

围栏封育对荒漠草原灌丛草地土壤优先流的影响研究

徐苗苗¹, 孟晨^{1,2,3,4}, 王兴^{2,3,4}, 朱志昊^{2,3,4}, 王丽^{2,3,4}, 宋乃平^{2,3,4}, 杜灵通^{2,3,4}

(1.宁夏大学农学院, 银川 750021; 2.宁夏大学生态环境学院, 银川 750021;

3.宁夏大学西北土地退化与生态系统恢复国家重点实验室培养基地,

银川 750021; 4.西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 银川 750021)

摘要:为探究围封对灌丛草地土壤优先流的影响,以宁夏吴忠市盐池县典型荒漠草原区为研究区,通过野外入渗染色试验、图像处理分析等方法,对围封荒漠草原灌丛草地土壤优先流的影响进行评价。结果表明:(1)围栏封育与放牧管理样地土壤水分入渗特征存在差异,在围栏封育样地,草地、天然柠条林地、人工柠条林地的入渗染色图像分别在 0—125, 0—115, 0—105 cm 呈现均匀分布,而在 125—240, 115—150, 105—140 cm 呈现染色分支,在放牧管理样地,草地、天然柠条林地、人工柠条林地入渗染色图像分别在 0—80, 0—70, 0—80 cm 呈现均匀分布,围栏封育导致土壤优先流发生深度更大;(2)土壤剖面染色面积比表现为围栏封育草地>围栏封育天然柠条林地>围栏封育人工柠条林地>放牧管理人工柠条林地>放牧管理天然柠条林地>放牧管理草地,土壤染色深度表现为围栏封育草地>围栏封育天然柠条林地>放牧管理草地>放牧管理天然柠条林地>围栏封育人工柠条林地>放牧管理人工柠条林地,围栏封育管理会导致土壤剖面染色面积比及染色深度增大;(3)土壤优先流变异系数表现为放牧管理天然柠条林地>放牧管理人工柠条林地>围栏封育天然柠条林地>放牧管理草地>围栏封育人工柠条林地>围栏封育草地,放牧管理导致土壤优先流程度增加,而围栏封育降低灌木林地及草地的优先流程度。因此,在荒漠草原等干旱半干旱地区,围栏封育可作为提升土壤水分均匀入渗深度、降低优先流发生程度、提高土壤水分利用效率的重要管理方式。

关键词: 优先流; 荒漠草原; 灌丛草地; 围栏封育; 放牧干扰

中图分类号:S152.7

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2023)03-0081-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.03.011

Study on the Effect of Grazing and Enclosure on the Preferential Flow of Soil in Desert Grassland and Shrub Grassland

XU Miaomiao¹, MENG Chen^{1,2,3,4}, WANG Xing^{2,3,4}, ZHU Zhihao^{2,3,4},

WANG Li^{2,3,4}, SONG Naiping^{2,3,4}, DU Lintong^{2,3,4}

(1.College of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021; 2.College of Ecological

Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021; 3.Key Laboratory of land Degradation and

Ecosystem Restoration in Northwest China, Ningxia University, Yinchuan 750021; 4.Key Laboratory of

Rehabilitation and Reconstruction of Degraded Ecosystems in Northwest China, Ningxia University, Yinchuan 750021)

Abstract: In order to explore effect of the enclosure of shrub grassland on soil preferential flow, typical desert area in Ningxia province, Wuzhong city was taken as the study area, field infiltration dyeing test and image processing analysis were used. The results showed that: (1) In the fenced and enclosed plots, the infiltration staining images showed obvious difference. In the fenced and enclosed plots, grassland, natural *Caragana korshinskii* forest and artificial *C. korshinskii* forest showed uniform distribution at 0—125, 0—115 and 0—105 cm, respectively, and branching at 125—240, 115—150 and 105—140 cm. While in the grazing management plots, the infiltration staining images of grassland, natural *C. korshinskii* forest and artificial *C. korshinskii* forest showed uniform distribution in 0—80, 0—70 and 0—80 cm, respectively. The depth of soil preferential flow was deepened due to fencing. (2) The area ratio of soil profile staining was as

收稿日期:2022-10-01

资助项目:宁夏自然科学基金项目(2021AAC05005, 2022AAC03102);宁夏重点研发计划项目(2021BEB04012, 2022BEG02003, 2019BFG02010)

第一作者:徐苗苗(1998—),女,宁夏中卫人,硕士研究生,主要从事水土保持与土壤水文研究。E-mail:3036649605@qq.com

通信作者:孟晨(1990—),男,宁夏石嘴山人,助理研究员,硕士生导师,主要从事水土保持与土壤水文研究。E-mail:mengchen@nxu.edu.cn

follows: fenced grassland > fenced natural *C. korshinskii* forest > fenced artificial *C. korshinskii* forest > grazing management artificial *C. korshinskii* forest > grazing management natural *C. korshinskii* forest > grazing management grassland. The depth of soil staining was as follows: fenced grassland > fenced natural *C. korshinskii* forest > grazing managed grassland > grazing managed natural *C. korshinskii* forest > fenced artificial *C. korshinskii* forest > grazing managed artificial *C. korshinskii* forest. Fenced management would lead to the increase of soil profile staining area ratio and depth. (3) Soil preferential flow variation coefficient of performance was as follows: grazing management natural *C. korshinskii* woodland > grazing management artificial *C. korshinskii* > enclosure cultivating natural *C. korshinskii* woodland > grazing management grassland > grazing management cultivating artificial *C. korshinskii* forest land > enclosures fence grassland. Grazing management will lead to increment of soil preferential flow. Cultivating and enclosures will reduce the degree of preferential flow shrub forest and grass. Therefore, in arid and semi-arid areas such as desert steppe, fencing can be an important management method to improve the uniform infiltration depth of soil water, reduce the occurrence of preferential flow, and improve the efficiency of soil water use.

Keywords: preferential flow; desert steppe; shrub grassland; enclosure; grazing disturbance

优先流现象是一种导致溶质快速下迁^[1]的重要的土壤水分运动过程,其通过影响土壤水分、养分等资源的运移与分布,决定植被对资源的获取与吸收,在影响干旱区水土流失、地下水污染等生态过程的同时,对荒漠草原等干旱区植被的可持续生长产生重要作用^[2]。由于优先流的非均匀性及非平衡性^[3],其运动形式与类型多样,对地表水、地下水和土壤水运动过程的影响十分复杂。例如,在森林生态系统中,优先流现象的发生可以很大程度地减少地表径流的产生^[4],有利于水资源的保护和调控;同时,在水资源丰富的地区,优先流现象会导致土壤含水率提高,对地下水补给起至关重要的作用^[5]。但是,在地质条件特殊、降雨量集中的区域,优先流现象也会造成滑坡、泥石流等地质灾害;在农田中,优先流现象的发生会导致农药快速流失,降低养分利用率的同时造成地下水污染^[6],对环境安全及人体健康产生严重威胁^[7]。因此,对典型区域及环境下土壤优先流的研究对于水土资源合理利用以及生态环境建设具有重要意义。

荒漠草原是草原向荒漠过渡,草原植被最干旱的一类草原^[8],生态系统稳定性差,年降水量少,植物种类贫乏,生产力低,退化后难以恢复^[9]。过度放牧是影响荒漠草原土壤环境的主要原因^[10]。孙会等^[11]发现,适度放牧对草地植被群落物种多样性具有促进作用,有利于草地生态系统健康和可持续发展;谷康民等^[12]发现,放牧对土壤水分初始入渗的增加对退耕还林(草)时期黄土高原水资源压力的缓解和土壤水分条件的改善具有重要意义;但王悦骅等^[13]发现,围封可提高植物的盖度、密度、丰富度和生物量,对植被恢复起到很好的作用;姚喜喜等^[14]认为,围封虽然增加高寒草甸植物群落生物量和土壤养分,但引起草地植物群落多样性下降,故适当放牧可以保护植物群落多样性和物种丰富度。

以往研究集中于放牧及围封对土壤水分、养分及多样性的影响,而针对放牧及围封影响土壤优先流的研究不够,阻碍对荒漠草原地下生态过程的全面认识。以宁夏盐池县典型荒漠草原为研究区,选取放牧干扰及围栏封育的人工柠条林地、天然柠条林地及草地,通过野外土壤水分入渗染色示踪法^[15]研究围栏封育对荒漠草原灌草地土壤优先流的影响,以期为荒漠草原地区植被恢复管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

盐池县位于宁夏回族自治区东部,吴忠市辖县(107°15'—107°19'E, 37°32'—37°36'N)。盐池属于农耕民族与游牧民族的交界地带,是著名的滩羊集中产区。该区日照时间长、温差大,干旱少雨,光能丰富,日照充足,年平均气温 7.8℃,冬夏两季平均温差 28℃。荒漠草原草场主要以风沙土为主。由于乱垦、乱挖,大部分草原严重沙化,一般草层高度 10~20 cm,覆盖度 35%~50%。主要植物有猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、长芒草(*Stipa bungeana*)、短花针茅(*Stipa breviflora*)、赖草(*Leymus secalinus*)、白草(*Pennisetum centrasiaticum*)、牛枝子(*Lespedeza potaninii*)、猫头刺(*Oxytropis aciphylla*)、沙珍棘豆(*Oxytropis racemosa*)、苦豆子(*Sophora alopecuroides*)、银灰旋花(*Convolvulus ammannii*)、虫实(*Corispermum hyssopifolium*)等。

1.2 样点选取

根据植被类型及放牧与否,在宁夏盐池县荒漠草原区内共设置 6 个试验样地,各样地土壤类型均为草原风沙土,地形、海拔一致。样地基本情况见表 1,样品采集 2022 年 4 月。

表 1 试验点样地信息

样地编号	土地管理方式	植被覆盖情况	坐标	海拔/m
1	放牧管理	人工柠条林+猪毛蒿+狗尾草	37°49′43″N,107°30′08″E	1519
2		天然柠条林+猪毛蒿+狗尾草	37°49′36″N,107°30′37″E	1516
3		猪毛蒿+狗尾草	37°49′42″N,107°30′31″E	1517
4	围栏封育	人工柠条林+猪毛蒿+狗尾草	37°49′25″N,107°31′11″E	1497
5		天然柠条林+猪毛蒿+狗尾草	37°49′37″N,107°30′38″E	1511
6		猪毛蒿+狗尾草	37°49′31″N,107°30′45″E	1518

1.3 入渗染色试验

优先流研究方法有多种,最常用的有染色示踪法和穿透曲线法^[1,16],经过文献查阅以及实地检测等方面综合考量,本试验采用染色示踪法,使用自制长、宽、高、厚分别为 120,60,30,0.5 cm 的铝合金框架。

选择地形相对平整、植被均匀地块作为试验点,试验点相邻的灌丛位置设置为土壤的染色示踪观测剖面;土壤的表层杂质需要处理干净,以达到更好的试验数据与结果,但是,不能影响表面的腐殖质层。处理结束之后,将铝合金框架高的 1/2 沿 90°方向砸入土壤,再覆上塑料膜保护试验点不被动物破坏以及自然环境影响,等待 1 天。1 天后,去除塑料膜,按染色的样方表面积和实际消耗量计算出需要的亮蓝溶液,用研究区 7—8 月降水情况确定喷洒体积,根据数据计算,研究区亮蓝染色剂浓度为 4 g/L,且需要 11.5 L,用恒流泵以积水渗透的方式均匀喷洒于试验点。喷洒完,继续用塑料膜覆盖。1 天后,移除框架,用高分辨率数码相机对以相同间隔垂直挖掘的 12 个染色剖面进行拍摄。

1.4 图像处理与数据分析

用 Erdas imagine v9.2、Photoshop CS6 和 Image ProPlus v6.0 软件分别对图像进行几何校正和光照校正、降噪及阈值处理以及划分出独立闭合的染色团块,提取染色图像的数量、面积和位置,最后进行一系列的计算。首先,优先流比计算公式为:

$$PE=\left(1-\frac{L\times W}{S_r}\right)\times 100\% \tag{1}$$

式中:PE 为优先流比(%);L 为基质流深度(cm);W 为水平染色宽度(cm)。长度指数计算公式为:

$$L_i=\sum_{i=1}^n |DC_{i+1}-DC_i| \tag{2}$$

式中:L_i为长度指数(%);DC_i和 DC_{i+1}分别为第 i 层和第 i+1 层土壤剖面的染色面积比(%);n 为土壤剖面层数。染色面积比计算公式为:

$$DC=\left(\frac{S_i}{S_n+S_i}\right)\times 100\% \tag{3}$$

式中:DC 为染色面积比(%);S_i为剖面染色总面积(cm²);S_n为剖面未染色的总面积(cm²)。优先流染色形态变异系数计算公式为:

$$CV=\frac{\sqrt{\frac{n\sum_{i=1}^n DC_i^2-(\sum_{i=1}^n DC_i)^2}{n(n-1)}}}{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n DC_i} \tag{4}$$

式中:CV 为染色面积比变异系数;n 为剖面垂直计算土层数;DC_i为剖面第 i 层对应的染色面积比(%)。

2 结果与分析

2.1 土壤水分入渗特征

由图 1 可知,在荒漠草原地区,相同的植被条件下,放牧干扰和围栏封育都对土壤水分入渗过程具有一定影响。土壤水分入渗染色深度为天然草地围栏封育>天然柠条林围栏封育>人工柠条林围栏封育>天然草地放牧干扰>人工柠条林放牧干扰>天然柠条林放牧干扰。围栏封育草地在 0—125 cm 的深度,染色呈均匀分布,125—240 cm 呈现出现染色分支。围栏封育天然柠条林地在 0—115 cm 深度染色呈均匀分布,115—150 cm 呈现深度不同的染色分支。围栏封育人工柠条林地在 0—105 cm 深度上林地染色呈均匀分布,105—140 cm 呈现不同的染色分支。放牧管理草地和放牧管理人工柠条林在染色上呈现基本相同的趋势,均在 0—80 cm 深度上染色均匀分布,放牧管理草地染色分支大于放牧管理人工柠条林 10 cm,达到 140 cm,天然柠条林染色在 0—70 cm 呈均匀分布,在 70—100 cm 土层呈现出染色分支。

2.2 土壤染色深度及面积比

在荒漠草原地区,放牧干扰和围栏封育人工柠条林地、天然柠条林和天然草地的土壤染色面积比均随着土层深度的增加而减小(图 2),6 个样地 0—400 mm 土壤剖面染色面积比的最大值,表现为围栏封育草地(40.38%)>围栏封育天然柠条林地(39.86%)>围栏封育人工柠条林地(34.79%)>人工柠条林放牧干扰(30.67%)>放牧管理天然柠条林地(30.62%)>放牧管理草地(28.52%)。而土壤染色深度表现为围栏封育草地(271 mm)>围栏封育天然柠条林地(226 mm)>放牧管理草地(223 mm)>放牧管理天然柠条林地(213 mm)>围栏封育人工柠条林地(209 mm)>放牧管理人工柠条林地(200 mm)。

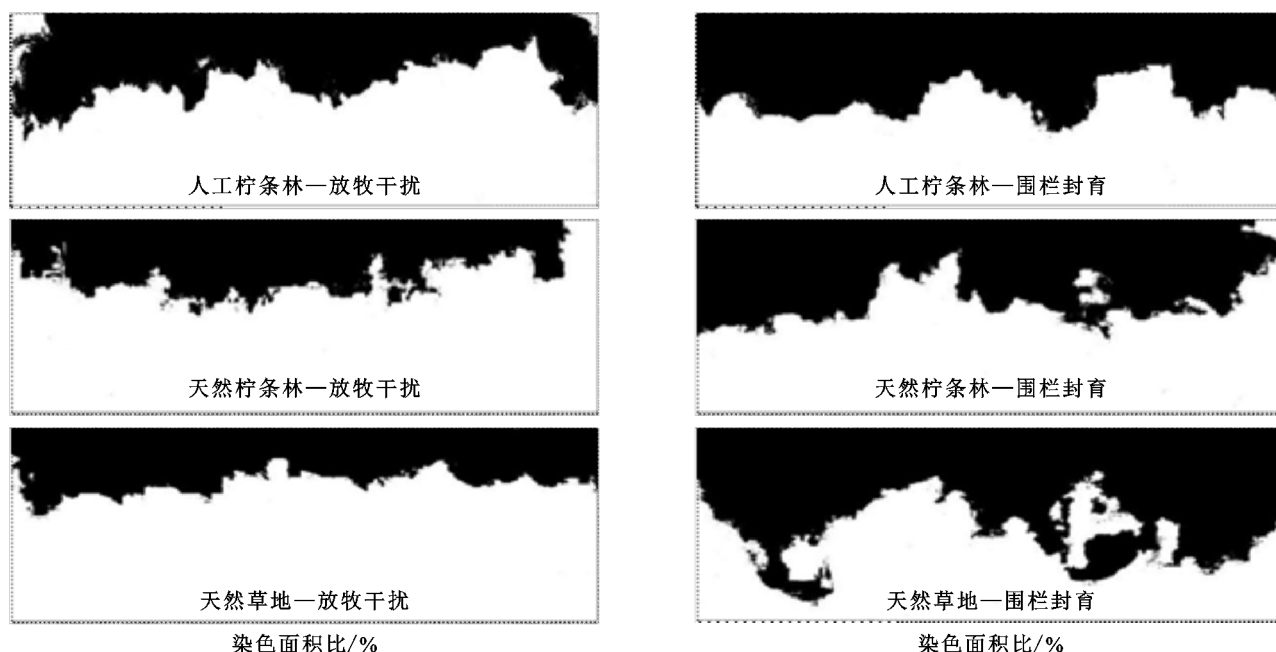


图 1 优先流垂直分布

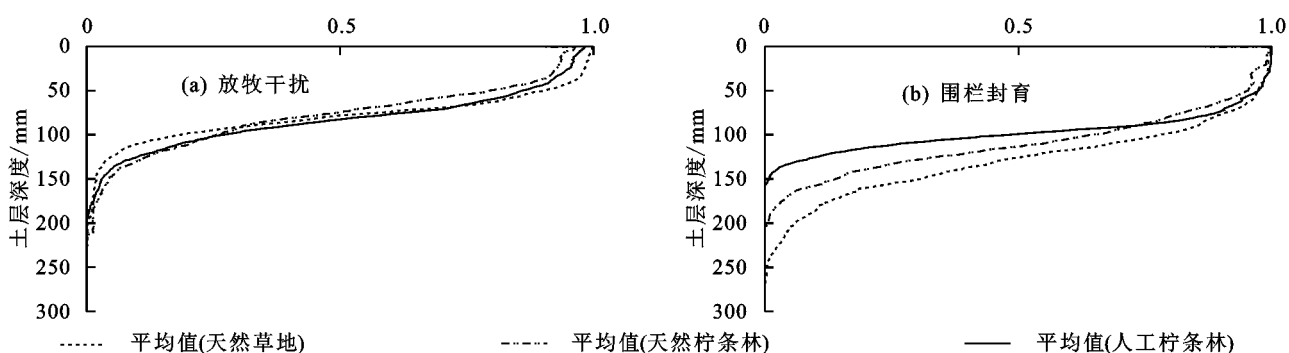


图 2 放牧干扰和围栏封育下土壤染色面积比

2.3 土壤基质流深度及长度指数

试验中基质流深度是染色面积 $>80\%$ 的染色深度。由表 2 可知,土壤基质流深度为围封草地(98.73 mm) $>$ 人工柠条林地围封(81.63 mm) $>$ 围封天然柠条林地(76.64 mm) $>$ 放牧草地(62.88 mm) $>$ 放牧人工柠条林地(61.36 mm) $>$ 放牧天然柠条林地(26.65 mm)。其中,围栏封育草地与放牧管理草地的土壤基质流深度相差 35.85 mm,围栏封育人工柠条林地与放牧管理人工柠条林相差 29.27 mm,围栏封育天然柠条林地与放牧管理天然柠条林土壤基质流深度相差最大,达到 49.99 mm,且围栏封育的基质流平均值均大于放牧干扰,可见放牧干扰对林地土壤基质流深度影响较大,其中天然柠条林的影响是所有中最大的。土壤入渗染色长度指数表现为围栏封育草地(4.09%) $>$ 放牧人工柠条林地(3.27%) $>$ 放牧草地(3.14%) $>$ 围栏封育人工柠条林地(2.95%) $>$ 围栏封育天然柠条林地(2.43%) $>$ 放牧天然柠条林地(2.13%)。

2.4 染色形态变化程度及优先流程度分析

优先流发育程度按照优先流染色形态变化程度划分为相对稳定($0 < CV_p \leq 0.1$)、次活跃($0.1 < CV_p \leq$

0.2)、活跃($0.2 < CV_p \leq 0.4$)和速变($CV_p > 0.4$)。对试验地进行优先流染色形态变化程度的分析(表 3)可知,土壤优先流变异系数表现为放牧管理天然柠条林地 $>$ 放牧管理人工柠条林地 $>$ 围栏封育天然柠条林地 $>$ 放牧管理草地 $>$ 围栏封育人工柠条林地 $>$ 围栏封育草地。放牧管理天然柠条林地土壤入渗染色变异系数最高,土壤优先流程度为速变,该样地土壤优先流现象最为明显;放牧管理人工柠条林地土壤优先流程度为活跃,优先流现象明显;围栏封育天然柠条林地、围栏封育人工柠条林地、围栏封育草地和放牧管理草地土壤优先流程度为次活跃,优先流现象不明显。围栏封育对柠条林地土壤优先流程度的限制最为显著。

3 讨论

3.1 土壤水分入渗特征

试验点样地的土壤染色深度皆表现为围栏封育大于放牧管理,由此可知,围栏封育导致土壤水分相对均匀地下渗至更深的土层。其中,土壤水分入渗染色深度最深的是天然草地围栏封育,土壤入渗染色深度最小的是放牧管理天然柠条林,可能是因为天然草地的植物根

系较浅;同时,在没有别的外来情况干扰下,草的生命力比较旺盛,故生长比较快,土壤水分入渗染色深度最深,而天然柠条林则由于前期受到相对稳定且较小的外来干扰,当突然接收到强度较大的放牧干扰,植物会出现应激反应,故对植物和土壤的特性影响较大^[17],其恢复较慢,土壤水分入渗也就较少。

表 2 不同管理方式下灌草地土壤优先流特征因子

样地	样点 标号	基质流 深度/mm	基质流深度 平均值/mm	长度 指数/%	长度指数 平均值/%	染色 深度/mm	染色深度 平均值/mm
人工柠条林—放牧干扰	1	67.36±27.23	61.36	4.49	3.27	132.55±39.32	145.14
	2	55.36±11.72		2.05		157.73±40.68	
人工柠条林—围栏封育	1	77.17±28.42	81.63	3.18	2.95	160.83±27.40	149.96
	2	86.09±11.27		2.71		139.09±19.15	
天然柠条林—放牧干扰	1	0.30±0.67	26.65	0.92	2.13	66.30±29.34	101.97
	2	53.00±31.71		3.34		138.64±39.74	
天然柠条林—围栏封育	1	69.64±15.56	76.64	1.32	2.43	164.00±31.08	166.05
	2	83.64±30.87		3.54		168.09±19.59	
天然草地—放牧干扰	1	62.18±11.05	62.88	4.13	3.14	131.91±35.57	137.62
	2	63.58±10.97		2.15		143.33±32.01	
天然草地—围栏封育	1	98.00±15.51	98.73	2.97	4.09	165.91±22.18	186.18
	2	99.45±22.11		5.22		206.45±31.46	

注:基质流深度和染色深度数据为平均值±标准差。

表 3 不同灌草地优先流染色形态变化程度

样地	样地点标	DC 最大值/ %	DC 最小值/ %	变异 系数(CV)	变异系数 平均值	程度 等级	优先流 现象
人工柠条林—放牧干扰	1	30.67	5.76	0.3385	0.2878	活跃	明显
	2	29.10	15.09	0.2371			
人工柠条林—围栏封育	1	34.79	18.24	0.1893	0.1473	次活跃	不明显
	2	28.63	19.42	0.1053			
天然柠条林—放牧干扰	1	5.93	1.58	0.4672	0.4202	速变	极明显
	2	30.62	12.21	0.3732			
天然柠条林—围栏封育	1	25.59	16.33	0.1296	0.1684	次活跃	不明显
	2	39.86	22.00	0.2072			
天然草地—放牧干扰	1	25.11	14.73	0.1731	0.1628	次活跃	不明显
	2	28.52	16.72	0.1526			
天然草地—围栏封育	1	34.28	22.97	0.1261	0.1460	次活跃	不明显
	2	40.38	22.92	0.1659			

3.2 土壤染色深度及面积比

围栏封育草地染色面积比及染色深度远高于其他,围栏封育天然柠条林染色面积比及染色深度远高于其他柠条林。天然草地物种多样,根系繁杂,围栏封育天然柠条林中可能也有其他种类植物,所以,根系系统丰富,活动力强,故土壤优先流路径更丰富也更深^[18]。人工柠条林地无论放牧干扰还是围栏封育的土壤染色深度均小于天然柠条林和天然草地,主要原因是人工种植中造林抚育措施的实施或者措施的不正确,在一定程度上破坏草地原有的孔隙结构^[19],对水分入渗形成很大影响。但是,人工柠条林的建设很大程度上增强林下土壤吸持水分的能力^[20],同时,放牧管理人工柠条林地则是在原先的基础上进一步

破坏土壤孔隙。

3.3 土壤基质流深度及长度指数

就土壤基质流深度而言,放牧干扰对林地土壤基质流深度有较大的影响,其中,对天然柠条林的影响最大,可能与天然柠条林原先的生长状态与生长环境有关。从土壤入渗染色长度指数可见,围栏封育导致草地及天然柠条林地土壤入渗染色长度指数增大,但在人工柠条林地,围栏封育则导致土壤入渗染色长度指数降低,最主要的原因是前期抚育管理方式不同,从而造成对外来压力的抗性不同,适应性不同^[21],故导致天然林与人工林结果的不同。

3.4 染色形态变化程度及优先流程度分析

虽然放牧管理样地优先流程度高于围栏封育样

地,但放牧管理样地土壤水分入渗深度低于围栏封育样地,可能是放牧干扰破坏根系的结构,对植物造成伤害或者围栏封育后根系生理生态学特征发生变化,导致土壤中根系系统更为丰富^[22],从而使得均质流深度增加,但放牧管理过程中由于牲畜的踩踏、干扰、啃食,导致土壤紧实度提升且异质性增加^[23],从而降低均质流深度,增强优先流程度。同时,放牧导致植物的再生、更新速度增快,形成更加丰富的根系系统活动^[24],或许是导致放牧管理样地土壤优先流程度更大。

4 结论

(1)相比于放牧管理,围栏封育管理导致柠条林地及草地土壤基质流深度更大,其有利于广泛分布的草本根系对水分及养分的吸收利用;

(2)相比于放牧管理,围栏封育管理导致土壤剖面染色面积比及染色深度增大,其有利于土壤水分在深层土壤的分布与储存,有利于减少蒸散发、增强水分利用效率;

(3)相比于放牧管理,围栏封育降低灌木林地及草地的优先流程度。在荒漠草原等干旱半干旱地区,围栏封育可作为提升土壤水分均匀入渗深度、降低优先流发生程度、提高土壤水分利用效率的重要管理方式。

参考文献:

- [1] 卢华兴,段旭,赵洋毅,等.滇中磨盘山典型林分土壤优先流特征及其归因分析[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2022,50(7):48-62.
- [2] 王佩佩,苏雪萌,周正朝,等.黄土丘陵区典型植被群落坡面土壤优先流特征及其影响因素[J].水土保持学报,2021,35(5):16-23.
- [3] 张中彬,彭新华.土壤裂隙及其优先流研究进展[J].土壤学报,2015,52(3):477-488.
- [4] Suzanne E A, Stéphanie R, Allan J C. Quantifying preferential flow in soils: A review of different techniques [J]. Journal of Hydrology, 2009, 378(1/2): 179-204.
- [5] Sukhija B S, Reddy D V, Nagabhushanam P, et al. Recharge processes: Piston flow vs preferential flow in semi-arid aquifers of India [J]. Hydrogeology Journal, 2003, 11(3): 387-395.
- [6] 任泽莹,赵勇钢,吕银彦,等.汾河流域下游不同土地利用方式下优先流区与基质流区土壤团聚体稳定性分析[J].水土保持研究,2022,29(6):59-64.
- [7] 刘蕾,王鹤雄,张国印,等.设施土壤优先流特征及其影响因素研究[J].河北农业科学,2021,25(2):46-52,71.
- [8] 聂明鹤,沈艳,陆颖,等.宁夏盐池县荒漠草原区不同群落优势植物叶片:土壤生态化学计量特征[J].草地学报,2021,29(1):131-140.
- [9] Wang R, Dong Z B, Zhou Z C, et al. Temporal variation in preferential water flow during natural vegetation restoration on abandoned farmland in the Loess Plateau of China [J]. Land, 2019, 8(12): 186.
- [10] Tang Q C, Duncan J M, Guo L, et al. On the controls of preferential flow in soils of different hillslope position and lithological origin [J]. Hydrological Processes, 2020, 34(22): 4295-4306.
- [11] 孙会,赵允格,刘广亮,等.放牧强度对黄土丘陵区草地植物群落特征的影响[J].草地学报,2022,30(4):810-817.
- [12] 谷康民,赵允格,张子辉,等.模拟放牧干扰对黄土丘陵区生物结皮坡面土壤水分入渗的影响[J].应用生态学报,2022,33(7):1827-1834.
- [13] 王悦骅,靳宇曦,王忠武,等.8年围封对内蒙古荒漠草原植物和土壤的影响[J].草地学报,2021,29(10):2339-2345.
- [14] 姚喜喜,才华,李长慧.封育和放牧对高寒草甸植被群落特征和土壤特性的影响[J].草地学报,2021,29(增刊1):128-136.
- [15] 张婧.土壤入渗与优先流测量方法研究[D].北京:中国农业大学,2017.
- [16] Hu X, Li Z C, Li X Y, et al. Influence of shrub encroachment on CT-measured soil macropore characteristics in the Inner Mongolia grassland of northern China [J]. Soil and Tillage Research, 2015, 150: 1-9.
- [17] 王晓芳,马红彬,刘杰,等.放牧对草原植物功能性状影响研究进展[J].应用生态学报,2022,33(2):569-576.
- [18] 金兆梁.不同林龄樟子松人工林土壤优先流特征[D].辽宁 阜新:辽宁工程技术大学,2019.
- [19] 杜满聪,李江涛,李淑玲,等.不同耕作方式对华南坡耕地土壤孔隙结构和抗穿透强度影响[J].广州大学学报(自然科学版),2018,17(6):74-80.
- [20] 陈晓冰,严磊,陈廷速,等.西南岩溶区粉垄耕作和免耕方式下甘蔗地土壤优先流特征[J].水土保持学报,2018,32(4):58-66.
- [21] 王晓芳,马红彬,刘杰,等.放牧对草原植物功能性状影响研究进展[J].应用生态学报,2022,33(2):569-576.
- [22] 程杰,刘永辉,田瑛.宁夏半干旱区柠条锦鸡儿灌木林生长特征.水土保持通报,2016,36(1):332-336.
- [23] 牛钰杰,杨思维,王贵珍,等.放牧作用下高寒草甸群落物种分布与土壤因子的关系[J].应用生态学报,2017,28(12):3891-3898.
- [24] Köhne J M, Köhne S, Šimůnek J. A review of model applications for structured soils: Water flow and tracer transport [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2009, 104(1/4): 4-35.