

引用格式:王则玉,蒲胜海,许咏梅,等.新疆非常规水滴灌对盐碱土水盐运移及脱盐效率的影响[J].资源科学,2026,48(4):1014-1024. [Wang Z Y, Pu S H Xu Y M, et al. Effects of drip irrigation with unconventional water on water-salt transport and desalination efficiency in saline-alkali soils of Xinjiang[J]. Resources Science, 2026, 48(4): 1014-1024.] DOI: 10.18402/resci.2026.04.18

# 新疆非常规水滴灌对盐碱土水盐运移及脱盐效率的影响

王则玉<sup>1,2,3</sup>, 蒲胜海<sup>1,2,3</sup>, 许咏梅<sup>1</sup>, 杨迎盈<sup>2,3</sup>, 刘小利<sup>2,3</sup>, 马兴旺<sup>1,2,3</sup>

(1. 新疆维吾尔自治区农业科学院, 乌鲁木齐 830091; 2. 农业农村部西北绿洲农业环境重点实验室, 乌鲁木齐 830091; 3. 库尔勒农业面源污染新疆野外科学观测研究站, 库尔勒 841000)

**摘要:**【目的】探究新疆不同类型非常规水对盐碱土水盐运移及脱盐效率的影响,为水资源高效利用与盐碱地改良提供技术支撑。【方法】以新疆典型中重度盐碱土为对象,通过室内土柱模拟试验,设置微咸水(T1)、磁化渠道水(T2)、磁化微咸水(T3)、电解水(T4)4种非常规水处理及常规处理水对照(CK),对比分析不同水源对土壤水盐垂直运移、pH及脱盐效率的影响。【结果】①4种非常规水均提升土壤入渗速率、缩短湿润锋运移时间,入渗用时较CK缩短2.76%~35.83%,入渗速率由高到低依次为T1>T2>T3>T4>CK,其中T1入渗速率较CK提升60.00%;各处理均可促进盐分向下迁移,土壤Cl<sup>-</sup>降幅85.60%~92.82%,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>降幅21.88%~33.77%,Mg<sup>2+</sup>降幅72.48%~82.86%,Na<sup>+</sup>降幅54.47%~67.49%,显著降低了有害离子含量。②仅T2可显著降低土壤剖面pH,平均降幅0.95%,T1、T3、T4均对土壤pH无显著影响;③整体脱盐率较CK提升幅度为-0.35%~13.37%,具体脱盐率依次为T4(54.71%)>T3(54.36%)>T2(51.13%)>CK(48.26%)>T1(48.09%),T1脱盐率较CK略降0.35%,呈负增长且存在长期积盐风险,T4脱盐效果最优但成本偏高难以规模化,T2与T3脱盐效果稳定、成本低廉,综合适用性最佳。【结论】综合脱盐效果、经济性及新疆区域土壤盐渍化突出、淡水资源短缺的资源环境特征,磁化渠道水和磁化微咸水滴灌更具有改良盐碱地和节水的优势,二者协同应用是破解新疆农业土壤盐渍化与水资源短缺双重难题的优选方案之一。

**关键词:**非常规水;盐碱土;水盐运移;脱盐效率;新疆

DOI: 10.18402/resci.2026.04.18

## 1 引言

新疆作为我国西部重要的农业产区与后备耕地资源集中区,耕地面积超过1亿亩。受温带大陆性气候影响,新疆区域降水稀少、蒸发强烈,土壤与地下盐分易向表层累积,2023年土壤资源调查数据显示,新疆盐碱化耕地占比达31.1%<sup>[1]</sup>,严重制约了农业可持续发展。同时,新疆水资源短缺问题突出,2023年农业用水缺口达12亿m<sup>3</sup>,常规灌溉水源供给不足<sup>[2]</sup>。在此背景下,合理开发利用非常规水资源,成为破解新疆农业用水短缺和土壤盐渍化双

重瓶颈的重要途径。

非常规水资源主要包括微咸水、磁化水、电解水等,这类水资源具有来源广泛、可循环利用的特点,能够有效弥补常规灌溉水源的不足,同时在盐碱地改良中发挥重要作用。新疆区域内非常规水资源储量丰富,为农业可持续发展提供了重要支撑,且各类非常规水资源的储量与功能各具特色。

微咸水是新疆储量最丰富的非常规水资源之一,其矿化度介于淡水与盐水之间,能够在一定条件下满足作物灌溉需求,且区域储量巨大,仅塔里

收稿日期:2024-08-22;修订日期:2025-06-10

基金项目:自治区重大科技专项项目(2023A02003-5);国家重点研发计划(2021YFD1900803);自治区“三农”骨干人才培养项目(2024SNGGNT080)

作者简介:王则玉,男,新疆精河人,副研究员,主要从事节水灌溉及土壤盐碱改良研究。E-mail: 45144490@qq.com

通讯作者:许咏梅,女,广东潮州人,研究员,主要从事水肥盐调控技术研究。E-mail: xym1973@163.com

2026年4月

木盆地地下微咸水储量即超过500亿 $\text{m}^3$ ,北疆微咸水储量也相当可观,开发潜力巨大<sup>[3]</sup>;同时,微咸水灌溉可在满足作物需水的基础上,淋洗表层土壤盐分,调节土壤盐分分布,是缓解新疆水资源短缺的重要途径。磁化水并非天然存在的水资源类型,而是通过物理磁化技术对常规水(如渠道水、微咸水)进行处理后得到的改性水。对常规水实施磁化处理的核心目的在于改良盐碱地,通过改变水分子簇结构、增强水分淋盐能力,提升盐分淋洗效率与土壤入渗性能;同时,该处理无需额外开采天然水源,可依托现有水资源进行改性,适配新疆各类灌溉场景<sup>[4]</sup>。电解水同样属于改性水资源,通过电解技术改变水体离子组成,可调节土壤离子平衡、强化盐分淋洗效果,进而实现盐碱地改良,其制备可依托当地现有水源完成,无需大规模开采天然资源,在新疆干旱区盐碱地改良中具有良好的应用潜力<sup>[5]</sup>。此外,磁化微咸水将微咸水与磁化技术有机结合,与单一微咸水、单一磁化水处理存在明显差异,可实现水源保障与盐分淋洗的功能互补,避免功能重复与效果损耗。明确各类非常规水的特性、差异及应用效果,是实现其高效利用的前提。

目前,微咸水、磁化水、电解水在盐碱地改良领域已有广泛研究与应用。①微咸水灌溉的相关研究较为成熟:研究证实,适度矿化度的微咸水滴灌可在满足作物需水的同时,淋洗、降低表层土壤盐分含量,改变盐分在土壤的垂直分布<sup>[6,7]</sup>;但长期使用易引发土壤深层积盐风险,其脱盐效果与灌水矿化度、灌水定额密切相关<sup>[8-10]</sup>。②磁化水灌溉的研究主要集中于其改性后的淋盐效果,与微咸水存在本质区别(微咸水是天然非常规水资源,磁化水是改性水资源,二者可结合形成磁化微咸水):磁化水灌溉能改善土壤离子吸附特性,促进土壤中盐离子的淋洗,改善土壤理化性质,提高植物对盐碱化土壤生境的适应性<sup>[11-17]</sup>。现有相关研究中,王淦等<sup>[18]</sup>、王全九等<sup>[19]</sup>的研究均针对磁化微咸水(而非单一微咸水),其中王淦等<sup>[18]</sup>对比了磁化微咸水和普通微咸水的灌溉效果,发现磁化微咸水能够减少土壤中 $\text{Na}^+$ 的含量,有利于作物生长;王全九等<sup>[19]</sup>研究发现,磁化微咸水能够提高土壤持水能力以及表层脱盐率,矿化度为3 g/L的磁化微咸水具有更好的脱盐效果;

张瑞喜等<sup>[20]</sup>发现应用磁化水(含磁化微咸水)进行灌溉,能强化盐分淋洗效应,进一步证实了磁化改性技术对微咸水淋盐效果的提升作用。③电解水灌溉是改性水资源利用的另一种方式,其调控原理与磁化水、天然微咸水存在差异:磁化水以物理改性改善水分子结构提升淋盐效果,而电解水通过电化学反应改变水体离子组成,以调控土壤离子平衡为核心,进而强化盐分迁移能力。电解水灌溉可提升土壤饱和导水率,促进盐分向深层土壤迁移,具备较强的盐分淋洗效果。如Li等<sup>[21]</sup>通过土柱试验表明,碱性电解水灌溉可显著提升盐碱土表层脱盐效率,使0~20 cm土层脱盐率提升18.7%;Semenko等<sup>[22]</sup>在伏尔加河流域干旱区的研究认为,电解水滴灌可使土壤盐分淋洗效率提高22.3%;新疆121团电解水滴灌试验结果显示,电解水处理土壤脱盐率显著高于微咸水和磁化渠道水,但同时会导致 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$ 等离子在深层土壤累积,增大土壤次生盐渍化风险<sup>[23]</sup>。

综上,现有非常规水改良盐碱土研究,多围绕单一水源或单一改性技术展开探讨,多种改性水源与天然水源的对比研究相对有限。不同水源作用下土壤水盐运移规律、离子调控效应及综合应用潜力的对比分析仍有待完善。

为此,本文选取新疆典型中重度盐碱土为研究对象,设置微咸水、磁化渠道水、磁化微咸水、电解水及常规灌溉水试验组,通过土柱模拟试验,系统探究不同水源灌溉对土壤水盐垂直运移、盐分分布及脱盐效果的影响,分析不同水体改良特性与应用优势,为干旱区盐碱地改良及非常规水资源合理利用提供参考。

## 2 材料与方法

### 2.1 试验材料与设计

试验于2023年4—10月在石河子市农业试验站(40°56'N,81°27'E)开展,采用一维土柱入渗试验(参照王全九等<sup>[24]</sup>、韦开等<sup>[25]</sup>),装置由马氏瓶供水装置、入渗土柱及固定支架组成。土柱为透明PVC管(高85 cm、直径10 cm),底部留2 mm孔并以PVC板封堵;供试土样取自石河子市121团6连棉田0~30 cm灰漠土,自然晾干、去除碎石及植物根系后过5 mm筛备用。土柱内壁涂抹白凡士林,按1.54 g/cm<sup>3</sup>

自然容重分层装填(每层 10 cm),层间刷毛避免优势流及边缘效应,夯实边缘,总装填高度 70 cm。装填后将土柱置于铺有 3 mm 粒径、2 cm 厚石英砂的平整地面,静置 24 h 后启动试验。

供试土壤 pH 8.34,碱化度 33.46%,含盐量 22.0 g/kg,其中  $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$  离子含量分别为 0.30、4.87、9.10、1.04、0.45、0.04 和 4.75 g/kg;该土壤为砂壤土,属氯化物-硫酸盐盐渍化强碱化土壤。

试验设 5 个处理,3 组重复:微咸水(T1)、磁化渠道水(T2)、磁化微咸水(T3)、电解水(T4),以常规

渠道水(CK)为对照。其中,渠道水(CK)为对照处理,水源取自研究区农田灌溉渠道,为当地常规灌溉淡水,其理化性质见表 1。由矿化度 5.6 g/L 地下水与蒸馏水配制成矿化度 4.0 g/L 的微咸水(T1);将 CK 和 T1 分别通过 0.4 T 磁化器(水流速 2 m/s),获得磁化渠道水(T2)和磁化微咸水(T3);电解水(T4)由新疆鑫耐米生物科技有限公司生产。各处理灌溉水量一致(总滴水量 2.5 L),滴头流量 0.15 L/h,马氏瓶自动供水;土柱上端口覆膜并开小孔减少蒸发。各类灌溉水理化性质见表 1(因 T2 与 CK 理化性质一致,T3 与 T1 理化性质一致,故未列出)。

表 1 各类灌溉水理化性质

Table 1 Physicochemical properties of different types of irrigation water

处理	pH	矿化度/(g/L)	盐分离子/(mg/L)							
			$\text{HCO}_3^-$	$\text{CO}_3^{2-}$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{K}^+$	$\text{Na}^+$
渠道水(CK)	7.40	0.52	14.79	29.09	70.29	124.15	16.19	9.75	2.93	104.63
微咸水(T1)	8.17	4.00	100.22	27.47	854.24	1551.85	86.33	51.98	1.10	599.50
电解水(T4)	2.29	0	0	0	0	0	0	0	0	0

## 2.2 测定指标及方法

(1)湿润锋垂直运移距离:湿润锋是指土壤湿润部分与干土层之间形成的分界面,反映土壤水分在重力和土壤基质吸力共同作用下的运动特征。试验中记录马氏瓶水位及土柱湿润锋变化,按先密后疏原则记录入渗时间,每次读取 8 个湿润锋点取平均值作为运移深度,湿润锋达 70 cm 时停止记录。

(2)土壤 pH 值:滴灌 1 周后,用土钻取 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm、40~50 cm、50~60 cm 和 60~70 cm 各土层样品,风干碾碎后,称取 2 份 10 g 过 2 mm 筛样品置于 50 ml 烧杯,分别加入去  $\text{CO}_2$  蒸馏水、25 ml 1 mol/L KCl 溶液(土液比 1:5);搅拌 30 min、静置 30 min 后,用 PHS-3C 酸度计测定各层 pH 值。

(3)离子组成分析:各土层样品风干过 1 mm 筛,称取 10 g 土样与 50 g 蒸馏水混合制备浸提液。参照《土壤农业化学分析方法》,采用双指示剂中和滴定法测定  $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ ,硝酸银滴定法测定  $\text{Cl}^-$ ,EDTA 间接络合滴定法测定  $\text{SO}_4^{2-}$ ,EDTA 滴定法测定  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ ,火焰光度法测定  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ ;每种离子测定 3 次,土壤总含盐量为 8 种离子含量之和。土壤

脱盐率计算公式如下:

$$N = \frac{(S_1 - S_2)}{S_1} \times 100\%$$

式中: $N$ 为不同深度土层脱盐率(%); $S_1$ 为试验前各层初始土壤含盐量(g/kg); $S_2$ 为淋洗后土壤含盐量(g/kg)

## 2.3 数据处理

使用 Origin 2025 软件进行数据处理和图表绘制,采用 SPSS 20.0 软件进行单因素方差分析(LSD 法, $P < 0.05$ )。

## 3 结果与分析

### 3.1 非常规水滴灌对湿润锋运移的影响

图 1 结果表明,各处理湿润锋的入渗深度均随时间呈先快后慢趋势。当湿润锋到达 30 cm 深度时,入渗用时依次为渠道水(CK)>电解水(T4)>磁化渠道水(T2)>磁化微咸水(T3)>微咸水(T1);当湿润锋到达 70 cm 深度时,与渠道水(CK)相比,非常规水灌溉显著缩短了入渗用时,降幅为 2.76%~35.83%。T1、T2、T3、T4、CK 各处理用时依次为 4190、5270、5810、6350 和 6530 min。

从图 2 可知,各处理单位时间内平均入渗深度

2026年4月

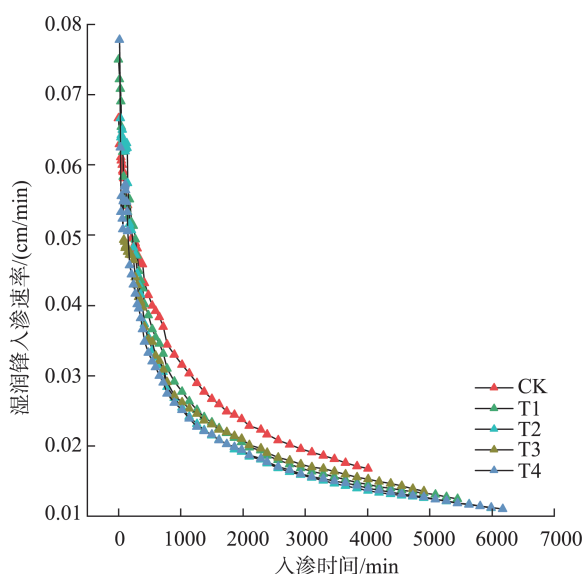


图1 湿润锋入渗速率变化曲线

Figure 1 Variation curves of wetting front infiltration distance

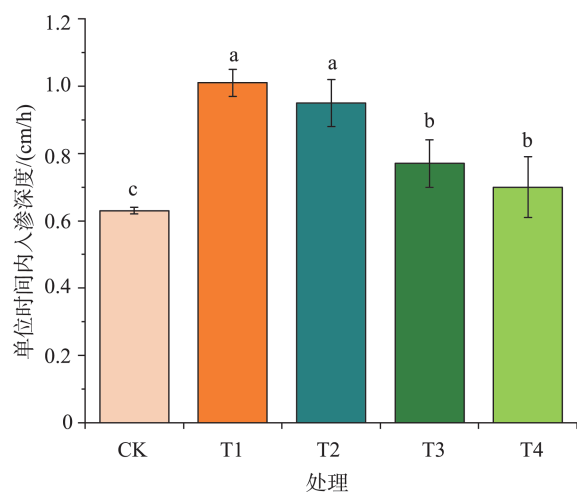


图2 各处理单位时间内平均入渗深度

Figure 2 Average infiltration depths per unit time under different treatments

注:柱上字母abc表示不同处理间差异显著( $P < 0.05$ ),下同。

由高至低的排序为:微咸水(T1)>磁化渠道水(T2)>磁化微咸水(T3)>电解水(T4)>渠道水(CK)。渠道水磁化后入渗深度明显增加,微咸水磁化后入渗深度显著减少。与渠道水(CK)相比,微咸水(T1)和磁化微咸水(T3)的相较于常规渠道水(CK),各非常规水处理湿润锋推进程度存在明显差异。从湿润锋入渗速率看,随时间推进各处理的湿润锋入渗速率均呈现递减趋势,但不同时间段减缓程度不同(图3)。600~300 min为入渗速率缓慢变化阶段,

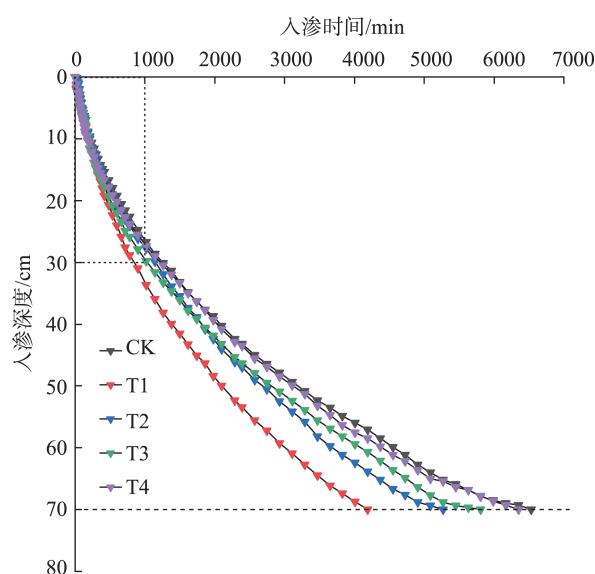


图3 湿润锋入渗深度随时间变化

Figure 3 Variation of wetting front infiltration rate with time

各处理间湿润锋推进速率差异显著。渠道水(CK)>微咸水(T1)、磁化微咸水(T3)>磁化渠道水(T2)、电解水(T4);3000 min之后,湿润锋入渗速率仍持续降低,下降趋势放缓,但未达到稳定入渗阶段。

### 3.2 非常规水滴灌对土壤剖面pH的影响

滴灌非常规水后,各处理0~70 cm土层pH值均随土壤深度增加呈上升趋势。渠道水(CK)、微咸水(T1)、磁化微咸水(T3)及电解水(T4)在0~70 cm各土层pH值处理之间无显著差异,但均显著高于磁化渠道水(T2)(图4)。磁化渠道水(T2)在0~70 cm各土层pH值均低于渠道水(CK),自上而下分别较CK降低0.61%、1.45%、1.67%、1.88%、0.93%、0.93%和0.85%,差异在30~40 cm土层最为显著。就0~70 cm土壤剖面平均pH值(图5)而言,磁化渠道水(T2)平均pH值较渠道水(CK)降低了0.95%,达到显著水平( $P < 0.05$ );微咸水(T1)、磁化微咸水(T3)和电解水(T4)的土壤剖面平均pH值较渠道水(CK)分别升高1.07%、0.47%和0.24%,增幅均未达显著水平( $P > 0.05$ )。此外,与微咸水(T1)相比,磁化微咸水(T3)平均pH值降低了0.59%,达到显著水平( $P < 0.05$ )。综上所述,仅磁化渠道水(T2)滴灌可使剖面各土层pH值显著低于渠道水(CK)处理。

### 3.3 非常规水滴灌对土壤盐分离子迁移与脱盐率的影响

不同非常规水滴灌条件下,土壤盐分离子经淋

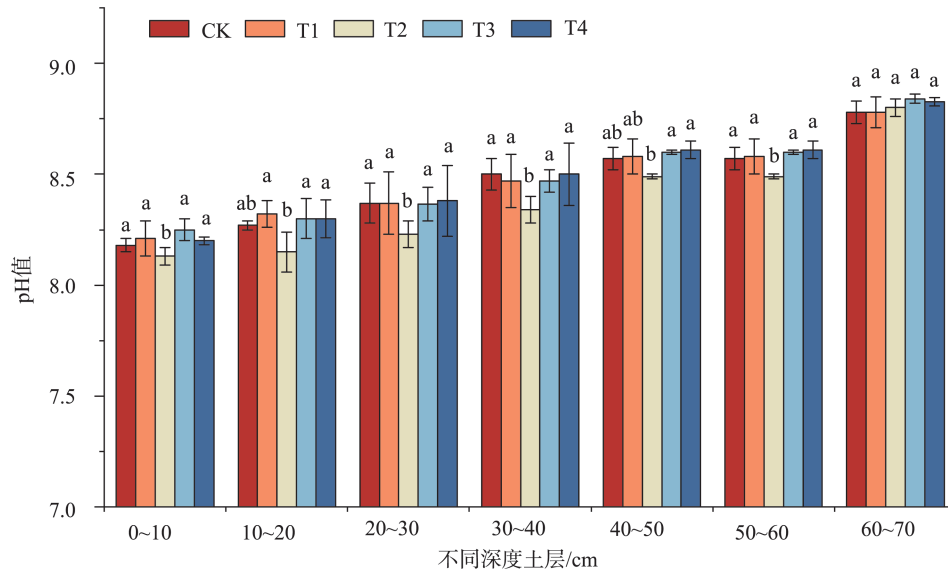


图4 土壤剖面0~70 cm各层pH值

Figure 4 pH values of each layer in 0-70 cm soil profile

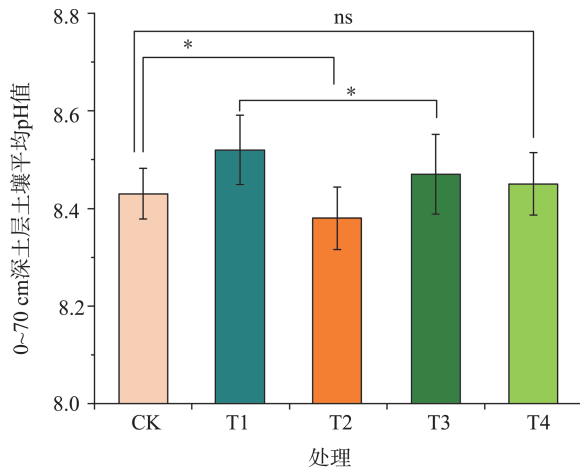


图5 土壤剖面平均pH值

Figure 5 Average pH values of soil profile

注:柱上\*表示处理间差异显著( $P < 0.05$ ), ns表示差异不显著。

溶作用向下迁移,除 $\text{Ca}^{2+}$ 含量随土层加深呈下降趋势外,其余离子均呈递增变化,且60~70 cm土层离子含量显著高于其他土层(图6)。与渠道水(CK)处理相比,磁化渠道水(T2)滴灌后各土层 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 含量降低, $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 含量增加;磁化微咸水(T3)滴灌后,各土层 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 含量均降低,仅 $\text{SO}_4^{2-}$ 含量呈增加趋势;电解水(T4)滴灌后,0~50 cm各土层 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 含量均增加,50~70 cm各土层上述离子含量降低,而 $\text{Mg}^{2+}$ 在0~70 cm全土层中含量均呈降低趋势。

由土壤剖面盐分离子平均含量分析可知(图

7),土壤中盐分离子以 $\text{SO}_4^{2-}$ 含量最高,其次为 $\text{Na}^+$ 和 $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{K}^+$ 含量最低;CK、T1、T2、T3、T4处理的脱盐率分别为48.26%、48.09%、51.13%、54.36%、54.71%。从离子含量变化来看,相较于对照组,各非常规水处理对土壤盐分离子的调控效果存在差异, $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 均呈现明显降低趋势,含量降幅分别为85.60%(T1)~92.82%(T2)、72.48%(T3)~82.86%(T4)、54.47%(T1)~67.49%(T2); $\text{SO}_4^{2-}$ 含量亦有所下降,降幅为21.88%(T2)~33.77%(T4); $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ 含量整体波动较小,无显著升高趋势。综合整体脱盐率与各盐分离子消减效果来看,电解水T4与磁化微咸水T3整体改良效果最优,磁化渠道水T2对 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$ 等主要盐离子消减作用显著,改良效果次之。

## 4 讨论

### 4.1 非常规水入渗特性对水盐运移的调控作用

水分入渗特性直接决定盐分在土壤剖面的运移距离与淋洗强度,是盐碱地滴灌改良效果的核心影响因素。非常规水通过改变水分子状态、土壤颗粒表面电学性质及孔隙结构,显著调控水分入渗过程。王全九等<sup>[24]</sup>证实,磁化处理可优化土壤持水能力,间接影响水盐运移效率;丁振瑞等<sup>[26]</sup>指出,电解水通过改变土壤酸碱环境,调节颗粒间作用力,进而改变入渗速率,为电解水改良盐碱土提供了机

2026年4月

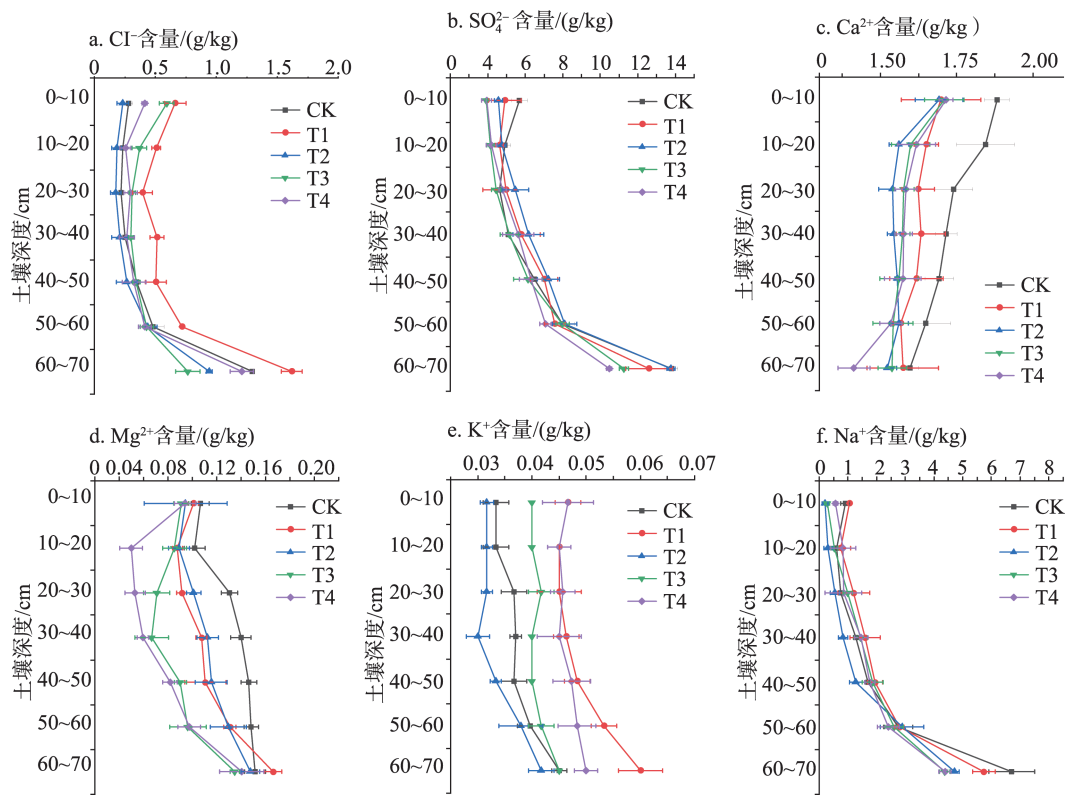


图6 各处理土壤盐分离子空间分布

Figure 6 Spatial distribution of soil salt ions under different treatments

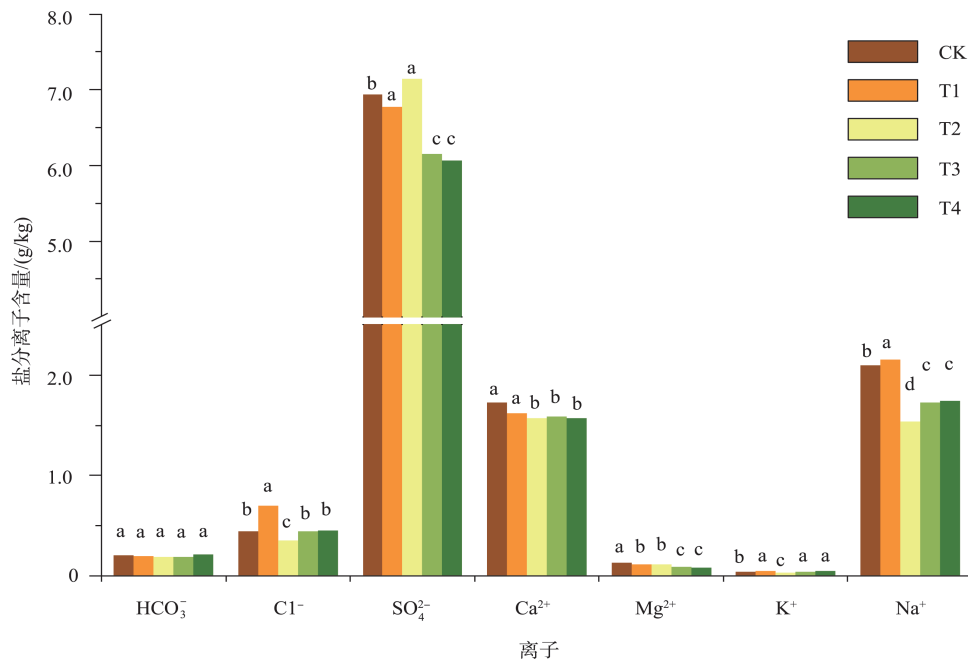


图7 土壤剖面盐分离子平均含量

Figure 7 Average salt ion contents in soil profile

理支撑。

土壤入渗特性是盐分淋洗效果评估与水源优

选的关键指标。干旱内陆区盐碱土改良高度依赖有限水资源,较快的人渗速率可在节水前提下实现

盐分深层淋洗,提升水分利用效率。本文结果显示,与渠道水(CK)相比,微咸水(T1)、磁化渠道水(T2)、磁化微咸水(T3)和电解水(T4)的入渗用时缩短2.76%~35.83%,这表明非常规水可加快湿润锋推进,强化淋盐效果,与干旱区农业节水、洗盐的核心需求高度契合。

值得注意的是,磁化水入渗机理具有复杂性,磁化处理能够改变水分子理化性质,使水体黏滞系数增大,进而减缓土壤水分运移速率。刘春成等<sup>[27]</sup>指出,磁化作用会降低土壤水分运移能力,王全九<sup>[28]</sup>也认为,磁化水表面张力虽有所降低,但黏滞系数增大仍会抑制土壤导水性能,减缓湿润锋推进速度。适度放缓的入渗过程可延长土壤水分滞留时间,促进盐分充分溶脱,对盐碱地改良具有积极作用。本文中磁化渠道水(T2)与磁化微咸水(T3)均表现出入渗速率提升的效果,与上述研究存在差异。分析其成因,主要与试验条件的特异性相关:①本文土壤为新疆典型中重度盐碱土,其颗粒组成与孔隙结构不同于常规土壤,微咸水灌溉形成的离子吸附层可进一步改善土壤孔隙连通性<sup>[29]</sup>;②磁化参数(磁场强度0.2 T)与水流速度适配性较好,削弱了黏滞系数增大对入渗的抑制作用<sup>[30]</sup>,最终呈现入渗促进效应。这一结果表明,磁化水的入渗调控效果受土壤类型与试验参数耦合影响,在干旱区盐碱土改良中具有独特优势,可作为优选水源类型。

#### 4.2 非常规水对土壤盐分离子迁移和pH的影响

在土壤pH调控方面,本文结果与以往研究存在差异:王全九等<sup>[27]</sup>发现,磁化微咸水灌溉仅使土壤表层pH略有上升,与常规水差异不显著。本文研究表明,微咸水(T1)与电解水(T4)灌溉后,土壤整体pH呈小幅上升趋势,分别升高1.07%和0.24%;磁化渠道水(T2)各土层pH整体呈下降趋势,而磁化微咸水(T3)土壤pH随土层变化呈现差异性变化,不同土层pH升降不一,整体表现为小幅降低。二者研究结果差异主要源于两方面:①土壤基础性不同,本文试验土壤为碱性盐碱土,初始pH达8.9,而王全九等<sup>[27]</sup>采用中性偏碱土壤,初始pH为7.8,土壤缓冲特性差异导致pH响应规律不同;②灌溉水质与磁化条件不同,本文磁化处理磁场强度为0.2 T,高于文献中的0.1 T,较强的磁化作用可改变

土壤胶体对氢氧根离子的吸附特性,进而对土壤pH产生调控作用<sup>[4,29]</sup>。由此可见,土壤初始理化性质与灌溉水质条件共同决定盐碱土pH的变化规律,干旱区非常规水灌溉改良过程中,需兼顾土壤背景与水质参数的匹配性。

盐分离子组成变化是评价盐碱土改良效果的核心指标,其中 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$ 过量累积会破坏土壤结构稳定性,加剧土壤盐渍化,而 $\text{Ca}^{2+}$ 为改善土壤结构的有益离子<sup>[15,31]</sup>。本文结果表明,相较于渠道水(CK),非常规水灌溉能够有效降低土壤剖面 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Na}^+$ 含量,降低主要盐离子含量水平,优化土壤盐分离子结构;各处理改良效果存在差异,磁化渠道水(T2)调控效果最为突出,电解水(T4)次之。该结果与现有研究中磁化处理可强化土壤盐分淋洗的结论基本一致<sup>[32-34]</sup>,进一步说明非常规水磁化处理对盐碱土改良具有可行性,在新疆盐碱地改良应用中具备良好潜力。

#### 4.3 新疆盐碱地改良的非常规水源筛选与应用

在干旱区应用非常规水进行盐碱地灌溉,其脱盐效率直接关系到盐碱地改良效果和作物生长条件,而成本可行性则影响生产效益与推广范围,二者共同决定了该类技术在农业生产中的适用性与可持续性。本文中,电解水(T4)脱盐率提升幅度最大(13.37%),但存在显著短板:一方面,其制备需消耗额外能源(0.8~1.2 kWh/m<sup>3</sup>),设备投入与运行成本为常规渠道水的3~5倍<sup>[35]</sup>,且长期运行中电极损耗、电解液补充等隐性成本未纳入核算;另一方面,深层土壤 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 累积(较渠道水CK增加28%~35%)易引发次生盐渍化,后续生态修复成本可能抵消短期脱盐收益,导致规模化应用受限。微咸水(T1)虽入渗速率提升最显著(较渠道水CK高出60.00%),但脱盐率呈负增长(-0.35%),长期灌溉下会加剧深层积盐<sup>[9,10,36]</sup>,增加土壤次生盐渍化风险。磁化渠道水(T2)与磁化微咸水(T3)的脱盐率较CK分别提升5.95%和12.64%,且仅需在灌溉系统中加装磁化装置,成本低廉、操作简便<sup>[24]</sup>,兼具改良效果与可行性。但需说明的是,磁化渠道水(T2)的低成本依赖于渠道水低矿化度(<0.52 g/L),若渠道水的水质波动(如矿化度升高),其脱盐效果可能下降<sup>[15,16]</sup>;磁化微咸水(T3)的预处理成

2026年4月

本较磁化渠道水(T2)高20%~30%,运行成本也有所增加,需结合区域水资源状况和微咸水水质进行合理开发利用。另外,使用磁化微咸水(T3)灌溉时需考虑作物的耐盐阈值,对于非耐盐作物应慎重应用。

结合新疆干旱区淡水资源短缺、微咸水储量丰富的资源禀赋,两种磁化水源的应用可根据区域水资源状况进行分区配置。渠道磁化水(T2)适配绿洲核心区(如天山北坡主要灌区),此类区域淡水供给相对稳定,土壤盐碱化程度较轻,可通过磁化处理提升水资源利用效率,强化轻度盐碱土的持续改良。磁化微咸水(T3)更适合地下微咸水丰富的边际盐碱耕地(如塔里木河下游),此类区域淡水缺口较大,土壤盐碱化严重,可通过预处理、磁化组合技术,在防控盐渍化风险的前提下合理利用微咸水资源。二者应用可采用分时与分区相结合的协同模式,结合区域水资源条件与土壤盐碱化差异优化配置:盐碱程度较高区域可优先采用磁化微咸水(T3)灌溉,保障盐分淋洗效果;盐碱程度偏低区域以磁化渠道水(T2)为主,控制应用成本;灌溉旺季需水量较大时,可搭配两种水源协同利用,缓解区域供水压力;非灌溉期以磁化渠道水(T2)巩固土壤改良效果,减少单一水源长期灌溉带来的生态隐患。该优化模式兼顾改良效果与成本平衡,适配干旱区水土资源特征,可为盐碱地改良与非常规水资源高效利用提供可行的技术参考。

#### 4.4 不足与展望

本文通过室内土柱模拟试验,明确了4种非常规水滴灌对盐碱土入渗特性、水盐运移、土壤pH及盐分离子分布的调控规律,揭示了不同灌溉水源对土壤脱盐效果及理化性质的影响机制。但本文仅在单一土壤类型与试验条件下开展,未来仍需结合田间尺度,综合考虑不同土壤质地、气候条件与灌溉制度等多因素耦合作用,进一步揭示非常规水滴灌条件下盐碱土水盐运移与调控机制,并探究非常规水长期灌溉对土壤理化性质及作物生长的影响,构建适宜干旱区的非常规水资源高效利用模式,为盐碱耕地改良与可持续利用提供更系统的科学依据。

## 5 结论

本文以新疆典型中重度盐渍化土壤为对象,通

过室内土柱滴灌试验,对比分析了微咸水、磁化渠道水、磁化微咸水、电解水4种非常规水的土壤水盐运移规律与脱盐效率,主要结论如下:

(1)与常规渠道水相比,4种非常规水均可不同程度提高土壤水分入渗速率、缩短湿润锋运移时间、降低土壤剖面 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 等有害盐分含量,并对土壤pH产生调控作用,脱盐率较对照提升0.35%~13.37%,在盐碱地改良中均表现出一定应用潜力。其中,磁化渠道水可显著降低剖面pH,磁化微咸水在加快入渗与协调盐分离子迁移方面优势明显,二者脱盐率分别较对照提高5.95%和12.64%,改良效果稳定且生态友好;电解水脱盐率最高,但易造成部分离子在表层累积,且制备成本高、推广受限;微咸水入渗速率最快,却存在长期灌溉导致的积盐风险。

(2)综合脱盐效果、运行成本与区域水资源禀赋,磁化渠道水适合绿洲灌区有限淡水的高效安全利用,磁化微咸水更契合干旱区微咸水储量大、淡水短缺的资源特征,可在防控盐渍化前提下实现其规模化安全灌溉。二者协同应用,可为干旱区水资源高效利用与盐碱耕地改良提供技术支撑。

#### 参考文献(References):

- [1] 苏媛,田长彦,买文选,等.滴灌条件下西北干旱区农田生物排盐研究进展与展望[J].土壤学报,2023,60(4):925-938.[Su Y, Tian C Y, Mai W X, et al. Progress and prospect of biological salt removal from farmland under drip irrigation in arid area of north-west China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(4): 925-938.]
- [2] 尹飞虎,张富仓.新疆农业节水与水资源高效利用的对策与建议[J].水资源与水工程学报,2025,36(2):1-8.[Yin F H, Zhang F C. Countermeasures and recommendations for agricultural water conservation and high-efficient water resources utilization in Xinjiang[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2025, 36(2): 1-8.]
- [3] 崔丙健,高峰,胡超,等.非常规水资源农业利用现状及研究进展[J].灌溉排水学报,2019,38(7):60-68.[Cui B J, Gao F, Hu C, et al. The use of brackish and reclaimed wastewater in agriculture: A review[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(7): 60-68.]
- [4] Saju S M, Rani T S, Pillai S P. Magnetized irrigation and its potential in sustainable agriculture: A review[J]. Journal of Experimental Agriculture International, 2024, 46(10): 593-602.

- [5] 肖伟, 李信. 电解水农业技术应用指导[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2021. [Xiao W, Li X. Application Guide for Electrolyzed Water Agriculture Technology[M]. Chengdu: University of Electronic Science & Technology Press, 2021.]
- [6] Xu Q, Xu Y B, Xia H J, et al. Optimizing brackish water irrigation strategies: Promoting the ecological and economic benefits of salt wasteland utilization[J]. *Agricultural Water Management*, 2025, DOI: 10.1016/j.agwat.2025.109652.
- [7] 周田田, 韩冬梅, 宋献方, 等. 干旱区滴灌水盐调控改良重度盐碱地棉田的包气带水分运移分析[J]. *资源科学*, 2018, 40(4): 818–828. [Zhou T T, Han D M, Song X F, et al. Water movement through unsaturated zones in the severe saline-alkali cotton fields in inland arid regions under water and salt regulation by drip irrigation[J]. *Resources Science*, 2018, 40(4): 818–828.]
- [8] Qiu H, Tian G L, Liu J Y, et al. Legacy effects of long-term brackish groundwater irrigation on bacterial communities in wheat rhizosphere and yield performance[J]. *Agronomy*, 2025, 15(12): 2732–2732.
- [9] 胡宏昌, 田富强, 张治, 等. 干旱区膜下滴灌农田土壤盐分非生育期淋洗和多年动态[J]. *水利学报*, 2015, 46(9): 1037–1046. [Hu H C, Tian F Q, Zhang Z, et al. Soil salt leaching in non-growth period and salinity dynamics under mulched drip irrigation in arid area[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 46(9): 1037–1046.]
- [10] 曹林波, 王胜. 膜下滴灌条件下土壤水盐运移特征浅析[J]. *湖北农业科学*, 2020, 59(S1): 4–8. [Cao L B, Wang S. Analysis of soil water and salt movement characteristics under sub-membrane drip irrigation[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2020, 59(S1): 4–8.]
- [11] Guo K, Feng X H, Liu X J, et al. Long-term freezing saline water irrigation and cotton cultivation improved soil properties and maintained low salinity in the root zone of coastal saline soil[J]. *Soil Use and Management*, 2024, DOI: 10.1111/sum.13117.
- [12] Malik M A, Nadeem S M, Ibrahim M, et al. Effective use of brackish water for improving soil properties and chickpea (*Cicer arietinum*) growth through organic amendments[J]. *Soil and Environment*, 2015, 34(1): 65–74.
- [13] 郭凯, 张秀梅, 李向军, 等. 冬季咸水结冰灌溉对滨海盐碱地的改良效果研究[J]. *资源科学*, 2010, 32(3): 431–435. [Guo K, Zhang X M, Li X J, et al. Effect of freezing saline water irrigation in winter on the reclamation of coastal saline soil[J]. *Resources Science*, 2010, 32(3): 431–435.]
- [14] 徐莉, 唐金, 陈淑英. 不同磁化水处理下盐渍化土壤脱盐效果研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2019, 37(5): 211–217. [Xu L, Tang J, Chen S Y. Effects of different magnetized-water treatments on soil desalinization[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2019, 37(5): 211–217.]
- [15] 李国苗, 刘霞, 王丽萍, 等. 磁化水滴灌对盐碱化农田土壤水盐及离子分布的影响[J]. *水土保持学报*, 2025, 39(4): 187–197. [Li G M, Liu X, Wang L P, et al. Effects of magnetized water drip irrigation on soil water, salt and ion distribution in saline-alkali farmland[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2025, 39(4): 187–197.]
- [16] 王艳红, 杨小刚. 磁化水处理技术及其在农业上的应用[J]. *农业工程*, 2014, 4(5): 74–77. [Wang Y H, Yang X G. Magnetized water treatment technology and its application in agriculture[J]. *Agricultural Engineering*, 2014, 4(5): 74–77.]
- [17] 蔡典雄, 胡育骄, 赵全胜, 等. 海冰水灌溉配合农艺措施对棉田土壤水盐动态的影响[J]. *资源科学*, 2010, 32(3): 457–465. [Cai D X, Hu Y J, Zhao Q S, et al. Effects of agronomic practices on soil water-salt dynamics in cotton fields under sea ice water irrigation conditions[J]. *Resources Science*, 2010, 32(3): 457–465.]
- [18] 王录, 郭建耀, 刘秀梅, 等. 磁化水灌溉对盐渍化土壤生化性质的影响[J]. *核农学报*. 2018, 32(1): 150–156. [Wang L, Guo J Y, Liu X M, et al. Effects of irrigation with magnetized salty water on biochemical properties of salty soil[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2018, 32(1): 150–156.]
- [19] 王全九, 许紫月, 单鱼洋, 等. 磁化微咸水矿化度对土壤水盐运移的影响[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(7): 198–206. [Wang Q J, Xu Z Y, Shan Y Y, et al. Effect of salinity of magnetized brackish water on salt and water movement[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(7): 198–206.]
- [20] 张瑞喜, 王卫兵, 褚贵新. 磁化水在盐渍化土壤中的入渗和淋洗效应[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(8): 1634–1641. [Zhang R X, Wang W B, Chu G X. Impacts of magnetized water irrigation on soil infiltration and soil salt leaching[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(8): 1634–1641.]
- [21] Lu J Y, Qu Z, Li M J, et al. Effects of ionized water irrigation on organic nitrogen mineralization in saline-alkali soil in China[J]. *Agronomy*, 2023, DOI: 10.3390/agronomy13092285.
- [22] Semenok S Y, Lytov M N, Chushkin A N, et al. Agroecological assessment of the effectiveness of irrigation of tomato using electrolyzed water[J]. *Agricultural Ecology of South Russia*, 2019, 14(3): 61–70.
- [23] Jiang Z B, Wang Q J, Ning S R, et al. Growth and yield response and water use efficiency of cotton under film-mulched drip irrigation to magnetized ionized water and *bacillus subtilis* in saline soil in Xinjiang[J]. *Agronomy*, 2023, DOI: 10.3390/agronomy13061644.
- [24] 王全九, 张继红, 门旗, 等. 磁化或电离化微咸水理化特性试验[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(10): 60–66. [Wang Q J, Zhang J H, Men Q, et al. Experiment on physical and chemical characteristics of activated brackish water by magnetization or ionization[J].

2026年4月

- Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(10): 60–66.]
- [25] 韦开, 张继红, 王全九, 等. 磁化微咸水及石膏改良对土壤水盐运移的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(1): 125–131. [Wei K, Zhang J H, Wang Q J, et al. Effects of magnetized saline water and gypsum amelioration on soil water–salt movement[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(1): 125–131.]
- [26] 丁振瑞, 赵亚军, 陈凤玲, 等. 磁化水的磁化机理研究[J]. 物理学报, 2011, 60(6): 432–439. [Ding Z R, Zhao Y J, Chen F L, et al. Magnetization mechanism of magnetized water[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(6): 432–439.]
- [27] 王全九, 解江博, 张继红, 等. 磁场强度对磁化水入渗和土壤水盐运移特征的影响[J]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 292–298. [Wang Q J, Xie J B, Zhang J H, et al. Effects of magnetic field strength on magnetized water infiltration and soil water and salt movement[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 292–298.]
- [28] 赵雪, 王照熙, 张文倩, 等. 水磁化处理对水肥溶液中黏性颗粒絮凝沉降的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(3): 114–124. [Zhao X, Wang Z X, Zhang W Q, et al. The efficacy of magnetization in enhancing flocculation and sedimentation of clay particles[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(3): 114–124.]
- [29] Abdelsalam H, Mostafa H, El-Ansary M, et al. Magnetization treatment effect on some physical and biological characteristics of saline irrigation water[J]. Scientific Reports, 2025, DOI: 10.1038/s41598-025-04297-6.
- [30] Wang L, Blanchy G, Cornelis W, et al. Changes in soil hydraulic and physio-chemical properties under treated wastewater irrigation: A meta-analysis[J]. Agricultural Water Management, 2024, DOI: 10.1016/j.agwat.2024.108752.
- [31] Suvendran S, Johnson D, Acevedo M, et al. Electromagnetic water treatment and soil compost incorporation to alleviate the impact of soil salinization[J]. Water, 2024, 16(11): 1577–1577.
- [32] 彭永倩, 王则玉, 朱连勇, 等. 磁化微咸水对新疆盐渍土壤水分入渗及盐分淋出特征的影响[J]. 节水灌溉, 2024, (9): 21–29. [Peng Y Q, Wang Z Y, Zhu L Y, et al. Effects of magnetized brackish water on soil water infiltration and salt leaching characteristics of saline soil in Southern Xinjiang[J]. Water Saving Irrigation, 2024, (9): 21–29.]
- [33] 李宗昱, 王全九, 张继红, 等. 磁化-去电子水对盐渍化土壤水盐运移特征影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(3): 290–295. [Li Z Y, Wang Q J, Zhang J H, et al. Effect of magnetization-de-electronic integrated activation water on water–salt transport characteristics of salinized soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(3): 290–295.]
- [34] 卜东升, 奉文贵, 蔡利华, 等. 磁化水膜下滴灌对新疆棉田土壤脱盐效果的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(S2): 163–166. [Bu D S, Feng W G, Cai L H, et al. Effects of magnetization water on desalinization in cotton farmland of under-film dripping irrigation in Xinjiang Province[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(S2): 163–166.]
- [35] 戎鑫, 李建军, 但宏兵, 等. 磁化水的特性、机理及应用研究进展[J]. 材料导报, 2022, 36(9): 65–71. [Rong X, Li J J, Dan H B, et al. Research progress on the characteristics, mechanism and application of magnetized water[J]. Material Report, 2022, 36(9): 65–71.]
- [36] 刘春成, 李毅, 郭丽俊, 等. 微咸水灌溉对斥水土壤水盐运移的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(8): 39–45. [Liu C C, Li Y, Guo L J, et al. Effect of brackish water irrigation on water and salt movement in repellent soils[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(8): 39–45.]

# Effects of drip irrigation with unconventional water on water-salt transport and desalination efficiency in saline-alkali soils of Xinjiang

WANG Zeyu<sup>1,2,3</sup>, PU Shenghai<sup>1,2,3</sup>, XU Yongmei<sup>1</sup>, YANG Yingying<sup>2,3</sup>,  
LIU Xiaoli<sup>2,3</sup>, MA Xingwang<sup>1,2,3</sup>

(1. Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830091, China; 2. Key Laboratory of Agro-Environment of Northwest Oasis, Ministry of Agriculture, Urumqi 830091, China; 3. Xinjiang Field Scientific Observation and Research Station for Agricultural Non-Point Source Pollution in Korla, Korla 841000, China)

**Abstract:** [Objective] This study aims to investigate the effects of different types of unconventional water on water-salt transport and desalination efficiency in saline-alkali soils of Xinjiang, thereby providing technical support for the efficient utilization of water resources and amelioration of saline-alkali land. [Methods] Taking typical moderate and severe saline-alkali soils in Xinjiang as the research object, indoor soil column simulation experiments were conducted. Four unconventional water treatments—brackish water (T1), magnetized channel water (T2), magnetized brackish water (T3), and electrolyzed water (T4)—and a conventional channel water control (CK) were established to compare and analyze the effects of different water sources on vertical soil water-salt transport, pH, and desalination efficiency. [Results] (1) The four types of unconventional water all increased soil infiltration rates, shortening infiltration time by 2.76%–35.83% compared with CK. They also reduced the concentrations of harmful ions such as  $\text{Cl}^-$  and  $\text{Na}^+$ , resulting in an increase in the desalination rate by 0.35% to 13.37% relative to CK. (2) In terms of soil pH changes, drip irrigation with T1, T3, and T4 did not significantly alter soil profile pH, while only T2 significantly reduced pH, with an average decrease of 0.95%. (3) Overall, T1 showed the fastest infiltration but a negative change in desalination rate (−0.35%), posing a risk of long-term salt accumulation. The desalination rates of T2 and T3 increased by 5.95% and 12.64%, respectively, demonstrating stable performance and low cost. T4 achieved the highest desalination rate (54.71%), but its high cost limited its large-scale application. [Conclusion] Considering desalination performance, economic efficiency, and regional water resource characteristics, drip irrigation with magnetized channel water and magnetized brackish water offers greater advantages in saline-alkali land amelioration and water saving. Their synergistic application represents one of the preferred solutions for addressing the dual challenges of agricultural water scarcity and soil salinization in Xinjiang.

**Key words:** unconventional water; saline-alkali soils; water-salt transport; desalination efficiency; Xinjiang