

基于色相分割的甘蔗地土壤优先流程度定量评价

姜波^{1,2}, 陈晓冰^{1,2}, 吴晗^{1,2}, 刘俊杰^{3,4}, 刘思佳^{3,4}, 秦梓城^{3,4}

(1.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;

2.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;

3.广西环境污染控制理论与技术重点实验室科教结合科技创新基地,

广西 桂林 541004;4.桂林理工大学环境科学与工程学院,广西 桂林 541004)

摘要:在土壤优先流研究中广泛使用染色图像分析技术,优化提升染色图像分析方法,可促进深入研究土壤优先流运动过程,定量细化分析优先流的发育组成研究。以典型农地甘蔗地作为研究对象,通过野外染色示踪试验,利用色相分割技术,并结合分形与灰色系统理论对 2 种典型耕作方式(垄耕和免耕)的甘蔗地土壤优先流程度进行定量分析与评价。结果表明:在相同外部供水条件下,垄耕甘蔗地土壤空间内的优先流相对于免耕甘蔗地的枝状染色形态呈零散团块状和散点状,垄耕甘蔗地染色等级 1、等级 2 和等级 3 的分形维数均随土层深度增加而减小。垄耕甘蔗地土壤表层(0—10 cm)内发生的“速变”程度的优先流是相同深度下免耕甘蔗地的 12.0 倍,免耕甘蔗地的“活跃”程度优先流平均占比值为 67.4%,是垄耕甘蔗地(54.2%)的 1.2 倍。容重对垄耕甘蔗地优先流发育程度影响最大,优先流程度随容重的增加而降低,而免耕甘蔗地的饱和导水率对优先流发育程度影响最大,优先流程度随饱和导水率减小而降低。垄耕耕作方式会影响甘蔗地田间含水量,加快土壤表层的水流运动,降低深层优先流的发育,减少水分入渗,在一定程度上可以起到蓄水保肥的作用,并能为广西甘蔗种植产业的增产增量相关研究提供技术支撑。

关键词:耕作方式;优先流;发育程度;图像解析;灰色关联

中图分类号:S152.7

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2022)01-0050-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.01.008

Quantitative Evaluation of Soil Preferential Flow Degree in Sugarcane Fields Based on Hue Segmentation

JIANG Bo^{1,2}, CHEN Xiaobing^{1,2}, WU Han^{1,2}, LIU Junjie^{3,4}, LIU Sijia^{3,4}, QIN Zicheng^{3,4}

(1.Guangxi Collaborative Innovation Center for Water Pollution Control and Safety in

Karst Area, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004; 2.Guangxi Key Laboratory of

Environmental Pollution Control Theory and Technology, Guilin University of Technology, Guilin,

Guangxi 541004; 3.Guangxi Key Laboratory of Environmental Pollution Control Theory and Technology for

Science and Education Combined with Science and Technology Innovation Base, Guilin, Guangxi 541004;

4.College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004)

Abstract: The extensive use of dyed image analysis techniques in the research of soil preferential flow, optimization and improvement of dyeing image analysis methods, can promote in-depth study of the movement process of soil preferential flow, and quantitatively refine and analyze the developmental composition of preferential flow. Taking typical farmland sugarcane field as the research object, through field dyeing tracer experiment, using hue segmentation technology, combined with fractal and gray system theory, the preferential flow degree of sugarcane field soil in two typical farming methods (ridge and no-tillage) was quantitative analyzed and evaluated. The results showed that: under the same external water supply conditions, the preferential flow in the soil space of the ridged sugarcane field was scattered, clumpy and dot-like compared to the branch-like staining morphology of the no-tillage sugarcane field. The dyeing grade 1 of the ridged sugar-

收稿日期:2021-08-02

资助项目:国家自然科学基金项目(41701248);广西自然科学基金项目(2017GXNSFBA198102);广西环境污染控制理论与技术重点实验室研究基金项目(桂科能 1701K009)

第一作者:姜波(1995—),男,硕士研究生,主要从事土壤水分模拟研究。E-mail:ab1303589446@163.com

通信作者:陈晓冰(1988—),男,博士,副教授,主要从事土壤水分运动与模拟研究。E-mail:Jayvision_chen@126.com

cane field, the fractal dimensions of 2 and 3 both decreased with the increase of soil depth. The preferential flow of “rapid change” in the top soil layer (0—10 cm) of ridged sugarcane field was 12.0 times that of no-tillage sugarcane field at the same depth, and the average percentage of preferential flow of “active” degree of no-tillage sugarcane field was 67.4%, which is 1.2 times that of ridged sugarcane land (54.2%). Bulk density had the greatest impact on the development of preferential flow in ridged sugarcane fields, and the degree of preferential flow decreased with the increase in bulk density. The saturated hydraulic conductivity of no-tillage sugarcane fields had the greatest impact on the development of preferential flow, and the degree of preferential flow decreased with decrease of saturated hydraulic conductivity. Ridge tillage affects the water content of sugarcane fields, speeds up the movement of water in the soil surface, reduces the development of deep preferential flows, reduces water infiltration, and can play a role in water storage and fertilizer preservation to a certain extent, can provide technical support for industry’s production increase and increase related research of sugarcane planting in Guangxi.

Keywords: tillage method; preferential flow; development degree; image analysis; grey correlation

广西作为甘蔗的主要种植地区之一,蔗田土壤水肥的利用状况一直是甘蔗种植生产中亟需解决的问题^[1]。通过对甘蔗地的土壤结构研究^[2]发现,由于甘蔗种植环境温度较高,土壤孔隙与裂隙高度发育,田间土壤优先流^[3]现象显著发生。优先流现象的发生会导致甘蔗地土壤水分和养分在土壤层中快速下渗和流失,并影响作物田间水肥的利用效率^[4],进而影响甘蔗产量^[1]。

染色示踪^[5]、CT 扫描^[6]、探地雷达^[7]和穿透曲线^[8]等技术方法是目前土壤优先流研究的常用方法。由于染色示踪技术可以直观显示土壤优先流的运动经过区域,进而表征优先流程度与特征,在优先流的研究中被众多学者广泛应用^[9]。通过染色示踪试验,将得到的土壤剖面染色图像结合图像分析技术,再利用形态学解析理论^[10]、生态学分析方法^[11]和几何学分形理论^[4]等对土壤优先流的特征进行分析。目前,在染色试验研究中,多针对优先流染色部分进行整体分析,以获得土壤优先流特征等数据,但缺少对优先流染色开展进一步细化解析,以准确定量反映土壤优先流的不同发育程度。虽然已有学者^[10]基于染色图像解析方法对田间优先流的类型与组成进行了分析,但对图像解析研究下优先流的发育特征及其发育状况组成缺乏定量描述。由于受到土壤高度空间异质性的影响,水流在土壤中运动过程差异显著,土壤染色越深,其水流运动越剧烈^[12]。因此,本研究使用色相分割技术将染色图像进一步开展分析与分类,细化定量描述土壤优先流发育的程度,分析优先流发育程度的组成情况,以精准地描述土壤水分的运动状况,为田间土壤水分的利用提供更为准确的理论支持。

综上,本研究以广西垄耕和免耕方式下的甘蔗地作为研究对象,基于伪彩色图像分析理论和空间映射

原理的色相分割方法对染色图像进行深度分割与分类,并结合分形与灰色关联分析方法,定量细化探究不同耕作方式下的甘蔗地土壤优先流发育程度及其组成,揭示影响优先流程度的主要因素,为耕作方式影响下的不同甘蔗地水分运移规律提供理论分析方法,也为进一步提高蔗田水肥利用效率提供一定的数据分析支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于广西武宣县(23°16′N,109°37′E)的甘蔗种植区内,年均气温为 20.4℃,年均降水量为 1 165.4 mm,属于亚热带季风气候,土壤类型主要为红壤土和石灰土。选择研究区内相邻的 2 块甘蔗地作为研究样地(长 36 m、宽 30 m),其中一块进行垄耕(RD)方式处理,在种植前对试验样地进行翻作,并设置多个垄行,其垄高为 15 cm,垄间距为 100 cm;另一块样地为免耕(NT)样地,不做任何处理。试验时间为 2020 年 7—8 月。

1.2 研究方法

1.2.1 样地布设 随机在垄耕甘蔗地和免耕甘蔗地种植带行间选取 3 个试验区域,并且开展优先流土壤染色示踪试验。在不对土壤产生较大扰动的前提下,首先将试验区域内的甘蔗地土壤表面的枝杆杂草等清理干净,再使用铁锤将特制的矩形金属样方(长、宽、高、厚分别为 60,60,30,0.3 cm)缓慢砸入土壤中,砸入深度为 10 cm,为保证相同处理后的甘蔗样地在染色示踪试验前具有相近的土壤状况,使用聚乙烯塑料薄膜将整个样方覆盖 24 h。

1.2.2 染色示踪试验 24 h 后,将样方上覆盖的塑料薄膜缓慢移除,再将浓度为 4 g/L 的 9.5 L(以当地

实际大雨为标准)亮蓝染色溶液,通过自制稳定恒流喷洒装置以 150 mL/min 的流量均匀喷洒在样方土壤中。待全部溶液喷洒完毕后,再次使用聚乙烯塑料薄膜覆盖样方 24 h。24 h 后,将塑料薄膜和样方移除,选择样方内 50 cm×50 cm 的中间区域,每 10 cm 间隔对土壤水平剖面进行挖掘,直至挖到最大染色深度。并使 Canon EOS50D 单反相机配 18~55 mm 镜头对每个剖面进行拍照,获得不同深度土壤水平剖面染色图像。土壤水平剖面挖掘过程见图 1。

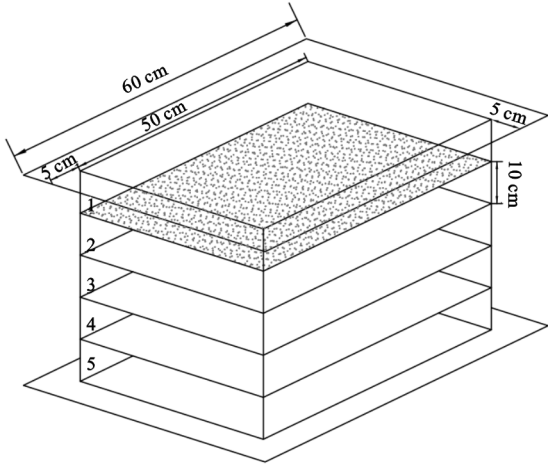


图 1 土壤染色剖面挖掘示意

1.2.3 图像处理 利用 WGEO 软件对获得的土壤水平剖面染色图像进行校正处理,再使用 Photoshop 2019 软件结合研究需要进行图像裁剪(50 cm×50 cm 的图像),对其进行颜色替换,将处理后的图像使用 MATLAB 2016a 软件进行色相深度分割和分级,获得 500 pixels×500 pixels 的土壤剖面染色图像,其染色等级划分为 5 个等级,其中染色色相最深为等级 1,最浅为等级 5。

1.2.4 图像分析

(1)分形维数。分形维数^[13]是指土壤优先流的异质性和自相似性。计算公式为:

$$F_D = \lim_{r \rightarrow \infty} \frac{\lg N(r)}{r} \quad (1)$$

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。分形维数越大,说明优先流染色图像的空间分布越复杂,水流运动范围越广泛,并且其染色斑块图像形态越不规则。

(2)染色面积比。土壤剖面染色面积比^[14]是指某一土层深度下染色斑块面积占土壤剖面总面积的百分比,染色斑块面积和土壤剖面面积用像素面积表示。计算公式为:

$$D_C = \frac{D_i}{D} \times 100\% \quad (2)$$

式中: D_C 为土壤染色面积比(%); D_i 为土壤剖面染

色面积(cm^2); D 为土壤剖面总面积(cm^2)。

(3)优先流程度。优先流程度是指一定土层深度下某等级染色面积占总染色面积的百分比,染色面积用像素面积表示。计算公式为:

$$P_f = \frac{D_g}{D_i} \times 100\% \quad (3)$$

式中: P_f 为土壤优先流占比(%); D_g 为某等级染色面积(cm^2)。

(4)色相分割。色相分割^[15]是指将 RGB 彩色图像转变为灰度图,将其像素点颜色用三维空间上的点表示,并建立 1 个三维空间的 R、G、B 彩色图像到一维空间灰度图像的映射,灰度图的每个像素颜色用一维直线上的 1 个点表示。计算公式为:

$$\text{Gary} = 0.29900 \times R + 0.58700 \times G + 0.11400 \times B \quad (4)$$

式中:Gary 为灰度图;R、G、B 分别为红、绿和蓝色。

(5)色相分级。色相分级^[15]是指将被替代成灰度图像的彩色图像的每个像素点的灰度值送入红、绿、蓝 3 个通道并且实施不同的变换,并再将其映射到颜色矩阵中,将染色分为 5 个等级,颜色最深为染色等级 1,颜色最浅为染色等级 5,用映射函数表示。计算公式为:

$$R(x, y) = \begin{cases} 0, & 0 \leq f \leq 63 \\ 0, & 64 \leq f \leq 127 \\ 4f(x, y) - 511, & 128 \leq f \leq 191 \\ 255, & 190 \leq f \leq 255 \end{cases} \quad (5)$$

$$G(x, y) = \begin{cases} 4f(x, y), & 0 \leq f \leq 63 \\ 255, & 64 \leq f \leq 127 \\ 255, & 128 \leq f \leq 191 \\ 1023 - 4f(x, y), & 190 \leq f \leq 255 \end{cases} \quad (6)$$

$$B(x, y) = \begin{cases} 255, & 0 \leq f \leq 63 \\ 511 - 4f(x, y), & 64 \leq f \leq 127 \\ 0, & 128 \leq f \leq 191 \\ 0, & 190 \leq f \leq 255 \end{cases} \quad (7)$$

式中: $R(x, y)$ 、 $G(x, y)$ 、 $B(x, y)$ 为伪彩色灰度值; $f(x, y)$ 为原始灰度图像的灰度值。

田间染色水流可以反映优先流的运动状况,进一步表征优先流的发育程度,参照牛海等^[16]对土壤水分垂直变化的划分,并结合本研究,将土壤中优先流运动变化程度对应染色分级划分 5 个等级,等级 1 表现为优先流运动程度最剧烈,即“速变”;等级 2 表现为优先流运动程度明显,即“活跃”;等级 3 表现为优先流运动程度比较明显,即“次活跃”;等级 4 表现为优先流运动相对不明显,即“基本稳定”;等级 5 表现为优先流运动不明显,即“稳定”。

1.3 数据处理

本研究使用 MATLAB 2016a 软件对不同等级的优先流染色面积比、优先流程度进行信息提取和图像分级处理;使用 Excel 2019 软件对得到的不同等级优先流染色图像的数据进行分析与处理;使用 SPSS 18.0 软件对土壤状况进行独立样本 T 检验差异性分析、单因素方差分析以及相关分析,差异性显著评价水平为 $P < 0.05$;优先流程度与优先流染色面积比的灰色关联则使用软件进行计算;使用 ImageJ 软件计算土壤分形维数;使用 AutoCAD 2018 和 Origin 2019b 软件分别对染色剖面挖掘过程和数据分析结果作图。

2 结果与分析

2.1 不同耕作方式土壤水流运动范围

土壤染色形态可在一定程度上表现土壤入渗水流的运动范围,反映优先流的空间分布状况,选择野外染色示踪试验所获取的垄耕甘蔗地与免耕甘蔗地总计 30 张土壤水平剖面图像,对其进行图像解析。由于图像较多,且同种类型的甘蔗地土壤染色形态沿土层深度的变化具有相似性,所以,每种甘蔗地仅分别选取同一观测区内的 5 张染色面积比与平均染色面积比最接近的图像进行展示,但后续数据分析时,选择全部样地的染色图像数据。

由图 2 可知,垄耕甘蔗地土壤染色形态由块状(0—10 cm)逐渐转变为团块状(10—20 cm),最后呈散点状(30—50 cm)分布于整个土壤空间内。垄耕甘蔗地水流在土壤表层活跃状态较明显,并随着土层深度的增加,其水流运动状态发生改变,出现水流分散运动现象。免耕甘蔗地土壤(0—10 cm)染色相对较少且呈团块状,随土层深度(20—50 cm)的增加,出现了相对明显的枝状分化现象。在相同外部供水条件下,垄耕甘蔗地土壤表层(0—10 cm)水流运动活跃程度较高,优先流现象相对更明显,且水流发生剧烈的横向运动,随土层深度的增加,其水流分化程度变大,在土壤深层(30—50 cm),相比于免耕甘蔗地呈集中的枝状裂隙水流运动形式,其水流运动多为散点状态,活跃程度不明显。说明垄耕措施在一定程度上可以影响甘蔗地的水流运动状态,提高土壤表层水流活跃程度,影响深层土壤优先流的发生与发展。

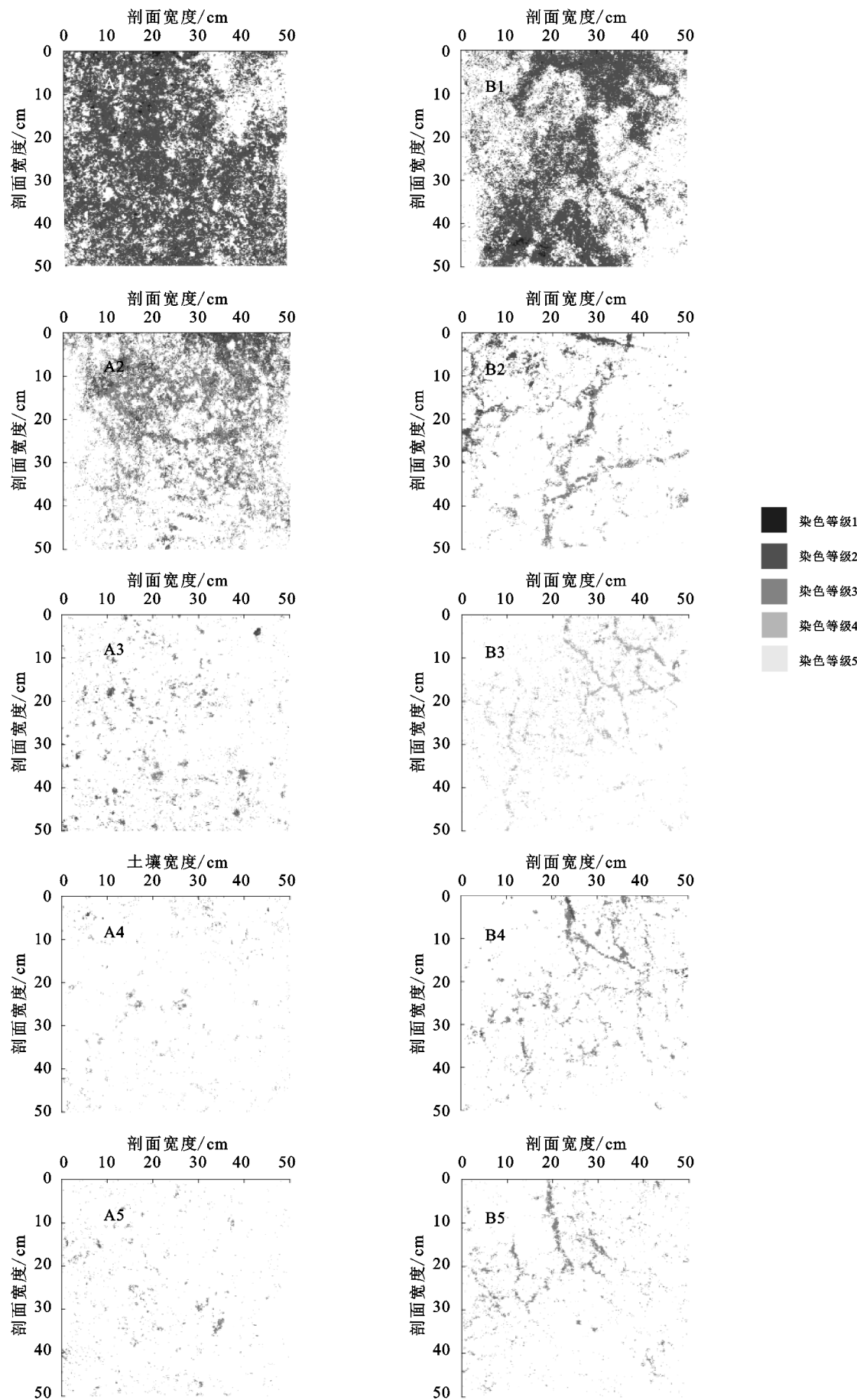
土壤分形维数可以定量描述土壤染色的形态空间变化,进而表征水流运动范围。通过对垄耕和免耕甘蔗地不同染色等级分形维数进行分析。由图 3 可知,在表层 0—10 cm 范围内,垄耕甘蔗地和免耕甘蔗地分形维数分别为 1.8 和 1.7,2 种耕作方式染色等级 2 在土壤表层优先流运动范围更大,空间分布更广

泛。染色等级 2 和染色等级 3 分形维数在整个土层深度范围内(0—50 cm)平均值均 > 1 ,说明在整个土壤剖面下染色等级 2 和染色等级 3 分布较多且较广泛。整体来看,垄耕甘蔗地染色等级 1、染色等级 2 和染色等级 3 的分形维数均随着土层深度的增加而减少,免耕甘蔗地则呈先减小后增大的趋势,表明随着土层深度的增加,垄耕甘蔗地水流运动较免耕甘蔗地弱,在垄耕甘蔗地土壤表层,染色等级 1 分形维数为 1.07,而其他土层深度范围均 < 1 ,表征垄耕甘蔗地表层水流运动更为活跃。垄耕措施影响水流运动,使表层水流运动更为剧烈,且水流范围较广泛,降低水流竖向运动形式,并对深层优先流运动有抑制作用。

2.2 不同耕作方式土壤优先流运动空间变化程度特征

由图 4 可知,垄耕甘蔗地“速变”程度优先流在 0—10 cm 土层与免耕甘蔗地存在显著差异($P < 0.05$),其“速变”程度的优先流占比为 12.5%,说明在 0—10 cm 土层,垄耕甘蔗地“速变”程度的优先流发生明显且优先流运动变化更为剧烈。随着土层深度(10—50 cm)的增加,2 种耕作方式甘蔗地“速变”程度优先流均 $< 4\%$,说明“速变”程度优先流活跃程度相对较低。免耕甘蔗地“活跃”程度优先流在 20—50 cm 土层内相对于垄耕甘蔗地占比更大,即免耕甘蔗地“活跃”程度的优先流在土壤深层更高。垄耕甘蔗地“次活跃”程度优先流在 0—10 cm 土层相对于免耕甘蔗地(19.6%)占比较少,仅为 2.0%,且两者差异显著($P < 0.05$),但在其他土壤深度下(10—50 cm),垄耕甘蔗地“次活跃”程度优先流分布更多。“基本稳定”和“稳定”程度优先流在 2 种甘蔗地占比均 $< 1.0\%$,说明其在土壤中分布相对较少。综合可知,不同耕作方式下的土壤优先流程度发育组成表现为垄耕甘蔗地在土壤表层(0—10 cm)多以“速变”程度优先流和“活跃”程度优先流为主,随着土层深度增加,“活跃”程度优先流减少,“次活跃”程度优先流增加;免耕甘蔗地“速变”程度优先流整体较少,“活跃”程度优先流在土壤深层百分比大于垄耕甘蔗地。

以优先流染色面积比和优先流程度分别作为参考序列和比较序列,对 2 种耕作方式甘蔗地内不同级别程度优先流进行灰色关联分析(图 5)。对垄耕甘蔗地优先流影响最大的为“速变”程度优先流,关联度值为 0.809,而对免耕甘蔗地优先流影响最大的是“活跃”程度优先流,关联度值为 0.784。“基本稳定”程度优先流均对垄耕和免耕甘蔗地优先流影响最小,关联度分别为 0.582 和 0.603。整体来看,同种耕作方式甘蔗地“速变”和“活跃”程度优先流对田间优先流的发育影响均高于“次活跃”“基本稳定”和“稳定”程度优先流。



注：A、B 分别为垄耕甘蔗地、免耕甘蔗地；其后数字 1~5 分别表示土层深度为 10、20、30、40、50 cm。

图 2 不同耕作方式的甘蔗地土壤水平剖面染色分级

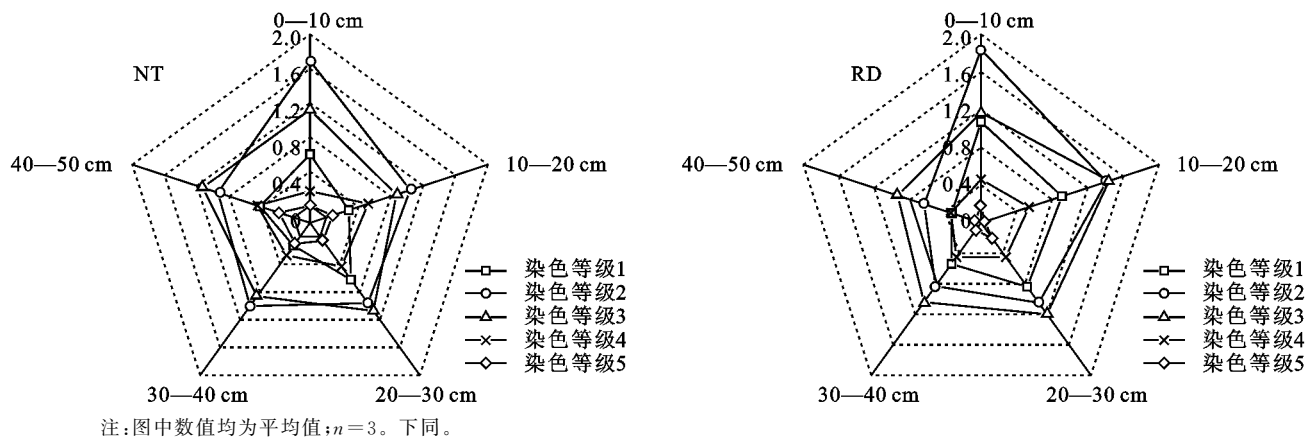


图 3 不同耕作方式的甘蔗地土壤分级染色分形维数

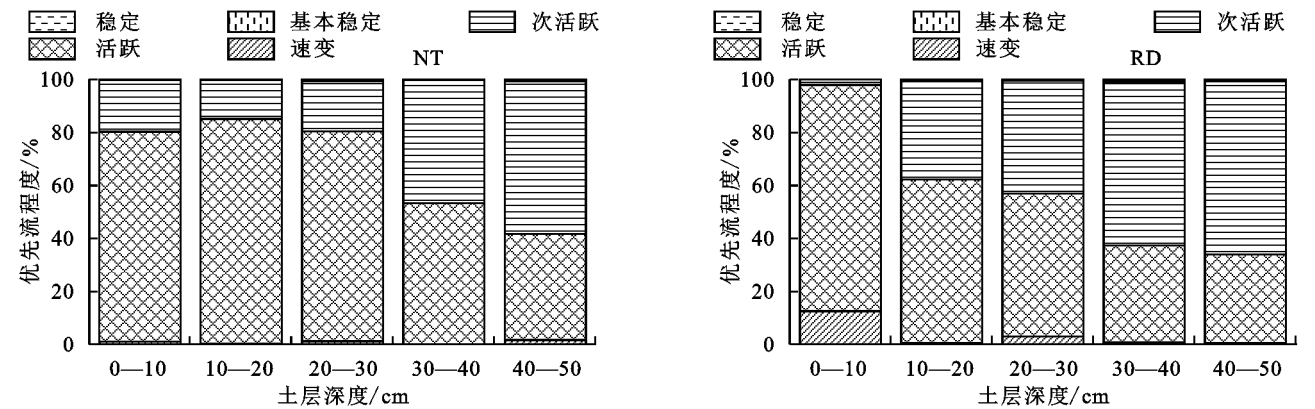


图 4 不同耕作方式的甘蔗地土壤优先流程度分级组成

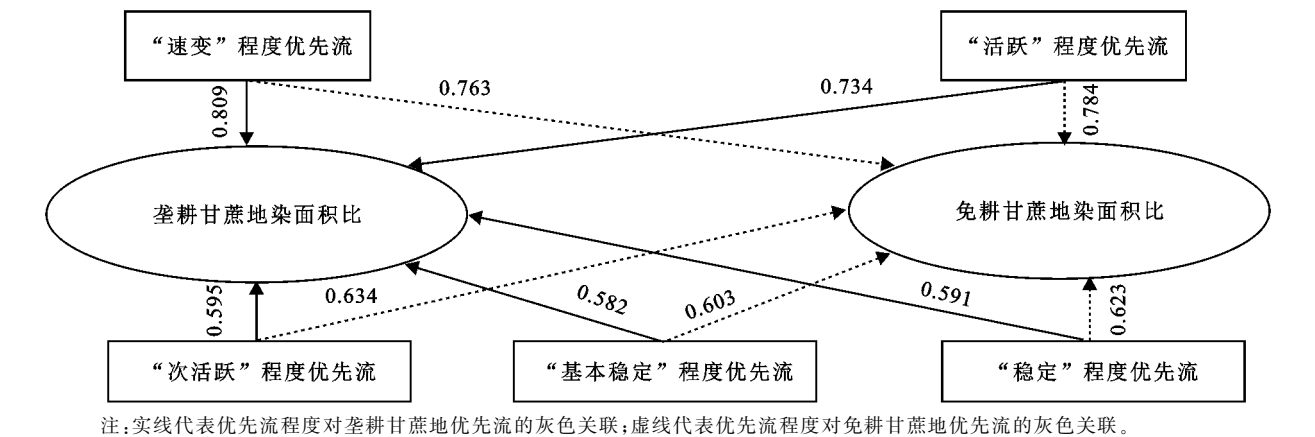


图 5 不同耕作方式的甘蔗地土壤优先流程度与染色关联性

2.3 不同耕作方式土壤环境对优先流程度的影响

不同耕作方式下的甘蔗地土壤环境状况见表 1, 2 种甘蔗地饱和导水率均随土层深度的增加而降低, 垄耕甘蔗地在 0—10 cm 土层内饱和导水率是免耕甘蔗地的 1.6 倍, 且差异显著 ($P < 0.05$), 但在 30—50 cm 土层垄耕甘蔗地饱和导水率均小于免耕甘蔗地, 说明垄耕土壤表层存在更大的饱和导水率, 但免耕甘蔗地深层土壤饱和导水率相对较高。

随着土层深度的增加, 2 种甘蔗地土壤前期含水率均呈增大的趋势, 垄耕甘蔗地在整个土层深度 (0—50 cm) 下土壤前期含水率平均值为 25.6%, 高于免耕甘蔗地的 17.1%, 垄耕甘蔗地蓄水保水能力更

强。由于垄耕措施使表层土壤结构发生变化, 容重与土层深层有显著差异, 免耕耕作由于长时间未对土壤结构产生扰动, 其容重差异不大。垄耕甘蔗地土壤结构孔隙较免耕甘蔗地少, 垄耕甘蔗地在相同土层深度下其容重均大于免耕甘蔗地。2 种甘蔗地均以粉粒和砂粒为主, 垄耕甘蔗地在 0—50 cm 土层深度, 黏粒和粉粒随土层深度增加整体呈减小的变化趋势, 而砂粒则随土层深度增加而变大。垄耕甘蔗地土壤砂粒含量更多, 但黏粒和粉粒含量相对更少。表现为 0—40 cm 土层为粉黏壤土, 40—50 cm 土层为壤土。

对 2 种甘蔗地的土壤环境相关性分析, 结果见表

2. 饱和导水率对免耕甘蔗地优先流程度影响最大(相关系数为 0.858),容重对垄耕甘蔗地优先流程度影响相关系数为-0.829,表现为容重越大,影响优先流的程度越小。前期含水率对垄耕影响最大。土壤质地对 2 种甘蔗地相关系数在-0.002~0.463,表明土壤质地对甘蔗地土壤优先流的发育程度影响较小。

表 1 不同耕作方式甘蔗地土壤基本性质

耕作方式	土层深度/cm	饱和导水率/(mm·s ⁻¹)	含水率/cm	容重/(g·cm ⁻³)	黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%
RD	0—10	0.297±0.28Aa	17.37±5.18Aa	1.41±0.52Aa	15.95±2.53Ab	42.92±0.51Aa	41.13±2.99Aa
	10—20	0.097±0.73Aab	24.88±4.79Aab	1.48±0.52Aa	16.07±1.20Ab	47.53±1.83Aa	36.40±0.78Aa
	20—30	0.025±0.19Ab	27.41±6.17Ab	1.62±0.84Ab	14.17±1.69Aab	43.58±3.26Aa	42.25±3.99Aa
	30—40	0.006±0.01Ab	29.42±5.43Ab	1.65±0.29Ab	15.52±1.62Ab	32.60±5.34Aa	38.52±6.98Aa
	40—50	0.002±0Ab	28.75±1.58Ab	1.61±0.25Ab	12.52±2.05Aa	32.60±3.59Ab	54.88±5.21Ab
NT	0—10	0.187±0.49Ba	10.30±2.65Ba	1.37±0.10Aa	18.34±3.25Aa	40.40±5.68Aa	41.26±8.10Aa
	10—20	0.059±0.24Ab	13.07±1.62Ba	1.45±0.09Aa	18.67±3.97Aa	41.05±8.65Aa	40.27±11.24Aa
	20—30	0.049±0.54Ab	14.76±5.01Ba	1.49±0.13Aa	16.17±2.47Aa	39.97±0.66Aa	43.86±3.08Aa
	30—40	0.020±0.11Ab	20.91±3.61Ab	1.53±0.06Aa	16.35±3.13Aa	39.88±6.34Aa	43.77±4.29Aa
	40—50	0.007±0.01Ab	21.18±1.29Ab	1.57±0.11Aa	20.44±1.64Ba	39.42±3.16Aa	40.15±1.78Ba

注:表中数值为平均值±标准差;不同小写字母表示同一耕作不同土层深度之间差异显著($P<0.05$);不同大写字母表示同一土层深度不同耕作条件之间差异显著($P<0.05$); $n=3$ 。

表 2 不同耕作方式土壤状况与优先流程度相关性系数

耕作方式	指标	饱和导水率	含水率	容重	黏粒	粉粒	砂粒	优先流程度
RD	饱和导水率	1.000						
	含水率	-0.345	1.000					
	容重	-0.756**	0.694**	1.000				
	黏粒	0.187	-0.461	-0.253	1.000			
	粉粒	0.177	-0.124	-0.232	0.737	1.000		
	砂粒	-0.189	-0.221	0.250	-0.847	-0.987**	1.000	
	优先流程度	0.685**	-0.773**	-0.829**	0.463	0.226	-0.302	1.000
	饱和导水率	1.000						
	含水率	-0.644**	1.000					
	容重	-0.697**	0.516	1.000				
NT	黏粒	-0.124**	0.104	0.465	1.000			
	粉粒	-0.095**	-0.189	-0.204	0.097	1.000		
	砂粒	0.140	0.100	-0.073	-0.590*	-0.860**	1.000	
	优先流程度	0.858**	-0.710**	-0.615*	0.024	-0.013	-0.002	1.000

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。

3 讨论

通过对不同耕作方式甘蔗地土壤染色形态分析发现,耕作方式改变土壤水分运动状况,从而对优先流的发育产生影响,垄耕处理后的甘蔗地,土壤颗粒填充深层土壤孔道,而免耕甘蔗地土壤结构未发生扰动,土壤连通性孔隙相对较多^[17]。垄耕甘蔗地土壤表层侧向孔隙结构较发育,水流多以非竖向运动为主,已有研究^[18]发现,土壤优先流存在侧向流动现象。垄耕甘蔗地土壤表层的优先流运动范围更广,活跃程度更高。通过测定试验样地土壤前期含水率发现,垄耕甘蔗地表层(0—10 cm)土壤平均含水率是

免耕甘蔗地的 1.6 倍,0—50 cm 土层土壤空间的平均含水率是免耕地的 1.8 倍,垄耕措施抑制了土壤水分竖向运动,使表层土壤水分含量更多,土壤整体含水率也得到了改善。张东旭等^[17]通过对砂岩区农地研究发现,免耕地土壤孔隙数量多且连通性较好,水流可快速通过高连通性的孔隙向土壤深层运动,降低土壤层中的含水量。本研究中免耕甘蔗地在 20—50 cm 土层水流运动相对于垄耕甘蔗地更活跃,分形维数大于垄耕甘蔗地,垄耕措施减少了土壤水分向深层渗漏和流失,并且使表层土壤水分的运动更剧烈。

本研究发现,优先流占比最大的为“活跃”程度与

“次活跃”程度优先流,而“稳定”程度和“基本稳定”程度优先流占比均较小,与朱钊岑等^[10]对不同类型土壤优先流的研究结果一致,土壤优先流类型多为非均质指流—高相互作用大孔隙流。结合灰色关联分析,活跃程度强的优先流占比对染色面积比影响强度更大,水流优先通过孔隙发育程度高的区域快速流动^[11]。在土壤深层,垄耕甘蔗地优先流程度较低,免耕甘蔗地深层土壤孔隙连通性较好,水流快速运动,优先流发育程度较高。垄耕能使土壤水分蓄存在田间土壤表层和耕作层,减少水分向更深层快速运动。王康等^[19]通过对优先流染色面积判断土壤优先通道大小及其优先流发育程度得出,免耕农地优先路径连通性高于翻耕地,本研究中相比于垄耕甘蔗地,免耕甘蔗地“活跃”程度优先流占比较高,其优先流发育稳定,分化程度低^[4]。对于垄耕和免耕来说,垄耕能在一定程度上降低深层水流运动强度,抑制了水流竖向运动。

土壤状况影响优先流的发育^[14],饱和导水率、前期含水率和容重对优先流程度大小均有较大影响。土壤孔隙通道影响土壤饱和导水率^[11],本研究发现,免耕甘蔗地饱和导水率更强,优先流发育高,但在 0—10 cm 土层,垄耕土壤由于结构改变,饱和导水率相对较大,其水流运动更剧烈。已有研究^[20-21]发现,土壤前期含水量较低的农地有更明显的优先流现象。本研究中,土壤优先流程度和土壤前期含水量相关性较高,垄耕甘蔗地前期含水率较高,其优先流程度更低。由于免耕甘蔗地饱和导水率更大,水分容易向土壤深层渗漏,土壤含水率相对垄耕甘蔗地低,另一方面,含水率较低的土壤易吸收水分^[5],免耕甘蔗地土壤深层优先流现象更明显。优先流发育中,土壤容重是影响优先流发育的一个重要因素,土壤容重小,优先流现象越明显^[22]。本研究得出,垄耕甘蔗地整体容重大,其优先流发育更弱,但在 0—10 cm 土层,其容重大于免耕甘蔗地,优先流程度较大,这是由于耕作方式土壤表层结构改变,优先流活跃程度更高。

以往研究常通过分形理论^[4]与形态学分析^[2]等方法进行土壤优先流程度的分析,但所得结果均基于整体染色分析所获得的整体优先流程度,较难定量反映田间优先流的发育组成。本研究通过对染色图像进行色相深度分割,细化解析了土壤染色形态,获得了甘蔗地土壤优先流的发育组成变化特征。虽然色相深度分割方法可以定量评价土壤优先流程度的大小,但由于土壤空间的异质性,使优先流在土壤空间内的分布具有随机性,不同优先流发育程度空间分布

特征无法定量分析,后续可以通过相关研究,对优先流发育程度的空间分布进行进一步探索研究。

4 结 论

(1) 垄耕甘蔗地水分运动过程相对于免耕甘蔗地的枝状裂隙多为均匀散点状,垄耕甘蔗地在 0—10 cm 土层水流运动范围更大,水分竖向入渗量更少,免耕甘蔗地深层水流运动更为剧烈。

(2) 2 种耕作方式甘蔗地均以“活跃”程度优先流和“次活跃”程度优先流为主,但免耕甘蔗地“活跃”程度优先流相对较高,染色面积平均值达 66.58%,是垄耕甘蔗地的 1.2 倍。垄耕甘蔗地深层土壤“次活跃”程度优先流占比高于免耕甘蔗地。

(3) 不同耕作方式会影响土壤环境,进而影响优先流程度,容重对垄耕甘蔗地的优先流程度影响最高,相关系数为 -0.829,免耕甘蔗地的饱和导水率对优先流影响程度最大相关系数为 0.858。

参考文献:

- [1] 黄振瑞,周文灵,江永,等.优化施肥对甘蔗产量、养分吸收及肥料利用率的影响[J].热带作物学报,2015,36(9): 1568-1573.
- [2] 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.
- [3] 徐宗恒,徐则民,曹军尉,等.土壤优先流研究现状与发展趋势[J].土壤,2012,44(6):905-916.
- [4] 李振东,朱彦光,陈晓冰,等.桂北岩溶区典型农地土壤优先流特征[J].水土保持研究,2019,26(5):68-74,80.
- [5] 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.
- [6] Zhang Z B, Hou H, Zhao Q G, et al. Characteristics of cracks in two paddy soils and their impacts on preferential flow[J].Geoderma,2014,228/229:114-121.
- [7] Prima S D, Winiarski T, Angulo-Jaramillo R, et al. Detecting infiltrated water and preferential flow pathways through time-lapse ground-penetrating radar surveys[J]. Science of the Total Environment,2020,726:e138511.
- [8] 杨坤,赵洋毅,王克勤,等.普洱茶种植对滇南红壤大孔隙的影响[J].土壤,2019,51(3):586-593.
- [9] 牛健植,余新晓,张志强.优先流研究现状及发展趋势[J].生态学报,2006,26(1):231-243.
- [10] 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.
- [11] 陈晓冰,吴晗,姜波,等.广西岩溶区稻田土壤优先流的空间分布[J].应用生态学报,2020,31(12):4099-4108.
- [12] 邱琳,吴华山,陈效民,等.利用染色示踪和图像处理技术对土壤大孔隙进行定量研究[J].土壤,2007,39(4): 621-626.

[7] 李姜瑶,余冬梅,张西营,等.西宁盆地黄土区边坡土体含水量对植物根—土复合体抗剪强度影响的试验研究[J/OL].工程地质学报:1-15.[2021-12-10].<https://doi.org/10.13544/j.cnki.jep.2020-006>.

[8] 栗岳洲,付江涛,胡夏嵩,等.土体粒径对盐生植物根—土复合体抗剪强度影响的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(2):403-412.

[9] 田佳,曹兵,及金楠,等.防风固沙灌木花棒沙柳根系生物力学特性[J].农业工程学报,2014,30(23):192-198.

[10] Fan C C, Su C F. Role of roots in the shear strength of root-reinforced soils with high moisture content [J]. Ecological Engineering,2008,33(2):157-166.

[11] Zhang C B, Chen L H, Liu Y P, et al.Triaxial compression test of soil-root composites to evaluate influence of roots on soil shear strength [J].Ecological Engineering,2010,36(1):19-26.

[12] 王保辉,朱连奇.不同布根形式对草本植物根土复合体抗剪强度试验[J].水土保持学报,2018,32(6):118-122.

[13] 强娇娇,颜哲豪,湛芸,等.喀斯特区 3 种草篱根—土复合体抗剪性能及其影响因素[J].草业学报,2020,29(12):27-37.

[14] 廖博,刘建平,周花玉.含根量对秋枫根—土复合体抗剪强度的影响[J].水土保持学报,2021,35(3):104-110,118.

[15] 解明礼,巨能攀,赵建军,等.区域地质灾害易发性分级方法对比分析研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2021,46(7):1003-1014.

[16] 中华人民共和国建设部.土工试验方法标准:GB/T 50123-2019[M].北京:中国计划出版社,2019.

[17] 杨乐,陈杰.基于灰色关联法的地质灾害危险性影响因素分析[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2017,36(6):80-84,91.

[18] Li Y, Huang C M, Wang B L, et al. A unified expression for grain size distribution of soils [J].Geoderma, 2017,288:105-119.

[19] 余冬梅,祁兆鑫,刘亚斌,等.青海柴达木盆地盐湖区 5 种盐生植物根—土复合体抗剪强度影响因素及评价[J].水土保持研究,2019,26(4):157-165.

[20] 余芹芹,乔娜,卢海静,等.植物根系对土体加筋效应研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(增刊 1):3216-3223.

[21] 孙聿卿,关辉,韩方.土体标度分布参数与其物理力学性质的关系研究[J].化工矿物与加工,2021,50(3):21-26.

[22] 王春雨,冯晓一,段杰,等.干密度和含水量对重塑黄土抗剪强度特性的影响研究[J].青海大学学报,2018,36(5):38-43.

[23] 房营光.颗粒介质尺度效应的抗剪试验及物理机理分析[J].物理学报,2014,63(3):274-283.

[24] 《工程地质手册》编委会.工程地质手册 [M].5 版.北京:中国建筑工业出版社,2018.

[25] 卢肇钧.黏性土抗剪强度研究的现状与展望[J].土木工程学报,1999,32(4):3-9.

[26] 卢廷浩.土力学[M].北京:高等教育出版社,2010.

(上接第 57 页)

[13] 彭进业,俞卞章,李楠.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.

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

[15] 张岩.MATLAB 图像处理超级学习手册[M].北京:人民邮电出版社,2014.

[16] 牛海,李和平,赵萌莉,等.毛乌素沙地不同水分梯度根系垂直分布与土壤水分关系的研究[J].干旱区资源与环境,2008,22(2):157-163.

[17] 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.

[18] 蒋小金,王恩姐,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.

[19] 王康,张仁铎,周祖昊.土壤性质对入渗再分布影响的显色示踪试验研究[J].土壤通报,2012,43(3):577-582.

[20] 张欣,张洪江,张福明,等.西南山区农地土壤前期含水量对优先流的影响[J].水土保持学报,2014,28(2):1-7,14.

[21] 李宗毅,张安琪,荣旭,等.土壤初始含水率对管渠灌溉水分入渗特性的影响[J].山东农业大学学报(自然科学版),2021,52(2):270-276.

[22] 侯芳,杨志,程金花,等.永定河(北京段)滨河带藤本和次生乔木林土壤优先流特征[J].水土保持学报,2021,35(3):143-149.