

盐基离子对土壤持水及收缩特性的影响

李青峰^{1,2}, 邢旭光^{1,2}, 马孝义¹

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100;
2. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 不同盐离子对土壤持水能力具有不同程度影响,且在土壤水分特征曲线测定过程中,土体随失水发生收缩和开裂。在已获取研究成果基础上进行扩展,进一步探索 8 种低浓度盐离子(K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 、 SO_4^{2-})对土壤持水能力和收缩特征的影响。选取陕西粉黏壤土并分别采用含有此 8 种离子的盐溶液(浓度均约为 $1\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$)对土样进行饱和处理,以无盐离子处理作为对照(CK);采用离心机法获取土壤水分特征曲线,使用游标卡尺测定离心过程中的土体轴向沉降高度,编写 MATLAB 程序对裂缝图像提取裂隙度量指标,据此对各处理土壤持水能力和收缩特征进行对比分析及评价。结果发现,在此浓度条件下:(1) K^+ 、 Na^+ 及 4 种阴性盐离子在一定程度上均可提高土壤持水能力,且阴阳盐离子中 CO_3^{2-} 和 K^+ 效果最显著,分别较 CK 提高 35.81% 和 3.68%;(2) Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 和 CO_3^{2-} 有利于减小土体轴向收缩度,且阴阳盐离子的作用效果分别表现为 $HCO_3^- > Cl^- > SO_4^{2-} > CO_3^{2-}$ 和 $Na^+ > K^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+}$;(3) Na^+ 、 Mg^{2+} 及 4 种阴性盐离子在一定程度上均有利于减轻土壤开裂程度,可同时减小土壤裂隙总长度、总面积以及长度密度和面积密度,且阴阳盐离子中 CO_3^{2-} 和 Na^+ 效果最显著。研究可为不同类型盐碱土壤持水能力评价及其干缩开裂机理认知提供理论指导。

关键词: 土壤水分;持水能力;土壤收缩;干缩裂缝;盐离子

中图分类号: S152.7 **文献标志码:** A

Effects of anions and cations on soil water retention and shrinkage behavior during dehydration process

LI Qing-feng^{1,2}, XING Xu-guang^{1,2}, MA Xiao-yi¹

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Yangling, Shaanxi 712100, China;
2. Key Laboratory for Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Area of Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Soil shrinkage and cracks commonly occur during soil water characteristic curve (SWCC) measurement, and the soil water retention varies with the type of salt ions (i.e., anions and cations) in the soil. A laboratory study was therefore conducted to make further analysis on the effects of four salt cations (K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , and Mg^{2+}) and anions (Cl^- , HCO_3^- , CO_3^{2-} and SO_4^{2-}) with a low concentration of $1\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ on water retention and soil shrinkage in silty clay loam saturated by salt solutions ($1\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$), based on existing findings. The SWCCs were measured by the centrifuge; meanwhile, during dehydration, the heights of soil samples were measured using calipers to estimate the change in soil bulk density and the axial shrinkage. Two indices, crack length and crack area, were directly obtained from the processed binarized images by using MATLAB. The results showed following. (1) The cations, K^+ , Na^+ , and four salt anions could improve water retention, and CO_3^{2-} and K^+ increased soil moisture by 35.81% and 3.68%, respectively, relative to the control treatment. (2) Mg^{2+} , SO_4^{2-} , and CO_3^{2-} could decrease axial soil shrinkage. The influences of anions and cations on soil shrinkage were ranked in order that $HCO_3^- > Cl^- > SO_4^{2-} > CO_3^{2-}$ and $Na^+ > K^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+}$, respectively. (3) Na^+ , Mg^{2+} , and four salt anions could reduce crack length, crack area, crack length density

and crack area density. And the performance of CO_3^{2-} and Na^+ was the best. The findings provide theoretical and practical guidance for evaluation of water retention and cognition of the mechanism of desiccation cracking.

Keywords: soil moisture; water retention; soil shrinkage; desiccation cracking; salt ion

土壤持水性能评价对制定合理的农田灌溉制度具有指导意义,土壤持水与保水能力可以通过土壤孔隙大小和分布特征进行判定,然而土壤的持水性、土壤水分有效性以及孔隙分布特性均可以通过土壤水分特征曲线进行评价^[1-2]。许多学者对土壤水分特征曲线拟合^[3-5]及其影响因素^[6-8]进行了研究,同时也有较多研究基于土壤水分特征曲线对土壤持水能力以及土壤水分有效性进行评价^[9-13],纵观有关土壤水分特征曲线的研究成果,较多针对添加物条件或是将非盐碱土作为研究对象,而对盐碱土壤持水性能的研究仍较少,关于不同盐分离子对其影响效果的评价则更是鲜有报道。明晰不同盐离子对土壤持水性能的影响,将有利于对不同类型盐碱地制定合理洗盐方式。

土壤水分特征曲线一般是通过离心机测得,然而随着离心机预设吸力和平衡时间逐渐增加,土体发生失水,并伴随沉降,容重逐渐增大,最终导致土体表面出现裂缝。土壤干缩开裂问题对于农田和作物均具有较强的破坏作用,土壤裂缝在很大程度上可导致水分与养分流失,造成灌溉效率降低和水环境污染,同时又可能破坏作物根系,导致产量降低^[14-15]。目前有关土壤裂缝的研究多是集中于土壤总盐的影响^[16-18],或是单独将土壤干缩开裂作为研究对象^[14,19],这在一定程度上忽略了不同盐离子各自产生的效应,且较少研究将土壤失水和土体收缩相结合,即土壤脱水过程中的土体收缩变化特征。土体收缩变化与吸力、含水率和容重变化具有同步性,故在土壤发生失水时,对其土壤水分特征曲线和土壤收缩特征同时展开研究具有实际意义;对不同盐离子导致的土壤裂缝进行评价,可为进一步认识盐碱土的干缩开裂机理和农田灌溉提供指导。

将土壤失水与土壤收缩相结合,在已有研究基础上,探索 4 种阳性及阴性盐离子对土壤持水及收缩特性的作用效果,以期更好的为不同盐碱土壤的持水性评价奠定基础,同时为土壤失水过程中的干缩开裂研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料与试验设计

试验土壤取自灌溉试验站小麦—玉米轮作试验

田,采集深度为 30 cm 农田耕作层;供试土壤经风干且过 2 mm 筛后,采用激光粒度仪测定土壤颗粒组成,粒径介于 0~0.002 mm、0.002~0.02 mm 和 0.02~2 mm 的颗粒含量分别为 17.28%、44.32% 和 38.40%,由国际制质地三角形可知土壤类型为粉黏壤土。

根据田间实测土壤容重 ($1.38 \sim 1.40 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) 将装填干容重设置为 $1.40 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,均匀装入环刀 (100 cm^3) 内;用蒸馏水分别与氯化钾、氯化钠、氯化钙、氯化镁、碳酸氢钠、碳酸钠和硫酸钠粉末/晶体配置成盐溶液(浓度均约为 $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$)。试验开始前,分别采用各盐溶液对土样进行饱和和处理 48 h,并以蒸馏水浸泡为对照(CK);试验结束后,采用干燥法测定土壤含水率;各处理均 4 次重复。

1.2 试验测定方法

1.2.1 土壤持水曲线测定 采用离心机法测定饱和和环刀样品的土壤水分特征曲线,高速恒温冷冻离心机(CR21G II 型)内恒温 4°C ;测定吸力为 10、50、100、300、500、700、1 000、3 000、5 000 cm 和 7 000 cm,各吸力达到平衡时间后,用电子天平称取土样质量进而计算土壤含水率。采用 van Genuchten 模型(式 1)对供试土样进行持水曲线拟合,进而基于土壤水分特征曲线对比分析各盐离子对土壤持水能力的影响。

$$\theta(s) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha s|^n)^m} & s < 0 \\ \theta_s & s \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, θ 为体积含水率, $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$; θ_s 为饱和体积含水率, $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$; θ_r 为残余体积含水率, $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$; s 为吸力, cm; α 为进气吸力的倒数(即 $\alpha = 1/s_a$); m 和 n 为形状系数。

1.2.2 土体收缩特性测定 离心过程中环刀内土体产生沉降现象,并以垂向收缩为主;每达到平衡时间时,用游标卡尺量取各转速下环刀内土体的轴向沉降高度进而计算土体收缩量,采用线缩率(式 2)描述土体在各吸力时的收缩度,采用轴向收缩应变(式 3)表征离心结束时土体的最终收缩形变量;同时测定各吸力下的土体容重,进而对离心过程中的土壤容重进行校正。

$$\delta_{sl} = z_i/H \times 100\%$$

(2)

$$\delta_s = \Delta h/H \times 100\%$$

(3)

式中, δ_{sl} 为土体线缩率, %; δ_s 为土体轴向收缩应变, %; z_i 为各吸力对应的土壤收缩度, mm; H 为土样初始高度, mm; Δh 为土壤脱水始末状态高度差, mm。

1.2.3 土体开裂特征测定 在试验结束后用数码相机(Canon IXUS 950IS, 分辨率 3264 × 2448)拍摄获取各处理环刀样品截面图像, 将相机置于固定支架以保证拍摄高度相同, 且拍摄时遮挡外界光源、关闭闪光灯, 仅用日光灯照明, 从而使得各处理土壤裂缝图像具有一致性; 而后编写 Matlab 程序进一步对图像中的裂隙参数进行提取。

在原有的数字图像中, 裂隙区域图像较无裂隙区域的色彩更黑且纯度更高, 鉴于饱和度分量图可以更明显地展现土壤裂隙, 因此, 将原有的 RGB 图像进行 HSI 转换, 提取饱和度分量图并采用全局阈值法得到土壤裂缝的二值化图。在此基础上, 为了尽量保留原始的短小裂缝, 利用膨胀腐蚀方法对短小裂缝进行适当连接, 并去除该图像中的孤立单点或杂点。最后根据处理后的土壤裂缝二值化图像提取裂缝总长度和裂缝面积参数, 并进一步计算获取裂缝长度密度和裂缝面积密度参数。

2 结果与分析

2.1 盐基离子对土壤水分特征曲线的影响

土壤含水率随着吸力增加呈现逐渐降低趋势, 从图 1(a)可以看出, 在脱水过程中阳离子处理土壤含水率在较低吸力段($h = 0 \sim 1\,000\text{ cm}$)和较高吸力段($h = 1\,000 \sim 7\,000\text{ cm}$)分别平均减小了约 39.25% 和 18.96%; 阳离子处理的土壤水分特征曲线与 CK

处理呈现平行状, 可见各处理土壤比水容量差异较小, 土壤孔隙结构差异不大。图 1(a)显示, 在 $h = 0 \sim 7\,000\text{ cm}$ 内当吸力相同时, 阳性盐离子处理的土壤含水率大小表现为 $\text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{CK} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$, 即不同阳性盐离子对土壤持水能力的影响程度不同, 具体表现为 $\text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$, 且低浓度($\approx 1\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$) K^+ 和 Na^+ 可增强土壤持水能力, 而 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 使得土壤持水能力减弱。从图 1(b)可以看出, 阴离子处理土壤含水率在较低吸力段和较高吸力段分别平均减小了约 30.76% 和 15.83%; Cl^- 和 SO_4^{2-} 处理土壤水分特征曲线基本重合, 土壤含水率平均绝对误差仅约 $\pm 0.003\text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$, 且与 CK 处理呈现平行状, 表明此 2 种离子对土壤持水能力的影响效果相似, 且对土壤孔隙结构的改变不明显; 而 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 处理土壤水分特征曲线明显发生上移现象, 在一定程度上改变了土壤孔隙结构, 进而使得土壤持水能力能到显著提升(图 1(b), 表 1)。图 1(b)显示, 在 $h = 0 \sim 7\,000\text{ cm}$ 内当吸力相同时, 阴性盐离子处理的土壤含水率大小表现为 $\text{CO}_3^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{CK}$, 即不同阴性盐离子对土壤持水能力的影响程度不同, 具体表现为 $\text{CO}_3^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$, 且 4 种离子均可增强土壤持水能力。与 CK 相比, 各处理土壤含水率在不同吸力段的增减程度不同, 如表 1 所示, 除 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 之外, 其余盐离子在一定程度上均能增强土壤持水能力, 且在 $h = 0 \sim 1\,000\text{ cm}$ 范围内效果不明显, 而在 $h = 1\,000 \sim 7\,000\text{ cm}$ 范围内土壤持水能力显著增强, 表明吸力增加有利于该 6 种离子提高土壤持水能力, 且阴阳离子中分别以 CO_3^{2-} 和 K^+ 改善土壤持水性的效果最为显著, HCO_3^- 对于提高土壤持水能力也具有较为显著的作用。

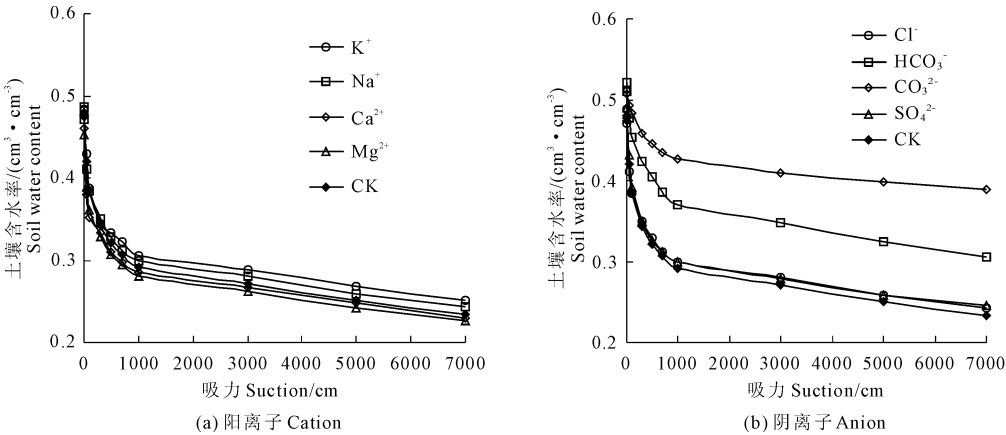


图 1 不同盐离子处理土壤水分特征曲线

Fig.1 Soil water characteristic curves for different salt ion treatments

表 1 盐离子与对照处理土壤含水率比较

Table 1 Comparison of the soil water content for salt ion and CK treatments/%

吸力段 Suction/cm	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻
0 ~ 1000	+ 2.47	+ 1.01	- 4.02	- 4.26	+ 27.19	+ 18.76	+ 2.02	+ 1.01
1000 ~ 7000	+ 6.31	+ 3.22	- 1.66	- 3.44	+ 55.68	+ 28.62	+ 3.32	+ 3.22
0 ~ 7000	+ 3.68	+ 1.66	- 3.33	- 4.02	+ 35.81	+ 21.64	+ 2.46	+ 1.66

注:表中数据为盐离子处理土壤含水率比对照处理高或低的百分比;“+”表示比对照处理高,“-”表示比对照处理低。

Note: The figures in Table 1 indicate the percentage of soil moisture for salt ion treatments higher or lower than for CK. “+” indicates that the soil moisture for salt ion treatments is higher than for CK, and “-” indicates that the soil moisture for salt ion treatments is lower than for CK.

2.2 盐基离子对土壤收缩特征曲线的影响

土壤比容和质量含水率关系曲线即为土壤收缩特征曲线,可用来根据土壤干湿变化预测田间地表收缩与膨胀、计算土壤含水率剖面、制定灌溉计划^[20]。对比图 2(a)、2(b)可以发现,阴阳盐离子对土壤收缩特征曲线具有不同程度的影响:(1) 对于阳性盐离子,4 种离子处理土壤收缩曲线形态类似,且数值差异较小,土壤比容随含水率的变化趋势一致。由此可知,K⁺、Na⁺、Ca²⁺和 Mg²⁺均可维持土壤收缩曲线的 3 个收缩段无显著变化且一致性较高;

(2) 对于阴性盐离子,SO₄²⁻和 Cl⁻对土壤收缩曲线影响较小,且与 CK 处理基本重合,而 CO₃²⁻和 HCO₃⁻导致土壤收缩曲线发生较大变化,即土壤含水率相同时与 CK 处理相比,CO₃²⁻和 HCO₃⁻导致土壤比容出现不同程度降低,使其 3 个收缩段与其他处理不同。综上,SO₄²⁻、Cl⁻以及 4 种阳性盐离子可维持土壤收缩特征曲线基本稳定,其中 Na⁺、SO₄²⁻和 Cl⁻对土壤收缩特征曲线的作用效果甚小,而 CO₃²⁻和 HCO₃⁻对其的影响效果极为明显。

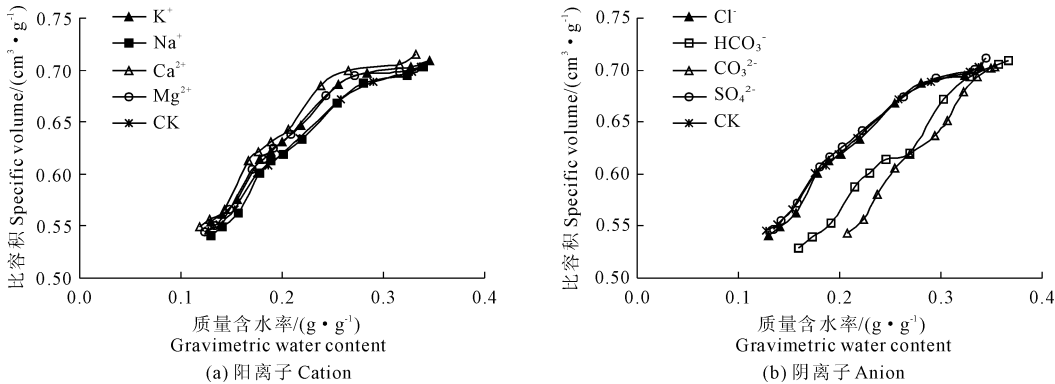


图 2 不同盐离子处理土壤收缩特征曲线

Fig.2 Soil shrinkage characteristic curves for different salt ion treatments

2.3 盐基离子对土壤收缩度和裂隙的影响

离心过程导致土体不断失水,并出现轴向沉降现象、容重逐渐增加,不同离子导致土壤容重增加幅度介于 0.39 ~ 0.47 g·cm⁻³之间。图 3 显示了测定过程中和测定结束时的土体线缩率变化和轴向收缩应变(δ_s),与 CK 处理($\delta_s = 22.50\%$)相比,K⁺、Na⁺、Ca²⁺和 Mg²⁺ 4 种阳盐离子处理 δ_s 值分别为 23.21%、24.18%、23.20%和 21.93%;Cl⁻、HCO₃⁻、CO₃²⁻和 SO₄²⁻ 4 种阴盐离子处理 δ_s 值分别为 24.18%、24.40%、20.57%和 21.63%。由此可知,在本研究设定的盐溶液浓度($\approx 1\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$)条件下,Mg²⁺、CO₃²⁻和 SO₄²⁻有利于缓解土壤发生沉降、减轻土壤垂向收缩程度;另一方面,在吸力为 300 cm

和 3 000 cm 时全部处理土壤线缩率发生较大幅度增长,故可初步将失水过程中的土体轴向沉降分为 3 个阶段,即 $h = 10 \sim 100\text{ cm}$ 、 $h = 300 \sim 1\,000\text{ cm}$ 和 $h = 3\,000 \sim 7\,000\text{ cm}$ (图 3)。

在离心作用下,土体不断失水,逐渐产生裂隙(本文省略裂隙饱和度分量示意图)。不同盐离子处理土壤裂缝的长度、宽度、密度、走向及分布特征均存在差异,采用裂隙总长度、总面积、面积密度和长度密度 4 个指标对土壤裂隙特征进行评价(见表 2),与 CK 处理相比:(1) 对于 4 种阳性盐离子,Na⁺和 Mg²⁺可同时减小土壤裂隙总长度和总面积以及相应的长度密度和面积密度,其中 Na⁺效果较好,而 K⁺和 Ca²⁺在一定程度上可加剧裂缝产生,导致裂

隙总长度和总面积增加;(2) 对于 4 种阴性盐离子,均有利于减轻土壤开裂水平,使得土壤裂隙总长度

和总面积及其长度密度和面积密度均有所减小,其中 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 效果较好,以 CO_3^{2-} 最优。

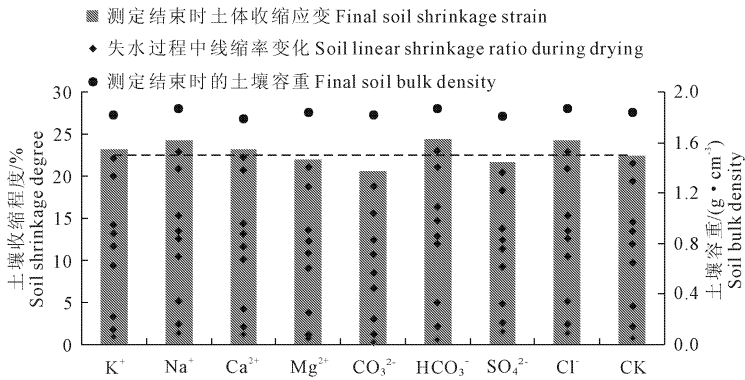


图 3 盐离子对土壤收缩和容重的影响

Fig.3 Effect of salt ions on soil shrinkage and bulk density

表 2 不同盐离子处理土壤裂缝参数

Table 2 Crack parameters for different salt ion treatments				
处理 Treatments	裂缝 总面积 Crack area /mm ²	裂缝 总长度 Crack length /mm	裂缝面 积密度 Crack area density/%	裂缝长 度密度 Crack length density /(mm·mm ⁻²)
CK	220.00	329.21	11.20	0.1677
阳性盐离子 Salt cations				
K ⁺	234.89	514.04	11.96	0.2618
Na ⁺	135.57	325.55	6.90	0.1658
Ca ²⁺	267.61	365.38	13.63	0.1861
Mg ²⁺	197.96	307.70	10.08	0.1567
阴性盐离子 Salt anions				
CO ₃ ²⁻	0.13	1.15	0.01	0.0006
HCO ₃ ⁻	24.12	70.77	1.23	0.0360
SO ₄ ²⁻	90.18	157.58	4.59	0.0803
Cl ⁻	135.57	325.55	6.90	0.1658

3 讨 论

邢旭光等^[21]研究表明,不同离子对土壤持水性能及其在失水过程中的轴向收缩和裂隙水平具有不同的作用效果,且与离子浓度存在相关性;在其研究中,离子浓度是基于咸水(TDS = 3 ~ 10 g·L⁻¹)、盐水(TDS = 10 ~ 50 g·L⁻¹)和卤水(TDS > 50 g·L⁻¹)标准而设定。另一方面,我国盐碱地面积广阔,且土壤中可溶性盐基离子类型多,而当前关于盐碱土壤水分特征曲线和收缩特征曲线的研究多是针对富含 Na⁺ 的土壤而展开^[19,22-24],存在一定局限性。为消除试验随机误差、提高研究可信度,同时增加研究结果适用范围,本研究在此基础上进一步扩展了对阴性盐离子的研究,且基于微咸水(TDS = 1 ~ 3 g·L⁻¹)标准

将离子浓度设置为 1 g·L⁻¹,即本文对比研究了浓度为 1 g·L⁻¹ 的阴阳性 8 种盐离子对土壤持水能力的影响,同时对比评价了土壤失水过程中的收缩水平,使得研究结果较为丰富、完善。盐离子对土壤持水能力的影响主要受土壤结构、团聚体、离子价态等因素影响^[21],不同盐离子具有不同的化学性质、与土壤的亲和力存在差异、土壤孔隙分布特征不同^[25-26],进而对土壤物理性质的作用效果以及影响机理有所差异。有必要将土壤物理与土壤化学相结合进一步探索其作用机理。

本研究设定盐基离子浓度均约为 1 g·L⁻¹,将本研究与文献^[21]的研究结果进行结合:(1) 除 5 g·L⁻¹ Na⁺ 外,其余处理均在一定程度上降低土壤持水能力^[21];本研究则表明在浓度很低时,K⁺ 和 Na⁺ 均具有提高土壤持水能力的作用,进一步证实离子浓度与土壤持水能力之间的负相关关系。(2) 随着 Mg²⁺ 浓度降低,土壤轴向收缩程度呈现减小趋势,有利于减小土壤沉降潜力^[21];本研究进一步证实,与 CK 相比,1 g·L⁻¹ Mg²⁺ 可减小土壤轴向沉降,印证了上述推断。(3) 本研究指出,1 g·L⁻¹ Na⁺ 和 Mg²⁺ 亦有利于降低土壤裂缝评价指标值,这对已有研究成果具有补充作用。综上,土壤持水能力和土壤裂隙评价指标均与盐离子浓度具有显著相关关系。可见本研究对已有研究成果具有补充作用,完善了微咸水、咸水、盐水和卤水条件下的不同盐离子对土壤持水和收缩特征的作用效果;同时对阴性盐离子作用的研究具有一定探索性。

4 结 论

该研究中离子浓度是基于微咸水标准而设定,对于咸水、盐水和卤水条件是一种补充与完善,在已

获得研究成果基础上进行扩展,进一步得到以下结论:

1) 不同盐离子导致土壤持水能力存在差异,浓度为 $1\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 K^{+} 、 Na^{+} 和 4 种阴性盐离子均可提高土壤持水能力,阴阳盐离子分别以 CO_3^{2-} 和 K^{+} 效果最为显著, HCO_3^{-} 亦可以有效改善土壤持水性能。

2) 土体在失水过程中发生收缩现象,浓度为 $1\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 和 CO_3^{2-} 有利于减小土体轴向收缩度,不同离子收缩应变表现为 $\text{Na}^{+} > \text{K}^{+} > \text{Ca}^{2+} > \text{CK} > \text{Mg}^{2+}$ 和 $\text{HCO}_3^{-} > \text{Cl}^{-} > \text{CK} > \text{SO}_4^{2-} > \text{CO}_3^{2-}$, 其中 CO_3^{2-} 和 HCO_3^{-} 可明显改变土壤收缩特征曲线形态。

3) 浓度为 $1\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 Na^{+} 、 Mg^{2+} 和 4 种阴性盐离子均可同时减小土壤裂隙总长度和总面积以及相应的长度密度和面积密度;阴阳盐离子中分别以 CO_3^{2-} 和 Na^{+} 效果最为显著。

参 考 文 献:

[1] 冉艳玲,王益权,张润霞,等.保水剂对土壤持水特性的作用机理研究[J].干旱地区农业研究,2015,33(5):101-107.

[2] 邢旭光,赵文刚,马孝义,等.土壤水分特征曲线测定过程中土壤收缩特性研究[J].水利学报,2015,46(10):1181-1188.

[3] Zhou W H, Yuen K V, Tan F. Estimation of soil-water characteristic curve and relative permeability for granular soils with different initial dry densities[J]. Engineering Geology, 2014, 179: 1-9.

[4] Mohammadi M H, Meskini-Vishkaee F. Predicting soil moisture characteristic curves from continuous particle-size distribution data[J]. Pedosphere, 2013, 23(1): 70-80.

[5] Shwetha P, Varija K. Soil water retention curve from saturated hydraulic conductivity for sandy loam and loamy sand textured soils[J]. Aquatic Procedia, 2015, 4: 1142-1149.

[6] Thyagaraj T, Rao S M. Influence of osmotic suction on the soil-water characteristic curves of compacted expansive clay [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136 (12): 1695-1702.

[7] Gao H, Shao M. Effects of temperature changes on soil hydraulic properties[J]. Soil and Tillage Research, 2015, 153: 145-154.

[8] Ugarte-Nano C C, Nicolardot B, Quinche M, et al. Effects of inte-

grated weed management based cropping system on the water retention of a silty clay loam soil[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 156: 74-82.

[9] 王志超,李仙岳,史海滨,等.农膜残留对土壤水动力参数及土壤结构的影响[J].农业机械学报,2015,46(5):101-106,140.

[10] Leung A K, Garg A, Ng C W W. Effects of plant roots on soi-water retention and induced suction in vegetated soil[J]. Engineering Geology, 2015, 193: 183-197.

[11] 邢旭光,柳 烨,马孝义.土壤添加物对土-水曲线和土体收缩的影响[J].水科学进展,2016,27(1):40-48.

[12] 高会议,郭胜利,刘文兆,等.不同施肥土壤水分特征曲线空间变异[J].农业机械学报,2014,45(6):161-165,176.

[13] Stoof C R, Wesseling J G, Ritsema C J. Effects of fire and ash on soil water retention[J]. Geoderma. 2010, 159: 276-285.

[14] Ren Jianhua, Li Xiaojie, Zhao Kai, et al. Study of an on-line measurement method for the salt parameters of soda-saline soils based on the texture features of cracks[J]. Geoderma, 2016, 263: 60-69.

[15] He B, Cai Y, Ran W, et al. Spatial and seasonal variations of soil salinity following vegetation restoration in coastal saline land in eastern China[J]. Catena, 2014, 118: 147-153.

[16] Pauchard L, Parisse F, Allain C. Influence of salt content on crack patterns formed through colloidal suspension desiccation[J]. Physical Review E, 1999, 59: 3737.

[17] Lima L A, Grismer M E. Soil crack morphology and soil salinity[J]. Soil Science, 1992, 153(2): 149-153.

[18] 张中彬,彭新华.土壤裂隙及其优先流研究进展[J].土壤学报,2015,52(3):477-488.

[19] Fattah M Y, Yahya A Y, Al-Hadidi M Th, et al. Effect of salt content on total and matric suction of unsaturated soils[J]. European Scientific Journal, 2013, 9: 228-245.

[20] 杨绍锴,黄元仿.关于土壤收缩特征曲线的探讨[J].土壤通报,2007,38(4):749-752.

[21] 邢旭光,马孝义,康端刚.盐阳离子类型及浓度对土壤持水及干缩开裂的作用效果[J].农业工程学报,2016,32(9):115-122.

[22] 栗现文,周金龙,靳孟贵,等.高矿化度土壤水分特征曲线及拟合模型适宜性[J].农业工程学报,2012,28(13):135-141.

[23] 孙凯强,唐朝生,王 鹏,等.盐分对土体干缩开裂的影响[J].工程地质学报,2015,23(增刊):77-83.

[24] 栗现文,周金龙,赵玉洁,等.高矿化度对砂性土毛细水上升的影响[J].农业工程学报,2011,27(8):84-89.

[25] 李学垣.土壤化学[M].北京:高等教育出版社,2001.

[26] 李海云,王秀峰.不同阴离子化肥对设施土壤理化性状的影响研究[J].中国生态农业学报,2004,12(4):126-128.