

微咸水灌溉下外源 NaCl 浓度对枸杞根层土壤环境因子及产量的影响

陈 珣¹, 杨树青¹, 娄 帅^{1,2}, 陈 希¹

(1. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018; 2. 内蒙古自治区水利科学研究院, 内蒙古 呼和浩特 010052)

摘 要:为探究微咸水灌溉下典型外源盐 NaCl 浓度对枸杞产量和土壤环境因子的影响, 寻求适宜于不同微咸水质区的灌溉水盐浓度, 于 2022 年 4—10 月在河套灌区下游开展田间试验, 设置 4 种不同 NaCl 浓度 (0.1、0.5、2.0、4.0 g · L⁻¹), 以清水作为对照 (CK) 对 0~100 cm 土层土壤水盐、pH、钠吸附比 (SAR) 变化及枸杞生长特性进行分析。结果表明: 微咸水灌溉下, 掺加不同外源 NaCl 浓度均可提高土壤含水率, 以浓度为 4.0 g · L⁻¹ 灌溉水盐浓度处理的土壤含水率明显高于其他处理; 土壤电导率随灌溉水盐浓度的增加呈线性增加趋势, 在 0.1 g · L⁻¹ 处理下, 30~40 cm 土层含盐量最少; 在枸杞生育时期内, 土壤 pH 随灌溉水盐浓度升高而升高, 低浓度处理下 (<0.5 g · L⁻¹) 与 CK 处理无显著差异, 4.0 g · L⁻¹ 浓度时, pH 值最高, 较 CK 增加 3.27%; 在 0~40 cm 土层, 掺加浓度为 0.1 g · L⁻¹ 处理的 SAR 最小, 较 0.5、2.0、4.0 g · L⁻¹ 处理分别减少 9.90%、7.53%、20.38%; NaCl 浓度大于 0.5 g · L⁻¹ 时, 枸杞新枝、地径和冠幅生长速率受到抑制; NaCl 浓度为 0.1 g · L⁻¹ 时的枸杞产量较 CK 处理下降最少, 为 26.49%。综上, 在 Cl-Na 型水质中掺加 NaCl 浓度小于 0.5 g · L⁻¹ 的微咸水灌溉可实现节约河套灌区淡水资源、预防土壤次生盐渍化的目标, 研究结果可为河套灌区类似水质区微咸水的安全利用提供技术支撑与理论依据。

关键词: 枸杞; 微咸水灌溉; 外源 NaCl; 土壤环境

中图分类号: S274; S152; S153 **文献标志码:** A

Effects of exogenous NaCl concentration on soil environmental factors in the root layer and yield of *Lycium barbarum* under brackish water irrigation

CHEN Yu¹, YANG Shuqing¹, LOU Shuai^{1,2}, CHEN Xi¹

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

2. Inner Mongolia Autonomous Region Institute of Water Resources Science, Hohhot, Inner Mongolia 010052, China)

Abstract: To explore the effects of typical exogenous salt (NaCl) concentration on the yield of *Lycium barbarum* and soil environmental factors under brackish water irrigation, and to identify the optimal salt concentration for irrigation in different brackish water quality areas, a field experiment was conducted downstream of the Hetao Irrigation District from April to October 2022. Four NaCl concentration treatments (0.1, 0.5, 2.0, 4.0 g · L⁻¹) along with a control (CK, clean water) treatment were established to analyze changes in soil water salinity, pH, and sodium adsorption ratio (SAR) in the soil layers from 0 to 100 cm, as well as the growth characteristics of *Lycium barbarum*. The results showed that under brackish water irrigation, the soil water moisture content was increased by adding different exogenous NaCl concentrations, and the soil moisture water content was significantly higher in the treatment with a concentration of 4.0 g · L⁻¹ irrigation water salt concentration than the other treatments. Soil electrical conductivity increased linearly with the increase of the irrigation salt concentration, under 0.1 g · L⁻¹ treatment, the salt content of 30~40 cm soil layer was the least. During the growth period of *Lycium barbarum*, soil pH increased with the increase of salt concentration of irrigation water, and there was no significant difference between

收稿日期: 2024-08-27

修回日期: 2024-10-29

基金项目: 国家自然科学基金 (52069023, 52179037)

作者简介: 陈珣 (1998-), 女, 内蒙古巴彦淖尔人, 硕士研究生, 研究方向为农业水土资源利用与环境调控。E-mail: chenyu980827@163.com

通信作者: 杨树青 (1966-), 女, 内蒙古乌兰察布人, 教授, 主要从事农业水土资源利用与环境调控研究。E-mail: nmndysq@126.com

CK and low NaCl concentration treatment ($<0.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$). At $4.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, soil pH was the highest, which increased by 3.27% compared with CK. In 0~40 cm soil layer, the SAR of $0.1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ treatment was the smallest, which decreased by 9.90%, 7.53% and 20.38% compared with 0.5, 2.0 and $4.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively. When NaCl concentration was greater than $0.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, the growth rate of new branches, ground diameter and crown width was inhibited. When NaCl concentration was $0.1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, the yield of *Lycium barbarum* decreased by 26.49% compared with CK treatment. In conclusion, adding brackish water with a NaCl concentration of less than $0.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ to Cl-Na water quality can help conserve freshwater resources and prevent secondary soil salinization in the Hetao irrigation area. The research findings provide valuable technical support and a theoretical foundation for the safe use of brackish water in areas with similar water quality conditions in the Hetao irrigation area.

Keywords: *Lycium barbarum*; brackish water irrigation; exogenous NaCl; soil environment

河套灌区农业灌溉用水面积占比达 90%,且主要依赖于引黄灌溉^[1]。然而,近年来国家指令性节水措施的实施(国发〔2012〕3号)进一步加剧了该地区农业淡水资源的紧缺形势。河套灌区浅层地下微咸水(矿化度为 $2 \sim 5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$)资源丰富,可开采量约为 $7.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[2-3],科学利用微咸水可缓解灌区水资源短缺的问题^[4]。河套灌区属典型的盐渍化农业灌区^[5],土壤及地下微咸水盐分离子组成中的阴阳离子主要以 Cl^- 和 Na^+ 为主^[6]。然而,微咸水中较高浓度的 Na^+ 和 Cl^- 会改变土壤理化性质,导致作物根区土壤含盐量增加和土壤基质势大幅下降,从而抑制作物对土壤水分的吸收,造成土壤次生盐碱化^[7-8]。因此,在河套灌区 Cl-Na 型水质区,开展微咸水灌溉下外源 NaCl 盐浓度对盐渍化土壤水盐酸碱度影响的研究对该灌区微咸水灌溉的安全利用具有重要的现实意义和科学价值。

前人研究发现,重度盐碱地上进行 $5 \text{ mS} \cdot \text{m}^{-1}$ 的微咸水灌溉,盐分主要积累在 40~60 cm 土层^[9]; Zartman 等^[10]在碱性土壤上进行 $0.4 \sim 12.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 咸水灌溉的研究发现,土壤电导率增加了 46.67%;微咸水滴灌下,土壤中可溶性离子 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 增加, pH 值升高^[11],土壤中 Na^+ 和 Cl^- 含量显著增加,引起土壤钠质化^[12];微咸水中添加不同浓度 NaCl,土壤渗透性随 NaCl 浓度的增加而增大^[13]。综上所述,前人对于微咸水的利用已进行了大量研究,但针对不同微咸水典型水质区盐浓度阈值的研究还有待深入。不同盐分浓度微咸水灌溉会直接影响土壤环境,进而影响作物生理生长特性,最终影响其产量。Wang 等^[14]研究发现,大于 $3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的微咸水灌溉使玉米生长受到抑制; $4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的微咸水灌溉使冬小麦的籽粒产量下降 35.6%^[15];盆栽试验表明,NaCl 浓度从 3‰ 增加至 4.5‰,刺槐的地径和苗高相对生长速率显著降低^[16]; $1 \sim 3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 微咸水灌溉胁迫番茄株高和茎粗的生长,减产 3.07% ~

15.54%^[17]; Garg 等^[18]通过使用微咸水灌溉马铃薯发现,与淡水灌溉相比,其产量降低 21%~44%。由此可见,针对典型水质区中度盐渍土大田多年生灌木(枸杞)微咸水灌溉浓度阈值的研究较少。因此,针对中度盐渍土微咸水的 Cl-Na 型典型水质区,开展不同外源 NaCl 浓度对土壤及枸杞产量的影响,探究 NaCl 浓度的阈值,研究结果将对盐碱土特定水质区微咸水的安全利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况与试验设计

试验于 2022 年 4—10 月在河套灌区下游的红卫试验站($108^\circ 45' \sim 109^\circ 36' \text{E}$, $40^\circ 30' \sim 40^\circ 40' \text{N}$, 海拔 1 040 m)开展。研究区属中温带半干旱大陆性气候,年平均降水量 182 mm,年平均蒸发量 2 383 mm,年平均气温 7.9°C ,无霜期 146 d。试验区淡水资源匮乏、微咸水丰富,平均地下水埋深 1.83 m,地下微咸水矿化度为 $3.84 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$,供试土壤以粉土和粉壤土为主,全盐量为 0.48%~0.84%,为中度盐碱地。土壤质地见表 1,土壤基本理化性质见表 2。供试品种为‘宁杞 1 号’,树龄 12 a,其完整根区深度在 60 cm 左右,其中细根和粗根集中分布在 40 cm 土层深度内^[19]。

本试验以河套灌区下游灌溉微咸水中 Na^+ 、 Cl^- 浓度范围 13.8~100.4、11.5~108.8 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 为参照^[20],以其水质(Na^+ 、 Cl^- 浓度分别为 18.6、63.0 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)为基础,调配不同浓度梯度的 NaCl 溶液加入当地微咸水($3.84 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$)中作为盐处理,调配后各处理的离子浓度归属于试验区与河套灌区的盐离子浓度上限构成的浓度范围,具有参考意义。

试验共 5 个处理,分别为 CK、 $0.1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ (S1)、 $0.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ (S2)、 $2.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ (S3)、 $4.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ (S4),每处理 3 次重复,共 15 个小区,各小区随机布设,小区面积为 39 m^2 ($3 \text{ m} \times 13 \text{ m}$),每小区包含枸杞 37 株,

表 1 研究区土壤基本性状

Table 1 Soil texture and bulk density in the study area

土层深度 Soil depth /cm	黏粒(0~0.002 mm) Clay/%	粉粒(0.002~0.05 mm) Silt/%	砂粒(0.05~2 mm) Sand/%	容重/(g·cm ⁻³) Bulk density	土壤类型 Soil type
0~10	9.06	73.41	17.53	1.36	粉壤土 Silt loam
10~20	11.02	71.19	17.79	1.33	粉壤土 Silt loam
20~30	3.19	84.79	12.02	1.37	粉土 Silt
30~40	2.98	87.24	9.78	1.46	粉土 Silt
40~60	2.76	86.63	10.61	1.44	粉土 Silt
60~80	4.22	86.98	8.80	1.42	粉土 Silt
80~100	2.40	79.47	18.13	1.39	粉壤土 Silt loam

表 2 研究区土壤基本理化性质

Table 2 Basic physical and chemical properties of soil in the study area

土层深度/cm Soil depth	有机质/(g·kg ⁻¹) Organic matter	水解氮/(mg·kg ⁻¹) Hydrolyzed nitrogen	速效磷/(mg·kg ⁻¹) Rapidly available phosphorus	速效钾/(mg·kg ⁻¹) Rapidly available potassium
0~10	11.966	186.02	43.30	304.5
10~20	18.729	194.18	63.50	392.5
20~30	3.877	89.19	11.10	203.5
30~40	7.534	100.22	4.45	403.5
40~60	7.668	140.12	4.45	663.0
60~80	5.289	84.49	3.95	232.5
80~100	5.057	100.22	3.50	201.5

株距 1 m,行距 3 m,小区间用塑料板作防渗隔离。枸杞灌溉按当地常规灌水量,全生育期内共灌水 4 次,单次灌水量均为 100 mm,灌水方式为畦灌。其它田间管理措施与当地农户管理相同,并保持所有处理一致。

1.2 样品采集与处理

分别于枸杞的 4 个关键生育时期:春梢生长期(A1,5 月 3 日—5 月 15 日)、开花初期(A2,6 月 10 日—6 月 20 日)、果实膨大期(A3,6 月 25 日—7 月 10 日)和夏盛果期(A4,7 月 15 日—8 月 15 日)对其生长指标进行定株观测,每处理选长势均匀的 3 棵枸杞作为观测株;在各处理的 3 个小区内采用土钻法随机取 0~100 cm 土样,其中,在枸杞主根区 0~40 cm 土层每 10 cm 取一次,40~100 cm 土层每 20 cm 取一次,共取 7 层,将土样装在自封袋中,做好标记后带回实验室,经过烘干、之后碾碎、过筛,用于土壤理化性质分析。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 枸杞生长指标测定 全生育期内,新枝生长量的观测枝标记并不进行修剪,其余杂枝定期修剪(约 10 天修剪一次)。在植株东南西北中 5 个方位各选一个新枝,用卷尺进行测量其长度,4 月 20 日—7 月上旬每隔 3 天测一次,7 月中旬—一落叶前每隔 10 天测一次;树体萌芽前用卷尺测冠幅(东西长、南北长),用游标卡尺测地径粗度,此后,于每月

中旬各测一次,直到果实采收结束;枸杞收获时每处理选长势相近的 4 棵进行考种,将每茬枸杞鲜果按小区编号分开排布到果栈子上,统一在热泵烘干装置中用煤火烘干,烘房湿度 25%,烘干温度 60~70℃,每隔 2 h 进行称量,至枸杞质量不变时取出。烘干后称量各小区枸杞干质量,经折算获得单位面积干果产量。

1.3.2 土壤指标的测定 利用烘干法测量土壤含水率,土壤浸提液的电导率(EC)值用 DDSJ-308A 型电导率仪测定,土壤 pH 用 PHS-3E 型酸度计测定^[21]。参照《LY/T 1251-1999 森林土壤水溶性盐分分析》测定土壤盐离子含量,Na⁺和 Cl⁻分别用火焰光度计法和标准硝酸银滴定法测定,Ca²⁺和 Mg²⁺用 EDTA 络合滴定法测定^[22];土壤钠吸附比(SAR)采用式(1)进行计算。

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}}$$

(1)

式中,各离子浓度单位为 mmol·L⁻¹。

1.4 数据处理与分析

采用 Excel 2020 进行数据分析与整理,利用 version Origin 2018 软件进行绘图,采用 SPSS 26.0 软件的最小显著差异法进行处理间显著性检验,显著性水平为 0.05。

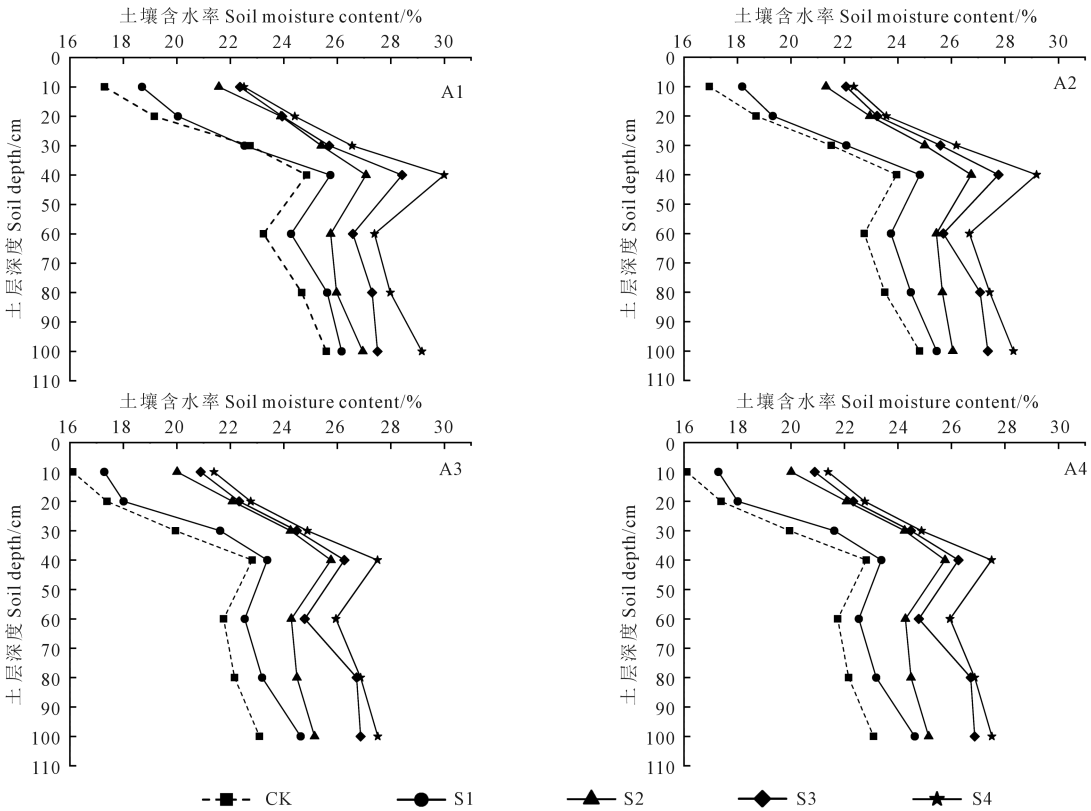
2 结果与分析

2.1 不同 NaCl 浓度的微咸水对土壤水分的影响

由图 1 可知,微咸水相同浓度下,随着枸杞生育时期的推进,土壤含水率整体呈先减后增的趋势。A1、A2、A3 和 A4 时期的土壤平均含水率分别为 24.77%、24.17%、23.12%和 23.64%, A1 时期达到峰值。在该时期不同 NaCl 浓度下,土壤含水率为 18.70%~29.99%,主根层(0~60 cm)各处理土壤平均含水率为 21.46%~26.17%,且随 NaCl 浓度的增大而增加;S1、S2、S3 和 S4 处理主根层平均含水率比 CK 分别提高 3.50%、12.08%、15.39%和 19.33%,且 S4 较 S1、S2、S3 处理分别增加 17.60%、5.81%、3.03%,S4 处理的土壤含水率随土层深度的增加在枸杞各生育时期分布特征为“增-减-增”,40 cm 处达到峰值,为 29.99%,较 60 cm 土层高 9.50%,60~100 cm 土层变化幅度小且稳定。

2.2 不同 NaCl 浓度的微咸水对土壤 EC 的影响

开花初期是枸杞生长的敏感期,这个时期发生盐胁迫会恶化土壤环境,导致枸杞生长受到抑制^[23]。由图 2 可知,在该时期(A2),土壤盐分有轻微积累,土壤 EC 值随土层深度的加深整体上呈“V”型波动,且随灌溉水盐浓度的增加而增大。盐分多集中于 0~20cm 土层,EC 最低值出现在 S1 处理,为 2.02 mS·cm⁻¹,较同期 S2、S3、S4 处理的 EC 值分别低 8.87%、14.49%、20.97%;土壤 EC 值在 20~40 cm 土层逐渐下降,S1~S4 处理在该土层的土壤 EC 值分别为 1.59、1.82、2.13、2.22 mS·cm⁻¹,较 CK 分别提高 6.86%、2.06%、42.77%、49.36%;整体来看,各时期各处理 60~100 cm 土层的 EC 平均值低于 0~40cm 土层。随着时间的推移,枸杞 A3 和 A4 期的 S1 处理与 CK 相比无显著差异,A2 期的 S1 处理土壤 EC 值较 A3、A4 期分别低 8.65%、3.98%。



注:1. 图中“A1”、“A2”、“A3”、“A4”分别代表枸杞春梢生长期、开花初期、果实膨大期和夏盛果期;2. “S1”、“S2”、“S3”、“S4”分别代表加入微咸水中 NaCl 的浓度分别为 0.1、0.5、2.0、4.0 g·L⁻¹。下同。

Note: 1. “A1”, “A2”, “A3” and “A4” in the figure represent spring shoot growth period, early flowering stage, fruit expansion stage and prime fruiting period of *Lycium barbarum*, respectively. 2. “S1”, “S2”, “S3” and “S4” represent the concentration of NaCl added to the brackish water as 0.1, 0.5, 2.0 and 4.0 g·L⁻¹, respectively. The same below.

图 1 不同 NaCl 浓度微咸水灌溉下枸杞各生育时期土壤含水率分布

Fig.1 Distribution of soil moisture content in different growth stages of *Lycium barbarum* under different NaCl concentration brackish water irrigation

2.3 不同 NaCl 浓度的微咸水对土壤 pH 值的影响

各灌溉水盐浓度下,随生育时期的推进,土壤 pH 呈先增后减趋势,在 A2 时期达到最大值,平均值为 7.72,较 A1 时期上升 2.06%(图 3)。各处理 A2 时期不同土层的土壤 pH 均呈现随灌溉水盐浓度的增加而增大的趋势。经分析,在 CK、S1、S2、S3、S4 处理下土壤 pH 平均值分别为 7.60、7.64、7.70、7.78、7.86,S3 和 S4 处理间变化幅度小,但与 S1 和 CK 处理相比变化幅度大。不同深度土壤 pH 值表现为 0~40 cm 土层为 7.45~7.88,40~60 cm 土层为 7.66~7.93,在 40~60 cm 土层,CK、S1、S2、S3 处理的土壤 pH 值较 S4 处理分别降低 3.19%、2.30%、1.66%、0.77%;60~100 cm 各处理不同时段土壤 pH 较稳定,介于 7.45~7.93 之间。

2.4 不同 NaCl 浓度微咸水对土壤 SAR 的影响

各生育时期 SAR 变化平稳,所以将各生育时期 SAR 取平均值进行分析。由图 4 可知,各处理在 60~100 cm 土层 SAR 变化比较平稳,而 0~40 cm 土层 SAR 差异较大。各处理的 SAR 均随土层深度的增加呈波动性变化,除 10~20 cm 土层外,其它土层土壤 SAR 均与盐浓度成正比,S2、S3、S4 处理较 CK 的 SAR 显著增加($P<0.05$)。其中,S1、S2、S3、S4 处理

在 0~10 cm 土层 SAR 较 CK 分别增加 1.73%、11.68%、4.97%、25.14%;30~40 cm 土层各处理的土壤平均 SAR 较 0~30 cm、40~60 cm 土层分别低 2.71%、7.90%;40~60 cm 土层各处理的土壤平均 SAR 比 60~100 cm 土层高 37.6%。

2.5 不同 NaCl 浓度的微咸水对枸杞生长指标的影响

如图 5 所示,枸杞全生育期内,其新枝生长速率、地径生长速率和冠幅生长速率均随外源 NaCl 灌溉水盐浓度的增加呈先增后减趋势,与 CK 相比,枸杞夏盛果期 S1、S2 处理的新枝生长速率、地径生长速率和冠幅生长速率均无显著差异($P>0.05$),S3、S4 处理显著降低($P<0.05$),S2 处理下其新枝、地径和冠幅生长速率均值最大均高于其余处理,分别为 0.391 、 0.0361 、 $0.302\text{ cm}\cdot\text{d}^{-1}$,较其他处理提高 1.89%~13.18%、0.49%~11.95%、2.24%~14.41%;S2 处理下,随着生育时期的推进,枸杞地径生长速率呈单峰分布,在 A3 期其值最大,为 $0.0513\text{ cm}\cdot\text{d}^{-1}$,而新枝、冠幅生长速率显著下降,峰值均在 A1 期,这是因为 A1 时期枸杞生长较快,新枝和冠幅也随之快速生长,而随生育时期的推进,树干为保证其生长,不断加强吸水吸肥能力,从而促使地径生长速率的增速加快^[24]。

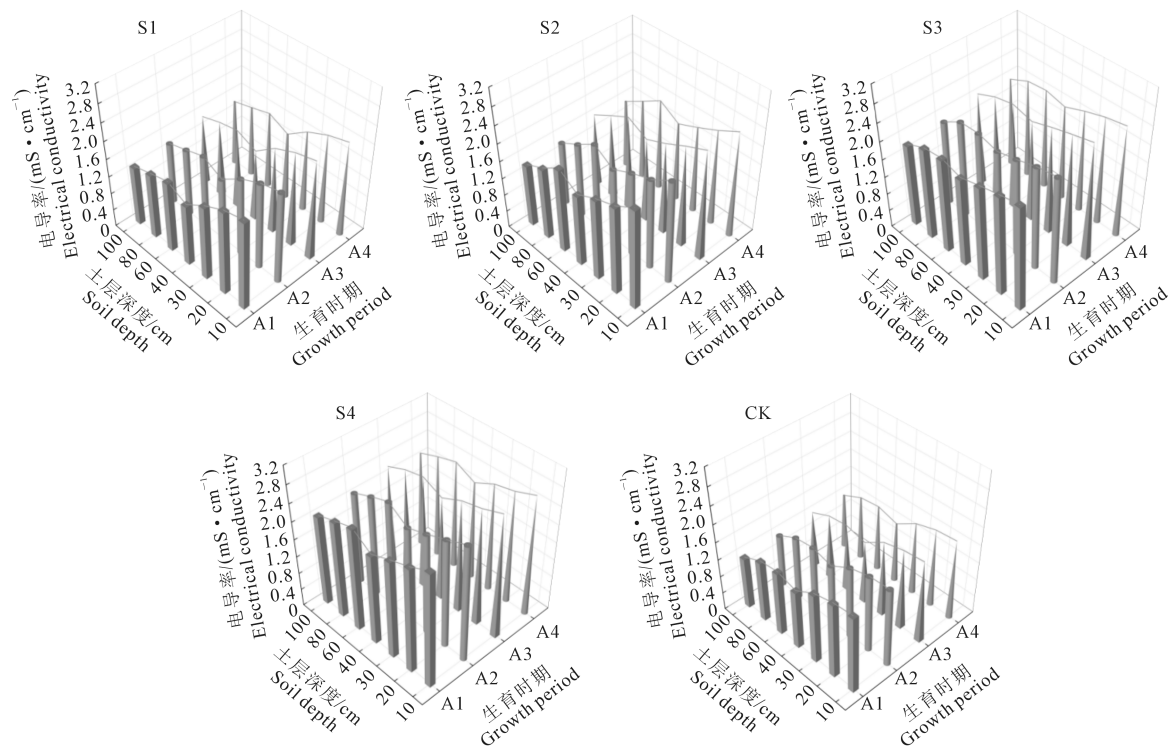


图 2 不同 NaCl 浓度微咸水灌溉下枸杞各生育时期土壤电导率分布图
Fig.2 Distribution of soil electrical conductivity at different growth stages of *Lycium barbarum* under different NaCl concentration brackish water irrigation

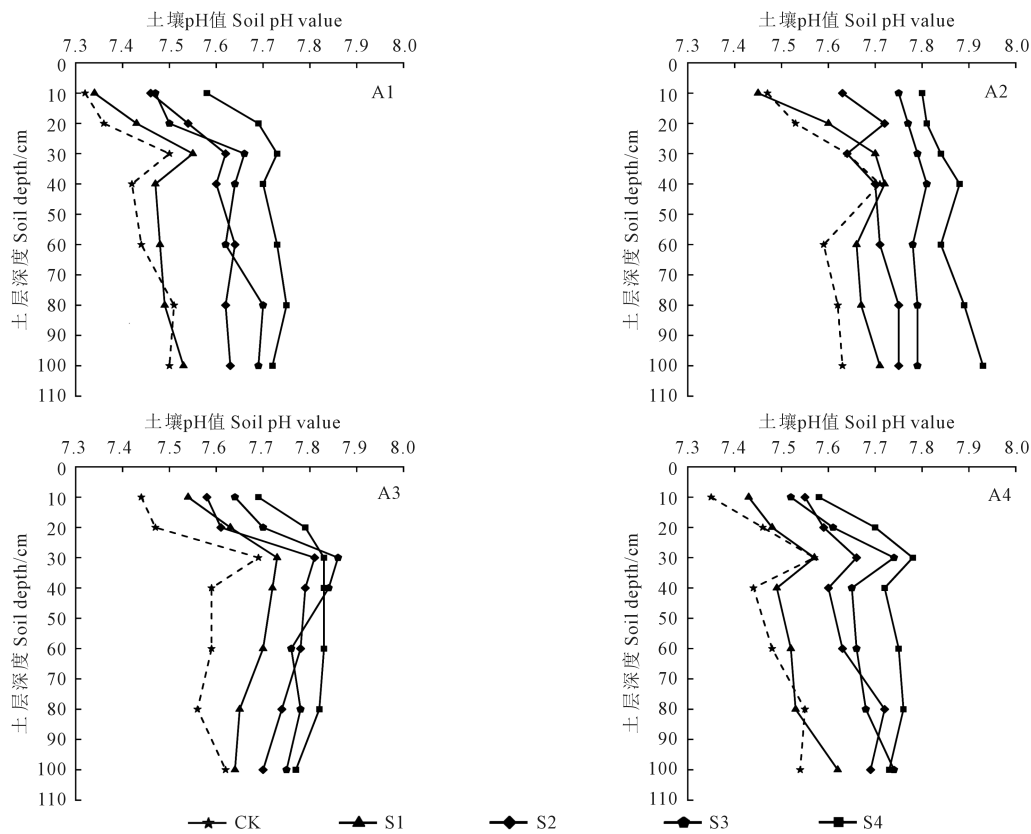
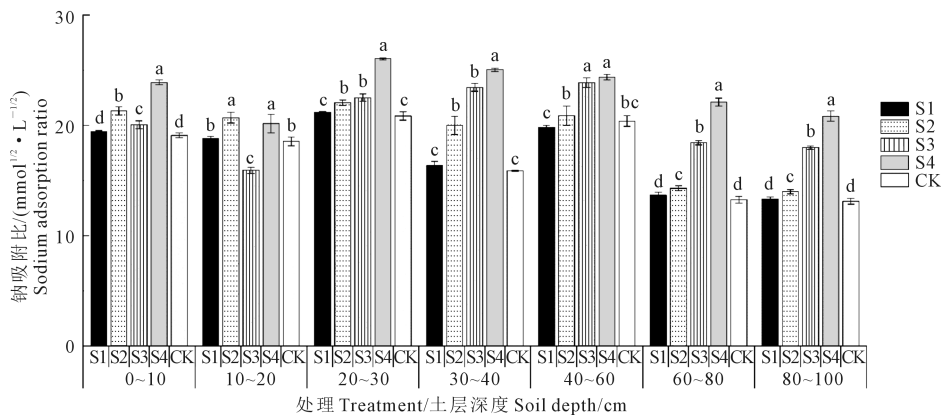


图 3 枸杞各生育时期不同 NaCl 浓度微咸水灌溉下土壤 pH 变化
Fig.3 Change of soil pH in each growth period of *Lycium barbarum* under different NaCl concentration brackish water irrigation



注:不同小写字母表示相同土层深度下各处理间差异显著($P<0.05$)。
Note : Different lowercase letters indicate significant differences between treatments at the same soil depth ($P<0.05$).

图 4 不同 NaCl 浓度微咸水灌溉下 0~100 cm 土层土壤钠吸附比

Fig.4 Soil sodium adsorption ratio in 0~100 cm soil layer under different NaCl concentration brackish water irrigation

2.6 不同 NaCl 浓度的微咸水对枸杞干果产量的影响

不同 NaCl 浓度微咸水灌溉对枸杞产量具有显著影响,产量与 NaCl 浓度呈负相关关系。在 CK 处理下,枸杞产量最高,为 4 198.72 kg · hm⁻²。S1、S2、S3、S4 处理产量分别为 3 086.42、2 432.81、1 790.21、1 479.83 kg · hm⁻²,比 CK 分别显著降低 26.49%、

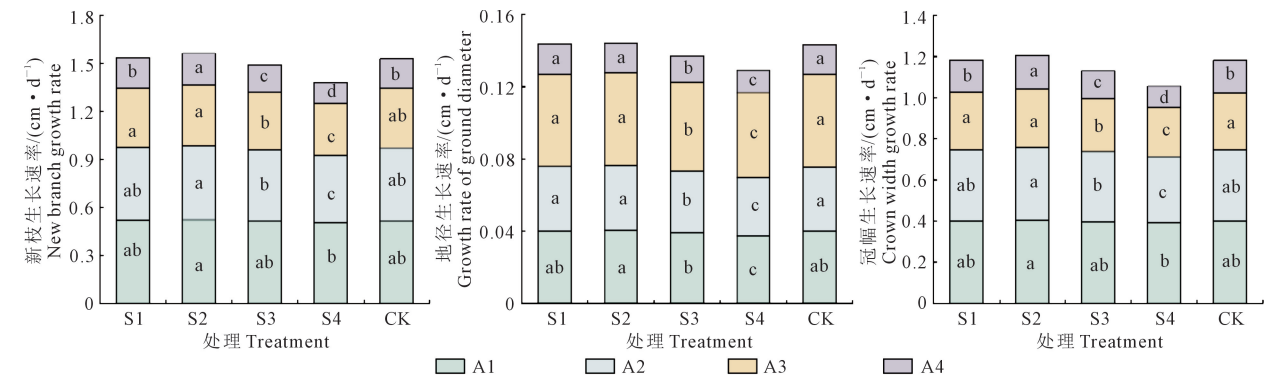
42.06%、57.36%、64.76%,S2 较 S1 处理显著下降 21.18%($P<0.05$)。可见,不同 NaCl 浓度微咸水灌溉对枸杞产生盐分胁迫,且灌溉水浓度越大盐分胁迫越严重,从而抑制作物生长、降低作物产量。但在当地淡水资源缺乏且得不到适时适量的黄河水灌溉的背景下,利用低盐浓度(0.1、0.5 g · L⁻¹)水灌

溉枸杞会在一定程度上提高枸杞的耐盐能力,减弱因盐浓度升高而导致产量下降的幅度,从而减轻盐胁迫对产量的影响^[25]。

2.7 土壤环境因子与枸杞产量相关性分析

对土壤 EC、SAR 与土壤含水率、pH 值、枸杞生长指标及干果产量进行 Pearson 相关性分析的结果如图 6 所示。土壤含水率与土壤 EC、SAR、pH 值呈显著正相关关系,相关系数分别为 0.82、0.77、0.63,土壤含水率与枸杞产量呈负相关关系。枸杞新枝、

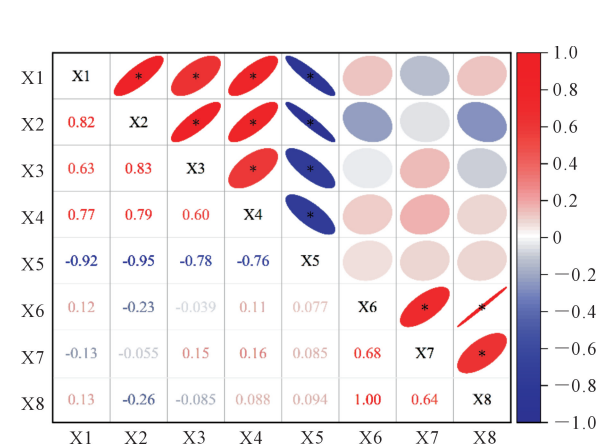
地径和冠幅生长速率均与产量呈正相关关系。土壤 EC 和 SAR、pH 值呈正相关关系,与新枝、地径、冠幅和产量呈负相关关系,说明该灌区土壤盐化和碱化同时发生,高矿化度水质灌溉或土壤本身含盐量高都可导致土壤发生盐碱化,从而抑制枸杞的生长及产量的增加。SAR 与 pH 值呈显著正相关关系,说明 pH 在一定程度上可以反映土壤碱度的变化;对产量表现出显著负面影响,说明 SAR 为产量的限制因子。



注:不同小写字母表示同一生育时期不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。
Note: Different lowercase letters indicate that there are significant differences between different treatments in the same growth period ($P<0.05$).

图 5 不同 NaCl 浓度微咸水灌溉下枸杞生长指标的变化

Fig.5 Changes of growth indexes of *Lycium barbarum* under brackish water irrigation with different NaCl concentrations



注:X1~X8 分别代表含水率、EC、pH、SAR、产量、新枝生长速率、地径生长速率、冠幅生长速率; * 表示 $P<0.05$, 红色表示正相关关系, 蓝色表示负相关关系。
Note: X1~X8 represent moisture content, EC, pH, SAR, yield, new branch growth rate, ground diameter growth rate, crown width growth rate, respectively. * indicates $P<0.05$, red indicates positive correlation, and blue indicates negative correlation.

图 6 不同 NaCl 浓度微咸水灌溉下各指标间的相关性分析
Fig.6 Correlation analysis of each index under different NaCl concentration brackish water irrigation

3 讨论

合理利用微咸水灌溉是缓解干旱区淡水资源短缺的有效途径之一,但微咸水中多余盐分会加大土壤次生盐渍化风险,导致土壤结构恶化^[26]。本研究发现,河套灌区 Cl-Na 型水质的微咸水掺加不同浓度 NaCl 进行枸杞灌溉,可提高根层土壤含水率,且随外源 NaCl 浓度的增大而增加,以 S4 处理根层含水率最高,达到 25.26%~26.86%,这与周爽^[25]的研究结果类似。但枸杞根层含水率提高的同时,也显著增加了根层的土壤盐分,且随外源 NaCl 浓度增加,土壤盐分累积量逐渐增大,S3、S4 处理枸杞根层土壤盐分累积量最高,分别为 2.29、2.45 $\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$,较 CK 分别提高 42.47%、52.58%。各处理枸杞根区 (0~60 cm) 土壤 EC 值较 60~100 cm 土层提高 9.34%~24.60%,出现明显的表聚现象。一方面,是因为随着外源 NaCl 浓度的升高,土壤入渗率降低,导致土降低了壤盐分向下运移较困难,减少 60~100 cm 土层盐分积累,对该土层 EC 值影响较小;另一方面,在枸杞生长后期,气温升高,蒸发蒸腾强烈,

“盐随水走”,60~100 cm 土层盐分逐渐向上运移,在表层聚集,表层含盐量增加^[27-28]。

土壤 pH 值和 SAR 是评价土壤盐碱化程度的重要指标^[29]。Hafiz 等^[30]通过配置不同浓度的 NaCl 灌溉水灌溉水稻发现,随外源 NaCl 浓度的增加,土壤 pH 呈升高趋势。这与本研究结果一致,这是因为外源 NaCl 增加了土壤的 Cl⁻和 HCO₃⁻浓度,从而提高土壤的 pH 值^[31-32],且导致根层 SAR 呈线性增加,其中,S4 处理下 0~60 cm 土层的土壤平均 SAR 较 CK 提高 26.10% ($P<0.05$),而 S1、S2 处理根层土壤 SAR 均值较 CK 分别提高 0.85%、10.75% ($P>0.05$)。这是因为外源 NaCl 浓度的增加,使灌溉水中 Na⁺含量显著最高,Na⁺进入土壤后置换出耕作层中的 Mg²⁺和 Ca²⁺,导致耕作层土壤出现钠质化趋势,且 Na⁺置换强度随灌溉水浓度增高而增大^[33]。

不同盐浓度微咸水灌溉会在一定程度上影响作物产量及其生长指标^[34]。Hu 等^[35]指出,配置 50 mmol·L⁻¹浓度 NaCl 与对照(0 mmol·L⁻¹)相比可有效改善枸杞生长状况,叶和根的相对生长速率提高 47.2%,干果产量增加 60.4%,但随配置盐浓度的升高而降低。杨广等^[36]发现,灌溉水矿化度高于 3 g·L⁻¹时,籽棉产量下降 2.36%;Khanishova 等^[37]指出 200 μmol·L⁻¹的 NaCl 浓度灌溉水可抑制小麦生长,减产达 23.5%。本研究与这些试验得到的结论一致。本研究发现,在河套灌区掺加外源 NaCl 浓度不超过 0.5 g·L⁻¹(S1 和 S2 处理),在一定程度提高枸杞耐盐能力,缓解因盐分胁迫产生的负面影响,促进枸杞生长,枸杞产量较 CK 处理分别下降 26.49%和 42.06% ($P<0.05$),而掺加高浓度外源 NaCl(S3 和 S4 处理)会引起根层 Na⁺浓度急剧增加,破坏土壤渗透性与结构,抑制枸杞根系对水分和养分的吸收,严重影响枸杞正常生长,导致枸杞产量下降 57.36%和 64.76%^[38]。

4 结 论

相比传统淡水灌溉(CK),掺加外源 NaCl 浓度小于 0.5 g·L⁻¹的微咸水灌溉,枸杞根层含水率提高 4.18%~16.80% ($P<0.05$),枸杞产量下降 26.49%~42.06%,相比于其他浓度处理,产量下降幅度较小;土壤含盐量为 1.72~2.19 mS·cm⁻¹,pH 值为 7.45~7.71,SAR 为 19.12~20.99 mmol^{1/2}·L^{-1/2},与 CK 差异都不显著。建议在河套灌区 Cl-Na 型微咸水水质区枸杞种植条件下外源 NaCl 浓度小于 0.5 g·L⁻¹。

参 考 文 献:

[1] 李泽岩, 曹文庚, 王卓然, 等. 内蒙古河套灌区浅层地下水化学特征和灌溉适宜性分析[J]. 现代地质, 2022, 36(2): 418-426.
LI Z Y, CAO W G, WANG Z R, et al. Hydrochemical characterization and irrigation suitability analysis of shallow groundwater in Hetao irrigation district, Inner Mongolia [J]. Geoscience, 2022, 36(2): 418-426.

[2] WEI C C, LI F H, YANG P L, et al. Effects of irrigation water salinity on soil properties, N₂O emission and yield of spring maize under mulched drip irrigation[J]. Water, 2019, 11(8): 1548.

[3] 李金刚, 何平如, 陈菁, 等. 灌溉水盐度对玉米出苗、产量、品质及土壤盐分动态的影响[J]. 节水灌溉, 2024, (4): 1-10.
LI J G, HE P R, CHEN J, et al. The effects of irrigation water salinity on maize emergence, yield, quality and soil salt dynamics[J]. Water Saving Irrigation, 2024, (4): 1-10.

[4] 郭全恩, 南丽丽, 李保国, 等. 灌溉水盐分组成对土壤水盐迁移参数的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(23): 123-128.
GUO Q E, NAN L L, LI B G, et al. Effect of salt ion composition of irrigation water on parameters of soil water and salt movement[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(23): 123-128.

[5] 张作为, 李宏宇, 付强, 等. 化肥有机肥配施对河套灌区土壤盐分及玉米水肥利用的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2023, 31(5): 1170-1182.
ZHANG Z W, LI H Y, FU Q, et al. Effects of combined application of chemical and organic fertilizers on soil salinity and corn water and fertilizer utilization in Hetao irrigation district [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2023, 31(5): 1170-1182.

[6] 杜丹丹, 白燕英, 袁德亮. 河套灌区地下水化学时空特征及环境驱动因素[J]. 环境科学, 2024, 45(10): 5777-5789.
DU D D, BAI Y Y, YUAN D L. Chemical spatiotemporal characteristics and environmental driving factors of groundwater in Hetao irrigation area[J]. Environmental Science, 2024, 45(10): 5777-5789.

[7] 张通港, 胡行路, 罗敏, 等. 微咸水离子组成对膜下滴灌土壤水盐分布和作物生长的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(8): 16-25.
ZHANG T G, HU X L, LUO M, et al. The impact of ion composition in saline water on soil salinity, salt distribution, and crop growth under mulched drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(8): 16-25.

[8] CUI Q, XIA J B, YANG H J, et al. Biochar and effective microorganisms promote *Sesbania cannabina* growth and soil quality in the coastal saline-alkali soil of the Yellow River Delta, China[J]. Science of the Total Environment, 2021, 756: 143801.

[9] 徐鑫, 张金珠, 李宝珠, 等. 不同盐度土壤水盐时空分布特征及对棉花出苗的影响[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2022, 40(2): 204-212.
XU X, ZHANG J Z, LI B Z, et al. Response characteristics and numerical simulation of soil water and salt dynamics in different salinized cotton seedling stage to submembrane drip irrigation[J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 2022, 40(2): 204-212.

[10] ZARTMAN R E, GICHURU M. Saline irrigation water: effects on soil chemical and physical properties[J]. Soil Science, 1984, 138(6): 417-422.

[11] 乔若楠. 不同离子组成微咸水灌溉对盆栽土壤理化性质和生菜生长的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.

- QIAO R N. Effects of saline water irrigation with different ionic composition on physical and chemical properties of potting soil and growth of lettuce[D]. Yangling; Northwest A&F University, 2022.
- [12] 郑复乐, 姚荣江, 杨劲松, 等. 改良材料对微咸水滴灌农田土壤盐分分布与离子组成的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(8): 60-71.
- ZHENG F L, YAO R J, YANG J S, et al. The effects of soil amendment with different materials on soil salt distribution and its ion composition under brackish-water drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(8): 60-71.
- [13] 李慧, 林青, 徐绍辉. 咸水/微咸水入渗对土壤渗透性和盐分阳离子运移的影响[J]. 土壤学报, 2020, 57(3): 656-666.
- LI H, LIN Q, XU S H. Effect of infiltration of saline water/brackish water on soil permeability and transport of salt cations in the soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(3): 656-666.
- [14] WANG Q M, HUO Z L, ZHANG L D, et al. Impact of saline water irrigation on water use efficiency and soil salt accumulation for spring maize in arid regions of China[J]. Agricultural Water Management, 2016, 163(1): 125-138.
- [15] 苟淇书. 不同矿化度灌溉水对土壤理化性质及冬小麦生长的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2021.
- GOU Q S. Effects of irrigation water with different salinity on soil physical and chemical properties and growth of winter wheat[D]. Tian: Shandong Agricultural University, 2021.
- [16] 祁琳, 郭龙梅, 刘允德, 等. 刺槐幼苗非结构性碳水化合物对 NaCl 胁迫的动态响应[J]. 林业科学, 2022, 58(1): 32-42.
- QI L, GUO L M, LIU Y D, et al. Dynamic responses of non-structural carbohydrates in *Robinia pseudoacacia* seedlings to NaCl stress[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2022, 58(1): 32-42.
- [17] 杨文杰. 微咸水膜下滴灌对加工番茄生理生长及耗水规律的影响研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2020.
- YANG W J. Effect of drip irrigation under brackish water film on physiological growth and water consumption of processing tomato[D]. Shihezi: Shihezi University, 2020.
- [18] GARG N, CHOUDHARY O P, THAMAN S, et al. Effects of irrigation water quality and NPK-fertigation levels on plant growth, yield and tuber size of potatoes in a sandy loam alluvial soil of semi-arid region of Indian Punjab[J]. Agricultural Water Management, 2022, 266: 107604.
- [19] 姜帅. 河套灌区枸杞种植中微咸水盐离子浓度限值与灌溉制度优化研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023.
- LOU S. Salinity ion concentration limit and optimization of irrigation system in brackish water under *Lycium barbarum* cultivation in Hetao-irrigation district [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2023.
- [20] 李彬, 史海滨, 张建国, 等. 节水改造前后内蒙古河套灌区地下水水化学特征[J]. 农业工程学报, 2014, 30(21): 99-110.
- LI B, SHI H B, ZHANG J G, et al. Hydrochemical characteristics of groundwater before and after water-saving reform in Hetao irrigation district, Inner Mongolia[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(21): 99-110.
- [21] 王育强. 微咸水不同淋洗灌溉模式对盐碱土盐运移特性影响的试验研究[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2023.
- WANG Y Q. Experimental study on the influence of different leaching irrigation modes of brackish water on water and salt transport characteristics of saline-alkali soil[D]. Ala'er: Tarim University, 2023.
- [22] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- LU R K. Methods for agricultural chemical analysis of soil[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [23] 邓箴. 基于蒸散量的宁夏半干旱区枸杞高效节水智能灌溉决策研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2022.
- DENG Z. Research on efficient water saving intelligent irrigation decision of *Lycium barbarum* based on evapotranspiration in semi-arid region of Ningxia[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2022.
- [24] 吕欣河. 微咸水微肥灌溉及配套措施对枸杞生长及土壤环境的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021.
- LV X H. Response of *Lycium barbarum*-soil and its supporting measures to irrigated with brackish water and micro-fertilizer[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021.
- [25] 周爽. 咸水灌溉对棉田土壤质量和温室气体排放的影响研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2023.
- ZHOU S. Study on the effects of saline water irrigation on soil quality and greenhouse gases emission in cotton field[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2023.
- [26] 孔春贤, 杨广, 刘承岳, 等. 不同矿化度水源膜下滴灌棉田土壤盐动态和作物生长模拟[J]. 干旱地区农业研究, 2024, 42(1): 108-122.
- KONG C X, YANG G, LIU C Y, et al. Simulation of soil water and salt migration and crop growth under film drip irrigation with different water salinity in cotton field[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2024, 42(1): 108-122.
- [27] 丛鑫. 微咸水灌溉下冬枣生长生理特征及水-土环境效应研究[D]. 济南: 济南大学, 2023.
- CONG X. Research of growth and physiological characteristics of winter jujube and water-soil environment effects under brackish water irrigation[D]. Jinan: University of Jinan, 2023.
- [28] MA J Y, LI Z Y, JIANG W G, et al. Effects of different salinity levels in drip irrigation with brackish water on soil water-salt transport and yield of protected tomato(*Solanum lycopersicum*) [J]. Agronomy, 2023, 13(9): 2442.
- [29] 赵惠丽, 于金艺, 刘涛, 等. 秸秆与脱硫石膏配施改良黄河三角洲盐碱地的理化性质[J]. 环境科学, 2023, 44(7): 4119-4129.
- ZHAO H L, YU J Y, LIU T, et al. Application of desulphurized gypsum with straw to improve physicochemical properties of saline-alkali land in Yellow River Delta[J]. Environmental Science, 2023, 44(7): 4119-4129.
- [30] HAFIZ M W, GHULAM S, NOOR-US S, et al. Deleterious impact of sodium chloride (NaCl) toxicity on chemical properties of soil and ionic composition of rice[J]. Pakistan Journal of Agricultural Research, 2021, 34(1): 169-175.
- [31] 王泽林, 杨广, 王春霞, 等. 咸水灌溉对土壤理化性质和棉花产量的影响[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2019, 37(6): 700-707.
- WANG Z L, YANG G, WANG C X, et al. Effects of saline water irrigation on cotton yield and soil physicochemical properties [J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 2019, 37(6): 700-707.
- [32] YANG G, LI F D, TIAN L J, et al. Soil physicochemical properties and cotton (*Gossypium hirsutum* L.) yield under brackish water

mulched drip irrigation [J]. Soil and Tillage Research, 2020, 199: 104592.

[33] 吴忠东. 微咸水畦灌对土壤水盐分布特征和冬小麦产量影响研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2008.

WU Z D. Study on the effect of soil water and salt distribution characteristics and winter wheat yield by saline water border irrigation [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2008.

[34] 杨广, 雷杰, 孔春贤, 等. 膜下滴灌水盐矿化度对棉花生长的影响及 AquaCrop 模拟 [J]. 农业工程学报, 2022, 38(21): 83-92.

YANG G, LEI J, KONG C X, et al. Effects of water salinity on cotton growth in mulched drip irrigation and its simulation by AquaCrop model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(21): 83-92.

[35] HU J, HUX K, ZHANG H W, et al. Moderate NaCl alleviates osmotic stress in *Lycium ruthenicum* [J]. Plant Growth Regulation, 2022, 96(1): 25-35.

[36] 杨广, 李万精, 任富天, 等. 不同矿化度咸水膜下滴灌棉花土壤盐分累积规律及其数值模拟 [J]. 农业工程学报, 2021, 37(19): 73-83.

YANG G, LI W J, REN F T, et al. Soil salinity accumulation and model simulation of cotton under mulch drip irrigation with different salinity level water [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(19): 73-83.

[37] KHANISHOVA M A, TAGIYEVA K R, AZIZOV I V. Effect of NaCl on physiological performance and yield of wheat hybrids [J]. Advanced Studies in Biology, 2024, 16(1): 1-12.

[38] DONG X L, WANG J T, ZHANG X J, et al. Long-term saline water irrigation decreased soil organic carbon and inorganic carbon contents [J]. Agricultural Water Management, 2022, 270: 107760.

(上接第 79 页)

[22] 胡田田, 何琼, 洪霞, 等. 基于模糊 Borda 组合模型评价番茄产量及品质对水肥供应响应 [J]. 农业工程学报, 2019, 35(19): 142-151.

HU T T, HE Q, HONG X, et al. Response of tomato yield-quality evaluated by fuzzy Borda combined model to irrigation and fertilization supply [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(19): 142-151.

[23] OWEIS T Y, FARAHANI H J, HACHUM A Y. Evapotranspiration and water use of full and deficit irrigated cotton in the Mediterranean environment in northern Syria [J]. Agricultural Water Management, 2011, 98(8): 1239-1248.

[24] 于坤, 郁松林, 刘怀锋, 等. 不同根区交替滴灌方式对赤霞珠葡萄幼苗根冠生长的影响 [J]. 农业工程学报, 2015, (4): 113-120.

YU K, YU S L, LIU H F, et al. Effects of alternate partial root-zone drip irrigation on growth of root and shoot of *Cabernet Sauvignon* grape seedlings [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, (4): 113-120.

[25] MACHEKPOSHI M F, SHAHNAZARI A, YOUSEFIAN M, et al. The effect of alternate partial root-zone drying and deficit irrigation on the yield, quality, and physiochemical parameters of milled rice [J]. Agricultural Water Management, 2023, 289: 108546.

[26] 刘星, 曹红霞, 廖阳, 等. 滴灌模式对黄土高原苹果树生长、产量及根系分布的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(4): 57-66, 120.

LIU X, CAO H X, LIAO Y, et al. Effects of drip irrigation methods on the growth, yield and root distribution of apple trees on the Loess Plateau [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(4): 57-66, 120.

[27] 刘琳絮, 王铁梅, 张霁, 等. 紫花苜蓿根系主要功能性状对分根区交替灌溉的响应 [J]. 草地学报, 2023, 31(3): 852-859.

LIU L X, WANG T M, ZHANG J, et al. Response of the main functional traits of alfalfa roots to alternate partial root-zone irrigation [J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(3): 852-859.

[28] WANG J T, DU G F, TIAN J S, et al. Effect of irrigation methods on root growth, root-shoot ratio and yield components of cotton by regulating the growth redundancy of root and shoot [J]. Agricultural Water Management, 2020, 234: 106120.

[29] EAPEN D, BARROSO M L, PONCE G, et al. Hydrotropism: root growth responses to water [J]. Trends in Plant Science, 2005, 10(1): 44-50.

[30] 郑健, 李欣怡, 马静, 等. 生物炭施肥沼液对渗出液电导率、全氮含量及土壤理化性质的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(3): 134-144.

ZHENG J, LI X Y, MA J, et al. Effects of combined application of biochar and biogas slurry on percolate electrical conductivity, total nitrogen and soil physical and chemical properties [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(3): 134-144.

[31] 李玮雯, 曲英华, 徐奕琳, 等. 不同发酵原料沼液的养分含量及变化 [J]. 中国沼气, 2012, 30(3): 17-20, 24.

LI Y W, QU Y H, XU Y L, et al. Change of nutrition contents of biogas slurry with different fermentation raw materials [J]. China Biogas, 2012, 30(3): 17-20, 24.

[32] 甘肃省质量技术监督局. 兰州市无公害蔬菜生产技术规程番茄: DB62/T 836-2002 [S]. 兰州: 中国标准出版社, 2002.

Gansu Provincial Bureau of Quality and Technical Supervision. Technical regulations for production of pollution free vegetables in Lanzhou city-tomatoes: DB62/T 836-2002 [S]. Lanzhou: Standards Press of China, 2002.

[33] ZHAO D, WANG Z, ZHANG J, et al. Improving yield and quality of processing tomato (*Lycopersicon esculentum* Miller) using alternate partial root-zone drip irrigation in arid Northwest China [J]. Water, 2019, 11(7): 13.

[34] 杨明达, 张素瑜, 杨慎骄, 等. 地下滴灌对冬小麦-夏玉米根系吸水特征的影响 [J]. 生态学杂志, 2024, 43(2): 469-479.

YANG M D, ZHANG S Y, YANG S J, et al. Effects of subsurface drip irrigation on root water uptake of winter wheat and summer maize [J]. Chinese Journal of Ecology, 2024, 43(2): 469-479.

[35] FENG X Y, PU J X, LIU H J, et al. Effect of fertigation frequency on soil nitrogen distribution and tomato yield under alternate partial root-zone drip irrigation [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2023, 22(3): 897-907.