

微咸水离子组成对膜下滴灌 土壤孔隙结构的影响

胡行路^{1,2,3}, 张体彬^{1,2,3}, 张通港⁴, 程煜⁴,
刘祯媛⁴, 梁青⁴, 冯浩^{1,2,3}

(1.中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心,陕西杨凌 712100; 2.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西杨凌 712100; 3.中国科学院大学,北京 100049; 4.西北农林科技大学水利与建筑工程学院,陕西杨凌 712100)

摘要:为探讨不同阳离子组成微咸水灌溉对膜下土壤孔隙结构的影响,开展 2a 田间定位试验,设置当地地下水灌溉(CK)、NaCl 微咸水灌溉(T1)、KCl 微咸水灌溉(T2)、CaCl₂ 微咸水灌溉(T3)、MgCl₂ 微咸水灌溉(T4)5 个处理,利用 CT 扫描技术研究不同阳离子组成微咸水对土壤孔隙结构的影响。结果表明:与 CK 处理相比,随灌溉次数增多,添加 Na⁺处理的土壤大孔隙度显著降低,添加 K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺处理的土壤大孔隙度显著增加,2022 年添加 Na⁺处理的大孔隙度平均降低了 44.49%,添加 K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺处理的土壤大孔隙度平均分别增加了 5.73%、80.73%、25.75%;在 2021—2022 年期间,与 CK 相比,4 种不同阳离子处理土壤孔隙成圆率均呈增加趋势,其中添加 Ca²⁺、Mg²⁺处理增加显著,土壤孔隙成圆率平均增加区间分别为 25.52%~30.94%、17.46%~23.19%;连续灌溉 2a 之后,添加 Na⁺和 K⁺处理的土壤开裂程度加重,土壤稳定性变差,而添加 Ca²⁺和 Mg²⁺对改善土壤结构、提高土壤入渗性能作用明显。

关键词:土壤孔隙结构;CT 扫描技术;微咸水灌溉;阳离子组成

中图分类号:S513; S156.44 文献标志码:A

Effects of brackish water cation compositions on soil pore structure under submembrane drip irrigation

HU Xinglu^{1,2,3}, ZHANG Tibin^{1,2,3}, ZHANG Tonggang⁴, CHENG Yu⁴,
LIU Zhenyuan⁴, LIANG Qing⁴, FENG Hao^{1,2,3}

(1. Research Center for Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Ministry of Education, Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Ministry of Water Resources, Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. College of Water Resources and Civil Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: To explore the effects of brackish water irrigation with different cation compositions on soil pore structure under mulch, a two-year field location experiment was conducted. The treatments included local ground water irrigation (CK), NaCl brackish water irrigation (T1), KCl brackish water irrigation (T2), CaCl₂ brackish water irrigation (T3) and MgCl₂ brackish water irrigation (T4). The effects of brackish water with different cation compositions on soil pore structure were studied by CT scanning technology. The results showed that: Compared with CK treatment, with the increase of irrigation times, the soil macroporosity of Na⁺ treatment was significantly decreased, and the soil macroporosity of K⁺, Ca²⁺ and Mg²⁺ treatments was significantly increased. In 2022, the soil macroporosity of Na⁺ treatment decreased by 44.49% on average, and the soil macroporosity of K⁺, Ca²⁺ and Mg²⁺ treatments increased by 5.73%, 80.73% and 25.75%, respectively. During 2021 and 2022, compared with

收稿日期:2023-10-28

修回日期:2023-12-28

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFD2001404);陕西省重点研发计划项目(重点产业创新链)(2023-ZDLNY-53);中国科学院“西部之光”人才培养计划项目(XAB2022YW04)

作者简介:胡行路(1995-),男,山东菏泽人,硕士研究生,研究方向为节水灌溉。E-mail: 1582150730@qq.com

通信作者:张体彬(1983-),男,山东菏泽人,副研究员,主要从事节水灌溉和水土资源高效利用研究。E-mail: zhangtibin@163.com

CK treatment, the soil pore rounding rate of the four different cation treatments showed an increasing trend, among which the soil pore rounding rate of Ca^{2+} and Mg^{2+} treatments increased significantly, and the average increase range of soil pore rounding rate was 25.52%~30.94% and 17.46%~23.19%, respectively. After continuous irrigation for two years, the soil cracking degree of Na^+ and K^+ treatments was aggravated, and the soil stability was becoming worse and worse, while the soil structure and infiltration performance of soil were improved obviously by adding Ca^{2+} and Mg^{2+} treatments.

Keywords: soil pore structure; CT scanning technology; brackish water irrigation; cation composition

河套灌区地下微咸水资源丰富,水质空间变异性较大,很多区域微咸水灌溉存在土壤结构恶化风险。土壤结构可以看作是固体和孔隙在不同尺度上的空间排列,影响着土壤中的诸多过程^[1]。土壤孔隙结构是土壤结构中的重要方面,主要包括土壤孔隙度、孔隙数目、孔径、孔隙分布、成圆率等形态和数量特征,以及孔隙的空间分布、连通性和孔隙之间相关性等空间分布特征^[2]。其中大孔隙是土壤中较大的空隙和通道,包括蚯蚓洞穴、根通道、土壤裂缝和内部聚集空隙,它们通常与土壤基质不同,可以使水分和养分优先流过土壤剖面^[3-6]。土壤孔隙结构问题的研究始终是土壤学科中的热点之一。研究表明大孔隙网络的形成极大改善了土壤中的透气性、根系发育及土壤内部养分循环^[7]。

目前 CT(计算机断层扫描)技术广泛应用于土壤科学研究领域,物理、化学和生物学特性的可视化和定量化描述^[8]。CT技术的快速性、非破坏性和可视化等诸多优势使得 CT 更适用于研究土壤的孔隙结构。诸多研究表明运用 CT 技术在分析土壤孔隙结构方面取得较大进展。张静举等^[9]利用 CT 扫描原状土柱,分析土壤孔隙数量、弯曲度和孔隙连通性等孔隙结构特征参数并进行土壤结构三维重建。房焕等^[10]利用 CT 扫描技术研究稻麦轮作区秸秆还田对水稻土容重、团聚体分布及稳定性、团聚体有机碳分布和孔隙大小分布的影响,结果表明稻麦轮作区全量秸秆还田能够降低土壤容重,增大土壤总孔隙度和大孔隙度,改善水稻土的物理结构。杨永辉等^[11]结合 CT 扫描技术研究不同土壤结构改良措施发现有机肥和免耕处理对提高土壤总孔隙数、大孔隙数、孔隙度和田间持水量效果最佳。同时 CT 扫描在生物量分布、根系结构和体积密度、有机质分布等研究方向上也有明显进展^[12-17]。

土壤中含有各种复杂离子,不同离子类型和浓度都会对土壤孔隙结构产生影响,推测是由于离子类型和浓度影响团聚体稳定性导致土壤孔隙结构发生变化^[18]。当 Na^+ 以可交换阳离子形式被土壤

颗粒吸附,同时可溶性盐从土壤中被浸出时,土壤呈钠质化,土壤结构由于黏土膨胀和分散而退化^[19]。交换性 K^+ 可引起与 Na^+ 相似的效应,可能导致土壤黏粒的膨胀和分散,但是研究发现 K^+ 对土壤颗粒的分散程度小于 Na^+ ^[20]。通常认为交换性 Ca^{2+} 有利于保持土壤结构的完整性,并且 Ca^{2+} 含量多的团聚体比 Mg^{2+} 含量多的团聚体更加稳定,即使 Na^+ 存在也是如此^[21]。有研究表明, Mg^{2+} 有稳定土壤结构、抑制土壤黏粒分散、减少土壤膨胀的效果,但过多的 Mg^{2+} 可导致土壤结构退化,与 Ca^{2+} 相比,土壤水力性质下降明显^[22-24]。

目前较多研究更多关注在不同耕作方式、土壤类型条件下土壤孔隙 2D/3D 特征参数变化情况及不同阳离子如何影响土壤入渗性能的研究,但是通过定位田间试验探讨不同阳离子组成微咸水灌溉对土壤孔隙结构影响的研究鲜有报道。鉴于此,于 2021—2022 年间针对河套灌区盐渍土农田开展田间试验,基于 CT 扫描技术对试验区 0~40 cm 土层土壤结构进行测定,研究不同阳离子组成微咸水灌溉对土壤孔隙结构的影响,为微咸水的安全利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区简介

田间试验于 2021—2022 年 4—9 月在内蒙古巴彦淖尔市临河曙光试验站(40°46'N,107°24'E,海拔 1 041 m)进行。试验区地处典型的温带大陆性干旱气候区,年平均降雨量约为 110 mm,年平均蒸发量为 2 300 mm,年均风速为 2.8~2.9 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。全年日照充足,时数为 3 190~3 260 h,年平均气温 7.9℃,昼夜温差大。试验区土壤属于黄河灌淤土,土壤剖面分层明显。试区农田表层 0~60 cm 土壤质地为黏壤土,60~80 cm 为砂土层,80~100 cm 为壤质砂土,其他土壤理化性质见表 1。

1.2 试验设置

为研究不同阳离子组成微咸水对土壤孔隙结

构的影响,以当地地下水为对照(CK),分别添加相同摩尔当量、不同类型氯化盐(分析纯),形成不同阳离子组成的微咸水处理(表 2)。各处理重复三个小区,每个小区面积为 60 m²(4 m×15 m)。供试玉

米为当地主栽品种‘金萃 628’,种植方式为“一膜一管双行”水肥一体化膜下滴灌。采用贴片式滴灌带,滴头间距 30 cm,流量 2.7 L·h⁻¹。小区种植 8 行玉米,玉米株距行距为 30 cm,地膜间距 70 cm。

表 1 试验区土壤理化性质

Table 1 Soil physicochemical properties before corn sowed in experimental area

深度 Depth/cm	土壤粒径 Particle size/%			土壤质地 Soil texture	容重 Bulk density /(g·cm ⁻³)	饱和浸提液电导率 EC _e /(dS·m ⁻¹)	pH
	黏粒 Clay	粉粒 Silt	沙粒 Sand				
0~20	23.5	44.7	31.8	黏壤土 Clay loam soil	1.42	1.30	8.42
20~40	21.4	49.1	29.5	黏壤土 Clay loam soil	1.44	1.10	8.63
40~60	24.8	46.5	28.7	黏壤土 Clay loam soil	1.42	1.18	8.54
60~80	4.3	4.9	90.8	砂土 Sand soil	1.52	1.36	8.50
80~100	7.7	9.7	82.6	砂壤土 Sandy loam soil	1.49	1.83	8.54

表 2 微咸水处理设置表

Table 2 Treatment table of slightly saline water

编号 No.	处理 Treatment	阳离子组成/(mmol·L ⁻¹)				EC /(dS·m ⁻¹)
		Cation compositions				
		Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	
CK	地下水 GW	10.3	0.2	4.0	7.4	1.6
T1	GW+20 mmol·L ⁻¹ NaCl	30.3	0.2	4.0	7.4	3.7
T2	GW+20 mmol·L ⁻¹ KCl	10.3	20.2	4.0	7.4	4.0
T3	GW+20 mmol·L ⁻¹ CaCl ₂	10.3	0.2	24.0	7.4	3.4
T4	GW+20 mmol·L ⁻¹ MgCl ₂	10.3	0.2	4.0	27.4	4.1

1.3 灌溉和施肥

播种之前翻耕均匀施入基肥(尿素 N:46%,磷酸二铵 N:18%、P₂O₅:42%),N、P 施用量分别为 150、180 kg·hm⁻²[25]。玉米生育期内追施同种肥料,保证全生育期内累积纯 N 施入量为 300 kg·hm⁻²。其他田间保护管理与周边农田一致。

基于前期研究成果,将土壤基质势下限控制在 -30 kPa,每天 9:00 和 15:00 对埋设在滴头正下方 20 cm 深度处的真空负压计进行读数,一旦达到阈值,立即进行灌溉。考虑地下水 EC(1.8 dS·m⁻¹)接近玉米耐盐阈值(1.7 dS·m⁻¹),所以 CK 处理未设置淋洗率(LR),CK 处理单次灌水定额为 10 mm,T1~T4 处理则考虑盐分淋洗,灌溉水 EC 大致在 3.8 dS·m⁻¹左右,LR 约为 19%,计算得单次灌水定额为 12.3 mm。2021 年生育期内 CK 和 T1~T4 处理总灌水量分别为 330 mm 和 406 mm;2022 年生育期内 CK 和 T1~T4 处理总灌水量分别为 340 mm 和 418 mm。

1.4 样品采集与处理

原状土壤样品分别于 2021 年 9 月 10 日和 2022 年 9 月 15 日在作物收获后采集,采集位置为滴头正下方,采集深度为 0~20 cm 和 20~40 cm。具体操作是在每个处理的滴灌带滴头正下方使用 PVC 管(外径 75 mm,内径 64 mm)采集。敲击时 PVC 管上端铺垫木板防止敲击破坏土样,直至完全嵌入土体。取出的土壤样品两端垫入足量保鲜膜以防止运输途中土体流失破坏,然后样品整体包裹足量保鲜膜密封,保证样品完整性及保水性。

1.5 图像处理

采用 uMI 780 PET/CT 扫描设备对土柱样品进行断层扫描,扫描峰值电压设定为 120 kV,电流设定为 103 mA。单位体素大小为 0.68 mm×0.68 mm×0.5 mm,单个切片扫描厚度为 0.5 mm,每个土柱扫描 440 幅断面切片。

首先将采集到的图像进行预处理,去除上下 20 层扰动较大切片,利用 Fiji-win64 软件进行灰度图像处理、孔隙参数提取和三维重建。首先将扫描的 DCM 格式文件导入 Fiji-win64,将其转化为 8-bit 灰度图像,之后进行图像分割。为避免边界部分影响,截取图像区域大小为 40.33 mm×40.33 mm,使用 Duplicates 功能对截取区域进行复制,最后调整图像分割阈值来区分土壤基质和孔隙。

关于土壤大孔隙的讨论很多[26-29],根据 Wang 等[30]和 Luxmoore[31]对孔隙度划分方法进行划分,孔隙面积>0.8 mm²、孔隙当量直径>1 mm 孔隙划分为大孔隙。

1.6 数据分析方法

使用 Fiji-win64 和 ImageJ 对 CT 图像进行数据提取,利用 Microsoft Excel 2019 进行数据整理分析,

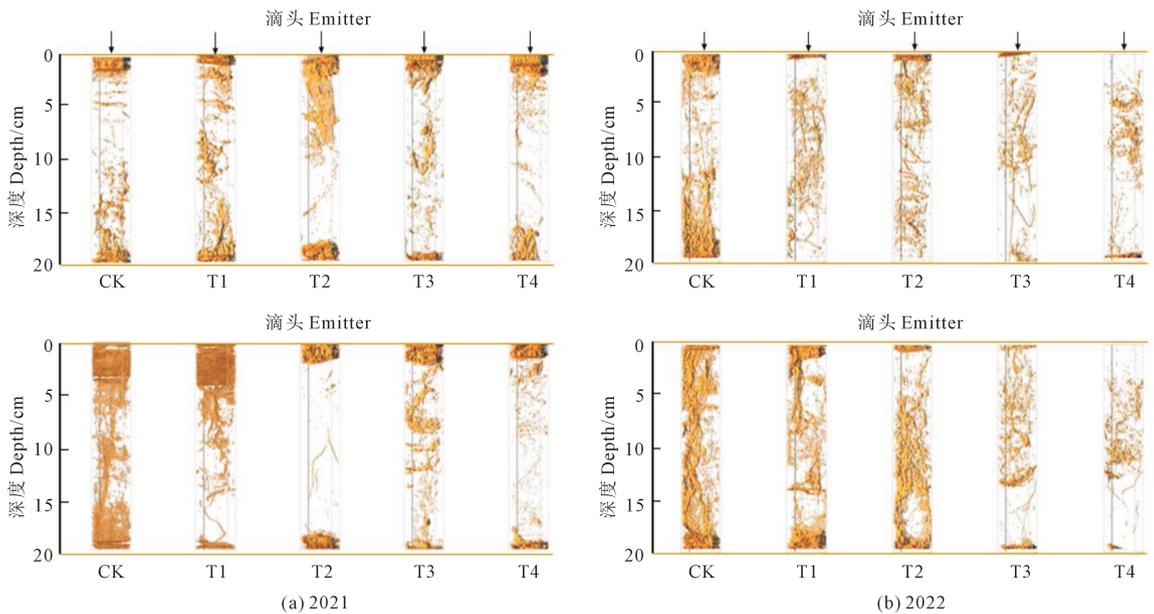
采用 IBM SPSS Statistics 24 统计分析软件对试验数据进行方差和相关性分析, Origin 2021b 软件进行绘图。

2 结果分析

2.1 土壤的三维可视化结构

由于土壤样品在运输过程中无法避免因晃动引起的土柱上下两端土体开裂, 因此本研究只讨论中间土柱完整部分。由图 1 可以看出, 2a 时间内 CK 处理土体开裂效果加重, 且产生大量的超大孔

隙。与 CK 处理相比, 2021 年和 2022 年 T1~T4 处理的土壤开裂程度均小于 CK 处理, 说明添加适量的阳离子灌水一定程度上抑制了土壤颗粒分散, 促进土壤粘结, 对稳定土壤结构、防止土体开裂有改善作用。2022 年 T1 和 T2 处理土壤开裂程度较 2021 年有所提升。随着年数增长, T1 处理土壤稳定性变差, 2021 年 T2 处理稳定性较好, 2022 年土体开裂程度加重。T3 和 T4 处理差异不明显, T4 处理土壤结构有微小分散效果, T3 处理对土壤结构稳定性最好。



注: CK: 地下水灌溉; T1: 添加 Na^+ ; T2: 添加 K^+ ; T3: 添加 Ca^{2+} ; T4: 添加 Mg^{2+} 。下同。

Note: CK: Groundwater irrigation; T1: Add Na^+ ; T2: Add K^+ ; T3: Add Ca^{2+} ; T4: Add Mg^{2+} . The same below.

图 1 各处理 0~40 cm 土壤可视化结构图

Fig.1 Visual structure diagram of 0~40 cm soil for each treatment

2.2 孔隙度

土壤孔隙度的大小能够反映土壤的疏松程度及水分和空气容量的大小, 大孔隙越多说明土壤越疏松, 容纳空气和水的量越大, 越利于根系生长。从图 2 可以看出, 2021 年 0~20 cm 土层, 相较于 CK 处理, T1、T2、T3 和 T4 处理大孔隙分别提高了 114.27%、145.20%、1.96% 和 62.47%; 2022 年 0~20 cm 土层, 相较于 CK 处理, T1 处理大孔隙降低了 42.74%, T2、T3 和 T4 处理分别提高了 27.40%、144.15% 和 45.79%。2021 年 20~40 cm 土层, 相较于 CK 处理, T1、T2、T3 和 T4 处理大孔隙分别降低 29.70%、38.18%、32.84% 和 61.11%; 2022 年 20~40 cm 土层, 相较于 CK 处理, T1 和 T2 处理大孔隙度降低 46.23% 和 15.95%, T3 和 T4 处理大孔隙度提高

17.30% 和 5.71%。

2.3 孔隙成圆率

成圆率是用来评价大孔隙形状复杂程度的指标。一般来说, 成圆率越大, 大孔隙形状接近圆形, 大孔隙状况越好; 反之则成圆率越小, 大孔隙形状不接近圆形, 其状况和稳定性越差。由图 3 可知, 2a 内各处理 0~40 cm 土层孔隙成圆率均呈波浪状分布。2022 年 T1 处理成圆率较 2021 年有所降低, 且低于 CK 处理, 2a 内 T3、T4 处理成圆率始终高于其他处理。2021 年 CK 和 T1~T4 处理成圆率区间分布分别为 0.67~0.73、0.71~0.79、0.74~0.83、0.84~0.92、0.80~0.86; 2022 年 CK 和 T1~T4 处理成圆率分布区间分别为 0.63~0.76、0.64~0.73、0.71~0.84、0.86~0.95、0.80~0.89。T1 处理 2a 内成圆率整体降

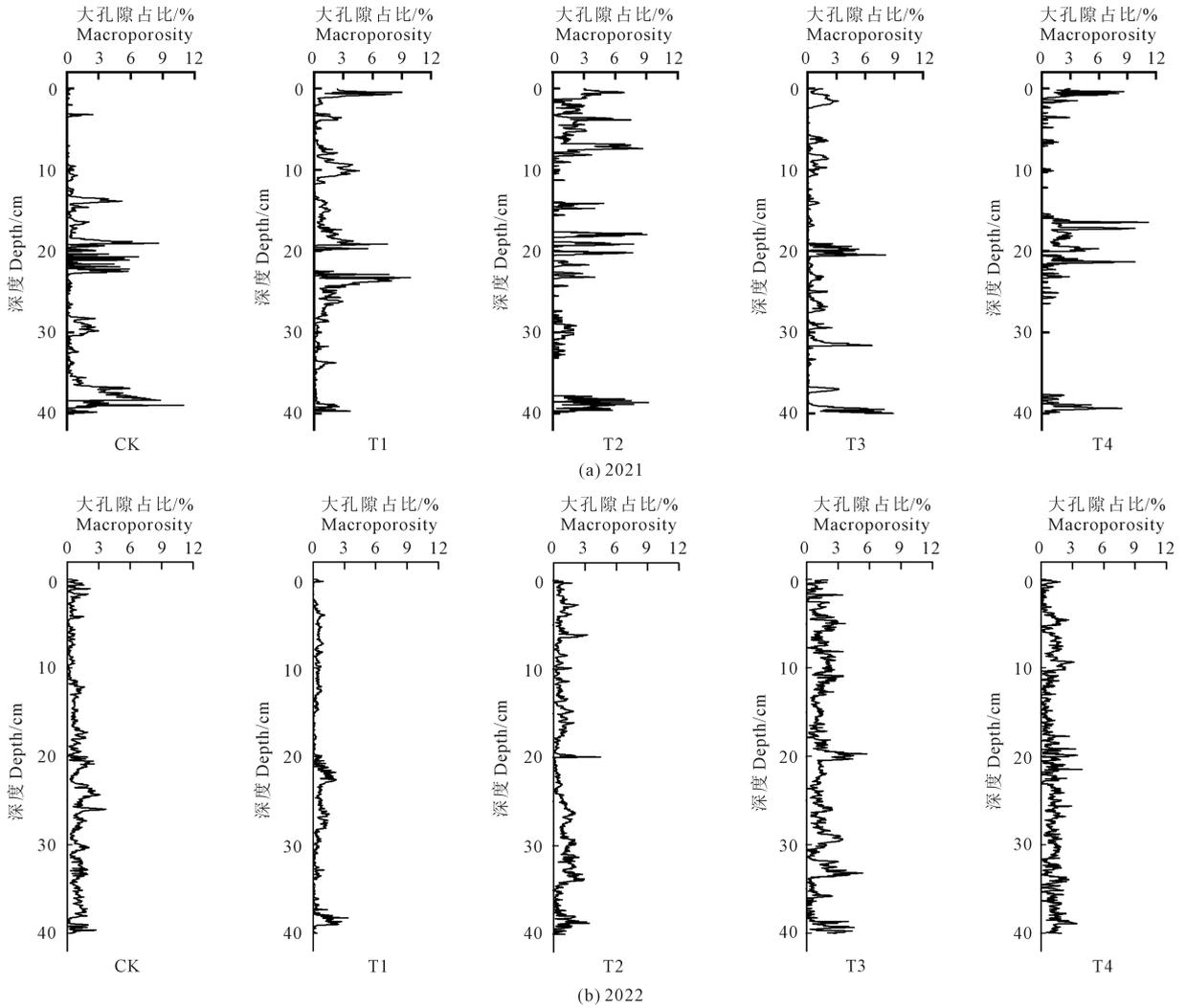


图 2 不同阳离子组成微咸水灌溉各处理 0~40 cm 土层大孔隙占比

Fig.2 Proportion of macropores in 0~40 cm soil layer treated by brackish water irrigation with different cations

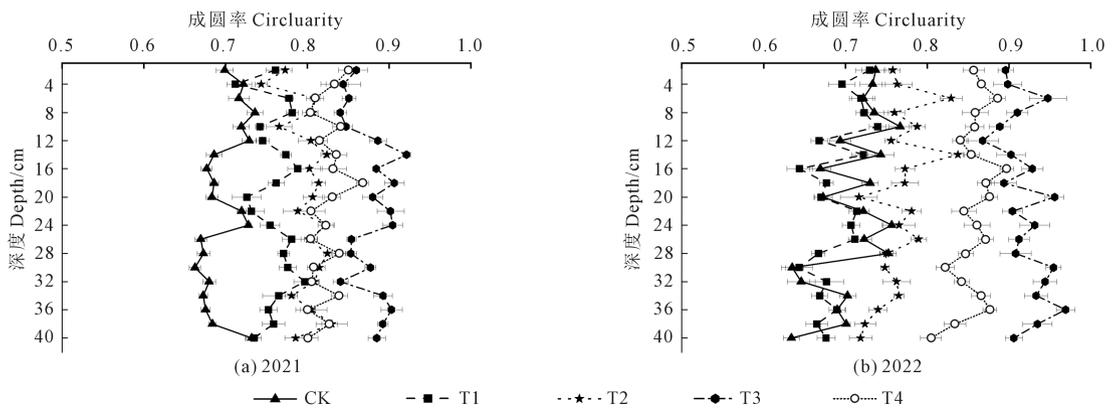


图 3 各处理 0~40 cm 土层成圆率

Fig.3 Rounding rate in 0~40 cm soil layer for each treatment

低,其他处理无明显变化,T3、T4 处理成圆率整体大于其他处理。2021 年 CK 和 T1~T4 处理成圆率变异系数分别为 3.98%、2.87%、2.67%、2.40%、2.25%;

2022 年 CK 和 T1~T4 处理成圆率变异系数分别为 5.50%、4.05%、3.96%、2.80%、2.48%。2a 内 0~40 cm 土层成圆率变异系数变化趋势均表现为 CK>T1

>T2>T3>T4。

2.4 分形维数

土壤由不规则颗粒组成,含有复杂的多孔介质,这些介质是各向异性的,具有自相似的结构^[32],其中分形维数是一个定量表征土壤各分形参数集不规则性和复杂性的特征参数,分形维数越大表明土壤孔隙结构越规则和稳定^[33]。利用 CT 图像对土壤大孔隙的结构特征进行分析,可以计算分形维数。通过数字图像分析方法求得的土壤孔隙分形维数,其准确性依赖于图像的分辨率。分辨率越高,得到的土壤孔隙分形维数越准确。由表 3 可知,在 0~20 cm 土层,与 CK 处理相比,2021 年 T1、T2、T4 处理差异不显著,T3 处理显著增大;2022 年 T2、T4 处理差异不显著,T3 处理显著增大,T1 处理显著降低。在 20~40 cm 土层,与 CK 处理相比,2021 年 T2、T3、T4 处理差异显著,且 T1 处理显著降低;2022

年 T1、T2、T3 处理差异显著,T4 处理差异不显著,同时 T3、T4 处理数值上高于 T1、T2 处理。

2.5 连通性

连通性数值越大,表明土壤孔隙状况越好。由表 4 可知,2a 内在 0~20 cm 土层,除 T1 处理外,各处理连通性均显著大于 CK 处理。CK 和 T1 处理连通性呈降低趋势,T2、T3 和 T4 处理呈上升趋势。在 20~40 cm 土层,与 CK 处理相比,2021 年 T1、T2 和 T4 处理差异显著,T2 处理差异不明显;2022 年 T1、T2 和 T3 处理差异显著,T4 处理差异不明显。

2.6 相关性分析

对土壤孔隙结构各指标进行相关性分析(表 5),结果表明各孔隙参数之间呈正相关关系。其中孔隙度与成圆率和连通性之间相关性不显著,与连通性呈显著正相关;成圆率、分维行数和连通性之间呈极显著正相关。

表 3 各处理 0~40 cm 土壤分形维数
Table 3 Fractal dimension of 0~40 cm soil for each treatment

年份 Year	深度 Depth/cm	处理 Treatment				
		CK	T1	T2	T3	T4
2021	0~20	2.31±0.072b	2.24±0.029b	2.37±0.054ab	2.49±0.043a	2.39±0.015ab
	20~40	2.54±0.053ab	2.30±0.017c	2.46±0.044b	2.66±0.050a	2.49±0.043ab
2022	0~20	2.33±0.057b	2.19±0.046c	2.35±0.071abc	2.55±0.063a	2.42±0.064ab
	20~40	2.41±0.043b	2.23±0.06c	2.32±0.037c	2.63±0.058a	2.55±0.058ab

注:图中不同小写字母表示该项指标在不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters in the figure indicate that the index is significantly different among treatments ($P<0.05$). The same below.

表 4 各处理 0~40 cm 土壤连通性
Table 4 Soil connectivity of 0~40 cm for each treatment

年份 Year	深度 Depth/cm	处理 Treatment				
		CK	T1	T2	T3	T4
2021	0~20	571±26.30c	261±7.05e	364±19.05d	1009±22.98a	576±70.1b
	20~40	729±11.59b	579±26.5c	762±11.34b	855±7.31a	564±11.53c
2022	0~20	429±13.44c	221±1.76e	369±10.06d	1624±19.37a	858±11.14b
	20~40	784±18.58b	342±6.17d	621±16.85c	1077±69.72a	855±17.34b

表 5 土壤孔隙结构各指标相关性分析

Table 5 Correlation analysis of various indicators of soil pore structure

指标 Index	孔隙度 Porosity	成圆率 Circularity	分形维数 Fractal dimension	连通性 Connectivity
孔隙度 Porosity	1			
成圆率 Circularity	0.34	1		
分形维数 Fractal dimension	0.41	0.72**	1	
连通性 Connectivity	0.45*	0.70**	0.76**	1

注 Note: * $P<0.05$; ** $P<0.01$.

3 讨论

3.1 不同阳离子对土壤大孔隙度的影响

土壤可交换阳离子是影响土壤团聚体稳定性的一个重要因素。在微咸水入渗过程中,土壤中可交换阳离子通过改变土壤颗粒间的相互作用促使土壤黏粒凝聚或者分散,进而改变土壤孔隙结构,影响土壤入渗过程^[34-35]。前人研究发现,不同阳离子对土壤结构参数的差异主要体现在阳离子引起的土壤结构变化,适宜浓度的微咸水不会使土壤发生盐碱化,有利于土壤结构稳定^[36]。本研究表明,

不同阳离子组成微咸水灌溉处理下土壤结构分散和开裂程度均小于当地地下水灌溉处理,并且大孔隙度有不同程度提升,这说明适宜浓度的微咸水灌溉在一定程度上抑制土壤结构恶化。但随着灌水次数增多,2022年0~20 cm土层,添加 Na^+ 处理大孔隙度低于CK处理;与2021年相比,2022年添加 K^+ 处理大孔隙度提高的百分比明显降低;添加 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 处理大孔隙度在2a中均有提升,且添加 Ca^{2+} 处理大孔隙度明显高于其他处理。这说明随着土体中盐离子越来越多,尤其是土壤中的阳离子越来越多,不同的阳离子对土壤结构的相互作用也随之改变。这是由于以 Na^+ 和 K^+ 为主的单价阳离子会不同程度导致土壤胶体颗粒分散和膨胀,土壤大孔隙容易被分散的粘土颗粒堵塞,整体上降低了土壤质量,同时研究表明土壤颗粒吸附的交换性 Na^+ 是导致土壤分散的主要原因,大量的 Na^+ 导致团聚体崩解,团聚体中大孔隙减少^[37]。 K^+ 对土壤分散程度低于 Na^+ , K^+ 对土壤颗粒表面吸附能力强于 Na^+ ,一般认为 K^+ 含量增高有利于缓解 Na^+ 对土壤的破坏作用^[20,38]。 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 可以通过取代交换性单价阳离子如 Na^+ 来促进土壤絮凝,促进土壤团聚体稳定性^[39]。有研究发现将 Ca^{2+} 引入到土壤中,促进了交换性 Na^+ 的有效置换,提高了土壤孔隙结构的稳定性^[40]。在20~40 cm土层,与CK相比,随着灌溉次数增多,大孔隙度变化由2021年的全部降低转变为2022年添加 Na^+ 和 K^+ 处理大孔隙度降低,添加 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 处理大孔隙度提升,这一结果与0~20 cm土层孔隙度变化情况基本一致。造成这一现象的原因是由于滴灌单次的灌溉深度较浅,并且经过作物吸收和土壤吸附后,向下层运移的盐分较少,直到2022年播种前进行翻耕,疏松土壤后再次进行灌溉,盐分运移深度增加,逐渐影响到20~40 cm土层。

3.2 不同阳离子对土壤成圆率的影响

土壤孔隙影响着土壤结构,其大小和形态对水分和溶质运移、根系发展和土壤肥力有着重要影响^[41]。本研究发现各处理大孔隙成圆率随土壤深度的增加数值大小无明显变化,均呈现波浪状。相较于CK,添加 Na^+ 的微咸水处理两年内成圆率整体降低,添加 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 处理成圆率整体大于其他处理。添加 Na^+ 处理成圆率逐年降低,逐渐接近CK处理,添加 Ca^{2+} 处理无明显变化,添加 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 处理成圆率始终处于较高值,且保持 $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$ 趋势。这表明添加 Na^+ 处理孔隙状况逐渐恶化,不仅大孔

隙度降低,孔隙形状也逐渐趋于不规则。同为添加单价阳离子的 Ca^{2+} 处理大孔隙成圆率无明显降低,但0~20 cm土层大孔隙成圆率差异变大。添加 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 处理大孔隙成圆率在2a内始终高于其他处理,表明添加 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 对改善土壤孔隙形状有显著作用,且 Ca^{2+} 的改善效果优于 Mg^{2+} 。

3.3 不同阳离子对土壤分形维数及连通性的影响

土壤中的液体和气体在传输运移过程中离不开土壤孔隙,而分形理论可以反映土壤孔隙的空间结构,分形维数的数值可以直接反映出土壤质地的均匀和规则程度,实现土壤孔隙的定量化研究^[42]。刘云鹏等^[43]采用分形模型对陕西4种土壤质地粒径分布的分形特征开展研究,结果发现分形维数较小的土壤质地较粗,土壤结构差,而分形维数较高的土壤其肥力及土壤结构较好。本研究发现2a内20~40 cm土壤的分形维数整体高于0~20 cm,这表明表层土壤结构较差,土壤保肥能力弱于深层土壤,这是因为河套地区长期引黄漫灌,且蒸发强烈,导致土壤表层积盐现象逐渐加剧,严重破坏了土壤结构。通过试验结果可以看出,添加 Na^+ 处理土壤分形维数逐年降低,且低于CK处理,添加 K^+ 处理土壤分形维数呈轻微降低趋势,其数值介于CK和添加 Na^+ 处理之间,表明添加 Ca^{2+} 处理土壤结构虽有恶化趋势,但明显优于添加 Na^+ 处理,这也进一步验证了 K^+ 对土壤黏粒的分散效果弱于 Na^+ 这一观点^[20]。相反,添加 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 处理的土壤分形维数数值逐渐增大并且大于其他处理,说明在 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 作用下土壤整体结构变好。

本研究发现各处理下孔隙连通性表现为 $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{CK} > \text{Na}^+$,20~40 cm土层土壤连通性大于0~20 cm,这一结果与分形维数变化趋势一致。整体来看,CK、添加 Na^+ 和 K^+ 处理0~20 cm土壤连通性数值小于20~40 cm土层, Na^+ 处理连通性2a内呈降低趋势,添加 K^+ 处理虽有降低但仍高于添加 Na^+ 处理,添加 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 处理0~20 cm土壤连通性数值大于20~40 cm土层,2a内土壤连通性呈上升趋势。结合分形维数,发现添加单价阳离子处理对缓解土壤结构恶化无明显缓解作用,特别是 Na^+ 处理土壤结构形态差,连通性差,其孔隙特征参数值已经低于CK处理,对土壤环境产生不利影响,而 K^+ 虽无明显改善效果,但其三维特征参数值略高于 Na^+ ,可能短期内对土壤整体孔隙无不利影响。相反,二价阳离子处理土壤孔隙三维特征参数始终高于其他处理,这表明以 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 为主的灌溉水可

以有效防止土壤孔隙结构恶化,孔隙形态发育较好,提升了大孔隙度,增加土壤连通性。有研究表明土壤阳离子对粘土分散程度的影响表现为 $\text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$, 以 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 为主的土壤孔隙结构发达,而以 Na^+ 或 K^+ 为主的土壤孔隙结构为大量孤立的孔隙簇,且孔隙中分散着较多黏土颗粒^[21],这也合理解释了本研究中添加二价阳离子对土壤孔隙结构改善效果明显这一结论。

各处理土壤孔隙结构参数相关性分析发现孔隙参数之间呈正相关关系。这与邱琛等^[44]、蔡太义等^[45]研究结果一致。添加单价阳离子处理的大孔隙度、成圆率、分形维数和连通性整体低于添加二价阳离子处理,且成圆率、分形维数和连通性三者呈极显著正相关。大量研究证明提高土壤大孔隙度有利于提高土壤连通性、透气性,土壤连通性的提高将提升土壤饱和导水率,这将有利于土壤中水分溶质运移和作物吸收养分,进而提升土壤保肥能力^[44,46-48]。

4 结 论

本文基于 2a 田间定位试验,利用 CT 扫描技术,研究了不同微咸水灌溉对土壤孔隙结构的影响,研究发现,初期在灌水中加入适量阳离子可以在一定程度上抑制土壤颗粒分散,对稳定土壤结构、防止土体开裂具有一定的改善作用。随着灌水次数的增多,土壤中的阳离子积累越来越多,不同阳离子对土壤结构的影响也有不同。通过对土壤大孔隙、孔隙成圆率、分形维数、孔隙连通性方面的分析, Na^+ 对土壤稳定性的作用越来越差, K^+ 在 2021 年稳定性较好,在 2022 年土体开裂程度加重, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 处理差异不明显, Mg^{2+} 处理土壤结构有微小分散效果, Ca^{2+} 处理对土壤结构稳定性最好。这表明以 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 为主的微咸水灌溉可以有效防止土壤孔隙结构恶化,土壤整体结构变好,孔隙形态发育较好,提升了大孔隙度,增加了土壤连通性。

参 考 文 献:

- [1] RABOT E, WIESMEIER M, SCHLÜTER S, et al. Soil structure as an indicator of soil functions: a review [J]. *Geoderma*, 2018, 314: 122-137.
- [2] 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.
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.
- [3] JARVIS N J. A review of non-equilibrium water flow and solute transport in soil macropores: principles, controlling factors and Consequences for water quality [J]. *European Journal of Soil Science*, 2020, 58(3): 523-546.
- [4] LI X G, LI Y K, LI F M, et al. Changes in soil organic carbon, nutrients and aggregation after conversion of native desert soil into irrigated arable land [J]. *Soil & Tillage Research*, 2009, 104(2): 263-269.
- [5] LIX Y, YANG Z P, LI Y T, et al. Connecting ecohydrology and hydrogeology in desert shrubs: stemflow as a source of preferential flow in soils [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2009, 13(7): 1133-1144.
- [6] HELLIWELL J R, STURROCK C J, GRAYLING K M, et al. Applications of X-ray computed tomography for examining biophysical interactions and structural development in soil systems: a review [J]. *European Journal of Soil Science*, 2013, 64(3): 279-297.
- [7] JARVIS N J, MOEYS J, KOESTEL J, et al. Chapter 3-preferential flow in a pedological perspective [M]//LIN H. *Hydrogeology*. New York: Academic Press, 2012: 75-120.
- [8] ZHANG H, HE H L, GAO Y J, et al. Applications of computed tomography (CT) in environmental soil and plant sciences [J]. *Soil & Tillage Research*, 2023, 226: 105574.
- [9] 张静举, 陈晓冰, 郑思文, 等. 基于 CT 技术的稻田不同轮作方式下土壤孔隙结构研究 [J]. *土壤通报*, 2018, 49(5): 1085-1090.
ZHANG J J, CHEN X B, ZHENG S W, et al. CT technique to analyze pore structures of paddy soils under different rotations [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2018, 49(5): 1085-1090.
- [10] 房焕, 李奕, 周虎, 等. 稻麦轮作区秸秆还田对水稻土结构的影响 [J]. *农业机械学报*, 2018, 49(4): 297-302.
FANG H, LI Y, ZHOU H, et al. Effects of straw incorporation on paddy soil structure in rice-wheat rotation system [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(4): 297-302.
- [11] 杨永辉, 武继承, 毛永萍, 等. 利用计算机断层扫描技术研究土壤改良措施下土壤孔隙 [J]. *农业工程学报*, 2013, 29(23): 99-108.
YANG Y H, WU J C, MAO Y P, et al. Using computed tomography scanning to study soil pores under different soil structure improvement measures [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(23): 99-108.
- [12] HAMAMOTO S, MOLDRUP P, KAWAMOTO K, et al. Pore network structure linked by X-ray CT to particle characteristics and transport parameters [J]. *Soil and Foundations*, 2016, 56(4): 676-690.
- [13] NAVEED M, MOLDRUP P, ARTHUR E, et al. Revealing soil structure and functional macroporosity along a clay gradient using X-ray computed tomography [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2013, 77(2): 403-411.
- [14] NUNAN N, RITZ K, RIVERS M, et al. Investigating microbial micro-habitat structure using X-ray computed tomography [J]. *Geoderma*, 2006, 133(3/4): 398-407.
- [15] PIERRET A, CAPOWIEZ Y, BELZUNCES L, et al. 3D reconstruction and quantification of macropores using X-ray computed tomography and image analysis [J]. *Geoderma*, 2002, 106(3/4):

- 247-271.
- [16] TRACY S R, ROBERTS J A, BLACK C R, et al. The X-factor: visualizing undisturbed root architecture in soils using X-ray computed tomography[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2010, 61(2): 311-313.
- [17] WANG W, KRAVCHENKO A N, SMUCKER A J M, et al. Intra-aggregate pore characteristics: X-ray computed microtomography analysis[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, 76(4): 1159-1171.
- [18] 丁武泉. 离子界面反应对土壤水分入渗的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2016.
- DING W Q. The effect of ion-surface interactions on soil water infiltrability[D]. Chongqing: Southwest University, 2016.
- [19] RENGASAMY P, MARCHUK A. Cation ratio of soil structural stability (CROSS)[J]. *Soil Research*, 2011, 49(3): 280-285.
- [20] QADIR M, SPOSITO G, SMITH C J, et al. Reassessing irrigation water quality guidelines for sodicity hazard[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 255: 107054.
- [21] MARCHUK A, RENGASAMY P, MCNEILL A, et al. Nature of the clay-cation bond affects soil structure as verified by X-ray computed tomography[J]. *Soil Research*, 2012, 50(8): 638-644.
- [22] LATIEI N, RASHID A S A, SIDDIQUA S, et al. Micro-structural analysis of strength development in low- and high swelling clays stabilized with magnesium chloride solution: a green soil stabilizer[J]. *Applied Clay Science*, 2015, 118: 195-206.
- [23] TURKOZ M, SAVAS H, ACAZ A, et al. The effect of magnesium chloride solution on the engineering properties of clay soil with expansive and dispersive characteristics[J]. *Applied Clay Science*, 2014, 101: 1-9.
- [24] SHABALA S, SHABALA L N, VOLKENBURGH E V. Effect of calcium on root development and root ion fluxes in salinised barley seedlings[J]. *Functional Plant Biology*, 2003, 30(5): 507-514.
- [25] 丁运韬, 程煜, 张体彬, 等. 滴灌灌水下限对夹砂层农田土壤水盐分布和玉米生长的影响[J]. *土壤学报*, 2022, 59(3): 733-744.
- DING Y T, CHENG Y, ZHANG T B, et al. Effects of different thresholds of mulched drip irrigation on water and salt distribution and water use efficiency of maize in a sand-layered soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(3): 733-744.
- [26] WILSON G V, LUXMOORE R J. Infiltration, macroporosity, and mesoporosity distributions on two forested watersheds[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1988, 52(2): 329-335.
- [27] CAMEIRA M R, FERNANDO R M, PEREIRA L S. Soil macropore dynamics affected by tillage and irrigation for a silty loam alluvial soil in southern Portugal[J]. *Soil & Tillage Research*, 2003, 70(2): 131-140.
- [28] KIM H, ANDERSON S H, MOTAVALLI P P, et al. Compaction effects on soil macropore geometry and related parameters for an arable field[J]. *Geoderma*, 2010, 160(2): 244-251.
- [29] BUDHATHOKI S, LAMBA J, SRIVASTAVA P, et al. Using X-ray computed tomography to quantify variability in soil macropore characteristics in pastures[J]. *Soil & Tillage Research*, 2022, 215: 105194.
- [30] WANG M Y, XU S X, KONG C, et al. Assessing the effects of land use change from rice to vegetable on soil structural quality using X-ray CT[J]. *Soil & Tillage Research*, 2019, 195: 104343.
- [31] LUXMOORE R J. Micro-, meso-, and macroporosity of soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1981, 45(3): 671-672.
- [32] PACHEPSKY Y A, GIMENEZ D, RAWLS W J. Bibliography on applications of fractals in soil science[J]. *Developments in Soil Science*, 2000, 27: 273-295.
- [33] DAI L, WANG G L, HE Y J. Assessing soil fractal and sorting characteristics based on geostatistics and modeling approaches in a typical basin of North China plain[J]. *Earth Science Informatics*, 2021, 14(2): 819-829.
- [34] LI S, WANG B L, ZHANG X, et al. Soil particle aggregation and aggregate stability associated with ion specificity and organic matter content[J]. *Geoderma*, 2023, 429: 116285.
- [35] 邵明安, 王全九, 黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- SHAO M A, WANG Q J, HUANG M B. *Soil physics*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [36] 郭向红, 毕远杰, 孙西欢, 等. 西葫芦微咸水膜下滴灌土壤水盐运移对产量影响的预测模型[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(8): 167-175.
- GUO X H, BI Y J, SUN X H, et al. Prediction model of soil water and salt transport on yield of summer squash under mulch drip irrigation with brackish water[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(8): 167-175.
- [37] YADUVANSHI N P S, SHARMA D R. Tillage and residual organic manures/chemical amendment effects on soil organic matter and yield of wheat under sodic water irrigation[J]. *Soil & Tillage Research*, 2008, 98(1): 11-16.
- [38] 叶澜涛, 周青云, 李松敏, 等. 滨海盐碱地覆膜和灌溉对玉米盐分离子分布及生物量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2020, 38(4): 74-83.
- YE L T, ZHOU Q Y, LI S M, et al. Effects of plastic film-mulching and irrigation on the salt ion distribution and biomass of maize in coastal saline-alkali soil[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2020, 38(4): 74-83.
- [39] 孙梅, 黄运湘, 孙楠, 等. 农田土壤孔隙及其影响因素研究进展[J]. *土壤通报*, 2015, 46(1): 233-238.
- SUN M, HUANG Y X, SUN N, et al. Advance in soil pore and its influencing factors[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, 46(1): 233-238.
- [40] YU X L, QI D M, LU S G. Pore structure alteration in a reclaimed saline-sodic soil identified by multiscale X-ray tomography[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2022, 86(4): 1015-1027.
- [41] 张佳瑞, 王金满, 祝宇成, 等. 分形理论在土壤学应用中的研究进展[J]. *土壤通报*, 2017, 48(1): 221-228.
- ZHANG J R, WANG J M, ZHU Y C, et al. Application of fractal theory on pedology: a review[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, 48(1): 221-228.