

桂北岩溶区典型农地土壤优先流特征

李振东¹, 朱彦光¹, 陈晓冰^{1,2}, 甘磊^{2,3}, 张宗急⁴, 方荣杰¹, 程芳丽⁴

(1.桂林理工大学 环境科学与工程学院, 广西 桂林 541004; 2.桂林理工大学,
广西岩溶地区水污染控制与用水安全保障协同创新中心, 广西 桂林 541004; 3.桂林理工大学,
广西环境污染控制理论与技术重点实验室, 广西 桂林 541004; 4.桂林市农业科学院, 广西 桂林 541004)

摘要:以广西桂北岩溶区的 3 种典型农地为研究对象,通过野外染色示踪试验,结合形态学、数理统计以及分形理论等方法,对岩溶区玉米地、花生地和水稻田的土壤优先流特征进行了研究。结果表明:在相同供水条件下,玉米地土壤水流运动形成的染色形态由大面积的块状变为树枝状,土壤在 20—40 cm 深度范围内存在较多侧向孔隙通道,染色形态表现为由树枝状又变为较小的团块状,而花生地和水稻田的土壤水流运动形成的染色形态均由大面积的块状变为指状,但花生地水分以优先流形式入渗时还伴有一定程度的侧向运移,呈现指状染色形态中夹有较小的团块状染色形态,水稻田指状染色形态中无明显团块;玉米地的平均基质流深度达 5.55 cm,是花生地的 1.18 倍,优先流发生时间相对花生地滞后,水稻田的平均基质流深度仅为 2.36 cm,其最先发生优先流现象;玉米地的平均总染色面积比、优先流比和湿润锋迹线的分形维数(32.09%, 71.59%和 1.34)是花生地的 1.40, 1.04, 1.05 倍,水稻田的平均总染色面积比、优先流比和湿润锋迹线的分形维数分别为 12.55%, 62.03%和 1.26,均小于玉米地和花生地,表现为玉米地优先流发育程度最大,其次为花生地,水稻田优先流发育程度最小。

关键词:优先流; 发育程度; 染色示踪法; 岩溶区

中图分类号:S152.7

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)05-0068-07

Characteristics of Soil Preferential Flow in Typical Farmland in the Karst Area of North Guangxi

LI Zhendong, ZHU Yanguang¹, CHEN Xiaobing^{1,2}, GAN Lei^{2,3},
ZHANG Zongji⁴, FANG Rongjie¹, CHENG Fangli⁴

(1.College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China; 4.Guilin Academy of Agricultural Sciences, Guilin, Guangxi 541004, China; 2.Guangxi Collaborative Innovation Center for Water Pollution Control and Safety in Karst Area, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China; 3.Guangxi Key Laboratory of Environmental Pollution Control Theory and Technology, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract: This paper concentrates on three types of typical farmland in the karst area of north Guangxi. Through field dyeing tracer test, the characteristics of soil preferential flow in corn field, peanut fields and paddy field in karst area were studied by combining with morphological, mathematical statistics and fractal theory. The results show that under the same condition of water supply, the dyeing form of soil water flow in corn field change from massive block to branch shape; the soil has more lateral pore channels in the depth range of 20—40 cm, which shows that the dyeing changes from dendrites to smaller clumps; however, the soil water movement of peanut fields and paddy fields change from massive block to finger-like; when the water infiltrates into peanut fields soil in the form of preferential flow, it is accompanied by a certain degree of lateral migration, that is, there are small clumps in finger-like dyeing form, there were no obvious clumps

收稿日期:2018-11-12

修回日期:2018-12-03

资助项目:国家自然科学基金(41701248, 41301289); 广西自然科学基金项目(2017GXNSFBA198102, 2016GXNSFAA380197); 广西高校科研西南岩溶区典型农地土壤优先流形成及其运动机制研究资助项目(2017KY0270); 广西环境污染控制理论与技术重点实验室研究资助项目(1701K009)

第一作者:李振东(1993—),男,湖北鄂州人,硕士研究生,研究方向为生态水利与节水灌溉。E-mail:lzd404695@163.com

通信作者:陈晓冰(1988—),男,内蒙古赤峰人,博士,硕士生导师,主要从事土壤水分运动与模拟研究。E-mail:jayvision_chen@126.com

in finger-like dyeing patterns of rice fields. The average depth of matrix flow is 5.55 cm in the corn field, which is 1.18 times higher than that of peanut fields. And the occurrence time of preferential flow falls behind that of peanut fields. However, the average depth of matrix flow fields is only 2.36 cm in paddy, and preferential flow is the fastest. The results show that the average total dyeing area ratio, preferential flow ratio and fractal dimension of wet front trace (32.09%, 71.59% and 1.34) of corn field are 1.40, 1.04 and 1.05 times higher than those of peanut fields, and the average total dyeing area ratio, preferential flow ratio and the fractal dimension of wetting front trace in the paddy field are 12.55%, 62.03% and 1.26, respectively. All of them are smaller than corn field and peanut fields. The results showed that the development degree of priority flow is the highest in corn field, followed by peanut fields, and the lowest in paddy field.

Keywords: preferential flow; degree of development; dye tracer method; karst area

优先流是土壤中一种常见的水分运动形式,农田中优先流的发生会使水分携带溶质快速向地下深处入渗^[1],缩短农作物对水肥的吸收时间,造成水肥流失^[2]。并且,肥料随水分运移到地下深层还会增大地下水受污染的风险,破坏环境^[3-5]。

广西岩溶地貌广泛分布,全区共有 81.86 万 hm^2 的石灰土壤,其中有 20.41 万 hm^2 用于耕地使用^[6]。岩溶这种特殊的地质条件,形成的土壤裂隙和孔隙高度发育,优先流现象普遍发生^[7]。国外对岩溶区的优先流研究较早且已取得一定成果,基于优先流运动特点,Ayadi 等^[8]采用同位素示踪法研究了地中海岩溶区地下水质变化,Pacheco 等^[9]采用层次聚类分析方法研究了岩溶区地下水时空变化过程。此外,Paquette 等^[10]采用同位素示踪法研究了岩溶区冻土径流机制和优先流路径中水分含量变化。而我国对于优先流的研究也主要集中在东北黑土区^[11]、黄土高原区^[12]、南方花岗岩^[13]、南方紫砂岩区^[14]等地,随着研究的深入和对岩溶区生态环境的逐渐重视,一些学者也开始逐步对岩溶区优先流开展相关研究^[6]。但对于岩溶区农地优先流,目前国内外研究较少。优先流的影响因素较多,在不同环境下优先流特征也存在一定差异性,王发等^[15]对退耕和耕作的农地优先流现象进行研究发现,耕作方式的不同使得土壤结构改变,发育有不同特征的土壤孔隙,进而改变土壤中优先流特征。也有研究表明,不同利用类型的土壤与优先流现象的发生存在着一定联系^[16],不同植物和不同的耕作方式对土壤环境的影响不相同,进而对优先流的发育也有不同的影响。陈国靖等^[17]对宁夏林地和草地的土壤结构进行研究,发现人类耕作活动会破坏土壤团聚体,而土壤中团聚体越多,土壤孔隙发育情况越好,优先流的通道更多。但是对于岩溶区不同农地间的土壤环境差异,特别是农作物种类差异会对优先流的发生及其变化产生何种影响,仍缺少相关分析研究。

针对以上问题,本文以广西桂北岩溶区 3 种典型

农地,即玉米地、花生地和水稻田的土壤优先流为研究对象,通过野外染色示踪法,结合图像形态学、数理统计以及分形理论等方法,分析研究桂北岩溶区不同农地土壤间的优先流特征,为西南岩溶区土壤水分运动理论发展提供一定基础,也为岩溶区合理利用土地资源,提高施肥和灌溉效率,减少地下水受污染提供一定科学指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于广西桂林市农业科学院农作物种植试验区内,地理位置为 $25^{\circ}4'N$, $109^{\circ}44'E$ 。研究区内地势平坦,平均海拔高度 160 m,属于亚热带季风气候,多年平均降水量 1 894 mm,年平均气温 18.5°C 。试验时间为 2017 年 12 月 1 日至 2018 年 1 月 15 日。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选择与布设 在研究内选取 3 块分别种植有玉米(YM)、花生(HS)、水稻(SD)的农地,农地尺寸均为长 15 m 和宽 20 m,且 3 块试验地均未进行翻耕。3 块样地施肥水平分别为:玉米地施基肥复合肥 37.50 g/m^2 ,钙镁磷肥 15.00 g/m^2 ,追施尿素 15.00 g/m^2 ,硫酸钾 15.00 g/m^2 ,复合肥 52.50 g/m^2 ;花生地基肥施用钙镁磷肥 75.00 g/m^2 ,花期喷施 2 次叶面肥(磷酸二氢钾和硼肥);水稻田基肥施复合肥 60.00 g/m^2 ,追肥施尿素 18.75 g/m^2 ,氯化钾 15.00 g/m^2 。在 3 块农地内的作物种植带之间分别随机选取 4 个试验观测点,同一样地间每个试验点间隔至少 2 m,清理表面枯枝落叶和杂草。然后将长、宽、高分别为 60 cm,60 cm 和 30 cm 的矩形金属样框垂直缓慢砸入土壤中,砸入深度为 15 cm,以形成染色试验观测样方,且在样方上覆盖聚乙烯塑料薄膜进行预处理,以保证样地在染色试验前的土壤前期含水量相近,时间为 24 h。样地基本情况见表 1。

1.2.2 染色示踪试验 24 h 后移除塑料薄膜,以当

地累积 24 h 降雨量 25 mm 为试验标准,配置 9.5 L 且溶液浓度为 4 g/L 的亮蓝溶液,用带有恒流泵的喷头以 150 ml/min 的速度均匀喷洒到金属样方内的土壤中(图 1)。喷洒结束后,再将塑料薄膜继续覆盖在金属样方上。24 h 后移除薄膜和金属样方,选取样方中间 50×50 cm 的区域染色土壤进行染色剖面垂直挖掘,挖掘方式为每层 10 cm 的垂直深度,且最大挖掘深度为 50 cm,即本研究最大染色深度。并使用高分辨率的数码相机对土壤垂直染色剖面进行拍摄,拍摄过程中配测量标尺和灰阶比色卡,以获取土壤垂直染色剖面图像。

表 1 样地基本情况

样地	海拔/ m	坡度/ (°)	种植 年限/a	土壤前期含水量/ (m ³ ·m ⁻³)
玉米地	160	0	3	0.379
花生地	160	0	3	0.393
水稻田	160	0	3	0.413

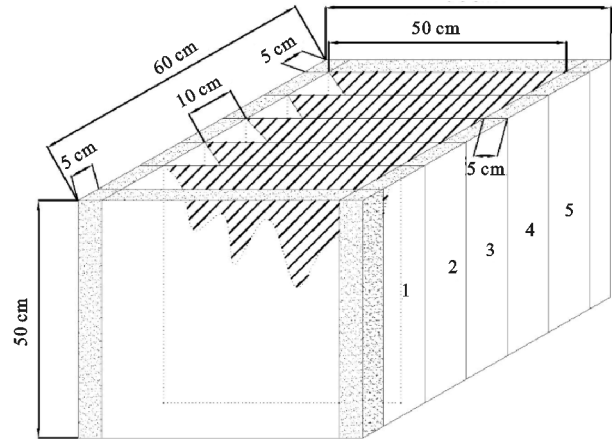


图 1 染色剖面处理示意图

1.2.3 土壤染色图像处理 在得到土壤染色剖面图像后,利用 ERDAS IMAGINE 2016 软件对其进行校正处理,并使用 PhotoshopCS 6.0 将校正后的图像进行裁剪,本研究裁剪后的尺寸为 500×500 pixels,并继续对图像进行颜色替换,将土壤染色部分替换成黑色,土壤未染色部分替换成白色,最后形成黑白二色图。再将得到的图像进行阈值调整和降噪,使替换颜色后的图像与染色原始图像相一致。最后将所得图像导入 Image Pro Plus 6.0 软件中,利用软件分割和计数功能将图像转换成由 0(黑色)和 255(白色)组成的二值数据矩阵,导入到 Excel 中,再进行相应参数计算分析。

1.2.4 优先流特征参数

(1) 染色面积比。染色面积比^[18]是将染色剖面图分成若干层,本文取每层厚度为 1 mm。将每张染色图片转换成数值矩阵后,计算每层黑色像素点所占

比例,即染色面积比。表达式为:

$$DC = \left(\frac{D}{D + ND} \right) \times 100\% \tag{1}$$

式中:DC 为每层染色面积比(%);D 为每层黑色像素面积(mm²);ND 为每层白色像素总面积(mm²)。同理,统计数值矩阵中黑色像素总面积比上剖面总面积即可得总的染色面积比。

(2) 基质流深度。基质流深度^[19]是指土壤中水分以基质流形式运动的垂直深度,单位为 mm。本文将染色面积比大于等于 80% 的土层深度定义为基质流深度。

(3) 优先流比。优先流比^[19]是指土壤染色剖面中,优先流区域的面积占总染色面积的比值。表达式为:

$$PF-fr = \left(1 - \frac{UniFr \cdot W}{TotStAr} \right) \times 100\% \tag{2}$$

式中:PF-fr 为土壤优先流比(%);UniFr 为基质流深度(mm);W 为土壤剖面染色宽度(mm);TotStAr 为土壤剖面总染色面积(mm²)。

1.2.5 分形维数 土壤优先流形成的湿润锋迹线具有不规则和无序的复杂几何形态,因此可以用分形维数来表征土壤优先流湿润锋迹线的形态特征,从而反映土壤优先流的发生程度。同时,分形维数不仅可以用来分析单位长度线的特征,还可以对比图形的复杂性^[20],而土壤染色形态具有不规则和无序性,亦可用分形维数来分析其土壤染色形态特征。

本文采用计盒法来分析湿润锋迹线和染色形态的分形维数,取边长为 r 的正方形盒子覆盖图像,则有一部分盒子不会覆盖在图像上,将覆盖在图像上的盒子数定为 N(r),然后将 r 缩小则 N(r)会增大,当 r 趋近于 0 时,则得到湿润锋迹线和染色图形的分形维数 F_D^[21-22]。表达式为:

$$F_D = - \lim_{r \rightarrow \infty} \frac{\lg N(r)}{r} \tag{3}$$

式中:F_D为分形维数;N(r)为覆盖在图形上的盒子数;r 为盒子边长。

当湿润锋迹线分形维数等于 1 的时候,表示此时入渗的水流为均匀流,当分形维数大于 1 的时候,表示此时发生优先流,而分形维数越大则优先流现象越明显^[23]。同理染色形态分形维数越大,表示染色形态越不规则,即土壤优先流现象越明显。本文在获取土壤染色图像的染色形态图片和湿润锋迹线后,采用 ImageJ 软件来计算湿润锋迹线的分形维数。

2 结果与分析

2.1 土壤染色形态分析

对 3 种典型农地进行野外染色示踪试验,得到土

壤染色形态垂直剖面,以分析土壤染色形态特征。每个典型农地分别开挖得到 20 个垂直剖面,总计 60 张

土壤染色形态图像。本文仅分别在每种农地中选取 1 个具有代表性的染色剖面进行形态特征分析。

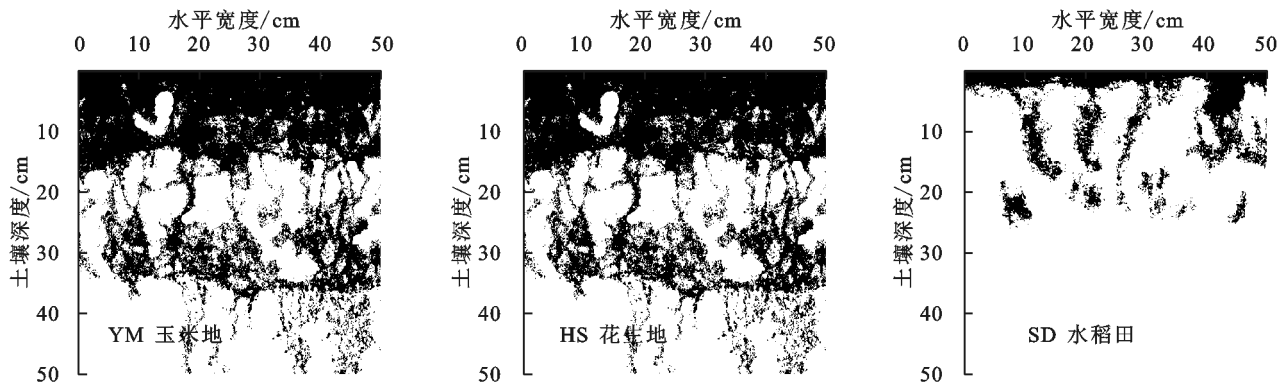


图 2 不同农地土壤染色形态

从图 2 中可以看出,玉米地在 0—15 cm 深度范围内的土壤出现大面积团块状染色形态,随后出现明显的树枝状染色形态,上下连通性较好。在 20—35 cm 深度范围染色形态呈团块状,与上层树枝状染色形态联通。团块状染色形态的出现表明在这一深度范围内存在较多侧向孔隙,水分以侧向运动为主。在 35—50 cm 土层深度处虽然也存在团块状染色形态,但较 20—35 cm 深度范围的团块状染色形态黑色像素点更少,说明在这一深度范围内土壤孔隙开始减少,水分入渗形式以垂向运移为主,随着时间推移,水分入渗深度可达 50 cm。而花生地仅在 0—10 cm 深度范围出现大面积的团块状染色形态,随后染色形态呈指状分布。在相同外部条件下,花生地大面积染色形态深度范围较小,则更快出现染色形态分化现象。从图中可以看出在 4 cm 深度之后染色形态呈团块状,说明此时优先流现象已开始发生,但水分入渗形式主要还是以侧向流动为主,优先流现象较玉米地更弱。花生地表层为熟土,下层为生土,果实生长在土壤表层且呈簇状生长,生长过程中果实膨胀长大^[24],这也使得土壤表层结构疏松,存在较多侧向孔隙,水分入渗较为迅速。同时花生生长在表层,深层土壤受

植物影响较小,孔隙发育程度相对表层较小,表现为在土壤 15 cm 深度之后开始出现 3 条明显的指状染色形态和少数面积较小的团块状染色形态,说明其中存在侧向孔隙通道,水分在快速向下入渗的过程中发生了侧向运移,但水分入渗主要还是以向下运移为主。而玉米地相比花生地染色分化剧烈,水分快速向下运移现象更为明显。在 46 cm 深度之内花生地染色达到最大深度,相比玉米地达到 50 cm 染色深度,花生地水分入渗能力较弱。对比玉米地和花生地,水稻田大面积染色形态仅出现在 0—4 cm 深度范围内,表明水稻田出现染色形态分化现象相对玉米地和花生地更快。在 4—28 cm 深度范围出现 4 条指状染色形态和少量团块状染色形态,染色形态连通性较好。水分入渗以垂向入渗为主,伴有少量侧向运移现象。水分在经过土壤表层大面积入渗后,沿着 4 条明显的孔隙通道快速向下入渗,在土层深度 28 cm 达到最大染色深度,相比玉米地和花生地,优先流现象较弱。

2.2 土壤优先流变化分析

分别对玉米地、花生地、水稻田的 20 个土壤垂直染色剖面图像进行处理,得到基质流深度、染色面积比、优先流比和最大染色深度 4 个优先流特征参数。

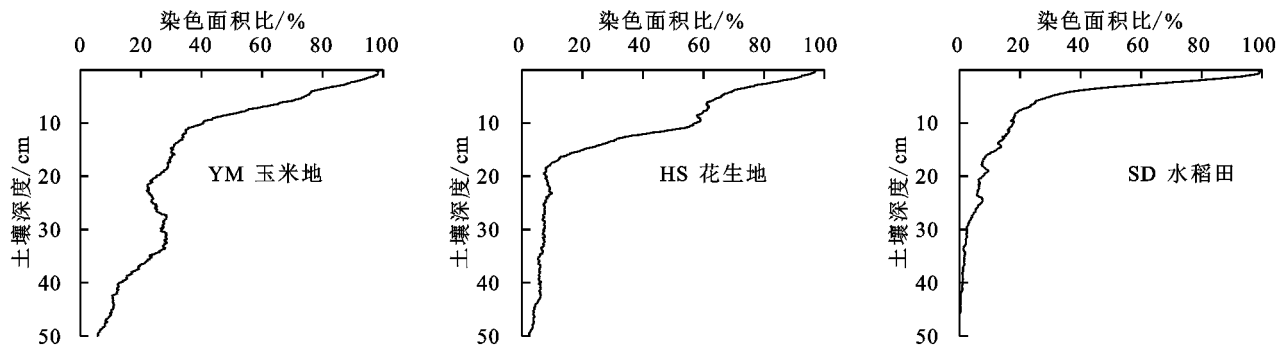


图 3 3 种样地土壤染色面积比

从图 3 中可以看出,玉米地的土壤染色面积比均随土层深度的增加呈先减小再增大再减小的“W”型变化,在土壤 0—20 cm 深度范围内染色面积比快速

减小,在 20—40 cm 深度范围出现明显波峰(28.74%)。主要是由于这一深度范围染色形态呈团块状,染色面积较大,因此染色面积比出现波峰型变化。而花生

地土壤染色面积比随深度呈“S”型变化,水分在以基质流入渗后染色形态开始分化,土壤染色面积比迅速减小。由于花生生长特性,导致土壤表层孔隙发育,水分在快速向下入渗时还伴有侧向入渗的现象,表现为团块状的优先流染色形态,因此在这一深度范围内土壤染色面积比减小的趋势变缓。之后出现数条竖直的孔隙通道,其形成的染色面积小于团块状的染色面积,土壤染色面积比减小的趋势加快后又减缓。相比玉米地和花生地。水稻田染色面积比随深度变化曲线呈“L”型,在 0~10 cm 深度范围快速减小,在 10—48 cm 深度范围内变化趋势减缓。对比图 2 可以发现,水稻田在 0—4 cm 出现大面积染色形态,随后分化为 4 条指状染色形态。在 0—10 cm 染色面积比减小 80.78%,而 10—50 cm 染色面积比仅减小 17.69%,即图 3 中土壤染色面积比从快速变化到变化趋势减缓的过程。

基质流深度即水分以基质流形式入渗的深度范围,从而表征优先流现象发生的快慢程度^[19]。从表 2 可以看出,基质流深度最大的是玉米地(5.55 cm),其次是花生地(3.81 cm),水稻田基质流深度最小(2.36 cm)。说明在相同外部供水条件下,水稻田最先发生优先流,其次为花生地,玉米地发生优先流现象较为滞后。但从图 2 和图 3 中我们可以看出,玉米地最晚发生优先流现象,但优先流现象更明显,即表现为在 15~50 cm 深度发育有大面积的树枝状和团块状染色形态,染色形态深度达 50 cm。从总染色面积比、优先流比、

最大染色深度 3 个参数也可以看出。在相同外部条件下,玉米地的总染色面积比(33.50%)分别是花生地(22.84%)和水稻田(12.55%)的 1.47 倍和 2.67 倍;最大染色深度(49.36 cm)大于花生地(43.99 cm)和水稻田(30.92 cm),三者差异性显著($p<0.05$)。优先流比即水分入渗过程中优先流所占比重^[23],见表 1,玉米地优先流比最大(71.59%),其次为花生地(68.58%),而水稻田(62.03%)最小。在相同外部条件下,玉米地总染色面积比和最大染色深度、优先流比均最大,即玉米地中水分入渗能力较强,优先流现象明显,其次为花生地,水稻田因土壤中水分长期处于过饱和状态,前期含水量较高,水分入渗深度较小,也因此优先流现象相对玉米地和花生地较弱。

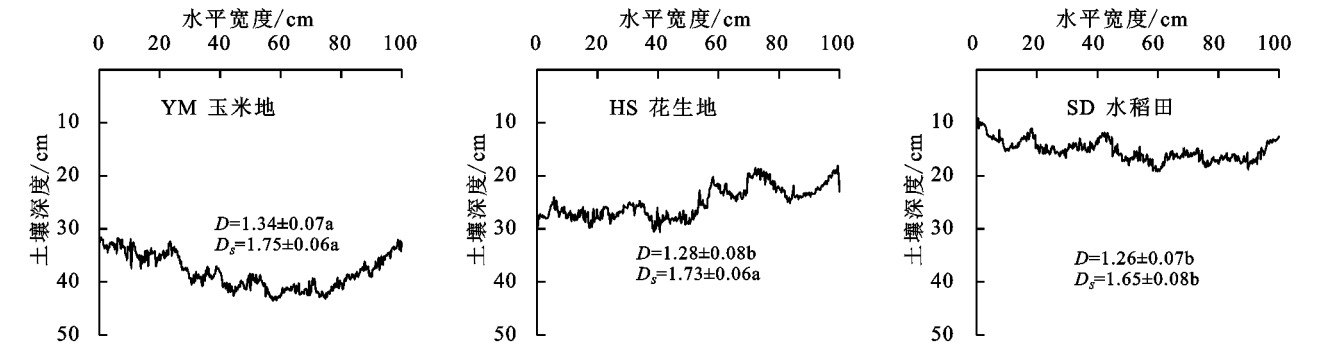
表 2 不同农地土壤优先流特征参数

样地	基质流 深度/cm	总染色 面积比/%	优先 流比/%	最大染色 深度/cm
玉米地	4.51±2.96a	32.09±11.54a	71.59±12.17a	49.36±2.75a
花生地	3.81±3.14ab	22.84±7.49b	68.58±21.18a	43.99±6.56b
水稻田	2.36±0.96b	12.55±3.43c	62.03±11.64a	30.92±9.16c

注:表中数据均为平均值±标准差, $n=20$;同列数据不同字母表示差异显著($p<0.05$)。

2.3 土壤优先流发育程度分析

土壤优先流现象形成的湿润锋迹线和染色形态具有不规则和无序的复杂几何形态,分形维数越大,土壤湿润锋迹线和染色形态特征越不规则,即优先流发育程度越高^[20-23],结果如图 4 所示。



注: D 表示湿润锋迹线分形维数; D_s 表示染色形态分形维数。

图 4 不同农地湿润锋迹线与染色形态分形维数

图中曲线分别为 3 种典型农地的平均湿润锋迹线,玉米地的湿润锋迹线在 30—45 cm 深度范围内,斜率为 0.42,无明显平缓的湿润锋迹线,说明玉米地在 0—50 cm 水平宽度范围均有优先流活动。而花生地湿润锋迹线在 15—32 cm 深度范围之内,水分入渗深度小于玉米地。在 0—25 cm 水平宽度范围之内变化较为平缓,即这一宽度内水分入渗深度相似,即无明显的优先快速入渗现象。在 25—50 cm 水平宽度湿润锋迹线呈波浪形变化,有 4 个明显的波峰,波峰

的出现说明有 4 条较发育的孔隙通道,水分沿着这些通道快速向下入渗,优先流主要出现在 25—50 cm 水平宽度范围。相对于花生地和玉米地,水稻田湿润锋迹线在 8—20 cm 深度范围之内,水分入渗能力最弱。同时在 0—30 cm 水平宽度湿润锋迹线呈波浪形变化,整体缓慢向下延伸,但波动幅度相对玉米地和花生地较小,在 30—50 cm 水平宽度范围变化较为平缓,说明水稻田存在快速向下运移的入渗水流,主要在 0—20 cm 水平宽度范围活动,即优先流现象发育。

通过湿润锋迹线可以表征3种典型农地均有优先流现象发生,且玉米地存在数条优先流通道使得水分在其中快速向下入渗。而花生地仅部分宽度范围湿润锋迹线波动较大,湿润锋深度范围小于玉米地。相对于玉米地和花生地,水稻田湿润锋迹线深度范围最小,随深度变化趋势更为平缓。湿润锋迹线可以定性的分析3种典型农地优先流现象,而本文引入分形维数对优先流进行定量评价。湿润锋迹线的平均分形维数由大到小表现为玉米地(1.34)、花生地(1.28)、水稻田(1.26)。玉米地湿润锋迹线分形维数最大,即其不规则性最高,因此优先流发育程度相对最高。花生地和水稻田的湿润锋迹线分形维数差异性不显著($p>0.05$),但通过湿润锋迹线的分析发现,花生地相比水稻田水分入渗深度更大,且湿润锋迹线变化更为明显。同时对3种典型农地染色形态分形维数分析发现,玉米地染色形态分形维数最大(1.75),这也进一步说明了,玉米地优先流发育程度最高。其次为花生地(1.73),水稻田染色形态分形维数最小(1.65),两者染色形态分形维数差异性显著($p<0.05$),说明花生地染色形态相比水稻田更为复杂,即花生地优先流发育程度相比水稻田更高。

3 讨论

田间土壤水分入渗包括基质流和优先流入渗形式,基质流深度即土壤中基质流发生的深度范围。基质流深度越大,土壤中发生基质流的时间越长,相对的优先流现象的发生则越滞后^[19]。本文研究得出玉米地基质流深度分别是花生地和水稻田的1.18倍和1.91倍,说明玉米地优先流现象发育相对滞后,而水稻田最先发育优先流现象。然而对于基质流深度的大小是否也表征优先流现象的强弱,张东旭等^[23]对3种不同农地优先流研究结果显示,南瓜地、柑橘地、玉米地基质流深度和平均总染色面积比分别为(2.30 cm, 1.50 cm, 3.50 cm)和(22.80%, 17.26%, 13.87%),南瓜地优先流程度最高,其次为柑橘地,玉米地优先流程度最低,基质流深度的大小与优先流发育程度无相关关系,因此本文还引入了其他参数对优先流进行分析。同时,上述学者研究得出的玉米地基质流深度和平均总染色面积比均小于本研究结果(4.51 cm, 32.09%),这主要受土壤类型的影响。同时,本文研究结果显示玉米地平均总染色面积比分别是花生地和水稻田的1.40倍和2.56倍,三者差异性显著($p<0.05$),染色面积越大,说明水分运动范围越大,间接也说明了土壤中大孔隙越多,更容易发育优先流。Flury等^[18]也指出在相同外部条件下染色面积比越

大,优先流现象更明显,因此相比花生地和水稻田,玉米地的孔隙较为发育,其次为花生地。张中彬等^[25]对红壤区水稻田研究结果显示,水稻田大孔隙主要集中在0—20 cm深度内,而本文水稻田土壤染色部分在0—30 cm深度内,水分会沿着大孔隙快速向下入渗,因此土壤染色部分也可以看作土壤中孔隙的分布,本文水稻田土壤染色深度范围大于上述学者研究结果,不同土壤类型的情况下,孔隙发育情况也会有所差距,但上述学者和本文对水稻田研究结果均显示大孔隙主要分布范围小于本文研究的玉米地和花生地的大孔隙分布范围,说明水稻田发育优先流的潜力低于玉米地和花生地。

相对于平均总染色面积比描述了整体的水分运动,优先流比则能直观的描述土壤染色区域中优先流发育所形成的染色占比^[23]。陈晓冰等^[6]对不同耕作方式甘蔗地优先流的研究得出,耕作的甘蔗地优先流比(82.89%)小于免耕甘蔗地(88.61%),免耕甘蔗地优先流发育程度较高,而其免耕甘蔗地基质流深度和平均总染色面积比(2.13 cm, 35.13%)均小于耕作甘蔗地(3.08 cm 35.72%)。本文研究得出玉米地的优先流比为71.59%,分别是花生地和水稻田的1.04倍和1.15倍,但玉米地基质流深度和平均总染色面积比均大于花生地和水稻田,与陈晓冰等^[6]得出的优先流比大的甘蔗地基质流深度和平均总染色面积比较小的结果不同,这主要是因为,优先流比是优先流部分染色面积与总染色面积的比值,当玉米地基质流深度和平均总染色面积比均大于花生地和水稻田时,则玉米地和花生地、水稻田的基质流深度与平均总染色面积比的比值不能确定大小,即优先流比可能大也可能小,这也说明仅靠优先流比和基质流深度、总染色面积比并不能完全的得出优先流发育程度大小的结论,需结合其他数据对其进行分析。

吕刚等^[26]对海州露天煤矿复垦排土场种植不同植物的土壤的优先流研究显示,总体趋势上土壤染色面积比随深度增加而减小,同时不同利用类型的土壤优先流染色面积比变化趋势不同,其玉米地染色面积比最大值为44.36%,小于本文结果(98.38%),而其玉米地最大染色面积出现在0—5 cm深度内,本文玉米地最大染色面积出现深度为0—1 cm。耕作会在一定程度上改变土壤的孔隙结构,而不同耕作方式也会改变土壤孔隙的数量与分布,又因为土层越深土壤受耕作和植物根系的影响越小,因此,最大染色面积比均出现在土壤表层,染色面积比随深度变化明显,而染色面积比的差异还说明不同土壤环境会改变土壤水分入渗能力。蒋小金^[11]等对东北典型黑土耕地优先流现象研究的结果显示,水分垂向运移受到阻碍时,开始侧向入渗,此时染色面积比增大,土壤染色形态呈团块状。本文图3显示,玉米地在20—

40 cm 深度范围出现波峰型变化和花生地出现的“S”型变化,这一深度染色面积比变化趋势减缓,同时图 2 中这一深度染色形态部分呈团块状分布,即在团块状染色形态处,水分运动出现了侧向入渗现象。戴翠婷^[27]等对三峡库区不同利用类型紫色土壤优先流研究也发现这一现象,同时其研究结果显示玉米地无明显侧向运移现象,这主要是本研究中的玉米地水分入渗在通过覆土层后受到阻碍,发生侧向运移,部分水分则继续向下入渗形成优先流。花生地和水稻田未出现明显的侧向运移现象,表现为土壤染色面积比随深度变化趋势线较为平滑,说明上下层土壤结构密度的改变会影响土壤水分入渗的方式。

潘网生等^[28]研究认为分形维数可以用来评价湿润锋迹线。而张东旭等^[23]对 3 种农地湿润锋迹线进行研究结果显示,3 种农地分形维数分别为 1.33(南瓜地),1.25(柑橘地),1.23(玉米地),同时南瓜地优先流发育程度最高,玉米地优先流发育程度最低。本文研究玉米地湿润锋迹线分形维数为 1.34,大于上述学者所得结果,说明土壤环境对优先流发育的影响较大。而本文综合染色形态特征和优先流参数特征分析结果显示玉米地优先流发育程度最大,其次为花生地,水稻田优先流发育程度最小。这主要是因为玉米地在植物生长过程中,土壤在灌溉后经历干湿循环,容易发育孔隙,因此水分入渗能力较强,基质流深度大。又由于孔隙数量多且分布范围广,优先流现象较为发育。而花生地植物植株覆盖在土壤表面,减少水分散发,水稻田土壤水分长期处于过饱和状态,孔隙发育相对玉米地较少,且水分的大面积入渗深度相对较小,即更快发生优先流的同时优先流的发育程度也相对较小。沃飞等^[29]对太湖水稻土研究结果显示,3 种水稻土在 0—30 cm 深度发育优先流的能力最强,而本文水稻田平均最大染色深度为 30.92 cm,这也间接说明本文水稻田染色主要集中在 0—30 cm 土层深度内,水分以优先流形式入渗深度小于玉米地和花生地,优先流发育程度相对最低。这一结果也说明了湿润锋迹线分形维数和优先流发育程度呈正相关关系。同时也表明,本文提出的染色形态的分形维数方法也可以表征优先流的发育程度,在一定程度上可以直接对土壤染色形态分形维数进行分析,以简化分析过程。

4 结论

(1) 桂北岩溶区玉米地优先流现象形成的染色形态由树枝状变为团块状再到树枝状,土壤在 20—40 cm 深度范围存在较多侧向孔隙通道;而花生地和水稻田染色形态均呈指状,同时,花生地水分快速向下运移的过程中还伴有明显的水分侧向运移现象。

(2) 相同供水条件下,玉米地的平均基质流深度

达 5.55 cm,是花生地的 1.46 倍,优先流发生时间相对滞后。而水稻田的平均基质流深度仅为 2.36 cm,最快发生优先流现象。

(3) 玉米地平均优先流比为 71.59%,其次为花生地(68.58%),水稻田(62.03%)最小;玉米地的湿润锋迹线分形维数为 1.34,分别是花生地和水稻田的 1.05 倍和 1.06 倍,即玉米地优先流发育程度最高,其次为花生地,水稻田优先流发育程度相对最小。

参考文献:

- [1] Dekker L W, Ritsema C J, Wendroth O, et al. Moisture distributions and wetting rates of soils at experimental fields in the Netherlands, France, Sweden and Germany[J]. *Journal of Hydrology*, 1999,215(1/4):4-22.
- [2] 盛丰,张利勇,吴丹.土壤优先流模型理论与观测技术的研究进展[J].*农业工程学报*,2016,32(6):1-10.
- [3] Chen C, Roseberg R J, Selker J S. Using microsprinkler irrigation to reduce leaching in a shrink/swell clay soil[J]. *Agricultural Water Management*, 2002,54(2):159-171.
- [4] Reichenberger S, Amelung W, Laabs V, et al. Pesticide displacement along preferential flow pathways in a Brazilian Oxisol[J]. *Geoderma*, 2002,110(1):63-86.
- [5] 王彬俨,程金花,张洪江,等.北京市昌平区农地土壤大孔隙形成的影响因素分析[J].*西北农林科技大学学报:自然科学版*,2013,41(5):81-86.
- [6] 陈晓冰,严磊,陈廷速,等.西南岩溶区粉垄耕作和免耕方式下甘蔗地土壤优先流特征[J].*水土保持学报*,2018,32(4):58-66.
- [7] Green R T, Bertetti F P, Miller M S. Focused groundwater flow in a carbonate aquifer in a semi-arid environment[J]. *Journal of Hydrology*, 2014,517(2):284-297.
- [8] Ayadi Y, Mokadem N, Besser H, et al. Hydrochemistry and stable isotopes($\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$) tools applied to the study of karst aquifers in southern mediterranean basin(Teboursouk area, NW Tunisia)[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2018,137:208-217.
- [9] Pacheco Castro R, Pacheco Ávila J, Ye M, et al. Groundwater quality: Analysis of its temporal and spatial variability in a karst aquifer[J]. *Groundwater*, 2018,56(1):62-72.
- [10] Paquette M, Fortier D, Vincent W F. Hillslope water tracks in the High Arctic:Seasonal flow dynamics with changing water sources in preferential flow paths[J]. *Hydrological Processes*, 2018,32(8):1077-1089.
- [11] 蒋小金,王恩姮,陈祥伟,等.典型黑土耕地土壤优先流环绕特征[J].*应用生态学报*,2010,21(12):3127-3132.
- [12] 高朝侠,徐学选,宇苗子,等.黄土塬区土地利用方式对土壤大孔隙特征的影响[J].*应用生态学报*,2014,25(6):1578-1584.

表 4 相关性分析						
类别	孔隙度	粗砂	粉砂	黏粒	有机质	高程
含水率(第 1 次探测)	0.70	-0.49	0.49	0.19	-0.45	0.25
含水率(第 2 次探测)	0.62	-0.59	0.66	-0.65	0.52	-0.49
含水率(第 3 次探测)	0.88 *	0.19	-0.14	-0.68	-0.30	-0.02

注：* 为在 0.05 的水平上相关性显著。

5 结论

(1) 地表沉陷提高了沉降中心位置地表土层土壤水分含量,但是沉降盆地边缘位置由于存在较多永久不能闭合的阶梯型裂缝,致使土壤水分降低,地表沉降改变了土壤水分原始的分布状态。

(2) 地表沉陷增加了地表土壤粉粒的含量,降低了土壤黏粒的含量,同时提高了开采区地表土壤孔隙度,对土壤粗粒及有机质含量影响不大。

(3) 经过相关性分析发现,地表沉陷提高了地表土壤水分含量与土壤孔隙度的正相关关系。

参考文献:

[1] 毕银丽,邹慧,彭超,等.采煤沉陷对沙地土壤水分运移的影响[J].煤炭学报,2014,39(2):490-495.

[2] 邹慧,毕银丽,朱郴韦,等.采煤沉陷对沙地土壤水分分布的影响[J].中国矿业大学学报,2014,43(3):496-500.

[3] 吴艳茹.半干旱地区采煤塌陷对土壤性质影响进展研究[J].内蒙古师范大学学报:哲学社会科学版,2011,40(5):109-112.

[4] 王健.半干旱区采煤塌陷对砂质土壤理化性质影响研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2007.

[5] 赵红梅.采矿塌陷条件下包气带土壤水分布与动态变化特征研究[D].北京:中国地质科学院,2006,75-77.

[6] 臧荫桐,汪季,丁国栋,等.采煤沉陷后风沙土理化性质变化及其评价研究[J].土壤学报,2010,47(2):262-268.

[7] 王健,高永,魏江生,等.采煤塌陷对风沙区土壤理化性质影响的研究[J].水土保持学报,2006,20(5):52-55.

[8] 王琦,全占军,韩煜,等.采煤塌陷对风沙区土壤性质的影响[J].中国水土保持科学,2013,11(6):111-118.

[9] 刘哲荣,燕玲,贺晓,等.采煤沉陷干扰下土壤理化性质的演变:以大柳塔矿采区为例[J].干旱区资源与环境,2014,28(11):133-138.

[10] 韩煜,史娜娜,王琦,等.采煤塌陷干扰下风沙区土壤理化性质变化特征[J].环境科学与技术,2016,39(11):15-19.

(上接第 74 页)

[13] 程金花,张洪江,史玉虎,等.长江三峡花岗岩区林地优先流影响因子分析[J].水土保持学报,2006,20(5):28-33.

[14] 陈晓冰,张洪江,李世友,等.紫色砂岩区不同植被类型土壤优先流特征及其影响因素[J].中国水土保持科学,2014,12(6):42-49.

[15] 王发,付智勇,陈洪松,等.喀斯特洼地退耕和耕作土壤优先流特征[J].水土保持学报,2016,30(1):111-116.

[16] 程立平,刘文兆.黄土塬区几种典型土地利用类型的土壤水稳定同位素特征[J].应用生态学报,2012,23(3):651-658.

[17] 陈国靖,蔡进军,马璠,等.宁夏黄土丘陵区典型林草植被类型对土壤水稳性团聚体的影响[J].水土保持研究,2018,25(5):49-53,60.

[18] Flury M, Flühler H, Jury W A, et al. Susceptibility of soils to preferential flow of water: A field study[J]. Water Resources Research, 1994,30(7):1945-1954.

[19] Schaik N L M B V. Spatial variability of infiltration patterns related to site characteristics in a semi-arid watershed[J]. Catena, 2009,78(1):36-47.

[20] 彭进业,俞卞章,李楠,等.分形维数在灰度图像二值化中的应用[J].小型微型计算机系统,2001,22(8):961-963.

[21] 肯尼思·法尔科内.分形几何:数学基础及其应用[M].沈阳:东北大学出版社,1999.

[22] 杨洋,王卫星.基于差分计盒法和数学形态学的路面裂缝分割和提取方法[J].科学技术与工程,2013,13(23):6746-6750.

[23] 张东旭,张洪江,程金花.基于多指标评价和分形维数的坡耕地优先流定量分析[J].农业机械学报,2017,48(12):214-220,277.

[24] 敖礼林.花生地深翻改土的作用与操作要点[J].科学种养,2017(11):32-32.

[25] Zhang Z B. Characterizing preferential flow in cracked paddy soils using computed tomography and breakthrough curve[J]. Soil & Tillage Research, 2015,146:53-65.

[26] 吕刚,傅昕阳,李叶鑫,等.海州露天煤矿排土场复垦区不同土地利用类型土壤入渗特征[J].水土保持学报,2017,31(3):123-128.

[27] 戴翠婷,刘窑军,王天巍,等.三峡库区高砾石含量紫色土优先流形态特征[J].水土保持学报,2017,31(1):103-108.

[28] 潘网生,许玉凤,卢玉东,等.基于非均匀性和分形维数的黄土优先流特征定量分析[J].农业工程学报,2017,33(3):140-147.

[29] 沃飞,陈效民,方堃,等.太湖地区水稻土大孔隙的 CT 扫描分析与灰色关联评价[J].土壤,2008,40(2):319-326.