

河套灌区枸杞种植下微咸水代表性盐离子浓度限值研究

娄 帅¹ 杨树青¹ 张万锋² 刘 月¹ 吕欣河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. 内蒙古师范大学旅游学院, 呼和浩特 010028)

摘要: 为确定适宜枸杞灌溉的微咸水代表性盐离子浓度限值,于2019—2020年在河套灌区下游开展 NaCl、CaCl₂、CaSO₄、NaHCO₃、Na₂SO₄ 5种代表性地下水盐分类型和4种浓度水平(质量浓度0.1、0.5、2.0、4.0 g/L)的田间交叉试验。结果表明:在相同矿化度下,外源 NaCl、NaHCO₃ 影响下枸杞生育期受渗透胁迫、次生胁迫最强,外源 CaCl₂ 质量浓度低于2.0 g/L能够缓解枸杞渗透胁迫,外源 CaCl₂、CaSO₄ 质量浓度低于4.0 g/L能够缓解次生胁迫。枸杞干果产量、百粒干质量随外源 NaCl、Na₂SO₄、CaSO₄ 质量浓度升高而降低,在0.1 g/L时达峰值,随外源 CaCl₂ 质量浓度升高呈单峰分布,0.5 g/L时最高。枸杞果实中总糖含量、黄酮含量、氨基酸总量随外源 CaCl₂、CaSO₄ 质量浓度升高先升后降,分别在0.5、2.0、2.0 g/L时达峰值。甜菜碱含量、氨基酸总量随 NaCl、Na₂SO₄、NaHCO₃ 质量浓度升高而降低,超过0.1 g/L后显著下降。类胡萝卜素含量随 CaCl₂、NaHCO₃ 质量浓度升高先升后降,分别在2.0、0.5 g/L时达峰值。相同阴离子(Cl⁻、SO₄²⁻)环境下,Na⁺、Ca²⁺分别对枸杞产量、品质的综合评分存在降低、提升作用,相同阳离子(Na⁺)环境下,阴离子对综合评分的负面影响由大到小依次为Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻。基于高斯回归发现,当Na⁺、Ca²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻浓度分别为18.6~19.2 mmol/L、12.2~13.0 mmol/L、63.0~68.4 mmol/L、6.3~14.4 mmol/L、5.5~14.0 mmol/L时,枸杞种植效益贴合度较高(C_i>0.7)。随C_i标准提高,Na⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻浓度向取值下限(18.6、63.0、6.3、5.5 mmol/L)逼近,Ca²⁺浓度向上限(13.0 mmol/L)逼近。以高于不同水质下产量、品质综合评分的平均值0.46为标准,发现灌溉微咸水中Na⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻存在浓度上限限值,分别为34.8、81.6、22.6、21.4 mmol/L,Ca²⁺存在下限限值,为9.8 mmol/L。研究可为指导河套灌区不同水质区枸杞种植提供科学依据。

关键词: 枸杞;微咸水;TOPSIS;盐胁迫;产量;品质

中图分类号: S273.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)11-0319-16 OSID: 

Salt Concentration Threshold of *Lycium barbarum* under Different Types of Brackish Water Irrigation in Hetao Irrigation Area

LOU Shuai¹ YANG Shuqing¹ ZHANG Wanfeng² LIU Yue¹ LÜ Xinhe¹

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China
2. College of Torism, Inner Mongolia Normal University, Huhhot 010028, China)

Abstract: *Lycium barbarum* (goji) fruit is widely used as a medicinal food in China. Aiming to investigate how different types of salt ions in brackish water affected the yield, appearance quality, and nutritional quality of *Lycium barbarum*. A field crossover experiment was conducted in the Hetao Irrigation Area, using five representative groundwater salinity types (NaCl, CaCl₂, CaSO₄, NaHCO₃, Na₂SO₄) at four concentration levels (0.1 g/L, 0.5 g/L, 2.0 g/L, 4.0 g/L), along with a total of 21 control treatments. The irrigation amount was 100 mm of brackish water in Wulat Front Banner, the main production area of *Lycium barbarum*. Throughout the growth period, *Lycium barbarum* was irrigated three times. The results revealed that NaCl had the strongest inhibitory effect on the osmotic regulation of *Lycium barbarum* among the tested salinity types. NaHCO₃ had the most significant impact on the secondary stress. CaCl₂ at concentrations below 2.0 g/L helped alleviate osmotic stress, while both CaCl₂ and CaSO₄ reduced secondary stress. The yield and dry mass of 100 grains of *Lycium barbarum* was

收稿日期: 2023-01-11 修回日期: 2023-08-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(52069023、52179037)

作者简介: 娄帅(1996—),男,博士生,主要从事盐碱地改良研究,E-mail: 865822716@qq.com

通信作者: 杨树青(1966—),女,教授,博士生导师,主要从事农业水土资源利用与环境调控研究,E-mail: nmndysq@126.com

decreased with the increase of concentrations of NaCl , Na_2SO_4 , and CaSO_4 , reaching their peak at 0.1 g/L. The yield and dry mass of 100 grains was initially increased and then decreased with the increase of concentrations of NaHCO_3 and CaCl_2 , reaching their peak at 0.5 g/L. Total sugars, flavonoids, and total amino acids were increased and then decreased with the increase of concentrations of CaCl_2 and CaSO_4 , reaching their peak at 0.5 g/L, 2.0 g/L, and 2.0 g/L, respectively. Betaine and total amino acids were decreased with the increase of concentrations of NaCl , Na_2SO_4 , and NaHCO_3 , and significantly decreased after exceeding 0.1 g/L. Carotenoid content was increased and then decreased with the increase of concentrations of CaCl_2 and NaHCO_3 , reaching its peak at 2.0 g/L and 0.5 g/L, respectively, which was significantly higher than that of the control treatment. The comprehensive scores indicated that under the same anion (Cl^- , SO_4^{2-}) environment, Na^+ inhibited the planting benefits of *Lycium barbarum*, while Ca^{2+} promoted them. Under the same cation (Na^+) environment, the inhibitory strength of different anions on the planting benefits of *Lycium barbarum* was observed in the order of Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- . Based on Gaussian regression, it was found that when Na^+ , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} and HCO_3^- were ranged from 18.6 mmol/L to 19.2 mmol/L, 12.2 mmol/L to 13.0 mmol/L, 63.0 mmol/L to 68.4 mmol/L, 6.3 mmol/L to 14.4 mmol/L and 5.5 mmol/L to 14.0 mmol/L, respectively, the planting benefit compatibility of *Lycium barbarum* was higher ($C_i > 0.7$). With the improvement of C_i standard, Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- approached the lower limit (18.6 mmol/L, 63.0 mmol/L, 6.3 mmol/L, 5.5 mmol/L), and Ca^{2+} approached the upper limit (13.0 mmol/L). The planting benefits remained satisfactory (with an average fit degree greater than 0.46) within the simulated range. The upper concentration thresholds were determined as 34.8 mmol/L for Na^+ , 81.6 mmol/L for Cl^- , 22.6 mmol/L for SO_4^{2-} , and 21.4 mmol/L for HCO_3^- . The lower concentration threshold for Ca^{2+} was determined as 9.8 mmol/L. These research findings provided a scientific basis for guiding the cultivation of *Lycium barbarum* in different water-quality areas of the Hetao Irrigation Area. The research evaluated the effects of different salinity levels of brackish water salt ions on the irrigation of *Lycium barbarum* and proposed suitable concentration ranges of various sensitive ions for irrigating *Lycium barbarum*, providing a theoretical basis for the promotion of brackish water irrigation for *Lycium barbarum*. The main innovation lied in the establishment of the relationship between brackish water salt ion concentration and the comprehensive benefits of *Lycium barbarum* through cross experiments and numerical simulations. The research findings demonstrated strong applicability in moderately saline-alkaline soils, mainly including loess and loam soils.

Key words: *Lycium barbarum*; brackish water; TOPSIS; salt stress; yield; quality

0 引言

近年来,内蒙古河套灌区灌溉面积不断扩大,然而,由于国家对黄河水资源实行全流域统一管理,导致灌区引黄指标逐渐减少,淡水资源日益短缺^[1]。为解决这一问题,许多地区采用了微咸水灌溉^[2]。然而,过高的微咸水盐分会对作物生长、产量、品质产生不良影响。如棉花株高、茎粗及根长密度随着微咸水电导率上升而显著下降^[3],微咸水盐分显著降低冬小麦抽穗开花期蒸腾作用^[4]。用 2.0 g/L NaCl 溶液灌溉使黄瓜减产 10.35% ~ 18.34%^[5], 4.6 g/L 微咸水灌溉导致番茄维生素 C、番茄红素、可溶性糖含量显著降低^[6]。枸杞作为河套灌区特色经济作物,不仅较耐盐^[7],且具有抗衰老、保护视神经、抗癌、预防糖尿病等功效,市场价值较高^[8]。因此,在微咸水灌溉区推广枸杞种植对缓解淡水资源矛盾具有长远意义。

枸杞生理、产量、品质指标对微咸水盐分胁迫的

敏感性不同,综合提出微咸水盐分限值至关重要。前人基于枸杞产量提出了微咸水盐分限值。如孙多强^[9]发现,超过 3.0 g/L 的微咸水灌溉下枸杞产量显著下降,魏琛琛等^[10]发现,5.0 g/L 微咸水灌溉下玉米产量较同灌水定额的淡水灌溉显著降低 30.88% ~ 37.32%。然而,综合考虑枸杞产量、外观品质、营养品质提出微咸水盐分限值的研究较少^[11]。黄酮含量、类胡萝卜素含量、甜菜碱含量、氨基酸、总糖含量为枸杞中发挥药用价值的主要成分^[12-13],根据 GB/T 18672—2014《枸杞》,单粒干质量是枸杞分级的重要指标^[14]。因此,应同时基于枸杞产量、单粒干质量和主要营养成分提出微咸水盐分限值。此外,河套灌区地下微咸水水质类型差异明显^[15],而不同盐分类型对作物的影响方式不同,如 Na^+ 比 Cl^- 更有利于小白菜中的氨基酸累积, Cl^- 比 Na^+ 更有利于小白菜干物质累积和光合速率^[16],葡萄氨基酸含量随 Ca^{2+} 浓度升高而升高^[17]。外源 CaCl_2 使苹果品质的综合评分提升^[18]。因此,将微

咸水盐离子组分分别讨论,以提出适于不同水质区的微咸水盐分限值至关重要。此外,微咸水不同盐分类型对作物盐胁迫的影响方式不同,进而对枸杞果实发育的影响机制也不同。因此,揭示外源盐组分对枸杞生育期盐胁迫的影响对明晰微咸水对果实发育的作用机制十分重要。

河套灌区微咸水主要可分为 HCO_3-Na 型、 SO_4-Na 型和 $\text{Cl}-\text{Na}$ 型^[15], Ca^{2+} 是河套灌区地下水广泛分布的优势离子^[19]。本研究开展 NaCl 、 CaCl_2 、 CaSO_4 、 NaHCO_3 、 Na_2SO_4 5 种灌区代表性地下水盐分组合与 4 浓度水平的交叉试验,揭示不同外源盐分类型对枸杞各生育期渗透、次生胁迫的影响趋势,并基于枸杞中总糖含量、黄酮含量、类胡萝卜素含量、甜菜碱含量、氨基酸总量及干果产量、百粒干质量对枸杞种植效益进行 TOPSIS 评分,构建微咸水中 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 浓度与效益评分间的高斯映射关系,提出微咸水盐离子浓度限值,以期

为不同水质区枸杞灌溉提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于河套灌区下游乌拉特灌域红卫试验站(40°42'N,107°24'E,海拔 1 040 m),属中温带半干旱大陆性气候,年均降水量为 143.8 ~ 233.4 mm,2019 年和 2020 年降水量分别为 157.3 mm 和 146.7 mm,属枯水年。年均蒸发量 2 383 mm,年均气温 7.9℃,无霜期 145 d,春冬季地表返盐较严重。试验于 2019 年 4 月 10 日开始,至 2020 年 10 月 31 日结束。供试土壤为粉土,土壤质地见表 1。土壤容重 1.55 g/cm³,中度盐碱地(全盐量 0.48% ~ 0.84%)。枸杞生育期内日降水量及温度变化如图 1 所示,平均地下水埋深 1.83 m。试验区地下微咸水中 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 浓度分别为 18.55、8.77、9.37、63.02、6.25、5.50 mmol/L。

表 1 研究区土壤质地参数
Tab.1 Soil texture of research area

土层深度/ cm	黏粒(粒径 0 ~ 0.002 mm)	粉粒(粒径 0.002 ~ 0.05 mm)	砂粒(粒径 0.05 ~ 2 mm)	平均粒径/ μm	中值粒径/ μm	容重/ (g·cm ⁻³)	饱和导水率/ (cm·h ⁻¹)	土壤类型
	质量分数/%	质量分数/%	质量分数/%					
0 ~ 10	9.57	72.90	17.53	45.26	35.63	1.36	3.11	粉壤土
10 ~ 20	11.02	71.19	17.79	31.12	27.21	1.33	2.61	粉壤土
20 ~ 30	3.19	84.79	12.02	108.05	73.33	1.37	8.53	粉土
30 ~ 40	2.98	87.24	9.78	112.14	75.8	1.46	8.98	粉土
40 ~ 60	2.76	86.62	10.62	113.34	76.51	1.44	9.51	粉土
60 ~ 80	4.22	86.98	8.80	101.81	69.61	1.42	6.84	粉土
80 ~ 100	2.40	79.46	18.14	109.32	74.06	1.39	10.53	粉壤土

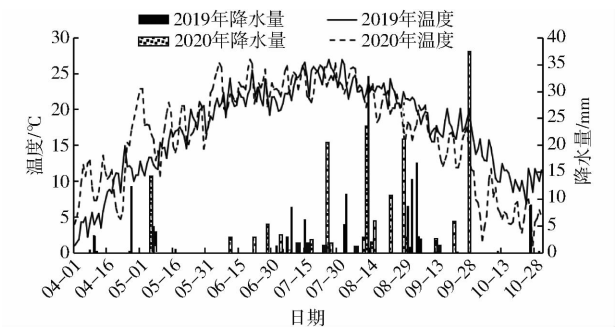


图 1 枸杞生育期内日降水量和温度

Fig.1 Daily rainfall and temperature during growth period of *Lycium barbarum*

1.2 试验设计

开展 NaCl 、 CaCl_2 、 CaSO_4 、 NaHCO_3 、 Na_2SO_4 5 种代表性盐离子组合与 0.1、0.5、2.0、4.0 g/L 4 个质量浓度梯度的二因素交叉试验,加对照共 21 个处理,重复 3 次,共 63 个小区。内蒙古河套灌区不同水质区地下水中 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 浓度

范围分别为 13.8 ~ 100.4 mmol/L、0.9 ~ 13.3 mmol/L、11.5 ~ 108.8 mmol/L、1.7 ~ 23.6 mmol/L、4.0 ~ 32.5 mmol/L^[15,20]。代表性枸杞微咸水灌溉区乌拉特前旗水质 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 浓度分别为 18.55、8.77、63.02、6.25、5.50 mmol/L。综合考虑各处理的代表性和阴阳离子比例,将 NaCl 、 CaCl_2 、 CaSO_4 、 NaHCO_3 和 Na_2SO_4 均按 0.1、0.5、2.0、4.0 g/L 加入当地微咸水中。调配后各处理 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 浓度分别为 18.6 ~ 87.5 mmol/L、8.80 ~ 62.82 mmol/L、63.0 ~ 171.13 mmol/L、6.3 ~ 35.7 mmol/L、5.5 ~ 34.9 mmol/L,基本符合或涵盖乌拉特前旗与河套灌区盐离子浓度上限的构成区间,具有参考价值。

试验开始前,于红卫村及先锋镇的枸杞主要种植区调研,发现枸杞种植农户采用井灌时,单次灌溉约为 100 mm。在整个生育期内灌水 4 次,日期为 5 月 12 日、6 月 15 日、7 月 8 日和 8 月 9 日的前后

5 d,具体日期与当年降雨情况、气温、枸杞长势等因素有关。本试验灌水制度同当地(2019年分别在5月15日、6月17日、7月6日和8月9日,2020年分别在5月17日、6月17日、7月8日和8月9日灌溉),方式为畦灌。供试作物为10年生“宁杞一号”,试验布置采用完全随机区组设计,小区面积30 m²,种植株距1.0 m,行距3.0 m,4月末萌芽,8月中收获。各小区间设2 m保护带,四周用埋深1.2 m的聚乙烯塑料膜隔开,顶部留30 cm,防止水肥互窜,田间管理与当地农户管理一致。各处理单次的灌水量和盐分浓度设置见表2。

表 2 正交试验因素水平及盐分调配设计
Tab.2 Experimental factor level and salt allocation design

小区编号	处理编号	加入微咸水 盐分种类	加入盐分质量浓 度/(g·L ⁻¹)
T1	NC1	NaCl	0.1
T2	NC2		0.5
T3	NC3		2.0
T4	NC4		4.0
T5	NS1	Na ₂ SO ₄	0.1
T6	NS2		0.5
T7	NS3		2.0
T8	NS4		4.0
T9	CC1	CaCl ₂	0.1
T10	CC2		0.5
T11	CC3		2.0
T12	CC4		4.0
T13	CS1	CaSO ₄	0.1
T14	CS2		0.5
T15	CS3		2.0
T16	CS4		4.0
T17	NHC1	NaHCO ₃	0.1
T18	NHC2		0.5
T19	NHC3		2.0
T20	NHC4		4.0
CK			0

1.3 样品采集与测定

1.3.1 枸杞产量和百粒干质量测定

将每茬枸杞鲜果按小区编号分开排布到果栈子上,统一在热泵干燥装置中用煤火干燥,干燥房相对湿度25%,干燥温度60~70℃,每隔2 h进行称量,至枸杞质量不变时取出,干燥时长约8 h。干燥后称量各小区枸杞干质量,经折算获得单位面积干果产量。各小区分别随机取100粒干果称百粒干质量,重复5次取平均。

1.3.2 枸杞营养品质测定

总糖含量采用蒽酮比色法测定,黄酮含量采用卢丁比色法测定,总糖含量、黄酮含量测定仪器均为

UV-1800紫外-可见分光光度计(NRJJ-S-031型)。类胡萝卜素含量、甜菜碱含量采用高效液相色谱法测定,测定仪器为Altus A-10高效液相色谱仪(NRJJ-S-002型)。氨基酸总量依照GB 5009.124—2016《食品中氨基酸的测定》测定,仪器为氨基酸自动分析仪(L-8900型)。

1.3.3 枸杞盐胁迫指标测定

春梢生长期、开花初期、果实膨大期和夏盛果期对各小区枸杞叶片均匀采样,重复3次。通过0.1 mL乙醇提取物与3.0 mL蒽酮在沸水浴中反应10 min,并用分光光度计在625 nm处读取冷却样品来分析可溶性糖含量^[21]。用Heathand P法测定丙二醛含量^[22]。

1.4 基于TOPSIS法的枸杞果实综合评价

首先,将枸杞总糖含量、甜菜碱含量、类胡萝卜素含量、黄酮含量、氨基酸总量5种主要营养物质进行TOPSIS评分得到营养品质贴合度 C_{pi} ,然后对产量、百粒干质量、 C_{pi} 进行二次评分,得到种植效益贴合度 C_i 。

TOPSIS法计算步骤如下^[23]:

(1)构建原始评价参数矩阵:设有 a 个评价对象, b 个评价指标,原始数据可写为矩阵 $X=(x_{ij})_{a \times b}$, x_{ij} 为第 i 个样本的第 j 个指标。对指标进行归一化,即

$$Z_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^a x_{ij}^2} \tag{1}$$

(2)得到归一化矩阵 $Z=(Z_{ij})_{a \times b}$,由于以上4个指标均为数值越大越有利,因此各列最大值最小值构成的最优、最劣向量分别记为

$$Z^+ = (Z_{\max 1}, Z_{\max 2}, \cdots, Z_{\max b}) \tag{2}$$

$$Z^- = (Z_{\min 1}, Z_{\min 2}, \cdots, Z_{\min b}) \tag{3}$$

(3)第 i 个评价对象与最优、最劣方案的距离分别为

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^b (Z_{\max j} - Z_{ij})^2} \tag{4}$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^b (Z_{\min j} - Z_{ij})^2} \tag{5}$$

(4)第 i 个评价对象与最优方案的贴合度 C_i 为

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \tag{6}$$

1.5 基于高斯过程回归(GPR)的枸杞综合评分预测

大田试验以年为周期,所能获得的果实品质数据有限。因此,需充分考虑数值方法对小样本数据的适应性。高斯过程回归近年来在小样本特征的研究中被证明具有较高精度^[24-26]。本研究构建代表

性盐离子 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 浓度与 C_i 的高斯映射,基于模拟结果得到枸杞关于微咸水中各代表性离子的浓度限值。对于给定的数据集 $D = \{(x_i, y_i)\}_{i=1}^n$ (输入数据 $x_i \in \mathbf{R}^d$, 输出数据 $y_i \in \mathbf{R}$), $f(x^{(1)})$ 、 $f(x^{(2)})$ 、 $\cdots$ 、 $f(x^{(n)})$ 可构成随机变量的一个集合,且具有联合高斯分布,高斯过程的全部统计特征由均值函数 $m(x)$ 和协方差函数 $k(x, x')$ 组成,即

$$f(x) \sim GP(m(x), k(x, x')) \tag{7}$$

将噪声考虑到观测目标值 y 中,可建立高斯过程回归问题的一般模型,即

$$y = f(x) + \varepsilon \tag{8}$$

式中, ε 为独立的高斯白噪声,符合高斯分布,均值为 0, 方差为 σ^2 , 即可记作 $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$ 。对于式(8),由于噪声 ε 为独立于 $f(x)$ 的白噪声,当 $f(x)$ 服从高斯分布,则 y 同样服从高斯分布,则其有限观测值联合分布的集合可形成一个高斯过程,即

$$y \sim GP(m(x), k(x, x') + \sigma_n^2 \delta_{ij}) \tag{9}$$

式中 δ_{ij} 为 Kronecker delta 函数,当 $i = j$ 时,函数 $\delta_{ij} = 1$;协方差函数以矩阵形式表达为

$$\mathbf{C}(X, X) = \mathbf{K}(X, X) + \sigma_n^2 \mathbf{I} \tag{10}$$

式中 $\mathbf{I}$ —— $N \times N$ 的单位矩阵

$\mathbf{C}(X, X)$ —— $N \times N$ 的协方差矩阵

$\mathbf{K}(X, X)$ —— $N \times N$ 的核矩阵

构成核矩阵 $\mathbf{K}(X, X)$ 的函数 k 称为核函数,其元素 $K_{ij} = k(x_i, x_j)$ 。本研究选取径向基核函数中的高斯核 (Gaussian kernel) 作为高斯回归的核函数^[27], 表达式为

$$k(x_i, y_j) = \exp\left(-\frac{\|x_i, y_j\|^2}{2\sigma^2}\right) \tag{11}$$

根据贝叶斯原理,GP 在给定数据集 D 内建立先验函数,在 n^* 个给定测试数据集的 $D_1 = \{x_i, y_i\}_{i=n+1}^{n+n^*}$ 下转变为后验分布,则训练数据向量 $\mathbf{X}^*$ 的输出向量 $\mathbf{f}^*$ 和测试数据的输出向量 $\bar{\mathbf{f}}^*$ 的联合高斯分布

$$\begin{bmatrix} \mathbf{y} \\ \mathbf{f}^* \end{bmatrix} \sim N\left(0, \begin{bmatrix} \mathbf{K}(X, X) + \sigma_n^2 \mathbf{I} & \mathbf{K}(X, \mathbf{X}^*) \\ \mathbf{K}(\mathbf{X}^*, X) & \mathbf{K}(\mathbf{X}^*, \mathbf{X}^*) \end{bmatrix}\right) \tag{12}$$

由此可以得到主要的 GP 回归方程,即

$$\mathbf{f}^* | X, y, \mathbf{X}^* \sim N(m^*, \text{cov}(\mathbf{f}^*)) \tag{13}$$

其中 $m^* = E[\bar{\mathbf{f}}^* | X, y, \mathbf{X}^*] =$

$$\mathbf{K}(\mathbf{X}^*, X) (\mathbf{K}(X, X) + \sigma_n^2 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{K}(X, \mathbf{X}^*) \tag{14}$$

$$\text{cov}(\mathbf{f}^*) = \mathbf{K}(\mathbf{X}^*, \mathbf{X}^*) - \mathbf{K}(\mathbf{X}^*, X) (\mathbf{K}(X, X) + \sigma_n^2 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{K}(X, \mathbf{X}^*) \tag{15}$$

其中,预测均值向量 $\bar{\mathbf{f}}^*$ 就是 GP 回归模型的输出,即

输出向量 $\mathbf{f}^*$ 的预测值。

以 2019 年枸杞果实数据进行模型构建,2020 年数据进行验证。模型验证的统计判据包括决定系数 R^2 、均方根误差 (Root mean square error, RMSE)。

1.6 数据处理方法与建模环境

采用 SPSS 21 软件进行数据 z-score 归一化、LSD 多重比较 ($\alpha = 0.05$)。TOPSIS 评分、高斯过程回归分别主要采用 Python 环境下的 numpy 和 sklearn 包完成,2019—2020 年降雨和蒸发组合图采用 Microsoft Excel 2016 软件绘制,等值线图采用 Origin 2018 绘制。

2 结果与分析

2.1 不同代表性外源盐浓度对枸杞可溶性糖和丙二醛的影响

2.1.1 外源 NaCl 浓度的影响

如图 2a(图中不同大写字母表示相同生育期不同外源盐浓度处理下指标数据的差异显著,不同小写字母表示相同外源盐浓度处理下不同生育期指标数据的差异显著,下同)所示,枸杞叶片可溶性糖含量受不同浓度外源 NaCl 影响在各生育期为 2.07% ~ 4.39%。在果实膨大期,当外源 NaCl 质量浓度为 0.1、0.5、2.0 g/L 时,可溶性糖含量达峰值(分别为 3.12%、3.92%、4.39%)。在开花初期,当 NaCl 质量浓度为 4.0 g/L 时可溶性糖含量最高(2.65%)。当 NaCl 质量浓度为 0.5 g/L 时,可溶性糖含量显著高于其它浓度,当 NaCl 质量浓度达 4.0 g/L 时,除开花初期外,其余生育期可溶性糖含量均最低。总体来看,在各生育期,只有当 NaCl 质量浓度为 2.0 g/L 时,可溶性糖含量略高于对照组 (CK),这表明外源 NaCl 会抑制可溶性糖含量的合成。如图 2b 所示,枸杞叶片中丙二醛含量在不同浓度外源 NaCl 影响下为 12.2 ~ 18.3 $\mu\text{mol/g}$ 。不同 NaCl 浓度下丙二醛含量随生育期变化趋势相似(由大到小依次为:夏盛果期、果实膨大期、春梢生长期、开花初期)。当 NaCl 质量浓度最低(0.1 g/L)时,丙二醛含量显著低于其它浓度。

2.1.2 外源 CaCl₂ 浓度的影响

如图 2c 所示,可溶性糖含量在外源 CaCl₂ 影响下为 2.82% ~ 4.72%,较所有外源盐影响下均值最高,较 NaCl 影响下均值高 17.44%。不同 CaCl₂ 质量浓度下可溶性糖含量随生育期呈单峰分布,果实膨大期最高。夏盛果期前,4.0 g/L CaCl₂ 下可溶性糖含量最高,其次是 2.0、0.1、0.5 g/L。夏盛果期叶片细胞衰老,枸杞抗逆能力下降,此时 4.0 g/L CaCl₂ 下可溶性糖含量显著降低,并低于 CK 和 2.0 g/L 处

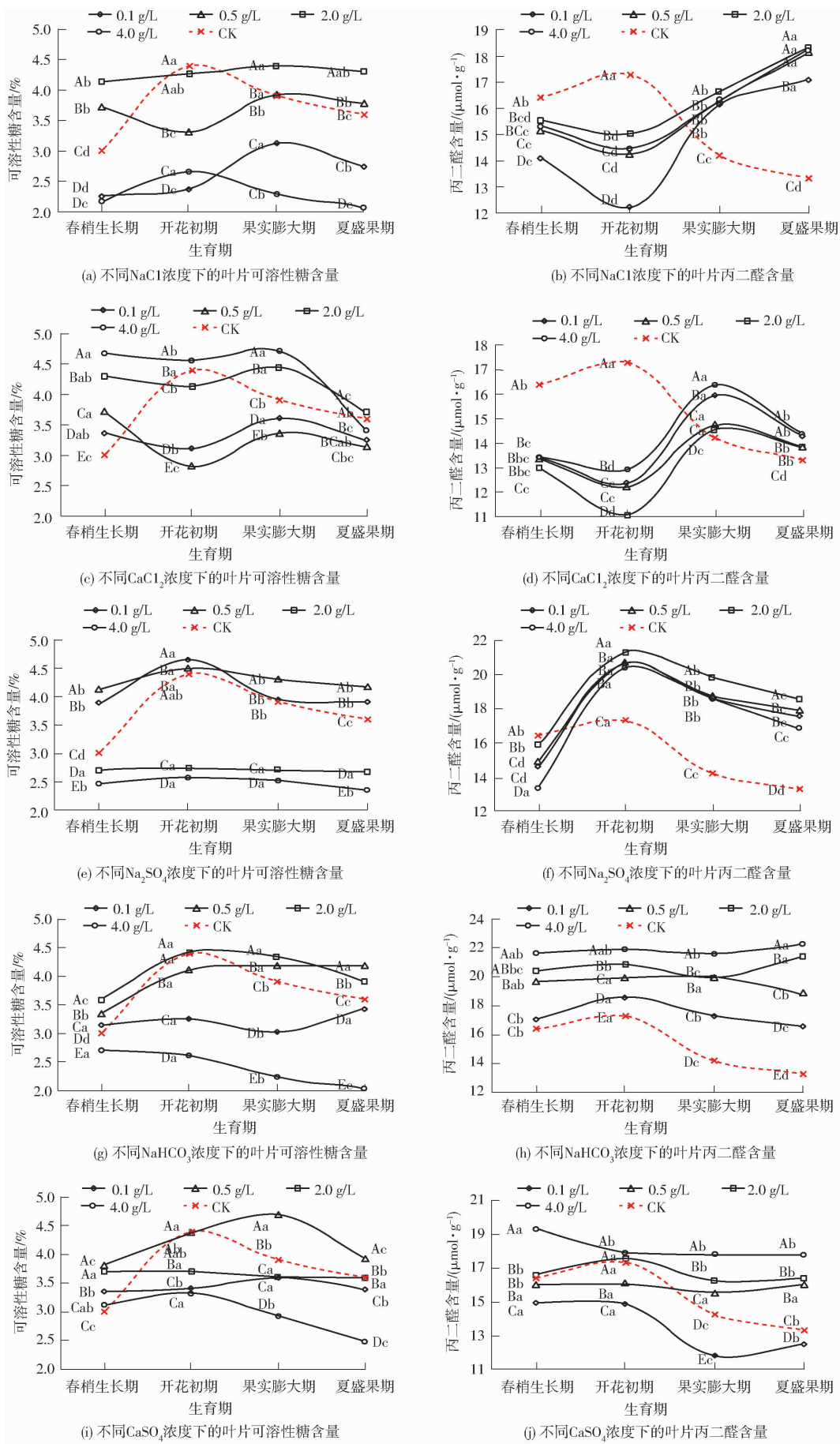


图 2 不同外源盐浓度下枸杞叶片中可溶性糖含量和丙二醛含量变化曲线

Fig. 2 Contents of soluble sugar and malondialdehyde in *Lycium barbarum* leaves at different concentrations of exogenous salt

理。如图 2d 所示,丙二醛含量在外源 CaCl_2 浓度影响下为 $11.07 \sim 16.35 \mu\text{mol/g}$,较 NaCl 影响下平均低 13.27% 。丙二醛含量在不同 CaCl_2 浓度下随生育期变化趋势相近(由大到小依次为:果实膨大期、夏盛果期、春梢生长期、开花初期)。从不同浓度看,春梢生长期、开花初期 CK 的丙二醛含量高于所有 CaCl_2 浓度处理。

2.1.3 外源 Na_2SO_4 浓度的影响

如图 2e 所示,可溶性糖含量随外源 Na_2SO_4 影响下各生育期为 $2.35\% \sim 4.50\%$,较 NaCl 影响下平均高 5.36% 。当外源 Na_2SO_4 质量浓度小于 0.5 g/L 时,可溶性糖含量随生育期呈单峰分布,开花初期最高(4.5%),与 CK 趋势一致。当 Na_2SO_4 质量浓度为 $2.0, 4.0 \text{ g/L}$ 时,可溶性糖含量显著降低,且随各生育期变化不显著。如图 2f 所示,枸杞丙二醛含量受外源 Na_2SO_4 影响为 $13.35 \sim 21.32 \mu\text{mol/g}$,较 NaCl 、 CaCl_2 下分别提高 $14.03\%、35.95\%$,可见 Na_2SO_4 较以上两种盐分对枸杞次生胁迫的程度更高。丙二醛含量在外源 Na_2SO_4 影响下时间尺度变化趋势与 CK 相近(由大到小依次为:开花初期、果实膨大期、夏盛果期、春梢生长期),但变化幅度不同。 Na_2SO_4 处理下丙二醛含量开花初期较春梢生长期平均提高 14.18% ,而 CK 提高 5.48% ,说明外源 Na_2SO_4 在开花初期使枸杞次生胁迫加剧。

2.1.4 外源 NaHCO_3 浓度的影响

如图 2g 所示,枸杞叶片可溶性糖含量受外源 NaHCO_3 影响为 $2.23\% \sim 4.43\%$,与 Na_2SO_4 相近。当外源 NaHCO_3 质量浓度为 2.0 g/L 时,可溶性糖含量随生育期推进呈单峰分布,在开花初期达峰值(4.43%),与 CK 趋势一致。当外源 NaHCO_3 质量浓度为 $0.1, 0.5 \text{ g/L}$ 时,可溶性糖含量在夏盛果期达峰值,可见低浓度外源 NaHCO_3 较高浓度处理下枸杞渗透调节峰值出现的时间延后。当 NaHCO_3 质量浓度为 4.0 g/L 时,在春梢生长期后持续下降,在夏盛果期最低,可见高浓度 NaHCO_3 在全生育期持续破坏枸杞渗透调节功能。如图 2h 所示,叶片丙二醛含量受外源 NaHCO_3 影响为 $16.63 \sim 22.31 \mu\text{mol/g}$,高于其它所有盐分下取值,可见 NaHCO_3 对枸杞次生胁迫的程度较高。丙二醛含量在 NaHCO_3 为 0.1 g/L 时在时间尺度与 CK 变化规律相似(由大到小依次为:开花初期、春梢生长期、果实膨大期、夏盛果期)。2.0、4.0 g/L 下丙二醛含量显著高于 CK。说明较高浓度外源 NaHCO_3 使枸杞受到的次生胁迫显著提升。

2.1.5 外源 CaSO_4 浓度的影响

如图 2i 所示,枸杞叶片可溶性糖含量受外源

CaSO_4 影响为 $2.47\% \sim 4.68\%$,均值仅次于 CaCl_2 ,可见两种钙盐促进枸杞渗透调节活动。当外源 CaSO_4 质量浓度为 $0.1, 0.5 \text{ g/L}$ 时,可溶性糖含量呈单峰分布,在果实膨大期达峰值($3.58\%、4.68\%$)。当外源 CaSO_4 质量浓度为 4.0 g/L 时,可溶性糖含量在开花初期达峰值,与 CK 一致。说明低浓度外源 CaSO_4 不会破坏枸杞细胞结构,且会使枸杞渗透调节的上升时间延长。 4.0 g/L CaSO_4 下可溶性糖含量均值较 CK 降低 26.03% ,可见高浓度外源 CaSO_4 显著抑制枸杞渗透调节。如图 2j 所示,丙二醛含量随外源 CaSO_4 影响为 $11.75 \sim 19.23 \mu\text{mol/g}$,与外源 NaCl 相近。丙二醛含量在外源 CaSO_4 质量浓度为 0.1 g/L 下与 CK 相似(由大到小依次为:开花初期、春梢生长期、果实膨大期、夏盛果期)。0.1、2.0 g/L 下丙二醛含量随生育期变化趋势相近,且均显著高于 CK。说明 0.1、2.0 g/L 处理下枸杞受到的次生胁迫显著提升,但未达到耐盐性阈值。

2.2 不同代表性地下微咸水盐分浓度对枸杞产量和品质的影响

2.2.1 产量和外观品质

如图 3a 所示,枸杞干果产量随 NaCl 、 Na_2SO_4 、 CaCl_2 、 CaSO_4 质量浓度增加而降低,随 NaHCO_3 质量浓度增加略微升高后降低。加入 0.1 g/L NaCl 、 Na_2SO_4 、 CaCl_2 、 CaSO_4 和 0.5 g/L NaHCO_3 时产量达峰值($3\ 086.42、2\ 710.48、5\ 198.41、4\ 508.93、3\ 993.86 \text{ kg/hm}^2$)。当 NaCl 、 CaCl_2 、 CaSO_4 质量浓度由 0.1 g/L 提升至 0.5 g/L 时产量下降最快(分别下降 $37.38\%、29.97\%、33.78\%$, $P < 0.05$)。 0.1 g/L NaCl 、 Na_2SO_4 下,产量较 CK 处理分别降低 $27.01\%、35.90\%$ ($P < 0.05$), 0.1 g/L CaCl_2 、 CaSO_4 下,产量较 CK 处理分别升高 $22.94\%、6.63\%$ ($P < 0.05$)。可见低盐(0.1 g/L)时,同种阴离子(Cl^- 、 SO_4^{2-})环境下 Ca^{2+} 较 Na^+ 更有利于提升枸杞产量。将各浓度下 NaCl 、 Na_2SO_4 、 NaHCO_3 产量均值横向比较,发现 NaCl 、 Na_2SO_4 分别较 NaHCO_3 低 $35.67\%、41.92\%$ 。可见相同阳离子(Na^+)环境下,不同阴离子对产量的负面效应由大到小依次为 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 。

如图 3b 所示,百粒干质量随 NaCl 、 Na_2SO_4 、 CaSO_4 、 NaHCO_3 质量浓度升高而降低,随 CaCl_2 质量浓度升高略微升高后降低。加入 0.1 g/L NaCl 、 Na_2SO_4 、 CaSO_4 、 NaHCO_3 和 0.5 g/L CaCl_2 时百粒干质量达峰值($28.32、32.07、33.15、31.38、35.42 \text{ g}$)。除 0.5 g/L CaCl_2 下百粒干质量较 CK 高 7.34% ($P < 0.05$)外,其余处理均低于 CK,说明 NaCl 、 Na_2SO_4 、 CaSO_4 、 NaHCO_3 对百粒干质量起抑制作用。

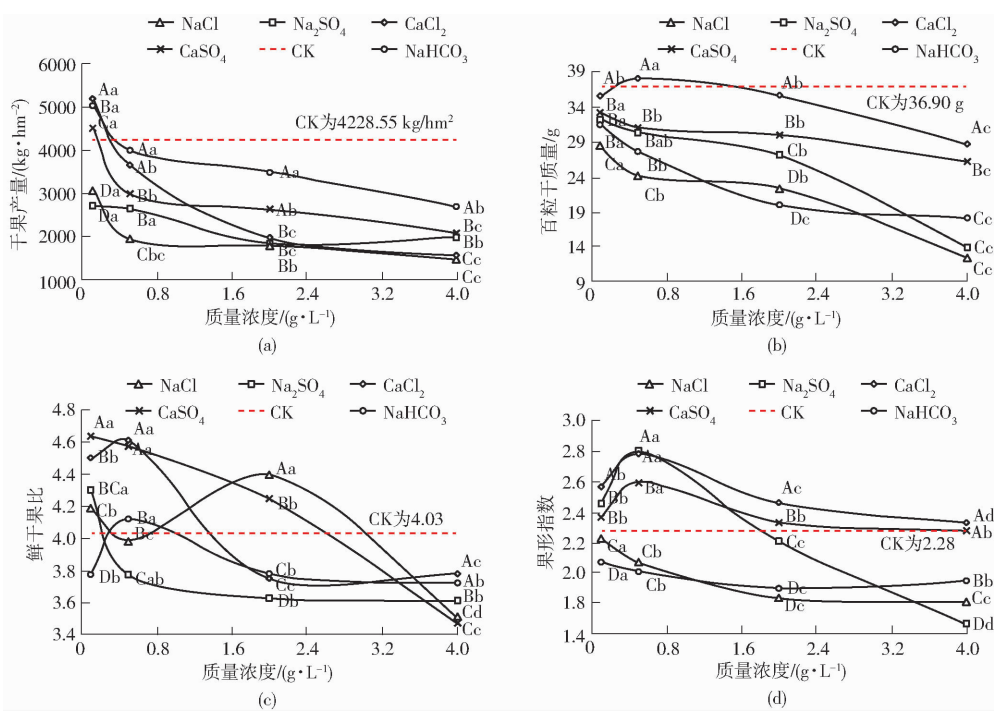


图3 不同敏感盐浓度下枸杞产量和外观品质

Fig.3 Yield and appearance quality of *Lycium barbarum* under different sensitive salt concentrations

CaCl₂ 下百粒干质量较 NaCl 高 21.75 g, CaSO₄ 较 Na₂SO₄ 高 30.02 g, 可见同种阴离子环境下, Ca²⁺ 比 Na⁺ 更能够提升枸杞百粒干质量。

如图 3c 所示, 鲜干果比随 CaCl₂、NaHCO₃ 质量浓度升高先升高后降低, 在加入 0.5 g/L 时达峰值 (4.61、4.12), 随 Na₂SO₄、CaSO₄ 质量浓度升高而降低, 随 NaCl 质量浓度升高呈“倒 N”形分布, 在 2 g/L 达峰值 (4.39)。当质量浓度小于 2 g/L 时, CaCl₂、CaSO₄ 下鲜干果比均值较 CK 分别高 6.43%、11.32% ($P < 0.05$), 可见中低浓度下 Ca²⁺ 环境有助于增加果实水分。

如图 3d 所示, 枸杞果形指数随加入 Na₂SO₄、CaCl₂、CaSO₄ 质量浓度升高先增后减, 在加入 0.5 g/L 时达峰值 (2.80、2.78、2.59), 分别较 CK 高 22.79%、21.99%、13.74% ($P < 0.05$), 说明一定浓度内的 3 种盐环境下枸杞有“长而细”的生长趋势。果形指数随 NaCl、NaHCO₃ 浓度增加均匀降低, 说明 NaCl 影响下, 枸杞果实有“短而宽”的生长趋势。

2.2.2 营养品质

如图 4a 所示, 总糖含量随 CaCl₂、CaSO₄、NaHCO₃ 质量浓度增加先增后减, 在 0.5 g/L 时达峰值, 分别较 CK 高 3.65%、1.38%、5.17%, 说明加入 0.5 g/L CaCl₂、CaSO₄、NaHCO₃ 促进总糖积累的限值。总糖含量随 NaCl、Na₂SO₄ 增加而持续减小, 分别在超过 0.1、0.5 g/L 后迅速降低, 两种盐分在所有水平下总糖含量均低于 CK, 可见 NaCl、Na₂SO₄ 对总糖含量积累产生抑制作用, 且加入 0.1、0.5 g/L

分别为维持总糖水平的 NaCl、Na₂SO₄ 限值。

如图 4b 所示, 黄酮含量随 CaCl₂、CaSO₄、NaCl、Na₂SO₄ 质量浓度升高先升后降, 加入 2 g/L CaCl₂、CaSO₄ 时黄酮含量达峰值, 较 CK 分别提高 23.53%、12.61% ($P < 0.05$), 加入 0.5 g/L NaCl、Na₂SO₄ 时黄酮含量达峰值, 较 CK 分别提高 12.61% 和降低 26.05% ($P < 0.05$), 可见 2、2、0.5、0.5 g/L 分别为 CaCl₂、CaSO₄、NaCl、Na₂SO₄ 保证黄酮水平的浓度限值。黄酮含量随 NaHCO₃ 质量浓度升高在 0.1 ~ 0.5 g/L 时下降幅度较大 (下降 6.64%, $P < 0.05$), 随后保持不变, 可见 0.1 g/L 为 NaHCO₃ 维持黄酮水平的浓度限值。

如图 4c 所示, 类胡萝卜素含量随 CaCl₂、NaHCO₃ 质量浓度升高先升后降, 分别在加入 2、0.5 g/L 时达峰值, 较 CK 高 11.28%、8.90% ($P < 0.05$)。随 NaCl、Na₂SO₄、CaSO₄ 质量浓度升高, 类胡萝卜素含量持续下降, 3 种盐在加入 0.1 g/L 时类胡萝卜素含量分别较 CK 高 14.29%、10.00%、5.24% ($P < 0.05$)。可见, 从促进类胡萝卜素含量积累角度, 2、0.5 g/L 分别为 CaCl₂、NaHCO₃ 的浓度限值, 0.1 g/L 为 NaCl、Na₂SO₄、CaSO₄ 的浓度限值。

如图 4d 所示, 甜菜碱含量随两种含钙盐 CaCl₂、CaSO₄ 质量浓度升高先升后降, 分别在加入 2、0.5 g/L 时达峰值, 较 CK 提高 1.45% 和降低 1.57% ($P < 0.05$)。甜菜碱含量随 NaCl、Na₂SO₄、NaHCO₃ 质量浓度升高而降低, 在 0.1 g/L 时达峰值, 分别较 CK 降低 13.65%、12.44%、2.43%。可

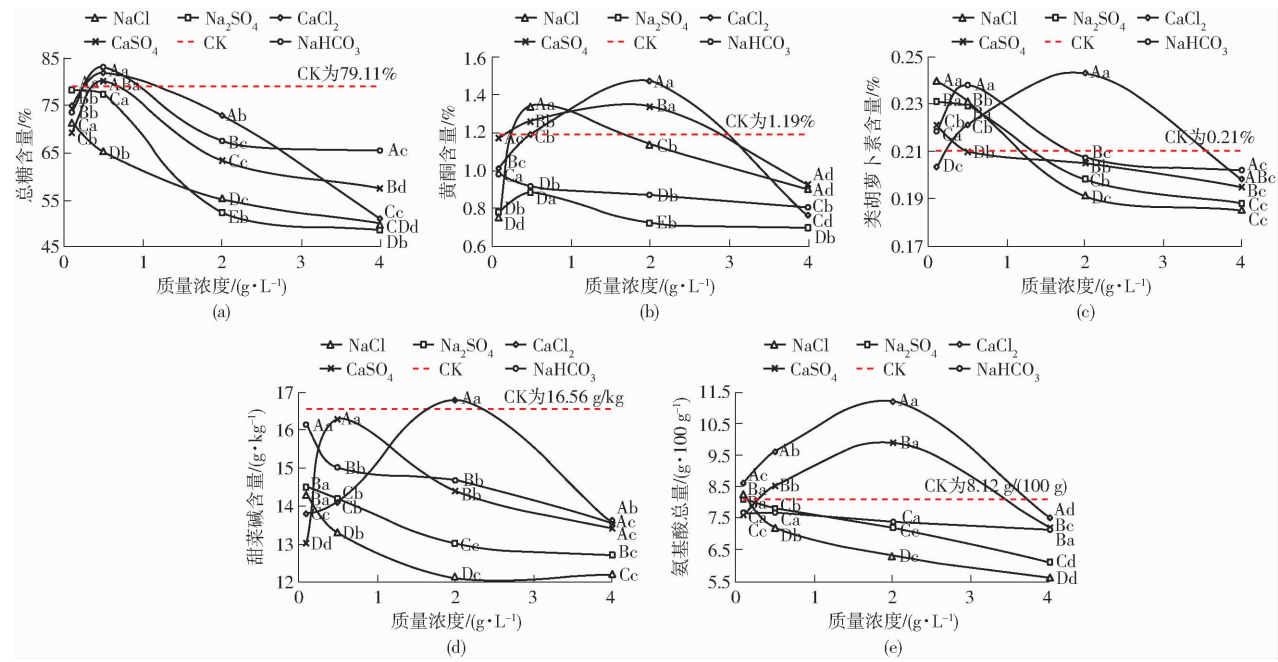


图 4 不同敏感盐浓度下枸杞营养品质

Fig. 4 Nutritional quality of *Lycium barbarum* under different sensitive salt concentrations

见,除 2 g/L CaCl_2 外,其余盐分均抑制甜菜碱含量积累,从维持甜菜碱含量水平角度,2、0.5 g/L 分别为 CaCl_2 、 CaSO_4 浓度限值,0.1 g/L 为 NaCl 、 Na_2SO_4 、 NaHCO_3 浓度限值。

如图 4e 所示,枸杞氨基酸总量随两种含钙盐 CaCl_2 、 CaSO_4 质量浓度升高先升后降,均在 2 g/L 时到达峰值,分别较 CK 提高 37.93%、21.92% ($P < 0.05$),氨基酸总量随 NaCl 、 Na_2SO_4 、 NaHCO_3 质量浓度升高而下降,在加入 0.1 g/L 时达峰值,较 CK 分别提高 2.22% 和降低 0.25%、5.51%,可见,加入小于等于 2 g/L 的 CaCl_2 、 CaSO_4 可促进枸杞氨基酸积累,加入 0.1 g/L 为枸杞能够维持氨基酸水平的 NaCl 、 Na_2SO_4 、 NaHCO_3 浓度限值。

2.3 枸杞产量、品质综合评价

2.3.1 营养品质综合评价

由于枸杞营养品质指标众多,直接将所有营养指标与产量一同评价将导致产量所占权重过低。因此,首先对营养品质进行综合评分,然后将得到的营养品质贴合度 C_{pi} 与干果产量和百粒干质量一同进行种植效益评分。

各处理归一化后的果实营养品质指标如表 3 所示,随 NaCl 和 Na_2SO_4 质量浓度由 0.1 g/L 增大到 4 g/L,营养品质排序先升后降。当质量浓度为 0.5 g/L 时,两种盐分对应的营养品质贴合度 C_{pi} 最高,4 g/L 时 C_{pi} 最低(分别为 0.17、0.11),排名倒数第 2、第 1 位。 C_{pi} 随 CaCl_2 质量浓度升高先升后降,在 0.5、2.0 g/L 时 C_{pi} 分别达 0.69 和 0.89,排名第 2、第 1 位,可见加入小于 2.0 g/L 的 CaCl_2 下枸杞营

养品质显著升高。随 CaSO_4 质量浓度升高, C_{pi} 先升后降,当质量浓度为 0.5、2 g/L 时, C_{pi} 均为 0.67,并列第 3 位。继续增加浓度, C_{pi} 迅速下降。随 NaHCO_3 质量浓度升高 C_{pi} 先升后降,并在 0.5 g/L 时达峰值(0.66,排第 5)。因此,从保证枸杞营养品质角度,0.5 g/L 为 NaCl 、 Na_2SO_4 、 CaSO_4 、 NaHCO_3 的浓度限值,2.0 g/L 为 CaCl_2 的浓度限值。从均值角度看, NaCl 、 Na_2SO_4 、 CaCl_2 、 CaSO_4 的 C_{pi} 分别为 0.36、0.28、0.58、0.53, CaCl_2 、 CaSO_4 较 NaCl 、 Na_2SO_4 分别高 60.70%、87.58%,可见相同阴离子条件下, Ca^{2+} 比 Na^{+} 更有利于提升枸杞营养品质。盐质量浓度从 0.1 g/L 提升至 4.0 g/L 过程中, NaCl 、 Na_2SO_4 、 NaHCO_3 下 C_{pi} 分别下降 60.72%、76.06%、51.09%,可见相同 Na^{+} 环境下, Cl^{-} 、 SO_4^{2-} 对枸杞营养品质的影响大于 HCO_3^{-} 。

2.3.2 枸杞产量、外观品质、营养品质综合评价

C_{pi} 、干果产量、百粒干质量分别代表枸杞果实的营养品质、产量和外观品质,将以上 3 个指标归一化后利用 TOPSIS 法计算各处理种植效益贴合度 C_i 。 C_i 越大,说明种植效益越高。如表 4 所示, C_i 受微咸水种类和浓度影响显著,当加入微咸水中的盐质量浓度高于 2.0 g/L 后,所有种类盐对应的 C_i 排名均降至第 15 位之后。其中以 NaCl 和 Na_2SO_4 对应的 C_i 最低(0.056、0.077),分别排在第 21、第 20 位,说明在田间试验尺度下,2.0 g/L 为枸杞关于种植效益的浓度限值。从总体趋势看, C_i 随 NaCl 、 Na_2SO_4 、 CaSO_4 质量浓度升高而降低,随 CaCl_2 、 NaHCO_3 质量浓度升高先升后降,在 0.5 g/L 时达峰

表 3 基于 TOPSIS 法的各处理枸杞果实营养品质评价及排序

Tab.3 Comprehensive evaluation and sorting of *Lycium barbarum* fruit nutritional quality calculated by using TOPSIS for all treatments

处理	编号	归一化果实营养品质指标					D^+	D^-	C_{pi}	排名
		总糖含量	黄酮含量	类胡萝卜素含量	甜菜碱含量	氨基酸总量				
T1	NC1	(0.258 ± 0.008) ^g	(0.174 ± 0.009) ^o	(0.275 ± 0.019) ^b	(0.248 ± 0.021) ^d	(0.252 ± 0.009) ^g	0.197	0.152	0.44	14
T2	NC2	(0.235 ± 0.009) ^j	(0.309 ± 0.014) ^b	(0.265 ± 0.008) ^b	(0.230 ± 0.011) ^f	(0.219 ± 0.015) ^j	0.154	0.186	0.55	7
T3	NC3	(0.199 ± 0.012) ^l	(0.263 ± 0.021) ^f	(0.219 ± 0.006) ^h	(0.209 ± 0.017) ^h	(0.191 ± 0.016) ^l	0.220	0.112	0.34	15
T4	NC4	(0.181 ± 0.006) ⁿ	(0.209 ± 0.010) ^k	(0.212 ± 0.010) ⁱ	(0.211 ± 0.006) ^h	(0.171 ± 0.018) ^m	0.266	0.055	0.17	20
T5	NS1	(0.282 ± 0.008) ^c	(0.180 ± 0.009) ⁿ	(0.265 ± 0.014) ^b	(0.251 ± 0.007) ^c	(0.246 ± 0.090) ^g	0.190	0.160	0.46	13
T6	NS2	(0.279 ± 0.015) ^d	(0.203 ± 0.005) ^l	(0.262 ± 0.009) ^b	(0.246 ± 0.005) ^d	(0.237 ± 0.020) ^h	0.179	0.156	0.47	12
T7	NS3	(0.007 ± 0.009) ^m	(0.167 ± 0.004) ^p	(0.227 ± 0.021) ^f	(0.225 ± 0.004) ^f	(0.219 ± 0.020) ^j	0.253	0.067	0.21	19
T8	NS4	(0.175 ± 0.002) ⁿ	(0.161 ± 0.005) ^q	(0.215 ± 0.010) ^h	(0.220 ± 0.009) ^g	(0.185 ± 0.060) ^l	0.284	0.035	0.11	21
T9	CC1	(0.270 ± 0.005) ^f	(0.233 ± 0.005) ⁱ	(0.233 ± 0.007) ^f	(0.239 ± 0.006) ^e	(0.261 ± 0.014) ^e	0.152	0.160	0.51	8
T10	CC2	(0.296 ± 0.005) ^{ab}	(0.275 ± 0.010) ^e	(0.253 ± 0.009) ^c	(0.244 ± 0.012) ^e	(0.292 ± 0.003) ^c	0.097	0.219	0.69	2
T11	CC3	(0.263 ± 0.011) ^g	(0.339 ± 0.012) ^a	(0.278 ± 0.027) ^a	(0.291 ± 0.006) ^a	(0.340 ± 0.018) ^a	0.037	0.289	0.89	1
T12	CC4	(0.184 ± 0.010) ⁿ	(0.176 ± 0.007) ^o	(0.227 ± 0.007) ^g	(0.235 ± 0.012) ^e	(0.228 ± 0.008) ⁱ	0.242	0.077	0.24	18
T13	CS1	(0.250 ± 0.002) ^h	(0.270 ± 0.007) ^f	(0.253 ± 0.007) ^d	(0.225 ± 0.015) ^g	(0.231 ± 0.019) ⁱ	0.156	0.161	0.51	9
T14	CS2	(0.289 ± 0.011) ^b	(0.291 ± 0.020) ^d	(0.241 ± 0.010) ^e	(0.282 ± 0.005) ^a	(0.258 ± 0.016) ^f	0.103	0.214	0.67	3
T15	CS3	(0.228 ± 0.015) ^j	(0.309 ± 0.006) ^b	(0.235 ± 0.005) ^e	(0.249 ± 0.013) ^d	(0.301 ± 0.013) ^b	0.106	0.214	0.67	3
T16	CS4	(0.208 ± 0.002) ^k	(0.214 ± 0.013) ^j	(0.223 ± 0.007) ^h	(0.232 ± 0.007) ^f	(0.219 ± 0.010) ^j	0.213	0.090	0.30	17
T17	NHC1	(0.266 ± 0.007) ^g	(0.278 ± 0.008) ^e	(0.227 ± 0.005) ^g	(0.250 ± 0.009) ^c	(0.280 ± 0.010) ^d	0.114	0.193	0.63	6
T18	NHC2	(0.300 ± 0.002) ^a	(0.301 ± 0.009) ^c	(0.211 ± 0.005) ⁱ	(0.272 ± 0.013) ^b	(0.260 ± 0.015) ^f	0.113	0.219	0.66	5
T19	NHC3	(0.244 ± 0.004) ^{hi}	(0.256 ± 0.006) ^g	(0.201 ± 0.011) ^j	(0.237 ± 0.014) ^e	(0.254 ± 0.006) ^f	0.162	0.148	0.48	10
T20	NHC4	(0.237 ± 0.007) ⁱ	(0.195 ± 0.006) ^m	(0.186 ± 0.010) ^k	(0.231 ± 0.004) ^f	(0.235 ± 0.010) ^h	0.220	0.098	0.31	16
	CK	(0.277 ± 0.013) ^e	(0.244 ± 0.006) ⁿ	(0.225 ± 0.008) ^g	(0.269 ± 0.006) ^b	(0.209 ± 0.005) ^k	0.174	0.154	0.47	11
Z^+		0.30	0.34	0.28	0.29	0.34				
Z^-		0.18	0.16	0.19	0.21	0.17				

注:同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$),下同。

表 4 基于 TOPSIS 法的各处理枸杞种植效益评价及排序

Tab.4 Evaluation and ranking of planting benefit of *Lycium barbarum* in each treatment based on TOPSIS

处理	编号	C_{pi}	干果产量	百粒干质量	D^+	D^-	C_i	排名
T1	NC1	(0.189 ± 0.008) ^k	(0.220 ± 0.004) ^e	(0.214 ± 0.013) ^e	0.259	0.219	0.458	12
T2	NC2	(0.237 ± 0.007) ^e	(0.138 ± 0.010) ^{ij}	(0.182 ± 0.006) ^g	0.296	0.212	0.417	14
T3	NC3	(0.146 ± 0.003) ^m	(0.127 ± 0.004) ^k	(0.168 ± 0.008) ^g	0.362	0.127	0.259	17
T4	NC4	(0.074 ± 0.002) ^q	(0.105 ± 0.005) ^m	(0.093 ± 0.008) ^j	0.454	0.027	0.056	21
T5	CC1	(0.198 ± 0.006) ^j	(0.193 ± 0.002) ^g	(0.243 ± 0.009) ^d	0.262	0.230	0.467	10
T6	CC2	(0.202 ± 0.011) ⁱ	(0.188 ± 0.004) ^g	(0.229 ± 0.008) ^d	0.265	0.222	0.456	13
T7	CC3	(0.091 ± 0.002) ^p	(0.131 ± 0.003) ^j	(0.204 ± 0.004) ^f	0.389	0.122	0.239	19
T8	CC4	(0.047 ± 0.003) ^r	(0.141 ± 0.005) ⁱ	(0.104 ± 0.005) ^j	0.449	0.038	0.077	20
T9	NS1	(0.222 ± 0.008) ^f	(0.370 ± 0.003) ^a	(0.268 ± 0.015) ^b	0.164	0.362	0.688	3
T10	NS2	(0.300 ± 0.017) ^b	(0.259 ± 0.007) ^d	(0.288 ± 0.020) ^a	0.139	0.355	0.718	1
T11	NS3	(0.384 ± 0.004) ^a	(0.140 ± 0.004) ^{ij}	(0.269 ± 0.003) ^b	0.232	0.382	0.622	7
T12	NS4	(0.105 ± 0.009) ^o	(0.111 ± 0.002) ^l	(0.216 ± 0.007) ^e	0.389	0.136	0.259	18
T13	CS1	(0.220 ± 0.007) ^f	(0.321 ± 0.026) ^b	(0.251 ± 0.000) ^c	0.176	0.318	0.644	5
T14	CS2	(0.292 ± 0.010) ^b	(0.213 ± 0.012) ^e	(0.234 ± 0.001) ^d	0.192	0.302	0.612	8
T15	CS3	(0.290 ± 0.014) ^c	(0.187 ± 0.008) ^g	(0.226 ± 0.011) ^{de}	0.216	0.289	0.572	9
T16	CS4	(0.129 ± 0.010) ⁿ	(0.150 ± 0.003) ^h	(0.198 ± 0.009) ^f	0.351	0.140	0.285	15
T17	NHC1	(0.273 ± 0.010) ^d	(0.277 ± 0.004) ^c	(0.240 ± 0.006) ^d	0.155	0.319	0.673	4
T18	NHC2	(0.286 ± 0.008) ^c	(0.295 ± 0.007) ^c	(0.219 ± 0.013) ^e	0.144	0.330	0.695	2
T19	NHC3	(0.207 ± 0.008) ^g	(0.245 ± 0.004) ^d	(0.157 ± 0.009) ^h	0.256	0.221	0.463	11
T20	NHC4	(0.133 ± 0.004) ^l	(0.200 ± 0.008) ^f	(0.138 ± 0.011) ⁱ	0.340	0.135	0.285	16
	CK	(0.204 ± 0.015) ^h	(0.301 ± 0.013) ^c	(0.299 ± 0.012) ^a	0.193	0.320	0.623	6
Z^+		0.384	0.370	0.291				
Z^-		0.047	0.105	0.094				

值(0.718、0.695)，分别较 CK 的 C_i 高 15.25%、11.56%，排名第 1、2 位。0.1 g/L CaCl_2 、 CaSO_4 、 NaHCO_3 处理下 C_i 分别较 CK 高 10.43%、3.37%、8.03%，可见适宜浓度 CaCl_2 、 CaSO_4 、 NaHCO_3 对枸杞种植效益具有提升作用。盐质量浓度从 0.1 g/L 提升至 4.0 g/L 过程中， NaCl 、 Na_2SO_4 、 NaHCO_3 下 C_i 分别下降 87.85%、62.13%、57.72%，可见相同阴离子(Cl^- 、 SO_4^{2-})环境下， Na^+ 比 Ca^{2+} 对枸杞种植效益的抑制作用更强，相同阳离子(Na^+)环境下， Cl^- 、 SO_4^{2-} 对种植效益的抑制作用较 HCO_3^- 更强。

2.4 河套灌区代表性水质盐离子影响下枸杞综合评分预测

基于 2019 年枸杞数据，构建 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 关于种植效益贴合度 C_i 的五元高斯回归模型，并用 2020 年数据进行验证。经检验，高斯回归的 R^2 为 0.897，RMSE 为 0.023，回归关系显著。以 0.1 mmol/L 作为 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 浓度步长，以河套灌区各离子浓度上限和枸杞主产区乌拉特前旗微咸水盐离子浓度作为各变量取值上下限进行模拟，得到 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 变化下枸杞种植效益贴合度 C_i 。由于 2019 年和 2020 年降水量为 157.3 mm 和 146.7 mm，属枯水年。因此，得出的盐离子浓度限值仅适用于枯水年。

由于五元回归关系无法用图像直观体现，因此基于模拟结果，将其余离子设定为乌拉特前旗地下水浓度情况下，将 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 的阴阳离子两两组合，揭示不同离子浓度影响下枸杞种植效益贴合度的变化趋势。如图 5a 所示，种植效

益贴合度 C_i 在外源离子 Na^+ 、 Cl^- 的影响下取值偏低(0.01 ~ 0.59)，随 Na^+ 、 Cl^- 浓度的提升而下降。如图 5b 所示， C_i 在 Ca^{2+} 、 Cl^- 的影响下取值较高(0.02 ~ 0.71)，随 Cl^- 浓度升高而降低，随 Ca^{2+} 浓度升高而升高，当 Ca^{2+} 浓度大于 12.8 mmol/L 且 Cl^- 浓度小于 65.9 mmol/L 时， C_i 达到峰值($C_i > 0.7$)。如图 5c 所示， C_i 在外源 Na^+ 、 SO_4^{2-} 影响下变化趋势主要与 Na^+ 浓度有关，当 Na^+ 浓度小于 23.0 mmol/L 时， $C_i > 0.4$ ，当 Na^+ 浓度大于 60.0 mmol/L 时， $C_i < 0.1$ ，此时已不适于灌溉枸杞。如图 5d 所示， C_i 在 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 的影响下取值较高(0.46 ~ 0.71)，随 SO_4^{2-} 浓度升高而降低，随 Ca^{2+} 浓度升高而升高，当 Ca^{2+} 浓度大于 12.2 mmol/L 且 SO_4^{2-} 浓度小于 10.5 mmol/L 时， C_i 达到峰值($C_i > 0.69$)。当 Ca^{2+} 浓度小于 9.6 mmol/L 且 SO_4^{2-} 浓度小于 10.5 mmol/L 时， C_i 达到峰值($C_i > 0.69$)。如图 5e 所示， C_i 随 HCO_3^- 浓度升高先增后减，在 9.2 ~ 13.0 mmol/L 取得峰值($C_i > 0.70$)，随 Na^+ 浓度升高而降低，当 Na^+ 浓度大于 42.0 mmol/L 时， C_i 仅随 Na^+ 浓度升高单方面减小，与 HCO_3^- 无关。当 Na^+ 浓度大于 60.0 mmol/L 时， $C_i < 0.1$ ，此时不宜灌溉枸杞。

2.5 基于枸杞种植效益的河套灌区灌溉微咸水盐离子浓度限值

如表 5 所示，基于所有模拟结果得出不同综合评分标准下相应的代表性盐离子浓度范围，发现当 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 浓度分别介于 18.6 ~ 19.2 mmol/L、12.2 ~ 13.0 mmol/L、63.0 ~ 68.4 mmol/L、

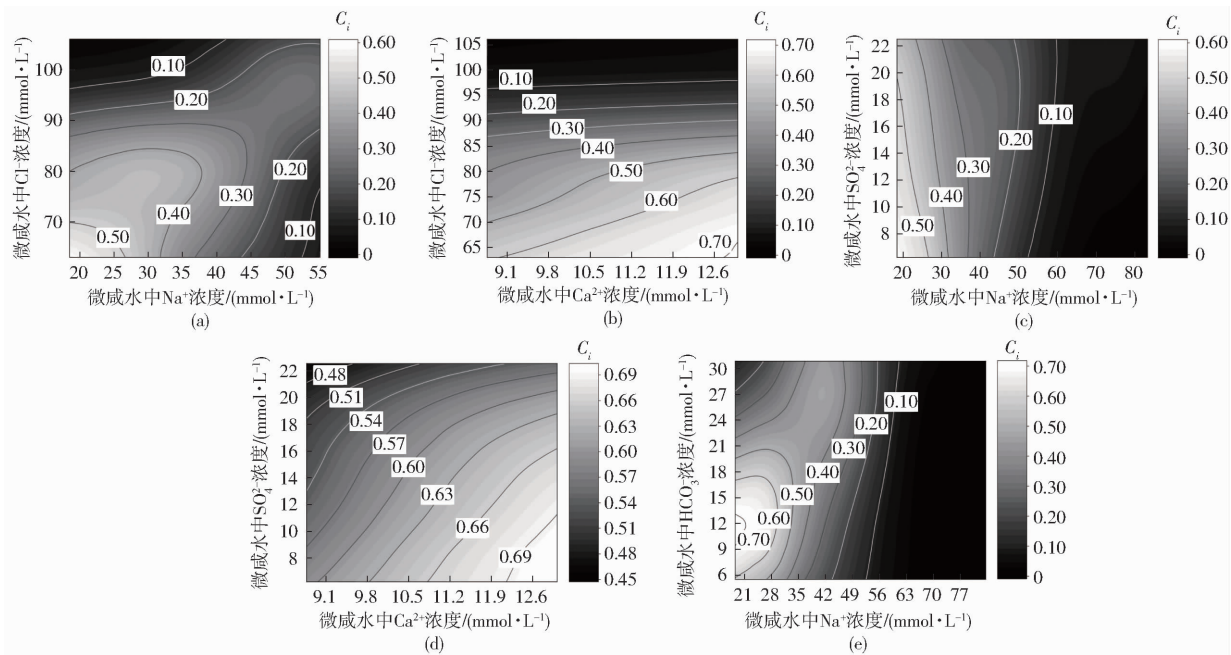


图 5 不同 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 浓度下枸杞种植效益贴合度 C_i

Fig. 5 Planting benefit fit degree C_i of *Lycium barbarum* under different concentrations of Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} and HCO_3^-

6.3 ~ 14.4 mmol/L、5.5 ~ 14.0 mmol/L 时,枸杞种植效益贴合度 $C_i > 0.7$ 。随 C_i 标准从 0.2 提升至 0.7,微咸水中 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 的允许浓度范围缩小。其中, Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 下限不变,

上限分别降低 67.6%、32.1%、36.2%、54.6%; Ca^{2+} 上限不变,下限提高 38.5%。可见, C_i 标准提高, Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 向取值下限 (18.6、63.0、6.3、5.5 mmol/L) 逼近, Ca^{2+} 向上限 (13.0 mmol/L) 逼近。

表 5 种植效益贴合度不同取值对应的微咸水代表性盐离子浓度

Tab. 5 Representative salt ion concentration ranges of brackish water corresponding to different values of planting benefit fit degree					
mmol/L					
种植效益贴合度	Na^+ 浓度	Ca^{2+} 浓度	Cl^- 浓度	SO_4^{2-} 浓度	HCO_3^- 浓度
>0.20	18.6 ~ 59.1	8.8 ~ 13.0	63.0 ~ 100.8	6.3 ~ 22.6	5.5 ~ 30.9
>0.30	18.6 ~ 51.0	9.1 ~ 13.0	63.0 ~ 90.0	6.3 ~ 22.6	5.5 ~ 30.9
>0.40	18.6 ~ 42.9	9.8 ~ 13.0	63.0 ~ 84.6	6.3 ~ 22.6	5.5 ~ 30.9
>0.46	18.6 ~ 34.8	9.8 ~ 13.0	63.0 ~ 81.6	6.3 ~ 22.6	5.5 ~ 21.4
>0.50	18.6 ~ 26.7	10.3 ~ 13.0	63.0 ~ 79.2	6.3 ~ 21.5	5.5 ~ 18.2
>0.60	18.6 ~ 26.7	11.6 ~ 13.0	63.0 ~ 73.8	6.3 ~ 20.5	5.5 ~ 15.0
>0.70	18.6 ~ 19.2	12.2 ~ 13.0	63.0 ~ 68.4	6.3 ~ 14.4	5.5 ~ 14.0

以大于模拟范围内不同水质下枸杞种植效益综合评分 C_i 的平均值 $C_i = 0.46$ 对应的离子浓度范围作为代表性盐离子浓度限值。经计算, Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 的允许浓度范围分别为:18.6 ~ 34.8 mmol/L、9.8 ~ 13.0 mmol/L、63.0 ~ 81.6 mmol/L、6.3 ~ 22.6 mmol/L、5.5 ~ 21.4 mmol/L,即 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 存在上限限值,分别为 34.8、81.6、22.6、21.4 mmol/L, Ca^{2+} 存在下限限值,为 9.8 mmol/L。

3 讨论

本研究发现,外源 NaCl 质量浓度达 2.0 g/L 时,枸杞夏盛果期可溶性糖含量显著降低,这是由于植株叶片可溶性糖和可溶性蛋白渗透调节盐胁迫和维持代谢平衡的能力有限^[28],而外源盐分对植株盐胁迫的强度与离子本身在土壤中的积聚特性有关,外源 Na^+ 易被带负电荷的土壤胶体吸附^[29], Cl^- 易积聚在湿润体内部,不易淋洗^[30],因此当外源 NaCl 浓度较高时,土壤 Na^+ 和 Cl^- 随灌水次数增加不断积累,并在夏盛果期超过枸杞渗透调节极限,严重破坏细胞结构^[31]。外源 CaCl_2 质量浓度小于 2.0 g/L 时,可溶性糖含量显著低于 CK,这是由于外源 Ca^{2+} 作为长距离信号分子,能够在传感蛋白 CaM 结合形成 Ca^{2+} -CaM 复合物,并激活多种靶蛋白加强抗盐过程^[32]。本研究发现, NaHCO_3 影响下各生育期丙二醛含量均值最高 (19.91 $\mu\text{mol/g}$),两种钙盐下 (CaCl_2 、 CaSO_4) 下最低 (13.72、16.03 $\mu\text{mol/g}$),这可能由于外源 Ca^{2+} 不仅可以作为第 2 信使调控抗氧化系统^[33],还能通过与细胞膜上磷酸酯和磷酸盐进行连接,进而缓解盐胁迫下细胞膜的氧化程度^[34]。而 HCO_3^- 作为主要的碱性盐离子,外源输入下会在

植株体内产生大量的 OH^- 、 H_2O_2 等,加速细胞膜结构氧化,导致丙二醛含量增加^[35]。

本研究发现,枸杞干果产量、百粒干质量随 NaCl 浓度升高而降低,且在相同阴离子环境下,外源 Na^+ 对枸杞产量和百粒干质量的负面效应较 Ca^{2+} 更显著。在相同阳离子环境下,不同阴离子对产量的负面影响由大到小依次为 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- ,这可能由于外源 Na^+ 、 Cl^- 在夏盛果期对枸杞渗透胁迫强度显著高于其它外源离子。通过两年试验发现,当外源 CaCl_2 质量浓度小于等于 2.0 g/L 时,枸杞中黄酮含量、类胡萝卜素含量、甜菜碱含量、氨基酸总量随 CaCl_2 浓度的浓度升高而升高,超过 2.0 g/L 后显著下降。通过分析外源 CaCl_2 对渗透、次生胁迫的影响发现,这可能由于小于 2.0 g/L 的外源 CaCl_2 可有效缓解枸杞渗透、次生胁迫,而高于 2.0 g/L 则会使渗透胁迫加剧,导致枸杞不得不投入更多养分来抵抗盐胁迫。此外,也可能由于外源 Ca^{2+} 能够通过刺激作物 DH-8 基因的表达降低 NaCl 对类胡萝卜素合成的负面影响^[36],且 Ca^{2+} 信号分子能够在盐胁迫下诱发植物甜菜碱积累和氨基酸合成^[33,37]。本研究发现,总糖含量随 NaHCO_3 增加在 0.5 g/L 时达峰值,随后显著降低。这是由于丙二醛作为膜脂氧化的终产物,在外源 NaHCO_3 高于 0.5 g/L 时显著升高,破坏了细胞膜结构的完整性与稳定性,导致胞内可溶性总糖流失。本研究发现,黄酮含量随 CaCl_2 、 CaSO_4 、 NaCl 、 Na_2SO_4 浓度升高先升后降, CaCl_2 、 CaSO_4 、 NaCl 、 Na_2SO_4 质量浓度分别为 2.0、2.0、0.5、0.5 g/L 时达峰值,均高于 CK。这是由于黄酮具有抗氧化和自由基清除能力,适当的盐胁迫会促进黄酮在植株体内积累^[26]。这与朱玉雪等^[38]发现的 100 mmol/L

NaCl 灌溉下藜麦黄酮达峰值的趋势相近,但峰值对应的盐浓度不同。

对枸杞总糖含量、黄酮含量、甜菜碱含量、类胡萝卜素含量、氨基酸总量进行综合评分,发现相同离子环境下, Ca^{2+} 比 Na^+ 更有利于提升枸杞营养品质评分 C_{pi} 。这是因为乌拉特灌域微咸水中 Na^+ 、 Cl^- 普遍偏高,外源 Ca^{2+} 能够缓解 Na^+ 、 Cl^- 胁迫造成的枸杞类胡萝卜素含量、总糖含量下降^[36,39]。同时, Ca^{2+} 在盐胁迫下能够提高植株甜菜碱和部分氨基酸积累^[33,36]。基于高斯回归发现,产量、外观品质、营养品质的综合评分 C_i 随 Na^+ 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 浓度升高而下降,随 Ca^{2+} 浓度升高而升高,随 HCO_3^- 浓度升高呈单峰趋势。这可能由于作物产量和营养物质的积累取决于生长中对养分离子的吸收,而 Na^+ 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 易扰乱植株体内离子稳态^[40-41],而适宜浓度的外源 HCO_3^- 能够促进土壤芳基硫酸酯酶 (ASF) 积累,提高植株硫循环和对盐胁迫的抗逆性^[42]。此外,外源 Ca^{2+} 通过与细胞中的 SOS3/CBL4 结合,激活 Na^+ 反转运蛋白 SOS1,帮助细胞排出有害的 Na^+ ^[43]。

微咸水灌溉对作物生长的影响除源于外源盐分的直接影响,还源于土壤盐分改变所造成的影响。微咸水盐分在入渗过程中,土壤含盐量随灌溉水盐分浓度升高呈幂函数增加^[44],采用 5.0 g/L 微咸水灌溉下 0~100 cm 土壤电导率较 1.1 g/L 下显著增加,且在灌水量较低时盐分易出现表聚^[45]。土壤盐分增加使作物根系吸水能力下降^[46]。土壤中的 Na^+ 可诱导作物根系 K^+ 流失,对作物造成毒害^[47],最终导致作物生物量、产量显著降低^[48],而 Ca^{2+} 离子则能降低 Na^+ 的毒害作用^[49]。此外,微咸水中的 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 降低了土壤中蔗糖酶、过氧化氢酶、脱氢酶、多酚氧化酶、羟胺还原酶、碱性磷酸酶和芳基硫酸酯酶活性,使作物籽粒发育受到抑制^[47]。可见,前人在总盐、盐离子层面围绕土壤盐分、外源盐分对作物的影响进行了研究,但外源盐分与土壤盐分对作物的耦合影响还有待深入探讨。此外,土壤质地和初始盐分对枸杞生长的影响与微咸水盐分同样重要,本研究主要基于河套灌区下游乌拉特灌域土壤条件下开展,在微咸水灌溉和枸杞种植方面具有一定代表性,但考虑不同土壤初始盐分和土壤类型因素下微咸水盐离子对作物的影响仍有待进一步探究。

有研究开展了微咸水盐分对作物影响的长周期试验。张余良等^[50]通过 20 年模拟试验发现矿化度 4.7 g/L 微咸水长期灌溉,土壤表层盐分、氯钠离子比例逐年升高,土壤初始入渗率逐年降低。王国栋

等^[51]通过 10 年试验发现,电导率为 1.05 mS/cm 的微咸水长期灌溉使土壤含盐量年均升高 61.5%,纤维素酶、脲酶、转化酶及过氧化氢酶活性分别降低 21.3%、50.9%、50.0% 和 10.5%,且随灌溉年限增加,影响加重。李佳等^[52]通过 8 年试验发现,长期采用超 4.0 g/L 微咸水灌溉,小麦出苗率和产量显著降低。周永学等^[53]采用 NaCl 和 CaCl_2 比例为 1:1 的微咸水进行为期 10 年的灌溉试验,发现微咸水在不同年份均显著增加叶片丙二醛含量,并显著降低产量。马玉诏等^[54]基于 Cl-Na 型微咸水开展为期 13 年的咸水灌溉试验,发现 4~8 g/L 微咸水显著降低冬小麦产量,且效果逐年增加。可见,随着微咸水灌溉年限的增加,作物生长和产量受到外源盐分的影响趋势相近,但影响程度逐年增加。然而,长周期试验较少涉及到微咸水盐离子层面的影响,不同微咸水盐离子对作物生长和果实发育的长期影响效应有待进一步研究。

4 结论

(1) 外源 NaCl、 Na_2SO_4 、 NaHCO_3 质量浓度分别达到 2.0、0.5、0.5 g/L 时,达到枸杞渗透调节极限,超出该浓度后可溶性糖含量显著下降;外源 CaCl_2 质量浓度小于 2.0 g/L 可缓解各生育期枸杞渗透胁迫;枸杞各生育期受次生胁迫强度在外源 NaHCO_3 影响下最高,两种钙盐 (CaCl_2 、 CaSO_4) 下最低。

(2) 枸杞干果产量、百粒干质量随 NaCl、 Na_2SO_4 、 CaSO_4 浓度增加而降低,干果产量、百粒干质量分别随 NaHCO_3 、 CaCl_2 浓度增加略微升高后降低;枸杞总糖含量、甜菜碱含量、氨基酸总量随 CaCl_2 、 CaSO_4 浓度增加先增后降,随 NaCl、 Na_2SO_4 浓度增加而降低;黄酮含量随 CaCl_2 、 CaSO_4 、NaCl、 Na_2SO_4 浓度升高先升后降;类胡萝卜素含量随 CaCl_2 、 NaHCO_3 浓度升高先升后降,随 NaCl、 Na_2SO_4 、 CaSO_4 浓度升高而降低。

(3) 基于对各处理产量、营养品质、外观品质的综合评价发现,相同阴离子 (Cl^- 、 SO_4^{2-}) 环境下, Na^+ 、 Ca^{2+} 分别对枸杞种植效益存在抑制、促进作用,相同阳离子 (Na^+) 环境下, Cl^- 、 SO_4^{2-} 对种植效益的抑制作用较 HCO_3^- 更强。

(4) 当微咸水中 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 浓度不超过 34.8、81.6、22.6、21.4 mmol/L,且 Ca^{2+} 浓度不低于 9.8 mmol/L 时,在每年 5 月 12 日、6 月 15 日、7 月 8 日和 8 月 9 日的前后 5 d 以 100 mm 灌水定额进行微咸水畦灌,能够保证枸杞产量、品质的综合评分 C_i 高于所有水质下的平均值 0.46。

参 考 文 献

- [1] YU R, LIU T, XU Y, et al. Analysis of salinization dynamics by remote sensing in Hetao Irrigation District of North China[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(12): 1952 – 1960.
- [2] 张体彬, 张义强, 冯浩. 河套灌区膜下滴灌研究进展及应用前景分析[J]. *灌溉排水学报*, 2015, 34(增刊1): 250 – 253.
ZHANG Tibin, ZHANG Yiqiang, FENG Hao. Advances of mulched drip irrigation in Hetao Irrigation District and its application prospects[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2015, 34(Supp. 1): 250 – 253. (in Chinese)
- [3] 刘冉, 王学成, 宋嘉雯, 等. 加气对微咸水灌溉棉花幼苗生长的影响[J]. *节水灌溉*, 2022(8): 1 – 7.
LIU Ran, WANG Xuecheng, SONG Jiawen, et al. Effect of aeration on the growth of cotton seedlings under irrigation with brackish water[J]. *Water Saving Irrigation*, 2022(8): 1 – 7. (in Chinese)
- [4] 庞桂斌, 张立志, 丛鑫, 等. 微咸水灌溉下冬小麦光合作用与光响应曲线模拟[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(11): 333 – 342.
PANG Guibin, ZHANG Lizhi, CONG Xin, et al. Leaf photosynthesis and light response curve simulation of winter wheat under brackish water irrigation[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(11): 333 – 342. (in Chinese)
- [5] 申佳丽. 微咸水灌溉下设施黄瓜土壤-灌溉制度协同调控机制研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2022.
SHEN Jiali. Study on the coordinated regulation mechanism of soil – irrigation system in facility cucumber under brackish water irrigation[J]. Yinchuan: Ningxia University, 2022. (in Chinese)
- [6] 闫妮. 咸水灌溉对番茄生长及产量和品质的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022.
YAN Ni. Effects of saline water irrigation on growth, yield and quality of tomato[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2022. (in Chinese)
- [7] 马晓蓉, 杨淑娟, 姚宁, 等. NaCl 胁迫对宁夏枸杞叶和幼根显微及超微结构的影响[J]. *西北植物学报*, 2021, 41(12): 2087 – 2095.
MA Xiaorong, YANG Shujuan, YAO Ning, et al. Effect of NaCl stress on the microstructure and ultrastructure of leaves and young roots in *Lycium barbarum*[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalis Sinica*, 2021, 41(12): 2087 – 2095. (in Chinese)
- [8] SEERAM N P. Berry fruits: compositional elements, biochemical activities, and the impact of their intake on human health, performance, and disease[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2008, 56(3): 627 – 629.
- [9] 孙多强. 微咸水灌溉对土壤水盐 and 枸杞耗水特性的影响及种植技术研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021.
SUN Duoqiang. Effects of brackish water irrigation on soil water and salt and water consumption characteristics of *Lycium barbarum* and research on planting technology[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021. (in Chinese)
- [10] 魏琛琛, 任树梅, 徐子昂, 等. 灌溉水盐分和灌水量对温室气体排放与玉米生长的影响[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(7): 251 – 260, 236.
WEI Chenchen, REN Shumei, XU Ziang, et al. Effects of irrigation water salinity and irrigation water amount on greenhouse gas emissions and spring maize growth[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(7): 251 – 260, 236. (in Chinese)
- [11] 张鹏, 袁兴铃, 薛友林, 等. 精准温度控制对枸杞鲜果贮藏品质和香气成分的影响[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(18): 322 – 330.
ZHANG Peng, YUAN Xingling, XUE Youlin, et al. Effects of precise temperature control on the storage quality and aroma components of fresh goji fruit[J]. *Transactions of the CSAE*, 2021, 37(18): 322 – 330. (in Chinese)
- [12] 刘伟东, 顾欣, 郭君钰, 等. 微波热风联合干燥工艺对枸杞品质和表面微生物的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(20): 296 – 302.
LIU Weidong, GU Xin, GUO Junyu, et al. Effects of microwave-hot air drying process on quality and surface microorganism quantity of *Lycium barbarum*[J]. *Transactions of the CSAE*, 2019, 35(20): 296 – 302. (in Chinese)
- [13] 宋艳梅, 张启立, 崔治家, 等. 枸杞子化学成分和药理作用的研究进展及质量标志物的预测分析[J]. *华西药杂志*, 2022, 37(2): 206 – 213.
SONG Yanmei, ZHANG Qili, CUI Zhijia, et al. Research progress on chemical constituents and pharmacological effects of *Lycii fructus* and its quality marker prediction and analysis[J]. *West China Pharmaceutical Journal*, 2022, 37(2): 206 – 213. (in Chinese)
- [14] 枸杞: GB/T 18672—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [15] 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 Bin, SHI Haibin, ZHANG Jianguo, et al. Hydrochemical characteristics of groundwater before and after water-saving reform in Hetao Irrigation District, Inner Mongolia[J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(21): 99 – 110. (in Chinese)
- [16] 张维霞, 高爽, 王俊玲, 等. Na^+ 与 Cl^- 浓度平衡供应促进小白菜干物质积累及营养品质提升[J]. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(5): 906 – 918.
ZHANG Weixia, GAO Shuang, WANG Junling, et al. The balanced supply of Na^+ and Cl^- promotes dry biomass accumulation and nutritional quality improvement of pakchoi[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2022, 28(5): 906 – 918. (in Chinese)
- [17] 段书延. 钙胁迫与根域限制对葡萄生长发育和代谢产物的影响[D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
DUAN Shuyan. Impact of calcium stress and root restriction on development metabolites of grape (*Vitis vinifera* L.) [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2019. (in Chinese)

[18] 孟智鹏,杨舜博,闫雷玉,等. 采前果面喷施钙制剂对苹果果实品质的影响[J]. 西北植物学报,2022,42(7):1219 – 1231.
MENG Zhipeng, YANG Shunbo, YAN Leiyu, et al. Effect of different calcium treatments on fruit quality of three apple varieties[J]. Acta Botanica Boreali-Occidental Sinica, 2022, 42(7): 1219 – 1231. (in Chinese)

[19] 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 Zeyan, CAO Wengeng, WANG Zhuoran, et al. Hydrochemical characterization and irrigation suitability analysis of shallow groundwater in Hetao Irrigation District, Inner Mongolia[J]. Geoscience, 2022, 36(2): 418 – 426. (in Chinese)

[20] 曾邯斌,苏春利,谢先军,等. 河套灌区西部浅层地下水咸化机制[J]. 地球科学,2021,46(6):2267 – 2277.
ZENG Hanbin, SU Chunli, XIE Xianjun, et al. Mechanism of salinity of shallow groundwater in the western Hetao Irrigation Area[J]. Earth Science, 2021, 46(6): 2267 – 2277. (in Chinese)

[21] RIZAI A, MATSUDA K, ARSLAN A. Water-stress induced changes in concentrations of proline and other solutes in growing regions of young barley leaves[J]. J. Exp. Bot., 1985, 172(1): 1716 – 1725.

[22] HEATH R L, PACKER L. Photoperoxidation in isolated chloroplast I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation [J]. Archives of Biochemistry and Biophysics, 1968, 125(1):189 – 198.

[23] 胡晓辉,高子星,马永博,等. 基于产量品质及水肥利用率的袋培辣椒水肥耦合方案[J]. 农业工程学报,2020,36(17): 81 – 89.
HU Xiaohui, GAO Zixing, MA Yongbo, et al. Coupling scheme of water and fertilizer based on yield, quality, use efficiency of water and fertilizer in bag pepper growing[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(17): 81 – 89. (in Chinese)

[24] KANG F, HAN S X, SALGADO R, et al. System probabilistic stability analysis of soil slopes using Gaussian process regression with Latin hypercube sampling[J]. Comput Geotech, 2015, 63: 13 – 25.

[25] SHENG H, LIU X, BAI L B, et al. Small sample state of health estimation based on weighted Gaussian process regression [J]. Journal of Energy Storage, 2021, 41: 11.

[26] ZHANG H N, MOON S K, NGO T H, et al. Rapid process modeling of the aerosol jet printing based on Gaussian process regression with Latin hypercube sampling[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2020, 21(1 – 3):121 – 135.

[27] 何志昆,刘光斌,赵曦晶,等. 高斯过程回归方法综述[J]. 控制与决策,2013,28(8):1121 – 1129,1137.
HE Zhikun, LIU Guangbin, ZHAO Xijing, et al. Overview of Gaussian process regression[J]. Control and Decision Making, 2013, 28(8): 1121 – 1129,1137. (in Chinese)

[28] 周妍. 盐胁迫对大豆种子萌发、离子平衡及可溶性糖影响的研究[D]. 长春:东北师范大学,2014.
ZHOU Yan. Research on germination, ionic balance and soluble sugars contention of Glycine max under saline stress[J]. Changchun: Northeast Normal University, 2014. (in Chinese)

[29] 孙在金. 脱硫石膏与腐植酸改良滨海盐碱土的效应及机理研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京),2013.
SUN Zaijin. Study on the effect and mechanism of desulfurization gypsum and humic acid on the improvement of coastal saline-alkali soil[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2013. (in Chinese)

[30] 王丹,康跃虎,万书勤. 微咸水滴灌条件下不同盐分离子在土壤中的分布特征[J]. 农业工程学报,2007,23(2):83 – 87.
WANG Dan, KANG Yuehu, WAN Shuqin. Distribution characteristics of different salt ions in soil under brackish water drip irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2007,23(2):83 – 87. (in Chinese)

[31] XIANG Y, HUANG Y M, XIONG L Z. Characterization of stress-responsive CIPK genes in rice for stress tolerance improvement[J]. Plant Physiology, 2007, 144(3): 1416 – 1428.

[32] MIN C K, CHONG W S, YUN D J, et al. Calcium and calmodulin-mediated regulation of gene expression in plants[J]. Molecular Plant, 2009, 2(1): 13 – 21.

[33] 杨双龙,杨婷,龚明. 渗透胁迫下水杨酸诱导的小桐子甜菜碱积累涉及 Ca^{2+} /CaM 信号[J]. 热带作物学报,2020, 41(5):939 – 946.
YANG Shuanglong, YANG Ting, GONG Ming. Salicylic acid induced betaine accumulation in *Jatropha* is involved in Ca^{2+} /CaM signaling under osmotic stress[J]. Journal of Tropical Crops, 2020, 41(5):939 – 946. (in Chinese)

[34] 马静茹. 外源 $\text{Ca} \sim (2+)$ 对氯化钠胁迫 84K 杨树幼苗光合特性的影响[D]. 泰安:山东农业大学,2022.
MA Jingru. Effects of exogenous $\text{Ca} \sim (2+)$ on photosynthetic characteristics of 84K poplar seedlings under NaCl stress[D]. Taian: Shandong Agricultural University,2022. (in Chinese)

[35] 王文银,高小刚,司晓林,等. 外源钙盐对盐胁迫下沙拐枣渗透调节和膜脂过氧化的影响[J]. 环境科学研究,2017, 30(8):1230 – 1237.
WANG Wenyin, GAO Xiaogang, SI Xiaolin, et al. Effects of exogenous calcium on osmotic adjustment and peroxidation of *Calligonum rnonolicum* membrane under salt stress[J]. Research of Environmental Sciences,2017,30(8):1230 – 1237. (in Chinese)

[36] DURAN R E, COSKUN Y, SAVASKAN C. The examination of Na – Ca effect on some qualitative and quantitative characters in durum wheat plants[J]. Academic Journals (Kenya), 2011(64): 14013 – 14023.

[37] 王玲霞. 红树植物秋茄响应盐胁迫的分子生理机制及调控网络研究[D]. 福州:福建农林大学,2015.
WANG Lingxia. Molecular physiological mechanism and regulatory network of mangrove plant *Kandelia* in response to salt stress[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2015. (in Chinese)

[38] 朱玉雪,马建蓉,郭晓农. NaCl 胁迫对藜麦幼苗生长和生理指标的影响[J]. 大麦与谷类科学,2022,39(1):17–22.
ZHU Yuxue, MA Jianrong, GUO Xiaonong. Impact of NaCl stress on the growth and physiological characteristics of quinoa seedlings[J]. Barley and Cereal Sciences,2022,39(1):17–22. (in Chinese)

[39] 薛焱,王迎春,王同智. 濒危植物长叶红砂适应盐胁迫的生理生化机制研究[J]. 西北植物学报,2012,32(1):136–142.
XUE Yan, WANG Yingchun, WANG Tongzhi. Physiological and biochemical mechanisms of an endemic halophyte *Trigyna maxim* under salt stress[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2012, 32(1):136–142. (in Chinese)

[40] NIU X, BRESSAN R A, HASEGAWA P M, et al. Ion homeostasis in NaCl stress environments[J]. Plant physiology, 1995, 109(3):735–742.

[41] ZORB C, GEILFUS C M, DIETZ K J. Salinity and crop yield[J]. Plant Biol., 2019, 21:31–38.

[42] 胡洋,丛孟非,陈末,等. 氮添加对巴音布鲁克高寒湿地土壤微生物量和酶活性的影响[J]. 生态学报,2022,42(13):1–12.
HU Yang, CONG Mengfei, CHEN Mo, et al. Effects of nitrogen addition on soil microbial biomass and enzymatic activity in Bayinbuluk alpine wetland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(13):1–12. (in Chinese)

[43] KSTER P, WALLRAD L, EDEL K H, et al. The battle of two ions: Ca^{2+} signalling against Na^{+} stress[J]. Plant Biology, 2018, 21(Supp. 1):12704.

[44] 董立霞,谭军利,李森,等. 覆砂下微咸水盐度和钠吸附比对水盐入渗及分布的影响[J]. 排灌机械工程学报,2022,40(12):1284–1289.
DONG Lixia, TAN Junli, LI Miao, et al. Effects of salinity and sodium adsorption ratio of brackish water under sand cover on water and salt infiltration and distribution[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2022,40(12):1284–1289. (in Chinese)

[45] 张美桃,杨培岭,任树梅,等. 灌溉水盐分及灌水量对土壤水盐分布与春玉米生长的影响[J]. 水土保持学报,2022,36(4):290–298.
ZHANG Meitao, YANG Peiling, REN Shumei, et al. Effects of irrigation water salinity and irrigation amount on soil water and salt distribution and spring maize growth[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2022,36(4):290–298. (in Chinese)

[46] 赖善星,张耀珑,盛统民,等. 干旱区微咸水覆膜灌溉棉花根系生长分布与土壤水盐运移规律及其相互作用[J]. 安全与环境工程,2022,29(6):175–183.
LAI Shanxing, ZHANG Yaolong, SHENG Tongmin, et al. Root growth and distribution of cotton under brackish water mulching irrigation and its interaction with soil water and salt transport in arid region [J]. Safety and Environmental Engineering, 2019,29(6):175–183. (in Chinese)

[47] 郭晓雯,刘佳炜,郑志玉,等. 全生育期咸水滴灌对土壤盐分累积和棉花生长的影响[J]. 干旱区研究,2022,39(6):1952–1965.
GUO Xiaowen, LIU Jiawei, ZHENG Zhiyu, et al. Effects of saline drip irrigation on soil salt accumulation and cotton growth during the whole growth period[J]. Arid Land Research,2022,39(6):1952–1965. (in Chinese)

[48] DEINLEIN U, STEPHAN A B, HORIE T, et al. Plant salt-tolerance mechanisms[J]. Trends in Plant Science, 2014, 19(6):317–379.

[49] KOPITKE P M. Interactions between Ca, Mg, Na and K: alleviation of toxicity in saline solutions[J]. Plant and Soil, 2012, 352(1):353–362.

[50] 张余良,陆文龙,张伟,等. 长期微咸水灌溉对耕地土壤理化性状的影响[J]. 农业环境科学学报,2006,25(4):969–973.
ZHANG Yuliang, LU Wenlong, ZHANG Wei, et al. Effects of long-term brackish water irrigation on physical and chemical properties of cultivated soil[J]. Journal of Agro-Environmental Science,2006,25(4):969–973. (in Chinese)

[51] 王国栋,褚贵新,刘瑜,等. 干旱绿洲长期微咸地下水灌溉对棉田土壤微生物量影响[J]. 农业工程学报,2009,25(11):44–48.
WANG Guodong, CHU Guixin, LIU Yu, et al. Effects of long-term brackish groundwater irrigation on soil microbial biomass of cotton field in arid oasis[J]. Transactions of the CSAE,2009,25(11):44–48. (in Chinese)

[52] 李佳,曹彩云,郑春莲,等. 河北低平原冬小麦长期咸水灌溉矿化度阈值研究[J]. 中国生态农业学报,2016,24(5):643–651.
LI Jia, CAO Caiyun, ZHENG Chunlian, et al. Study on salinity threshold of winter wheat under long-term saline irrigation in Hebei Low Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2016,24(5):643–651. (in Chinese)

[53] 周永学,李美琪,黄志杰,等. 长期咸水滴灌对灰漠土理化性质及棉花生长的影响[J]. 干旱地区农业研究,2021,39(4):12–20.
ZHOU Yongxue, LI Meiqi, HUANG Zhijie, et al. Effects of long-term saline drip irrigation on physicochemical properties of grey desert soil and cotton growth[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021,39(4):12–20. (in Chinese)

[54] 马玉诏,党红凯,李科江,等. 咸水灌溉对冬小麦籽粒品质特性和产量的影响[J]. 应用生态学报,2022,33(4):1063–1068.
MA Yuzhao, DANG Hongkai, LI Kejiang, et al. Effects of salt water irrigation on grain quality characteristics and yield of winter wheat[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2022,33(4):1063–1068. (in Chinese)