

绿洲农田土壤优先流特征及其对灌溉量的响应*

闫加亮^{1,2} 赵文智^{1**} 张勇勇¹

(¹中国科学院寒区旱区环境与工程研究所中国生态系统研究网络临泽内陆河流域研究站/中国科学院内陆河流域生态水文重点实验室, 兰州 73000; ²中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 优先流是土壤养分和水分快速通过土壤剖面的普遍物理现象. 研究农田土壤优先流特征及其影响因素, 对量化绿洲灌溉深层渗漏量、提高水肥利用效率以及降低浅层地下水水质污染的风险具有重要意义. 在绿洲农田利用亮蓝溶液进行原位染色示踪试验, 结果表明: 沟与垄位置处的染色路径数目在土壤深度 7.3~16.7 cm 差异显著, 而优先流最大入渗深度差异不显著. 优先流最大入渗深度主要受蚂蚁洞穴和灌溉量的影响, 平均灌溉量 120 mm 下优先流的最大入渗深度为 (43.1±5.9) cm; 受到蚂蚁洞的影响, 灌溉量 55 mm 的样方优先流最大入渗深度达 (68.3±7.6) cm. 细根 ($\Phi \leq 2$ mm) 与优先流显著相关, 粗根与优先流相关性不显著, 表明植物根系中的细根对优先流的产生有重要作用. 绿洲农田土壤优先流特征受到灌溉量、垄沟耕作、蚂蚁洞穴和根系等因素的影响, 而蚂蚁洞穴是影响优先流最大入渗深度的不确定因素.

关键词 染色试验; 染色路径数目; 裂隙面积密度; 地表特征

文章编号 1001-9332(2015)05-1454-07 中图分类号 S152.7 文献标识码 A

Characteristics of the preferential flow and its response to irrigation amount in oasis cropland. YAN Jia-liang^{1,2}, ZHAO Wen-zhi¹, ZHANG Yong-yong¹ (¹Linze Inland River Basin Research Station, Chinese Ecosystem Research Network/ Key Laboratory of Inland River Ecohydrology, Cold and Arid Regions, Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; ²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2015, 26(5): 1454-1460.

Abstract: Preferential flow is a physical process describing how water and solutes move along certain pathways through soil profile. Studying the cropland preferential flow patterns and its influential factors could quantify the deep percolation, improve water and fertilizer use efficiency and reduce the risk of agrochemicals contaminating shallow groundwater in oasis cropland. The dye tracer experiments were carried out in field oasis cropland, using a brilliant blue FCF solution. The results showed that between ridge and furrow, the number of stained paths densities differed significantly at the 7.3-16.7 cm depth of the soil profiles, while the maximum dye depth had no significant difference. The main influence factors of the maximum stained depth were the irrigation amount and the ant burrows. The maximum stained depth was (43.1±5.9) cm with the mean irrigation amount of 120 mm, however, the maximum stained depth was (68.3±7.6) cm with the irrigation amount of 55 mm under the influence of the ant burrows. Root played an important role in preferential flow, but only the fine roots ($\Phi \leq 2$ mm) were significantly related to the preferential flow in oasis cropland, while the coarse roots were not. In oasis cropland, the characteristics of the preferential flow were influenced by the irrigation amount, the furrow and ridge planting, the ant burrows and the roots, and the ant burrows were an uncertain factor which affected the maximum infiltration depth of the preferential flow.

Key words: dye tracer experiment; stained path number; crack area density; soil surface characteristics.

* 国家杰出青年科学基金项目(41125002)和国家自然科学基金项目(41401036)资助.

** 通讯作者. E-mail: zhaowzh@lzb.ac.cn

2014-07-10 收稿, 2015-02-06 接受.

优先流是土壤养分和水分快速穿过土壤剖面向土壤深层入渗的一种普遍物理现象, 主要分为大孔隙流、非稳定流、指流和管状流等类型^[1-5]. Beven 等^[6]于 1982 年在《Water Resources Research》发表了关于优先流的综述以来, 众多国内外学者为优先流的研究做出了贡献. 比如, Kung^[7]于 1990 年在美国汉库克农业研究试验站首次对管状流现象进行了研究; 亮蓝被众多学者证实有较好的可视性、无毒, 在优先流的研究中被广泛应用^[8-11]. 国内学者关于优先流研究始于 21 世纪初, Cheng 等^[12]研究发现土地利用变化对优先流路径分布特征有重要影响以及根系对优先流路径的形成有重要贡献; 王伟等^[13]通过研究大孔隙特征与优先流发生的关系发现, 半径 >0.3 mm, 尤其是半径 >1.5 mm 的大孔隙是林地优先流发生的主要通道; 徐宗恒等^[14]比较了两类植被斜坡体优先流的平均染色面积和平均染色路径数量, 发现优先流的发生和发展的活跃程度存在差异. 关于优先流的研究方法与技术以及优先流模型的发展也都有学者进行了总结^[1-2]. 鉴于优先流越来越受到广泛的关注, Beven 等^[5]于 2013 年在《Water Resources Research》又发表了关于优先流过去、现在和未来的综述.

在农田灌溉中, 优先流受到耕作方式、地表特征、裂隙、土壤动物和初始土壤含水量等因素的影响. Shipitalo 等^[15]研究发现, 在透水性不好的粘土农田, 土壤水因干燥而开裂的裂隙与犁底层的蚯蚓洞以优先流的形式通过耕作层入渗到 1 m 深处的排水管道. Greve 等^[16]通过土柱试验研究发现, 即使地表裂隙闭合仍然可以作为优先流的通道. 对于裂隙来说, 不仅在免耕农田中, 而且在耕作农田中, 都可以作为优先流路径^[17-18]. 土壤动物不仅以其洞穴与地表裂隙相互作用对优先流有影响, 还可以通过疏松土壤、改变土壤孔隙度, 从而影响优先流的特征^[17]. 耕作压实虽然可以增加表层土壤容重, 减少表层土壤孔隙度, 但也可以增强下层的优先流^[19]. 初始土壤含水量对优先流的特征和最大入渗深度亦有重要影响^[20].

研究农田优先流特征及其影响因素对量化绿洲灌溉深层渗漏量、提高水肥利用效率以及降低浅层地下水水质污染的风险具有重要意义, 特别是在地下水位比较低且地表水与地下水交换频繁的地区^[5, 20]. 黑河中游绿洲农田主要以渠灌为主, 地下水埋深比较浅, 约 4 m, 并且农田土壤水分运动及其侧渗过程一直是该地区关注的重要科学问题. 优先流

现象增加了水量平衡估算难度和不确定性, 而关于该地区农田土壤优先流的研究尚且不足. 本研究的目标是: 1) 研究绿洲农田的优先流染色路径数目和最大染色深度等特征; 2) 分析影响绿洲农田优先流的主要因素及其影响机制.

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

本研究区位于张掖绿洲边缘平川镇, 选择开垦 50 年以上的玉米田 ($39^{\circ}19'39''$ N, $100^{\circ}08'25''$ E). 该地区属于典型温带干旱气候, 年均降水量约 117 mm, 年均气温为 7.6 $^{\circ}$ C, 年均日照时数 3051 h, 年均无霜期 165 d, 年均蒸发量 2341 mm, 地下水位为 3~5 m. 地带性土壤为棕漠土, 土壤母质为洪积物, 经过长期灌溉、施肥和耕作, 形成灌淤旱耕人为土. 表 1 为试验地土壤基本理化特性. 制种玉米是该地区农业生产的支柱产业, 在玉米生长季约灌溉 9 次, 每次平均灌溉量约为 120 mm, 为覆膜垄沟种植方式.

1.2 优先流染色示踪试验

为了满足灌溉前土壤初始含水量的初始条件, 于 2013 年 8 月一次例行灌溉前, 在试验点随机布设了 12 个 1.5 m \times 1.5 m 的样方, 每个样方都包含完整的垄(有地膜覆盖)和沟(无地膜覆盖). 样方周围设置 150 cm \times 150 cm \times 50 cm 的白铁框, 铁框没入土壤约 15 cm, 夯实铁框内外边壁, 最后在白铁框外围用土堆实, 防止染料侧漏(图 1a). 在不破坏地表结构的前提下, 把每个样方的玉米割除并去除土壤表层的杂物. 试验配制 2 g \cdot L⁻¹ 的亮蓝溶液 (brilliant blue FCF), 约用 11、17、24 和 29 min 分别以 55、85、120

表 1 试验地土壤基本理化性状

Table 1 Basic soil properties at the experiment site (mean \pm SD, $n=6$)

土壤性状 Soil property		深度 Depth (cm)	
		0~20	20~100
土壤颗粒机械组成 Particle size distribution	沙粒 Sand (%)	27.9 \pm 7.2	23.9 \pm 6.1
	粉粒 Silt (%)	69.7 \pm 6.9	73.5 \pm 5.6
	粘粒 Clay (%)	2.4 \pm 0.4	2.5 \pm 0.5
容重 Bulk density (g \cdot cm ⁻³)		1.47 \pm 0.05	1.48 \pm 0.08
饱和导水率 Ks (mm \cdot h ⁻¹)		15 \pm 9	40 \pm 20
有机碳 Soil organic carbon (g \cdot kg ⁻¹)		12.72 \pm 0.76	7.75 \pm 1.77

Ks: Saturated hydraulic conductivity.

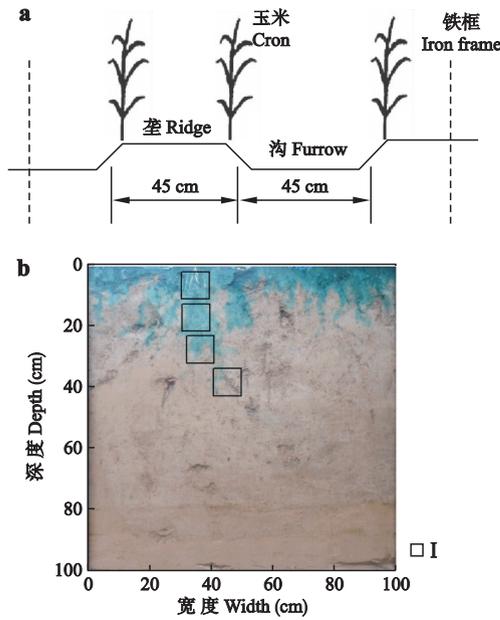


图1 试验样方横断面(a)和根系取样(b)示意图

Fig. 1 Schematic diagram for the experiment plot's cross section (a) and the sampled root sites (b).

I: 根取样位置 Sampled sites of roots.

和 145 mm 的灌溉量处理样方, 每种处理 3 个重复。染色 24 h 后, 顺着垄沟断面挖取土壤剖面, 每个样方以 15 cm 间隔挖 6 个 1 m × 1 m 剖面。每个剖面用铁铲铲平, 并放置 1 m × 1 m 标准框, 用数码相机摄取 3780 像素 × 3780 像素的图片。图片首先利用 Photoshop CS4 进行校正, 然后利用 ImageJ 1.48f 依次进行背景差值、颜色调整和二值化处理, 并计算染色面积特征曲线, 最后用 MATLAB R2010b 对二值化图片进行分析, 分别统计染色路径数目和染色路径宽度。分析比较垄、沟位置处优先流特征差异时, 利用 Photoshop CS4 把染色剖面分割成分别包含垄和沟的两张图片, 然后再进行相关图片参数统计与计算。

1.3 取样及室内分析

在挖取染色剖面的同时, 从灌溉量 120 mm 处理的每个样方中, 随机选择两个垂直剖面, 共选择 6 个, 分别在染色区域内以 10 cm 垂直间隔用直径 70 mm、高 52 mm 的环刀 (体积 300 cm³) 取根系 (图 1b), 利用 1 mm 的土壤筛洗根, 然后扫描成 300 pi 的图片, 用 WinRhizon 根分析系统分析粗根 ($\Phi > 2$ mm) 和细根 ($\Phi \leq 2$ mm) 的体积。另外, 在地表放置 50 cm × 50 cm 标准框, 用数码相机获取图片, 带回实验室计算地表裂隙面积密度。在试验样方附近, 用环刀法和铝盒烘干法分别测垄和沟耕作层 (0~20 cm) 的土壤容重和土壤含水量, 取 6 个重复。

1.4 数据处理

采用 SPSS 16.0 进行数据的统计和检验。统计分析采用双尾 *t* 检验判断沟和垄的染色剖面染色路径数目是否存在差异; 采用单因素方差分析比较沟与垄的地表裂隙面积密度、土壤容重和初始土壤含水量以及有蚂蚁洞和无蚂蚁洞染色剖面最大染色深度差异是否显著; 对根系密度和染色面积进行 Pearson 相关性分析 ($\alpha = 0.05$)。利用 Excel 2007 进行数据整理, 用 OriginPro 8.5 作图。

2 结果与分析

2.1 灌溉量对优先流特征的影响

不同灌溉量的优先流都呈现大孔隙流特征, 但染色面积和染色路径宽度分布特征存在差异 (图 2)。灌溉量 55 和 85 mm 的优先流染色面积和染色路径宽度分布特征都随着土壤深度的增加而减少。优先流路径宽度以 > 200 mm 为主, 并伴有少量宽度 20~200 mm 的优先流路径, 优先流路径的水分向土壤基质扩散的程度较大。灌溉量 120 mm 的染色面积亦随着土壤深度的增加而呈减少的趋势, 并且在土壤深度 37 cm 处出现一个小的峰值, 表明小部分土壤水能以优先流的形式入渗到深处, 然后再进行扩散; 在土壤深度 0~19 cm, 染色路径宽度以 > 200 mm 为主, 并且其染色面积百分比 $> 60\%$, 剖面染色面积呈现均匀染色, 随着灌溉量的增加, 土壤耕作层 (0~20 cm) 大量土壤水从优先流路径扩散到土壤基质。土壤深度 19 cm 以下, 染色路径宽度转变成以 20~200 mm 为主, 并伴有宽度 < 20 mm 的染色路径, 表明一部分土壤水以优先流的形式向下渗, 并没有向土壤基质发生明显的扩散。灌溉量 145 mm 的优先流染色面积也随着深度的增加而减少, 在土壤深度 43 cm 出现一个较大的峰值; 优先流染色路径宽度主要以 20~200 mm 为主。随着灌溉量的增加, 土壤水不仅以优先流的形式入渗到土壤深层, 而且从优先流路径向土壤基质扩散的程度较大。优先流路径均匀染色深度和最大染色深度都随着灌溉量的增加而呈增加的趋势 (图 3)。灌溉量 55、85、120 和 145 mm 的均匀染色都只发生在土壤表层, 均匀染色深度分别是 (10.4 ± 1.6) 、 (10.2 ± 1.3) 、 (17.7 ± 2.4) 和 (21.5 ± 2.8) cm; 而最大染色深度分别是 (28.3 ± 4.1) 、 (43.5 ± 2.5) 、 (43.2 ± 5.9) 和 (59.2 ± 5.6) cm。

2.2 垄沟耕作对优先流特征的影响

受到地膜覆盖的影响, 垄和沟位置处的地表裂隙存在差异, 耕作层的土壤容重和土壤含水量亦

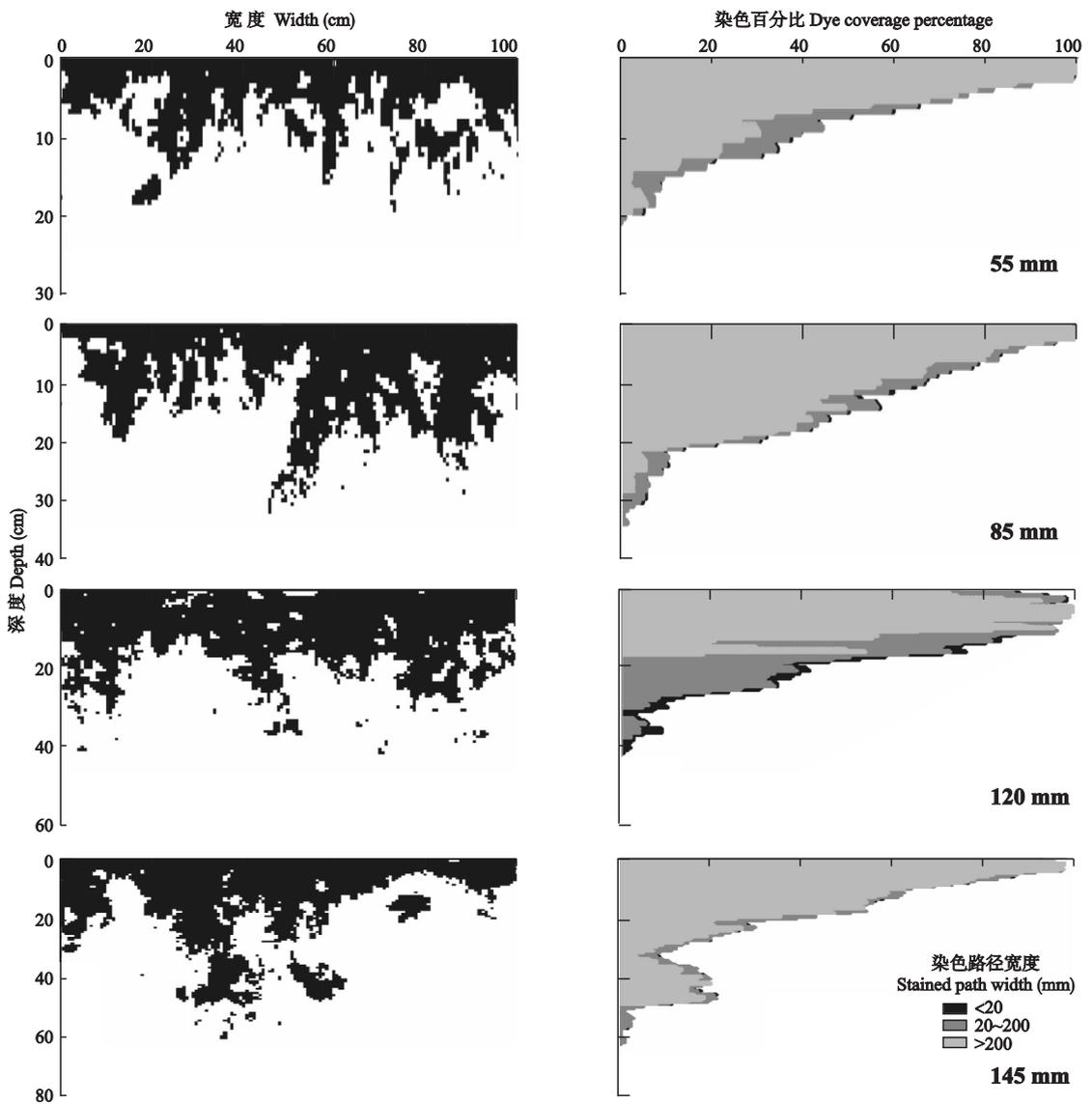


图2 不同灌溉量优先流的剖面染色宽度和染色面积。

Fig.2 Preferential flow of the stained width and dye coverage.

存在差异. 沟的地表裂隙密度为 $(309.9 \pm 86.9) \text{ cm}^2 \cdot \text{m}^{-2}$, 显著大于垄的地表裂隙密度 $(19.1 \pm 1.2) \text{ cm}^2 \cdot \text{m}^{-2}$; 虽然沟的耕作层的土壤容重比垄的土壤容重仅大 $(0.08 \pm 0.02) \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 但差异显著; 沟与垄的耕作层的初始土壤质量含水量差异亦显著(表2).

沟与垄的染色路径数目都随深度的增加呈现先增加后减少的趋势, 且在深度 15 cm 左右均达到最大值, 同时存在差异性(图4). 在深度 7.3~16.7 cm, 垄的染色路径数目显著大于沟的染色路径数目, 垄与沟的染色路径数目在其他深度差异不显著. 此外, 垄与沟的最大染色深度分别为 (41.8 ± 6.3) 和 (40.3 ± 4.1) cm, 无显著性差异.

2.3 根系密度对优先流的影响

植物根系对优先流的产生和发展有重要作用.

如表3所示, 总根系体积密度(VTR)与剖面染色面积(DSA)相关性显著, 其中细根体积密度(VFR)和剖面染色面积相关性显著, 而粗根体积密度(VCR)和剖面染色面积无显著相关, 表明植物根系中的细

表2 地表裂隙密度、耕作层(0~20 cm)的土壤容重和初始含水量

Table 2 Soil bulk density and initial soil water content and soil surface crack density in plow layer (0~20 cm)

项目 Item	沟 Furrow	垄 Ridge
地表裂隙密度 Soil surface crack density ($\text{cm}^2 \cdot \text{m}^{-2}$)	$309.9 \pm 86.9^{**}$	19.1 ± 1.2
土壤容重 Soil bulk density ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	$1.53 \pm 0.04^*$	1.45 ± 0.02
初始土壤质量含水量 Initial soil water content (%)	5.61 ± 0.66	$7.55 \pm 0.89^*$

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$. 下同 The same below.

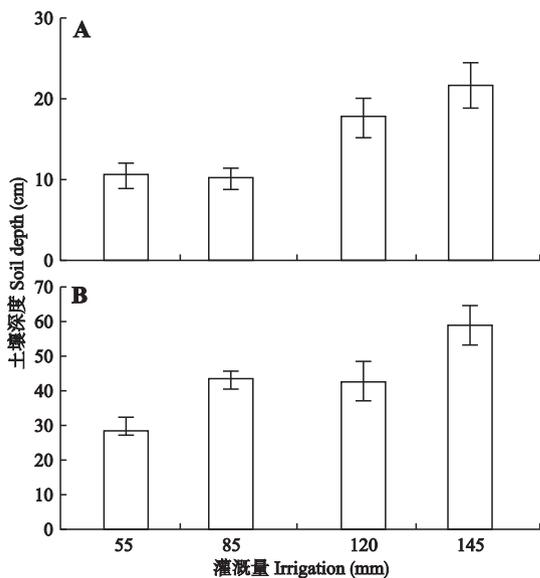


图3 不同灌溉量条件下均匀染色深度(A)和最大染色深度(B)

Fig.3 Homogenous (A) and maximum (B) stained depths under different irrigation amounts.

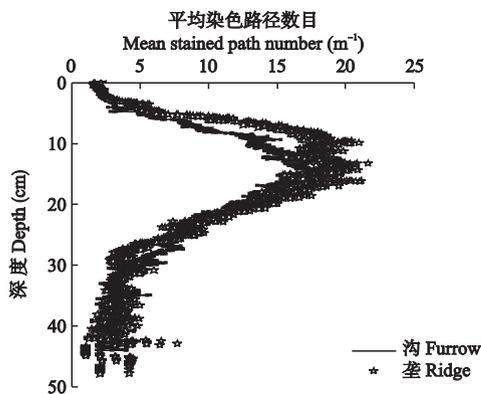


图4 沟与垄的染色路径数目

Fig.4 Mean stained path numbers of furrow and ridge.

表3 根系体积密度与染色面积的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between root volume density and dye stained area

	DSA	VFR	VCR
VFR	0.482 *		
VCR	0.422	0.776 **	
VTR	0.477 *	0.931 **	0.952 **

DSA: 染色面积 Dye stained area; VFR: 细根体积密度 Volume density of the fine roots; VCR: 粗根体积密度 Volume density of the coarse roots; VTR: 根总体积密度 Volume density of the total roots.

根 ($\Phi \leq 2$ mm) 对优先流的产生有重要作用。

2.4 蚂蚁洞穴对优先流特征的影响

在3个灌溉量55 mm的样方中,有一个样方出现两个蚂蚁洞。有蚂蚁洞穴样方的染色剖面与无蚂蚁洞样方的染色剖面存在明显差异(图5),蚂蚁洞

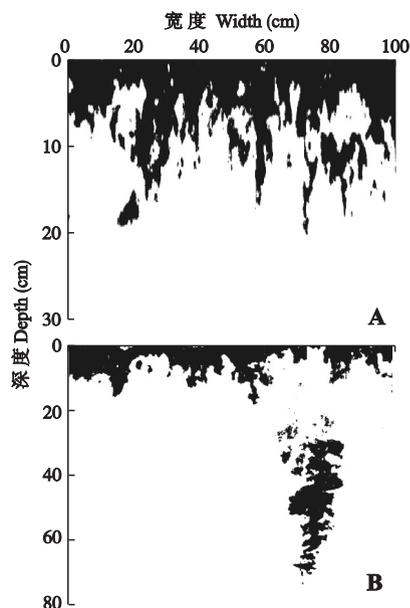


图5 无蚂蚁洞穴(A)和有蚂蚁洞穴(B)染色剖面特征

Fig.5 Characteristics of stained soil profile without ant burrow (A) and with ant burrow (B).

穴对优先流的产生有重要影响。有蚂蚁洞穴样方的染色剖面最大染色深度是(68.3 ± 7.6) cm,显著大于无蚂蚁洞穴样方染色剖面的最大染色深度(28.3 ± 4.1) cm。

3 讨论

绿洲玉米农田不同灌溉量的优先流均呈现典型的大孔隙流特征。前人研究在耕作层和犁底层交界处经常形成横向流^[15,18-19],但在本研究中并没发现该现象,这可能主要是因为土壤质地和耕作方式存在差异。随着灌溉量的增加,土壤水能以优先流的形式穿过耕作层向犁底层深处渗透(图2)。虽然耕作会破坏土壤结构以及大孔隙的连通性,但秋耕之后经过6个月的歇地期,耕作层土壤亦形成具有一定连通性的大孔隙结构,而连通性是优先流发生的必要条件之一^[21]。

土壤动物能够通过疏松土壤增加土壤孔隙度,其洞穴本身就是土壤大孔隙的重要来源,是影响优先流特征的重要因素之一。Shipitalo等^[15]研究发现,蚯蚓洞穴不仅可以作为水流的快速通道,还可以和裂隙发生连通,促使土壤溶质快速向土壤深层渗透。Fan等^[17]研究发现,免耕农田比耕作农田的蚯蚓多度和生物量大,导致土壤大孔隙增多,所以免耕农田灌溉入渗量是耕作农田的1.4~2.0倍。灌溉量55 mm的样方由于受到蚂蚁洞穴的影响,优先流最大入渗深度可达(68.3 ± 7.6) cm,比灌溉量145 mm样

方的最大入渗深度 (59.2 ± 5.6) cm 大. 在绿洲玉米田, 蚂蚁洞穴增加了优先流最大入渗深度的不确定性. 虽然试验的 12 个样方中, 只有一个样方有蚂蚁洞穴, 但有研究发现该地区绿洲玉米田节肢动物和线虫等土壤动物都有相当的多度和丰富度^[22-24]. 因此, 农田中灌溉量和土壤动物洞穴相互作用对优先流发生及其最大入渗深度的影响可能比本试验结果更明显.

由于覆膜等原因, 沟与垄的地表裂隙、容重和初始土壤含水量存在显著差异 (表 2), 这些都直接或间接的影响到优先流特征. 虽然沟的地表裂隙密度显著大于垄的, 但在土壤深度 (7.3~16.7) cm 下, 垄的优先流染色路径数目显著大于沟的染色路径数目, 其他土壤深度的优先流染色路径数目差异不显著. 产生这种结果的原因可能是因为裂隙不仅在干燥条件下张开的裂隙是优先流的主要通道^[15, 17-18], 而且在湿润条件下闭合的裂隙仍然对优先流有重要贡献^[16, 18]. 垄与沟优先流路径数目差异的主要原因可能是因为垄比沟的土壤容重小, 导致垄比沟有更大的土壤孔隙度所引起的^[18-19]. 初始土壤含水量对优先流最大染色深度影响的研究结果存在差异. Bogner 等^[25]在森林的壤质土壤研究发现, 初始土壤含水量高比初始土壤含水量低的最大染色深度大; 而 Hardie 等^[20]在对比砂壤草地和农田的优先流特征时发现相反的结果. 受到裂隙、容重和初始土壤含水量的综合影响, 垄的最大染色深度比沟的大, 但差异不显著.

根系对优先流的产生与发展有重要作用. 虽然, 根总体积密度与染色面积显著相关, 但不是所有径级的根系与染色面积均显著相关, 只有细根的总体积密度与染色面积显著相关, 粗根的总体积密度与染色面积相关性不显著 (表 3). 这说明, 不是所有根系对优先流有贡献, 此结果与 Lange 等^[26]和 Cheng 等^[12]研究乔木树根与优先流关系一致. 对于死根而言, 可能是因为细根比粗根分解速率更快, 更易产生大孔隙为优先流提供通道^[12]; 而对于活根, 可能是根系微生物排泄出能够诱发及保持优先流路径的斥水性物质^[27], 已有研究发现优先流路径中的微生物碳氮含量显著高于土壤基质^[28-29].

在该地区, 农业生态系统土壤水分运动及其侧渗过程一直是倍受关注的热点问题, 而优先流现象为这些问题的解决增加了难度和不确定性. Liu 等^[30]和赵雨雯等^[31]用不同的方法计算和评估了该地区灌溉量和水量平衡, 但他们的结果也存在差异.

除了方法上的不同外, 没有考虑到优先流的影响可能也是存在差异的原因之一. 本研究定性分析了不同因素对优先流的影响, 为进一步揭示该地区水分运动机理, 在模型模拟过程中, 应该考虑包括优先流的土壤水运移模型, 并根据各因素对优先流的影响确定其在模型中的参数.

4 结 论

绿洲玉米农田优先流特征受到灌溉量、垄沟耕作、蚂蚁洞穴和根系等因素的综合影响. 优先流最大入渗深度主要受蚂蚁洞和灌溉量的影响. 平均灌溉量 120 mm 优先流的最大入渗深度为 (43.1 ± 5.9) cm, 而灌溉量 55 mm 的样方由于受到蚂蚁洞的影响, 优先流最大入渗深度可达 (68.3 ± 7.6) cm, 因此, 灌溉量和蚂蚁洞对优先流的综合影响可能会增加以优先流形式运移的土壤溶质污染地下水. 由垄沟耕作引起的耕作层土壤容重和土壤含水量以及土壤表面裂隙密度的差异对耕作层的优先流特征有重要影响. 在土壤深度 (7.3~16.7) cm 下, 垄的染色路径数目显著大于沟染色路径数目. 根系对优先流的产生与发展有重要作用, 在绿洲玉米农田, 仅细根与优先流显著性相关, 粗根与优先流相关性不显著, 因此植物根系中的细根 ($\Phi \leq 2$ mm) 对优先流的产生有重要的影响作用.

参考文献

- [1] Allaire SE, Roulier S, Cessna AJ. Quantifying preferential flow in soils: A review of different techniques. *Journal of Hydrology*, 2009, **378**: 179-204
- [2] Gerke HH. Preferential flow descriptions for structured soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2006, **169**: 382-400
- [3] Niu J-Z (牛健植), Yu X-X (余新晓), Zhang Z-Q (张志强). The present and future research on preferential flow. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2006, **26** (1): 231-243 (in Chinese)
- [4] Xu Z-H (徐宗恒), Xu Z-M (徐则民), Cao J-W (曹军尉), et al. Present and future research of preferential flow in soil. *Soils* (土壤), 2012, **44**(6): 905-916 (in Chinese)
- [5] Beven K, Germann P. Macropores and water flow in soils revisited. *Water Resources Research*, 2013, **49**: 3071-3092
- [6] Beven K, Germann P. Macropores and water flow in soils. *Water Resources Research*, 1982, **18**: 1311-1325
- [7] Kung KJS. Preferential flow in a sandy vadose zone. I. Field observation. *Geoderma*, 1990, **46**: 51-58
- [8] Flury M, Flühler H. Brilliant blue FCF as a dye tracer for solute transport studies: A toxicological overview.

- Journal of Environmental Quality*, 1994, **23**: 1108–1112
- [9] Flury M, Flühler H. Tracer characteristics of brilliant blue FCF. *Soil Science Society of America Journal*, 1995, **59**: 22–27
- [10] Ketelsen H, Meyer-Windel S. Adsorption of brilliant blue FCF by soils. *Geoderma*, 1999, **90**: 131–145
- [11] German-Heins J, Flury M. Sorption of brilliant blue FCF in soils as affected by pH and ionic strength. *Geoderma*, 2000, **97**: 87–101
- [12] Cheng JH, Zhang HJ, Wang W, *et al.* Changes in preferential flow path disturbance and its affecting factors in Southwest China. *Soil Science*, 2011, **176**: 652–660
- [13] Wang W (王伟), Zhang H-J (张洪江), Cheng J-H (程金花), *et al.* Macropore characteristics and its relationships with the preferential flow in broadleaved forest soils of Simian Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2010, **21**(5): 1217–1223 (in Chinese)
- [14] Xu Z-H (徐宗恒), Xu Z-M (徐则民), Guan Q (官琦), *et al.* The characteristic of preferential flow in different vegetated slope soils. *Journal of Mountain Science (山地学报)*, 2012, **30**(5): 521–527 (in Chinese)
- [15] Shipitalo MJ, Nuutinen V, Butt KR. Interaction of earthworm burrows and cracks in a clayey, subsurface-drained, soil. *Applied Soil Ecology*, 2004, **26**: 209–217
- [16] Greve A, Andersen MS, Acworth RI. Investigations of soil cracking and preferential flow in a weighing lysimeter filled with cracking clay soil. *Journal of Hydrology*, 2010, **393**: 105–113
- [17] Fan R, Zhang X, Yang X, *et al.* Effects of tillage management on infiltration and preferential flow in a black soil, Northeast China. *Chinese Geographical Science*, 2013, **23**: 312–320
- [18] Bogner C, Mirzaei M, Ruy S, *et al.* Microtopography, water storage and flow patterns in a fine-textured soil under agricultural use. *Hydrological Processes*, 2013, **27**: 1797–1806
- [19] Etana A, Larsbo M, Keller T, *et al.* Persistent subsoil compaction and its effects on preferential flow patterns in a loamy till soil. *Geoderma*, 2013, **192**: 430–436
- [20] Hardie MA, Cotching WE, Doyle RB, *et al.* Effect of antecedent soil moisture on preferential flow in a texture-contrast soil. *Journal of Hydrology*, 2011, **398**: 191–201
- [21] Nimmo JR. Preferential flow occurs in unsaturated conditions. *Hydrological Processes*, 2012, **26**: 786–789
- [22] Liu J-L (刘继亮), Li F-R (李锋瑞), Niu R-X (牛瑞雪), *et al.* Responses of ground arthropods to soil salinization in lands different in land-use/cover type in the middle reaches of Heihe River. *Acta Pedologica Sinica (土壤学报)*, 2011, **48**(6): 1242–1252 (in Chinese)
- [23] Wang X-F (王雪峰), Su Y-Z (苏永中), Yang R (杨荣). Characteristics of soil nematode community along an age sequence of sandy desert soil cultivation in a marginal oasis of middle reaches of Heihe River. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2010, **21**(8): 2125–2131 (in Chinese)
- [24] Liu J-L (刘继亮), Li F-R (李锋瑞), Niu R-X (牛瑞雪), *et al.* Influence of soil salinization on soil animal community in an arid oasis of middle Heihe River. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2012, **23**(6): 1551–1561 (in Chinese)
- [25] Bogner C, Wolf B, Schlather M, *et al.* Analysing flow patterns from dye tracer experiments in a forest soil using extreme value statistics. *European Journal of Soil Science*, 2008, **59**: 103–113
- [26] Lange B, Luescher P, Germann P. Significance of tree roots for preferential infiltration in stagnic soils. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2009, **13**: 1809–1821
- [27] Morales VL, Parlange JY, Steenhuis TS. Are preferential flow paths perpetuated by microbial activity in the soil matrix? A review. *Journal of Hydrology*, 2010, **393**: 29–36
- [28] Bundt M, Widmer F, Pesaro M, *et al.* Preferential flow paths: Biological ‘hot spots’ in soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 2001, **33**: 729–738
- [29] Bogner C, Borken W, Huwe B. Impact of preferential flow on soil chemistry of a podzol. *Geoderma*, 2012, **175/176**: 37–46
- [30] Liu B, Zhao WZ, Chang X, *et al.* Water requirements and stability of oasis ecosystem in arid region, China. *Environmental Earth Sciences*, 2010, **59**: 1235–1244
- [31] Zhao L-W (赵丽雯), Ji X-B (吉喜斌). Quantification of transpiration and evaporation over agricultural field using the FAO-56 dual crop coefficient approach: A case study of the maize field in an oasis in the middlestream of the Heihe River Basin in Northwest China. *Scientia Agricultura Sinica (中国农业科学)*, 2010, **43**(19): 4016–4026 (in Chinese)

作者简介 闫加亮,男,1985年生,博士研究生.主要从事绿洲生态水文研究. E-mail: louphechina@sina.com

责任编辑 肖红
