



黄霖锋, 王建鹏, 刘威帆, 刘昊, 万猛虎, 马风兰, 刘吉利, 吴娜. 深旋耕作和滴灌定额对盐碱地玉米抗逆生理特性的影响[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(07): 196-209.

HUANG Linfeng, WANG Jianpeng, LIU Weifan, LIU Hao, WAN Menghu, MA Fenglan, LIU Jili, WU Na. Effects of deep rotary tillage and drip irrigation quota on the stress resistance physiological characteristics of maize in saline-alkali land[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(07): 196-209.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.07.17

深旋耕作和滴灌定额对盐碱地玉米抗逆生理特性的影响

黄霖锋¹ 王建鹏¹ 刘威帆¹ 刘昊¹ 万猛虎¹ 马风兰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 针对宁夏银北地区盐碱地降水量少蒸发量大、返盐碱严重和水资源短缺等问题, 采用深旋耕作技术结合节水滴灌策略, 以裂区试验设计, T1(深旋耕作)和T2(普通旋耕)为主处理, W1(常规灌水量, 4 500 m³/hm²)、W2(节水10%, 4 050 m³/hm²)、W3(节水20%, 3 600 m³/hm²)和W4(节水30%, 3 150 m³/hm²)4个灌滴定额为副处理, 测定土壤含水率、盐分质量分数、玉米叶片抗氧化酶活性、非酶保护性物质和产量等相关参数, 进行耕作方式和滴灌量对玉米叶片生理特性和产量影响的研究。结果表明: 1) 深旋耕作各节水处理在0~20 cm和20~40 cm土层的土壤含水率较普通旋耕分别提高了0.28%~5.51%和5.72%~11.70%, 土壤盐分质量分数分别降低了27.99%~51.19%与30.41%~46.79%; 2) 玉米吐丝期时深旋耕作各节水处理的叶面积指数提高0.3%~6.25%, 灌浆期相对叶绿素含量提高0.11%~3.62%; 3) 玉米灌浆期, 深旋耕作各节水处理叶片的超氧化物歧化酶(SOD)活性较普通旋耕提高了1.12%~11.81%, 过氧化物酶(POD)活性提高了12.41%~19.73%, 而脯氨酸(Pro)含量显著降低了46.22%~58.43%, 过氧化氢酶(CAT)活性提高了1.55%~18.51%, 丙二醛(MDA)含量降低了7.60%~21.40%, 细胞膜透性降低了8.55%~15.86%; 4) 玉米产量和抗逆生理指标综合分析表明, T1W2处理综合表现最佳。深旋耕作下适当节水滴灌(4 050 m³/hm²)能有效保持土壤含水量, 降低玉米耕层盐分, 提高叶片保护酶活性, 降低膜脂过氧化产物(MDA)的积累, 优化玉米叶面积建成和叶绿素合成, 从而实现节水控盐与玉米增产。

关键词 深旋耕作; 节水; 抗氧化酶; 叶面积指数; 产量

中图分类号 S513

文章编号 1007-4333(2025)07-0196-14

文献标志码 A

Effects of deep rotary tillage and drip irrigation quota on the stress resistance physiological characteristics of maize in saline-alkali land

HUANG Linfeng¹, WANG Jianpeng¹, LIU Weifan¹, LIU Hao¹, WAN Menghu¹,
MA Fenglan¹, LIU Jili^{2*}, WU Na¹

(1. Agricultural College, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;

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

Abstract Aiming at the problems of less precipitation, large evaporation capacity, serious salinization and shortage of water resources in saline-alkali land in the Yinbei area of Ningxia, deep rotary tillage technology combined with water-saving drip irrigation strategy was adopted. A split-plot experimental design was

收稿日期: 2024-11-13

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFD1900603)

第一作者: 黄霖锋(ORCID:0009-0007-6579-9916), 硕士研究生, E-mail: 12023131424@stu.nxu.edu.cn

通讯作者: 刘吉利(ORCID:0000-0002-2360-5075), 研究员, 博士生导师, 主要从作物逆境生理研究, E-mail: tim11082003@163.com

used. T1 (deep rotary tillage) and T2 (conventional rotary tillage) were the main treatments, and W1 (conventional irrigation, 4 500 m³/hm²), W2 (water saving 10 %, 4 050 m³/hm²), W3 (water saving 20 %, 3 600 m³/hm²) and W4 (water saving 30 %, 3 150 m³/hm²) were the secondary treatments. The soil moisture content, salt content, antioxidant enzyme activity, non-enzymatic protective substances and yield of maize leaves were measured. The effects of tillage methods and drip irrigation amount on the physiological characteristics and yield of maize leaves were studied. The results showed that: 1) Compared with the conventional rotary tillage, the soil water content of deep rotary tillage in 0-20 cm and 20-40 cm soil layers increased by 0.28%-5.51% and 5.72%-11.70%, respectively, and the soil salt content decreased by 27.99%-51.19% and 30.41%-46.79%, respectively. 2) The leaf area index of each water-saving treatment of deep rotary tillage increased by 0.3%-6.25% at the silking stage of maize, and the relative chlorophyll content increased by 0.11%-3.62% at the filling stage. 3) At the filling stage of maize, the superoxide dismutase (SOD) activity and peroxidase (POD) activity in the leaves of each water-saving treatment of deep rotary tillage increased by 1.12%-11.81% and 12.41%-19.73%, respectively, compared with those of conventional rotary tillage, while the proline (Pro) content significantly decreased by 46.22%-58.43%, the catalase (CAT) activity increased by 1.55%-18.51%, the malondialdehyde (MDA) content decreased by 7.60%-21.40%, and the cell membrane permeability decreased by 8.55%-15.86%. 4) The comprehensive analysis of maize yield and stress resistance physiological indexes showed that the comprehensive performance of T1W2 treatment was the best. In conclusion, the appropriate water-saving drip irrigation (4 050 m³/hm²) under deep rotary tillage can effectively maintain soil water content, reduce maize topsoil salinity, increase leaf protective enzyme activity, reduce the accumulation of membrane lipid peroxidation products (MDA), optimize maize leaf area formation and chlorophyll synthesis, so as to achieve water-saving salt control and maize yield increase.

Keywords deep rotary tillage; water saving; antioxidant enzymes; leaf area index; yield

宁夏回族自治区光热充足,是我国重要的玉米种植区。随着种植结构的优化,玉米已成为该地区的主要粮食作物^[1]。然而,该区域春季干旱和返盐碱现象严重,现有不同程度盐渍化耕地 16.58 万 hm²,同时连续多年农业机械频繁碾压导致土壤结构恶化、养分失衡和肥力下降^[2]。传统耕作方法往往耕作深度不足,耗水量大,水分利用效率低,严重限制了玉米产量的保障^[3-4]。针对这些问题,急需探索保障玉米高产优质的同时改善土壤结构同时高效节水的耕作灌溉模式。

深旋耕作采用“螺旋型钻头”垂直深入土壤 30~50 cm,以高速旋转磨削、切割和破碎土壤,可以在改良土壤耕层结构的同时保持土壤上下层不扰动,并形成深厚且疏松的耕作层^[5-6]。深旋耕作作为逐渐成熟的耕作技术,已有一些研究表明具有以下特点:1)加深耕作层,改善土壤结构,增加通气性和透水性,有利于根系呼吸和生长^[7];2)有效破碎土壤团粒,减少毛细管孔隙,减缓水分蒸发导致的盐分上升^[8];3)深旋耕作后 20~40 cm 土层土壤过氧化物酶、脲酶、蔗糖酶及磷酸酶活性均高于 0~20 cm 土壤耕层^[9];4)深旋耕作显著提高了叶片超氧化物歧

化酶和过氧化物酶活性,降低在逆境条件下氧自由基对作物生长的伤害^[10];5)采用深旋耕作有助于改善盐碱地的土壤质量,可以为玉米生长提供更稳定的养分和水分环境^[11]。节水灌溉是干旱和半干旱地区实现农业可持续发展的重要战略。实施这一策略不仅节约水资源,还能调控作物的营养生长与生殖生长的平衡,显著提升水分利用效率^[12-13]。同时已有研究表明:1)在玉米非临界期适当节水可以提高水分利用效率而不影响产量^[14];2)适当节水延缓玉米吐丝后叶片衰老,优化光合效率,提高水分利用效率和产量^[15];3)抽穗期适度水分亏缺可调整营养物质分配,促进籽粒产量^[16-17];4)植物在应对逆境时适当节水可以提高抗氧化酶活性,从而增强抗氧化能力,降低缺水导致的损伤^[18];5)适当节水在节约水资源的同时,可以优化光合效率,从而促进作物生长并提升抗逆^[19]。

关于深旋耕作和节水灌溉对土壤结构和作物生长影响的研究较多,但有关深旋耕作与节水灌溉互作对盐碱地玉米叶片抗逆生理等方面的影响研究尚不全面。本试验拟选取 2 种旋耕方式,与 4 种滴灌定额进行裂区试验设计,对宁夏盐碱地土壤水

盐变化及玉米叶片抗氧化酶特性和产量等进行研究,以期为该地区盐碱地的改良和玉米生产的节水增效提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本试验于2022年在宁夏平罗县渠口乡交际村(106.58°(E),38.85°(N))进行,试验地海拔高度1 180 m,年均降水量186.5 mm,年蒸发量1 709.0 mm,属大陆性气候。试验地年平均气温约为8.2℃,>10℃的活动积温为3 205.8℃,年日照时数为3 202 h,无霜期约为152 d。试验田土壤质地为粉(沙)质黏土,0~20 cm土层pH为8.00、全盐质量分数为3.29 g/kg、有机质6.1 g/kg、全氮1.05 g/kg、碱解氮5.50 g/kg、速效磷1.49 g/kg、速效钾14.70 g/kg。

1.2 试验设计

试验采用裂区试验设计,主处理为T1(深旋耕作)和T2(普通旋耕),耕深分别为40~45 cm、15~

20 cm;副处理为4个灌滴定额W1(常规灌水量,4 500 m³/hm²)、W2(节水10%,4 050 m³/hm²)、W3(节水20%,3 600 m³/hm²)和W4(节水30%,3 150 m³/hm²),总共形成8个处理组合:T1W1、T1W2、T1W3、T1W4、T2W1、T2W2、T2W3和T2W4。耕作方式及滴灌定额处理见表1。

灌水分为冬灌和生育期灌水,冬灌占30%,采用畦灌;生育期灌水占70%,采用滴灌,共滴灌5次。每种处理重复3次,共24个小区,每个小区的尺寸为11 m×6 m,小区面积为66 m²,并且在试验区外围设置4行保护行。采用‘先玉1225’作为试验品种,按照等行距的方式种植,行距60 cm,株距20 cm,种植密度90 000 /hm²。氮、磷(P₂O₅)、钾(K₂O)的施用量分别为300、150、75 kg/hm²,分4次进行;其中,1/3的氮肥、磷肥、钾肥作为基肥施用,剩余的作为追肥,通过水肥一体化技术在拔节期、大喇叭口期和灌浆期进行施用。除了上述管理措施外,其他所有管理活动均依照当地的标准农田管理实践进行。

表1 耕作方式及滴灌定额处理
Table 1 Tillage methods and drip irrigation quota treatment m³/hm²

耕作方式 Tillage method	滴灌处理 Drip irrigation treatment	冬灌 Winter irrigation	生育期灌水 Irrigation in growing period					滴灌总额 Total drip irrigation
			V3-V6	V6-V12	V12-VT	VT-R1	R1-R3	
T1	W1	1 350	525	525	525	1 050	525	4 500
	W2	1 215	472.5	472.5	472.5	945	472.5	4 050
	W3	1 080	420	420	420	840	420	3 600
	W4	945	367.5	367.5	367.5	735	367.5	3 150
T2	W1	1 350	525	525	525	1 050	525	4 500
	W2	1 215	472.5	472.5	472.5	945	472.5	4 050
	W3	1 080	420	420	420	840	420	3 600
	W4	945	367.5	367.5	367.5	735	367.5	3 150

注:T1,深旋耕作;T2,普通旋耕。W1为常规灌水量,W2、W3、W4分别为节水10%、20%和30%。V3,苗期;V6,拔节期;V12,大喇叭口期;VT,抽雄期;R1,吐丝期;R3,乳熟期。
Note: T1, deep rotary tillage ; T2, ordinary rotary tillage. W1 is the conventional irrigation amount ; W2, W3 and W4 save water by 10 % , 20 % and 30 % respectively. V3, seedling stage ; V6, jointing stage ; V12, large bell-mouth period ; VT, tasseling period ; R1, silking stage ; R3, milk ripening period.

1.3 测定项目及方法

1.3.1 土壤含水率和盐分质量分数

在玉米苗期(V3)、拔节期(V6)、大喇叭口期

(V12)、抽雄期(VT)、吐丝期(R1)和乳熟期(R3)等关键生育期,分层采集0~100 cm土壤样品,用于土壤含水率和盐分质量分数测定。

1)土壤含水率:采用烘干法测定,土壤样品测量其湿重后,放入烘箱 105~110℃烘干 16 h,冷却后称量干重,计算公式为:

$$\text{土壤含水率} = (M_1 - M_2) / M_1 \times 100\% \quad (1)$$

式中: M_1 和 M_2 分别为土壤湿重和干重。

2)土壤盐分质量分数:取土壤样品,按 5:1 水土质量比与超纯水混合,在震荡箱中震荡 30 min,静置 5 min 后用 DDS-307A 电导率仪(上海雷磁公司生产)测量,并计算土壤盐分质量分数。

1.3.2 玉米叶面积指数及相对叶绿素含量

在玉米 V3、V6、V12、VT、R1 和 R3 等关键生育期,选取 5 株具有代表性的植株样本,进行叶面积指数和 SPAD 的测定,最后求平均值。

1)叶面积指数(LAI):用长宽乘法计算叶面积,公式为:

$$\text{LAI} = 0.75p \times \sum_{i=1}^n (a_i \times b_i) \quad (2)$$

式中: p 为玉米种植密度; a 和 b 分别为叶片的长和宽; i 为叶片个数。

2)相对叶绿素含量(SPAD):晴朗无风天气,9:00—12:00 采用 SPAD-502 便携式叶绿素仪(日本美能达公司生产)测定叶片 SPAD 值。

1.3.3 玉米叶片抗氧指标

在玉米 V3、V6、V12、VT、R1 和 R3 等关键生育期,选取 3 株具有代表性的植株采集叶片样品,用于抗氧化特性指标测定。

采用 NBT(氮蓝四唑)法测定超氧化物歧化酶 SOD 活性^[20];愈创木酚法测定 POD 活性^[21];紫外吸收法测定过氧化氢酶 CAT 活性^[21]。硫代巴比妥酸法测定 MDA 含量^[20];磺基水杨酸提取法测定脯氨酸含量^[20];电解质外渗量法测定细胞膜透性^[21]。

1.3.4 玉米产量

玉米成熟后,每小区收获 10 m²样方进行测产,并选取代表性果穗 10 个,测定穗粒重、穗粒数、百粒重、及含水率等指标,最后折算成单位面积产量。

1.4 数据统计

数据采用 Microsoft Excel 2016 整理及汇总,采用 IBM SPSS Statistics 27 软件进行统计分析,以 LSD 法进行差异显著性检验,并采用 Surfer、Origin2024b 等软件绘图。

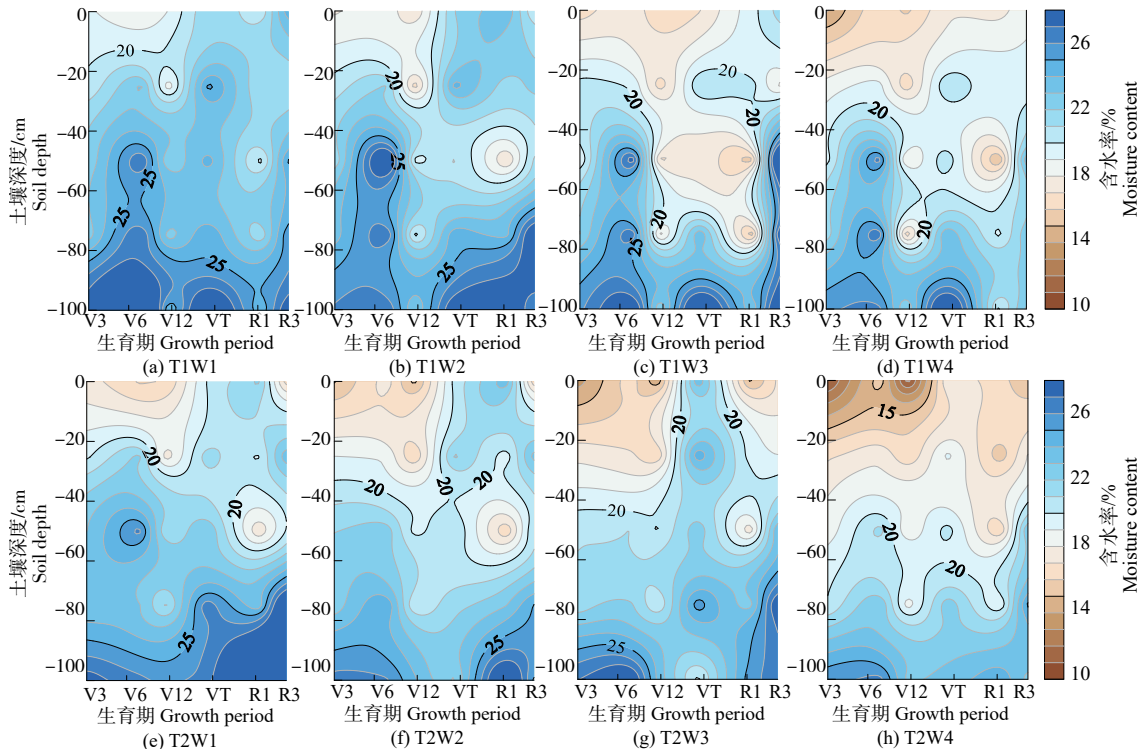
2 结果与分析

2.1 耕作方式及滴灌定额对玉米主要生育期不同土层含水率的影响

深旋耕作显著提高了玉米主要生育期内不同耕层土壤的含水量,尤其在降低滴灌定额的情况下,减缓干旱的效果更为显著(图 1)。与传统普通耕作相比,深旋耕作在 0~60 cm 土层均提高了土壤含水率,其中 20~40 cm 土层增幅最为显著,达到 5.72%~11.70%。而在 0~20 cm 和 40~60 cm 土层深旋耕作处理的平均土壤含水率增幅为 0.28%~5.51% 和 1.73%~5.50%,虽然提升幅度相对较小,但深旋耕作仍表现出对土壤含水率的积极影响。随着玉米生育期进展至吐丝期前,尽管 0~40 cm 土层含水量下降,深旋耕作相较于普通耕作仍保持较高含水率,表现出更好的保水能力。特别是在苗期和大喇叭口期,深旋耕作下各处理较普通旋耕在 0~20 cm 和 20~40 cm 土层的含水率提升幅度分别达到 30.22%~66.98% 和 15.66%~32.91%,进一步表明深旋耕作能够有效提高土壤含水率,为作物生长提供有利条件。

2.2 耕作方式及滴灌定额对玉米主要生育期不同土层盐分质量分数的影响

深旋耕作显著降低了玉米主要生育期内各耕层土壤的盐分质量分数,在降低滴灌定额下效果更显著(图 2)。和普通耕作相比,深旋耕作在主要生育期内对 0~60 cm 土层的平均土壤盐分质量分数均呈现出显著的降低趋势。具体而言,在 0~20 cm 和 20~40 cm 土层,深旋耕作处理的平均土壤盐分质量分数降幅达到 27.99%~51.19% 和 30.41%~46.79%,表明深旋耕作在表层土壤中具有显著的脱盐效果;而在 40~60 cm 土层,降幅为 26.40%~34.22%,虽然降低幅度相对较小,但深旋耕作仍表现出对深层土壤盐分的积极影响。土壤盐分质量分数在拔节期和吐丝期出现 2 个明显的峰值,而深旋耕作显著减缓了这些时期土壤盐分的累积。在拔节期,深旋耕作下的 0~20 cm 和 20~40 cm 土层盐分质量分数较普通耕作分别降低了 35.46%~70.57% 和 31.53%~71.19%。到了吐丝期,盐分质量分数的降低幅度分别为 24.26%~58.61% 和 5.59%~46.20%,进一步表明深旋耕作在改善土壤盐分方面的有效性。总体来看,深旋耕作不仅在关



T1和T2分别为深旋耕作和普通旋耕。W1、W2、W3和W4分别为常规灌水量(4 500 m³/hm²)、节水10%(4 050 m³/hm²)、节水20%(3 600 m³/hm²)和节水30%(3 150 m³/hm²)的滴灌定额。V3,苗期;V6,拔节期;V12,大喇叭口期;VT,抽雄期;R1,吐丝期;R3,乳熟期。下同。

T1 and T2 are deep rotary tillage and conventional rotary tillage, respectively. W1, W2, W3 and W4 were drip irrigation quotas of conventional irrigation (4 500 m³/hm²), water-saving 10% (4 050 m³/hm²), water-saving 20% (3 600 m³/hm²) and water-saving 30% (3 150 m³/hm²), respectively. V3, seedling stage; V6, jointing stage; V12, big trumpet period; VT, tasseling stage; R1, silking stage; R3, milk ripening period. The following Figs. are the same.

图1 耕作方式及滴灌定额对玉米主要生育期不同土层含水率的影响

Fig.1 Effects of tillage methods and drip irrigation quota on water content of different soil layers in main growth period of maize

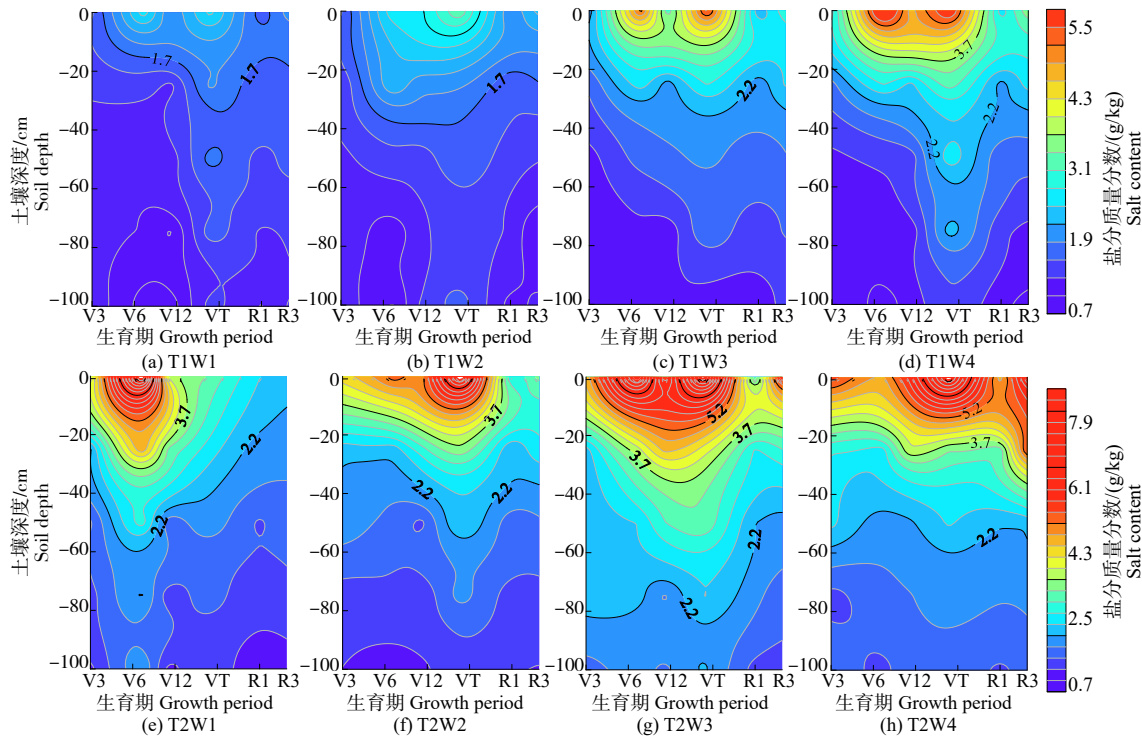


图2 耕作方式及滴灌定额对玉米主要生育期不同土层盐分质量分数的影响

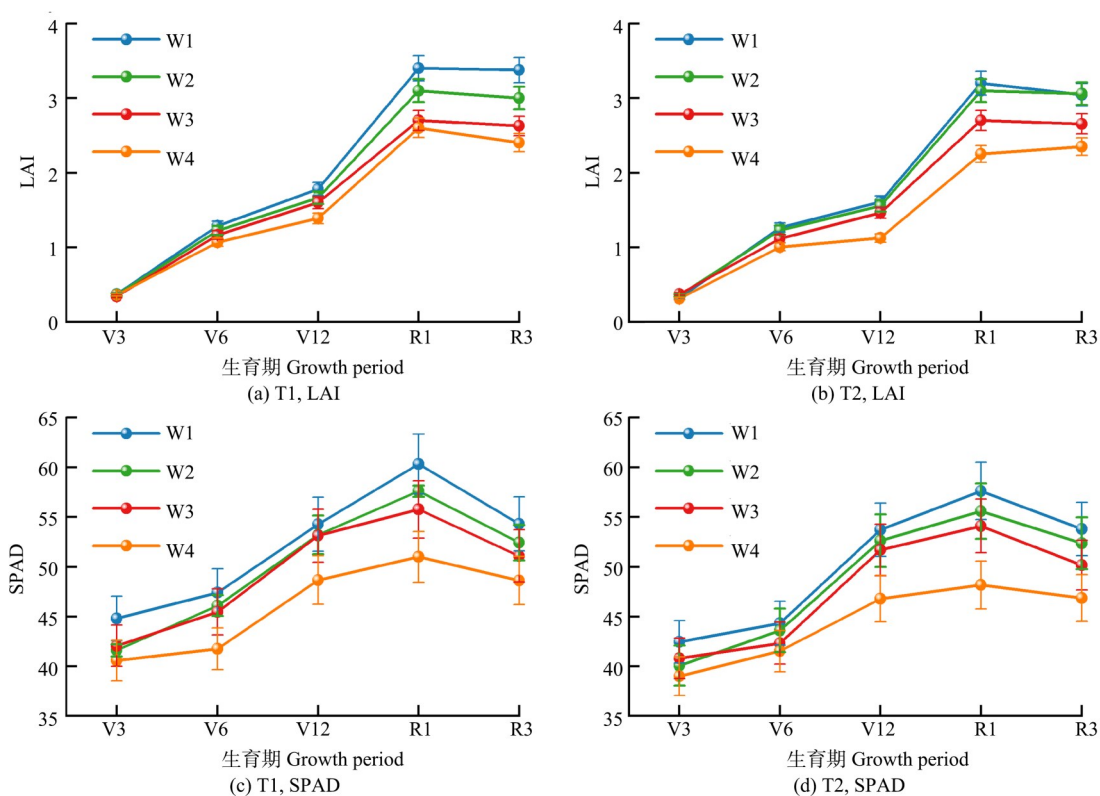
Fig.2 Effects of tillage methods and drip irrigation quota on salt mass fraction in different soil layers during the main growth period of maize

键生育期内显著降低了土壤的盐分质量分数,而且在玉米生长的关键阶段,如拔节期和吐丝期,降低土壤盐分的效果尤为显著。

2.3 耕作方式及滴灌定额对玉米叶面积指数和相对叶绿素含量的影响

随着玉米生育期的推进,叶面积指数(LAI)和相对叶绿素含量(SPAD)均表现出单峰变化趋势,两者均在吐丝期达到峰值(图3)。吐丝期时,深旋耕作下W2、W3和W4滴灌定额处理的玉米LAI较W1分别降低了8.8%、20.6%和23.5%,而普通旋耕的降幅为3.1%、15.6%和21.9%。随着滴灌定额下降,LAI均

表现出下降趋势;同一生育期,深旋耕作下的各滴灌定额处理SPAD含量较W1下降了4.53%~15.46%,普通旋耕的下降幅度为2.70%~16.42%,说明过度节水对SPAD也有显著影响。然而,深旋耕作在吐丝期的各处理LAI仍比普通旋耕模式高出0.3%~6.25%,表明深旋耕作对叶面积增长有积极作用。到了灌浆期,深旋耕作处理的玉米叶片的SPAD含量比普通旋耕提高了0.11%~3.62%,表明深旋耕作在保持叶绿素含量方面具有一定效果。综上,相同滴灌定额下,深旋耕作不仅能提升玉米叶面积,还能有助于维持叶绿素的含量,从而为玉米生长提供良好的生理基础。



标记点上竖直线表示标准偏差,图4至图7同。

The vertical line on the marker point represents the standard deviation, as shown in Figs 4 to 7.

图3 耕作方式及滴灌定额对玉米主要生育期叶面积指数(LAI)和相对叶绿素含量(SPAD)的影响

Fig.3 The effects of tillage methods and drip irrigation quota on LAI and SPAD in the main growth period of maize

2.4 耕作方式及滴灌定额对玉米叶片抗逆生理特性的影响

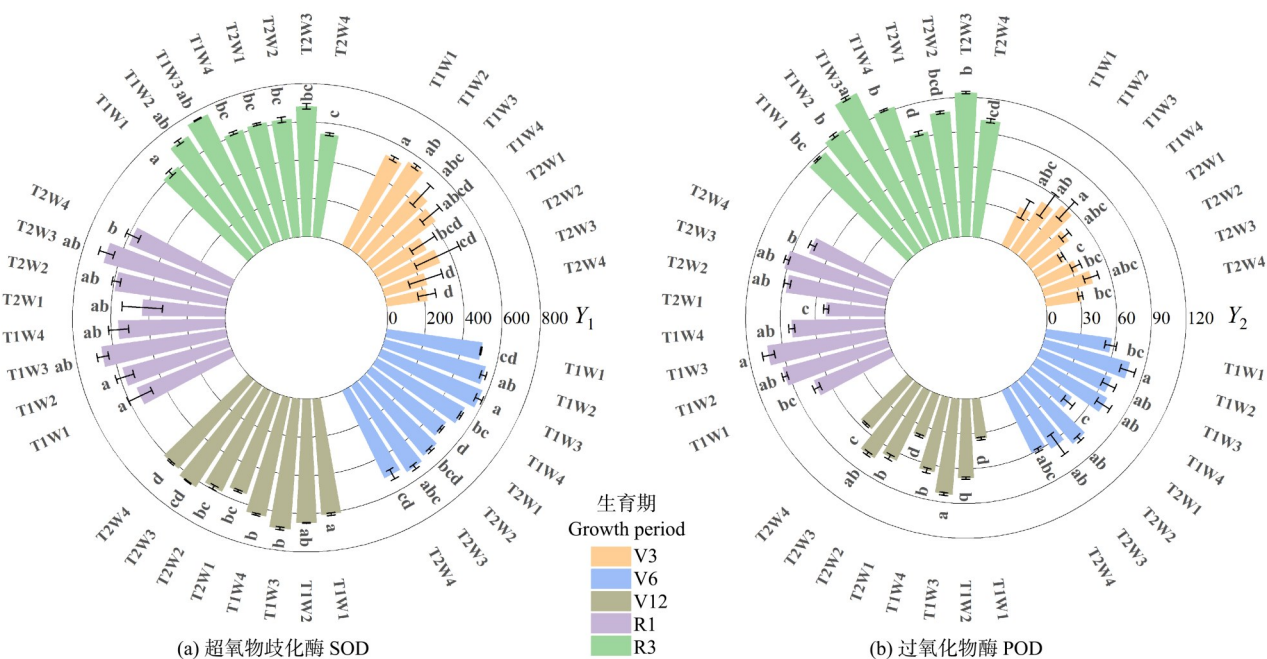
2.4.1 对玉米叶片超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)活性的影响

随着玉米生育期的推进,玉米叶片的超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)的活性总体呈现上升趋势(图4)。深旋耕作显著增强了2种酶在玉米各生育期的活性。

大喇叭口期,SOD活性首次达到峰值,深旋耕作下的W3处理玉米叶片的SOD活性相较于W1、W2和W4处理分别提高了10.97%、5.41%和7.17%,在普通旋耕下,相应的提升幅度分别为13.39%、7.46%和3.54%。这一结果表明,适度降低滴灌定额有助于增强玉米叶片的SOD活性。玉米叶片的POD活性在拔节期首次达到最大值,深旋耕作的W2处理玉米叶片的POD活性比W1、W3和W4分别高出25.51%、

13.91%和8.41%,而普通旋耕下的提升幅度为38.96%、10.74%和17.48%,表明W2处理在提高玉米叶片的POD活性方面具有优势。至灌浆期,深旋耕作处理的玉米叶片的SOD活性比普通旋耕提高了1.12%~12.90%,而POD活性的提升幅度为

12.41%~19.73%,说明深旋耕作对SOD和POD活性的积极影响持续存在。综上,深旋耕作不仅在玉米生育前期增强了这2种抗氧化酶的活性,而且在生育后期也维持了较高的活性水平,从而有助于玉米植株更好地应对逆境胁迫。



Y_1 为超氧化物歧化酶活性(FW)值, U/g; Y_2 为过氧化物酶活性值, U/(mg·min)。V3、V6等表示生育期, 详见表1; 相同生育期, 柱上不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$), 图5和图6同。

Y_1 was the value of superoxide dismutase activity (FW), U/g; Y_2 is peroxidase activity value, U/(mg·min). V3, V6, etc. represent the growth period, see Table 1 for details. Different lowercase letters on the same growth period column indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$), Figs 5 and 6 are the same.

图4 耕作方式及滴灌定额对玉米叶片超氧化物歧化酶活性和过氧化物酶活性的影响

Fig. 4 Effects of tillage methods and drip irrigation quota on superoxide dismutase activity and peroxidase activity in maize leaves

2.4.2 对玉米叶片脯氨酸(Pro)含量和过氧化氢酶(CAT)活性的影响

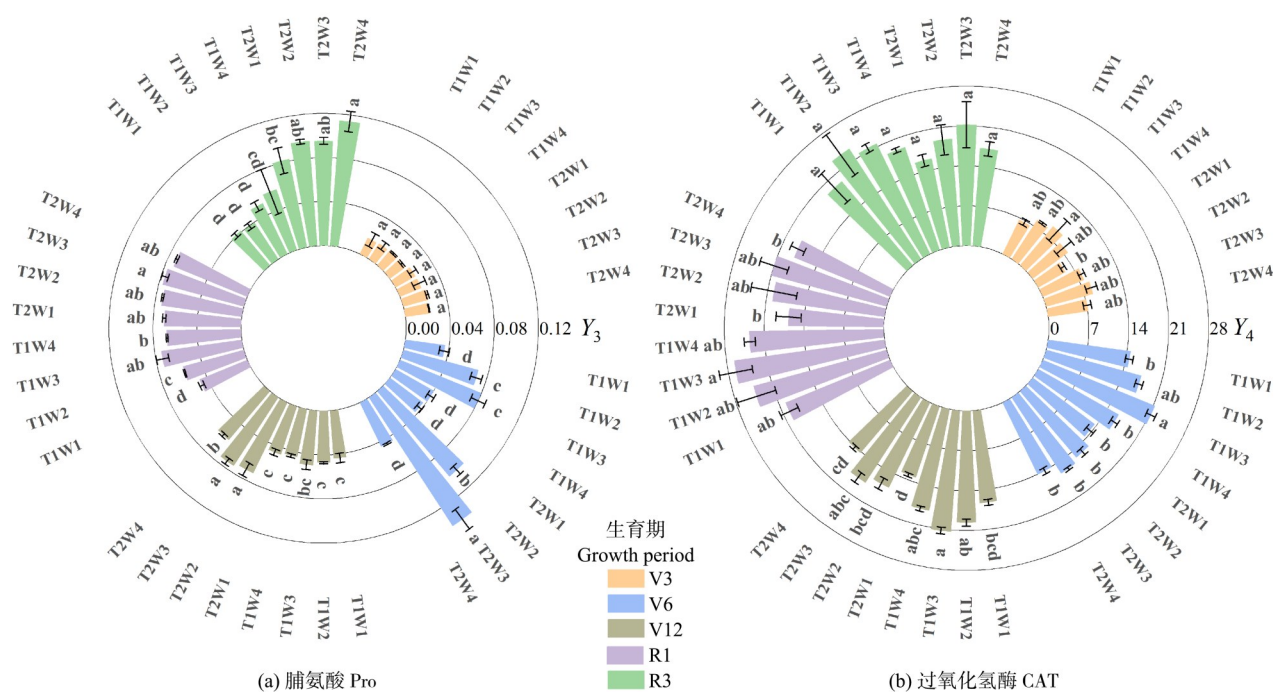
随着玉米生育期的推进,玉米叶片的脯氨酸(Pro)含量和过氧化氢酶(CAT)活性总体上呈现上升趋势(图5)。深旋耕作相比普通旋耕显著降低了玉米叶片各生育期的Pro含量。

灌浆期,深旋耕作下各滴灌定额处理的玉米叶片Pro含量相较于普通旋耕降低了46.22%~58.43%,CAT活性提高了1.55%~18.51%,表明深旋耕作有助于减轻逆境影响和增强玉米抗氧化防御系统。同一生育期,深旋耕作下W1处理的玉米叶片Pro含量显著低于W2、W3和W4处理,分别下降了3.64%、22.46%和31.90%,而在普通旋耕下,降低幅度分别为14.35%、14.08%和28.31%,

一致表明降低滴灌定额显著影响玉米叶片的Pro的含量。在吐丝期,深旋耕作下W2、W3和W4处理相较于W1处理的玉米叶片的CAT活性分别提升了18.12%、25.63%和16.00%,而在普通旋耕下,提升幅度为15.64%、20.11%和7.93%,一致表明适度节水有助于提高玉米叶片的CAT活性。总体而言,深旋耕作配合适度降低滴灌定额可以降低玉米叶片的Pro含量和提升CAT活性,有助于维持玉米的正常生理代谢,降低逆境对植株的损害。

2.4.3 对玉米叶片丙二醛(MDA)含量和细胞膜透性的影响

玉米叶片的丙二醛(MDA)含量总体上随生育期的推进呈现上升趋势,而细胞膜透性则与此相反(图6)。与普通旋耕相比,深旋耕作显著降低了玉

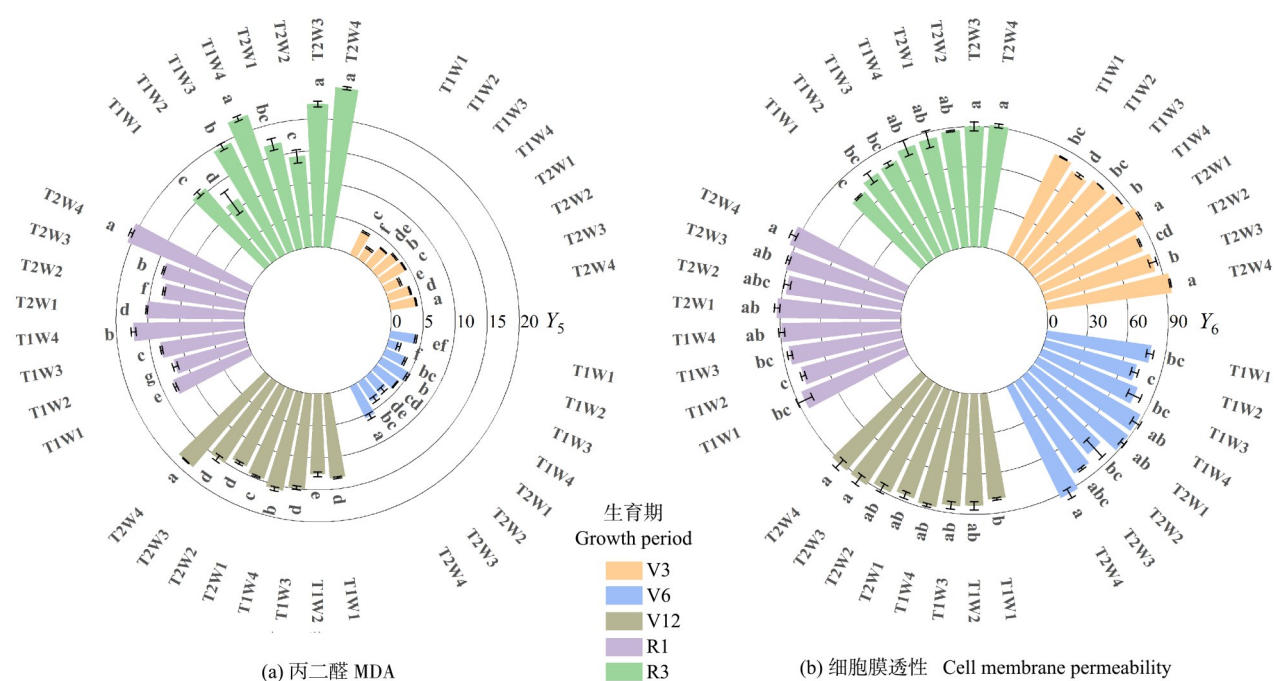


Y_3 为脯氨酸(FW)质量摩尔浓度, $\mu\text{mol/g}$; Y_4 为过氧化氢酶活性值, $\text{U}/(\text{g} \cdot \text{min})$ 。

Y_3 is the mass molar concentration proline (FW), $\mu\text{mol/g}$; Y_4 is catalase activity value, $\text{U}/(\text{g} \cdot \text{min})$.

图 5 耕作方式及滴灌定额对玉米脯氨酸质量摩尔浓度和过氧化氢酶活性的影响

Fig. 5 Effects of tillage methods and drip irrigation quota on proline mass molar concentration and catalase activity of maize



Y_5 为丙二醛质量摩尔浓度, $\mu\text{mol/g}$; Y_6 为细胞膜透性, %。

Y_5 is the mass molar concentration of malondialdehyde, $\mu\text{mol/g}$; Y_6 is cell membrane permeability, %.

图 6 耕作方式及滴灌定额对玉米叶片丙二醛质量摩尔浓度和细胞膜透性的影响

Fig. 6 Effects of tillage methods and drip irrigation quota on malondialdehyde mass molar concentration and cell membrane permeability of maize leaves

米叶片中MDA的含量,并有效减缓了细胞膜透性的增加。

在大喇叭口期,深旋耕作下W2处理相较于W1、W3和W4,玉米叶片的MDA含量分别下降了5.25%、15.56%和19.82%,而在普通旋耕下,分别下降了5.21%、7.89%和25.13%,表明W2灌水定额在降低MDA含量上更为高效。在同一生育期,深旋耕作下的玉米叶片的细胞膜透性(W2、W3和W4)较W1处理分别增加了5.05%、5.84%和9.22%,而普通旋耕的增加幅度为2.99%、7.27%和7.35%,表明滴灌量对细胞膜透性具有显著影响。在灌浆期,深旋耕作下各滴灌处理相较于普通旋耕,玉米叶片的MDA含量降低了7.60%~21.40%,细胞膜透性降低了8.55%~15.86%,表

明深旋耕作在维持细胞膜结构方面具有积极作用。综上,深旋耕作配合适当滴灌定额,有助于减少玉米叶片的MDA的积累,减轻细胞膜损伤,维护细胞膜的完整性。

2.5 耕作方式及滴灌定额对玉米产量的影响

玉米产量随滴灌定额降低呈现先增后减的变化趋势(图7),2种耕作模式下滴灌定额为4 050 m³/hm²时产量达到最高;深旋耕作各滴灌定额处理的玉米产量显著高于普通旋耕。深旋耕作下W2滴灌定额处理与W1、W3和W4滴灌定额处理相比,玉米产量分别提高3.57%、11.55%和19.81%;普通旋耕下分别提高2.42%、18.58%和29.81%。对比2种耕作模式下各滴灌定额处理的玉米产量,深旋耕作较普通旋耕玉米产量提高7.60%~21.40%。

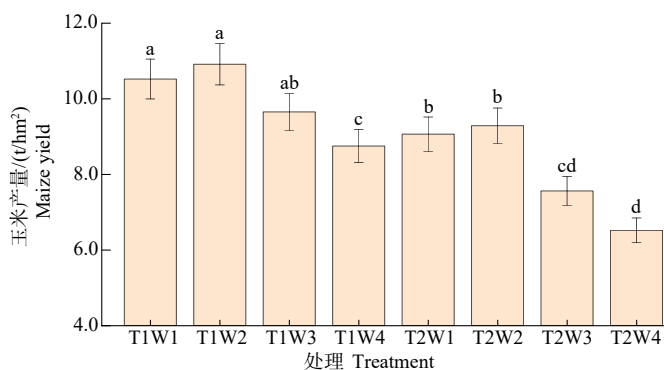


图7 耕作方式及滴灌定额对玉米产量的影响

Fig. 7 Effects of tillage methods and drip irrigation quota on maize yield

2.6 玉米产量及抗逆生理特性的综合分析

2.6.1 相关性分析

为进一步分析不同因素对玉米产量的影响,对玉米产量与土壤含水率、盐分质量分数、叶片光合性能指标以及抗氧化特性参数进行皮尔逊(Pearson)相关性分析,结果见表2。产量与超氧化物歧化酶活性呈显著正相关($P < 0.05$),相关系数为0.43,与土壤含水率、叶面积指数、相对叶绿素含量和过氧化氢酶活性呈极显著正相关($P < 0.01$),相关系数分别为0.77、0.63、0.67和0.53。同时产量与土壤盐分质量分数、叶片脯氨酸、丙二醛含量和细胞膜透性呈极显著负相关($P < 0.01$),相关系数分别为-0.67、-0.63、-0.61和-0.59。以上结果表明,采用适宜的耕作措施结合适量的滴灌定额,有助于玉米在各生育期间维持叶片的优良生理状态。使超氧化物歧化酶等抗氧化酶活性保持在较

高水平,降低丙二醛含量和脯氨酸含量,同时可提升叶面积指数和相对叶绿素含量,利于玉米光合产物的合成,进而显著提高玉米产量。

2.6.2 综合评价

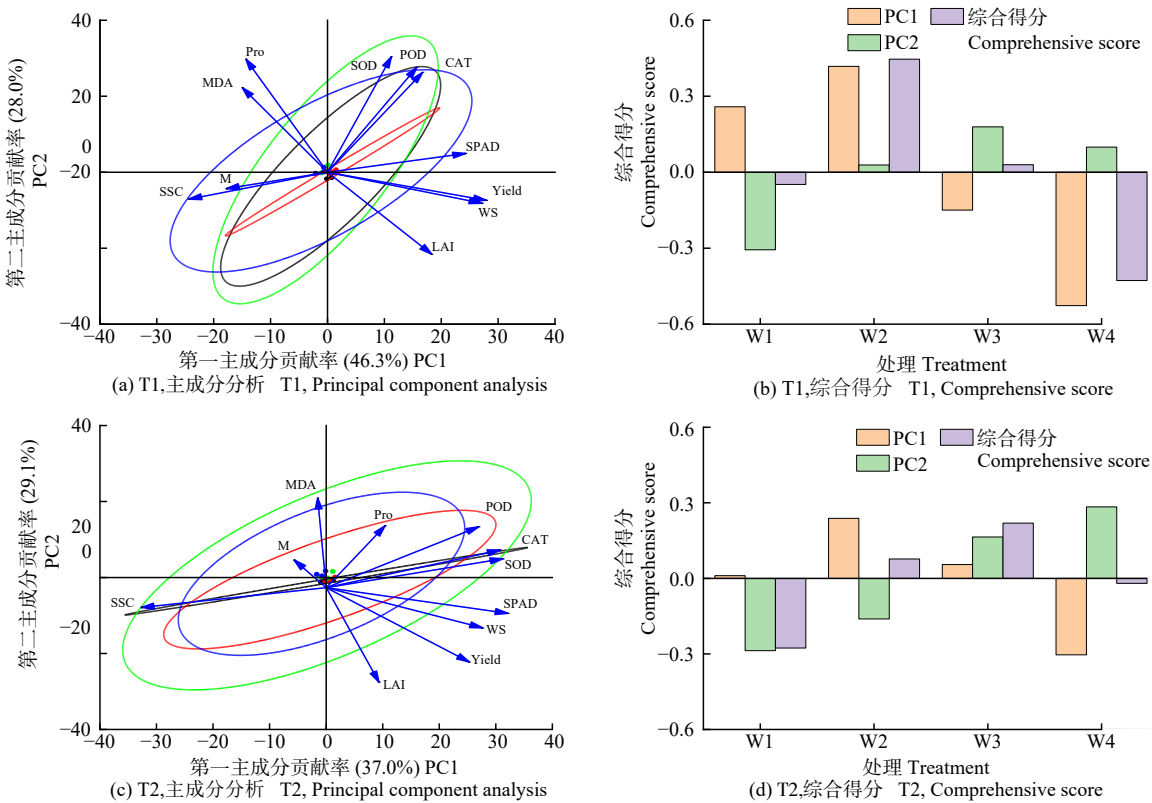
对2种耕作处理下玉米产量、土壤含水率、盐分质量分数、叶片光合性能指标和抗氧化特性参数进行主成分分析,结果见图8。通过降维,将11个互相关联的因素转化为2个独立综合指标,试验提取的主成分特征值最大为1,由此确定2个主成分。深旋耕作下第一主成分贡献率为46.3%,第二主成分贡献率为28.0%,累计贡献率达到74.3%,各滴灌定额综合得分表现为W2>W3>W1>W4;而普通耕作下第一主成分贡献率为37.0%,第二主成分贡献率为29.1%,累计贡献率达到66.1%,各滴灌定额处理综合得分表现为W3>W2>W4>W1。2耕作模式下趋势一致,共

表 2 玉米产量与土壤含水率、盐分质量分数、叶片光合性能指标和抗氧化特性参数的相关性

Table 2 Correlation analysis between maize yield and soil moisture content, salt mass fraction, leaf photosynthetic performance index and antioxidant characteristic parameters

参数 Parameter	WS	SSC	LAI	SPAD	SOD	POD	CAT	Pro	MDA	M	产量 Yield
WS	1.00										
SSC	-0.59**	1.00									
LAI	0.57**	-0.22	1.00								
SPAD	0.64**	-0.77**	0.38	1.00							
SOD	0.32	-0.66**	0.08	0.66**	1.00						
POD	0.32	-0.44*	-0.23	0.25	0.61**	1.00					
CAT	0.42*	-0.63**	0.06	0.42*	0.76**	0.72**	1.00				
Pro	-0.53**	0.42*	-0.53**	-0.26	0.09	0.24	-0.08	1.00			
MDA	-0.38	-0.01	-0.72**	-0.2	0.051	0.31	-0.14	0.47*	1.00		
M	-0.47*	0.3	-0.4*	-0.07	-0.28	-0.35	-0.63**	0.36	0.54**	1.00	
产量 Yield	0.77**	-0.67**	0.63**	0.67**	0.43*	0.15	0.53**	-0.63**	-0.61**	-0.59**	1.00

注：**和*分别表示 0.01 和 0.05 水平上差异显著。WS, 含水率; SSC, 盐分质量分数; LAI, 叶面积指数; 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; CAT, 过氧化氢酶活性; Pro, 脯氨酸含量; MDA, 丙二醛质量摩尔浓度; M, 细胞膜透性。
Note: ** and * represent significant differences at the 0.01 and 0.05 probability levels, respectively. WS refers to the moisture content; SSC refers to salt mass fraction; LAI refers to leaf area index; SPAD refers to the relative chlorophyll content; SOD refers to the activity of superoxide dismutase; POD refers to peroxidase activity; CAT refers to catalase activity; pro refers to the proline content; MDA refers to the mass molar concentration of malondialdehyde; M refers to cell membrane permeability.



WS,SSC,LAI,SPAD,SOD,POD,CAT,Pro,MDA 和 M 的具体含义详见表 2。

The specific meanings of WS, SSC, LAI, SPAD, SOD, POD, CAT, Pro, MDA and M are detailed in Table 2.

图 8 2 种耕作处理下玉米产量和不同因素的主成分分析及综合得分

Fig. 8 Principal component analysis and comprehensive score of maize yield and different factors under two tillage treatments treatments

同表现为适当节水(W2、W3)可明显提高累计贡献率及综合得分。

3 讨论

3.1 耕作方式及滴灌定额对玉米耕层土壤含水率和盐分质量分数的影响

深旋耕作通过有效破碎土壤团粒和减少毛细管孔隙,不仅减缓了水分蒸发,而且降低了水分蒸发导致的盐分上升^[11]。本研究发现,深旋耕作在关键生育期内显著提高了各耕层土壤的含水率,尤其在0~40 cm土层,含水率提升幅度较大。这与王斌等^[22]的研究结果,深旋耕作较传统旋耕能显著提高中表层耕层土壤的含水率相一致。曹明海等^[23]研究表明,深旋处理在耕层0~40 cm的土壤脱盐率显著高于传统翻耕处理。本研究发现,深旋耕作显著降低了玉米关键生育期内各耕层土壤的盐分质量分数,尤其是在0~40 cm土层,降低幅度最为显著。这表明深旋耕作在降低土壤盐分质量分数方面是有效的。随着生育期的推进,深旋耕作相比普通耕作更能有效减缓土壤盐分质量分数的升高。特别是在拔节期和吐丝期,这两个时期的土壤盐分质量分数峰值在深旋耕作下显著降低。这可能是由于深旋耕作切断了毛细管孔,减少了水分蒸腾和“返盐”作用,并对耕层土壤盐分进行了物理稀释。综合看,深旋耕作与适当的滴灌定额相结合,能够有效降低盐碱地土壤盐分质量分数的同时提高耕层土壤的含水率。

3.2 耕作方式与滴灌定额对盐碱地玉米抗逆生理特性的影响

盐害土壤由于渗透势增高,作物根系吸水困难,导致植株生长受影响^[24]。作物缺水会导致光合作用电子传递受阻,产生大量活性氧物质(ROS),这些ROS会导致细胞膜过氧化产生MDA,伤害细胞膜并使植物体内氧化还原失衡^[25]。本研究结果显示,随着滴灌定额减少,玉米叶片中的MDA含量在W3和W4滴灌定额处理下显著高于对照处理,表明细胞膜脂过氧化程度加剧,这与已有研究^[24-25]的结果相似。这可能是盐胁迫同时对植物造成渗透胁迫、离子毒害和氧化胁迫,也会诱导ROS产生进而伤害细胞膜^[26-27]。SOD、POD和CAT等抗氧化酶能有效清除ROS,维持细胞内平衡,减缓膜脂过氧化并降低膜损伤^[28]。付艳等^[29]发现,玉米叶片

SOD活性随盐浓度增加先升后降。本研究显示,相同滴灌定额处理下,深旋耕作处理的玉米叶片SOD活性较普通旋耕处理显著提升,这可能是由于深旋耕作改善了土壤结构,抑制了盐分上升,从而减缓了作物的盐碱胁迫^[30]。此外,本研究发现玉米叶片SOD酶活性W3滴灌定额时达到最高、POD酶活性在W2滴灌定额时达到最高,随滴灌定额的减少而下降,说明玉米的抵抗逆境能力在一定范围内随节水程度增加而增强,但超过阈值则减弱,这与已有研究^[31]结果相似。本研究还发现,两种耕作方式下玉米叶片脯氨酸(Pro)含量均随滴灌定额的减少而上升,这与王智威等^[32]的研究结果一致,表明植物在逆境下通过积累脯氨酸来调节细胞渗透压,以适应水分胁迫。综合看,耕作方式与滴灌定额的交互效应对盐碱地玉米的抗逆生理特性有显著影响。深旋耕作结合适量节水滴灌可改善土壤结构,有效抑制盐分表聚,并在一定程度上提高了玉米的抗氧化酶活性,从而增强了盐碱地玉米的抗逆能力。

3.3 耕作方式及滴灌定额对盐碱地玉米产量的影响

叶绿素作为光合作用的关键色素,对光能吸收至关重要,而LAI则是衡量作物源强度和群体光合生产能力的重要指标^[33-34]。本研究发现,深旋耕作在各生育期显著提高了玉米的LAI和SPAD,有效促进了叶绿素的合成,有利于增强了光合作用。有研究表明,植物在长期缺水时会加速叶绿素降解或减少其合成^[35]。在过度降低滴灌定额的情况下,2种耕作方式均导致LAI和SPAD显著降低,但在相同滴灌定额下,深旋耕作相比普通耕作更能提升LAI和SPAD,这可能与深旋耕作有效破碎土壤团粒,减少毛细管孔隙,减缓水分蒸发导致的盐分上升,减缓盐胁迫有关^[16,36]。

靳晓敏等^[37]的研究发现,深旋耕作处理的玉米在株高、LAI和光合生产能力方面均优于传统耕作,进而增加了产量。本研究结果显示,在相同水分条件下,深旋耕作较普通旋耕玉米产量提高了7.60%~21.40%,这主要归功于深旋耕作改善了盐碱地土壤水盐条件,提高了玉米的LAI和SPAD,促进了光合产物合成。此外,王旭敏等^[38]和李百凤等^[39]的研究表明,适当节水对玉米产量无显著影响,并可促使作物产生水分利用和生长的补偿效应。在本研究中,深旋耕作下W2滴灌定额处理产

量最佳,较其他处理提高了3.57%~19.81%,这可能是由于适当节水提高了玉米抗逆性,产生一定生长补充效应,从而促进了玉米的水分利用和产量形成。

4 结 论

深旋耕作与适当节水滴灌能抑制耕层土壤盐分表聚,并维持较高土壤含水量,提升玉米叶面积指数与叶绿素含量,提高玉米关键生育期叶片的SOD、POD和CAT等抗氧化酶活性,降低MDA含量,在一定程度上增强了玉米抗逆性,从而促进了产量提高。盐碱地深旋耕作下节水10%处理的玉米生理抗性和产量最高,可作为宁夏引黄灌区盐碱地玉米节水抑盐高产栽培的适宜调控措施。

参考文献 References

- [1] 朱志明,刘春光,高升,左佳伟,贾文,王彦琪.宁夏回族自治区玉米生产现状及单产提升路径分析[J].中国农技推广,2023,39(10):3-5
Zhu Z M, Liu C G, Gao S, Zuo J W, Jia W, Wang Y Q. Analysis on the current situation of maize production in Ningxia Hui autonomous region and the path of increasing yield per unit area [J]. *China Agricultural Technology Extension*, 2023, 39(10): 3-5 (in Chinese)
- [2] 徐洪艳.大面积的玉米连作问题值得注意[J].辽宁农业科学,2015(6):63-65
Xu H Y. The problem of continuous cropping of corn in a large area deserves attention [J]. *Liaoning Agricultural Sciences*, 2015(6): 63-65 (in Chinese)
- [3] 于丽娜,戈秋妹,任莹,韩欣苒,尹宝重.土壤耕作方式对冬小麦根系生理特性的影响[J].河北农业科学,2023,27(6):35-40
Yu L N, Ge Q M, Ren Y, Han X P, Yin B Z. Effects of soil tillage methods on physiological characteristics of root system of winter wheat [J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2023, 27(6): 35-40 (in Chinese)
- [4] Qin J T, Wang X S, Fan X C, Jiang M L, Lv M C. Whether increasing maize planting density increases the total water use depends on soil water in the 0-60 cm soil layer in the North China plain [J]. *Sustainability*, 2022, 14(10): 5848
- [5] 韦本辉,刘斌,甘秀芹,申章佑,胡泊,李艳英,吴延勇,陆柳英.粉垄栽培对水稻产量和品质的影响[J].中国农业科学,2012,45(19):3946-3954
Wei B H, Liu B, Gan X Q, Shen Z Y, Hu P, Li Y Y, Wu Y Y, Lu L Y. Effect of fenlong cultivation on yield and quality of rice [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(19): 3946-3954 (in Chinese)
- [6] Wei B H. Discussion on the construction of green agriculture "3+1" industry system using fenlong activated resources [J]. *Agricultural Science & Technology*, 2017, 18(2): 380-384
- [7] 白文斌,张建华,高振峰,郝建平.不同施肥与耕作方式对高粱-玉米轮作田杂草多样性影响[J].西北农业学报
Bai W B, Zhang J H, Gao Z F, Hao J P. Effects of different fertilization and tillage methods on weed diversity in sorghum-maize rotation field [J]. *Northwest Agricultural Journal*. 2023(9):1-14 (in Chinese)
- [8] 王玉凤,陈天宇,付健,薛盈文,杨克军.不同耕作方式对松嫩平原半干旱区玉米土壤生物特性影响[J].玉米科学,2023,31(3):95-103
Wang Y F, Chen T Y, Fu J, Xue Y W, Yang K J. Effects of different tillage methods on maize soil biological characteristics in semiarid area of Songnen Plain [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2023, 31(3): 95-103 (in Chinese)
- [9] 王立春,马虹,郑金玉.东北春玉米耕地合理耕层构造研究[J].玉米科学,2008,16(4):13-17
Wang L C, Ma H, Zheng J Y. Research on rational plough layer construction of spring maize soil in NorthEast China [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2008, 16(4): 13-17 (in Chinese)
- [10] 麻仲花.垂直深旋耕增施有机肥对盐碱地土壤质量及玉米生长的影响[D].银川:宁夏大学,2023
Ma Z H. Effects of vertical deep rotary tillage with organic fertilizer application on soil quality and maize growth in saline alkali land [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2023 (in Chinese)
- [11] 宋秀丽,林小娟,王冰雪,靳晓燕,庞爱国,于晓波,孙士明.不同种植方式对土壤理化性质及玉米生长的影响[J].黑龙江农业科学,2021(3):7-15
Song X L, Lin X J, Wang B X, Jin X Y, Pang A G, Yu X B, Sun S M. Effects of different planting methods on soil physical and chemical properties and maize growth [J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2021(3): 7-15 (in Chinese)
- [12] 刘丹,张霞,李军,王旭东.渭北旱塬农田不同耕作模式对土壤性状、玉米产量和水分利用效率的影响[J].应用生态学报,2018,29(2):573-582
Liu D, Zhang X, Li J, Wang X D. Effects of different tillage patterns on soil properties, maize yield and water use efficiency in Weibei Highland, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(2): 573-582 (in Chinese)
- [13] 王鸣燕,宿顺顺,冯浩,吴淑芳,胡亚瑾,陈霁菲.节水灌溉与有机肥配施对关中地区夏玉米氮肥利用的影响[J].玉米科学,2023,31(4):165-172
Wang M Y, Su S S, Feng H, Wu S F, Hu Y J, Chen J F. Effects of water-saving irrigation and combined application of organic fertilizer on nitrogen utilization of summer maize in Guanzhong area [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2023, 31(4): 165-172 (in Chinese)
- [14] 孟兆江,段爱旺,王晓森,高阳,申孝军.调亏灌溉对棉花根冠生长关系的影响[J].农业机械学报,2016,47(4):99-104
Meng Z J, Duan A W, Wang X S, Gao Y, Shen X J. Effect of regulated deficit irrigation on growth relation of root and shoot in cotton [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(4): 99-104 (in Chinese)
- [15] 王怀苹,杨明达,张素瑜,李帅,关小康,王同朝.不同节水灌溉方式对夏玉米生长、产量及水分利用的影响[J].作物杂志,2024(2):206-212
Wang H P, Yang M D, Zhang S Y, Li S, Guan X K, Wang T C. Effects of different water-saving irrigation modes on growth, yield, and water utilization of summer maize [J]. *Crops*, 2024(2): 206-212 (in Chinese)
- [16] 银敏华,李援农,周昌明,谷晓博,张天乐,杨丹,吴国军.调亏灌水和分蘖干扰对冬小麦生长的补偿效应[J].应用生态学报,2015,26(10):3011-3019
Yin M H, Li Y N, Zhou C M, Gu X B, Zhang T L, Yang D, Wu G J. Compensation effects of regulated deficit irrigation and tillering interference to winter wheat [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(10): 3011-3019 (in Chinese)
- [17] 白羿雄,姚晓华,姚有华,吴昆仑.适度水分亏缺管理提高青稞营养品质和环境效益[J].植物营养与肥料学报,2018,24(2):499-506

- Bai Y X, Yao X H, Yao Y H, Wu K L. Mild water deficit management to achieve high nutrition quality of hulless barley and environmental benefit [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(2): 499-506 (in Chinese)
- [18] 孙明伟, 徐月乔, 王贵, 孙伟. 松嫩草地两种生态型羊草根际效应和光合生理对干旱胁迫的响应[J]. 中国草地学报, 2021, 43(5): 8-17
- Sun M W, Xu Y Q, Wang G, Sun W. Responses of the rhizosphere effect and photosynthetic physiology of two ecotypes of *Leymus chinensis* to drought stress in Songnen grassland [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2021, 43(5): 8-17 (in Chinese)
- [19] 丁蓓蓓, 张雪靓, 赵振庭, 侯永浩. 华北平原限水灌溉条件下冬小麦产量及水分利用效率变化的Meta分析[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(12): 7-17
- Ding B B, Zhang X L, Zhao Z T, Hou Y H. Change in winter wheat yield and its water use efficiency as affected by limited irrigation in North China Plain: A meta-analysis [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2021, 40(12): 7-17 (in Chinese)
- [20] 邹琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000
- Zou Q. *Experimental Instruction of Plant Physiology* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000 (in Chinese)
- [21] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000
- Li H S. *Principles and Techniques of Plant Physiological Biochemical Experiment* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000 (in Chinese)
- [22] 王斌, 何文寿, 耿世杰. 粉垄耕作对土壤水分利用效率和马铃薯产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(21): 93-96
- Wang B, He W S, Geng S J. Effects of deep vertically rotary tillage on soil water use efficiency and potato yield [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2020, 48(21): 93-96 (in Chinese)
- [23] 曹明海, 刘洪光, 王刚, 冯进平, 徐亦彬, 雪宝. 不同粉垄深度和春灌水量对土壤水盐运移规律影响研究[J]. 节水灌溉, 2022(2): 13-20
- Cao M H, Liu H G, Wang G, Feng J P, Xu Y B, Xue B. Effects of different powder ridge depth and spring irrigation amount on soil water and salt transport [J]. *Water Saving Irrigation*, 2022(2): 13-20 (in Chinese)
- [24] Ramoliya P J, Patel H M, Pandey A N. Effect of salinisation of soil on growth and macro- and micro-nutrient accumulation in seedlings of *Acacia catechu* (Mimosaceae) [J]. *Annals of Applied Biology*, 2004, 144(3): 321-332
- [25] Li J, He C R, Tong W W, Zou Y M, Li D H, Zhang C, Xu W D. Tanshinone IIA blocks dexamethasone-induced apoptosis in osteoblasts through inhibiting Nox4-derived ROS production [J]. *International Journal of Clinical and Experimental Pathology*, 2015, 8(10): 13695-13706
- [26] 付海奇, 刘晓, 宋姝, 吕婉嘉, 杨永青. 次生代谢物调控植物抵抗盐碱胁迫的机制[J]. 植物生理学报, 2023, 59(4): 727-740
- Fu H Q, Liu X, Song S, Lv W J, Yang Y Q. Mechanisms of secondary metabolites regulating plant resistance to salinity and alkali stress [J]. *Plant Physiology Journal*, 2023, 59(4): 727-740 (in Chinese)
- [27] Grotto D, Maria L S, Valentini J, Paniz C, Schmitt G, Garcia S C, Pomblum V J, Rocha J B T, Farina M. Importance of the lipid peroxidation biomarkers and methodological aspects FOR malondialdehyde quantification [J]. *Química Nova*, 2009, 32(1): 169-174
- [28] 朱永波. 水分胁迫对不同玉米品种生理生化指标的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008
- Zhu Y B. Effects of water stress on physiological and biochemical indexes of different maize varieties [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2008 (in Chinese)
- [29] 付艳, 高树仁, 杨克军, 殷奎德. 盐胁迫对玉米耐盐系与盐敏感系苗期几个生理生化指标的影响[J]. 植物生理学报, 2011, 47(5): 459-462
- Fu Y, Gao S R, Yang K J, Yin K D. Effects of salt stress on several physiological and biochemical indicators in seedling of salt-tolerant line and salt-sensitive line of maize (*Zea mays* L.) [J]. *Plant Physiology Journal*, 2011, 47(5): 459-462 (in Chinese)
- [30] 孙国荣, 关旻, 阎秀峰. 盐胁迫对星星草幼苗保护酶系统的影响[J]. 草地学报, 2001, 9(1): 34-38
- Sun G R, Guan Y, Yan X F. Effect of Na_2CO_3 stress on defensive enzyme system of *Puccinellia tenuiflora* seedlings [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2001, 9(1): 34-38 (in Chinese)
- [31] 张仁和, 郑友军, 马国胜, 张兴华, 路海东, 史俊通, 薛吉全. 干旱胁迫对玉米苗期叶片光合作用和保护酶的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(5): 1303-1311
- Zhang R H, Zheng Y J, Ma G S, Zhang X H, Lu H D, Shi J T, Xue J Q. Effects of drought stress on photosynthetic traits and protective enzyme activity in maize seedling [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(5): 1303-1311 (in Chinese)
- [32] 王智威, 牟思维, 闫丽丽, 韩清芳, 杨宝平. 水分胁迫对春播玉米苗期生长及其生理生化特性的影响[J]. 西北植物学报, 2013, 33(2): 343-351
- Wang Z W, Mou S W, Yan L L, Han Q F, Yang B P. Effects of physiological and biochemical characteristics and growth under water stress in seedling of spring maize [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2013, 33(2): 343-351 (in Chinese)
- [33] 李静, 王洪章, 刘鹏, 张吉旺, 赵斌, 任佰朝. 夏玉米不同栽培模式花后叶片光合性能的差异[J]. 作物学报, 2021, 47(7): 1351-1359
- Li J, Wang H Z, Liu P, Zhang J W, Zhao B, Ren B Z. Differences in photosynthetic performance of leaves at post-flowering stage in different cultivation modes of summer maize (*Zea mays* L.) [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2021, 47(7): 1351-1359 (in Chinese)
- [34] 张俊杰, 陈金平, 汤钰镭, 张锐, 曹红章, 王丽娟, 马梦金, 王浩, 王泳超, 郭家萌, KRISHNA SV Jagadish, 杨青华, 邵瑞鑫. 花期前后干旱胁迫对复水后夏玉米光合特性与产量的影响[J]. 作物学报, 2023, 49(5): 1397-1409
- Zhang J J, Chen J P, Tang Y L, Zhang R, Cao H Z, Wang L J, Ma M J, Wang H, Wang Y C, Guo J M, Jagadish K, Yang Q H, Shao R X. Effects of drought stress before and after anthesis on photosynthetic characteristics and yield of summer maize after re-watering [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2023, 49(5): 1397-1409 (in Chinese)
- [35] 陈梦茹, 邢英英, 张帆, 邵雅婷, 付锦涛, 张香竹, 王秀康. 不同灌水定额下缓释氮肥与尿素混掺对玉米生长和产量及水肥利用效率的影响[J]. 西北农业学报, 2024, 33(7): 1235-1248
- Chen M R, Xing Y Y, Zhang F, Shao Y T, Fu J T, Zhang X Z, Wang X K. Effects of slow-release nitrogen fertilizer and urea blending on maize growth, yield and water-fertilizer use efficiency under different irrigation levels [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2024, 33(7): 1235-1248 (in Chinese)
- [36] 郭瑞, 田秀平, 杜锦, 马小俊, 杨雨欣. 水杨酸对盐胁迫下糯玉米幼苗生理和光合特性的影响[J]. 玉米科学, 2024, 32(2): 77-83
- Guo R, Tian X P, Du J, Ma X J, Yang Y X. Effects of salicylic acid on physiological and photosynthetic characteristics of waxy corn seedlings under salt stress [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2024, 32(2): 77-83 (in Chinese)
- [37] 靳晓敏, 杜军, 沈润泽, 沈振荣, 解艳玲, 王玉民, 韦本辉. 宁夏引黄灌区粉垄栽培对玉米生长和产量的影响[J]. 农业科学研究, 2013, 34(1):

50-53

Jin X M, Du J, Shen R Z, Shen Z R, Xie Y L, Wang Y M, Wei B H.

The effect of sumash-ridging cultivation technology on the growth and yield of corn in Yellow River irrigation district of Ningxia[J]. *Journal of Agricultural Sciences*, 2013, 34(1): 50-53 (in Chinese)

- [38] 王旭敏, 雒文鹤, 刘朋召, 张琦, 王瑞, 李军. 节水减氮对夏玉米干物质和氮素积累转运及产量的调控效应[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(15): 3183-3197

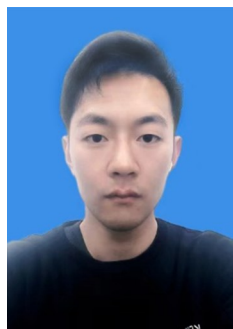
Wang X M, Luo W H, Liu P Z, Zhang Q, Wang R, Li J. Regulation

effects of water saving and nitrogen reduction on dry matter and nitrogen accumulation, transportation and yield of summer maize [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(15): 3183-3197 (in Chinese)

- [39] 李百凤, 冯浩, 吴普特. 作物非充分灌溉适宜土壤水分下限指标研究进展[J]. *干旱地区农业研究*, 2007, 25(3): 227-231

Li B F, Feng H, Wu P T. Studies on optimum low limits of soil moisture index for deficit irrigation of crops[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2007, 25(3): 227-231 (in Chinese)

责任编辑: 刘迎春



第一作者简介: 黄霖锋, 在读硕士研究生, 2023年9月至今就读于宁夏大学农艺与种业专业, 研究方向为作物高产栽培。参加国家重点研发计划项目(2021YFD1900603), 2024年获得宁夏大学硕士三等学业奖学金。



通讯作者简介: 刘吉利, 博士, 宁夏大学生态环境学院研究员, 博士生导师。主要从事盐碱地改良与作物逆境生理生态等方面的教学与研究工作。主持国家自然科学基金3项、国家重点研发计划子课题1项、宁夏重点研发计划项目1项、宁夏自然科学基金2项。登记科技成果6项, 获省部级奖励3项, 授权国家发明专利2项、实用新型专利4项, 参编专著2部, 发表论文30余篇。