

入渗水量对重庆四面山草地优先流影响的定量评价

姚晶晶^{1,2}, 程金花^{1,2}, 张洪江^{1,2}, 李明峰^{1,2}, 阚晓晴^{1,2}

(1. 北京林业大学水土保持学院, 重庆缙云山三峡库区森林生态系统国家定位观测研究站, 北京 100083;

2. 北京林业大学, 林业生态工程教育部工程研究中心, 北京 100083)

摘要: 以重庆四面山草地为研究对象, 通过野外染色示踪试验, 借助图像处理技术、方差分析、相关性分析及变异性分析等方法, 分析3种不同入渗水量(20, 40, 60 mm, 对应的样地编号分别为G20, G40, G60)对土壤优先流的影响并进行定量评价。结果表明: (1) 染色面积比基本上随着土层深度的增加而减小, 其中G20和G40的染色面积比分别从3 cm和12 cm处开始显著下降; (2) 总染色面积比和优先流长度指数与入渗水量呈显著正相关($P < 0.01$); (3) 入渗水量的增加可以促进水分向更深层运动, 最高可达60 cm; (4) 优先流区染色面积比和最大入渗深度的非均匀性随着入渗水量的增加而减小, 其变异性系数的变化分别为1.88~0.47和0.52~0.07, 但入渗水量对实际入渗深度的影响则更为复杂。

关键词: 入渗水量; 优先流; 染色面积; 入渗深度; 变异系数

中图分类号: S152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2018)02-0045-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.02.007

Quantitative Evaluation of Effects of Infiltration Amounts on Preferential Flow in Grassland in Simian Mountain of Chongqing

YAO Jingjing^{1,2}, CHENG Jinhua^{1,2}, ZHANG Hongjiang^{1,2}, LI Mingfeng^{1,2}, KAN Xiaoping^{1,2}

(1. Jinyun Forest Ecosystem Research Station, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083; 2. Beijing Forestry University, Forestry Ecological Engineering Research Center, Ministry of Education, Beijing 100083)

Abstract: To quantitatively evaluate the effects of three different infiltration amounts on soil preferential flow, the morphological image processing technology, statistical sample variability analysis, variance analysis, and correlation analysis were used in this study. G20, G40, and G60 were taken to represent these plots with three different infiltration amounts (20 mm, 40 mm, and 60 mm respectively). Dyeing experiments with Brilliant Blue FCF (C.I. Food Blue 2) were conducted in grassland in Simian Mountain of Chongqing. The results showed that: (1) Dye coverage generally decreased with the increasing soil depth, and sharp decreases were found at the depths of 3 cm in G20 and 12 cm in G40, respectively. (2) The total dye coverage and length index of preferential flow were positively correlated with infiltration amounts ($P < 0.01$). (3) Water infiltration was promoted to deeper soil layers as the infiltration amounts increased, and the maximum depth of water infiltration reached 60 cm. (4) The non-uniformity of dyed coverage in preferential flow area and the maximum infiltration depth decreased with the increasing infiltration amounts with their variation coefficients ranging from 1.88 to 0.47, and 0.52 to 0.07, respectively. However, the effects of infiltration amounts on actual infiltration depth was even more complicated.

Keywords: infiltration amount; preferential flow; dyed area; infiltration depth; variation coefficient

优先流是指水分和溶质沿大孔隙、裂隙、虫洞及根孔等优先路径, 绕过部分土壤基质快速下渗的现象^[1-2]。优先流的存在缩短了水分和溶质在土壤中的运移时间, 致使大量污染物来不及充分降解就下渗到土层深处, 不但增大了农业灌溉及肥料的损失, 更对地下水造成严重威胁^[3-4]。

优先流的普遍存在及对环境的影响引起了国内外学术界的广泛关注。目前, 国内外学者基于染色示踪剂^[5]、CT扫描^[6]、穿透曲线^[7]、渗透仪^[8]以及数学模型^[2,9]等对优先流开展研究。其中, 染色示踪法因其可以直观清晰地反映染色水流经过的区域, 且成本较低而成为应用最广泛的优先流研究方法。

收稿日期: 2017-10-24

资助项目: 国家科技支撑计划项目“长江防护林质量调控与高效经营经营技术研究与示范”(2015BAD07B040304); 水体污染控制与治理科技重大专项“纳水河世园会及冬奥会水质保障与流域生态修复技术与示范”(2017ZX07101-004-003); 北京市科技计划项目“怀柔小流域河岸带生态恢复技术研究”(Z151100001115001); 北京林业大学青年教师科学研究中长期项目“防护林结构配置机理及其生态功能研究”(2015ZCQ-SB-03)

第一作者: 姚晶晶(1989—), 女, 在读博士生, 主要从事流域治理研究。E-mail: yaojing1989_lucky@163.com

通信作者: 程金花(1979—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事林业生态工程研究。E-mail: jinhua_cheng@126.com

目前研究者基于染色示踪法对优先流的影响因素进行了大量研究。优先流在多种因素的综合作用下体现出较明显的空间变异性。影响优先流的因素包括土壤质地和结构、生物因素、前期含水量、耕作方式、降雨强度、灌溉方式、入渗水量、干湿和冻融交替等^[10-11]。其中,入渗水量对优先流的影响显著,盛丰等^[12]通过碘—淀粉染色示踪试验发现入渗水量的增加不但增大了土壤染色深度,还促进水流运动由优先流向基质流转变,其研究结果虽然在一定程度上揭示了不同入渗水量对优先流的影响差异,但是多为定性描述,缺乏变异性特征分析及定量评价;潘网生等^[13]通过引入非均匀分析法和皮尔逊简单相关系数法,发现增加入渗水量能够提高优先流入渗深度的非均匀性,但分析中未剔除基质流区,不能准确反映优先流发育程度。另外,关于入渗水量对优先流影响的相关研究多通过挖掘垂直剖面实现,缺乏垂直剖面和水平

剖面相结合的综合分析。因此,本文以重庆四面山草地为研究对象,基于田间染色示踪试验挖掘垂直剖面和水平剖面,并借助图像处理技术,结合变异性分析方法,对不同入渗水量条件下土壤优先流的特征进行分析并做出定量评价,以期为该地区水资源评价及管理提供一定的理论依据及技术支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究的野外试验于 2016 年 7—8 月在北京林业大学四面山科学研究基地进行。四面山(28°31′—28°43′N,106°17′—106°30′E)距重庆市主城区 140 km,海拔 500~1 780 m。属中亚热带湿润性季风气候,年平均气温 13.6~18.4℃,年平均降水量 1 522.3 mm。土壤类型主要为紫色土和黄壤土^[14]。选择研究基地的草地为研究样地,其土壤基本性质见表 1。

表 1 研究区样地基本性质

土层深度/cm	pH	容重/(g·cm ⁻³)	总孔隙度/%	含水量/%	砂粒 (2~0.02 mm) 含量/%	粉粒 (0.02~0.002 mm) 含量/%	黏粒 (≤0.002 mm) 含量/%	有机质 含量/%	土壤 温度/℃	草本 种类
0—10	4.34±0.05	1.00±0.07	56.67±3.13	42.43±2.79	69.22±7.21	27.19±6.00	3.58±0.21	6.47±0.21	26.6±0.1	乌蕨、中华里白、宽叶苔草、芒萁等
10—20	4.40±0.06	1.09±0.06	49.76±3.07	31.71±1.47	61.59±3.72	32.39±3.50	6.02±0.23	3.45±0.17	26.7±0.1	
20—30	4.41±0.04	1.11±0.08	47.69±1.13	29.44±0.36	54.34±5.66	37.79±4.08	7.87±1.96	3.38±0.04	26.9±0.1	
30—40	4.48±0.08	1.11±0.08	50.27±2.30	30.99±1.10	48.43±4.81	44.58±4.20	6.99±0.65	3.37±0.11	27.7±0.1	
40—50	4.39±0.02	1.12±0.04	51.76±0.89	35.82±2.51	48.83±3.44	42.14±2.52	9.03±1.03	2.77±0.11	27.3±0.1	
50—60	4.43±0.07	1.19±0.05	49.72±3.05	34.88±3.14	41.41±2.46	47.84±2.49	10.75±0.42	1.75±0.13	27.3±0.1	

注:表中数据为平均值±标准差。下同。

1.2 样地选择与试验步骤

在研究样地选取 3 个相邻的试验小区,两两间距为 1 m,每个试验小区大小为 150 cm×90 cm,在不破坏有机质层的前提下将样地中的草本及枯落物清理干净。根据双环入渗原理,将 2 块大小分别为 120 cm×60 cm×50 cm 和 140 cm×80 cm×50 cm 的金属框垂直砸入样地 30 cm,露出地面高度为 20 cm。

染色处理前,在距离试验小区 50 cm 处挖掘土壤剖面,以 10 cm 为 1 层采集土壤样品,测定土壤 pH、容重、总孔隙度、含水量、粒径组成及有机质含量等基本理化性质^[15-16],同时测定土壤温度;然后采用积水渗透法^[14]将浓度为 4 g/L 的亮蓝溶液通过安装有喷头的恒流泵(保定气力 BT100-02 型)向 3 个样地内框分别均匀喷洒 20 mm(中雨强度)、40 mm(大雨强度)和 60 mm(暴雨强度)。为了有效避免样地表面积水等造成的亮蓝溶液侧渗,运用双环入渗的原理,喷洒亮蓝溶液的同时向外框喷洒同等深度的水。由于试验采用的是恒流泵,因此不同样地喷洒溶液所耗时间与设计剂量成正比。依据喷洒亮蓝溶液的量将样地编号为 G20、G40 和 G60。喷洒结束后为防止外界因素对染色试验的干扰,用塑料薄膜将样地覆盖。染色 24 h 后,移走塑料薄膜,将每个样方

平均分为 2 个 60 cm×60 cm 的小样方,分别开挖水平剖面(间距为 5 cm)和垂直剖面(间距为 10 cm),并使用 1 300 万像素的佳能 500 D 数码相机拍摄每个剖面的染色图像。土壤剖面挖掘示意图 1。

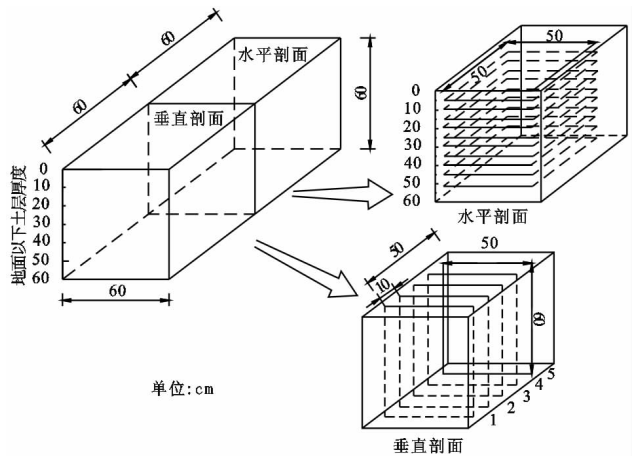


图 1 土壤剖面挖掘示意

1.3 图像处理

首先使用 ERDAS IMAGINE 9.2 软件将拍摄的染色图片进行几何校正,然后参照图片中的标尺,使用 Photoshop CS 6.0 将染色图像进行裁剪,其中水平剖面的图片裁剪后的大小为 50 cm×50 cm,垂直

剖面则根据实际染色深度进行裁剪。经过色相、饱和度和明度的调整及去色后,将图片转化为由黑色(像素值为 0)和白色(像素值为 255)组成的二元信息矩阵图像;最后运用 Image ProPlus v6.0 进行降噪处理并输出由 0 和 255 组成二值矩阵,以此二值矩阵为依据进行研究区优先流特征分析^[14]。

1.4 数据分析

1.4.1 染色图像分析

(1)土壤剖面染色面积比。土壤剖面染色面积比(D_c)可以直观地反映优先流的发育程度,染色面积比小于 80% 时,值越高,优先流越明显,其计算公式为^[5]:

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

式中: D_c 为某土壤剖面染色面积比(%); D 为某土壤剖面总染色面积(cm^2); N_D 为某土壤剖面未染色面积(cm^2)。

(2)土壤优先流比。基于垂直剖面计算得来的土壤优先流比(P_F)可以剔除基质流区域的影响,从而更真实地反映优先流区在整个染色区域的分布情况,其计算公式为^[17]:

$$P_F = (1 - \frac{U_F \cdot W}{D_T}) \times 100\% \quad (2)$$

式中: P_F 为土壤剖面优先流比(%); U_F 为土壤剖面基质流深度(cm); W 为土壤剖面水平宽度(cm); D_T 为土壤剖面染色区总面积(cm^2)。

(3)优先流长度指数。优先流长度指数(L_i)与染色剂渗透模式的异质性程度有关,优先流区染色剂的运动具有更高的异质性,因此,该参数较大的土壤优先流更发育^[18]:

$$L_i = \sum_{j=1}^n |D_{c(i+1)} - D_{c_j}| \quad (3)$$

式中: L_i 为优先流长度指数(%); $D_{c(i+1)}$ 、 D_{c_j} 为土壤剖面第 $i+1$ 层、第 j 层对应的染色面积比(%); n 为土壤剖面垂直土层数,本研究选取垂直剖面进行该指标的计算,沿垂直面向下 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。

1.4.2 优先流染色非均匀性分析

(1)优先流区染色面积比变异系数。在剔除基质流区的基础上,为了定量评价优先流的发育程度,引入优先流区染色面积比变异系数以直观表征土壤不同深度染色区域的变化,其计算公式为^[4,19]:

$$C_v = \frac{\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i} \quad (4)$$

式中: C_v 为土壤优先流染色面积比变异系数; N 为土壤剖面优先流区垂直土层数; x_i 为土壤剖面在 i 深处染色面积比; $\bar{x}$ 为优先流染色面积比的平均值。

(2)入渗深度非均匀系数。盛丰等^[20]认为最大入渗深度不能完全描述土壤水流运动的非均匀特征,

因为染色溶液入渗和流动的非均匀性致使该深度以上的土壤没有被全部染色,由此引入实际入渗深度进行水流入渗的非均匀特征分析。而潘网生等^[13]认为实际入渗深度的引入并不能完全真实、完整地描述优先流的非均匀特征。本文通过综合分析最大入渗深度和实际入渗深度的非均匀性,以期更完整、真实地描述优先流入渗的非均匀性:

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

$$h_a(x, y) = \sum_{i=1}^k \beta(x, y, z) \Delta h_i \quad (6)$$

$$C_u = \frac{\sum |h_a(x, y) - \bar{h}_a|}{M \cdot \bar{h}_a} \quad (7)$$

式中: C_μ 为最大入渗深度变异系数; $h_{\max}(x_i, y_i)$ 为垂直剖面(x_i, y_i)位置处染色最大深度(cm); $\bar{h}$ 为不同(x_i, y_i)位置染色最大深度的平均值(cm); m 为垂直剖面水平方向像素总点数,本研究中为 1 800; $h_a(x, y)$ 为(x, y)位置的实际入渗深度(cm);如果(x, y, z)位置被染色,则 $\beta(x, y, z) = 1$,反之 $\beta(x, y, z) = 0$; Δh_i 为相邻两水平剖面的垂直距离(cm); k 为试验的总剖面数; C_u 为实际入渗深度变异系数; $\bar{h}_a$ 为实际入渗深度平均值(cm); M 为土壤水平剖面的像素总点数。

1.4.3 数据处理 使用 Excel 2013 和 SPSS 18.0 进行数据分析,并结合 Origin 8.0 进行作图。

2 结果与分析

2.1 入渗水量对土壤剖面染色空间变化特征的影响

2.1.1 染色面积分布 为了充分反映水分在垂直方向和水平方向的运动情况,本文对重庆四面山草地不同入渗水量条件下土壤垂直和水平剖面的染色图像进行了分析。从图 2 和图 3 可以看出,入渗水量对土壤垂直剖面的染色面积分布影响较大。总体上,3 种处理表层土壤染色面积均在 90% 以上,均为基质流区^[5,19]。随着土层深度的增加,水流形态逐渐转变为优先流。染色面积比随着土层深度的增加而减少,说明入渗过程具有非均匀性,存在明显的优先流现象^[13]。各处理不同垂直剖面间染色面积比差异较大,较大的标准差(图 3)可以进一步体现优先流空间分布的不均匀性。不同处理的染色面积比下降幅度不同,其中 G20 和 G40 分别从土层深度 3 cm 和 12 cm 处开始急剧下降,而 G60 的下降幅度比较平缓,这种现象一定程度上可以归因于三者不同的基质流深度。入渗水量较少时,基质流深度较小,土壤水分运动优先表现为优先流,变异性较强;随着入渗水量的增加,染色面积比大于 80% 的区域增加,基质流深度增大,变异性较弱。需要指出的是,G60 垂直剖面

1,2,4 优先流区染色面积随土层深度较小的下降幅度在一定程度上体现了其较大的优先流发育程度。

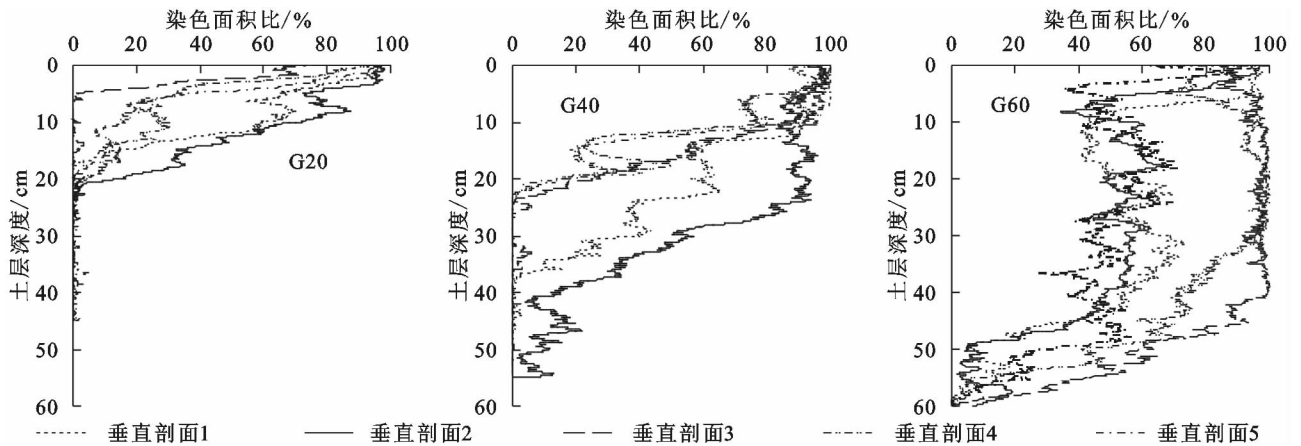
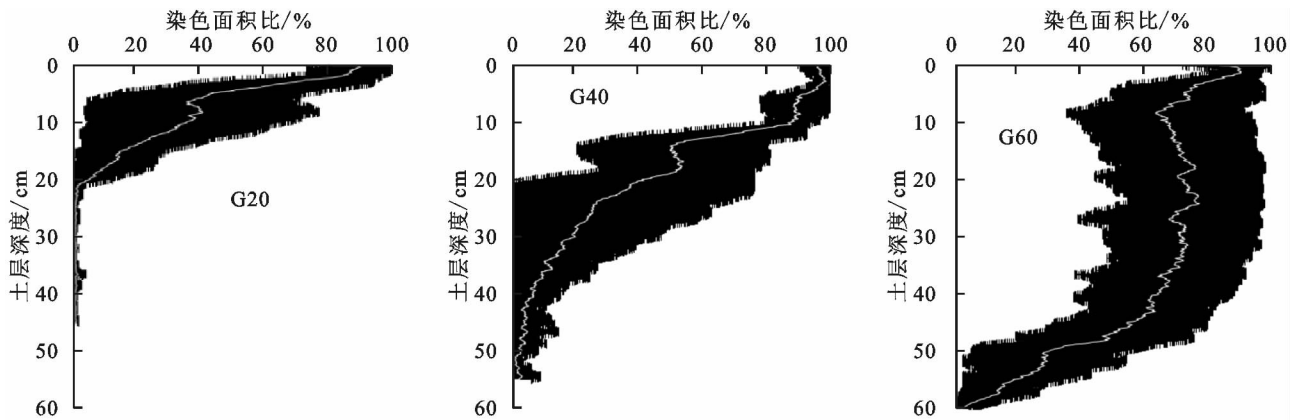


图 2 不同入渗水量条件下垂直剖面染色面积比



注:图中黑色部分表示土标准差。

图 3 不同入渗水量条件下垂直剖面平均染色面积比

由图 4 可知,不同入渗水量条件下土壤水平剖面染色面积比存在一定差异,其中 G40 和 G60 在 5 cm 土层深度处,染色面积比均大于 80%,为基质流区^[5]。与垂直剖面相似,染色面积比总体上随土层深度的增大而减小,但是存在波动,这在一定程度上是由土壤水侧向入渗造成的^[20]。相同土层深度条件下,与垂直剖面染色面积比不同的是当土层深度 ≤ 50 cm 时,水平剖面染色面积比在相同土层深度范围内从大到小大多表现为 $G40 > G60 > G20$,可能原因是当入渗水量较少时,入渗水量不能满足优先路径向下输送水分的需求;当入渗水量升高到一定程度时,上层入渗水量超过了垂直优先路径的输送能力,因而沿着水平方向发生侧向流动;而当入渗水量进一步升高时,入渗均匀度升高,垂直入渗强度上升,促进水分向更深层运动。

从土壤垂直剖面 and 水平剖面的染色图像可以看出,不同入渗水量条件下,土壤优先流在垂直和水平方向均表现出空间异质性,即具有三维空间变异性。

2.1.2 入渗深度空间分布 为了充分揭示入渗深度随入渗水量的变化特征,本文应用 Origin 8.0 绘制了 3 种不同入渗水量条件下最大和实际入渗深度的空间分布图,以分析入渗深度对入渗水量的响应。由图

5 和图 6 可知,最大和实际入渗深度均随着入渗水量的增加而增大,但是在空间上存在较大差异,这与盛丰等^[12,20]和潘网生等^[13]入渗水量 ≤ 60 mm 时的最大入渗深度分布结果相符。

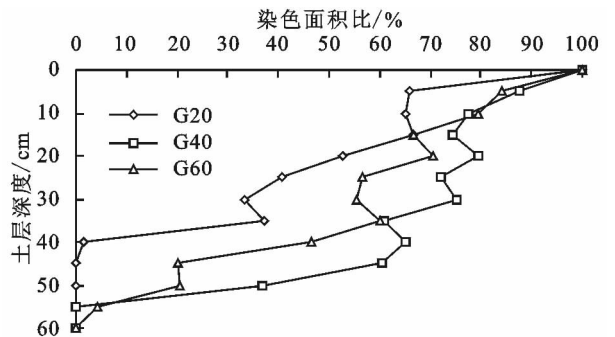


图 4 不同入渗水量条件下水平剖面染色面积比

入渗深度的空间差异性再次证明优先入渗的存在。G20 和 G40 的最大入渗深度变化范围均大于其实际入渗深度,而 G60 虽具有较大的最大入渗深度(60 cm),但是其变化范围明显小于实际入渗深度。最大和实际入渗深度的获取分别基于垂直和水平剖面,前者可以通过挖掘垂直剖面直接获得,后者却由于不能切开所有的水平剖面获得染色结果,而水分的侧向入渗常导致相邻的水平剖面染色结果不一致,因

此受到较大的约束。本研究的最大入渗深度和实际入渗深度的趋势相同,可见二者均可表征入渗深度随入渗水量的变化特征,综合分析可以更全面、真实地反映入渗深度对入渗水量的响应。

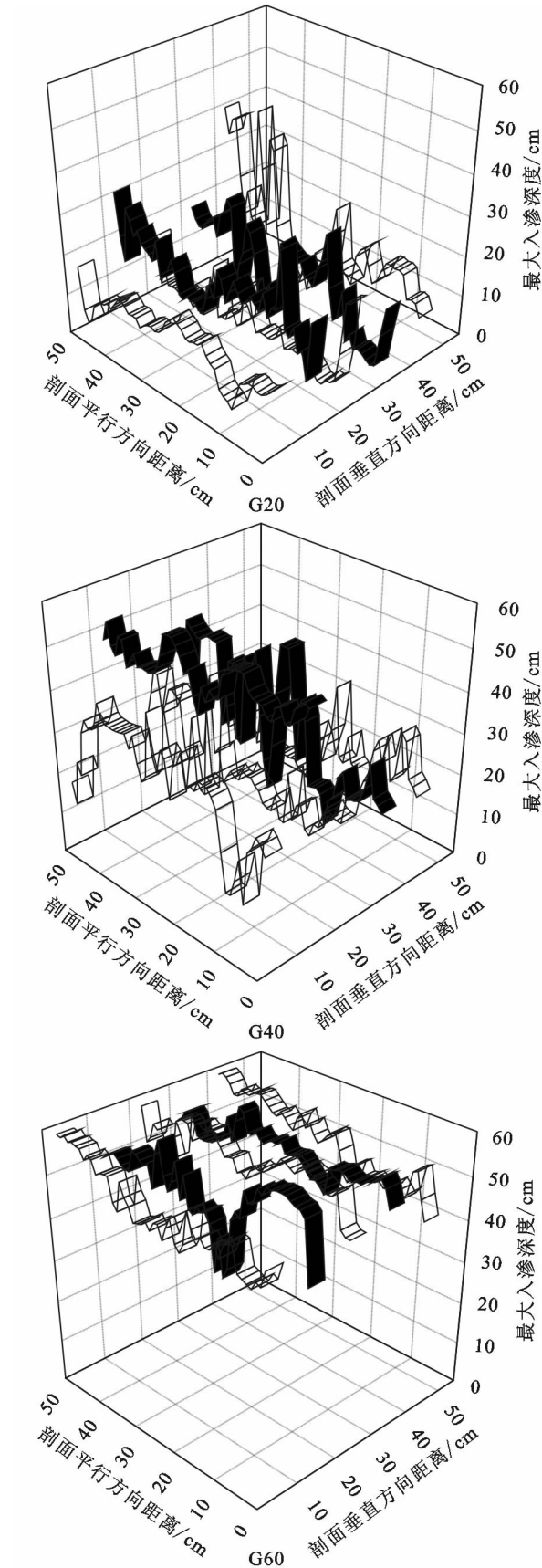


图 5 不同入渗水量条件下最大入渗深度的空间分布

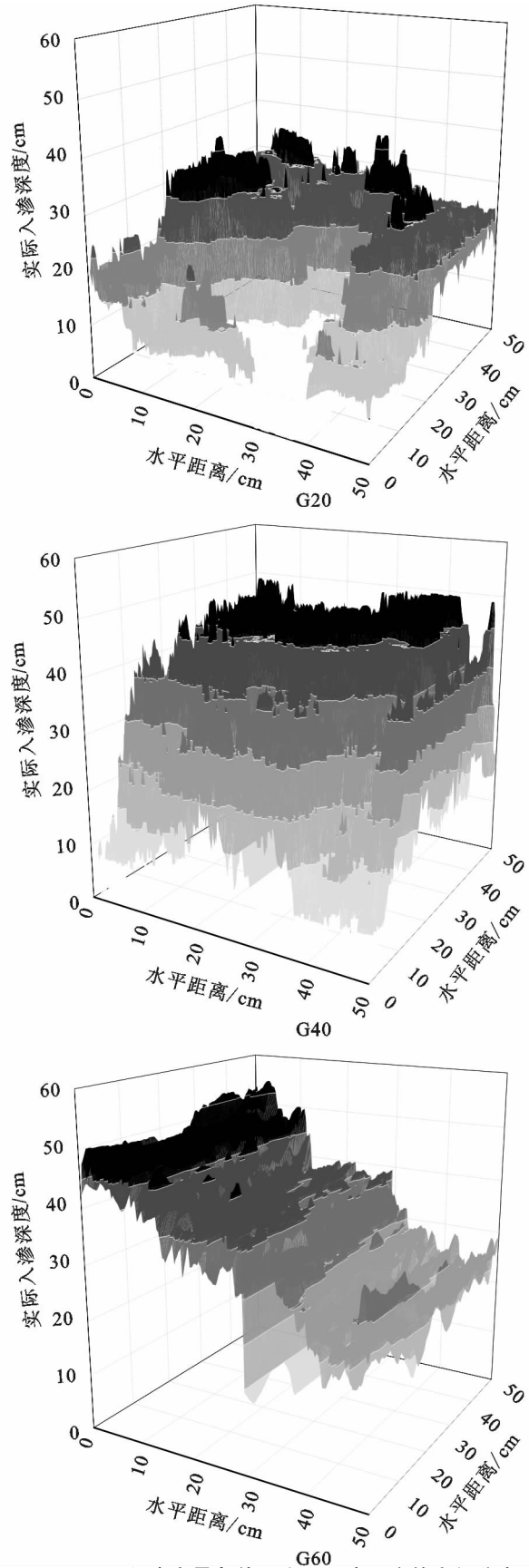


图 6 不同入渗水量条件下实际入渗深度的空间分布

2.2 入渗水量对染色形态特征影响的定量评价

通过对垂直剖面的染色图像进行数据提取和计算,获得不同入渗水量条件下总染色面积比(D_c)、基质流深度(U_F)、优先流比(P_F)和优先流长度指数

(L_i)等土壤剖面染色形态参数,用以分析评价优先流 形态特征和发育程度(表 2)。

表 2 不同入渗水量条件下土壤剖面染色形态特征参数

样地编号	总染色面积比 $D_c/\%$	基质流深度 U_F/cm	优先流比 $P_F/\%$	长度指数 $L_i/\%$
G20	16.24±8.86a	2.23±1.59a	74.19±14.69b	314.04±67.96a
G40	35.06±14.01a	13.27±7.90a	34.33±16.37a	566.11±221.27b
G60	59.86±18.31b	19.26±21.07a	56.24±40.71ab	791.77±204.55b

注:同一列的不同字母表示在 0.05 水平上差异显著。

入渗水量的增加可在一定程度上增大土壤剖面染色面积。其中,G60 的总染色面积比显著高于其他 2 种处理,分别是 G20 和 G40 的 3.7,1.7 倍。G40 的平均总染色面积比是 G20 的 2.2 倍,但是相同处理的各垂直剖面之间染色面积的较大差异性导致二者的总体差异并不显著。

G20、G40 和 G60 的基质流深度分别为总染色深度的 5.95%,26.24%和 32.14%,入渗水量的增加虽然对基质流深度及其所占比例有一定的促进作用,但是 3 种处理间的基质流深度并没有显著差异。G60 的基质流深度变化的标准差为 21.07 cm,大于其平均基质流深度;G20 和 G40 基质流深度变化的标准差相对于其平均基质流深度也较大,说明水流在各种处理内部存在非均匀流动,即存在优先流;三者的优先流比(P_F)则进一步证明了该结果。G20 和 G60 的平均优先流比均超过 50%,且二者不存在显著差异,但 G20 的优先流比却显著大于 G40。

长度指数(L_i)可以较好地反映优先流和基质流的差异性,该指标数值越大表示优先流程度越高^[5]。由表 2 可知,长度指数随着入渗水量的增大而增大,且 G40 和 G60 显著高于 G20,优先流程度较高,但二者之间无显著差异。

通过对以上各染色形态特征参数的分析可以发现,除优先流比外,其他染色形态参数均随着入渗水量的增加而增大。优先流比和优先流长度指数虽然都是衡量优先流的参数,但是前者为整个优先流区域占全部染色区的比例,而后者则重点描述不同土层的差异,因此 G40 的优先流比虽然较小,但是不同土层之间的差异却比较大,因而具有较大的优先流长度指数。此外,不同入渗水量条件下,各形态参数内部之间存在一定的差异,但较大的标准差降低了这种差异性,可能是因为优先流空间分布的不均匀性导致每个处理的不同垂直剖面间染色形态特征参数存在较大的差异,从而减小了不同处理间的差距。

将入渗水量和土壤剖面染色形态特征参数进行相关性分析(表 3),结果表明,入渗水量与总染色面积比及长度指数呈显著正相关;入渗水量的增加可在一定程度上增大基质流深度的同时抑制优先流比。总染色面积比与基质流深度以及长度指数呈显著正

相关关系,但与优先流比呈显著负相关关系,可见总染色面积的增大促进了基质流的发育,加大了优先流与基质流的差异性,却减小了优先流比。基质流深度与优先流比呈显著负相关,但与长度指数呈显著正相关,表明基质流的增大在抑制优先流的发育的同时,还会增大二者的差异性。

表 3 入渗水量与土壤剖面染色形态特征参数相关性分析

参数	入渗水量	总染色面积比 D_c	基质流深度 U_F	优先流比 P_F	长度指数 L_i
入渗水量	1				
总染色面积比 D_c	0.811	1			
基质流深度 U_F	0.510	0.858	1		
优先流比 P_F	-0.253	-0.581	-0.834	1	
长度指数 L_i	0.774	0.770	0.525	-0.302	1

注: ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关; * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

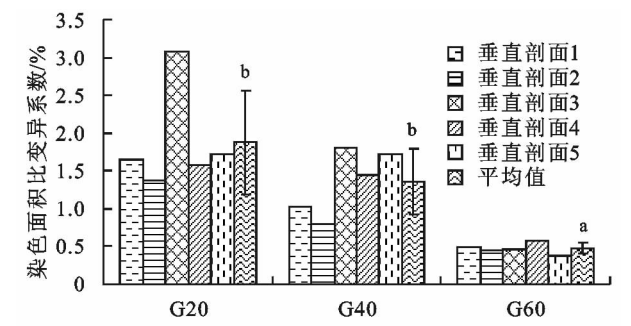
2.3 入渗水量对土壤优先流变异性特征的影响

通过对优先流区染色面积比变异系数(C_V)、最大入渗深度变异系数(C_μ)和实际入渗深度变异系数(C_u)进行分析,以揭示不同入渗水量条件下土壤优先流的非均匀性特征。

2.3.1 优先流染色面积变异性分析 为了准确分析优先流的变异性特征,在剔除基质流区的前提下获取土壤垂直剖面优先流区染色面积比变异系数(C_V)。从图 7 可以看出, C_V 随着入渗水量的增加而减小,且 G60 的染色面积比变异系数显著小于 G20 和 G40,说明 G20 和 G40 优先流区不同土层的染色面积变化趋势相似,均具有较大的变异性,且显著高于 G60。由图 3 可知,平均染色面积比从大到小表现为 $G60>G40>G20$,但是 3 种处理的染色面积比具有相似的标准差变化范围,因此 C_V 越小,优先流发育程度越高,这与吴庆华等^[19]的研究结果相似。由此可知,G60 的优先流发育程度最高,G40 次之,G20 最小,与优先流长度指数的分析结果相同。与 C_V 的变化趋势相似,其标准差也随着入渗水量的增大而减小,说明入渗水量的增加可以减小每个处理内部优先流空间分布的非均匀性。

2.3.2 优先流入渗深度变异性分析 G20、G40 和 G60 的最大入渗深度变异系数(C_μ)和实际入渗深度变异系数(C_u)分别为 0.52,0.27,0.07 和 0.50,0.07,0.41。

前者随着入渗水量的增加而减小,可见入渗水量对最大入渗深度的非均匀性影响明显,入渗水量的增加可以减小最大入渗深度的非均匀性,对实际入渗深度的影响则更加复杂。由于 C_{μ} 和 C_u 分别从垂直和水平染色剖面获取,该结果可以归因于入渗水量的增加可以增加水分垂直运动的均匀性,从而减小最大入渗深度间的标准差,进而减小 C_{μ} ;而 G40 中水流明显的侧向运动使其实际入渗深度变化较小,从而导致其具有最小的实际入渗深度变异系数。



注:图中不同字母表示在 0.05 水平上差异显著。
图 7 不同入渗水量条件下垂直剖面优先流区染色面积比变异系数

C_{μ} 和 C_u 分别从垂直和水平剖面两个角度阐述了不同入渗水量条件下优先流入渗深度的变异性特征。结果表明,当入渗水量为 20 mm 时,二者基本相同,说明最大和实际入渗深度具有相同的变化趋势。当入渗水量为 40 mm 和 60 mm 时,二者的差异较大,可能是由于水分垂直入渗和侧向运动的程度不同造成的。

综上所述,本研究通过垂直和水平剖面综合分析了入渗水量对优先流的影响并进行了定量评价。研究结果较全面而真实地反映了入渗水量对优先流的影响,可以为合理灌溉、减少水分损失、降低优先流的危害提供一定的理论依据。但本文仅对草地进行了分析和评价,今后可以对该地区其他不同土地利用类型进行深入研究,以揭示该地区土壤优先流对入渗水量的响应,从而为区域水分管理提供一定的技术支持。

3 结论

通过染色示踪试验,定量评价了入渗水量对四面山草地的影响,主要结论为:

(1)染色面积比基本上随着土层深度的增加而减小,但是具有较大的空间异质性;当入渗水量为 20 mm 和 40 mm 时,染色面积比分别从 3 cm 和 12 cm 处开始显著下降,而当入渗水量升高到 60 mm 时,水分运动的均匀程度增强。

(2)入渗水量为 20 mm 和 40 mm 对应的最大入渗深度的变化范围均大于实际入渗深度;入渗水量为 60 mm 对应的最大入渗深度虽然高达 60 cm,但是其变化范围明显小于实际入渗深度,说明入渗水量对土壤水分的运动方向具有重要影响。

(3)入渗水量对土壤染色形态参数的影响不同,总染色面积比和优先流长度指数与渗透水量呈显著正相关($P<0.01$);在一定程度上,入渗水量的增加可以在增加基质流深度的同时减小优先流比。

(4)3 种入渗水量(20,40,60 mm)对应的染色面积比变异系数为 1.88,1.36,0.47,最大入渗深度变异系数为 0.52,0.27,0.07,实际入渗深度变异系数为 0.50,0.07 和 0.41,说明入渗水量的增加可以减弱优先流区染色面积比和最大入渗深度的变异程度,但对实际入渗深度的影响则更为复杂。

参考文献:

[1] Hardie M A, Cotching W E, Doyle R B, et al. Effect of antecedent soil moisture on preferential flow in a texture-contrast soil[J]. Journal of Hydrology, 2011, 398 (3):191-201.

[2] 吴庆华,朱国胜,崔皓东,等. 降雨强度对优先流特征的影响及其数值模拟[J]. 农业工程学报, 2014, 30 (20): 118-127.

[3] Lipsius K, Mooney S J. Using image analysis of tracer staining to examine the infiltration patterns in a water repellent contaminated sandy soil[J]. Geoderma, 2006, 136(3):865-875.

[4] 梁建红,吴艳宏,周俊,等. 土壤类型对优先流路径和磷形态影响的定量评价[J]. 农业机械学报, 2017, 48(1): 220-227.

[5] 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.

[6] Zeng Y, Gantzer C J, Payton R L, et al. Fractal dimension and lacunarity bulk density determined with X-ray computed tomography[J]. Soil Science Society of America Journal, 1996, 60(6):1718-1724.

[7] 吕文星. 三峡库区 3 种土地利用方式优先流特征及其对硝态氮运移的影响[D]. 北京:北京林业大学, 2013.

[8] Holden J. Flow through macropores of different size classes in blanket peat[J]. Journal of Hydrology, 2009, 364(3/4):342-348.

[9] Stumpp C, Maloszewski P. Quantification of preferential flow and flow heterogeneities in an unsaturated soil planted with different crops using the environmental isotope $\delta^{18}\text{O}$ [J]. Journal of Hydrology, 2010, 394(3):407-415.