

DOI: 10.5846/stxb202204130989

牛凤娇, 潘成忠, 崔永生, 邹春蕾, 张国栋, 马勇星. 晋西黄土区土地利用对降雨入渗产流模式和优先流分布的影响试验研究. 生态学报, 2023, 43(10): 4154–4166.

Niu F J, Pan C Z, Cui Y S, Zou C L, Zhang G D, Ma Y X. Experimental investigation to the effect of different land-use on rainfall infiltration runoff patterns and preferential flow distribution in the Loess area of western Shanxi Province. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(10): 4154–4166.

晋西黄土区土地利用对降雨入渗产流模式和优先流分布的影响试验研究

牛凤娇¹, 潘成忠^{1,*}, 崔永生¹, 邹春蕾², 张国栋², 马勇星¹

1 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875

2 北京林业大学水土保持学院 山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站, 北京 100083

摘要:黄土高原退耕还林(草)工程显著改变了河川径流过程,但其作用机制尚不清晰。选取晋西黄土区 4 种典型下垫面(20 年和 30 年刺槐人工林地、草地、休耕地)分别开展连续 3 场模拟降雨试验,观测坡面入渗产流过程,并结合染色示踪和图像处理软件技术,分析土地利用类型对坡面降雨入渗产流模式和优先流分布的影响。结果表明:(1)累积入渗量和优先流发育程度均表现为刺槐林地>草地>休耕地,刺槐林地优先流对总入渗的贡献是草地和休耕地的 2.5—4.5 倍,但优先流贡献均不超过 10%,仍以基质流入渗为主。(2)4 种用地类型降雨入渗主要补给地表 60—70cm 土层,前期降雨均匀增加表层土壤含水率,而后期降雨补给深层土壤水分的空间变异性显著增强。(3)刺槐林地产流量及径流系数均显著小于草地和休耕地,且前期含水量对 20 年刺槐林地的影响较小,而显著影响草地和休耕地径流系数。(4)直径 $d < 1\text{mm}$ 的细根显著促进降雨入渗和优先流发育,而 $d > 5\text{mm}$ 的粗根与入渗量和基质流量呈显著负相关。较高的土壤初始含水率、容重和粘粒含量会抑制入渗和优先流的发生。研究说明不同土地利用类型将改变降雨入渗产流过程及土壤水运动形式。

关键词:入渗;基质流;优先流;土地利用类型;黄土区;模拟降雨

Experimental investigation to the effect of different land-use on rainfall infiltration runoff patterns and preferential flow distribution in the Loess area of western Shanxi Province

NIU Fengjiao¹, PAN Chengzhong^{1,*}, CUI Yongsheng¹, ZOU Chunlei², ZHANG Guodong², MA Yongxing¹

1 College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

2 Jixian National Forest Ecosystem Observation and Research Station, Chinese National Ecosystem Research Network, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: The Grain for Green Project has changed hydrological processes on the Loess Plateau, but there is little information on the infiltration and runoff mechanism. Four typical land-use types (20a and 30a *Robinia pseudoacacia* woodland (20 or 30 RW), grassland (GL), and fallow slopeland (FL)) in the Caijiachuan watershed of the Loess area of western Shanxi Province were selected to investigate the effects of land uses on rainfall-infiltration-runoff processes under field simulated rainfalls. The dyeing tracer and image processing software were used to analyze the spatial distribution of preferential flows. The results showed that: (1) both the cumulative infiltration amount and the preferential flow distribution ranked the order: RW>GL>FL. The contribution ratio of preferential flow to total infiltration in RW was 2.5—4.5 times

基金项目:国家自然科学基金项目(42077059)

收稿日期:2022-04-13; **采用日期:**2022-08-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: pancz@bnu.edu.cn

those of GL and FL. However, the contribution of preferential flow was less than 10% for all land uses and matrix flow dominated the infiltration processes. (2) The threshold depth in soil water impacted by rainfall infiltration was 60—70cm for the 4 land-use types. For all plots, antecedent precipitation evenly increased the soil water content of topsoil, while late precipitation increased the infiltration depth and its spatial variability in the increased soil water content. (3) The RW had significantly smaller surface runoff ratios to rainfall than GL and FL. Antecedent soil water content had little effect on the runoff in 20 RW plots, and had great influence on those in GL and FL plots. (4) The fine roots of diameter $d < 1\text{mm}$ significantly strengthened water infiltration and preferential flow occurrence, while roots of $d > 5\text{mm}$ had negative effect on infiltration and matrix flow. Antecedent water content, bulk density and clay content were the key soil factors hindering soil infiltration and the formation of preferential flow. These results indicate that the land-use types can change the processes of rainfall infiltration and soil moisture movement on the hillslopes, which may help understand the runoff generation mechanism.

Key Words: infiltration; matrix flow; preferential flow; land-use types; the Loess area; simulated rainfall

降雨入渗是黄土高原地区土壤水分补给的主要来源^[1-2]。土壤入渗补给主要存在基质流和优先流两种形式,水分和溶质在土壤中层缓慢推进、湿润锋均匀下移的水分运动形式为基质流^[3];水分绕过大部分土壤基质,通过大孔隙纵向或横向快速运移的水分运动形式为优先流。优先流是土壤从均质走向非均质的标志^[4],通过调节入渗、产流、侵蚀、地下水补给等过程影响土地的退化^[5-6]。

自 1999 年我国大范围实施了退耕还林还草工程,黄土高原地区植被覆盖度明显增加^[7-8]。植被恢复在有效控制土壤侵蚀、改善生态环境的同时,亦导致了一些生态问题,如部分区域出现了土壤干层^[9]、河川径流减少^[10]等。此外,小流域径流观测分析表明,植被恢复可显著削减洪峰流量,并改变降雨径流过程^[11]。然而,植被恢复对坡面或流域尺度上的降雨入渗产流的作用机制仍不明晰,难以有效支撑该区的流域高质量发展和生态保护^[12]。

不同土地利用类型下植物根系在土壤中的生长延伸和生死更迭,枯落物分解等改变了土壤结构,导致土壤特性(如含水率、容重、孔隙度等)的改变,进而影响土壤的入渗产流过程和水分运动^[13-16]。研究表明,不同土地利用类型下的入渗速率由大到小依次为林地>灌木>草地>农田^[17]。染色示踪法是观测原位土壤优先流入渗通路的常用方法,结合图像分析技术可定量揭示优先流路径数量、宽度和对总入渗的贡献等^[18-19]。研究表明优先流现象在林地更容易发生,草地和农田的优先流多出现在表层^[20]。根系周边非均质界面可以使水分以较快的速度向下运动,对优先流入渗有一定的促进作用^[21-22]。现有研究多集中于对优先流发育程度的评估,缺少对基质流、优先流入渗贡献的定量区分。随着退耕还林工程的实施,林龄多样化所带来的差异也逐渐被研究者考虑。部分研究认为随着林龄的增长土壤渗透性减弱^[23],而优先流的发育程度出现波动^[24],需进一步探索其影响机制。进一步将降雨-入渗-产流机制研究与基质流、优先流过程定量分析结合,探究不同土地利用类型及林龄下入渗产流模式和优先流分布,可为黄土区河道径流减少及土壤干层等问题提供可能性理论依据。

本研究以山西省吉县蔡家川流域几种典型土地利用类型坡面为研究对象,采用野外模拟降雨和染色示踪相结合的方法,开展不同林龄刺槐人工林、草地和休耕地的降雨-入渗-产流和土壤水分运动研究,分析不同样地的降雨入渗产流模式和优先流发育过程,并量化优先流、基质流入渗贡献和影响机制,进而为黄土区的生态保护和植被建设提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于山西省吉县蔡家川流域,地理坐标为 $110^{\circ}39'45''$ — $110^{\circ}47'45''\text{E}$, $36^{\circ}14'27''$ — $36^{\circ}18'23''\text{N}$,海拔

高度为 900—1513m,地处黄土高原东南部,土层深厚,土质为褐土,属于典型的黄土残塬沟壑区,为暖温带大陆性季风气候。该区多年平均降水量 491mm,潜在蒸散量 1729mm,年均气温 10.2℃,日照时数约 2563h。该区域在 1991 年和 2001 年先后经过两次大规模植树造林,主要土地利用类型有林地、农地、荒草地、果园等。

1.2 试验设计

1.2.1 样地选择

为评估土地利用类型对降雨入渗的影响机制,选取地形条件相近的 4 种典型坡面开展模拟降雨试验,分别为休耕地(对照)、20 年和 30 年刺槐人工林地以及自然草地,林、草地均设 3 个重复径流小区。模拟降雨径流小区尺寸均为长×宽=1m×1m,坡度为 15°左右。径流小区采用石棉瓦板围成,石棉瓦板埋入土中 20cm,板两侧用细土填实,以避免水流随石棉瓦板内壁下渗。径流小区地表出口安装径流收集装置,在根系较密集的地表 20cm 和 50cm 处平行安装 2 个壤中流导流槽。在模拟降雨前,人为去除地表枯落物和植被,并适当平整下垫面使其基本顺直,以避免地面不平整导致的局部填洼或入渗不均等现象发生。

试验开始前,选取试验场地邻近区域取样测定土壤性质,包括初始含水率、容重、总孔隙度、饱和导水率和粒径。每个样点在 0—1m 的土层每隔 10cm 采铝盒和环刀土样,每层 3 个重复。采用烘干法测量土壤初始含水率(105℃,24h);马尔文 Mastersizer2000 激光扫描仪测量粘粒(<0.002mm)、粉粒(0.002—0.05mm)和沙粒(0.05—2mm)含量;环刀法测量土壤容重和总孔隙度;恒定水头法测量饱和导水率。试验样地基本情况见表 1。

表 1 样地基本情况调查

Table 1 Basic information questionnaire for sample plots

植被类型 Vegetation types	主要植物 Main plant	样地编号 Sample plot	坡度 Slope/(°)	坡向 Aspect	土壤类型 Soil type
20 年刺槐林地 20a <i>Robinia pseudoacacia</i> woodland	刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i> 高羊茅 <i>Festuca arundinacea</i>	20RW-1 20RW-2 20RW-3	15	东南	砂壤土
30 年刺槐林地 30a <i>Robinia pseudoacacia</i> woodland	刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i> 高羊茅 <i>Festuca arundinacea</i>	30RW-1 30RW-2 30RW-3	15	东南	砂壤土
草地 Grassland	铁杆蒿 <i>Artemisia sacrorum</i> 艾蒿 <i>Artemisia argyi</i>	GL-1 GL-2 GL-3	15	东南	砂壤土
休耕地 Fallow slopland	—	FL	15	东南	砂壤土

1.2.2 试验过程

试验采用长、宽、高=1.2m×1.2m×1.5m 的针头式人工降雨器(图 1),针头直径 0.55mm,针孔均匀分布,降雨用水为 4g/L 的亮蓝溶液。在降雨过程中保持降雨器内水位不变,标定雨强 30mm/h,降雨均匀系数大于 0.80。相较于直接浇灌或喷洒染色剂的示踪试验,其优点在于试验结果能够更好地反映自然情况,同时能反映坡面产流情况。

人工降雨试验于 2021 年 7—9 月选择连续晴朗天气开展,每次降雨持续 3h,降雨量为 90mm。降雨 24h 后开展下一场降雨,连续 3 场降雨在 72h 内完成,总降雨量为 270mm。降雨过程中采用集雨桶每 10min 收集一次地表和壤中流径流量,并用量筒量取其体积。同时用便携式土壤湿度传感器(IMKO PICO-64)测量 1m×1m 垂直剖面土壤含水率,每 10cm 为一层,每层水平均匀测量 10 个数值。每天降雨结束后,用塑料布覆盖小区表层及剖面,以减少水分蒸发的影响。每个试验小区 3 次降雨全部完成 24h 后,在其坡中部位垂直开挖 1m×1m 的垂向剖面。在剖面周围放置铝合金硬质不变形框,用于后期图像处理的几何校正和标准化处理。在遮光的条件下用相机对染色剖面进行拍照记录。同时将剖面划分为 10cm×10cm 的网格(图 1),取土样测

土壤含水率和根系生物量。

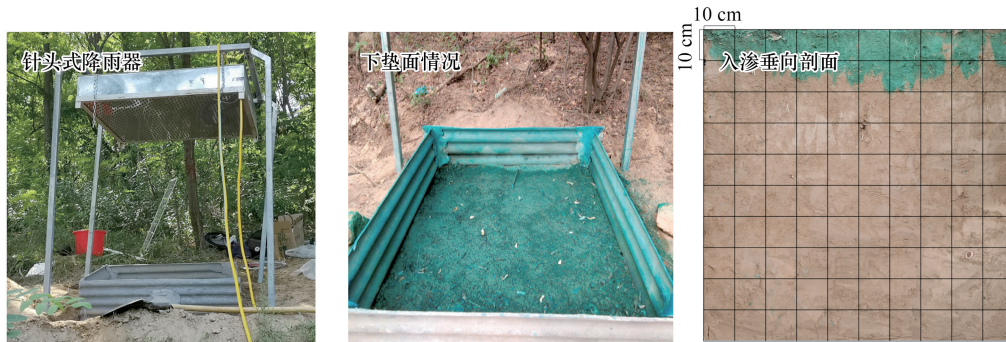


图 1 试验布设

Fig.1 Experimental device plan

1.3 数据分析

1.3.1 图像处理

染色图像的处理分为几何校正、白平衡校正、色彩校正、参数计算等步骤。运用 Adobe Photoshop CS 对染色剖面照片进行几何校正,调整图像大小、亮度、明度、阈值等。应用 MATLAB 建立矩阵并赋值,绘制染色占比随土层深度变化图。用 Excel 计算土壤及根系参数、分层入渗量及基质流、优先流贡献率,用 Origin 绘制成图。土壤水分运动等值线图运用 Surfer 根据克里金差值法绘制。

1.3.2 数据处理

本研究将染色占比小于 80% 的区域界定为优先流区,其他区域为基质流区^[6]。为排除边界区域对入渗的影响,选取小区中间作为基质流和优先流的分析区域。

优先流分数 ($PF - fr$)^[25] 采用式(1)计算:

$$PF - fr = 100 \times \left(1 - \frac{\text{UniFr} \times W}{\text{TSA}} \right) \quad (1)$$

其中,UniFr 是均匀入渗深度 (cm),即染色区基质流深度(下文简称基质流深度),按照染色区域覆盖率的值等于 80% 的入渗深度计算; W 是剖面宽度 (cm); TSA 是总的剖面染色面积 (cm^2),在本试验中为最大染色深度对应的剖面面积。

优先流入渗体积^[6] (PIV) 及其对总入渗体积 (TIV) 的贡献分别采用式(2)和(4)计算:

$$\text{PIV} = \sum_{i=0}^{i=ID} V_i - \sum_{j=0}^{j=\text{UniFr}} V_j \quad (2)$$

其中, ID 表示入渗深度 (cm), V_i 、 V_j 表示第 i 、 j 土层的入渗量 (mm)。

$$V = 10 \times \sum_{u=1}^{u=6} (\theta_{tu} - \theta_{iu}) \times d \times V_s / 60 \quad (3)$$

其中, θ_{tu} 是降雨后土壤含水率 (%); θ_{iu} 是初始土壤含水率 (%); u 表示土壤样本序列的宽度,在本试验中为 6; d 表示该层土壤的容重 (g/cm^3); V_s 表示样本土壤体积 (cm^3)

优先流对总入渗的贡献^[6] 计算:

$$\text{优先流对总入渗的贡献}(\%) = \frac{\text{PIV}}{\text{TIV}} \times 100 \quad (4)$$

2 结果与分析

2.1 不同土地利用类型下土壤和根系特征

考虑到不同土地利用类型及黄土区土壤均质的特性,每种类型选取了典型小区进行土壤及根系特性测定

(图2)。土壤初始含水率表现为草地和休耕地>20年刺槐林地>30年刺槐林地。容重表现为草地>休耕地>20年刺槐林地>30年刺槐林地,其中0—30cm土层均呈增大趋势,30—50cm土层逐渐减小并趋于平稳,总孔隙度变化趋势与之相反,0—10cm土层较疏松。饱和导水率表现为20年刺槐林地>30年刺槐林地>草地>休耕地,其中0—10cm土层饱和导水率较大,10cm以下减小并趋于稳定。粒径均表现为砂粒占比最大,占50%—60%,粉粒次之,占40%左右。0—10cm土层,草地和休耕地砂粒含量>刺槐林地,10—100cm土层,刺槐林地>草地和休耕地。

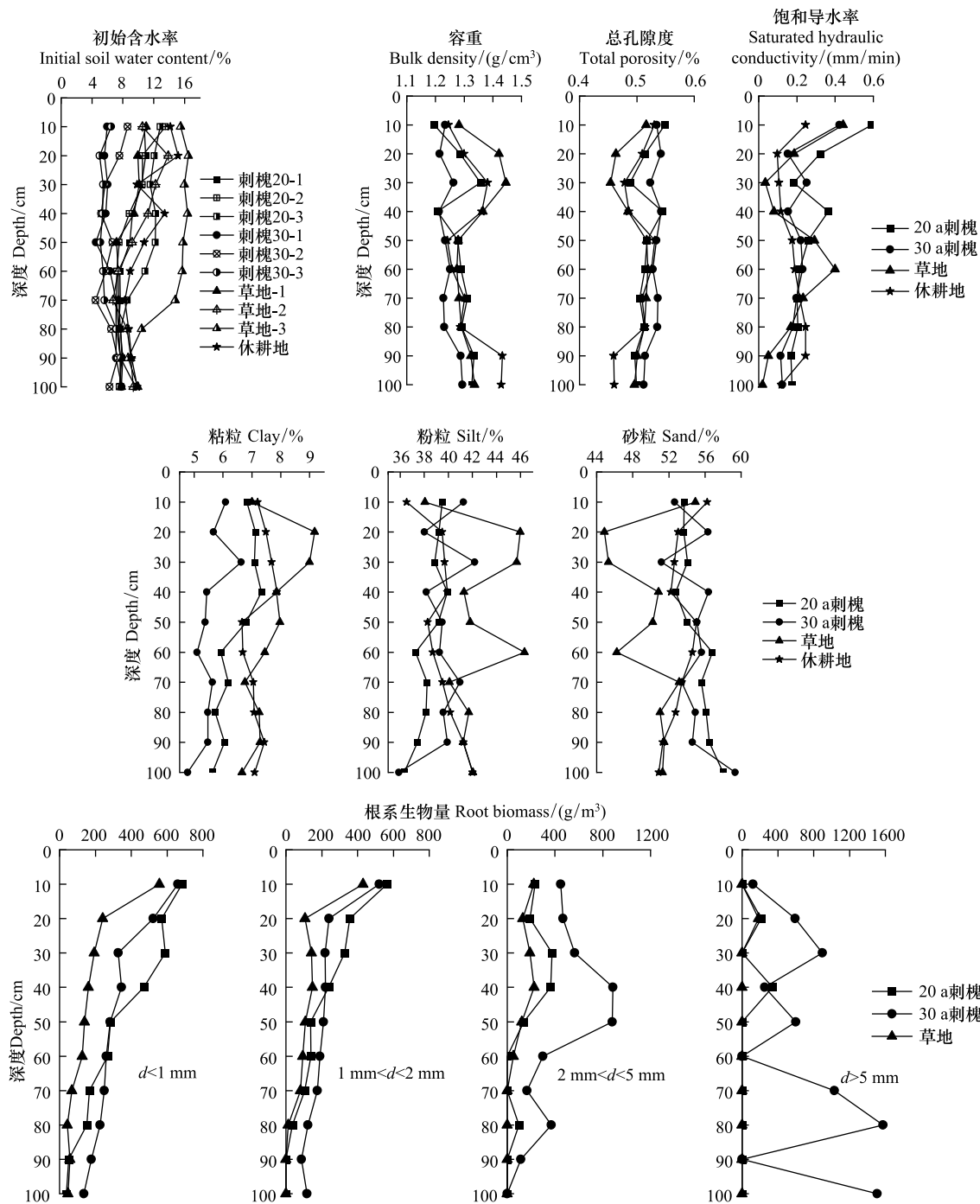


图2 土壤性质及根系分布指标

Fig.2 Soil properties and root distribution indicators

d: 根系生物量径级

4 种用地类型根系分布存在较大差异,休耕地几乎没有根系,根系生物量径级 $d < 1\text{mm}$ 和 $1\text{mm} < d < 2\text{mm}$ 均表现为 20 年刺槐林地 $>$ 30 年刺槐林地 $>$ 草地,径级 $2\text{mm} < d < 5\text{mm}$ 和 $d > 5\text{mm}$ 均表现为 30 年刺槐林地 $>$ 20 年刺槐林地 $>$ 草地;20 年刺槐林地 $< 2\text{mm}$ 细根占比较大,30 年刺槐林地 $> 2\text{mm}$ 粗根占比较大,且 30 年刺槐林地在 50cm 土层以下根系分布比 20 年刺槐林地及草地更为丰富。

2.2 不同土地利用类型下降雨-入渗分析

2.2.1 优先流分布

刺槐林地、草地、休耕地的土壤优先流染色深度具有较大的差异,最大染色深度由深到浅依次为 48cm (20 年刺槐林地)、28cm (30 年刺槐林地)、20cm (草地)、14cm (休耕地) (图 3)。20 年刺槐林地在 0—25cm 土层染色分布均匀,25—48cm 土层出现染色深度不同的分支;30 年刺槐林地在 0—10cm 土层染色分布均匀,10—28cm 土层出现染色深度不同的分支;草地在 0—5cm 土层染色分布均匀,5—20cm 土层出现染色深度不同的分支;而休耕地整体在 0—14cm 范围内都呈现出比较均匀的染色状态。

20 年和 30 年刺槐林地染色比较均匀,说明在刺槐林地垂直方向的大孔隙流入渗占主导,而草地染色不均匀说明多方向的大孔隙流和侧向流所占比例较高,这与 Mei 等^[6] 人的研究相符。对比剖面染色图中染色下边缘线可以看出,休耕地的下边缘线更加平滑,而草地、刺槐林地的下边缘线有多个峰值出现,且林地优先流入渗深度明显大于草地和休耕地,说明根系会产生优先流入渗通道,促进优先流入渗,使其出现峰值,而在没有根系的情况下入渗深度基本一致且比较均匀。

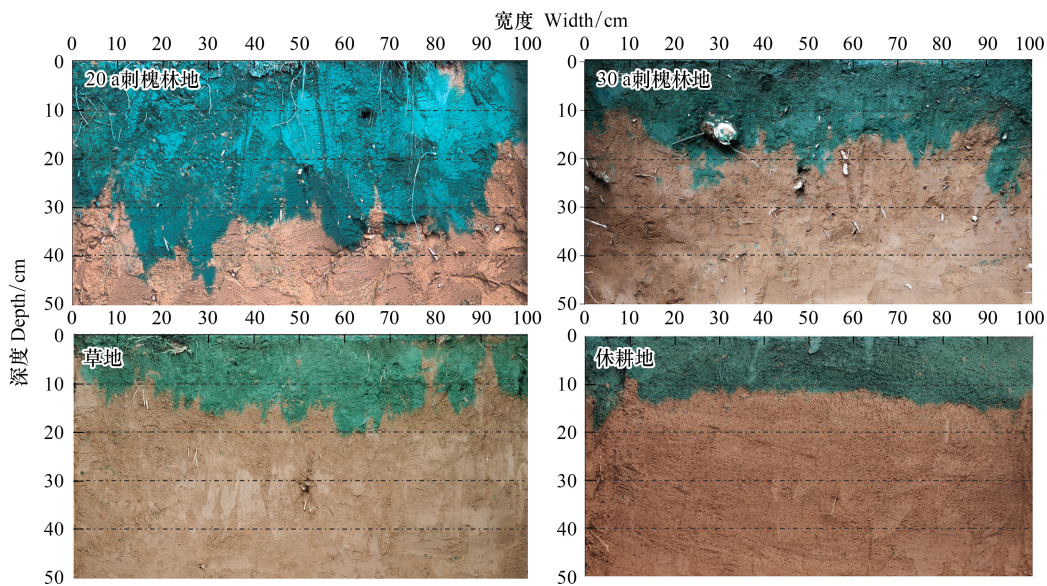


图 3 土壤剖面的染色垂向分布

Fig.3 The vertical distribution of the dyed soil

4 种用地类型染色面积占比均随着土层深度的增加而减小,直至染色最深处减小为 0 (图 4)。对于最大染色深度、基质流深度、染色面积占比和优先流入渗贡献,均表现为 20 年刺槐林地 $>$ 30 年刺槐林地 $>$ 草地 $>$ 休耕地;对于优先流分数和优先流入渗量,表现为 30 年刺槐林地 $>$ 20 年刺槐林地 $>$ 草地 $>$ 休耕地 (表 2)。优先流特征因子整体表现为林地 $>$ 草地 $>$ 休耕地,其可能与林地枯落物分解和根系有关。休耕地优先流程度最小,其土层均质且无根系。而草地的根系主要分布在 0—20cm 土层,故其土壤染色深度较浅,优先流发育不充分。刺槐林地优先流对总入渗量的贡献是草地和休耕地的 2.5—4.5 倍,其中 20 年刺槐林地优先流现象比 30 年刺槐林地更为明显,其原因可能在于前者 $< 2\text{mm}$ 的细根占比更大,而 $> 2\text{mm}$ 的粗根占比略小,研究认为细根对优先流的贡献作用更强^[26—27]。

2.2.2 基质流与优先流对入渗的贡献

4 种样地类型均表现为雨后土壤含水率较雨前发生了明显的增长(图 5)。20 年和 30 年刺槐林地土壤含水率变化较大,累计变化量均值达 68.16%,草地和休耕地的变化较小,累计变化量均值仅有 48.43%。降雨对林地土壤水分的补给效果好于草地和休耕地。

4 种样地类型均整体以均匀的基质流为主,优先流为辅(图 5)。20 年刺槐林地优先流主要集中于 30—40cm 土层,占该层总入渗量的 29.2%;30 年刺槐林地优先流在 10—20cm、20—30cm 两个土层均有一定分布,占比分别为 17.1%和 10.7%;草地和休耕地在 10—20cm 土层出现优先流,占比分别为 17.0%和 7.3%。4 种用地类型降雨入渗主要补给均在 60—70cm 以上土层,20 年和 30 年刺槐林地优先流分布范围及占比均大于草地和休耕地,优先流现象更为明显,与上述对优先流特征因子的计算分析结果相符。整体上基质流占比较高,优先流单层占比均低于 30%,甚至在休耕地低于 10%。因此晋西黄土区的入渗模式以基质流入渗为主,但林地可能会增加优先流的入渗比重。

2.3 不同土地利用类型下土壤水分运动特征

降雨结束 24h 后 20 年刺槐林地 0—50cm 土层土壤含水率在垂向上差异不大,在 20%—24%之间,50cm 土层土壤水分开始发生明显变化,由 20%降至 8%;30 年刺槐林地 0—30cm 土壤含水率在 20%—28%之间,30cm 土层土壤水分开始发生明显变化;草地 0—50cm 土壤含水率在 21%—23%之间,休耕地 0—50cm 土壤含水率在 21%—25%之间,土壤水分发生明显变化的土层均为 50cm(图 6)。

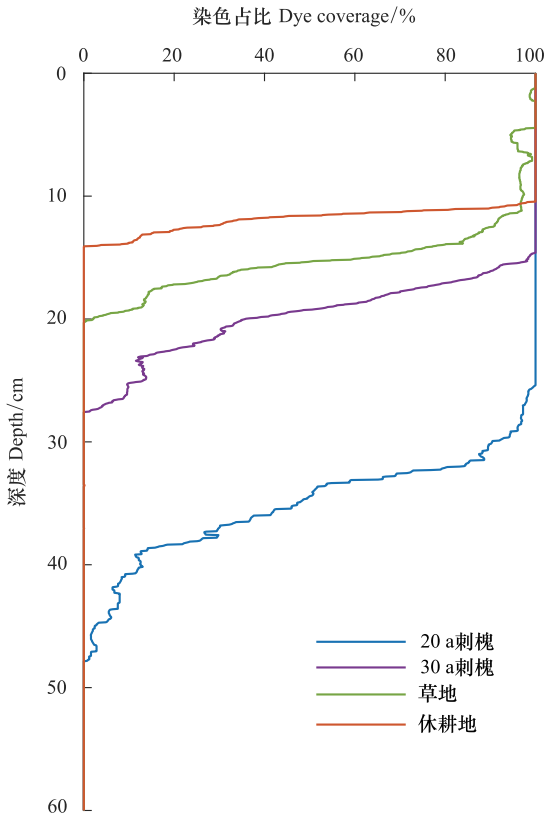


图 4 染色占比随土层深度变化

Fig.4 The variation with soil depth in dye area coverage

表 2 几种土地利用类型的优先流特征参数

Table.2 Preferential flow characteristics for the typical land uses

样地 Sample plot	最大染色深度 Infiltration depth/cm	基质流深度 Uniform infiltration depth/cm	染色面 积占比 Dye coverage/%	优先流分数 Preferential flow fraction/%	优先流 入渗量 Preferential infiltration volume/mm	优先流入 渗贡献 Preferential infiltration contribution/%
20 年刺槐林地 20a <i>Robinia pseudoacacia</i> woodland	47.88	32.08	57.64	10.59	4.44	5.61
30 年刺槐林地 30a <i>Robinia pseudoacacia</i> woodland	27.60	17.05	32.74	13.22	5.38	5.54
草地 Grassland	20.29	13.91	25.3	8.39	1.42	2.22
休耕地 Fallow slopeland	14.12	11.12	19.67	5.8	0.91	1.24

20 年和 30 年刺槐林地土壤水分开始明显变化的土层深度与优先流入渗深度基本一致。说明刺槐林地优先流对水分运移可能具有促进作用,大孔隙优先流入渗对土壤水分条件的改善具有重要意义。这与 Jiang 等^[28]的研究相一致,其认为从剖面土壤水分分布的水分骤变土层能够更准确地反映优先流入渗深度。但在本研究中和草地和休耕地的研究结果与之不符,其水分发生明显变化的土层深度大于优先流入渗深度。这可能

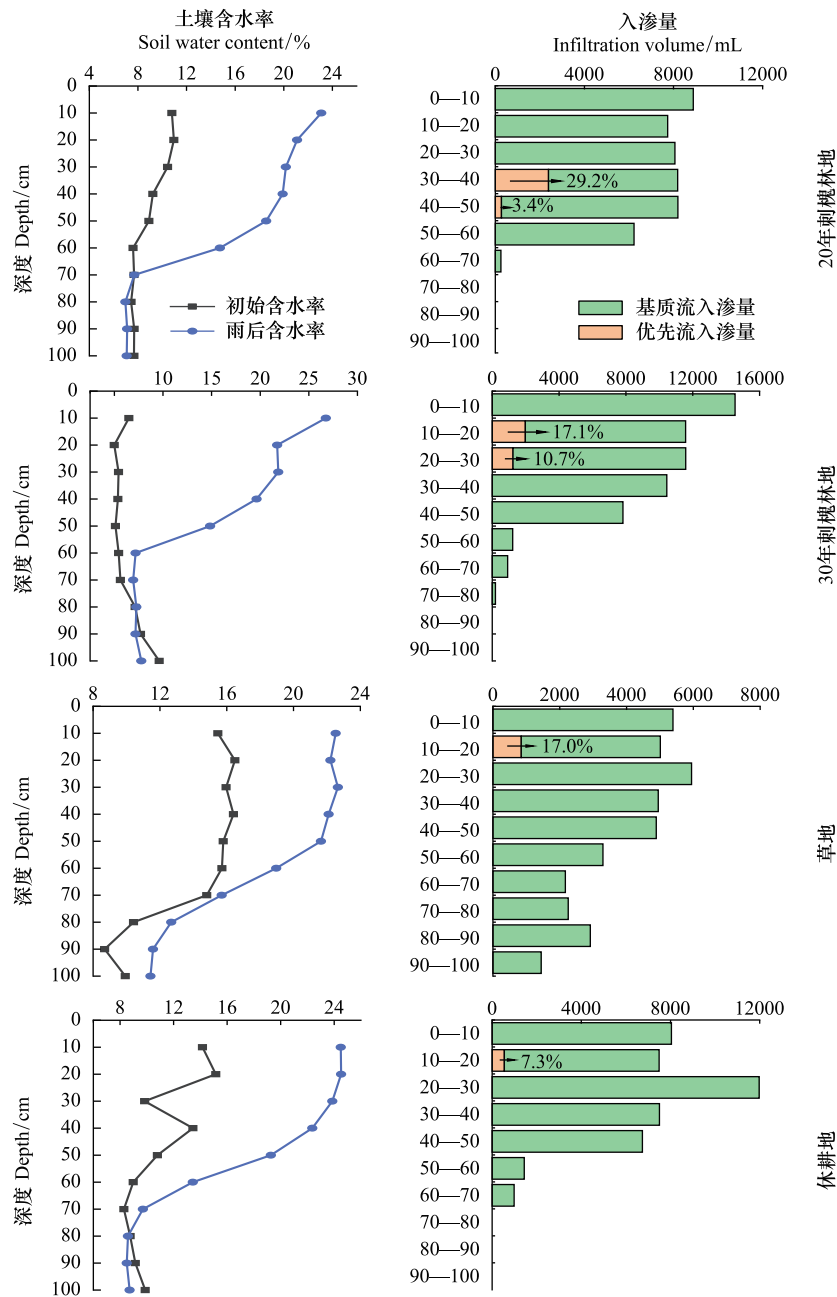


图5 不同土层基质流和优先流入渗贡献

Fig.5 The contributions of matrix and preferential flows to total infiltration amount for different soil layers

是由于该类型小区大孔隙优先流比重很小,难以在剖面水分变化中体现。

20年刺槐林地和休耕地2种典型土壤剖面降雨前后的水分变化情况见图7,第2次降雨对剖面土壤水分的补给比较接近,均集中于0—30cm土层,且土壤含水率的增大幅度接近,说明前期降雨总体上均匀补给地表土壤水分。第3次降雨前后的土壤水分变化说明,后期降雨继续增加下层土壤水分,但刺槐林地土壤水分的补给集中于30—50cm土层,且相对均匀,而休耕地土壤水分增量在30—60cm土层存在明显的空间变异性,且主要补给土层仍在表层。

2.4 不同土地利用类型下降雨-产流过程分析

产流是降雨和入渗过程的表现形式^[1]。在连续3天总降雨量为270mm(次降雨量90mm)条件下,4种样

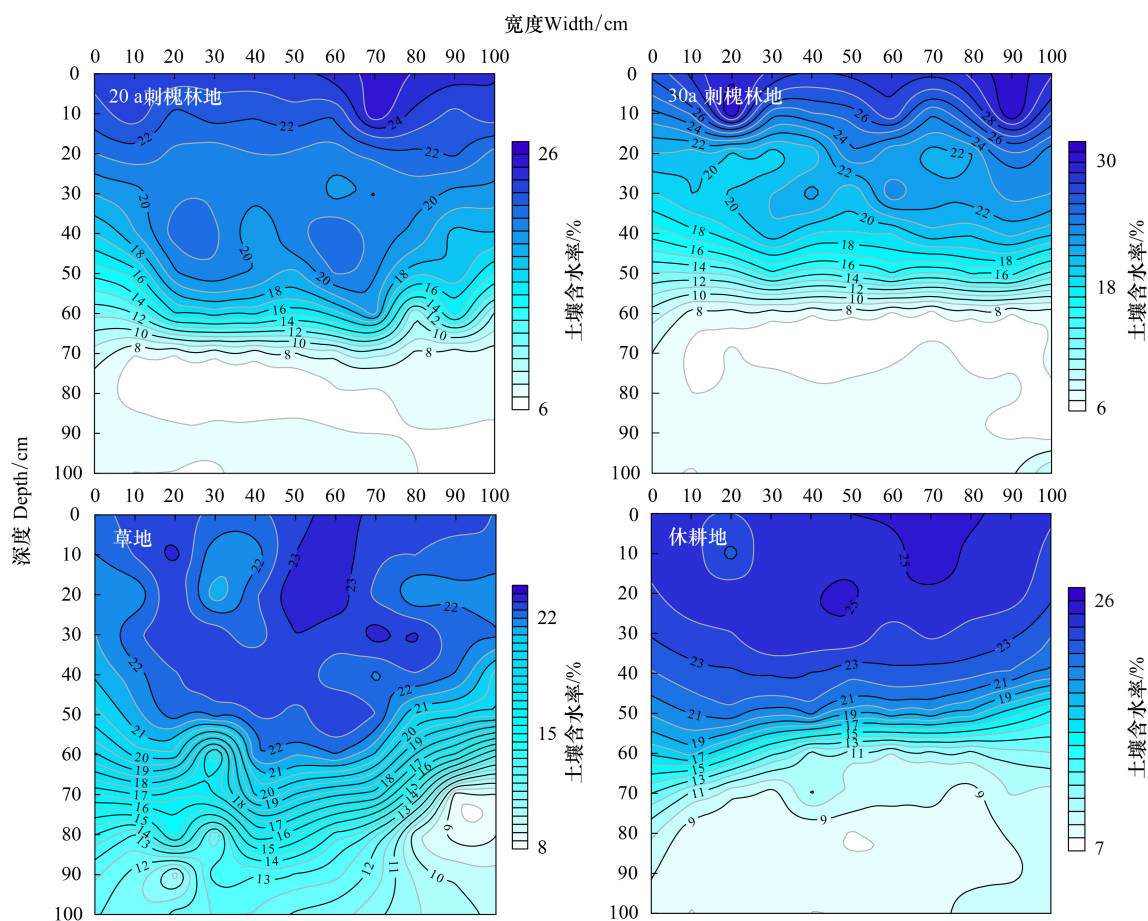


图 6 典型土地利用下降雨结束 24h 剖面土壤水分等值线

Fig.6 The contours of soil moisture at 24 hours after rainfall for the typical land uses

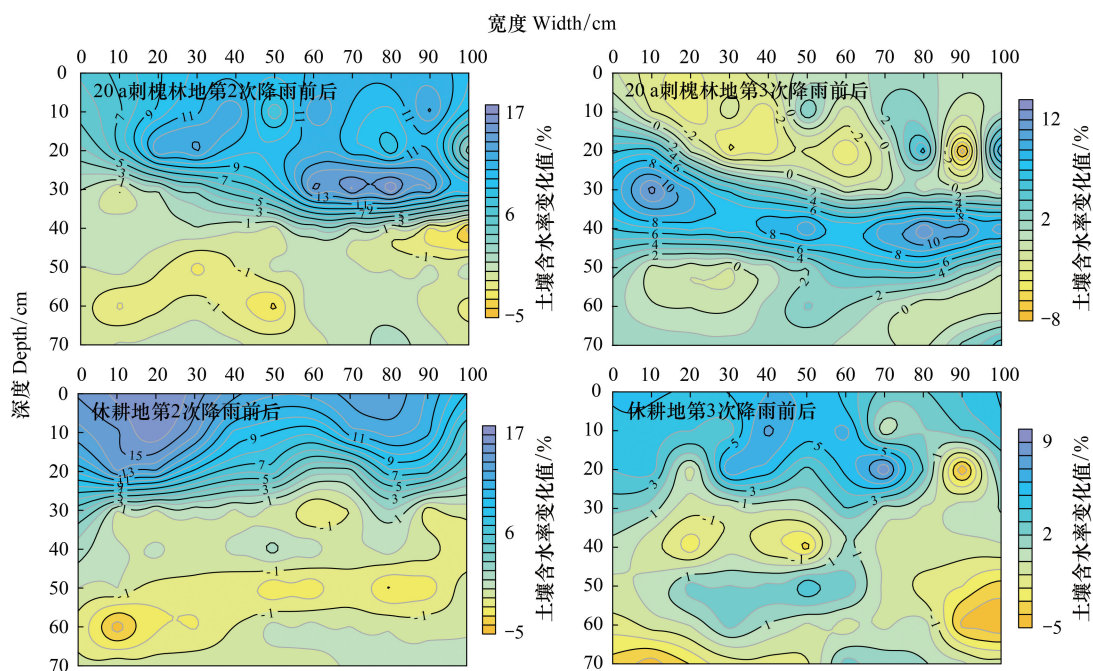


图 7 降雨过程中的土壤水分变化

Fig.7 The dynamics in soil water content among three rainfalls

地均未产生壤中流。初次降雨仅休耕地和 1 个草地小区未产生地表径流,其它小区均有地表径流产生(表 3)。第 2、3 次降雨刺槐林地径流系数总体上小于草地和休耕地。20 年刺槐林地径流系数最小,且径流系数与前期土壤含水率无明显相关关系。而草地和休耕地径流系数随前期土壤含水率的增加而增大。导致 20 年刺槐林地地表径流与前期含水量关系不明显的原因可能是,受到降雨针头堵塞影响,第 2、3 次降雨量可能有所不足,且刺槐林枯落物分解、根系等显著改变了土壤结构,增强了土壤渗透性^[23,29—30]。与 20 年刺槐林地相比,30 年刺槐林地径流系数与前期土壤含水率呈正相关,但相关性较草地和休耕地更弱。随着生长年限的延长,30 年刺槐林地粗根含量增加,而粗根系在一定程度上会破坏孔隙在垂直方向上的连通性,阻碍入渗^[31—32]。休耕地和草地-3 在第 1 次降雨条件下未产流,这可能主要与样地表层土壤(0—10cm)较高的砂粒含量有关,已有研究表明砂粒含量与入渗量呈显著正相关关系^[33]。

表 3 降雨入渗产流情况
Table 3 Rainfall infiltration runoff

样地编号 Sample plot	试验 Experiment	降雨前土壤含水率 Initial soil water content/%	入渗量 Infiltration volume/mm	产流量 Runoff volume/mm	径流系数 Runoff coefficient
20RW-1	1 次降雨,24h	8.84	89.87	0.13	0.001
	2 次降雨,48h	15.81	89.92	0.08	0.001
	3 次降雨,72h	22.78	89.94	0.07	0.001
	小计	—	269.73	0.28	0.001
20RW-2	1 次降雨,24h	8.81	89.83	0.17	0.002
	2 次降雨,48h	15.57	89.88	0.13	0.001
	3 次降雨,72h	22.33	89.90	0.10	0.001
	小计	—	269.61	0.40	0.001
20RW-3	1 次降雨,24h	10.35	89.85	0.16	0.002
	2 次降雨,48h	17.54	89.79	0.22	0.002
	3 次降雨,72h	24.72	89.90	0.10	0.001
	小计	—	269.53	0.47	0.002
30RW-1	1 次降雨,24h	6.34	85.40	4.60	0.051
	2 次降雨,48h	13.58	64.77	25.23	0.280
	3 次降雨,72h	19.07	73.23	16.77	0.186
	小计	—	223.40	46.60	0.173
30RW-2	1 次降雨,24h	6.41	87.12	2.88	0.032
	2 次降雨,48h	13.61	81.34	8.66	0.096
	3 次降雨,72h	20.33	87.44	2.56	0.028
	小计	—	255.90	14.10	0.052
30RW-3	1 次降雨,24h	6.29	89.74	0.26	0.003
	2 次降雨,48h	13.52	88.85	1.15	0.013
	3 次降雨,72h	20.69	87.59	2.41	0.027
	小计	—	266.18	3.82	0.014
GL-1	1 次降雨,24h	8.60	78.92	11.08	0.123
	2 次降雨,48h	14.08	67.82	22.18	0.246
	3 次降雨,72h	18.79	67.48	22.52	0.250
	小计	—	214.22	55.79	0.207
GL-2	1 次降雨,24h	9.82	83.72	6.28	0.070
	2 次降雨,48h	15.93	76.15	13.85	0.154
	3 次降雨,72h	21.49	63.65	26.35	0.293
	小计	—	223.52	46.48	0.172
GL-3	1 次降雨,24h	13.97	90.00	0.00	0.000
	2 次降雨,48h	20.73	87.84	2.16	0.024
	3 次降雨,72h	27.34	82.50	7.50	0.083
	小计	—	260.35	9.65	0.036
FL	1 次降雨,24h	10.84	90.00	0.00	0.000
	2 次降雨,48h	17.66	78.71	11.29	0.125
	3 次降雨,72h	23.62	74.63	15.38	0.171
	小计	—	243.34	26.66	0.099

RW:刺槐林地 *Robinia pseudoacacia* woodland; GL:草地 Grassland; FL:裸地 Fallow slopeland

2.5 根土参数对入渗的影响分析

不同土地利用类型下降雨入渗整体以基质流入渗为主,但入渗量、基质流和优先流分布及贡献存在明显差异,入渗量和优先流发育程度均表现为刺槐林地>草地>休耕地,而 20 年刺槐林地较 30 年刺槐林地入渗能力更强。研究表明,上述差异主要受到土壤性质和根系分布的影响^[13—14,27]。为进一步探讨不同根土参数对入渗的影响,判定促进作用最优的根系径级,针对根系相对密集的 0—50cm 土层,分别计算分层土壤和根系参数与总入渗量、基质流入渗量和优先流入渗量的相关性(表 4)。总体上,土壤初始含水率、粘粒含量与入渗量和基质流入渗量呈显著负相关,土壤容重与优先流入渗量呈显著负相关,总孔隙度与优先流入渗量呈显著正相关。较高的初始含水率、容重和粘粒含量会抑制入渗和优先流的发生,这一结果与 Wu 和 Hardie 等人^[34—35]的研究相符。不同根系径级对入渗的作用存在差异, $d<2\text{mm}$ 的细根对入渗量、基质流量及优先流量均具有明显的促进作用,其中 $d<1\text{mm}$ 时促进作用更强;当 $d>5\text{mm}$ 时根系与入渗量和基质流入渗量呈显著负相关,其原因可能为随着粗根占比的增加,根系会堵塞土壤原有孔隙,尤其横向伸长的根系,破坏孔隙的纵向连通性,从而阻碍入渗^[31—32]。

表 4 入渗特征与土壤根系参数相关系数

Table 4 Correlation coefficients between infiltration characteristic and Soil root parameter

入渗特征 Infiltration characteristic	初始含水率 Initial soil water content	容重 Bulk density	总孔隙度 Total porosity	饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity	粒径 Particle size			根系生物量 Root biomass			
					粘粒 Clay	粉粒 Silt	砂粒 Sand	$d<1$	$1<d<2$	$2<d<5$	$d>5$
入渗量 Infiltration volume	-0.788 **	-0.411	0.411	0.161	-0.592 **	-0.248	0.379	0.712 **	0.609 **	0.482	-0.632 **
基质流入渗量 Uniform infiltration volume	-0.719 **	-0.345	0.345	0.156	-0.582 **	-0.272	0.394	0.706 **	0.642 **	0.482	-0.629 **
优先流入渗量 Preferential infiltration volume	-0.484	-0.618 **	0.618 **	0.456	-0.327	-0.221	0.261	0.876 *	0.836 *	0.609 *	0.455

$d(\text{mm})$:根系径级 Root diameter; *: $P<0.05$; **: $P<0.01$

3 结论

本文针对晋西黄土区蔡家川流域典型下垫面开展模拟降雨试验,观测坡面入渗产流过程,并结合染色示踪和图像处理软件技术,分析土地利用类型对降雨入渗产流模式和优先流分布的影响,得到以下主要结论:

(1) 4 种样地类型均整体以基质流入渗为主,优先流入渗为辅,优先流贡献均不超过 10%。累积入渗量和优先流发育程度均表现为刺槐林地>草地>休耕地,刺槐林地优先流对总入渗的贡献是草地和休耕地的 2.5—4.5 倍。

(2) 4 种用地类型降雨入渗主要补给地表 60—70cm 土层,前期降雨均匀增加表层土壤含水率,而后期降雨补给深层土壤水分的空间变异性显著增强。

(3) 细根对入渗和优先流有一定的促进作用,直径 $d<1\text{mm}$ 时促进作用最强,根系生长到一定径级会阻碍入渗, $d>5\text{mm}$ 的粗根与入渗量和基质流量呈显著负相关。较高的初始含水率、容重和粘粒含量会抑制入渗和优先流的发生。

(4) 刺槐林地产流量及径流系数均显著小于草地和休耕地,且前期含水量对 20 年刺槐林地的影响较小,而显著影响草地和休耕地径流系数。目前晋西黄土区人工林地产流量显著小于草地和休耕地,这可能是造成黄土区河道径流减少的重要原因之一。

致谢:山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站提供试验条件,特此致谢。

参考文献(References):

- [1] Alaoui A, Caduff U, Gerke H H, Weingartner R. Preferential flow effects on infiltration and runoff in grassland and forest soils. *Vadose Zone Journal*, 2011, 10(1): 367-377.
- [2] Wang X P, Li X R, Xiao H L, Berndtsson R, Pan Y X. Effects of surface characteristics on infiltration patterns in an arid shrub desert. *Hydrological Processes*, 2007, 21(1): 72-79.
- [3] Allaire S E, Roulier S, Cessna A J. Quantifying preferential flow in soils: A review of different techniques. *Journal of Hydrology*, 2009, 378(1/2): 179-204.
- [4] Hlaváčiková H, Holko L, Danko M, Novák V. Estimation of macropore flow characteristics in stony soils of a small mountain catchment. *Journal of Hydrology*, 2019, 574: 1176-1187.
- [5] Allaire S E, Van Bochove E, Denault J T, Dadfar H, Thériault G, Charles A, De Jong R. Preferential pathways of phosphorus movement from agricultural land to water bodies in the Canadian Great Lakes basin: A predictive tool. *Canadian Journal of Soil Science*, 2011, 91(3): 361-374.
- [6] Mei X M, Zhu Q K, Ma L, Zhang D, Wang Y, Hao W J. Effect of stand origin and slope position on infiltration pattern and preferential flow on a Loess hillslope. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(5): 1353-1365.
- [7] 许智超, 张岩, 刘宪春, 朱清科. 半干旱黄土区退耕还林十年植被恢复变化分析——以陕西吴起县为例. *生态环境学报*, 2011, 20(1): 91-96.
- [8] 范建忠, 李登科, 董金芳. 陕西省重点生态建设工程区植被恢复状况遥感监测. *农业工程学报*, 2012, 28(7): 228-234.
- [9] Deng L, Yan W M, Zhang Y W, Shangguan Z P. Severe depletion of soil moisture following land-use changes for ecological restoration: Evidence from northern China. *Forest Ecology and Management*, 2016, 366: 1-10.
- [10] Deng L, Shangguan Z P, Li R. Effects of the grain-for-green program on soil erosion in China. *International Journal of Sediment Research*, 2012, 27(1): 120-127.
- [11] 张建军, 纳磊, 张波, 张瑞. 黄土高原小流域水土保持林空间配置对场降雨径流影响的模拟. *中国水土保持科学*, 2009, 7(6): 26-31.
- [12] 刘晓燕, 杨胜天, 李晓宇, 周旭, 罗娅, 党素珍. 黄河主要来沙区林草植被变化及对产流产沙的影响机制. *中国科学: 技术科学*, 2015, 45(10): 1052-1059.
- [13] Chu L, Sun T C, Wang T W, Li Z X, Cai C F. Temporal and spatial heterogeneity of soil erosion and a quantitative analysis of its determinants in the three gorges reservoir Area, China. *International Journal of Environmental Research and Health*, 2020, 17(22): 8486.
- [14] Litt G F, Ogden F L, Mojica A, Hendrickx J M H, Kempema E W, Gardner C B, Bretfeld M, Regina J A, Harrison J B J, Cheng Y Y, Lyons W B. Land cover effects on soil infiltration capacity measured using plot scale rainfall simulation in steep tropical lowlands of central Panama. *Hydrological Processes*, 2020, 34(4): 878-897.
- [15] 李兆松, 王兵, 李盼盼, 王忠禹, 汪建芳. 氮添加条件下白羊草种群及近地表生物结皮对土壤入渗性能的影响. *山地学报*, 2018, 36(3): 354-363.
- [16] 赵珩钰, 曹斌挺, 焦菊英. 黄土丘陵沟壑区退耕坡地不同植物群落的土壤侵蚀特征. *中国水土保持科学*, 2017, 15(3): 105-113.
- [17] 刘畅, 张建军, 张海博, 刘俊廷, 高思远, 胡亚伟, 施政乐, 徐勤涛. 晋西黄土区退耕还林后土壤入渗特征及土壤质量评价. *水土保持学报*, 2021, 35(5): 101-107.
- [18] Cheng J H, Zhang H J, Wang W, Zhang Y Y, Chen Y Z. Changes in preferential flow path distribution and its affecting factors in Southwest China. *Soil Science*, 2011, 176(12): 652-660.
- [19] Liu M X, Du W Z, Zhang H L. Changes of preferential flow path on different altitudinal zones in the Three Gorges Reservoir Area, China. *Canadian Journal of Soil Science*, 2014, 94(2): 177-188.
- [20] 肖自幸, 朱蔚利, 牛健植, 邵文伟, 张由松. 鹞峰国家森林公园不同林分下土壤优先流现象研究. *湖南农业科学*, 2011(17): 118-121.
- [21] 李振东, 朱彦光, 陈晓冰, 甘磊, 张宗急, 方荣杰, 程芳丽. 桂北岩溶区典型农地土壤优先流特征. *水土保持研究*, 2019, 26(5): 68-74, 80-80.
- [22] 赵思远, 苏辉东, 贾仰文, 龚家国, 牛存稳, 甘永德, 赵翠平. 北方土石山区典型坡面优先流特征研究. *水土保持学报*, 2018, 32(6): 9-15.

- [23] 刘凯, 王磊, 宋乃平, 杨新国, 陈林. 毛乌素沙地南缘不同林龄人工柠条林土壤渗透性研究. 干旱区资源与环境, 2013, 27(5): 89-94.
- [24] 马昀, 孟晨, 岳健敏, 宋乃平, 谢莉, 杜灵通. 宁夏荒漠草原不同林龄人工柠条林地土壤优先流研究. 生态学报, 2022, 42(3): 895-903.
- [25] Van Schaik N L M B. Spatial variability of infiltration patterns related to site characteristics in a semi-arid watershed. Catena, 2009, 78(1): 36-47.
- [26] Li X Y, Yang Z P, Li Y T, Lin H. Connecting ecohydrology and hydropedology in desert shrubs: stemflow as a source of preferential flow in soils. Hydrology and Earth System Sciences, 2009, 13(7): 1133-1144.
- [27] Zhang Y H, Niu J Z, Yu X X, Zhu W L, Du X Q. Effects of fine root length density and root biomass on soil preferential flow in forest ecosystems. Forest Systems, 2015, 24(1): e012.
- [28] Jiang X J, Liu X E, Wang E H, Li X G, Sun R, Shi W J. Effects of tillage pan on soil water distribution in alfalfa-corn crop rotation systems using a dye tracer and geostatistical methods. Soil and Tillage Research, 2015, 150: 68-77.
- [29] 李义豪, 李传哲, 穆文彬, 刘佳, 严登华. 不同坡度和前期土壤含水率下裸地和草地的降雨产流试验分析. 科学技术与工程, 2017, 17(14): 45-53.
- [30] 刘定辉, 李勇. 植物根系提高土壤抗侵蚀性机理研究. 水土保持学报, 2003, 17(3): 34-37, 117-117.
- [31] 曹丹妮, 邸涵悦, 郭忠录, 马美景. 演替梯度下土壤优先流特征及影响因素. 水土保持研究, 2021, 28(2): 99-107.
- [32] Luo Z T, Niu J Z, Xie B Y, Zhang L, Chen X W, Berndtsson R, Du J, Ao J K, Yang L, Zhu S Y. Influence of root distribution on preferential flow in deciduous and coniferous forest soils. Forests, 2019, 10(11): 986.
- [33] 程竞萱, 程金花, 郑欣, 张勇刚. 不同植被覆盖下土壤优先流特征及影响因素. 河南农业大学学报, 2018, 52(6): 973-982.
- [34] Wu Q H, Liu C L, Lin W J, Zhang M, Wang G L, Zhang F W. Quantifying the preferential flow by dye tracer in the North China Plain. Journal of Earth Science, 2015, 26(3): 135-444.
- [35] Hardie M A, Cotching W E, Doyle R B, Holz G, Lisson S, Mattern K. Effect of antecedent soil moisture on preferential flow in a texture-contrast soil. Journal of Hydrology, 2011, 398(3/4): 191-201.