

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2026.53073

干旱灌区有机肥替代部分化肥促进甜玉米产量提升的关键机制

蔡宏伟 于爱忠* 姜科强 王鹏飞 王玉珑 霍建喆 庞小能 尹波
尚永盼

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

摘要: 解析干旱灌区有机肥替代部分化肥对甜玉米产量的影响及其关键机制, 以期为该区优化甜玉米高产技术提供理论依据。田间试验于 2023—2024 年在西北绿洲灌区进行, 设置 5 个有机肥等氮替代化肥处理梯度, 分别为: CK (有机肥替代 0% 化学氮肥)、M1 (有机肥替代 10% 化学氮肥)、M2 (有机肥替代 20% 化学氮肥)、M3 (有机肥替代 30% 化学氮肥) 和 M4 (有机肥替代 40% 化学氮肥)。分析不同比例有机肥替代化肥对土壤养分、甜玉米光合特性和产量的影响。与 CK 处理相比, M1 和 M2 处理均促进了甜玉米生长及土壤养分积累, 其中 M2 处理效果较好, M2 处理下甜玉米的干物质积累量(DMA)、鲜穗产量(EY)和鲜籽粒产量(GY)分别提高 11.17%、4.51% 和 6.31%, 土壤全氮(TN)、速效磷(AP)、速效钾(AK)分别提高 28.23%、7.07%、3.93%, 净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)分别提高 1.36%、16.14% 和 34.34%。M3 和 M4 处理虽然增强了气孔导度和蒸腾速率, 但降低了作物产量与土壤养分含量。相关性分析表明, TN、有机质(SOM)、根系生物量(RB)、SPAD、叶面积指数(LAI)、DMA、AK、 T_r 、AP 和 P_n 均与甜玉米 EY 和 GY 呈正相关关系。为明确各因子的调控路径, 偏最小二乘结构方程模型(PLS-SEM)进一步说明, 土壤养分影响 RB, RB 直接影响 LAI 和光合参数, LAI 和光合参数直接影响 DMA, 进而影响甜玉米 EY 和 GY。综上所述, 有机肥替代 20% 化肥可通过改善土壤养分和甜玉米光合特性, 促进产量提升, 可作为绿洲灌区甜玉米生产的合理有机无机配施制度。

关键词: 甜玉米; 有机肥; 光合特性; 土壤养分; 产量

Key mechanisms underlying the enhancement of sweet maize yield through partial substitution of chemical fertilizers with organic manure in arid irrigation districts

Cai Hong-Wei, Yu Ai-Zhong*, Jiang Ke-Qiang, Wang Peng-Fei, Wang Yu-Long, Huo Jian-Zhe, Pang Xiao-Neng, Yin Bo, and Shang Yong-Pan

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

Abstract: This study investigated the effects of partially replacing chemical fertilizers with organic fertilizers on sweet maize yield in the oasis irrigation area and explores the underlying mechanisms, aiming to provide a theoretical basis for optimizing high-yield cultivation practices in this region. Field trials were conducted in the Northwest Oasis Irrigation District from 2023 to 2024, with five levels of organic fertilizer substitution: 0% (CK), 10% (M1), 20% (M2), 30% (M3), and 40% (M4). The study examined the effects of different substitution ratios on soil nutrients, photosynthetic characteristics, and sweet maize yield.

本研究由国家重点研发计划项目(2022YFD1900200), 甘肃省研产融合科技攻关赋能计划项目(25FNNA003-2-2), 甘肃省现代寒旱特色农业玉米产业技术体系(GSARS08)和甘肃农业大学伏羲杰出人才培养计划项目(GAUfx-04J01)资助。

This study was supported by the National Key Research and Development Program of China (2022YFD1900200), the Gansu Province Research-Production Integration Science and Technology Breakthrough Empowerment Program Project (25FNNA003-2-2), the Gansu Province Modern Cold and Arid Characteristic Agricultural Corn Industry Technology System (GSARS08), and the Fuxi Outstanding Talent Cultivation Program of Gansu Agricultural University (GAUfx-04J01).

* 通信作者(Corresponding author): 于爱忠, E-mail: yuaizh@gsau.edu.cn

第一作者联系方式: E-mail: 17358163339@163.com

Received (收稿日期): 2025-09-25; Accepted (接受日期): 2026-01-22; Published online (网络出版日期): 2026-02-03.

URL: <https://link.cnki.net/urlid/11.1809.S.20260203.1505.012>

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

Compared with CK, both M1 and M2 treatments enhanced sweet maize growth and soil nutrient accumulation, with M2 showing superior results. the M2 treatment increased dry matter accumulation (DMA), fresh ear yield (EY), and fresh grain yield (GY) by 11.17%, 4.51%, and 6.31%, respectively. Soil total nitrogen (TN), available phosphorus (AP), and available potassium (AK) increased by 28.23%, 7.07%, and 3.93%, respectively. Net photosynthetic rate (P_n), stomatal conductance (G_s), and transpiration rate (T_r) increased by 1.36%, 16.14%, and 34.34%, respectively, and all differences were statistically significant. Although M3 and M4 treatments increased stomatal conductance and transpiration rate, they reduced crop yield and soil nutrient content. Correlation analysis indicated that TN, soil organic matter (SOM), root biomass (RB), SPAD, leaf area index (LAI), DMA, AK, T_r , AP, and P_n are key factors influencing EY and GY. To clarify the regulatory pathways among these variables, partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM) revealed that soil nutrients influence RB, which directly affects LAI and photosynthetic parameters. LAI and photosynthetic parameters, in turn, directly influence DMA, ultimately affecting EY and GY. In summary, replacing 20% of chemical fertilizer with organic fertilizer enhances yield by improving soil fertility and photosynthetic efficiency in sweet maize. This approach offers a rational strategy for organic-inorganic fertilizer management in oasis irrigation systems.

Keywords: sweet maize; organic fertilizer; photosynthetic characteristics; soil nutrients; yield

近年来,随着人们膳食结构优化和健康意识提升,甜玉米因其营养丰富、口感甜脆及经济效益高等特点,广受消费者青睐^[1]。提高甜玉米产量已成为满足日益增长的市场需求的关键途径^[2]。合理施用氮肥是提高农作物产量的重要措施^[3],但过量施氮不仅会导致作物产量和品质下降,还会加剧温室气体排放、养分流失和资源利用效率降低等一系列问题^[4]。有机肥所含的溶解性有机质(DOM)等活性物质可通过络合、溶解等过程活化土壤难溶养分,兼具改良土壤与减少环境污染等优势^[5-6]。然而,由于有机肥养分矿化分解缓慢,单一施用难以满足作物关键生育期的养分需求。有机无机配施发挥了化肥速效性与有机肥缓释性的特点,可有效协调土壤养分供应与作物需求间的动态平衡^[7-9]。

诸多研究表明,有机肥替代部分化肥不仅能显著提高土壤有机质、全量养分与速效养分含量^[10],还能增加碳氮储量,从而增强土壤基础地力^[11]。同时,有机肥富含大量有机质和微量元素,与化肥配施可有效改善土壤环境,促进根际微生物种群数量与丰度的增加,有助于优化根系生长及其对养分的吸收与利用效率^[12-13]。与单施化肥相比,有机肥替代部分化肥可通过提高叶面积指数和 SPAD 值以延长光合时间,优化玉米的光合性能使光合酶活性明显提升,从而获得更多的光合同化产物并增加光合产物向籽粒的运转分配^[14]。此外,该措施还能改善土壤中的氮素供给关系,实现养分的平稳释放,在作物关键生育阶段满足其养分需求,促进干物质向籽粒的转运进而提高氮素利用效率和籽粒产量^[15]。有研究表明,常规施肥量下减施化肥氮 25%或 50%并配施等量氮素的鸡粪,可提高玉米单位面积有效穗数、产量及生物量^[16]。也有研究发现,30%有机肥配施化肥较单施化肥可有效提高玉米光合作用,有

利于作物光合产物的形成,进而提高玉米产量^[17]。国内外关于有机肥替代化肥对作物产量的提升效应已有很多研究,但在干旱内陆气候背景下从光合生理角度对有机肥替代部分化肥促进甜玉米增产机制的探讨较为薄弱。

本研究针对西北绿洲灌区甜玉米生产中过度依赖化学氮肥、作物产量提升受限等问题,从玉米土壤养分、光合特征和干物质积累等角度分析了有机肥不同比例替代化肥对甜玉米产量的影响及其关键机制,以期为绿洲灌区甜玉米高产栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

田间试验于 2023—2024 年在甘肃农业大学绿洲农业综合试验站(37°30'N, 103°5'E)进行。试验区位于河西走廊东端,属寒温带大陆性干旱气候区,海拔 1776 m,年平均气温 7.3℃,年日照时数 2945 h。多年平均降雨量为 156 mm,年蒸发量 2400 mm,土壤类型为灌漠沙壤土,试验开始前,该试验田长期实行单作玉米种植模式。试验田 0~30 cm 土层基础土壤 pH 为 8.64、土壤容重为 1.49 g cm⁻³、有机碳为 11.27 g kg⁻¹和全氮为 0.98 g kg⁻¹,土壤速效磷和速效钾含量分别为 26.2 mg kg⁻¹和 156 mg kg⁻¹。玉米生长期试验站日降雨量及日均温变化见图 1。

1.2 试验设计

试验采用随机区组设计,设5个处理,每个处理3次重复,共15个小区,小区面积80 m² (16 m×5 m)。处理包括:有机肥替代0%化肥(CK),以及有机肥替代10% (M1)、20% (M2)、30% (M3)和40% (M4)化肥的处理。纯氮施用量为300 kg hm⁻², P₂O₅施用量为 225 kg hm⁻²。供试商品有机肥来源于甘肃绿能农业

科技股份有限公司, 主要成分为牛粪、羊粪等, 其氮、磷、钾含量分别为4.0%、1.0%和0.8%, 有机质含量不低于45%; 所用尿素氮含量为46%。有机肥和磷肥均作基肥一次性施入。各处理磷、钾养分施用量一致, 施肥处理不足部分通过过磷酸钙(P_2O_5 16%)和氯化钾(K_2O 60%)补充。详细施肥方案列于表1。

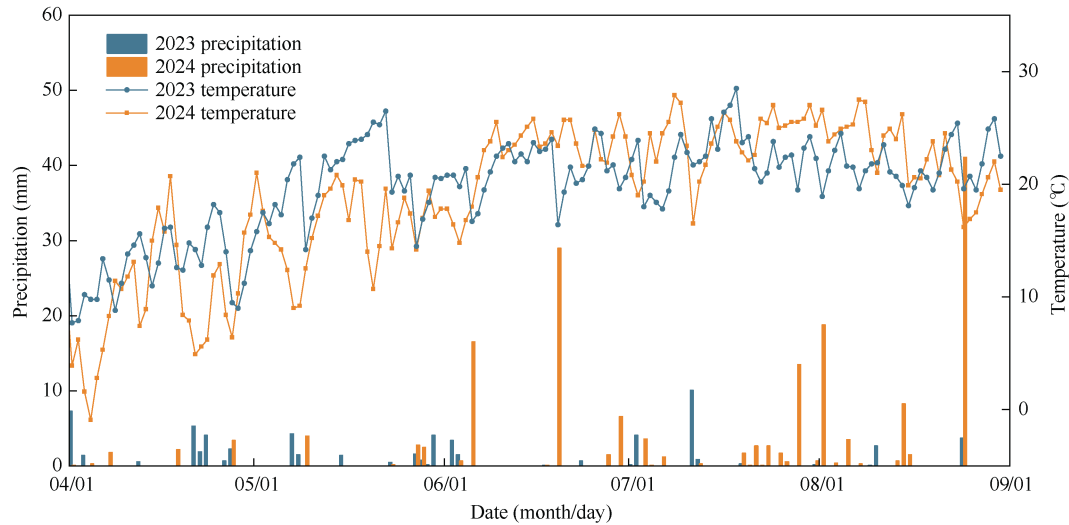


图 1 2023–2024 年试验站降雨量与气温
Fig. 1 Precipitation and air temperature at the experimental station from 2023 to 2024

表 1 不同施肥处理肥料施用量
Table 1 Fertilizer application rates under different fertilization treatments

处理 Treatment	基肥 Base fertilizer (kg hm ⁻²)				追肥 Top application (kg hm ⁻²)		
	有机肥 Organic manure	尿素 Urea	过磷酸钙 Superphosphate	氯化钾 Potassium chloride	拔节期 Jointing stage	大喇叭口期 Flare opening stage	灌浆期 Filling stage
有机肥替代 0 化肥 CK	0	263	301	16	150	150	90
有机肥替代 10%化肥 M1	302	236	282	12	150	150	90
有机肥替代 20%化肥 M2	604	210	263	8	150	150	90
有机肥替代 30%化肥 M3	906	185	244	4	150	150	90
有机肥替代 40%化肥 M4	1208	159	225	0	150	150	90

CK: organic manure substitution 0%; M1: 10%; M2: 20%; M3: 30%; M4: 40%.

供试甜玉米品种为“脆王”。种植密度为100,000株 hm⁻² (株距25 cm, 行距40 cm)。分别于2023年5月1日与2024年5月3日播种, 相应采收日期分别为2023年7月29日和2024年7月28日, 全生育期分别为89 d 和86 d。玉米采用膜下滴灌水肥一体化技术, 通过水表计量灌溉, 总灌水量为3240 m³ hm⁻², 在拔节期、大喇叭口期、吐丝开花期和灌浆期平均进行灌溉。生育期内其他田间管理措施与当地大田生产保持一致。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 鲜穗、鲜籽粒产量 于甜玉米最佳采收期分别采收各小区10 m²样方内的所有果穗, 随机选取20穗, 测定穗部性状, 包括穗粒数和千粒重等, 穗数采用样方法折算; 所有果穗去除苞叶后进行称重,

计算鲜果穗产量(kg hm⁻²), 脱下籽粒并称重计算出籽率, 根据出籽率计算鲜籽粒产量(kg hm⁻²)^[18]。

1.3.2 叶面积指数 用长宽法测定, 在甜玉米全生育期每隔15 d 测定一次, 叶面积指数计算公式如下:

$$LAI = 0.75 \times P \times \sum_{i=1}^n (a_i \times b_i)$$

(1)

式中, 0.75为校正系数, P 为基本苗数, a 、 b 分别为叶片的长、宽, i 为叶片个数。

1.3.3 光合生理指标 采用 Li-6800型便携式光合系统测定仪(美国 Li-Cor 公司), 在甜玉米苗期、拔节期、大喇叭口期、开花期和采收期, 选择晴朗天气, 于上午09:00—11:30在各小区内随机选取3株玉米, 测定穗位叶中部的净光合速率(P_n)、蒸腾速率

(T_r)、胞间 CO_2 浓度(C_i)和气孔导度(G_s), 结果取平均值。利用便携式叶绿素仪(SPAD-502型)测定叶片 SPAD 值, 测定时期及部位与叶片光合参数指标同步, 各小区随机选取长势均匀、具代表性的玉米植株3株测定气体交换参数及 SPAD 值^[19]。

1.3.4 土壤养分指标 于甜玉米采收期(2023年7月25日、2024年7月26日)采用土钻法^[20]在每个小区均采用多点混合取样法取0~20 cm 土层土样, 并及时去除土壤表层枯叶、石砾及根系。样品自然风干后过0.25 mm 筛用于土壤养分测定。采用 pH 计测定 pH; 采用水合热重铬酸钾氧化-比色法测定土壤有机质含量; 采用凯式消煮法测定土壤全氮含量; 采用 NaHCO_3 浸提-钼锑抗比色法和醋酸铵浸提-火焰光度法分别测定土壤速效磷和速效钾含量。

1.3.5 干物质积累量 于玉米出苗后15 d 开始取样, 之后每隔15~20 d 取样一次。每次取样在每个小区采用 S 形法在同一覆膜带内选取10株植株样本, 置于105℃烘箱中杀青0.5 h, 随后将温度调至80℃持续烘干至恒重, 最后测定其干重。

1.3.6 根系生物量 在甜玉米采收期, 采用土壤剖面法采集根系样品。取样范围以1/2株距为宽度、

1/2行距为长度, 挖取0~60 cm 土层整体土体, 将其全部装入0.45 mm 网袋, 用自来水冲洗干净后, 置于80℃烘箱中烘干至恒重, 最后称量根系干重。

1.4 数据处理与分析

使用 Microsoft Excel 2021 完成数据整理, 使用 Origin 2021 进行图表绘制。使用 SPSS 27.0 软件进行统计分析, 包括处理间的单因素方差分析(One-Way ANOVA)、Duncan 多重比较($\alpha = 0.05$)以及 Pearson 相关性分析($P < 0.05$)。此外, 采用 SmartPLS 4 建立 PLS-SEM。

2 结果与分析

2.1 有机肥替代部分化肥对甜玉米产量的影响

不同比例的有机肥替代化肥显著影响甜玉米产量(图 2)。M2 处理可显著提高甜玉米的鲜穗产量和鲜籽粒产量 ($P < 0.05$)。与 CK 处理相比, M1 处理下甜玉米鲜穗产量无显著差异, M2 处理下甜玉米的鲜穗产量 2 年平均分别提高了 4.51%, 鲜籽粒产量分别提高了 6.31%; 而 M3 和 M4 处理下甜玉米的鲜穗产量 2 年平均分别降低了 3.65%和 5.55%, 鲜籽粒产量分别降低 4.33%和 6.31%。

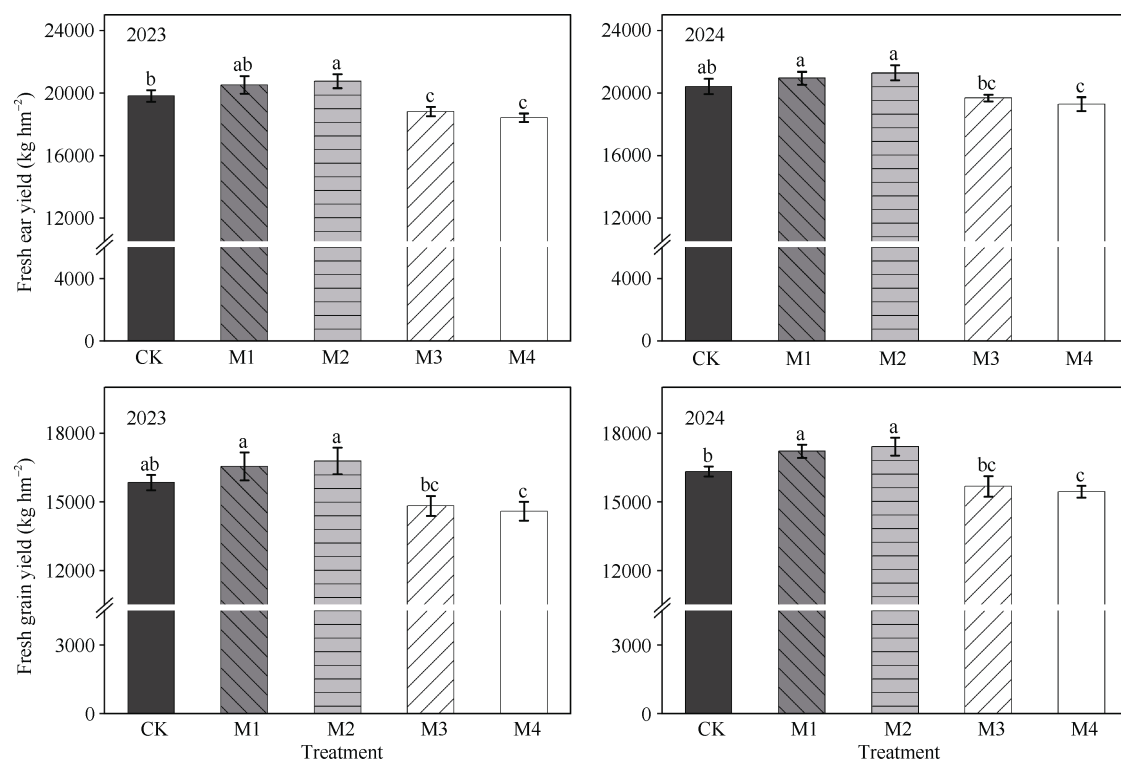


图2 不同处理下甜玉米鲜穗产量、鲜籽粒产量

Fig. 2 Fresh ear yield and fresh grain yield of sweet maize under different treatments

处理同表1。不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。误差线表示标准误。

Treatments are the same as those given in Table 1. Different lowercase letters above the bars indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$). Error bars represent the standard error of the mean.

2.2 有机肥替代部分化肥对甜玉米干物质积累动态的影响

不同比例的有机肥替代化肥显著影响甜玉米干物质(图 3)。M1 和 M2 处理可显著提高甜玉米的干物质积累量, 其中 M2 处理效果更好($P < 0.05$)。从不同生育时期来看, M1 和 M2 处理显著提高了甜玉米大喇叭口期、开花期和采收期的干物质积累量。在大喇叭口期, 与 CK 处理相比, M1 和 M2 处理的干物质积累量 2 年平均分别提高了 10.15%和 16.30%, 而 M3 和 M4 处理分别降低了 4.60%和

11.78%。在开花期, 与 CK 处理相比, M1 和 M2 处理干物质积累量 2 年平均分别提高了 6.56%和 12.08%, 而 M3 和 M4 处理分别降低了 3.19%和 7.52%。在采收期, 与 CK 处理相比, M1 和 M2 处理干物质积累量 2 年平均分别提高了 7.67%和 15.54%, 而 M3 和 M4 处理分别降低了 5.90%和 11.46%。从全生育期平均来看, 与 CK 处理相比, M1 和 M2 处理的干物质积累量 2 年平均分别提高了 6.03%和 11.17%, 而 M3 和 M4 处理分别降低了 6.83%和 12.63%。

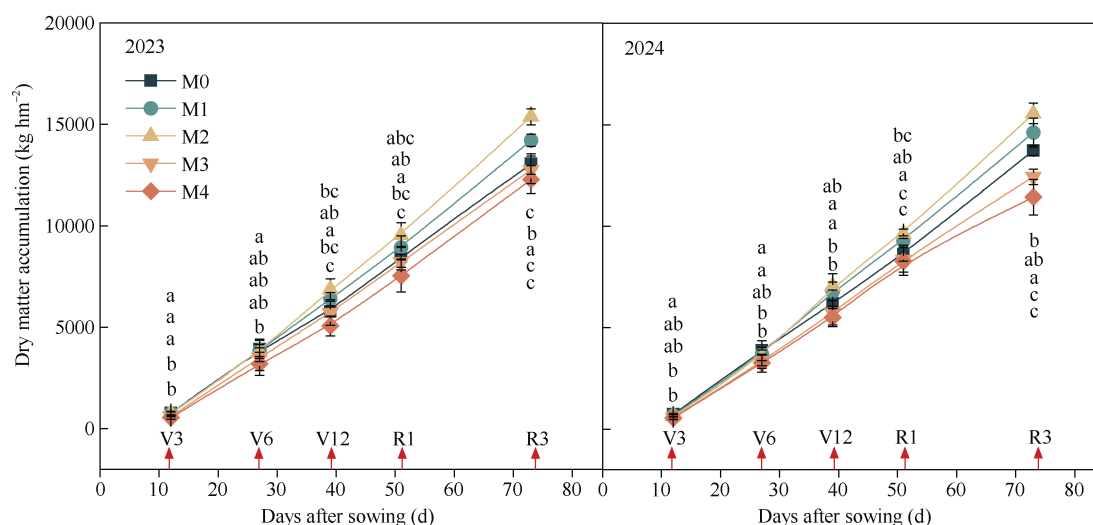


图 3 不同处理下甜玉米干物质的影响

Fig. 3 Effects of different treatments on dry matter accumulation in sweet maize

处理同表 1。V3: 苗期; V6: 拔节期; V12: 大喇叭口期; R1: 开花期; R3: 采收期。不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。误差线表示标准误差。

Treatments are the same as those given in Table 1. V3: seedling period; V6: jointing period; V12: big flare period; R1: flowering period; R3: harvest period. Different lowercase letters above the bars indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$). Error bars represent the standard error of the mean.

2.3 有机肥替代部分化肥对甜玉米根系生物量的影响

不同比例的有机肥替代化肥显著影响甜玉米根系生物量(图 4)。M1 和 M2 处理可显著提高甜玉米的根系生物量, 其中 M2 处理效果更好($P < 0.05$)。与 CK 处理相比, M1 处理的根系生物量 2 年平均无显著差异, M2 处理的根系生物量提高了 17.51%; 而 M3 和 M4 处理则分别降低了 15.49%和 18.23%。

2.4 有机肥替代部分化肥对甜玉米叶面积指数和 SPAD 的影响

2.4.1 不同比例的有机肥替代化肥对甜玉米全生育期叶面积指数的影响 不同比例的有机肥替代化肥显著影响甜玉米叶面积指数(图 5)。M1 和 M2 处理可显著提高甜玉米的叶面积指数, 其中 M2 处理

效果更好($P < 0.05$)。从不同生育时期来看, M1 和 M2 处理显著提高了甜玉米大喇叭口期、开花期和采收期的叶面积指数。在大喇叭口期, 与 CK 处理相比, M1 和 M2 处理的叶面积指数 2 年平均分别提高了 5.40%和 10.84%, 而 M3 和 M4 处理分别降低了 3.50%和 5.35%。在开花期, 与 CK 处理相比, M1 和 M2 处理叶面积指数 2 年平均分别提高了 2.99%和 5.72%, 而 M3 和 M4 处理分别降低了 3.35%和 6.01%。在采收期, 与 CK 处理相比, M1 和 M2 处理叶面积指数 2 年平均分别提高了 6.05%和 9.46%, 而 M3 和 M4 处理分别降低了 1.76%和 10.20%。从全生育期平均来看, 与 CK 处理相比, M1 和 M2 处理的干物质积累量分别提高了 2.34%和 4.84%, M3 和 M4 处理分别降低了 6.65%和 11.51%。

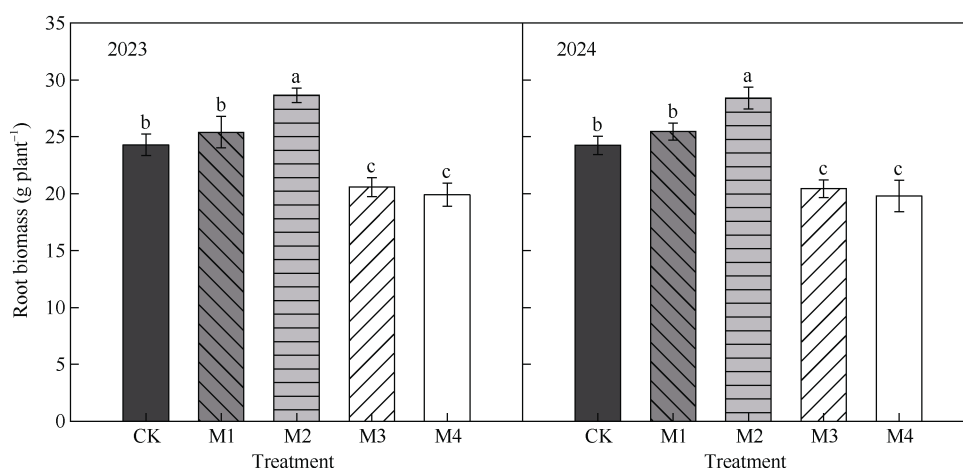


图 4 不同处理下甜玉米根系生物量

Fig. 4 Root biomass of sweet maize under different treatments

处理同表 1。不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。误差线表示标准误。

Treatments are the same as those given in Table 1. Different lowercase letters above the bars indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$). Error bars represent the standard error of the mean.

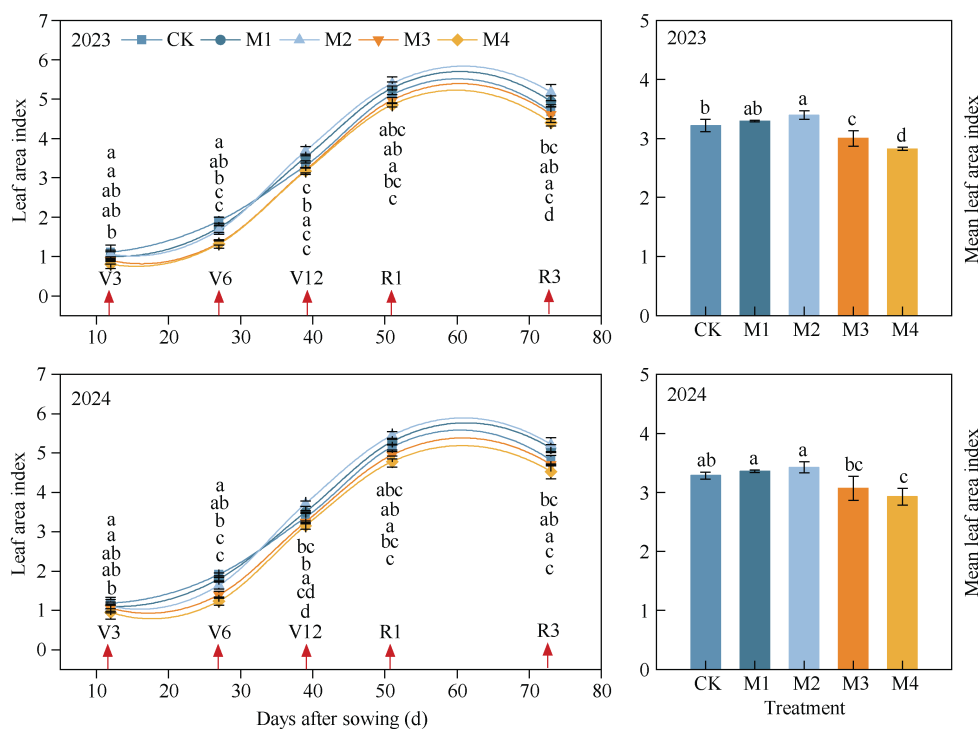


图 5 不同处理下甜玉米全生育期叶面积指数动态及平均叶面积指数

Fig. 5 Dynamics and average leaf area index of sweet maize at different growth stages under different treatments

处理同表 1。V3: 苗期; V6: 拔节期; V12: 大喇叭口期; R1: 开花期; R3: 采收期。不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。误差线表示标准误。

Treatments are the same as those given in Table 1. V3: seedling period; V6: jointing period; V12: big flare period; R1: flowering period; R3: harvest period. Different lowercase letters above the bars indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$). Error bars represent the standard error of the mean.

2.4.2 不同比例的有机肥替代化肥对甜玉米全生育期 SPAD 的影响 不同比例的有机肥替代化肥显著影响甜玉米 SPAD (图 6)。M1 和 M2 处理可显著提高甜玉米的 SPAD, 其中 M2 处理效果更好 ($P < 0.05$)。从不同生育时期来看, M1 和 M2 处理显著提

高了甜玉米大喇叭口期、开花期和采收期的 SPAD。在大喇叭口期, 与 CK 处理相比, M1 和 M2 处理的 SPAD 两年平均分别提高了 2.18% 和 4.31%, 而 M3 和 M4 处理分别降低了 1.66% 和 5.67%。在开花期, 与 CK 处理相比, M1 和 M2 处理的 SPAD 两年平均

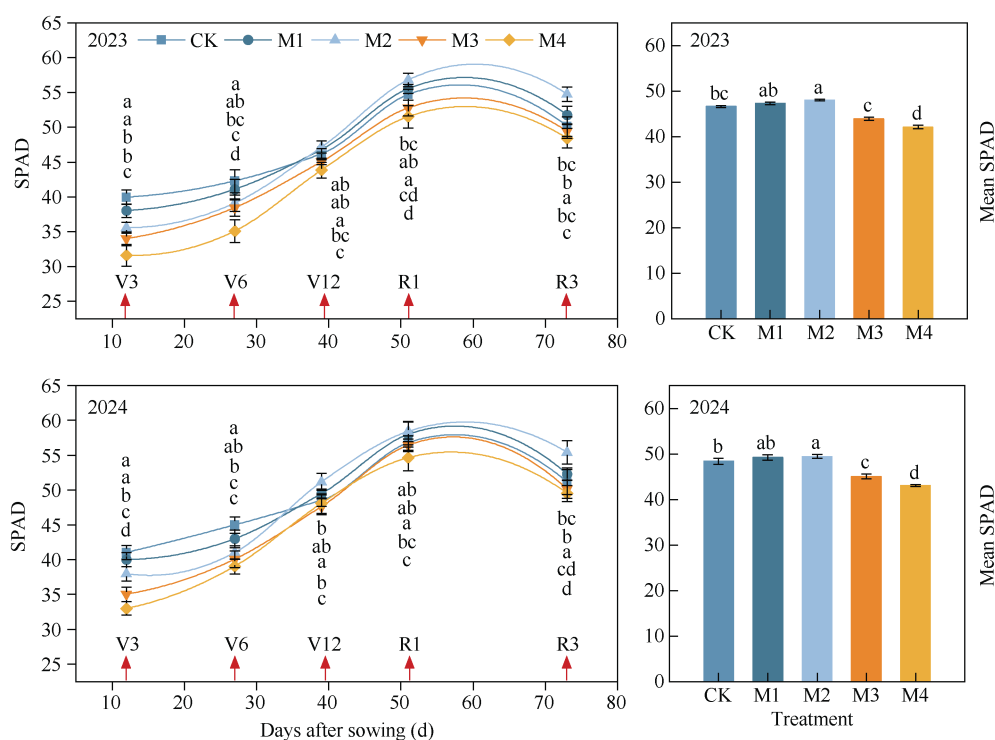


图 6 不同处理下甜玉米全生育期 SPAD 及平均 SPAD

Fig. 6 SPAD values and mean SPAD of sweet maize throughout the growing season under different treatments

处理同表 1。V3: 苗期; V6: 拔节期; V12: 大喇叭口期; R1: 开花期; R3: 采收期。不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。误差线表示标准误。

Treatments are the same as those given in Table 1. V3: seedling period; V6: jointing period; V12: big flare period; R1: flowering period; R3: harvest period. Different lowercase letters above the bars indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$). Error bars represent the standard error of the mean.

分别提高了 1.84% 和 3.39%，而 M3 和 M4 处理分别降低了 2.93% 和 5.67%。在采收期，与 CK 处理相比，M1 和 M2 处理 SPAD 两年平均分别提高了 2.75% 和 8.77%，而 M3 和 M4 处理分别降低了 2.67% 和 5.26%。从全生育期平均来看，与 CK 处理相比，M1 和 M2 处理的 SPAD 两年平均分别提高了 1.57% 和 2.56%，M3 和 M4 处理分别降低了 6.37% 和 10.40%。

2.5 有机肥替代部分化肥对甜玉米光合生理参数的影响

不同比例的有机肥替代化肥显著影响甜玉米 P_n 、 T_r 、 C_i 和 G_s (图 7)。M1 和 M2 处理可显著提高甜玉米 P_n 、 T_r 和 G_s ，降低 C_i ，其中 M2 处理效果更好 ($P < 0.05$)。从不同生育时期来看，甜玉米的 P_n 、 T_r 、 G_s 均表现出先增加后降低的单峰曲线，各指标均在 R1 时期达到峰值。 C_i 表现出先降低后增加的趋势。在 R1 时期，与 CK 处理相比，M1 和 M2 处理的 P_n 两年平均分别提高 5.70% 和 7.95%； T_r 分别提高 10.97% 和 12.89%； G_s 分别提高 18.01% 和 42.18%； C_i 分别降低 6.63%、14.39%。M3 和 M4 处理的 P_n 两年平均分别降低 1.66% 和 5.18%； T_r 分别提高 9.35%

和 7.37%； G_s 分别提高 33.11% 和 17.18%； C_i 分别降低 13.92% 和 5.91%。从全生育期平均来看，与 CK 处理相比，M1 和 M2 处理的 P_n 两年平均分别提高了 0.87% 和 1.36%； T_r 分别提高了 11.57% 和 16.14%； G_s 分别提高了 16.73% 和 34.34%； C_i 分别降低了 4.15% 和 10.53%。M3 和 M4 处理的 P_n 两年平均分别降低了 9.58% 和 14.59%； T_r 分别增加了 8.44% 和 3.88%； G_s 分别增加了 27.02% 和 10.41%； C_i 分别降低了 9.08% 和 4.77%。

2.6 有机肥替代部分化肥对甜玉米土壤养分的影响

不同比例的有机肥替代化肥显著影响甜玉米土壤养分 (图 8)。M1 和 M2 处理均可显著提高土壤全氮、速效磷和速效钾含量，其中 M2 处理效果更好 ($P < 0.05$)。与 CK 处理相比，M1 和 M2 处理土壤全氮含量 2 年平均分别提高了 13.65% 和 28.23%；速效磷含量分别提高了 2.48% 和 7.07%；速效钾含量分别提高了 1.67% 和 3.93%。而 M3 和 M4 处理土壤全氮含量 2 年平均分别降低了 0.92% 和 6.09%；速效磷含量分别降低了 2.34% 和 4.75%；速效钾含量分别降低了

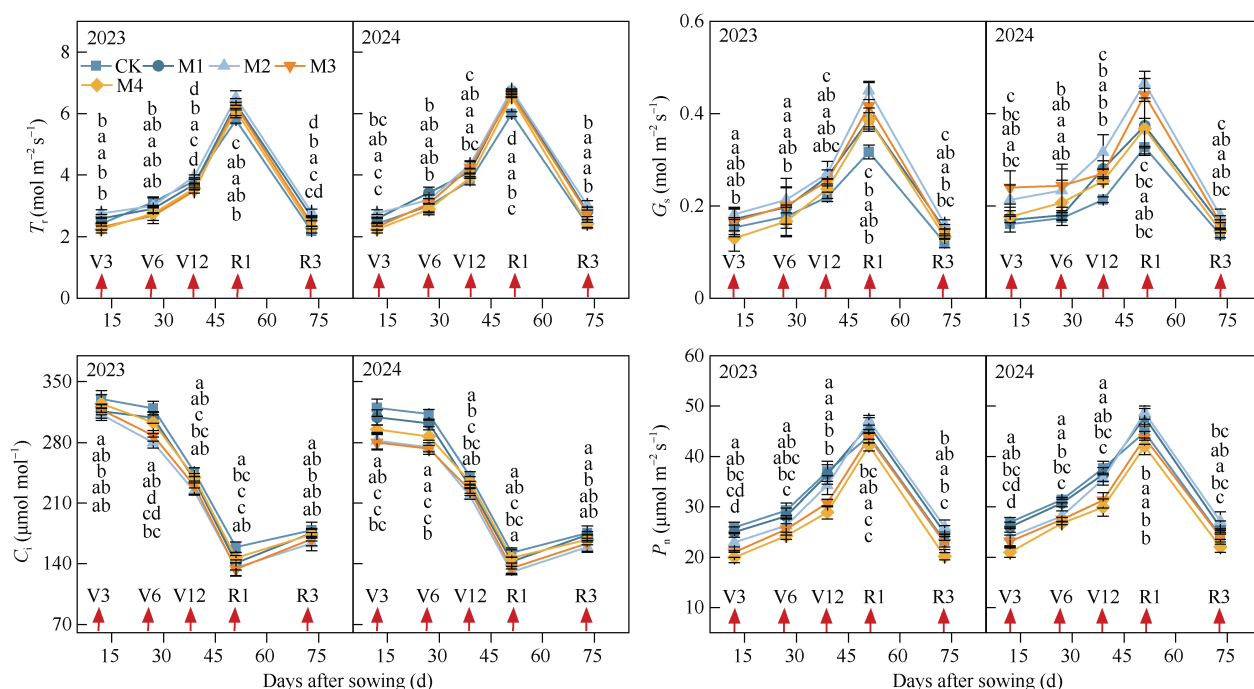


图7 不同处理下甜玉米光合参数的影响

Fig. 7 Effects of different treatments on photosynthetic parameters of sweet maize

处理同表1。V3: 苗期; V6: 拔节期; V12: 大喇叭口期; R1: 开花期; R3: 采收期。不同小写字母表示处理间差异显著。误差线表示标准误。
Treatments are the same as those given in Table 1. V3: seedling period; V6: jointing period; V12: big flare period; R1: flowering period; R3: harvest period. Different lowercase letters above the bars indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$). Error bars represent the standard error of the mean.

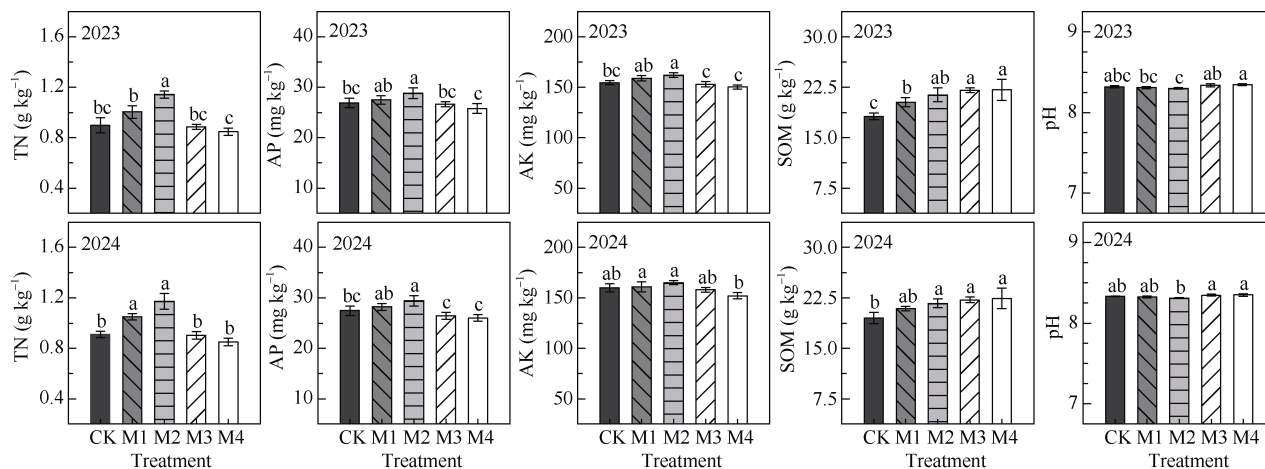


图8 不同处理下甜玉米土壤养分含量

Fig. 8 Soil nutrient content of sweet maize under different treatments

处理同表1。TN: 全氮含量; AP: 速效磷含量; AK: 速效钾含量; SOM: 有机质含量; pH: 土壤 pH。不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。误差线表示标准误。

Treatments are the same as those given in Table 1. TN: total nitrogen content; AP: available phosphorus content; AK: available potassium content; SOM: organic matter content; pH: soil pH. Different lowercase letters above the bars indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$). Error bars represent the standard error of the mean.

1.15%和3.92%。土壤有机质含量随有机肥替代比例增加呈升高趋势, M1、M2、M3和M4处理的有机质含量2年平均较CK分别提高9.33%、14.33%、17.54%和18.27%;而M3和M4处理的有机质含量显著高于M1和M2处理。此外, M1和M2处理的

土壤pH两年平均较CK分别降低了0.12%和0.26%,而M3和M4处理分别提高了0.18%和0.24%。

2.7 有机无机肥配施促进甜玉米产量提升的光合及土壤养分关键机制分析

相关分析表明, 甜玉米鲜穗、鲜籽粒产量、干

物质积累量与 SPAD、LAI、 P_n 、TN、AP、AK 和 RB 均呈极显著正相关($P < 0.01$), 与 C_i 、 G_s 、pH 相关性不显著。此外, T_r 与 DMA 呈显著正相关($P < 0.05$), 与 EY、GY 呈极显著正相关($P < 0.01$); SOM 与 GY 呈显著正相关($P < 0.05$), 与 DMA 和 EY 呈极显著正相关($P < 0.01$) (图 9)。PLS-SEM 表明, 土壤养分(TN、SOM、AP 和 AK)主要通过影响 RB ($P < 0.001$)进而影响 LAI ($P < 0.001$)和光合参数(P_n 、 G_s 和 T_r) ($P < 0.01$)。LAI 和光合参数进一步影响 DMA ($P < 0.05$), 最终影响产量(GY 和 EY) ($P < 0.001$)。因此, 适宜的有机肥替代部分化学氮肥可通过提高土壤养分含量、增加甜玉米根系生物量, 进而改善光合性能, 促进干物质积累, 最终提高产量(图 10)。

3 讨论

3.1 有机肥替代化肥对甜玉米产量的影响

适宜比例有机肥替代化肥不仅可满足玉米生长发育所需养分, 还可提高肥料利用率, 增加玉米产

量^[21]。本研究发现随着有机肥替代比例的增加, 甜玉米产量呈现先升高后降低的趋势, 且在有机肥替代 20%化肥处理下获得最高产量, 这与万连杰等^[22]的研究结果一致, 其主要原因是: 一方面, 有机肥具有缓释性, 与化肥配施可协调速效与缓效养分的供给平衡, 适宜的有机替代比例能够满足甜玉米全生育期的养分需求, 为作物生长提供充分养分支持^[23]。另一方面, 有机肥中的有机质有助于改善土壤结构, 增强微生物活性, 优化土壤酶活性, 从而构建更健康的土壤生态系统。该过程可促进根系生长, 减少养分淋失, 提高养分利用效率; 同时还能增强光合作用, 促进干物质积累, 最终实现作物高产^[24]。而本研究中, 有机肥替代 30%和 40%化肥处理较单施化肥处理显著降低了甜玉米产量, 其原因可能是: 第一, 过量施用有机肥会影响土壤中的氮素供应平衡, 导致土壤养分释放不稳定, 难以满足玉米在关键生育期的养分需求。这不仅造成作物生长前期氮素供应不足, 还会引起中后期养分吸收失衡, 从而抑制

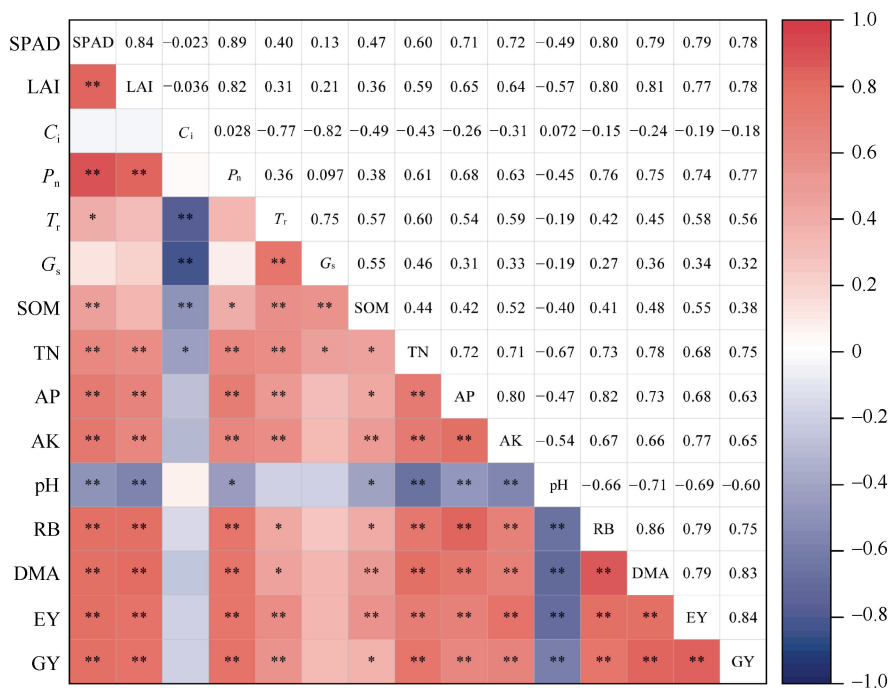


图 9 甜玉米鲜籽粒产量和鲜穗产量与土壤养分、光合参数和干物质积累的相关分析

Fig. 9 Correlation analysis of sweet corn fresh grain yield and fresh ear yield with soil nutrients, photosynthetic parameters, and dry matter accumulation

EY: 鲜穗产量; GY: 鲜籽粒产量; DMA: 干物质积累量; TN: 全氮含量; SOM: 有机质含量; AP: 速效磷含量; AK: 速效钾含量; pH: 土壤 pH; SPAD: 叶绿素含量; LAI: 叶面积指数; P_n : 光合速率; T_r : 蒸腾速率; C_i : 胞间 CO_2 浓度; G_s : 气孔导度; RB: 根系生物量。* 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平下存在显著差异。

EY: fresh ear yield; GY: fresh grain yield; DMA: dry matter content; TN: total nitrogen content; SOM: organic matter content; AP: available phosphorus content; AK: available potassium content; pH: soil pH; SPAD: chlorophyll content; LAI: leaf area index; P_n : photosynthetic rate; T_r : transpiration rate; C_i : intercellular CO_2 concentration; G_s : stomatal conductance; RB: root biomass. * and ** indicate significant correlations at the 0.05 and 0.01 levels, respectively.

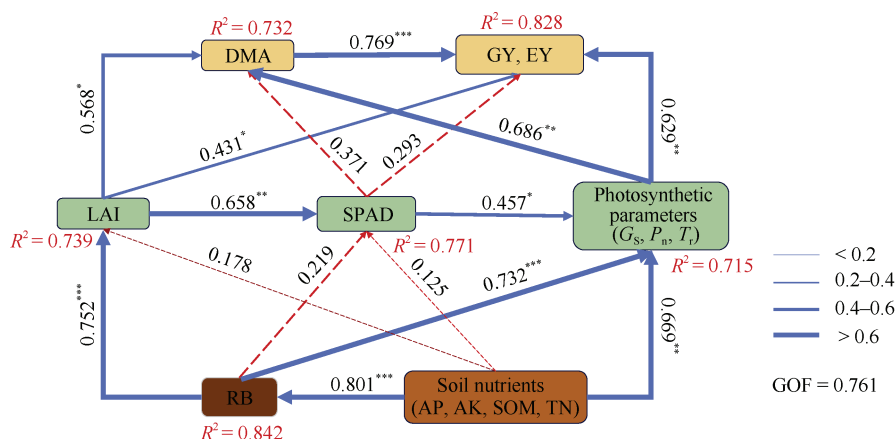


图 10 土壤养分、甜玉米根系生物量和叶片光合生理参数影响产量的 PLS-SEM 分析

Fig. 10 PLS-SEM analysis of the effects of soil nutrients, root biomass, and leaf photosynthetic parameters on sweet maize yield

缩写同图 9。实线表示显著的路径，实线的粗细表示通径系数绝对值的大小，虚线表示该路径不显著。线旁的数值为标准化通径系数。***、**与*分别表示在 0.001、0.01 和 0.05 概率水平差异显著。

Abbreviations are the same as those given in Fig. 9. Solid lines indicate significant pathways, with line thickness representing the magnitude of the absolute path coefficient value. Dashed lines indicate non-significant pathways. Numbers beside the lines are standardized path coefficients. ***, ** and * indicate significance at the 0.001, 0.01, and 0.05 levels, respectively.

作物生长发育，并影响产量形成^[25]。第二，有机肥过量施用因其缓效性无法保障生育后期叶片养分供应，也不能有效延长叶片功能期，不利于调节光合作用与产量形成之间的关系，会减少光合产物的积累向籽粒转移，最终导致减产^[26]。相关分析表明，甜玉米的 GY、EY 及 DMA 与土壤养分含量及光合参数均呈正相关关系，这初步揭示了甜玉米产量的提升受到地上部光合作用与地下部土壤环境因素的共同调控。此外，PLS-SEM 分析结果也表明，土壤养分主要通过促进 RB 的增长来改善光合特性，进而提升 DMA，最终对 GY 与 EY 产生正向影响。这一结果与尹海龙等^[27]的研究结果一致，即有机肥的施入能通过改善养分循环，从而促进作物根系发育和对养分的吸收利用。根系作为连接“土壤-作物”系统的桥梁，其生物量的增加为地上部光合器官的建成与功能维持提供了基础，最终体现在更高的光合效率和干物质积累上。然而，本研究仅基于 2 年田间试验研究结果，缺乏对产量长期效应的稳定性的系统分析，未来需进一步探讨长期有机肥替代化肥对甜玉米产量的影响及其可持续性。

3.2 有机肥替代化肥对甜玉米光合特征的影响

产量形成是以光合作用为基础，因此，高产的首要途径在于最大限度地利用光能并提升光合性能^[28]。适宜比例的有机肥替代化肥正是改善植物光合性能的有效措施^[29]。本研究发现，有机肥替代 20% 化肥可以显著提高甜玉米生育后期叶面积指数，

这与 Wang 等^[30]的研究结果一致。其原因可能是，第一，无机氮的肥效能满足生育前期甜玉米的养分需求，而配施适量有机肥有助于保障生育后期的养分供应，从而延长叶片的持绿时间，延缓衰老和脱落，最终提高生育后期的 LAI。然而，有机肥替代比例过高时，难以在关键生育期有效释放养分，导致叶片提前衰老甚至脱落，降低作物的 LAI^[31]。第二，有机肥中含有大量氮磷钾及中微量元素，不仅能促进植株生长，还可改善土壤结构，为微生物提供充足能源和适宜环境，增强其活性，促进有机质分解与养分转化，从而进一步提高 LAI^[32]。本研究发现，有机肥替代 20% 化肥在提高甜玉米净光合速率、气孔导度和蒸腾速率的同时降低了胞间 CO₂ 浓度，这与董睿潇等^[33]结果一致。其原因可能是，第一，有机肥中的有机质作为一种缓释营养源，能够持续稳定地提供氮、磷及其他必需元素，其缓慢的释放特性有助于避免作物光合作用过程中的养分失衡或过剩^[34]；第二，有机肥中所含微生物能够产生促进生长的物质，刺激根系发育与养分吸收^[35]，同时，有机质可改善土壤结构和保水能力，为根系生长与养分吸收创造适宜条件，进而提高气孔导度，增强叶片的气孔调节能力与二氧化碳固定效率^[36]；第三，适宜比例的有机肥替代部分化肥，有助于协调土壤养分供应与作物需求间的动态平衡，提高养分利用效率。这一过程可促进植物功能叶中养分的持续积累，增强叶绿体内光合碳同化关键酶的活性，最终提升玉

米的光合速率^[37]。SPAD 值作为反映作物叶片衰老和光合功能的关键指标,直接影响着光合速率与光合产物的形成。本研究发现,有机肥替代 20%化肥能够有效提高甜玉米生育后期的 SPAD,这与 Wang 等^[38]研究一致。其原因可能是,第一,有机肥中所含的 Mg^{2+} 、 Cu^{2+} 等金属离子参与叶绿素的合成,和化肥配施可以增加 SPAD 的含量^[39];第二,有机肥为作物生长提供了均衡且持续的养分供应,确保叶绿素合成与叶片完整发育所必需元素的供给;同时,有机肥中的有机质通过促进植物根系共生关系、提高养分利用效率来保障叶片养分供给,进而维持较大的绿色叶面积、延长功能叶片的持续期,最终使 SPAD 值得到进一步提高^[40]。干物质累积量作为反映作物生长状况的重要指标,其含量高低直接影响作物产量的形成^[41]。有研究表明,适量有机肥施用能够增加玉米相对叶绿素含量和叶面积指数,促进光合产物形成,提高玉米干物质积累速率,从而增加玉米的干物质积累量^[42],这与本研究中有有机肥替代 20%化肥能够显著提高甜玉米干物质积累量的结果一致。其原因可能是,有机肥替代化肥有助于维持甜玉米全生育期氮素供应,提高土壤氮素有效性及有机质含量。有机质通过其分解释放的有机酸、酶类和有益微生物群落改善土壤理化与生物特性,进而优化根系生长环境,并促进微量元素的吸收与代谢。此外,适量有机肥替代部分化肥还能促进植株地上部生长、延长茎叶功能期、提高叶面积指数、增加光合产物向籽粒的运转分配,从而提升干物质积累量^[43]。当前研究主要侧重于有机肥替代部分化肥对作物光合特性的影响,而其与光合相关酶和产量的内在机制还有待长期深入剖析。

3.3 有机肥替代化肥对甜玉米土壤养分的影响

近年来,为响应“化肥零增长计划”,有机肥替代化学氮肥已成为改善土壤质量和产量提升的重要途径^[44]。本研究结果表明,与单施化肥相比,随着有机肥替代比例的增加土壤有机质含量也随之提升,这与史帆等^[45]的研究结果类似。其原因可能是,一方面,有机肥替代比例的提高直接增加了外源有机碳的输入^[46];另一方面,有机肥中含有大量氮磷钾及中微量元素,有利于植物生长发育而且具有改良土壤结构的优势,这为微生物生长提供了充足的能源和适宜的环境,从而加速土壤有机质矿化与积累过程;此外,微生物活性的增强会刺激潜在的土壤酶活性,这反过来作用于有机肥分解和养分释放,

最终使得土壤有机质含量得以显著提高^[47]。温延臣等^[48]通过定位试验发现,有机肥替代化学氮肥能够有效提高土壤全氮含量,并且增强土壤氮素的有效性,促进作物吸收利用,这与本研究结果基本一致。其原因可能是有机肥替代部分化肥可以提高土壤脲酶活性和增加亚硝酸细菌等微生物数量,进而促进土壤中有益菌的生长,改善土壤供氮特性,提高作物根系活性,最终提高土壤氮素含量^[49];此外,有机无机配施制度加速了有机物质的腐解速率,改善了土壤团粒结构和养分状况,更有利于土壤氮的矿化,促进耕层土壤全氮含量的升高^[50]。本研究发现,随着有机肥替代比例的增加, pH 呈现先降低后升高的趋势,且有机肥替代 20%化肥能够有效降低土壤 pH。其原因可能是,第一,本试验地为碱性土壤,施用有机肥可为土壤微生物提供营养物质,微生物分解有机质的过程中产生的有机酸对碱性土壤 pH 可起到缓冲或调节作用,降低了土壤 pH^[51];第二,施用有机肥可以有效降低土壤中金属离子的活性,例如 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 及 Mg^{2+} 等,从而降低土壤 pH^[52]。

速效养分作为作物可直接利用的形态,其含量高低是决定作物生长状况的重要因素。本研究发现有有机肥替代 20%化肥较单施化肥可显著提高 0~20 cm 土层土壤速效磷和速效钾含量,这与李荣等^[53]研究结果相一致。其原因主要有以下 3 个方面,第一,由于有机肥具有全养分的特性,在施用之后会向土壤中增添一定含量的磷、钾养分;第二,施入有机肥向土壤中投入了大量腐殖质,土壤腐殖质中活性基团对养分离子的吸附、络合和保持作用减缓了土壤中 Ca^{2+} 对速效磷酸盐的固定作用,同时有机肥料中的有机磷在土壤中的不断积累和分解释放也减少了速效磷的流失,促进了速效磷含量的快速提高,增强了磷肥有效性及利用率^[54];第三,钾素主要来源于土壤中含钾矿物风化及土壤有机质分解,有机肥替代部分化肥增加土壤速效钾含量的效果同样优于单施化肥,主要是由于有机肥中钾素有效转化效率高于化学钾肥,与水溶性钾肥相比,有机肥速效钾被土壤固定程度明显降低,故其有效性较高^[47]。当有机肥替代比例超过 20%时,土壤速效钾与速效磷含量呈现下降趋势,其原因可能是:一方面,过高比例的有机肥会显著增强微生物活性,促进其对土壤中矿质态养分的生物固持^[55];另一方面,有机肥中磷、钾的释放速率与其化学形态和腐熟程度密切相关,高比例替代下有机肥可能难以完

全满足作物旺盛期的养分需求^[56]。综上所述, 有机肥替代 20%化学氮肥能有效增加有机质含量, 促进土壤中微生物和生物酶对营养物质的分解与释放, 进而改善土壤结构和环境, 持续增加土壤中的养分含量并培肥土壤, 保证农田生产力。本研究仅分析了土壤养分对有机肥替代化肥的响应, 而有机肥替代化肥对甜玉米土壤质量的长期影响与内在机制尚需深入探究。

4 结论

与传统施氮相比, 有机肥替代 20%化肥可通过提升土壤有机质、全氮含量、速效磷和速效钾含量来增加甜玉米根系生物量, 从而使甜玉米在生育中后期维持较高的叶面积指数、叶绿素含量以及净光合速率、气孔导度和蒸腾速率, 这一过程有助于增强光合产物形成, 最终实现甜玉米增产。因此, 有机肥替代 20%化肥可作为干旱绿洲灌区甜玉米生产中适宜的有机无机肥结合施用模式。

References

- [1] 李向岭, 胡君霞, 左悺平, 等. 聚天门冬氨酸缓释复合肥显著提高甜玉米鲜穗产量与品质. 植物营养与肥料学报, 2021, 27: 2019–2029.
Li X L, Hu J X, Zuo Y P, et al. Slow-release compound fertilizer containing polyaspartic acid effectively increases fresh ear yield and quality of sweet corn. J Plant Nutr Fert, 2021, 27: 2019–2029 (in Chinese with English abstract).
- [2] 李蓉, 李正鹏, 严清彪, 等. 复种绿肥协同不同水平氮肥对春小麦产量及品质的影响. 中国农业科学, 2025, 58: 2333–2345.
Li R, Li Z P, Yan Q B, et al. Effects of multiple cropping green manure combined with different nitrogen fertilizer levels on yield and quality of spring wheat. Sci Agric Sin, 2025, 58: 2333–2345 (in Chinese with English abstract).
- [3] 李文瑄, 戴孚岳, 王洪媛, 等. 麦玉轮作体系下秸秆还田和有机替代对作物产量及农田氮损失的影响. 植物营养与肥料学报, 2025, 31: 442–457.
Li W X, Dai F Y, Wang H Y, et al. Effects of straw returning and organic substitution on crop yield and field nitrogen loss under wheat-maize rotation system. J Plant Nutr Fert, 2025, 31: 442–457 (in Chinese with English abstract).
- [4] 赵福成, 景立权, 闫发宝, 等. 施氮量对甜玉米产量、品质和蔗糖代谢酶活性的影响. 植物营养与肥料学报, 2013, 19: 45–53.
Zhao F C, Jing L Q, Yan F B, et al. Effects of nitrogen fertilization on yield, quality and enzyme activity associated with sucrose metabolism of sweet corn. Plant Nutr Fert Sci, 2013, 19: 45–53 (in Chinese with English abstract).
- [5] Li H R, Shang Y W, Gao J S, et al. Subsurface manure application enhances soil quality, ecosystem multifunctionality, and crop yield in the North China Plain. Appl Soil Ecol, 2024, 203: 105674.
- [6] Wang H B, Liu X P, Chen S C, et al. Hydrophobic neutral and basic fractions of organic fertilizer-derived dissolved organic matter promote phosphorus mobilization in paddy soils. Soil Tillage Res, 2026, 255: 106811.
- [7] 陈香碧, 胡亚军, 秦红灵, 等. 稻作系统有机肥替代部分化肥的土壤氮循环特征及增产机制. 应用生态学报, 2020, 31: 1033–1042.
Chen X B, Hu Y J, Qin H L, et al. Characteristics of soil nitrogen cycle and mechanisms underlying the increase in rice yield with partial substitution of mineral fertilizers with organic manure in a paddy ecosystem: a review. Chin J Appl Ecol, 2020, 31: 1033–1042 (in Chinese with English abstract).
- [8] 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).
- [9] Zhai L C, Wang Z B, Zhai Y C, et al. Partial substitution of chemical fertilizer by organic fertilizer benefits grain yield, water use efficiency, and economic return of summer maize. Soil Tillage Res, 2022, 217: 105287.
- [10] Tuo Y F, Xie C Y, Wang S J, et al. Irrigation combined with organic fertilizer could promote the environmental health of soil available nutrients and improve the functional activity of saponins in *Panax Notoginseng*. Agric Water Manag, 2025, 313: 109444.
- [11] 孙雪, 张玉铭, 张丽娟, 等. 长期添加外源有机物料对华北农田土壤团聚体有机碳组分的影响. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29: 1384–1396.
Sun X, Zhang Y M, Zhang L J, et al. Effects of long-term exogenous organic material addition on the organic carbon composition of soil aggregates in farmlands of North China. Chin J Eco-Agric, 2021, 29: 1384–1396 (in Chinese with English abstract).
- [12] Ren J H, Liu X L, Yang W P, et al. Rhizosphere soil properties, microbial community, and enzyme activities: short-term responses to partial substitution of chemical fertilizer with organic manure. J Environ Manag, 2021, 299: 113650.
- [13] 张庆, 胡春胜, 刘彬彬, 等. 生物有机肥配施化肥对生菜生长和土壤环境的影响. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31: 725–741.
Zhang Q, Hu C S, Liu B B, et al. Influence of combined application of bioorganic fertilizer and chemical fertilizer on lettuce growth and soil environment. Chin J Eco-Agric, 2023, 31: 725–741 (in Chinese with English abstract).
- [14] 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).
- [15] 尉亚囡, 薄其飞, 唐安, 等. 长期覆膜和施用有机肥对黄土高原春玉米产量和品质的效应. 中国农业科学, 2023, 56:

- 1708–1717.
- Wei Y N, Bo Q F, Tang A, et al. Effects of long-term film mulching and application of organic fertilizer on yield and quality of spring maize on the Loess Plateau. *Sci Agric Sin*, 2023, 56: 1708–1717 (in Chinese with English abstract).
- [16] 张军, 胡川, 周起晖, 等. 减氮及有机肥替代对旱地冬小麦干物质积累、转运、分配和产量的影响. *作物学报*, 2025, 51: 207–220.
- Zhang J, Hu C, Zhou Q H, et al. Effects of nitrogen reduction and organic fertilizer substitution on dry matter accumulation, translocation, distribution, and yield of dryland winter wheat. *Acta Agron Sin*, 2025, 51: 207–220 (in Chinese with English abstract).
- [17] 郭喜军, 谢军红, 李玲玲, 等. 氮肥用量及有机无机肥配比对陇中旱农区玉米光合特性及产量的影响. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26: 806–816.
- Guo X J, Xie J H, Li L L, et al. Appropriate nitrogen fertilizer rate and organic N ratio for satisfactory photosynthesis and yield of maize in dry farming area of Longzhong, Gansu province. *J Plant Nutr Fert*, 2020, 26: 806–816 (in Chinese with English abstract).
- [18] 姚霄宇, 邱纹, 陆虎华, 等. 种植密度和施肥方式对春播鲜食糯玉米产量、品质及氮素吸收利用的影响. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29: 2258–2271.
- Yao X Y, Qiu W, Lu H H, et al. Optimum combination of planting density and fertilization mode for high yield, quality and nitrogen utilization of spring-sown fresh waxy maize. *J Plant Nutr Fert*, 2023, 29: 2258–2271 (in Chinese with English abstract).
- [19] 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).
- [20] Wu Z M, Chen X, Lu X C, et al. Impact of combined organic amendments and chemical fertilizers on soil microbial limitations, soil quality, and soybean yield. *Plant Soil*, 2025, 507: 317–334.
- [21] 陶磊, 褚贵新, 刘涛, 等. 有机肥替代部分化肥对长期连作棉田产量、土壤微生物数量及酶活性的影响. *生态学报*, 2014, 34: 6137–6146.
- Tao L, Chu G X, Liu T, et al. Impacts of organic manure partial substitution for chemical fertilizer on cotton yield, soil microbial community and enzyme activities in mono-cropping system in drip irrigation condition. *Acta Ecol Sin*, 2014, 34: 6137–6146 (in Chinese with English abstract).
- [22] 万连杰, 何满, 李俊杰, 等. 有机肥替代部分化肥对椴柑生长、品质及土壤特性的影响. *中国农业科学*, 2022, 55: 2988–3001.
- Wan L J, He M, Li J J, et al. Effects of partial substitution of chemical fertilizer by organic fertilizer on ponkan growth and quality as well as soil properties. *Sci Agric Sin*, 2022, 55: 2988–3001 (in Chinese with English abstract).
- [23] Zhang X B, Sun N, Wu L H, et al. Effects of enhancing soil organic carbon sequestration in the topsoil by fertilization on crop productivity and stability: Evidence from long-term experiments with wheat-maize cropping systems in China. *Sci Total Environ*, 2016, 562: 247–259.
- [24] 王晓娟, 贾志宽, 梁连友, 等. 不同有机肥量对旱地玉米光合特性和产量的影响. *应用生态学报*, 2012, 23: 419–425.
- Wang X J, Jia Z K, Liang L Y, et al. Effects of organic fertilizer application rate on leaf photosynthetic characteristics and grain yield of dryland maize. *Chin J Appl Ecol*, 2012, 23: 419–425 (in Chinese with English abstract).
- [25] 杨康, 吴坤燕, 孙瑞, 等. 有机肥部分替代化肥对华北小麦-玉米农田氮素损失及氮平衡的影响. *中国生态农业学报(中英文)*, 2025, 33: 484–497.
- Yang K, Wu K Y, Sun R, et al. Effect of partial replacement of mineral fertilizer by manure on nitrogen losses and balance from wheat-maize farmland in North China. *Chin J Eco-Agric*, 2025, 33: 484–497 (in Chinese with English abstract).
- [26] 潘剑玲, 代万安, 尚占环, 等. 秸秆还田对土壤有机质和氮素有效性影响及机制研究进展. *中国生态农业学报*, 2013, 21: 526–535.
- Pan J L, Dai W A, Shang Z H, et al. Review of research progress on the influence and mechanism of field straw residue incorporation on soil organic matter and nitrogen availability. *Chin J Eco-Agric*, 2013, 21: 526–535 (in Chinese with English abstract).
- [27] 尹海龙, 田长彦. 根施甜菜碱对盐胁迫下玉米幼苗根系生长与光合特性的影响(简报). *干旱区资源与环境*, 2013, 27(9): 113–118.
- Yin H L, Tian C Y. Effects of root-applied glycinebetaine on the root growth and photosynthetic characteristics under salt stress in maize seedlings. *J Arid Land Resour Environ*, 2013, 27(9): 113–118 (in Chinese with English abstract).
- [28] 赵隼, 董树亭, 刘鹏, 等. 有机无机肥长期定位施肥对冬小麦群体光合特性及籽粒产量的影响. *应用生态学报*, 2015, 26: 2362–2370.
- Zhao J, Dong S T, Liu P, et al. Effects of long-term mixed application of organic and inorganic fertilizers on canopy apparent photosynthesis and yield of winter wheat. *Chin J Appl Ecol*, 2015, 26: 2362–2370 (in Chinese with English abstract).
- [29] 郭瑶, 柴强, 殷文, 等. 玉米密植光合生理机制及应用途径研究进展. *作物学报*, 2022, 48: 1871–1883.
- Guo Y, Chai Q, Yin W, et al. Research progress of photosynthetic physiological mechanism and approaches to application in dense planting maize. *Acta Agron Sin*, 2022, 48: 1871–1883 (in Chinese with English abstract).
- [30] Wang C, Ma H Y, Feng Z H, et al. Integrated organic and inorganic fertilization and reduced irrigation altered prokaryotic microbial community and diversity in different compartments of wheat root zone contributing to improved nitrogen uptake and wheat yield. *Sci Total Environ*, 2022, 842: 156952.
- [31] 杨昭, 柴强, 王玉, 等. 河西绿洲灌区减量灌溉下绿肥对小麦光合源及产量的补偿效应. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28: 1003–1014.
- Yang Z, Chai Q, Wang Y, et al. Compensation of green manure on photosynthetic source and yield loss of wheat caused by reduced irrigation in Hexi oasis irrigation area. *J Plant Nutr Fert*, 2022, 28: 1003–1014 (in Chinese with English abstract).
- [32] 栗海鹏, 杜武焰, 吴涵茜, 等. 不同有机肥对煤矿复垦区土壤养分及细菌群落结构的影响. *中国农业科学*, 2024, 57: 3207–3219.

- Li H P, Du W Y, Wu H Q, et al. Different manures affect soil nutrients and bacterial community structure in mining reclamation area. *Sci Agric Sin*, 2024, 57: 3207–3219 (in Chinese with English abstract).
- [33] 董睿潇, 王永庆, 王鑫博, 等. 盐胁迫对食用型向日葵现蕾期叶片光合性能与冠层结构的影响. *中国生态农业学报(中英文)*, 2024, 32: 141–152.
- Dong R X, Wang Y Q, Wang X B, et al. Effects of salt stress on photosynthetic characteristics and canopy structure of edible sunflower leaves at budding stage. *Chin J Eco-Agric*, 2024, 32: 141–152 (in Chinese with English abstract).
- [34] He H, Peng M W, Lu W D, et al. Commercial organic fertilizer substitution increases wheat yield by improving soil quality. *Sci Total Environ*, 2022, 851: 158132.
- [35] 公华锐, 李静, 马军花, 等. 秸秆还田配施有机无机肥料对冬小麦土壤水氮变化及其微生物群落和活性的影响. *生态学报*, 2019, 39: 2203–2214.
- Gong H R, Li J, Ma J H, et al. Effects of straw incorporation combined with inorganic-organic fertilization on soil water and nitrogen changes and microbial community structure in winter wheat. *Acta Ecol Sin*, 2019, 39: 2203–2214 (in Chinese with English abstract).
- [36] 吴龙龙, 田仓, 张露, 等. 稻田水氮氧环境因子对水稻生长发育、光合作用和氮利用的调控研究进展. *应用生态学报*, 2021, 32: 1498–1508.
- Wu L L, Tian C, Zhang L, et al. Research advance in the roles of water-nitrogen-oxygen factors in mediating rice growth, photosynthesis and nitrogen utilization in paddy soils. *Chin J Appl Ecol*, 2021, 32: 1498–1508 (in Chinese with English abstract).
- [37] 李君艳, 姚得秀, 郭晓磊, 等. 花后干旱对冬小麦光合、抗氧化特性和 C_4 光合酶活性的影响. *生态学杂志*, 2023, 42: 49–57.
- Li J Y, Yao D X, Guo X L, et al. Effects of post-anthesis drought on photosynthesis, antioxidant properties, and C_4 photosynthetic enzyme activity in winter wheat. *Chin J Ecol*, 2023, 42: 49–57 (in Chinese with English abstract).
- [38] Wang Y L, Lyu H Q, Yu A Z, et al. No-tillage mulch with green manure retention improves maize yield by increasing the net photosynthetic rate. *Eur J Agron*, 2024, 159: 127275.
- [39] 张水勤, 袁亮, 林治安, 等. 腐植酸促进植物生长的机理研究进展. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23: 1065–1076.
- Zhang S Q, Yuan L, Lin Z A, et al. Advances in humic acid for promoting plant growth and its mechanism. *J Plant Nutr Fert*, 2017, 23: 1065–1076 (in Chinese with English abstract).
- [40] 裴丽珍, 陈远学, 张雯雯, 等. 有机物料还田对夏玉米穗位叶光合性能及氮代谢的影响. *作物学报*, 2022, 48: 2115–2124.
- Pei L Z, Chen Y X, Zhang W W, et al. Effects of organic material returned on photosynthetic performance and nitrogen metabolism of ear leaf in summer maize. *Acta Agron Sin*, 2022, 48: 2115–2124 (in Chinese with English abstract).
- [41] 李澳旗, 张俊, 崔晓路, 等. 不同灌水量下尿素添加适宜氮肥增效剂促进夏玉米灌浆增产. *农业工程学报*, 2023, 39(16): 99–110.
- Li A Q, Zhang J, Cui X L, et al. Nitrogen fertilizer synergist in urea under irrigation for high yield of summer maize at the filling stage. *Trans CSAE*, 2023, 39(16): 99–110 (in Chinese with English abstract).
- [42] Cheng M H, Wang H D, Zhang F C, et al. Effects of irrigation and fertilization regimes on Tuber yield, water-nutrient uptake and productivity of potato under drip fertigation in sandy regions of northern China. *Agric Water Manag*, 2023, 287: 108459.
- [43] Ma D K, Yin L N, Ju W L, et al. Meta-analysis of green manure effects on soil properties and crop yield in northern China. *Field Crops Res*, 2021, 266: 108146.
- [44] 白春生, 范虹, 李波, 等. 等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).
- [45] 史帆, 李文广, 易树生, 等. 有机无机肥配施下旱地麦田土壤有机碳组分含量的变化特征. *中国农业科学*, 2025, 58: 719–732.
- Shi F, Li W G, Yi S S, et al. The variation characteristics of soil organic carbon fractions under the combined application of organic and Inorganic fertilizers. *Sci Agric Sin*, 2025, 58: 719–732 (in Chinese with English abstract).
- [46] 张贵芹, 王洪章, 郭新送, 等. 有机物料投入对滨海盐碱地土壤理化性状和夏玉米产量形成的影响. *作物学报*, 2024, 50: 2323–2334.
- Zhang G Q, Wang H Z, Guo X S, et al. Effects of organic material inputs on soil physicochemical properties and summer maize yield formation in coastal saline-alkali land. *Acta Agron Sin*, 2024, 50: 2323–2334 (in Chinese with English abstract).
- [47] Gao P, Zhang T, Lei X Y, et al. Improvement of soil fertility and rice yield after long-term application of cow manure combined with inorganic fertilizers. *J Integr Agric*, 2023, 22: 2221–2232.
- [48] 温延臣, 张曰东, 袁亮, 等. 商品有机肥替代化肥对作物产量和土壤肥力的影响. *中国农业科学*, 2018, 51: 2136–2142.
- Wen Y C, Zhang Y D, Yuan L, et al. Crop yield and soil fertility response to commercial organic fertilizer substituting chemical fertilizer. *Sci Agric Sin*, 2018, 51: 2136–2142 (in Chinese with English abstract).
- [49] 叶盛嘉, 郑晨萌, 张影, 等. 氮肥减量配施有机肥对豫中地区冬小麦-夏玉米轮作生产力和土壤性质的影响. *中国生态农业学报(中英文)*, 2022, 30: 900–912.
- Ye S J, Zheng C M, Zhang Y, et al. Effects of reduced chemical nitrogen input combined with organic fertilizer application on the productivity of winter wheat and summer maize rotation and soil properties in central Henan province. *Chin J Eco-Agric*, 2022, 30: 900–912 (in Chinese with English abstract).
- [50] 盖霞普, 刘宏斌, 翟丽梅, 等. 长期增施有机肥/秸秆还田对土壤氮素淋失风险的影响. *中国农业科学*, 2018, 51: 2336–2347.
- Gai X P, Liu H B, Zhai L M, et al. Effects of long-term additional application of organic manure or straw incorporation on soil nitrogen leaching risk. *Sci Agric Sin*, 2018, 51: 2336–2347 (in Chinese with English abstract).
- [51] 郭慧婷, 高静, 张强, 等. 有机肥对我国酸性和碱性土壤 pH 的影响差异及原因. *应用与环境生物学报*, 2024, 30: 496–503.
- Guo H T, Gao J, Zhang Q, et al. Differences and reasons for the effects of organic fertilizer on the pH of acidic and alkaline soils

- in China. *Chin J Appl Environ Biol*, 2024, 30: 496–503 (in Chinese with English abstract).
- [52] 张秀颖, 蔡江平, 王聪, 等. 不同培肥模式对辽西北沙化草地土壤改良与植被恢复的影响. *应用生态学报*, 2024, 35: 55–61. Zhang X Y, Cai J P, Wang C, et al. Effects of different fertilization patterns on soil improvement and vegetation restoration of desertified grassland in northwest Liaoning province, China. *Chin J Appl Ecol*, 2024, 35: 55–61 (in Chinese with English abstract).
- [53] 李荣, 勉有明, 侯贤清, 等. 施氮对还田秸秆腐解及养分释放、土壤肥力与玉米产量的影响. *作物学报*, 2023, 49: 2012–2022. Li R, Mian Y M, Hou X Q, et al. Effects of nitrogen application on decomposition and nutrient release of returning straw, soil fertility, and maize yield. *Acta Agron Sin*, 2023, 49: 2012–2022 (in Chinese with English abstract).
- [54] 姚佳璇, 俄胜哲, 袁金华, 等. 施肥对灌漠土作物产量、土壤肥力与重金属含量的影响. *中国生态农业学报(中英文)*, 2020, 28: 813–825. Yao J X, E S Z, Yuan J H, et al. Effects of fertilization on crop yield, soil fertility and heavy metal content in irrigated desert soil. *Chin J Eco-Agric*, 2020, 28: 813–825 (in Chinese with English abstract).
- [55] 胡可, 李华兴, 卢维盛, 等. 生物有机肥对土壤微生物活性的影响. *中国生态农业学报*, 2010, 18: 303–306. Hu K, Li H X, Lu W S, et al. Effect of microbial organic fertilizer application on soil microbial activity. *Chin J Eco-Agric*, 2010, 18: 303–306 (in Chinese with English abstract).
- [56] 梁元振, 赵京考, 吴德亮, 等. 秋施有机肥对土壤生物学、理化性状及玉米产量的影响. *水土保持研究*, 2017, 24(3): 113–118. Liang Y Z, Zhao J K, Wu D L, et al. Effects of applying organic fertilizer in autumn on soil biology, physical and chemical properties and maize yield. *Res Soil Water Conserv*, 2017, 24(3): 113–118 (in Chinese with English abstract).