和对照草地土壤的 RMSE(θ)均小于 0.01, 拟合效果较好。不同形成

时间鼯鼠鼠丘的基质性孔隙含水量 θ_{ixt} (视为植物有效水)均低于对照草地的对应值, 而结构性孔隙含水量 θ_{str} 则高于对照土壤。这表明鼯鼠活动改变了草地原有的土壤结构, 土壤重力水可通过结构性孔隙快速流失, 使草地保水能力下降。

由图 1 可知, 低吸力(-100~0 $\text{cm H}_2\text{O}$)下, 与草地对照相比, 不同形成时间鼯鼠鼠丘的体积含水量随吸力的增加快速下降, 降幅分别为 0.33, 0.28, 0.35 cm^3/cm^3 , 高于对照草地土壤的降幅值 0.21 cm^3/cm^3 , 说明鼯鼠活动使更多土壤水通过结构性孔隙快速运移, 容易加快草地土壤水土流失; 高吸力(-15 300~-100 $\text{cm H}_2\text{O}$)范围内, 不同形成时间鼯鼠鼠丘的土壤体积含水量均低于对照草地土壤, 说明鼯鼠活动降低了土壤的持水量, 降幅为 0.03 cm^3/cm^3 (图 1)。此土壤持水量的减少可能是因为鼯鼠挖掘土丘降低了土壤容重和有机质含量(表 1), 使得土壤胶结物质和亲水物质减少^[23], 从而导致土壤持水能力降低。

2.3 不同形成时间鼠丘土壤导水率

基于张力入渗试验数据, 采用 Wooding 模型^[15]计算得到不同形成时间鼯鼠鼠丘和对照草地近饱和土壤导水率曲线 $K(h)$ (图 3)。由图 3 可知, 对照草地表层土壤饱和导水率 K_s 为 0.000 29 cm/s ; 新鼯鼠鼠丘和

1年鼯鼠鼠丘 K_{fs} 分别为 0.000 40, 0.000 35 cm/s; 较对照草地分别提高 38%, 21%; 2年鼯鼠鼠丘 K_{fs} 则相应降低 17%, 为 0.000 29 cm/s。这表明鼯鼠活动形成的新土堆, 大孔隙丰富, 饱和导水率最高; 1年后, 土壤饱和导水率有所下降, 但仍高于对照草地的对应值。鼠丘土壤高饱和导水率说明此时土壤易产生地表径流, 地表径流可能主要优先通过新近形成的鼯鼠鼠丘与鼠洞快速流失, 使草地保水能力下降, 加重草地退化与逐步的沙化。2年后, 土壤饱和导水率低于对照草地。其可能的原因包括: 一是随时间推进, 由于重力作用, 原本松散的新生土堆慢慢紧实, 大孔隙比例减低; 二是经过降雨中雨滴的滴溅作用, 加剧土堆的紧实程度; 三是随植物的生长和植被恢复, 根系有利于土壤的团聚作用, 加速土壤结构再构。

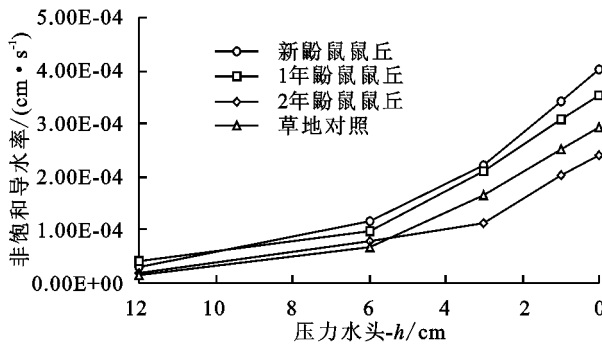


图3 不同类型鼠丘土壤非饱和导水率

2.4 不同形成时间鼠丘土壤孔隙特征

鼯鼠活动破坏了草原土壤结构, 从而改变了土壤

孔隙特征。由表3可知, 与对照草地相比, 不同形成时间鼯鼠鼠丘的总孔隙度分别增加 0.04, 0.01, 0.08 cm^3/cm^3 。毛管孔隙度(毛管孔隙度% = 田间持水量% × 容重)分别减少 0.11, 0.04, 0.13 cm^3/cm^3 ; 非毛管孔隙度(非毛管孔隙度 = 总孔隙度 - 毛管孔隙度)分别增加 0.15, 0.05, 0.21 cm^3/cm^3 。由此表明, 鼯鼠活动增加了土壤非毛管孔隙(不具持水能力, 能使土壤通气、透水)含量, 降低了土壤毛管孔隙度, 从而导致土壤保水性能降低。

由表3可知, 对照草地土壤中小孔隙(半径 125~250 μm), 中孔隙(半径 250~500 μm)和大孔隙(半径 >500 μm)的有效孔隙度分别为 0.047, 0.013, 0.014 cm^3/cm^3 。新鼠丘、1年和2年鼯鼠鼠丘的小孔隙有效度分别为 0.025, 0.016, 0.046 cm^3/cm^3 ; 中孔隙的孔隙有效性分别为 0.016, 0.015, 0.010 cm^3/cm^3 ; 大孔隙的有效性则分别为 0.019, 0.015, 0.017 cm^3/cm^3 。与对照草地土壤相比, 新成鼠丘、1年和2年鼠丘土壤中半径 >125 μm 的土壤孔隙总有效孔隙度分别降低 19%, 38%, 1%, 其中半径为 125~250 μm 的有效孔隙度降幅最为明显, 最高可达 47%, 66%, 2%, 而半径 >250 μm 的有效孔隙度却呈现出相反的变化趋势, 新鼠丘、1年和2年鼠丘土壤中分别增加 30%, 11%, 1%(表3)。这表明鼯鼠活动降低了土壤中小孔隙的总体积, 却增加了大孔隙的体积。

表3 不同类型鼠丘土壤孔隙特征

单位: cm^3/cm^3

类别	总孔隙度	毛管孔隙度	非毛管孔隙度	125~250 μm 孔隙度	250~500 μm 孔隙度	>500 μm 孔隙度
新鼯鼠鼠丘	0.71 ± 0.01	0.26 ± 0.01	0.45 ± 0.01	0.025 ± 0.008	0.016 ± 0.001	0.019 ± 0.005
1年鼯鼠鼠丘	0.68 ± 0.02	0.33 ± 0.01	0.35 ± 0.02	0.016 ± 0.008	0.015 ± 0.005	0.015 ± 0.002
2年鼯鼠鼠丘	0.75 ± 0.02	0.24 ± 0.02	0.51 ± 0.02	0.046 ± 0.031	0.017 ± 0.001	0.018 ± 0.005
草地对照	0.67 ± 0.03	0.37 ± 0.02	0.30 ± 0.03	0.047 ± 0.046	0.013 ± 0.008	0.014 ± 0.002

2.5 结构性孔隙对饱和导水率的相对贡献

土壤透水性和饱和导水率是水分研究的重要参数, 是衡量土壤渗透能力的重要指标^[24]。土壤透水能力最终取决于土壤孔隙结构^[25], 即土壤结构性孔隙对饱和导水率的相对贡献率。由图4可知, 与对照草地相比, 新成、1年、2年鼯鼠鼠丘土壤中小孔隙(半径 125~250 μm)对 K_{fs} 的贡献率有所减少, 分别降低了 9%, 11%, 33%; 而中等孔隙(半径 250~500 μm)和大孔隙(半径 >500 μm)对 K_{fs} 的贡献率却增加了, 增幅最高可达 60%。总体而言, 鼯鼠活动导致土壤孔径 >125 μm 的结构性孔隙对 K_{fs} 的总贡献率略有增加。对于对照草地与不同形成时间鼯鼠土堆, 土壤中绝大部分水流都是通过半径 >125 μm 孔隙运动, 该部分孔隙对 K_{fs} 的贡献率高达 87%~91%。

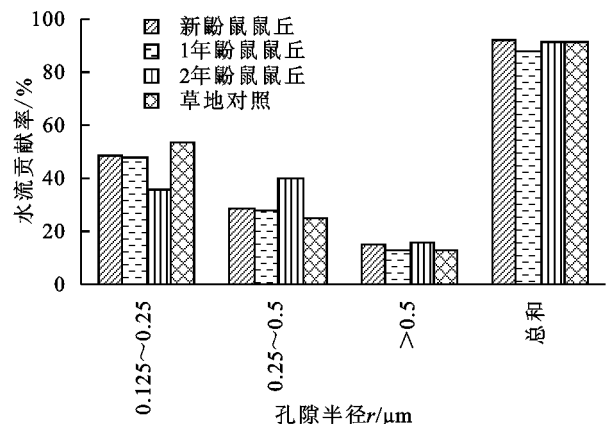


图4 不同孔隙半径对饱和导水率的贡献率

3 讨论

高原鼯鼠作为若尔盖地区地下活动较为活跃的啮齿动物, 它们严格适应的地下生活方式, 主要以地

表以下 3~20 cm 的植物根茎为食物来源,并偏爱生产力高的草地作为栖息地^[25]。它们居于地下,挖掘大量洞道系统,并不断将地下土壤上翻堆积于地表,从而形成覆盖植物地上部分的裸露土丘^[13]。鼯鼠造丘活动不仅造成了土壤垂直和水平结构发生变化,也改变了土壤理化性质和孔隙结构^[26]。本研究表明,不同形成时间鼠丘的土壤理化性质与周围未干扰区域的土壤理化性质存在明显差异。其中新鼯鼠鼠丘土壤黏粒明显减少,粉粒含量明显增加,而且土壤容重低于对照草地的对应值,这与杨莹博等^[27]的研究结果一致。这种差异可能是由于鼯鼠活动直接疏松了土壤,降低了土壤容重,同时作为胶结物质的土壤黏粒,其含量减少易造成土壤随水流移动,增加土壤水土流失风险。另外,鼯鼠在挖掘搬运、回填、堆砌土丘时破坏了土壤原有结构^[13],增加了土壤非毛管孔隙(不具持水能力,能使土壤通气、透水)含量,降低了土壤毛管孔隙度及土壤中小孔隙的总体积,从而导致土壤保水性能降低。

土壤水分特征曲线及饱和导水率是土壤水动力学研究中的重要参数,影响着地面水分的入渗、径流及蒸发三者的分配关系。土壤水分特征曲线和饱和导水率易受土壤容重、质地、土壤结构、有机质含量等诸多因素的影响^[16,28]。已有研究^[29-30]表明,鼠类的造丘活动能有效改善土壤的紧实度,进而形成较为疏松的土壤。疏松的土壤形成较大的土壤间隙或孔隙,从而形成水流优先通道,提高土壤透水能力^[31]。本研究表明,与对照草地相比,不同形成时间鼯鼠鼠丘的基质性孔隙含水量 θ_{xt} (视为植物有效水)均较低,而结构性孔隙含水量 θ_{sr} 则均高于对照草地的对应值。另外,随着时间的推移,鼯鼠鼠丘土壤饱和导水率呈现下降趋势。即新鼯鼠鼠丘的饱和导水率最高,1 年鼯鼠鼠丘的次之,2 年鼯鼠鼠丘的值最小。

综上所述,本研究从鼯鼠造丘后形成大量鼠丘为出发点,探讨鼠丘土壤持水性能及孔隙结构的时空变化规律。研究结果不仅为鼯鼠造丘活动改变土壤理化性质和孔隙结构提供可靠的数据资料,也为若尔盖地区开展草原水土保持及生态修复提供研究思路。

4 结论

(1) 鼯鼠挖掘土丘活动改变了草地土壤粒级组成结构,降低了土壤容重和有机质含量,不利于土壤水分的吸持。同时裸露土壤面积的增加也会进一步加剧草原水土流失。

(2) 草原鼯鼠活动使草地土壤中易流失的结构性孔隙水(θ_{sr})含量有所提高,而被植物有效利用的基质性孔隙水(θ_{xt})含量下降。

(3) 鼯鼠活动破坏了草地土壤结构,降低了土壤中小孔隙(125~250 μm)的体积,增加了中、大孔隙

(>250 μm)的体积,从而提高了土壤的饱和导水率,使草地保水能力下降,易导致草地出现水分亏缺,从而加重草地退化与逐步的沙化。

参考文献:

- [1] Hu G Y, Dong Z B, Lu J F, et al. The developmental trend and influencing factors of aeolian desertification in the Zoige Basin, eastern Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Aeolian Research*, 2015, 19: 275-281.
- [2] Li B Q, Yu Z B, Liang Z M, et al. Effects of climate variations and human activities on runoff in the zoige alpine wetland in the Eastern Edge of the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2014, 19(5): 1026-1035.
- [3] 费凯,胡玉福,舒向阳,等.若尔盖高寒草地沙化对土壤活性有机碳组分的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(5): 327-330.
- [4] 税伟,白剑平,简小枚,等.若尔盖沙化草地恢复过程中土壤特性及水源涵养功能[J]. *生态学报*, 2017, 37(1): 277-285.
- [5] 张顺谦,郭海燕,罗勇.气候变化和载畜量对若尔盖草地沙化的驱动力评价[J]. *中国草地学报*, 2007, 29(5): 64-71.
- [6] 红原县志编纂委员会.红原县志[M].成都:四川人民出版社,1996.
- [7] 苏军虎,刘荣堂,纪维红,等.我国草地鼠害防治与研究的发展阶段及特征[J]. *草业科学*, 2013, 30(7): 1116-1123.
- [8] 熊远清,吴鹏飞,张洪芝,等.若尔盖湿地退化过程中土壤水源涵养功能[J]. *生态学报*, 2011, 31(19): 5780-5788.
- [9] 陈梦蝶,黄晓东,侯秀敏,等.青海省草原鼠害区域草地生物量及盖度动态监测研究[J]. *草业学报*, 2013, 22(4): 247-256.
- [10] 张蕊,王媛,马丽娜,等.三江源区退化人工草地、“黑土滩”和天然草地植物群落物种多样性[J]. *草地学报*, 2014, 22(6): 1171-1178.
- [11] 李志威,王兆印,张晨笛,等.若尔盖沼泽湿地的萎缩机制[J]. *水科学进展*, 2014, 25(2): 172-180.
- [12] 王丹,吕瑜良,徐丽,等.水分和温度对若尔盖湿地和草甸土壤碳矿化的影响[J]. *生态学报*, 2013, 33(20): 6436-6443.
- [13] 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.
- [14] Li J C, Wang W L, Hu G Y, et al. Changes in ecosystem service values in Zoige Plateau, China [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2010, 139(4): 766-770.
- [15] Wooding R. Steady infiltration from a shallow circular pond [J]. *Water Resources Research*, 1968, 4: 1259-1273.
- [16] Wang H L, Tang X Y, Zhang W, et al. Within-year changes in hydraulic properties of a shallow entisol in farmland and forestland [J]. *Vadose Zone Journal*, 2015, 14(7): 1-10.

- Field Crops Research, 2014, 155: 67-76.
- [8] Li L, Tilman D, Lambers H, et al. Plant diversity and overyielding: Insights from belowground facilitation of intercropping in agriculture [J]. *New Phytologist*, 2014, 203(1): 63-69.
- [9] 肖靖秀, 郑毅, 汤利, 等. 小麦-蚕豆间作对根系分泌糖和氨基酸的影响[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(11): 1825-1830.
- [10] 肖靖秀, 郑毅, 汤利. 小麦-蚕豆间作对根系分泌低分子量有机酸的影响[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(6): 1739-1744.
- [11] Seran T H, Brintha I. Review on maize based intercropping [J]. *Journal of Agronomy*, 2010, 9(3): 135-145.
- [12] 周晓晨, 李永梅, 王自林, 等. 坡耕地红壤农作物根系与团聚体稳定性的关系[J]. *山西农业大学学报(自然科学版)*, 2017, 37(11): 818-824.
- [13] Kemper W D, Rosenau R C. Aggregate stability and size distribution [J]. *Methods of Soil Analysis Part. Physical & Mineralogical Methods*, 1986: 425-442.
- [14] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. *科学通报*, 1993, 38(20): 1896-1896.
- [15] 陈山, 杨峰, 林杉, 等. 土地利用方式对红壤团聚体稳定性的影响[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(5): 211-216.
- [16] 姜敏, 刘毅, 刘闯, 等. 丹江口库区不同土地利用方式土壤团聚体稳定性及分形特征[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(6): 265-270.
- [17] Ström L, Olsson T, Tyler G. Differences between calcifuge and acidifuge plants in root exudation of low-molecular organic acids [J]. *Plant and Soil*, 1994, 167(2): 239-245.
- [18] 尹元萍, 张雅琼, 申毓哈, 等. 玉米//大豆间作中大豆根系生长及氮磷养分吸收的特点[J]. *西南农业学报*, 2014, 27(6): 2305-2310.
- [19] 马心灵, 朱启林, 耿川雄, 等. 不同氮水平下作物养分吸收与利用对玉米//马铃薯产量优势的贡献[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(4): 1265-1273.
- [20] 杨智仙, 汤利, 郑毅, 等. 不同品种小麦与蚕豆间作对蚕豆枯萎病发生、根系分泌物和根际微生物群落功能多样性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(3): 570-579.
- [21] 李欣雨, 夏建国, 田汶艳. 稻田植茶后土壤团聚体水稳性变化特征及影响因素分析[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(4): 148-153.
- [22] 王英俊, 李同川, 张道勇, 等. 间作白三叶对苹果//白三叶复合系统土壤团聚体及团聚体碳含量的影响[J]. *草地学报*, 2013, 21(3): 485-493.
- [23] 李娟, 韩霁昌, 陈超, 等. 黄土高原丘陵沟壑区土地利用方式对土壤团聚体特征的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(1): 248-253.
- [24] Pirmoradian N, Sepaskhah A R, Hajabbasi M A. Application of fractal theory to quantify soil aggregate stability as influenced by tillage treatments [J]. *Biosystems Engineering*, 2005, 90(2): 227-234.
- [25] Ahmadi A, Neyshabouri M R, Rouhipour H, et al. Fractal dimension of soil aggregates as an index of soil erodibility [J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 400(3/4): 305-311.
- (上接第 184 页)
- [17] Dexter A R, Richard G, Arrouays D, et al. Complexed organic matter controls soil physical properties [J]. *Geoderma*, 2008, 144: 620-627.
- [18] Kastanek F J, Nielsen D R. Description of soil water characteristics using a cubic spline interpolation [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 65(2): 279-283.
- [19] Kutílek M, Nielsen D R. *Soil Hydrology* [M]. Germany: Cremlingen-Destedt Catena Verlag, 1994: 134-140.
- [20] 鲁如坤. *土壤农业化学分析法* [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 89-93.
- [21] 谭秋锦, 宋同清, 彭晚霞, 等. 峡谷型喀斯特不同生态系统土壤团聚体稳定性及有机碳特征[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(3): 671-678.
- [22] 王子龙, 胡斐南, 赵勇钢, 等. 土壤胶结物质分布特征及其对黄土大团聚体稳定性的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(5): 331-336.
- [23] 李雪垠, 李朝霞, 王天巍, 等. 紫色土中砾石夹层对土壤水分入渗的影响[J]. *水科学进展*, 2016, 27(5): 662-669.
- [24] 王红兰, 唐翔宇, 鲜青松, 等. 紫色土水分特征曲线室内测定方法的对比[J]. *水科学进展*, 2016, 27(2): 240-248.
- [25] 何咏琪, 黄晓东, 候秀闵, 等. 基于 3S 技术的草原鼠害监测方法研究[J]. *草业学报*, 2013, 22(3): 33-40.
- [26] 舒杨. 草原鼠害的生态防治技术研究及其应用[D]. 成都: 四川农业大学, 2014.
- [27] 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[J]. *草业学报*, 2010, 19(1): 14-20.
- [28] Lionel A, Yves C. Temporal and spatial variability of soil bulk density and near-saturated hydraulic conductivity under two contrasted tillage management systems [J]. *Geoderma*, 2009, 152(1/2): 85-94.
- [29] Huo L, Chen Z, Zou Y, et al. Effect of zoige alpine wetland degradation on the density and fractions of soil organic carbon [J]. *Ecological Engineering*, 2013, 51: 287-295.
- [30] 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斑秃面积变化的响应[J]. *草业学报*, 2011, 20(1): 1-6.
- [31] Rui Y C, Wang S P, Xu Z H, et al. Warming and grazing affect soil labile carbon and nitrogen pools differently in an alpine meadow of the Qinghai-Tibet Plateau in China [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2011, 11(6): 903-914.