

DOI:10.11686/cyxb2025276

http://cyxb.magtech.com.cn

李月琪, 马涛, 丁玉萍, 等. 基于生长-养分积累-产量协同调控的宁夏盐碱地玉米品种适应性研究. 草业学报, 2026, 35(6): 93-107.

LI Yue-qi, MA Tao, DING Yu-ping, *et al.* Adaptation of maize varieties in saline and alkaline land in Ningxia based on growth-nutrient accumulation-yield synergistic regulation. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(6): 93-107.

基于生长-养分积累-产量协同调控的 宁夏盐碱地玉米品种适应性研究

李月琪¹, 马涛¹, 丁玉萍¹, 苏明¹, 李涛¹, 马小英¹, 马凤兰¹, 万猛虎¹, 李清云¹, 张丹¹,
吴娜¹, 刘吉利^{2*}

(1. 宁夏大学农学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏大学生态环境学院, 宁夏 银川 750021)

摘要:针对宁夏引黄灌区盐碱地种植玉米产量降低等问题,本研究旨在探讨不同玉米品种在盐碱胁迫下的生长、生理、养分积累及产量表现,通过构建综合评价体系,筛选出适配不同盐碱程度的优势品种,为盐碱地玉米高效种植的品种选择与栽培管理提供科学依据。试验于2023年在宁夏平罗县开展,设置轻度盐碱(QS)和中度盐碱(ZS)2种盐碱梯度为主区,以先玉335(V₁)、银玉238(V₂)、晋单73(V₃)、德科622(V₄)、DK815(V₅)、禾育157(V₆)、先玉1321(V₇)、锦润919(V₈)、天赐19(V₉)、先玉1225(V₁₀)10个玉米品种为副区,用于筛选不同盐碱程度下表现优异的玉米品种。结果表明:不同盐碱胁迫环境下,10个玉米品种在生长、生理、养分积累及产量方面均呈现出品种特异性,不同品种在各指标上表现出不同的优势特征;其中,在QS下,V₃的净光合速率(P_n)、穗粒重和产量均达到最优,较其他品种增幅分别达4.90%~57.48%、1.36%~35.97%和9.70%~40.26%;V₅的PS II潜在最大光合能力(F_v/F_o)、K⁺含量最高,较其他品种增幅分别达3.50%~27.29%、2.54%~6.02%;V₁₀的PS II最大光化学效率(F_v/F_m)、脯氨酸(Pro)含量和全磷含量达到最高,分别较其他品种提高了0.25%~3.77%、0.14%~46.16%和12.59%~48.48%。而在ZS下,V₃的相对叶绿素含量(SPAD)、F_v/F_o较其他品种增幅分别达2.88%~35.30%、4.30%~35.37%;V₅的产量较其他品种提高了3.56%~61.80%;V₁₀的P_n、过氧化物酶(POD)活性及K⁺含量分别较其他品种提高了3.39%~32.24%、1.11%~15.05%和1.32%~5.19%。经熵权-TOPSIS法和主成分分析(PCA)综合评价,结果基本一致,在QS下,综合指标较优的3个玉米品种是V₃、V₅和V₁₀,而在ZS下,综合指标较优的3个玉米品种同样是V₁₀、V₃和V₅。因此,综合两种评价方法得出,晋单73(V₃)在轻度盐碱环境下具备突出的适应性和稳产性,而先玉1225(V₁₀)在中度盐碱环境下表现相对较好,这两个品种为宁夏盐碱地玉米种植提供了科学的品种选择,可作为区域示范推广的核心品种。

关键词:玉米;品种;盐碱胁迫;生长、生理特性;养分积累;产量;综合评价

Adaptation of maize varieties in saline and alkaline land in Ningxia based on growth-nutrient accumulation-yield synergistic regulation

LI Yue-qi¹, MA Tao¹, DING Yu-ping¹, SU Ming¹, LI Tao¹, MA Xiao-ying¹, MA Feng-lan¹, WAN Meng-hu¹,
LI Qing-yun¹, ZHANG Dan¹, WU Na¹, LIU Ji-li^{2*}

1. College of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. College of Ecology and Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

收稿日期:2025-07-03;改回日期:2025-08-28

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFD1900603)和宁夏重点研发计划项目(2019BFG02015)资助。

作者简介:李月琪(2003-),女,河北邢台人,在读硕士。E-mail: lyqzakwx0101@163.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: timi11082003@163.com

Abstract: This study aimed to investigate the growth, physiological characteristics, nutrient accumulation, and yield performance of different maize varieties under saline-alkali stress conditions to address issues such as reduced maize (*Zea mays*) yields in such soils within the Ningxia Yellow River Irrigation District. By establishing a multi-trait evaluation system, the study sought to identify superior varieties suited to cultivation in saline-alkali soil, thereby providing a scientific basis for variety selection and cultivation management for efficient maize production on saline-alkali land. The experiment was conducted in Pingluo County, Ningxia, in 2023, with two main areas set up: mild saline-alkali (QS) and moderate saline-alkali (ZS) soil conditions. The varieties tested were Xianyu 335 (V_1), Yinyu 238 (V_2), Jindan 73 (V_3), Deke 622 (V_4), DK815 (V_5), Heyu 157 (V_6), Xianyu 1321 (V_7), Jinrun 919 (V_8), Tianci 19 (V_9), and Xianyu 1225 (V_{10}). It was found that under the tested contrasting saline-alkali stress conditions, the 10 maize varieties exhibit variety-specific differences in growth, physiology, nutrient accumulation, and yield, with different varieties demonstrating distinct advantages for various traits; Among them, under QS conditions, V_3 achieved optimal net photosynthetic rate (P_n), kernel weight, and yield, with average increases of 4.90%–57.48%, 1.36%–35.97%, and 9.70%–40.26%, respectively, compared to other varieties; V_5 exhibited the highest PS II potential maximum photosynthetic capacity (F_v/F_o) and K^+ content, with increases of 3.50% to 27.29% and 2.54% to 6.02%, respectively, compared to other varieties; V_{10} had the highest PS II maximum photochemical efficiency (F_v/F_m), proline (Pro) content, and total phosphorus content, with increases of 0.25% to 3.77%, 0.14% to 46.16%, and 12.59% to 48.48%, respectively, compared to other varieties. Under ZS conditions, the relative chlorophyll content (SPAD) and PS II potential maximum photosynthetic capacity (F_v/F_o) of V_3 was increased by 2.88% to 35.30% and 4.30% to 35.37%, respectively, compared to other varieties; V_5 yield was increased by 3.56% to 61.80% compared to other varieties; P_n , peroxidase (POD) activity, and K^+ content of V_{10} were increased by 3.39% to 32.24%, 1.11% to 15.05%, and 1.32% to 5.19%, respectively, compared to other varieties. A multivariate evaluation was conducted using the entropy weight-TOPSIS method and principal component analysis (PCA), with results showing consistent trends. Under the QS conditions, the three maize varieties with the optimal multivariate scores were V_3 , V_5 , and V_{10} , while under the ZS condition, the three maize varieties with the optimal scores were V_{10} , V_3 , and V_5 . Therefore, based on the combined score of the two statistical methods, Jindan 73 (V_3) demonstrated outstanding adaptability and stable yield under mild (QS) saline-alkali conditions, while Xianyu 1225 (V_{10}) performed relatively well under moderate (ZS) saline-alkali conditions. These two varieties provide a scientific basis for variety selection in saline-alkali maize cultivation in Ningxia and are suitable as core varieties for regional demonstration of contrasting saline-alkali soil tolerance and extension agency promotion.

Key words: maize; variety; saline-alkali stress; growth and physiological characteristics; nutrient accumulation; yield; comprehensive evaluation

盐碱地作为一种特殊的土地资源,因高盐高碱的土壤环境,往往会造成农作物大幅减产,尤其对偏好中性或弱酸性土壤环境的作物影响更为显著^[1]。目前,我国宁夏引黄灌区盐碱地面积已达24万 hm^2 ,约占灌区现有耕地面积的48.9%^[2];而玉米(*Zea mays*)是宁夏地区主要的栽培作物,也是产量最高的粮食作物^[3]。然而,随着盐碱化土地面积的不断扩张,我国玉米种植规模持续缩减,产量稳定性也面临严峻挑战^[4]。

围绕玉米耐盐碱特性,前人已开展了大量研究工作。研究表明,筛选耐盐品种是推动盐碱化土地高效利用的核心途径之一^[5]。同时,盐碱胁迫对作物生长发育具有显著影响,多数作物在盐碱胁迫下常表现出生长迟缓、叶

片黄化甚至脱落,严重时整株枯萎死亡^[6]。就玉米而言,其株高和根长在 NaCl 溶液浓度升高的过程中,会呈现先增加后减少的趋势^[7]。玉米苗期,盐胁迫对其生长发育的影响主要体现在抑制光合作用及干扰体内代谢物的运输方面^[8]。此外,非生物胁迫下,作物面临高盐浓度与离子失衡的双重挑战,会使超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)和过氧化物酶(peroxidase, POD)活性下降,同时引起膜脂过氧化,使丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量增加^[9]。另有研究表明^[10],在低盐、中盐和高盐胁迫影响下,玉米的有效穗数、穗粒数和产量所受到的影响依次增强。现有研究已明确盐碱胁迫对玉米生长发育、生理特性及产量有显著影响,且证实筛选耐盐品种是高效利用盐碱化土地的核心途径,但多数研究存在局限性,缺乏从大田实际环境出发,通过多品种对比,综合玉米生长发育、生理特性、养分吸收积累及最终产量等多维度指标,系统评价玉米对盐碱环境适应性的研究。因此,开展多品种大田试验,科学筛选耐盐碱性强、产量表现优的玉米品种,不仅能有效挖掘盐碱地的生产潜力,而且对保障宁夏盐碱地玉米稳定增产、提升盐碱地农业综合效益也具有重要的现实意义。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验于 2023 年在宁夏回族自治区石嘴山市平罗县前进农场(39°21' N, 106°43' E)进行,该地区属暖温带大陆性气候,常年干旱少雨,年均降水量 200 mm,年平均气温 9.5 °C,供试土壤的基本理化性质如表 1 所示。

表 1 土壤基础肥力水平

Table 1 Basic fertility of tested soils

盐碱梯度 Saline-alkali gradient	耕层 Till layer (cm)	全盐含量 Total salt content (g·kg ⁻¹)	pH	有机质 Organic matter (g·kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen (g·kg ⁻¹)	全磷 Total phosphorus (g·kg ⁻¹)	碱解氮 Alkali-hydrolyzed nitrogen (mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available phosphorus (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium (mg·kg ⁻¹)
轻度盐碱 Mildly saline-alkali	0~20	2.87	8.62	9.76	0.95	0.64	26.23	10.11	69.08
	20~40	2.66	8.75	13.51	0.81	0.61	42.14	5.25	63.11
中度盐碱 Moder- ately saline-alkali	0~20	5.80	8.92	9.24	0.63	0.42	36.30	4.28	136.28
	20~40	5.71	9.05	8.79	0.58	0.48	43.10	3.79	121.31

1.2 试验材料与设计

本研究采用裂区试验设计,主区为盐碱梯度(S),分别为轻度盐碱(QS)和轻度盐碱(ZS);副区为 10 个玉米品种(V),分别为先玉 335(V₁)、银玉 238(V₂)、晋单 73(V₃)、德科 622(V₄)、DK815(V₅)、禾育 157(V₆)、先玉 1321(V₇)、锦润 919(V₈)、天赐 19(V₉)、先玉 1225(V₁₀)。小区面积为 48 m²(长 12 m×宽 4 m),3 次重复。采用宽窄行滴灌水肥一体化种植,宽行 70 cm、窄 40 cm,滴灌带铺设在窄行,种植密度为 90000 株·hm⁻²。试验施用氮肥普滋苗(N≥45%)、磷酸一铵[(N+P₂O₅)≥73%]、氯化钾(K₂O≥62%),均为水溶性肥料,具体灌水施肥情况如表 2 所示。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 玉米生长指标的测定 在玉米灌浆中期,每个小区随机采集 5 株具有代表性的玉米植株,测定株高、茎粗、叶面积。以玉米基部刚露出地面处到地上部最高处的距离为株高^[11];茎粗为采用游标卡尺测量植株地上茎基部第 3 节间中部茎秆的直径^[12];按照公式 1 求得单片叶面积^[13];将玉米器官叶片、茎鞘、穗部分开后装袋放入烘箱 105 °C 杀青 30 min,于 80 °C 烘干至恒重后测定总干物质质量。

$$\text{单片叶面积} = \text{叶长} \times \text{叶宽(叶最宽处)} \times 0.75 \quad (1)$$

1.3.2 玉米叶片生理指标的测定 在玉米灌浆中期,于上午 9:00—11:00 在田间分别使用 TPS-2 光合测定仪(天津瑞暄科技发展有限公司,天津)测定净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r),用 FMS-2 荧光测定仪(北京力科惠泽

科技有限公司,北京)测定 PS II 最大光化学效率 (PS II maximum photochemical efficiency, F_v/F_m)、PS II 潜在最大光合能力 (PS II maximum potential photosynthetic rate, F_v/F_o)。利用 SPAD-502Plus 叶绿素仪(浙江托普云农科技股份有限公司,杭州)测定棒三叶的相对叶绿素含量 (relative chlorophyll content, SPAD) 并采集棒三叶,每个处理采集 3 片放入冰盒带回实验室;采用氮蓝四唑 (nitrogen blue tetrazole, NBT) 法^[14]测定超氧化物歧化酶活性;采用愈创木酚法^[14]测定过氧化物酶活性;采用硫代巴比妥酸法^[14]测定丙二醛含量;采用磺基水杨酸提取法^[14]测定脯氨酸 (proline, Pro) 含量。

1.3.3 玉米叶片 Na、K 离子含量测定 采用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消煮法^[15] 制作提取液,采用火焰光度法^[15] (FP6431; INESA 上海仪电分析仪器有限公司)测定 Na^+ 、 K^+ 含量。

1.3.4 玉米养分含量的测定 在玉米灌浆中期进行取样,每次取样 5 株,带回实验室于 105 °C 杀青 30 min,接着各器官分装于 85 °C 烘干至恒重。将样品粉碎后过 0.25 mm 筛。植株全氮的测定用凯氏定氮法^[16];植株全钾测定用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消煮,火焰光度法^[16];植株全磷测定用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消煮,钒钼黄比色法^[16];进而计算植株氮、磷、钾素积累量。

1.3.5 产量测定 在玉米成熟期从每个小区中挑选中间的两行进行田间产量测定;选取 20 穗成熟的玉米进行风干处理,并在室内考种,测定穗重、百粒重等产量构成指标,将含水量折合 14% 计算单位面积产量。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2019 整理及汇总数据,使用 SPSS (Version 20.0) 进行单因素方差分析,比较不同处理的差异,并使用最小显著性差异法 (least significant difference, LSD) 进行多重比较。采用 Origin Pro 2025 绘图,使用 SPSSAU 线上平台 (<https://spssau.com/index.html>) 构建结构方程模型 (SEM),同时,建立熵权-TOPSIS^[17] 和主成分分析法 (principal component analysis, PCA)^[9] 的多目标综合评价体系。

2 结果与分析

2.1 盐碱胁迫对不同玉米品种生长指标的影响

2.1.1 盐碱胁迫对不同玉米品种株高和茎粗的影响 由图 1 可知,盐碱梯度 (S)、品种 (V) 及其交互作用 ($S \times V$) 对玉米株高和茎粗的影响存在差异。对于株高, S、V 影响达到显著 ($P < 0.05$) 或极显著 ($P < 0.01$) 水平,而两者的交互作用未达到显著水平。在轻度盐碱 (QS) 和 中度盐碱 (ZS) 处理下,先玉 1225 (V_{10}) 玉米品种的株高均达到最优,分别较其他品种高出 2.57~29.96 cm (QS) 和 6.88~34.18 cm (ZS); 而对于茎粗, V 影响达到极显著水平 ($P < 0.01$), 两者交互达到显著水平。在 QS 处理下,先玉 1321 (V_7) 茎粗为最高,较其他品种高出 0.15~0.55 cm, 而 ZS 处理下,锦润 919 (V_8) 的茎粗较其他玉米品种高出 0.38~1.06 cm。

2.1.2 盐碱胁迫对不同玉米品种叶面积和单株干物质积累量的影响 由图 2 可知,盐碱梯度 (S)、品种 (V) 及其交互作用 ($S \times V$) 对玉米叶面积和单株干物质积累量的影响均达到极显著水平 ($P < 0.01$)。在轻度盐碱 (QS) 和 中度盐碱 (ZS) 处理下,银玉 238 (V_2) 玉米品种叶面积均达到最优,分别较其他品种提高了 7.63%~60.58% (QS) 和 13.38%~64.73% (ZS); 在 QS 处理下,天赐 19 (V_9) 的单株干物质积累量最高,较其他品种增幅达 21.80%~49.41%, 而 ZS 处理下,锦润 919 (V_8) 的单株干物质积累量显著高于其他玉米品种,提高了 19.86%~82.12%。

表 2 试验灌水施肥方案

Table 2 Experimental irrigation and fertilization scheme

滴灌日期 Drip irrigation date	灌水量 Quantity of irrigation water ($m^3 \cdot hm^{-2}$)	氮肥用量 Nitrogen fertilizer usage ($kg \cdot hm^{-2}$)	磷肥用量 Phosphorus fertilizer usage ($kg \cdot hm^{-2}$)	钾肥用量 Potassium fertilizer usage ($kg \cdot hm^{-2}$)
4月25日 April 25	450	30.00	15.00	12.00
5月20日 May 20	300	—	—	—
6月5日 June 5	450	54.00	27.00	21.60
6月20日 June 20	450	54.00	27.00	21.60
7月5日 July 5	375	36.00	18.00	14.40
7月15日 July 15	375	36.00	18.00	14.40
7月25日 July 25	375	—	—	—
8月7日 August 7	300	45.00	22.50	18.00
8月17日 August 17	300	45.00	22.50	18.00
8月27日 August 27	300	—	—	—
9月7日 September 7	225	—	—	—

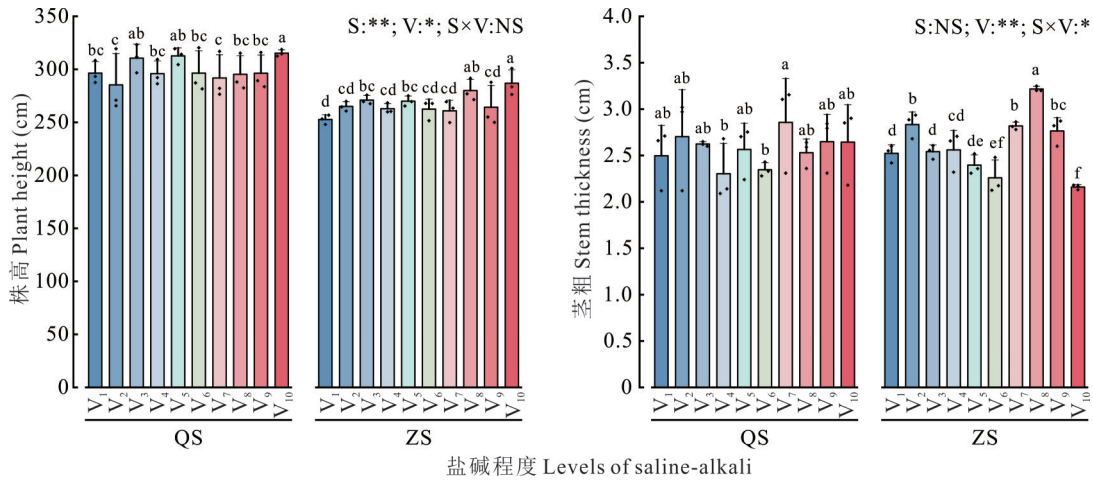


图 1 盐碱胁迫对不同玉米品种株高和茎粗的影响

Fig. 1 Effect of saline-alkali stress on plant height and stem thickness of different maize varieties

S: 盐碱梯度; QS: 轻度盐碱; ZS: 中度盐碱; V: 品种; *表示 $P < 0.05$, **表示 $P < 0.01$, NS 表示不显著; 不同小写字母表示不同玉米品种在 0.05 水平差异显著。下同。S: Saline-alkali gradient; QS: Mildly saline-alkali; ZS: Moderately saline-alkali; V: Variety; * indicates $P < 0.05$, ** indicates $P < 0.01$, NS indicates not significant; Different lowercase letters indicate significant differences among different maize varieties at the 0.05 level. The same below.

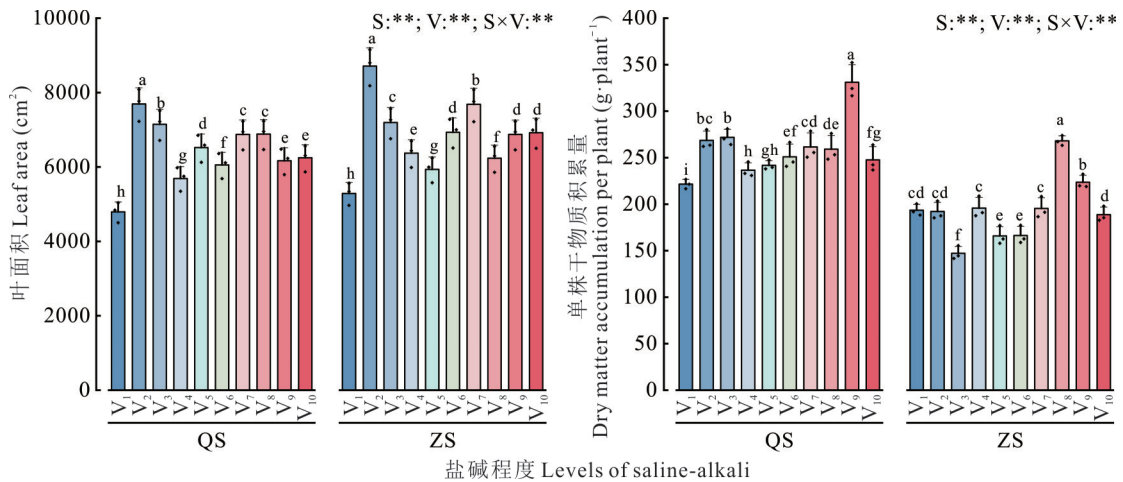


图 2 盐碱胁迫对不同玉米品种叶面积和单株干物质积累的影响

Fig. 2 Effect of saline-alkali stress on leaf area and dry matter accumulation per plant of different maize varieties

2.2 盐碱胁迫对不同玉米品种生理指标的影响

2.2.1 对叶片光合特性和相对叶绿素含量 (SPAD) 的影响 由图 3 可知, 盐碱梯度 (S)、品种 (V) 及其交互作用 ($S \times V$) 对净光合速率 (P_n)、蒸腾速率 (T_r) 和 SPAD 的影响均达到极显著水平 ($P < 0.01$)。在轻度盐碱 (QS) 下, 晋单 73 (V_3) 的 P_n 达到最优, 较其他品种提高了 4.90%~57.48%, 而中度盐碱 (ZS) 下, 先玉 1225 (V_{10}) 的 P_n 显著高于其他玉米品种, 提高了 3.39%~32.24%; 在 QS 和 ZS 处理下, 天赐 19 (V_9) 的 T_r 均达到最高, 分别较其他品种提高 0.08%~46.42% 和 1.49%~61.90%; 在 QS 处理下, 禾育 157 (V_6) 的 SPAD 达到最高, 较其他品种增幅达 0.02%~9.50%, 而 ZS 下, 晋单 73 (V_3) 的 SPAD 达到最优, 较其他品种提高 2.88%~35.30%。

2.2.2 对叶片荧光参数的影响 由图 4 可知, 仅盐碱梯度 (S) 对 PS II 潜在最大光合能力 (F_v/F_o) 的影响达到显著水平。在轻度盐碱 (QS) 下, 先玉 1225 (V_{10}) 的 PS II 最大光化学效率 (F_v/F_m) 达到最高, 较其他品种增幅达 0.25%~3.77%, 而中度盐碱 (ZS) 下, 禾育 157 (V_6) 的 F_v/F_m 达到最优, 较其他品种提高了 0.01%~7.36%; 在 QS 下, DK815 (V_5) 的 F_v/F_o 达到最大, 较其他品种增幅达 3.50%~27.29%, 而 ZS 下, 晋单 73 (V_3) 的 F_v/F_o 达到最高, 较其他品种提高了 4.30%~35.37%。

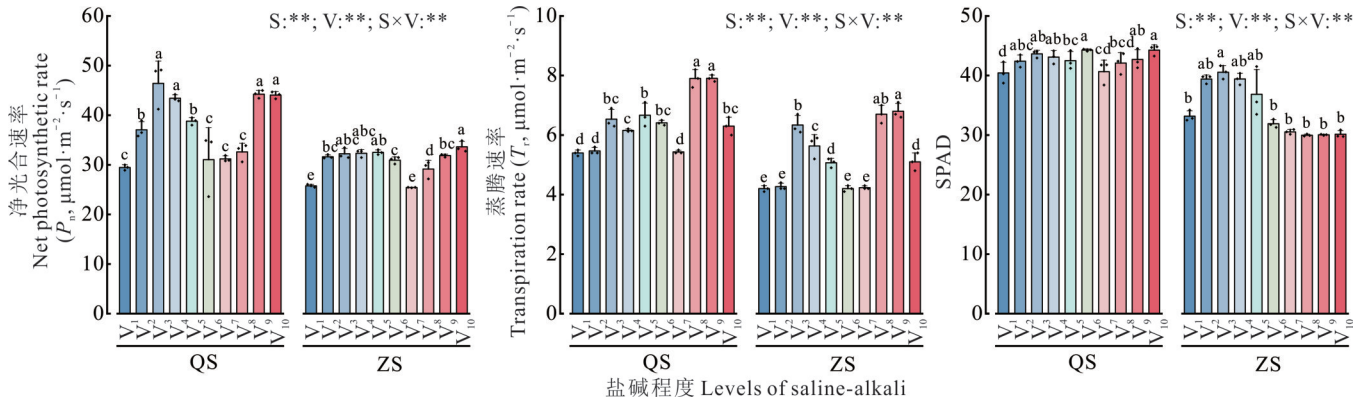


图3 盐碱胁迫对不同玉米品种叶片净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)和相对叶绿素含量(SPAD)的影响

Fig. 3 Effects of saline-alkali stress on net photosynthetic rate (P_n), transpiration rate (T_r), and relative chlorophyll content (SPAD) in leaves of different maize varieties

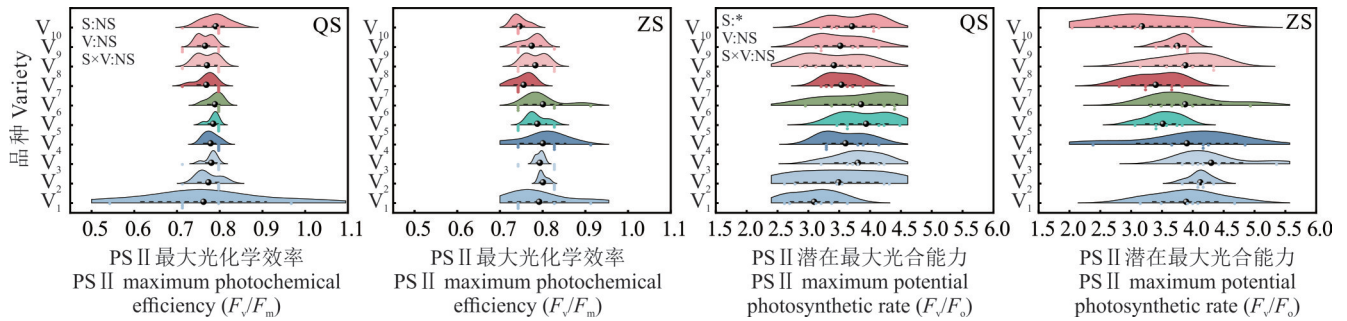


图4 盐碱胁迫对不同玉米品种叶片PS II最大光化学效率(F_v/F_m)和PS II潜在最大光合能力(F_v/F_o)的影响

Fig. 4 Effects of saline-alkali stress on maximum photochemical efficiency (F_v/F_m) of PS II and maximum potential photosynthetic capacity (F_v/F_o) of PS II in leaves of different maize varieties

2.2.3 对叶片抗氧化特性的影响 由图5可知,盐碱梯度(S)、品种(V)及其交互作用($S \times V$)对超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)活性的影响均达到极显著水平($P < 0.01$)。在轻度盐碱(QS)下,先玉1321(V_7)的SOD活性显著高于其他品种,增幅达13.01%~33.99%,而中度盐碱(ZS)下,天赐19(V_9)的SOD活性最高,较其他品种提高了5.69%~12.73%;在QS下,先玉1321(V_7)的POD活性显著高于其他品种,增幅达16.06%~43.84%,而在ZS下,先玉1225(V_{10})的POD活性达到最高,较其他品种提高了1.11%~15.05%。

盐碱梯度(S)、品种(V)对丙二醛(MDA)和脯氨酸(Pro)含量的影响均达到极显著水平($P < 0.01$),两因素交互效应对Pro含量的影响极显著($P < 0.01$),对MDA含量的影响未达到显著水平。在轻度盐碱(QS)下,DK815

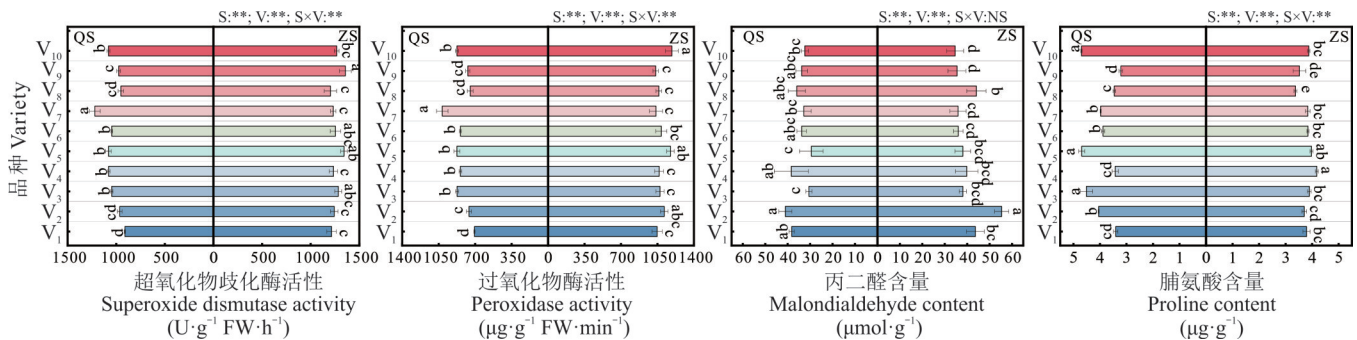


图5 盐碱胁迫对不同玉米品种叶片超氧化物歧化酶、过氧化物酶活性和丙二醛、脯氨酸含量的影响

Fig. 5 Effects of saline-alkali stress on superoxide dismutase and peroxidase activities, as well as malondialdehyde and proline content in leaves of different maize varieties

(V₅)的MDA含量最低,较其他品种下降了3.65%~39.42%,而中度盐碱(ZS)下,先玉1225(V₁₀)的MDA含量最低,较其他品种下降了2.48%~27.33%;在QS下,先玉1225(V₁₀)品种的Pro含量达到最大,较其他品种增幅达0.14%~46.16%,而在ZS下,德科622(V₄)的Pro含量最高,较其他品种提高了5.03%~23.81%(图5)。

2.2.4 对叶片Na⁺、K⁺含量及其比值的影响 由图6可知,盐碱梯度(S)、品种(V)及其交互作用(S×V)对Na⁺、K⁺含量及其比值的影响均达到极显著水平($P<0.01$)。在轻度盐碱(QS)下,天赐19(V₉)玉米品种的Na⁺含量达到最高,较其他品种增幅达0.96%~62.42%,而中度盐碱(ZS)下,锦润919(V₈)的Na⁺含量最高,较其他品种提高了1.07%~88.47%;在QS下,DK815(V₅)品种的K⁺含量显著高于其他品种,增幅达2.54%~6.02%,而在ZS下,先玉1225(V₁₀)的K⁺含量显著高于其他品种,提高了1.32%~5.19%;在QS和ZS下,锦润919(V₈)玉米品种的Na⁺/K⁺均达到最高,分别较其他品种提高了0.52%~61.14%和0.18%~91.10%。

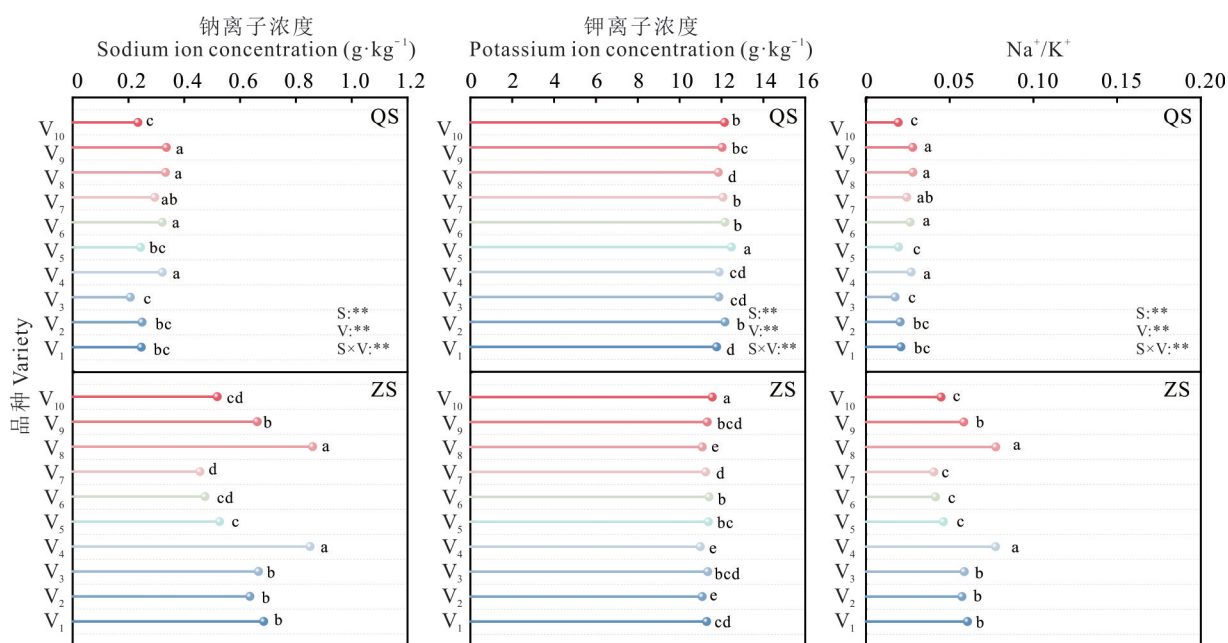


图6 盐碱胁迫对不同玉米品种叶片Na、K离子含量及其比值的影响

Fig. 6 Effect of saline and alkaline stress on the content of Na and K ions and their ratio in the leaves of different maize varieties

2.3 盐碱胁迫对不同玉米品种养分积累动态变化的影响

由图7可知,盐碱梯度(S)、品种(V)及其交互作用(S×V)对全磷、全钾的影响均达到极显著水平($P<0.01$)。品种(V)及其交互作用(S×V)对全氮的影响达到极显著水平($P<0.01$)。在轻度盐碱(QS)下,锦润919(V₈)玉米品种的全氮含量显著高于其他品种,增幅达3.89%~43.09%,而中度盐碱(ZS)下,银玉238(V₂)的全氮含量显著高于其他品种,提高了32.95%~59.62%;在QS下,先玉1225(V₁₀)品种的全磷含量显著高于其他品种,增幅达12.59%~48.48%,而在ZS下,银玉238(V₂)品种的全磷含量显著高于其他品种,提高了5.08%~71.00%;在QS下,先玉1321(V₇)品种的全钾含量显著高于其他品种,增幅达10.22%~117.26%,而在ZS下,先玉335(V₁)品种的全钾含量显著高于其他品种,提高了5.95%~51.29%。

2.4 盐碱胁迫对不同玉米品种产量及其构成的影响

由图8可知,盐碱梯度(S)、品种(V)及其交互作用对产量及其构成的影响存在差异。对于穗粒重,S、V影响均达到极显著($P<0.01$),而两者的交互作用未达到显著水平,在轻度盐碱(QS)处理下,晋单73(V₃)玉米品种的穗粒重达到最优,较其他品种增幅达1.36%~35.97%,在中度盐碱(ZS)下,银玉238(V₂)的穗粒重达到最高,较其他品种提高了6.24%~43.62%;对于百粒重,V单因素、S×V两因素影响均达到极显著水平($P<0.01$)。在

QS处理下,禾育157(V₆)的百粒重最高,较其他品种提高了5.40%~31.98%,而ZS处理下,德科622(V₄)的百粒重达到最优,较其他品种增幅达1.60%~21.07%。盐碱梯度(S)、品种(V)及其交互作用(S×V)对产量的影响均达到极显著水平(P<0.01)。在QS下,晋单73(V₃)的产量高于其他品种,增幅达9.70%~40.26%,而在ZS下,DK815(V₅)的产量达到最优,较其他品种提高了3.56%~61.80%。

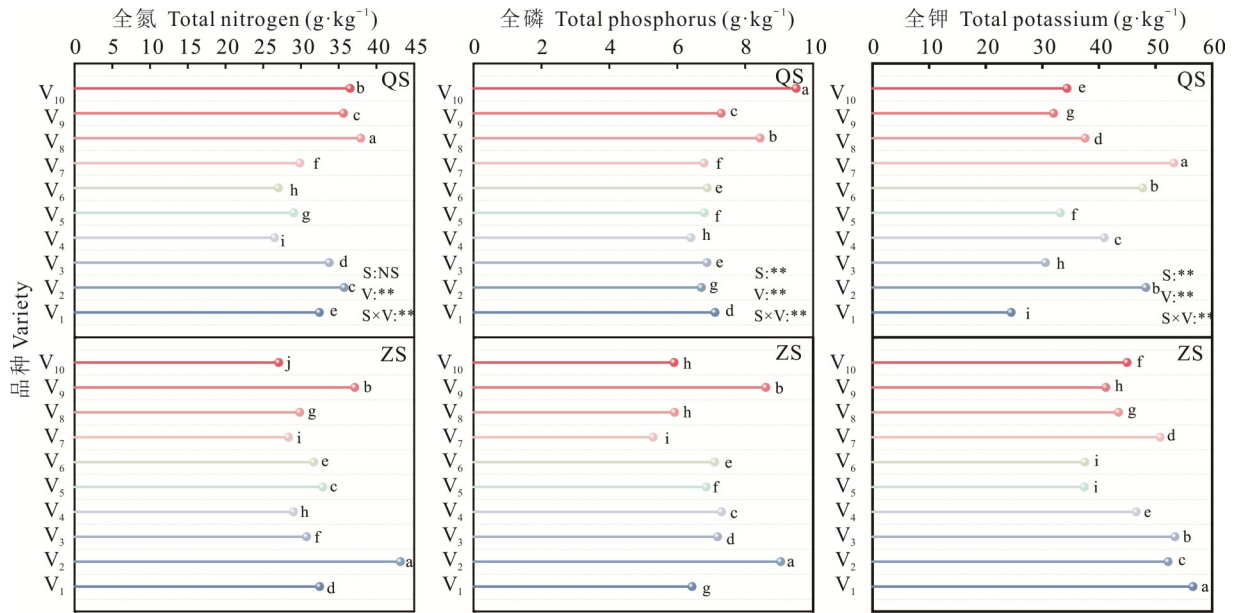


图7 盐碱胁迫对不同玉米品种养分积累动态变化的影响

Fig. 7 Effect of saline-alkali stress on the dynamics of nutrient accumulation in different maize varieties

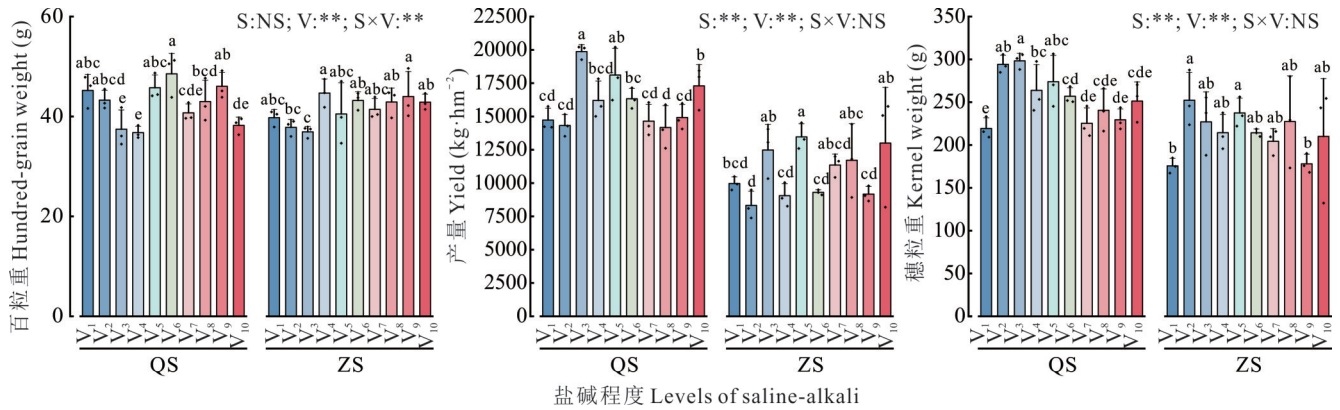


图8 盐碱胁迫对不同玉米品种产量及其构成的影响

Fig. 8 Effect of saline and alkaline stress on yield and its composition in different maize varieties

2.5 不同盐碱胁迫下对玉米各项指标的SEM及Mantel相关性检验分析

图9结构方程模型(SEM)表明,不同玉米品种在轻度盐碱(QS)和轻度盐碱(ZS)下的生长指标(growth index, GI)、生理指标(physiological index, PI)和离子浓度(ion concentration, IC)及最终产量的表现存在差异。在QS下,不同玉米品种可直接影响养分积累量(nutrient accumulation, NA)和籽粒产量及其构成(seed yield and its composition, YC),标准化路径系数分别达到0.556和0.796,同样,也可通过影响GI、PI和IC进而调节NA和YC,其中,不同玉米品种对PI、IC均有极显著正效应,GI、PI、IC对NA的影响达到显著水平,而GI、PI对YC均达到极显著水平,NA对YC的调节作用显著。在ZS下,不同玉米品种对NA的影响并不显著,对YC的影响显著,标准化路径系数达到0.372,其中,IC对NA有显著正效应,GI、PI、IC对YC的影响均达到显著水平。因此,不同

盐碱梯度下玉米品种可通过生长优化、生理调节、离子平衡的协同作用,直接或间接调控养分积累量与籽粒产量及其构成,从而实现对盐碱环境的适应性响应。进一步利用 Mantel 检验,对株高(plant height, ZG)、茎粗(stem thickness, JC)、叶面积(leaf area, LA)、单株干物质质量(dry matter mass per plant, GW)等 15 个因子与 NA 和 YC 之间的关系进行分析(图 9)发现,NA 与 LA、GW、 T_r 、 Na^+ 、 Na^+/K^+ 呈正相关($P<0.05$ 、 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 、 $P<0.05$ 、 $P<0.01$)。

2.6 综合评价分析

利用熵权-TOPSIS法以 22 个待评价指标为目标构建原始矩阵(表 3),在轻度盐碱(QS)下,株高、茎粗、叶

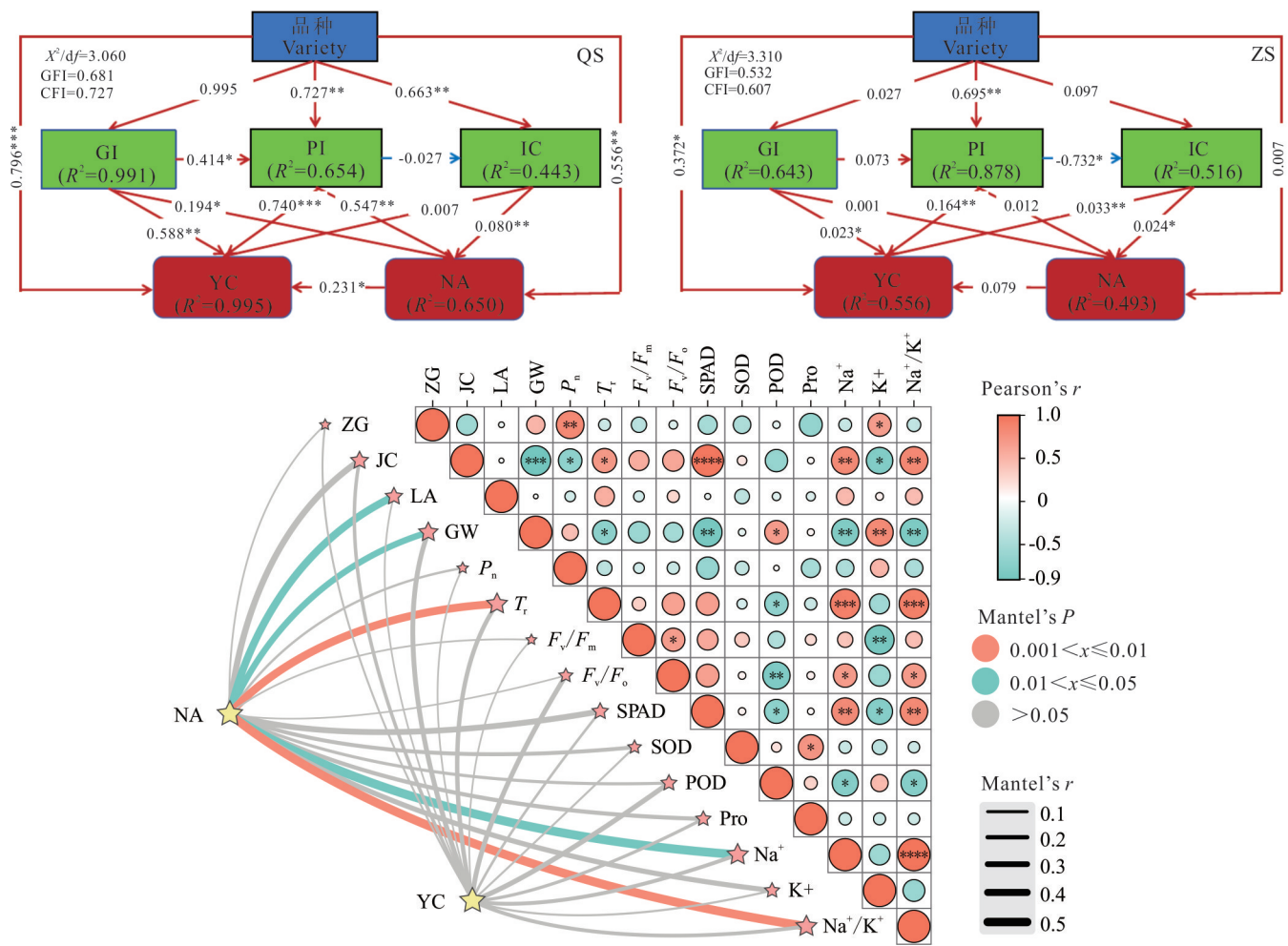


图 9 不同盐碱胁迫下对玉米各项指标的结构方程模型及 Mantel 相关性检验分析

Fig. 9 Analysis of structural equation model (SEM) and Mantel test correlation test on various indexes of maize under different saline and alkaline stresses

GI: 生长指标; PI: 生理指标; IC: 离子浓度; YC: 籽粒产量及其构成; NA: 养分积累量; ZG: 株高; JC: 茎粗; LA: 叶面积; GW: 单株干物质质量; P_n : 净光合速率; T_r : 蒸腾速率; F_v/F_m : PS II 最大光化学效率; F_v/F_o : PS II 潜在最大光合能力; SPAD: 相对叶绿素含量; SOD: 超氧化物歧化酶活性; POD: 过氧化物酶活性; Pro: 脯氨酸含量; Na^+ : 钠离子浓度; K^+ : 钾离子浓度; Na^+/K^+ : 钠钾离子比。红色箭头表示正相关; 蓝色箭头表示负相关; 与箭头相关联的值表示标准化回归系数。与响应变量相关的 R^2 值表示通过与其他变量的关系解释变异比例。模型的统计信息如下: X^2/df 为卡方与自由度比值; GFI: 拟合优度指数; CFI: 比较拟合指数。***表示 $P<0.001$ 。GI: Growth index; PI: Physiological index; IC: Ion concentration; YC: Seed yield and its composition; NA: Nutrient accumulation; ZG: Plant height; JC: Stem thickness; LA: Leaf area; GW: Dry matter mass per plant; P_n : Net photosynthetic rate; T_r : Transpiration rate; F_v/F_m : Maximum photochemical efficiency of PS II; F_v/F_o : Potential maximum photosynthetic capacity of PS II; SPAD: Relative chlorophyll content; SOD: Superoxide dismutase activity; POD: Peroxidase activity; Pro: Proline content; Na^+ : Sodium ion concentration; K^+ : Potassium ion concentration; Na^+/K^+ : Sodium/potassium ion. Red arrows indicate positive correlation, blue arrows indicate negative correlation, and values associated with arrows indicate standardized regression coefficients. The R^2 value associated with the response variable indicates the proportion of variance explained through the relationship with other variables. The statistical information of the model is as follows: X^2/df is chi-square to degrees of freedom ratio; GFI is the goodness of fit index; CFI is comparative fit index. *** denotes $P<0.001$.

面积、单株干物质质量、 P_n 、 T_r 、 F_v/F_m 、 F_v/F_o 、SPAD、SOD、POD、MDA、Pro、 Na^+ 、 K^+ 、 Na^+/K^+ 、全氮、全磷、全钾、穗粒重、百粒重及产量对应的权重分别为0.32%、1.23%、4.99%、3.75%、8.78%、5.95%、0.18%、1.43%、0.29%、2.19%、3.40%、3.41%、5.98%、8.88%、0.09%、9.28%、4.89%、4.89%、19.79%、3.50%、2.74%和4.04%。其中,全钾、 Na^+/K^+ 、 Na^+ 等指标权重较高,反映了这些指标在QS下的贡献度较高。在中度盐碱(ZS)下,对应的权重分别为0.15%、1.58%、2.17%、5.74%、1.01%、4.49%、0.02%、0.90%、38.82%、0.18%、0.28%、2.58%、0.40%、13.91%、0.03%、14.70%、2.34%、3.17%、2.34%、1.44%、0.45%和3.29%。其中,SPAD、 Na^+/K^+ 、 Na^+ 等指标权重较高,反映了这些指标在ZS下的贡献度较高。根据上述熵权法计算的各项评价指标权重结果,得出正负理想解、与正负理想解的距离及相对贴近度(relative proximity, C_i),最终得到熵权-TOPSIS综合评价结果,如表4所示, QS下各处理的相对贴近度由大到小排序为 $V_3 > V_5 > V_{10} > V_6 > V_2 > V_4 > V_7 > V_8 > V_9 > V_1$, ZS下则表现为 $V_{10} > V_3 > V_5 > V_7 > V_8 > V_1 > V_2 > V_6 > V_9 > V_4$ 。利用主成分分析对22个指标进行降维分析,提取第一、二主成分,计算综合得分。QS下各处理排序结果由大到小为 $V_5 > V_3 > V_{10} > V_7 > V_6 > V_4 > V_9 > V_2 > V_8 > V_1$, ZS下则表现为 $V_{10} > V_3 > V_5 > V_4 > V_1 > V_8 > V_7 > V_6 > V_2 > V_9$ 。综合两种评价方法得出,在QS下,表现较优的3个玉米品种是 V_3 、 V_5 和 V_{10} ,而在ZS下,综合指标较优的3个玉米品种同样是 V_{10} 、 V_3 和 V_5 (表5)。

表3 熵值法计算各项评价指标权重结果

Table 3 Results of the entropy method for calculating the weights of various evaluation indicators

评价指标 Evaluation indicator	盐碱梯度 Saline-alkali gradient					
	轻度盐碱 Mildly saline-alkali (QS)			中度盐碱 Moderately saline-alkali (ZS)		
	信息熵值 Information entropy value	信息效用值 Information utility value	权重系数 Weight coefficient (V_j , %)	信息熵值 Information entropy value	信息效用值 Information utility value	权重系数 Weight coefficient (V_j , %)
株高 Plant height	0.9998	0.0002	0.32	0.9997	0.0003	0.15
茎粗 Stem thickness	0.9992	0.0008	1.23	0.9972	0.0028	1.58
叶面积 Leaf area	0.9968	0.0032	4.99	0.9962	0.0038	2.17
单株干物质 Dry matter of per plant	0.9976	0.0024	3.75	0.9900	0.0100	5.74
净光合速率 Net photosynthetic rate (P_n)	0.9943	0.0057	8.78	0.9982	0.0018	1.01
蒸腾速率 Transpiration rate (T_r)	0.9961	0.0039	5.95	0.9922	0.0078	4.49
PS II 最大光化学效率 F_v/F_m	0.9999	0.0001	0.18	1.0000	0.0000	0.02
PS II 潜在最大光合能力 F_v/F_o	0.9991	0.0009	1.43	0.9984	0.0016	0.90
相对叶绿素含量 SPAD	0.9998	0.0002	0.29	0.9324	0.0676	38.82
超氧化物歧化酶 SOD	0.9986	0.0014	2.19	0.9997	0.0003	0.18
过氧化物酶 POD	0.9978	0.0022	3.40	0.9995	0.0005	0.28
丙二醛 MDA	0.9978	0.0022	3.41	0.9955	0.0045	2.58
脯氨酸 Pro	0.9961	0.0039	5.98	0.9993	0.0007	0.40
Na^+	0.9942	0.0058	8.88	0.9758	0.0242	13.91
K^+	0.9999	0.0001	0.09	1.0000	0.0000	0.03
Na^+/K^+	0.9940	0.0060	9.28	0.9744	0.0256	14.70
全氮 Total nitrogen	0.9968	0.0032	4.89	0.9959	0.0041	2.34
全磷 Total phosphorus	0.9968	0.0032	4.89	0.9945	0.0055	3.17
全钾 Total potassium	0.9871	0.0129	19.79	0.9959	0.0041	2.34
穗粒重 Kernel weight	0.9977	0.0023	3.50	0.9975	0.0025	1.44
百粒重 Hundred-grain weight	0.9982	0.0018	2.74	0.9992	0.0008	0.45
产量 Yield	0.9974	0.0026	4.04	0.9943	0.0057	3.29

表 4 基于 TOPSIS 综合评价的不同盐碱梯度品种适应性分析

Table 4 Adaptation analysis of varieties with different saline-alkali gradients based on comprehensive TOPSIS evaluation

品种 Variety	盐碱梯度 Saline-alkali gradient							
	轻度盐碱 Mildly saline-alkali (QS)				中度盐碱 Moderately saline-alkali (ZS)			
	D_i^+	D_i^-	C_i	排序 Sort	D_i^+	D_i^-	C_i	排序 Sort
V ₁	253.692	22.644	0.082	10	137.182	66.647	0.327	6
V ₂	224.490	145.104	0.393	5	172.868	74.382	0.301	7
V ₃	28.384	258.770	0.901	1	58.757	142.824	0.709	2
V ₄	178.959	93.895	0.344	6	157.753	33.981	0.177	10
V ₅	92.319	181.434	0.663	2	70.901	169.652	0.705	3
V ₆	164.882	108.060	0.396	4	147.558	48.007	0.245	8
V ₇	214.819	106.859	0.332	7	83.032	112.283	0.575	4
V ₈	234.166	104.554	0.309	8	87.944	113.723	0.564	5
V ₉	214.268	75.386	0.260	9	151.994	44.420	0.226	9
V ₁₀	126.808	146.005	0.535	3	57.601	157.887	0.733	1

注: D_i^+ : 正理想解距离; D_i^- : 负理想解距离; C_i : 相对贴近度。

Note: D_i^+ : Positive ideal solution distance; D_i^- : Negative ideal solution distance; C_i : Relative proximity.

表 5 基于主成分综合评价的不同盐碱梯度品种适应性分析

Table 5 Adaptation analysis of varieties with different saline-alkali gradients based on comprehensive principal component evaluation

品种 Variety	盐碱梯度 Saline-alkali gradient							
	轻度盐碱 Mildly saline-alkali (QS)				中度盐碱 Moderately saline-alkali (ZS)			
	PC1	PC2	得分 Score	排序 Sort	PC1	PC2	得分 Score	排序 Sort
V ₁	-1.4011	-0.8839	-0.57	10	0.9180	-1.5923	-0.04	5
V ₂	-0.3346	-1.1385	-0.29	8	-1.2373	0.2730	-0.30	9
V ₃	0.0840	2.0281	0.36	2	0.3917	0.5700	0.22	2
V ₄	-0.3682	0.5838	-0.01	6	0.3430	0.3262	0.16	4
V ₅	1.2385	0.1816	0.40	1	1.0677	-0.5338	0.20	3
V ₆	-0.1208	1.0732	0.14	5	-0.7325	-0.4030	-0.28	8
V ₇	1.4352	-0.9784	0.27	4	-0.1586	-1.1259	-0.26	7
V ₈	-1.0334	-0.2630	-0.36	9	-1.7272	0.5723	-0.38	6
V ₉	-0.7450	-0.1072	-0.24	7	-0.1486	-0.0643	-0.05	10
V ₁₀	1.2455	-0.4958	0.29	3	1.2839	1.9779	0.73	1

注: PC1: 第一主成分; PC2: 第二主成分。

Note: PC1: First principal component; PC2: Second principal component.

3 讨论

3.1 盐碱胁迫对不同玉米品种生长、生理指标和离子浓度的影响

不同盐碱胁迫环境下,选择适宜的玉米品种是实现盐碱地高产稳产的关键。杨晓杰等^[18]研究表明,不同玉米品种因基因型、形态特征及生理生化机制的差异,对盐碱胁迫的响应表现为显著分化;其中株高、茎粗和叶面积等形态指标是支撑作物高产稳产的表型基础^[19],本试验中 V₂ 品种在轻、中度盐碱下,叶面积均达到最优, V₈、V₉ 的单株干物质积累量分别在 QS 和 ZS 环境下达到最高。然而,依赖形态指标开展评价具有一定的局限性,其无法成

为综合评价的唯一依据。还需结合光合参数、荧光参数、抗氧化酶活性等生理指标。常硕其等^[20]研究发现,超级杂交稻(*Oryza sativa*)生物学产量大、稻谷产量高的重要原因在于其具有较高的净光合速率(P_n)。 F_v/F_m 和 F_v/F_o 是反映光化学状况的两个重要参数,二者可作为衡量作物耐盐性、耐旱性等抗逆能力的重要指标^[21-22]。有研究表明^[23],SOD活性测定结果能够直观反映玉米受逆境胁迫的程度;同时,在盐碱胁迫下,离子失衡会打破细胞内稳态,引发活性氧的过量积累,进而诱发膜脂过氧化反应,对细胞膜结构与功能造成损伤;而MDA是细胞膜脂过氧化的重要产物,其含量高低可以反映植物遭受逆境胁迫和细胞膜脂过氧化的程度^[24]。滕祥勇等^[25]研究发现,盐碱胁迫下水稻叶片中 Na^+/K^+ 显著下降,表明植株的离子平衡体系已遭破坏。所以 Na^+/K^+ 是衡量植物耐盐性的关键指标,维持其正常比例对植物保持离子平衡至关重要。本试验进一步揭示,QS环境下,在 P_n 、 F_v/F_m 、 F_v/F_o 、SOD、MDA、 Na^+/K^+ 指标中表现较好的玉米品种分别是 V_3 、 V_{10} 、 V_5 、 V_7 、 V_5 、 V_8 ;而在ZS下,分别是 V_{10} 、 V_6 、 V_3 、 V_9 、 V_{10} 、 V_8 。

3.2 盐碱胁迫对不同玉米品种养分积累及籽粒产量的影响

盐碱胁迫是制约玉米生长发育、养分积累和产量形成的重要非生物逆境之一,但不同玉米品种在遗传背景、生理特性和生态适应性上的差异,会导致其对养分(全氮、全磷、全钾)的吸收、转运和分配模式显著不同,进而影响其产量形成^[26]。周晓舟等^[27]研究表明,全氮、全磷、全钾是评估植株养分的核心指标,其高低在一定程度上可反映玉米品种对养分的吸收、运输和积累能力,吸收能力强的品种通常具有更高的全量养分积累量。而穗粒重、百粒重和产量是衡量玉米品种丰产性的核心指标。有研究表明,玉米产量存在明显的基因型差异,高产玉米品种的主要性状特征表现为百粒重与穗粒数的协同提升^[28]。本试验结果与前人研究结果基本一致,QS环境下,在全氮、全磷、全钾、穗粒重、百粒重和产量指标中表现较好的玉米品种分别是 V_8 、 V_{10} 、 V_7 、 V_3 、 V_6 、 V_3 ,而在ZS下,分别是 V_2 、 V_2 、 V_1 、 V_2 、 V_4 、 V_5 。

3.3 不同玉米品种的盐碱适应性分析

TOPSIS法通过计算各方案与理想解的距离,实现对研究目标的综合评价,这一方法能够弥补单变量回归分析仅能从单一目标开展评价的局限。但由于不同指标的量纲存在差异,导致多个指标之间无法直接进行比较。鉴于此,研究者通常会将熵权法与TOPSIS法相结合,以此对多个目标进行综合评价^[29-31]。例如,李慧等^[32]采用熵权法与TOPSIS法对水氮优化管理模式下玉米的产量、氮素利用及土壤硝态氮状况展开综合评价,研究发现灌溉水量为 $400\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 、氮肥用量为 $200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,可以实现关中平原夏玉米在节约水资源与减少肥料使用上的目标。彭彦珉等^[29]采用熵权和TOPSIS法结合,对小麦(*Triticum aestivum*)季耕作方式和玉米季氮肥用量组合下玉米产量、干物质和氮素积累量、氮肥吸收效率、氮素利用效率、氮肥偏生产力、氮肥农学效率、氮肥贡献率进行综合评价表明,麦季深松配合玉米季氮肥用量 $210\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 可作为旱地麦—玉两熟体系玉米高产高效的栽培模式以及高效的耕作施氮模式。而主成分分析(PCA)能将多个指标进行降维分析,在品种评价方面,诸多研究运用PCA法取得良好效果。例如,郭富城等^[33]基于对16个水稻品种(系)农艺性状、灌浆期光合特性和籽粒淀粉合成关键酶活性的测定,通过主成分分析(PCA),结合实际产量,筛选出适宜宁夏盐碱地种植的水稻品种。因此,本研究采用熵权—TOPSIS和主成分分析法进行综合评价,更系统地反映不同玉米品种在多维度指标下的综合表现及其对不同盐碱环境的适应性差异,从而筛选出适配不同盐碱程度的优势品种。

4 结论

本研究通过熵权—TOPSIS法和主成分分析,揭示了玉米品种在不同盐碱环境下的综合表现差异,筛选出 V_3 、 V_5 、 V_{10} 是适配轻、中度盐碱程度的优势玉米品种,其中 V_5 和 V_3 在轻度盐碱地表现更优, V_{10} 在中度盐碱地优势突出。这为盐碱地农业生产提供了品种选择依据,同时也为其他作物耐盐碱品种筛选提供了参考。

参考文献 References:

- [1] Zhao H Y, Lin H X. Molecular mechanism of plants in responses to salt and alkali stress. *Soils and Crops*, 2020, 9(2): 103-113.

- 赵怀玉, 林鸿宣. 植物响应盐碱胁迫的分子机制. *土壤与作物*, 2020, 9(2): 103–113.
- [2] Wang C J, Li F X, Wu X. Effects of different organic materials on soil nutrient content and nitrogen effectiveness in saline soils of Yinbei irrigation district. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2021(23): 141–142, 153.
王长军, 李凤霞, 吴霞. 不同有机物料对银北灌区盐碱地土壤养分含量及氮有效性的影响. *现代农业科技*, 2021(23): 141–142, 153.
- [3] Ren X Y, Chen Y Y, Liang X H. Effect of Fenlong tillage on soil nutrients and maize yield in saline land of Ningxia Yinbei irrigation area. *Southwest Journal of Agriculture*, 2022, 35(5): 1063–1068.
任晓月, 陈彦云, 梁新华. 粉垄耕作对宁夏银北盐碱地土壤养分及玉米产量的影响. *西南农业学报*, 2022, 35(5): 1063–1068.
- [4] Li C C, Song Y, Sun D Q. Seedling growth difference and physiological mechanism of different maize cultivars under mixed saline-alkali stress. *Chinese Journal of Ecology*, 2023, 42(10): 2486–2493.
李聪聪, 宋勇, 孙东泉. 不同品种玉米在盐碱复合胁迫下的幼苗生长差异及其生理机制. *生态学杂志*, 2023, 42(10): 2486–2493.
- [5] Weng H Y, Wu M Y, Li X B, *et al.* High-throughput phenotyping salt tolerance in JUNCAOs by combining prompt chlorophyll a fluorescence with hyperspectral spectroscopy. *Plant Science*, 2023, 330: 111660.
- [6] Chun Y, Li X Y, Yuan Y, *et al.* Overview of the impact of salinity-alkali stress on quinoa's physiological, biochemical, and metabolic levels. *Journal of Agricultural Sciences*, 2024, 45(4): 67–77.
春宇, 李向颖, 元元, 等. 盐碱胁迫对藜麦生理生化及代谢水平的影响综述. *农业科学研究*, 2024, 45(4): 67–77.
- [7] Ruan Y H, Zhang Z X, Wang L Q, *et al.* Effect of NaCl stress on seedling physiological indices of different maize varieties. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, 45(3): 44–46.
阮英慧, 张卓新, 王丽琼, 等. 氯化钠胁迫对不同玉米品种苗期生理指标的影响. *江苏农业科学*, 2017, 45(3): 44–46.
- [8] Zhang H. Effects of deep-turning straw return on growth, development and yield of maize in saline and alkaline land. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2023.
张皓. 深翻秸秆还田对盐碱地玉米生长发育及产量的影响. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023.
- [9] Su M, Li F G, Hong Z Q, *et al.* Study on the antioxidant properties of nitrogen application in alleviating heat-induced premature senescence in dryland potatoes after flowering. *Chinese Journal of Agricultural Sciences*, 2025, 58(4): 660–675.
苏明, 李翻过, 洪自强, 等. 施氮缓解旱地马铃薯花后高温早衰的抗氧化特性研究. *中国农业科学*, 2025, 58(4): 660–675.
- [10] Li Y P, Xu Z H, Lin Y N, *et al.* Research progress on the physiological and molecular mechanisms of salt tolerance in maize. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2024, 51(12): 1–10.
李懿璞, 许政晗, 蔺雅楠, 等. 玉米耐盐生理与分子机制研究进展. *广东农业科学*, 2024, 51(12): 1–10.
- [11] He K H, Chang L G, Cui T T, *et al.* QTL localization of maize plant height and ear height in multiple environments. *Chinese Journal of Agricultural Sciences*, 2016, 49(8): 1443–1452.
何坤辉, 常立国, 崔婷婷, 等. 多环境下玉米株高和穗位高的 QTL 定位. *中国农业科学*, 2016, 49(8): 1443–1452.
- [12] Wang X T, Wei F, Dai Z J, *et al.* Identification of candidate genes associating with stem diameter in maize (*Zea mays* L.) based on integrating QTL mapping and RNA-seq. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2022, 23(6): 1737–1745.
王新涛, 魏锋, 代资举, 等. 基于 QTL 定位和 RNA-seq 分析挖掘玉米茎粗候选基因. *植物遗传资源学报*, 2022, 23(6): 1737–1745.
- [13] Ding X P, Bai J, Zhang C Y, *et al.* Effects of row expansion and plant reduction on canopy structure and yield of summer maize populations. *Chinese Journal of Agricultural Sciences*, 2020, 53(19): 3915–3927.
丁相鹏, 白晶, 张春雨, 等. 扩行缩株对夏玉米群体冠层结构及产量的影响. *中国农业科学*, 2020, 53(19): 3915–3927.
- [14] Sun Q, Hu J J. Research techniques in plant physiology. Yangling: Northwest A&F University Press, 2006.
孙群, 胡景江. 植物生理学研究技术. 杨凌: 西北农林科技大学出版社, 2006.
- [15] Wang J, Huang W J, Yao S Y, *et al.* Characteristics of ion distribution, uptake and transport in poplar trees at different growth stages and their relationship with soil salinity. *Northwest Journal of Agriculture*, 2025, 34(1): 140–152.
王杰, 黄文娟, 姚诗雨, 等. 不同生长阶段胡杨树离子分布、吸收和运移特征及其与土壤盐分的关系. *西北农业学报*, 2025, 34(1): 140–152.
- [16] Bao S D. Soil agrochemical analysis. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [17] Zhang F, Chen M R, Xing Y Y, *et al.* Optimization of potato fertilization and drip irrigation volume combinations based on

- entropy weight method and TOPSIS. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2023, 29(4): 732–744.
- 张帆, 陈梦茹, 邢英英, 等. 基于熵权法和 TOPSIS 对马铃薯施肥和滴灌量组合的优化. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29(4): 732–744.
- [18] Yang X J, Li X Y, Wang H Y, *et al.* Screening of salt-tolerant germplasm and evaluation of salt tolerance in maize inbred lines. *Maize Science*, 2014, 22(4): 19–25.
- 杨晓杰, 李旭业, 王海艳, 等. 玉米自交系耐盐种质的筛选及耐盐性评价. *玉米科学*, 2014, 22(4): 19–25.
- [19] Liu X J. Agronomic traits, yield and quality performance of cereals with different phosphorus efficiencies under coordinated fertilization with nitrogen, phosphorus and potassium. Taiyuan: Shanxi Agricultural University, 2022.
- 刘晓杰. 不同磷效率谷子在氮磷钾统筹施肥下农艺性状、产量及品质表现. 太原: 山西农业大学, 2022.
- [20] Chang S Q, Deng Q Y, Wu J. Progress in the characterization of photosynthesis and material accumulation in super hybrid rice. *Hybrid Rice*, 2014, 29(1): 1–5.
- 常硕其, 邓启云, 吴俊. 超级杂交稻光合作用和物质积累特性研究进展. *杂交水稻*, 2014, 29(1): 1–5.
- [21] Chen C, He X D, Qin J Z, *et al.* Comparison of F_v/F_m characteristics in chlorophyll fluorescence parameters of four *Michelia* species. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2013, 40(1): 32–37.
- 陈辰, 何小定, 秦金舟, 等. 4种含笑叶片叶绿素荧光参数 F_v/F_m 特性的比较. *安徽农业大学学报*, 2013, 40(1): 32–37.
- [22] Zhang X J, Zhou F P, Zhang Y Z, *et al.* Differential analysis of chlorophyll fluorescence characteristics of glutinous sorghum during flag leaf fertility. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2014, 42(12): 1270–1273.
- 张晓娟, 周福平, 张一中, 等. 糯高粱旗叶生育期间叶绿素荧光特性差异分析. *山西农业科学*, 2014, 42(12): 1270–1273.
- [23] Zhou L B. Response of yield and physiological indexes to planting density of introduced maize varieties based on the Tibetan Plateau. Nyingchi: Tibet Agricultural and Animal Husbandry University, 2023.
- 周丽斌. 基于西藏高原引进玉米品种产量及生理指标对种植密度的响应. 林芝: 西藏农牧大学, 2023.
- [24] Song J L, Qin J M, Xiong H Y, *et al.* Effects of adding different substrates on physiological characteristics of corn seedlings in tetracycline-containing soil. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(2): 342–349.
- 宋建丽, 秦俊梅, 熊华焯, 等. 添加不同基质对含四环素土壤玉米幼苗生理特性的影响. *水土保持学报*, 2019, 33(2): 342–349.
- [25] Teng X Y, Li P Z, Lin X Y, *et al.* Effects of alkaline salt stress on mineral ion uptake and partitioning in rice seedlings. *Northeast Agricultural Science*, 2022, 47(1): 11–16.
- 滕祥勇, 李鹏志, 林秀云, 等. 碱性盐胁迫对水稻苗期矿质离子吸收与分配的影响. *东北农业科学*, 2022, 47(1): 11–16.
- [26] Wang H. Effects of nitrogen fertilizer on growth and development of maize and product quality. *Henan Agriculture*, 2025, 36(6): 70–72.
- 王慧. 浅析氮肥对玉米生长发育及产品质量的影响. *河南农业*, 2025, 36(6): 70–72.
- [27] Zhou X Z, Tang C Y. Effects of nitrogen, phosphorus and potassium on agronomic traits and plant nutrients of fall corn. *Henan Agricultural Science*, 2008, 37(9): 27–29, 33.
- 周晓舟, 唐创业. 氮磷钾对秋玉米农艺性状和植株养分的影响. *河南农业科学*, 2008, 37(9): 27–29, 33.
- [28] Sun M Y, Ji M, Li C Q, *et al.* Yield differences among modern corn varieties and typical biological characteristics of high-yielding corn varieties. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2025, 31(2): 226–237.
- 孙梦宇, 纪萌, 李长青, 等. 现代玉米品种的产量差异及高产玉米品种的典型生物学特征. *植物营养与肥料学报*, 2025, 31(2): 226–237.
- [29] Peng Y M, Zhao K N, Li S, *et al.* Effects of wheat-corn cropping systems and nitrogen fertilizer application rates on corn yield and nitrogen use efficiency in dryland wheat-corn double-cropping areas. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2025, 31(1): 63–76.
- 彭彦珉, 赵凯男, 李爽, 等. 麦季耕作方式和玉米季氮肥用量对旱地麦—玉米两熟区玉米产量和氮素利用的影响. *植物营养与肥料学报*, 2025, 31(1): 63–76.
- [30] Miao Z M, Li J C, Chen D. Evaluation of water level management schemes for winter wheat under waterlogged conditions based on the entropy-weighted TOPSIS model. *Journal of Irrigation and Drainage Machinery Engineering*, 2018, 36(12): 1306–1311.
- 缪子梅, 李竞春, 陈栋. 基于熵权 TOPSIS 模型评价涝渍条件下冬小麦水位管理方案. *排灌机械工程学报*, 2018, 36(12): 1306–1311.
- [31] Zhao S T, Shi S L, Li X L, *et al.* Application of TOPSIS based on entropy weight to screen soil sustainable systems suitable

for corn rotation in the arid region of central Gansu. *Acta Agrestia Sinica*, 2019, 27(4): 997–1005.

赵思腾, 师尚礼, 李小龙, 等. 基于熵权-TOPSIS 模型筛选陇中旱作区适宜玉米轮作的土壤可持续系统. *草地学报*, 2019, 27(4): 997–1005.

- [32] Li H, Wang X M, Liu M, *et al.* Optimization of water and nitrogen reduction schemes based on summer corn yield and nitrogen utilization. *Acta Agronomica Sinica*, 2023, 49(5): 1292–1304.

李慧, 王旭敏, 刘苗, 等. 基于夏玉米产量和氮素利用的水氮减量方案优选. *作物学报*, 2023, 49(5): 1292–1304.

- [33] Guo F C, Gou R L, She Y M F, *et al.* Study on the adaptability of different salt-tolerant rice varieties to saline-alkali soils in Ningxia. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2026, 91(2): 24–33. <https://doi.org/10.13207/j.jnwafu.2026.02.003>.

郭富城, 苟瑞丽, 舍杨梦斐, 等. 不同耐盐水稻品种对宁夏盐碱地的适应性研究. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2026, 91(2): 24–33. <https://doi.org/10.13207/j.jnwafu.2026.02.003>.