

花粉多糖对高温干旱条件下小麦抗氧化酶活性变化及产量品质影响研究

王慧慧, 李玉珠, 任丹, 付宝, 张鹏鹏, 黄瑾*

成都新朝阳作物科学股份有限公司 四川成都

【摘要】为探究植物源生物刺激素花粉多糖对高温干旱逆境下小麦生理代谢、生长恢复及产量品质的调控作用,通过盆栽模拟与大田验证试验,设置清水对照(CK)、脱落酸处理(ABA, 25 $\mu\text{mol/L}$)、花粉多糖 800 倍液(SF_1)和 400 倍液(SF_2)4 个处理,测定小麦抗氧化酶活性、丙二醛含量、生长恢复指标、齐穗期农艺性状及产量品质相关参数。结果表明:①高温干旱条件下,花粉多糖可显著提高小麦超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)活性,降低丙二醛(MDA)含量,且 800 倍处理效果优于 ABA;②花粉多糖 400 倍处理下小麦干旱后恢复率达 75.00%,显著高于对照处理,可缓解高温干旱对小麦的影响;③齐穗期花粉多糖处理可改善小麦旗叶叶长、叶宽与叶面积指数,提升光合效率;④花粉多糖处理可使小麦有效穗数及籽粒千粒重增加 9.38%、12.51%,亩产增幅 31.20%,同时花粉多糖处理能显著改善小麦籽粒品质,促进蛋白质及淀粉含量增加 58.82%、13.18%。综上,花粉多糖可通过提升小麦抗氧化能力、促进高温干旱后生长恢复、优化农艺性状,实现小麦产量与品质的协同提升,为高温干旱逆境下小麦抗逆栽培及花粉多糖的田间应用提供了理论依据与技术支撑。

【关键词】生物刺激素;花粉多糖;高温干旱胁迫;抗氧化酶;小麦;营养品质

【基金项目】省级知识产权专项资金项目(2025-ZS-00199)

【收稿日期】2026 年 3 月 20 日 **【出刊日期】**2026 年 4 月 15 日 **【DOI】**10.12208/j.jafs.20260006

Study on the effects of pollen polysaccharides on antioxidant enzyme activity changes, yield, and quality of wheat under high temperature and drought conditions

Huihui Wang, Yuzhu Li, Dan Ren, Bao Fu, Pengpeng Zhang, Jin Huang*

Chengdu New Sun Crop Science Co., Ltd., Chengdu, Sichuan

【Abstract】To explore the regulatory effects of plant-derived biostimulant pollen polysaccharide on physiological metabolism, growth recovery, yield, and quality of wheat under high temperature and drought stress, pot simulation and field verification experiments were conducted. Four treatments were set up: a control group with distilled water (CK), abscisic acid treatment (ABA, 25 $\mu\text{mol/L}$), and pollen polysaccharide treatments at 800-fold dilution (SF_1) and 400-fold dilution (SF_2). The activities of antioxidant enzymes, malondialdehyde (MDA) content, growth recovery indicators, agronomic traits at the full heading stage, and yield and quality-related parameters of wheat were measured. The results showed that: ① Under high temperature and drought conditions, pollen polysaccharide significantly increased the activities of superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD), and catalase (CAT) and reduced MDA content, with the 800-fold dilution treatment showing better effects than ABA; ② The recovery rate of wheat after drought treatment with pollen polysaccharide at 400-fold dilution reached 75.00%, significantly higher than that of the control treatment, indicating that it could alleviate the effects of high temperature and drought on wheat; ③ Pollen polysaccharide treatment at the full heading stage improved the flag leaf length, width, and leaf area index of wheat, enhancing photosynthetic efficiency; ④ Pollen polysaccharide treatment

第一作者简介:王慧慧(1994-)女,汉族,四川成都人,硕士研究生,中级农艺师,从事障碍土壤修护、生物刺激素及植物营养调理研究与产品开发;

*通讯作者:黄瑾(1982-)女,汉族,四川成都人,理学博士,高级工程师,从事生物农药、生物刺激素机理研究与产品开发。

increased the effective spike number and grain weight per 1000 grains by 12.68% and 14.29%, respectively, with a yield increase of 27.32% per mu. Additionally, pollen polysaccharide treatment significantly improved wheat grain quality, promoting an increase in protein and starch content by 58.82% and 13.18%, respectively. In summary, pollen polysaccharide can enhance wheat yield and quality by improving its antioxidant capacity, promoting growth recovery after high temperature and drought stress, and optimizing agronomic traits. This provides theoretical basis and technical support for wheat stress-resistant cultivation under high temperature and drought conditions and the field application of pollen polysaccharide.

【Keywords】 Biostimulants; Pollen polysaccharides; High temperature and drought conditions; Antioxidant enzymes; Wheat; Nutritional quality

前言

小麦是我国三大主粮之一, 其生产状况直接关系到国家粮食安全与农业经济发展。在全球气候变暖背景下, 高温已成为制约我国小麦主产区产量提升的主要非生物逆境因素。高温胁迫会破坏植物细胞内活性氧代谢平衡, 导致超氧阴离子、过氧化氢等活性氧大量积累, 引发膜脂过氧化损伤, 造成丙二醛(MDA)等有毒物质沉积, 同时抑制植物光合生理与营养吸收, 最终导致植株生长受阻、产量降低、品质下降^[1-3]。如何通过农艺措施与生物调控手段提升小麦的高温抗逆性, 实现逆境下的稳产提质, 是当前小麦栽培研究的重要方向。

生物刺激素作为新型农业投入品, 不直接提供营养元素, 也无农药的杀虫抗病功效, 而是通过调节植物自身信号转导与生理代谢, 增强植物对非生物逆境的耐受性, 提升养分利用效率与作物产量, 成为农业绿色发展的重要抓手^[4-6]。2012年欧洲生物刺激素工业协会(EBIC)明确了生物刺激素的定义与功能, 2022年欧盟肥料法规(EU)2019/1009正式实施, 将生物刺激素列为独立农业投入类别, 进一步推动了生物刺激素的研发与应用^[7-8]。

花粉多糖是经生物酶法提取精制的植物源生物刺激素, 主要含多糖、寡糖、单糖等水溶性糖类, 还富含氨基酸、矿物质及微量元素, 具有促进作物生长、激活抗逆生理反应的潜在功能^[9]。基于此, 本研究以小麦为试验材料, 通过盆栽与大田结合的方式, 模拟高温逆境条件, 探究花粉多糖对小麦抗氧化酶活性、膜脂过氧化程度、高温后生长恢复能力、齐穗期农艺性状及产量品质的影响, 明确花粉多糖的适宜施用浓度与调控效应, 为花粉多糖在小麦抗逆栽培中的应用提供理论依据, 同时丰富植物源生物刺激素的抗逆作用机制研究, 为高温逆境下小麦的稳

产提质提供新的技术途径, 对推动我国小麦产业绿色高效发展具有重要的现实意义。

1 材料和方法

1.1 试验材料

1.1.1 供试药剂

花粉多糖(多糖 $\geq 2\%$, 成都新朝阳作物科学股份有限公司);

脱落酸(ABA, 分析纯)。

1.1.2 试验作物

小麦(川麦42)。

1.2 试验设计

1.2.1 盆栽试验

试验于2025年6-8月在成都蒲江县成都新朝阳生物技术研究院进行, 采用盆栽模拟高温胁迫验证试验, 试验设计如表1所示。

表1 试验处理与浓度设计

编号 Number	试验处理 Test Treatment	试验浓度 Test Concentration
1	CK	CK
2	ABA	25 $\mu\text{mol/L}$
3	SF ₁	花粉多糖 800 倍
4	SF ₂	花粉多糖 400 倍

具体操作:

(1) 采用塑料盆栽(口径7 cm, 高度7 cm), 每盆装混合均匀的种植土170 g。挑选饱满完好且露白的种子进行播种, 每个小方盆种植12颗种子, 每个处理设置8组重复, 放置在25°C培养间中进行培养, 光照强度设置为10000 Lux, 光照时间设置为14小时光照, 10小时黑暗。

(2) 待小麦幼苗长至10 cm左右, 按照试验设计, 对小麦幼苗进行叶面喷施, 喷药后放置到40°C

培养间进行高温胁迫处理, 光照强度设置为 10000 Lux, 光照时间设置为 14 小时光照, 10 小时黑暗, 期间不再进行浇水。

(3) 胁迫处理 12 h 左右各处理组开始出现叶片失水, 部分幼苗开始倒伏。取样检测不同处理组小麦叶中抗氧化酶活性。36 h 后移放于 25°C 培养间, 取样检测不同处理小麦叶片中丙二醛含量, 同时对各处理样品补充充足水分进行恢复, 待阳性对照 ABA 长出新叶时, 统计各处理每小盆长出新叶的株数, 计算恢复率。

1.2.2 大田试验

试验于 2025 年 3 月至 6 月在四川省绵阳市进

行, 供试试验地土壤基础理化性质如表 2 所示。每小区面积为 20m² (4m*5m), 每个处理设置 3 个小区重复, 共计 12 个小区, 所有小区按随机分布原则进行划分, 小区之间设 1 m 宽的保护行, 具体试验设计同盆栽试验。

具体操作: 试验地小麦的种植密度均为 250,000 株/667m², 田间统一进行施肥、除草、病虫害防治等常规管理。在小麦返青期、拔节期、齐穗期与灌浆期按试验设计喷施药剂, 且在灌浆期调查小麦生长状况。小麦成熟后, 每个处理单独收获、脱粒、晒干, 统计有效穗数 (个/m²) 调查小麦有效穗数, 并取样检测小麦籽粒品质。

表 2 供试地土壤基本理化性质

土壤质地 Soil texture	pH	有机质 Organic matter/ (%)	碱解氮 Alkali hydrolyzed N (mg/kg)	有效磷 Available P/ (mg/kg)	速效钾 Available K/ (mg/kg)
黄壤土 Yellow earths	5.3	1.46	112.45	46.71	68.91

1.3 测定指标及方法

1.3.1 生理指标

小麦叶片超氧化物歧化酶 (SOD) 活性采用氮蓝四唑 (NBT) 比色法测定, 过氧化物酶 (POD) 采用愈创木酚比色法, 过氧化氢酶 (CAT) 活性采用紫外吸收法测定; 叶片 MDA 含量采用硫代巴比妥酸法测定^[10]。

恢复率%=复水后长出新叶的株数/幼苗总数*100

1.3.2 农艺及产量品质指标

齐穗期测定小麦旗叶长度、宽度及茎粗, 并计算小麦叶片叶面积指数:

叶面积指数=小麦绿叶总面积/单位土地面积

小麦绿叶总面积=单片叶叶长*叶宽*0.83*每株有效叶片数*单位面积小麦株数 (0.83 为小麦叶面积校正系数)

成熟后统计有效穗数 (个/m²)、穗粒数, 测定小麦籽粒粒长、粒宽及籽粒千粒重 (g), 并计算亩产量;

亩产量=平均粒重*穗粒数*有效穗数*0.85 (0.85 为小麦产量经验折算系数)

小麦籽粒蛋白质含量采用凯氏定氮法测定^[11], 小麦籽粒淀粉含量采用蒽酮比色法测定^[12]。

1.4 数据处理与分析

数据统计分析时, 处理间差异以 Duncan 多重比

较法进行检验 ($P<0.05$)。采用 Microsoft Excel 2025 进行数据绘图。

2 结果与分析

2.1 高温条件下花粉多糖对小麦生长恢复情况的影响

高温胁迫后恢复浇水, 各处理小麦生长恢复能力存在显著差异 (图 1-2)。CK 处理小麦受高温损伤严重, 恢复率仅为 13.89%, 大部分植株表现为萎蔫、新叶无法萌发, 甚至死亡; SF₁、SF₂ 和 ABA 处理均能显著提高小麦高温后的恢复率, 其中, SF₂ 处理小麦恢复率最高, 达 75.00%, 表明花粉多糖可促进小麦高温后的生长恢复, 有效缓解高温胁迫对小麦植株的损伤, 400 倍液处理的恢复效果更佳。

2.2 高温条件下花粉多糖对小麦叶片中抗氧化酶活性和丙二醛累积的影响

高温胁迫下小麦体内抗氧化酶活性与丙二醛含量呈现显著的处理间差异 (图 3)。与 CK 相比, SF₁、SF₂ 处理均能显著提高小麦叶片 SOD、POD、CAT 活性, 降低 MDA 含量, 且效果与抗逆激素 ABA (25 μmol/L) 相当, 表明花粉多糖通过激活小麦抗氧化系统, 缓解高温胁迫造成的氧化损伤。

从抗氧化酶活性来看, SF₂ 处理的提升效果最为显著, 其 SOD 活性达 794.41U/g.FW, 较 CK 提升 64.64%, 较 ABA 处理提升 11.40%, 较 SF₁ 处理提升 21.26%; POD 活性达 926.21 U/g.FW, 较 CK 提

升 39.07%, 较 ABA 处理提升 2.04%, 较 SF₁ 处理提升 3.38%; CAT 活性达 938.06 U/g.FW, 较 CK 提升 137.76%, 较 ABA 处理提升 1.81%, 较 SF₁ 处理提

升 25.22%。SF₁ 处理的抗氧化酶活性略低于 ABA 处理, 但仍显著高于 CK。

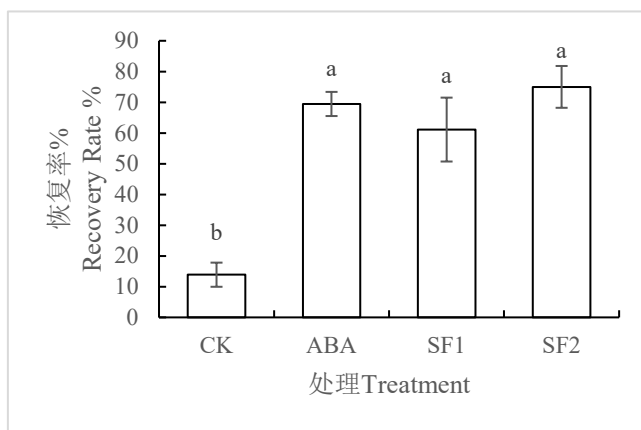
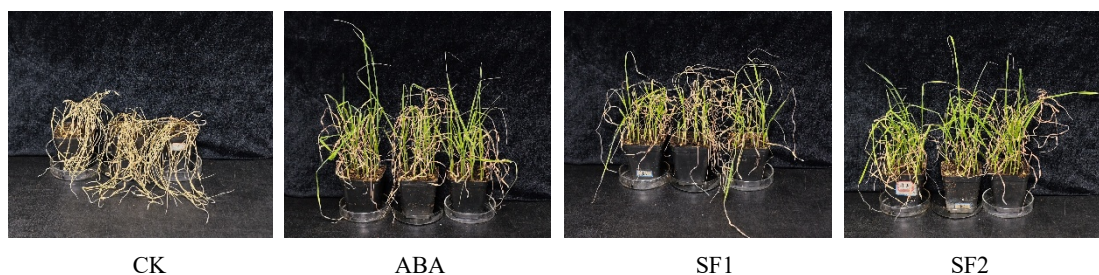


图 1 高温胁迫复水后小麦生长恢复情况

注: CK 代表清水对照处理, ABA 代表阳性对照处理, SF₁ 与 SF₂ 分别代表花粉多糖 800 倍与 400 稀释处理。不同字母表示处理间差异显著 (P<0.05), 下图表同。



CK

ABA

SF1

SF2

图 2 复水后各处理小麦生长恢复情况

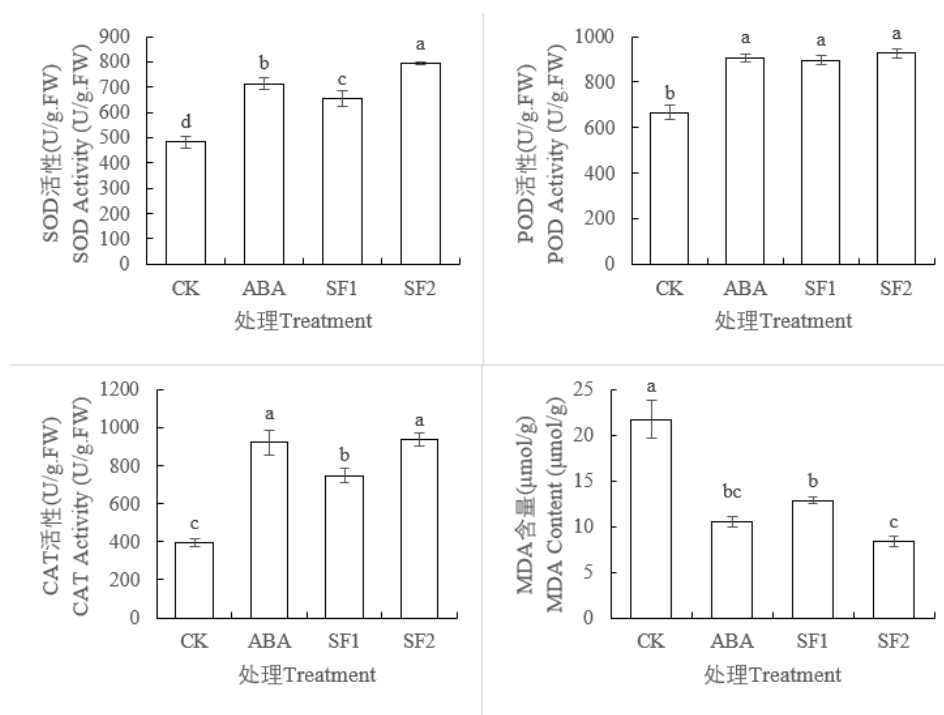


图 3 不同处理下小麦叶片中抗氧化酶活性及丙二醛含量变化情况

从MDA含量来看,各处理MDA含量均显著低于CK,且SF₂处理MDA含量最低,仅为8.36 μmol/g,较CK降低61.52%,较ABA处理降低20.70%,较SF₁处理降低34.85%。表明花粉多糖浓度与抗氧化酶活性呈正相关,400倍液花粉多糖能更有效地激活小麦抗氧化系统,减少活性氧积累,降低膜脂过氧化程度。

2.3 花粉多糖对齐穗期小麦生长的影响

小麦齐穗期是营养生长与生殖生长并进的关键时期,农艺性状的优劣直接影响后续光合产物积累与产量形成。由图4可知,与CK相比,SF₁、SF₂处理均能不同程度改善小麦茎粗、旗叶长度和宽度等农艺性状。其中SF₁处理对叶长的提升效果最为显著,较CK显著提升14.17%,SF₂处理对叶

宽的提升效果最为显著,较CK显著提升9.03%,计算小麦叶面积指数发现,花粉多糖处理后,小麦齐穗期叶面积指数达到5以上,更利于小麦光合作用,为后续灌浆增产作准备;不同处理对小麦茎秆粗度影响无明显差异。

整体来看,花粉多糖处理能优化小麦齐穗期农艺性状,增加植株光合面积,且800倍液更利于叶长延伸,400倍液更利于叶宽拓展。

2.4 花粉多糖对小麦产量及品质的影响

由图5可知,与CK相比,SF₁、SF₂处理均能显著提高小麦有效穗数,且SF₂处理效果显著优于ABA处理,增长率为4.74%,表明花粉多糖能通过促进小麦分蘖成穗、增加籽粒灌浆效率。但不同处理对小麦穗粒数无显著影响。

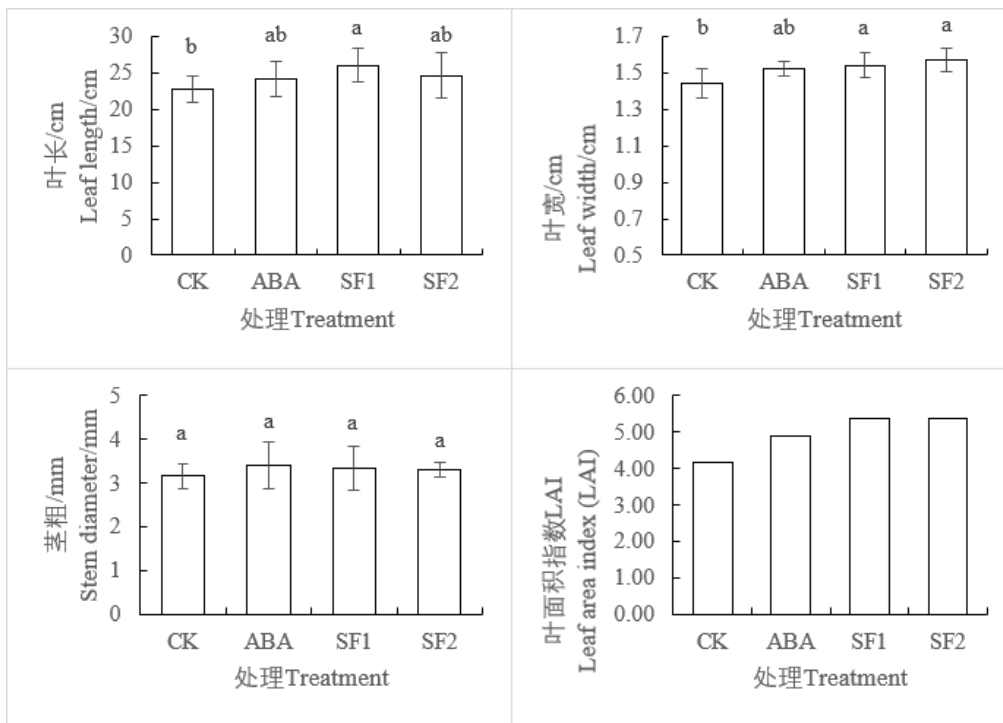


图4 齐穗期不同处理对小麦生长状况的影响

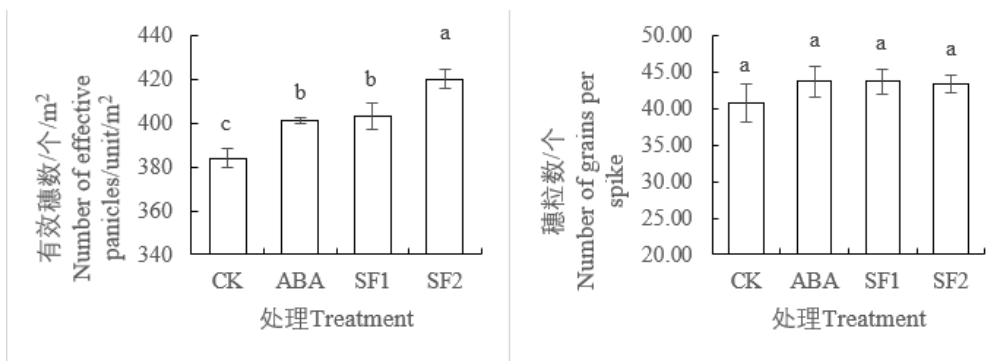


图5 不同处理对小麦有效穗数及穗粒数的影响

由表 3 可知,不同处理对于小麦粒长与粒宽的影响趋势一致, SF₁ 处理后, 相比 CK 对照, 小麦粒长粒宽有一定增幅, 但效果不显著, 而 SF₂ 浓度处理后, 小麦粒长粒宽显著增加, 增长率分别达到 7.81%、10.0% (图 6)。不同处理对小麦千粒重及亩产量均显著增加, 其中 SF₂ 处理后, 小麦千粒重显著高于其他处理, 相较 CK 及 ABA 对照, 增长率达到 12.51%、4.67%, 其亩产量达到 469.79 kg/亩, 较 CK 显著增加了 31.20%。数据表明, 花粉多糖可促进小麦籽粒生长, 实现产量提升, 且 400 倍液处理的调控效果更显著。

小麦籽粒蛋白质与淀粉含量是衡量其品质的核心指标, 直接影响小麦的食用与加工价值。由图

7 可知, 与 CK 相比, ABA、SF₁、SF₂ 处理均能显著提高小麦籽粒蛋白质与淀粉含量, 且提升效果随花粉多糖浓度升高而增强。

蛋白质含量方面, SF₂ 处理达 13.69 g/100g, 较 CK 显著提升 58.82%, 较 ABA 处理显著提升 29.52%, SF₁ 处理与 ABA 处理间无显著差异。淀粉含量方面, SF₁ 和 SF₂ 处理间无显著差异, 其中 SF₂ 较 CK 显著提升 13.18%, 较 ABA 处理显著提升 6.15%。

整体来看, 花粉多糖在提升小麦产量的同时, 能同步改善籽粒品质, 实现“稳产提质”的双重效果, 这与花粉多糖促进小麦光合产物积累与营养物质向籽粒转运密切相关。

表 3 不同处理下小麦籽粒及产量变化

处理 Treatment	粒长/mm Grain length/mm	粒宽/mm Grain width/mm	千粒重/g Thousand grain weight/g	亩产量 (kg) Yield per mu/kg
CK	0.64±0.015b	0.30±0.003b	43.01±0.25c	380.46±14.05b
ABA	0.67±0.003ab	0.32±0.003ab	46.23±0.31b	458.74±12.74a
SF ₁	0.68±0.015ab	0.32±0.009ab	46.72±0.29b	465.9±9.41a
SF ₂	0.70±0.009a	0.33±0.003a	48.39±0.70a	499.15±10.3a



图 6 花粉多糖 400X 处理组小麦籽粒变化

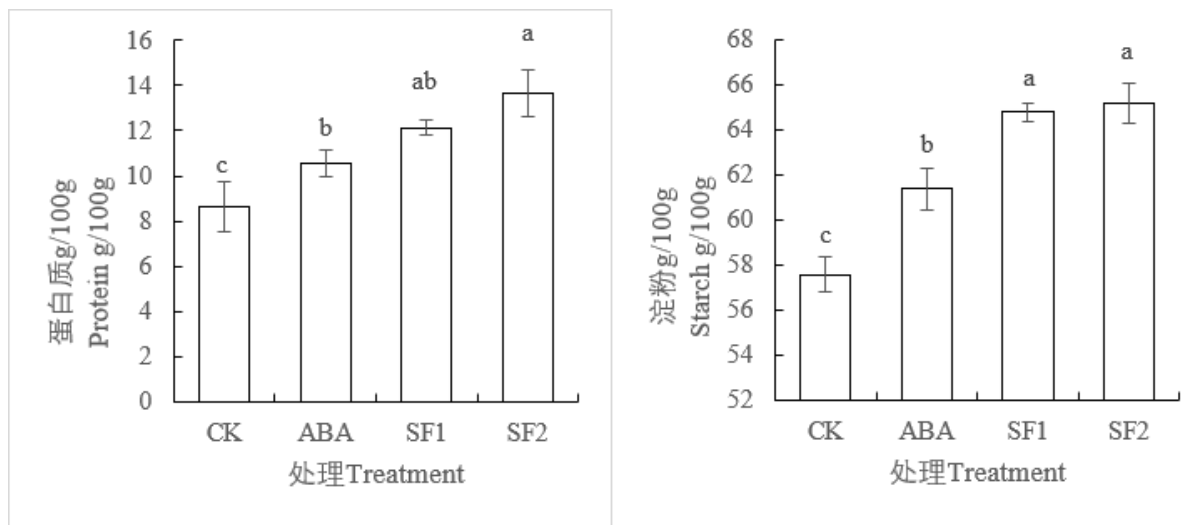


图 7 不同处理对小麦籽粒品质的影响

3 讨论

高温干旱逆境是制约小麦生长发育与产量品质形成的关键因素, 其核心危害在于打破植物细胞内活性氧的产生与清除平衡, 引发氧化应激反应, 造成膜系统损伤、光合功能下降、生长代谢紊乱^[13-14]。SOD、POD、CAT 是植物清除活性氧的关键酶, MDA 含量反映膜损伤程度^[15-16]。本研究结果表明, 花粉多糖能显著提高干旱胁迫下小麦 SOD、POD、CAT 活性, 降低 MDA 含量, 且 400 倍液处理效果优于 800 倍液与抗逆阳性对照 ABA, 这说明花粉多糖可通过激活小麦抗氧化酶系统的表达与活性, 维持细胞正常的生理代谢功能, 是花粉多糖提升小麦高温抗逆性的重要生理机制。这与 KA Hemida 等在干旱条件下来调控小麦抗氧化酶的变化以保护其正常生长发育研究结果相似^[17]。

生长恢复能力是衡量植物高温干旱抗逆性的核心指标, 高温胁迫后植株能否快速恢复生长, 直接决定后续营养生长与生殖生长进程, 进而影响产量构成与最终产量。本试验期间, 四川绵阳小麦灌浆期(2025年4-6月)出现连续12天日均温 $\geq 32^{\circ}\text{C}$ 、0-20 cm 土壤相对含水量 $< 35\%$ 的高温干旱天气。而经花粉多糖处理后, 小麦齐穗期叶面积指数显著提升, 成熟期千粒重、穗粒数及产量均显著增加, 说明花粉多糖可在高温干旱下稳定光合系统、优化产量构成因素。结合室内盆栽结果, 花粉多糖处理后小麦恢复率高达 75.00%, 表明其可快速修复高温干旱造成的生理损伤, 维持光合器官功能, 改善农艺性状。小麦旗叶是齐穗期至灌浆期光合产物合成与转运的关键功能叶, 其光合效能、持绿时长直接影响籽粒灌浆充实度, 而叶面积指数可有效表征群体光合覆盖范围, 合理提升叶面积指数能扩大光合同化面积, 为产量提升奠定群体基础^[18-19]。本研究证实了花粉多糖对于干旱条件下小麦叶片恢复影响小麦最终产量这一论证。

从小麦籽粒品质的变化可以发现, 与传统抗逆调节剂 ABA 相比, 花粉多糖实现了“增产提质”的双重效果, 花粉多糖处理后, 小麦籽粒蛋白质与淀粉含量分别增加了 58.82%、13.18%, 这与前人研究生物刺激素提升作物产量与品质研究的结果高度一致^[20], 充分体现了花粉多糖作为植物源生物刺激素的应用优势。

4 结论

本研究通过盆栽模拟与大田验证试验, 系统探究了花粉多糖对高温干旱逆境下小麦抗氧化酶活性、生长恢复、农艺性状及产量品质的调控效应, 得出以下结论:

(1) 花粉多糖能显著激活高温干旱胁迫下小麦的抗氧化系统, 提高 SOD、POD、CAT 活性, 降低 MDA 含量, 缓解氧化损伤, 且 800 倍液处理效果优于 ABA 处理。

(2) 花粉多糖能有效促进小麦高温干旱后的生长恢复, 400 倍液处理下小麦恢复率达 75.00%, 是缓解小麦高温干旱损伤的有效调控手段。

(3) 花粉多糖能优化小麦齐穗期农艺性状, 增加光合面积, 提升光合效率, 为产量形成奠定基础; 花粉多糖可提升小麦有效穗数、千粒重及亩产量 12.68%、14.29%、27.32%, 同时促进小麦籽粒蛋白质及淀粉含量增加 58.82%、13.18%。

综上, 花粉多糖作为植物源生物刺激素, 通过激活小麦自身抗氧化酶活系统, 缓解高温干旱胁迫带来的 ROS 损伤, 降低 MDA 累积, 促进生长恢复。花粉多糖优化农艺性状, 实现产量与品质的双重提升。本研究为高温干旱逆境下小麦的抗逆栽培提供了新的技术途径, 也为花粉多糖在农业生产中的大面积应用提供了理论依据, 对推动我国小麦产业绿色高效发展具有重要意义。

参考文献

- [1] 霍治国, 尚莹, 郭定荣, 等. 中国小麦干热风灾害研究进展[J]. 应用气象学报, 2019, 30 (2): 129-140.
- [2] 彭超军, 华夏, 王松峰, 等. 干旱胁迫对不同小麦品种灌浆期旗叶光合及生理特性的影响[J]. 河南农业科学, 2025, 2: 40-47.
- [3] 宋磊, 次仁央金, 王小强, 等. 小麦对高温胁迫的响应机制研究进展[J]. 中国农学通报, 2022, 1(17): 6-12.
- [4] 赵文麟, 郭湘, 王雪, 等. 生物刺激素在植物响应胁迫中的应用研究进展[J]. 植物生理学报, 2024, 11 (9): 1620-1628.
- [5] Colla G, Rouphael Y, Canaguier R, et al. Biostimulants in agriculture: Innovative tools for improving plant growth, productivity and efficiency under stress conditions[J]. Frontiers in Plant Science, 2017, 8: 1-18.

- [6] 谢尚强, 王文霞, 张付云, 等. 植物生物刺激素研究进展[J]. 中国生物防治学报, 2019, 3 (10): 487-496.
- [7] European Biostimulant Industry Council. Biostimulant definitions and scope [R]. Brussels: EBIC, 2012.
- [8] Regulation (EU) 2019/1009 of the European Parliament and of the Council of 20 June 2019 laying down rules on the making available on the market of EU fertilising products [J]. Official Journal of the European Union, 2019: 1-78.
- [9] 王慧慧, 黄瑾, 吴丹, 等. 不同用量花粉多糖配施复合肥对小白菜生长影响研究[J], 农业食品与科学, 2025, 5 (1): 40-45.
- [10] 李玲. 植物生理学模块实验指导[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [11] 赵世杰, 史国安, 董新纯. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002.
- [12] GB 5009.5-2016 食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [13] H Alsamadany, Y Alzahrani, ZH Shah. Physiomorphic and molecular-based evaluation of wheat germplasm under drought and heat stress[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1-13.
- [14] Fahad Alghabari , Zahid Hussain Shah, Abdalla Ahmed Elfeel, et al. Biochemical and Physiological Responses of Thermostable Wheat Genotypes for Agronomic Yield under Heat Stress during Reproductive Stages[J]. *Agronomy*, 2021, 11: 1-20.
- [15] Djanaguiraman M, Boyle D L, Welti R, et al. Decreased photosynthetic rate under high temperature in wheat is due to lipid desaturation, oxidation, acylation, and damage of organelles[J]. *BMC Plant Biology*, 2018, 18(55): 1-17.
- [16] Hussain S Z , Rehman H M , Tasneem A ,et al.Redox and Ionic Homeostasis Regulations against Oxidative, Salinity and Drought Stress in Wheat (A Systems Biology Approach)[J]. *Frontiers in Genetics*, 2017, 8:141-151.
- [17] Khaulood A. Hemida , Mostafa M. Rady , Sahar A. Abd El-Hamed, et al. Upregulation of antioxidant pathways and drought tolerance in wheat plants by seed priming with an antioxidant-enriched biostimulant[J]. *South African Journal of Botany*, 2026, c: 261-283.
- [18] Sperotto R A , Kean D , Tan Y ,et al.Identification and Characterization of Contrasting Genotypes/Cultivars for Developing Heat Tolerance in Agricultural Crops: Current Status and Prospects[J].*Frontiers in Plant Science*, 2020, 11.
- [19] Pandey A , Khobra R , Mamrutha H M ,et al.Elucidating the Drought Responsiveness in Wheat Genotypes[J]. *Sustainability*, 2022, 14(7): 3957, 1-20.
- [20] 张运红, 杨占平, 郑春风, 等. 几种生物刺激素对小麦产量形成及品质的调控[J]. *麦类作物学报*, 2019, 11: 1333-1342.

版权声明: ©2026 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS