

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2025.04.039

CSTR: 32310.14.stbcbx.2024.04.039

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 Guomiao, LIU Xia, WANG Liping, 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.

磁化水滴灌对盐碱化农田土壤水盐及离子分布的影响

李国苗¹, 刘霞¹, 王丽萍¹, 屈忠义^{1,2}, 李响¹, 乔天¹, 于函宏¹, 赵靖怡¹

(1. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018;

2. 内蒙古科技大学能源与环境学院, 内蒙古 包头 014010)

摘要: [目的] 为探讨不同灌溉水源滴灌条件下磁化强度对土壤水盐运移规律的影响, 明确适宜的磁场强度。[方法] 于 2023 年 5 月至 2024 年 10 月在达拉特旗进行田间试验。设置 2 种灌溉水源(黄河水 F、微咸水 B)和 4 种磁化梯度(M) (0.5 T、0.3 T、0.1 T、0 T), 探究不同处理对土壤水盐动态、盐分淋洗及离子迁移规律的影响机制。[结果] 磁化水滴灌显著提高根层土壤水分体积分数, 促进盐分淋溶, 缓解作物根层水盐胁迫, 并有效降低土壤中 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 Na^+ 的质量分数。在不同磁化强度条件下, FM 处理和 BM 处理表现出显著差异, 其中磁场强度为 0.3 T 时, FM3、BM3 处理根层土壤体积含水率和脱盐率较 FM0、BM0 分别提高 3.03%~3.35%、1.58%~3.16% 和 8.83%~14.56%、7.07%~13.62%, 同时, 对土壤 Cl^- 和 Na^+ 的脱除效果较好, FM3 处理脱除率分别达 19.17%~31.67%、33.95%~42.91%, BM3 处理分别为 5.20%~21.03%、20.41%~26.02%。磁化强度为 0.5 T 时, SO_4^{2-} 的脱除率最高, FM5 和 BM5 分别为 30.97%~35.22%、25.81%~26.02%。磁化水滴灌有效减少土壤水盐胁迫面积, 在改善土壤水盐环境方面具有潜力。通过拟合分析表明, 0.29~0.38 T 为优化根层水盐环境的适宜磁场区间。综上所述, 2 种灌溉水源磁化后滴灌均可提高根层土壤水分体积分数, 促进盐分淋溶。[结论] 磁化水滴灌显著改善根区土壤水盐环境, 0.3~0.4 T 为沿黄灌区重度盐碱化农田最适宜的磁化强度, 研究结果可为沿黄灌区盐碱地改良和水资源的高效利用提供理论依据支撑。

关键词: 盐碱地改良; 磁化水滴灌; 磁场强度; 水盐分布; 盐分离子

中图分类号: S156.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)04-0187-11

Effects of Magnetized Water Drip Irrigation on Soil Water, Salt and Ion Distribution in Saline-Alkali Farmland

LI Guomiao¹, LIU Xia¹, WANG Liping¹, QU Zhongyi^{1,2}, LI Xiang¹,

QIAO Tian¹, YU Hanhong¹, ZHAO Jingyi¹

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018;

2. School of Energy and Environment, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou, Inner Mongolia 014010)

Abstract: [Objective] To investigate the effects of magnetic field intensity on the movement patterns of soil water and salt under drip irrigation with different water sources, and to determine the optimal magnetic field strength. [Methods] A field experiment was conducted from May 2023 to October 2024 in Dalate Banner. The experiment included two types of irrigation water sources (Yellow River water [F] and slightly saline water [B]) and four levels of magnetic field intensity (M) (0.5 T, 0.3 T, 0.1 T and 0 T). The study examined the mechanisms by which different treatments affect soil water and salt dynamics, salt leaching and ion migration. [Results] Magnetized water drip irrigation significantly increased the soil volumetric water content in the crop root zone, promoted salt leaching, alleviated water-salt stress in the root zone, and effectively reduced the mass

收稿日期: 2025-03-18

修回日期: 2025-05-05

录用日期: 2025-05-13

网络首发日期 (www.cnki.net): 2025-06-09

资助项目: 国家自然科学基金项目 (52369009); 内蒙古自然科学基金项目 (2023MS05024); 盐碱地生态修复与节水减排控盐关键技术研究学科项目 (YLLKZX-NND052)

第一作者: 李国苗 (1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事盐渍化土壤水盐养分动态研究。E-mail: 1368353396@qq.com

通信作者: 刘霞 (1971—), 女, 博士, 副教授, 主要从事农业水土资源利用与水土环境调控研究。E-mail: liukasumi@126.com

http://stbcbx.alljournal.com.cn

fractions of Cl^- , SO_4^{2-} and Na^+ in the soil. Under different magnetic intensities, FM and BM treatments showed significant differences. When the magnetic field intensity was 0.3 T, the root-zone soil volumetric water content of FM3 and BM3 treatments increased by 3.03%–3.35% and 1.58%–3.16%, respectively, and the desalination rates increased by 8.83%–14.56% and 7.07%–13.62%, respectively, compared with FM0 and BM0. These treatments also achieved better Cl^- and Na^+ removal, with FM3 showing removal rates of 19.17%–31.67% and 33.95%–42.91%, and BM3 achieving 5.20%–21.03% and 20.41%–26.02%, respectively. When the magnetic field intensity was 0.5 T, SO_4^{2-} removal was most effective, with FM5 and BM5 reaching 30.97%–35.22% and 25.81%–26.02%, respectively. In addition, magnetized water drip irrigation effectively reduced areas affected by soil water-salt stress and showed potential in improving the soil water-salt environment. Fitting analysis indicated that a magnetic field range of 0.29–0.38 T was optimal for improving the root-zone water-salt environment. Drip irrigation with magnetized water using both irrigation sources can enhance root-zone soil moisture and promote salt leaching. [Conclusion] Magnetized water drip irrigation significantly improves the root-zone soil water-salt environment. A magnetic field strength of 0.3–0.4 T is optimal for highly saline-alkali farmland in the Yellow River irrigation area. These findings provide theoretical support for improving saline-alkali land and the efficient utilization of water resources in the Yellow River irrigation area.

Keywords: saline-alkali land improvement; magnetized water drip irrigation; magnetic field intensity; water-salt distribution; salt ions

Received: 2025-03-18

Revised: 2025-05-05

Accepted: 2025-05-13

Online(www.cnki.net): 2025-06-09

沿黄南岸灌区地处干旱半干旱地带,农业生产面临水资源短缺与土壤盐碱化双重挑战。达拉特旗现有耕地 $1.86 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 其中盐碱化耕地面积达 5.72 万 hm^2 , 占比超 30%, 是自治区盐碱化耕地的主要分布区域之一。由于强烈的自然蒸发与长期过量灌溉形成土壤盐分积累-结构恶化-作物根系环境恶化的恶性循环,进而影响生态系统稳定性^[1-2]。如何有效提高水资源利用效率改善土壤盐渍化,已经成为保障沿黄南岸灌区农业可持续发展的关键任务。针对水盐调控需求,当前技术体系聚焦于灌溉模式优化、土壤结构改良及耐盐碱作物选育^[3-5]。然而,传统措施在重度盐碱区仍面临成本高、见效慢、水资源利用率不足等瓶颈。近年来,磁化技术因其能够降低灌溉水表面张力、提高溶氧量和水分渗透性,在节水灌溉与盐碱地改良邻域受到广泛关注。已有研究^[6-10]表明,磁场作用下,水分子氢键断裂,分子团簇变小,活性增强,在土壤中具有更强的渗透和溶解能力。GUO 等^[11]通过大田试验发现,磁化水滴灌显著提高耕层(0~40 cm)土壤体积含水率,其中磁化淡水处理和磁化微咸水处理较未磁化处理分别提高 6.6% 和 46.32%;朱珠等^[12]通过研究磁化不同水质滴灌对盐碱土壤盐分的影响发现,磁化微咸水土壤剖面脱盐率较未磁化处理平均增加 7.20%,磁化渠道水增加 8.99%。在土壤离子调控研究中, Cl^- 、 Na^+ 、 SO_4^{2-} 是盐碱化和次生盐碱化土壤中的主导盐

分离离子,直接关系着土壤结构、植物生长和土壤环境,磁化水通过调控离子的迁移可有效缓解土壤盐害,从而提升农业生产力;李夏等^[13]研究发现,磁化水滴灌可显著降低土壤全盐量,提高 Na^+ 和 Cl^- 的淋洗效率;徐莉等^[14]指出,当磁化强度为 1 000 mT 时,新疆盐渍化土壤脱盐率可达 57.47%, Cl^- 、 SO_4^{2-} 质量分数分别降低 54.35%、31.82%;卜东升等^[15]通过 3 a 的膜下滴灌试验研究发现,磁场强度为 0.3 T 时,0~60 cm 土层脱盐率达 20.04%~30.06%,同时对 Cl^- 、 SO_4^{2-} 质量分数也显著降低。尽管已有研究证明磁化水滴灌在盐碱地改良中具有较好的应用潜力,但是仍存磁场参数优化不足,脱盐效果受盐碱程度、土壤类型及灌溉水源条件影响较大的问题。本研究通过拓展磁化水适用性研究,探讨不同水源条件下磁化水滴灌对沿黄灌区重度盐碱化农田的应用效果。通过引入离子动态分析,综合评估磁化水对 Cl^- 、 Na^+ 、 SO_4^{2-} 等离子迁移模式的影响,优化磁场参数,提出适用于沿黄灌区盐碱地改良的最优磁场强度范围,为磁化水的推广应用提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于内蒙古自治区鄂尔多斯市达拉特旗树林召镇东海新村试验基地($40^\circ 29' \text{N}$, $109^\circ 52' \text{E}$),地处草原向荒漠过渡的干旱半干旱地带,平均海

拔 1 004 m。该地区属于大陆性高原气候,年平均降水量 301.9 mm,年平均蒸发量是其 6.2 倍,年平均气温 6.6 ℃,全年无霜期 135~150 d,平均日照时间

3 100 h。2023 年及 2024 年高丹草生育期间降雨量分别为 185.9、353.8 mm。试验区气象及地下水数据见图 1。

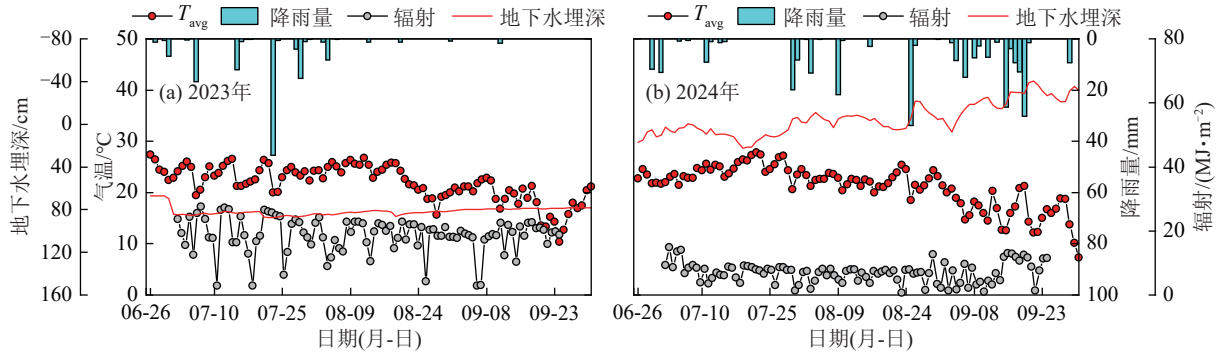


图 1 2023—2024 年 6—9 月高丹草生育期气象数据

Fig. 1 Meteorological data during the growth period of *sorghum bicolor*×*sudanense* from June to September, 2023–2024

试验区 0~100 cm 土壤类型为粉砂壤土,体积质量率),盐分平均质量分数为 8.77~10.10 g/kg, pH 为 8.5,约为 1.41 g/cm³,田间持水量平均为 34.86%(体积含水该试验地土壤为重度盐碱土。土壤理化性质见表 1。

表 1 试验地土壤物理性质

Table 1 Soil physical properties of experimental site

土层深度/cm	土壤粒径分布/%			土壤体积质量(g·cm ⁻³)	田间持水率/%	土壤质地	pH
	<0.002 mm	0.002~0.05 mm	>0.05 mm				
0~20	4.51	56.97	35.52	1.42	36.81	粉砂壤土	8.50
20~40	4.76	66.91	28.33	1.38	35.51	粉砂壤土	8.36
40~60	4.10	72.14	23.79	1.45	36.08	粉砂壤土	8.53
60~100	4.81	70.80	24.40	1.39	32.94	粉砂壤土	8.56

1.2 试验设置

试验时间为 2023 年 5 月至 2024 年 10 月。磁化水装置由水泵、水箱、磁化器(邯郸市若腾电子科技有限公司)及输送管道组成,设置磁化 4 种梯度(M)分别为 0、0.1 T、0.3 T、0.5 T 的外置永磁磁化器,分别对黄河

水(F)(电导率为 0.94 mS/cm)和微咸水(B)(电导率为 3.2 mS/cm)进行磁化处理,与非磁化水进行对照,共形成 8 种处理,每个处理 3 次重复,共 24 个试验样地,每个小区的面积为 864 m²(36 m×24 m),各小区间设置 1 m 间隔带。田间试验布置及种植模式见图 2。

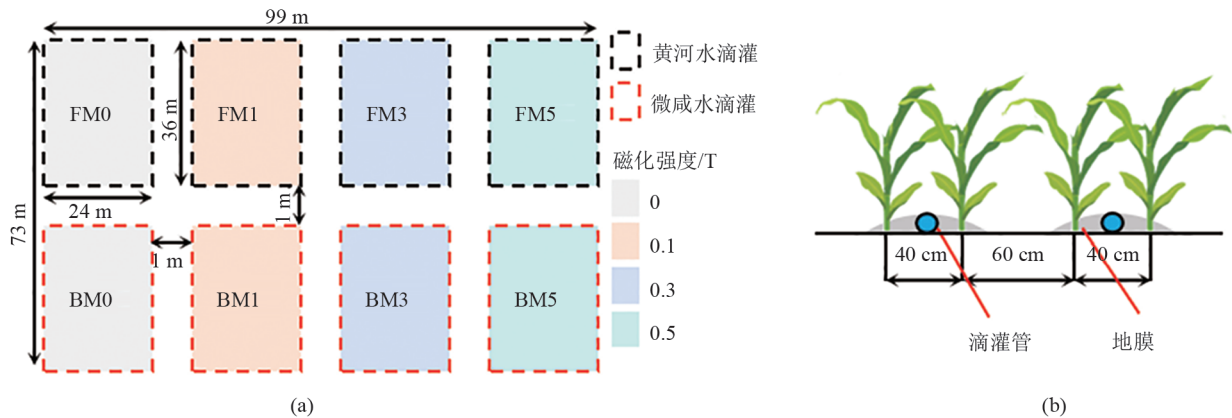


图 2 田间试验布置及种植模式示意

Fig. 2 Schematic diagram of field experiment layout and planting pattern

供试作物为高丹草(*Sorghum sudanense* hybrid)品种为“杰宝”,种植密度为 37.5 kg/hm²,行距 60 cm,株距 40 cm,播种深度 2~4 cm,种植前进行黄河水春灌,灌水量为 3 000 m³/hm²,春灌后进行深松深耕深

翻 30~40 cm,施入底肥(复合肥:N-P₂O₅-K₂O 为 12~15~18)施加量为 450 kg/hm²。高丹草于每年 6 月上旬播种,10 月收获。在高丹草播种后、苗期、拔节期、抽穗期、成熟期各灌水 1 次,共灌水 5 次,灌溉定额

180 mm。其他田间管理方式均与当地一致。在试验开始前,灌水前后,牧草生长旺盛期,收获期进行取样。各处理采用五点取样法进行取样,土壤采集深度为 1 m。

1.3 测定指标及计算方法

1.3.1 气象及地下水数据 采用 Campbell 自动气象站采集气象数据,采集频率为 2 次/h。气象数据包括降水量、太阳辐射、温度、风速和湿度。采用 HOBO 地下水位计采集地下水数据,采集频率为 6 次/d。

1.3.2 土壤体积含水率 采用烘干法测定,取土深度为 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm。

1.3.3 土壤含盐量及脱盐率 取回土壤自然风干后带回实验室,均匀混合碾压后过 1 mm 网筛,土壤过筛后与水按照质量比 1:5 制成浸提液,测定土壤全盐量、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 Na^+ 、 Cl^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 。其中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 采用 EDTA 滴定法测定; CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 采用酸滴定法测定; Cl^- 采用硝酸银滴定法测定; Na^+ 利用火焰光度法测定;土壤物理性质测定采用环刀法测定土壤体积质量和孔隙度。

土壤脱盐率(soil desalinization efficiency, SDE)是衡量灌溉淋洗效果的主要指标之一。其计算式为:

$$\text{SDE} = \left(1 - \frac{\text{SSF}}{\text{SSI}} \right) \times 100\% \quad (1)$$

式中:SSI 为生育期初土壤含盐量, g/kg;SSF 为生育期末土壤含盐量, g/kg。

1.3.4 土壤水盐分胁迫面积

高丹草是由苏丹草与高粱杂交培育而成,根据 FAO—O 中苏丹草耐盐值划分,当土壤盐分超过作物盐分胁迫阈值 9.22 g/kg 时,作物受高盐胁迫,对应高丹草相对减产量为 50%。当土壤水分体积分数小于田间持水量的 70%(灌水下限)时,对应土壤体积含水率为 24%,即为低水胁迫。本研究中盐分胁迫面积指高丹草全生育期内 0~80 cm 土层盐分质量分数超过 9.22 g/kg 时所占总面积大小。水分胁迫面积为 0~80 cm 土层土壤体积含水率低于 24% 时所占地面积大小。

水分/盐分胁迫面积占比 =

$$\left(\frac{\text{受水分/盐分胁迫面积}}{\text{区域总面积}} \right) \times 100\% \quad (2)$$

1.4 数据处理与分析

利用 Excel 2010 软件进行数据处理, Furfer23、Origin 2024 软件进行绘图, IBM SPSS Statistics 27 统计软件进行显著性分析。

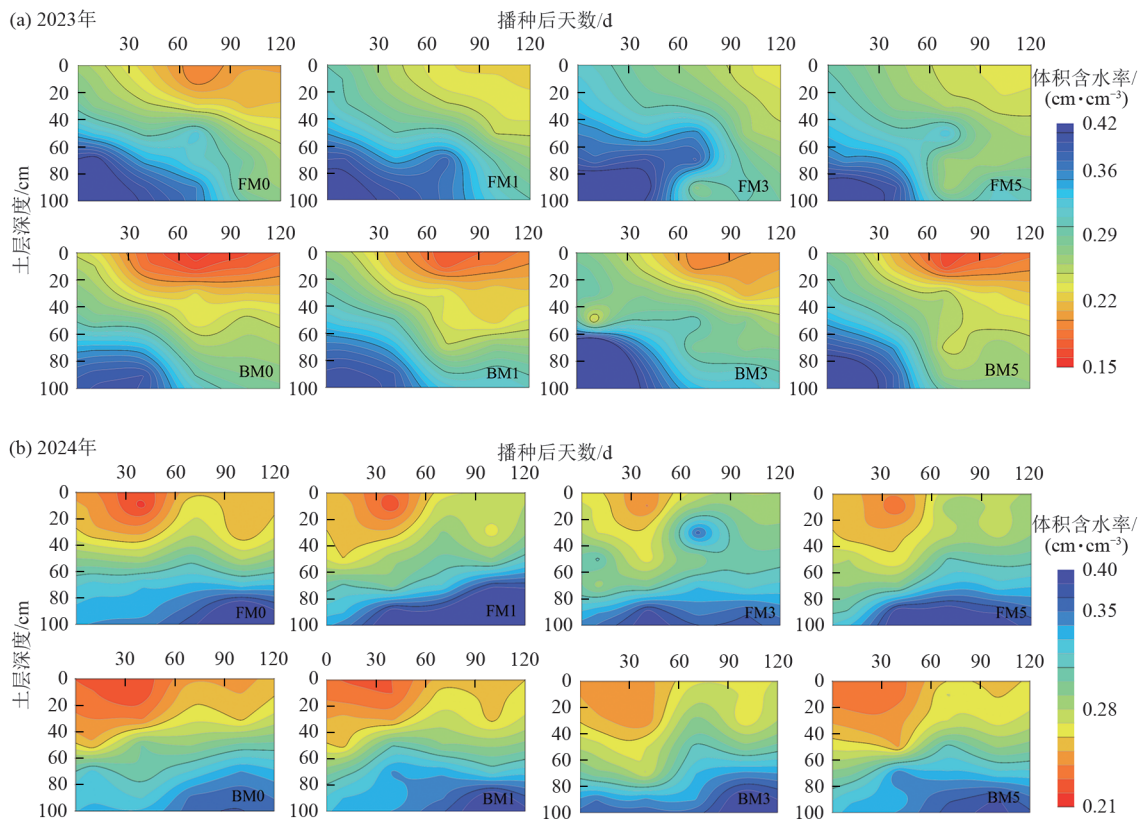
2 结果与分析

2.1 磁化水滴灌对土壤水分分布的影响

磁化水滴灌对高丹草根区土壤水分动态的影响研究表明(图 3),土壤体积含水率随作物生育期推进呈显著递减趋势,与植株需水量随生育期增加的规律相吻合。2023—2024 年数据结果表明,在 0~40 cm 土层,与未磁化处理(FM0、BM0)相比,磁化黄河水处理(FM1、FM3、FM5)土壤体积含水率分别提高 1.02%~2.53%、3.03%~3.35% 和 1.26%~2.03%,微咸水磁化处理(BM、BM3、BM5)土壤体积含水率增幅分别为 0.73%~0.69%、1.58%~3.16% 和 0.79%~2.39%,表明磁化黄河水及磁化微咸水均能增强土壤持水能力,提高水分有效性。全生育期内(DAS 0~120 d)土壤保水性表现为 $\text{M3} > \text{M5} > \text{M1} > \text{M0}$,黄河水在 0.3 T 磁化强度下的根层水分保持效果最佳,土壤平均体积含水率达 28.27%。灌溉水矿化度与磁化强度存在显著交互效应,微咸水处理(BM)整体体积含水率低于同强度黄河水处理(FM),为 1.25%~5.59%,可能与微咸水中的 Na^+ 对土壤团聚体结构的破坏作用有关,进而影响土壤持水能力。TEDESCHI 等^[16]通过 7 a 不同浓度微咸水滴灌发现,NaCl 施加量与交换性钠百分比(ESP)呈显著正相关($r=0.962, p<0.01$),同时,团聚体稳定性指数与 ESP 呈高度负相关($r<-0.96$),表明 Na^+ 导致团聚体结构破坏,从而降低土壤渗透性与持水能力,与本研究结果类似。

2.2 磁化水滴灌对土壤盐分分布的影响

土壤盐分质量分数随土层深度增加呈递减规律(图 4),其中 0~40 cm 土层盐分动态对磁化处理响应显著,表明灌溉水渗透过程主导盐分迁移路径。不同磁化强度处理对根层土壤盐分分布影响存在显著差异,生育前中期(DAS 0~90 d)各处理盐分质量分数差异较大,在生育后期(DAS 90~120 d)差异缩小,此时盐分质量分数降至最低。在播种后第 120 d,与未磁化处理相比,FM1、FM3、FM5 处理盐分质量分数分别降低 0.30~1.13、1.22~2.36、0.88~1.73 g/kg; BM1、BM3、BM5 处理分别降低 0.43~0.98、1.00~2.61、1.02~2.22 g/kg。除 BM0 处理外,2024 年 0~40 cm 土层土壤盐分质量分数较 2023 年减少 0.24~1.36 g/kg,主要受 2024 年降雨量增加的影响,导致盐分向深处迁移量增加。全生育期土壤盐分质量分数表现为 $\text{M3} > \text{M5} > \text{M1} > \text{M0}$,表明 0.3 T 磁化处理盐分质量分数低于其他处理,整体上 BM 处理盐分质量分数高于 FM 处理。其中,FM3 和 BM3 处理的土壤盐分质量分数较未磁化处理平均降低 1.69、1.81 g/kg,其中 FM3 处理的盐分质量分数比 BM3 低 23.15%。



注:F表示黄河水;B表示微咸水;M表示磁化强度;0、1、3、5分别表示磁化强度为0、0.1、0.3、0.5 T。下同。

图 3 2023—2024 年不同磁化强度下土壤水分动态分布规律

Fig. 3 Dynamic distribution patterns of soil moisture under different magnetic intensities during 2023–2024

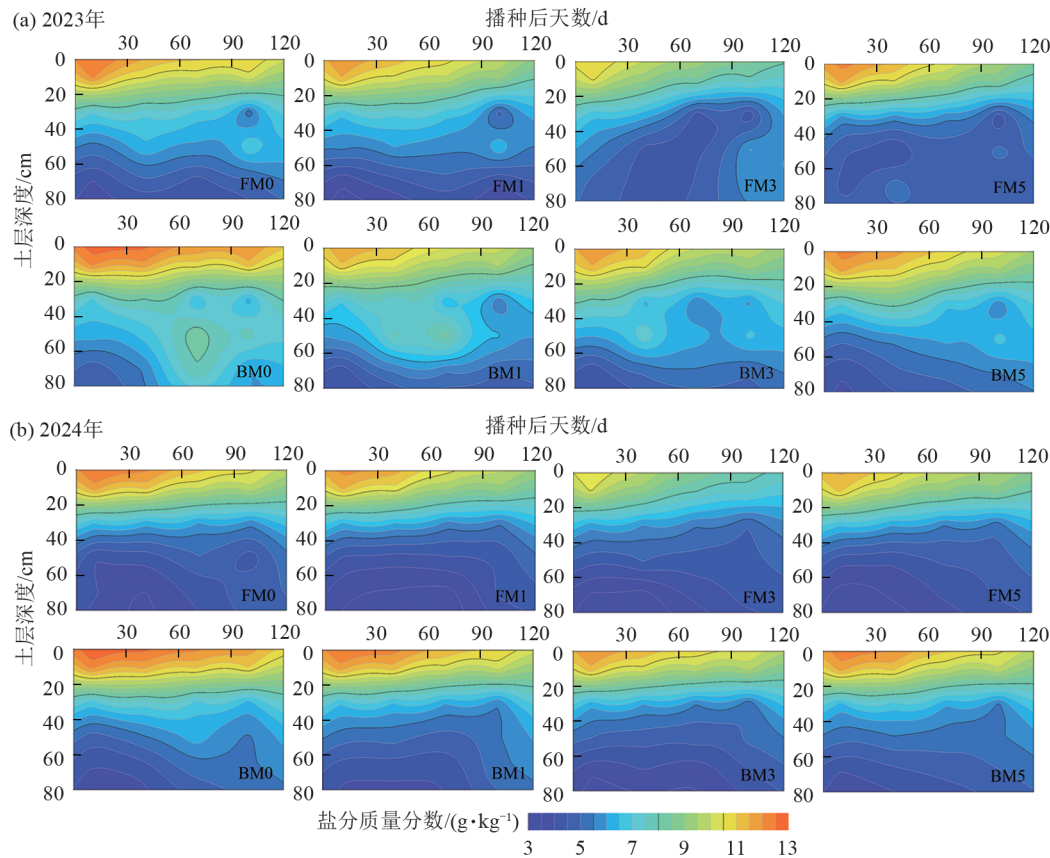


图 4 2023—2024 年不同磁化强度下土壤盐分动态分布规律

Fig. 4 Dynamic distribution patterns of soil salinity under different magnetic intensities during 2023–2024
<http://stbcbx.alljournal.com.cn>

进一步分析磁化强度对土壤脱盐率的影响表明,磁化处理脱盐效果优于未磁化处理(图5)。与未磁化处理相比,FM1、FM3、FM5处理平均脱盐率分别提升1.96%~3.91%、8.83%~14.56%和6.04%~10.54%;BM1、BM3、BM5处理分别提升6.34%~9.90%、7.07%~13.62%、6.31%~11.75%,其中,FM3处理2023年20~40 cm和2024年0~20 cm土层达到差异显著性水平($p < 0.05$),脱盐率分别达到37.43%、27.42%。磁化强度对脱盐效果呈非线性

性关系,脱盐效果表现为 $M3 > M5 > M1 > M0$,FM处理优于BM处理。2024年40~60 cm土层积盐率较低,为2.79%~13.79%,而60~80 cm积盐率较高,为21.21%~39.55%,可能是由于2024年地下水位较高,限制盐分向更深处迁移。表明磁化处理可有效提高0~40 cm土层脱盐率,但对深层土壤影响有限,40~80 cm土层的盐分受地下水位和降雨等因素影响较大,0.3 T磁场强度下脱盐效果达峰值。

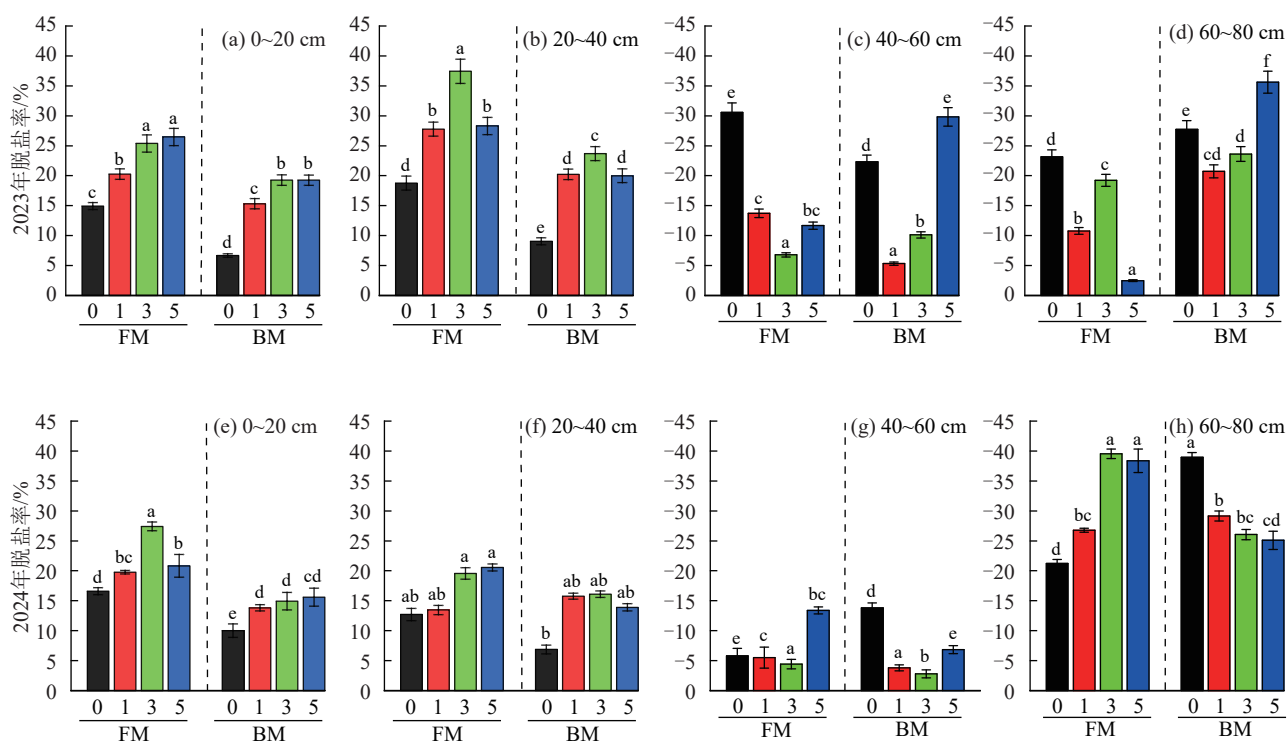


图5 2023—2024年不同磁化强度下土壤0~80 cm土层脱盐率

Fig. 5 Desalination rate of 0~80 cm soil layer under different magnetic intensities during 2023~2024

2.3 磁化水滴灌对水盐胁迫面积的影响

磁化水有效缓解土壤水盐胁迫,而微咸水灌溉则加剧胁迫(图6)。随着磁化强度增加,FM1、FM3、FM5处理水、盐胁迫面积占比较FM0分别降低8.08%~8.99%、19.61%~23.06%、9.88%~13.92%和3.99%~4.32%、13.53%~13.65%、7.17%~7.77%;BM1、BM3、BM5处理较BM0分别降低4.66%~7.43%、15.35%~23.66%、6.50%~8.52%和4.02%~4.04%、7.81%~9.84%、4.96%~5.20%。其中,水、盐胁迫面积由低到高依次为 $M3 < M5 < M1 < M0$,2023年和2024年变化规律一致。根据拟合参数得当M分别为0.29 T~0.31 T、0.32 T~0.38 T时,FM和BM处理水胁迫面积占比达到最小值,分别为6.88%~7.95%、16.59%~17.64%;当M为0.3 T~0.32 T、0.3 T时,FM和BM处理盐分胁迫面积占比达到最小值,分别为7.44%~7.72%、15.83%~

17.74%。综合表明,不同水质的最优磁化强度存在一定差异,0.29 T~0.38 T磁场区间可优化根层水盐环境,减轻胁迫效应。

2.4 磁化水滴灌对土壤盐分离子分布的影响

磁化水灌溉显著影响土壤盐分离子迁移特征,表现为随生育期推进逐级淋洗的时空分布规律(图7)。在0~40 cm耕作层中,阳离子主要以 Na^+ 为主,其次为 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} ,阴离子主要以 SO_4^{2-} 和 Cl^- 为主, HCO_3^- 质量分数较少。磁化处理降低土壤中 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 Na^+ 的质量分数。 Cl^- 和 Na^+ 在0.3 T磁场下迁移性最强,其中 Cl^- 脱除率分别达19.17%~31.67%(F)、5.20%~21.03%(B),较未磁化处理提升11.17%~14.66%和3.43%~11.01%; Na^+ 脱除率达33.95%~42.91%(F)、20.41%~26.02%(B),分别提升14.25%~25.24%和19.60%~26.86%。而磁化强度为0.5 T时, SO_4^{2-} 脱除率较高,脱除率达30.97%~

35.22%(F)、27.57%~25.81%(B),较未磁化处理分别提升8.56%~12.79%和10.92%~20.52%,但深层积累现象显著,可能对后续土壤盐分动态产生影响。磁化处理可增强水对盐分的携带能力,促进纵向迁

移,但不同磁化强度处理对盐分离子的淋洗表现出较强的离子选择性,磁化强度为0.3 T时,对 Cl^- 和 Na^+ 脱除率较高,而磁化强度为0.5 T时,对 SO_4^{2-} 脱除率最佳。

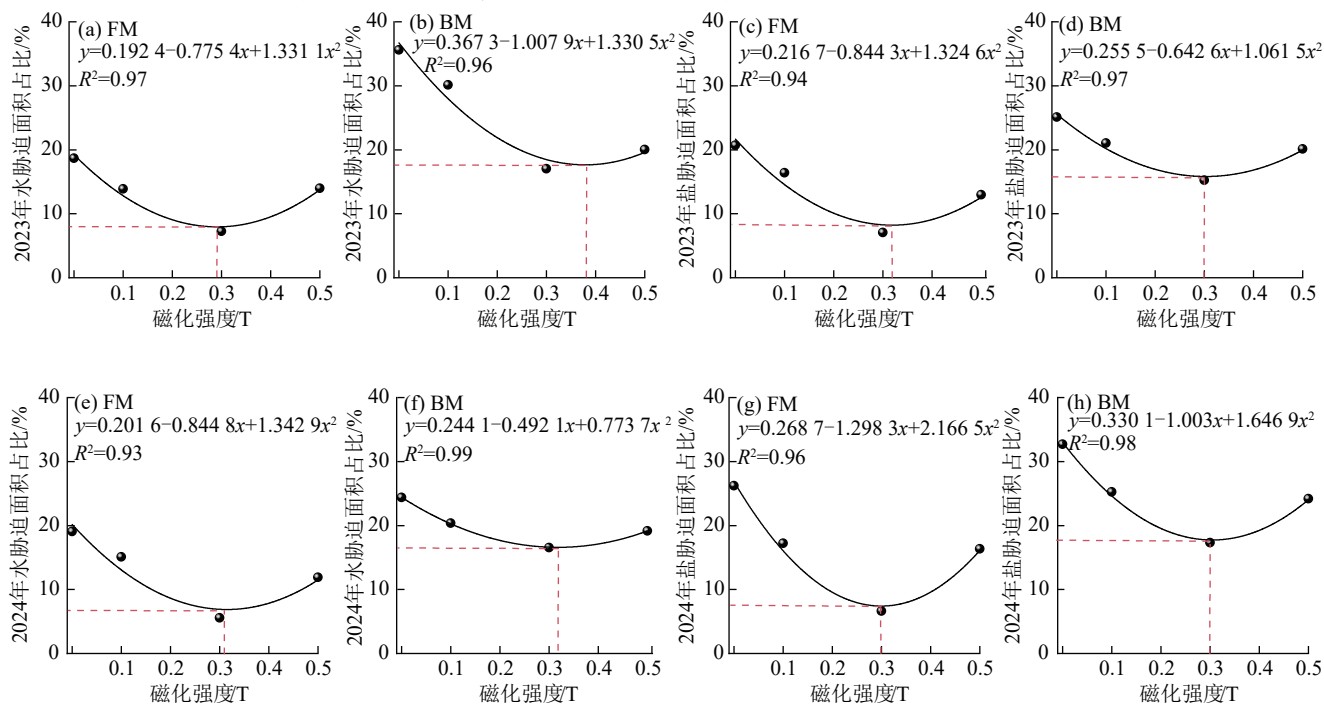


图6 2023—2024年磁场强度对土壤水盐胁迫面积的影响

Fig. 6 Effect of magnetic field intensity on area affected by soil water-salt stress during 2023–2024

2.5 土壤盐分离子相关性分析

对4种磁化强度下黄河水及微咸水处理2年的土壤盐分数据(256组)进行相关性分析,旨在探讨磁化水在改善盐碱土壤中的主导因子。由图8可知, Cl^- 和 SO_4^{2-} 与全盐量的相关性在4种磁化强度下均保持较高水平($r > 0.9$),表明二者是土壤盐分积累的主要贡献离子。 M 为0.3 T时, Na^+ 与全盐量的相关性降幅最大,从0.93下降至0.87,表明磁化处理显著促进 Na^+ 迁移; M 为0.5 T时, Ca^{2+} 与全盐量的相关性从0.53上升至0.67,表明磁化作用可能使 Ca^{2+} 在耕层滞留,从而改善土壤结构,缓解盐碱化程度。结果表明磁化水不仅有利于脱盐,还可通过调整土壤耕层离子再分布比例,优化土壤耕层环境,从而增强其改良盐碱土壤的效果。

3 讨论

本研究通过不同磁化强度处理的黄河水与微咸水滴灌试验,揭示磁化水在根层土壤水盐环境、缓解水盐胁迫及调控盐分离子动态中的关键作用。试验结果表明,磁化处理通过重构根区土壤水盐分布,显著提升0~40 cm土层土壤保水能力和脱盐效率,其中,黄河水在0.3 T磁化强度下的土壤体积含水率最高,较未磁化处理FM0提升3.03%~3.35%,该现象

与周振鹏等^[17]研究结果相类似。磁化作用通过弱化或断裂水分子氢键,将缔合态水分子团簇分解为自由单体或二聚体,导致水分表面张力降低,增强水分在土壤小孔隙中的滞留效应^[6,18]。水分入渗和湿润锋迁移速率降低,根层土壤水分体积分数增加^[19]。当更多的水分进入到土壤小孔隙中,引起水分与盐分更有效地溶解,导致土壤盐分迁移的对流和弥散作用加强,进而提高根层盐分淋洗效率,与ZLOTOPOLSKI^[20]研究结果基本一致。与未磁化处理相比,40~80 cm土层出现盐分积累现象,磁化处理组脱盐率呈现负值,且高于未磁化处理。可能是磁化作用促进盐分垂向迁移与地下水毛细上升形成“顶托效应”发生动力学失衡,深层盐分未能完全排出土体,导致局部积累^[21]。磁化处理组因水分渗透系数提高导致盐分下移量较大^[22],而对照处理因渗透性低,盐分垂向迁移总量受限,反而减少深层盐分的增量,此现象与唐胜强等^[23]关于低导水率土壤盐分阻滞效应的结论一致,表明磁化技术应用需结合地下水位调控措施。当磁场强度恒定时,微咸水处理削弱磁化效果,微咸水处理土壤体积含水率整体低于黄河水处理,差异达1.25%~5.59%,与 Na^+ 主导的渗透抑制效应密切相关^[19,24]。

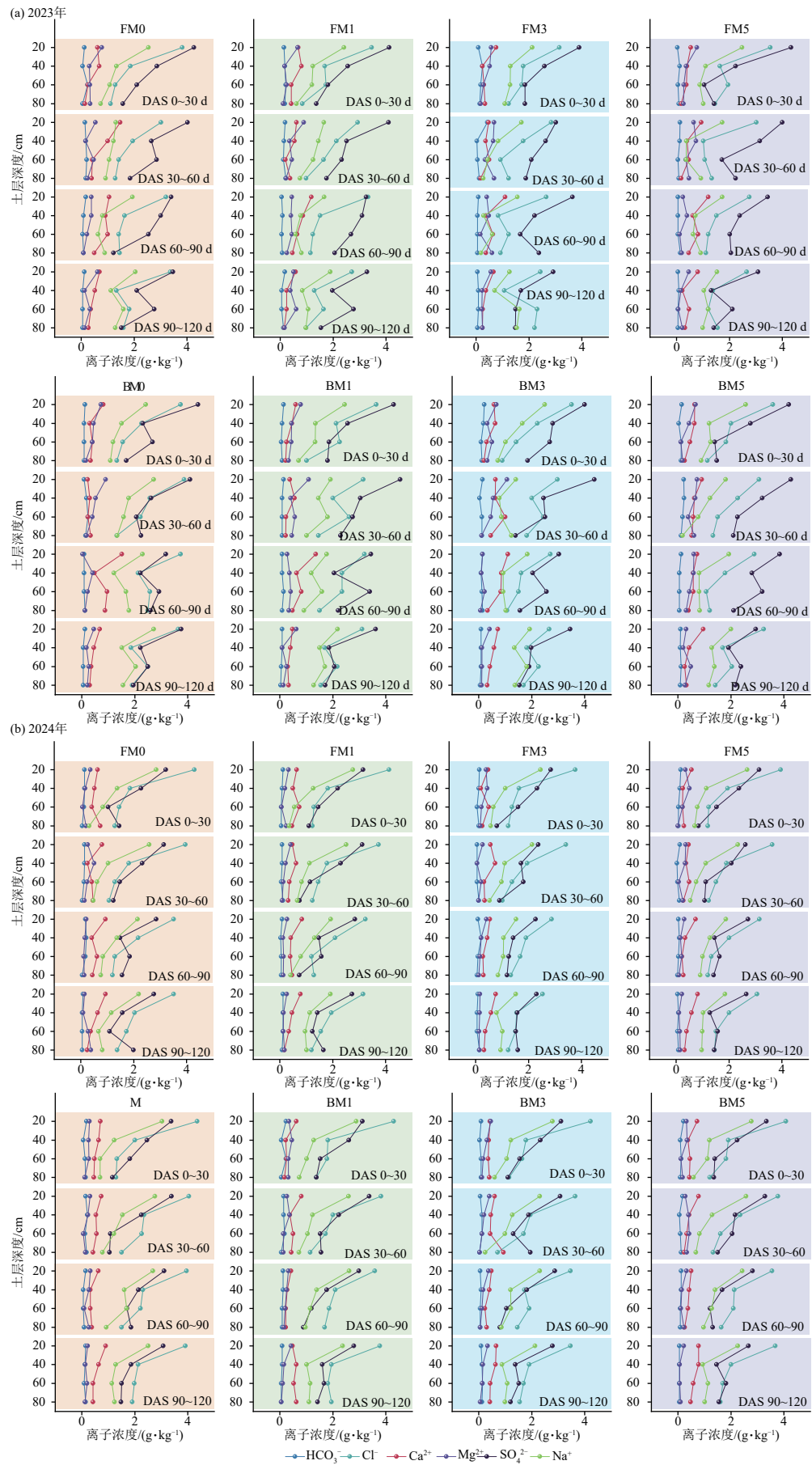


图 7 2023—2024 年不同磁化强度下土壤盐分离子迁移规律

Fig.7 Migration patterns of soil salt ions under different magnetic intensities from 2023 to 2024

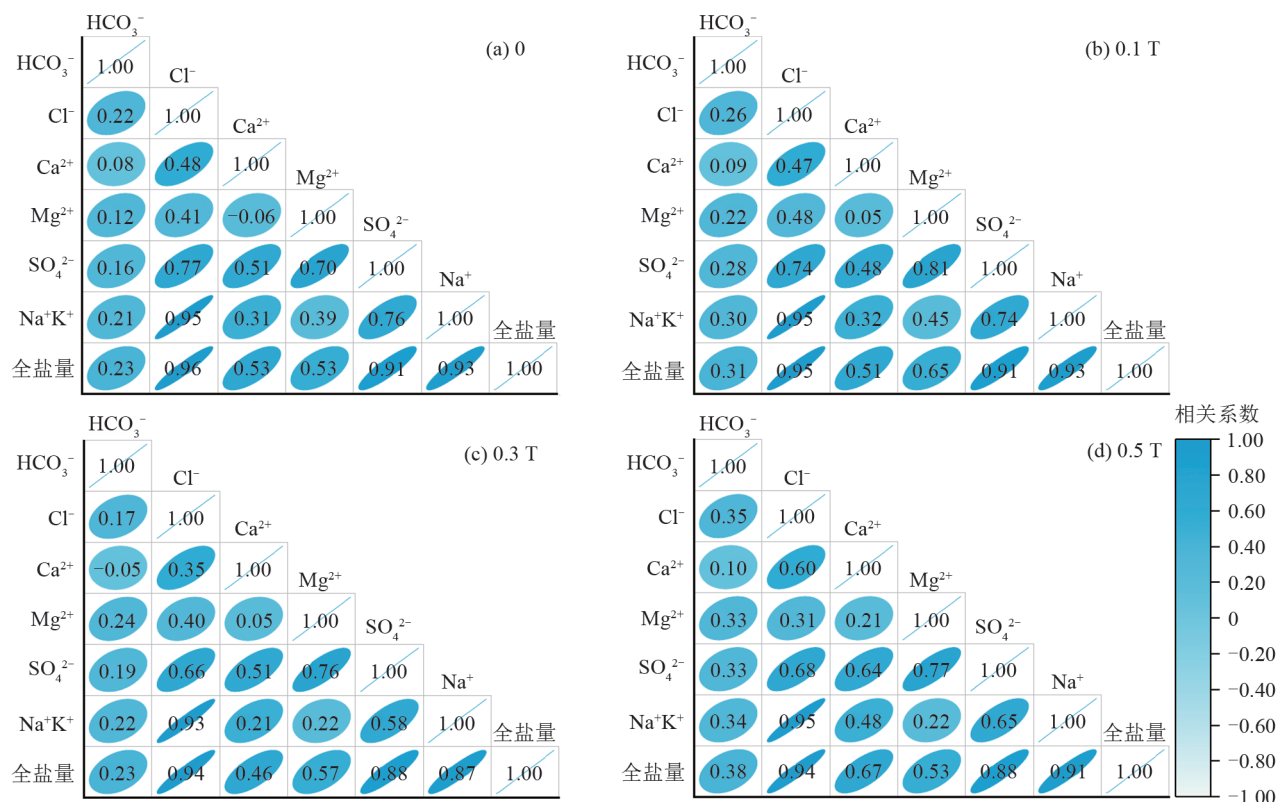


图8 不同磁化强度下盐分离离子与全盐量相关性

Fig. 8 Correlation between salt ions and total salt content under different magnetic intensities

动力学分析表明,同一入渗时间内,微咸水入渗速率显著高于淡水,导致上层水分滞留时间缩短,与前人^[9]研究结果相似。而当灌溉水质相同时,磁化处理与脱盐效率呈非线性调控特征^[17],土壤保水性和脱盐率并不是随着磁化强度的增加而增加,而是表现为 $0.3\text{ T} > 0.5\text{ T} > 0.1\text{ T} > 0$,当磁场强度为 0.3 T 时,土壤保水性和脱盐率均最大。已有研究^[7,25]表明,水的表面张力系数存在一个“谷”值,当磁场强度在 $0.2\sim 0.3\text{ T}$ 区间内,水的表面张力出现最低值,表面张力降幅最大,累计入渗量减少^[26],从而延长水盐相互作用时间,与本研究结果类似。土壤盐分质量分数随生育期推进呈递减趋势,生育前中期脱盐效果显著优于后期,该结果可能与作物根系吸水和灌溉水渗透的协同作用密切相关。高丹草生长初期,作物蒸腾作用较弱,灌溉水向下渗透占主导,磁化水通过增强盐分迁移能力加速根层盐分淋洗;而生育后期,当地气温升高,蒸散作用导致土壤水分向上迁移,可能引发盐分表聚。

磁化处理通过改变水分运动路径,增强离子迁移能力,不同磁场强度对不同盐基离子的淋洗效率存在显著差异。试验表明,在 0.3 T 处理下, Cl^- 和 Na^+ 的迁移效率分别提高 $11.17\%\sim 14.66\%$ 和 $14.25\%\sim 25.24\%$ 。相比之下,微咸水条件下 0.5 T 处理对 SO_4^{2-} 的脱除效果最优,脱除率达 $21.32\%\sim 25.61\%$ 。此差异可能与离子水合特性相关, Cl^- 和

Na^+ 因较小水合半径更易随水迁移^[26]。 Cl^- 和 SO_4^{2-} 与全盐量的强相关性($r > 0.9$)可能与其高迁移性和低吸附性密切相关,二者作为土壤盐渍化的标志性离子,其稳定性表明,磁化处理对高溶解度盐基的淋洗有限^[25]。然而 Na^+ 的相关性显著降低表明,磁化作用可能通过改变 Na^+ 水合半径或增强土壤胶体对 Na^+ 的解吸能力,优先促进其向下迁移。此外, Ca^{2+} 与全盐量相关性增强表明磁化作用可能通过提升 Ca^{2+} 、 Na^+ 吸附选择性比例促使 Ca^{2+} 取代交换性 Na^+ ,从而降低土壤碱化度^[27]。 Ca^{2+} 的滞留有助于促进土壤胶体凝聚,增加 $>0.25\text{ mm}$ 团聚体比例,进而改善土壤透水性,优化土壤环境^[28]。磁化处理在促进盐分淋失的同时优化盐分离子的空间分布,但也可能因深层离子累积对后续种植产生潜在影响^[29]。尽管磁化微咸水处理的脱盐效果较磁化黄河水处理略低,但其对土壤盐分淋失仍具有积极作用^[30],为灌溉水资源匮乏的地区提供可行方案。磁化水黄河水处理和磁化微咸水处理在生育后期 $40\sim 60\text{ cm}$ 土层均出现盐分累积现象,建议采用滴灌灌溉模式配合暗管排盐系统以规避深层土壤积盐风险。

本研究为揭示磁化强度对盐分离子迁移的选择性机制,提出基于水质差异的磁化参数优化区间,为磁化水滴灌技术规模化应用提供重要依据,但其适用性仍需进一步验证。后续研究需重点关注在不同质地土壤及对磁化参数的响应阈值,多离子竞争迁

移的分子动力学机制,同时通过进行长期监测,评估磁化水在实际农业生产中的可行性和推广价值。

4 结 论

1)磁化水通过改变水分子物理特性显著改善根层水盐运移,其中FM3处理土壤体积含水率较FM0处理提高 3.03%~3.35%,脱盐效率提高 8.83%~14.56%,BM3处理土壤体积含水率较BM0处理提升 1.58%~3.16%,脱盐效率提升 7.07%~13.62%。土壤保水性表现为 M3>M5>M1>M0,盐分质量分数呈反向趋势,表明磁化强度与灌溉水质存在交互作用。

2)磁化强度为 0.3 T 时,显著改善土壤水盐胁迫,缓解土壤盐碱化压力,利用拟合公式求得在 M 为 0.29~0.38 T 时,FM 和 BM 处理水胁迫面积达最小值,较对照处理分别降低 19.61%~23.06% 和 15.35%~23.66%;盐胁迫面积降低 13.53%~13.65% 和 7.81%~9.84%,最优磁化强度与灌溉水质密切相关。

3)磁化水显著提升 SO_4^{2-} 、 Cl^- 和 Na^+ 的淋溶效率,促进 Ca^{2+} 积累。其中 0.3 T 处理对 Cl^- 和 Na^+ 的脱除率较高,FM 处理分别达 19.17%~31.67%、33.95%~42.91%,BM 处理分别达 5.20%~21.03%、20.41%~26.02%,0.5 T 对 SO_4^{2-} 分别达 30.97%~35.22%、25.81%~26.02%。

基于本研究结果,建议针对不同土壤类型及灌溉水质条件,优化磁化水滴灌的施用策略。对于以氯化钠为主的重度盐渍化土壤,推荐采用 0.3 T 磁场强度;在使用微咸水滴灌时,可将磁化强度提升至 0.35~0.38 T;在以硫酸盐为主的盐碱土中,将磁场强度提升至 0.5 T 效果最佳。本研究为沿黄南岸灌区盐碱地改良与微咸水资源化利用提供理论支撑,对推动农业可持续发展具有重要意义。

参考文献:

- [1] 于宝勒.盐碱地修复利用措施研究进展[J].中国农学通报,2021,37(7):81-87.
YU B L. Remediation measures of saline-alkali land: A review [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2021, 37(7):81-87.
- [2] 史海滨,杨树青,李瑞平,等.内蒙古河套灌区节水灌溉与水土肥高效利用研究展望[J].灌溉排水学报,2020,39(11):1-12.
SHI H B, YANG S Q, LI R P, et al. Water-saving irrigation and utilization efficiency of water and fertilizer in Hetao irrigation district of Inner Mongolia: Prospect for future research [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(11):1-12.
- [3] 杨真,王宝山.中国盐渍土资源现状及改良利用对策[J].山东农业科学,2015,47(4):125-130.
YANG Z, WANG B S. Present status of saline soil resources and countermeasures for improvement and utilization in China[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2015, 47(4):125-130.
- [4] 杨劲松,姚荣江,王相平,等.中国盐渍土研究:历程、现状与展望[J].土壤学报,2022,59(1):10-27.
YANG J S, YAO R J, WANG X P, et al. Research on salt-affected soils in China: History, status quo and prospect[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(1):10-27.
- [5] 冯云格,柏超,王士超.“三北”地区盐碱地治理技术研究进展[J].现代农业科技,2020(10):154-158.
FENG Y G, BAI C, WANG S C. Research Progress of saline-alkali soil treatment technology in three-north areas [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2020 (10):154-158.
- [6] CAI R, YANG H W, HE J S, et al. The effects of magnetic fields on water molecular hydrogen bonds[J]. Journal of Molecular Structure, 2009, 938(1/3):15-19.
- [7] HUO Z F, ZHAO Q, ZHANG Y H. Experimental Study on effects of magnetization on surface tension of water[J]. Procedia Engineering, 2011, 26:501-505.
- [8] 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, 13(6):e1644.
- [9] 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.
- [10] ZHOU B B, YANG L, CHEN X P, et al. Effect of magnetic water irrigation on the improvement of salinized soil and cotton growth in Xinjiang[J]. Agricultural Water Management, 2021, 248:e106784.
- [11] GUO Y, WANG Q J, WANG K, et al. Spring irrigation with magnetized water affects soil water-salt distribution, emergence, growth, and photosynthetic characteristics of cotton seedlings in southern Xinjiang, China[J]. BMC Plant Biology, 2023, 23(1):e174.
- [12] 朱珠,王则玉,许咏梅,等.磁化不同水质滴灌对土壤盐分的影响[J].新疆农业科学,2023,60(12):3086-3093.
ZHU Z, WANG Z Y, XU Y M, et al. Effects of magnetized drip irrigation with different water quality on soil salinity [J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2023, 60(12): 3086-3093.
- [13] 李夏,乔木,周生斌.磁化水滴灌对棉田土壤脱盐效果及棉花产量的影响[J].干旱区研究,2017,34(2):431-436.
LI X, QIAO M, ZHOU S B. Effects of drip irrigation with magnetized water on soil desalinization in cotton field and

- cotton yield[J]. *Arid Zone Research*, 2017, 34(2): 431-436.
- [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] 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(增刊2): 163-166.
- BU D S, FENG W G, CAI L H, et al. Effects of magnetization water on desalination 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.
- [16] TEDESCHI A, DELL' AQUILA R. Effects of irrigation with saline waters, at different concentrations, on soil physical and chemical characteristics [J]. *Agricultural Water Management*, 2005, 77(1/3): 308-322.
- [17] 周振鹏, 王振华, 叶含春, 等. 降解膜覆盖和磁化水滴灌对加工番茄土壤水分、产量和品质的影响[J]. *干旱区资源与环境*, 2022, 36(10): 201-208.
- ZHOU Z P, WANG Z H, YE H C, et al. Effects of degradable film mulching and magnetized water drip irrigation on soil water, yield and quality of processing tomato [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2022, 36(10): 201-208.
- [18] 和劲松, 祁凡雨, 裴洛伟, 等. 磁场处理对液态水缔合结构影响的综合评价指标[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(21): 293-300.
- HE J S, QI F Y, PEI L W, et al. Integrated index assessing effect of magnetic treatment on liquid water's associative structure [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(21): 293-300.
- [19] 吴忠东, 王全九. 入渗水矿化度对土壤入渗特征和离子迁移特性的影响[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(7): 64-69.
- WU Z D, WANG Q J. Effect on Both soil infiltration characteristics and ion mobility features by mineralization degree of infiltration water [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(7): 64-69.
- [20] ZLOTOPOLSKI V. The impact of magnetic water treatment on salt distribution in a large unsaturated soil column [J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2017, 5(4): 253-257.
- [21] 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]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(2): 292-298.
- [22] 王友娟, 赵东波, 荣春英, 等. 水团簇构象稳定性起源和本质的密度泛函理论与量子分子动力学研究[J]. *物理化学学报*, 2013, 29(10): 2173-2179.
- WANG Y J, ZHAO D B, RONG C Y, et al. Towards understanding the origin and nature of the conformational stability of water clusters: A density functional theory and quantum molecular dynamics study [J]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2013, 29(10): 2173-2179.
- [23] 唐胜强, 余冬立. 灌溉水质对土壤饱和导水率和入渗特性的影响[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(10): 108-114.
- TANG S Q, SHE D L. Influence of water quality on soil saturated hydraulic conductivity and infiltration properties [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(10): 108-114.
- [24] ZHANG Y H, LI X Y, JIRÍŠ, et al. Optimizing drip irrigation with alternate use of fresh and brackish waters by analyzing salt stress: The experimental and simulation approaches [J]. *Soil and Tillage Research*, 2022, 219: e105355.
- [25] 张军, 张立红. 磁化增注机理的分子动力学模拟[J]. *青岛大学学报(自然科学版)*, 2003, 16(3): 40-44.
- ZHANG J, ZHANG L H. Molecular dynamics simulation of mechanism of magnetization increasing injection [J]. *Journal of Qingdao University (Natural Science)*, 2003, 16(3): 40-44.
- [26] TOLEDO E J L, RAMALHO T C, MAGRIOTIS Z M. Influence of magnetic field on physical-chemical properties of the liquid water: Insights from experimental and theoretical models [J]. *Journal of Molecular Structure*, 2008, 888(1/3): 409-415.
- [27] 刘秀梅, 王录, 王华田, 等. 磁化微咸水灌溉对土壤交换性盐基离子组成的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(2): 266-271.
- LIU X M, WANG L, WANG H T, et al. Effects of magnetic brackish water irrigation on composition of soil exchangeable base ions [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(2): 266-271.
- [28] 张富仓, 张一平, 白锦麟, 等. 磁场对(塬)土理化性质影响的研究[J]. *西北农业学报*, 1992, 1(3): 46-48.
- ZHANG F C, ZHANG Y P, BAI J L, et al. Studies on effect of magnetic treatment on Lou soil physico-chemical properties [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 1992, 1(3): 46-48.
- [29] 张继红. 磁化水膜下滴灌对土壤肥力和棉花生长的作用机制研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2022.
- ZHANG J H. Effect mechanism research of drip irrigation under mulch with magnetized water on soil fertility and cotton growth [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2022.
- [30] 王全九, 单鱼洋. 微咸水灌溉与土壤水盐调控研究进展[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(12): 117-126.
- WANG Q J, SHAN Y Y. Review of research development on water and soil regulation with brackish water irrigation [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(12): 117-126.