

# 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

陈晓冰<sup>1,2</sup>, 严磊<sup>3</sup>, 陈廷速<sup>4</sup>, 李振东<sup>3</sup>, 甘磊<sup>2,3</sup>, SAEED Rad<sup>3</sup>

(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:** 以西南岩溶区的典型农地甘蔗地为研究对象, 采用野外染色示踪技术, 利用形态学解析手段, 并结合土壤水分分层评价方法, 对粉垄耕作和免耕方式下甘蔗地土壤优先流特征进行研究。结果表明: 在相同外部供水条件下, 粉垄耕作甘蔗地水分下渗湿润锋迹线较免耕甘蔗地平缓, 呈均匀整体形式下渗, 平均下渗深度是免耕甘蔗地的 0.95 倍, 其优先流染色形态相对于免耕甘蔗地的枝状分化状态, 多以零散团块状分化形式为主; 在相同外部条件下, 免耕甘蔗地最先发生优先流现象, 优先流的发生速度是粉垄耕作甘蔗地的 1.45 倍, 平均优先流比达 88.61%, 大于粉垄耕作甘蔗地(82.89%), 二者之间差异显著( $P < 0.05$ ); 沿土壤深度的增加, 优先流在粉垄耕作甘蔗地土壤空间中的发展变化程度表现为“次活跃—活跃—次活跃—相对稳定—次活跃”, 而免耕甘蔗地表现为“次活跃—活跃—次活跃—相对稳定”, 免耕甘蔗地的优先流空间发展变化程度较高, 主要发生在 5—35 cm 土层范围内, 相比粉垄耕作甘蔗地 10—30 cm 土层深。粉垄耕作方式与免耕方式相比, 降低了岩溶区甘蔗地土壤优先流的发生与发展, 在一定程度上提高了土壤的保肥蓄水能力。

**关键词:** 岩溶区; 不同耕作方式; 优先流; 空间变化程度

**中图分类号:** S152.7; S344.9; S566.1      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1009-2242(2018)04-0058-09

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.04.010

## The Characteristics of Preferential Flow in Sugarcane Field with Smash-Ridging and No-Tillage in the Karst Area of Southwest China

CHEN Xiaobing<sup>1,2</sup>, YAN Lei<sup>3</sup>, CHEN Tingsu<sup>4</sup>, LI Zhendong<sup>3</sup>, GAN Lei<sup>2,3</sup>, SAEED Rad<sup>3</sup>

(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. Guilin University of Technology, College of Environmental Science and Engineering, Guilin, Guangxi 541004; 4. Microbiology Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007)

**Abstract:** Preferential flow is a non-equilibrium flow which presents the rapid movement of water and solute transport in soil. It has become a significant soil water movement type in special geological conditions of karst area. This paper concentrated on typical farmland of sugarcane field with smash-ridging and no-tillage types in the karst area of Southwest China, using the methods of brilliant blue dye, image analytics and the soil moisture layer evaluation to present the soil preferential flow features of two tillage types. The results showed that under the same water supply condition, the wetting front curve of sugarcane field with smash-ridging was more gentle than no-tillage field. The average infiltration depth of sugarcane field with smash-ridging was 0.05 times lower than that of no-tillage type, which presented homogeneous infiltration pattern. The preferential flow staining pattern of sugarcane field with two tillage types was scattered clumps (smash-ridging type) and dendritic patterns (no-tillage type), respectively. At the same external condition, the occurrence of preferential flow was faster in sugarcane field with no-tillage, which the rate of preferential flow was 1.45 times higher than the sugarcane field with smash-ridging. The average preferential flow fraction of sugarcane field with smash-ridging was 82.89%, which was lower than the no-tillage (88.61%). There was significant difference between them ( $P < 0.05$ ). Along with soil depth, the occurrence and change degrees of preferential flow in

收稿日期: 2018-02-12

资助项目: 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)

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: 甘磊(1983—), 男, 博士, 副教授, 主要从事土壤结构与土壤水热运动模拟研究。E-mail: allen\_gl2006@163.com

sugarcane field with smash-ridging changed from secondary active, active, secondary active, relatively stable, and to secondary active, while the change degrees of preferential flow in no-tillage type was higher, which changed from secondary active, active, secondary active, and to relatively stable. The occurrence of preferential flow in no-tillage type was mainly at depths of 5—35 cm, which was deeper than the smash-ridging type (10—30 cm). Compared with the no-tillage type, the smash-ridging type reduced the occurrence and change degrees of preferential flow in sugarcane field of karst area. The soil abilities of water and fertility retention were improved to a certain extent.

**Keywords:** karst area; different tillage types; preferential flow; degree of spatial variation

优先流作为土壤水分的一种快速运动形式,其发生会导致土壤水分与养分的快速渗漏流失,影响区域水环境。目前国内学者已经开展了不同土壤环境中的优先流相关研究,特别是我国学者,集中对北方土石山区<sup>[1]</sup>、东北黑土区<sup>[2-3]</sup>、黄土高原区<sup>[4]</sup>、南方花岗岩区<sup>[5]</sup>、南方红壤区<sup>[6]</sup>和南方紫色砂岩区<sup>[7]</sup>的林地、农地和草地等土壤优先流特征进行了研究,并取得了一定研究成果。随着对优先流认识的深入,研究重点已经逐步扩展至生态脆弱地区,如岩溶区。岩溶区特殊的岩性地质条件造成其区内土层薄、土壤总量少,且形成了典型的地表地下双层空间结构,孔隙、裂隙高度发育,在降雨和灌溉条件下,土壤优先流现象普遍发生<sup>[8-9]</sup>。然而,当前对岩溶区优先流的研究仅集中在分析其对区域地下水补给的影响方面<sup>[10-12]</sup>,而我国部分学者也仅对岩溶峰丛洼地区域<sup>[13]</sup>的土壤优先流进行了基础研究,系统对岩溶区土壤优先流发生、变化等特征的相关研究与报道仍相对较少。

广西作为我国岩溶地貌的主要分布区域,形成的石灰土壤总计 81.86 万 hm<sup>2</sup>,其中耕作土壤 20.41 万 hm<sup>2</sup>,约占区内旱地总面积的 22.26%。区内种植着我国 60%以上的甘蔗,作为我国主要甘蔗种植区,90%以上的甘蔗种植在旱地。为提高田间甘蔗产量,解决因气候干旱、施肥过量以及甘蔗传统单一的连作制种植方式带来的蔗田生态条件恶化等问题,近几年韦本辉等<sup>[14]</sup>提出了一种新的耕作技术——粉垄耕作,即在种植带下形成“U”形槽状田间微地形,以便积聚雨水,可保障甘蔗全生育期水肥稳定均衡供给,提高了甘蔗的产量。然而粉垄耕作后所形成的田间微地形,在持续的降雨和灌溉条件下极易造成种植带垄间过量积水,导致土壤长期处于过饱和状态,在冷

热干湿交替作用下,土壤理化性质会发生改变,其变化对田间优先流的发生起到显著的影响作用<sup>[15]</sup>。在这种情况下,充分了解粉垄耕作甘蔗地田间的土壤优先流现状,对深入分析粉垄耕作与其他耕作方式下的甘蔗地水肥利用效率之间的差异具有一定的科学指导作用。

本研究以岩溶区粉垄耕作和免耕方式下甘蔗地的土壤染色图像为基础,运用形态学处理方法和统计学分析方法,探究两种耕作方式下甘蔗地土壤优先流的发生及其空间发展变化特征,为认识西南岩溶地区土壤水分运动规律,丰富土壤物理学提供理论基础,也为今后优化粉垄耕作技术,进一步提高田间水肥利用率,增加作物产量,降低岩溶区农业水生态环境污染提供一定科学支撑。

## 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的研究基地内,地理坐标为 23°14'20"N, 108°03'18"E, 基地距离南宁主城区 80 km, 海拔 105~106 m, 年平均气温 21.6 °C, 年降水量 1 304 mm, 属于亚热带季风气候, 土壤类型主要为红壤土和石灰土, 土壤质地为壤土。

### 1.2 研究方法

1.2.1 样地选择与布设 选择基地内 2 块相邻且面积相同(1 170 m<sup>2</sup>)的甘蔗地作为研究样地,其中一块甘蔗地采用粉垄耕作方式处理(T),另一块甘蔗地为免耕方式处理(NT)。并将每块甘蔗地继续进行种植小区划分,每个小区长 7 m, 行距 1.3 m, 种植 5 行, 小区之间均设隔离行。施肥方法为:基肥复合肥 0.23 kg/hm<sup>2</sup>, 追肥复合肥 0.23 kg/hm<sup>2</sup>。试验时间为 2017 年 7 月 23 日至 8 月 23 日,样地基本情况见表 1。

表 1 样地基本情况

样地	海拔/m	坡度/(°)	作物品种	耕作方式	种植年限/a	生长状况	覆盖度/%
甘蔗地 1	105	0	桂柳 05—136	粉垄耕作	3	伸长期	25
甘蔗地 2	105	0	桂柳 05—136	免耕	3	伸长期	35

在每种耕作方式下的甘蔗样地内随机选取 6 个种植小区,并在每个小区内的任意种植行间沿种植带方向,随机选择一处土壤优先流观测点,总计 12 个观测样点。首先缓慢清除样点表面枯枝落叶层,并砸入

长、宽均为 60 cm,高 30 cm,厚度为 0.3 cm 的金属钢板样方,砸入深度 15 cm,然后在样方上部覆盖高密度聚乙烯薄膜,进行样地预处理,以保证开始进行染色试验前样地具有相近的土壤前期含水量。

1.2.2 染色示踪 样地预处理 48 h 后, 移除覆盖在样方上的塑料薄膜, 根据当地大雨强度, 即 24 h 累计降雨 25 mm 计算出所需水量, 配置 4 g/L 的亮蓝色溶液 9.5 L(含 5% 的损耗); 然后使用连接有恒流泵(保定兰格 BT100—1 L)的喷头, 以 150 mL/min 的流量将亮蓝溶液均匀喷洒至样方内, 溶液施加结束后, 继续使用塑料薄膜覆盖样方 24 h。

1.2.3 样地挖掘 24 h 后, 移除塑料薄膜和金属样方。由于样方砸入过程中扰动样方边缘土壤(本研究边缘宽度为 5 cm), 为防止边缘效应影响染色图像数据获取, 仅选择样方中间 50 cm×50 cm 的区域作为土壤剖面挖掘区, 并以 10 cm 土壤宽度垂直挖掘样方, 每挖掘一层, 使用宽毛刷清理挖掘剖面, 并用 2 500 万像素数码单反相机配灰阶比色卡和三角架对染色剖面进行垂直拍摄。垂直挖掘深度直至染色消失为止。本研究挖掘至样地土壤 50 cm 深度处, 总计挖掘 60 个土壤剖面, 挖掘剖面示意见图 1。

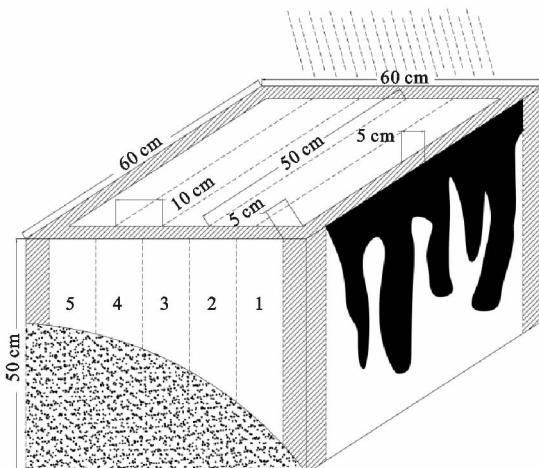


图 1 染色剖面挖掘示意

1.2.4 染色图像处理 使用 ERDAS IMAGINE 2016 软件对所得染色照片进行图像校正预处理, 然后通过 Photoshop CS6 软件按照研究规格(500 pixels×500 pixels)对图像进行裁剪, 并将其进行反相调节处理, 使染色区域变为黑色, 未染色区域变为白色, 调节图像阈值, 进行图像降噪, 使染色图像与实际状况相一致。最后利用 Image pro Plus v6.0 图像解析软件对处理后的垂直染色图像进行黑白像素点的分割与数量的统计分析, 即将黑白染色图像最终导出为一个仅含 0(黑色像素)和 255(白色像素)的二值矩阵数据。

#### 1.2.5 土壤优先流特征分析

(1) 土壤剖面染色面积比。土壤剖面染色面积比<sup>[16]</sup>是指某一土壤深度处(或土壤整个剖面中)染色面积占土壤剖面宽度(或剖面总面积)的比例, 其中染色面积可用像素面积来表示, 即 1 单位长度距离 = 1 pixel, 表达式为:

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

式中:  $DC$  为土壤某一深度处(或土壤整个剖面)的土壤染色面积比(%);  $D$  为土壤某一深度处(或土壤整个剖面)的土壤染色面积( $\text{mm}^2$ );  $ND$  为土壤某一深度处(或土壤整个剖面)的土壤未染色面积( $\text{mm}^2$ ), 本研究土壤剖面宽度取 500 mm, 即 500 pixels。

(2) 土壤优先流发生深度。土壤优先流发生深度<sup>[17]</sup>可用土壤基质流深度来反映, 即基质流发展成为优先流时基质流区域的最大垂直深度, 该深度为土壤剖面中优先流与基质流之间的临界深度, 本文定义土壤剖面中某一深度处的染色面积比  $\geq 80\%$  时, 该深度即为基质流深度  $UniFr(\text{mm})$ 。

(3) 土壤优先流比。土壤优先流比<sup>[17]</sup>是指土壤整个剖面中优先流对应的染色面积占整个土壤剖面总染色面积的比例, 它反映了优先流在土壤中的程度, 表达式为:

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

式中:  $PF-fr$  为土壤优先流比(%);  $UniFr$  为基质流深度( $\text{mm}$ );  $W$  为土壤剖面染色宽度( $\text{mm}$ );  $TotStAr$  为土壤剖面总染色面积( $\text{mm}^2$ )。  $PF-fr$  值越大, 优先流程度越高。

(4) 土壤染色复杂度。土壤染色复杂度是指染色图像表现在土壤剖面中的复杂程度。优先流在大孔隙中快速运动, 形成的湿润锋迹线的形态为不同形状的图斑, 土壤剖面中的图斑表征了优先流在土壤环境中的作用程度, 可以描述其在土壤空间中运动过程状态。因此本研究将分数维几何学中的复杂度<sup>[18]</sup>进行重新赋值, 来反映优先流在土壤中的状况, 表达式为:

$$C = \frac{2 \lg P}{\lg A} \quad (3)$$

式中:  $C$  为土壤染色复杂度;  $P$  为土壤剖面染色图像总周长( $\text{mm}$ );  $A$  为染色区域面积( $\text{mm}^2$ )。  $C$  值越高, 说明土壤剖面染色复杂程度越高, 染色形态越曲折复杂, 土壤优先流越发育。

(5) 土壤染色形态变异性。土壤染色形态变异性<sup>[19]</sup>是指不同土壤深度范围内的土壤染色图像的变化程度, 即变异系数, 它反映了土壤空间中优先流的发育程度, 表达式为:

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

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n DC_i$$

式中:  $CV$  为土壤染色面积比变异系数;  $n$  为土壤垂直剖面计算的土层数量;  $DC_i$  为土壤剖面第  $i$  层对应的染色面积比(%), 本研究以单位 1 mm 土壤深度进行

土层数量计算。CV值越大,说明优先流程度越低。

1.2.6 数据处理软件 本研究使用ERDAS IMAGINE 2016、Photoshop CS6 和 Image pro Plus v 6.0 等软件对染色图像进行校正、染色变换以及二值矩阵形态学解析分析;使用SPSS 18.0 软件对所得数据采用单因素方差分析方法进行差异性分析;使用AutoCAD 2016 和 SigmaPlot 12.5 软件对样地挖掘剖面以及染色图像数据进行作图。

## 2 结果与分析

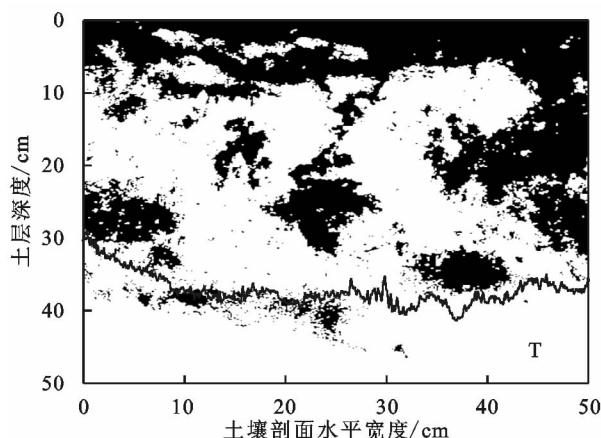
### 2.1 甘蔗地土壤染色形态特征分析

通过对粉垄耕作和免耕甘蔗地土壤垂直剖面染色图像进行解析,分析两种不同耕作方式下甘蔗地土壤染色形态特征,但由于每种耕作方式均有30个土壤染色剖面,总计60个土壤染色剖面,数量较多,因此每种耕作方式下甘蔗地仅选择1个具有代表性的剖面进行展示。

图2为施加相同数量的亮蓝染色溶剂,经过24 h后所获得的土壤垂直剖面染色形态图像以及平均染色湿润锋迹线图像。从图2可以看出,粉垄耕作甘蔗地表层0—10 cm深度范围内的土壤基本全部被染色,染色面积比在80%以上,0—50 cm土层深度范围内的整个剖面染色呈零散团块状或团状形态分布,上下染色出现明显非联通断离式的分布状态;而免耕甘蔗地仅0—5 cm土层深度范围内出现大面积整体的染

色现象,染色面积比大于80%,土壤垂直剖面染色形态由土壤表层至深层呈上下联通的树枝或指状染色分化形态。说明基质流与优先流伴随发生,但在相同外部供水条件下,粉垄耕作甘蔗地的土壤水分在入渗初期表现为以基质流为主的整体均匀入渗形式,随时间延续,优先流开始发生,相对于免耕甘蔗地,其优先流的分化也多表现为零散团块状形式,而非免耕甘蔗地初期短暂的基质流水分运动(0—5 cm),进而迅速转变为明显的枝状优先流水分运动状态。同时,免耕甘蔗地的枝状染色分布形态也表明土壤中有均匀分布,且上下连通性较高的水分快速入渗通道,而粉垄耕作甘蔗地土壤中虽然有优先流现象发生,但土壤中存在较多的横向水分运移通道,导致其染色形态呈团块状分布形式。

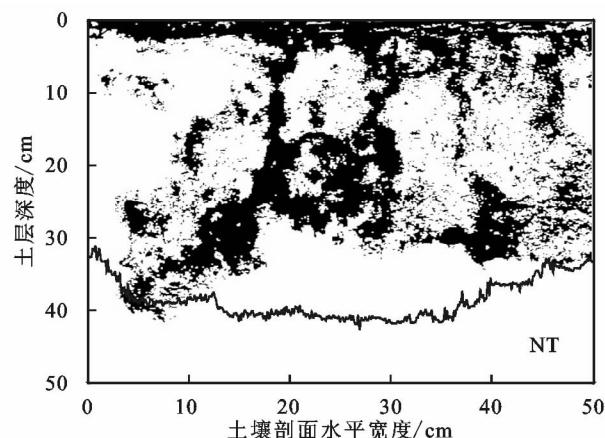
图2中显示粉垄耕作甘蔗地土壤中平均染色湿润锋迹线总体呈现较平缓向下入渗形式,即土壤剖面水平宽度0—50 cm范围内迹线斜率较免耕甘蔗地小,而免耕甘蔗地则表现为中间平缓,在水平宽度0—10 cm和35—50 cm迹线斜率较大的现象,说明免耕甘蔗地的土壤水分总体以优先流形式在集中多条优先通道中下渗,而粉垄耕作甘蔗地则表现为基质流整体向下入渗形式,但其染色湿润锋迹线单一波动幅度(水平25—35 cm)较免耕甘蔗地大,也进一步表明其土壤水分在此处存在优先流入渗形式,两种耕作方式甘蔗地内均有土壤优先流现象发生。



注:图中黑色为土壤染色形态图像,下方曲线为平均湿润锋迹线。

图2 不同耕作方式下甘蔗地土壤染色及平均湿润锋迹线形态

分别对60个土壤垂直染色剖面进行形态学数据分析与统计,结果见表2。粉垄耕作甘蔗地土壤平均最大染色深度为46.98 cm,小于免耕甘蔗地的平均最大染色深度(48.11 cm),但二者最大染色深度之间差异不显著( $P=0.271>0.05$ )。同时,两种耕作方式下甘蔗地土壤剖面均出现染色深度达50 cm的现象,其中免耕甘蔗地有18个剖面,其土壤染色深度在46—50 cm之间有7个剖面,而粉垄耕作甘蔗地染色深度达50 cm的剖面仅有13个,土壤染色深度在



46—50 cm之间的剖面也仅有4个。说明粉垄耕作在一定程度上降低了土壤水分快速入渗的能力,使甘蔗地土壤水分以相对均匀的整体入渗形式进行运动,同时促进了土壤空间中横向水分运动,最终形成零散团块状的染色形态,使样地土壤剖面平均总染色面积比(35.72%)大于免耕甘蔗地(35.13%)。但对60个剖面的总染色面积比进行差异性分析得出,两种耕作方式下甘蔗地的土壤总染色面积比差异不显著( $P=0.813>0.05$ ),这也进一步说明两种耕作方式下的甘

蔗地均有优先流现象发生。根据表 2 中两种耕作方式下甘蔗地的平均染色湿润锋深度得出, 粉垄耕作甘蔗地的平均染色湿润锋深度(36.49 cm)小于免耕甘蔗地的平均染色湿润锋深度(38.28 cm), 在相同外部灌溉或降雨条件下, 免耕农地内土壤水分平均下渗深度是粉垄耕作农地的 1.05 倍, 粉垄耕作措施在一定程度上有利于农地土壤水分的保蓄。但通过对两种甘蔗地的染色湿润锋深度进行显著性分析, 得出二者之间差异不显著( $P=0.258>0.05$ ), 这可能是由于两种耕作方式下的甘蔗地均发生土壤优先流现象所引起的。

表 2 不同耕作方式下甘蔗地土壤染色形态特征参数

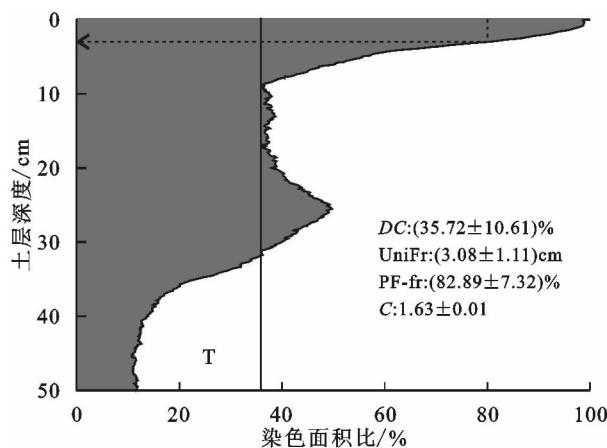
样地	耕作方式	最大染色深度/cm	总染色面积比/%	染色湿润锋深度/cm
甘蔗地 1	粉垄耕作	46.98±4.15	35.72±10.61	36.49±5.90
甘蔗地 2	免耕	48.11±3.70	35.13±8.76	38.28±6.22

注: 表中数据均为平均值±标准差。

## 2.2 甘蔗地土壤优先流发生及特征参数分析

分别对粉垄耕作和免耕甘蔗地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( $PF-fr$ )和复杂度( $C$ )4 个优先流特征参数进行对比分析(图 3)。粉垄耕作甘蔗地和免耕甘蔗地的土壤染色面积比均随土壤深度的增加, 总体呈现先降低后增加再降低的“S”形变化趋势, 最终达到 50 cm 土层深度。但粉垄耕作甘蔗地 0—10 cm 表层土壤中染色面积比的降低趋势相对缓慢, 即染色面积比沿土层

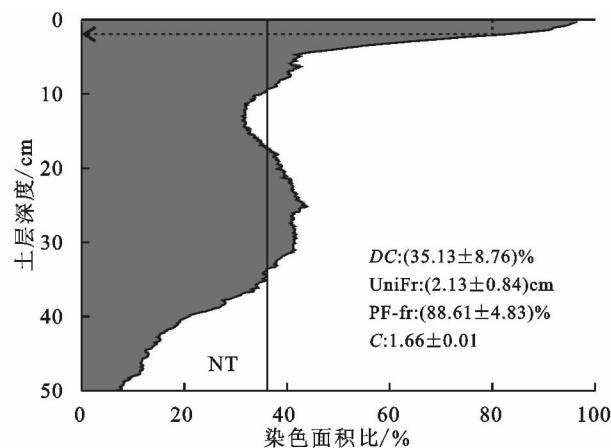
深度所形成的变化趋势线斜率相对较小, 随后所形成的波谷平缓且宽于免耕甘蔗地, 表现为 10—21 cm 土层深度范围内的平均染色面积比均达 36.00%, 而免耕甘蔗地的染色面积比沿土壤深度的变化趋势线所形成的波谷仅出现在 12—15 cm 土层深度范围内, 随后缓慢增加形成波峰, 其波峰宽度相比粉垄耕作甘蔗地(20~33 cm)宽。粉垄耕作甘蔗地染色面积比变化趋势线所形成的波峰相对较窄(25~27 cm), 随后又继续形成了平缓较宽(40~50 cm)的波谷。粉垄耕作对于农地土壤表层来说, 其影响了土壤的空间孔隙结构, 使原有孔隙均质细小化, 致使土壤染色面积比呈现相对缓慢的降低变化趋势, 即基质流在该土壤深度范围内成为了主要的土壤水分入渗形式。虽然免耕甘蔗地的土壤表层中也有基质流发生, 但其发生范围较小, 变化迅速, 可较快地转变为以优先流为主的土壤水分运动形式。由于免耕甘蔗地土壤孔隙未受破坏, 有多条相对集中且竖直的孔隙通道均匀的分布土壤空间中, 其所形成的染色面积比相对一致, 因此出现波峰平缓的变化趋势。而粉垄耕作甘蔗地的土壤空间中横向孔隙通道发育较高, 使样地内的水分运动形式在基质流变化后, 转变为横向占比较多的优先流运动形式, 即染色出现零散团块状分布状态, 引起土壤剖面染色面积比变化曲线出现了平缓的波谷变化趋势。由于上文已对总染色面积比进行分析, 故此处不再赘述。



注: 图中数据均为平均值±标准差。

图 3 不同耕作方式下甘蔗地土壤优先流特征参数

基质流深度不仅用于反映土壤水分入渗过程中的基质流发生运动区域, 它也可以间接表征优先流发生的快慢程度, 即对土壤水分入渗过程中优先流发生的响应速度。粉垄耕作和免耕甘蔗地土壤基质流深度结果如图 3 所示, 平均深度分别为 3.08, 2.13 cm, 二者之间差异显著( $P=0.000<0.05$ )。表现为在相同的外部供水环境下, 粉垄耕作甘蔗地土壤优先流发



生滞后于免耕甘蔗地, 在相同时间内免耕甘蔗地优先流的发生速度是粉垄耕作甘蔗地的 1.45 倍。

优先流比直接反映了土壤中优先流的发生程度, 即在整个土壤水分入渗过程中, 优先流所占的比重, 其值越大, 说明优先流程度相对越高。通过对两种耕作方式下甘蔗地优先流比进行分析, 得出粉垄耕作甘蔗地平均优先流比(82.89%)小于免耕甘蔗地(88.61%),

二者之间存在显著差异( $P=0.001<0.05$ )。说明粉垄耕作甘蔗地土壤优先流程度小于免耕甘蔗地。在相同的田间灌溉条件下,未经过耕作处理的甘蔗地,其优先流程度较高,水分以优先流形式快速流失渗漏比重较大,而粉垄耕作技术在一定程度上对田间土壤水分的优先流运动形式起到了较低的作用,保蓄了土壤水分。

在地学和土壤制图中复杂度反映了二维平面下图斑的复杂性,其一般用分数维进行表示。水分在土壤空间中运动所形成的湿润锋形态可以看作为图斑,用以分析土壤优先流的运动过程特征。粉垄耕作和免耕甘蔗地土壤染色形态平均复杂度分别为1.63和1.66,二者之间存在显著差异( $P=0.020<0.05$ )。说明粉垄耕作甘蔗地染色湿润锋所形成的图斑边界线弯曲程度相对免耕甘蔗地小,边界线扭折性的变化程度相对较低,即湿润锋呈平缓运动。这也进一步反映出土壤水分在粉垄耕作甘蔗地内入渗平缓,多以基质流形式整体均质向下入渗,所形成的水分入渗湿润锋边界相对平滑,而免耕甘蔗地则以优先流为主要形式运动。

### 2.3 甘蔗地土壤优先流空间发展变化特征分析

优先流在入渗过程中所形成的湿润锋形态即土壤染色形态能够表征优先流在土壤空间中的运动变化过程,其染色形态变化程度可以用染色形态变异性即变异系数来定量表示。

本研究以5 cm为一层将土壤进行分层,土壤剖面染色形态变异系数计算结果见图4。随土层深度的增加,粉垄耕作甘蔗地染色形态变异系数总体呈先降低后增加再降低的变化趋势,最大值0.59出现在40—45 cm土层范围内,最小值0.15出现在10—15 cm土层范围内,不同土层的染色形态变异系数之间在0—35 cm,35—45 cm与45—50 cm深度范围内差异显著( $P<0.05$ );而免耕甘蔗地染色形态变异系数则表现为沿土壤深度的增加,先降低后增加再降低最后增加的变化趋势,最大值0.62出现在45—50 cm土层深度范围内,最小值0.13出现在25—30 cm土层深度范围内,不同土层的染色形态变异系数之间仅在0—40 cm与40—50 cm深度范围内差异显著( $P<0.05$ )。在土壤空间中,两种耕作方式甘蔗地的染色形态变异系数均在0—10 cm表层土壤范围内出现降低现象,表层土壤对外界水分的入渗响应最为直接与迅速,但粉垄耕作甘蔗地的降低值仅为0.01,而免耕甘蔗地达0.18,且0—5 cm土层免耕甘蔗地的染色形态变异系数为0.32,是粉垄耕作甘蔗地的1.46倍,即随土层深度的增加,粉垄耕作甘蔗地的染色形

态变化程度较低,保持上下土层无显著变化趋势,也表明其对土壤水分入渗中优先流发生的响应相对较慢,以基质流为主。随土层深度的进一步增加,染色形态变异系数值出现变化,在45—50 cm土层中,粉垄甘蔗地染色形态变异系数值(0.34)较40—45 cm土层(0.59)显著降低( $P<0.05$ ),而免耕甘蔗地则继续保持增长趋势,值由0.57增至0.62,这主要由于粉垄耕作甘蔗地土壤耕层大孔隙被破坏,深层多表现为横向发育孔隙,水分沿横向孔道运动至土壤深层,土壤剖面中形成离散团块状染色形态,深层土壤中的优先流现象相比免耕甘蔗地深层多,故染色形态变异系数小。0—50 cm土层深度范围内的粉垄耕作甘蔗地的平均土壤染色形态变异系数为0.29,是免耕甘蔗地的1.1倍。说明粉垄耕作甘蔗地染色形态变化程度总体高于免耕甘蔗地,即免耕甘蔗地优先流发育程度比粉垄耕作甘蔗地高。

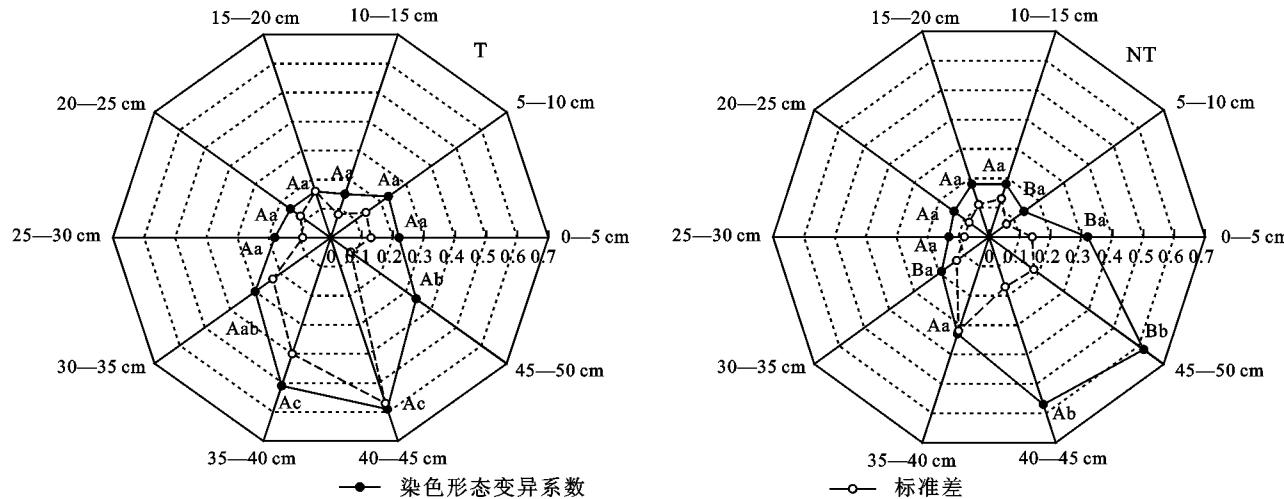
由两种耕作方式下甘蔗地内相同土层深度之间的染色形态变异系数得出,0—10 cm土层深度范围内二者之间差异显著( $P<0.05$ ),但随土层深度的增加(10—45 cm),总体差异不显著( $P>0.05$ ),仅在最深一层即45—50 cm深度范围内表现为差异显著( $P<0.05$ )。两种耕作方式的甘蔗地内均存在优先流现象,但0—10 cm表层土壤免耕甘蔗地优先流程度相对较高,但随土层深度的增加,粉垄耕作甘蔗地深层土壤优先流发育程度有所增加。

优先流作为土壤水分的一部分,在土壤空间中的变化和分布与土壤含水量呈正相关关系<sup>[6,20-21]</sup>,因此可以将土壤水分分层评价<sup>[22]</sup>与土壤染色形态变化程度相结合,以分析优先流在不同土壤环境中的响应程度,即在土壤空间中的发展变化状况。根据染色形态变异系数的优先流判别定义与评价方法相结合进行重新定义,可将土壤空间中的优先流发展变化程度分为4种:“速变”表现为优先流现象比较明显( $CV=0\sim0.10$ );“活跃”表现为优先流现象明显( $CV=0.10\sim0.20$ );“次活跃”表现为优先流现象不明显( $CV=0.20\sim0.40$ );“相对稳定”表现为无明显优先流现象( $CV\geq0.40$ )。

两种耕作方式下甘蔗地土壤优先流空间发展变化状况见图5。沿土层深度的增加,优先流在粉垄耕作甘蔗地土壤空间中的发展变化程度表现为“次活跃(0—10 cm)—活跃(10—30 cm)—次活跃(30—35 cm)—相对稳定(35—45 cm)—次活跃(45—50 cm)”,而免耕甘蔗地表现为“次活跃(0—5 cm)—活跃(5—35 cm)—次活跃(35—40 cm)—相对稳定(40—50 cm)”。在相同的外部供水条件下,两种耕作

方式下甘蔗地的优先流空间发展变化状况存在差异,其中粉垄耕作甘蔗地 0—10 cm 表层土壤以基质流为主,优先流主要发生区域在 10—30 cm 土层深度范围内,随土壤深度的增加,优先流现象逐渐消失,即上下土层染色形态变异系数较大,但由于受到横向孔道发

育的影响,土壤深层又出现优先流现象,表现为次活跃。免耕甘蔗地由于保持有良好的土壤结构,基质流主要在 0—5 cm 土层内发生,随土层深度的增加,优先流在 5—35 cm 土层深度范围内发展变化,最后在 35—50 cm 土层深度范围内优先流现象逐渐消失。



注:图中不同大写字母表示不同耕作方式下同一土层间差异显著( $P<0.05$ );不同小写字母表示相同耕作方式下不同土层间差异显著( $P<0.05$ )。

图 4 不同耕作方式下甘蔗地土壤染色形态变异系数

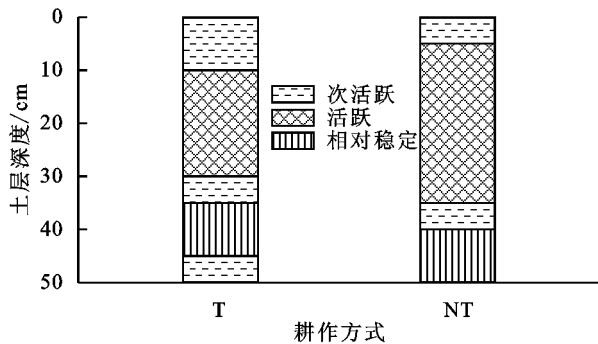


图 5 不同耕作方式下甘蔗地土壤优先流空间发展变化程度

### 3 讨论

通过对染色水流在不同耕作方式下甘蔗地土壤中运动而形成的染色形态图像进行解析,本研究为揭示我国西南岩溶区典型农地优先流的发生与发展变化提供了一定基础。

利用总染色面积比<sup>[1,13]</sup>和最大染色深度<sup>[3,7,13]</sup>可以定性描述与定量分析土壤空间中优先流的发展变化状况。李文凤等<sup>[2]</sup>通过染色示踪法对免耕和秋翻黑土区农地进行优先流特征研究,得到的土壤平均最大染色深度分别为 43 cm 和 27 cm,均小于本研究中的两种耕作方式甘蔗地土壤的平均最大染色深度(48 cm 和 47 cm),这主要受土壤质地和耕作方式的影响,但两种不同土壤环境下的土壤免耕农地平均最大染色深度均大于耕作农地,说明耕作方式会对农地土壤优先流产生影响。本研究得出免耕甘蔗地的平均总染色面积比(35.13%)小于粉垄耕作甘蔗地(35.72%),总染色面积比小<sup>[23]</sup>表明其优先流程度相对高,但对

于每一个土壤剖面来说,各染色剖面之间的总染色面积比差异不显著( $P>0.05$ )。同时,粉垄耕作甘蔗地最大染色深度达到土壤挖掘深度 50 cm 的剖面数占全部土壤剖面数的 43 %,在土壤 50 cm 深度处也有优先流现象发生。因此,使用总染色面积比与最大染色深度两个特征参数用于分析土壤优先流发生变化状况并不全面,应在增加样本数量的同时,结合多指标参数对研究样地的土壤优先流状况进行综合分析描述。

研究者在对东北黑土区<sup>[3]</sup>、紫色砂岩区<sup>[7]</sup>和岩溶峰丛洼地区<sup>[13]</sup>的农地优先流观测中均发现,随土层深度的增加,染色面积比总体均呈现降低的变化趋势,与本研究所得结果相一致。但粉垄耕作甘蔗地土壤剖面染色形态随土壤深度的增加,由整体均匀分布形态(0—10 cm)逐步向零散团块状形态(10—45 cm)分化,耕作层(0—20 cm)与犁底层(20—40 cm)交界面出现有明显染色形态分化现象。与研究者对上述地区的农地优先流研究所得整体均匀染色形态(0—25 cm)分布存在差异。说明耕作方式的不同,对土壤优先流运动过程的影响也不同。同时,土壤剖面零散团块状染色形态说明土壤垂直联通孔道数量相对较少,侧向或横向孔道发育<sup>[24-25]</sup>,出现水分侧流现象。蒋小金等<sup>[3]</sup>和戴翠婷等<sup>[26]</sup>分别对东北黑土区和三峡库区紫色土农地的土壤优先流研究也发现了横向侧流现象,但多以短斜枝状侧流形态为主。以上分析说明,粉垄耕作与传统耕作方式相比,并未完全破坏土壤孔隙通道,耕作后的土

壤仅在垂直方向上降低了水分的交换运移能力,但在土层中仍具有横向通气透水特性,以利于蓄水保肥。免耕甘蔗地表现为枝状染色形态分化现象,垂直联通孔道较粉垄耕作甘蔗地多,其形成的优先流程度高。免耕农地与耕作农地相比,免耕方式下的残留物覆盖,对土壤孔隙发育具有促进作用<sup>[2]</sup>,具有显著的优先流特征。张东旭等<sup>[27]</sup>对南方紫色砂岩区的免耕南瓜地与玉米连作农地的土壤优先流进行研究发现,免耕农地联通孔道多于耕作农地,优先流分化现象明显且程度高,与本研究结果相一致,但免耕甘蔗地的优先流程度(89.00%)要高于免耕南瓜地(71.00%),这可能与作物和土壤类型的不同有关。

王发等<sup>[13]</sup>在对岩溶洼地区常年翻耕的农地优先流研究中发现,最大水分入渗深度为45 cm,与本研究相近,但优先流比仅为35.00%,显著低于粉垄耕作甘蔗地(83.00%),说明相同土壤环境条件下,不同的耕作方式对土壤优先流发育程度具有较大影响。由于粉垄耕作所使用的机械钻头结构特殊,整地后不乱土层,全层土壤疏松透气,相对于深翻深耕的传统耕作方式,其仍能保留土层内的部分孔隙通道,形成的作物生境环境优于传统耕作方式。虽然这种技术下的甘蔗地内仍有优先流现象发生,但在相同的外部供水条件下,粉垄耕作土壤中的优先流发生相对于免耕甘蔗地滞后,且主要以横向运动形式发生在10—30 cm土层深度范围内,在一定程度上对田间土壤优先流起到了降低作用,主要表现为减少土壤水分垂直入渗交换,增加土壤横向水分运动,这有利于植物根系对土壤层中水肥的吸收利用。韦本辉等<sup>[14]</sup>在对岩溶区采用粉垄耕作后的甘蔗产量调查结果显示,与传统耕作方式相比,粉垄耕作后的甘蔗增产21.91%~27.37%。

由于粉垄耕作所形成的田间微地形结构会造成田间过量积水,闫加亮等<sup>[28]</sup>在对灌溉条件影响绿洲农田优先流的研究中发现,随着灌溉量的增加,土壤水能以优先流的形式穿过耕层向犁底层深处渗透,即本文中得出粉垄耕作甘蔗地45—50 cm土层深度范围内优先流发展变化程度为“次活跃”,而非免耕甘蔗地的“相对稳定”变化程度。因此,为进一步提高粉垄耕作方式下的田间水肥利用率,降低土壤中优先流的发生与发展,可尝试辅以其他措施,如在整地后进行田间秸秆覆盖,利用秸秆等枯落物持水的特性,在进行田间微地行蓄水的同时,进一步提高田间保水蓄肥能力。

## 4 结论

(1)在相同的外部供水条件下,粉垄耕作甘蔗地湿润迹线较免耕甘蔗地平缓,形成的湿润锋斑块边界

线扭折性的变化程度相对较低,土壤水分呈均匀整体入渗形式,平均最大下渗深度为46.98 cm,小于免耕甘蔗地1.13 cm。

(2)田间基质流与优先流伴随发生,随土层深度的增加,粉垄耕作甘蔗地土壤剖面中染色形态表现为由均匀整体向离散团块状形态分化,相对于免耕甘蔗地的均匀整体向枝状形态分化形式,优先流分化现象不明显。在相同外部供水条件下,免耕甘蔗地优先流的发生速度是粉垄耕作甘蔗地的1.45倍,粉垄耕作甘蔗地优先流的发生滞后于免耕甘蔗地,其优先流比为82.89%,小于免耕甘蔗地。

(3)随土层深度的增加,优先流在粉垄耕作甘蔗地土壤空间中的发展变化状况表现为“次活跃—活跃—一次活跃—相对稳定—一次活跃”,优先流主要发生在10—30 cm土层深度范围内,而免耕甘蔗地表现为“次活跃—活跃—一次活跃—相对稳定”,优先流主要发生在5—35 cm土层深度范围内,其优先流空间发展变化程度较高。

(4)粉垄耕作技术降低了田间土壤优先流程度,相比于深耕深翻的传统耕作方式,其整地后土层保留或形成有部分孔隙通道,水分发生横向运动,以便于植物根系对土壤层中水肥的吸收利用。

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 段晓倩,倪晨,陈姣,等.基于含水量高频监测的花岗岩崩岗侵蚀红壤优先流研究[J].水土保持学报,2016,30(5):82-88.
- [7] 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.
- [8] 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.

- [9] Worthington S R H. Diagnostic tests for conceptualizing transport in bedrock aquifers[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 529 (Part 1): 365-372.
- [10] Sohrt J, Ries F, Sauter M, et al. Significance of preferential flow at the rock soil interface in a semi-arid karst environment[J]. *Catena*, 2014, 123: 1-10.
- [11] Fu Z Y, Chen H S, Zhang W, et al. Subsurface flow in a soil-mantled subtropical dolomite karst slope: A field rainfall simulation study [J]. *Geomorphology*, 2015, 250: 1-14.
- [12] Dvory N Z, Livshitz Y, Kuznetsov M, et al. The effect of hydrogeological conditions on variability and dynamic of groundwater recharge in a carbonate aquifer at local scale [J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 535: 480-494.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Van Schaik N. Spatial variability of infiltration patterns related to site characteristics in a semi-arid watershed[J]. *Catena*, 2009, 78(1): 36-47.
- [18] 曾志远,曹锦铎.分维几何学在地学和土壤制图学上的应用[J].土壤,1991,23(3):117-122.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 王红兰,蒋舜媛,崔俊芳,等.紫色土坡耕地土壤大孔隙流的定量评价[J].农业工程学报,2017,33(22):167-174.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] Bogner C, Mirzaei M, Ruy S, et al. Microtopography, water storage and flow patterns in a fine-textured soil under agricultural use [J]. *Hydrological Processes*, 2013, 27(12): 1797-1806.
- [25] Etana A, Larsbo M, Keller T, et al. Persistent subsoil compaction and its effects on preferential flow patterns in a loamy till soil[J]. *Geoderma*, 2013, 192(1): 430-436.
- [26] 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):103-108,115.
- [27] 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.
- [28] 闫加亮,赵文智,张勇.绿洲农田土壤优先流特征及其对灌溉量的响应[J].应用生态学报,2015,26(5):1454-1460.

(上接第 57 页)

- [11] Yang W F, Zhao X F, Zhang F, et al. Identification of the earlier human-induced sedimentation change in Daya Bay, northern South China Sea using  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{137}\text{Cs}$ [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, 126(1): 334-337.
- [12] Zapata F. Handbook for the assessment of soil erosion and sedimentation using environmental radionuclides [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [13] Appleby P G, Oldfield F, Thompson R, et al.  $^{210}\text{Pb}$  dating of annually laminated lake sediments from Finland[J]. *Nature*, 1979, 280(5717): 53-55.
- [14] Appleby P G, Oldfield F. The assessment of  $^{210}\text{Pb}$  data from sites with varying sediment accumulation rates [J]. *Hydrobiologia*, 1983, 103(1): 29-35.
- [15] Appleby P G, Oldfield F. The calculation of lead-210 dates assuming a constant rate of supply of unsupported  $^{210}\text{Pb}$  to the sediment[J]. *Catena*, 1978, 5(1): 1-8.
- [16] Hernández J. A  $^{210}\text{Pb}$ -based chronological model for recent sediments with random entries of mass and activities: Model development[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2016, 151(1): 64-74.
- [17] Zhang X C, Zhang G H, Garbrecht J D, et al. Dating sediment in a fast sedimentation reservoir using cesium-137 and lead-210[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2015, 79(3): 948-956.
- [18] Mabit L, Benmansour M, Abril J M, et al. Fallout  $^{210}\text{Pb}$  as a soil and sediment tracer in catchment sediment budget investigations: A review[J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 138(11): 335-351.
- [19] 王志伟,艾钊,张国庆,等.沂蒙山区坡面侵蚀过程[J].中国水土保持科学,2013,11(5):42-47.