

盐碱土干缩裂隙动态演化特征与盐分非均匀分布规律分析

翟亚明^{1,2} 胡舒璇¹ 冯根祥^{1,2} 王策^{1,2} 黄明逸^{1,2} 赵涛¹ 王浩轩¹

(1. 河海大学农业科学与工程学院, 南京 211100;

2. 江苏省农业水土资源高效利用与固碳减排工程研究中心, 南京 211100)

摘要: 盐碱土表层常伴随复杂的干缩裂隙网络结构,探究盐碱土干缩裂隙特征及其动态演化过程中的土壤盐分分布规律,对于科学制定盐碱土盐分淋洗制度具有重要意义。采用室内土格开展盐碱土干缩裂隙动态演化特征及盐分淋溶试验,设置3种初始土壤含盐量2 g/kg(S1)、5 g/kg(S2)和8 g/kg(S3),利用数字图像处理技术和形态学算法获取土壤裂隙几何形态参数和连通性指数,分析不同初始含盐量土壤在脱湿-吸湿过程中的干缩裂隙演化特征,并同步监测裂隙演化下的土壤盐分动态变化规律。结果表明,土壤干缩开裂(脱湿)过程中,土壤初始含盐量越大,土壤裂隙面积率、平均宽度、长度密度、连通性指数均相应增大,且裂隙面积率、平均宽度在单个干湿循环内形成“∞”环形状。同时,土壤盐分逐渐向裂隙附近区域迁移,最终形成裂隙网格边缘含盐量高、网格内部低的非均匀分布规律。土壤干缩开裂过程中,S1、S2、S3处理土壤内部含盐量变异系数随着土壤含水率降低而逐渐升高,且在裂隙发育稳定后(土壤含水率为5%左右)分别达到0.235、0.247和0.251;在土壤盐分淋洗(吸湿)过程中,S3处理土壤裂隙面积率较S2和S1处理提高8.565、4.208个百分点,其土壤脱盐率相应增加20.4%、67.3%。总体上,土壤初始含盐量越高,土壤淋洗脱盐率越大,S3、S2、S1处理最终土壤脱盐率分别为54.2%、45.0%和32.4%($P<0.05$)。

关键词: 盐碱土; 土壤裂隙; 盐分分布; 淋洗

中图分类号: S152.4; TV93

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2025)05-0552-08

OSID:



Dynamic Evolution Characteristics of Saline-alkali Soil Shrinkage Cracks and Analysis of Non-uniform Distribution of Salt

ZHAI Yaming^{1,2} HU Shuxuan¹ FENG Genxiang^{1,2} WANG Ce^{1,2}
HUANG Mingyi^{1,2} ZHAO Tao¹ WANG Haoxuan¹

(1. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China
2. Jiangsu Province Engineering Research Center for Agricultural Soil - Water Efficient Utilization, Carbon Sequestration and Emission Reduction, Nanjing 211100, China)

Abstract: The surface of saline-alkali soil is often accompanied by a complex network of shrinkage cracks. Investigating the characteristics of shrinkage cracks in saline-alkali soil and the distribution of soil salinity during the dynamic evolution process is of significant importance for scientifically formulating leaching regimes to mitigate soil salinity. Indoor soil grids were employed to investigate the dynamic evolution characteristics of shrinkage cracks in saline-alkali soil and conduct salt leaching experiments. Three initial soil salinity levels were set at 2 g/kg (S1), 5 g/kg (S2), and 8 g/kg(S3). Digital image processing technology and morphological algorithms were employed to obtain geometric parameters and connectivity indices of the soil cracks. The evolution process of shrinkage cracks during the drying - wetting cycles in soils with different initial salinity levels was analyzed, and simultaneous investigations were conducted into the dynamic variations of soil salinity during crack evolution. The results indicated that during the process of soil shrinkage and cracking (soil dehumidification), an increase in initial soil salinity corresponded to increases in the crack area ratio, mean width, length density, and connectivity index. Moreover, within a single wet-dry cycle, the crack area ratio and mean width form an “∞” ring shape. Concurrently, soil salinity gradually migrated toward the vicinity of the cracks, ultimately leading

收稿日期: 2024-06-12 修回日期: 2024-09-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(52209051,52479039)和江苏省自然科学基金项目(BK20210372)

作者简介: 翟亚明(1982—),男,副教授,博士,主要从事节水灌排理论与技术研究,E-mail: hearoalt@163.com

通信作者: 冯根祥(1988—),男,副教授,博士,主要从事盐碱地综合改良与利用研究,E-mail: fenggx@hhu.edu.cn

to a non-uniform distribution pattern with higher salinity at the edges of the crack network and lower salinity within the grid. During soil shrinkage and cracking, the coefficient of variation of soil salinity content within treatments S1, S2, and S3 was increased as soil moisture was decreased, reaching 0.235, 0.247 and 0.251, respectively, after crack development stabilized (at soil water content of approximately 5%). In the process of soil salinity leaching (soil hygroscopic), the crack area ratio in treatment S3 was increased by 8.565 percentage points and 4.208 percentage points compared with that of treatments S2 and S1, respectively, with corresponding increase in soil desalination rates of 20.4% and 67.3%. Overall, higher initial soil salinity resulted in a greater soil leaching desalination rate. The final soil desalination rates for treatments S3, S2, and S1 were 54.2%, 45.0%, and 32.4%, respectively ($P < 0.05$). Overall, the research result elucidated the dynamic evolution characteristics of shrinkage cracks in saline-alkali soil and unveiled the intricate relationship between crack evolution and soil salinity distribution. The findings can offer valuable insights into the formulation of effective soil improvement strategies to mitigate soil salinity issues.

Key words: saline-alkali soil; soil cracks; salt distribution; leaching

0 引言

随着我国淡水资源短缺和土壤盐碱化风险不断加剧,精准调控土壤水盐环境对于开发利用盐碱地资源尤为关键。盐碱农田土壤状况常呈现较强的非均质性,其中,受农田干湿缩胀、作物根系腐烂和动物活动等因素的影响,土壤裂隙在农田中普遍存在^[1]。在土壤裂隙的众多诱因中,受土壤干湿缩胀效应而产生的裂隙在盐碱地中广泛分布。盐碱地干缩裂隙具有连通性和贯穿性^[2]的网络特征,其演化过程对盐碱地土壤水盐运移过程的影响较为复杂。一方面,干缩裂隙动态演化时土壤基质域变形过程改变了土壤孔隙结构,进而对土壤水盐运移过程产生影响;另一方面,土壤裂隙易造成淋洗水分提前渗漏,以裂隙优先流的形式流出土体,进而影响盐分淋洗效果^[3-4]。

土壤收缩-膨胀特性是干缩裂隙发育的直接原因,其开裂的本质是土体颗粒或团聚体之间的胶结能力受内外因作用而发生断裂^[4]。土壤收缩-膨胀变形具有明显的非线性特征,其变形由团聚体膨缩(可逆)和团聚体颗粒状骨架断裂(不可逆)两部分组成^[5]。研究发现,土壤裂隙发育过程中,土壤基质域收缩变形呈现非均匀性特征^[6]。开裂后的土壤基质域内部、边缘、裂隙域变形量存在差异,且开裂的土壤会沿着某中心方向收缩。土壤基质域这种非均匀变形特性直接导致了土壤结构、水力传导特性的变化^[7],继而改变了土壤介质的连续性和水分、溶质运移过程^[8]。另有研究发现,不同土壤含盐量下的土壤裂隙网络特征具有明显差异,其中张展羽等^[9]发现不同含盐量的土壤裂隙面积率和长度密度均差异显著($P < 0.05$),含盐量越大,稳定时土壤裂隙面积率越大,长度密度越小。而另有研究发现钠盐在减少裂隙方面具有较好效果,所形成的

裂隙面积较小,且随着钠盐的增加裂隙面积率随之减小^[10]。土壤盐分淋洗效果主要受土壤内部因素(土壤结构、含盐量等)和外部因素(淋洗过程等)影响^[11]。土壤裂隙演化过程中的土壤基质域非均匀变形过程会导致土壤水盐运动更为复杂,而不同含盐量下的土壤裂隙演化特征也存在明显差异。因此,在盐碱地淋洗降盐过程中,需要密切关注不同盐分条件下的土壤裂隙演化过程,分析土壤裂隙演化中的水盐非均匀变化规律,为科学合理确定淋洗制度提供基础。

目前,针对干缩裂隙的研究多侧重其发育和演化过程,而针对盐碱土干缩裂隙动态演化过程中土壤盐分动态分布规律的研究尚不深入。本研究对不同初始含盐量盐碱土开展试验,对盐碱土裂隙演化过程中的裂隙几何形态特征、土壤盐分动态分布、土壤水盐淋洗进行分析,为指导盐碱地土壤水盐精准调控和盐碱地农业水土资源高效利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与装置

供试土壤采自江苏省农业水土资源高效利用与固碳减排工程研究中心试验场大田(31°86'N, 118°60'E)表层0~10 cm,土壤以黄棕壤为主。取土后,先用2 mm筛网筛除杂质,所得土壤进行风干,使用吸管法测定试验土壤粒径组成,如表1所示。

表 1 供试土壤基本物理性质
Tab.1 Physical properties of tested soil

土壤类型	土壤颗粒粒径占比/%			容重/ (g·cm ⁻³)	土壤质地
	0 ~	0.002 ~	>0.02 mm		
	0.002 mm	0.02 mm			
黄棕壤	43.28	35.41	21.31	1.30	壤质黏土

试验大田土壤含盐量为 0.3 g/kg,以氯化盐为主,属于非盐化土。将风干试验土壤分成 3 等份,称取不同质量提纯氯化钠溶解于去离子水,待充分溶解后,再将氯化钠溶液均匀喷洒到各土样中并充分搅拌混合,配制成初始含盐量分别为 2 g/kg(S1)、5 g/kg(S2)和 8 g/kg(S3)供试土壤,每个处理设置 3 个重复。将配置好的不同初始含盐量土样按容重 1.30 g/cm³ 均匀回填至规格为 24 cm×24 cm×10 cm (长×宽×高)有机玻璃土格中,刮平后利用有机玻璃板均匀压实,使土层初始厚度为 6 cm,与土壤水盐监测系统(TDR/MUX 型,波兰)^[12] 仪器探头长度一致,便于准确测量数据。有机玻璃土格底部中心位置设置直径为 1 cm 的水样采集孔,用于采集盐分淋洗过程中的淋洗渗漏水样。

1.2 试验过程与数据观测

土样回填完成后,使用气压喷壶将去离子水喷洒在土壤试样表面至饱和状态。喷洒过程中,喷嘴保持在土壤试样表面上方高度 80 cm,采用雾化喷洒模式以水平喷洒姿态均匀喷水,以确保喷洒均匀并减小水滴对土壤表面的溅蚀,喷水强度设置为 8.3 mm/h。同时,在喷洒过程中,尽量避免在土壤表面形成洼水或径流现象。喷洒完成后,各处理试样置于实验室内完成自然干燥脱湿。采用空调设备调控室内环境,以确保实验室内环境相对稳定(温度(24±3)℃,相对湿度(50±15)%)^[13],并采用温湿度记录仪实时监测实验室内温湿度变化。

各处理土样脱湿开裂过程中,采用数码相机(尼康 Zfc 型,分辨率 5 568 像素×3 712 像素)实时采集土壤表面裂隙高清图像。图像采集完成后,采用电子秤(量程 10.0 kg,精度 0.1 g)记录土格内土样及水分质量,用于估算土格内试样土壤整体含水率。采用土壤水盐监测系统(TDR/MUX 型,波兰)同步观测土壤裂隙边缘及内部土壤电导率,如图 1 所示。

待裂隙网络稳定后(连续两次称量相对误差小于 0.2% 时)^[6],开展盐分淋洗(吸湿)试验。淋洗用水采用去离子水。采用前文相同方法将各处理土壤淋洗至饱和状态。淋洗过程中,采用数码相机连续采集土壤表面裂隙闭合过程的高清图像。淋洗完

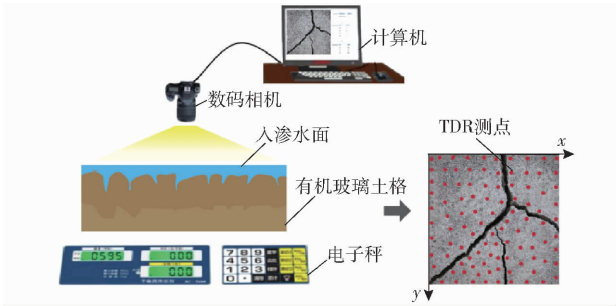


图 1 试验装置示意图
Fig.1 Schematic of test device

成后 2 d,采用土壤水盐监测系统(TDR/MUX 型,波兰)测定各处理土壤电导率,以及水样采集孔所收集到的淋洗渗漏水样含盐量。

1.3 图像处理与数据分析

采用 Photoshop 2020 对原始图像进行剪裁后,用 Matlab R2022b 对中心图像进行图像二值化、骨架化^[9],从而获取土壤裂隙的几何形态参数(裂隙面积率、长度密度、平均宽度)及连通性指数。处理过程图 2 所示。

土壤裂隙的几何形态参数和连通性指数计算公式如下:

(1)裂隙面积率 R_A (%),定义为土壤表面单位面积上裂隙面积,即表面裂隙面积与经图像处理后的土壤表面积之比,计算公式为

$$R_A = \frac{\sum A_i}{A_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中 A_i ——第 i 条裂隙面积,cm²
 A_0 ——研究区总面积,cm²

(2)裂隙长度密度 L_c (cm/cm²),定义为土壤表面裂隙长度与经图像处理后的土壤表面积之比,计算公式为

$$L_c = \frac{\sum L_i}{A_0} \quad (2)$$

式中 L_i ——第 i 条裂隙骨架长度,cm

(3)裂隙平均宽度 W_c (cm),为裂隙面积率和长度密度之比。

(4)裂隙连通性指数 K ,定义为裂隙交叉点数 N_{bp} 与裂隙节点数(裂隙交叉点数与裂隙端点数 N_{ep} 之和)之比,该指数变化过程可体现裂隙网格的形

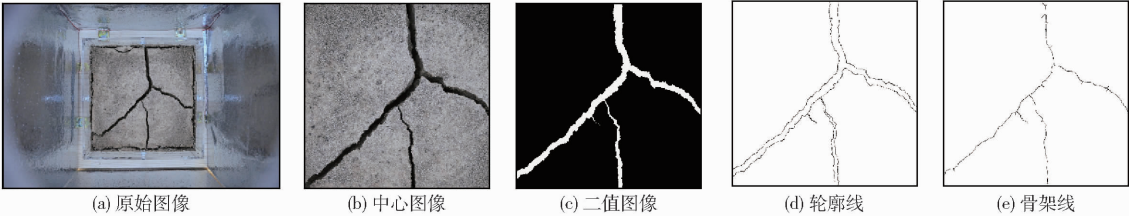


图 2 图像数字化处理示意图

Fig.2 Digital image processing diagrams

成过程。计算公式为

$$K = \frac{N_{bp}}{N_{bp} + N_{ep}} \tag{3}$$

2 结果与分析

2.1 土壤裂隙动态演化特征

2.1.1 土壤裂隙几何形态

脱湿过程中,土壤裂隙面积率、裂隙长度密度和裂隙平均宽度随土壤含水率变化的关系如图 3 所示。可以看出,随着土壤盐分的增加,开裂含水率(土壤脱湿过程中开始出现裂隙时所对应的含水率)呈现增大趋势,S1 处理开裂含水率为 24.76%,S2 处理开裂含水率为 26.03%,S3 处理开裂含水率为 27.11%,且各处理的开裂含水率具有显著性差

异($P < 0.05$)。土壤干缩裂隙发育呈现明显的“先出现一级(主干)裂隙,再出现次级(分支)裂隙”现象,最终将土壤分割成不同区块^[14]。相同土壤含盐量下,各处理裂隙面积率、长度密度和平均宽度均随土壤含水率的下降而逐渐变大,并最终在土壤含水率趋近 10% 左右时逐步稳定。其中,当土壤含水率大于 25% 时,不同初始含盐量下土壤裂隙面积率、裂隙平均宽度上升缓慢,而相应的裂隙长度密度增长速度较快。当土壤含水率自 25% 下降至 10% 左右时,各处理裂隙面积率、裂隙平均宽度增长速度逐步提高。总体来看,土壤脱湿过程中土壤初始含盐量对土壤裂隙几何特征影响较明显,具体表现在土壤初始含盐量越大,土壤裂隙面积率、裂隙长度密度和裂隙平均宽度均越大。

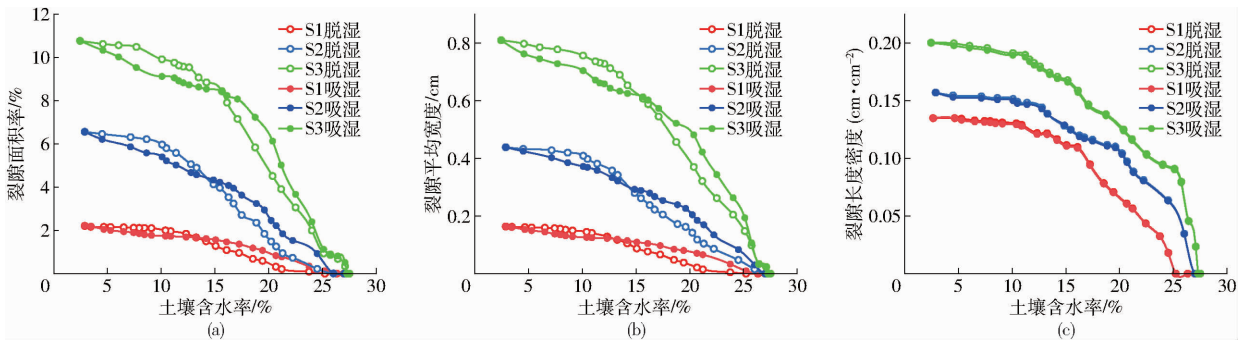


图 3 脱湿-吸湿过程中土壤裂隙面积率、平均宽度、长度密度随土壤含水率变化曲线

Fig.3 Relationship curves of crack area ratio, mean width and length density with soil water content during dehumidification and hygroscopic process

吸湿过程中,土壤裂隙面积率、裂隙平均宽度随土壤含水率变化的关系如图 3a、3b 所示。可以发现,该关系曲线与脱湿过程中土壤裂隙面积率、裂隙平均宽度随土壤含水率的关系曲线呈现明显的“∞”环形状(图 3a、3b)。以上现象表明土壤脱湿-吸湿过程中,土壤干缩裂隙的开裂与闭合属于不可逆的过程,即吸湿过程中的裂隙面积率、平均宽度减少路径未按原脱湿路径返回。该现象可由裂隙开裂-闭合过程中,土壤持水特性曲线与土壤收缩特性曲线的滞后效应解释^[15]。此外,由图 3a、3b 可发现,不同初始土壤含盐量下,“∞”环形状交点的土壤含水率随土壤初始含盐量的升高而逐渐升高。具体表现为:S1、S2 和 S3 处理“∞”环形状交点土壤含水率分别为 13.25%、14.08% 和 15.65%。而相应过程中土壤裂隙长度密度变化相对缓慢,且裂隙长度密度在脱湿和吸湿程中曲线相似(图 3c)。

2.1.2 土壤裂隙连通性指数

土壤脱湿-吸湿过程中,不同初始含盐量下土壤裂隙连通性指数随土壤含水率的关系如图 4 所示。土壤脱湿过程中,不同初始含盐量下的土壤裂隙连

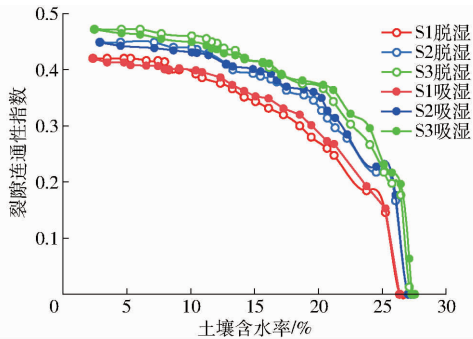


图 4 脱湿-吸湿过程中土壤裂隙连通性指数随土壤含水率变化曲线

Fig.4 Relationship curves of crack connectivity index with soil water content during dehumidification and hygroscopic process

通性指数均随土壤含水率的减少而逐渐增大,并最终趋于稳定。同时,土壤初始含盐量越高,稳定后土壤连通性指数越大,表现为 S1、S2 和 S3 处理裂隙连通性指数最终分别稳定在 0.420、0.449 和 0.472。土壤吸湿过程中,不同初始含盐量下土壤裂隙连通性指数均随土壤含水率的增大而逐渐减小,并最终趋于 0(各处理裂隙完全愈合)。观察图 4 可发现,

土壤脱湿-吸湿过程中裂隙连通性指数未完全重合。这进一步说明土壤干缩裂隙的开裂与闭合是不可逆过程,土壤持水过程较土壤收缩过程具有明显的滞后现象。

2.2 土壤盐分非均匀分布规律

S1、S2、S3 处理所对应的土壤初始含盐量(土壤饱和溶液电导率)分别为 821、1 914、2 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。土壤裂隙动态演化中的土壤含盐量分布规律如图 5(图中变异系数 $C_v = S_\sigma/M$, S_σ 为土壤整体含盐量标准差, M 为含盐量平均值)所示。由图 5 第 1 列可知,各处理土壤含水率为 20% 左右时,土壤裂隙网络初步形成。此时,各处理裂隙网格内土壤含盐量均在初始值上下浮动,并开始出现非均匀分布的变化趋势, S1、S2、S3 处理土壤含盐量变异系数分别为 0.078、0.080 和 0.081。由图 5 第 2 列可知,随着脱湿过程推进,当土壤含水率为 12% 左右时,土壤盐分非均匀分布特征更加明显, S1、S2 和 S3 处理土壤含盐量变异系数分别为 0.156、0.179 和 0.185,且开始出现土壤盐分逐渐向裂隙边缘聚集的趋势。由图 5 第 3 列可知,当土壤含水率为 5% 左右时,土壤裂隙网络已基本稳定,此时土壤盐分表现出剧烈的

非均匀分布特征, S1、S2、S3 处理土壤含盐量变异系数分别为 0.235、0.247 和 0.251,且裂隙边缘附近的土壤盐分明显高于裂隙网格内部的土壤盐分。总体来看,裂隙网络的存在影响了盐分在土壤中的分布。随着土壤裂隙的不断演化,各处理土壤盐分存在明显的非均匀分布特征,且表现出明显的由裂隙网格内部向裂隙边缘聚集的现象。

分析图 5a 可知,当土壤含水率为 20%、12% 和 5% 左右时, S1 处理各裂隙所形成的裂隙网格中心处土壤电导率平均值分别为 796.97、713.45、684.16 $\mu\text{S}/\text{cm}$,较初始土壤电导率(821 $\mu\text{S}/\text{cm}$)分别降低 2.93%、13.10% 和 16.67%。相对应的, S1 处理各裂隙边缘土壤电导率平均值分别为 934.27、1 088.19、1 301.68 $\mu\text{S}/\text{cm}$,较初始土壤电导率分别升高 13.80%、32.54% 和 58.55%。分析图 5b 可知,在土壤含水率分别为 20%、12% 和 5% 左右时, S2 处理各裂隙所形成的裂隙网格中心处土壤电导率平均值分别为 1 801、1 530.17、1 429.44 $\mu\text{S}/\text{cm}$,较初始土壤电导率(1 914 $\mu\text{S}/\text{cm}$)分别降低 5.90%、20.05% 和 25.32%;相对应的, S2 处理各裂隙边缘土壤电导率平均值分别为 2 278.53、

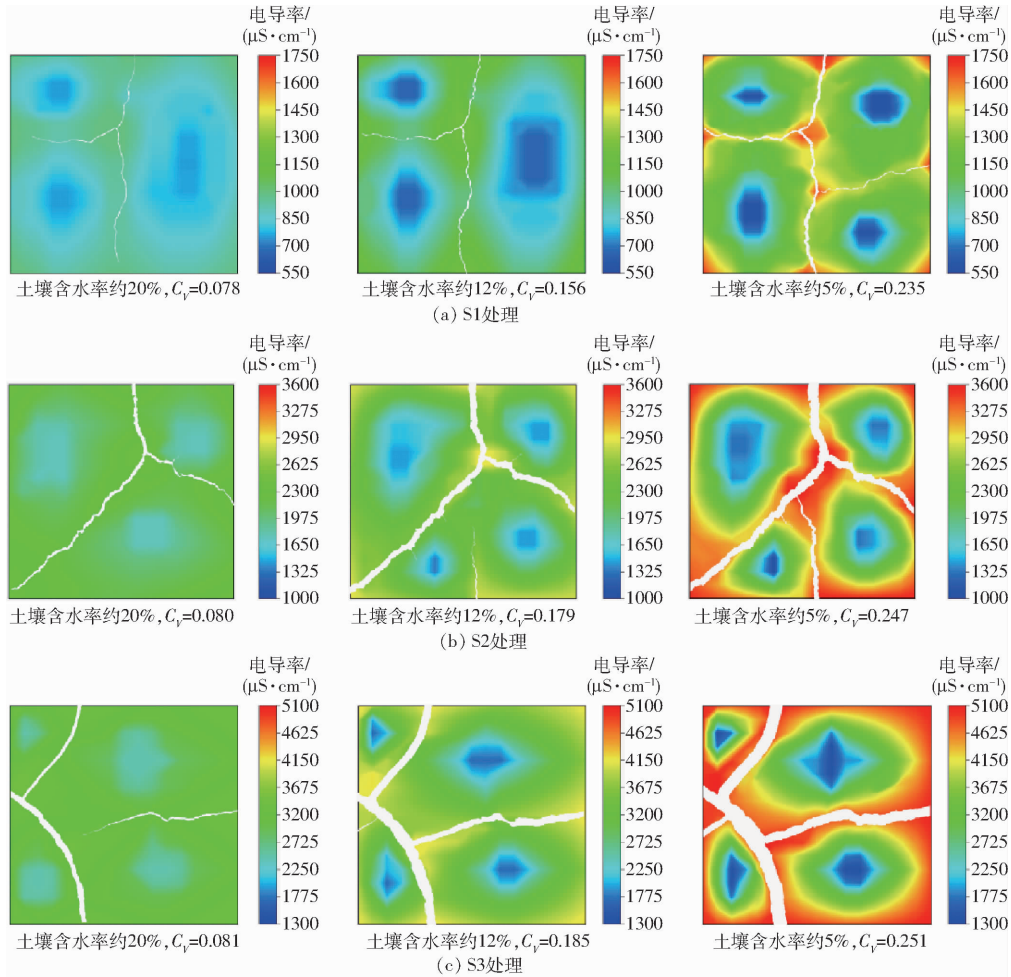


图 5 不同处理下土壤裂隙发育及含盐量变化过程

Fig. 5 Soil cracks development and salinity change under different treatments

2 678.20、325.94 $\mu\text{S}/\text{cm}$,较初始土壤电导率分别升高 19.05%、39.93% 和 71.70%。分析图 5c 可知,在土壤含水率分别为 20%、12% 和 5% 左右时,S3 处理各裂隙所形成的裂隙网格中心处土壤电导率平均值分别为 2 550、2 009.05、1 872.90 $\mu\text{S}/\text{cm}$,较初始土壤电导率(2 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$)分别降低 7.72%、26.94% 和 46.83%;相对应的,S3 处理各裂隙边缘土壤电导率平均值分别为 3 212.23、3 952.86、4 954.62 $\mu\text{S}/\text{cm}$,较初始土壤电导率分别升高 20.44%、43.74% 和 80.17%。由此可见,土壤裂隙动态演化中,初始土壤盐分越高,土壤盐分由网格内部向裂隙边缘聚集的现象更为剧烈。

2.3 土壤盐分淋洗

土壤电导率是反映土壤可溶性盐含量的指标,但土壤电导率并不能完全反映土壤含盐量的绝对积累。土壤饱和电导率和土壤深度可以用来估算土壤盐分质量 $S(\text{g})$ ^[16],计算式为

$$S = 0.109\ 2EC_eH \tag{4}$$

式中 EC_e ——土壤饱和电导率, $\mu\text{S}/\text{cm}$

H ——土壤剖面计算深度,cm

表 2 为各处理土壤裂隙参数与盐分淋洗分析结果。由表 2 可知,不同处理下,土壤初始含盐量越

高,淋洗前土壤裂隙稳定时的几何形态参数(土壤裂隙面积率、裂隙长度密度、裂隙平均宽度)及连通性指数越大,土壤脱盐率越大。其中,S1、S2、S3 处理土壤脱盐率分别为 32.4%、45.0% 和 54.2%,3 种盐分处理下土壤均有较好的盐分淋洗效果,且不同初始土壤含盐量下土壤脱盐率具有显著性差异($P < 0.05$)。S3 处理下土壤裂隙面积率、裂隙长度密度、裂隙平均宽度、裂隙连通性指数相比 S2 处理和 S1 处理增长量分别为 8.565 个百分点、0.065 cm/cm^2 、0.647 cm 、0.052 和 4.208 个百分点、0.043 cm/cm^2 、0.372 cm 、0.023。其土壤脱盐率同比 S2、S1 处理增加 20.4%、67.3%。由此可知,S3 处理下土壤裂隙面积率、裂隙长度密度、裂隙平均宽度、裂隙连通性指数均为 3 个处理中最大,其裂隙发育状态较好,相互贯穿连通的裂隙网络提高了裂隙土壤的导水性能,为淋洗水提供了较为发达的优先流通道。此外,由 2.2 节可知,各处理土壤盐分存在明显的非均匀分布特征,盐分主要分布在裂隙的边缘处,裂隙边缘处累积的盐分越高,能被淋洗水带走的盐分越多。尤其是在土壤初始含盐量较高的情况下,土壤盐分非均匀分布特征与盐分淋洗效率较初始含盐量低的处理更加明显。

表 2 各处理土壤裂隙参数与盐分淋洗分析结果

Tab. 2 Analysis results of soil cracks parameters and salt leaching in each treatment

处理	$R_A/\%$	$L_c/(\text{cm}\cdot\text{cm}^{-2})$	W_c/cm	K	S_{SI}/g	S_{SF}/g	$S_{SI}-S_{SF}/\text{g}$	$S_{DE}/\%$
S1	2.205	0.135	0.163	0.420	5.4	3.649	1.751	(32.4±2.1) ^a
S2	6.562	0.157	0.438	0.449	13.5	7.424	6.076	(45.0±0.9) ^b
S3	10.770	0.200	0.810	0.472	21.6	9.900	11.700	(54.2±1.5) ^c

注: S_{SI} 、 S_{SF} 为土壤盐分初始质量和最终质量; S_{DE} 为土壤脱盐效率, $S_{DE}=(S_{SI}-S_{SF})/S_{SI}\times 100\%$; S_{DE} 数字后不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

3 讨论

3.1 土壤含盐量对盐碱土裂隙几何形态的影响

在开裂初期裂隙网格总长度迅速增加,从而形成了网格的基本形状,蒸发后期主要表现为裂隙宽度的增大^[17]。盐分改变了土体的原有结构,在脱湿过程中,盐分与土壤颗粒之间的复杂相互作用受到价态和离子浓度的影响。土壤盐分升高,不同土壤颗粒之间的内摩擦角降低,土壤的抗剪程度进一步减弱,导致收缩干裂^[18]。本研究中,随着土壤初始含盐量的增大,土壤裂隙的几何形态和裂隙连通性指数也随之增大,这与张展羽等^[9]的试验结论中裂隙面积率、裂隙连通性指数规律一致,但裂隙长度密度的规律却相反,这是因为土壤厚度也会对几何形态特征产生影响,本研究中,填装的试样土壤厚度为 6 cm,而张展羽等^[9]试验使用的土壤厚度仅为 1 cm。

这是由于土壤厚度的增加使得土壤内部形成更长的变形途径,即变形能够沿着更大的深度进行,有利于土壤裂隙的扩展和延伸。此外,土壤盐分的增加可以显著降低扩散双电层(Diffusion double layer,DDL)^[19-20]厚度,使得黏性盐碱土壤强度降低,收缩开裂加剧。

脱湿过程与吸湿过程中土壤裂隙面积率、裂隙平均宽度形成一条“ ∞ ”字形曲线,研究表明土壤脱湿与吸湿过程中,相同土壤含水率下裂隙形态有显著差异,这一现象主要与土壤水分特征曲线的滞后效应相关^[15],这是由于在相同土壤含水率下,脱湿过程中的吸力大于吸湿过程。这种差异性还表现在膨胀收缩程度上,而且是不可逆的。在脱湿过程中,土壤会发生收缩,土壤微观颗粒和盐离子的移动导致固相骨架的收缩,从而产生裂隙。而吸湿过程中,裂隙并不会完全按照原来的路径闭合,这进一步加

剧了土壤结构的变化。因此,裂隙形态在脱湿与吸湿过程中会呈现不同特征,并且裂隙的产生速率也不尽相同。

3.2 裂隙发育对盐分分布的影响

盐碱土改良利用的理论前提是土壤水盐运移理论^[21]。在入渗径流途径中,灌溉水和降水向下渗透,导致土壤中的盐分逐渐向下迁移,形成盐分逐渐积累的过程。与灌溉水入渗原理相反,土壤蒸发过程受大气蒸发状况的影响。随着蒸发的进行,毛管力使土壤底部的水分持续向上运动。在这一过程中,土壤中的盐分也随着水分向上迁移,导致土壤表面积盐析出。在研究过程中,含盐量较高的土壤表面可观察到有盐分析出现象。盐随水走,这是盐分在土壤中迁移的主要方式,因此影响水分迁移的因素也会影响盐分的迁移^[22]。盐碱土中的裂隙也遵循相应规律。当土壤发生干缩开裂时,裂隙周围的土壤水分会逐渐变少。因此,盐分会随之迁移到裂隙边缘。特别是交叉处的裂隙,含盐量的变化将变得更加显著。在盐碱土开裂过程中,裂隙与土壤水分、盐分有着相互作用。

3.3 裂隙发育对盐碱土盐分淋洗的影响

为使水盐得以调控,灌水洗盐是土壤改良利用的先行途径和有效措施,水利改良盐碱土方面的措施主要包括灌溉淋洗(以水洗盐)、排水携盐(带走盐分),而灌溉淋洗较为普遍^[23]。小定额灌水条件下土壤表层水分易蒸发,保水效果不显著,返盐现象严重,脱盐效果较弱^[24]。而在灌水量不同的情况下,灌水量越大,水分与土壤得以充分接触,脱盐效果表现较好^[25],本研究淋洗水量充足,由此脱盐较好。通过持续淋洗,不仅可以有效洗脱表层土壤盐分,而且能够显著改良整体土壤质地^[26]。本研究在盐碱土表层裂隙发育完全后采取一次淋洗,得到对

于盐碱土表面裂隙淋洗制度的改良机理,对于盐分较高的土壤裂隙表层,可以进行持续淋洗。盐碱土发育的裂隙对入渗有显著作用,能够为淋洗水提供明显的优先通道^[27]。同时土壤的干缩裂隙发育程度越高,裂隙的存在有助于促进优先流发育,使部分淋洗水绕过土壤基质区,从而洗去裂隙边缘聚集的大部分盐分,得到较好的脱盐效果。为了解决盐碱地裂隙土壤表层的高盐分问题,采用淋洗的方法进行脱盐,这种方式能够有效减少土壤表层含盐量,为土壤改良提供可行方法。

本研究仅局限于室内模拟尺度的土壤裂隙形态量化及盐分分布研究,而针对田间尺度土壤裂隙发育特征随土壤脱湿-吸湿过程的变化、如何将干缩裂隙抑制措施和裂隙流机理应用于田间水盐肥调控是今后裂隙研究的重要内容。

4 结论

(1)在脱湿过程中,干缩裂隙在稳定状态下裂隙面积率、长度密度、平均宽度和裂隙连通性指数随着含盐量的增加而增加。在脱湿-吸湿过程中,土壤裂隙面积率和裂隙平均宽度形成过程存在不可逆性,裂隙长度密度在脱湿和吸湿过程中曲线相似。

(2)在裂隙网格形成过程中,各处理土壤盐分存在明显的非均匀分布特征,表现出盐分向干缩裂隙方向迁移的现象。随着土壤含水率逐步降低,土壤盐分由网格内部向裂隙边缘聚集的现象更为剧烈,且各处理土壤含盐量变异系数越来越大。

(3)随着初始含盐量升高,土壤裂隙发育越来越好,能够为淋洗水提供更发达的优先流通道,淋洗后各处理土壤脱盐率也呈现增加趋势。在 S1、S2、S3 处理下,土壤脱盐率分别达到 32.4%、45.0%、54.2%。

参 考 文 献

[1] 朱磊,陈玖泓,刘德东. 土壤表面干缩裂隙形态定量分析及其数值模拟[J]. 农业工程学报,2016,32(14):8-14.
ZHU Lei, CHEN Jiuhong, LIU Dedong. Morphological quantity analysis of soil surface shrinkage crack and its numerical simulation[J]. Transactions of the CSAE, 2016,32(14):8-14. (in Chinese)

[2] ZHANG Y,ZHANG Z,MA Z,et al. A review of preferential water flow in soil science[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2018,98(4):604-618.

[3] GREVE A, ANDERSEN M S, ACWORTH R I. Investigations of soil cracking and preferential flow in a weighing lysimeter filled with cracking clay soil[J]. Journal of Hydrology,2010,393(1-2):105-113.

[4] 唐朝生,施斌,崔玉军. 土体干缩裂隙的形成发育过程及机理[J]. 岩土工程学报,2018,40(8):1415-1423.
TANG Chaosheng,SHI Bin,CUI Yujun. Behaviors and mechanisms of desiccation cracking of soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2018,40(8):1415-1423. (in Chinese)

[5] WANG G,WEI X. Modeling swelling-shrinkage behavior of compacted expansive soils during wetting-drying cycles[J]. Canadian Geotechnical Journal,2015,52(6):783-794.

[6] 翟亚明,李康,王策,等. 农田干缩裂隙形态特征及其裂隙率预测模型研究[J]. 农业机械学报,2023,54(5):335-347.
ZHAI Yaming,LI Kang,WANG Ce,et al. Morphological characteristics of dry shrinkage cracks and prediction model of crack porosity in farmland soils[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(5):335-347. (in Chinese)

[7] COENELIS W M,CORLUY J,MEDINA H,et al. Measuring and modelling the soil shrinkage characteristic curve[J]. *Geoderma*, 2006,137(1-2):179-191.

[8] PETH S,NELLESSEN J,FISCHER G,et al. Non-invasive 3D analysis of local soil deformation under mechanical and hydraulic stresses by μ CT and digital image correlation[J]. *Soil and Tillage Research*,2010,111(1):3-18.

[9] 张展羽,朱文渊,朱磊,等. 根系及盐分含量对农田土壤干缩裂隙发育规律的影响[J]. *农业工程学报*,2014,30(20):83-89.
ZHANG Zhanyu,ZHU Wenyuan,ZHU Lei,et al. Effects of roots and salinity on law of development for farmland soil desiccation crack[J]. *Transactions of the CSAE*, 2014,30(20):83-89. (in Chinese)

[10] 邢旭光. 添加物与盐分对土壤持水与水分入渗-蒸发特性的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2017.
XING Xuguang. Influences of additives and salts on water retention and soil-water infiltration and evaporation[D]. Yangling: Northwest A&F University,2017. (in Chinese)

[11] 史海滨,杨树青,李瑞平,等. 内蒙古河套灌区水盐运动与盐渍化防治研究展望[J]. *灌溉排水学报*,2020,39(8):1-17.
SHI Haibin,YANG Shuqing,LI Ruiping,et al. Soil water and salt movement and soil salinization control in Hetao Irrigation District: current state and future prospect[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*,2020,39(8):1-17. (in Chinese)

[12] 王策,张展羽,陈晓安,等. 基于水量平衡原理的裂隙优先流双域渗透模型及其应用[J]. *农业机械学报*,2021,52(10):314-326,348.
WANG Ce,ZHANG Zhanyu,CHEN Xiaolan,et al. Dual-permeability model for crack preferential flow based on principle of water volume balance and its application[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2021,52(10):314-326,348. (in Chinese)

[13] 张展羽,李文杰,王策,等. 多级干湿循环对农田土壤干缩裂缝演变特征的影响[J]. *农业机械学报*,2016,47(12):172-177,252.
ZHANG Zhanyu,LI Wenjie,WANG Ce,et al. Effects of dry-wet cycles on evolution characteristics of farmland soil desiccation cracks[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2016,47(12):172-177,252. (in Chinese)

[14] 李文杰,张展羽,王策,等. 干湿循环过程中壤质黏土干缩裂缝的开闭规律[J]. *农业工程学报*,2015,31(8):126-132.
LI Wenjie,ZHANG Zhanyu,WANG Ce,et al. Propagation and closure law of desiccation cracks of loamy clay during cyclic drying-wetting process[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015,31(8):126-132. (in Chinese)

[15] MUALEM Y,BERIOZKIN A. General scaling rules of the hysteretic water retention function based on Mualem's domain theory[J]. *European Journal of Soil Science*,2009,60(4):652-661.

[16] FENG Genxiang,ZHU Chengli,WU Qingfeng,et al. Evaluating the impacts of saline water irrigation on soil water-salt and summer maize yield in subsurface drainage condition using coupled HYDRUS and EPIC model[J]. *Agricultural Water Management*,2021,258:107175.

[17] LI Dongdong,YANG Binbin,YANG Changde,et al. Effects of salt content on desiccation cracks in the clay[J]. *Environmental Earth Sciences*,2021,80:1-13.

[18] ZHANG Z,LI X,ZHOU S, et al. Quantitative study on salinity estimation of salt-affected soils by combining different types of crack characteristics using ground-based remote sensing observation[J]. *Remote Sensing*,2023,15(13):3249.

[19] DECARLO K F,SHOKRI N. Salinity effects on cracking morphology and dynamics in 3-D desiccating clays[J]. *Water Resource Research*,2014,50:3052-3072.

[20] SHOKRI N,ZHOU P,KESHMIRI A. Patterns of desiccation cracks in saline bentonite layers[J]. *Transport in Porous Media*, 2015,110(2):333-344.

[21] 时祥顺,滕晓飞,孙麒,等. 土壤水分盐分运移研究进展综述[J]. *广州化工*,2016,44(5):9-10,31.

[22] 张殿发,郑琦宏,董志颖. 冻融条件下土壤中水盐运移机理探讨[J]. *水土保持通报*,2005(6):14-18.
ZHANG Dianfa,ZHENG Qihong,DONG Zhiying. Mechanism of soil salt moisture transfer under freeze-thawing condition[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*,2005(6):14-18. (in Chinese)

[23] 刘小媛,张晴雯,高佩玲,等. 间歇组合灌溉对中度盐化土壤水盐运移规律的影响研究[J]. *干旱地区农业研究*,2018,36(6):1-6,12.
LIU Xiaoyuan,ZHANG Qingwen,GAO Peiling,et al. Effects of alteration irrigation on soil water and salt transport in moderately saline soil[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*,2018,36(6):1-6,12. (in Chinese)

[24] 张瀚,杨鹏年,汪昌树,等. 干旱区不同冬灌定额对土壤水盐分布的影响研究[J]. *灌溉排水学报*,2016,35(11):42-46.
ZHANG Han,YANG Pengnian,WANG Changshu,et al. Effect of winter irrigation amount on soil moisture and salt distribution in arid area[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*,2016,35(11):42-46. (in Chinese)

[25] 罗雪园,周宏飞,柴晨好,等. 不同淋洗模式下干旱区盐渍土改良效果分析[J]. *水土保持学报*,2017,31(2):322-326.
LUO Xueyuan,ZHOU Hongfei,CHAI Chenhao,et al. Analysis of improvement effects on different leaching modes of saline soil in arid areas[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*,2017,31(2):322-326. (in Chinese)

[26] 赵鑫. 淋洗条件下硫酸盐型盐碱地离子运移及盐碱淋出水养殖适用性研究[D]. 上海:上海海洋大学,2023.
ZHAO Xin. Ion movement behavior and feasibility of fishery utilization in the sulfate saline-alkaline soil [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University,2023. (in Chinese)

[27] 李航,郑丽萍,甘永德,等. 膨胀性土壤干缩裂隙对入渗产流影响[J]. *中国农村水利水电*,2023(10):114-120.
LI Hang,ZHENG Liping,GAN Yongde,et al. Influence of swelling soil shrinkage cracks on rainfall infiltration tests[J]. *China Rural Water and Hydropower*,2023(10):114-120. (in Chinese)