

耕作方式对岩溶区甘蔗地土壤优先流特征的影响^①

陈晓冰^{1,2}, 严磊³, 李振东³, SAEED Rad³, 陈廷速⁴, 甘磊^{2,3*}

(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 桂林理工大学环境科学与工程学院, 广西桂林 541004; 4 广西农业科学院微生物研究所, 南宁 530007)

摘要: 岩溶区特殊的岩性地质条件, 使土壤优先流现象广泛发生。以广西岩溶区内的典型农地甘蔗地作为研究对象, 利用野外染色示踪技术和图像解析方法, 分别对传统耕作(CT)和粉垄耕作(SRT)方式下的田间土壤优先流特征进行分析, 揭示耕作方式对岩溶区甘蔗地土壤优先流的发生及其空间发展变化的影响。结果表明: ①在相同外部供水条件下, 传统耕作甘蔗地优先流运动分化程度相对较高, 多呈指状形式, 且平均湿润锋下渗深度为 43.19 cm, 显著大于粉垄耕作($P<0.05$), 而粉垄耕作甘蔗地优先流以横向运动形式为主, 表现为团块状湿润锋形式; ②粉垄耕作甘蔗地土壤优先流发生时间显著滞后于传统耕作($P<0.05$), 是其 1.67 倍; ③随土壤深度的增加, 两种耕作方式下的甘蔗地土壤优先流发育程度总体呈现先增加后降低的变化趋势, 但粉垄耕作甘蔗地优先流比(70.72%)和长度指数(527.12%)均显著小于传统耕作甘蔗地($P<0.05$), 且在土壤空间中对应的染色形态变异系数(1.19)是传统耕作的 1.38 倍, 优先流发育程度显著低于传统耕作甘蔗地。粉垄耕作与传统耕作方式相比, 在一定程度上降低了田间土壤优先流现象, 改善了田间土层中的水肥状况。

关键词: 岩溶区; 粉垄耕作; 传统耕作; 优先流

中图分类号: S152.7 **文献标识码:** A

优先流是一种水分绕过土壤基质直接通过土壤大孔隙快速下渗的非均匀流^[1-3], 其发生会使农地土壤养分随水流快速运移至土壤深层, 降低田间作物的水肥利用效率^[4], 进而影响作物产量。岩溶地区土层薄、地下双层空间结构等特殊的地质环境, 导致土壤优先流显著发生^[5-6]。广西作为我国岩溶地貌的主要分布区, 区内种植着我国 60% 以上的甘蔗, 甘蔗田间水施肥利用问题, 一直是当地农业生产所关注的主要问题^[7]。为提高广西甘蔗产量, 近年来一种新技术——粉垄耕作正被用于甘蔗的田间种植过程中, 在一定程度上已使甘蔗增产^[8]。但这种耕作方式会形成沟垄形态的凹凸起伏田间地貌, 改变土壤结构。由于耕作方式引起了土壤结构发生变化, 会使田间原有的土壤水分运动状况发生改变^[9]。

目前, 对于不同耕作方式下的土壤水分相关研究多集中在分析其含水量随土壤深度的变化方面^[10-11],

研究发现不同耕作方式下不同深度土壤中的含水量及水分入渗特性均存在一定的差异, 总体表现为免耕条件下的土壤水分入渗性能优于其他耕作方式。但针对耕作方式下的土壤水分运动, 特别是优先流的相关报道仍较少。李文凤等^[12]对黑土区免耕和秋翻农地土壤优先流特征进行分析, 得出免耕土壤优先流的发育程度高于秋翻土壤。张东旭等^[13]通过研究免耕与连作方式下的农地, 也发现连作方式土壤中的优先流发育程度较免耕方式下土壤优先流发育程度差。而对于岩溶区田间普遍存在的土壤优先流, 研究者也仅从退耕封育区土壤和常年翻耕土壤进行探究^[14], 缺少除免耕以外其他耕作方式对岩溶区农地土壤优先流的研究报道。同时, 当前我国旱作农业仍以翻耕、深松耕和旋耕等农业土壤耕作制度为主^[15]。

因此, 本研究以广西岩溶区内粉垄耕作和传统耕作 2 种典型耕作方式下的甘蔗地为研究对象, 通过分

①基金项目: 国家自然科学基金项目(41701248, 41501230), 广西自然科学基金项目(2017GXNSFBA198102, 2016GXNSFAA380197), 广西中青年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)和桂林理工大学博士科研启动基金项目(GUTQDJ2017001)资助。

* 通讯作者(allen_gl2006@163.com)

作者简介: 陈晓冰(1988—), 男, 内蒙古赤峰人, 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

析其土壤优先流的发生及其空间变化特征,以揭示典型耕作方式对岩溶区甘蔗地土壤优先流的影响,为优化岩溶区农业耕作制度,完善岩溶区土壤水分运动理论,改善农地水肥利用状况,提高作物产量提供一定科学支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于广西农业科学院里建科学研究基地内(108°02' E, 23°14' N),属亚热带季风气候,年平均气温 21.7 °C,年平均降雨量为 1 304.2 mm。基地内地势平坦,平均海拔 105.5 m,土壤以石灰土和红壤土为主,土壤质地为壤土。本研究选取基地内的粉垄耕作和传统耕作方式的甘蔗地作为试验样地,试验时间为 2017 年 8 月 24 日至 2017 年 9 月 7 日。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选择与布设 在研究区内选取 2 块相邻且长宽均分别为 39 m 和 30 m 的甘蔗地,对其中一块样地进行粉垄耕作处理(SRT),即在甘蔗种植前,采用深层旋耕形式整地,深度达土壤 50~60 cm,种植带下形成“U”型槽状结构;另一块进行传统耕作处理(CT),即在甘蔗种植前,采用犁具对样地进行翻耕,翻耕深度达 30~40 cm。进一步对 2 块样地进行种植小区划分,每个小区种植 5 行,行距 1.3 m,种

植甘蔗品种为桂糖 05-136,种植年限为 3 a,并在每个小区之间设置隔离行。施肥方法均为:基肥复合肥 0.23 kg/hm²,追肥复合肥 0.23 kg/hm²。

1.2.2 染色示踪试验 分别在 2 个甘蔗地内各随机选取 3 个种植小区,并在每个小区内沿种植带间再随机选取 1 个区域,进行优先流染色示踪观测试验。首先清理区域地表枯枝落物,再将长 60 cm、宽 60 cm、高 30 cm,厚度为 0.5 cm 的矩形金属样方缓慢砸入土壤中,砸入深度为 15 cm,且保证土壤与金属板之间紧实。然后使用塑料薄膜覆盖样方,24 h 后移除塑料薄膜,以当地大雨强度为标准(24 h 累计降雨量为 25 mm),配制 4 g/L 的亮蓝溶液 9.6 L(含 10% 损耗),并采用积水渗透方式,使用稳定恒流泵(保定兰格 BT100-1L)以 150 ml/min 强度均匀施加于金属样方内的土壤中。施加完毕后,再次使用塑料薄膜覆盖样方,以保证土壤在染色过程中不受外界影响。24 h 后移除塑料薄膜和金属样方,为了降低样方在取出过程中对土壤的影响,仅选择样方中间 50 cm×50 cm 的核心区进行土壤染色剖面挖掘。以 10 cm 水平宽度进行土壤垂直剖面挖掘,总计挖掘 5 层,且挖掘至最大染色深度处,本研究为 50 cm 土壤深度。并配合标尺与灰阶比色卡,使用 2 500 万像素单反相机对染色剖面进行拍照,每个样地各获取 5 张染色剖面图像,总计 30 张。土壤染色剖面挖掘过程如图 1 所示。

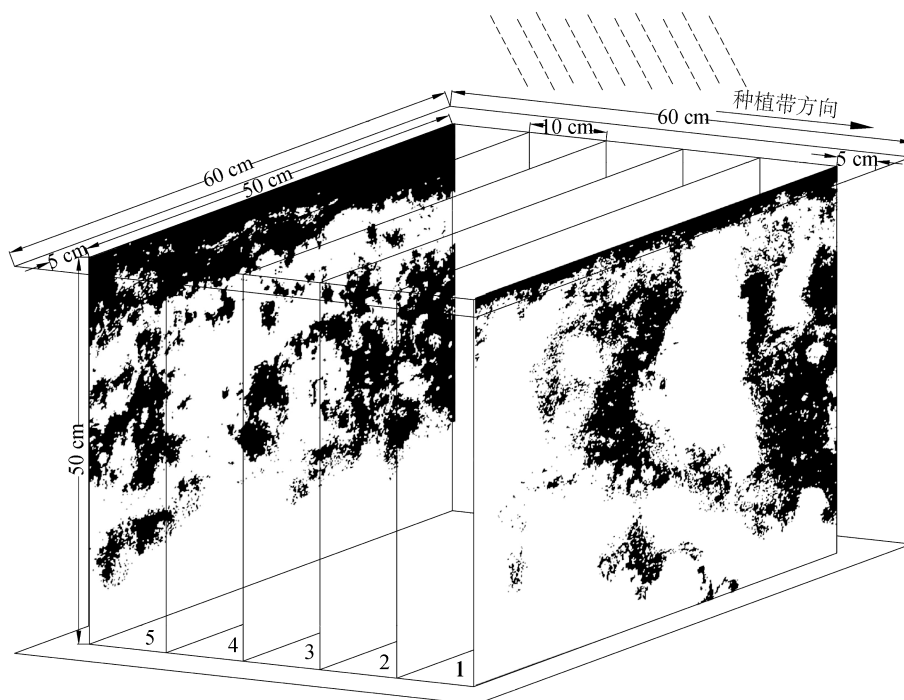


图1 土壤染色剖面挖掘示意

Fig.1 Schematic diagram of dyed soil profile

1.2.3 图像处理 首先使用 ERDAS IMAGINE 2016 软件对所采集的土壤染色剖面图像进行几何矫正, 然后通过 Photoshop CS 6.0 的裁剪、颜色替换、阈值调节等功能将矫正后的剖面图像转变成尺寸为 500×500 pixels 的黑白图像(像素单位为 1 mm/pixel), 其中未染色区调整为白色, 染色区调整为黑色。再将黑白图像导入 Image ProPlus 6.0 软件中进行图像分割与计数处理, 得到一个与图像(500×500 pixels)对应的仅含 0(黑色像素)和 255(白色像素)二值数据矩阵, 最终导入到 Excel 表中, 计算出相应的染色形态特征参数。

1.2.4 染色形态特征参数 对染色剖面的染色面积比^[1]、基质流深度^[16]、优先流比^[16]和长度指数^[17]等 4 个染色形态特征参数分别进行计算, 以分析 2 种耕作方式下甘蔗地土壤优先流特征。

1) 土壤染色面积比。土壤剖面中被亮蓝溶液染色的面积与剖面总面积的比值称为土壤染色面积比, 其可以直观反映水流在土壤中的运动情况, 计算公式为:

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

式中: DC 为土壤剖面染色面积比(%); D 为土壤剖面染色的总面积(mm^2); ND 为土壤剖面中未被染色的总面积(mm^2)。本研究中土壤剖面宽度为 500 mm。

2) 基质流深度。土壤染色剖面中某一深度处的染色面积比为 80% 以上所对应的这一土壤深度称为基质流深度(cm), 其值越大, 说明优先流发生越滞后。

3) 优先流比。土壤剖面中产生优先流区域的面积与总的染色面积的比值称为优先流比, 其值越大说明土壤中优先流发生现象越明显。计算公式为:

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

式中: PF-fr 为优先流比(%); UniFr 为土壤剖面基质流深度(mm); W 为土壤剖面染色的水平宽度(mm); TotStAr 为土壤剖面染色总面积(mm^2)。

4) 长度指数。以一定深度将土壤染色剖面分为若干层, 其下层与上层的染色面积比之差的绝对值之和称为长度指数。其值越大, 说明优先流现象越明显。计算公式为:

$$Li = \sum_{i=1}^n |DC_{i+1} - DC_i| \quad (3)$$

式中: Li 为土壤长度指数(%); DC_{i+1} 、 DC_i 为土剖面第 $i+1$ 层和第 i 层对应的染色面积比(%); n 为土壤剖面垂直土层数。

5) 染色形态变异系数。在染色面积比的基础上运用统计学中变异性的分析方法, 计算得出土壤剖面中染色面积比沿土壤深度的变异系数, 称为染色形态变异系数。其值越小, 说明优先流在土壤空间中发育程度越高。计算公式为:

$$CV = \frac{\sqrt{\frac{n \sum_{i=1}^n DC_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n DC_i \right)^2}{n(n-1)}}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n DC_i} \quad (4)$$

式中: CV 为染色形态变异系数; n 为沿土壤深度所计算的土层个数(每层土层大小均以 1 mm); DC_i 为土壤垂直剖面中第 i 层所求出的染色面积比(%)。

1.2.5 数据处理与分析 本研究利用 ERDAS IMAGINE 2016、Photoshop CS 6.0 和 Image ProPlus 6.0 等软件对土壤染色剖面图像进行图像校正、裁剪和二值化处理分析, 以获取图像数据。利用 Excel 2016 软件进行图像数据整理。利用 SPSS 17.0 对图像数据进行单因素方差分析(One-way, ANOVA)与差异显著性分析(Duncan 法, 统计显著性评价为 $P < 0.05$ 的水平)。利用 Origin 2017 对数据结果作图。

2 结果与分析

2.1 耕作方式对甘蔗地土壤染色形态特征的影响

通过对采集到的 2 种不同耕作方式下的甘蔗地土壤染色剖面进行解析, 以获得粉垄耕作和传统耕作方式下甘蔗地土壤剖面的染色形态特征。但由于每种耕作方式下所采集的土壤染色剖面均有 15 个, 数量较多。因此, 本文仅取每种耕作方式下各具有代表性的 1 个土壤剖面进行染色形态特征展示分析。

如图 2 所示, 在土壤剖面中, 粉垄耕作甘蔗地的染色形态分化程度要明显小于传统耕作甘蔗地, 表现为传统耕作甘蔗地的染色形态在整个土壤剖面内呈上下联通的指状或枝状分布形式, 且贯穿整个土壤剖面, 说明染色水流集中沿着主要的数条垂直孔隙通道下渗运动。而粉垄耕作甘蔗地土壤剖面染色形态呈现 0 ~ 5 cm 土壤表层整体均匀(染色面积比 $\geq 80\%$), 深层零星团块状分布形式, 最大染色仅达土壤 33 cm 深度处。表明粉垄耕作甘蔗地土壤水分主要以基质流形式整体均匀下渗, 相比传统耕作甘蔗地, 虽有优先流现象发生, 但多呈横向流动而非垂直方向流动, 优先流现象相对较弱。这主要是由于粉垄耕作在整地过程中旋耕深层土壤至表层^[8], 并使土壤颗粒细小化, 破坏了原有土壤孔隙结构的同时, 使耕层土壤更加均质

化,形成的竖向孔道数量相比传统耕作显著降低。因此,在相同的外部供水条件下,粉垄耕作甘蔗地的水分垂直

运动形式减少,横向运动形式增多,与传统耕作方式相比,在一定程度上提高了耕作层的蓄水保肥能力。

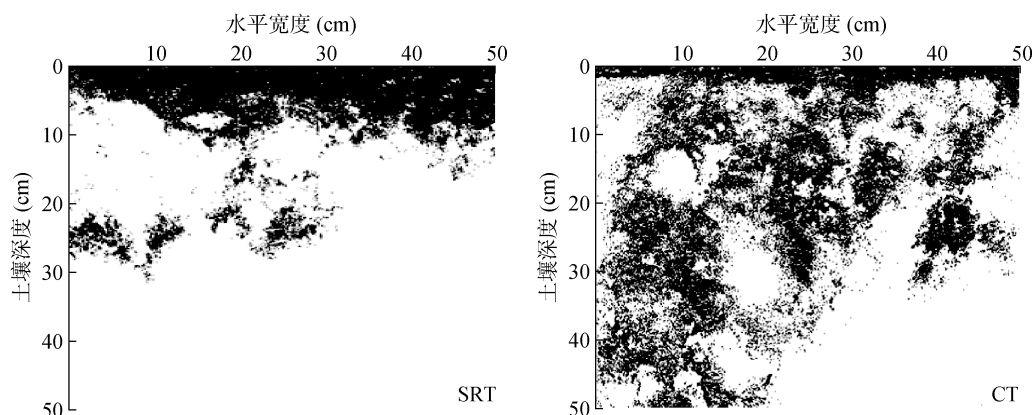


图 2 不同耕作方式下甘蔗地土壤剖面染色形态

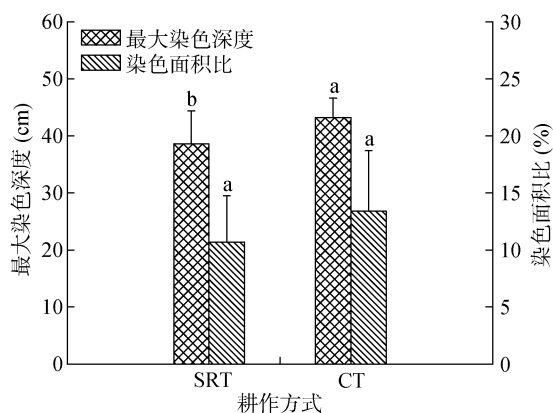
Fig. 2 Images of dyed soil profiles in sugarcane fields under different tillage patterns

对 30 个土壤染色剖面进行统计与分析,得出 2 种不同耕作方式下土壤剖面染色形态特征参数,如图 3 所示。由图 3 可知传统耕作甘蔗地土壤平均最大染色深度为 43.19 cm,显著($P<0.05$)大于粉垄耕作甘蔗地(38.61 cm),是其 1.12 倍。对于粉垄耕作甘蔗地,其染色深度范围在 45 ~ 50 cm 的染色剖面仅占染色剖面总数的 40.00%,数量少于传统耕作甘蔗地(67.00%)。染色表征水流运动所产生的湿润锋形态,在一定程度上反映了水流的下渗深度,间接表明优先流的发生范围。因此,在相同的外部供水条件下,对于粉垄耕作甘蔗地来说,其优先流发生范围相比传统耕作甘蔗地来说小,主要集中在 15 ~ 45 cm 土壤层内,且多以团块状湿润锋形式存在,即发生了明显的横向运动。而传统耕作甘蔗地优先流多以竖向运动为主,可达到本研究土壤深度 50 cm 处。对于总的水流运动形态来说,粉垄耕作与传统耕作甘蔗地的平均染色面积比之间差异不显著($P>0.05$),分别为 21.33% 和 26.81%,反映出 2 种耕作方式下的土壤空间中的水流下渗量相同,但运动形式侧重有所不同。同时也说明,耕作方式所产生的田间土壤水流运动形式表现为基质流与优先流伴随发生。

2.2 耕作方式对甘蔗地优先流现象的影响

分别计算 2 种耕作方式下甘蔗地的土壤基质流深度、优先流比、长度指数等 3 个优先流特征参数,计算结果如表 1 所示。由表 1 得出粉垄耕作下的 3 个样地中,样地 1 的平均基质流深度为 4.04 cm,均显著($P<0.05$)大于样地 2(2.90 cm)和样地 3(2.24 cm)。在野外实地观察中发现,样地 1 中的枯落物数量明显多于其他 2 个样地,土壤表层前期含水量($33.17 \text{ m}^3/\text{m}^3$)

高于样地 2($24.57 \text{ m}^3/\text{m}^3$)和样地 3($26.49 \text{ m}^3/\text{m}^3$),在相同外部供水条件下,水分入渗运动过程中的基质流形式所产生的时间和深度均大于其他 2 个样地。即在相同时间内,样地 2 和样地 3 先产生优先流现象,这与各样地的优先流比与长度指数相对应。传统耕作甘蔗地 3 个样地之间的基质流深度同样表现为样地 1 显著大于样地 2 和样地 3($P<0.05$),且对于 2 种不同耕作方式下的甘蔗地,二者之间差异也显著($P<0.05$),粉垄耕作甘蔗地平均基质流深度为 3.06 cm,比传统耕作甘蔗地平均基质流深度深 1.83 cm。说明在相同田间灌溉条件下,粉垄耕作甘蔗土壤优先流的产生时间要滞后于传统耕作甘蔗地,是其 1.67 倍。



($n = 15$, 图中小写字母不同表示不同耕作方式间最大染色深度或染色面积比差异显著($P<0.05$))

图 3 不同耕作方式下甘蔗地染色形态特征参数

Fig. 3 Characteristic parameters of dyed morphology of sugarcane fields under different tillage patterns

优先流比能够较好地反映土壤空间中优先流现象的发生程度^[16]。由表 1 分析得到,同一耕作方式

表 1 不同耕作方式下甘蔗地土壤优先流特征参数
Table 1 Characteristic parameters of soil preferential flows in sugarcane fields under different tillage patterns

耕作方式	样地编号	基质流深度(cm)	优先流比(%)	长度指数(%)
SRT	1	4.04 ± 0.62 a	61.33 ± 8.67 b	493.64 ± 105.35 a
	2	2.90 ± 0.77 b	70.47 ± 7.45 ab	494.52 ± 71.24 a
	3	2.24 ± 0.84 b	80.35 ± 7.52 a	593.20 ± 60.96 a
CT	1	2.32 ± 0.86 a	86.24 ± 3.46 a	748.72 ± 152.99 a
	2	1.60 ± 0.64 b	81.64 ± 5.60 a	424.04 ± 74.01 b
	3	1.58 ± 0.86 b	88.80 ± 6.67 a	796.52 ± 89.15 a

注：n=5，小写字母不同表示同一种耕作处理下不同样地之间差异显著(P<0.05)。

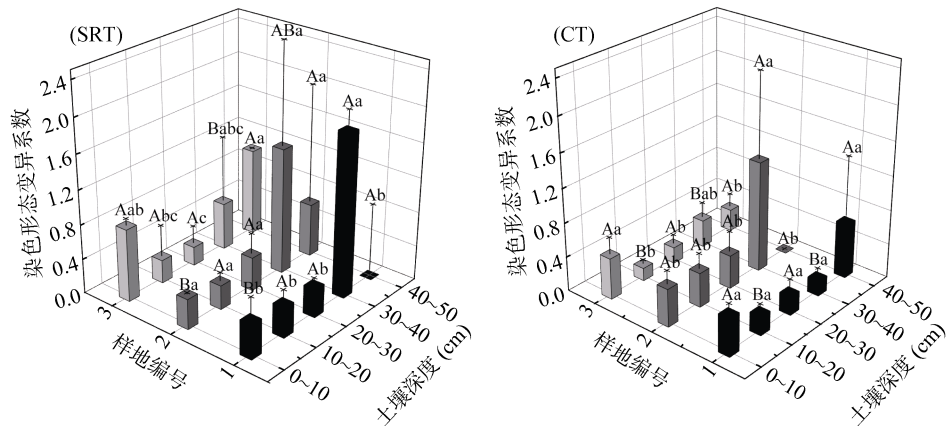
下样地间的甘蔗地优先流比总体差异不显著(P>0.05)，但粉垄耕作甘蔗地的 3 个样地的优先流比均小于传统耕作甘蔗地，表现为平均优先流比为 70.72%，显著(P<0.05)小于传统耕作甘蔗地(85.56%)。在一定程度上说明，粉垄耕作后的甘蔗地，其土壤中的优先流现象比传统耕作甘蔗地要小，这种条件下可以降低水肥以优先流的形式流失，提高耕层土壤中的水肥含量，有助于田间作物对养分的吸收利用。

长度指数描述了由优先流所引起的染色形态在土壤空间的异质性变化，其表征了优先流现象的变化程度^[17]。同一种耕作方式下，仅有传统耕作方式样地 2 与其他 2 个样地之间差异显著，这主要是因为其对应的优先流比仅为 81.64%，土壤水分入渗过程中优先流现象相对其他样地不明显，基质流在整个水分入渗过程中占比较大，导致染色水流在土壤空间中以优先流形式运动变化不明显。同时，由粉垄耕作甘蔗

样地的优先流比得出，其值均小于传统耕作甘蔗样地 2，但所得长度指数均大于 424.04%，说明长度指数和优先流比虽然均可以反映优先流在土壤空间中的发生变化，但其相互具有一定的独立性。因此，应选择较多特征参数对优先流进行综合分析，以确保分析结果的准确性。通过对粉垄耕作与传统耕作甘蔗地的长度指数进行分析，其对应的平均长度指数分别为 527.12% 和 656.43%，二者之间差异显著(P<0.05)，说明传统耕作甘蔗地土壤空间中的优先流变化明显，优先流现象较粉垄耕作甘蔗地显著。

2.3 耕作方式对甘蔗地优先流程度的影响

染色形态变异系数可以较好地反映出土壤空间中的优先流发育程度^[18]。将整个土壤垂直染色剖面以 10 cm 为土层进行划分，分别计算不同耕作方式下甘蔗地沿土壤深度增加方向上的 5 层土壤染色变异系数，结果如图 4 所示。



(n=5，大写字母不同表示相同深度不同样地之间差异显著(P<0.05)，小写字母不同表示同一样地不同深度之间染色形态差异性显著(P<0.05))

图 4 不同耕作方式下甘蔗地土壤染色形态变异系数

Fig. 4 Variation coefficients of soil dyed morphology in sugarcane fields under different tillage patterns

粉垄耕作甘蔗地中染色形态变异系数在样地 1 和样地 2 的整个土壤剖面中呈现出先减小后增大再减小的变化趋势，最大值均出现在 30~40 cm 土壤层

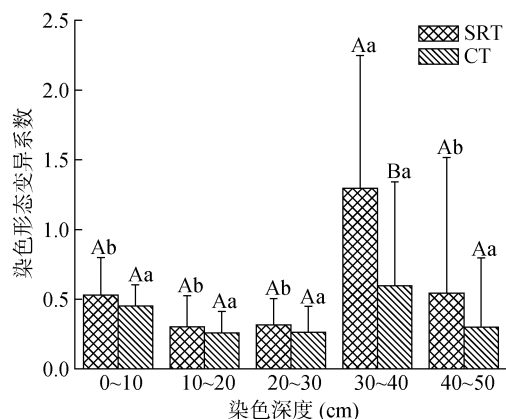
中，其值分别为 1.88 和 1.46，而样地 3 的染色形态变异系数则表现为先减小后增大的变化趋势，最大值出现在 40~50 cm 土层内，值为 1.02。染色形态变异

系数最小值在样地1中出现在40~50 cm土层中,样地2和样地3则出现在土层10~20 cm和20~30 cm内。但3个样地的染色形态变异系数总体呈现先降低后增加的变化趋势,反映出粉垄耕作甘蔗地土壤空间中的优先流发育程度随土壤深度的增加而降低,这也进一步说明粉垄耕作后的田间土壤的耕层具有相对较好的保蓄水分能力。对于同一土壤深度不同粉垄耕作甘蔗样地来说,3个样地之间染色形态变异系数总体差异不显著($P>0.05$),说明粉垄耕作3个甘蔗样地中的优先流在土壤空间中的运动变化过程相似。对于传统耕作甘蔗地来说,沿土壤深度增加方向,3个样地的染色形态变异系数均呈现先减小再增加的变化趋势,虽与粉垄耕作甘蔗地相似,但其3个样地中出现的最大染色形态变异系数仅为1.29,显著小于粉垄耕作甘蔗地(1.88),对应的最小值为0,说明传统耕作甘蔗地相比粉垄耕作甘蔗地,其优先流发育程度相对较高。而对于同一土壤层,不同传统耕作样地之间总体差异不显著($P>0.05$),与粉垄耕作甘蔗地相一致。

将2种耕作方式下甘蔗地的染色形态变异系数进行综合分析,结果如图5所示。粉垄耕作和传统耕作甘蔗地的平均染色形态变异系数均在0~30 cm土壤深度范围内呈现降低的变化趋势,且二者之间差异不显著($P>0.05$),反映出其优先流程度均趋于增加。随土壤的进一步加深,30~40 cm土层内的染色形态变异系数急剧增大($P<0.05$),分别达到0~50 cm土壤深度范围内的最大值(1.30和0.60)。而40~50 cm土层,2种耕作方式下甘蔗地的染色形态变异系数又发生降低现象,即优先流程度又有所增加。虽然粉垄耕作与传统耕作甘蔗地的优先流程度随土壤深度的总体变化趋势相一致,但是对其0~50 cm整个土壤层进行分析发现,粉垄耕作甘蔗地的染色形态变异系数(1.19)与传统耕作(0.86)之间差异显著($P<0.05$),且二者之间相差1.38倍。进一步说明土壤空间中粉垄耕作甘蔗地的优先流发育程度要显著低于传统耕作甘蔗地,在一定程度上具有较高的土壤蓄水保肥能力。

3 讨论

不同田间耕作方式会改变土壤中下渗水流的运动状况,进而影响土壤优先流的发展变化。通过对甘蔗地土壤染色形态图像进行解析,其中传统耕作甘蔗地内所形成的染色形态主要为指状或枝状形式,这与研究者对华北土石山区^[19]、东北黑土区^[20]、西北黄土区^[21]和南方紫色砂岩区^[22]的耕地水分运动所得研究结果相一致,而粉垄耕作甘蔗地的染色形态即水流



($n=15$, 大写字母不同表示相同土层深度下不同耕作方式之间差异显著($P<0.05$), 小写字母不同表示相同耕作方式下不同土层深度之间差异显著($P<0.05$))

图5 不同耕作方式之间的土壤染色形态变异系数对比

Fig. 5 Comparison of variation coefficients of soil dyed morphology under different tillage patterns

湿润锋则多以离散团块状的形式为主,与传统耕作存在一定差别。在对黑土与紫色土耕地的优先流研究中,蒋小金等^[20]与戴翠婷等^[23]均发现,土壤中水流虽以斜枝状侧流形态为主,但也存在少量横向侧流现象,再次反映出粉垄耕作田间的土壤优先流有别于传统耕作,其多以横向流运动为主。同时,在相同外部供水条件下,粉垄耕作与传统耕作甘蔗地的平均总染色面积比之间差异不显著($P>0.05$),但平均最大染色深度之间差异显著($P<0.05$),这也说明虽然耕作使田间耕层土壤疏松,增加了土壤总孔隙度^[24],但粉垄耕作形成了较多的横向孔隙结构,更多的土壤水分以横向流动为主,降低了以往耕作方式下的竖向水分运动形式,改善了土层间的水分状况。

本研究得出,在相同外部供水条件下,粉垄耕作甘蔗地的优先流发生时间晚于传统耕作甘蔗地,是其发生速度的1.67倍,且2种耕作方式下的甘蔗地水流运动均以优先流形式为主,优先流占比均高于70.00%,间接说明传统耕作甘蔗地的水分入渗相对较快。粉垄耕作深耕土壤可达50~60 cm^[8],较以往深松、翻耕等耕作方式形成的耕层深度有所增加。但研究发现,深松可增加土壤孔隙度,提高土壤水分垂向渗透速率^[25-26],有利于水分向深层入渗,这与粉垄耕作存在一定差异,主要是由于粉垄耕作使用了垂直旋磨钻头,形成的土壤颗粒更加细小化,且以横向孔隙结构为主。

王发等^[14]在对岩溶区常年翻耕农地优先流特征研究中发现,其优先流比仅为35.00%,显著低于本研究2种耕作方式下的土壤优先流比,其主要是由耕作方式的差异所造成的,常年翻耕等频繁的耕作方式

会使土壤有机矿化速率加快,团聚体稳定性降低,原有田间孔隙结构受到破坏^[27-28]。在耕作初期,土壤大孔隙数量较多,但随着时间的推移,耕作措施产生的大孔隙比例有所下降,中小孔隙比例增加^[29]。在这种条件下,土壤水分运动过程中的优先流现象相对较小^[12]。同时,在对样地调查中发现,粉垄耕作甘蔗地的枯枝落物形成的地表覆盖度(25.00%)和土壤前期含水量($32.69\text{ m}^3/\text{m}^3$)高于传统耕作甘蔗地(17.00%和 $25.49\text{ m}^3/\text{m}^3$),且粉垄耕作甘蔗地样地 1 由于地表枯枝落物相比样地 2 和样地 3 多,对应的土壤前期含水量略高于其他 2 个样地,其土壤优先流现象及程度均较低。而粉垄耕作甘蔗地的优先流发生程度也高于传统耕作甘蔗地,说明土壤前期含水量较高时,在一定程度上会降低土壤优先流程度,这与张欣等^[30]对前期含水量影响下的西南山区农地土壤优先流所得结果相一致。因此可以得出,即使在相同区域内,不同的耕作方式、不同的田间环境都会对土壤优先流产生影响。

染色形态变异系数反映了土壤空间中优先流的发育程度,本研究得出 0~50 cm 土壤深度范围内,粉垄耕作与传统耕作的染色形态变异系数分别为 1.19 和 0.86,吴庆华等^[18]研究发现,变异系数 $\geq 0.5\%$ 为优先流一般发育,因此 2 种耕作甘蔗地均为优先流一般发育。一方面说明耕作措施对田间优先流现象具有一定的降低作用^[12,14],另一方面说明通过粉垄技术整地后的田间,其土壤优先流所产生的水肥流失影响要小于传统翻耕等耕作措施。但这里我们应该注意,由于以往研究者是在直径 9.5 cm、高 15 cm 的土柱中得到的染色变异系数评价结果,而非本研究田间实地情况下所得。因此,对于染色形态变异系数数值上二者相差较大。同时,不同的外界供水量也会影响优先流的发展变化^[21,31]。

由于本研究仅对目前岩溶区内甘蔗种植过程中广泛使用的耕作措施进行了研究,今后可对农业生产中推广使用的保护性耕作措施,如秸秆覆盖等耕作方式开展进一步研究,以期完善耕作条件影响下的土壤水分运动提供理论基础。

4 结论

1)在相同外部供水条件下,2 种耕作方式下的甘蔗地优先流与基质流伴随发生,但传统耕作甘蔗地优先流运动分化更显著,以指状或枝状形式为主,即多为竖向运动,且湿润锋平均下渗深度达 43.19 cm,而粉垄耕作甘蔗地的优先流湿润锋多为团块状形态,以

横向运动为主,其平均下渗深度仅为 38.61 cm,显著低于传统耕作甘蔗地。

2)粉垄耕作甘蔗地优先流发生时间显著滞后于传统耕作甘蔗地,且在土壤空间中的平均优先流比为 70.72%,显著小于传统耕作甘蔗地(85.56%)。

3)粉垄耕作与传统耕作相比,其田间土壤空间中优先流现象(平均长度指数为 527.12%)和优先流发育程度(平均优先流比为 70.72%)均显著小于传统耕作甘蔗地。粉垄耕作技术的使用,在一定程度上降低了岩溶区蔗田土壤优先流程度,保蓄了蔗田土层中的水肥。

参考文献:

- [1] 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
- [2] 程竹华, 张佳宝. 土壤中优势流现象的研究进展[J]. *土壤*, 1998, 30(6): 315-319
- [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] Wesley W S, John T W. Preferential flow estimates to an agricultural tile drain with implications for glyphosate transport[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2006, 35(5): 1825-1835
- [5] 张继光, 陈洪松, 苏以荣, 等. 喀斯特峰丛洼地坡面土壤水分空间变异研究[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(8): 54-58
- [6] 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: 284-297
- [7] 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
- [8] 韦本辉, 甘秀芹, 申章佑, 等. 粉垄栽培甘蔗试验增产效果[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(21): 4544-4550
- [9] 张中彬, 彭新华. 土壤裂隙及其优先流研究进展[J]. *土壤学报*, 2015, 52(3): 477-488
- [10] 郭晓霞, 刘景辉, 田露, 等. 轮作条件下免耕对黄土高原旱作土壤水分入渗特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(10): 112-117
- [11] 何丹, 马东豪, 张锡洲, 等. 土壤入渗特性的空间变异规律及其变异源[J]. *水科学进展*, 2013, 24(3): 340-348
- [12] 李文凤, 张晓平, 梁爱珍, 等. 不同耕作方式下黑土的渗透特性和优先流特征[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(7): 1506-1510
- [13] 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
- [14] 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
- [15] 王铁生. 我国农业耕作制度的区划及成就[J]. *农业科技与装备*, 2013(5): 84-85

- [16] Van Schaik N. Spatial variability of infiltration patterns related to site characteristics in a semi-arid watershed[J]. Catena, 2009, 78(1): 36–47
- [17] Tobella A B, Reese H, Almaw A, et al. The effect of trees on preferential flow and soil infiltrability in an agroforestry parkland in semiarid Burkina Faso[J]. Water Resources Research, 2014, 50(4): 3342–3354
- [18] 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
- [19] 杜晓晴, 牛健植, 侯琨, 等. 华北土石山区优先流区与基质流区土壤特性分析[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(3): 51–57
- [20] 蒋小金, 王恩妲, 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
- [21] 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
- [22] 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
- [23] 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
- [24] 陈学文, 张晓平, 梁爱珍, 等. 耕作方式对黑土耕层孔隙分布和水分特征的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(6): 114–120
- [25] Borghei A M, Taghinejad J, Minaei S, et al. Effect of subsoiling on soil bulk density, penetration resistance, and cotton yield in northwest of Iran[J]. International Journal of Agriculture & Biology, 2008, 10(1): 120–123
- [26] 张明君, 李玲玲, 谢军红, 等. 耕作方式与施肥对旱农区粮饲兼用玉米耗水特性和干物质积累的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(1): 179–185
- [27] 王丽, 李军, 李娟, 等. 轮耕与施肥对渭北旱作玉米田土壤团聚体和有机碳含量的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(3): 759–768
- [28] 陈宁宁, 李军, 吕薇, 等. 不同轮耕方式对渭北旱塬麦玉轮作田土壤物理性状与产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(9): 1102–1111
- [29] 张海林, 秦耀东, 朱文珊. 耕作措施对土壤物理性状的影响[J]. 土壤, 2003, 35(2): 140–144
- [30] 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
- [31] 姚晶晶, 程金花, 张洪江, 等. 入渗水量对重庆四面山草地优先流影响的定量评价[J]. 水土保持学报, 2018, 32(2): 45–51

Tillage Pattern Effects on Characteristics of Soil Preferential Flow in Sugarcane Fields in the Karst Region

CHEN Xiaobing^{1,2}, YAN Lei³, LI Zhendong³, SAEED Rad³, CHEN Tingsu⁴, GAN Lei^{2,3*}

(1 Guangxi Collaborative Innovation Center for Water Pollution Control and Safety in Karst Area, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China; 2 Guangxi key laboratory of Environmental Pollution Control Theory and Technology, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China; 3 College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China; 4 Microbiology Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China)

Abstract: The unique geological conditions lead to the soil preferential flow widely occurs in the karst region. Therefore, in this paper, the typical sugarcane fields in the karst region of Guangxi was taken as study objects, the methods of brilliant blue dye tracer technique and image analysis were used, and the characteristics of soil preferential flows in sugarcane fields were studied under the conventional tillage (CT) and smash-ridging tillage (SRT) in order to reveal the effects of tillage patterns on the occurrence and spatial development of soil preferential flow in sugarcane fields in the karst region. Results showed that: 1) the differentiation degree of preferential flow movement was higher in CT sugarcane field under the same water supply condition. The motion morphology of wetting front in CT sugarcane field was finger form and reached at a depth of 43.19 cm, which was significantly deeper than that of SRT one ($P<0.05$). However, the wetting front of preferential flow in SRT sugarcane field was mainly blocky morphology which indicated a horizontal mobility pattern. 2) The occurrence time of preferential flow in SRT sugarcane field was 1.67 times later than that of CT one ($P<0.05$). 3) With the increase of soil depth, the preferential flow levels of two tillage patterns both increased first and then decreased. But the preferential flow fraction (70.72%) and length index (527.12%) of SRT sugarcane field were significantly lower than those of CT one ($P<0.05$). Meanwhile, the average of variation coefficient of the dyed area percentages in the whole soil profiles in SRT sugarcane field was 1.38 times higher than that of CT one. The degree of preferential flow in SRT sugarcane field was significantly lower than that of CT one. To a certain extent, compared with CT, SRT can reduce the phenomenon of preferential flow and preserve moisture and fertility in sugarcane field of karst region.

Key words: Karst region; Smash-ridging tillage (SRT); Conventional tillage (CT); Preferential flow