

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2025.04.001

CSTR: 32310.14.stbxb.2025.04.001

李响, 郭月峰, 祁伟. 荒漠草原不同退化程度土壤优先流发育特征[J]. 水土保持学报, 2025, 39(4): 22-30.

LI Xiang, GUO Yuefeng, QI Wei. Characteristics of soil preferential flow development in desert steppe with different degradation degrees[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(4): 22-30.

荒漠草原不同退化程度土壤优先流发育特征

李响¹, 郭月峰¹, 祁伟²

(1. 内蒙古农业大学沙漠治理学院, 呼和浩特 010018; 2. 内蒙古自治区水利事业发展中心, 呼和浩特 010020)

摘要: [目的] 为探讨荒漠草原区不同退化程度下土壤中优先流的发育特征。[方法] 通过野外染色示踪试验和室内分析, 用环刀法和重铬酸钾外加热法测定各退化程度土壤的基本理化性质, 经图像处理软件得到剖面染色图的相关数据, 研究内蒙古鄂尔多斯市荒漠草原不同退化程度土壤优先流的空间分布特征和形态特征。[结果] 中度退化区总染色面积比达到最高值 35.23%, 最大染色深度为 27.7 cm; 极重度退化区总染色面积比达到最低值 19.54%, 最大染色深度为 19.6 cm。在中度退化条件下, CV 显著降低, 约为 70%, Cu 显著降低, 低于 15; 极重度退化条件下, CV 最高, 超过 100%, Cu 显著增加, 超过 25。说明 CV 越大, 优先流发育程度并不一定越强; Cu 也无法说明优先流发育程度的高低。结合多维指标分析得到, 中度退化区土壤的优先流发育最佳。[结论] 中度退化区表现出较为均衡的优先流发育特征, 水分利用效率较高, 保持良好的生态功能, 对提高土壤有机质质量分数、增加植被盖度、优化放牧管理及维持土壤健康与生态功能有益, 同时说明适度的放牧干扰可促进荒漠草原的水资源合理利用及生态恢复。

关键词: 荒漠草原; 退化程度; 优先流; 发育特征

中图分类号: S812.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)04-0022-09

Characteristics of Soil Preferential Flow Development in Desert Steppe with Different Degradation Degrees

LI Xiang¹, GUO Yuefeng¹, QI Wei²

(1. College of Ecological Environment of Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2. Inner Mongolia

Autonomous Region Water Conservancy Development Center, Hohhot 010020, China)

Abstract: [Objective] To explore the characteristics of preferential flow development in soil in desert steppe with different degradation degrees. [Methods] Through field dyeing tracer test and indoor analysis, basic physical and chemical properties of soil with different degradation degrees were determined by the ring knife method and potassium dichromate external heating method, and the relevant data of section dyeing map were obtained by image processing software to study the spatial distribution and morphological characteristics of soil preferential flow in desert steppe with different degradation degrees in Ordos, Inner Mongolia. [Results] The total staining area ratio of moderately degraded area reached the highest value, which was 35.23%, and the maximum staining depth was 27.7 cm. The total staining area ratio of the extremely severe degradation area reached the lowest value, which was 19.54%, and the maximum staining depth was 19.6 cm. Under the condition of moderate degradation, CV decreased significantly, by about 70%, Cu also decreased significantly, and the value was less than 15. Under the condition of extremely severe degradation, the CV value was the highest, being more than 100%, and the Cu value increased significantly, being greater than 25. The development degree of preferential flow was not necessarily strong when CV was large; Cu could not explain the development degree of preferential flow. Combined with multi-dimensional indicators, the preferential flow of soil in moderate degradation area was the

收稿日期: 2024-12-11

修回日期: 2025-02-12

录用日期: 2025-04-20

网络首发日期 (www.cnki.net): 2025-05-16

资助项目: 国家自然科学基金项目 (31960329); 内蒙古自治区科技计划项目 (2021GG0085)

第一作者: 李响 (1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事林业研究。E-mail: 15048903161@163.com

通信作者: 郭月峰 (1982—), 女, 博士, 教授, 博士研究生导师, 主要从事水土保持与荒漠化研究。E-mail: guoyuefeng0525@126.com

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

best. [Conclusion] The moderately degraded area shows relatively balanced characteristics of preferential flow development, high water use efficiency, and maintains good ecological functions. It is beneficial to improve soil organic matter content, increase vegetation coverage, optimize grazing management, and maintain soil health and ecological function. At the same time, moderate grazing disturbance can promote rational utilization of water resources and ecological restoration of desert steppe.

Keywords: desert steppe; degradation degree; preferential flow; developmental characteristics

Received: 2024-12-11

Revised: 2025-02-12

Accepted: 2025-04-20

Online(www.cnki.net): 2025-05-16

荒漠草原是干旱和半干旱地区的重要生态系统之一,其不仅在生物多样性保护中起着关键作用,还对调节区域水文循环具有重要影响,是我国北方重要的生态屏障。然而,持续过度放牧和人类活动对其造成负面影响,使其原有的稳定性和多样性受到破坏,同时也影响系统的再生性和承载性,草地资源被破坏的同时产生恶性循环,荒漠草原退化问题变得日益严峻。

草地退化是一个多维度、多因素交互作用的复杂的过程,土壤作为草地生态系统的重要组成部分,其物理性质的变化直接影响着草地的生产力和水文过程。优先流指一种非均匀流,其流动路径沿着土壤中的某些优先路径,在流动过程中绕开绝大部分的土壤基质,最终汇入深层地下水^[1]。土壤优先流是影响荒漠草原水资源利用和植被恢复的重要因素。目前,对于优先流的研究主要集中于以下方面,如郭巧玲等^[1]对不同降雨历时下采煤塌陷区土壤优先流特征的研究;杨鹏华等^[2]对荒漠—绿洲过渡带典型固沙植物根区土壤优先流特征的研究;李叶鑫等^[3]对排土场土体裂缝优先流迁移规律及活跃度的评价;李旭等^[4]开展的微生物矿化边坡格构内植被土优先流试验及数值模拟;徐苗苗等^[5]研究围封对荒漠草原灌丛草地土壤优先流的影响;刘燕^[6]开展的不同利用方式对荒漠草原土壤空间异质性的影响;马昀等^[7]以典型荒漠草原为研究区域,分析不同林龄柠条林土壤优先流的特征;吴小龙^[8]对不同放牧管理草地土壤优先流响应机制进行研究;王启学^[9]通过研究荒漠草地土壤水分周年变化过程及其影响因素,找到在干旱条件下决定土壤水分变化的主要因子。

然而,在土壤退化过程中有机质减少,导致土壤结构松散、团粒结构破坏,更容易形成裂缝和不均匀的孔隙结构,为优先流的发生提供条件。反之,土壤优先流对入渗过程具有显著影响,能有效减少径流和土壤侵蚀。同时增强植被根系的蓄水性能,促进根系水分运动过程,从而进一步影响干旱地区的土地退化^[10]。优先流在荒漠草原的水分

调节和生态功能维持中起着至关重要的作用,目前,对荒漠草原不同退化程度土壤中优先流的研究相对较少,在荒漠草原的退化环境下,优先流形成与发展过程中的变化及规律尚未明确。因此,本研究旨在探讨不同退化程度下土壤优先流的发育特征,为荒漠草原的土壤改良与植被恢复工作提供理论基础和支持,并为当地的水土保持工作提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区地处内蒙古鄂尔多斯市鄂托克旗乌兰镇西北100 km的藏锦鸡儿群落,试验地中心点地理坐标为39°44'26"N,107°36'09"E。地处毛乌素沙地的边缘地带,是典型的荒漠草原生态系统。地势以低山丘陵和沙丘为主,海拔为1 200~1 400 m。气候属于典型的温带大陆性气候,冬夏季变化大,风多而降雨少,气温干燥,日照长温差大。年平均气温约为7.5℃^[11]。年平均降水量为200~300 mm,降水集中于7—9月,年平均蒸发量远高于降水量,达3 000 mm以上,导致水资源严重匮乏,干旱胁迫显著。该区域土层较薄,土壤类型主要包括灰钙土和沙质土等,保水能力较差。

主要植被类型包括旱生灌木和多年生禾草,如藏锦鸡儿(*Caragana tibetica*)群落、羊草(*Leymus chinensis*)、沙蒿(*Artemisia desertorum*)、苦豆子(*Sophora alopecuroides*)、克氏针茅(*Stipa krylovii*)和芨芨草(*Achnatherum splendens*)等。由于当地矿产资源的开发和放牧强度的加大,区域植被覆盖度显著下降,土壤结构遭到破坏,加剧生态系统的退化。草原退化程度逐年上升,荒漠化草原占比逐年增加。

1.2 研究区布设

研究区为牧民住宅周边的退化草地,以牧民住宅为中心,依“Y”形划定3条样线,选择5个取样区(图1)。由于长期的人为干扰(如过度放牧)和气候变化的影响,沿着样线由远及近不同距离上出现不

同程度的土地退化。参考《天然草地退化、沙化、盐渍化的分级指标(GB 19377—2003)》^[12],将5个取样区依次划分为未退化草地U(对照组)、轻度退化草地L、中度退化草地M、重度退化草地S和极重度退化草地E^[13]。

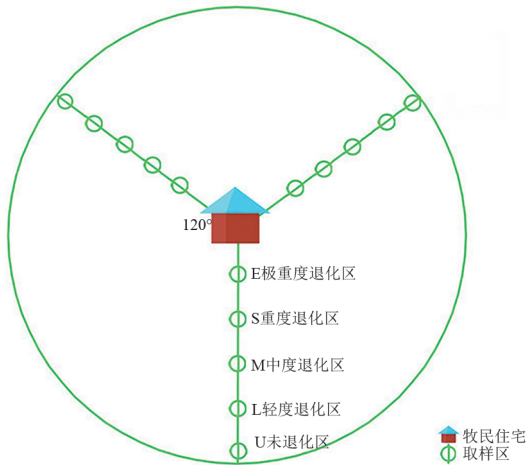


图 1 研究区布设

Fig. 1 Layout map of the study area

1.3 染色示踪试验

试验于2023年8月1—14日开展,每条样线取5处观测点,开展野外染色示踪试验。在样点上放

置长和宽均为0.7 m、高0.6 m的试验专用金属框,确定每个样点与周围各灌木、草本基本等距且植株数基本相同。在确保土壤腐殖质层结构与功能完整性得以维持不被破坏的前提下,移除地表覆盖的枯落物与大石砾,使地表呈裸露状态^[14]。金属框需以垂直角度进入土壤,均匀喷洒4 g/L的亮蓝溶液,染色示踪试验前1周无降雨发生,喷洒后用白色塑料布覆盖,避免杂物进入。覆盖24 h后,取下塑料布并缓慢移出金属框,挖掘染色剖面,剔除四边的0.1 m,则实际挖掘的面积为0.5 m×0.5 m。水平宽度0.1 m为1层挖掘垂直剖面并对其边缘进行适当修整,利用钢尺精确测量剖面的长宽尺寸,并使用相机拍摄获取染色处理后的各个剖面图像3~6张。

1.4 土壤基本性质测定

分别在水平剖面染色区与未染色区用环刀采原状土,选取3组重复;再用铝盒采相应的土壤样品,选取3组重复,便于测定土壤物理性质。同时使用保鲜盒采集原状土带回实验室于阴凉通风处晾干,用于土壤理化性质测定。土壤体积质量的测定采用环刀法,土壤有机质的测定用重铬酸钾—外加热法^[15]。研究区土壤基本性质指标见表1。

表 1 不同退化程度土壤理化性质

Table 1 Physicochemical properties of soil with different degradation degrees

退化程度	黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%	体积质量/(g·cm ⁻³)	土壤孔隙度/%	有机质/(g·kg ⁻¹)
未退化区 U	9.31	88.19	2.50	1.40	40.90	40.24
轻度退化区 L	9.38	88.30	2.32	1.34	41.37	46.49
中度退化区 M	9.65	89.01	1.34	1.30	42.77	53.35
重度退化区 S	9.14	88.11	2.75	1.45	39.76	35.90
极重度退化区 E	8.27	87.91	3.82	1.48	38.19	29.03

1.5 染色图像及数据处理

受曝光过度、失真等原因,可能使图像与实际染色部分存在差异,因此,需对图像预处理再进行分析。参考张旭等^[16]处理方法,结合现有软件技术进行处理。步骤为:1)校正。几何校正使用 Adobe Photoshop,先裁剪为真实尺寸,之后调整亮度、对比度等参数,增强颜色对比。2)二值化。将图像转为灰度图,调整色相阈值。3)信息提取。将处理后的图像导出为像素文件,放入 Image-Pro Plus,用位图分析功能识别像素灰度值,最后在 Microsoft Excel 软件中进行数据处理,以获得染色图像的相关信息。

本研究用 Image-Pro Plus 6.0 和 Adobe Photoshop 2022 软件对剖面染色图像进行处理,用 Microsoft Excel 2021、SPSS 27.0 和 Origin 2018 软件处理数据,分析优先流的特征和变异性。

1.6 优先流特征指数相关计算

1.6.1 优先流特征指数 一定深度土壤染色面积占图像宽度的比例即为染色面积比,可用染色像素数占图像宽度像素数的比例获取,计算公式^[17]为:

$$DC_i = \frac{a_i}{A} \tag{1}$$

式中:DC_i为土层深度*i*处染色面积比,%;*a_i*为深度*i*处染色像素数,个;*A*为深度处*i*图像宽度像素数,个;土壤剖面宽度为0.5 m;0.001 m为1个像素,即*A*为500个。

基质入渗深度指在土壤水分入渗过程中,当基质入渗转变为优先流入渗时所达到的最大垂直深度。该深度标志着土壤优先流现象起始发生的位置,在实际测定中可通过观察土壤剖面,确定染色面积比达到或超过80%时所对应的土层深度,以此作为基质入渗深度的表征值^[18]。

最大染色深度指在染色图像分析中,像素值表现为0(通常表示未被染色或染色程度极低的区域)的土层所达到的最大垂直距离。此参数可作为衡量优先流在土壤中分布深度的参考指标^[19]。

优先流比则是染色剖面范围内,优先流区域面积占整个染色区域总面积的比例,该比例越大,表明优先流现象越显著,优先流程度越高^[20]。计算时除去基质入渗区域的影响,其计算公式为:

$$PF = \left(1 - \frac{UF \times W}{DT}\right) \times 100\% \quad (2)$$

式中:PF为土壤剖面优先流比,%;UF为土壤剖面基质入渗深度,cm;W为土壤剖面水平宽度,cm,本研究为50 cm;DT为染色区总面积,cm²。

优先流长度指数是通过特定算法计算得出。在土壤垂直剖面上,针对每一土层,计算其与上一土层染色面积比的差值,并取该差值的绝对值进行累加求和。该指数与染色剂在土壤中的渗透模式所呈现的异质性程度具有密切关联,能够有效地反映出优先流与基质流在土壤水分运动过程中的差异特征。一般来说,该指数越大,说明土壤中优先流现象越显著^[21],计算公式为:

$$L_i = \sum_{i=1}^n |DC_{(i+1)} - DC_i| \quad (3)$$

式中: L_i 为优先流长度指数,%; $DC_{(i+1)}$ 为土壤剖面第*i*+1层对应的染色面积比,%; n 为土壤剖面垂直土层数,沿垂直剖面向下1个像素为1层, n 值大小根据最大染色深度包含的像素数确定^[22]。

1.6.2 优先流变异性 土壤染色形态变异性反映不同土层深度范围内土壤染色图像的变化程度,从而揭示土壤空间中优先流的发育程度,计算公式为:

$$CV = \frac{\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (DC_i - \overline{DC_m})^2}}{\overline{DC_i}} \times 100\% \quad (4)$$

式中:CV为土壤优先流染色面积比变异系数,%; N 为土壤剖面优先流垂直土层数量; DC_m 为优先流染色面积比均值,%。

鉴于实际入渗深度的测定通常存在一定难度,已有研究^[23]提出采用最大入渗深度非均匀系数,用于分析优先流入渗过程中的非均匀性特征。该系数不仅反映入渗的非均匀性,还可作为衡量优先流发育变异性的一种表达方式,计算公式为:

$$Cu = \frac{\sum_{i=1}^m |h_{\max(x_i, y_i)} - h_{\text{mean}}|}{m \cdot \bar{h}} \quad (5)$$

式中:Cu为最大入渗深度的非均匀系数; $h_{\max(x_i, y_i)}$ 为垂直剖面 (x_i, y_i) 位置处染色最大深度; h_{mean} 为不同位

置染色最大深度的平均值; m 为垂直剖面水平方向总像素点数,本研究为500。

2 结果与分析

2.1 土壤优先流空间分布特征

5个退化程度下土壤垂直剖面染色图像条形染色部分为优先流集中发生区。由图2可知,在表层土壤中,染色分布相对均匀。随着土层深度增加,染色面积逐渐减少。值得注意的是,在各研究区域内,均观测到局部区域的染色面积出现反弹式增大。中度退化区M剖面的染色深度及染色面积明显大于其他剖面,而极重度退化区E剖面的染色深度及面积最小。

未退化区U3土壤垂直剖面染色面积在10~20 cm土层内随土层深度增加迅速减小,在0~10 cm土层内保持着相对稳定的速度减小。U1和U2的最大染色深度分别为17.5、19.8 cm,优先流通道不明显,染色剂主要以基质流的形式均匀渗透。

在轻度退化区L1,土壤垂直剖面的染色面积在6~8 cm土层范围内,随土层深度增加而迅速减少,而在L2区域,染色面积在土层深度达到10 cm后开始逐渐减小。L2和L3的最大染色深度分别为23、16.6 cm。轻度退化区土壤结构出现微小裂隙,染色剂在土壤中的分布出现一些不规则的染色路径,优先流开始发育,裂隙可能是由土壤紧实度增加或植物根系活动导致。

在中度退化区M3,土壤垂直剖面的染色面积15~22 cm土层内,随着土层深度的增加逐渐减小。M1、M2和M3的最大染色深度分别为23.7、27.7、27.3 cm。中度退化区的染色程度较好,土壤退化程度进一步加剧,土壤结构破坏较为明显,染色剂在土壤中的分布出现明显的条带状染色路径,优先流通道较为发育。中度退化区剖面染色程度较其余退化区剖面染色程度的变化显著。

重度退化区S和极重度退化区E的最大染色深度分别为25.6、19.6 cm。重度退化区S2和极重度退化区E2染色区域较为均匀,染色面积随土层深度增加而减少的量较为稳定。

由图3可知,未退化区U表层(0~10 cm土层)的染色面积比普遍较高,通常维持在80%以上。水流入渗主要为基质流,土壤水分变化表现为均匀下渗形式。在轻度退化区L和轻度退化区M中,染色面积比随土层深度增加逐渐降低,表层仍保持较高的染色面积比,次表层和深层(20 cm以下)染色面积比逐渐减少。在重度退化区S和极重度退化区E中,染色面积比整体显著降低。特别是极重度退化区E,染色面积比均处于较低水平,土壤深层基本无染色。

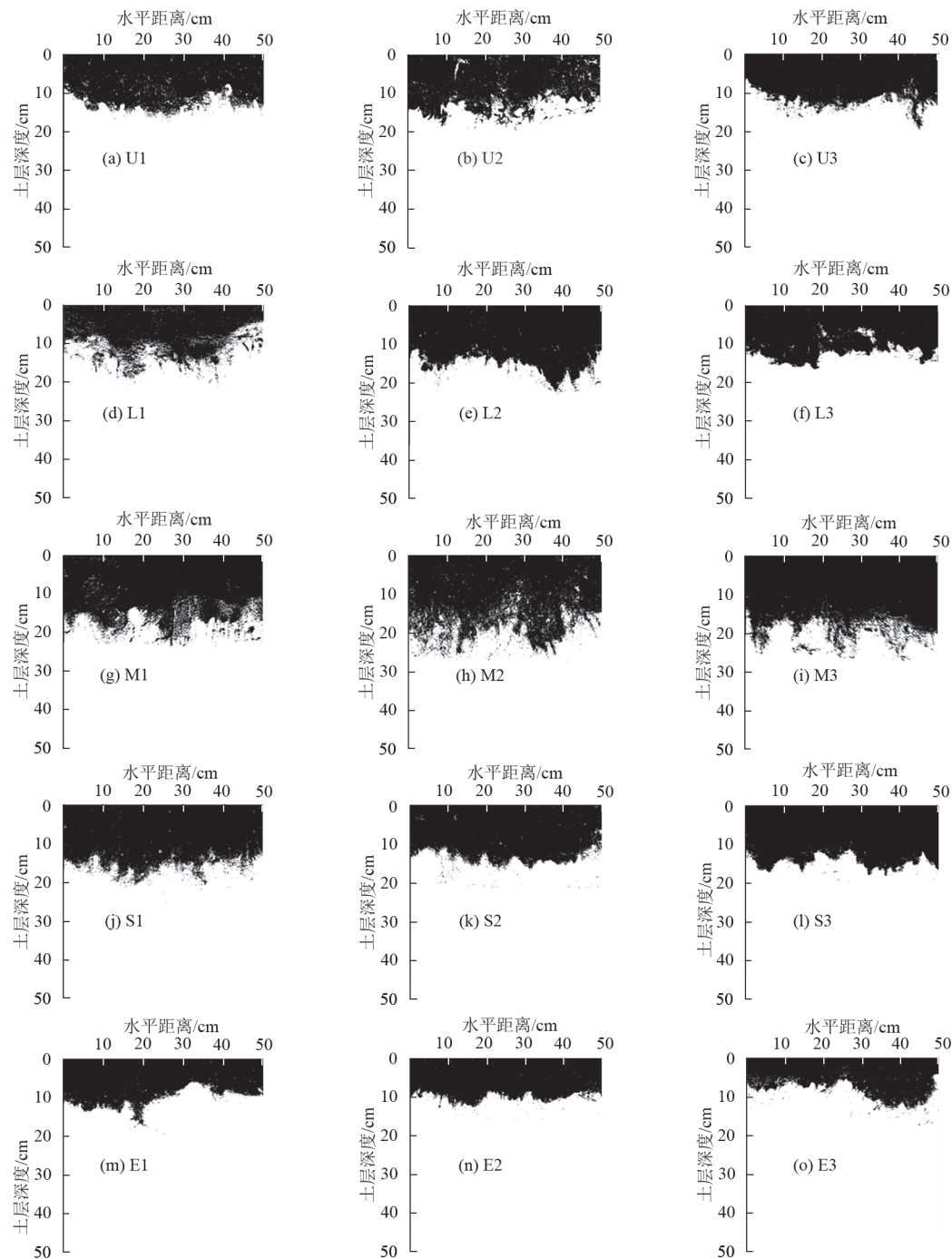


图2 不同退化程度土壤垂直剖面染色特征

Fig.2 Staining images of the vertical profiles of soil with different degradation degrees

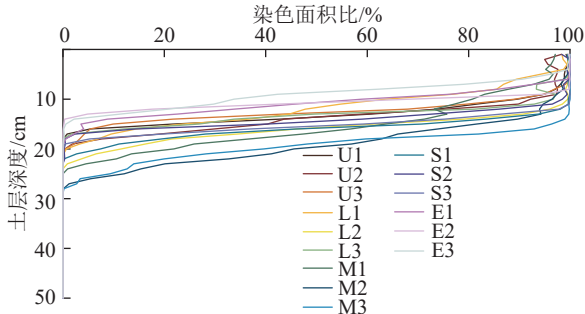


图3 不同退化程度土壤垂直剖面染色面积比

Fig.3 Staining area ratios of the vertical profiles of soil with different degradation degrees

2.2 土壤优先流形态特征差异

由表2可知,未退化区U和轻度退化区L的基质流深度分别为10.93、11.07 cm,数值较接近,在轻微退化的情况下,土壤的基质流深度变化不显著。中度退化区M的基质流深度增加至13.87 cm,随土层深度增加,渗透路径集中化。重度退化区S,基质流深度下降至13.03 cm,极重度退化区E则降至7.9 cm,严重退化后的土壤,其结构的破坏显著降低水分的垂直渗透能力。中度退化区M和重度退化区S与极重度退化区E差异显著($p<0.05$)。

表 2 优先流特征参数
Table 2 Parameters of priority flow characteristics

退化程度	基质流深度/cm	总染色面积比/%	优先流比/%	长度指数/%
未退化区 U	10.93±0.47ab	25.41±1.15b	13.94±1.67a	101.61±2.63a
轻度退化区 L	11.07±2.74ab	26.49±4.35b	17.11±10.18a	102.92±4.09a
中度退化区 M	13.87±3.23a	35.23±4.51a	22.00±9.22a	102.26±2.59a
重度退化区 S	13.03±1.06a	29.37±1.94b	11.30±1.40a	102.02±2.28a
极重度退化区 E	7.90±1.37b	19.54±1.88c	19.49±7.48a	100.63±0.45a

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示不同退化区间差异显著($p<0.05$)。

总染色面积比随退化程度的土层加深呈先上升后下降趋势,未退化区的总染色面积比为 25.41%,随着退化程度的发展,轻度退化区和中度退化区的总染色面积比逐渐增加,中度退化区达到最高值 35.23%。在重度退化区和极重度退化区情况下,总染色面积比分别降至 29.37% 和 19.54%,呈显著下降趋势。中度退化区、重度退化区和极重度退化区间差异显著($p<0.05$)。

优先流比是评估土壤水分传导沿特定路径集中的重要指标。未退化区的优先流比为 13.94%,而轻度退化区和中度退化区分别上升至 17.11% 和 22%。在重度退化情况下,优先流比骤降至 11.3%,而后极重度退化区中,优先流比又回升至 19.49%。

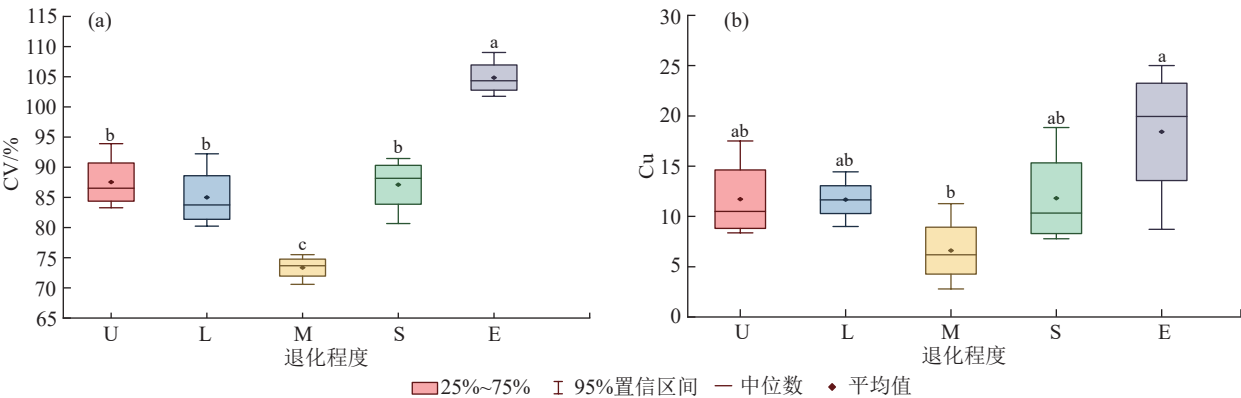
长度指数说明优先流的发育程度和连通性。未退化区的长度指数为 101.61%,轻度和中度退化条件下略微增加,重度退化条件下,长度指数下降,表明优先流路径的相对连通性受到影响。极重度退化时,长度指数为 100.63%,优先流的长度和连通性在极端退化条件下遭到严重破坏。由基质流深度、总染色面积比、优先流比和长度指数的变化可知,荒漠草原土壤在退化过程中,优先流形态特征发生显著改变。

2.3 土壤优先流变异性特征

2.3.1 优先流变异系数(CV)随退化程度的变化分析 由图 4a 可以看出,不同退化程度下 CV 的变化特征。未退化区、轻度退化区和重度退化区 CV 相对接

近,均保持在 85%~95%,其差异不显著($p>0.05$)。重度退化区,尽管土壤结构有所破坏,但仍有部分孔隙维持优先流的连通性。在中度退化条件下,CV 显著降低约 70%,在不同退化程度中差异显著($p<0.05$)。极重度退化条件下的 CV 最高,超过 100%,显著高于其他退化程度($p<0.05$)。通过对比不同剖面染色面积变异系数及染色面积比分布情况发现,中度退化区剖面染色面积比的波动程度较大,反弹现象显著且 CV 较小,相比之下,极重度退化区的剖面染色面积比反弹较小,CV 较大。表明染色面积比的波动反弹越大 CV 反而越小。

2.3.2 优先流均匀系数(Cu)随退化程度的变化分析 由图 4b 可知,不同退化程度下 Cu 变化特征。Cu 用于衡量土壤优先流路径的均匀性,Cu 越高,表明优先流路径的分布越均匀。Cu 在未退化、轻度退化和重度退化条件下的值较为接近,均为 15~20,且无明显差异($p>0.05$)。在重度退化条件下,尽管土壤结构已经受损,但由于部分深根系植物的作用,仍存在一定的均匀渗透能力。在中度退化情况下,Cu 显著降低,低于 15,在不同退化程度中差异显著($p<0.05$)。Cu 在极重度退化条件下,显著增加($p<0.05$)超过 25,表明在极端退化条件下,尽管优先流的总体数量减少,但残存的孔隙网络呈一定程度的集中性和均匀性。



注:不同小写字母表示不同退化区间差异显著($p<0.05$)。

图 4 不同退化程度优先流发育变异性指数分布

Fig.4 Distribution of development variability indices of preferential flow in soil with different degradation degrees
<http://stbcbx.alljournal.com.cn>

3 讨论

不同退化程度的土壤表层,其孔隙间的连通性较好,水分运动过程相对均匀,不易发生优先流与王赵男等^[24]研究结果相似。在不同环境条件、不同发育程度和不同位置等影响下,优先流路径在空间上具有高度变异性和复杂性。染色面积比变异程度大,优先流发育程度不一定强。优先流均匀系数可以反映入渗过程的非均匀性,但无法直接说明优先流发育程度的高低^[25]。

未退化和轻度退化阶段的土壤孔隙结构较为完整,水分在土壤剖面中的分布均匀,表现为较高的染色面积比和均匀系数。未退化区土壤具有良好的孔隙结构和团聚体稳定性,使得水分能够均匀渗入并在土体内扩散。土壤有机质质量分数较高,植被根系发达,有助于维持孔隙连通性和优先流路径的发育^[26],对水分的垂直渗透和横向扩散起到积极作用。而较高的水分均匀性和充足的孔隙可能限制优先流的快速形成和有效传输,导致在特定情况下水分利用率不高,水分供给的集中化效果不显著。在中度退化阶段,土壤表现出优先流发育的良好平衡状态,与适度干扰理论一致。该阶段的染色面积比和优先流比均有所增加,孔隙连通性高,水分渗透能力强,能够有效分布在土壤剖面内。在中度退化区中,土壤结构的进一步破坏,如土壤团聚体的破坏,导致水分和溶质的快速运移^[27],促进优先流的发育。有研究^[28]表明,中度退化条件下,适度的孔隙减少使得水分沿优先流路径传导更为集中,有助于提高深层水分的利用效率和植被根系对水分的吸收。因此,中度退化阶段是从土壤稳定状态到严重破坏的关键过渡点,适度的干扰可能有助于形成更为有效的水分传导途径,维持生态系统的功能和稳定性。在重度退化阶段,有机质流失,土壤团聚体结构被破坏,导致有效孔隙减少,优先流路径的数量和长度减少且连通性下降,水分渗透集中于表层,深层渗透能力减弱。土壤的优先流特征发生劣化,表现为总染色面积比、长度指数和优先流比的下降,以及变异系数的上升,与麦建军^[29]研究结果一致,土壤退化对孔隙连通性的破坏显著降低土壤的水分渗透性。极重度退化条件下,水分渗透能力严重受限,优先流特征的发育几乎消失。土壤有机质大量丧失,结构趋于颗粒化,水分主要通过少数大孔隙快速下渗或发生地表径流,缺乏有效的深层传导途径,导致土壤持水能力下降。均匀系数虽有所回升,但优先流路径匮乏,水分利用效率也显著降低。植被根系无法获取足够的水分,进而加剧草地退化的恶性循环^[30]。

据上述分析可看出,中度退化阶段可能是水分渗透和生态功能的一个平衡点。在此阶段,土壤中既保持一定程度的孔隙连通性,又通过适度的孔隙减少和优先流路径的集中化,使水分渗透更加高效。相比之下,未退化和轻度退化阶段,土壤结构虽较为完整,但水分传导路径缺乏集中效应;而重度和极重度退化阶段,土壤结构严重受损,水分传导途径高度不均匀且几乎完全消失。因此,维持土壤在中度退化阶段可能有助于最大化其水分利用效率和生态功能,对于荒漠草原的可持续管理具有重要意义。故本研究提出,在管理荒漠草原土壤退化过程中,应合理控制干扰强度,以避免过度退化,同时保持土壤在适宜的退化水平。适度的植被干扰、控制放牧强度、增加土壤有机质等措施可能有效提高土壤的水分利用效率,促进优先流的集中化,从而在维持生态系统功能的同时实现水资源的有效管理。

4 结论

不同退化程度染色面积比随剖面垂直土层深度增加而下降,在中度退化区,染色剂的分布出现明显的条带状染色路径,优先流通道较为发育,剖面染色程度较其余退化区剖面染色程度的变化显著。在中度退化条件下,CV、Cu显著降低,极重度退化条件下,CV、Cu显著升高。染色面积比变异程度大,优先流发育程度不一定强;优先流均匀系数反映入渗过程的非均匀性,但无法直接说明优先流发育程度的高低。中度退化程度的土壤表现出较为均衡的优先流发育特征,染色面积比和优先流比显著增加,水分渗透集中在部分有效孔隙中,增强水分利用效率,保持良好的生态功能。适度的孔隙减少使得水分传导更加集中,有利于深层水分的利用和植物生长。

基于研究结论,建议在荒漠草原退化治理中采取科学的生态恢复措施,保持土壤在适度退化状态。具体措施包括增加土壤有机质、恢复植被覆盖度及合理控制放牧强度等,以增强土壤孔隙结构和优先流连通性,提高水分渗透和保持能力。在轻度至中度退化阶段及时采取恢复措施,有利于阻止土壤的进一步退化,提升土壤生态功能和植被生长能力。

参考文献:

- [1] 郭巧玲,胡骞,代彬,等.不同降雨历时下采煤塌陷区土壤优先流特征[J].水土保持学报,2025,39(1):130-140. GUO Q L, HU Q, DAI B, et al. Soil preferential flow characteristics in coal mine subsidence area under different rainfall duration[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(1): 130-140.
- [2] 杨鹏华,胡广录,李昊辰,等.荒漠-绿洲过渡带典型固沙

- 植物根区土壤优先流特征[J].干旱区研究,2025,42(1):127-140.
- YANG P H, HU G L, LI H C, et al. Characteristics of the soil priority flow in the root zone of typical sand-fixing plants in the desert-oasis transition zone[J]. Arid Zone Research, 2025, 42(1): 127-140.
- [3] 李叶鑫,吕刚,王道涵.排土场土体裂缝优先流迁移规律及活跃度评价[J].灌溉排水学报,2025,44(4):82-88.
- LI Y X, LV G, WANG D H. Migration and activity valuation of preferential flow with ground fissures in a dump[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2025, 44(4): 82-88.
- [4] 李旭,刘家庆,周成,等.微生物矿化边坡格构内植被土优先流试验及数值模拟[J].公路交通科技,2024,41(11):104-113.
- LI X, LIU J Q, ZHOU C, et al. Preferential flow experiment and numerical simulation on microbial mineralized vegetation soil in slope lattice[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2024, 41(11): 104-113.
- [5] 徐苗苗,孟晨,王兴,等.围栏封育对荒漠草原灌丛草地土壤优先流的影响研究[J].水土保持学报,2023,37(3):81-86.
- XU M M, MENG C, WANG X, et al. Study on the effect of grazing and enclosure on the preferential flow of soil in desert grassland and shrub grassland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(3): 81-86.
- [6] 刘燕.不同利用方式对荒漠草原景观格局与土壤空间异质性的影响[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2023.
- LIU Y. Effects of different land use patterns on landscape pattern and soil spatial heterogeneity in desert steppe[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2023.
- [7] 马昀,孟晨,岳健敏,等.宁夏荒漠草原不同林龄人工柠条林地土壤优先流研究[J].生态学报,2022,42(3):895-903.
- MA Y, MENG C, YUE J M, et al. Study on preferential flow of soil of artificially planted *Caragana korshinskii* shrubland in different years of desert grassland in Ningxia[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(3): 895-903.
- [8] 吴小龙.半干旱区放牧管理草地土壤水分-溶质运移与优先流响应机制[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2022.
- WU X L. Mechanism of soil water-solute transport and preferential flow characteristic in a semi-arid grassland[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2022.
- [9] 王启学.植被恢复背景下荒漠草原土壤水分时空特征及其影响因素研究[D].银川:宁夏大学,2022.
- WANG Q X. Study on the spatial and temporal characteristics of soil moisture and its influencing factors in desert grassland under the background of vegetation restoration [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2022.
- [10] 张勇勇,富利,赵文智,等.荒漠绿洲土壤优先流研究进展[J].中国沙漠,2017,37(6):1189-1195.
- ZHANG Y Y, FU L, ZHAO W Z, et al. A review of researches on preferential flow in desert-oasis region[J]. Journal of Desert Research, 2017, 37(6): 1189-1195.
- [11] 弓文玄,陈佳楠,杨福俊,等.鄂托克旗荒漠草原产草量及土壤状况调查[J].内蒙古林业调查设计,2014,37(1):49-52.
- GONG W X, CHEN J N, YANG F J, et al. Investigation on grass yield and soil condition of desert steppe in Etuoque Banner[J]. Inner Mongolia Forestry Investigation and Design, 2014, 37(1): 49-52.
- [12] 国家质量监督检验检疫总局.天然草地退化、沙化、盐渍化的分级指标:GB 19377—2003[S].北京:中国标准出版社,2004:1-5.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Parameters for degradation, sandification and salification of rangelands: GB 19377—2003[S]. Beijing: Standards Press of China, 2004.
- [13] GUO Y F, ZHANG D, QI W. Bacterial diversity of herbal rhizospheric soils in Ordos desert steppes under different degradation gradients[J]. Peerj, 2023, 11: e16289.
- [14] 师雪淇,程金花,管凝,等.喀斯特地区典型植被根系对优先流的影响[J].水土保持研究,2024,31(5):73-83.
- SHI X Q, CHENG J H, GUAN N, et al. Influence of root system on preferential flow in a typical forest stand in karst region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(5): 73-83.
- [15] 温林生,彭云,邓文平,等.庐山杉木林与黄山松林的土壤层水源涵养能力和土壤侵蚀敏感性探究[J].水土保持学报,2022,36(2):255-260.
- WEN L S, PENG Y, DENG W P, et al. Research on water conservation ability and soil erosion sensitivity in *Cunninghamia lanceolata* and *Pinus taiwanensis* forest[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(2): 255-260.
- [16] 张旭,卢玉东,王博,等.黄土高原南部黄土渗流特征的染色示踪研究[J].水土保持学报,2022,36(6):110-118.
- ZHANG X, LU Y D, WANG B, et al. Study on the characteristics of loess seepage in the southern Loess Plateau by dye tracing method[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(6): 110-118.
- [17] 陈晓冰,张洪江,程金花,等.基于染色图像变异性分析的优先流程度定量评价[J].农业机械学报,2015,46(5):93-100.
- CHEN X B, ZHANG H J, CHENG J H, et al. Quantitative evaluation of preferential flow development degree based on dyed image variability analysis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5): 93-100.
- [18] VAN SCHAICK N L M B. Spatial variability of infiltration

- tion patterns related to site characteristics in a semi-arid watershed[J]. *Catena*, 2009, 78(1): 36-47.
- [19] 郑欣,程金花,张洪江,等.北京地区2种类型土壤优先流染色形态特征及其影响因素[J].水土保持学报, 2018, 32(3): 113-119.
- ZHENG X, CHENG J H, ZHANG H J, et al. Characteristics and influencing factors of preferential flow dyeing morphology of two soils in Beijing[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(3): 113-119.
- [20] 吴庆华,张家发,蔺文静,等.土壤水流模式染色剂示踪及优先流程度评估[J].农业工程学报, 2014, 30(7): 82-90.
- WU Q H, ZHANG J F, LIN W J, et al. Applying dyeing tracer to investigate patterns of soil water flow and quantify preferential flow in soil columns[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(7): 82-90.
- [21] TOBELLA A B, REESE H, ALMAW A, et al. The effect of trees on preferential flow and soil infiltrability in an agroforestry parkland in semiarid Burkina Faso[J]. *Water Resources Research*, 2014, 50(4): 3342-3354.
- [22] 阮芯竹,程金花,张洪江,等.重庆四面山不同林地土壤大孔隙特征及其影响因素[J].水土保持学报, 2015, 29(3): 68-74.
- RUAN X Z, CHENG J H, ZHANG H J, et al. Soil macropore characteristics of different woodland and their influencing factors on simianshan mountain in Chongqing[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(3): 68-74.
- [23] 姚晶晶,程金花,张洪江,等.入渗水量对重庆四面山草地优先流影响的定量评价[J].水土保持学报, 2018, 32(2): 45-51.
- YAO J J, CHENG J H, ZHANG H J, et al. Quantitative evaluation of effects of infiltration amounts on preferential flow in grassland in Simian Mountain of Chongqing[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(2): 45-51.
- [24] 王赵男,辛颖,赵雨森.黑龙江省水源地优先流区与基岩质流区土壤特性分析[J].水土保持学报, 2017, 31(1): 49-54.
- WANG Z N, XIN Y, ZHAO Y S. Analysis on soil characters of preferential pathways and soil matrix in water-source area of Heilongjiang Province[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(1): 49-54.
- [25] 曾敏,杨倩,吴元芝,等.花岗岩山坡A-C结构土壤下典型植被优先流发育特征研究[J].山东林业科技, 2024, 54(4): 1-10.
- ZENG M, YANG Q, WU Y Z, et al. Study on the characteristics of preferential flow of typical vegetation in A-C structure of soils on a granite hillslope[J]. *Journal of Shandong Forestry Science and Technology*, 2024, 54(4): 1-10.
- [26] 段剑,王凌云,王玲,等.植物根孔构型与土壤优先流过程研究进展[J].中国水土保持科学(中英文), 2023, 21(2): 117-123.
- DUAN J, WANG L Y, WANG L, et al. A review of researches on plant root channel architecture and soil preferential flow process[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2023, 21(2): 117-123.
- [27] 李珠宇,李志成,徐贵迁,等.干热河谷冲沟系统土壤团聚体对优先路径的影响[J].水土保持学报, 2024, 38(2): 304-315.
- LI Z Y, LI Z C, XU G Q, et al. Effect of soil aggregate on preferential path in gully system of dry-hot valley[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(2): 304-315.
- [28] 段凤仪,朱成立,王策,等.灌溉优先流对裂隙分布密度、灌水强度及土壤湿度的响应机理[J].灌溉排水学报, 2023, 42(2): 32-41.
- DUAN F Y, ZHU C L, WANG C, et al. Effects of cracking patterns and antecedent soil water content on preferential flow of irrigated water[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2023, 42(2): 32-41.
- [29] 麦建军.外源有机物添加对侵蚀退化黑土水分特性及作物产量的影响[D].北京:中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心), 2023.
- MAI J J. Effects of addition of exogenous organic matter on water characteristics and crop yield of eroded and degraded black soil[D]. Beijing: Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, 2023.
- [30] 姚强岭,于利强,陈胜焱,等.西部生态脆弱矿区采动水资源与生态环境效应[J].煤炭学报, 2025, 50(2): 748-767.
- YAO Q L, YU L Q, CHEN S Y, et al. Mining-affected water resources and ecological effects in ecologically fragile mining areas of western China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2025, 50(2): 748-767.