杨琳琳,张飞,张裕川,等.腐植酸叶面肥对高粱冠层及光合特性调控研究[J].山西农业大学学报(自然科学版),2025,45(4):102-111.
Yang L L, Zhang F, Zhang Y C, et al.Studies on the regulation of humic acid foliar fertilizer on sorghum canopy and photosynthetic characteristics[J].Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2025,45(4):102-111.
doi: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202504013

腐植酸叶面肥对高粱冠层及光合特性调控研究

杨琳琳[1],张飞[1],张裕川[2],王艳秋[1],杨毅轩[2],朱凯[1],张志鹏[1],王佳旭[1],张旷野[1],卢峰[1*]

(1.辽宁省农业科学院 高粱研究所,辽宁 沈阳 110161;2.西北农林科技大学 农学院,陕西 杨凌 712100)

摘　要:[目的]高粱是全球第5大禾谷类作物,在粮食安全与农业可持续发展中有重要地位,但传统高粱栽培过度依赖根系施肥,易加剧环境污染、限制产量。腐植酸可促进作物产量提高,在高粱中也有应用,但其对高粱光合特性乃至产量形成的影响机制尚报道较少。研究腐植酸叶面肥对高粱冠层结构、光合特性及产量的调控作用,旨在探讨其在光能利用效率与产量形成关系中的潜在作用机制。[方法]以'辽粱1号'(LL1)、'辽糯10'(LN10)和'辽粘3号'(LN3)这3个高粱品种为试验材料,2022—2024年连续3年进行试验,设置腐植酸叶面肥喷施处理与清水对照,于花期喷施后测定冠层叶面积指数(LAI)、光合有效辐射(PAR)、光合参数、农艺性状及产量。[结果]腐植酸叶面肥处理提高了3个高粱品种的总LAI,增幅为1.26%～5.91%,其中LN3增幅最大且与对照差异显著;冠层PAR分布模式改变,各层PAR均降低,且下层降幅最大;群体光截获率提高,其中LL1和LN10的增幅分别为1.81%和2.92%,与对照相比差异显著;腐植酸叶面肥明显降低了LL1、LN10冠层下层透光率以及LN3的中层透光率,明显增加了LN10的消光系数。光分布的优化进一步缓解了高粱灌浆期光合衰退现象,表现为净光合速率提高11.66%～13.36%,胞间CO_2浓度降低9.33%～13.86%,气孔导度提升7.03%～17.99%,水分利用率增加4.40%～6.33%;喷施叶面肥后,LL1、LN10和LN3的产量均提高,增幅分别为10.88%、4.47%和6.29%,其中LN3农艺性状优化更为全面。[结论]喷施腐植酸叶面肥可优化高粱冠层结构,提高光能利用效率,缓解光合衰退,最终促进产量提升,可为利用腐植酸叶面肥进行高粱高效栽培提供理论支持。然而,腐植酸叶面肥的调控效应存在明显的品种间差异,后续研究需进一步探讨其内在调控机制并优化施肥方案。

关键词:腐植酸; 叶面肥; 高粱; 冠层结构; 光合特性; 产量
中图分类号:S514　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1671-8151(2025)04-0102-10

Studies on the regulation of humic acid foliar fertilizer on sorghum canopy and photosynthetic characteristics

Yang Linlin[1], Zhang Fei[1], Zhang Yuchuan[2], Wang Yanqiu[1], Yang Yixuan[2], Zhu Kai[1], Zhang Zhipeng[1], Wang Jiaxu[1], Zhang Kuangye[1], Lu Feng[1*]

(*1.Sorghum Research Institute, Liaoning Academy of Agricultural Sciences, Shenyang 110161, China; 2.College of Agriculture, Northwest A&F University, Yangling 712100, China*)

Abstract: [Objective] As the fifth most important cereal crop globally, sorghum plays a crucial role in food security and sustainable agriculture. Conventional sorghum cultivation practices heavily rely on root-zone fertilization, which may exacerbate environmental pollution while limit yield potential. Although humic acid (HA) has demonstrated crop productivity benefits and been applied in sorghum cultivation, its regulatory effects on sorghum photosynthesis and yield formation remain poorly under-

收稿日期:2025-04-07　　**修回日期**:2025-06-30
基金项目:国家谷子高粱产业技术体系(CARS-06-14.5-A22);国家现代农业产业技术体系高粱产业辽宁创新团队项目;专用高粱种质创制及新品种培育(2023JH1/10200001);乡村振兴科技支撑关键技术示范(2025-XCZX-004);沈阳市种业创新专项(24-215-2-02)
作者简介:杨琳琳(ORCID:0009-0005-1327-3061),研究实习员,研究方向:高粱育种与栽培,E-mail:yanglnlin0330@163.com
*通信作者:卢峰,研究员,E-mail:lufeng740202023@163.com

stood. This study aimed to investigate HA foliar fertilizer effects on sorghum canopy structure, photosynthetic characteristics, and yield to explore its potential mechanisms of action in the relationship between light energy utilization efficiency and yield formation. [Methods] Field experiments were conducted over three consecutive growing seasons (2022-2024) using three sorghum cultivars: 'Liaoliang 1' (LL1), 'Liaonuo 10' (LN10), and 'Liaonian 3' (LN3). Treatments included HA foliar application and a water control (CK), with measurements taken post- flowering for: canopy leaf area index (LAI), photosynthetically active radiation (PAR)distribution, photosynthetic parameters, agronomic traits, and yield components. [Results]HA foliar fertilizer treatment significantly increased total LAI in all cultivars ranged between 1.26% and 5.91%, with LN3 showing the highest improvement. Canopy PAR distribution pattern was significantly changed, with reduced PAR across all layers, particularly in the lower canopy. Light interception rate increased, with LL1 and LN10 exhibiting significant improvements of 1.81% and 2.92%, respectively. HA foliar treatment also significantly reduced light transmittance in the lower canopy of LL1 and LN10 and the middle canopy of LN3 while significantly increasing the extinction coefficient in LN10. These structural optimizations mitigated photosynthetic decline during grain filling, enhancing net photosynthetic rate by 11.66%～13.36%, reducing intercellular CO_2 concentration by 9.33%～13.86%, improving stomatal conductance by 7.03%～17.99%, and boosting water use efficiency by 4.40%～6.33%. After HA foliar application, yield increases of 10.88%, 4.47% and 6.29% were observed in LL1, LN10 and LN3, respectively, with LN3 demonstrating the most comprehensive agronomic improvements. [Conclusion]HA foliar application optimized sorghum canopy structure, enhanced light use efficiency, alleviated photosynthetic decline, and ultimately increased yield. These findings provide theoretical support for the HA-based high-efficiency sorghum cultivation. However, cultivar-specific responses highlight the need for further studies on underlying regulatory mechanisms and fertilization strategies.

Keywords: Humic acid, Foliar fertilizer, Sorghum, Canopy structure, Photosynthetic characteristics, Yield

高粱(*Sorghum bicolor* L.)是全球第5大禾谷类作物,具有抗旱、耐涝、耐盐碱、耐瘠薄等特性,同时兼具粮食、饲料、能源和工业原料等多重用途,在保障粮食安全和推动农业可持续发展中具有重要地位[1-3]。然而,传统栽培技术中过度依赖土壤施肥的粗放管理模式逐渐显现弊端,如长期过量施用化肥导致的土壤板结、养分利用率低下等,加剧环境污染风险[4-5]。因此,如何通过绿色高效的栽培管理技术优化养分管理、增强光合生产能力,进而实现产量与品质协同提升,仍是当前高粱生产中亟待解决的关键问题。

腐植酸是动植物遗骸经过长时间的降解累积形成的一种大分子有机化合物,含有多种活性基团[5]。腐植酸水溶肥是以腐植酸为功能性载体,通过科学配比添加氮、磷、钾等大量元素或铜、铁、锌等必需微量元素制成的复合型肥料[6]。与传统化肥相比,腐植酸水溶肥兼具改良土壤环境、促进作物养分吸收、增强作物抗逆性及调控作物生理代谢等多重功能,近年来逐渐成为绿色农业生产中的研究热点,尤其在高附加值作物与逆境农田系统中展现出广阔的应用前景[7-11]。前人研究发现在水稻、玉米、谷子和小麦等粮食作物的生长后期,叶面喷施腐植酸均对作物产量的提高起到了明显的促进作用。例如,水稻孕穗期和灌浆期喷施腐植酸叶面肥,可提高结实率,增加千粒重[12]。在玉米拔节期喷施腐植酸叶面肥,玉米的穗粒数较对照显著增加,增产率可达8.3%[13]。在谷子的各生育期使用腐植酸叶面肥处理后,谷子穗重、穗粒重均显著增加,光合指标也有明显改善,并且随着喷施时间向生长后期的推移,腐植酸改善效果更加显著[14]。在小麦抽穗期和灌浆期喷施腐植酸叶面肥500倍液,可使小麦增产10.06%[15]。

目前腐植酸在高粱上的研究多聚焦于土壤改良和养分吸收方面,研究表明,腐植酸可改善土壤结构,提高高粱对氮、磷等关键养分的吸收能力,从而提升其抗逆性与产量。例如,杨钰燕[16]的研究显示,在450 kg/hm^{2}的腐植酸施用量下,土壤pH值和可溶性盐含量降低,土壤有机质、全氮、有效磷和速效钾含量增加,高粱的干物质积累和产量提升。张玲玉[17]的研究发现腐植酸生物炭改善了土壤理化性质,降低了土壤pH值和电导率,显著缓解了盐胁迫对高粱生长、产量和光合参数的抑制。腐植酸与无机肥配合施用可显著提高沙土的有机质、阳离子交换量、全氮、速效氮、速效磷和速效钾含量[18]。腐植酸和生物炭配合施用可显著促进高粱茎叶对土壤磷素的吸收,提高磷素利用率[19]。然而,腐植酸在高粱叶面喷施中对冠层结构动态变化与光合特性协同影响的系统研究仍较

缺乏。高粱的冠层结构是影响光能截获和光合效率的关键因素,而光合特性则是决定产量形成的核心指标。本研究通过在开花期对‘辽糯10’(LN10)、‘辽粱1号’(LL1)和‘辽粘3号’(LN3)3个高粱品种进行田间喷施腐植酸叶面肥,系统分析其对高粱冠层结构、光合特性及产量形成的调控效应,旨在为高粱绿色高效栽培技术体系的优化提供理论支持。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

本试验在陕西省榆林市小杂粮综合试验示范站(37°56′26″ N, 109°21′46″ E)开展,该区域属于干旱半干旱大陆性季风气候,海拔1120 m。高粱生长季(6-9月)平均降水量450 mm左右,平均气温为25.8 ℃。试验地属于典型的黄土高原丘陵沟壑区,土壤为黄绵土,地势平坦、肥力均匀。

1.2 试验材料

供试高粱品种‘辽粱1号’(LL1)、‘辽糯10’(LN10)和‘辽粘3号’(LN3)具有抗逆性强、适应性广的特点,均由辽宁省农业科学院高粱研究所选育。3个品种在陕西榆林试验区株高均略低于品种审定株高,其中,‘辽糯10’株高130~145 cm,生育期113 d;‘辽粱1号’株高150~165 cm,生育期115 d;‘辽粘3号’株高150~165 cm,生育期116 d。

供试肥料为腐植酸水溶肥料,购买自四川国光农化股份有限公司(腐植酸≥40 g/L)。

1.3 试验设计

试验于2022-2024年进行,每年5月中旬播种高粱,9月底收获。试验采用随机区组设计,小区为8行区,行长10 m、宽0.50 m,面积40 m^2,每处理3个小区。南北向种植,种植密度10.5株/m^2。试验区四周设置1.5 m保护行,种植同品种高粱。在高粱开花期(全区50%植株半穗以上进入开花阶段[20])人工喷施腐植酸叶面肥(YMF),此时群体冠层结构趋于稳定,叶片光合功能对产量贡献显著[21]。喷施时间选择晴朗无风天气,保证叶片充分湿润且药液缓干。喷施前按照肥料推荐浓度,稀释成500倍液,根据小区面积计算实际用量,确保肥料喷施剂量为225 L/hm^2,以同步喷施等量清水为对照(CK)。底肥施用缓释肥600 kg/hm^2(N:P:K=26:12:10),拔节期追施尿素150 kg/hm^2,其它田间管理措施均按当地高产栽培模式统一进行。

1.4 试验方法

1.4.1 冠层结构相关参数测定

于高粱灌浆期,选晴朗天气中午11:00-13:00进行调查[22]。在每小区随机选取3株生长势一致的代表性植株,使用植物冠层分析仪SS1 SunScan对冠层垂直方向进行分层测定(上层、中层、下层),同步获取叶面积指数(leaf area index,LAI)、冠层光合有效辐射(photosynthetically active radiation,PAR)、光截获率、透光率和消光系数。

1.4.2 光合特性指标测定

于高粱灌浆期,选晴朗天气上午9:00-11:00,在每小区随机选取3株生长势一致的代表性植株,调查倒二叶光合特性[23]。使用便携式光合仪CIRAS-3测定净光合速率(net photosynthetic rate,Pn)、气孔导度(stomatal conductance,Gs)、胞间CO_2浓度(intercellular carbon dioxide concentration,Ci)及蒸腾速率(transpiration rate,Tr);利用叶绿素仪SPAD-502测定叶片的相对叶绿素含量(soil and plant analyzer development,SPAD)。每个叶片重复测量3次。

1.4.3 农艺性状测定

于高粱成熟期,在每小区随机选取3株生长势一致的代表性植株,使用塔尺测量株高和穗长,使用游标卡尺测量茎粗(茎秆基部上数第5节的直径)和穗粗(穗中部最大直径)。待植株样本经105 ℃杀青30 min后,65 ℃烘干至恒重,测定地上部分干物质量[24]。每小区收获中间2行植株进行产量测定,并将实测产量折算为14%标准含水率下的公顷产量。

1.5 统计分析

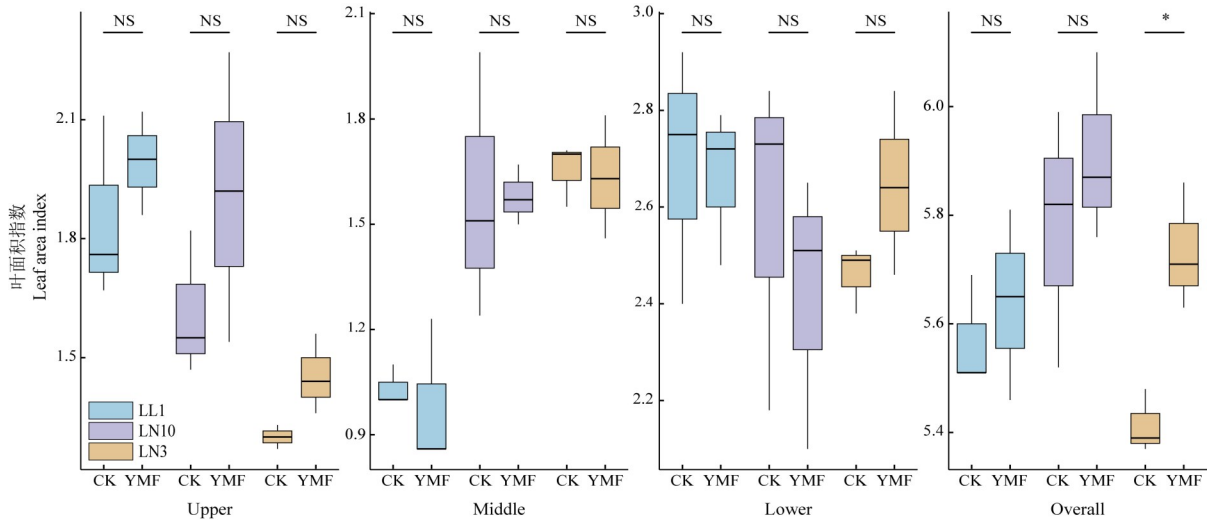
使用Excel 2019软件对试验数据进行初步整理,计算各指标的算术平均值与标准差,所有图形与表格均基于2022-2024年各年度数据平均值绘制;使用SPSS 24软件对数据进行统计分析,对于仅包含2个处理组的数据,采用独立样本T检验(Independent-Samples T Test)评估其差异显著性;对于3组及以上的比较,采用单因素方差分析(One-Way ANOVA),在满足正态性和方差齐性的前提下,通过LSD事后检验确定组间显著性差

异,以$P<0.05$为差异显著。

2　结果与分析

2.1　喷施腐植酸叶面肥后高粱叶面积指数

3个品种高粱灌浆期的整体叶面积指数为5.41～5.91。对照组中,各品种上层LAI为1.30～1.85,普遍低于下层LAI(2.46～2.69)。与对照相比,腐植酸叶面肥处理提高了LL1、LN10和LN3的上层LAI,分别由1.85、1.61和1.30增加至1.99、1.91和1.45,增幅分别为7.57%、18.63%和11.54%;中层LAI和下层LAI对叶面肥的响应存在品种差异,LL1和LN3的中层LAI分别降低4.85%和1.21%,而LN10无明显变化,下层LAI在LL1和LN10中分别降低1.12%和6.20%,但在LN3中增加7.72%。总体而言,喷施腐植酸叶面肥后,LL1、LN10和LN3的总LAI均呈增加趋势,增幅分别为1.26%、2.25%和5.91%,其中,LN3增幅最大且达显著水平(图1)。



Upper:冠层上层;Middle:冠层中层;Lower:冠层下层;Overall:总体情况。LL1:'辽粱1号';LN10:'辽糯10';LN3:'辽粘3号'。CK:清水处理;YMF:腐植酸叶面肥处理。NS:无显著差异;*:差异显著($P<0.05$)。箱线图自下而上分别对应最小值、下四分位数、中位数、上四分位数和最大值5个统计量

Upper: Upper layer of the canopy; Middle: Middle layer of the canopy; Lower: Lower layer of the canopy; Overall: Entire canopy. LL1: Liaoliang 1'; LN10: 'Liaonuo 10'; LN3: 'Liaonian 3'. CK: Water treatment; YMF: Humic acid foliar fertilizer treatment. NS: Not significant; *: Significant at $P<0.05$. The boxplot displays five statistical metrics from bottom to top: minimum, first quartile, median, third quartile, and maximum

图1　喷施腐植酸叶面肥后不同高粱品种叶面积指数

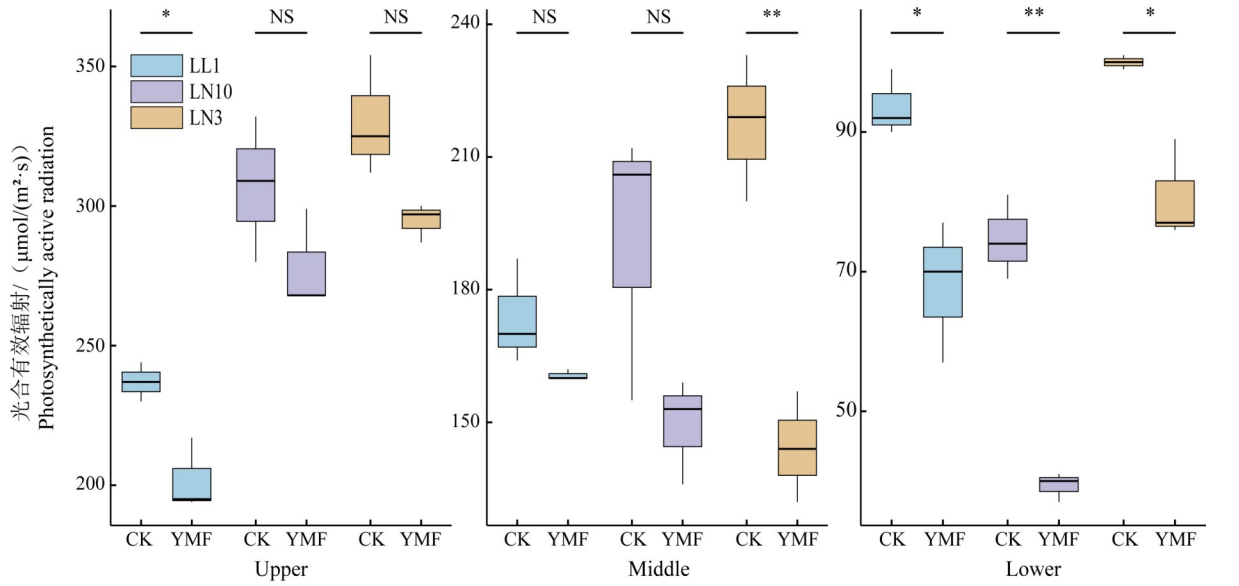
Fig.1　Leaf area index of different sorghum varieties with HA foliar application

2.2　喷施腐植酸叶面肥后高粱冠层光合有效辐射空间分布

在冠层垂直方向,随着冠层高度增加,PAR逐渐变高(图2)。对照组中,各品种上部、中部、下部冠层的PAR分别为237.00～330.33、173.67～217.33和74.67～100.00。腐植酸叶面肥处理后各品种上部、中部、下部冠层PAR分别为202.00～294.67、144.33～160.67和39.33～80.67。施加腐植酸叶面肥改变了3个高粱品种冠层光分布模式,整体而言,叶面肥处理普遍降低了各层PAR,且下层降幅最为明显,而群体光截获率均呈上升趋势,其中LL1和LN10和对照相比差异显著,分别提高了1.81%和2.92%(图3)。同时,喷施腐植酸叶面肥对不同高粱品种冠层光分布的影响因品种而异,LL1上层和下层截获率分别增加2.52%和25.34%,但中层下降23.96%;LN10表现为中下层协同优化,中层和下层光截获率分别提升21.71%和21.63%;而LN3虽然中层截获率大幅增加(49.49%),但下层下降18.98%,使得整体增幅不明显。

2.3　喷施腐植酸叶面肥后高粱透光率和消光系数

如图4所示,喷施腐植酸叶面肥显著改变了高粱冠层光分布特征。施叶面肥后各冠层透光率较对照均下降,其中下层透光率降幅最明显,LL1、LN10、LN3分别减少1.70%、2.77%、1.04%。消光系数变化存在品种间差异,施叶面肥后LL1总消光系数由0.49增至0.54,LN10由0.51增至

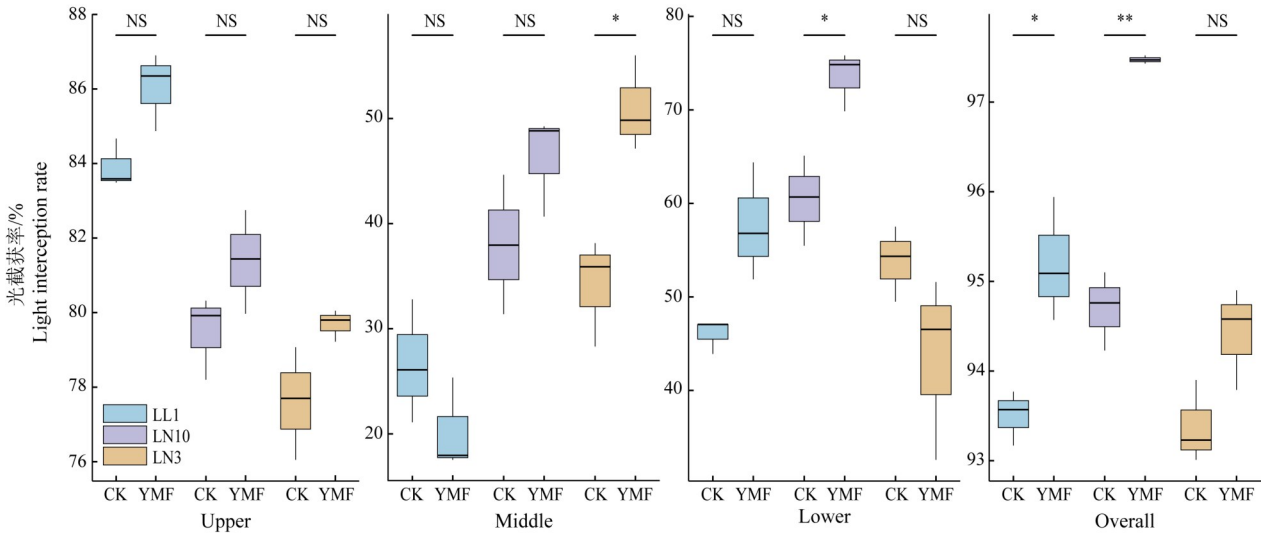


Upper:冠层上层;Middle:冠层中层;Lower:冠层下层。LL1:‘辽粱1号’;LN10:‘辽糯10’;LN3:‘辽粘3号’。CK:清水处理;YMF:腐植酸叶面肥处理。NS:无显著差异;*:差异显著($P<0.05$);**:差异极显著($P<0.01$)。箱线图自下而上分别对应最小值、下四分位数、中位数、上四分位数和最大值5个统计量

Upper: Upper layer of the canopy; Middle: Middle layer of the canopy; Lower: Lower layer of the canopy. LL1: Liaoliang 1'; LN10: 'Liaonuo 10'; LN3: 'Liaonian 3'. CK: Water treatment; YMF: Humic acid foliar fertilizer treatment. NS: Not significant; *: Significant at $P<0.05$; **: Significant at $P<0.01$. The boxplot displays five statistical metrics from bottom to top: minimum, first quartile, median, third quartile, and maximum

图2 喷施腐植酸叶面肥对不同高粱品种光合有效辐射的影响

Fig.2 Photosynthetically active radiation distribution in sorghum canopies with humic acid foliar treatment



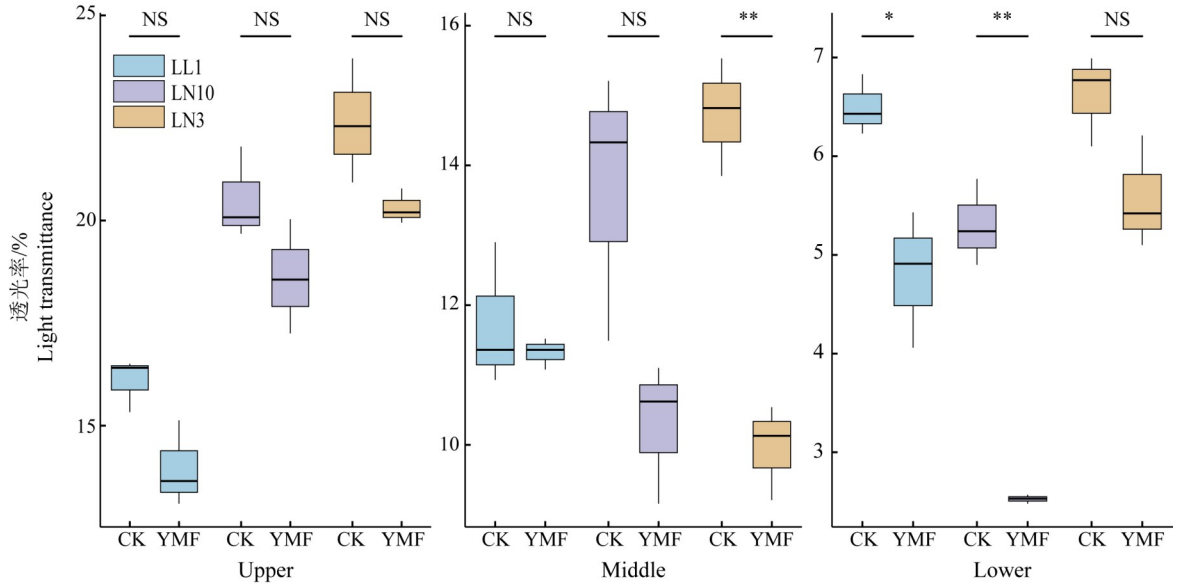
Upper:冠层上层;Middle:冠层中层;Lower:冠层下层;Overall:总体情况。LL1:‘辽粱1号’;LN10:‘辽糯10’;LN3:‘辽粘3号’。CK:清水处理;YMF:腐植酸叶面肥处理。NS:无显著差异;*:差异显著($P<0.05$);**:差异极显著($P<0.01$)。箱线图自下而上分别对应最小值、下四分位数、中位数、上四分位数和最大值5个统计量

Upper: Upper layer of the canopy; Middle: Middle layer of the canopy; Lower: Lower layer of the canopy; Overall: Entire canopy. LL1: Liaoliang 1'; LN10: 'Liaonuo 10'; LN3: 'Liaonian 3'. CK: Water treatment; YMF: Humic acid foliar fertilizer treatment; NS: Not significant; *: Significant at $P<0.05$; **: Significant at $P<0.01$. The boxplot displays five statistical metrics from bottom to top: minimum, first quartile, median, third quartile, and maximum

图3 喷施腐植酸叶面肥对不同高粱品种光截获率的影响

Fig.3 Effects of humic acid foliar application on light interception rate of different sorghum varieties

0.62,较对照差异显著,而LN3仍为0.50(图5)。整体而言,LL1施叶面肥后下层消光系数提升,但中层降低;LN10上层消光系数下降,但中层和下层均增加;LN3中层消光系数增加,下层降低。

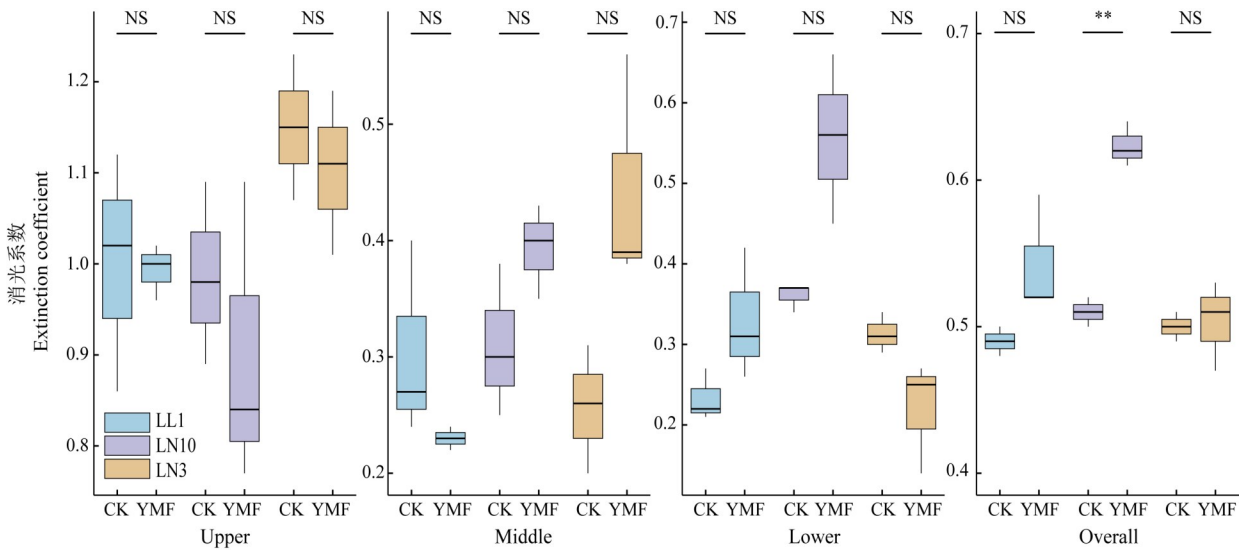


Upper:冠层上层;Middle:冠层中层;Lower:冠层下层。LL1:'辽粱1号';LN10:'辽糯10';LN3:'辽粘3号'。CK:清水处理;YMF:腐植酸叶面肥处理;NS:无显著差异;*:差异显著($P<0.05$);**:差异极显著($P<0.01$)。箱线图自下而上分别对应最小值、下四分位数、中位数、上四分位数和最大值5个统计量

Upper: Upper layer of the canopy; Middle: Middle layer of the canopy; Lower: Lower layer of the canopy. LL1: Liaoliang 1'; LN10: 'Liaonuo 10'; LN3: 'Liaonian 3'. CK: Water treatment; YMF: Humic acid foliar fertilizer treatment. NS: Not significant; *: Significant at $P<0.05$; **: Significant at $P<0.01$. The boxplot displays five statistical metrics from bottom to top: minimum, first quartile, median, third quartile, and maximum

图4　喷施腐植酸叶面肥对不同高粱品种冠层透光率的影响

Fig.4　Effects of HA foliar application on canopy light transmittance of different sorghum varieties



Upper:冠层上层;Middle:冠层中层;Lower:冠层下层;Overall:总体情况。LL1:'辽粱1号';LN10:'辽糯10';LN3:'辽粘3号'。CK:清水处理;YMF:腐植酸叶面肥处理。NS:无显著差异;**:差异极显著($P<0.01$)。箱线图自下而上分别对应最小值、下四分位数、中位数、上四分位数和最大值5个统计量

Upper: Upper layer of the canopy; Middle: Middle layer of the canopy; Lower: Lower layer of the canopy; Overall: Entire canopy. LL1: Liaoliang 1'; LN10: 'Liaonuo 10'; LN3: 'Liaonian 3'. CK: Water treatment; YMF: Humic acid foliar fertilizer treatment. NS: Not significant; *: Significant at $P<0.05$; **: Significant at $P<0.01$. The boxplot displays five statistical metrics from bottom to top: minimum, first quartile, median, third quartile, and maximum

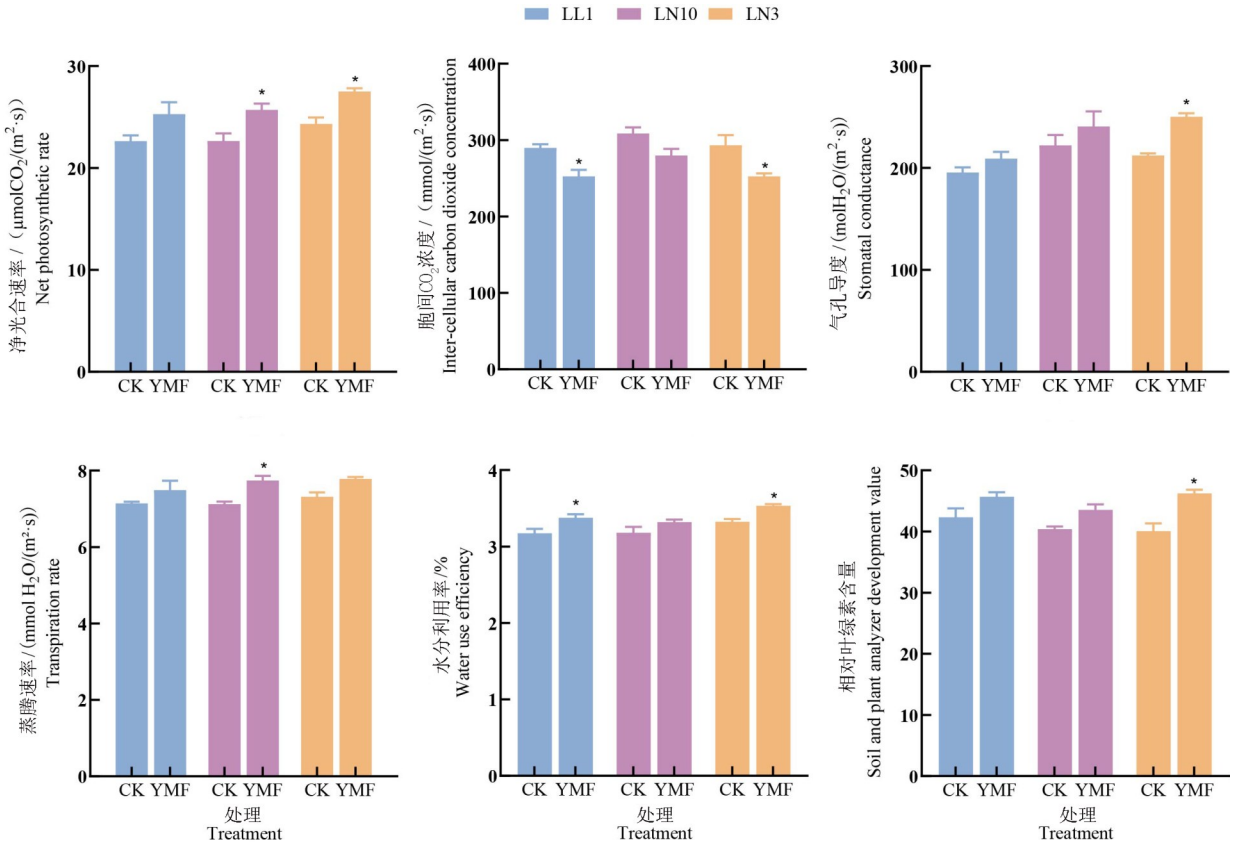
图5　喷施腐植酸叶面肥对不同高粱品种消光系数的影响

Fig.5　Extinction coefficient variations of different sorghum varieties with HA foliar application

2.4　喷施腐植酸叶面肥后高粱叶片光合特性

未喷施腐植酸叶面肥时,高粱灌浆期净光合速率较开花期下降21.54%～28.30%,伴随Pn降低、Ci普遍升高、Gs与Tr同步下降。喷施叶面肥

后光合衰退现象缓解,如图6所示,LL1的Pn提高11.66%,Ci显著下降12.92%,Gs提高7.03%,SPAD、Tr和水分利用率也分别增加了7.96%、4.90%和6.31%;LN10的Pn提升13.36%,Ci降低9.33%,Gs提高8.35%,SPAD、Tr和水分利用率分别增加7.75%、8.71%和4.40%;叶面肥对LN3光合性能改善最明显,相较对照,喷施叶面肥后该品种Pn、Gs、SPAD和水分利用率均显著提高,增幅分别为13.03%、17.99%、15.38%和6.33%,Ci显著降低13.86%。



LL1:‘辽粱1号’;LN10:‘辽糯10’;LN3:‘辽粘3号’。CK:清水处理;YMF:腐植酸叶面肥处理;*:2个处理间差异显著($P<0.05$)

LL1: Liaoliang 1’; LN10: ‘Liaonuo 10’; LN3:‘Liaonian 3’. CK: Water treatment; YMF: Humic acid foliar fertilizer treatment; *: There is significant difference bewteen two treatments ($P<0.05$)

图6 喷施腐植酸叶面肥对不同高粱品种光合特性的影响

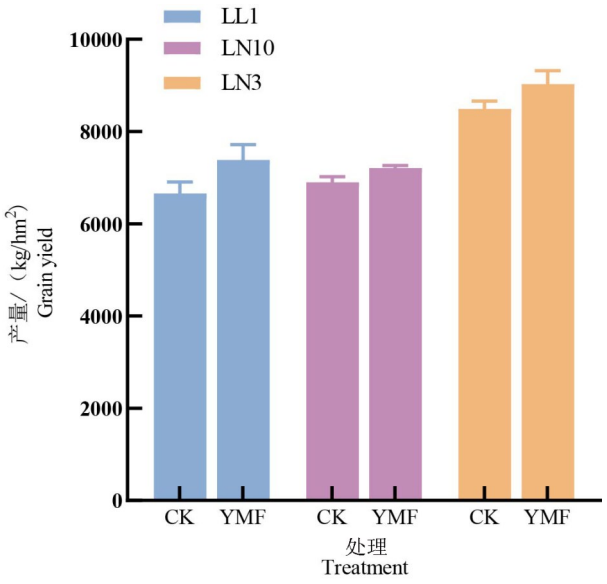
Fig.6 Effects of HA foliar fertilizer on photosynthetic characteristics of different sorghum varieties

2.5 喷施腐植酸叶面肥后高粱农艺性状与产量

对照组中,LL1、LN10和LN3这3个高粱品种的产量分别为6 660.25 kg/hm^2、6 902.15 kg/hm^{2}和8 492.10 kg/hm^2;而喷施腐植酸叶面肥后3个高粱品种的产量分别增至7 384.95 kg/hm^2、7 210.80 kg/hm^{2}和9 027.00 kg/hm^2(图7),分别较对照提高了10.88%、4.47%和6.29%。腐植酸叶面肥处理后,LN3各农艺性状均得到优化,其中,穗长由24.33 cm增加到31.00 cm,干物质积累量由189.01 g增加至205.55 g,与对照相比差异显著。该处理下LN3茎粗和穗粗亦有提升趋势,茎粗由19.83 mm增加至22.40 mm,提高12.96%;穗粗由55.77 mm增加至68.67 mm,提高23.13%。LL1的部分性状也有所改善,穗长和穗粗分别从26.67 cm和53.10 cm增加至29.50 cm和64.63 mm,提高了10.61%和21.71%,干物质积累量由169.65 g增至184.11 g,提高8.52%。LN10的干物质积累量由166.95 g增至177.52 g,提升6.33%,分蘖数增长5.48%,其它性状均未呈现明显的变化(表1)。

3 讨论

本研究中,腐植酸叶面肥对高粱冠层结构的调控效应表明,其通过重塑叶面积指数垂直分布



LL1:‘辽粱1号’;LN10:‘辽糯10’;LN3:‘辽粘3号’。CK:清水处理;YMF:腐植酸叶面肥处理

LL1: Liaoliang 1’; LN10: ‘Liaonuo 10’; LN3: ‘Liaonian 3’. CK: Water treatment; YMF: Humic acid foliar fertilizer treatment

图7　喷施腐植酸叶面肥对不同高粱品种产量的影响

Fig.7　Effects of HA foliar application on yields of different sorghum varieties

优化了光能捕获效率。有研究显示,生长后期维持较高的叶面积指数可有效增强群体冠层对光能辐射的截获能力[25-27]。本研究发现,喷施腐植酸后所有供试高粱品种的上层叶面积指数均提升,总叶面积指数增加,意味着腐植酸可能通过促进上层叶片扩展或延缓衰老扩大了冠层光合面积。中下层LAI对叶面肥的响应呈现品种特异性,例如,LN3下层LAI增加7.72%,而LL1和LN10下层LAI分别降低1.12%和6.20%,腐植酸可能通过调控叶片倾角或同化物分配改变冠层结构[28]。

腐植酸处理可能通过“上层拦截-中下层增效”的层级调控模式优化群体光环境,喷施腐植酸叶面肥后,所有供试高粱品种上层PAR均降低,透光率同步下降,这与Delfine等[25]的研究结果一致,表明上层叶密度增加增强了直射光拦截。群体光截获率整体上升可能是由于腐植酸通过光能再分配提升系统效率,LL1的中层消光系数下降,而下层消光系数提升,结合上层透光率降低,表明其冠层通过减少中层叶片光拦截能力,使得更多光能穿透至下层,驱动下层光截获率增加;LN10通过中下层消光系数协同增加,实现光截获率均衡提升;LN3的中层光截获率增加49.49%而下层下降18.98%,这可能与中层叶片过度扩张或叶片平展化相关。

进一步分析光合参数发现,喷施腐植酸叶面肥能够显著改善高粱灌浆期的光合性能,有效缓解光合衰退现象。3个高粱品种净光合速率提升11.66%~13.36%,胞间CO_2浓度降低9.33%~13.86%,气孔导度增加7.03%~17.99%,叶片SPAD值提升7.75%~15.83%,这与先前报道的关于腐植酸增强植物光合能力的研究结果一致[29-31]。各品种光合特性指标的变化中,LN3的Gs提升17.99%与SPAD增加15.38%最为突出,可能是喷施叶面肥后,该品种通过增强气孔调控与叶绿素合成能力,更高效地将光分布改善转化为光合增益。LN3产量提升6.29%的同时,其穗长、穗粗和干物质积累增加,证实冠层光能利用效

表1　喷施叶面肥对高粱成熟期农艺性状的影响

Table 1　Effects of HA foliar application on sorghum agronomic traits at maturity stage

品种 Variety	处理 Treatment	株高/cm Plant height	茎粗/mm Stem diameter	穗长/cm Ear length	穗粗/mm Ear diameter	干物质重/g Dry matter weight	分蘖数/个 Tillers number
LL1	YMF	159.83±5.33a	20.47±1.80ab	29.50±2.86ab	64.63±11.33a	184.11±10.15bc	0.80±0.14a
	CK	159.83±2.25a	19.37±0.99ab	26.67±0.24ab	53.10±1.50ab	169.65±2.02cd	0.87±0.05a
LN10	YMF	129.00±1.41b	19.03±1.02ab	25.67±0.62ab	53.30±5.48ab	177.52±3.61bcd	0.77±0.05a
	CK	131.67±4.64b	18.90±0.81b	26.00±1.08ab	51.87±4.09b	166.95±1.55d	0.73±0.05a
LN3	YMF	151.33±3.68a	22.40±0.37a	31.00±2.86a	68.67±3.33a	205.55±4.57a	0.90±0.08a
	CK	150.67±3.30a	19.83±0.56ab	24.33±2.01b	55.77±2.87ab	189.01±4.12b	0.87±0.09a

注:LL1为‘辽粱1号’;LN10为‘辽糯10’;LN3为‘辽粘3号’。CK为清水处理;YMF为腐植酸叶面肥处理。同列不同字母代表差异显著($P<0.05$)。

Note: LL1 is Liaoliang 1’; LN10 is ‘Liaonuo 10’; LN3 is ‘Liaonian 3’. CK is Water treatment; YMF is Humic acid foliar fertilizer treatment. Different letters in the same column represent significant differences at 0.05 level.

率的提高有效促进了同化物向穗部的转运[32]。

本研究发现不同高粱品种对腐植酸叶面肥的响应存在差异,LN3的优异表现可能与其固有的源库协调特性相关,该品种在对照条件下产量最高,表明其光合产物转运系统具备较强潜力。叶面肥处理进一步放大了这种优势,通过提高上层叶面积指数与中层消光系数,构建"高捕获-高转化"的光能利用模式,但该品种下层截获率下降幅度较大,提示未来需进一步优化冠层光分布策略以释放更高增产潜力。3个供试品种里,LN10的产量增幅最低,虽中下层光截获率协同提升,但穗部形态未显著改变,分蘖数和干物质积累量的有限增长可能限制其增产潜力。这些发现强调了腐植酸叶面肥的应用需结合品种特征与源库关系进行精准设计,未来研究应着重解析高粱关键性状与叶面肥响应的分子调控网络。

此外,从经济效益角度分析,腐植酸叶面肥成本为45元/hm^2,高粱市场价为2.4元/kg。喷施腐植酸叶面肥后,LL1、LN10和LN3每公顷产量分别增加724.70 kg、308.65 kg和534.90 kg,对应增收分别为1 739.28元/hm^2、740.76元/hm^2和1 283.76元/hm^2,投入产出比分别达1∶38.65、1∶16.46和1∶28.53。这表明喷施腐植酸叶面肥可显著增加高粱的经济效益,具有良好的应用前景。

4 结论

喷施腐植酸叶面肥能够有效优化高粱冠层结构,改善光合有效辐射的空间分布,增强叶片光合性能,从而显著提升高粱的农艺性状和产量。其作用机制包括增加叶面积指数以增强光截获能力,重构冠层PAR垂直分布以提升群体光能利用效率,以及通过改善气孔导度与CO_2同化效率维持叶片光合功能。研究结果可为利用腐植酸叶面肥进行高粱高效栽培提供理论支持,同时提示不同品种在响应机制上存在差异,未来应进一步探讨其内在调控机制及优化施肥方案。

参 考 文 献

[1]张国琴,葛玉彬,张正英,等.高粱抗旱研究综述[J].甘肃农业科技,2018,49(6):67-72.
Zhang G Q, Ge Y B, Zhang Z Y, et al. A review of drought resistance of sorghum [J]. Gansu Agricultural Science and Technology, 2018, 49(6):67-72.

[2]邹剑秋.基于1961—2020年FAO数据的世界高粱产业分析[J].山西农业大学学报(自然科学版),2023,43(1):1-10.
Zou J Q. World sorghum industry analysis based on 1961-2020 FAO data[J].Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2023,43(1):1-10.

[3]Dahlberg J, Berenji J, Sikora V, et al. Assessing *Sorghum* [*Sorghum bicolor* (L) Moench] germplasm for new traits: food, fuels & unique uses[J]. Maydica, 2011, 56(2): 85-92.

[4]王利宾,王曰鑫.腐植酸肥对土壤养分与微生物活性的影响[J].腐植酸,2011(4):6-9.
Wang L B, Wang Y X. Effects of humic acid fertilizer on soil nutrients and microbial activity[J]. Humic Acid, 2011(4):6-9.

[5]Bindraban P S, Dimkpa C, Nagarajan L, et al. Revisiting fertilisers and fertilisation strategies for improved nutrient uptake by plants [J]. Biology and Fertility of Soils, 2015, 51(8): 897-911.

[6]樊秀荣,何忠萍,刘卓恩,等.含腐植酸水溶肥对青椒生长发育及产量的影响[J].农村科学实验,2024(18):154-156.
Fan X R, He Z P, Liu Z E, et al. Effects of humic acid-containing water-soluble fertilizers on the growth, development and yield of green peppers[J]. Rural Scientific Experiment, 2024(18):154-156.

[7]Al-Bawee A S H, Aziz E K. Effect of potassium and foliar nutrition with humic acid on growth and yield of *Sorghum bicolor* (L.) Meonch [J]. Plant Archives, 2019, 19(1): 485-491.

[8]张茜,马萃,张婷,等.简述腐植酸类肥料在35种药材种植上的应用研究[J].腐植酸,2025,(1):11-15,44.
Zhang X, Ma C, Zhang T, et al. The application of humic acid fertilizers on the cultivation of 35 kinds of Chinese herbal medicines:a brief review[J]. Humic Acid, 2025,(1):11-15, 44.

[9]谢俊彪,尚蕴果,朱明娟,等.不同类型腐植酸肥料对土壤养分供应与种子萌发的影响机制[J].种子科技,2025,43(4):195-197.
Xie J B, Shang Y G, Zhu M J, et al. Effect mechanism of different humic acid fertilizers on soil nutrient supply and seed germination [J]. Seed Science & Technology, 2025, 43(4): 195-197.

[10]谷端银,王秀峰,魏珉,等.腐植酸类物质与植物抗逆性研究进展[J].山东农业大学学报(自然科学版),2016,47(3):321-326.
Gu D Y, Wang X F, Wei M, et al. Research progress of humic substances on plant stress resistance [J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2016,47(3):321-326.

[11]Rathor P, Upadhyay P, Ullah A, et al. Humic acid improves wheat growth by modulating auxin and cytokinin biosynthesis pathways[J]. AoB PLANTS, 2024, 16(2): plae018.

[12]王鹏举,张兆冬,王莉莉,等.智沣含腐植酸水溶肥料在水稻上的应用效果研究[J].安徽农学通报,2020,26(17):85-86.
Wang P J, Zhang Z D, Wang L L, et al. Study on the application effect of Zhifeng humic acid-containing water-soluble fertilizer on rice [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2020,26(17):85-86.

[13]张昭会,韩桂莲,付茂宁,等.黄腐酸锌对夏玉米产量的影响[J].化肥工业,2018,45(4):77-79.
Zhang Z H, Han G L, Fu M N, et al. Effect of zinc fulvate on the yield of summer maize[J]. Chemical Fertilizer Industry, 2018,45(4):77-79.

[14]闫锋,董扬,赵富阳,等.不同时期喷施腐植酸水溶肥对谷子生长发育的影响[J].腐植酸,2024,(3):21-25,41.
Yan F, Dong Y, Zhao F Y, et al. Effects of humic acid water-soluble fertilizer application at different periods on growth of foxtail millet[J]. Humic Acid, 2024,(3):21-25, 41.

[15]蔡根风."腐植酸水溶肥料"在小麦上的肥效试验[J].河南农业,2014(20):57-58.
Cai G F. Fertilizer efficiency test of "humic acid water-soluble fertilizer" on wheat[J]. Agriculture of Henan, 2014(20): 57-58.

[16]杨钰燕.土壤改良剂对向日葵与高粱生长发育及土壤理化性状的影响[D].杨凌:西北农林科技大学,2024.
Yang Y Y. The effects of soil amendments on the growth and development of sunflowers and sorghum, as well as soil physicochemical properties[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2024.

[17]张玲玉.外源添加生物炭对盐胁迫下高粱生长的影响[D].保定:河北农业大学,2023.
Zhang L Y. Effect of exogenously added biochar on the growth of sorghum under salt stress[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2023.

[18]王瑛.天然钠基膨润土-菌渣复合材料对沙质土壤保水保肥性能的影响[D].石河子:石河子大学,2022.
Wang Y. Effect of natural sodium bentonite and mushroom residue composites on water and fertilizer retention of sandy soil[D]. Shihezi: Shihezi University, 2022.

[19]刘畅,贺浩强,王茜,等.腐植酸和生物炭配施对饲用甜高粱生长与土壤磷素吸收状况的影响[J].天津农业科学,2019,25(7):69-72,78.
Liu C, He H Q, Wang X, et al. Effects of combined application of humic acid and biochar on feed-sweet sorghum growth and soil phosphorus uptake[J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2019,25(7):69-72, 78.

[20]陆平.高粱种质资源描述规范和数据标准[M].北京:中国农业出版社,2006:19.
Lu P. Description specification and data standard of sorghum germplasm resources[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2006:19.

[21]Zhao R J, Li Y Q, Xu C, et al. Expression of heterosis in photosynthetic traits in F1 generation of sorghum (*Sorghum bicolor*) hybrids and relationship with yield traits[J]. Functional Plant Biology, 2024, 51: FP24135.

[22]于国宜,孔令聪,张亮,等.不同新型肥料对小麦光合特性、冠层结构及产量的影响[J].作物杂志,2022(4):193-198.
Yu G Y, Kong L C, Zhang L, et al. Effects of different new type fertilizers on wheat photosynthetic characteristics, canopy structure and yield[J]. Crops, 2022(4):193-198.

[23]王艳秋,张飞,朱凯,等.抗旱型高粱开花前期和后期应对水分亏缺的生理调节研究[J].山西农业大学学报(自然科学版),2020,40(3):37-44.
Wang Y Q, Zhang F, Zhu K, et al. Physiological response to water-deficience of drought-tolerant sorghum variety prior to and post of flowering[J]. Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2020,40(3):37-44.

[24]高杰,李青风,汪灿,等.宽窄行结合高密度栽培有效提高糯高粱产量及干物质和氮素的积累转运[J].植物营养与肥料学报,2024,30(12):2342-2353.
Gao J, Li Q F, Wang C, et al. Combination of high plant density and wide-narrow row planting enhances the yield, dry matter and nitrogen accumulation and transportation in waxy sorghum[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2024, 30(12):2342-2353.

[25]肖治林,顾汉柱,张耗.高产高效水稻冠层光能利用特征研究进展[J].中国稻米,2022,28(4):30-34.
Xiao Z L, Gu H Z, Zhang H. Research progress on canopy light energy utilization for high-yield and high-efficiency rice[J]. China Rice, 2022,28(4):30-34.

[26]De Hita D, Fuentes M, Fernández V, et al. Discriminating the short-term action of root and foliar application of humic acids on plant growth: emerging role of jasmonic acid[J]. Frontiers in Plant Science, 2020, 11: 493.

[27]Prasad T G, Liza J, Manjushree B J, et al. Comparative evaluation of humic substances: effect at cell level and chlorophyll retention during accelerated senescence[J]. American Journal of Plant Sciences, 2023, 14(6): 638-652.

[28]Mantilla-Perez M B, Salas Fernandez M G. Differential manipulation of leaf angle throughout the canopy: current status and prospects[J]. Journal of Experimental Botany, 2017, 68(21-22): 5699-5717.

[29]Delfine S, Tognetti R, Desiderio E, et al. Effect of foliar application of N and humic acids on growth and yield of durum wheat[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2005, 25(2): 183-191.

[30]Ahmed A M T. Effect of humic acid and maxigrow (organic fertilizer) on growth, flowering and yield of snake cucumber (*Cucumis melo*.L)[J]. Science Journal of University of Zakho, 2024, 12(2): 153-158.

[31]Lotfi R, Kalaji H M, Valizadeh G R, et al. Effects of humic acid on photosynthetic efficiency of rapeseed plants growing under different watering conditions[J]. Photosynthetica, 2018, 56(3): 962-970.

[32]Meng X S, Pan Y H, Chai Y X, et al. Higher light utilization and assimilate translocation efficiency produced greater grain yield in super hybrid rice[J]. Plant and Soil, 2024, 504(1): 529-544.

(编辑:郭玥微)