

非饱和土壤中大孔隙流的影响因素研究

张锦华, 李明思*, 韩 寒, 柳幸爽, 徐 强, 蓝明菊
(石河子大学 水利建筑工程学院, 新疆 石河子 832000)

摘 要:【目的】分析非饱和土壤中大孔隙流现象的影响因素及影响特点。【方法】在装有粉砂壤土的土槽中人工造出直径 4 mm 的通地表和不通地表的孔隙进行滴灌试验, 设置 3 种灌水量: 50、60、70 L; 3 种孔隙长度: 50、60、70 cm; 3 种土壤初始含水率: 5.7%、9.9%、13.3%。通过测定孔隙不同长度处的孔壁土壤含水率及相应长度处基质流区的含水率, 并计算其相应的基质吸力, 分析孔隙中出现大孔隙流的概率。【结果】土壤中出现大孔隙流的现象具有一定的随机性, 孔隙上部(0~30 cm)出现大孔隙流的概率在 2.08%~7.14%之间, 下部(40~70 cm)出现大孔隙流的概率在 14.58%~19.05%之间, 上部出现大孔隙流的概率小于下部出现大孔隙流的概率; 通地表孔隙出现大孔隙流的概率(13.04%)小于不通地表孔隙出现大孔隙流的概率(27.54%); 3 种影响因素对出现大孔隙流的影响程度为: 孔隙长度最大, 初始含水率次之, 灌水量最小。【结论】非饱和土壤中, 孔隙长度对出现大孔隙流的概率影响较大; 大孔隙流现象通常出现在孔隙的下半部分。

关 键 词: 非饱和土壤; 大孔隙流; 基质吸力; 农田排水; 土壤水分运动

中图分类号: S152; S152.7

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022023

OSID:



张锦华, 李明思, 韩寒, 等. 非饱和土壤中大孔隙流的影响因素研究[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(7): 70-77, 103.

ZHANG Jinhua, LI Mingsi, HAN Han, et al. Factors Affecting Macropore Flow in Unsaturated Soil[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(7): 70-77, 103.

0 引 言

【研究意义】土壤中的大孔隙流是指土壤中的水分和溶质通过大孔隙(大于通常意义的毛细管孔径)而绕过部分基质区迁移到深层土壤中的现象^[1]。土壤中的大孔隙流属于重力流, 其基本特征是: 孔隙中的含水率大于其周围基质流区的含水率, 或者孔隙中的水分运动速度快于其周围基质流区的水分运动速度^[2], 大孔隙流会产生一定的漏斗吸力, 进而促进大孔隙周围基质流区的水分向大孔隙运动^[3]。吴继强等^[4]指出, 有大孔隙存在的土体, 其水分入渗量要高于均质土体的同类指标, 说明大孔隙会加快水分的入渗; 聂锦杰等^[5]利用纤维网人工制造的大孔隙流导管研究了大孔隙对暗管排水效果的影响, 发现大孔隙流对暗管排水效果具有促进作用。利用大孔隙流的这些特点, 有利于实现非饱和土壤中的排水效果。

【研究进展】学者们对大孔隙流的影响因素做了许多室内研究。高朝侠等^[6]利用土柱试验对大孔隙流的影响因素进行研究, 发现土壤的初始含水率、大孔

隙的扭曲性、大孔隙的连通性等因素都会对大孔隙流产生一定的影响; 王岩等^[7]研究发现土壤的初始含水量对大孔隙流具有一定的影响, 土壤的初始含水量越低, 土壤中大孔隙流现象越明显; 张少妮等^[8]在对大孔隙流的影响因素进行研究时, 得出大孔隙的扭曲度越大(孔隙弯曲程度越大), 大孔隙方向上水分受到的阻力越大, 大孔隙流入渗的速度就越慢; 赵娇娜^[9]在对土壤初始含水率、土壤容重以及植物根系对大孔隙流的影响研究时, 得出土壤初始含水率对大孔隙流的形成具有重要影响。Zhou 等^[10]在 30 cm 直径的土柱中设置直径为 9 mm 的大孔隙, 研究孔隙的长度、类型、位置等因素对大孔隙中溶质迁移和分布的影响, 结果显示, 表面开放的孔隙中水分和溶质的运移速度更快; Allaire-leung 等^[11]在直径为 33 cm 的土柱中设置直径为 10 mm 的孔隙, 研究大孔隙的连续性对土壤中水分和溶质运移的影响, 结果表明, 孔隙连续性越强土壤中水分和溶质运移的速度越快。

土壤中影响大孔隙流的因素众多, 而且大孔隙的存在有利于非饱和土壤水分的运动和溶质运移。然而, 众多关于大孔隙流的研究成果还都是理论探讨, 并没有上升到生产应用层面, 这是因为土壤中大孔隙的分布和形状具有随机性, 给该理论的生产应用带来困难。石河子大学^[12]提出的人造大孔隙流导管用于非饱和

收稿日期: 2022-01-12

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(51790533)

作者简介: 张锦华(1992-), 男, 硕士研究生, 主要从事灌溉原理与新技术应用研究。E-mail: 92205@163.com

通信作者: 李明思(1965-), 男, 教授, 主要从事灌溉原理与新技术应用研究。E-mail: leemince@126.com

土壤暗管排水的技术，不仅在一定程度上解决了土壤中大孔隙分布的随机性问题，提高了该理论的实用性；还为解决滴灌盐碱地节水-排盐问题给予了启发。【切入点】但是前人的研究成果是在大孔隙流导管通向地面布置而取得的，大孔隙流导管通向地面的布置形式在实际生产中不利于土壤耕作和作物根系的生长，为了不影响耕作，大孔隙流导管应该埋在耕作层以下。在作物生育期（例如滴灌棉花）田间耕作层中是基质流，若要利用大孔隙流导管将耕作层中的基质流转化成大孔隙流，孔隙中需要留出一定长度的“过渡段”，而这一“过渡段”也是设计大孔隙流导管埋深的重要因素。【拟解决的关键问题】为了探讨这一“过渡段”问题，本文借鉴前人的工作经验，在装有粉砂壤土的土槽中人工制造直径 4 mm 通地表和不通地表的孔隙进行滴灌试验，研究不同灌水量、孔隙长度、土壤初始含水率对大孔隙流的影响，以期深入了解大孔隙流形成机制，为滴灌盐碱地非饱和土壤暗管排水技术的研发提供理论支持。

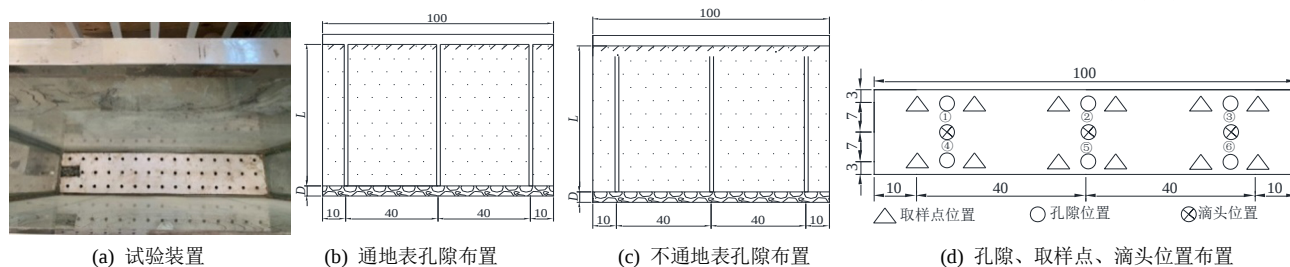


图 1 试验装置和大孔隙布置 (单位: cm)

Fig.1 Test setup and macropore arrangement

注 图 1(b)、图 1(c)中 L 为土层深度; D 为砾石深度。孔隙长度 L 为 70 cm 时, D 为 5 cm; 孔隙长度 L 为 60 cm 时, D 为 5 cm; 孔隙长度 L 为 50 cm 时, D 为 5 cm。

1.2 试验方法

试验中对大孔隙埋设方式进行 2 种处理, 分别为孔隙通向填土表面 (图 1 (b)) 和孔隙埋在填土表层 5 cm 以下 (图 1 (c))。每种孔隙分别布置在土槽两侧, 每侧 3 个孔隙 (图 1 (d)); 其中①—③号为通向填土表面的大孔隙, ④—⑥号为埋在土层以下的大孔隙, 各孔隙之间相距 40 cm, 以避免孔隙之间的流态相互干扰。试验中分别设置灌水量、孔隙长度、土壤初始含水率共 3 个因素, 每个影响因素设置 3 个水平, 每个处理设置 3 个重复, 共计 27 个处理。参照新疆膜下滴灌棉花田间灌水定额指标, 苗期灌水定额 25 mm、蕾期 35 mm, 本文试验中设定灌水量分别为 50 L (25 mm)、60 L (30 mm)、70 L (35 mm); 由于滴灌棉花计划湿润层深度 60 cm, 所以本文试验中设定孔隙长度分别为 50、60、70 cm; 根据孔隙成形和棉花灌水要求的最低含水率下限, 试验中设定土壤初始体积含水率分别为 5.7%、9.9%、13.3%。每种处理分别进行 3 次重复, 用了 9 个同规格土槽完成试验。

试验中采用果树输液袋进行滴灌, 每个袋子的容

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2020 年 10 月—2021 年 10 月在石河子大学水利建筑工程学院水利与土木工程试验中心进行 (东经 86°03', 北纬 44°18', 平均海拔高度 450.8 m)。供试土壤取自实验中心北边农学院试验田。用筛分法和比重计法测土壤机械成分: 粒径 <0.002 mm 的土粒量占 2.44%, 0.002~0.02 mm 粒径占 77.9%, 0.02~2 mm 粒径占 12.86%; 根据国际土壤质地分类标准, 该土壤可定为粉砂壤土; 土壤干体积质量为 1.40 g/cm³, 田间体积持水率为 26.65%, 饱和体积含水率为 46.32%。

试验所用玻璃土槽为 100 cm×20 cm×80 cm (长×宽×高), 土槽底部设有 5 cm 厚的砂砾石垫层, 垫层上部覆盖多孔板, 见图 1 (a) 所示。参考前人^[13-14]试验方法, 试验中的土壤大孔隙用直径 4 mm 的亚克力玻璃棒作模具、装土完成后抽出玻璃棒而形成; 为避免抽出亚克力玻璃棒后土壤向中间孔隙聚集, 本文试验中所用土壤均带有一定的初始含水率。

量为 1 L, 每个土槽共放置 3 个滴头, 滴头间距为 40 cm, 为了保证土壤水分由基质流区过渡到大孔隙中, 防止滴头直接向孔隙中滴水, 试验中设置滴头距孔隙距离 7 cm (图 1 (d))。输液袋中的水为自来水, 试验中调整灌水器 (滴头) 开关, 使滴头流量保持在 0.5 L/h 左右, 以避免因流量过大而产生地表径流, 进而影响通地表的大孔隙流的形成。灌水过程中每隔一定时间在土槽外部绘制湿润锋, 以此来观测土壤中的水分入渗情况。灌水结束后, 待土槽下方排水口停止出水 24 h 后对土壤进行取样。

1.3 测定指标与方法

直接测定大孔隙中的水分状况是困难的, 所以, 在试验中采用测定孔隙壁面上的土壤含水率与孔隙周围基质流区的土壤含水率相比较的方法, 来判断大孔隙流的生成现象。

1.3.1 含水率的测定

用烘干法测土壤含水率。取样点布置在大孔隙左、右二侧 5 cm 处以及大孔隙处 (图 1 (d) 所示)。用特制的钻头^[15], 从孔隙内部取孔隙边壁上的土样, 测其

含水率。每个取样点垂直向下每 10 cm 取 1 个样。每个土槽共设置 18 个取样点。

1.3.2 土壤水分特征曲线的测定

为了从土壤水吸力方面判定基质流与重力流的区别,试验中需要将所测得的土壤含水率换算成土壤水吸力;所以专门测定了土壤水分特征曲线。灌水结束后,用环刀在土壤中取 3 个土样,用美国 SEC 公司生产的压力膜仪测土壤的水分特征曲线,见图 2。

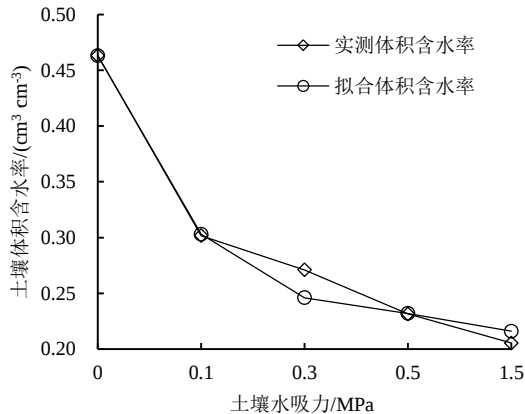


图 2 土壤水分特征模拟曲线

Fig.2 Soil moisture characteristics simulation curve

利用 Van Genuchten 模型进行土壤水分特征曲线拟合,其参数见表 1。

表 1 Van Genuchten 土壤水分特征曲线模型参数

Table 1 Van Genuchten soil moisture characteristic curve model parameters

参数	α	n	$\theta_s/(\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3})$	$\theta_r/(\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3})$
数值	29.67	1.84	0.463 2	0.205 3

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \cdot [1 + (\alpha \cdot h)^n]^{-(1-1/n)}, \quad (1)$$

表 2 不同灌水量下孔壁土壤含水率分布

Table 2 Distribution of pore wall soil water content at different irrigation rates

处理	孔隙长度/cm	灌水量 50 L		灌水量 60 L		灌水量 70 L	
		基质流区体积含水率/%	孔壁体积含水率/%	基质流区体积含水率/%	孔壁体积含水率/%	基质流区体积含水率/%	孔壁体积含水率/%
通地表	0	39.32±1.39ab	38.07±0.95bc	40.15±0.76a	39.52±0.87ab	37.84±1.02bc	36.77±0.90c
	10	38.65±1.33b	<u>40.58±0.85a</u>	39.93±0.36ab	39.37±0.05ab	40.29±0.80a	38.69±0.77b
	20	39.85±0.57a	39.41±0.80a	39.18±1.35a	39.92±0.14a	36.47±10.78a	40.01±0.32a
	30	39.72±3.19b	39.21±0.43b	39.29±0.87b	39.10±1.06b	40.19±0.73ab	41.26±0.78a
	40	39.91±0.46a	38.91±0.62a	38.97±0.41a	38.48±0.39a	39.12±1.13a	39.60±1.45a
	50	38.99±0.80a	39.27±0.86a	38.33±0.28b	<u>39.30±0.29a</u>	38.77±1.02a	39.74±2.09a
	60	38.48±0.69ab	38.54±0.13ab	38.42±1.46ab	37.97±0.92b	38.82±0.70ab	39.44±0.20a
	70	36.98±0.48b	37.12±0.20b	37.29±0.37b	36.69±0.12b	37.99±0.30b	<u>38.52±0.18a</u>
不通地表	0	39.30±0.92c	38.10±1.11b	36.94±0.55bc	36.44±0.28c	37.08±0.45bc	36.74±0.30c
	10	39.14±0.84ab	38.72±0.33abc	38.00±1.05bc	37.63±0.68c	39.47±1.64a	39.08±0.85ab
	20	39.41±0.99a	38.61±0.19a	39.49±0.77a	39.04±0.34a	40.04±0.31a	39.82±1.15a
	30	40.10±1.05a	38.86±0.48ab	39.17±0.62ab	38.62±0.75b	39.81±0.51ab	40.24±0.81a
	40	38.59±0.55ab	38.71±0.62ab	38.05±0.75b	<u>39.40±0.49a</u>	38.12±0.80b	<u>39.36±0.63a</u>
	50	36.66±0.35d	<u>37.81±0.59abc</u>	37.37±0.81bcd	38.22±0.73ab	37.16±0.72cd	<u>38.43±0.11a</u>
	60	36.50±1.30c	<u>38.71±0.40a</u>	36.68±0.46c	35.94±0.45c	37.12±0.68bc	38.38±0.42ab
	65	36.61±1.06b	<u>38.44±0.46a</u>	36.55±0.33a	36.62±0.51a	36.10±0.40a	36.86±0.48a

注 底部划“_”的数据为出现大孔隙流的土层;同行不同字母表示相同变量不同处理间差异显著 ($p < 0.05$)。

式中: θ 为土壤体积含水率 (cm^3/cm^3); θ_s 为饱和体积含水率 (cm^3/cm^3); θ_r 为剩余体积含水率 (cm^3/cm^3); α 为拟合系数; n 为拟合指数; h 为土壤水吸力 (MPa)。利用幂函数模型进行土壤水分特征曲线拟合,得到粉砂壤土的体积含水率与土壤水吸力的函数。

$$h = 1.784 \cdot 10^{-6} \theta_v^{-8.586} + 0.053 88 \quad (R = 0.992 9), \quad (2)$$

式中: θ_v 为土壤体积含水率 (cm^3/cm^3); h 为土壤水吸力 (MPa)。

1.4 数据处理

使用 Excel 表进行数据分析、利用 Origin 2017 绘制不同变量处理下出现大孔隙流的概率图、利用 SPSS 软件对数据进行方差分析,对比不同处理之间试验结果的显著性差异。

2 结果与分析

根据文献[2]中对土壤大孔隙流特点的介绍,本文试验中通过对比大孔隙壁上的土壤含水率及基质吸力与其周围基质流区的土壤含水率及基质吸力的大小来判断孔隙中出现大孔隙流的现象。

2.1 灌水量对大孔隙流的影响

在土壤初始体积含水率为 5.7%、通地表孔隙长度为 70 cm、不通地表的孔隙长度为 65 cm 时,对不同灌水量下的土壤体积含水率分布进行观测。结果显示,土壤中的大孔隙流现象存在随机性,不论大孔隙通向地表或是不通向地表,大孔隙流现象大多是从孔隙一定长度处开始出现,而且不一定沿着孔隙长度连续出现;不通地表的孔隙出现大孔隙流现象的土层深度要深于通地表的孔隙出现大孔隙流现象的土层深度,如表 2 所示。

对于通地表的孔隙,通过方差分析可知,灌水量为 50 L 时,仅孔隙长度 10 cm 处的孔壁土壤含水率比相应长度处基质流区的含水率大 1.93%,出现大孔隙流现象的概率为 12.5%。灌水量 60 L 时,仅 50 cm 长度处的孔壁土壤含水率比相应长度处基质流区的含水率大 0.97%,出现大孔隙流的概率为 12.5%。灌水量为 70 L 时,孔隙长度 70 cm 处孔壁含水率与其相应基质流区的含水率存在显著性差异,且孔壁土壤含水率比相应长度处基质流区的含水率大 0.53%,出现大孔隙流的概率为 12.5%。随着灌水量的增加出现大孔隙流现象的概率保持稳定,但是出现大孔隙流的土层深度加深。

对于不通地表的孔隙,灌水量 50 L 所对应的孔隙长度 50、60、65 cm 处孔壁土壤含水率与其两侧基质流区的含水率存在显著性差异,且孔隙长度 50、60、65 cm 处孔壁土壤含水率比其二侧基质流区的含水率分别大 1.15%、2.21%、1.83%,出现大孔隙流现象的概率为 37.5%。灌水量为 60 L 时,在孔隙长度 40 cm 处的孔壁土壤含水率比其二侧基质流区的土壤含水率大 1.35%,出现大孔隙流现象的概率为 12.5%。灌水量为 70 L 时,在孔隙长度 40、50 cm 处的孔壁土壤含水率比其二侧基质流区的土壤含水率分别大 1.24%、1.27%,出现大孔隙流现象的概率为 25%。虽然孔隙顶部覆土且灌水,但是,大孔隙流现象均未从孔隙顶部出现,多数情况下是在孔隙下部出现。

非饱和土壤中的土壤水分是从基质吸力低处向基质吸力高处运动^[16];但是,当土壤中存在大孔隙时,水分会向大孔隙汇集。根据粉砂壤土水分特征曲线可

知,灌水量为 50 L 时,通地表孔隙的孔壁基质吸力在 59~63 KPa 之间波动,相应的基质流区的吸力在 58~64 KPa 之间波动;其中,孔隙长度 10 cm 处的孔壁基质吸力比相应长度的基质流区吸力小 2.13 KPa。灌水量为 60 L 时,孔隙长度 50 cm 处的孔壁基质吸力比相应长度的基质流区吸力小 1.29 KPa。同理,灌水量为 70 L 时,孔隙长度 70 cm 处的孔壁基质吸力比相应长度处的基质流区的吸力分别小 0.81 KPa。这一现象表明,在这些长度处的孔壁土壤水分不是从基质流区水平汇集到孔壁上的,而应该是从基质流区沿垂直方向运动到孔壁上的。由于土壤中存在孔隙,造成基质流路径阻断,所以在孔隙壁面上会出现水分汇集。

对于不通地表的孔隙,灌水量为 50 L 时,孔隙长度 50、60、65 cm 处的孔壁基质吸力比相应长度的基质流区的吸力分别小 2.34、4.51、4.46 KPa。灌水量为 60 L 时,孔隙长度 40 cm 处的孔壁基质吸力比相应长度的基质流区的吸力分别小 0.25 KPa。同理,灌水量为 70 L 时,孔隙长度 40、50 cm 处的孔壁基质吸力比相应长度的基质流区的吸力分别小 1.69、2.21 KPa。孔隙上部覆盖土层后,孔隙中会产生气堵现象^[17],尽管如此,基质流区的水分仍然会向孔隙壁面汇集。

2.2 孔隙长度对大孔隙流的影响

在土壤初始体积含水率为 5.7%、灌水量为 50 L 时,对不同的孔隙长度下的土壤体积含水率分布进行观测。结果显示,土壤中的大孔隙流现象仍然存在随机性以及不连续性。如表 3 所示。

表 3 不同孔隙长度下孔壁土壤含水率分布

Table 3 Distribution of pore wall soil water content at different pore depths

处理	孔隙长度/cm	孔隙长度 50 cm		孔隙长度 60 cm		孔隙长度 70 cm	
		基质流区体积含水率/%	孔壁体积含水率/%	基质流区体积含水率/%	孔壁体积含水率/%	基质流区体积含水率/%	孔壁体积含水率/%
通地表	0	38.56±0.97a	38.32±1.32a	38.10±0.78a	37.82±0.28a	39.08±0.80a	38.35±0.46a
	10	37.54±0.44a	38.59±0.65a	37.63±0.49a	38.49±0.79a	38.50±0.83a	38.87±0.92a
	20	37.78±1.01b	38.65±0.28ab	37.87±0.65b	<u>39.35±0.13a</u>	38.45±1.06ab	38.47±0.32ab
	30	38.18±0.67b	38.54±0.30ab	38.70±0.23ab	39.41±0.43a	37.01±0.21c	<u>38.65±0.69ab</u>
	40	38.20±0.86bc	38.46±0.76abc	38.60±0.23abc	39.68±0.69a	37.49±0.59c	<u>38.97±0.94ab</u>
	50	38.49±0.82ab	39.66±0.84a	38.82±0.39ab	39.95±0.57a	37.94±0.49a	39.38±1.23ab
	60	-	-	38.93±0.38ab	40.23±0.71a	37.46±0.72b	<u>39.12±0.37a</u>
	70	-	-	-	-	36.42±0.42b	37.80±0.69ab
不通地表	0	38.69±0.55a	37.86±1.53a	38.27±0.58a	38.09±0.40a	38.04±0.55a	38.28±0.88a
	10	38.81±0.90ab	38.64±0.79abc	37.24±0.61c	37.36±0.58bc	39.12±0.73a	38.81±0.39ab
	20	38.65±0.69a	38.91±0.29a	36.51±0.30d	37.26±0.39cd	38.15±0.56ab	37.58±0.43bc
	30	38.26±0.44b	<u>39.23±0.36a</u>	36.41±0.25c	36.95±0.29c	37.76±1.13b	38.31±0.63b
	40	38.53±0.44bc	<u>39.47±0.46a</u>	36.60±0.42c	36.96±0.56c	37.85±0.52c	<u>39.07±0.38ab</u>
	45	37.62±0.70b	<u>39.13±0.43a</u>	36.83±0.43c	37.29±0.64c	37.62±0.40ab	38.46±0.38ab
	55	-	-	36.77±0.61b	<u>38.72±1.43a</u>	37.25±0.48b	<u>38.63±0.64a</u>
	65	-	-	-	-	36.90±0.46a	<u>37.72±0.16b</u>

对于通地表的孔隙,当孔隙长度为 50 cm 时,孔壁土壤含水率与相应长度处基质流区的含水率进行对比均未出现显著性差异 ($p>0.05$)。当孔隙长度为 60 cm 时,在孔隙 20 cm 长度处,其孔壁土壤含水率比其二侧基质流区的土壤含水率大 1.48%,出现大孔隙流现象的概率为 12.5%。当孔隙长度为 70 cm 时,在孔隙 30、40、60 cm 长度处,其孔壁土壤含水率比其二侧基质流区土壤含水率分别大 1.64%、1.48%、1.66%,出现大孔隙流现象的概率为 37.5%。随着孔隙长度的增大,出现大孔隙流现象的概率也增大。

对于不通地表的孔隙,孔隙长度为 50 cm 时,在孔隙 30、40、50 cm 长度处,其孔壁土壤含水率比其二侧基质流区的含水率分别大 0.97%、0.94%、1.51%,出现大孔隙流现象的概率为 50%。当孔隙长度为 60 cm 时,仅在孔隙 60 cm 长度处的孔壁土壤含水率比其二侧基质流区的含水率大 1.95%,出现大孔隙流现象的概率为 14.30%。当孔隙长度为 65 cm 时,在孔隙 40、60、65 cm 长度处孔壁土壤含水率与其二侧基质流区的含水率存在显著性差异,其孔壁土壤含水率比其二侧基质流区的含水率分别大 1.22%、1.38%、0.82%,出现大孔隙流现象的概率为 37.5%。孔隙上部被覆盖后,大孔隙流出现的概率并没有随着孔隙长度的增大而增大,但是,大孔隙流现象均未从孔隙顶部出现。

对土壤水吸力分析可知,关于通地表的孔隙,当孔隙长度为 60 cm 时,孔隙 20 cm 长度处的孔壁基质吸力比相应长度的基质流区的吸力小 2.08 KPa。当孔隙长度为 70 cm 时,孔隙 30、40、60 cm 长度处的孔壁基质吸力比相应长度的基质流区的吸力分别小 2.81、2.31、2.55 KPa。

对于不通地表的孔隙,当孔隙长度为 50 cm 时,孔隙 30、40、50 cm 长度处的孔壁基质吸力比相应的基质流区的吸力分别小 1.32、1.20、2.27 KPa。当孔隙长度为 60 cm 时,孔隙 60 cm 长度处的孔壁基质吸力比相应的基质流区的基质吸力小 1.45 KPa。当孔隙长度为 65 cm 时,孔隙 40、60、65 cm 长度处的孔壁基质吸力比相应的基质流区的基质吸力分别小 2.31、2.55、2.85 KPa。

从上述孔隙基质吸力可以看出,孔隙中出现大孔隙流现象的位置也存在孔壁基质吸力小于孔隙周围土壤的基质吸力的现象,说明孔壁上的水分不是直接从水平方向汇集来的。

2.3 土壤初始含水率对大孔隙流的影响

在灌水量为 50 L、通地表孔隙长度为 70 cm、不通地表的孔隙长度为 65 cm 时,对不同初始体积含水率下的土壤含水率分布进行观测,结果显示,土壤中的大孔隙流现象存在随机性和不连续性,如表 4 所示。

表 4 不同土壤初始含水率下孔壁土壤含水率分布

Table 4 Distribution of pore wall soil water content at different initial soil water content

处理	孔隙长度/cm	初始体积含水率 5.70%		初始体积含水率 9.90%		初始体积含水率 13.30%	
		基质流区体积 含水率/%	孔壁体积 含水率/%	基质流区体积 含水率/%	孔壁体积 含水率/%	基质流区体积 含水率/%	孔壁体积 含水率/%
通地表	0	37.74±0.70a	36.51±1.20a	38.82±1.14a	38.54±1.31a	37.37±1.33a	37.13±1.51a
	10	37.90±1.26a	37.72±0.71a	38.46±1.36a	37.90±1.65a	38.54±1.28a	39.61±0.87a
	20	38.15±0.50a	38.65±0.59a	39.17±0.86a	39.08±0.65a	38.02±0.67a	38.74±0.91a
	30	38.58±0.66a	39.10±0.69a	38.90±0.68a	38.78±0.37a	39.11±0.41a	39.08±0.77a
	40	38.42±0.56b	<u>39.62±0.47a</u>	38.63±0.90a	38.99±1.20a	39.24±0.44a	38.95±0.55a
	50	38.32±0.57a	39.17±0.26a	38.31±0.93a	39.57±1.68a	39.71±0.64a	39.45±0.81a
	60	37.69±0.55a	38.36±0.79a	38.02±0.67a	39.20±0.84a	38.80±0.83a	38.85±1.44a
	70	37.02±0.44b	37.34±0.88ab	37.27±0.58a	<u>38.85±0.96b</u>	38.80±1.11ab	38.89±1.12a
不通地表	0	38.31±1.53a	37.96±1.23a	39.12±0.60a	38.34±1.13a	38.45±0.43a	37.98±0.26a
	10	37.69±1.02a	37.00±1.33a	39.01±0.93a	38.04±1.38a	38.45±1.12a	38.04±0.81a
	20	37.61±0.98a	37.21±1.60a	39.36±1.70a	38.88±1.52a	38.51±0.96a	38.20±0.59a
	30	38.15±0.71a	37.98±0.53a	38.13±0.25b	<u>39.21±0.75a</u>	39.18±0.49a	39.23±0.73a
	40	38.14±1.19b	38.94±0.80ab	37.93±1.04b	<u>40.38±1.29a</u>	39.29±0.35ab	39.50±0.28ab
	50	34.43±2.32b	<u>38.96±1.34a</u>	39.10±0.96ab	39.30±1.40a	38.61±0.59b	<u>39.84±0.68a</u>
	60	37.70±0.64b	37.13±0.23b	37.87±0.90b	38.57±1.39b	38.10±0.98b	<u>40.39±0.19a</u>
	65	36.55±0.94b	37.00±0.66b	37.44±0.52b	37.57±0.81b	37.11±0.99b	<u>39.90±0.07a</u>

对于通地表的孔隙,土壤的初始体积含水率为 5.7%时,孔隙 40 cm 长度处的孔壁土壤含水率比其二

侧基质流区的含水率大 1.20%,出现大孔隙流现象的概率为 12.50%。土壤的初始体积含水率为 9.90%时,

孔隙 70 cm 长度处的孔壁土壤含水率比其二侧基质流区的土壤含水率大 1.58%，出现大孔隙流现象的概率为 12.50%。当土壤的初始体积含水率为 13.30% 时，孔壁土壤含水率与相应长度处基质流区的含水率进行对比均未出现显著性差异 ($p>0.05$) 出现大孔隙流现象的概率为 0。

对于不通地表的孔隙，土壤的初始体积含水率为 5.70% 时，孔隙 50 cm 长度处的孔壁土壤含水率比其二侧基质流区的含水率大 4.53%，出现大孔隙流现象的概率为 12.5%。当土壤的初始体积含水率为 9.90% 时，孔隙 30、40 cm 长度处的孔壁土壤含水率比其二侧基质流区的土壤含水率分别大 1.08%、2.45%，出现大孔隙流的概率为 25%。当土壤的初始体积含水率为 13.30% 时，孔隙 50、60、70 cm 长度处的孔壁土壤含水率比其二侧基质流区的含水率分别大 1.23%、2.29%、2.79%，出现大孔隙流现象的概率为 37.50%。试验显示，在孔隙顶部覆盖的情况下，随着初始体积含水率的增大，出现大孔隙流现象的概率逐渐增大。

对粉砂壤土的基质吸力进行分析可知，关于通地表的孔隙，当土壤的初始体积含水率为 5.70% 时，孔壁基质吸力在 58~65 KPa 之间波动，其基质流区的吸力在 60~63 KPa 之间波动；其中，孔隙 40 cm 长度处的孔壁基质吸力比其相应长度的基质流区吸力小 1.53 KPa。当土壤的初始体积含水率为 9.90% 时，孔隙 70 cm 长度处的孔壁基质吸力比其相应长度的基质流区吸力小 2.56 KPa。

对于不通地表的孔隙，当土壤的初始体积含水率为 5.70% 时，孔隙 50 cm 长度处的孔壁基质吸力比相应的基质流区的基质吸力小 11.05 KPa。当土壤的初始体积含水率为 9.90% 时，孔隙 30、40 cm 长度处的孔壁基质吸力比相应的基质流区的吸力分别小 1.51、1.58 KPa。当土壤的初始体积含水率为 13.30% 时，孔隙 50、60、70 cm 长度处的孔壁基质吸力比相应的基质流区的吸力分别小 1.49、2.78、4.10 KPa。

上述对土壤基质吸力的分析结果同样显示出孔壁上的水分不是直接从水平方向汇集来的。

3 讨论

3.1 大孔隙流现象的随机性

本研究显示，土壤中发生大孔隙流现象存在明显的随机性。每次重复试验所观测到的大孔隙流的出现位置都不固定；但是，对各次重复试验测得的孔壁含水率以及二侧基质流区含水率分别取平均值，结果显示，在孔隙下部出现大孔隙流现象的概率最大，这与大部分关于土壤大孔隙流问题的研究结果类似^[18]。这表明了大孔隙流的“优先流”和“指流”现象，其不仅能绕过基质流区在土壤深层积水，还能在孔隙下部

起到“源”的作用，向周围基质流区入渗。吴继强等^[19]研究也有类似结果，其研究发现，在入渗初期，水分会向大孔隙域聚集，并通过大孔隙的孔壁向基质域进行水平方向的入渗。盛丰等^[20]在用单离子示踪技术研究大孔隙对水和溶质的输移时发现，示踪剂溶液在土壤大孔隙中入渗得越深，其运移到深层土壤时的浓度越高，所以会对周围土壤起到“源”的作用。

3.2 大孔隙流的过渡区

根据土壤水动力学理论，土壤非饱和流是从基质吸力小的地方向基质吸力大的地方运动。本文试验数据显示，土壤大孔隙的孔壁体积含水率大于其二侧基质流区的土壤体积含水率，即孔壁土壤的基质吸力小于相应长度的基质流区的基质吸力，这表明孔壁上的水分不是从同长度的基质流区水平汇集来的，应该是从上层土壤运动下来的。上部土层的水分在重力和基质吸力共同作用下，向下层土壤“扩散”运动^[21]；当遇到孔隙时，基质流路径被阻断（即毛管吸力被阻断），水分无法穿过孔隙横断面进行水平运动，因此，将沿着孔隙壁面垂直向下运动。随着水分沿孔隙壁面逐步汇集，导致孔壁上某些位置的含水率大于同长度处基质流区的含水率，表现出优先流现象，并在孔隙一定长度处形成大孔隙流现象^[22]；因此，孔隙的下部出现大孔隙流的概率大，此结果与吕捷等^[18]的研究结果一致；其试验发现，土壤水分并没有直接通过大孔隙传递至孔隙底端，而是先在基质区下渗；当水分下渗至孔隙一定长度时，孔隙附近的基质区的水分开始向大孔隙中汇集。另外，水分在基质流区进行“扩散”运动时，由于起点和路径不同，使其在孔壁上的汇集位置也不同，因此，显示出大孔隙流的随机性。从基质流到达孔隙壁面，到孔壁面出现大孔隙流现象（即水分汇集），水分运动经过的孔隙长度就是基质流向大孔隙流转化的过渡段。在本文试验中，各处理的孔隙都存在这样一个过渡段，表明了土壤大孔隙产生大孔隙流的效率。

3.3 大孔隙流的影响因素

由于土壤中的大孔隙流现象具有随机性，所以，大孔隙流现象出现的概率是判断各种影响因素对大孔隙流影响程度的标准。试验中对通地表孔隙和不通地表孔隙均设定了 3 种影响大孔隙流的因素，分别是灌水量、孔隙长度和土壤初始含水率。试验结果显示，不通地表的大孔隙总体上比通地表的大孔隙更容易产生大孔隙流；而且，孔隙长度因素和土壤初始含水率因素对大孔隙流出现的影响程度比灌水量因素的影响程度大，如图 3 所示。

图 3 显示，对于通地表的孔隙，随着灌水量的不断增加，出现大孔隙流现象的概率稳定不变，说明灌水量条件下对大孔隙流出现的概率影响不大；孔隙长

度因素和出现大孔隙流现象的概率呈正相关关系,即随着孔隙长度的增加,其出现大孔隙流现象的概率逐渐增大,其增大的平均比率为 1.5。土壤初始含水率因素与出现大孔隙流现象的概率呈负相关关系,此结果与王岩等^[7]、赵娇娜^[9]的研究结果类似。王岩等^[7]研究表明,土壤的初始含水率越高,水分及溶质的迁移越不明显;赵娇娜^[9]使用亮蓝染色剂对深层土壤染色,试验发现土壤的初始含水率越大,土壤中水分入渗的速率越慢。灌水量、孔隙长度和初始含水率等因素影响下,通地表孔隙出现大孔隙流的概率的平均值分别为 12.5%、16.67%、8.33%。

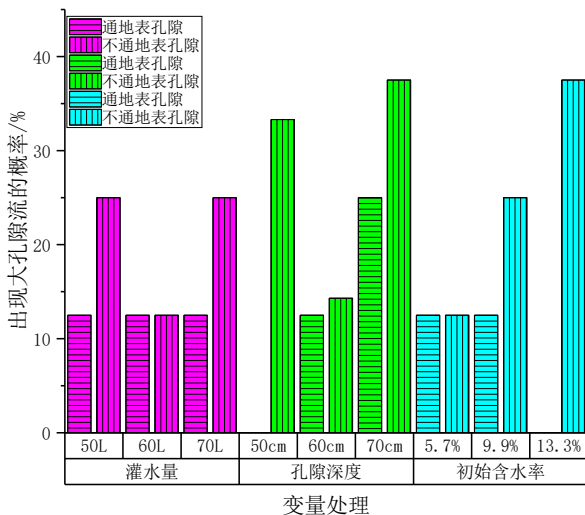


图3 不同变量处理下出现大孔隙流的概率

Fig.3 Effect of different variable treatments on the probability of occurrence of macropore flow

对于不通地表的孔隙,其出现大孔隙流现象的概率随灌水量或孔隙长度呈“U”形变化;近似地,其出现大孔隙流现象的概率和灌水量和孔隙长度等因素均呈负相关关系。但出现大孔隙流的概率和初始含水率呈正相关关系,即随着土壤初始含水率的增加,其出现大孔隙流现象的概率逐渐增大,且增大比率平均为 1.5。但是通过对出现大孔隙流现象的概率的平均值分析发现,孔隙长度影响下的大孔隙流出现的概率平均值为 33.93%,比初始含水率影响下的平均值 25%大 14.3%。由此可说明,孔隙长度因素对大孔隙流出现的影响程度比土壤初始含水率因素的影响程度大。

总体而言,对于通地表孔隙和不通地表的孔隙,均表现出孔隙长度因素对出现大孔隙流的概率的影响程度最大,土壤的初始含水率因素次之,灌水量因素影响最小。因为当孔隙长度增大后,孔隙壁面的长度增大,水分在壁面上运动的距离增长,增加了水分汇集的机会,因此能增大产生大孔隙流的概率。

通过对土层含水率分布进行分析可知,在不同灌水量、孔隙长度、初始含水率条件下,孔隙顶部出现

大孔隙流的概率很小,而距孔隙顶部 30 cm 处,出现大孔隙流的概率分别为 0%、4.76%、2.08%;距孔隙顶部 40 cm 处,出现大孔隙流的概率分别为 4.17%、7.14%、4.17%。由此可知,在孔隙 30~40 cm 长度处是容易出现大孔隙流现象的最高位置,这可以给生产中设计大孔隙流导管的长度提供参考。

3.4 大孔隙流现象的应用要求

由于非饱和土壤存在一定的基质吸力,所以,在非饱和土壤中进行排水排盐较为困难。Chen 等^[23]将人工制作的大孔隙流导管组装在排水暗管上,实现了非饱和土壤的排水排盐效果。但是,当大孔隙流导管连通地表或者接近地表时,将影响农田耕作或作物根系的生长。另外,土壤基质流向大孔隙流转化时需要一定的过渡段,而这一过渡段就是水分沿着孔隙向下运动并逐步汇集成重力流所需要的长度;所以,要求大孔隙流导管应该具有最短的长度,才能实现导管中出现大孔隙流现象。本文试验显示,对于不同的孔隙长度,埋在土层下的孔隙出现大孔隙流的概率大于通地表的孔隙出现大孔隙流的概率。这对设计大孔隙流导管有一定的参考作用。

4 结论

1) 本研究表明,土壤中出现大孔隙流的现象具有一定的随机性及不连续性。总体而言,孔隙上部出现大孔隙流的概率小,而孔隙下部出现大孔隙流的概率大。在不同的灌水量、孔隙长度和初始含水率影响下,孔隙 0~30 cm 长度处出现大孔隙流的概率为 2.08%~7.14%,而孔隙 40~70 cm 长度处出现大孔隙流的概率为 14.58%~19.05%。

2) 在不同的孔隙长度影响下,不通地表的孔隙比通地表的孔隙更容易出现大孔隙流现象。试验显示,在不同的孔隙长度影响下,不通地表的孔隙出现大孔隙流的概率为 33.33%,而通地表的孔隙出现大孔隙流的概率为 19.05%。

3) 孔隙长度因素对出现大孔隙流现象的影响作用大于土壤初始含水率因素对出现大孔隙流现象的影响作用,而灌水量因素对出现大孔隙流现象的影响较小。试验显示,不同的孔隙长度和土壤初始含水率影响下出现大孔隙流现象的增长幅度平均值均为 1.5,而不同的灌水量影响下出现大孔隙流现象的增长幅度平均值为 0。

参考文献:

- [1] 盛丰. 土壤优先流运动的示踪成像技术与分形模型模拟[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2015.
SHENG Feng. Tracer imaging techniques and fractal model simulation of soil preferential flow movement[M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2015.

- [2] 朱磊, 杨金忠, 岳卫峰. 水流在土壤大孔隙中运动的数值模拟[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(3): 20-23.
ZHU Lei, YANG Jinzhong, YUE Weifeng. Numerical simulation of water flow movement in soil macropores[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2008, 27(3): 20-23.
- [3] WANG Z, LU J H, WU L S, et al. Visualizing preferential flow paths using ammonium carbonate and a pH indicator[J]. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66(2): 109-133.
- [4] 吴继强, 张建丰, 高瑞, 等. 大孔隙对土壤水分入渗特性影响的物理模拟试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(10): 13-18.
WU Jiqiang, ZHANG Jianfeng, GAO Rui, et al. Physical simulation experiments on the effect of large pore space on soil water infiltration characteristics[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2009, 25(10): 13-18.
- [5] 聂锦杰, 李明思, 梁萌帆, 等. 一种基于大孔隙流理论的农田排水暗管的工作性能试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(12): 88-95.
NIE Jinjie, LI Mingsi, LIANG Mengfan, et al. An experimental study on the working performance of an agricultural drainage culvert pipe based on macropore flow theory[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(12): 88-95.
- [6] 高朝侠, 徐学选, 赵娇娜, 等. 土壤大孔隙流研究现状与发展趋势[J]. 生态学报, 2014, 34(11): 2 801-2 811.
GAO Chaoxia, XU Xuexuan, ZHAO Jiaona, et al. Current status and development trend of soil macropore flow research[J]. Journal of Ecology, 2014, 34(11): 2 801-2 811.
- [7] 王岩, 陈友媛, 彭昌盛, 等. 初始含水量对黄河口潮滩溶质优先运移的影响研究[J]. 海洋环境科学, 2011, 30(3): 310-315.
WANG Yan, CHEN Youyuan, PENG Changsheng, et al. Effect of initial water content on preferential transport of solutes in the tidal flats of the Yellow River Estuary[J]. Marine Environmental Science, 2011, 30(3): 310-315.
- [8] 张少妮, 徐学选, 高朝侠, 等. 大孔隙扭曲度对土壤水分入渗的影响[J]. 水土保持通报, 2015, 35(4): 24-28.
ZHANG Shaoni, XU Xuexuan, GAO Chaoxia, et al. Effect of Macropore Tortuosity on Soil Infiltration[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(4): 24-28.
- [9] 赵娇娜. 长武塬区不同土地利用类型土壤大孔隙流研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2012.
ZHAO Jiaona. Study of soil macropore flow in different land use types of Changwu Plateau[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2012.
- [10] ZHOU B B, LI Y, WANG Q J, et al. Preferential water and solute transport through sandy soil containing artificial macropores[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 70(5): 2 371-2 379.
- [11] ALLAIRE-LEUNG S E, GUPTA S C, MONCRIEF J F. Water and solute movement in soil as influenced by macropore characteristics:1. Macropore continuity-Science Direct[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2000, 41(3): 283-301.
- [12] 石河子大学. 具有引导渗流作用的排水暗管装置的制备方案: ZL201810317852.1[P]. 2019-10-01.
Shihezi University. Preparation scheme of drainage concealed pipe device with guided seepage: ZL201810317852.1[P]. 2019-10-01.
- [13] 冯杰, 尚曼廷, 刘佩贵. 大孔隙土壤与均质土壤水分特征曲线比较研究[J]. 土壤通报, 2009, 40(5): 1 006-1 009.
FENG Jie, SHANG Manting, LIU Peigui. A comparative study of moisture characteristic curves of macroporous soils and homogeneous soils[J]. Soil Bulletin, 2009, 40(5): 1 006-1 009.
- [14] 杨梦. 土壤大孔隙特征对水分及溶质优势流运移影响的实验研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021.
YANG Meng. Experimental study on the effect of soil macropore characteristics on water and solute dominant flow transport[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2021.
- [15] 石河子大学. 用于土壤大孔隙内部的取样钻头: ZL202122001788.6[P]. 2022-02-15.
Shihezi University. Sampling bit for the interior of large pore space of soil: ZL202122001788.6[P]. 2022-02-15.
- [16] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.
LEI Zhidong, YANG Shixiu, XIE Senchuan. Soil hydrodynamics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1988.
- [17] LIU Y, CHENG G. Constitutive modeling for unsaturated soils considering gas hardening effect[J]. Chinese Science Bulletin: 2011, 56(16): 7.
- [18] 吕捷, 樊秀峰, 吴振祥. 基于降雨染色示踪试验的大孔隙流特性研究[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(5): 109-122.
LYU Jie, FAN Xiufeng, WU Zhenxiang. Study of macropore flow characteristics based on rainfall dye tracer test[J]. Journal of the Changjiang Academy of Sciences, 2021, 38(5): 109-122.
- [19] 吴继强, 张建丰, 高瑞. 不同大孔隙深度对土壤水分入渗特性的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(5): 91-95.
WU Jiqiang, ZHANG Jianfeng, GAO Rui. The effect of the infiltration characteristics under the different macropores' depth in the soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(5): 91-95.
- [20] 盛丰, 张利勇, 王康. 土壤大孔隙发育特征对水和溶质输移的影响[J]. 土壤, 2015, 47(5): 1 007-1 013.
SHENG Feng, ZHANG Liyong, WANG Kang. Influence of soil macropore development characteristics on water and solute transport[J]. Soil, 2015, 47(5): 1 007-1 013.
- [21] WANG Z, WU L S, HARTER T, et al. A field study of unstable preferential flow during soil water redistribution[J]. Water Resources Research, 2003, 39(4): 1-11.
- [22] ALLAIRE S E, ROULIER S, CESSNA A J. Quantifying preferential flow in soils: A review of different techniques[J]. Journal of Hydrology, 2009, 378(12): 179-204.
- [23] CHEN W J, LI M S, NIE J J, et al. Experimental study on macropore flow effects in unsaturated soil on subsurface drainage and soil desalination[J]. Irrigation and Drainage, 2021, 70(4): 1-13.