

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2026.53071

减量 20%灌水与 25%有机肥替代化肥提高青贮玉米产量的光合特性

张鸿蓉 王菲儿 李盼 仇海龙 朱静 赵连豪 南运有 何蔚
樊志龙 胡发龙 柴强 殷文*

甘肃农业大学农学院 / 省部共建干旱生境作物学国家重点实验室, 甘肃兰州 730070

摘要: 针对西北绿洲灌区青贮玉米生产中存在水肥施用过量、资源浪费及产量低下等现象, 本研究旨在探究减量灌溉及适宜比例有机肥替代化肥协同调控青贮玉米产量的光合特性, 以期为西北干旱灌区青贮玉米高效生产配置适宜的水肥管理技术。本研究开始于 2020 年, 在甘肃省武威市开展二因素田间裂区试验, 主因素为 2 个灌水水平, 分别为常规灌水减量 20%灌水(I1, 324 mm)、常规灌水(I2, 405 mm); 副因素为 5 个不同施肥配比, 分别为全施化学氮肥(F1)、25%有机肥替代化学氮肥(F2)、50%有机肥替代化学氮肥(F3)、75%有机肥替代化学氮肥(F4)、全施有机肥(F5)。通过测定 2022—2024 年青贮玉米叶面积指数(LAI)、光合势(LAD)、光合特征参数、叶绿素荧光参数及鲜草与干草产量等指标, 探究减量灌水与适宜比例有机肥替代化肥对青贮玉米产量的影响。研究表明, 25%有机肥替代化学氮肥较全施化肥显著提高青贮玉米鲜草和干草产量, 且效果优于其他等氮替代处理; 减量 20%灌水结合 25%有机肥替代化学氮肥(I1F2)较常规灌水结合全施化学氮肥(I2F1)分别提高青贮玉米鲜草和干草产量 5.0%和 13.8%。减量灌水与有机无机肥配合施用有利于增强青贮玉米产量及光合特性, 其中以减量 20%灌水结合 25%有机肥替代化学氮肥调控优势突出。与对照 I2F1 相比, I1F2 青贮玉米平均叶面积指数(MLAI)、总光合势(TLAD)和 PSII 电子传递速率(ETR)分别提高 11.5%、40.8%和 17.2%; 净光合速率(P_n)提升 15.9%, 胞间 CO_2 浓度(C_i)降低 12.6%, 气孔导度(G_s)提高 7.8%, 非调节性能量耗散(Y(NO))降低 14.7%。减量 20%灌水与 25%有机肥替代化学氮肥提高青贮玉米产量主要归因于 LAI、LAD、SPAD、ETR、 P_n 和 G_s 的协同提升而增强叶片光合特性。因此, 减量 20%灌水结合 25%有机肥替代化肥可通过优化青贮玉米光合特性进而提高产量, 是西北灌区实现节水增产的高效水肥策略。

关键词: 青贮玉米; 产量; 光合特性; 减量灌水; 有机肥替代化肥

Photosynthetic characteristics of 20% reduced irrigation combined with 25% organic substitution for chemical fertilizer in increasing silage maize yield

Zhang Hong-Rong, Wang Fei-Er, Li Pan, Qiu Hai-Long, Zhu Jing, Zhao Lian-Hao, Nan Yun-You, He Wei, Fan Zhi-Long, Hu Fa-Long, Chai Qiang, and Yin Wen*

College of Agronomy, Gansu Agricultural University / State Key Laboratory of Aridland Crop Science, Lanzhou 730070, Gansu, China

Abstract: In response to the issues of excessive irrigation and fertilizer use, resource waste, and low yield in silage maize production in the oasis irrigation regions of Northwest China, this study investigates the photosynthetic mechanisms underlying yield improvement through reduced irrigation combined with optimized organic substitution for mineral fertilizer. The objective is to

本研究由国家重点研发计划项目(2023YFD1900405), 甘肃省高校产业支撑计划项目(2025CYZC-037), 甘肃省科技计划项目(25JRRA347, 24ZDNA008), 国家自然科学基金项目(32372238, 32460547)和大学生创新创业训练计划项目(202510733001)资助。

This study was supported by the National Key Research and Development Program of China (2023YFD1900405), the Industrial Support Project of Educational Committee of Gansu Province (2025CYZC-037), the Science and Technology Program in Gansu Province (25JRRA347, 24ZDNA008), the National Natural Science Foundation of China (32372238, 32460547), and the College Students' Innovation and Entrepreneurship Training Program Project (202510733001).

* 通信作者(Corresponding author): 殷文, E-mail: yinwen@gsau.edu.cn

第一作者联系方式: E-mail: 15769354121@163.com

Received (收稿日期): 2025-09-18; Accepted (接受日期): 2025-11-18; Published online (网络出版日期): 2025-12-08.

URL: <https://link.cnki.net/urlid/11.1809.S.20251205.1557.002>

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

provide a scientifically based irrigation and nutrient management strategy for efficient silage maize cultivation in arid irrigated areas. A two-factor split-plot field experiment was conducted in Wuwei city, Gansu province, beginning in 2020. The irrigation treatments included I1 (20% reduction in conventional irrigation, 324 mm) and I2 (conventional irrigation, 405 mm), while the fertilization treatments comprised five levels: F1 (100% chemical nitrogen fertilizer), F2 (25% organic substitution), F3 (50% organic substitution), F4 (75% organic substitution), and F5 (100% organic fertilizer). From 2022 to 2024, data were collected on leaf area index (LAI), leaf area duration (LAD), photosynthetic parameters, chlorophyll fluorescence, and yields of fresh forage (FY) and hay (HY) to evaluate treatment effects. Results showed that substituting 25% of chemical nitrogen with organic fertilizer (I1F2) significantly improved both fresh and hay yields, outperforming other substitution ratios. Compared with I2F1, I1F2 increased fresh and hay yields by 5.0% and 13.8%, respectively. This treatment also enhanced mean LAI, total LAD, and PSII electron transport rate (ETR) by 11.5%, 40.8%, and 17.2%, respectively. Furthermore, net photosynthetic rate (P_n) increased by 15.9%, intercellular CO_2 concentration (C_i) decreased by 12.6%, stomatal conductance (G_s) improved by 7.8%, and non-regulated energy dissipation (Y(NO)) declined by 14.7%. The yield increase was primarily attributed to synergistic improvements in LAI, LAD, SPAD, ETR, P_n , and G_s , leading to enhanced leaf photosynthetic performance. Therefore, a 20% reduction in irrigation combined with 25% organic substitution for mineral nitrogen represents an effective strategy for improving silage maize yield and water use efficiency in northwest irrigated regions.

Keywords: silage maize; yield; photosynthetic characteristics; reduced irrigation; organic fertilizer replacing chemical fertilizer

青贮玉米是全球范围内广泛种植的高产饲料作物, 因其具备高能量、高消化率和易储存的优点, 成为畜牧业的重要粗饲料来源^[1]。在我国畜牧业持续扩张的背景下, 青贮玉米需求刚性增长已成为维护国家饲料安全战略的关键支撑^[2]。西北干旱灌区年均降雨量少且水资源浪费严重, 过量水肥投入不仅加剧资源浪费, 还易引发土壤退化及环境污染等问题, 间接导致作物产量下降^[3]。因此, 探索适宜的灌溉量及有机肥替代措施, 有助于缓解西北干旱灌区水肥资源矛盾与提升青贮玉米产量, 对推动干旱区农牧业绿色转型具有重要实践价值。

青贮玉米产量提升受品种选择、耕作制度、栽培技术等多种农艺措施影响, 其中灌溉和施肥最为关键^[4-6]。研究表明, 施加氮肥可有效提高青贮玉米生育期内叶绿素含量和干物质积累量, 从而实现增产^[7]。然而, 过量施肥易导致土壤健康程度下降, 同时引发环境污染及粮食产量下降等一系列生产生态问题^[8]。有机肥其养分释放缓慢而持久的肥力特性有助于延长玉米叶片功能期, 增强光合碳同化能力, 为产量形成提供持续的光合产物供应^[9]。现有研究证实, 无机肥速效养分供应可满足作物生育前期营养需求^[10], 有机肥投入有助于持续改善土壤理化性质, 进一步增强其水肥保蓄能力^[11]。此外, 有机无机肥配施可有效增加玉米叶面积指数, 提高叶片相对叶绿素含量, 延长叶片光合有效期, 强化光合性能^[12]。与此同时, 合理灌溉可有效提高玉米产量和水氮利用效率, 对产量提升有明显正效应^[13], 而过度灌溉则会导致资源浪费及作物减产。适度减量灌溉在实现节水的同时, 有助于协调作物营养生长与生殖生长, 促进碳同化产物向籽粒运移^[14]; 此外, 适度水

分亏缺可诱导作物气孔调节, 有助于提高水分利用效率^[15]。由此可见, 减量灌溉与有机肥替代部分化学氮肥二者均对玉米增产增效具有积极调控效应。当前水肥协同调控作物光合特性及产量提升的研究已较为普遍, 现有研究主要集中于灌水或施肥单一因素对青贮玉米产量的单一影响, 但减量灌水与有机肥替代化肥二者交互对青贮玉米产量提升的光合特性的研究相对较少。因此, 本研究通过设置减量灌水与有机无机肥等氮配施田间试验, 探究不同水肥管理模式对青贮玉米叶面积指数、光合势、叶绿素含量、叶绿素荧光参数及产量的影响, 明确青贮玉米光合特性和产量对水肥协同调控的响应, 旨在构建适于西北绿洲灌区, 集节水节肥与优质高产于一体的青贮玉米栽培技术体系。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验开始于 2020 年, 在绿洲农业试验基地(甘肃省武威市凉州区黄羊镇, 37°30'N, 103°5'E)进行, 2022—2024 年进行数据采集。该地区年平均 $\geq 10^\circ C$ 积温约 2985 $^\circ C$, 年日照时数约 2945 h, 年平均太阳辐射 6000 MJ m^{-2} , 属温带大陆性干旱气候。0~30 cm 土层土壤全氮、有机质、容重和 pH 分别为 0.75 g kg^{-1} 、13.80 g kg^{-1} 、1.57 g cm^{-3} 和 8.2, 土壤类型为灌漠土。2022—2024 年青贮玉米生育期气温和降雨情况如图 1 所示。

1.2 试验设计

本试验采用二因素裂区设计, 共设置 10 个处理, 3 次重复。主区: 灌水水平 I1 (常规灌水减量 20%灌水, 324 mm) 和 I2 (常规灌水, 405 mm); 副区: F1 (全

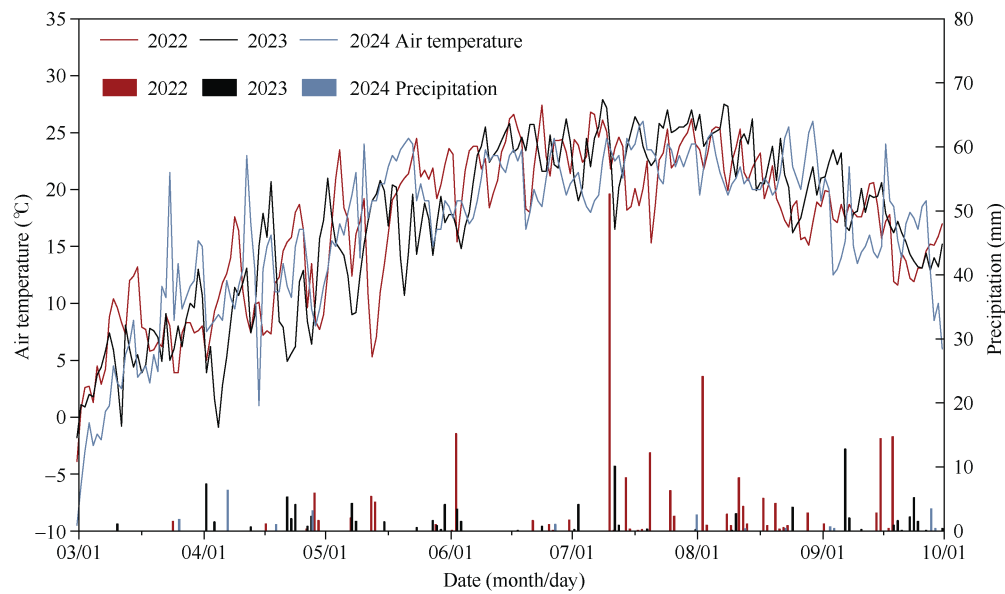


图 1 青贮玉米生长季节的气温与降雨量
Fig. 1 Air temperature and precipitation during the growing season of silage maize

施化学氮肥)、F2 (25%有机肥替代化学氮肥)、F3 (50%有机肥替代化学氮肥)、F4 (75%有机肥替代化学氮肥)、F5 (全施有机肥), 每个小区面积为 31.50 m² (7.8 m×4.5 m)。

青贮玉米品种采用“陇青贮 1 号”, 覆盖无色透明地膜, 种植密度为 8.25 万株 hm⁻², 穴播种植, 40 cm 等行距种植, 株距为 30 cm, 2022—2024 年播种日期分别为 4 月 23 日、4 月 15 日、4 月 15 日, 收获日期分别为 8 月 25 日、8 月 21 日、8 月 21 日。灌溉方式为膜下滴灌, 前一年冬季统一灌水 120 mm 用于保墒, 青贮玉米各生育时期灌水量如表 1 所示。

试验采用等氮代替原则, 氮肥总量为 360 kg hm⁻², 磷肥(P₂O₅)总量为 180 kg hm⁻² (包含有机肥替代处理中含有的 P₂O₅), 施用有机肥料中有机质为 31.02%, N+P₂O₅+K₂O = 1.64%+1.39%+3.59%; 化肥为尿素 (N ≥ 46%)和过磷酸钙(P₂O₅ ≥ 16%)。该地区土壤富

钾, 不考虑钾肥投入。有机肥与磷肥均做基肥, 化学氮肥基肥与大喇叭口期追肥分别占总施氮量的 40%和 60%。基肥为播种前一次性均匀撒施于地面, 后旋耕机旋入 15 cm 耕层。追肥采用穴施方式, 玉米植株 10 cm 处使用穴播枪打深度为 10 cm 孔后, 施肥并填土。青贮玉米试验处理代码及施肥量如表 2 所示。

表 1 青贮玉米不同生育时期的灌水量
Table 1 Irrigation amounts at different growth stages of silage maize (mm)

时期 Date	减量 20%灌水 Reduced irrigation by 20%	常规灌水 Conventional irrigation
拔节期 Jointing stage	72	90
大喇叭口期 Big flare stage	60	75
吐丝期 Silking stage	72	90
灌浆期 Filling stage	60	75
乳熟期 Doughing stage	60	75

表 2 青贮玉米试验处理代码及施肥量
Table 2 Treatment codes and fertilization rates of silage maize (kg hm⁻²)

处理 Treatment	施氮量 N application rate			
	全生育期 Whole growth period	化学氮肥 Application of chemical nitrogen fertilizer		有机肥 Application ratio of organic fertilizer
		基肥 Base fertilizer	大喇叭口期追肥 Trumpet period	
F1	360	144	216	0
F2	360	108	162	90
F3	360	72	108	180
F4	360	36	54	270
F5	360	0	0	360

1.3 测定指标及计算方法

1.3.1 青贮玉米产量 当籽粒乳熟线位于整个籽粒 1/2 位置时, 各小区选取长势均匀且能代表小区整体状况的 6 m² 样方, 刈割(避开样方边行)称取鲜重。后将其放入网袋后自然风干, 风干 14 d 后在 65℃ 烘箱烘干(≥ 48 h)至恒重, 得出干草产量。

1.3.2 叶面积指数(LAI)和光合势(LAD) 叶面积指数: 利用长宽系数法计算, 在青贮玉米拔节期、大喇叭口期、抽雄期、吐丝期、灌浆期和蜡熟期随机选取 10 株, 测量其完全展开绿叶叶片长(cm)和最大宽(cm)。

$$\text{叶面积指数: LAI} = 0.75 \times P \times \sum_{i=1}^n (a_i \times b_i) \quad (1)$$

式中, 0.75 为校正系数, P 为青贮玉米基本苗数, a_i 、 b_i 分别为绿叶长、宽, i 为叶片个数。

$$\text{光合势: LAD} = \frac{(\text{LAI}_2 + \text{LAI}_1)(T_2 - T_1)}{2} \quad (2)$$

式中, LAI₁ 与 LAI₂ 指青贮玉米在 T₁ 与 T₂ 时期的叶面积指数。

1.3.3 叶绿素相对含量(SPAD) 在晴朗无风的早上 09:00—11:30 进行, 选取各小区长势均匀具有代表性的 5 株青贮玉米, 测定时期包括拔节期、大喇叭口期、抽雄期、吐丝期、灌浆期和蜡熟期, 每个处理重复 3 次。使用 SPAD-502 型叶绿素仪测定青贮玉米最新完全展开叶和穗位叶片基部、中部和顶部三部分, 并计算其平均值, 所选取植株的叶片应当为无病虫害、无机械损伤的健康叶片。

1.3.4 光合气体交换参数 选择晴朗天气上午 09:00—11:30, 采用 LI-6800XT 型光合仪(LI-COR, Lincoln, 美国)在小区内选取 3 株有代表性的青贮玉米, 在穗位叶中部分别在青贮玉米拔节期、大喇叭口期、抽雄期、吐丝期、灌浆期和蜡熟期测定净光

合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、胞间 CO₂ 浓度(C_i)和气孔导度(G_s)取其平均值。

1.3.5 叶绿素荧光动力学参数 采用 FMS-II 脉冲调制式叶绿素荧光仪(PAM-2500, Heinz Walz, 德国)测定青贮玉米稳态荧光(F)、光下最大荧光(F_m')以及光下最小荧光(F_0'), 并计算其相关参数。

1.4 数据统计与分析

采用 Excel 2021 整理、计算和分析试验数据, 使用 SPSS 26.0 进行方差分析(ANOVA)、显著性检验(Duncan, $P < 0.05$)、相关性分析(Person), 利用 Origin 2022 制图。

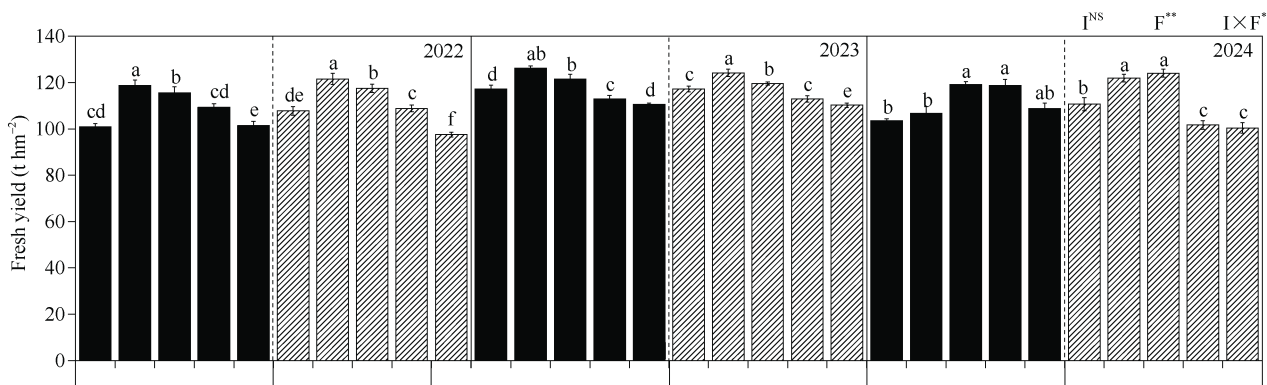
2 结果与分析

2.1 不同灌水量和有机肥替代化学氮肥对青贮玉米产量的影响

灌水处理对青贮玉米的鲜、干草产量无显著差异, 而施肥处理及灌水×施肥对鲜、干草产量影响显著(图 2)。3 个试验年度内, F2 (25%有机肥替代化学氮肥)、F3 (50%有机肥替代化学氮肥)相较于 F1 (全施化学氮肥)处理青贮玉米鲜草产量分别提高 13.0% 和 9.5%, 干草产量分别提高 9.5% 和 9.0%。与对照 I2F1 (常规灌溉及全施化学氮肥)相比, I1F2 (减量 20%灌溉与 25%有机肥替代化学氮肥)处理青贮玉米干草产量增加 13.8%, I1F3 (减量 20%灌溉与 50%有机肥替代化学氮肥)青贮玉米鲜、干草产量分别提高 6.1%、10.5%。说明减量 20%灌水结合 25%有机肥替代有助于提升青贮玉米产量。

2.2 减量灌水与有机肥替代化肥对青贮玉米叶面积指数的影响

灌水处理对青贮玉米全生育期的平均叶面积指数(MLAI)无显著差异, 施肥处理及灌水×施肥则对 MLAI 影响显著(图 3)。F2 和 F3 青贮玉米 MLAI 较



(图 2)

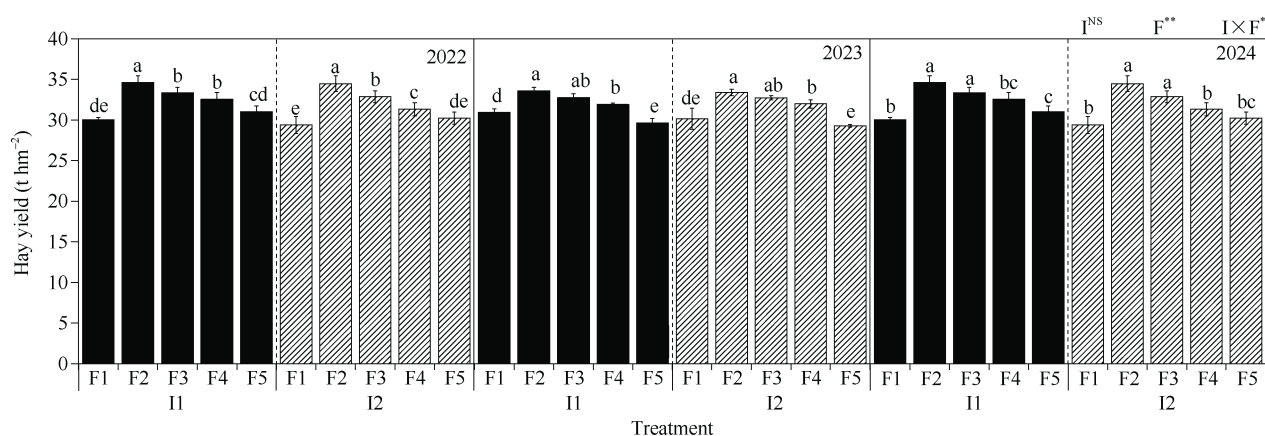


图 2 不同水肥处理下青贮玉米鲜、干草产量

Fig. 2 Fresh and hay yield of silage maize under different irrigation and fertilizer treatments

I1 和 I2 分别表示减量 20% 灌水和常规灌水。F1–F5 分别表示全施化学氮肥、25% 有机肥替代化学氮肥、50% 有机肥替代化学氮肥、75% 有机肥替代化学氮肥和全施有机肥。不同字母表示同一年度中不同处理差异显著 ($P < 0.05$)。*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; NS: 无显著差异。I1 and I2 represent 20% reduced irrigation and conventional irrigation, respectively. F1–F5 represent: F1, full application of chemical nitrogen fertilizer; F2, 25% organic fertilizer substitution for chemical nitrogen; F3, 50% organic fertilizer substitution for chemical nitrogen; F4, 75% organic fertilizer substitution for chemical nitrogen; F5, full application of organic fertilizer. Different letters indicate significant differences among treatments within the same year ($P < 0.05$). *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; NS: no significant difference.

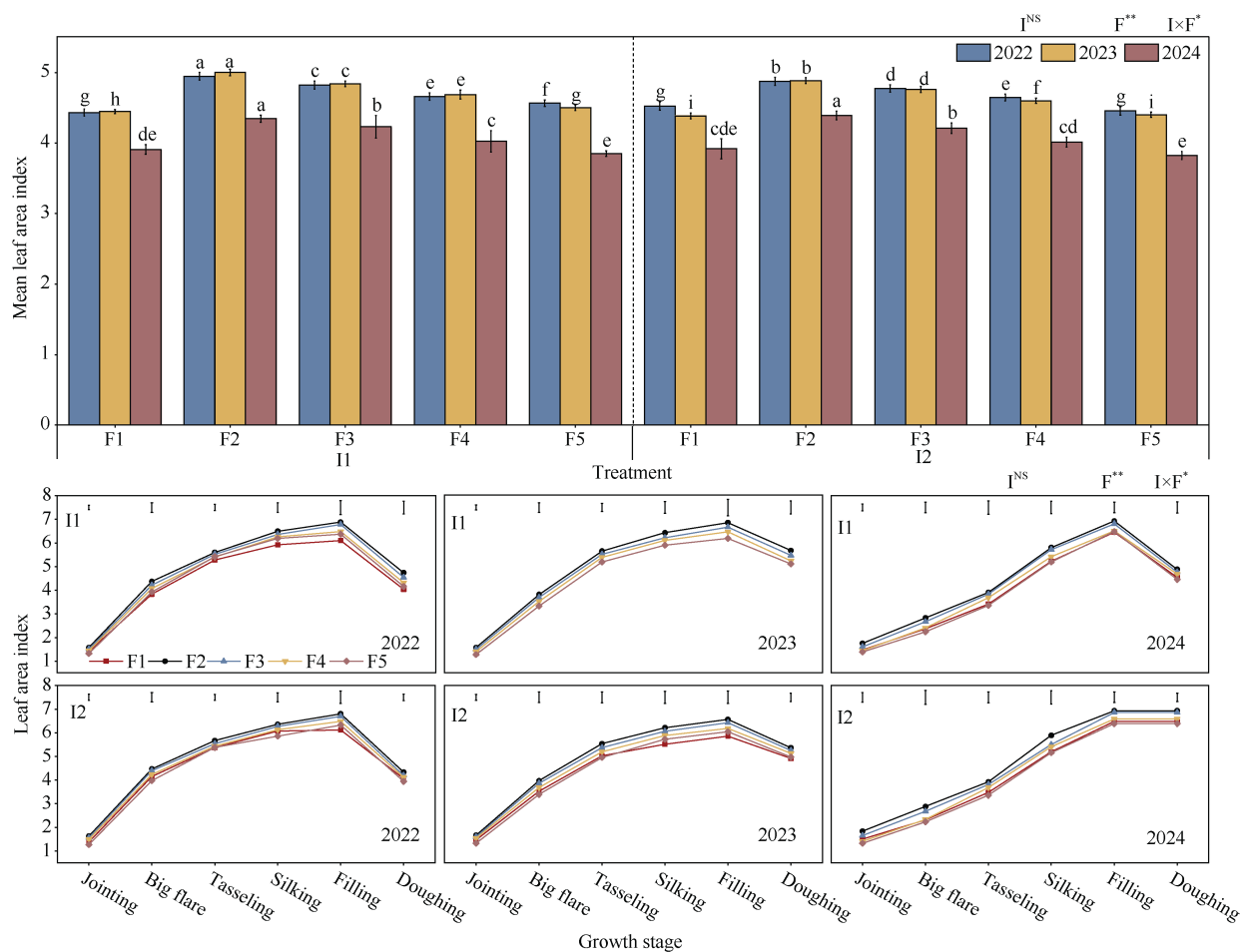


图 3 不同水氮处理下青贮玉米叶面积指数

Fig. 3 Leaf area index of silage maize under various irrigation and fertilizer treatments

处理同图 2。不同字母表示同一年度中不同处理差异显著 ($P < 0.05$)。*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; NS: 无显著差异。

Treatments are the same as those given in Fig. 2. Different letters indicate significant differences among treatments within the same year ($P < 0.05$). *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; NS: no significant difference.

F1 分别提高了 10.7%和 8.3%。与 I2F1 处理相比, I1F2 和 I1F3 处理青贮玉米 MLAI 分别提高 11.5%和 7.8%。说明减量 20%灌水结合 25%有机肥替代可有效提升青贮玉米的平均叶面积指数, 增强冠层光能捕获能力, 优化碳同化效率, 进而有效提升其光合速率。

青贮玉米的叶面积指数(LAI)在灌浆期升至最高, 整个生育期内表现为先上升后下降的单峰变化趋势。灌水处理对青贮玉米叶面积指数无显著影响, 施肥处理及灌水×施肥对 LAI 有显著影响(图 3)。与 F1 相比, F2 和 F3 在拔节期到灌浆期 LAI 分别提高 10.9%和 8.9%。与 I2F1 相比, I1F2 和 I1F3 在拔节期到灌浆期 LAI 分别提高 19.0%和 10.8%。说明减量 20%灌水结合 25%有机肥替代可有效调控青贮玉米全生育期叶面积指数动态, 增强群体冠层光捕获能力, 进而优化植株光合作用性能。

2.3 减量灌水与有机肥替代化肥对青贮玉米光合势的影响

灌水处理对青贮玉米全生育期内总光合势(TLAD)

影响显著, 施肥处理及灌水×施肥对 TLAD 均有显著影响(表 3); 与 I2 相比, I1 提高 TLAD 为 15.8%。与 F1 相比, F2 和 F3 分别提高 TLAD 为 21.5%和 16.6%。相较于 I2F1, I1F2 和 I1F3 分别提高 TLAD 为 40.8%和 34.0%。

从青贮玉米全生育期光合势(LAD)动态变化来看, 光合势呈先升后降趋势, 吐丝期至灌浆期间呈现最高峰。灌水处理、施肥处理及灌水×施肥对 LAD 有显著影响。与 F1 相比, F2 与 F3 在青贮玉米拔节期到抽雄期、抽雄期到灌浆期、灌浆期到乳熟期 LAD 分别提高 13.0%和 8.8%、10.1%和 7.4%、11.8%和 9.4%。相较于 I2F1, I1F2 和 I1F3 在青贮玉米拔节期到开花期、开花期到灌浆期、灌浆期到乳熟期 LAD 分别提高 10.3%和 6.3%、11.2%和 8.8%、12.5%和 9.6%。这表明减量 20%灌水配合 25%有机肥替代可有效优化青贮玉米全生育期光合势的动态分布, 有利于维持青贮玉米生育后期较大的光合源。

表 3 不同水氮处理下青贮玉米光合势
Table 3 Leaf area duration of silage maize under various irrigation and fertilizer treatments

年份 Year	灌水水平 Irrigation level	有机无机肥配施比例 Application ratio of organic-inorganic fertilizer	拔节期– 大喇叭口期 Jointing–big flare	大喇叭口期– 抽雄期 Big flare–tasseling	抽雄期– 吐丝期 Tasseling–silking	吐丝期– 灌浆期 Silking–filling	灌浆期– 乳熟末期 Filling–doughing	总和 Total
2022	I1	F1	39.28 c	68.29 d	95.19 d	120.24 d	86.38 d	375.23 e
		F2	44.59 a	74.80 a	102.77 a	133.69 a	98.99 a	523.06 a
		F3	42.90 a	73.04 b	101.05 b	131.39 b	96.41 b	497.68 b
		F4	41.39 b	71.08 c	99.09 c	127.35 c	91.69 c	433.45 c
		F5	39.40 c	70.05 e	98.64 d	125.64 d	89.64 d	402.21 d
	I2	F1	41.47 e	71.41 e	97.25 c	121.89 d	86.60 d	377.81 d
		F2	45.75 a	76.06 a	102.25 a	131.62 a	94.63 a	406.41 a
		F3	44.64 b	74.47 b	100.40 b	129.66 b	92.56 b	398.67 b
		F4	43.01 c	72.60 c	98.35 c	126.15 c	90.04 c	388.21 c
		F5	39.32 d	70.14 d	95.53 d	121.88 d	87.23 d	370.39 e
2023	I1	F1	35.70 d	64.72 d	94.06 d	116.87 d	92.35 d	401.54 d
		F2	40.42 a	71.05 a	102.73 a	132.88 a	106.55 a	516.96 a
		F3	38.89 b	69.07 b	99.77 b	128.87 b	103.15 b	492.52 b
		F4	36.93 c	66.89 c	97.74 c	125.81 c	99.61 c	426.99 c
		F5	34.58 e	63.93 e	94.31 e	120.93 e	96.02 d	392.48 e
	I2	F1	37.46 d	64.15 b	89.59 c	113.78 e	91.59 e	362.17 d
		F2	42.26 a	71.33 a	99.90 a	127.76 a	101.40 a	399.49 a
		F3	40.94 b	69.30 a	97.25 b	124.96 b	99.26 b	389.61 b
		F4	39.16 c	66.56 b	94.21 c	120.75 c	96.17 c	376.21 c
		F5	35.38 e	62.59 b	90.77 c	117.68 d	93.63 d	363.92 d

(续表 3)

年份 Year	灌水水平 Irrigation level	有机无机肥配施比例 Application ratio of organic-inorganic fertilizer	拔节期– 大喇叭口期 Jointing–big flare	大喇叭口期– 抽雄期 Big flare–tasseling	抽雄期– 吐丝期 Tasseling–silking	吐丝期– 灌浆期 Silking–filling	灌浆期– 乳熟末期 Filling–doughing	总和 Total
2024	I1	F1	28.79 c	43.29 d	73.36 d	116.74d	93.46c	354.42 c
		F2	34.33 a	50.47 a	82.51 a	127.28 a	100.33 a	454.16 a
		F3	32.06 b	48.73 b	81.14 b	125.26 b	98.39 b	431.84 b
		F4	28.87 c	45.67 c	77.42 c	119.34 c	95.18 c	366.48 c
		F5	27.20 d	41.95 e	72.67 e	116.73 e	92.91 d	333.89 d
	I2	F1	28.60 c	43.47 c	73.72 c	116.73 b	93.75 b	321.54 c
		F2	35.38 a	51.04 a	83.45 a	128.25 a	100.48 a	364.51 a
		F3	32.45 b	48.72 ab	79.24 ab	123.56 ab	98.74 ab	347.26 ab
		F4	28.09 c	45.15 bc	77.29 c	119.93 ab	95.53 b	331.22 bc
		F5	26.72 c	41.92 c	72.36 c	115.46 ab	92.43 b	330.68 bc

显著性(P 值) Significance (P-value)

灌水水平 Irrigation level (I)	**	NS	**	**	**	**
有机无机肥配施比例 Application ratio of organic-inorganic fertilizer (F)	**	**	**	**	**	**
灌水水平×有机无机肥配施比例 I×F	**	*	**	**	**	**

处理同图 2。数据后不同字母表示同一年度中不同处理差异显著($P < 0.05$)。*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; NS: 无显著差异。
Treatments are the same as those given in Fig. 2. Different letters following the data indicate significant differences among treatments within the same year ($P < 0.05$). *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; NS: no significant difference.

2.4 减量灌水与有机肥替代化肥对青贮玉米叶片相对叶绿素含量的动态影响

灌水处理对青贮玉米叶片相对叶绿素含量 (SPAD)无显著差异, 施肥处理及灌水×施肥对青贮

玉米 SPAD 影响显著(图 4)。与 F1 相比, F2 在青贮玉米拔节期到吐丝期、吐丝期到乳熟期的 SPAD 分别提高 9.2%和 7.7%, F3 在拔节期到大喇叭口期、灌浆期到乳熟期的 SPAD 分别提高 6.4%和 5.1%。

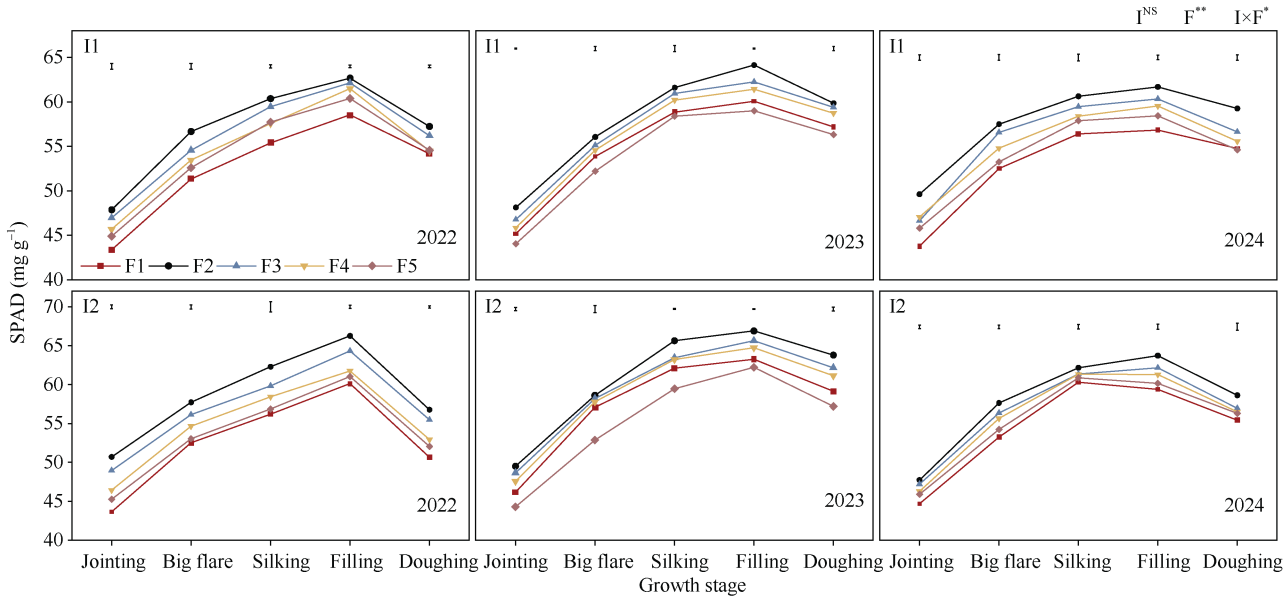


图 4 不同水氮处理下青贮玉米相对叶绿素含量
Fig. 4 SPAD values of silage maize under various irrigation and fertilizer treatments
处理同图 2。*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; NS: 无显著差异。
Treatments are the same as those given in Fig. 2. *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; NS: no significant difference.

与 I2F1 相比, I1F2 在青贮玉米拔节期到灌浆期、灌浆期到乳熟期的 SPAD 分别提高 9.4%和 9.1%, I1F3 在青贮玉米拔节期到吐丝期、乳熟期到灌浆末期的 SPAD 分别提高 7.1%和 6.0%。结果表明, 减量 20% 灌水结合 25%有机肥替代能够增强青贮玉米的光能利用, 延长其光合作用持续时间, 并促进灌浆阶段的干物质积累。

2.5 减量灌水与有机肥替代化肥对青贮玉米气体交换参数的影响

灌水处理对青贮玉米气体交换参数无显著差异, 施肥处理及灌水×施肥对气体交换参数均影响显著

(表 4)。与 F1 相比, F2 和 F3 青贮玉米净光合速率(P_n) 分别提高 15.1%和 8.7%, 气孔导度(G_s)分别提高 9.7%和 5.8%, 胞间 CO_2 浓度(C_i)分别降低 11.7%和 7.9%。与 F1 相比, G_s 在 F2 处理下提高了 6.1%。与 I2F1 相比, I1F2 和 I1F3 分别提高青贮玉米 P_n 为 15.9%和 9.3%, 增加蒸腾速率(T_r)为 10.8%和 6.9%, 降低 C_i 为 12.6%和 9.2%。与 I2F1 相比, I1F2 处理下的 G_s 提高 7.8%。说明在减量 20%灌水条件下, 25% 有机肥替代通过改善养分供应, 优化青贮玉米的光合气体交换参数, 提升其光合性能, 从而为其高产奠定基础。

表 4 不同灌溉与施肥处理下青贮玉米光合参数
Table 4 Photosynthetic parameters of silage maize under various irrigation and fertilizer treatments

年份 Year	灌水水平 Irrigation level	有机无机肥配施比例 Application ratio of organic-inorganic fertilizer	净光合速率 P_n ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	蒸腾速率 T_r ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	气孔导度 G_s ($\text{mmol mol}^{-2} \text{s}^{-1}$)	胞间 CO_2 浓度 C_i ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
2022	I1	F1	40.29 de	6.67 d	0.411 cd	259.71 a
		F2	50.68 a	7.09 ab	0.457 a	236.22 c
		F3	46.10 b	6.85 bcd	0.426 bc	250.38 b
		F4	41.92 cd	6.77 cd	0.426 bcd	254.31 ab
		F5	40.51 de	6.68 d	0.411 cd	256.33 ab
	I2	F1	39.86 de	6.67 d	0.407 d	259.91 a
		F2	50.63 a	7.18 a	0.460 a	223.21 d
		F3	45.83 b	6.94 abc	0.433 b	241.00 c
		F4	43.37 c	6.81 cd	0.429 b	257.21 ab
		F5	38.60 e	6.64 c	0.415 bcd	258.94 a
2023	I1	F1	42.19 e	8.35 d	0.495 cd	284.81 b
		F2	46.96 a	9.68 a	0.563 a	239.49 f
		F3	45.76 b	9.22 b	0.546 a	253.66 def
		F4	44.65 c	8.65 c	0.519 b	266.58 cd
		F5	41.54 d	8.17 d	0.489 cd	277.12 bc
	I2	F1	41.43 d	8.08 d	0.471 d	306.16 a
		F2	45.99 b	9.29 b	0.541 a	248.79 ef
		F3	44.71 c	8.79 c	0.520 b	260.93 de
		F4	42.86 d	8.34 d	0.506 bc	277.19 bc
		F5	39.49 e	7.70 e	0.474 d	290.47 b
2024	I1	F1	40.31 d	7.15 e	0.361 ab	249.03 b
		F2	44.27 a	7.60 a	0.328 d	234.54 cd
		F3	42.07 bc	7.43 bc	0.330 d	233.61 d
		F4	39.30 e	7.22 de	0.350 bc	250.18 b
		F5	38.27 f	7.13 e	0.315 de	246.59 b
	I2	F1	41.21 cd	7.24 d	0.373 a	246.63 b
		F2	43.80 a	7.62 a	0.323 d	236.77 cd

(续表 4)

年份 Year	灌水水平 Irrigation level	有机无机肥配比比例 Application ratio of organic-inorganic fertilizer	净光合速率 P_n ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	蒸腾速率 T_r ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	气孔导度 G_s ($\text{mmol mol}^{-2} \text{s}^{-1}$)	胞间 CO_2 浓度 C_i ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
2024	I2	F3	42.26 b	7.50 b	0.335 cd	239.13 c
		F4	40.40 d	7.37 c	0.365 ab	247.53 b
		F5	37.68 f	7.14 e	0.302 e	258.47 a
显著性(P 值) Significance (P -value)						
灌水水平 Irrigation level (I)			NS	NS	NS	NS
有机无机肥配比比例 Application ratio of organic-inorganic fertilizer (F)			**	**	*	**
灌水水平×有机无机肥配比比例 I×F			*	*	*	*

处理同图 2。数据后不同字母表示同一年度中不同处理差异显著($P < 0.05$)。*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; NS: 无显著差异。
Treatments are the same as those given in Fig. 2. Different letters following the data indicate significant differences among treatments within the same year ($P < 0.05$). *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; NS: no significant difference.

2.6 不同灌水量和有机肥替代化学氮肥对青贮玉米叶绿素荧光参数的影响

灌水处理对青贮玉米叶绿素荧光参数无显著影响, 施肥处理及灌水×施肥对 PSII 电子传递速率(PSII electron transfer rate, ETR)、最大光化学效率(potential maximum photochemical efficiency, F_v/F_m)、调节性能量耗散(regulatory energy dissipation, Y(NPQ))、非调节性能量耗散(non-regulatory energy dissipation, Y(NO))以及热耗散(non-photochemical quenching, NPQ)均有显著影响(表 5)。与 F1 相比, F2

和 F3 处理下青贮玉米的 ETR、Y(NPQ)、NPQ 分别提高 17.2%和 10.3%、9.6%和 6.9%、20.0%和 8.9%, Y(NO)分别降低 17.1%和 7.7%。与 I2F1 相比, I1F2 和 I1F3 处理下青贮玉米的 ETR、Y(NPQ)分别提高 23.2%和 15.9%、6.6%和 6.1%。I1F2 较 I2F1, Y(NO)降低 14.7%, NPQ 提高 8.4%。说明 25%有机肥等氮替代无机肥可有效优化青贮玉米光能分配, 降低非调节性能量耗散, 其中减量 20%灌水条件结合 25%有机肥替代可实现青贮玉米 PSII 电子传递速率最大化, 并维持较高的热耗散。

表 5 灌溉及施肥对青贮玉米叶绿素荧光参数的影响
Table 5 Effects of irrigation and fertilizer treatments on chlorophyll fluorescence parameters in silage maize

年份 Year	灌水水平 Irrigation level	有机无机肥配比 Application ratio of organic-inorganic fertilizer	PSII 电子传递速率 ETR ($\mu\text{mol electrons m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	潜在最大 光化学效率 F_v/F_m	调节性能量耗散 Y(NPQ) ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	非调节性能量 耗散 Y(NO)	热耗散 NPQ (s^{-1})
2023	I1	F1	49.197 ef	0.696 e	0.259 de	0.330 ab	0.627 f
		F2	59.992 a	0.772 a	0.284 b	0.294 c	0.706 b
		F3	55.873 bc	0.740 bc	0.278 bc	0.322 b	0.663 de
		F4	51.757 de	0.715 de	0.249 ef	0.318 ab	0.674 cde
		F5	50.626 def	0.697 e	0.244 f	0.345 a	0.615 f
	I2	F1	478.708 f	0.705 de	0.256 def	0.315 c	0.666 cde
		F2	57.196 ab	0.753 ab	0.318 a	0.282 d	0.750 a
		F3	53.254 cd	0.727 cd	0.285 b	0.307 bc	0.704 bc
		F4	50.141 def	0.728 cd	0.265 cd	0.301 bc	0.690 bcd
		F5	50.564 def	0.695 e	0.228 g	0.332 c	0.636 ef
2024	I1	F1	59.676 d	0.826 e	0.257 ab	0.256 a	0.724 de
		F2	69.117 a	0.881 a	0.254 ab	0.189 de	1.010 b
		F3	65.555 b	0.835 bc	0.258 ab	0.223 bc	0.827 c
		F4	62.014 c	0.794 de	0.238 a	0.235 abc	0.852 c
		F5	60.526 cd	0.818 e	0.241 c	0.263 ab	0.668 e

(续表 5)

年份 Year	灌水水平 Irrigation level	有机无机肥配比 Application ratio of organic-inorganic fertilizer	PSII 电子传递速率 ETR ($\mu\text{mol electrons}$ $\text{m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	潜在最大 光化学效率 F_v/F_m	调节性能量耗散 Y(NPQ) ($\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	非调节性能量 耗散 Y(NO)	热耗散 NPQ (s^{-1})
I2		F1	57.105 f	0.870 de	0.248 b	0.251 cd	0.871 c
		F2	64.239 b	0.954 ab	0.262 ab	0.191 e	1.163 a
		F3	60.992 cd	0.879 cd	0.271 a	0.213 e	1.030 b
		F4	59.450 de	0.797 cd	0.265 bc	0.236 e	0.999 b
		F5	59.020 ef	0.745 e	0.227 bc	0.254 e	0.796 cd
显著性(P 值) Significance (P-value)							
灌水水平 Irrigation level (I)			NS	NS	NS	NS	NS
有机无机肥配比 Application ratio of organic-inorganic fertilizer (F)			**	**	**	**	**
灌水水平×有机无机肥配比 I×F			NS	*	*	*	*

处理同图 2。数据后不同字母表示同一年度中不同处理差异显著($P < 0.05$)。*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; NS: 无显著差异。
Treatments are the same as those given in Fig. 2. Different letters following the data indicate significant differences among treatments within the same year ($P < 0.05$). *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; NS: no significant difference. ETR: PSII electron transfer rate; F_v/F_m : potential maximum photochemical efficiency; Y(NPQ): regulatory energy dissipation; Y(NO): non-regulatory energy dissipation; NPQ: non-photochemical quenching.

2.7 不同灌水量和有机肥替代化学氮肥与青贮玉米产量及光合特性的相关性关系

2.7.1 相关性分析 通过对青贮玉米光合特性及其鲜、干草产量进行相关性分析(图5)。青贮玉米鲜草产量(fresh grass yield, FY)与干草产量(hay yield, HY)、叶面积指数(LAI)、PSII电子传递速率(ETR)、潜在最大光学效率(F_v/F_m)、调节性能量耗散(Y(NPQ))与净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)及气孔导度(G_s)之间均呈显著正相关关系, 但与非调节性能量耗散(Y(NO))和热耗散(NPQ)呈显著负相关关系。青贮玉米干草产量(HY)与LAI、光合势(LAD)、ETR、 F_v/F_m 、Y(NPQ)、 P_n 、 T_r 、 G_s 呈显著正相关关系, 但与胞间 CO_2 浓度(C_i)呈显著负相关关系。说明青贮玉米产量主要受叶面积指数及其气体交换参数影响, 通过增加作物受光面积提高光合速率, 进而促进干物质积累。因此, 减量20%灌水结合25%有机肥替代能够提高青贮玉米叶片相对叶绿素含量与潜在最大光化学效率, 增强光能捕获能力; 同时通过增加气孔导度并降低胞间 CO_2 浓度, 有效提升碳同化效率, 促进光合产物积累, 从而有效提高青贮玉米鲜草和干草产量。

2.7.2 主成分分析 对青贮玉米12个光合指标进行主成分分析(图5), 主成分1 (64.2%)和主成分2 (17.0%), 累计贡献率达81.2%。主成分1代表叶面积指数(LAI)、光合势(LAD)、PSII电子传递速率(ETR)、

潜在最大光化学效率(F_v/F_m)、热耗散(NPQ)、气孔导度(G_s)、净光合速率(P_n)、鲜草产量(FY)和干草产量(HY)。主成分2代表相对叶绿素含量(SPAD)、调节性能量耗散(Y(NPQ))、胞间 CO_2 浓度(C_i)和非调节性能量耗散(Y(NO))。其中, LAI、 P_n 和 G_s 为直接影响青贮玉米鲜、干草产量的主要参数。

3 讨论

3.1 不同灌水量和有机肥替代化学氮肥对青贮玉米产量的影响

鉴于青贮玉米具有生物量高、营养丰富及可溶性碳水化合物与蛋白质含量高等特性, 可有效优化反刍动物饲料配比^[16], 而较高的青贮玉米产量是农户选择的首要目标^[17]。本研究发现, 减量20%灌水可提高青贮玉米鲜草及干草产量。这可能是因为合理减量灌水可诱导青贮玉米产生适度的生理胁迫, 从而优化其形态建成, 促使叶片中合成的糖类等光合产物持续高效地输送至茎秆, 最终增加干草产量^[18]。本研究中, 有机肥和化肥配合施用可有效提高青贮玉米鲜草及干草产量, 在25%有机肥替代比例下作物增产效果最佳。可能是由于施用有机肥促进了叶片生长和分化, 为青贮玉米增产奠定了基础^[19]。研究发现, 减量灌溉20%条件下, 有机肥等氮量替代化学氮肥对青贮玉米鲜草及干草产量的提升效果优于常规灌水与全施化学氮肥, 这可能是因为:

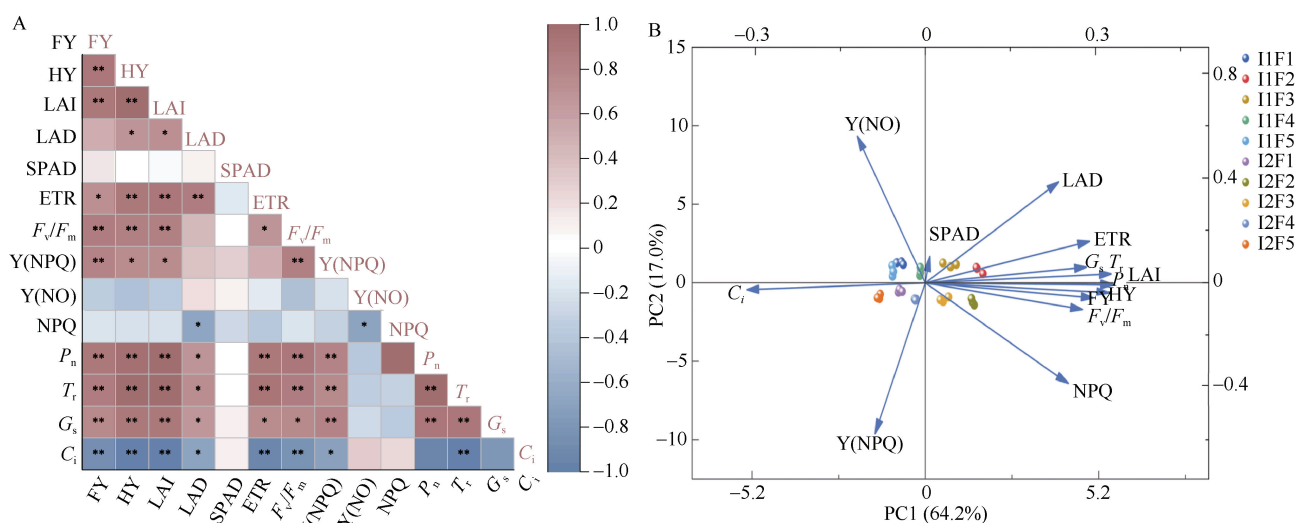


图 5 不同水肥处理下青贮玉米产量和光合特性的相关分析(A)及主成分分析(B)

Fig. 5 Correlation analysis (A) and principal component analysis (B) of yield and photosynthetic characteristics in silage maize under different irrigation and fertilizer treatments

处理同图 2。FY、HY、LAI、LAD、SPAD、ETR、 F_v/F_m 、Y(NPQ)、Y(NO)、NPQ、 P_n 、 T_r 、 G_s 和 C_i 分别代表青贮玉米鲜草产量、干草产量、叶面积指数、光合势、相对叶绿素含量、PSII 电子传递速率、潜在最大光化学效率、调节性能量耗散、非调节性能量耗散、热耗散、净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间 CO_2 浓度。显著性检验 ($P < 0.05$), *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$ 。

Treatments are the same as those given in Fig. 2. FY, HY, LAI, LAD, SPAD, ETR, F_v/F_m , Y(NPQ), Y(NO), NPQ, P_n , T_r , G_s , and C_i represent fresh grass yield, hay yield, leaf area index, leaf area duration, chlorophyll concentration, PSII electron transfer rate, potential maximum photochemical efficiency, regulatory energy dissipation, non-regulatory energy dissipation, non-photochemical quenching, net photosynthetic rate, transpiration rate, stomatal conductance, and intercellular CO_2 concentration, respectively. Significance level: *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$.

(1) 适量灌水可通过调节植物体内生理生化过程, 优化根系构型, 从而提升作物水分吸收速率和有效缓解因水分胁迫引起的光合抑制^[20]; (2) 合理配施有机肥有助于提升土壤有机质含量, 增强土壤酶活性, 延缓叶片衰老, 从而提高青贮玉米干物质积累效率^[21]; (3) 适宜水肥管理可通过水肥互作效应提高作物水肥利用效率, 促进光合产物持续高效积累, 增加青贮玉米鲜草和干草产量^[22]。因此, 通过减量 20% 灌溉与 25% 有机肥替代化学氮肥进行水肥调控的协同作用, 可促进作物的保水保肥实现青贮玉米鲜干草产量提升。

3.2 不同灌水量和有机肥替代化学氮肥对青贮玉米光合源与气体交换参数的影响

叶面积指数和光合势可反映青贮玉米冠层光能利用能力, 光合源大小主要由叶面积指数、净光合速率等光合指标来衡量^[23]。本研究发现, 减量 20% 灌水降低青贮玉米光合势。这可能是因为干旱胁迫抑制青贮玉米气孔导度, 阻碍 CO_2 交换^[24]。本研究中, 有机肥和化肥配合使用可提高青贮玉米叶面积指数、光合势及相对叶绿素含量, 其中以 25% 有机肥替代化学氮肥等氮配施效果最佳。这可能是因为

有机肥含氮、磷、钾等营养元素能够通过促进植物内源激素合成进而调控细胞分裂与分化, 较高水平的内源激素有利于玉米叶片分化与扩展, 进而扩大其光合源^[25]。本研究发现, 25% 有机肥替代化学氮肥可提高青贮玉米净光合速率并降低胞间 CO_2 浓度。这是由于有机肥的施用可提高 CO_2 固定的关键酶 Rubisco 酶活性, 进而增大光合速率、促进同化物积累^[26]。研究发现, 减量 20% 灌溉与 25% 有机肥替代化学氮肥可提高青贮玉米平均叶面积指数、总光合势、相对叶绿素含量, 同时该水肥处理也可提高净光合速率、蒸腾速率。其原因在于: (1) 有机肥中含有参与叶绿素合成的 Mg^{2+} 、 Cu^{2+} 等金属离子, 同时也是电子传递体的重要成分, 有利于酶促反应的进行^[9]; (2) 适宜比例的有机无机肥等氮配施有助于改善土壤肥力特性, 促进作物地上与地下部分生长发育, 从而提升青贮玉米光合特性^[27]; (3) 有机肥中的养分经微生物矿化自有机态向无机态转换并释放的过程缓慢而持久, 可为作物提供长期而稳定的养分供应, 可满足作物生长发育后期养分需求, 补偿青贮玉米因缺水导致的光合速率降低^[28-29]。因此, 减量 20% 灌溉与 25% 有机肥配合施用可有效提高青贮

玉米叶片光合特性。

3.3 不同灌水量和有机肥替代化学氮肥对青贮玉米叶绿素荧光参数的影响

叶绿素荧光指叶片中叶绿素在光照下释放的荧光,反映植物叶绿体所呈现的状态和光合作用的效率。在环境胁迫下,光合作用多个关键过程所受抑制可通过叶绿素荧光诱导动力学变化直观体现^[30]。本研究发现,减量 20%灌水可维持青贮玉米具有较高的 PSII 电子传递速率、潜在最大光化学效率和调节性能量耗散量子产量。可能是由于适度的水分胁迫激活了光保护机制,从而有效防止 PSII 反应中心发生光抑制维持其功能保持稳定,作物可以将大部分过剩能量以热能的形式耗散,以适应水分胁迫对作物的伤害^[31-32]。本研究中,有机肥和化肥配合施用能够提高青贮玉米 PSII 电子传递速率、调节性能量耗散量子产量和热耗散。这可能是由于有机肥中含有的众多营养元素有利于合成促进 PSII 构象稳定的 D1 蛋白,D1 蛋白是 PSII 反应中心的基本框架,不仅能为各种辅助因子提供结合位点,还可维持 PSII 反应中心构象的稳定^[33]。同时,有机肥有利于类囊体膜质子梯度形成,其不仅为叶绿体内 ATP 合成提供动力,还可诱导依赖叶黄素循环的热耗散形成从而触发 NPQ 光保护机制^[34-35]。本研究中,减量 20%灌溉与 25%有机肥配合施用可以提升青贮玉米 PSII 电子传递速率、调节性能量耗散量子产量和热耗散,使潜在最大光化学效率保持相对稳定。这可能是由于:(1) 适量减灌可使叶片保持较强的渗透能力有助于叶片维持气孔开放,使卡尔文循环持续运行不断消耗 ATP 和 NADPH,从而实现高 PSII 电子传递速率^[36];(2) 有机肥与无机氮肥配施可协同调控养分释放过程,提升作物对土壤养分的吸收与利用效率^[37];(3) 有机肥配合施用使作物养分充足,增强光合电子传递速率^[38]。因此,减量 20%灌溉与 25%有机肥配合施用有利于增强青贮玉米光合特性,减弱其光合性能损伤,是提高或维持叶绿素荧光参数相对稳定的基础。

4 结论

25%有机肥替代化学氮肥较全施化肥有效提高青贮玉米鲜草和干草产量,且效果优于其他等氮替代处理。减量 20%灌水与 25%有机肥替代化学氮肥较常规灌水全施化肥分别提高青贮玉米鲜草和干草产量为 5.0%和 13.8%。这主要是由于减量 20%灌水

结合 25%有机肥替代无机氮肥可提高青贮玉米全生育期平均叶面积指数、总光合势,增大生育后期叶绿素含量,提高净光合速率、气孔导度,降低胞间 CO₂ 浓度;有效提高 PSII 电子传递速率、潜在最大光化学效率、调节性能量耗散量子产量,降低非调节性能量耗散量子产量,提高热耗散。因此,减量 20%灌水结合 75%化学氮肥与 25%有机肥配合施用是西北绿洲灌区青贮玉米节水增产的有效水肥管理措施。

References

- [1] 李智贤,陈佳钰,鲁泽让,等. 不同施肥方式对青贮玉米生长及品质的影响. 中国土壤与肥料, 2024(8): 188–197.
Li Z X, Chen J Y, Lu Z R, et al. Effects of different fertilization methods on the growth and nutrient utilization of silage maize. Soil Fert Sci China, 2024(8): 188–197 (in Chinese with English abstract).
- [2] 受娜,高玮,沈禹颖,等. 不同施氮量对青贮玉米产量及水分利用效率的影响. 草业科学, 2021, 38: 1351–1361.
Shou N, Gao W, Shen Y Y, et al. Effects of different nitrogen application rates on yield and water use efficiency of silage maize. Pratac Sci, 2021, 38: 1351–1361 (in Chinese with English abstract).
- [3] Wang L P, Yin W, Li P, et al. No tillage with plastic re-mulching enhances yield stability and maintains high water productivity of maize by improving water eco-physiology and root traits in northwest oasis regions. Agric Water Manag, 2025, 318: 109723.
- [4] 齐帅,秦伟娜,焦婷,等. 河西走廊灌区不同青贮玉米品种生理特性、产量及水分利用效率评价. 草原与草坪, 2025, 45(3): 100–108.
Qi S, Qin W N, Jiao T, et al. Evaluation on physiological characteristics, yield and water use efficiency for different silage maize varieties in irrigation area of Hexi Corridor. Grassland Turf, 2025, 45(3): 100–108 (in Chinese with English abstract).
- [5] 杨相昆,张占琴,田海燕,等. 保护性耕作对北疆麦后复种青贮玉米田地温和作物生长的影响. 干旱地区农业研究, 2015, 33(5): 52–57.
Yang X K, Zhang Z Q, Tian H Y, et al. Effects of different tillage managements on soil temper and corn growth cultivated after wheat harvest in the reclamation region of Northern Xinjiang. Agric Res Arid Areas, 2015, 33(5): 52–57 (in Chinese with English abstract).
- [6] 张兰,宋谦,马淑梅,等. 覆膜栽培对不同品种青贮玉米生产性能和营养品质的影响. 草地学报, 2025, 33: 2033–2040.
Zhang L, Song Q, Ma S M, et al. Effects of film mulching cultivation on productive performance and nutritional quality of different silage maize varieties. Acta Agrest Sin, 2025, 33: 2033–2040 (in Chinese with English abstract).
- [7] 罗海强,李珩,张楠海,等. 播期对宁夏引黄灌区不同品种青贮玉米光能利用及生物产量的影响. 干旱地区农业研究, 2024, 42(5): 97–108.
Luo H Q, Li H, Zhang N H, et al. Effects of sowing date on light use efficiency and biological yield of different varieties of silage

- maize in Ningxia Yinhuang irrigation area. *Agric Res Arid Areas*, 2024, 42(5): 97–108 (in Chinese with English abstract).
- [8] 王逸筠, 赵文栋, 孙泽强, 等. 有机肥替代对鲁西北轻度盐碱地土壤性状和小麦、玉米产量的影响. *山东农业科学*, 2023, 55(1): 93–99.
Wang Y J, Zhao W D, Sun Z Q, et al. Effects of organic manure substitution on soil properties and yield of wheat and maize in lightly salinized land in northwest Shandong province. *Shandong Agric Sci*, 2023, 55(1): 93–99 (in Chinese with English abstract).
- [9] 吴霞玉, 李盼, 韦金贵, 等. 减量灌水及有机无机肥配施对西北灌区玉米光合生理、籽粒产量及品质的影响. *作物学报*, 2024, 50: 1065–1079.
Wu X Y, Li P, Wei J G, et al. Effect of reduced irrigation and combined application of organic and chemical fertilizers on photosynthetic physiology, grain yield and quality of maize in northwestern irrigation areas. *Acta Agron Sin*, 2024, 50: 1065–1079 (in Chinese with English abstract).
- [10] 邓浩亮, 潘小番, 兰雪梅, 等. 水氮互作对玉米和大豆带状复合种植模式下大豆光合特性、籽粒产量及品质的影响. *西北农业学报*, 2025, 34: 592–605.
Deng H L, Pan X F, Lan X M, et al. Effects of water-nitrogen interactions on photosynthetic characteristics, grain yield and quality of soybean under maize-soybean strip intercropping system. *Acta Agric Boreali-Occident Sin*, 2025, 34: 592–605 (in Chinese with English abstract).
- [11] 陈倩, 谢军红, 李玲玲, 等. 不同比例有机肥替代化肥对玉米生长及水分利用效率的影响. *干旱地区农业研究*, 2021, 39(6): 162–170.
Chen Q, Xie J H, Li L L, et al. Effects of different proportions of organic fertilizer substitutes for chemical fertilizer on growth characteristics and water use efficiency of maize. *Agric Res Arid Areas*, 2021, 39(6): 162–170 (in Chinese with English abstract).
- [12] 白春生, 范虹, 李波, 等. 等氮量有机肥替代化肥对绿洲灌区糯玉米光合特性及品质的影响. *干旱地区农业研究*, 2024, 42(6): 121–130.
Bai C S, Fan H, Li B, et al. Effects of equal nitrogen organic fertilizer substitution of chemical fertilizer on photosynthetic characteristics and quality of waxy maize in oasis irrigation areas. *Agric Res Arid Areas*, 2024, 42(6): 121–130 (in Chinese with English abstract).
- [13] 李佳, 王义, 肖蓉, 等. 不同灌溉施肥方式对夏玉米产量和水氮利用的影响. *山东农业科学*, 2024, 56(2): 104–110.
Li J, Wang Y, Xiao R, et al. Effects of different irrigation and fertilization modes on yield and water and nitrogen utilization of summer maize. *Shandong Agric Sci*, 2024, 56(2): 104–110 (in Chinese with English abstract).
- [14] 王永亮, 胥子航, 李申, 等. 不同覆盖措施对土壤水热状况及春玉米产量和水分利用效率的影响. *作物学报*, 2024, 50: 1312–1324.
Wang Y L, Xu Z H, Li S, et al. Effects of different mulching measures on moisture and temperature of soil and yield and water use efficiency of spring maize. *Acta Agron Sin*, 2024, 50: 1312–1324 (in Chinese with English abstract).
- [15] 王岩, 白春生, 李波, 等. 覆膜免耕和灌水量对西北绿洲灌区玉米产量及光合特性的影响. *作物学报*, 2025, 51: 755–770.
Wang Y, Bai C S, Li B, et al. Effects of no-tillage with plastic film and the amount of irrigation water on yield and photosynthetic characteristics of maize in oasis irrigation area of Northwest China. *Acta Agron Sin*, 2025, 51: 755–770 (in Chinese with English abstract).
- [16] 蒋丛泽, 受娜, 高玮, 等. 陇东旱塬区不同青贮玉米品种生产性能和营养品质综合评价. *草业学报*, 2023, 32(7): 216–228.
Jiang C Z, Shou N, Gao W, et al. A multivariate evaluation of production performance and nutritional quality of different varieties of silage maize in the dry plateau area of Longdong. *Acta Pratac Sin*, 2023, 32(7): 216–228 (in Chinese with English abstract).
- [17] 韦文华, 李盼, 邵冠贵, 等. 西北灌区青贮玉米产量及品质对减量灌水与有机无机肥配施的响应. *中国农业科学*, 2025, 58: 1521–1534.
Wei W H, Li P, Shao G G, et al. Response of silage maize yield and quality to reduced irrigation and combined organic-inorganic fertilizer in northwest irrigation areas. *Sci Agric Sin*, 2025, 58: 1521–1534 (in Chinese with English abstract).
- [18] 豆静静, 郑志伟, 王义坤, 等. 夏玉米光合产物分配及生物量的动态模拟研究. *山东农业科学*, 2023, 55(4): 42–49.
Dou J J, Zheng Z W, Wang Y K, et al. Dynamic simulation of photosynthate distribution parameters and biomass in summer maize. *Shandong Agric Sci*, 2023, 55(4): 42–49 (in Chinese with English abstract).
- [19] 朱元刚, 董树亭, 张吉旺, 等. 种植方式对夏玉米光合生产特征和光温资源利用的影响. *应用生态学报*, 2010, 21: 1417–1424.
Zhu Y G, Dong S T, Zhang J W, et al. Effects of cropping patterns on photosynthesis characteristics of summer maize and its utilization of solar and heat resources. *Chin J Appl Ecol*, 2010, 21: 1417–1424 (in Chinese with English abstract).
- [20] 杨晓青. 不同类型冬小麦品种根系特性及其与 WUE 的关系研究. 西北农林科技大学硕士学位论文, 陕西杨凌, 2004.
Yang X Q. Study on the Relations between Roots Characteristics and WUE of Different Type Winter Wheat Varieties. MS Thesis of Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi, China, 2004 (in Chinese with English abstract).
- [21] 程红玉, 汤振东, 雷玉明, 等. 有机肥替代部分化肥对青贮玉米产量、品质及土壤肥力的影响. *草地学报*, 2025, 33: 1702–1712.
Cheng H Y, Tang Z D, Lei Y M, et al. Effects of organic fertilizer partially substituting chemical fertilizer on yield, quality and soil fertility of silage maize. *Acta Agrest Sin*, 2025, 33: 1702–1712 (in Chinese with English abstract).
- [22] 陈桂平, 李盼, 邵冠贵, 等. 减量灌水与有机无机肥配施对青贮玉米吐丝期后叶片持绿特性的调控作用. *中国农业科学*, 2025, 58: 1381–1396.
Chen G P, Li P, Shao G G, et al. The regulatory effect of reduced irrigation and combined Organic-Inorganic fertilizer application on stay-green characteristics in silage maize leaves after tasseling stage. *Sci Agric Sin*, 2025, 58: 1381–1396 (in Chinese with English abstract).
- [23] 孙颖琦, 王钰文, 范晓庆, 等. 青贮玉米与饲用谷子间作对产量相关性状的影响. *草业科学*, 2023, 40: 3138–3149.
Sun Y Q, Wang Y W, Fan X Q, et al. Effects of silage maize and feeding millet intercropping on their yield. *Pratac Sci*, 2023, 40:

- 3138–3149 (in Chinese with English abstract).
- [24] 王久龙, 王振华, 李文昊, 等. 施氮量对复播青贮玉米光合特性和产量的影响. 干旱地区农业研究, 2017, 35(5): 250–255.
Wang J L, Wang Z H, Li W H, et al. Effects of nitrogen application rate on photosynthetic characteristics and yield of silage maize. Agric Res Arid Areas, 2017, 35(5): 250–255 (in Chinese with English abstract).
- [25] 冯志威, 杨艳君, 郭平毅, 等. 谷子光合特性及产量最优的氮磷肥水平与细胞分裂素 6-BA 组合研究. 植物营养与肥料学报, 2016, 22: 634–642.
Feng Z W, Yang Y J, Guo P Y, et al. Optimum combining rate of N and P fertilizer with 6-BA for highest photosynthetic efficiency and yield in foxtail millet. J Plant Nutr Fert, 2016, 22: 634–642 (in Chinese with English abstract).
- [26] 闫恒宇, 李朝霞, 李玉斌. 高温对玉米生长的影响及中国耐高温玉米筛选研究进展. 植物学报, 2024, 59: 1007–1023.
Yan H Y, Li Z X, Li Y B. Research progress on heat stress impact on maize growth and heat-tolerant maize screening in China. Bull Bot, 2024, 59: 1007–1023 (in Chinese with English abstract).
- [27] 李升, 尹娟, 杨莹攀, 等. 不同灌溉定额下复合寡糖对青贮玉米养分、酶活性及产量品质的影响. 节水灌溉, 2024(7): 16–23.
Li S, Yin J, Yang Y P, et al. Effects of complex oligosaccharides on nutrients, enzyme activities, yield and quality of silage corn under different irrigation quotas. Water Sav Irrig, 2024(7): 16–23 (in Chinese with English abstract).
- [28] 邱纹, 姚霄宇, 陆虎华, 等. 不同施肥处理对春播鲜食糯玉米产量、品质和氮素吸收利用的影响. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2023, 44(6): 26–35.
Qiu W, Yao X Y, Lu H H, et al. Effects of different fertilization treatments on yield, quality, and nitrogen absorption and utilization of spring-sown fresh waxy maize. J Yangzhou Univ Agric (Life Sci Edn), 2023, 44(6): 26–35 (in Chinese with English abstract).
- [29] 单宁, 田军仓, 闫新房, 等. 水肥热耦合对滴灌青贮玉米生长、光合及产量的影响. 节水灌溉, 2021(9): 12–17.
Shan N, Tian J C, Yan X F, et al. Effects of water, fertilizer and heat coupling on growth, photosynthesis and yield of silage maize under drip irrigation. Water Sav Irrig, 2021(9): 12–17 (in Chinese with English abstract).
- [30] 崔晓伟, 高健, 张志坚, 等. 5 种地被竹叶绿素荧光特性研究. 江西农业大学学报, 2011, 33: 726–730.
Cui X W, Gao J, Zhang Z J, et al. Chlorophyll fluorescence characteristics of five dwarf bamboos. Acta Agric Univ Jiangxiensis, 2011, 33: 726–730 (in Chinese with English abstract).
- [31] He J, Chee C W, Goh C J. ‘Photoinhibition’ of *Heliconia* under natural tropical conditions: the importance of leaf orientation for light interception and leaf temperature. Plant Cell Environ, 1996, 19: 1238–1248.
- [32] Valladares F, Pearcy R W. Interactions between water stress, sun-shade acclimation, heat tolerance and photoinhibition in the sclerophyll *Heteromeles arbutifolia*. Plant Cell Environ, 1997, 20: 25–36.
- [33] Bredenkamp G J, Baker N R. Temperature-sensitivity of D1 protein metabolism in isolated *Zea mays* chloroplasts. Plant Cell Environ, 1994, 17: 205–210.
- [34] Livingston A K, Cruz J A, Kohzuma K, et al. An Arabidopsis mutant with high cyclic electron flow around photosystem I (hcef) involving the NADPH dehydrogenase complex. Plant Cell, 2010, 22: 221–233.
- [35] 李绍长, 胡昌浩, 龚江, 等. 低磷胁迫对磷不同利用效率玉米叶绿素荧光参数的影响. 作物学报, 2004, 30: 365–370.
Li S C, Hu C H, Gong J, et al. Effects of low phosphorus stress on the chlorophyll fluorescence of different phosphorus use efficient maize. Acta Agron Sin, 2004, 30: 365–370 (in Chinese with English abstract).
- [36] 顾万荣, 李召虎, 翟志席, 等. DCPTA 和 DTA-6 对大豆叶片光合及叶绿素荧光特性的调控. 大豆科学, 2008, 27: 777–782.
Gu W R, Li Z H, Zhai Z X, et al. Regulation of DCPTA and DTA-6 on photosynthesis and chlorophyll fluorescence parameters of soybean leaves. Soybean Sci, 2008, 27: 777–782 (in Chinese with English abstract).
- [37] 杨凯, 杜延全, 张西兴, 等. 有机物料与化肥配施提升土壤肥力、养分利用和玉米产量研究. 中国土壤与肥料, 2024(4): 76–82.
Yang K, Du Y Q, Zhang X X, et al. Experimental study on combined application of organic materials and chemical fertilizers to improve soil fertility, nutrient utilization and maize yield. Soil Fert Sci China, 2024(4): 76–82 (in Chinese with English abstract).
- [38] 王科捷, 杨乔乔, 王佳, 等. 水氮协同对玉米光合特性及产量的影响. 中国土壤与肥料, 2023(7): 48–55.
Wang K J, Yang Q Q, Wang J, et al. Synergistic effects of water and nitrogen on photosynthetic characteristics and yield of maize. Soil Fert Sci China, 2023(7): 48–55 (in Chinese with English abstract).