



马凤兰, 苏泽晖, 刘威帆, 刘昊, 马小英, 黄霖锋, 万猛虎, 李涛, 刘吉利, 吴娜. 灌水定额对不同程度盐碱地玉米光合特性及产量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2025,30(05):28-41.

MA Fenglan, SU Zehui, LIU Weifan, LIU Hao, MA Xiaoying, HUANG Linfeng, WAN Menghu, LI Tao, LIU Jili, WU Na. Effects of irrigation quota on yield formation and photosynthetic characteristics of maize in saline and alkaline land[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025,30(05):28-41.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.05.03

灌水定额对不同程度盐碱地玉米光合特性及产量的影响

马凤兰¹ 苏泽晖¹ 刘威帆¹ 刘昊¹ 马小英¹ 黄霖锋¹
万猛虎¹ 李涛¹ 刘吉利² 吴娜^{1*}

(1. 宁夏大学农学院, 银川 750021;

2. 宁夏大学生态环境学院, 银川 750021)

摘要 为探究灌水定额对盐碱地玉米光合特性及产量形成的影响,以‘先玉1225’为试验材料,采用裂区试验设计,设置中度(全盐量3.39~4.59 g/kg, S_1)和轻度(1.36~2.57 g/kg, S_2)盐碱为主区;5 100(W_1)、4 350(W_2)、3 600(W_3)、2 850(W_4)、2 100 m³/hm²(W_5)灌水定额为副区,分别在玉米拔节期、大喇叭口期、开花期和灌浆期测定净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)、胞间CO₂(C_i)和相对叶绿素含量(SPAD)及光合代谢酶等指标,运用方差分析、相关性分析和主成分综合分析方法分析叶片 P_n 、 T_r 、 G_s 、 C_i 、SPAD、光合代谢酶与产量的相关关系及各指标的综合得分。结果表明:增加灌溉量可优化不同盐碱地玉米的光合参数。随灌溉量的增加,SPAD、 P_n 、 T_r 和 G_s 等呈现上升趋势,而 C_i 则表现出相反变化趋势。 S_1 的 W_3 玉米SPAD较其他灌溉处理高出5.35%~14.59%, W_1 的叶片 P_n 、 T_r 、 G_s 较其他灌溉处理分别升高8.12%~53.16%、4.26%~38.03%和39.86%~103.53%, C_i 则降低13.24%~30.49%;而 S_2 的 W_2 玉米SPAD较其他灌溉处理高出1.09%~9.64%, W_2 叶片 P_n 和 G_s 较其他灌溉处理分别高出4.80%~66.70%和12.31%~120.60%, W_3 叶片 T_r 较其他灌溉处理高出1.40%~41.89%;光合酶活性方面, S_1 的 W_2 玉米叶片磷酸烯醇式丙酮羧化酶(PEPC)和核酮糖-1,5-二磷酸羧化酶/加氧酶(Rubisco)活性较其他灌溉处理分别高出12.95%~118.06%和19.57%~71.87%;而 S_2 的PEPC和Rubisco活性较其他灌溉处理分别高出23.81%~105.94%和1.75%~28.89%。不同盐碱胁迫下,产量与SPAD、 P_n 、 T_r 、 G_s 和Rubisco活性含量均呈极显著正相关($P<0.01$),与PEPC呈显著相关($P<0.05$),但均与 C_i 呈负相关。主成分分析结果显示, S_1 和 S_2 各处理的综合得分由高到低均为 $W_2>W_1>W_3>W_4>W_5$ 。因此,宁夏玉米产区盐碱地最佳灌水量为4 350 m³/hm²。

关键词 灌水定额; 盐碱地; 产量; 光合特性; 玉米

中图分类号 S513

文章编号 1007-4333(2025)05-0028-14

文献标志码 A

Effects of irrigation quota on yield formation and photosynthetic characteristics of maize in saline and alkaline land

MA Fenglan¹, SU Zehui¹, LIU Weifan¹, LIU Hao¹, MA Xiaoying¹, HUANG Linfeng¹,
WAN Menghu¹, LI Tao¹, LIU Jili², WU Na^{1*}

(1. College of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;

2. College of Ecology and Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

收稿日期: 2024-11-30

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFD1900603)

第一作者: 马凤兰(ORCID:0009-0003-1692-1015), 硕士研究生, E-mail: mfl990925@163.com

通讯作者: 吴娜(ORCID:0009-0001-0501-3981), 教授, 主要从事作物高产栽培研究, E-mail: wunanxy@nxu.edu.cn

Abstract In order to investigate the effect of irrigation quota on photosynthetic characteristics and yield formation of maize in saline and alkaline land, maize variety 'Xianyu 1225' was taken as the experimental material. Split-zone experimental design was adopted in this study. Moderate salinity (total salt content: 3.39 - 4.59 g/kg, S_1) and mild salinity (1.36 - 2.57 g/kg, S_2) were set as the main zones; 5 100(W_1), 4 350(W_2), 3 600(W_3), 2 850(W_4) and 2 100 m³/hm²(W_5) irrigation quotas were used as the subzones. Net photosynthetic rate (P_n), stomatal conductance (G_s), transpiration rate (T_r), inter-cellular CO₂ (C_i), and the relative chlorophyll content (SPAD) and photosynthetic metabolism enzymes, etc. were measured at the corn jointing stage, big bell stage, blooming stage, and the filling stage, respectively. The correlations between leaf P_n , T_r , G_s , C_i , SPAD, photosynthetic metabolism enzymes and yield as well as the composite scores of each index were analyzed by using analysis of variance, correlation analysis and principal component synthesis. The results showed that increasing the irrigation amount significantly optimized the photosynthetic parameters of maize in different saline sites. With the increase in irrigation amount, SPAD, P_n , T_r and G_s showed an increasing trends, while C_i showed the opposite change trend. Among them, The SPAD of W_3 maize in S_1 was 5.35% to 14.59% higher than that of other irrigation treatments. and the leaf P_n , T_r , and G_s of W_1 were elevated by 8.12% to 53.16%, 4.26% to 38.03%, and 39.86% to 103.53%, respectively, while C_i was decreased by 13.24% to 30.49% compared with other irrigation treatments. In contrast, whereas in S_2 , the SPAD of W_2 maize was 1.09% to 9.64% higher, the leaf P_n and G_s of W_2 were 4.80% to 66.7% and 12.31% to 120.60% higher, and the leaf T_r of W_3 was 1.40% to 41.89% higher than other irrigation treatments, respectively. Aspects of photosynthetic enzyme activities, phosphoenolpyruvate carboxylase (PEPC) and ribulose-1, 5-bisphosphate carboxylase/oxygenase (Rubisco) activities of W_2 maize leaves in S_1 were 12.95% to 118.06% and 19.57% to 71.87% higher than those of other irrigated treatments, respectively; while in S_2 PEPC and Rubisco activities were 23.81% to 105.94% and 1.75% to 28.89% higher than other irrigation treatments, respectively. Under different saline conditions, the yield was highly significantly positively correlated ($P < 0.01$) with SPAD, P_n , T_r , G_s and Rubisco activity content, and significantly correlated ($P < 0.05$) with PEPC. Still, all were negatively correlated with C_i . The results of principal component analysis showed that the composite scores of the S_1 and S_2 treatments were $W_2 > W_1 > W_3 > W_4 > W_5$. In summary, the optimum irrigation water quantity for saline land in maize production area of Ningxia was 4 350 m³/hm².

Keywords irrigation quota; saline and alkaline land; yield; photosynthetic characteristics; maize

宁夏回族自治区的大部分地区属于半干旱区, 土壤盐渍化现象严重^[1]。玉米在宁夏是主要的栽培作物, 也是产量最高的粮食作物^[2]。玉米对水分的需求极大, 水分状况对其生长至关重要^[3]。相较于肥料, 玉米的生理代谢活动对水分的需求更为敏感^[4], 缺乏水分会严重抑制其正常的生理功能, 导致减产。在盐碱条件下, 灌水量对作物的光合作用及产量具有显著影响^[5-6], 合理灌溉对于提高玉米产量至关重要^[7-8]。因此, 探究宁夏盐碱地区玉米生产最佳的灌水定额对提升该地区玉米种植效率和促进农业可持续发展具有重要意义。

多项研究表明, 涝渍与盐碱对作物光合速率具有一定影响, 且两者共同作用时会进一步加剧其影响。Zheng等^[9]研究发现涝渍对小麦光合速率的负面影响超过盐碱, 而Sheng等^[10]则指出盐碱胁迫会导致玉米

和紫花苜蓿叶片加速衰老过程, 抑制光合作用。唐榕^[11]的研究揭示了随着盐碱胁迫程度的加剧, 作物的 P_n 、 C_i 、 T_r 和 G_s 均呈现下降趋势。另一方面, 灌溉对作物叶绿素含量及光合作用具有积极的促进作用。赵辉等^[12]研究发现, 灌溉量的增加能促进拔节后期叶绿素含量的提升。陆文娟^[13]的研究则表明, 玉米生育前期适度缺水后复灌有助于提升叶片的叶绿素含量。此外, 吴鹏等^[14]研究发现, 虽然盐碱胁迫会抑制黄瓜幼苗的呼吸作用, 但外源物质(MT)能够增强光合关键酶的活性, 提高 P_n , 从而减轻胁迫损伤。Yin等^[15]的研究进一步揭示了灌溉对PEPC活性的影响, 盐碱胁迫降低了PEPC相关基因的转录本稳态水平, 而灌溉则能显著提升其活性。因此, 灌水量与作物光合作用及产量密切相关。通过合理的灌溉管理, 不仅可以促进作物SPAD的提升和光合作用的增强, 还能在一定程度上

缓解盐碱胁迫对作物造成的负面影响,最终实现作物产量的提高。张丽娟等^[16]的研究也证实了产量与 P_n 、 T 等光合参数之间的正相关关系,进一步强调了合理灌溉在作物生产中的重要性。目前,关于灌水定额对盐碱地玉米产量形成及光合特性影响方面的研究鲜见报道。本研究以‘先玉1225’为试验材料,运用田间试验、方差分析、相关性分析和主成分综合分析方法分析不同灌水处理下盐碱地玉米的光合特性及产量等指标的变化,旨在探讨灌水定额对盐碱地玉米光合特性及产量形成的影响,以期为宁夏玉米产区优化盐碱地玉米灌溉管理策略提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2023年4—10月在宁夏回族自治区石嘴山市平罗县西大滩试验地(38°84′23.8″N,106°40′33.6″E,海拔1180 m)进行。该地属于中温带干旱气候,日照充足。试验地年均气温8.0~8.3℃,年降雨量为160~190 mm,蒸发量约为893 mm,无霜期约153~170 d(图1)。试验地0—40 cm土壤类型为盐碱土,土壤质地为沙壤土,土壤肥力较低(表1)。

1.2 供试材料

玉米品种为‘先玉1225’(宁审玉20190015),宁夏回族自治区银川市平罗县种子公司提供。氮肥为普滋苗生物刺激素型高氮水溶肥,总养分≥45 g/100 g;磷肥为磷酸二氢铵, $N+P_2O_5+K_2O\geq 73$ g/100 g;钾肥为中化氯化钾, $KCl\geq 62$ g/100 g。

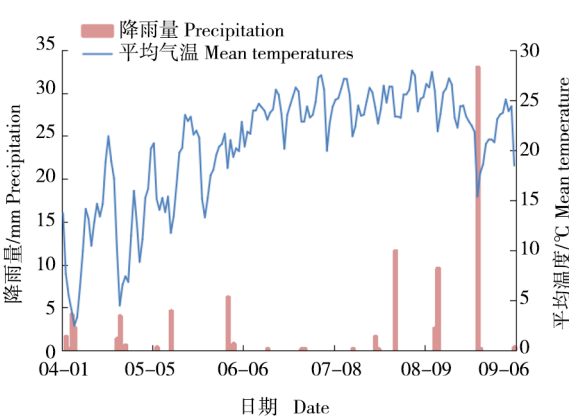


图1 2023年玉米生育期内降雨量和平均气温

Fig. 1 Rainfall and mean temperature during the 2023 maize growth period

1.3 试验设计

试验采用裂区试验设计,设置盐碱程度和灌溉定额2个因素,主区为盐碱程度:中度(S_1)和轻度盐碱(S_2),依据中国土壤学会盐渍土专业委员会的^[17]划分;5100(W_1)、4350(W_2)、3600(W_3)、2850(W_4)、2100 m³/hm²(W_5)灌水定额为副区,每个处理重复3次,共计30个小区,每个小区占地面积66 m²(12.0 m×5.5 m),每个小区之间设置1.0 m的过道,周围布设0.5 m保护行。玉米在2023年4月播种,采用宽窄行种植(窄行40.0 cm、宽行70.0 cm),种植密度90000株/hm²。玉米灌溉方式采用滴灌,玉米灌溉定额结合当地生产灌水经验制定,当地滴灌额度为3600 m³/hm²。具体灌溉方案和施肥方案见表2和表3。

表1 试验区盐碱地(土层0—40 cm)的基本性质

Table 1 The basic properties of the saline-alkali land (soil layer 0 - 40 cm) in the experiment field

盐碱程度 The degree of salinity	土层/cm Soil layer	pH	全盐量/ (g/kg) TDS	有机质/ (g/kg) OM	全氮/ (g/kg) TN	全磷/ (g/kg) TP	碱解氮/ (mg/kg) AN	速效磷/ (mg/kg) AP	速效钾/ (mg/kg) AK	容重/ (mg/cm ³) Capacity
S ₁	0—20	8.92	4.59	12.24	0.79	0.71	57.22	1.33	135.98	1.61
	≥20—40	9.01	3.39	11.93	0.66	0.63	54.31	1.12	126.42	1.65
S ₂	0—20	8.60	2.57	9.76	0.78	0.76	32.65	3.16	71.02	1.61
	≥20—40	8.75	1.36	9.45	0.58	0.76	25.45	3.01	60.68	1.77

注:S₁和S₂分别为中度和轻度盐碱。下同。
Note: S₁ and S₂ are moderate and mild salinity, respectively. The same below.

表 2 不同处理下的春玉米灌水方案

Table 2 Spring corn irrigation program under different treatments

m³/hm²

处理 Treatment	日期 Date											合计 Sum
	04-25	05-20	06-05	06-20	07-05	07-15	07-25	08-07	08-17	08-27	09-07	
T ₁	450	405	600	600	510	510	510	405	405	405	300	5 100
T ₂	450	330	525	525	435	435	435	330	330	330	225	4 350
T ₃	450	255	450	450	360	360	360	255	255	255	150	3 600
T ₄	450	180	375	375	285	285	285	180	180	180	75	2 850
T ₅	450	105	300	300	210	210	210	105	105	105	0	2 100

表 3 施肥方案

Table 3 Fertilization plan

kg/hm²

肥料 Fertilizer	日期 Date							合计 Sum
	04-25	06-05	06-20	07-05	07-15	08-07	08-17	
N	30.0	54.0	54.0	36.0	36.0	45.0	45.0	300
P	15.0	27.0	27.0	18.0	18.0	22.5	22.5	150
K	12.0	21.6	21.6	14.4	14.4	18.0	18.0	120

1.4 测定项目及方法

1.4.1 光合参数

在拔节期、大喇叭口期、开花期、灌浆期分别选取长势均匀的玉米功能叶片进行测定,每个小区随机选择 3 株。选择晴朗、湿度适中的天气,用美国 LI-COR 公司 6 400 便携式光合仪于 9:00—11:00 测定完整无损的玉米功能叶片的 P_n 、 G_s 、 C_i 和 T_r ;使用日本柯尼卡美能达 (Konica Minolta) 公司 SPAD502 便携式叶绿素仪测定叶绿素含量 (SPAD);使用北京索莱宝科技有限公司提供的试剂盒测定 PEPC 和 Rubisco 的活性。

1.4.2 产量及构成因素

玉米于 9 月 21 日收获,按平均穗重从所收果穗中随机选取 10 穗进行室内考种,测量玉米果穗的穗重、穗粒重、百粒重和含水率等。理论产量计算公式为:

理论产量 = 穗粒重 × 公顷穗数 × (1 - 含水率) × 出籽率 / (1 - 14%)

式中:14% 为玉米含水率。

1.5 数据分析

使用 Excel 2016 进行数据整理,采用 Origin 2022 进行单因素方差分析。利用相关分析评估玉米光合参数、光合酶活性及玉米产量之间相关性。采用主成分分析综合评价各处理变化特征。

2 结果与分析

2.1 盐碱及灌溉定额对玉米 SPAD 的影响

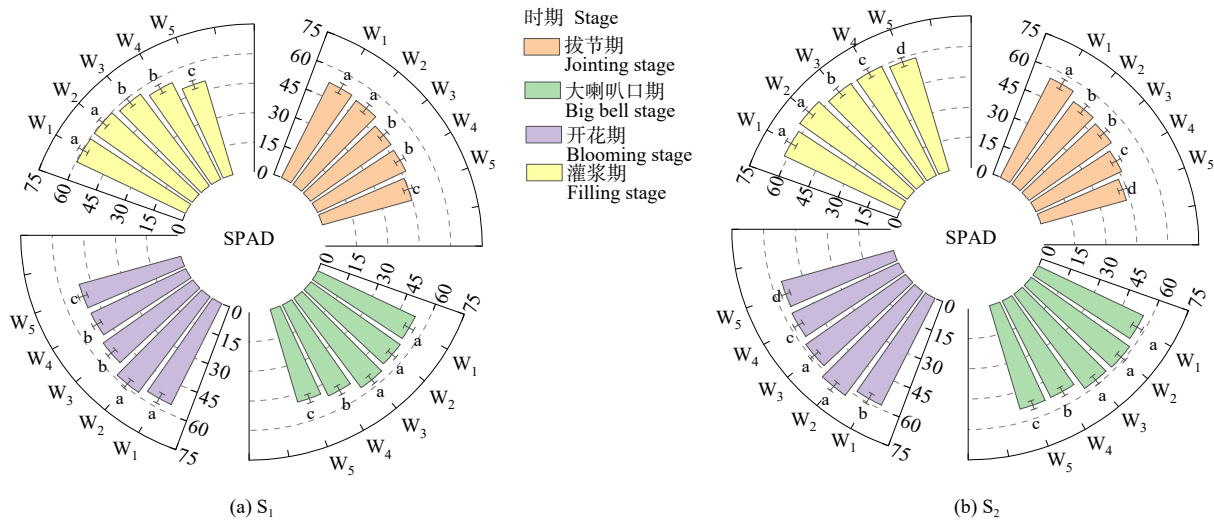
由图 2 可知,在 S_1 和 S_2 中,玉米 T_r 随着生育时期推进均呈增长趋势,至灌浆期达到峰值。拔节期,不同盐碱地的玉米 SPAD 由高到低均为 $W_1 > W_2 > W_3 > W_4 > W_5$ 。大喇叭口期,在 S_1 中, W_3 的玉米 SPAD 最高,较其他灌溉处理分别高出 5.35% (W_2)、3.64% (W_1)、9.09% (W_4) 和 14.59% (W_5);而 S_2 中, W_2 的玉米 SPAD 最高,较其他灌溉处理高出 1.09%~9.64%。开花期,不同盐碱地的玉米 SPAD 均表现为 W_2 显著高于其他灌溉处理 ($P < 0.05$)。在灌浆期, S_1 和 S_2 的玉米 SPAD 由高到低均为 $W_2 > W_1 > W_3 > W_4 > W_5$,说明适宜灌水量可以提升玉米叶片 SPAD。

由表 4 可知,盐碱与灌溉均显著影响玉米各生长期的 SPAD ($P < 0.05$),盐碱与灌溉互作对玉米灌浆期叶片的 SPAD 有极显著的影响 ($P < 0.01$),对大喇叭口期有显著的影响 ($P < 0.05$),对拔节期与开花期的影响不显著。

2.2 盐碱及灌溉定额对玉米光合参数的影响

2.2.1 对玉米 P_n 的影响

由图 3 可知,在 S_1 和 S_2 中,玉米 P_n 随着生育时期推进均呈增长趋势,至灌浆期达到峰值。拔节



W₁、W₂、W₃、W₄、W₅分别为灌溉定额5 100、4 350、3 600、2 850、2 100 m³/hm²。不同小写字母表示同一盐碱程度下不同处理间差异达到显著水平($P<0.05$)。下同。

W₁、W₂、W₃、W₄、W₅ are irrigation quotas of 5 100、4 350、3 600、2 850、2 100 m³/hm², respectively. Different lowercase letters indicate significant ($P<0.05$). The same below.

图2 不同灌水处理下玉米的SPAD

Fig. 2 Maize SPAD under different irrigation treatments

表4 盐碱胁迫和灌水定额对不同时期叶片SPAD影响的方差分析

Table 4 ANOVA on the effects of salinity stress and irrigation quota on leaf SPAD at different stage

变异来源 Source of CV	时期 Stage			
	拔节期 Jointing stage	大喇叭口期 Big bell stage	开花期 Blooming stage	灌浆期 Filling stage
S	ns	**	**	**
W	**	**	**	**
S×W	ns	*	ns	**

注:S,盐碱胁迫;W,灌溉定额。*表示显著相关($P<0.05$);**表示极显著相关($P<0.01$);ns表示不显著。下同。

Note: S, saline-alkali stress; W, irrigation quota. *, significant correlation ($P<0.05$); **, very significant correlation ($P<0.01$); ns, not significant. The same below.

期,S₁的W₂玉米叶片P_n最高,较其他灌溉处理分别高出25.00%(W₁)、9.86%(W₃)、38.00%(W₄)和148.83%(W₅),而S₂的W₂较其他灌溉处理分别高出4.80%(W₁)、15.00%(W₃)、43.00%(W₄)和66.70%(W₅)。在大喇叭口期,S₂和S₁的P_n均表现为W₂高于其他灌溉处理,在S₁中,除W₅灌溉处理外,W₂与其他灌溉处理均无显著差异($P<0.05$),而S₂中W₂除与W₁无显著差异外,与其他灌溉处理差异显著($P<0.05$)。开花期,不同盐碱地的玉米P_n由高到低均为W₁>W₂>W₃>W₄>W₅,W₁均显著高于其他灌溉处理($P<0.05$)。在灌浆期,S₁的

玉米P_n由高到低为W₁>W₂>W₃>W₄>W₅,而S₂的玉米P_n由高到低为W₂>W₁>W₃>W₄>W₅,且W₁与W₂无显著差异($P<0.05$)。

由表5可知,盐碱程度和灌溉定额均显著影响玉米各生长期的P_n($P<0.05$),盐碱与灌溉互作对拔节期P_n有极显著影响($P<0.01$),对大喇叭口期有显著的影响($P<0.05$),而对开花期和灌浆期的影响不显著。

2.2.2 对玉米C_i的影响

由图4可知,在S₁和S₂中,玉米C_i随着生育时期推进均呈增长趋势,至灌浆期达到峰值。玉米

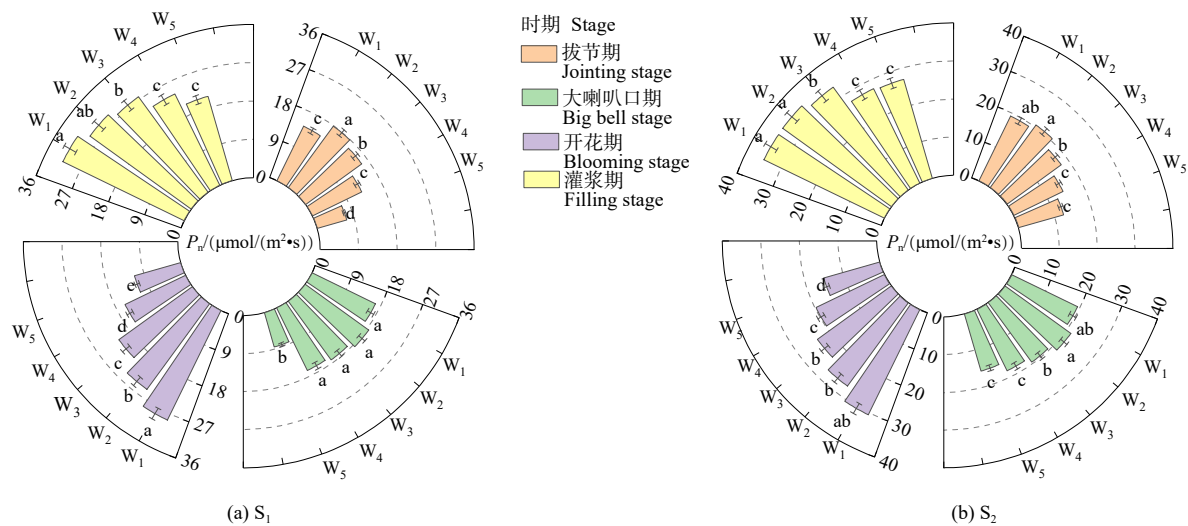


图 3 不同灌水处理下玉米的 P_n
Fig. 3 Maize P_n under different irrigation treatments

表 5 盐碱胁迫和灌水定额对不同时期叶片 P_n 影响的方差分析

变异来源 Source of CV	时期 Stage			
	拔节期 Jointing stage	大喇叭口期 Big bell stage	开花期 Blooming stage	灌浆期 Filling stage
S	**	**	**	**
W	**	**	**	**
S×W	**	*	ns	ns

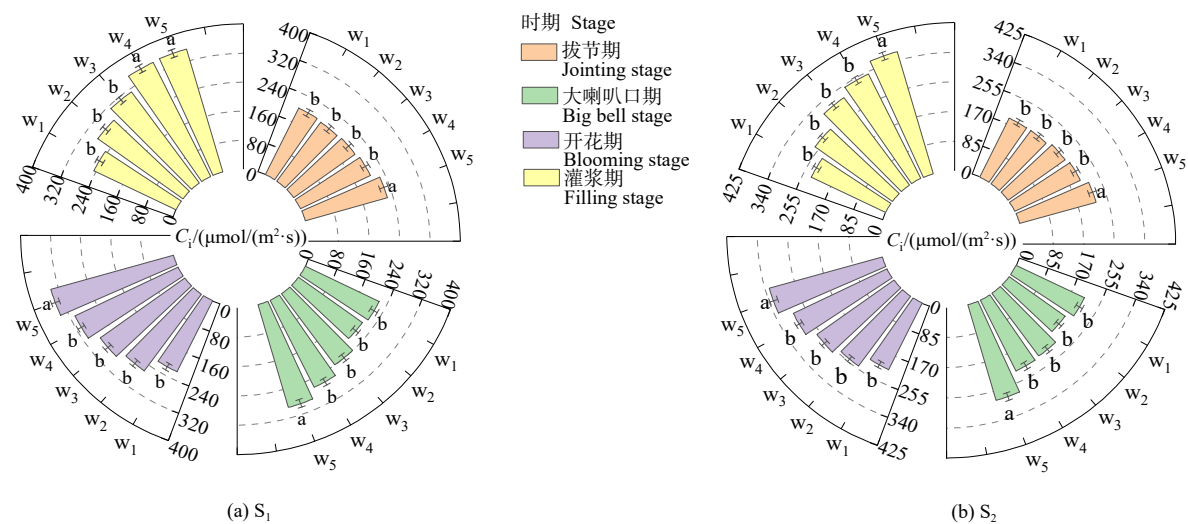


图 4 不同灌水处理下玉米的 C_i
Fig. 4 Maize C_i under different irrigation treatments

拔节期和大喇叭口期, S_2 和 S_1 的玉米叶片 C_i 均表现为 W_5 显著高于其他灌溉处理 ($P < 0.05$)。开花期, S_1 与 S_2 的玉米叶片 C_i 由高到低均为 $W_5 > W_4 >$

$W_3 > W_2 > W_1$, S_1 的 W_5 玉米叶片 C_i 较其他灌溉处理高出 9.97%~38.91%, 而 S_2 的 W_5 较其他灌溉处理高出 26.01%~47.89%。灌浆期, S_1 与 S_2 的玉米

叶片 C_i 均表现为 W_5 显著低于其他灌溉处理 ($P<0.05$)。

由表 6 可知,盐碱和灌溉定额均显著影响玉米

各生长期的 C_i ($P<0.05$),盐碱与灌溉互作对灌浆期 C_i 有显著影响 ($P<0.05$),对拔节期、大喇叭口期和开花期的影响不显著。

表 6 盐碱胁迫和灌水定额对不同时期叶片 C_i 影响的方差分析

Table 6 ANOVA on the effects of salinity stress and irrigation quota on leaf C_i at different stage

变异来源 Source of CV	时期 Stage			
	拔节期 Jointing stage	大喇叭口期 Big bell stage	开花期 Blooming stage	灌浆期 Filling stage
S	ns	**	**	*
W	**	**	**	**
S×W	ns	ns	ns	*

2.2.3 对玉米 G_s 的影响

由图 5 可知,在 S_1 和 S_2 中,玉米 G_s 随着生育时期推进均呈增长趋势,至灌浆期达到峰值。拔节期,不同盐碱地的玉米叶片 G_s 由高到低均为 $W_1>W_2>W_3>W_4>W_5$,在 S_1 中, W_1 显著高于其他灌溉处理 ($P<0.05$);而 S_2 的 W_1 除与 W_2 之间无显著差异外,均显著高于其他处理 ($P<0.05$)。大喇叭口

期, S_1 的 W_1 玉米叶片 G_s 最高,较其他灌溉处理分别高出 15.96% (W_2)、16.35% (W_3)、41.78% (W_4) 和 152.68% (W_5) ($P<0.05$);而 S_2 的 W_2 玉米 G_s 较其他灌溉处理分别高出 12.31% (W_1)、12.85% (W_3)、43.09% (W_4) 和 120.60% (W_5)。开花期和灌浆期, S_1 和 S_2 的玉米 G_s 由高到低均为 $W_1>W_2>W_3>W_4>W_5$,且 W_1 均显著高于其他处理 ($P<0.05$)。

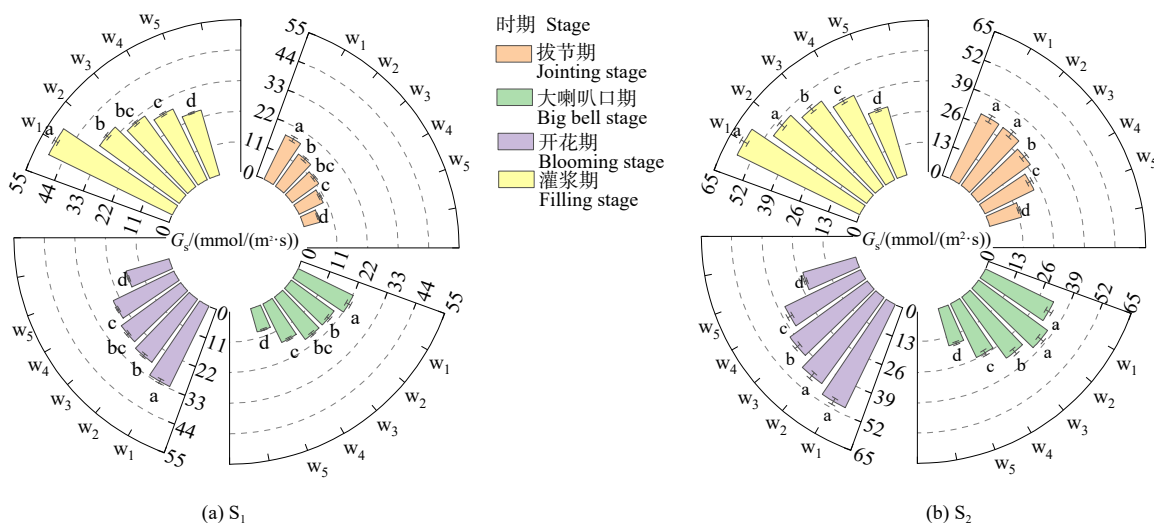


图 5 不同灌水处理下玉米的 G_s
Fig. 5 Maize G_s under different irrigation treatments

由表 7 可知,盐碱和灌溉定额均极显著影响玉米各生长期 G_s ($P<0.01$),盐碱与灌溉互作对拔节期、大喇叭口期和开花期 G_s 有极显著影响,对灌浆期有显著影响 ($P<0.05$)。

2.2.4 对玉米 T_r 的影响

由图 6 可知,在 S_1 和 S_2 中,玉米 T_r 随着生育时期推

进均呈增长趋势,至灌浆期达到峰值。拔节期, S_1 的玉米 T_r 由高到低为 $W_2>W_1>W_3>W_4>W_5$, W_2 较其他灌溉处理分别高出 7.50% (W_1)、18.75% (W_3)、20.00% (W_4) 和 56.16% (W_5); S_2 的玉米 T_r 由高到低为 $W_3>W_2>W_1>W_4>W_5$, W_3 较其他灌溉处理分别高出 8.90% (W_1)、1.40% (W_2)、20.77% (W_4) 和 41.89% (W_5)。大

表 7 盐碱胁迫和灌水定额对不同时期叶片 G_s 影响的方差分析

Table 7 ANOVA on the effects of salinity stress and irrigation quota on leaf G_s at different stage

变异来源 Source of CV	时期 Stage			
	拔节期 Jointing stage	大喇叭口期 Big bell stage	开花期 Blooming stage	灌浆期 Filling stage
S	**	**	**	**
W	**	**	**	**
S×W	**	**	**	*

喇叭口期、开花期和灌浆期,不同盐碱地的玉米 T_r 随灌水量递减均呈下降趋势,由高到低均为 $W_1>W_2>W_3>W_4>W_5$ 。灌浆期, S_1 的 W_1 较其他灌溉处理分别高出

4.26%(W_2)、16.67%(W_3)、20.99%(W_4)和38.03%(W_5), S_2 的 W_1 较其他灌溉处理分别高出9.49%(W_2)、32.54%(W_3)、44.27%(W_4)和74.21%(W_5)。

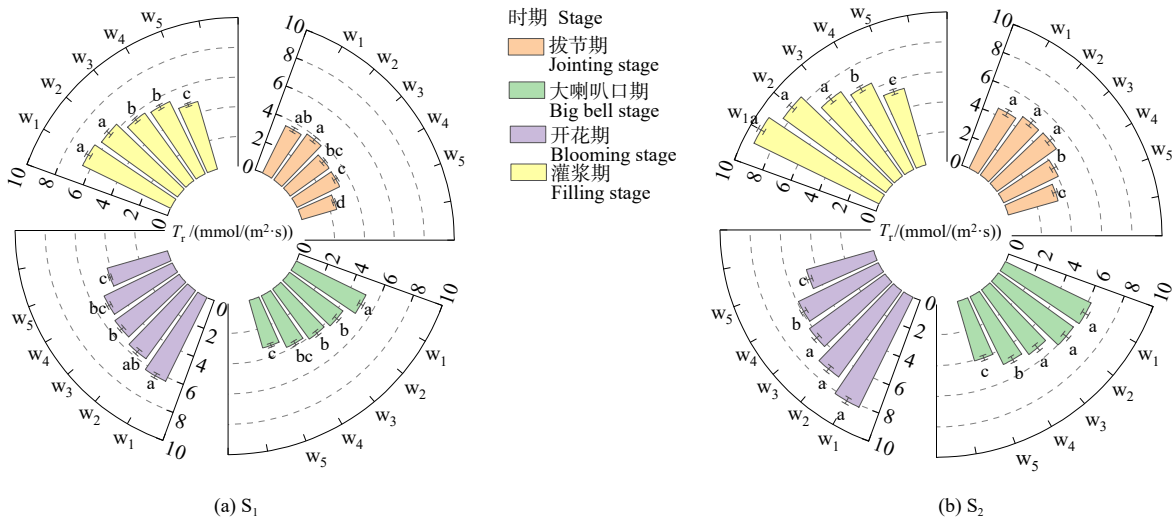


图 6 不同灌水处理下玉米的 T_r

Fig. 6 Maize T_r under different irrigation treatments

由表 8 可知,盐碱和灌溉定额均极显著影响玉米各生长期 T_r ($P<0.01$),盐碱与灌溉互作对拔节

期、大喇叭口期和开花期 T_r 有极显著影响 ($P<0.01$),对灌浆期有显著影响 ($P<0.05$)。

表 8 盐碱胁迫和灌水定额对不同时期叶片 T_r 影响的方差分析

Table 8 ANOVA on the effects of salinity stress and irrigation quota on leaf T_r at different stage

变异来源 Source of CV	时期 Stage			
	拔节期 Jointing stage	大喇叭口期 Big bell stage	开花期 Blooming stage	灌浆期 Filling stage
S	**	**	**	**
W	**	**	**	**
S×W	**	**	**	*

2.3 盐碱及灌溉定额对玉米光合酶的影响

由图 7 可知, S_2 的叶片 PEPC 和 Rubisco 活性均显著高于 S_1 ($P<0.05$)。开花期,不同盐碱条件的

PEPC 和 Rubisco 活性均表现为 W_2 最优。 S_1 的 W_2 玉米叶片 PEPC 活性较其他灌溉处理分别高出 10.84%(W_3)、22.67%(W_1)、31.43%(W_4)和

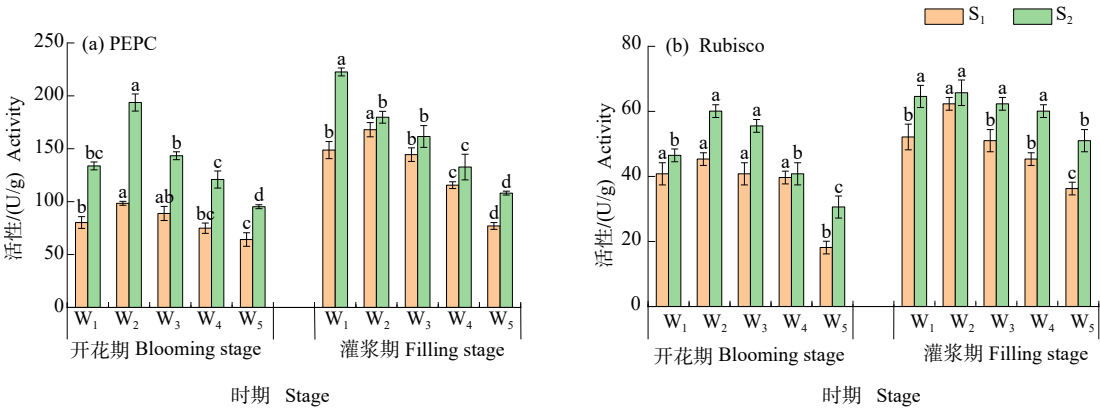


图7 不同灌水处理的玉米光合酶变化

Fig. 7 Changes in photosynthetic enzymes in maize with different irrigation treatments

53.33%(W₅),而S₁中W₂除与W₅无显著差异外,与其他灌溉处理差异均达显著水平($P<0.05$);S₂中W₂玉米Rubisco活性较其他灌溉处理分别高出44.8%(W₁)、35.07%(W₃)、60.18%(W₄)和103.37%(W₅)。在灌浆期,S₁的玉米PEPC和Rubisco活性均表现为W₂最高,分别较其他灌溉处理高出12.95%~118.06%和19.57%~71.87%;而S₂玉米PEPC和Rubisco活性也表现为W₂最优,

分别较其他灌溉处理高出23.81%~105.94%和1.75%~28.89%。

由表9可知,盐碱和灌溉均极显著影响玉米开花期和灌浆期的PEPC和Rubisco活性($P<0.01$)。盐碱和灌溉互作对这2个时期的PEPC活性有极显著影响($P<0.01$),二因素互作对Rubisco活性在开花期有极显著影响($P<0.01$),灌浆期有显著影响($P<0.05$)。

表9 盐碱胁迫和灌水定额对叶片PEPC活性和Rubisco活性影响的方差分析

Table 9 ANOVA on the effects of salinity stress and irrigation quota on leaf PEPC activity and Rubisco activity			
指标 Index	变异来源 Source	开花期 Blooming stage	灌浆期 Filling stage
PEPC 活性 PEPC activity	S	**	**
	W	**	**
	S×W	**	**
Rubisco 活性 Rubisco activity	S	**	**
	W	**	**
	S×W	**	*

2.4 盐碱及灌溉定额对玉米产量及回归模拟曲线的影响

2.4.1 对玉米产量的影响

由图8可知,S₂中各灌溉处理的玉米产量均显著高于S₁($P<0.05$)。S₂中W₂的玉米产量表现最优,W₂较其他灌溉处理分别高出4.20%(W₁)、8.64%(W₃)、10.69%(W₄)和31.34%(W₅);而S₁中玉米产量最优的是W₁,W₁较其他灌溉处理分别高出5.45%(W₂)、26.09%(W₃)、43.21%(W₄)和

46.84%(W₅)。

2.4.2 对玉米产量回归模拟曲线的影响

由图9可知,通过对不同盐碱条件下产量与灌水量进行回归拟合方程发现,S₁的灌水量对玉米产量影响呈S形曲线关系,S₂的灌水量对玉米产量影响呈二次函数关系。S₁的玉米产量增产幅度随灌水量的增加呈增加的趋势;继续增加灌水定额,W₂的产量增加幅度下降;拟合结果显示,W₁玉米产量最高,因此,W₁为适宜的灌溉定额。S₂的玉米产量随

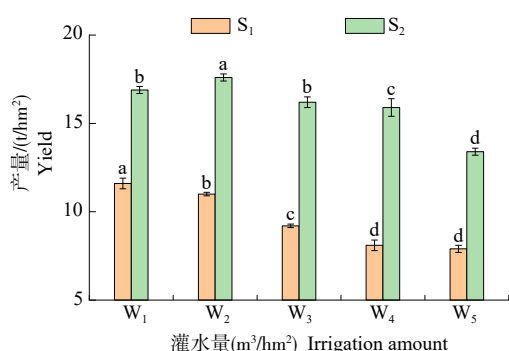


图8 不同灌水处理下玉米的产量

Fig. 8 Maize yield under different irrigation treatments

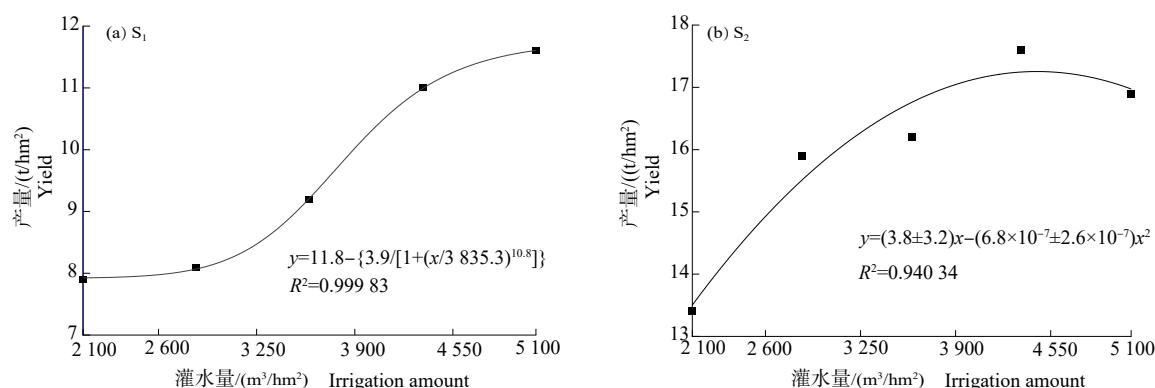


图9 不同灌水处理与玉米产量的回归模拟曲线

Fig. 9 Regression simulation curves between different irrigation treatments and maize yield

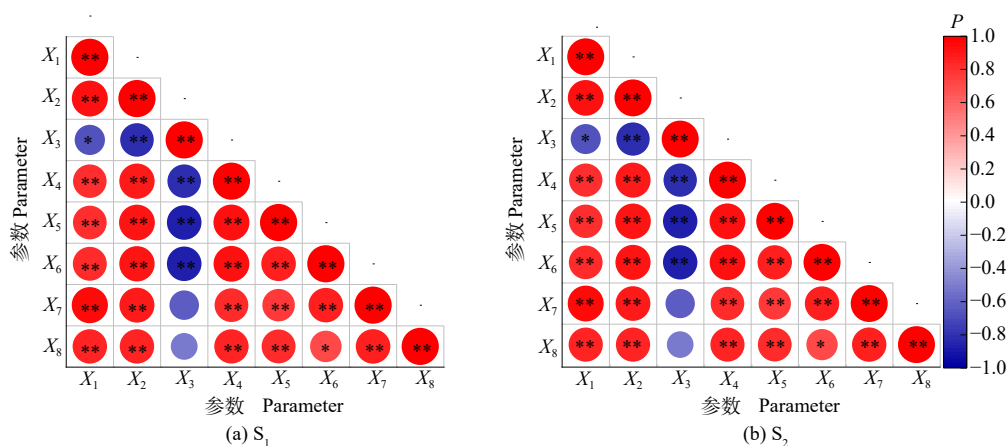


图10 玉米光合特性与产量的相关性分析

Fig. 10 Correlation analysis between photosynthetic characteristics and yield in maize

X_1 , SPAD; X_2 , P_n ; X_3 , C_i ; X_4 , G_s ; X_5 , T_r ; X_6 , PEPC; X_7 , Rubisco; X_8 , 产量。*和**分别表示在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平显著相关。
 X_1 , SPAD; X_2 , P_n ; X_3 , C_i ; X_4 , G_s ; X_5 , T_r ; X_6 , PEPC; X_7 , Rubisco, X_8 , Yield. * and ** were significantly correlated at $P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively.

2.6 玉米光合特性的主成分分析对产量的贡献率

由图11可知,对玉米光合参数与产量进行主成分分析,将互相关联的8个单项指标进行降维,获得2个相互独立的综合指标。本试验所提取的

灌水量的增加呈先升后降的趋势;拟合结果显示, W_2 玉米产量最高,且显著高于 W_1 ($P < 0.05$),因此 W_2 为适宜的灌溉定额。

2.5 光合特性及玉米产量的相关性分析

由图10可知,不同盐碱条件下,玉米光合特性与产量显著相关。在不同盐碱条件下,产量与 SPAD、 P_n 、 G_s 、 T_r 和 Rubisco 均呈极显著正相关 ($P < 0.01$),与 PEPC 呈显著相关 ($P < 0.05$),但均与 C_i 呈负相关。因此, S_1 和 S_2 的玉米产量均与其光合指标紧密相关,且这种关系表现为显著的正相关或负相关。

主成分最大特征值为1,由此得到2个主成分, S_1 的第一主成分 (PC_1) 对玉米产量的贡献率为 84.9%,第二主成分 (PC_2) 对玉米产量的贡献率则为 9.1%,累计方差贡献率达到 94.0%。 S_2 的 PC_1

对玉米产量贡献率为84.7%, PC_2 对玉米产量贡献率则为7.5%, 累计方差贡献率达到92.2%。主成分分析结果显示, S_1 的 W_1 、 W_2 、 W_3 、 W_4 、 W_5 处理的综合得分分别为2.35、3.49、0.49、-1.64、

-4.70, 而 S_2 的 W_1 、 W_2 、 W_3 、 W_4 、 W_5 处理的综合得分分别为2.09、3.17、1.07、-1.32、-5.01。 S_1 和 S_2 中表现最优的均为 W_2 。可见, 灌水量 $4\ 350\ m^3/hm^2$ 可实现宁夏玉米高产。

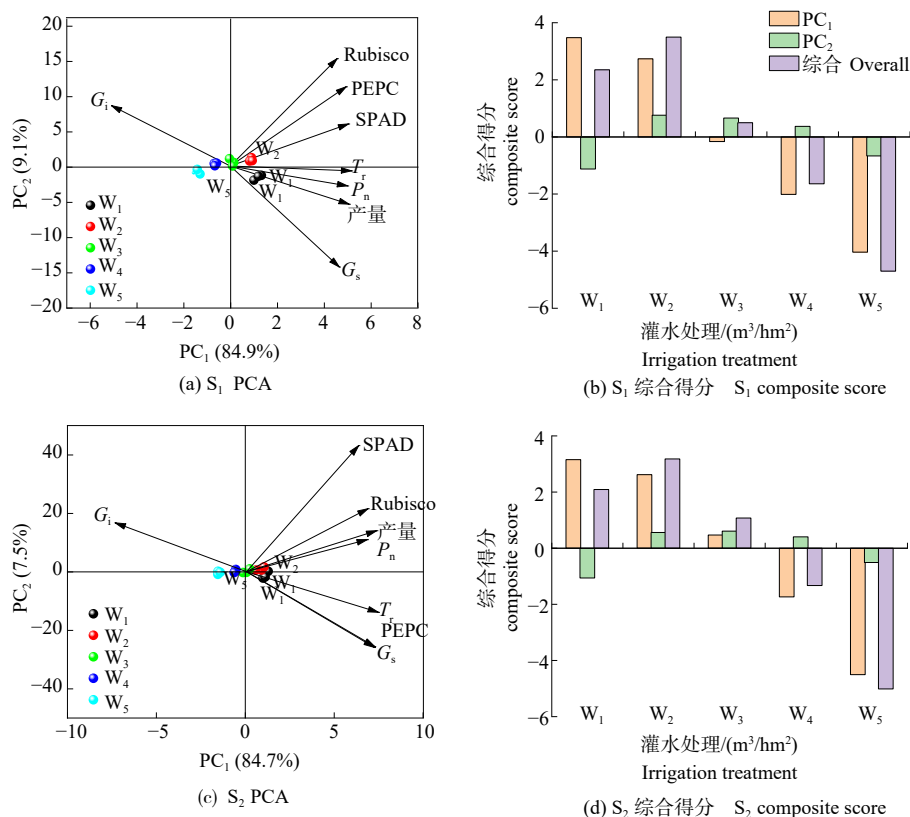


图 11 玉米光合特性与产量的主成分分析

Fig. 11 Principal component analysis of photosynthetic characteristics and yield in maize

3 讨论

3.1 盐碱及灌溉定额对玉米 SPAD 的影响

叶片 SPAD 是反映叶片叶绿素含量的重要指数, 其含量的高低可以反映植株生长状况和叶片光合作用强弱^[18]。本试验结果表明, 中度与轻度盐碱条件下, 玉米 SPAD 均在灌溉定额 $4\ 350\ m^3/hm^2$ (W_2) 下达到最大值, 分别为 59.47 和 63.40, 与唐光木等^[19]研究结果不同。这可能与研究区的土壤种类^[20]和耕作方式^[21]不同有关。在盐碱地种植玉米时, 应根据土壤盐分状况和玉米生长需求制定合理的灌溉制度, 通过增加灌溉量来稀释土壤盐分、改善土壤水分状况和调节植物体内离子平衡等措施来提高玉米的叶绿素含量和光合性能^[22]。

3.2 盐碱及灌溉定额对玉米光合参数的影响

盐碱胁迫抑制玉米光合作用, 而适量的灌溉可缓解盐胁迫的负面影响^[23]。光合作用是评价植物耐盐碱胁迫能力的重要生理指标^[24]。本试验结果表明, 不同盐碱程度下, 玉米 T_r 和 G_s 均随着灌水量的增加而增加, 这与张能艳等^[25]研究结果一致, W_2 的玉米叶片 P_n 表现最佳, 灌溉定额 $2\ 100\ m^3/hm^2$ (W_5) 的最低, 这可能是由于水分胁迫导致气孔导度受限^[26], 导致 P_n 降低。本试验发现, 不同盐碱地的 W_5 玉米叶片 C_i 均显著高于其他处理 ($P < 0.05$), 与孟天天等^[27]研究结果不同; 可能盐碱胁迫导致玉米发生水分胁迫, 而水分胁迫使玉米叶绿体基质体积减小、气孔关闭, 使 CO_2 的光合碳同化受到抑制, 进而对玉米的光合作用造成影响^[28-29]。Wang 等^[30]研究发现, 合理灌水会提高叶片的 SPAD, 促进气孔开

放,使叶肉细胞光合作用增强,从而提高了作物光合速率,优化了作物水分利用效率,最终实现作物高产的目的^[31]。科学合理的管理灌溉定额可以在一定程度上缓解盐胁迫对玉米光合作用的负面影响,并提高玉米的产量和品质^[32]。

3.3 盐碱及灌溉定额对玉米光合酶的影响

适宜的滴灌有助于减少盐碱胁迫对玉米叶片 Rubisco 活性的伤害^[33]。本试验结果表明, S_1 的玉米 Rubisco 活性较 S_2 降低 5.17%~28.89% (图 7),与吴鹏等^[14]的研究结果一致; S_2 的玉米 PEPC 的活性较 S_1 升高 7.01%~49.64% (图 7),与 Champigny 等^[34]的研究结果一致。盐碱胁迫下,硝酸盐还原引发细胞质 pH 的升高,进而激活 PEPC 活性及促进有机酸合成^[35],以中和碱性离子,为维持 pH 稳态,缓解胁迫^[36]。

3.4 盐碱及灌溉定额对玉米产量的影响

合理的灌溉可以缓解盐碱胁迫对玉米产量的负面影响^[37]。王海瑞等^[4]研究发现,玉米全生育期耗水递增,拔节至抽雄期耗水激增,抽雄和灌浆期耗水占比 $\geq 65\%$ 。陈静静等^[38]研究表明,拔节期和抽穗期灌溉利于维持产量及提高水分利用效率。本研究中, S_2 的 W_2 玉米产量最高;而 S_1 中 W_1 玉米产量最高。不同盐碱胁迫下, W_2 的综合评价得分均为最优,这是由于 W_2 可显著增强玉米光合性能,提升水分利用效率,有利于实现高产。综合来看, W_2 可实现玉米高产和高效节水。今后应进一步开展灌溉定额下土壤盐分运移规律,研发更具针对性的灌溉管理方案,以实现精细化、高效化的农田水资源管理。

4 结 论

在轻度和中度盐碱条件下,灌溉定额为 $4\ 350\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ (W_2) 均能显著提升玉米叶片的 SPAD、 P_n 、 T_r 及 G_s ,同时降低 C_i ,来缓解盐碱胁迫对光合作用的抑制;此外, W_2 灌溉定额能够提高 Rubisco 和 PEPC 的活性,促进碳同化过程,最终实现玉米产量提升。综合分析表明,玉米产量与 SPAD、 P_n 、 T_r 、 G_s 及 Rubisco 的活性均呈极显著正相关 ($P<0.01$),与 PEPC 活性呈显著正相关 ($P<0.05$),与 C_i 呈负相关。在不同盐碱条件下, W_2 均表现出最优的综合评价得分。因此,宁夏玉米产区盐碱地最佳灌水量为 $4\ 350\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ 。

参考文献 Reference

- [1] 刘福荣,李林燕. 宁夏银北灌区耕地土壤盐渍化现状及治理对策[J]. 宁夏农林科技, 2008, 49(2): 63-64, 66
Liu F R, Li L Y. Salinization of arable soil in Yinbei irrigation area of Ningxia and countermeasures for its management[J]. *Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology*, 2008, 49(2): 63-64, 66 (in Chinese)
- [2] 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[J]. 西南农业学报, 2022, 35(5): 1063-1068
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 [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2022, 35(5): 1063-1068 (in Chinese)
- [3] Grzesiak S, Hura T, Grzesiak M T, Pieńkowski S. The impact of limited soil moisture and waterlogging stress conditions on morphological and anatomical root traits in maize (*Zea mays* L.) hybrids of different drought tolerance[J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 1999, 21(3): 305-315
- [4] 王海瑞,吕志远,汤鹏程,苗澍,郭克贞,任杰. 喷灌条件下不同灌溉施肥对玉米耗水和产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(3): 72-77, 107
Wang H R, Lv Z Y, Tang P C, Miao S, Guo K Z, Ren J. Effect of different irrigation and fertilization on water consumption and yield of corn under the condition of sprinkler irrigation[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2016, 34(3): 72-77, 107 (in Chinese)
- [5] 张忠学,张世伟,郭丹丹,谭智湘,陈选,梁乾平. 玉米不同水肥条件的耦合效应分析与水肥配施方案寻优[J]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 206-214
Zhang Z X, Zhang S W, Guo D D, Tan Z X, Chen X, Liang Q P. Coupling effects of different water and fertilizer conditions and optimization of water and fertilizer schemes on maize[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(9): 206-214 (in Chinese)
- [6] 张波,吕廷波,赵秀杰,王东旺,徐强,邢猛,周小杰. 不同灌溉定额对滴灌骏枣生长的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(6): 168-174, 182
Zhang B, Lv T B, Zhao X J, Wang D W, Xu Q, Xing M, Zhou X J. Effects of different irrigation quotas on the growth of red jujube under drip irrigation[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(6): 168-174, 182 (in Chinese)
- [7] 隋凯强,赵龙刚,刘树堂,皇甫呈惠,林少雯,陈晶培. 水肥耦合对夏玉米根系形态及产量的影响[J]. 华北农学报, 2018, 33(4): 232-238
Sui K Q, Zhao L G, Liu S T, Huangfu C H, Lin S W, Chen J P. Effects of coupling water and fertilizer on root morphology and yield of summer maize[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2018, 33(4): 232-238 (in Chinese)
- [8] 李建国,潘铜华,王玲慧,杜清浩,常毅博,张大龙,刘媛. 水肥耦合对番茄光合、产量及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(10): 82-90
Li J M, Pan T H, Wang L H, Du Q J, Chang Y B, Zhang D L, Liu Y. Effects of water-fertilizer coupling on tomato photosynthesis, yield and water use efficiency [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(10): 82-90 (in Chinese)
- [9] Zheng C F, Jiang D, Liu F L, Dai T B, Jing Q, Cao W X. Effects of salt and waterlogging stresses and their combination on leaf photosynthesis, chloroplast ATP synthesis, and antioxidant capacity in wheat [J]. *Plant*

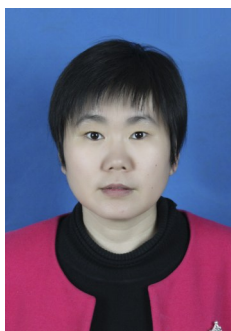
- Science*, 2009, 176(4): 575-582
- [10] Sheng M, Tang M, Chen H, Yang B W, Zhang F F, Huang Y H. Influence of arbuscular mycorrhizae on photosynthesis and water status of maize plants under salt stress[J]. *Mycorrhiza*, 2008, 18(6/7):287-296
- [11] 唐榕. 油莎豆种子萌发和植株生长对盐碱胁迫的响应[D]. 石河子: 石河子大学, 2022
- Tang R. Response of seed germination and plant growth to saline alkali stress of *Cyperus esculent* L [D]. Shihezi: Shihezi University, 2022 (in Chinese)
- [12] 赵辉, 庞桂斌, 丛鑫, 薛建文, 张立志, 宋立庆, 董文旭, 徐征和. 不同灌溉定额下施加生物炭对夏玉米光合特性及产量的影响[J]. 节水灌溉, 2022(8):16-23
- Zhao H, Pang G B, Cong X, Xue J W, Zhang L Z, Song L Q, Dong W X, Xu Z H. Effects of biochar application on photosynthetic characteristics and yield of summer maize under different irrigation rates [J]. *Water Saving Irrigation*, 2022, (8): 16-23 (in Chinese)
- [13] 陆文娟, 李伏生, 农梦玲. 不同水肥条件下分根区交替灌溉对玉米生理特性和水分利用的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(18):5257-5265
- Lu W J, Li F S, Nong M L. Effects of alternate partial root-zone irrigation on physiological characteristics and water use of maize under different water and fertilizer conditions[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(18):5257-5265 (in Chinese)
- [14] 吴鹏, 吕剑, 郁继华, 刘娜, 李金武, 金莉, 金宁, 王舒亚. 褪黑素对盐碱复合胁迫下黄瓜幼苗光合特性和渗透调节物质含量的影响[J]. 应用生态学报, 2022, 33(7):1901-1910
- Wu P, Lv J, Yu J H, Liu N, Li J W, Jin L, Jin N, Wang S Y. Effects of melatonin on photosynthetic properties and osmoregulatory substance contents of cucumber seed-lings under salt-alkali stress [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(7):1901-1910 (in Chinese)
- [15] Yin X M, Liang X, Zhang R, Ling Yu L, Xu G H, Zhou Q S, Zhan X H. Impact of phenanthrene exposure on activities of nitrate reductase, phosphoenolpyruvate carboxylase, vacuolar H^+ -pyrophosphatase and plasma membrane H^+ -ATPase in roots of soybean, wheat and carrot[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2015, 113, 59-66
- [16] 张丽娟, 杨升辉, 杨恒山, 张瑞富, 毕文波, 高强. 高产栽培下氮肥运筹对春玉米光合特性的影响[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(5):2598-2601
- Zhang L J, Yang S H, Yang H S, Zhang R F, Bi W B, Gao Q. Effects of nitrogen fertilizer application schemes on spring maize (*Zea mays* L) photosynthetic characteristics under hyper-yield cultivation [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2012, 40(5):2598-2601 (in Chinese)
- [17] 中国土壤学会盐渍土专业委员会. 中国盐渍土分类分级文集[C]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1989:181-182
- Soil Society of China Saline Soil Specialized Committee. Anthology of classification and grading of saline soils in china [C]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press. 1989:181-182 (in Chinese)
- [18] 王鹏. 土壤干湿交替对桑树幼苗生理及生长的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2013
- Wang P. Effect of different drying-wetting cycles on mulberry seedling growth and physiology[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2013 (in Chinese)
- [19] 唐光木, 何红, 杨金钰, 徐万里. 灌溉定额对膜下滴灌玉米生理性状及产量的影响[J]. 水土保持研究, 2014, 21(3):293-297
- Tang G M, He H, Yang J Y, Xu W L. Effect of irrigation quota on physiological characteristic and yield in drip irrigation under mulch of maize[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014, 21(3): 293-297 (in Chinese)
- [20] 贾壮壮, 谭亚男, 管孝艳, 王忠静, 陶园. 宁夏盐碱地成因及分区治理措施综述[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(5): 122-134
- Jia Z Z, Tan Y N, Guan X Y, Wang Z J, Tao Y. Saline-alkali soil formation and its remediation strategies in different regions of Ningxia: A comprehensive review[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2023, 42(5): 122-134(in Chinese)
- [21] 王建鹏. 不同耕作方式和灌水量对宁夏引黄灌区盐碱土水盐变化及玉米生长的影响[D]. 银川: 宁夏大学, 2023
- Wang J P. Effects of diferent tillage methods and irrigation amount onwater and salt changes of saline alkali soil and maize growthin yellow river irrigation area of Ningxia[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2023 (in Chinese)
- [22] 麻莹, 郭立泉, 唐燕, 刘卫红. 盐碱胁迫下药用植物碱地肤渗透调节与离子平衡机制特点[J]. 吉林工商学院学报, 2010, 26(5):55-58, 61
- Ma Y, Guo L Q, Tang Y, Liu W H. Characterization of osmotic adjustment and ionic balance mechanism of medicinal plant alkali berry under saline stress [J]. *Journal of Jilin Business and Technology College*, 2010, 26(5):55-58, 61 (in Chinese)
- [23] 李文阳, 胡秀娟, 王长进, 韩坤龙. 盐胁迫对不同品种玉米苗期生长与叶片光合特性的影响[J]. 生态科学, 2019, 38(2): 51-55
- LI W Y, Hu X J, Wang C J, Han K L. Effect of salt stress on photosynthetic characteristics of leaves in the seedling stage of different maize cultivars[J]. *Ecological Science*, 2019, 38(2): 51-55 (in Chinese)
- [24] 梁培鑫, 唐榕, 刘建国. 混合盐碱胁迫对油莎豆光合生理及产量的影响[J]. 中国农业科技导报, 2023, 25(12):195-204
- Liang P X, Tang R, Liu J G. Effects of mixed saline-alkali stress on photosynthetic physiology and yield in *Cyperus esculentus* L [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2023, 25(12): 195-204 (in Chinese)
- [25] 张能艳. 灌浆期不同灌水量和遮荫水平对夏玉米生理特性及产量的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2023
- Zhang N Y. Effects of different watering and shading levels on physiological characteristics and yield of summer maize at grain filling stage [D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2023 (in Chinese)
- [26] Vitale L, Di Tommasi P, Arena C, Fierro A, Virzo De Santo A. Effects of water stress on gas exchange of field grown *Zea mays* L in Southern Italy: An analysis at canopy and leaf level [J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2007, 29(4):317-326
- [27] 孟天天, 杜香玉, 张向前, 陈丽荣, 路战远, 兰慧青, 刘雅杰, 武迪. 灌水量对玉米大喇叭口期光合日变化及干物质积累的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(S2):9-16
- Meng T T, Du X Y, Zhang X Q, Chen L R, Lu Z Y, Lan H Q, Liu Y J, Wu D. Effect of irrigation amount on the diurnal changes of photosynthesis and dry matter accumulation of maize in the horn mouth stage [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2022, 41(S2): 9-16 (in Chinese)
- [28] 束胜, 郭世荣, 孙锦, 袁颖辉, 袁凌云. 盐胁迫下植物光合作用的研究进展[J]. 中国蔬菜, 2012, (18):53-61
- Shu S, Guo S R, Sun J, Yuan Y H, Yuan L Y. Research progress on photosynthesis under salt stress[J]. *China Vegetable*, 2012, (18): 53-61 (in Chinese)
- [29] 徐大全. 光合作用测定及研究中一些值得注意的问题[J]. 植物生理学通讯, 2006, 426:1163-1167
- Xu D Q. Some noteworthy problems in measurement and investigation of photosynthesis [J]. *Plant Physiology Journal*, 2006, 426: 1163-1167 (in

- Chinese)
- [30] Wang L Ren B Z, Zhao B, Liu P, Zhang J W. Comparative yield and photosynthetic characteristics of two corn hybrids differing in maturity under different irrigation treatments [J]. *Agriculture*, 2022, 12 (3): 365-365
- [31] 闫建文, 史海滨, 李仙岳, 田德龙, 李祯, 周俊. 轻度盐渍化土壤水氮对玉米光合特性及产量的影响[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(3): 277-284, 289
Yan J W, Shi H B, Li X Y, Tian D L, Li Z, Zhou J. Effects of water and nitrogen conditions on the photosynthetic characteristics and yield of maize in slightly salted soil [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(3): 277-284, 289 (in Chinese)
- [32] 苏东涛, 党德宣, 薄晓峰, 王静, 傅君. 盐胁迫对玉米的影响及抗逆栽培[J]. *天津农业科学*, 2014, 20 (9): 14-18
Su D T, Dang D X, Bo X F, Wang J, Fu J. Effects of salt stress on maize and adverse-resistant cultivation [J]. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2014, 20 (9): 14-18 (in Chinese)
- [33] 徐晨, 李前, 于江, 赵洪祥, 闫伟平, 孙宁, 张治安, 张丽华, 边少锋. 不同滴灌模式对玉米生理特性的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2023, 46 (3): 438-446
Xu C, Li Q, Yu J, Zhao H X, Yan W P, Sun N, Zhang Z A, Zhang L H, Bian S F. Effects of different drip irrigation patterns on physiological characteristics of maize [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2023, 46 (3): 438-446 (in Chinese)
- [34] Champigny M L, Foyer C. Nitrate Activation of cytosolic protein kinases diverts photosynthetic carbon from sucrose to amino acid biosynthesis: Basis for a new concept [J]. *Plant Physiology*, 1992, 100(1): 7-12
- [35] 贾宏昉, 张洪映, 刘维智, 崔红, 刘国顺. 高等植物硝酸盐转运蛋白的功能及其调控机制[J]. *生物技术通报*, 2014 (6): 14-21
Jia H F, Zhang H Y, Liu W Z, Cui H, Liu G S. Function and regulation mechanisms of nitrate transporters in higher plants [J]. *Biotechnology Bulletin*, 2014(6): 14-21 (in Chinese)
- [36] 杨涓, 许兴. 盐胁迫下植物有机渗透调节物质积累的研究进展[J]. *宁夏农学院学报*, 2003, 24(4): 86-91
Yang J, Xu X. Progress of research on accumulation of osmotic substance under salt-stress in plants [J]. *Journal of Ningxia Agricultural College*, 2003, 24(4): 86-91 (in Chinese)
- [37] 袁成福, 冯绍元, 霍再林. 咸水灌溉对土壤水盐分布及制种玉米产量的影响[J]. *中国农村水利水电*, 2016 (7): 1-5, 10
Yuan C F, Feng S Y, Huo Z L. Effect of Saline Water irrigation on the soil water-salt distribution and seed maize yield [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2016(7): 1-5, 10 (in Chinese)
- [38] 陈静静, 张富仓, 周罕觅, 赵永刚, 魏新光. 不同生育期灌水和施氮对夏玉米生长、产量和水分利用效率的影响[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2011, 39(1): 89-95
Chen J J, Zhang F C, Zhou H M, Zhao Y G, Wei X G. Effect of irrigation at different growth stages and nitrogen fertilizer on maize growth, yield and water use efficiency [J]. *Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition*, 2011, 39(1): 89-95 (in Chinese)

责任编辑: 吕晓梅



第一作者简介: 马风兰, 宁夏大学农学院作物学专业硕士研究生。参与国家重点研发计划(2021YFD1900603)。2023—2024年获校级硕士研究生奖学金。



通讯作者简介: 吴娜, 宁夏大学农学院教授, 硕士生导师, 主要从事作物高产栽培、保护性耕作等方面的教学与科研工作。先后主持国家自然科学基金2项, 宁夏回族自治区自然科学基金4项, 自治区政府横向课题1项。参与国家重点研发计划2项, 宁夏重点研发重大项目2项。获批国家发明专利2项, 自治区成果登记5项, 参与出版专著3部, 制定地方标准2项, 发表论文50余篇。