

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

王佩佩, 苏雪萌, 周正朝, 刘俊娥

(陕西师范大学地理科学与旅游学院, 西安 710119)

摘要: 以黄土丘陵区 3 种典型植被群落(白羊草、铁杆蒿和杠柳)为研究对象,并以退耕 1 年的撂荒地作为对照(CK),采用原位染色示踪和实验室分析相结合,对比分析不同植被群落斑块格局下的土壤优先流特征,探究植物根系、土壤理化性质对优先流的影响。结果表明:相较 CK,植被恢复提高了优先流发育程度;对于各植被斑块,铁杆蒿植被斑块具有最高的染色面积比(45.62%)、最大染色深度(30.30 cm)、优先流比(39.76%)和长度指数(475.90%),杠柳次之,白羊草最小;而对于同一植被群落,除白羊草群落外,其他群落优先流发育程度表现为植被斑块大于裸地斑块;通过结构方程模型发现,优先流染色面积比主要受到土壤总孔隙度、团聚体稳定性、根系生物量密度和有机质含量的直接影响,解释方差可达 70%。因此,植被的自然恢复通过其根系发育影响土壤性质,进而改善土壤优先流发育程度,提高土壤入渗能力。

关键词: 优先流; 斑块状植被; 土壤理化性质; 根系特征; 黄土丘陵区

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)05-0016-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2021.05.003

Characteristics and Influencing Factors of Soil Preferential Flow on Slope of Typical Vegetation Communities in Loess Hilly Region

WANG Peipei, SU Xueming, ZHOU Zhengchao, LIU Jun'e

(School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119)

Abstract: Taking three typical vegetation communities (*Bothriochloa ischaemum*, *Artemisia gmelinii* and *Periploca sepium*) in the loess hilly region as research objects, and the abandoned land for one year as the control (CK), the characteristics of soil preferential flow under different vegetation community patch patterns were analyzed based on in-situ dye-tracer and laboratory experiment methods, and the effects of plant roots and soil physicochemical properties on preferential flow were explored. The results showed that vegetation restoration improved the development of preferential flow in comparison with the CK. For each vegetation patch, the highest dye coverage (45.62%), maximum staining depth (30.30 cm), preferential flow proportion (39.76%) and the length index (475.90%) were found in *A. gmelinii* vegetation patch, followed by *P. sepium* and *B. ischaemum*. For the same vegetation community, the development degree of preferential flow was higher in vegetation patches than that in bare patches, except for the *B. ischaemum* community. Furthermore, the structural equation model indicated that the dyeing area ratio of preferential flow was directly affected by soil total porosity, aggregate stability, root mass density and soil organic matter content, and which could explain 70% of the total variance. Therefore, the natural vegetation restoration could affect soil properties through roots development, thereby improving the development degree of soil preferential flow and soil infiltration capacity.

Keywords: preferential flow; patched vegetation; soil physicochemical properties; root traits; the loess hilly region

土壤水分是影响干旱半干旱地区植被生长和分布格局的重要限制因子之一,而降水入渗是土壤水分的重要补给来源,决定着土壤的蓄水和地表径流^[1-2]。优先流作为土壤水分入渗的一种重要形式,是指土壤

水绕过土壤基质而优先运移至地下水源的过程^[3]。优先流与生态系统的稳定性、地质灾害以及地下水水质污染等现象息息相关,是维持土壤系统功能、确定灌溉与施肥等的重要基础^[4-5]。

收稿日期: 2021-05-06

资助项目: 国家自然科学基金项目(41977061); 中央高校基础科研基金项目(GK202001003); 中央高校基础科研基金项目(2020CSLZ007); 陕西省重点研发计划项目(2021ZDLSF05-02)

第一作者: 王佩佩(1995—), 女, 在读博士研究生, 主要从事水土资源评价与规划研究。E-mail: wangpp@snnu.edu.cn

通信作者: 周正朝(1980—), 男, 博士, 教授, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: zczhou@snnu.edu.cn

受到水分限制,干旱半干旱地区难以维持大面积植被的生长,常形成斑块状植被格局,并呈现植被斑块和裸地斑块镶嵌的景观^[6]。已有研究^[7]发现,植被斑块的入渗速率大于裸地斑块,对地表径流和侵蚀产物具有拦截作用。此外,李小雁^[8]发现,灌丛斑块表层土壤水分稍低于裸地斑块,但其深层土壤水分远大于裸地斑块,使得水分在深层土壤聚集,供干旱缺水时使用。因此,斑块化植被格局对调节水文过程和稳定生态系统具有重要作用。

黄土丘陵区是我国典型的干旱半干旱区,水资源的长期匮乏使斑块格局成为该区域典型的植被景观格局。当前,一些研究^[7-8]对部分干旱半干旱区斑块格局影响土壤水分、地表径流和土壤侵蚀进行探究;优先流的研究^[9-11]主要集中在不同土地覆盖类型、植被类型以及耕作方式等方面。关于植被恢复过程中斑块状植被格局下的优先流特征的研究相对匮乏。但准确认识斑块格局对黄土丘陵区的水文过程及潜在的水土流失的影响对该区域生态建设具有重要意义。

鉴于此,本文以黄土丘陵区白羊草(*Bothriochloa ischaemun*)、铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)及杠柳(*Periploca sepium*)群落为研究对象,以退耕 1 年的撂荒地作为对照,应用染色示踪方法研究了 3 种群落斑块格局下的优先流特征,探究了根系和土壤理化性质对优先流的影响,以期为黄土丘陵区水土保持、土壤侵蚀防治及植被恢复提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究选取陕西省延安市安塞区坊塌流域为试验区域(36°46′13″—36°49′18″N,109°15′22″—109°17′01″E)。该流域隶属于典型的黄土丘陵沟壑区(图 1)。流域多年年平均气温 8.8℃,多年年平均降水量 505 mm,属干旱半干旱大陆性气候,流域土壤主要是黄绵土。全流域植被类型以狼牙刺(*Sophora davidii*)、杠柳、铁杆蒿、白羊草和长芒草(*Stipa bungeana*)等自然恢复植被为主,多呈斑块状分布格局。

1.2 试验设计

为后续试验设计,对 2 种景观类型作以区分:植被斑块多以高等植物覆盖为主,如灌木、草本植物聚集等;裸地斑块没有高等植物覆盖或有稀疏高等植物,其土壤表层一般上覆较为低级的植物,如构成生物结皮的藻类、地衣类和苔藓类等。于 2018 年 8 月,在研究区选取植被恢复年限 10 年以上的白羊草、铁杆蒿和杠柳植被群落作为研究对象,以退耕 1 年的撂荒地作为对照(CK),样地详细信息见表 1。在 3 个自然植被群落所在的整个坡面选择植被斑块和裸地斑块,随后为每种斑块随机选取 3 个重复样点,CK 所在坡面选取植被斑块和裸

地斑块各 1 个进行染色示踪试验。

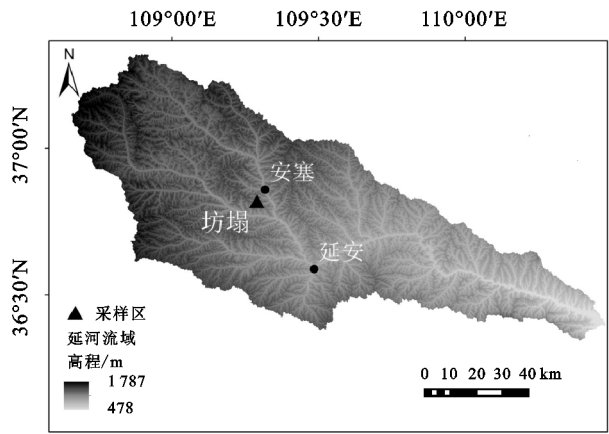


图 1 研究区概况

表 1 不同植被群落样地信息

群落类型	植被类型	经度(°E)	纬度(°N)	坡向/(°)	坡度/(°)
白羊草	须根系多年生草本	109.27	36.82	NE 65	20
铁杆蒿	直根系半灌木	109.27	36.84	NE 55	18
杠柳	灌木	109.28	36.72	NE 50	16
撂荒地(CK)	1 年生草本	109.25	36.81	NE 30	11

1.3 研究方法

1.3.1 染色示踪试验 在每个样点分别设立样方(1 m×1 m),首先清理样方内地表的较大枯枝和砾石,但不扰动土体表层枯枝落叶层和腐殖质层;将定制的矩形铁框(长×宽×高=40 cm×40 cm×30 cm)以植株为中心垂直插入清理后的土体(深度 15 cm),并在铁框与土壤接触处涂抹适量凡士林,防止水分沿此下渗。再将配置好的亮蓝溶液(4 g/L,共 10 L)用喷壶均匀地喷洒在铁框内的土壤表面,而后用保鲜膜覆盖在喷洒区域上,以避免蒸发、降水以及其他外界条件对试验的干扰;24 h 后,在不破坏染色土体的情况下移走铁框,在喷洒区域的中部开挖土壤剖面(宽×深=40 cm×40 cm),然后用直尺测量染色区域的宽度和深度,并采用数码相机(AF-S D5600, Nikon, 日本)正对土壤剖面拍照,作为后期示踪分析的基础。

1.3.2 土壤性质测定 在每个样点附近挖取剖面,以 10 cm 为 1 层,在 0—60 cm 土层分别用 100 cm³的标准环刀($d=50.46$ mm, $h=50$ mm)、透气良好的布袋和大铝盒取土壤样品用于土壤容重、土壤有机质和土壤团聚体的测定。土壤容重采用环刀法测定,并基于容重的测定计算土壤总孔隙度(土壤密度取 2.65 g/cm³);土壤有机质含量采用重铬酸钾容量法—外加热法测定;团聚体测定采用湿筛法(DIK-2012 土壤团粒分析仪),用平均重量直径(MWD)作为各级水稳性团聚体的综合指标,计算公式为:

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^6 M_i \times D_i}{\sum_{i=1}^6 M_i} \quad (1)$$

式中:MWD 为平均重量直径(mm); M_i 为各粒级的质量(g); D_i 为每个粒级的平均直径(mm), D_1 取

3.500 mm, D_0 取 0.053 mm。

1.3.3 根系参数测定 在选定的样点以 10 cm 为 1 层采集土柱(10 cm×10 cm×10 cm), 抖落无根的土壤, 将含有根系的土样装入自封袋。带回实验室后, 用 0.25 mm 筛选出所有的根系并用清水冲洗干净, 用无纺布吸干根系表面的水分后, 再使用扫描仪将根系扫描为 300dpi 的图像(Epson V700 photo scanner, 日本)。根系参数使用 WinRhizo 根系分析系统(2009a, Regent Instruments, Quebec, QC, 加拿大)测定, 最后将根系放入烘箱, 在 60 °C 恒温干燥 72 h 后称重(精确到 0.001 g)^[12]。根长密度(RLD, cm/cm³)、根系表面积密度(RSAD, cm²/cm³)、根系体积密度(RVD, cm³/cm³)和根生物量密度(RMD, mg/cm³)计算公式为:

$$RLD = RL / V \quad (2)$$

$$RSAD = RSA / V \quad (3)$$

$$RVD = RV / V \quad (4)$$

$$RMD = RM / V \quad (5)$$

式中: RL 为某径级根系长度(cm); RSA 为某径级根系表面积(cm²); RV 为某径级根系体积(cm³); RM 为总根系干质量(mg); V 为每层提取根的土壤体积(cm³)。

由于本研究涉及植物均为灌木草本植物, 根系直径多集中 5 mm 以内, 故将径级分为 $D < 2$ mm 的细根以及 $D \geq 2$ mm 的粗根。

1.3.4 数据处理与分析 采用 ArcGIS 10.2 对拍摄的示踪图片进行几何校正, 采用 Photoshop 对几何校正后的图片进行裁剪, 对图片进行重分类, 设置阈值, 进行二值化, 并采用 Matlab 2015 提取像元值, 并计算以下优先流指标:

(1) 染色面积比(DC , %), 土壤整个剖面(或某一深度处)染色面积占土壤剖面总面积(或总宽度)的比例。

$$DC = D / (D + ND) \times 100\% \quad (6)$$

式中: D 为土壤剖面总染色面积(cm²); ND 为土壤剖面未染色面积(cm²)。

(2) 优先流比($PF - fr$, %), 土壤剖面上优先流区的面积与总染色面积的比值。

$$PF - fr = (1 - \text{UniFr} \times W / \text{TotStAr}) \times 100\% \quad (7)$$

式中: UniFr 为基质流深度(cm), 即染色面积比 $\geq 80\%$ 所对应的土壤深度; W 为土壤剖面水平宽度(本研究为 40 cm); TotStAr 为土壤剖面染色总面积(cm²)。

(3) 长度指数(Li , %), 以一定深度(本研究为 1 mm)将土壤剖面等分为若干层, 其相邻土层深度处的 DC 差值的绝对值之和即为长度指数。

$$Li = \sum_{i=1}^n |DC_{i+1} - DC_i| \quad (8)$$

式中: DC_{i+1} 、 DC_i 分别为第 $i+1$ 、 i 层对应的染色面

积比; n 为土壤剖面垂直土层数。

采用 Excel 2016 软件对数据进行数据处理; 使用 SPSS 21 软件进行单因素方差分析和 Pearson 相关分析, 使用 Origin 2020 制图。最后, 使用 Mplus 7 建立结构方程模型。

2 结果与分析

2.1 土壤优先流特征

由图 2 可知, 白羊草、铁杆蒿、杠柳染色面积主要集中在 0—20 cm 的土层, CK 染色面积则相对较浅。白羊草植被斑块的染色面积比在 0—5 cm 土层逐渐升高, 达到峰值后基本维持, 直到 18 cm 土层开始减小, 染色深度可达 25—30 cm, 而裸地斑块染色深度可达 30—40 cm。铁杆蒿植被斑块的染色面积比在 0—5 cm 土层逐渐增大, 达到峰值后呈波动降低, 染色深度可达 30—40 cm; 而裸地斑块染色深度为 23—30 cm。杠柳植被斑块与裸地斑块的染色面积比曲线波动较大, 植被斑块染色面积比在 10—20 cm 土层开始下降, 而裸地斑块染色面积比在 20—25 cm 土层开始下降, 但染色深度差异并无明显规律。CK 染色面积比在 0—5 cm 土层逐渐升高, 达到峰值后开始波动下降, 染色深度可达 20—25 cm。

白羊草群落中, 植被斑块的总染色面积比和基质流深度大于裸地斑块, 植被斑块的总染色深度、优先流比、长度指数均小于裸地斑块, 杠柳群落则与之相反(表 2)。铁杆蒿群落和 CK 中, 相较于裸地斑块, 植被斑块具有更高的染色面积比、最大染色深度、优先流比和长度指数以及更低的基质流深度, 表明除白羊草群落外, 其他群落的植被斑块优先流发育程度更高。各群落中的植被斑块的各优先流指标(除基质流深度外)的平均值均表现为铁杆蒿 > 杠柳 > 白羊草, 即铁杆蒿群落的植被斑块优先流发育程度更高。对于裸地斑块, 总染色面积比和基质流深度的平均值为杠柳 > 白羊草 > 铁杆蒿, 最大染色深度、优先流比和长度指数的平均值表现为白羊草 > 铁杆蒿 > 杠柳, 表明白羊草群落的裸地斑块优先流发育程度更高。

2.2 土壤理化性质特征

由图 3 可知, 植被斑块下, 各植被群落总孔隙度均随土层深度的增加呈减小趋势; 0—30 cm 土层白羊草总孔隙度最大, 铁杆蒿次之, CK 最小; 30—60 cm 土层 3 种植被群落与 CK 的总孔隙度无明显差异。裸地斑块下, 3 种植被群落总孔隙度高于 CK。不同植被群落, 土壤有机质含量(SOM)随土层深度的增加而减小。尤其是植被斑块下, 0—10 cm 土层的 SOM 与其他土层深度差异显著。植被斑块下, 杠柳的 SOM 最高, 铁杆蒿最低; 裸地斑块下 SOM 表现为杠柳群落 > 白羊草群落 > 铁杆蒿群落。对于同一植被群落, 除 CK 外, 植被斑块的

SOM 高于裸地斑块。平均重量直径(MWD)是描述各级水稳性团聚体的综合指标。随土层深度增加,

MWD 呈减小趋势。此外,白羊草群落 MWD 在 0—10 cm 土层大于铁杆蒿和杠柳群落。

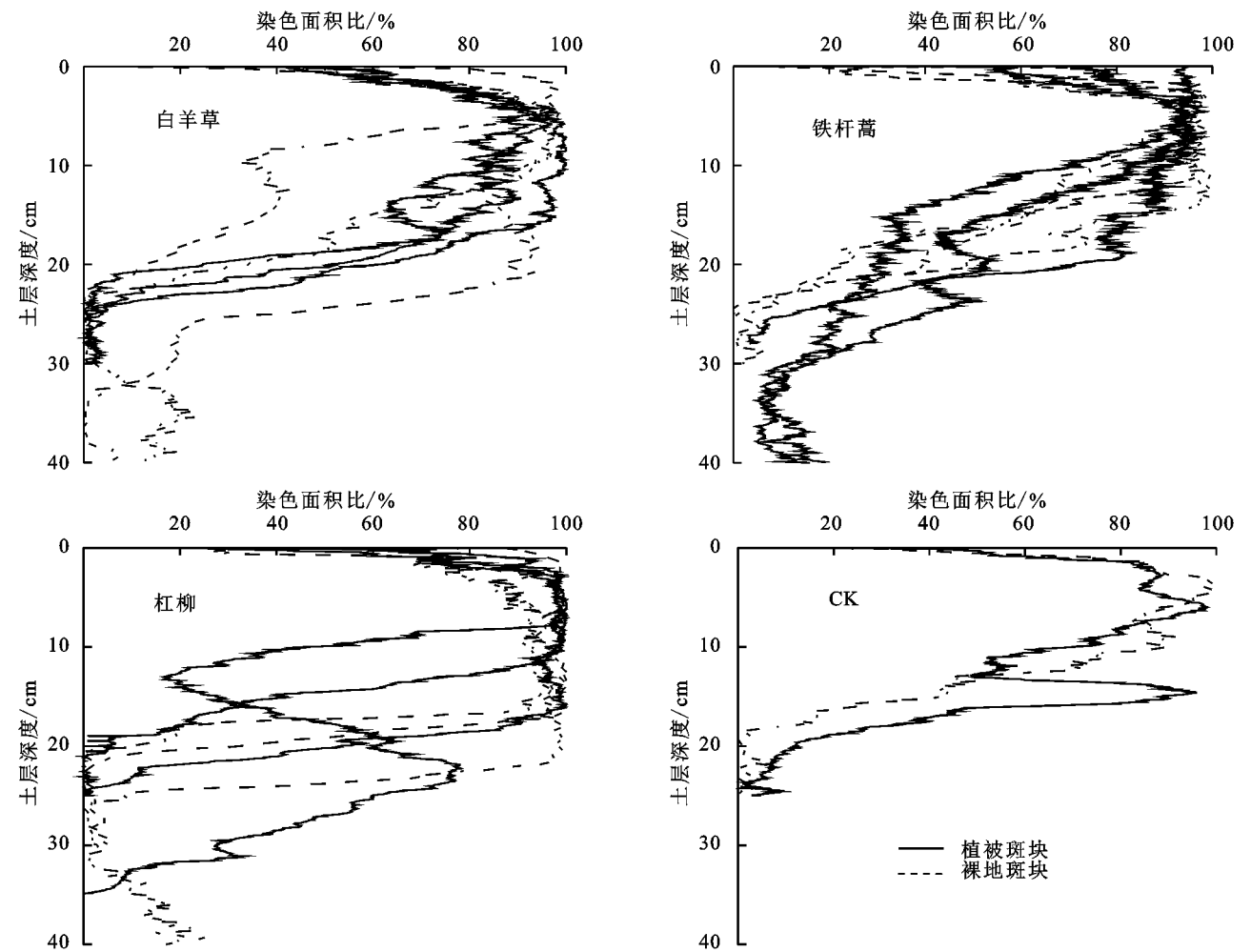


图 2 不同植被群落下土体垂直剖面的染色面积比

表 2 优先流特征指标

群落	斑块	染色面积比/%	最大染色深度/cm	基质流深度/cm	优先流比/%	长度指数/%
白羊草	植被	42.56±4.55ab	24.85±1.71a	14.00±4.08a	18.03±10.98a	367.56±70.11a
	裸地	42.42±14.72ab	26.33±4.86a	13.60±6.72a	26.52±14.97a	393.50±75.85a
铁杆蒿	植被	45.62±3.76a	30.30±4.78a	11.07±2.34a	39.76±8.76a	457.90±45.87a
	裸地	40.49±3.09ab	23.90±1.40ab	12.40±3.08a	23.86±10.44a	348.87±67.79a
杠柳	植被	43.09±7.73ab	26.33±7.49a	12.83±4.60a	25.73±16.13a	376.96±75.64a
	裸地	48.13±8.78a	22.18±2.93ab	17.80±2.55a	7.10±3.65a	336.90±72.89a
CK	植被	34.49±4.11b	24.30±1.30a	10.10±1.20a*	25.71±3.98a	371.89±11.87a
	裸地	30.91±2.34b	18.70±1.01ab	10.40±1.12a*	15.86±1.99a	357.93±10.76a

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示不同植被群落在同一斑块类型下差异显著($p<0.05$);*表示同一群落不同斑块类型间差异显著($p<0.05$)。

2.3 根系特征

由表 3 可知,植被斑块下,各植被群落根长密度随土层深度增加而减小。白羊草群落根系集中在 0—30 cm,且细根占比较大,0—10 cm 土层细根根长密度占比高达 98.3%。铁杆蒿、杠柳根系分别主要集中在 0—40,0—30 cm 土层,且粗根占比更高,0—10 cm 土层铁杆蒿、杠柳粗根占总根长密度的 36%和 35%。与其他植被群落相比,铁杆蒿根系可达深度最

大。根表面积密度与根体积密度所表现的特征与根长密度相似,其中铁杆蒿与杠柳的根表面积密度及根体积密度大于白羊草与 CK。

对于同一植被群落,植被斑块的根系生物量密度均大于裸地斑块,且差异显著(表 3)。各群落根系生物量随土层深度的增加呈减小趋势。各植被群落的植被斑块根系生物量密度整体高于 CK(除 0—10 cm 土层),具体表现为铁杆蒿群落>杠柳群落>白羊草群落>CK。

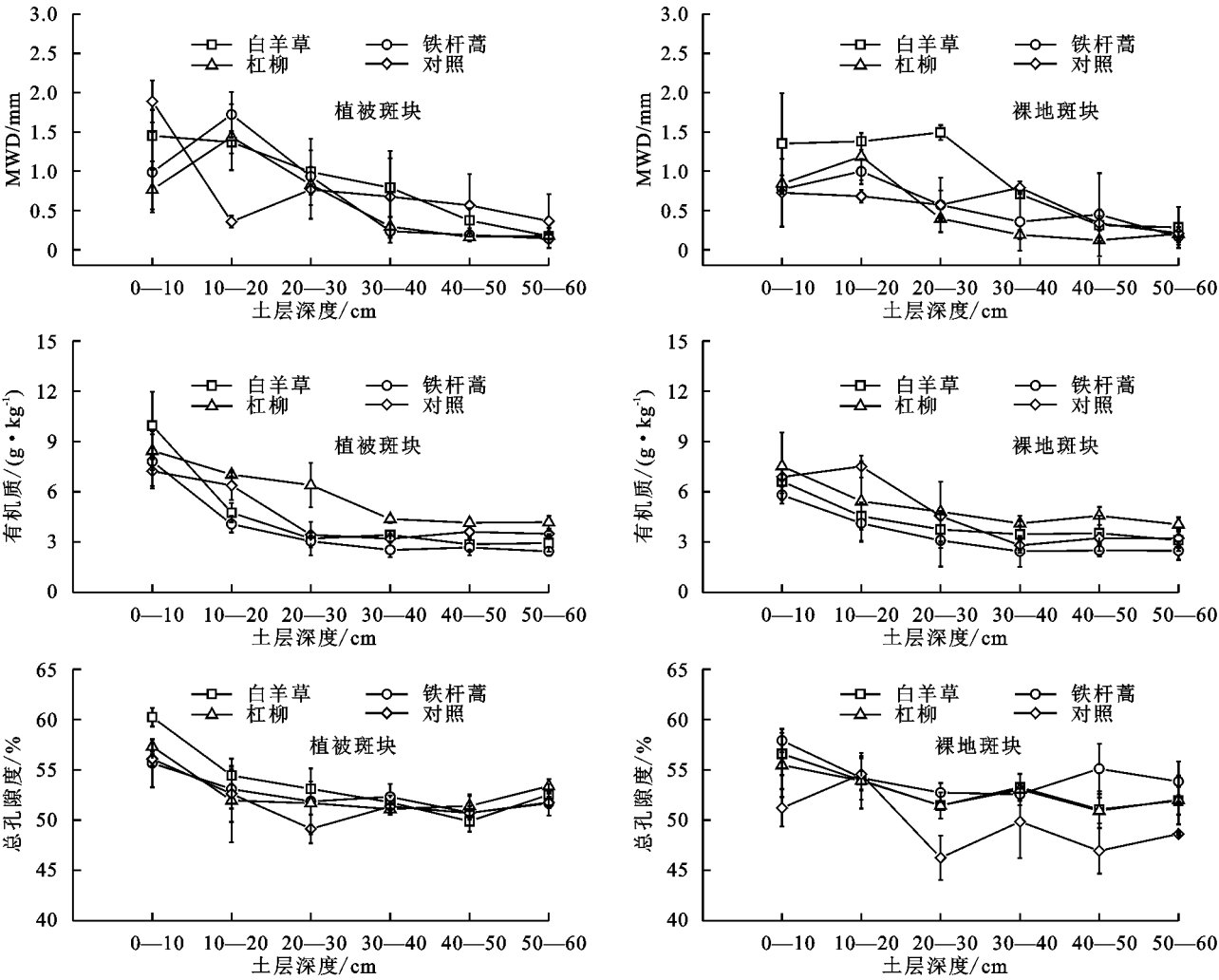


图 3 不同植被群落理化性质变化特征

2.4 土壤优先流影响因素分析

土壤总孔隙度 (TP)、MWD、土壤有机质含量 (SOM)、RMD 和各径级的 RLD、RSAD、RVD 均与土壤染色面积比呈显著正相关 ($p < 0.01$, 表 4)。RMD 和各径级的 RLD、RSAD、RVD 与 TP、SOM 呈显著正相关 ($p < 0.05$), 其中, TP 与 $D < 2$ mm 的根系特征参数达极显著相关 ($p < 0.01$)。此外, TP、MWD 与 SOM 呈显著正相关 ($p < 0.05$)。

土壤、根系特征参数对优先流染色面积比具有显著影响, 本文通过结构方程模型可视化各变量之间的交互作用、直接和间接影响。模型 (Chi-Square (χ^2) = 3.598, $p = 0.3082 > 0.05$, Akaike information criteria (AIC) = 46.365) 通过各径级 RVD、RMD、总孔隙度 (TP)、有机质 (SOM) 和 MWD 解释了土壤染色面积比的 70% (图 4)。TP、MWD、RMD 和 SOM 是直接影响土壤染色面积比的重要因素, 路径系数分别为 0.35, 0.33, 0.26, 0.24 ($p < 0.01$)。而 TP 被 $D < 2$ mm 的 RVD 和 SOM 影响 (路径系数为 0.33, 0.34, $p < 0.01$), MWD 被 SOM 影响 (路径系数为 0.30, $p < 0.01$)。此外, $D < 2$ mm 的 RVD 和 RMD 是土壤有机质的重要影响

因子, 路径系数分别为 0.39, 0.49 ($p < 0.001$)。

3 讨论

土壤染色面积比的曲线形态表明, 相较于 CK, 黄土丘陵区 3 种典型植被群落提高了土壤优先流程度 (图 2), 说明自然植被恢复有利于土壤水分的下渗。不同植被类型具有不同的根系形态特征, 使得土壤水分运动的形式不同^[13]。本研究中, 对于各群落的植被斑块, 优先流发育程度依次为铁杆蒿 > 杠柳 > 白羊草, 铁杆蒿群落具有更高的染色面积比、最大染色深度、优先流比和长度指数 (表 2)。与以往研究^[14]中发现的植物根系形态特征影响土壤水分下渗的结果相一致。铁杆蒿作为直根系植物, 有利于产生更稳定的大孔隙, 促使优先流的发生^[15]。白羊草属须根系植物, 细根占比高达 98%, 可以形成致密的根系网络, 虽然可以促使优先流的发生, 但其促进作用随根长密度的增加而减小, 这主要是由于致密的根系网络可能会堵塞优先流通道^[15-16]。其次, 白羊草所生长的坡较陡, 虽采样时选择在较缓的坡下进行, 但可能仍对结果产生一定影响。而相较于铁杆蒿, 杠柳根系分布的土层深度较浅 (0-30 cm), 因此优先流发育程度较低。

表 3 不同植被群落根系各参数变化特征

植被 类型	土层 深度/cm	裸地斑块				植被斑块			
		根长密度/ (cm·cm ⁻³)	根表面积密度/ (cm ² ·cm ⁻³)	根体积密度/ (cm ³ ·cm ⁻³)	根系生物量密度/ (mg·cm ⁻³)	根长密度/ (cm·cm ⁻³)	根表面积密度/ (cm ² ·cm ⁻³)	根体积密度/ (cm ³ ·cm ⁻³)	根系生物量密度/ (mg·cm ⁻³)
白羊草	0-10	0.08(0.66)	0.07(0.18)	0.26(0.38)	0.87	0.02(1.17)	0.02(0.25)	0.10(0.59)	1.49
	10-20	0.01(0.30)	0.01(0.04)	0.01(0.04)	0.57	0(0.75)	0(0.19)	0(0.11)	1.20
	20-30	0.01(0.19)	0.01(0.03)	0.05(0.06)	0.35	0(0.40)	0(0.07)	0(0.10)	0.46
	30-40	0(0.11)	0(0.02)	0.02(0.05)	0.29	0(0.13)	0(0.02)	0.03(0.04)	0.34
	40-50	0(0.08)	0(0.02)	0.02(0.05)	0.16	0(0.07)	0(0.01)	0(0)	0.11
	50-60	0(0.05)	0(0.01)	0.02(0.02)	0.11	0(0.02)	0(0.01)	0(0.12)	0.04
铁杆蒿	0-10	0.25(0.62)	0.22(0.20)	1.68(0.63)	2.71	0.22(0.39)	0.24(0.13)	2.37(0.41)	3.47
	10-20	0.10(0.15)	0.09(0.05)	0.66(0.17)	1.48	0.04(0.19)	0.04(0.06)	0.27(0.21)	2.46
	20-30	0.04(0.14)	0.03(0.05)	0.25(0.17)	0.52	0.04(0.16)	0.03(0.04)	0.25(0.12)	0.77
	30-40	0.01(0.11)	0.01(0.03)	0.07(0.09)	0.52	0.05(0.16)	0.04(0.04)	0.35(0.13)	0.70
	40-50	0(0.10)	0(0.02)	0.01(0.05)	0.30	0.02(0.17)	0.02(0.04)	0.12(0.09)	0.71
	50-60	0(0.09)	0(0.02)	0.01(0.05)	0.22	0(0.07)	0(0.01)	0.01(0.03)	0.23
杠柳	0-10	0.04(0.62)	0.04(0.05)	0.28(0.16)	1.56	0.32(0.59)	0.27(0.22)	1.93(0.76)	5.86
	10-20	0.03(0.15)	0.02(0.03)	0.18(0.11)	1.16	0.04(0.16)	0.03(0.06)	0.17(0.21)	2.28
	20-30	0.05(0.14)	0.05(0.03)	0.35(0.07)	0.72	0.05(0.15)	0.04(0.06)	0.22(0.19)	0.50
	30-40	0.02(0.11)	0.01(0.02)	0.04(0.04)	0.36	0.01(0.10)	0(0.02)	0.03(0.05)	0.39
	40-50	0.04(0.10)	0.04(0.04)	0.11(0.08)	0.43	0(0.10)	0(0.01)	0.01(0.03)	0.32
	50-60	0.09(0.09)	0.09(0.07)	0.11(0.08)	0.19	0(0.04)	0(0.01)	0.02(0.04)	0.22
对照	0-10	0.03(0.30)	0.03(0.09)	0.19(0.27)	1.87	0.02(0.25)	0.01(0.07)	0.09(0.20)	2.73
	10-20	0.10(0.62)	0.08(0.18)	0.56(0.52)	1.03	0.05(0.03)	0.05(0.03)	0.05(0.03)	0.84
	20-30	0.03(0.02)	0.03(0.02)	0.03(0.02)	0.38	0.03(0.02)	0.03(0.02)	0.03(0.02)	0.41
	30-40	0.17(0.11)	0.17(0.11)	0.17(0.11)	0.28	0.01(0.12)	0.01(0.04)	0.04(0.12)	0.29
	40-50	0.04(0.20)	0.04(0.06)	0.26(0.18)	0.45	0.01(0.04)	0.01(0.01)	0.05(0.03)	0.17
	50-60	0.02(0.12)	0.02(0.03)	0.13(0.09)	0.28	0(0.08)	0(0.03)	0.02(0.08)	0.21

注:括号外数据为根系 $D\geqslant 2$ mm;括号内数据为根系 $D<2$ mm。

表 4 土壤、根系特征与土壤染色面积比的相关关系

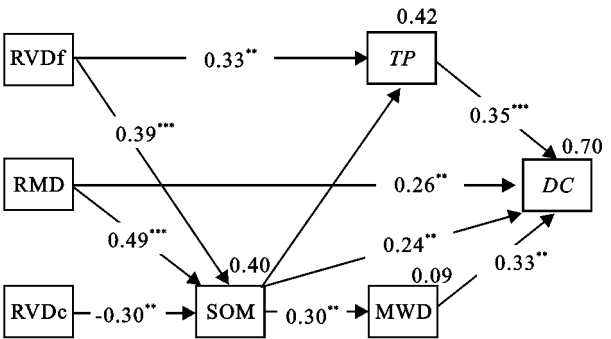
指标	染色面积比	总孔隙度	有机质	MWD	RLD		RSAD		RVD	
					$D<2$ mm	$D\geqslant 2$ mm	$D<2$ mm	$D\geqslant 2$ mm	$D<2$ mm	$D\geqslant 2$ mm
总孔隙度	0.65**									
有机质	0.64**	0.58**								
MWD	0.50**	0.24*	0.30*							
RLD($D<2$ mm)	0.51**	0.62**	0.45**	0.42**						
RLD($D\geqslant 2$ mm)	0.40**	0.32**	0.26*	-0.05	0.32**					
RSAD($D<2$ mm)	0.52**	0.59**	0.54**	0.29*	0.82**	0.52**				
RSAD($D\geqslant 2$ mm)	0.36**	0.25*	0.23*	-0.07	0.26*	0.97**	0.54**			
RVD($D<2$ mm)	0.48**	0.53**	0.51**	0.21	0.66**	0.67**	0.95**	0.61**		
RVD($D\geqslant 2$ mm)	0.35**	0.25*	0.21	-0.04	0.28*	0.94**	0.50**	0.96**	0.58**	
RMD	0.63**	0.47**	0.55**	0.19	0.32**	0.68**	0.51**	0.61**	0.59**	0.57**

注: ** 表示 $p<0.01$; * 表示 $p<0.05$ 。

对于同一植被群落,除白羊草外,其他植被群落的植被斑块具有更高的染色面积比、最大染色深度、优先流比和长度指数和更低的基质流深度(表 2),表明植被斑块的优先流发育程度优于裸地斑块。主要是由于植被斑块粗糙度相对较大,根系(包括腐烂的根系)发育也能促使产生大孔隙,改善土壤结构和增

强生物活动,为优先流的产生创造一个有利的环境^[17];而裸地斑块地表无鲜活植物,且地表具有结皮,虽然地下部分存在周边植物的侧根(表 3),以及腐烂根系所产生的根孔,使得其下也存在优先流的发育,但其程度不及植被斑块,形成斑块状植被格局下的水分的“汇”和“源”^[6]。因此,植被斑块化格局的出

现,可以使小尺度上水分再分配,从而使得植被在干旱少雨的干旱半干旱地区得以稳定生长,促使水分渗入更深层土壤,减少地表侵蚀的发生。这与以往对于干旱半干旱区的斑块状植被格局对水文过程的影响结果^[7-8]相一致。白羊草群落表现出的不同,可能是由于其下根系致密程度达到了堵塞优先流通道的程度,但临界值尚不清楚,有待进一步研究。



注: RVDf 为 RVD($D<2\text{ mm}$); RVDc 为 RVD($D\geq 2\text{ mm}$); TP 为土壤总孔隙度; SOM 为土壤有机质含量; MWD 为团聚体平均重量直径; DC 为土壤染色面积比; 路径上的值是标准化路径系数; * * * 表示 $p<0.001$; * * 表示 $p<0.01$; 矩形右上方数字表示模型解释的特定变量中的方差比例(R^2)。

图 4 土壤、根系特征和土壤染色面积比的结构方程模型输出

土壤水分下渗受土壤理化性质和根系特征的共同影响^[18]。本研究中,土壤染色面积比与土壤理化性质和各根系参数的强相关性(表 4),表明根系的分布和土壤理化性质的改善有利于优先流通道的形成,从而诱导优先流的发生。与以往对植被恢复中优先流特征的影响因素研究^[19]一致。此外,染色面积比主要受到土壤总孔隙度、团聚体平均重量直径、根系生物量密度和有机质含量的直接影响,解释方差达 70%(图 4)。土壤总孔隙度及其连通性直接影响优先流的方式及强度^[20],有机质作为黏合剂能增加土壤的黏结力而促进团粒结构的形成,进而有利于水稳性团聚体的形成,改善土壤结构;较高的团聚体稳定性提高了土壤孔隙度,减少了水流通道黏土颗粒的覆盖,为优先流的发育提供稳定性良好通道^[18,21]。

本研究中,根系主要通过影响土壤性质间接影响土壤水分下渗(图 4)。这主要归因于 2 个方面:一方面根系可以通过穿插作用形成连通性良好的大孔隙或通道,尤其是土壤表层根系形成的大孔隙网络会成为主要的优先流通道^[22],有助于土壤水的运动;另一方面,根系分泌物及死亡根系的腐烂有利于有机质的积累,促使水稳性团聚体的形成和土壤孔隙的稳定,以增加优先流路径的丰度^[3]。这与 Zhang 等^[23]的研究结果一致,植物根系主要分布在土壤表层,并且可以有效改善理化性质,从而易于诱导优先流的产生。

4 结论

(1)相较于 CK,黄土丘陵区的 3 种植被群落均不同程度地提高了优先流发育程度,对于各群落的植被斑块,优先流发育程度依次为铁杆蒿>杠柳>白羊草,铁杆蒿群落具有更高的染色面积比、最大染色深度、优先流比和长度指数;对于各群落的裸地斑块,优先流发育程度依次为白羊草>铁杆蒿>杠柳。

(2)对于同一植被群落,除白羊草外,其他植被群落的植被斑块的优先流发育程度优于裸地斑块。植被斑块具有更高的染色面积比、最大染色深度、优先流比和长度指数和更低的基质流深度。

(3)优先流染色面积比主要受到总孔隙度、团聚体稳定性、根系生物量密度和有机质含量的直接影响,解释方差可达 70%。同时,根系特征也可以通过对土壤理化性质的作用以间接影响染色面积比,即根系的发育和分布有利于优先流通道的形成,从而诱导优先流的发生。

参考文献:

[1] Wu G L, Liu Y, Yang Z, et al. Root channels to indicate the increase in soil matrix water infiltration capacity of arid reclaimed mine soils[J]. Journal of Hydrology, 2017, 546: 133-139.

[2] Sun D, Yang H, Guan D X, et al. The effects of land use change on soil infiltration capacity in China: A meta-analysis[J]. Science of The Total Environment, 2018, 626: 1394-1401.

[3] Zhang Y H, Zhang M X, Niu J Z, et al. The preferential flow of soil: A widespread phenomenon in pedological perspectives[J]. Eurasian Soil Science, 2016, 49(6): 661-672.

[4] Shao W, Bogaard T A, Bakker M, et al. Quantification of the influence of preferential flow on slope stability using a numerical modelling approach[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2015, 19(5): 2197-2212.

[5] Khan M R, Koneshloo M, Knappett P S K, et al. Megacity pumping and preferential flow threaten groundwater quality[J]. Nature Communications, 2016, 7(1): e12833.

[6] 杜建会, 严平, 董玉祥. 干旱地区斑块状植被格局形成的水分驱动机制及其研究进展[J]. 生态学杂志, 2012, 31(8): 2137-2144.

[7] 李小军, 汪君, 高永平. 荒漠化草原植被斑块分布对地表径流、侵蚀及养分流失的影响[J]. 中国沙漠, 2011, 31(5): 1112-1118.

[8] 李小雁. 干旱地区土壤-植被-水文耦合、响应与适应

- 机制[J].中国科学:地球科学,2011,41(12):1721-1730.
- [9] 程竞萱,程金花,郑欣,等.不同植被覆盖下土壤优先流特征及影响因素[J].河南农业大学学报,2018,52(6):973-982.
- [10] 张建中,姚晶晶,张成梁,等.排矸场植被恢复初期不同植被类型土壤优先流特征[J].干旱区资源与环境,2021,35(4):165-172.
- [11] 陈晓冰,严磊,李振东,等.耕作方式对岩溶区甘蔗地土壤优先流特征的影响[J].土壤,2019,51(4):786-794.
- [12] Pérès G, Cluzeau D, Menasseri S, et al. Mechanisms linking plant community properties to soil aggregate stability in an experimental grassland plant diversity gradient[J].Plant and Soil,2013,373(1/2):285-299.
- [13] Jiang X J, Liu W, Chen C, et al. Effects of three morphometric features of roots on soil water flow behavior in three sites in China[J].Geoderma,2018,320:161-171.
- [14] Huang Z, Tian F P, Wu G L, et al. Legume grasslands promote precipitation infiltration better than graminaceous grasslands in arid regions[J].Land Degradation and Development,2016,28(1):309-316.
- [15] Tang B Z, Jiao J Y, Yan F C, et al. Variations in soil infiltration capacity after vegetation restoration in the hilly and gully regions of the Loess Plateau, China[J].Journal of Soils and Sediments,2018,19(3):1456-1466.
- [16] Liu Y, Guo L, Huang Z, et al. Root morphological characteristics and soil water infiltration capacity in semi-arid artificial grassland soils[J].Agricultural Water Management,2020,235:e106153.
- [17] Guo L, Fan B, Zhang J, et al. Occurrence of subsurface lateral flow in the Shale Hills Catchment indicated by a soil water mass balance method [J]. European Journal of Soil Science,2018,69(5):771-786.
- [18] Hao H X, Wei Y J, Cao D N, et al. Vegetation restoration and fine roots promote soil infiltrability in heavy-textured soils[J].Soil and Tillage Research,2020,198:e104542.
- [19] 曹丹妮,邸涵悦,郭忠录,等.演替梯度下土壤优先流特征及影响因素[J].水土保持研究,2021,28(2):99-107.
- [20] Shein E V. Soil hydrology: Stages of development, current state, and nearest prospects[J].Eurasian Soil Science,2010,43(2):158-167.
- [21] Ghestem M, Sidle R C, Stokes A. The influence of plant root systems on subsurface flow: Implications for slope stability[J].BioScience,2011,61(11):869-879.
- [22] Bogner C, Trancón Y W B, Lange H. Characterising flow patterns in soils by feature extraction and multiple consensus clustering[J].Ecological Informatics,2013,15:44-52.
- [23] Zhang Y H, Niu J Z, Zhang M X, et al. Interaction between plant roots and soil water flow in response to preferential flow paths in Northern China [J]. Land Degradation and Development,2017,28(2):648-663.
- (上接第 15 页)
- [32] Zhang X Q, Hu M C, Guo X Y, et al. Effects of topographic factors on runoff and soil loss in Southwest China[J].Catena,2018,160:394-402.
- [33] 李瑞,张弛,顾再柯,等.贵州喀斯特区典型小流域坡面土壤侵蚀与主要影响因子的响应[J].水土保持研究,2018,25(3):1-5.
- [34] 张信宝,王世杰,贺秀斌,等.碳酸盐岩风化壳中的土壤蠕滑与岩溶坡地的土壤地下漏失[J].地球与环境,2007,35(3):202-206.
- [35] 冯强,赵文武. USLE/RUSLE 中植被覆盖与管理因子研究进展[J].生态学报,2014,34(16):4461-4472.
- [36] 马芊红,张科利.西南喀斯特地区土壤侵蚀研究进展与展望[J].地球科学进展,2018,33(11):1130-1141.
- [37] 莫建飞,陈燕丽,莫伟华.岩溶生态系统水土流失敏感性关键指标和评估模型比较[J].水土保持研究,2021,28(2):256-266.
- [38] 刘警鉴,卢远,刘斌涛,等.广西壮族自治区土地利用与土壤侵蚀的关系[J].水土保持通报,2018,38(1):41-46.
- [39] 师长兴.砾石对土壤可蚀性的影响及土壤可蚀性值估算方法[J].土壤通报,2009,40(6):1398-1401.
- [40] 倪九派,袁道先,谢德体,等.基于 GIS 的岩溶槽谷区小流域土壤侵蚀量估算[J].应用基础与工程科学学报,2010,18(2):217-225.
- [41] 谢婷婷.基于 RUSLE 模型的喀斯特地区土壤侵蚀评价[D].武汉:华中科技大学,2016.
- [42] Prosdócimi M, Cerdà A, Tarolli P. Soil water erosion on Mediterranean vineyards: A review [J]. Catena, 2016,141:1-21.
- [43] Hurlbert S H. Pseudoreplication and the design of ecological field experiments[J].Ecological Monographs,1984,54(2):187-211.