

不同降雨历时下采煤塌陷区土壤优先流特征

郭巧玲^{1,2}, 胡骞¹, 代彬¹, 袁毅哲¹, 彭子康¹

(1. 东华理工大学水资源与环境工程学院, 南昌 330013; 2. 地下水污染成因与修复江西省重点实验室, 南昌 330013)

摘要: [目的] 为研究采煤塌陷区裂缝引发的优先流特征, 为科学合理地开展矿区水资源管理及生态治理实践工作提供支撑。[方法] 在神府-东胜煤田采煤塌陷区选取 3 条同一宽度 (3 cm) 的裂缝, 开展相同降雨强度、不同降雨历时的染色示踪试验。采用 Adobe Photoshop 2020、Image Pro Plus 6.0、SketchUp Pro 2019、Auto CAD 2019 等处理软件, 分析不同降雨历时下的裂缝优先流特征。[结果] 1) 神府-东胜采煤塌陷区优先流发生区域的土壤水分体积分数、孔隙度、饱和导水率大于非优先流区域, 体积质量和田间持水量小于非优先流区域; 2) 降雨历时分别为 10、20、30 min 时, 相应的基质流深度分别为 5、8、10 cm; 优先流发育深度分别为 26.4、47.7、44.3 cm。降雨历时越长, 基质流和优先流发育越深; 3) 各试验点染色面积比均随着土层深度增加呈减小趋势, 形态上表现为 S 形状。当降雨历时较短时, 染色面积比随着土层深度变化的幅度较小; 当降雨历时较长时, 染色面积比曲线波动增大。4) 总体上, 随着土层深度增加, 宽染色路径的数量在减少, 细小染色路径数量增加, 染色路径总数呈先增加后减小趋势。且降雨历时越长, 相同深度处土壤染色路径越宽, 宽路径数量越多。[结论] 研究成果可为煤炭矿区土地复垦和生态治理提供科学依据。

关键词: 采煤塌陷区; 染色示踪; 不同降雨历时; 优先流; 神府-东胜煤田

中图分类号: X132

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2025)01-0130-11

Soil Preferential Flow Characteristics in Coal Mine Subsidence Area under Different Rainfall Duration

GUO Qiaoling^{1,2}, HU Qian¹, DAI Bin¹, YUAN Yizhe¹, PENG Zikang¹

(1. School of Water Resources and Environmental Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;

2. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Genesis and Remediation of Groundwater Pollution, Nanchang 330013, China)

Abstract: [Objective] Research on the preferential flow characteristics triggered by cracks in coal mining subsidence areas can provide support for scientific and rational development of water resource management and ecological management practice in the mining area. [Methods] Three cracks of the same width (3 cm) were selected in the coal mining subsidence area of Shenfu-Dongsheng Coal Field to carry out the staining tracer test under the same rainfall intensity and different rainfall durations. Processing software such as Adobe Photoshop 2020, Image Pro Plus 6.0, SketchUp Pro 2019, and Auto CAD 2019 were used to analyze the preferential flow characteristics of cracks under different rainfall durations. [Results] 1) Soil volumetric water content, porosity, and saturated hydraulic conductivity in the preferential flow occurrence area of the Shenfu-Dongsheng coal mining subsidence area were greater than those in the non-preferential flow area, and the volumetric weight and field water-holding capacity were less than those in the non-preferential flow area zone. 2) When the rainfall duration was 10, 20 and 30 min, the corresponding depths of substrate flow were 5, 8 and 10 cm, respectively, while the depths of preferential flow were 26.4, 47.7 and 44.3 cm, respectively. The longer the rainfall duration, the deeper the development of substrate and preferential flow. 3) The

收稿日期: 2024-08-04

修回日期: 2024-09-03

录用日期: 2024-10-11

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-12-25

资助项目: 国家自然科学基金项目 (42162021); 东华理工大学博士基金项目 (DHBK2019093); 江西省水利科技重点项目 (202325ZDKT01); 南昌市水文地质与优质地下水资源开发利用重点实验室开放基金项目 (20242C21)

第一作者: 郭巧玲 (1978—), 女, 教授, 博士 (后), 主要从事水文与水资源研究。E-mail: yys7401@163.com

通信作者: 郭巧玲 (1978—), 女, 教授, 博士 (后), 主要从事水文与水资源研究。E-mail: yys7401@163.com

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

staining area ratio at each test site showed a decreasing trend with the increase of soil depth, and the morphology showed an S shape. When the rainfall duration was short, the magnitude of change in the coloring area ratio with soil depth was small; when the rainfall duration was long, the fluctuation of the coloring area ratio curve increased. 4) In general, with the increase of soil depth, the number of wide staining paths decreased, the number of fine staining paths increased, and the total number of staining paths showed a tendency of increasing first and then decreasing. The longer the rainfall duration, the wider the soil staining paths at the same depth was, and there were more wide paths. [Conclusion] The findings can provide a scientific basis for land reclamation and ecological management in coal mining areas.

Keywords: coal mining subsidence area; dyeing tracing; different rainfall duration; preferential flow; Shenfu-Dongsheng Coal field

Received: 2024-08-04

Revised: 2024-09-03

Accepted: 2024-10-11

Online(www.cnki.net): 2024-12-25

优先流是沿土壤中的某些优先路径通道绕过大部分的土壤基质流向深层地下水的非均匀流^[1]。优先流的存在影响水分在各层之间的转移,缩短水分和养分在土壤中的滞留时间。土壤优先流可通过影响入渗过程,减少径流和土壤侵蚀,使其能够快速运移至土壤深层,既减少土壤对水分和养分的吸收利用^[2],还造成地下水资源的污染^[3]。优先流的存在也是引发泥石流、山体滑坡等地质问题的主要因素^[4-5]。煤炭在我国一次性能源的生产和消耗中占70%以上。煤炭开采对人类生存环境产生一系列消极影响。其中,较明显的是采煤土地塌陷问题。据统计^[6]表明,我国每采1万t煤,平均造成的土地塌陷面积为0.002 km²。塌陷区出现的大量地裂缝是衍生地质灾害最直观的原因之一^[7]。塌陷区裂缝的出现为土壤水分运动提供优先通道,改变地表径流、降水入渗和地下水径流,使得矿区水文过程发生改变,进而引起地下水位下降、泉水和河流干枯、地下水体污染、水土流失等问题^[8]。

优先流研究涉及农田生态系统、湿地生态系统、草原生态系统、森林生态系统、农林牧复合生态系统等^[9]。研究的地貌类型涉及山地^[10]、喀斯特岩溶地^[11]、荒漠绿洲湿地^[12]、黄土丘陵等^[13]多种地貌。依据优先流的形成原因,可将其分为自然环境作用下的优先流和人为作用下的优先流2大类。自然环境作用下的优先流包括土壤干裂龟裂、植物生长腐烂、穴居动物活动、地下水潜蚀作用、岩溶塌陷、地面沉降等裂缝、裂隙形成的优先流^[14];人类作用下的优先流主要为大面积地下和露天采矿引起的塌陷裂缝、裂隙,路堑边坡等基坑工程导致的边坡裂缝、裂隙,地下水和油气抽采引发的裂缝、裂隙等产生的优先流^[15]。目前,优先流的研究成果主要集中在自然环境作用下形成的裂隙、裂缝等产生的优先流,如孟晨等^[16]开展的土壤孔隙三维空间网络结构对优先流的影响;刘伟平等^[17]对花岗岩残积土裂隙优先流的研究;余海龙等^[18]对灌丛植物

根区优先流的研究;李志成等^[19]对干热河谷林草地土壤优先流特征的研究;张勇勇等^[20]对荒漠绿洲植物根系优先流的研究;朱磊等^[21]对农田干缩土壤裂隙优先流的研究;盛丰等^[22]对再生水灌溉条件下农田土壤优先流演化过程研究;蒙仲举^[23]对荒漠草原微斑块发育与土壤优先流响应的研究。人为作用下形成的土壤裂隙、裂缝的特征和规模与自然作用下的完全不同,其引发的优先流也不同,且人为作用下的优先流引发的环境效应远大于自然条件下形成的土壤优先流,但相关研究较少。关于采煤塌陷区裂缝产生的优先流研究成果更少,陈建平等^[24]在淮河冲积平原煤矿塌陷区,用高密度电法模拟采煤塌陷区优先流路径的形成过程;郭巧玲等^[25]初步分析了神府-东胜煤田塌陷区优先流特征。优先流的形成受到多种因素的影响,然而人为作用下的裂缝、裂隙形成的优先流与影响因素的关系鲜见报道。基于此,本文以神府-东胜煤田塌陷区为研究对象,系统分析降雨历时对采煤塌陷区裂缝优先流的影响,以期为我国煤矿塌陷区土地复垦和生态环境治理修复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

野外试验在神府-东胜煤田某煤矿塌陷区开展。该煤矿始建于1986年12月,2003年11月建成投产。经过多年的煤矿开采,形成大面积的采煤塌陷区。井田范围南北长约9.3 km,东西宽约14.1 km,面积为64.209 6 km²。矿区气候变化较为明显,冬寒时间长,夏热时间短,秋季凉爽多雨,春季风沙较大。年降雨量少,蒸发量大,霜冻期较长。属干燥的半沙漠高原大陆性气候。夏季最高气温达36.6℃,冬季最低气温为-27.9℃。降雨多集中在6—8月。地貌主要呈流水冲蚀特征,沿乌兰木伦河两岸分布着丰富的支沟,形成树枝状的地形网络。地形起伏大,复杂

多变,沟谷纵横交错^[26]。矿区煤矿埋藏较浅,易开采,是我国优质煤的重要基地。

1.2 野外染色试验

在神府-东胜煤田某煤矿采煤塌陷稳定区选择 50 m×50 m 的试验样地。样地内分布的植物有狗牙根、梭梭柴,且有较多的塌陷裂缝及塌陷洞。在样地内众多裂缝中,选择 3 条宽度均为 3 cm 的裂缝,每个试验点对应 1 条裂缝且裂缝所在地表无植被,裂缝间的间距>10 m,相互不产生影响。试验于 2023 年 7 月 13~25 日进行,选择 5 g/L 的亮蓝溶液作为染色示踪剂。分别标注各试验点为试验点 1、试验点 2、试验点 3。结合当地降雨特征,模拟暴雨情景 125 mm/h 连续降雨 10、20、30 min 的情形。具体试验设计见表 1。

试验开始前,将边长 60 cm×60 cm、高 30 cm 的

铝框夯入土壤中 20 cm,对铝框边缘内外土壤进行压实,避免由于铝框边缘土质疏松导致亮蓝溶液向外渗漏^[27]。将亮蓝溶液用喷壶缓慢均匀喷洒,喷洒完毕后取保鲜膜覆盖铝框,以防外界条件干扰^[28]。待静置 24 h 后,以 10 cm 为 1 层开挖水平剖面。开挖剖面时,沿垂直裂缝走向将水平剖面分为 6 段,形成 6 个垂直剖面,依次为 A 剖面、B 剖面、C 剖面、D 剖面、E 剖面、F 剖面。0~10 cm 土层 6 个纵剖面开挖完毕,进行 10 cm 深度横剖面整平并拍照。交替进行各层纵剖面 and 横剖面开挖、拍照。剖面挖取要尽量平整光滑,防止粗糙面产生阴影而影响染色面积的计算,垂直剖面的挖取要与水平面垂直,防止图像发生变形。开挖时拍照相机镜头垂直正对剖面中心,防止图像发生变形(图 1)。

表 1 不同降雨历时下的试验设计

Table 1 Test design under different rainfall durations

试验点号	控制条件	裂缝宽度/cm	亮蓝溶液量/L	试验方案
1	同一宽度裂缝和土壤初始含水量条件下,不同降雨历时	3	7.5	以 125 mm/h 降雨强度连续降雨 10 min
2			15.0	以 125 mm/h 降雨强度连续降雨 20 min
3			22.5	以 125 mm/h 降雨强度连续降雨 30 min

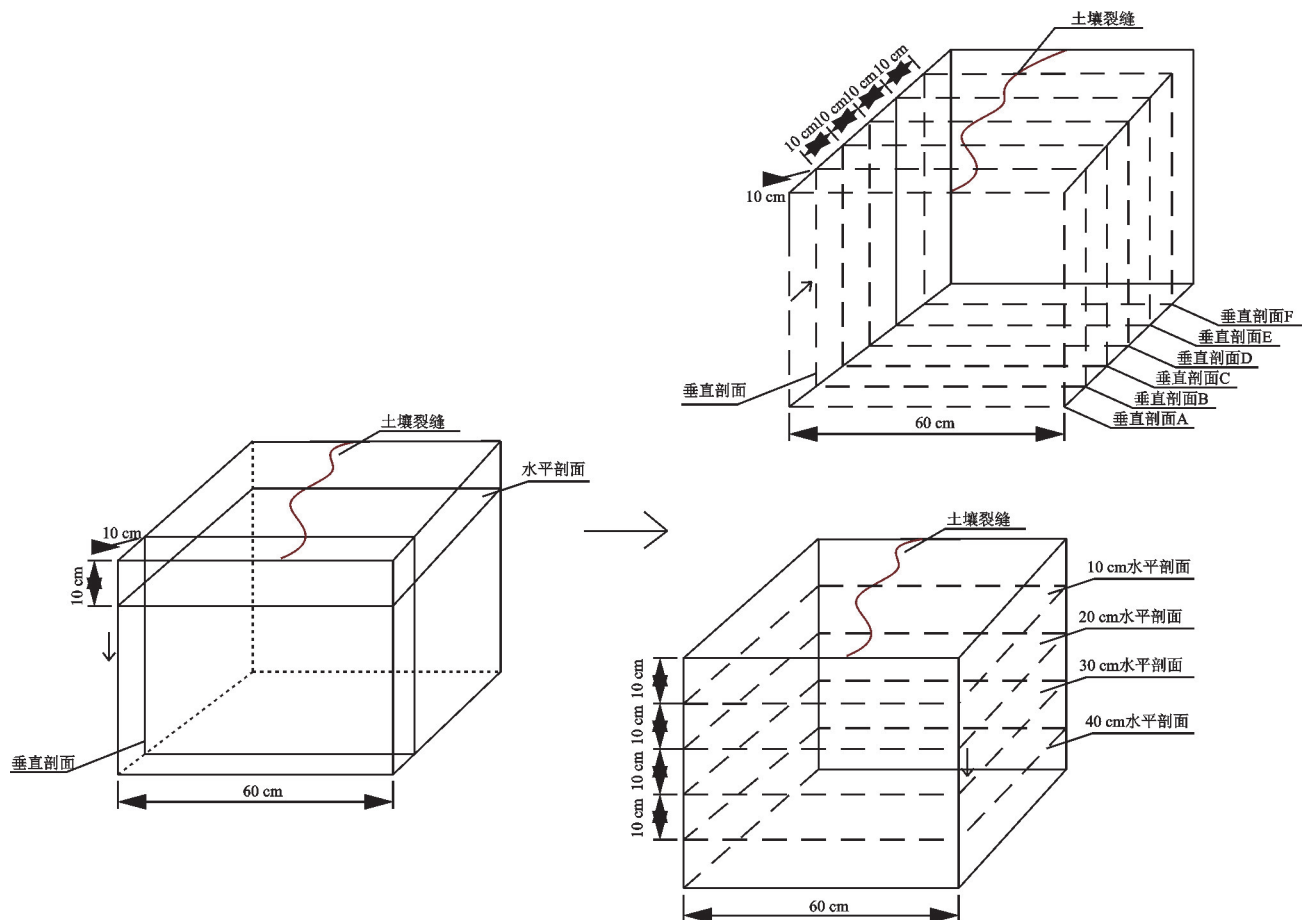


图 1 剖面开挖示意

Fig.1 Schematic diagram of the section excavation

1.3 染色图像处理

垂直剖面按 0~10、10~20、20~30、30~40、40~

50、50~60 cm 等依次分层开挖,因此,需要对同一位置不同深度的图像进行拼接。开挖剖面图通过 Adobe

Photoshop 2020 和 Image Pro Plus 6.0 软件进行处理。利用 Adobe Photoshop 2020 对图片进行校正-剪裁-调整;使用 Image Pro Plus 6.0 对图片进行二值化处理^[29]。拍摄染色剖面时,由于人为因素、光照条件或相机本身等因素可能导致图像出现一定程度的误差,利用 Adobe Photoshop 2020 几何校正功能对图片进行校正,竖直方向根据各个试验点的染色深度进行裁剪^[30]。利用图像调整和 Camera Raw 功能调节对比度、色阶、亮度、饱和度和阴影等。打开要进行处理的真彩色图像,染色部分为蓝色或浅蓝色。通过选择图像-调节-替换颜色,并在替换颜色窗口中,选择具有代表性的染色部分,同时,把明度调至 100,调节颜色容差为 68,饱和度和色相为 0,进行颜色替换。替换后的颜色,染色部分为白色,土壤仍为原来的颜色。选择图像-模式-灰度,就可进行灰阶图像转换。在灰阶图像中,染色部分呈白色或灰白色,土壤呈灰色或黑色。选择图像-调整-阈值。用目测法调节阈值,即一边调节阈值,一边观察图像中染色图形的变化,直到染色部分面积与实际染色部分基本一致为止^[31]。通过调整使图像完全还原实际情形,并将染色部分定义为黑色,未染色部分定义为白色。将处理后的黑白 GIF 格式图片导入 Image Pro Plus 6.0 软件对处理后的染色图像进行黑白像素统计,最终得到 1 个仅含有 255(黑色像素)和 0(白色像素)数值的数据库^[32]。染色路径数量即为黑色像素数量,染色路径宽度即为黑色像素占比实际剖面宽度的乘积,染色面积比为土层中黑色像素数量与图像总像素数的比值,表达式为:

$$D_c = \frac{D}{D + N_D} \times 100\% \quad (1)$$

式中: D_c 为土壤剖面染色面积比,%; D 为土壤剖面总染

色面积, cm^2 ; N_D 为土壤剖面未染色面积, cm^2 。

1.4 土壤物理和水分特性

剖面开挖时,以 10 cm 为 1 层,每层分别使用 100 cm^3 的标准环刀采集染色区和非染色区土样,直到剖面染色消失。将土样编号并密封带回实验室进行土壤水分、密度、比重、体积质量、孔隙度、田间持水量、饱和导水率及机械组成等测定。土壤体积质量采用环刀法测定;土壤机械组成先进行筛分,再用激光粒度分析仪测定;土壤水分体积分数采用烘干法测定;土壤密度采用称量法测量;土壤饱和导水率和田间持水量分别采用定水头渗透仪法和威尔特克斯法测定。

2 结果与分析

2.1 土壤物理和水分特性

采煤塌陷区试验点 1、试验点 2 和试验点 3 的土壤机械组成、孔隙度、体积质量、水分体积分数、饱和导水率和田间持水量的分析结果见表 2。由于各试验点土壤物理和水分特性测试取样最深剖面为优先流到达的最深位置,试验点 1、试验点 2 和试验点 3 的染色深度分别在地面以下 26.4、47.7、44.3 cm,对应的 3 个试验点取样深度分别为地面以下 20、40、40 cm。整体上,3 个试验点同一深度处染色区域土壤的水分体积分数、孔隙度、饱和导水率大于非染色区,体积质量和田间持水量小于非染色区。3 个试验点染色区水分质量分数从表层向深层,整体上呈增加趋势,说明优先路径的存在,使水分快速运移至土壤深处,且降雨历时越长的试验点,相同深度处土壤水分体积分数要更高。3 个试验点土壤的机械组成主要以 1~0.05 mm 的砂粒为主。3 个试验点染色区的土壤随土层深度增加,体积质量增加,孔隙度减小,是由于地表裂缝随着土层深度增加,形态发生一定的变化,通常随着土层深度增加,裂缝宽度逐渐变小。

表 2 各试验点土壤物理和水分特性

Table 2 Soil physical and moisture characteristics of each test site

试验 点号	土层 深度/cm	水分体积分数/%		体积质量/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)		孔隙度/%		田间持水量/%		饱和导水率/ ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)		机械组成 >0.05 mm/%	
		SA	UA	SA	UA	SA	UA	SA	UA	SA	UA	SA	UA
1	0~10	4.54	1.12	0.81	1.05	69.01	60.86	14.55	15.84	0.008	0.005	92.64	91.06
	10~20	5.61	1.34	0.87	1.07	66.57	59.68	12.57	13.45	0.006	0.003	90.32	91.78
2	0~10	5.06	1.32	0.88	1.20	66.43	54.11	13.80	14.12	0.006	0.003	93.22	90.72
	10~20	6.57	2.59	0.98	0.91	65.63	61.21	10.41	10.60	0.005	0.002	89.66	87.45
	20~30	7.23	5.64	1.04	1.04	62.59	60.44	9.48	9.18	0.005	0.002	90.47	89.72
	30~40	9.38	7.73	1.37	1.33	58.33	59.51	6.83	7.54	0.004	0.002	88.96	89.67
3	0~10	5.69	1.83	0.79	1.05	65.95	60.77	6.62	10.58	0.006	0.004	91.05	90.35
	10~20	7.23	3.41	0.87	1.06	64.67	61.21	6.29	9.72	0.005	0.002	91.68	89.88
	20~30	8.89	6.09	1.00	1.06	62.25	59.16	5.92	6.84	0.005	0.002	88.24	93.45
	30~40	9.88	8.02	1.11	1.09	57.96	58.55	5.71	7.07	0.006	0.002	95.01	91.07

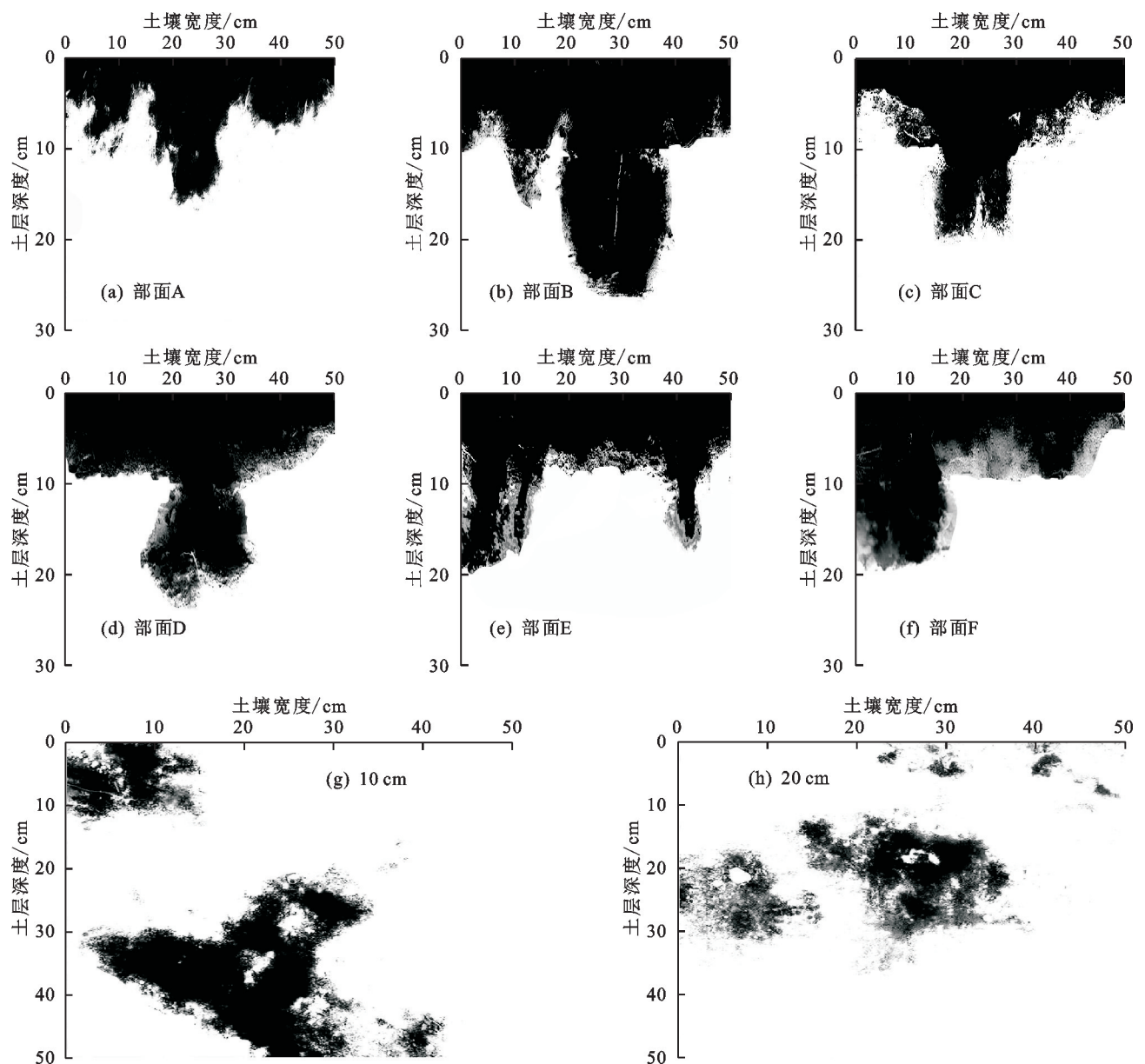
注:SA 为染色区;UA 为非染色区。

2.2 优先流分布及染色面积

2.2.1 垂直剖面优先流形态 染色剖面的黑白二值图像能直接反映土壤的染色形态特征,通过 Adobe Photoshop 2020、Image Pro Plus 6.0、SketchUp Pro 2019、Auto CAD 2019 等软件对野外染色示踪试验垂直剖面

和水平剖面图像进行处理。采煤塌陷区土壤水下渗过程出现明显的优先流现象。试验点 1(图 2)、试验点 2(图 3)和试验点 3(图 4)的染色深度分别在地面以下 26.4、47.7、44.3 cm。试验点 1 在地面以下 0~5 cm 土层,土壤水主要以基质流的形式存在,5 cm 以下出现优先流,优先流运移最深到达地面以下 26.4 cm,出现在 B 剖面。试验点 2 基质流与优先流的分界点在地面以下 8 cm 处,优先流运移最深到达地面以下 47.7 cm,出现

在 E 剖面。试验点 3 的基质流在地面以下 0~10 cm 土层,10 cm 以下出现优先流,优先流运移最深到达地面以下 44.3 cm 土层,出现在 D 剖面。试验点 2 染色深度高于试验点 3,是因为尽管 2 个试验点裂缝宽度一致,但在实际挖取剖面时,试验点 2 的裂缝深 32 cm,试验点 3 的裂缝深 22 cm,裂缝深度的不同对优先流产生一定的影响,裂缝深度越深,优先流运移越深。同一深度土壤剖面,降雨历时越长,染色越充分,即优先流现象越明显。降雨历时越短的土壤剖面,亮蓝染色剂所覆盖的优先路径更为细小,且深度更浅。相同雨强相同裂缝宽度条件下,降雨历时越长,基质流运移深度越深,土壤优先流的发育程度越明显,优先流运移的深度越深。



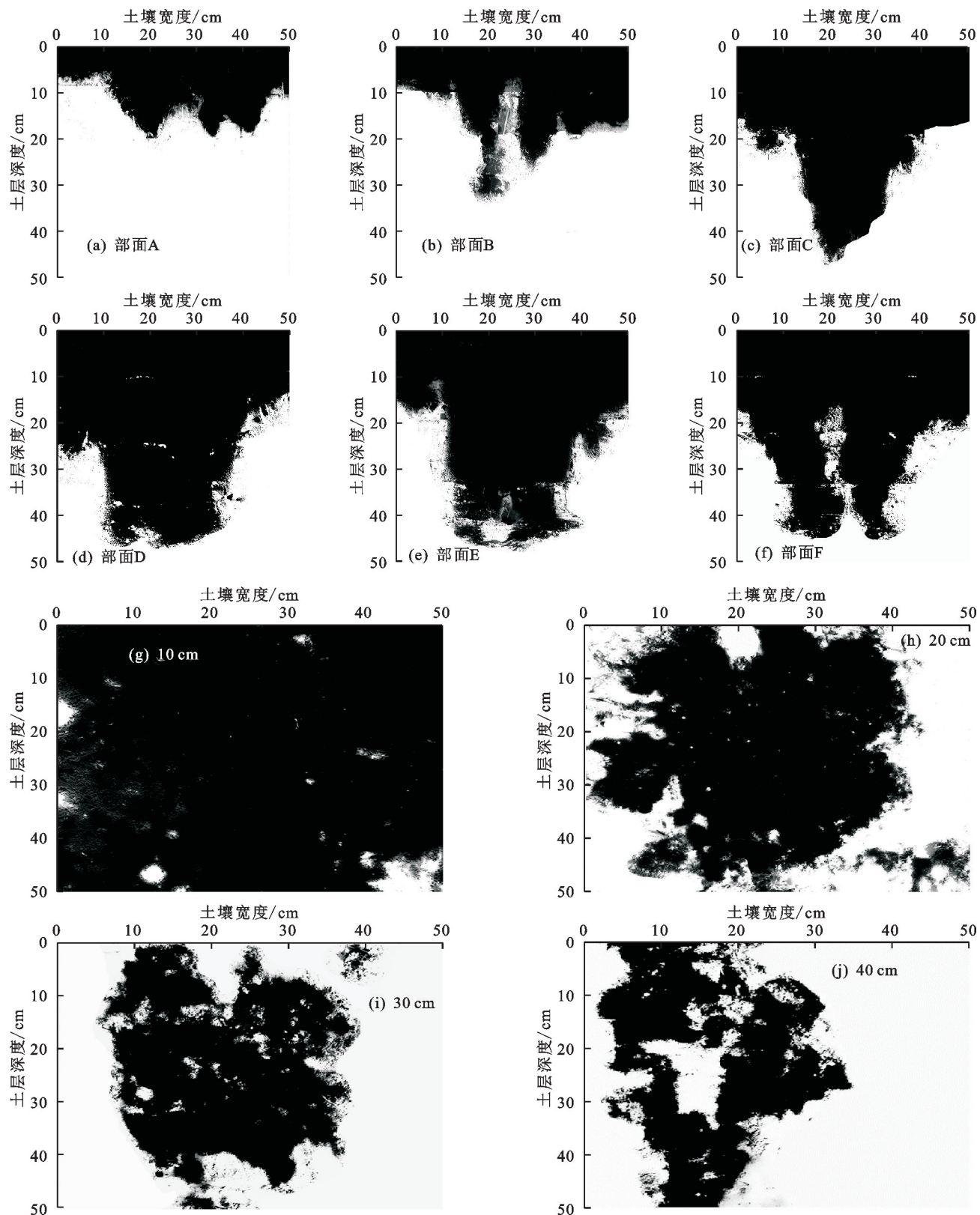
注:图 a~f 分别为 A~F 垂直剖面染色情况;g~h 分别为 10、20 cm 土层水平剖面染色情况。下同。

图 2 试验点 1 垂直和水平剖面染色

Fig.2 Staining plot of each vertical and horizontal profiles at test site 1

对比 3 种不同降雨历时下的土壤优先流发育情况,3 个试验点染色面积均随土层深度增加逐渐减小。由于 3 个试验点裂缝深度及空间形态不同,尽管宽度相同,不同垂直剖面的染色路径空间异质性较

大,染色分化现象明显,3 个试验点优先流最深位置所在剖面不同。试验点 1 在 B 剖面,试验点 2 在 E 剖面,试验点 3 在 D 剖面,这主要和各试验点裂缝在地表以下的走向及裂缝形态有关。



注:图 i~j 分别为 30、40 cm 土层水平剖面染色情况。下同。

图 3 试验点 2 垂直和水平剖面染色

Fig.3 The staining plot of each vertical and horizontal profiles at test site 2

2.2.2 水平剖面优先流形态 为了解析优先流的空间分布形态特征,还需对水平剖面染色特征进行分析。试验点 1 染色深度 26.4 cm,出现 2 个水平染色剖面;

试验点 2 染色深度 47.7 cm,出现 4 个水平剖面;试验点 3 染色深度 44.3 cm,出现 4 个水平剖面,利用 Image Pro Plus 6.0 软件计算各水平剖面染色面积。

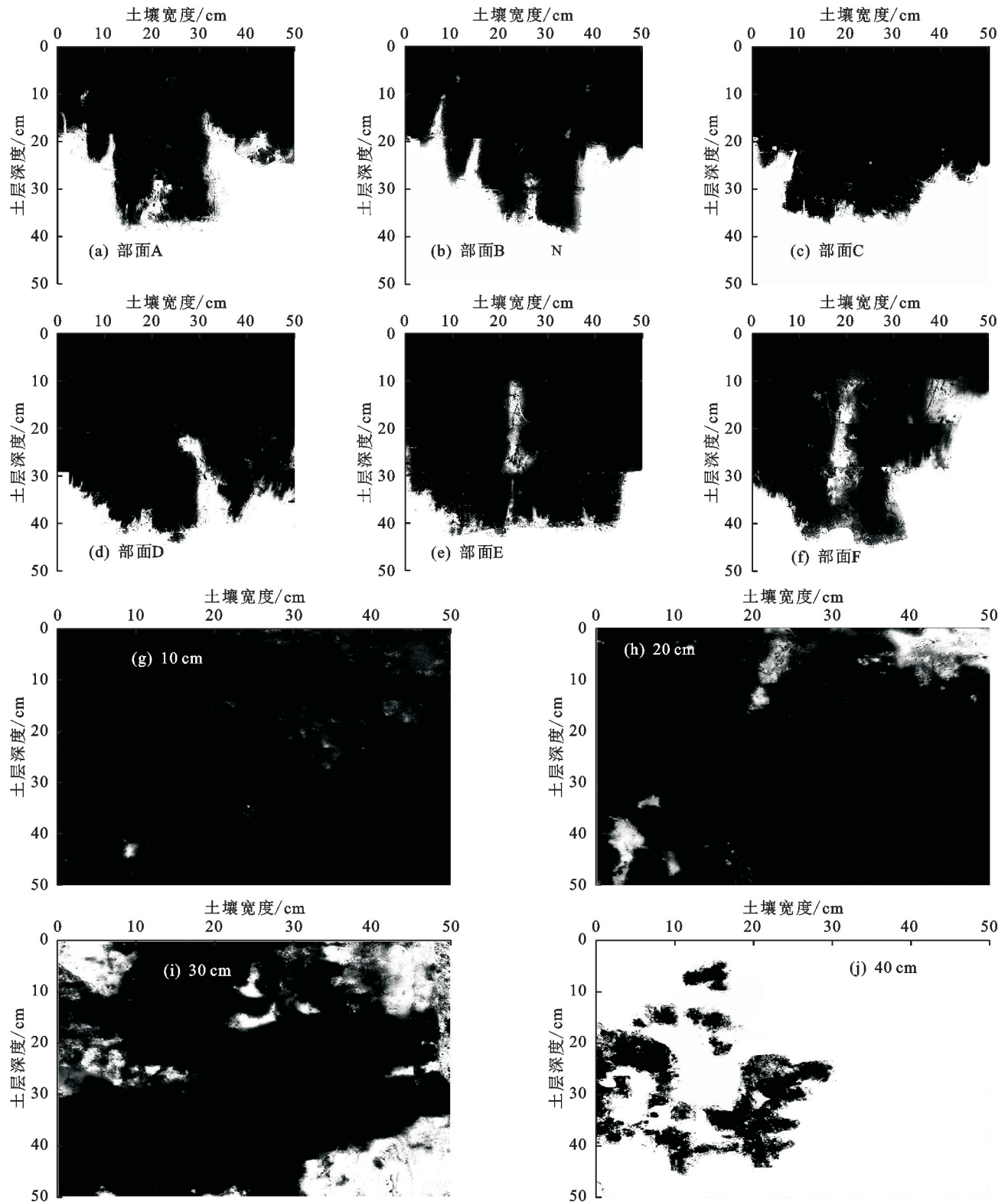


图 4 试验点 3 垂直和水平剖面染色

Fig.4 Staining plot of each vertical and horizontal profiles at test site 3

不同降雨历时下的水平剖面染色图像区别较大。当以 125 mm/h 降雨强度连续降雨 10 min 时,染色形态主要呈指状或分散的团块状。地面以下 10 cm

深度的水平剖面染色面积占比较小,染色面积仅达到 21.70%;地面以下 20 cm 土层深度的水平剖面染色面积下降为 13.26%,优先流发育程度随着土层深度的

增加而减小。当以 125 mm/h 降雨强度连续降雨 20 min 时,染色形态主要呈密集团块状、网状及环状。相较于试验点 1、试验点 2 在地面以下 10、20 cm 土层深度的水平剖面,染色面积分别增加 75.23%和46.73%。当以 125 mm/h 降雨强度连续降雨 30 min 时,染色覆盖范围最大且染色团块集中,40 cm 土层深度呈网状及环状,优先流发育程度最为显著。相较于试验点 2、试验点 3 在地面以下 10、20、30 cm 深度处,染色面积分别增加 2.77%、34.58%和 41.81%。以上结果表明,相同深度土壤染色面积随着降雨历时的增加而增大。

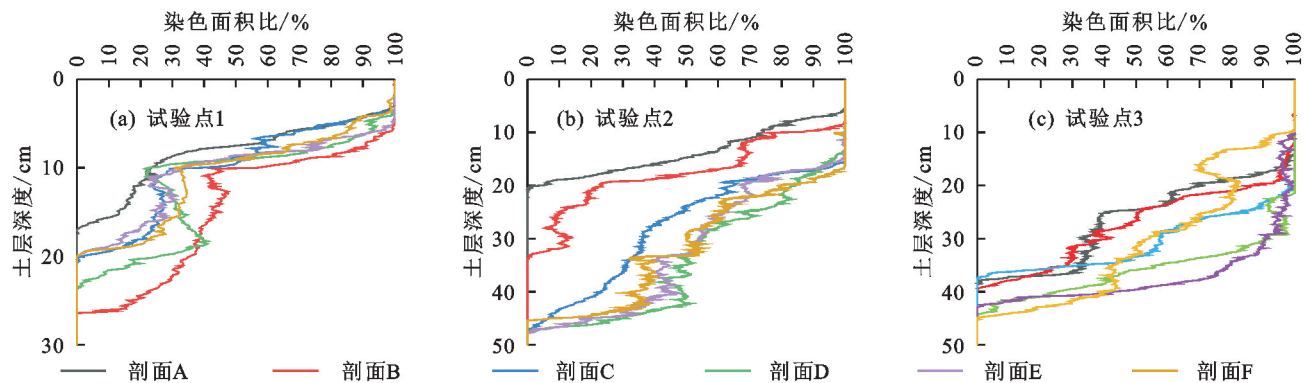


图5 不同降雨历时下各剖面染色面积变化

Fig.5 The dyeing area change of each section under different rainfall durations

对比 3 个试验点,试验点 3 在地面以下 10 cm 土层出现优先流后,各剖面染色面积下降速率差异较大。下降速率相对较大的 A 剖面在地面以下 25 cm 土层,染色面积降到 40%;而 F 剖面则到地面以下 45 cm 土层,染色面积降到 40%。试验点 2 在地面以下 8 cm 土层出现优先流后,A 剖面染色面积下降速度最快,在地面以下 17 cm 土层,染色面积降到 40%;下降速率相对较小的 D 剖面则在地面以下 38 cm 土层,染色面积降到 40%。其他剖面染色面积下降速度相对 A 剖面下降较慢,但染色深度较深,在 47 cm 土层左右。试验点 1 基质流范围较浅,仅有 5 cm 深度。5 cm 以下出现优先流后,各剖面染色面积变化规律较为一致。通过分析可知,优先流在空间分布上具有不均匀性和复杂性。随着染色水流的不断下渗,土壤垂直剖面染色面积比下降速率也在不断变化,造成此差异的原因主要是降雨历时的差异及裂缝形态、走向的不同。

2.3 染色路径及宽度

3 组试验垂直剖面染色路径数量见表 3。试验点 1 在地表以下 0~3.1 cm 土层,染色路径数量 10 个以下;3.1~8.6 cm 土层深度内,染色路径数量急剧增加,最高达到 114 个,8.6 cm 土层深度以下,染色路径数量呈下降趋势。试验点 2 在地表以下 0~6.2 cm 土层,染色路径数量少于 10 个;6.2~27.9 cm 土层,染色路径数量最多

降雨历时越长,降雨量越大,水流更多以优先流的形式快速运移到地下,优先流的发育越明显。

2.2.3 优先流染色面积比 染色面积比是反映染色溶液在土壤中运动范围和轨迹的易得参数。在不同降雨历时下,试验点 1、试验点 2 和试验点 3 的各垂直剖面染色面积比见图 5。3 个试验点染色面积比均随土层深度增加呈减小趋势,形态上表现为 S 形状。每个试验点的不同剖面 A、B、C、D、E、F,由于裂缝垂直走向和形态的不同,导致优先流的运移范围和走向也不同,各剖面沿垂向的染色面积变化速率不同。

为 77 个,27.9 cm 土层深度以下,染色路径数量呈下降趋势。在试验点 3 处,0~10.0 cm 表土层,染色路径数量较少,在 10 个以内;10.0~41.3 cm 深度内,染色路径数量增多,并在 30.5 cm 处达到最大值,染色路径最多为 61 个,41.3 cm 土层深度以下,染色路径数量开始下降。

对 3 个试验点以 10 cm 为 1 层,计算各个试验点每层的离散系数(表 4)。试验点 1 在地面以下 0~10 cm 土层处离散系数较高,说明在该范围内变异性相对较强,稳定性较弱。试验点 2 在地面以下 40~50 cm 土层内离散系数出现最大值,说明在该范围内变异性相对较强,稳定性较弱。试验点 3 则是在地面以下 30~40 cm 深度变异性较强,稳定性较弱。

对于染色路径宽度而言,3 个试验点随土层深度的增加,宽路径的数量均在不断减少,细小路径数量不断增加。地面以下 0~10 cm 土层内,试验点 3 染色路径大多是长于 45 cm 的宽路径,试验点 2 染色路径多集中在 36 cm 土层以上的宽路径,而试验点 1 以 35 cm 土层以上的宽路径为主;在 10~20 cm 土层深度,试验点 3 和试验点 2 的宽路径分别以 30~40、10 cm 左右为主且数量减少,而试验点 1 宽路径较少,小于 1 cm 的细小染色路径大幅增加;在 20~30 cm 土层内,试验点 3 以 20 cm 左右长的宽染色路径为主,试验点 2 宽路径以 10~20 cm 土层为主,细小路径大

量出现,短于 1 cm 的染色路径占大多数,试验点 1 在此土层深度则主要为短于 1 cm 的细小路径;在 30~40 cm 土层深度内,试验点 2 仅有个别 10 cm 左右的宽裂缝,绝大多数为细小裂缝;在 40 cm 以下土层深度内,试验点 1 也只剩宽度小于 1 cm 的细小路径。

通过对 3 个试验点染色路径数量和染色路径宽度的分析发现,3 个试验点染色路径数量均呈先增加后减小趋势;随着土层深度的增加,宽染色路径的数量在逐渐减少,细小染色路径数量增加,染色路径宽度也随土层深度的增加而不断降低。降雨历时越长,染色路径数量最大值出现的土层越深。相同土层深度的土壤剖面,降雨历时越长,染色路径越宽。

3 讨论

本研究结果表明,优先流区和非优先流区的土壤性质表现出一定的差异。同一土层深度处,优先流发生区

域的土壤孔隙度和饱和导水率高于非优先流区,体积质量和田间持水量低于非优先流区,与王赵男等^[33]研究黑龙江天然次生林优先流区土壤特性结论一致。土壤理化性质的异质性在空间上促使优先流运动的形成,改变水分在土壤中的入渗过程^[34]。

采煤塌陷区由于存在大量的裂缝,部分水分沿着裂缝下渗,使得土壤中优先路径明显。相同降雨强度下,10 min 降雨历时下渗水量较小时,优先流形态呈分散的团块状和指状;当降雨历时增加到 20 min 时,下渗水量增多,优先流形态呈密集团块状、网状及环状,与管凝等^[35]研究不同入渗水量下的人工林土壤优先流形态所得结论较为一致。

由此说明,当降水量少时,水分优先沿着裂缝通道竖直向下运动;当降水量大供水充足时,水分在沿优先通道运动的同时,向周边侧向入渗。

表 3 不同降雨历时下各试验点不同土层深度染色路径的数量及宽度

Table 3 Number and width of staining paths at different depths at each experimental site under different rainfall durations

试验点号	类别	0~10/cm	10~20/cm	20~30/cm	30~40/cm	40~50/cm
1	总条数	4 949	3 192	513	—	—
2		1 017	3 842	4 456	3 170	2 702
3		620	2 341	3 615	4 188	1 014
1	宽度/cm	0.1~50.0	0.1~20.4	0.1~16.6	—	—
2		0.1~50.0	0.1~50.0	0.1~40.5	0.1~27.4	0.1~24.2
3		0.1~50.0	0.1~50.0	0.1~49.4	0.1~45.3	0.1~9.3

表 4 不同降雨历时下各试验点不同土层深度染色路径数量的离散系数

Table 4 Discrete coefficients of the number of staining paths at different depths at each experimental site under different rainfall durations

试验点号	土层深度/cm	最小值	最大值
1	0~10	1.94	2.99
	10~20	0.85	1.78
	20~30	0.64	1.74
2	0~10	0.16	1.70
	10~20	1.57	2.27
	20~30	1.69	2.56
	30~40	1.29	2.44
	40~50	1.83	2.86
3	0~10	0.20	0.26
	10~20	0.33	1.63
	20~30	1.13	1.89
	30~40	1.61	2.12
	40~50	1.50	1.83

通过染色形态特征可说明优先流发育情况。在采煤塌陷区裂缝带,试验框内表层土壤基本均匀染色,土壤水运动表现为基质流,优先流发生在基质流以下的深层土壤。当降雨历时短,入渗水量小时,染色面积比随土层深度变化的幅度较小;当降雨历时增加,入渗水

量大时,染色面积比曲线波动增大,与宋艺琳等^[36]研究不同入渗水量下刺槐地优先流所得结论一致。导致该现象的主要原因是土壤的非均质性,随着入渗水量增加,优先流也表现出空间异质性。

土壤裂缝优先流发育特征受到多种因素的影响,尤令等^[37]对农田土壤优先流的影响因素研究指出,降雨强度与降雨历时的增加在加深基质流区域的同时,加深优先流的发育深度,与本研究结果一致。本研究设置 10、20、30 min 等 3 个降雨时长,10 min 降雨时长在地表以下 5 cm 出现优先流,优先流深度为 26.4 cm;20、30 min 等 2 种降雨时长分别在地表以下 8、10 cm 出现优先流,优先流深度分别为 47.7、44.3 cm,二者较为接近。20 min 降雨时长优先流略深的原因是,尽管 20 min 降雨历时所在裂缝与 30 min 降雨历时所在裂缝宽度相同,但前者的深度为 32 cm,后者为 21 cm,说明裂缝深度对优先流发育产生一定的影响。

采煤塌陷区优先流的发育受到多种因素的影响,如降雨条件(降雨量、降雨强度、降雨历时)、土壤基本特性、裂缝空间特征等。本研究主要针对干旱地区砂土开展优先流特征研究,后续还需开展其他土壤质地条件下的优先流特征研究,以系统分析土壤特性对优先流的影响。

4 结论

1)采煤塌陷区地表以下相同土层深度,优先流发生区域的土壤水分体积分数、孔隙度、饱和导水率大于非优先流区域,体积质量和田间持水量小于非优先流区域。优先流区域的土壤水分体积分数从表层向深层,整体上呈增加趋势;且降雨历时越长,相同土层深度土壤水分体积分数越高。

2)当降雨历时分别为10、20、30 min时,相应的基质流深度分别为5、8、10 cm;优先流发育深度分别为26.4、47.7、44.3 cm。降雨历时越长,基质流和优先流发育越深。

3)土壤表层表现为基质流,优先流发生在基质流以下的深层土壤。当降雨历时较短时,染色面积比随着土层深度变化的幅度较小;当降雨历时较长时,染色面积比曲线波动增大。

4)随着染色深度增加,宽染色路径的数量在逐渐减少,细小染色路径的数量呈增加趋势,染色路径总数呈先增加后减小趋势。且降雨历时越长,相同深度处土壤染色路径越宽,宽路径数量越多。

参考文献:

- [1] ZHANG Y, ZHANG M, NIU J, et al. The preferential flow of soil: A widespread phenomenon in pedological perspectives[J]. *Eurasian Soil Science*, 2016, 49(6): 661-672.
- [2] JOHNSON A C, HARIA A H, BHARDWAJ C L, et al. Water movement and isoproturon behaviour in a drained heavy clay soil: 2. Persistence and transport[J]. *Journal of Hydrology*, 1994, 163: 217-231.
- [3] 曹顺爱. 稻田土壤优先流及其对氮肥运移的影响研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
CAO Z A. Soil preferential flow and its influence on nitrogen and fertilizer transport in paddy fields[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003.
- [4] 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.
- [5] 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*, 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.
- [6] 武强, 董东林, 傅耀军, 等. 煤矿开采诱发的水环境问题研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2002, 31(1): 19-22.
WU Q, DONG D L, FU Y J, et al. Research on water pollution induced by coal mining[J]. *Journal of China University of mining and Technology*, 2002, 31(1): 19-22.
- [7] YANG J H, YU X, YANG Y, et al. Physical simulation and theoretical evolution for ground fissures triggered by underground coal mining[J]. *PLoS One*, 2018, 13(3): e0192886.
- [8] NOVÁK V, ŠIMÁUNEK J, VAN GENUCHTEN M T. Infiltration of water into soil with cracks[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2000, 126(1): 41-47.
- [9] BENEGAS L, ILSTEDT U, ROUPSARD O, et al. Effects of trees on infiltrability and preferential flow in two contrasting agroecosystems in Central America[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2014, 183: 185-196.
- [10] 刘目兴, 杜文正. 山地土壤优先流路径的染色示踪研究[J]. *土壤学报*, 2013, 50(5): 871-880.
LIU M X, DU W Z. To investigate soil preferential flow paths in mountain area using dye tracer[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(5): 871-880.
- [11] SOHRT J, RIES F, SAUTER M, et al. Significance of preferential flow at the rock soil interface in a semi-arid karst environment[J]. *Catena*, 2014, 123: 1-10.
- [12] 朱钊岑, 刘冰, 刘婵, 等. 荒漠绿洲湿地土壤优先流与水分入渗特征[J]. *生态学报*, 2020, 40(12): 3979-3990.
ZHU Z C, LIU B, LIU C, et al. Characteristics of preferential flow and water infiltration in desert oasis wetland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(12): 3979-3990.
- [13] LIPIEC J, TURSKI M, HAJNOS M, et al. Pore structure, stability and water repellency of earthworm casts and natural aggregates in loess soil[J]. *Geoderma*, 2015, 243/244: 124-129.
- [14] 李伟莉, 金昌杰, 王安志, 等. 土壤大孔隙流研究进展[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(4): 888-894.
LI W L, JIN C J, WANG A Z, et al. Research progress in soil macropore flow[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(4): 888-894.
- [15] 袁龙. 粉砂土路堤拓宽优先流影响研究[D]. 郑州: 河南大学, 2019.
YUAN L. Study on the influence of priority flow to the widened embankment of silty sand [D]. Zhengzhou: Henan University, 2019.
- [16] 孟晨, 牛健植, 余海龙, 等. 土壤大孔隙三维特征影响因素和测定方法研究进展[J]. *北京林业大学学报*, 2020, 42(11): 9-16.
- [17] MENG C, NIU J Z, YU H L, et al. Research progress in influencing factors and measuring methods of three-dimensional characteristics of soil macropores [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2020, 42(11): 9-16.
- [17] 刘伟平, 刘子彰, 李邵峰. 颗粒级配对接花岗岩残积土入渗及干缩开裂的影响[J]. *南昌大学学报(工科版)*, 2023, 45

- (1):30-37.
- LIU W P, LIU Z Z, LI S F. Influence of grain size distribution on infiltration and dry shrinkage cracking of granite residual soil[J]. Journal of Nanchang University (Engineering and Technology), 2023, 45(1):30-37.
- [18] 余海龙,樊瑾,牛玉斌,等.灌丛树干茎流与根区优先流对灌丛沙堆“土壤沃岛效应”的影响研究[J].草地学报, 2019, 27(1):1-7.
- YU H L, FAN J, NIU Y B, et al. Review on the influence of bushwood stem flow and root-induced preferential flow on the “soil fertile island effect” of Nebkha[J]. Acta Agrestia Sinica, 2019, 27(1):1-7.
- [19] 李志成,赵洋毅,王克勤,等.金沙江干热河谷活跃和稳定冲沟集水区土壤优先流特征[J].水土保持学报, 2022, 36(6):119-127.
- LI Z C, ZHAO Y Y, WANG K Q, et al. Soil preferential flow characteristics in active and stable gully catchment areas of the dry-hot valleys of the Jinsha River[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(6):119-127.
- [20] 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.
- [21] 朱磊,陈泓泓,刘德东.耦合基质区与裂隙网络的土壤优先流模型及验证[J].农业工程学报, 2016, 32(14):15-21.
- ZHU L, CHEN J H, LIU D D. Preferential flow model coupling soil matrix with fracture network and its validation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(14):15-21.
- [22] 盛丰,方妍.土壤水非均匀流动的碘-淀粉染色示踪研究[J].土壤, 2012, 44(1):144-148.
- SHENG F, FANG Y. Study on preferential soil water flow using iodine-starch staining method[J]. Soils, 2012, 44(1):144-148.
- [23] 蒙仲举.内蒙古中部荒漠草原微斑块发育与土壤优先流响应机制[D].呼和浩特:内蒙古农业大学, 2022.
- MENG Z J. Micropatch development and soil preferential flow response mechanism in central Inner Mongolia[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2022.
- [24] 陈建平,朱哲,吴丽.基于塌陷裂缝非连续均质的土壤水分扩散物理模拟[J].中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(2):66-72.
- CHEN J P, ZHU Z, WU L. Physical model test on moisture diffusion in discontinuous homogeneous soil with collapse-fissure[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(2):66-72.
- [25] 郭巧玲,苏宁,丁斌,等.采煤塌陷区裂隙优先流特征[J].中国水土保持科学, 2018, 16(3):112-120.
- GUO Q L, SU N, DING B, et al. Characteristics of preferential flow in the soil cracks of a coal mining subsidence area[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2018, 16(3):112-120.
- [26] 吕帅,王新国,陈宇鹏.上湾煤矿绿色矿山建设实践[J].中国煤炭, 2023, 49(S1):41-45.
- LV S, WANG X G, CHEN Y P. Talking about green mine construction in Shangwan Coal mine [J]. China Coal, 2023, 49(S1):41-45.
- [27] 高超.凤阳山主要林分类型土壤优先流特征及其影响因素[D].南京:南京林业大学, 2015.
- GAO C. Soil priority flow characteristics of main forest types and its influencing factors[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2015.
- [28] 吕捷,樊秀峰,吴振祥.基于降雨染色示踪试验的大孔隙流特性研究[J].长江科学院院报, 2021, 38(5):109-114.
- LV J, FAN X F, WU Z X. Research on macropore flow characteristics based on rainfall dyeing tracer experiment [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(5):109-114.
- [29] 韦灵.秸秆覆盖对广西稻田土壤优先路径与水流运动的影响[D].广西 桂林:桂林理工大学, 2020.
- WEI L. Effect of straw covering on soil priority path and water flow movement in Guangxi paddy field[D]. Guilin, Guangxi: Guilin University of Technology, 2020.
- [30] 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, CHEN 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.
- [31] 姚晶晶.重庆四面山集水区尺度土壤优先流特征及其对养分运移的影响[D].北京:北京林业大学, 2018.
- YAO J J. Scale soil preferential flow characteristics and its influence on nutrient transport in the Siwan Mountain catchment area in Chongqing [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2018.
- [32] 刘璇.南京紫金山 4 种林分土壤优先流研究[D].南京:南京林业大学, 2018.
- LIU X. Study on soil preferential flow in four kinds of stands in Purple Mountain, Nanjing[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2018.
- [33] 王赵男,辛颖,赵雨森.黑龙江省水源地优先流区与基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.

- 改善效应[D].昆明:云南大学,2022.
- ZENG M. Effects of soil and water conservation and quality improvement of different plant communities in phosphorus-rich areas of Dianchi Lake Basin[D]. Kunming: Yunnan University,2022.
- [35] 王亚萍,刘庆安,庞军柱,等.秦岭南坡不同林分类型枯落物层和土壤层水文功能综合评价[J].西北林学院学报,2024,39(3):50-58.
- WANG Y P, LIU Q A, PANG J Z, et al. Comprehensive evaluation of hydrological function of litter and soil layers in different stand types in the south slope of the Qinling Mountains[J]. Journal of Northwest Forestry University,2024,39(3):50-58.
- [36] 邓继峰,万龙燕,侯瑞萍,等.辽东山区 5 种林分土壤颗粒分形特征与土壤性质[J].东北林业大学学报,2024,52(9):99-108.
- DENG J F, WAN L Y, HOU R P, et al. Soil grain fractal characteristics and soil properties of five forest stand types in the Liaodong Mountains area[J]. Journal of Northeast Forestry University,2024,52(9):99-108.
- [37] 李鹏,齐实,张林,等.北京山区不同植被恢复类型土壤质量综合评价[J].水土保持学报,2024,38(1):337-346.
- LI P, QI S, ZHANG L, et al. Comprehensive evaluation of soil quality of different vegetation restoration types in mountainous areas of Beijing[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2024,38(1):337-346.
- [38] 李笑雨,白金珂.青藏高原南部 4 种土地利用方式土壤质量评价[J].草业科学,2024,41(7):1614-1623.
- LI X Y, BAI J K. Evaluation of soil quality of different land use types in the southern Tibetan Plateau[J]. Practical Science,2024,41(7):1614-1623.
- [39] LI X Y, WANG D Y, REN Y X, et al. Soil quality assessment of croplands in the black soil zone of Jilin Province, China: Establishing a minimum data set model[J]. Ecological Indicators,2019,107:e105251.
- [40] 胡伟,刘文辉,刘凯强,等.基于最小数据集土壤质量评价及生物指标的确立[J].草地学报,2024,32(12):3855-3867.
- HU W, LIU W H, LIU K Q, et al. Evaluation of soil quality and establishment of bio-indicators based on minimal data set[J]. Acta Agrestia Sinica,2024,32(12):3855-3867.
- [41] 杨维,李慧婷,季海明.西宁市南北山主要造林树种的土壤水分特征研究[J].林业调查规划,2024,49(3):124-132.
- YANG W, LI H T, JI H M. Soil moisture characteristics of major afforestation tree species in north and south mountains of Xining City[J]. Forest Inventory and Planning,2024,49(3):124-132.
- [42] NIU X Y, WANG Y H, YANG H, et al. Effect of land use on soil erosion and nutrients in Dianchi Lake watershed, China[J]. Pedosphere,2015,25(1):103-111.
- [43] DUAN Z Z, WANG M J, LIU Y, et al. Predicting hydrological alterations to quantitative and localized climate change in plateau regions: A case study of the Lake Dianchi Basin, China[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment,2022,36(4):969-983.
- (上接第 140 页)
- [34] 程竞锋,闫加亮,徐满厚,等.吕梁关帝山不同植被坡面土壤优先流特征及其影响因素[J].生态学杂志,2021,40(12):3890-3900.
- CHEN J F, YAN J L, XU M H, et al. Preferential flow characteristics and its influencing factors on slope positions in different vegetation types in Guandi Mountain, Lüliang[J]. Chinese Journal of Ecology,2021,40(12):3890-3900.
- [35] 管凝,程金花,侯芳,等.不同入渗水量下的西南喀斯特地区人工林土壤优先流特征[J].土壤通报,2023,54(3):587-595.
- GUAN N, CHEN J H, HOU F, et al. Priority flow characteristics of artificial forest soil in southwest karst area at different water seepage levels[J]. Soil Bulletin,2023,54(3):587-595.
- [36] 宋艺琳,毕华兴,赵丹阳,等.晋西黄土区不同入渗水量下刺槐林地优先流特征[J].土壤,2024,56(2):448-456.
- SONG Y L, BI H X, ZHAO D Y, et al. Characteristic of preferential flow in robinia pseudoacacia forests in Loess Plateau in western Shanxi Province under different infiltration conditions[J]. Soils,2024,56(2):448-456.
- [37] 尤今,王树谦.土壤裂隙对农田土壤优先流的影响及其控制因子[J].节水灌溉,2022(9):71-75.
- YOU J, WANG S Q. Impacts of soil fracture on cropland soil preferential flow and its controlling factors[J]. Water Saving Irrigation,2022(9):71-75.