

秸秆覆盖下桂北岩溶区水稻田土壤优先流特征

陈晓冰^{1,2,3}, 韦灵⁴, 吴晗⁴, 姜波⁴, 李振东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: 优先流作为一种土壤水分的快速入渗形式, 广泛发生于水稻田内。通过进行野外土壤染色示踪试验, 结合形态学图像解析技术, 开展秸秆覆盖与非覆盖条件下的广西岩溶区水稻田土壤优先流特征研究。结果表明: 在相同的外部供水条件下, 秸秆覆盖水稻田土壤染色形态以整体均匀分布形式为主, 而非秸秆覆盖水稻田呈明显枝状染色形态分化现象并贯穿整个土壤空间, 其平均染色斑块形状系数为 13.96, 染色形态表现为显著不规则分化状况, 且土壤空间中染色水流平均分布密度达 0.117, 相比秸秆覆盖水稻田更大, 呈现染色水流集中分布状态。秸秆覆盖水稻田土壤入渗量相比非秸秆覆盖水稻田较高, 平均总染色面积比达 46.69%, 二者之间差异显著 ($P < 0.05$), 但田间优先流发生时间相对较晚, 对应的平均基质流深度为 16.92 cm, 优先流比显著小于非秸秆覆盖水稻田 (49.55%) ($P < 0.05$), 仅为 27.47%。秸秆覆盖措施可影响田间土壤水分运动过程, 在一定程度上提高田间水分的入渗量, 降低土壤优先流发生程度, 促进稻田土壤水分的保持, 减少田间水肥流失。

关键词: 岩溶区; 秸秆覆盖; 优先流; 空间分布

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)05-0124-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.05.018

The Characteristics of Preferential Flow on Straw Mulching of Paddy Field in the Karst Region of North Guangxi

CHEN Xiaobing^{1,2,3}, WEI Ling⁴, WU Han⁴, JIANG Bo⁴, LI Zhendong⁴

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

Abstract: Preferential flow is a rapid infiltration form of soil moisture which occurs widely in paddy fields. This paper concentrated on typical farmland of paddy fields with straw mulching and non-cover conditions in the Karst region of Guangxi, using the methods of brilliant blue dye and the morphological image analysis technology to present the soil preferential flow features of two tillage types. The results showed that under the same water supply condition, the soil dyeing morphology of straw mulching paddy fields was mainly uniformly distributed, while the non-mulching conditions paddy fields showed obvious branch-like dyeing morphological and throughout the soil space. The average dyed patch shape coefficient of non-mulching conditions paddy field was 13.96, and the dyeing morphology showed a significant irregular differentiation. The average distribution density of dyeing water in soil space was 0.117, which was larger than that straw mulching paddy field, showing a concentrated distribution condition of dyeing water. The soil infiltration capacity of straw mulching field was higher than that of non-cover conditions paddy field, with its the average total dyeing area ratio was 46.69%. There was significant difference between them ($P < 0.05$). But the time rate of preferential flow of straw mulching paddy field was later than the non-mulching conditions paddy field, which the average matrix flow depth was 16.92 cm. The preferential flow fraction of straw mulching paddy field was 27.47% less than the straw mulching rice

收稿日期: 2020-03-30

资助项目: 广西中青年骨干教师基础能力提升项目(2017KY0270); 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); 桂林理工大学博士科研启动基金项目(GUTQDJJ2017001)

第一作者: 陈晓冰(1988—), 男, 博士, 讲师, 主要从事土壤水分运动与模拟研究。E-mail: jayvision_chen@126.com

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

paddy (49.55%). There was significant difference between them ($P < 0.05$). Straw mulching method can affect the process of soil water movement in the field. At the same time, its increase the amount of water infiltration in the field to a certain extent and reduce the occurrence of preferential flow. Compared with the non-cover conditions of paddy field, the straw mulching method also promote the maintenance of soil water in the paddy field, and reduce the loss of water and fertilizer in the field.

Keywords: Karst region; straw mulching method; preferential flow; spatial distribution

广西作为我国岩溶地貌的主要分布地区之一,其岩溶面积达 $9.87 \times 10^4 \text{ km}^2$,形成的耕地面积为 $44.171 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。岩溶区特殊的岩性地质构造,形成的土层相对较薄,土壤孔隙、裂隙结构高度发育,土壤优先流现象广泛发生^[1]。优先流引起田间土壤水分快速流动,在一定程度上会降低作物的水肥利用效率,影响作物的生产发育。

目前,广西区内种植有大量水稻,水稻种植面积占广西总耕地面积的 44.58%。由于水稻生长环境的需求,使用水肥的数量高于其他农作物,但水肥利用效率较低^[2]。为此,探究水稻种植过程中的水肥状况已成为近年来农业生产领域的研究热点问题。已有研究^[3]发现,采用种植技术与管理措施相结合的方式改善水稻生长环境,可在一定程度上达到水肥有效利用的目标,实现水稻的增产增收。其中,通过秸秆覆盖种植方式可以改善田间土壤环境,增加土壤孔隙度,改良土壤结构,提高土壤有机质含量,促进微生物活力和田间作物根系的发育^[4],但其如何影响田间土壤水分运动过程鲜有报道。同时,Zhang 等^[5]通过对水稻田的土壤水分运动研究中发现,水稻田存在明显的优先流现象。目前,针对稻田土壤优先流的相关研究主要集中在分析土壤孔隙、裂隙结构下的稻田土壤水流运动状态,特别是对土壤优先流的影响^[5-7],以及探究稻田土壤中优先流对水分和养分运移流失的作用等方面^[8-10]。而针对以种植方式为条件下的稻田土壤水流运动,特别是土壤优先流的相关研究少有涉及。

因此,本研究以广西北部岩溶区内的水稻田为研究对象,通过野外染色示踪试验,结合图像形态学解析理论,并利用统计学分析方法,开展以秸秆覆盖与秸秆非覆盖条件下的水稻田土壤优先流特征研究,可为揭示秸秆覆盖如何影响稻田土壤水流运动过程,进一步探究秸秆覆盖下的土壤水肥运动状况提供理论支撑,也为进一步完善生态脆弱岩溶地区的农业水文过程的相关研究提供一定科学支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究地位于广西桂林市两江镇水稻生产示范区,地理坐标为 $110^{\circ}00'E, 25^{\circ}10'N$ 。属亚热带季风区,年平均气温为 20°C ,年平均降水量为 $1\ 869 \text{ mm}$ 。土壤类型

为水稻土,质地为黏壤土和黏土。选择研究区内相邻的 2 块分别为秸秆覆盖(CM)与非覆盖(CK)条件下的水稻田作为研究样地,每块水稻田长和宽分别为 25, 15 m,且 2 块田块间设有田埂。水稻种植前使用机械翻耕整地,翻耕深度为 20—30 cm。在水稻种植前,对需进行秸秆覆盖处理的水稻田进行种植行间秸秆均匀覆盖,所用秸秆为上季收获后经粉碎的水稻秸秆,秸秆长度 5—10 cm,覆盖厚度约 2 cm,覆盖量为 $2\ 500 \text{ kg/hm}^2$ 。实验地水稻品种为“五优 308”,以单季稻为主,水稻生育期为 3—8 月,种植方式为人工插秧,田间灌溉方式为传统漫灌形式,施肥方式为:基肥施复合肥和尿素均为 330 kg/hm^2 ,分蘖肥和穗肥均为尿素 134 kg/hm^2 。试验时间为 2019 年 10 月 1—8 日。

1.2 研究方法

1.2.1 试验区域选择与布设 水稻收割后,需排除田内积水。在每块水稻田内的种植带行间随机选取 3 个土壤优先流观测区域,以开展染色示踪试验。随后清除表面残留秸秆枯枝等,将长、宽和高分别为 60, 60, 30 cm,厚 0.3 cm 的金属样方缓慢砸入种植带行间,砸入深度为 10 cm,并使用高密度聚乙烯塑料薄膜覆盖整个样方,覆盖时间 24 h,以保证相同样地在进行染色示踪试验前具有相近土壤前期含水量。

1.2.2 染色示踪试验 24 h 后,移除样方表面塑料薄膜。以当地大雨强度,即 24 h 累积降雨 25 mm 为标准计算样方染色示踪试验需水量,即配制 4 g/L 的亮蓝染色溶液 9.5 L(含 5% 的损耗)。并使用自制稳定恒流喷洒装置,以 150 mL/min 的流量将亮蓝溶液均匀喷洒至样方内。溶液喷洒完成后,再次使用塑料薄膜将样方覆盖 24 h。

1.2.3 样地挖掘 24 h 后,移除塑料薄膜和样方。为降低样方在砸入和移除过程中对样地土壤的扰动,选择样方内 $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$ 的核心土壤区域沿种植带方向进行土壤染色垂直剖面挖掘工作。剖面垂直挖掘宽度为 10 cm,挖掘深度直至样地最大染色深度(本研究最大染色深度为 50 cm),每个区域挖掘 5 个剖面,总计 30 个土壤垂直染色剖面。并在每个剖面挖掘结束后使用高像素单反相机,配直尺和灰阶比色卡对垂直染色剖面进行拍照。以获取土壤垂直剖面染色图像数据,用以本研究的结果分析使用。具体剖面挖掘示意图 1。

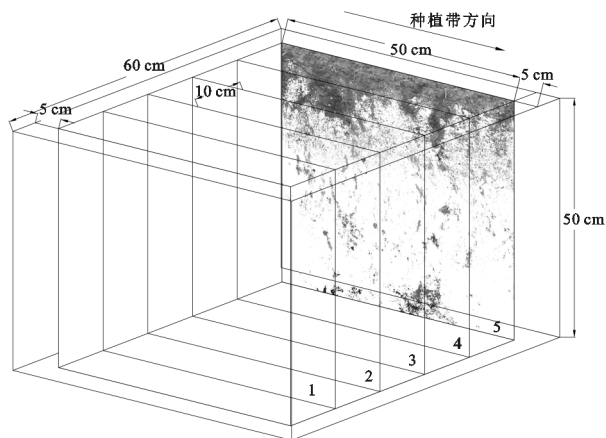


图1 土壤染色剖面挖掘示意

1.2.4 染色图像处理 首先使用 WGEO 软件对所得的土壤染色剖面图像进行图像校正处理,并按照研究需要(土壤剖面尺寸 50 cm×50 cm,0.1 cm=1 pixel),利用 Photoshop CS5 对校正后的图像进行裁剪、替换颜色、降噪和灰度调节,得到 500 pixels×500 pixels 的土壤剖面染色灰度图像。然后将处理后的图像分别导入 Image pro Plus 6.0 图像解析软件和 MATLAB R2011b 分析软件,对土壤染色灰度图像进行染色像素分割解析与统计,对应得到 1 个仅含有 0 和 255 数值的矩阵数据和 1 个 0~255 的灰度级分析数值矩阵,用以进行后续土壤优先流相关参数等分析使用。

1.2.5 土壤优先流特征分析

(1)土壤染色面积比。土壤染色面积比是指土壤剖面中染色区域(土壤某处深度下染色区域)占整个土壤剖面区域(土壤某处深度下区域)的百分比,即土壤染色图像中的染色像素点数量(土壤某处深度下染色像素点数量)占整个染色图像中的像素总数量(土壤某处深度下像素点总数量)的比例,计算公式^[11]为:

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

式中:DC 为土壤某一深度下的土壤剖面染色面积比(%);D 为土壤某一深度下的土壤染色面积(cm²)或像素点数量(个);ND 为土壤某一深度下的土壤未染色面积(cm²)或像素点数量(个)。该值越大,说明土壤剖面水流运动范围越大。

(2)土壤基质流深度。土壤基质流深度是指土壤优先流发生的深度,即土壤剖面中染色面积百分比≥80%所对应的土壤深度 UniFr(cm)。该值越大,说明土壤优先流发生越晚^[12]。

(3)土壤优先流比。土壤优先流比是指土壤染色剖面中优先流染色区域面积占整个剖面染色面积的百分比,即土壤剖面中基质流深度以外的染色面积占总染色面积的比例,计算公式^[12]为:

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

式中:PF-fr 为土壤优先流比(%);UniFr 为基质流深度(cm);W 为土壤剖面水平染色宽度(cm);TotStAr 为土壤剖面总染色面积(cm²)。该值越大,说明土壤优先流程度越高。

(4)土壤染色斑块形状系数。土壤染色斑块形状系数可由景观生态学中的斑块形状系数表征,可反映空间结构度量中的重要特征,是指土壤剖面中染色斑块的周长与等面积的圆周长之比,计算公式^[13]为:

$$SI = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} \quad (3)$$

式中:SI 为土壤染色斑块形状系数;P 为土壤剖面中染色斑块的周长(cm);A 为染色斑块同等圆的面积(cm²)。该值越大,说明土壤染色斑块形状越不规则。

(5)长度指数。长度指数是指土壤剖面等分深度后,相邻土层深度处的染色面积比之差的绝对值之和,计算公式^[12]为:

$$Li = \sum_{i=1}^n |DC_{i+1} - DC_i| \quad (4)$$

式中:Li 为土壤长度指数(%);DC_{i+1} 和 DC_i 分别为土剖面第 i+1 深度和第 i 深度对应的染色面积比(%);n 为土壤染色剖面垂直等分深度总数。该值越大,说明土壤优先流空间变化相对越剧烈。

1.3 数据处理

本研究使用 WGEO、Photoshop CS5、Image pro Plus 6.0 和 MATLAB R2011b 等软件对染色形态图像进行图像处理与解析;使用 Excel 2016 软件对染色图像解析数据进行统计;使用 SPSS 17.0 对图像解析数据进行独立样本 T 检验差异性分析(统计显著性评价水平为 P<0.05);使用 AutoCAD 2016 和 Origin 2020 对染色剖面挖掘过程和数据分析结果进行作图。

2 结果与分析

2.1 不同秸秆覆盖水稻田土壤染色形态特征

通过对秸秆覆盖与非覆盖条件下水稻田进行土壤染色示踪试验,获得 6 个样地总计 30 张稻田土壤垂直剖面染色图像,剔除染色效果较差的 2 张图像,最终每种处理条件下分别获得 14 张,总计 28 张土壤垂直剖面染色图像,用以进行土壤优先流染色形态特征分析。经分析得出相同处理条件下的水稻田土壤染色形态相似,但由于染色图像数量较多,故对秸秆覆盖与非覆盖条件下的水稻田仅各选取 1 张具有代表性的土壤垂直剖面染色图像进行染色形态分析使用。

由图 2 可知,不同秸秆覆盖水稻田的土壤染色深度均可达 50 cm 土壤深度,其中秸秆覆盖条件下的水稻田土壤染色形态在土壤表层(0—10 cm)整体呈现均匀分布状态,即染色水流覆盖整个土壤表层区域,随土层深度的逐渐增加(10—20 cm),土壤染色形态出现明显的

带状(10—15 cm)和团块状(15—20 cm)分化现象,土壤深层(20—50 cm)团块状分化现象较土壤表层明显。土壤染色形态在一定程度上反映了土壤水流的运动范围,秸秆覆盖下的水稻田土壤水流在土壤表层呈明显的整体均匀向下入渗形式,随土层深度的逐渐增加,水流运动状态发生改变,以带状优先流和团块状横向水流运动形式为主。而非秸秆覆盖下的水稻田土壤表层染色相对较少,仅 0—3 cm 土层深度范围内出现均匀整体的染色现象,随土层深度的增加,相比秸秆覆盖下的水稻田出现了较明显的染色形态分化现象,即呈枝状染色形态

分化并贯穿整个土层垂直剖面,但其随土层深度的继续增加,虽也出现团块状染色形态,但数量相对秸秆覆盖水稻田地少。在相同的外部供水环境下,非秸秆覆盖下的稻田土壤染色形态呈较明显的优先流染色形态分化现象,水流运动以优先流运动为主,其优先流运动深度与范围均较秸秆覆盖水稻田大,虽出现水流横向运动,但程度较秸秆覆盖水稻田小。以上可以说明,秸秆覆盖措施在一定程度上影响了水稻田的土壤水流运动,进而影响了田间土壤优先流的发生与发展,入渗水流在土壤空间中以均匀和横向入渗水流为主。

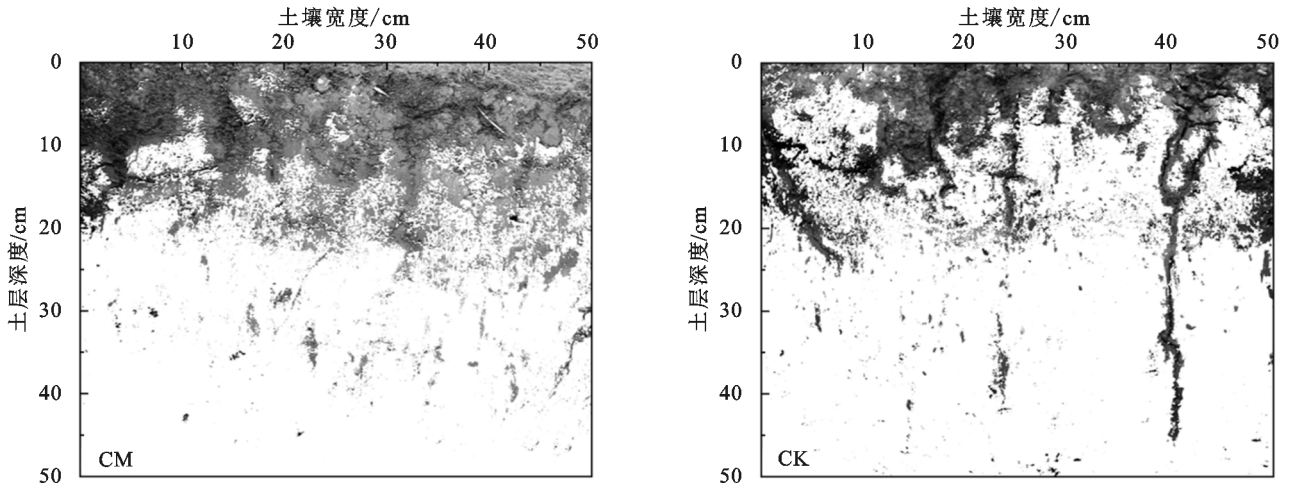


图 2 不同秸秆覆盖条件下水稻田土壤染色形态

土壤染色斑块形状系数可以定量表征土壤染色所形成的染色斑块的形态状况,通过对不同秸秆覆盖条件下水稻田的土壤垂直剖面染色斑块形状系数进行分析,得到非秸秆覆盖下的平均土壤染色斑块形状系数为 13.96,是秸秆覆盖水稻田(11.60)的 1.20 倍,二者之间差异显著($P < 0.05$)。说明非秸秆覆盖稻田土壤染色形态相对更不规则化,即染色形态分化现象更显著,也进一步说明非秸秆覆盖下水稻田土壤水流运动形式以优先流运动为主,水流运动过程较剧烈。

2.2 不同秸秆覆盖水稻田土壤优先流分布变化特征

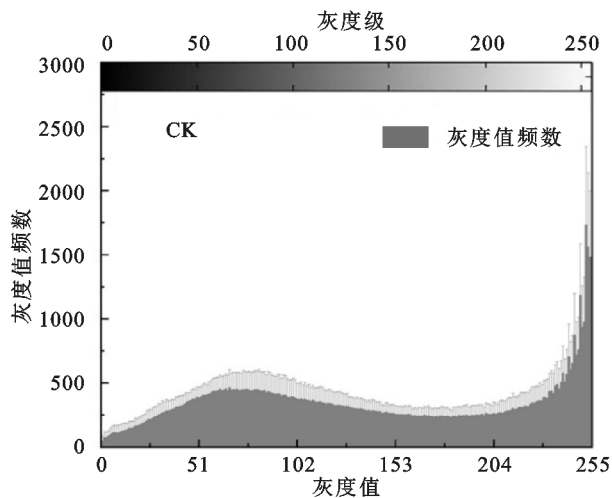
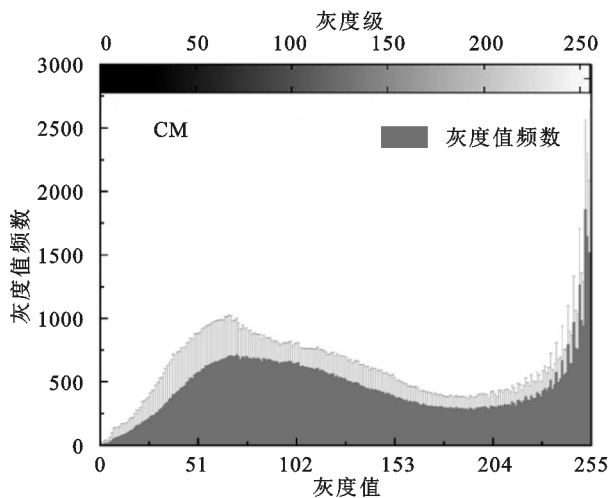
土壤染色形态可以反映土壤空间中水流的运动过程,进而表征土壤优先流的空间分布变化情况。通过对秸秆覆盖与非覆盖条件下水稻田土壤染色图像进行灰度分析,获得染色区内具有不同染色状况的灰度数据。不同染色状况(即不同灰度数值出现频数的高低)可以反映不同土壤空间中的水流变化状况。由图 3 可知,在土壤 0—50 cm 水平宽度范围内,秸秆覆盖水稻田的土壤染色平均灰度值频数在 0~255 灰度级范围内呈现先增加后降低再增加的变化趋势,整体总灰度值频数为 116 731.00,平均灰度值频数为 458.00。而非秸秆覆盖水稻田,其土壤染色灰度值也呈现与秸秆覆盖相一致的变化趋势,但其灰度值频数在灰度级 51~153 范围内显著低于秸秆覆盖

水稻田,整体总灰度值频数也相对秸秆覆盖水稻田小,为 87 509.00,平均灰度值频数为 343.00。灰度值频数反映了某一灰度级出现的总次数,且灰度级(灰度值)越接近 0,说明土壤颗粒染色越深,即土壤中水分含量越高。因此,在相同的外部供水条件下,秸秆覆盖水稻田的土壤水流运动数量多于非秸秆覆盖水稻田,其主要原因为秸秆覆盖水稻田的土壤水流运动以整体均匀而非优先流形式向下入渗为主,即在单位土壤空间内的水分运动数量相对较高,同时间接表明非秸秆覆盖水稻田以土壤优先流运动为主。秸秆覆盖措施可以在一定程度上增加水分以非优先流形式的整体入渗量,田间土壤水分含量增加,有利于作物的使用。

土壤空间中的染色密度可以间接表征土壤中水流的集中分布程度,反映优先流的空间分布状况。通过对 6 个样地的水稻田土壤染色水流进行空间分布分析,得到不同秸秆覆盖下的稻田土壤染色密度空间分布状况(图 4)。由图 4 可知,秸秆覆盖水稻田 3 个试验观测区域下的土壤水流均主要集中分布在土壤 0—20 cm 深度范围内,且呈均匀整体化的空间分布状态,而随着土层深度的增加,水流逐渐以优先流的形式产生,但其土壤空间分布密度(水流量)以及水平分布范围均明显小于土壤表层,通过分析其土壤空间

中的染色水流分布密度值,得出 3 个观测区域下土壤空间中的水流分布平均密度范围为 0.045~0.172,说明土壤空间中的优先水流平均分布密度最低值为 0.045。而对于非秸秆覆盖下的水稻田,田间水流染色密度仅集中分布在 0—10 cm 土壤表层空间内,此区域范围内的整体水流高密度分布范围也小于秸秆覆盖水稻田,且随土壤的加深,空间水流分布更为集

中(0.117),土壤空间内呈现较明显的优先水流(点密度)集中分布状态,其水流空间分布平均密度范围最小值为 0.049,说明土壤空间中最低优先水流平均分布密度大于秸秆覆盖水稻田。同时,染色水流平均密度最大值达 0.184,也进一步说明非秸秆覆盖下的稻田土壤水流密度集中分布区域内的空间水流分布相对更集中,与秸秆覆盖水稻田相比差异显著($P < 0.05$)。



注:图中数据为平均值±标准差; $n=14$ 。

图 3 不同秸秆覆盖条件下水稻田土壤染色灰度直方图

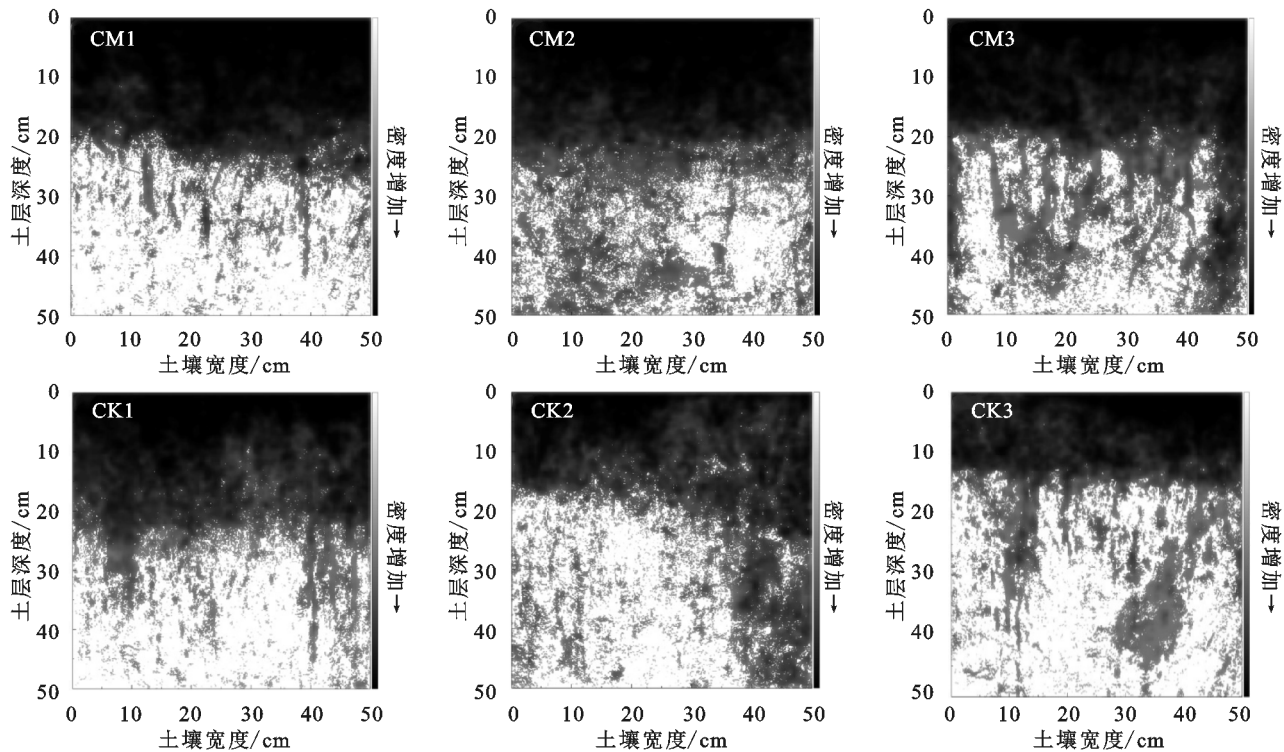


图 4 不同秸秆覆盖条件下水稻田土壤染色空间密度

2.3 不同秸秆覆盖水稻田土壤优先流现象特征

分别对秸秆覆盖和非秸秆覆盖水稻田土壤垂直染色剖面的染色面积比(DC)、基质流深度(UniFr)、优先流比($PF - fr$)和长度指数(Li)4 个土壤优先流特征参数进行对比分析,来揭示土壤优先流现象,所得结果见表 1。

染色面积比反映了土壤空间中整体水流的入渗情况,一般来说,其值越大说明在相同的外部供水条件下,田间入渗水量较大。秸秆覆盖水稻田的土壤平均染色面积比为 46.69%,显著高于非秸秆覆盖下的水稻田(35.00%),再次说明秸秆覆盖可以促进田间水分入渗,结合土壤染色形态特征分析发现,虽然秸秆覆盖措施促

进了水分的大量入渗,但其入渗多以均匀水流为主,以优先流形式的入渗量相对秸秆覆盖水稻田较少。

基质流深度表征了土壤优先流的发生开始深度,其反映土壤优先流的发生情况。秸秆覆盖水稻田的平均基质流深度为 16.92 cm,显著大于非秸秆覆盖水稻田($P < 0.05$),是其 1.93 倍。说明在相同外部供水条件下,秸秆覆盖水稻田内的土壤优先流发生时间较非秸秆覆盖水稻田晚,即非秸秆覆盖水稻田土壤优先流发生相对较快,其在一定程度上会降低土壤空间中的水分停留时间,加快水分的流失,影响田间作物的利用。

优先流比表征了土壤空间中的优先流发育程度,其值越大,说明土壤中优先流的发育程度越高。通过计算水稻田内的土壤优先流比,得到非秸秆覆盖水稻田土壤平均优先流比为 49.55%,是秸秆覆盖水稻田的 1.80 倍,二者之间差异显著($P < 0.05$)。说明非秸

秆覆盖措施下稻田田间优先流发育程度相对较高,进一步表明秸秆覆盖措施可以在一定程度上降低稻田土壤水流的快速运动,保持土壤空间中的水分,进而提高田间作物的水肥利用效率。

长度指数反映了土壤空间中优先流的变化程度,其值越大,说明土壤空间中的优先流变化程度越高。经计算分析得出,秸秆覆盖下的水稻田其长度指数(709.34%)小于非秸秆水稻田(754.13%),说明秸秆覆盖下的稻田土壤优先流空间变化程度相对较低,秸秆覆盖对土壤优先流的发育变化产生影响,但二者之间差异不显著($P > 0.05$)。其主要原因为 2 种措施下的水稻田土壤染色图像均出现了长度指数相近的土壤剖面,使其二者之间的差异性不明显;另一方面也说明,长度指数对于土壤优先流变化程度的评价基于染色面积比的比较计算,易受土壤染色情况的影响。

表 1 不同秸秆覆盖条件下水稻田土壤优先流特征参数

样地类型	染色面积比/%	基质流深度/cm	优先流比/%	长度指数/%
秸秆覆盖	46.69±6.61A	16.92±2.54A	27.47±5.41A	709.34±118.62A
非秸秆覆盖	35.00±7.88B	8.76±4.13B	49.55±22.21B	754.13±158.01A

注:表中数据均为平均值±标准差;同列不同大写字母代表同一特征参数不同秸秆覆盖条件之间差异显著($P < 0.05$); $n = 14$ 。

3 讨论

对不同秸秆覆盖条件下水稻田的土壤染色图像进行解析,开展农业种植措施对田间优先流运动特征的分析,为探究农业生产影响下的田间水肥利用情况提供了一定的研究基础。

通过对稻田土壤水流运动过程分析,秸秆覆盖下的水稻田土壤水分运动与非秸秆覆盖水稻田相比以整体均匀入渗为主,秸秆覆盖措施在一定程度上可以增加土壤水分入渗过程中的基质流比例,从而降低优先流的数量。Wang 等^[14]通过对秸秆还田后的轮作稻田研究发现,秸秆还田抑制了田间裂隙和土壤优先流产生,降低了土壤入渗率的波动,防止了水分深层渗透,这与本研究结果相似。同时,在试验过程中发现,秸秆覆盖下的水稻田土壤表面裂隙发育显著小于非秸秆覆盖水稻田。由于水田土壤裂隙是田间土壤优先流的主要途径^[5],可以得出秸秆覆盖措施在一定程度上降低了土壤裂隙发育。通过对土壤前期含水量的测定发现,秸秆覆盖下的稻田表层土壤平均含水率为 37.65%,非覆盖水稻田为 34.94%。已有研究^[7]发现,水稻田的干湿交替^[7]变化,加剧了田间土壤裂隙发育,土壤含水率的提高,可以在一定程度上缓和田间裂隙发育。同时,张欣等^[15]通过对三峡库区内具有不同前期含水量的农地土壤优先流进行研究得出,土壤前期含水量高的农地土壤优先流发育程度较低,进一步说明秸秆覆盖提高了土壤含水率,进而影响了田间土壤结构,降低了土壤中的优先流现象。

通过对秸秆覆盖与非覆盖水稻田的土壤染色形

态分析中发现,秸秆覆盖措施下的水稻田土壤深层有横向水流运动现象发生。蒋小金等^[16]在对东北黑土区耕地的土壤优先流的研究中也发现了横向侧流现象,但染色多以短斜枝状优先流形态为主,与本研究所得土壤剖面中的团块状染色形态存在差异。同时,Lahue 等^[17]通过研究稻田横向渗流发现,其在田间水分损失中所占比例一般较小,田间损失多以优先流为主。随土层深度的逐渐增加,秸秆覆盖水稻田虽有优先流分化现象出现,但其程度相对较低,结合染色形态特征,说明秸秆覆盖下水稻田的横向水流运动可以反映出秸秆覆盖措施下的水稻田具有保持土壤水分的能力,起到了保护性耕作的作用^[18]。前人^[19]对岩溶区甘蔗地的土壤优先流相关研究结论相似,即合理的保护性耕作方式在一定程度上可以提高田间土壤保水能力。

土壤空间中的水流密度分布状态可以反映土壤水流的运动范围与运动强弱。不同秸秆覆盖条件下的稻田土壤水流运动空间分布状态不同,反映出土壤水流下渗过程中同时存在不同形式的运动状态,即基质流和优先流。但由于秸秆覆盖下水稻田水流集中分布区域在土壤 0—20 cm 深度范围内,其分布范围较大,无法较准确的判断此处的优先流状况,因此有必要开展后续土壤水平剖面染色形态的相关分析研究,定量描述该范围的优先流程度。同时,李振东等^[20]通过对岩溶区的传统水稻田研究发现,其优先流程度达 62.03%,虽高于本研究非秸秆覆盖下水稻田的土壤优先流比(49.55%),但二者均说明水稻田存在明显的优先流现象,这对后续深入开展岩溶区水稻田土壤水流运动

过程模拟研究具有一定的指导意义。

4 结论

(1) 秸秆覆盖下的水稻田土壤空间染色形态呈现由土壤表层均匀整体分布向深层带状和团块状态转变,而非秸秆覆盖水稻田土壤染色形态表现为明显的枝状染色形态分化现象,其平均土壤染色斑块形状系数(13.96)大于秸秆覆盖水稻田(11.60),二者之间差异显著($P < 0.05$)。

(2) 非秸秆覆盖水稻田土壤空间内的水流分布相对秸秆覆盖水稻田更集中,平均密度可达 0.117,且土壤空间中的土壤优先流平均分布密度最低值为 0.049,是秸秆覆盖的 1.10 倍。

(3) 在相同的外部供水条件下,秸秆覆盖措施相比非覆盖措施在一定程度上可以增加水稻田土壤水分入渗量,平均染色面积比可达 46.69%,显著高于非覆盖水稻田(35.00%),同时降低田间土壤优先流程度,其平均土壤优先流比仅为 27.47%,显著低于非秸秆覆盖下的水稻田。秸秆覆盖种植技术通过改变稻田田间土壤环境进而影响了土壤水流运动状况,在一定程度上有助于提高田间作物的水肥利用效率。

参考文献:

- [1] Worthington S R H. Diagnostic tests for conceptualizing transport in bedrock aquifers[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 529: 365-372.
- [2] Hamoud Y A, Guo X, Wang Z, et al. Effects of irrigation water regime, soil clay content and their combination on growth, yield, and water use efficiency of rice grown in South China[J]. *International Journal of Agricultural & Biological Engineering*, 2018, 11(4): 144-155.
- [3] 付佑胜, 刘伟中, 张凯, 等. 麦秸秆高留茬条件下不同秸秆覆盖量对稻田杂草及水稻产量的影响[J]. *西南农业学报*, 2019, 32(10): 2313-2318.
- [4] 靳苗苗, 胡正锬, 朱柏菁, 等. 环境胁迫对不同水分管理措施下稻田土壤功能稳定性的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(11): 3795-3803.
- [5] Zhang Z B, Zhou 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.
- [6] 张展羽, 陈于, 孔莉莉, 等. 土壤干缩裂缝几何特征对入

渗的影响[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(10): 192-197.

- [7] Qi W, Zhang Z Y, Wang C, et al. Crack closure and flow regimes in cracked clay loam subjected to different irrigation methods[J]. *Geoderma*, 2020, 358: 1-11.
- [8] Zhao Y, De Maio M, Vidotto F, et al. Influence of wet-dry cycles on the temporal infiltration dynamic in temperate rice paddies[J]. *Soil & Tillage Research*, 2015, 154: 14-21.
- [9] Anyusheva M, Lamers M, La N, et al. Persistence and leaching of two pesticides in a paddy soil in Northern Vietnam[J]. *Clean Soil, Air, Water*, 2016, 44(7): 858-866.
- [10] Fuhrmann I, Maarastawi S, Neumann J, et al. Preferential flow pathways in paddy rice soils as hot spots for nutrient cycling[J]. *Geoderma*, 2019, 337: 594-606.
- [11] Flury M, Flüher 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.
- [12] Van Schaik N. Spatial variability of infiltration patterns related to site characteristics in a semi-arid watershed[J]. *Catena*, 2009, 78: 36-47.
- [13] Bettinger P, Bradshaw G A, Weaver G W. Effects of geographic information system vector-raster-vector data conversion on landscape indices[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1996, 26(8): 1416-1425.
- [14] Wang C, Zhang Z Y, Fan S M, et al. Effects of straw incorporation on desiccation cracking patterns and horizontal flow in cracked clay loam[J]. *Soil & Tillage Research*, 2018, 182: 130-143.
- [15] 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): 4-10, 17.
- [16] 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.
- [17] Lahue G T, Linquist B A. The magnitude and variability of lateral seepage in California rice fields[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 574: 202-210.
- [18] 李向东, 陈源泉, 隋鹏, 等. 中国南方集约多熟稻田保护性耕作制度[J]. *生态学杂志*, 2007, 26(10): 1653-1656.
- [19] 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.
- [20] 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.

ter Resource Research, 1994, 30: 1029-1044.

(上接第 118 页)

- [22] Guijarro M, Pajares G, Riomoros I, et al. Automatic Segmentation of Relevant Textures in Agricultural Images[J]. *Computers & Electronics in Agriculture*, 2011, 75(1): 75-83.
- [23] Barling R D, Moore I D, Grayson R B. A quasi-dynamic wetness index for characterizing the spatial distribution of zones of surface saturation and soil water content[J]. *Wa-*

- [24] 胡玉福, 邓良基, 匡先辉, 等. 基于纹理特征的高分辨率遥感图像土地利用分类研究[J]. *地理与地理信息科学*, 2011, 27(5): 42-45, 68.
- [25] Zhong Y F, Zhao B, Zhang L P. Multiagent object-based classifier for high spatial resolution imagery[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(2): 841-857.