

DOI: 10.11766/trxb202006180316

贾昂元, 张勇勇, 赵文智, 康文蓉. 干旱区绿洲农田土壤大孔隙与水分入渗特征[J]. 土壤学报, 2022, 59 (2): 486–497.

JIA Angyuan, ZHANG Yongyong, ZHAO Wenzhi, KANG Wenrong. Characteristics of Soil Macropores and Water Infiltration in Oasis Croplands in an Arid Region[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59 (2): 486–497.

干旱区绿洲农田土壤大孔隙与水分入渗特征*

贾昂元^{1, 2}, 张勇勇^{1, 2†}, 赵文智¹, 康文蓉^{1, 2}

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 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 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 土壤大孔隙虽然占土壤总孔隙的极少部分, 但影响着土壤水分入渗途径和过程。本研究以干旱区山前绿洲、老绿洲、边缘绿洲三种典型绿洲农田为研究对象, 通过原位染色示踪和 CT 扫描技术, 定量研究了绿洲农田的大孔隙特征和土壤水分入渗性能。结果表明: 绿洲农田的土壤大孔隙大多集中在 0~20 cm 土层, 老绿洲农田的大孔隙三维结构较山前绿洲农田和边缘绿洲农田复杂, 其土壤大孔隙度、分形维数、分支密度、连接点密度、连通性指数显著大于山前绿洲和边缘绿洲农田 ($P < 0.05$)。绿洲农田的稳定入渗率存在显著性差异 ($P < 0.05$), 表现为: 边缘绿洲 ($0.48 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$) > 老绿洲 ($0.28 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$) > 山前绿洲 ($0.16 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$)。绿洲农田水分的入渗特征呈现异质性, 入渗的染色面积比随土层深度增加而减小, 老绿洲的优先流长度指数、最大入渗深度显著高于山前绿洲和边缘绿洲 ($P < 0.05$), 其优先流现象明显。在干旱区绿洲农田, 土壤大孔隙是影响优先流的关键因素, 土壤的大孔隙度高, 且连通性好, 更容易产生优先流。

关键词: 干旱区; 绿洲农田; 大孔隙; 入渗; 土壤水分

中图分类号: S152.7 文献标志码: A

Characteristics of Soil Macropores and Water Infiltration in Oasis Croplands in an Arid Region

JIA Angyuan^{1, 2}, ZHANG Yongyong^{1, 2†}, ZHAO Wenzhi¹, KANG Wenrong^{1, 2}

(1. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Linze Inland River Basin Research Station, Key Laboratory of Inland River Basin Ecohydrology, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: 【Objective】 Soil macropores in oasis croplands account for a low ratio of the total soil porosity, but significantly influence the path and process of soil water infiltration. Therefore, it is necessary to explore or characterize soil macropores and their effects on the water infiltration process in arid regions. 【Method】 In this study, we selected three types of oasis croplands (piedmont oasis cropland, old oasis cropland, and marginal oasis cropland), using *in-situ* dye tracer experiment and a

* 国家自然科学基金项目(41877153, 42071044)、中国科学院 A 类先导专项(XDA23060302)、中国科学院青年创新促进会会员(2020420)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41877153, 42071044), the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (No. XDA23060302), the Youth Innovation Promotion Association CAS (No. 2020420) .

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: zhangxyz23@126.com

作者简介: 贾昂元 (1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事干旱区土壤水文研究。E-mail: jiaangyuan@lzb.ac.cn

收稿日期: 2020-06-18; 收到修改稿日期: 2021-01-11; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2021-05-13

helical medical X-ray computed tomography (CT), the characteristics of soil macropores and water infiltration in the three oasis croplands were quantitatively investigated. 【Result】 The results showed that soil macropores in the oasis croplands were mainly concentrated in the 0–20 cm soil layer. The three-dimensional macropore structure in the old oasis cropland was more complex than those of piedmont oasis and marginal oasis croplands. Also, the soil macroporosity, fractal dimension, branch density, junction density, and connectivity density in the old oasis cropland were significantly ($P < 0.05$) higher than those of piedmont oasis and marginal oasis. Besides, there was a significant ($P < 0.05$) difference in the steady infiltration rates between the three types of oasis croplands. The steady infiltration rates were of the order marginal oasis cropland ($0.48 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$) > old oasis cropland ($0.28 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$) > piedmont oasis cropland ($0.16 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$). The dyed area of water infiltration in croplands decreased with the depth of the soil layer. Also, the maximum infiltration depth and preferential flow length index in old oasis cropland were significantly ($P < 0.05$) higher than that in piedmont oasis and marginal oasis croplands, and the degree of preferential flow was also the highest. 【Conclusion】 In oasis croplands of arid regions, the characteristics of soil macropores are the key factors affecting preferential flow. The oasis soils with high macroporosity and connectivity are more likely to produce preferential flow, resulting in soil water moving to the deep soil layer. It was observed that old oasis cropland had higher macroporosity and pore connectivity than the other oasis croplands, and demonstrated the most obvious degree of preferential flow. This study provides an *in-situ* measurement technique and database for the study of preferential flow in arid regions.

Key words: Arid region; Oasis cropland; Macropore; Infiltration; Soil moisture

河西走廊中段绿洲是我国重要的农业生产区，也是国内单季粮食产量较高的区域之一。近 35 年以来，人为开垦使绿洲面积增加了 1.5 倍^[1-2]。由于不同的开垦年限以及人为耕作措施的影响，形成了不同类型的绿洲农田土壤，其特殊的土壤母质，气候条件和管理方式对土壤孔隙结构和水分运动过程产生着深刻的影响^[3-5]。荒漠绿洲农田土壤由于受到干湿交替、冻融作用和土壤特性等非生物因素和动物洞穴、植物根系等生物因素的影响，大孔隙广泛存在^[3]。荒漠绿洲区土壤水分运动的研究以往多关注均匀流^[4]，也有相关学者通过染色示踪技术表明了荒漠绿洲地区存在优先流现象，发现大孔隙流现象是荒漠绿洲区土壤水分运动的重要形式之一^[5-6]。土壤大孔隙虽然只占土壤体积的 0.1%~5%，但却可传导 90%的水流量，对土壤水分运动起着关键作用^[7]。绿洲农田灌溉水分利用效率提高、养分流失和地下水污染与土壤大孔隙引起的优先流现象有着密切关系^[8]。大孔隙作为土壤优先流通道，将水分传至土壤深层，影响着荒漠绿洲区的生态水文过程^[9-11]。

目前对大孔隙的研究方法主要有渗透仪法、染色示踪法、CT 扫描技术以及溶质穿透曲线法等^[12-14]。染色示踪法观测简单直观，适合在农田进行土壤大孔隙流现象研究。Zhang 等^[15]将染色技术应用到水稻田土壤裂隙的研究，李胜龙等^[16]利用染色技术研究了稻田

—田埂过渡区的优先流特征。通过染色可以观察到土壤大孔隙流形态特征，但难以获得土壤三维孔隙结构特征^[17]，缺乏对土壤大孔隙的量化研究。近年来 CT 扫描技术被国内外学者广泛应用在土壤大孔隙结构研究中^[18-21]，CT 扫描是一种无损的 3D 成像技术，能够在不破坏土壤结构的情况下，获取土壤大孔隙结构^[22]，进一步分析得到土壤大孔隙结构的特征参数。Hu 等^[18]利用 CT 扫描技术研究了青海湖流域不同土地利用类型的大孔隙结构，结果表明土壤类型是影响土壤大孔隙特征的重要因素之一。

目前关于土壤大孔隙特征的研究多集中在水分条件较好的草地、林地、水稻田^[9, 11, 14]等，而对于干旱区绿洲农田的大孔隙特征的研究相对较少，特别是绿洲农田的土壤大孔隙结构特征如何？大孔隙的产生对绿洲农田水分入渗的影响如何？基于上述认识，本文将 CT 扫描和原位染色示踪技术相结合，对干旱区典型绿洲农田的大孔隙特征进行了较为全面深入的探究，旨在揭示大孔隙对荒漠绿洲农田水分入渗过程的影响，提高荒漠绿洲区地表水与地下水转换规律的认识。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区地处甘肃省河西走廊中段（99°51′—

100°30'E, 38°57'—39°42'N, 海拔 1 374 m)。该区是典型的干旱荒漠气候, 年平均气温 7.6°C, 年平均日照时数 3 051 h, 年平均风速 3.2 m·s⁻¹, 多年平均降水量为 117 mm, 蒸发量 2 388 mm, 7—9 月降水量约占全年降水量的 60%。研究区主要景观类型有外围荒漠、荒漠绿洲过渡带和中心绿洲区。黑河中游是西北干旱区典型的绿洲灌溉农业, 农业种植主要依赖于黑河地表水和地下水灌溉, 以种植玉米为

主。近几十年来, 荒漠边缘被逐步开垦, 形成了不同开垦年限的绿洲农田^[23], 土壤类型为灌漠土。其中新开垦的边缘绿洲农田土壤有机质低, 保水性能差, 土壤为砂土; 经过百年尺度耕作的老绿洲农田, 由于人为施肥灌溉, 其土壤肥力较高, 土壤质量好; 分布在北山山前的绿洲, 受地层条件和山洪洪水所携带泥沙淤积, 开垦形成的山前绿洲农田, 土壤耕作层主要是黏土层, 土壤为黏土(图 1)。

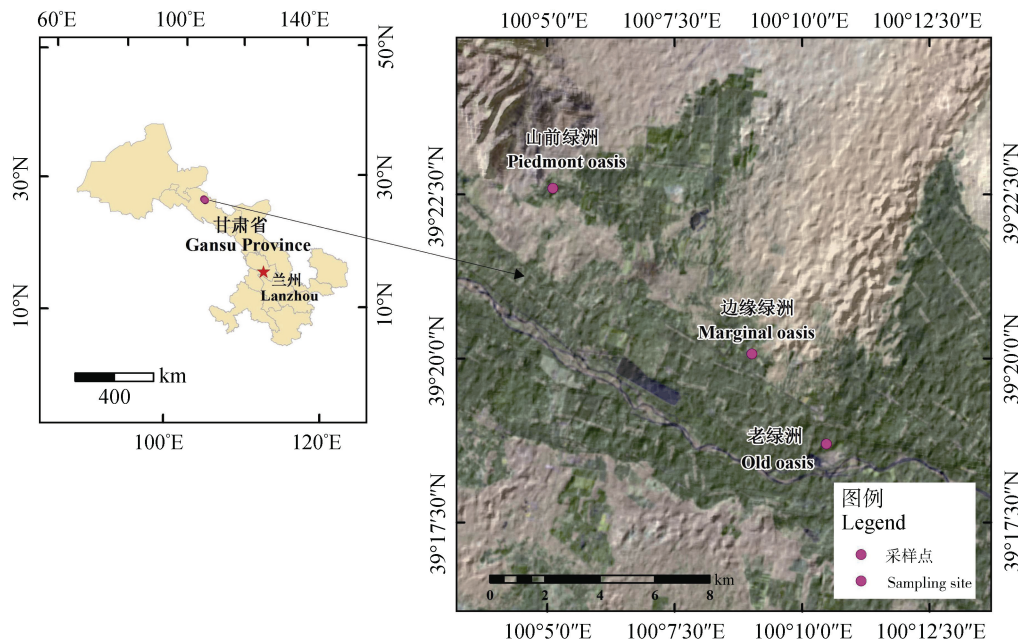


图 1 研究区样地分布示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the study area

1.2 试验设计

2019 年 7—10 月在研究区选取了三种典型农田: 老绿洲农田、边缘绿洲农田、山前绿洲农田开展试验。利用高 30 cm, 内径 19 cm 的 PVC 管在三个样地进行原状土柱的采集, 每个样地取 3 个重复, 共计 9 个土柱。在原状土柱转运过程中注意对样品的保护, 确保其土壤结构的完整性, 为避免土壤水分的蒸发, 采样结束后利用保鲜膜将土柱的两端密封。采集的原状土柱在临泽县人民医院利用 CT 机 (Optima CT520, GE, USA) 进行扫描, 激发电压为 100 kVp, 电流为 100 mA, 扫描图像的水平分辨率为 0.469 mm, 垂直分辨率为 0.625 mm, 由于受到 CT 扫描分辨率的限制, 本研究中绿洲农田土壤大孔隙孔径大于 0.47 mm。为避免作物根系对土壤结构的影响, 原状土柱的采集和入渗试验均在玉米农田的行间空地上进行。

在采集原状土柱的样点附近, 开展单环染色入渗试验, 单环直径 20 cm, 设计灌水量为 100 mm, 与当地实际灌水定额保持一致。入渗试验中, 采用亮蓝溶液作为染色剂, 浓度为 4 g·L⁻¹, 利用马氏瓶供水, 保持定水头 5 cm。入渗过程中记录马氏瓶水位刻度随时间变化 (实验刚开始时, 每 3 min 记录一次水面位置, 30 min 以后每 10 min 记录一次), 在每个样地进行 3 个重复。入渗完成 24 h 后, 入渗湿润锋基本稳定, 垂直开挖土壤剖面, 剖面深度为 40 cm。将剖面修理平整后, 用相机对染色剖面进行拍照, 为避免阳光直射, 采取遮光拍照获取染色剖面图像。并在 0~30 cm 土层每隔 10 cm 采集土壤样品, 测定土壤容重、饱和含水量、总孔隙度和机械组成等基本性质。采用环刀法测定土壤容重、土壤总孔隙度和饱和含水量等, 土壤机械组成采用激光粒度仪 (Mastersizer 2000) 测定。

1.3 数据处理

土壤染色图像经过 Photoshop CS6 进行裁剪处理、几何校正, 处理好的图像在 Image-J 软件中进行图像二值化处理, 然后利用 ArcMap10 计算土壤剖面染色特征参数(最大入渗深度、优先流长度指数、土壤染色面积比)。染色面积比是指土壤染色区域面积与所选取的整个剖面面积的比值。基质流入渗深度为染色面积比 >80% 以上的土层深度^[23]。优先流长度指数是整个土壤染色剖面上下层染色面积比的绝对差值, 计算公式为 $L = \sum_{i=1}^n |Dc(i+1) - Dc(i)|$, 将土壤染色剖面划分成 n 层, $Dc(i)$ 表示第 i 层的染色面积比^[24]。

为消除边缘效应的影响, CT 扫描后的原始图像去除上下各 20 张图像, 并选择中间 12 cm×12 cm 的感兴趣区域进行分析。采用目视解译分析方法, 利用 Image-J 对图像进行阈值分割, 对照每个土柱 CT 扫描的原始图像, 进行对比选取合理的阈值, 进行二值化阈值分割处理。利用 Image-J 中的 3D viewer 模块对图像进行三维结构重建, 构建土壤大孔隙三维结构图, 利用 Image-J 中的 BoneJ 插件构建三维

骨架结构, 其中孔隙数、孔隙度、大孔隙面积密度、平均孔隙体积、分形维数、分支密度、连接点密度、平均孔隙直径、连通性密度均可通过 Image-J 直接计算得出^[25-26]。

利用 Excel 对数据进行计算处理, 利用 SPSS 20.0 对数据进行单因素方差分析、显著性检验和相关性分析, 利用 Origin 2018 进行制图。

2 结 果

2.1 绿洲农田土壤基本物理性质

表 1 显示了绿洲农田土壤的基本物理性质, 0~30 cm 土层的三种绿洲农田砂粒含量存在显著性差异 ($P < 0.05$), 但不同土层间的差异并不显著, 老绿洲、边缘绿洲农田的砂粒含量分别为山前绿洲的 2.58 倍、3.43 倍。根据美国农业部土壤质地分类标准, 山前绿洲农田质地为粉黏壤土, 老绿洲农田质地为壤质砂土, 边缘绿洲农田质地为砂土。边缘绿洲和山前绿洲农田的土壤容重显著大于老绿洲农田 ($P < 0.05$), 但老绿洲农田的总孔隙度最大, 为 45%。

表 1 绿洲农田土壤基本物理性质

Table 1 Basic soil physical properties in different oasis croplands

样地 Sample plot	土层 Soil layer /cm	机械组成			土壤质地 Soil texture	容重 Bulk density /(g·cm ⁻³)	总孔隙度 Total porosity /%	饱和含水量 Saturated water content /%
		Particle size distribution /%						
		砂粒 Sand 0.05~2 mm	粉粒 Silt 0.002~0.05 mm	黏粒 Clay <0.002 mm				
山前绿洲	0~10	26.16±5.18	61.21±4.46	12.63±2.30	粉黏壤土	1.54±0.02	41.89±0.89	42.72±2.38
Piedmont oasis	10~20	24.72±2.56	62.58±2.52	12.70±0.29	粉黏壤土	1.53±0.03	42.26±0.71	41.89±1.68
	20~30	25.28±2.09	62.52±1.34	12.2±1.27	粉黏壤土	1.55±0.03	41.51±0.65	40.35±2.27
老绿洲 Old oasis	0~10	60.92±1.32	33.33±1.06	5.75±0.65	壤质砂土	1.44±0.04	45.67±1.03	44.91±2.51
	10~20	61.60±1.93	32.85±1.01	5.55±0.92	壤质砂土	1.46±0.01	44.91±0.26	43.87±1.08
边缘绿洲 Marginal oasis	20~30	62.37±2.80	32.52±1.91	5.11±1.14	壤质砂土	1.50±0.03	43.40±0.77	43.56±2.46
	0~10	82.84±1.46	14.01±1.20	3.15±0.34	砂土	1.53±0.04	42.26±1.03	39.76±2.02
边缘绿洲 Marginal oasis	10~20	82.18±2.08	14.52±1.91	3.29±0.31	砂土	1.57±0.03	40.76±0.77	39.11±1.15
	20~30	81.20±3.02	15.39±2.81	3.41±0.27	砂土	1.56±0.03	41.13±0.76	38.05±2.18

注: 数据为平均值 ± 标准差。Note: Data are mean ± standard deviation.

2.2 绿洲农田土壤大孔隙特征

由图 2 可知, 三种绿洲农田的土壤大孔隙大多集中于农田的耕作层 (0~20 cm)。老绿洲农田的孔

隙发育好, 土壤大孔隙结构复杂, 土壤孔隙的连续性较好; 老绿洲农田土壤的大孔隙度明显高于边缘绿洲农田和山前绿洲农田, 且在 20 cm 土层以下,

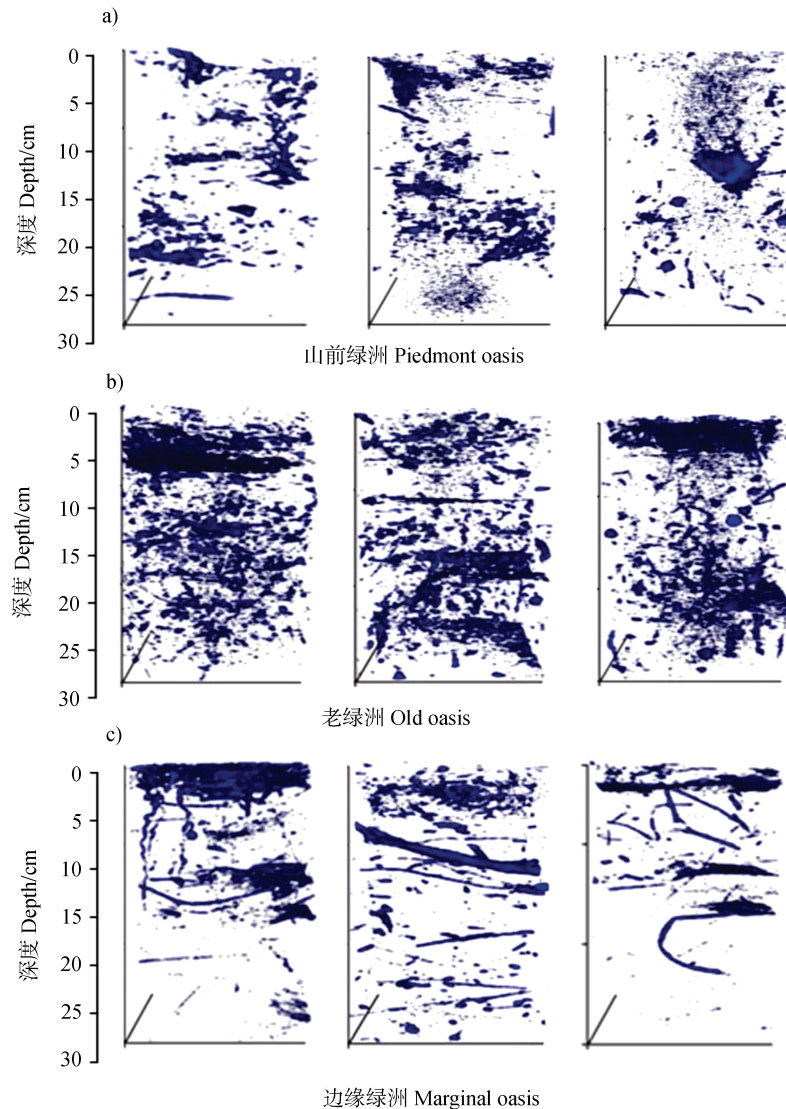


图2 绿洲农田土壤三维孔隙结构图

Fig. 2 Three-dimensional visualization of soil macropore networks in different oasis croplands

仍有一定数量的大孔隙分布。边缘绿洲农田大孔隙相对较少，且其连通性低，在10~20 cm土层中，有少量的连续性孔隙分布，可能是由腐烂的作物根系形成的。不同类型的绿洲农田土壤大孔隙结构呈现明显的异质性特征。

经过Image-J软件处理计算得到不同绿洲农田土壤大孔隙特征参数(表2)，土壤大孔隙度表现为：老绿洲农田(0.54%)>山前绿洲农田(0.22%)>边缘绿洲农田(0.14%)。老绿洲农田的大孔隙度、大孔隙数、分形维数、分支密度、连接点密度、连通性密度和山前绿洲农田、边缘绿洲农田之间存在显著性差异($P<0.05$)。土壤大孔隙分形维数与土壤结构密切相关，老绿洲农田的分形维数特征值显著高于其他两

种农田($P<0.05$)。山前绿洲、老绿洲、边缘绿洲的土壤大孔隙平均直径分别为3.27 mm、3.14 mm、3.58 mm，不同绿洲农田的平均土壤大孔隙体积、平均孔隙直径差异不显著($P>0.05$)。较低的分支密度、连接点密度和连通性密度意味着土壤大孔隙连通性较差，而老绿洲农田的分支密度、连接点密度以及连通性指数最大，因此其大孔隙连通性最好。

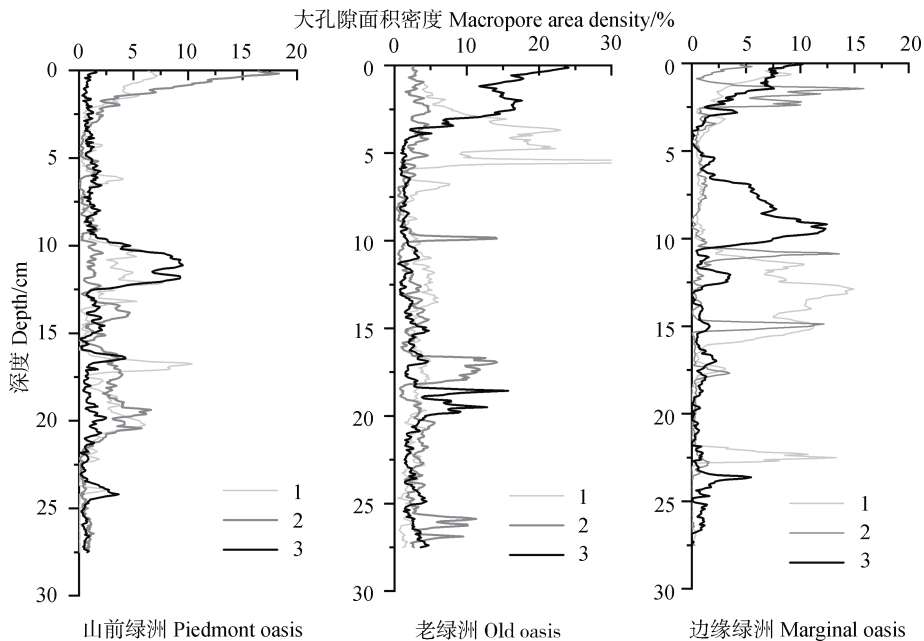
如图3所示，三种绿洲农田的大孔隙面积密度均表现出随土壤深度增加而波动性减小，并在不同深度处存在峰值现象。边缘绿洲的大孔隙面积密度在10~15 cm土层深度处呈现波动性峰值，可能是由于该层次土壤中存在较大裂缝引起的。山前绿洲农田和边缘绿洲农田20 cm土层以下的大孔隙面积密度较

表 2 土壤大孔隙特征参数

Table 2 Macropore characteristics of all soil columns in different oasis croplands

大孔隙数	大孔隙度	平均孔隙体积	分形维数	分支密度	连接点密度	平均孔隙直径	连通性密度	
Number of large pores	Large porosity /%	Mean pore volume /mm ³	Fractal dimension	Branch density / (cm·cm ⁻³)	Junction density / (个·cm ⁻³)	Mean pore diameter /mm	Connectivity density	
山前绿洲 ^① -1	388	0.14	14.73	1.74	0.33	0.18	3.97	0.01
山前绿洲 ^① -2	1 411	0.31	8.56	2.06	1.2	0.69	3.00	0.01
山前绿洲 ^① -3	1 611	0.21	5.01	2.03	1.19	0.6	2.83	0.01
山前绿洲 ^①	1 153 b	0.22 b	9.43 a	1.94 b	0.91 b	0.49 b	3.27 a	0.01 b
老绿洲 ^② -1	2 224	0.61	10.79	2.32	1.98	0.81	3.22	0.14
老绿洲 ^② -2	1 766	0.53	11.83	2.19	1.48	0.81	3.29	0.07
老绿洲 ^② -3	2 836	0.49	6.86	2.3	2.58	1.4	2.91	0.11
老绿洲 ^②	2 275 a	0.54 a	9.83 a	2.27 a	2.01 a	1.01 a	3.14 a	0.11 a
边缘绿洲 ^③ -1	365	0.14	15.31	1.82	0.39	0.19	3.69	0.01
边缘绿洲 ^③ -2	310	0.09	11.92	1.73	0.23	0.14	3.49	0.01
边缘绿洲 ^③ -3	578	0.18	12.6	1.83	0.55	0.26	3.57	0.01
边缘绿洲 ^③	417 b	0.14 b	13.27 a	1.79 b	0.39 b	0.20 b	3.58 a	0.01 b

①Piedmont oasis, ②Old oasis, ③Marginal oasis 注：数据为平均值 ± 标准差；不同字母表示差异达 0.05 显著水平。Note: Data are mean ± standard deviation; Different letters showed a significant difference of 0.05.



注：数字 1, 2, 3 代表三个重复。下同。Note: No. 1, 2, 3 represents three repetitions. The same as below.

图 3 土壤大孔隙面积密度随深度变化

Fig. 3 Distribution of macropore area density along the soil core column depth in different oasis croplands

小, 而老绿洲农田的大孔隙面积密度与上层差异较小, 表明在 20 cm 土层下依旧存在着一定数量的大孔隙。老绿洲农田与边缘绿洲农田、山前绿洲农田的平均大孔隙面积密度存在显著性差异 ($P < 0.05$)。

2.3 绿洲农田土壤水分入渗特征

在土壤水分入渗过程中, 通常用初始入渗速率、

稳定入渗速率、累计入渗量等指标来衡量土壤的入渗性能。由图 4 可知, 在土壤水分入渗过程中, 边缘绿洲的累计入渗量大于老绿洲和山前绿洲, 山前绿洲、老绿洲、边缘绿洲 90 min 累计入渗量分别为 26.2 mm、33.9 mm、58.3 mm, 表明山前绿洲农田的入渗速率最慢, 入渗性能低于其他两种农田。

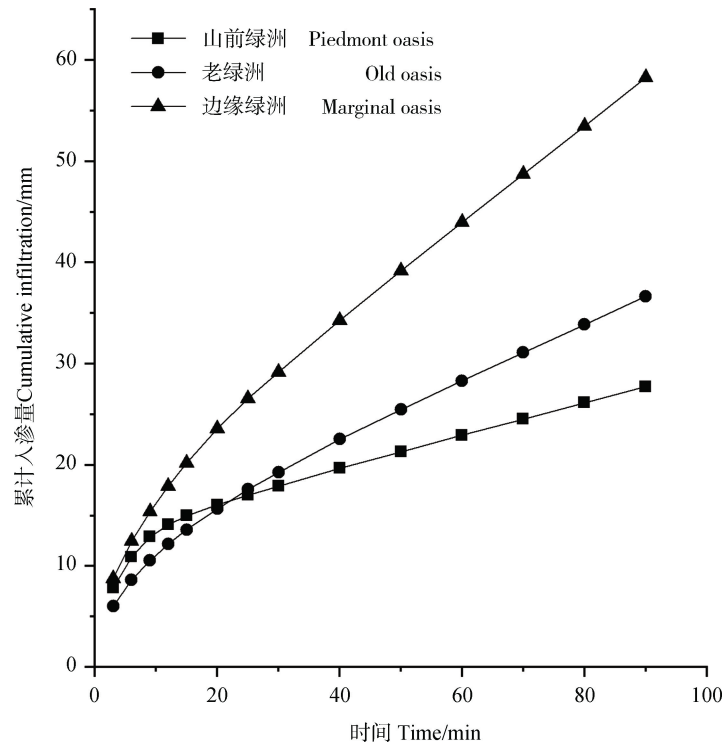


图 4 绿洲农田累计入渗量随时间变化曲线

Fig. 4 Cumulative infiltration in different oasis croplands

三种绿洲农田的入渗指标存在差异 (图 5), 稳定入渗速率表现为边缘绿洲农田 ($0.48 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) > 老绿洲农田 ($0.28 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) > 山前绿洲农田 ($0.16 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$), 有显著性差异 ($P < 0.05$)。初始入渗速率表现为边缘绿洲农田 ($3.02 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) > 山前绿洲农田 ($2.47 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) > 老绿洲农田 ($1.99 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$), 边缘绿洲和山前绿洲的初始入渗速率显著大于老绿洲农田 ($P < 0.05$)。边缘绿洲农田的入渗能力较高, 其稳定入渗速率为老绿洲的 1.71 倍、山前绿洲的 3 倍, 这主要是由于土壤机械组成决定的 (表 1)。

2.4 绿洲农田土壤水分运动的染色特征

如图 6 所示, 三种绿洲农田的土壤染色特征存在差异, 边缘绿洲农田的入渗以基质流为主, 基质流入渗深度占其总入渗深度比例高, 达到 79%, 入

渗深度浅; 而老绿洲最大入渗深度大, 土壤水分分布的空间异质性强, 优先流现象明显。由图 7 可知, 三种农田的染色面积比随土层深度的增加而波动下降, 总染色面积比为: 老绿洲农田 (56%) 显著大于边缘绿洲和山前绿洲 ($P < 0.05$)。最大入渗深度为: 老绿洲 (33 cm) > 山前绿洲 (21.8 cm) > 边缘绿洲 (18.4 cm)。老绿洲、山前绿洲、边缘绿洲的优先流长度指数分别为 310、200、174, 优先流长度指数越大表示其土壤水分运动的优先流现象明显。老绿洲农田的优先流长度指数和最大入渗深度大于山前绿洲和边缘绿洲, 土壤水分运动以大孔隙流为主。

2.5 入渗特征的影响因素

由表 3 可知, 干旱区绿洲农田稳定入渗速率与砂粒含量呈显著正相关 ($P < 0.01$), 砂粒含量越高, 其稳定入渗速率越大, 与黏粒、粉粒含量呈显著负

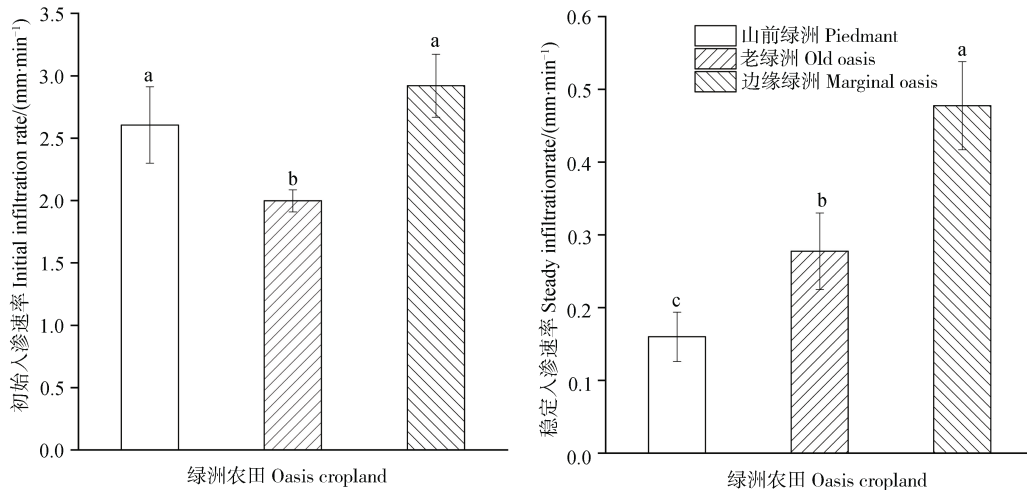


图 5 绿洲农田土壤水分入渗速率差异

Fig. 5 Difference of water infiltration rates in different oasis croplands

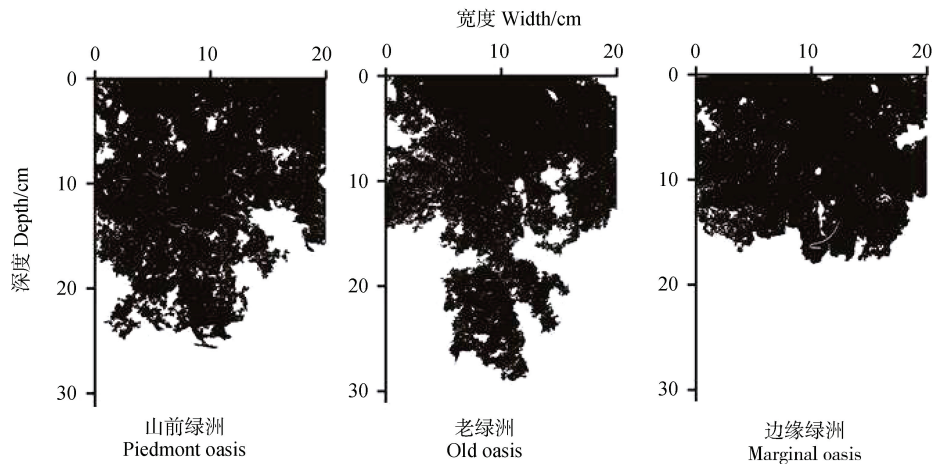


图 6 绿洲农田土壤水分入渗染色图

Fig. 6 Binarization image of soil water infiltration in different oasis croplands

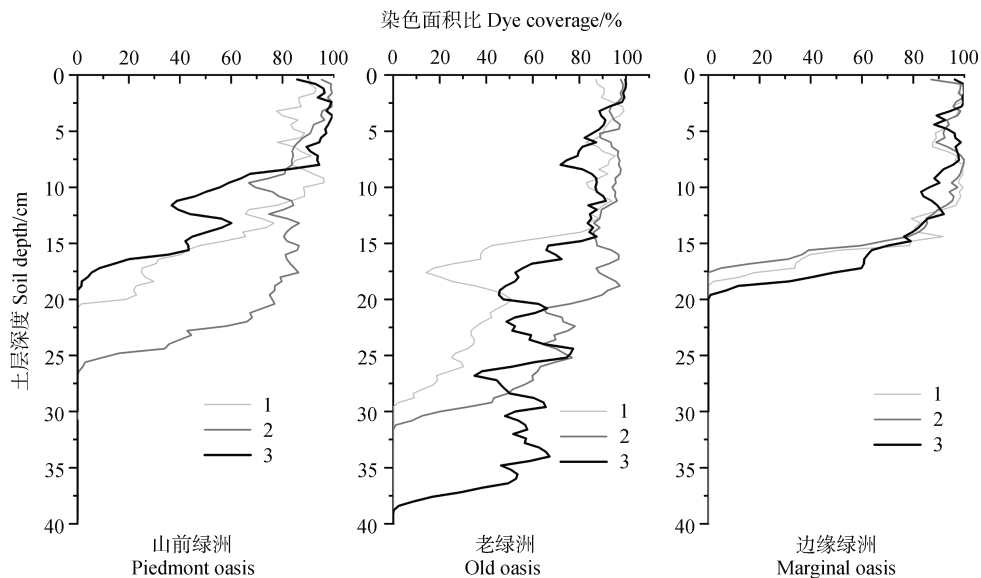


图 7 绿洲农田土壤染色面积比随土层深度的变化

Fig. 7 Change in soil dye area ratio in different oasis croplands

表 3 入渗特征参数与土壤结构的相关性

Table 3 Correlation analysis between infiltration characteristics and soil structure properties

	大孔隙度	分形维数	连接点密度	分支密度	连通性密度	大孔隙数	砂粒	粉粒	黏粒
	Large porosity	Fractal dimension	Junction density	Branch density	Connectivity density	Number of large pores	Sand	Silt	Clay
最大入渗深度 ^①	0.963**	0.884**	0.897**	0.542	0.900**	0.869**	-0.037	0.054	0.047
优先流长度指数 ^②	0.831**	0.732**	0.872**	0.442	0.910**	0.818**	-0.056	0.068	0.01
稳定入渗速率 ^③	-0.248	-0.328	-0.097	0.479	-0.040	-0.347	0.881**	-0.889**	-0.83**

①Maximum infiltration depth, ②The length index, ③Steady infiltration rate ** $P < 0.01$

相关 ($P < 0.01$)。最大入渗深度、优先流长度指数与土壤大孔隙度、分形维数、连接点密度、连通性密度呈显著正相关 ($P < 0.01$)，土壤大孔隙度越高，且连通性越好，其土壤水分运动的优先流现象越明显。

3 讨论

干旱区绿洲农田受到灌溉的干湿交替、作物根系和动物活动等因素的影响，绿洲农田的土壤大孔隙特征存在着异质性^[23]。绿洲农田的土壤大孔隙大多集中于 0~20 cm 耕作层，这与 Zhang 等^[25]对红壤区水稻田研究结果一致，在 20 cm 以下为犁底层，受耕作影响小，土壤容重较大，土壤的大孔隙度低。老绿洲的土壤大孔隙结构特征较边缘绿洲、山前绿洲复杂，且土壤大孔隙度、分形维数、连接点密度显著高于边缘绿洲和山前绿洲。农事活动耕作对土壤大孔隙结构发育有一定的影响，蔡太义等^[27]利用 CT 技术对煤矿区不同复垦年限的土壤孔隙结构的研究表明，随着复垦年限的延长，土壤大孔隙度、孔隙数量总体呈现逐渐增加的趋势。老绿洲农田由于开垦时间长，在灌溉、人为耕作和施肥等因素的影响下^[24]，其黏粉粒含量要高于边缘绿洲农田，土壤质量较高，土壤孔隙发育良好，其孔隙结构也更加复杂。边缘绿洲农田开垦时间较短，砂粒含量大于 80%，容重较大，土壤有机质含量低，发育程度较差，土壤大孔隙结构相对简单。山前绿洲农田由于其耕作层土壤主要是洪水冲积物，黏粉粒含量较高，达到 75%，容重较大，但开垦时间短，约 10 年，其孔隙发育较差，大孔隙度与边缘绿洲农田差异不显著。绿洲农田土壤大孔隙结构发育与土壤质地、农事耕作活动密切相关，绿洲化过程改变了土

壤的理化性质和水力传导度，土壤大孔隙度增加、孔隙结构逐步形成^[3, 11]。

土壤质地是影响土壤水分入渗过程的重要因素^[28]，解文艳和樊贵盛^[29]对潇河灌区农田入渗能力的研究表明，土壤质地对土壤入渗能力的影响显著。边缘绿洲农田土壤质地为砂土，老绿洲农田为壤砂土，山前绿洲农田为粉黏壤土（表 1），在整个入渗过程中，边缘绿洲农田的入渗能力最强。由稳定入渗速率和累计入渗量结果表明，边缘绿洲农田显著大于老绿洲、山前绿洲，主要是因为其砂粒含量较高。本研究与谭丽丽^[30]的研究结果一致，其通过对滨州农田入渗的研究结果表明，土壤的稳定渗速率、累积入渗量与黏粒含量呈显著负相关；吕刚等^[31]在辽西北风沙地的研究也表明稳定入渗率与土壤中粉粒含量呈负相关。同时，土壤水分入渗的性能与孔隙度、容重表现出很强的相关性^[4]，魏恒等^[32]对塔里木河上游绿洲不同植被类型土壤水分入渗的研究表明，土地利用类型对入渗的影响较大。在干旱区绿洲农田，土壤稳定入渗速率主要受土壤地质的影响。

土壤大孔隙是形成土壤优先流的主要原因之一^[24]，王发等^[33]研究表明耕作方式改变了土壤结构，形成了不同特征的土壤大孔隙，进而影响着土壤优先流运动特征。边缘绿洲和山前绿洲的土壤大孔隙度低，大孔隙连通性差，入渗以基质流为主，平均最大入渗深度在 20 cm 左右，优先流长度指数较低，大孔隙流现象不明显。而老绿洲农田的大孔隙度、分形维数、分支密度、连接点密度等大孔隙特征参数优于边缘绿洲和山前绿洲，大孔隙连通性好，土壤大孔隙结构复杂；最大入渗深度和优先流长度指数显著大于山前绿洲和边缘绿洲，大孔隙特征参数与优先流程度表现出很强的相关性，更易产

生大孔隙流现象。郭会荣等^[34]通过溶质穿透实验表明,大孔隙度越高,优先流对溶质穿透曲线的贡献越大。土壤大孔隙为土壤水分的运动提供了优先流通道,使其能够绕过部分土壤基质向土壤深处运动,不同的土壤大孔隙结构特征影响着绿洲农田的水分入渗过程。干旱区绿洲农田受到农事活动措施(开垦年限、耕作和灌溉等)及自然因素(土壤母质、干湿冻融交替等)的综合作用^[35],改变了土壤理化性质、水力传导度及其土壤结构的演变过程,形成了不同土壤类型的绿洲农田,土壤大孔隙度增加、孔隙结构形成,影响着绿洲农田土壤水分入渗的途径和过程。

4 结 论

干旱区绿洲农田的土壤大孔隙特征及土壤水分入渗特征存在差异。老绿洲农田大孔隙度、大孔隙数、分形维数、连接点密度、连通性密度显著大于山前绿洲、边缘绿洲($P<0.05$)。三种绿洲农田的稳定入渗速率存在着显著性差异($P<0.05$),稳定入渗速率和累计入渗量表现为:边缘绿洲农田>老绿洲农田>山前绿洲农田。老绿洲农田的优先流长度指数和最大入渗深度大于山前绿洲和边缘绿洲,其土壤水分运动优先流现象明显。绿洲农田的土壤水分入渗特征与土壤质地、土壤大孔隙特征有较强的相关性,土壤质地对稳定入渗率影响较大,而大孔隙在土壤水分运移过程发挥着重要作用。绿洲化过程改变了土壤的理化性质和入渗特性,老绿洲土壤大孔隙度增加、孔隙结构形成,孔隙连通性好,更易产生优先流,土壤水分运动的空间异质性程度高。

参考文献 (References)

- [1] Gong J, Qian D W, Zhang L L, et al. Spatiotemporal change of oasis/desert land and its landscape response in Linze County in recent 35 years[J]. *Arid Zone Research*, 2016, 33 (4): 805—813. [巩杰, 钱大文, 张玲玲, 等. 近 35 a 临泽县绿洲-荒漠土地变化及其景观响应[J]. 干旱区研究, 2016, 33 (4): 805—813.]
- [2] Su Y Z, Zhang Z H, Yang R. Amount of irrigation and nitrogen application for maize grown on sandy farmland in the marginal oasis in the middle of Heihe river basin[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33 (12): 2007—2015. [苏永中, 张智慧, 杨荣. 黑河中游边缘绿洲沙地农田玉米水氮用量配合试验[J]. 作物学报, 2007, 33 (12): 2007—2015.]
- [3] Zhang Y Y, Fu L, Zhao W Z, et al. A review of researches on preferential flow in desert-oasis region[J]. *Journal of Desert Research*, 2017, 37 (6): 1189—1195. [张勇勇, 富利, 赵文智, 等. 荒漠绿洲土壤优先流研究进展[J]. 中国沙漠, 2017, 37 (6): 1189—1195.]
- [4] Hu K L, Li B G, Chen D, et al. Simulation of nitrate leaching under irrigated maize on sandy soil in desert oasis in Inner Mongolia, China[J]. *Agricultural Water Management*, 2008, 95 (10): 1180—1188.
- [5] Yan J L, Zhao W Z, Zhang Y Y. Characteristics of the preferential flow and its response to irrigation amount in oasis cropland[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26 (5): 1454—1460. [闫加亮, 赵文智, 张勇勇. 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.]
- [6] Zhu Z C, Liu B, Liu C, et al. Characteristics of preferential flow and water infiltration in desert oasis wetland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40 (12): 1—12. [朱钊岑, 刘冰, 刘婵, 司瑞. 荒漠绿洲湿地土壤优先流与水分入渗特征研究[J]. 生态学报, 2020, 40 (12): 1—12.]
- [7] Wu J Q, Zhang J F, Gao R. 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. [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.]
- [8] Cheng Y N, Liu J L, Zhang J B. Advance in the study on quantification of soil pore structure[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43 (4): 988—994. [程亚南, 刘建立, 张佳宝. 土壤孔隙结构量化研究进展[J]. 土壤通报, 2012, 43 (4): 988—994.]
- [9] Ma M M, Lin Q, Xu S H. Water infiltration characteristics of layered soil under influences of different factors and estimation of hydraulic parameters[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57 (2): 347—358. [马蒙蒙, 林青, 徐绍辉. 不同因素影响下层状土壤水分入渗特征及水力学参数估计[J]. 土壤学报, 2020, 57 (2): 347—358.]
- [10] Sadeghi M, Tuller M, Warrick A W, et al. An analytical model for estimation of land surface net water flux from near-surface soil moisture observations[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 570: 26—37.
- [11] Zhang Y Y, Zhao W Z, Fu L. Soil macropore characteristics following conversion of native desert soils to irrigated croplands in a desert-oasis ecotone, Northwest China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2017, 168: 176—186.
- [12] Li T C. Characteristics of soil macropores in the loess plateau and their effects on soil moisture[D]. Yangling, Shannxi: Northwest A & F University, 2017. [李同川. 黄土高原土壤大孔隙特征及其对土壤水分的影响[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2017.]

- [13] 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.
- [14] Ruan X Z, Cheng J H, Zhang H J, et al. Soil macropore characteristics of different woodland and their influencing factors on Simianshan mountain in Chongqing[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29 (3): 68—74, 80. [阮芯竹, 程金花, 张洪江, 等. 重庆四面山不同林地土壤大孔隙特征及其影响因素[J]. *水土保持学报*, 2015, 29 (3): 68—74, 80.]
- [15] 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.
- [16] Li S L, Yi J, Liu M X, et al. Characteristics of preferential flow in the intermediate zone between paddy field and ridge [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(5): 1131—1142. [李胜龙, 易军, 刘目兴, 等. 稻田—田埂过渡区土壤优先流特征研究[J]. *土壤学报*, 2018, 55 (5): 1131—1142.]
- [17] Meng C. Problems and prospects of research on soil macropores[J]. *Modern Horticulture*, 2019(11): 13—14. [孟晨. 土壤大孔隙研究的问题及展望[J]. *现代园艺*, 2019 (11): 13—14.]
- [18] Hu X, Li Z C, Li X Y, et al. Soil macropore structure characterized by X-ray computed tomography under different land uses in the Qinghai Lake Watershed, Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Pedosphere*, 2018, 28 (3): 478—487.
- [19] Wang J M, Guo L L, Bai Z K, et al. Effects of land reclamation time on soil pore number and porosity based on computed tomography (CT) images in opencast coal mine dump[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(12): 229—236. [王金满, 郭凌俐, 白中科, 等. 基于 CT 分析露天煤矿复垦年限对土壤有效孔隙数量和孔隙度的影响[J]. *农业工程学报*, 2016, 32 (12): 229—236.]
- [20] Luo L F, Lin H, Li S C. Quantification of 3-D soil macropore networks in different soil types and land uses using computed tomography[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 393 (1/2): 53—64.
- [21] Gan L, Zhang J J, Huang T Q, et al. Pore structure in sugarcane soil under different tillage managements based on CT scanning[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2017, 30 (8): 1843—1848. [甘磊, 张静举, 黄太庆, 等. 基于 CT 技术的甘蔗地不同耕作措施下土壤孔隙结构研究[J]. *西南农业学报*, 2017, 30 (8): 1843—1848.]
- [22] Zhou H, Li W Z, Zhang Z B, et al. Characterization of multi-scale soil structure with X-ray computed tomography[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50 (6): 1226—1230. [周虎, 李文昭, 张中彬, 等. 利用 X 射线 CT 研究多尺度土壤结构[J]. *土壤学报*, 2013, 50 (6): 1226—1230.]
- [23] Zhang Y Y, Zhao W Z, He J H, et al. Soil susceptibility to macropore flow across a desert-oasis ecotone of the Hexi Corridor, Northwest China[J]. *Water Resources Research*, 2018, 54 (2): 1281—1294.
- [24] Bargaúes Tobella A, 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.
- [25] Zhang Z B, Peng X H, Zhou H, et al. Characterizing preferential flow in cracked paddy soils using computed tomography and breakthrough curve[J]. *Soil & Tillage Research*, 2015, 146: 53—65.
- [26] Han Q L, Zhao Y, Zhao Y D, et al. Skeleton extracting algorithm for soil pore based on thinning method[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50 (9): 229—234. [韩巧玲, 赵玥, 赵燕东, 等. 基于细化法的土壤孔隙骨架提取算法研究[J]. *农业机械学报*, 2019, 50 (9): 229—234.]
- [27] Cai T Y, Huang H J, Bai Y H, et al. Using X-ray CT scanning to quantify the microstructural characteristics of soil pore in mining areas along a reclamation time[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43 (11): 3196—3203. [蔡太义, 黄会娟, 白玉红, 等. 基于显微 CT 研究不同复垦年限土壤孔隙的微结构特征[J]. *煤炭学报*, 2018, 43 (11): 3196—3203.]
- [28] Zhang Y Q, Liang T, Zhang D G, et al. Variation of soil water infiltration and the influence of aggregates in degraded alpine meadow in Eastern Qilian Mountains[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2020, 28 (2): 500—508. [张玉琪, 梁婷, 张德罡, 等. 祁连山东段退化高寒草甸土壤水分入渗的变化及团聚体对水分入渗的影响[J]. *草地学报*, 2020, 28 (2): 500—508.]
- [29] Xei W Y, Fan G S. Influence of soil structure on infiltration characteristics in field soils[J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2004, 35 (5): 537—540. [解文艳, 樊贵盛. 土壤质地对土壤入渗能力的影响[J]. *太原理工大学学报*, 2004, 35 (5): 537—540.]
- [30] Tan L L. Study on spatial variability of soil physical properties and water infiltration performance in Binzhou farmland[D]. Yantai, Shandong: Ludong University, 2016. [谭丽丽. 滨州农田土壤物理性质及水分入渗性能空间变异性研究[D]. 山东烟台: 鲁东大学, 2016.]
- [31] Lü G, Zhai J X, Li Y X, et al. Soil infiltration characteristics of different plant community in sandy land of northwestern Liaoning[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, 36 (4): 133—139. [吕刚, 翟景轩, 李叶鑫, 等. 辽西北风沙地不同植物群落土壤入渗特性[J]. *干旱地区农业研究*, 2018, 36 (4): 133—139.]

- [32] Wei H, Zhao C Y, Sun D Y. Infiltration properties of the typical land surface soil in the oasis of upper Tarim river[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, 32 (4): 837—843. [魏恒, 赵成义, 孙栋元. 塔里木河上游绿洲典型地表特征土壤水分入渗性能研究[J]. *冰川冻土*, 2010, 32 (4): 837—843.]
- [33] Wang F, Fu Z Y, Chen H S, et al. Characteristics of preferential flow in soil of abandoned farmland and cultivated land of karst depression[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30 (1): 111—116. [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.]
- [34] Guo H R, Jin M G, Wang Y. Quantitative evaluation of preferential flow based on laboratory breakthrough experiments of soil columns[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2009, 28 (6): 101—106. [郭会荣, 靳孟贵, 王云. 基于室内土柱穿透实验的优先流定量评价[J]. *地质科技情报*, 2009, 28 (6): 101—106.]
- [35] Su Y Z, Wang F, Zhang Z H, et al. Soil properties and soil aggregate characteristics in marginal farmlands of oasis in middle Hexi Corridor Region[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40 (4): 741—748. [苏永中, 王芳, 张智慧, 等. 河西走廊中段边缘绿洲农田土壤性状与团聚体特征[J]. *中国农业科学*, 2007, 40 (4): 741—748.]

(责任编辑：檀满枝)