

网络出版时间:2026-06-09

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1359.S.20260609.1006.002

一种复合农用益生菌菌剂对小麦生长及产量品质的影响

史雨梦¹, 刘 灿¹, 李 娜¹, 罗 宇¹, 刘明露², 王付转¹

(1. 河南工业大学生物工程学院, 河南郑州 450001; 2. 淇县中等专业学校, 河南鹤壁 458000)

摘要:为探究自制复合农用益生菌菌剂对小麦生长及产量和品质的影响,以小麦新品系吨麦 99-1 为研究对象,于 2023—2025 年度在大田条件及各小区(85.8 m²)每次喷液量均为 250 L 情况下设置 5 个施用量:清水(CK)、2.5 L 复合菌剂(T1)、5 L 复合菌剂(T2)、25 L 复合菌剂(T3)和 50 L 复合菌剂(T4),于小麦苗期至灌浆期采用滴灌方式共施用 5 次,测定不同时期小麦株高、分蘖数、地上部鲜重、抗氧化酶活性及丙二醛含量等指标,并于成熟期测定产量构成要素及籽粒品质指标。结果表明,复合菌剂对分蘖期、拔节期和孕穗期的小麦均具有明显的促生作用,并表现出良好的增产效果。与 CK 相比,小麦增产幅度表现为 T3>T4>T2>T1,其中 T3 处理增产效果显著,两个生长季产量分别达到 11 258.56 和 12 046.48 kg·hm⁻²,较 CK 分别提高 25.59% 和 23.63%。在籽粒品质方面,除 2024—2025 生长季 T1 处理的淀粉含量略低于 CK 外,其余处理的淀粉、粗蛋白、湿面筋含量和容重均高于 CK,多数品质指标在一定施用范围内随菌剂施用量增加而呈上升趋势,其中 T4 处理综合表现最佳。综合来看,该自制复合农用益生菌菌剂对小麦具有较好的促生、增产和改善籽粒品质的作用。

关键词:小麦;益生菌菌剂;农艺性状;生理活性指标;产量;品质

中图分类号:S512.1;S311

文献标识码:A

文章编号:1009-1041(2026)07-0973-08

Effect of a Compound Agricultural Probiotic Inoculant on Growth, Yield and Grain Quality of Wheat

SHI Yumeng¹, LIU Can¹, LI Na¹, LUO Yu¹, LIU Minglu², WANG Fuzhuan¹

(1. College of Bioengineering, Henan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450001, China;

2. Qi County Secondary Vocational School, Hebi, Henan 458000, China)

Abstract: To investigate the effects of a self-developed compound agricultural probiotic inoculant on wheat growth, yield and grain quality, a field experiment was conducted using a new wheat line Dun-mai 99-1 during the 2023—2024 and 2024—2025 growing seasons. Under a spraying volume of 250 L per plot (area 85.8 m²) each time, five compound inoculant application levels of 0, 25, 5, 25 and 50 L were set, and represented by CK, T1, T2, T3 and T4, respectively. The inoculant was applied five times through drip irrigation from the seedling stage to the grain-filling stage. Agronomic traits, aboveground fresh weight, antioxidant enzyme activities and malondialdehyde content were determined at different growth stages, and yield components, grain yield, and grain quality traits were measured at maturity. The results showed that the compound inoculant significantly promoted wheat growth at the tillering, jointing and booting stages, and exhibited significant yield increasing effects. Compared with the control, the yield increase ranked as T3>T4>T2>T1. Among them, T3 showed the greatest yield advantage, with grain yields of 11 258.56 and 12 046.48 kg·hm⁻² in the two grow-

收稿日期:2025-12-23

修回日期:2026-01-16

基金项目:国家自然科学基金(31900876);河南省科技厅产学研项目(142107000017);河南工业大学小麦和玉米深加工国家工程实验室开放课题(NL2017006)

第一作者 E-mail: shiyumeng0518@163.com(史雨梦)

通讯作者 E-mail: fuzhuanwang@163.com(王付转)

ing seasons, increased by 25.59% and 23.63%, respectively, compared to the control. In terms of grain quality, except that the starch content under T1 was slightly lower than that of CK in the 2024—2025 season, the starch content, crude protein content, wet gluten content, and test weight under the other treatments were generally higher than those of CK. Most grain quality traits showed an increasing trend with increasing inoculant application within a certain range, and T4 showed the best overall performance. In conclusion, the self-developed compound agricultural probiotic inoculant showed good potential for promoting wheat growth, increasing yield, and improving grain quality.

Keywords: Wheat; Probiotic agents; Agronomic traits; Physiological activity indicators; Yield; Quality

小麦是保障粮食安全的重要口粮作物,其高产优质栽培对保障粮食安全和推动农业可持续发展具有重要意义^[1-2]。当前,中国小麦种植过程中存在化肥投入偏高的现象,这不仅导致土壤板结、肥力降低等问题,还影响了小麦的品质并削弱土壤持续生产能力^[3-4]。因此,开发减肥增效、促进小麦可持续生产的绿色投入品具有重要现实意义。微生物菌肥作为一种环境友好型的生物肥料,因其在改善土壤微生态、促进养分吸收利用和作物生长发育方面的积极作用,受到广泛关注。已有研究表明,枯草芽孢杆菌、地衣芽孢杆菌及其相关复合菌剂能够促进甜椒、烟草、洋桔梗和大豆等作物的生长发育,并在一定程度上提高作物产量和品质^[5-8]。与单一菌剂相比,复合菌剂通过不同功能菌株之间的协同作用,更有利于促进作物生长、改善土壤环境并提高产量。然而,不同作物乃至不同品种对微生物菌剂的响应存在明显差异,已有研究结果尚不能直接推广到小麦生产体系。目前,微生物菌剂在蔬菜、烟草和花卉等作物上的应用研究较多,而在小麦等主要粮食作物上的研究相对不足,尤其是关于复合菌剂施用量对小麦生长发育、产量及品质影响的系统研究仍较少^[9-12]。此外,不同小麦品种(系)对微生物菌剂的响应可能存在差异,有必要针对特定材料开展应用效果评价。因此,本研究以小麦新品系吨麦99-1为材料,分析了复合菌剂不同施用量对其生长发育、产量和品质的影响,以期为微生物菌剂在小麦绿色生产中的合理应用提供理论依据和实践参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2023—2025年连续两个小麦生长季在河南省开封市祥符区半坡店村试验田(114°49′

E, 35°2′N)进行,该区域为暖温带大陆季风气候区,年均气温 14.1℃,年降水量 685.7 mm。前茬作物为玉米,土壤类型为潮土,0~20 cm 耕层土壤 pH 值 7.87,有机碳含量 9.55 g·kg⁻¹,全氮含量 1.96 g·kg⁻¹,全磷含量 1.37 g·kg⁻¹,有效钾含量 151.33 mg·kg⁻¹,碱解氮含量 78.96 mg·kg⁻¹,有效磷含量 25.15 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

试验采用随机区组设计,设置各小区每次喷施清水(CK)、2.5 L 复合菌剂(T1)、5 L 复合菌剂(T2)、25 L 复合菌剂(T3)和 50 L 复合菌剂(T4) 5 个处理,每个处理 3 次重复,共 15 个小区,小区面积 85.8 m² (39.0 m×2.2 m),相当于喷施液量为 250 L。在小麦苗期、分蘖期、拔节期、孕穗期、灌浆期采用滴灌方式各施用复合菌剂 1 次,各小区每次喷液量均为 250 L。每年小麦播种量均为 262 kg·hm⁻²。所有处理均为条播,小麦行距为 20 cm。分别于 2023 年和 2024 年 10 月 23—29 日播种,次年 5 月 30 至 6 月 7 日收获。各处理播种前施底肥纯 N 225 kg·hm⁻²、P₂O₅ 120 kg·hm⁻²、K₂O 120 kg·hm⁻²。分别于播种前、拔节期和灌浆期灌水 1 次,其他管理措施同当地大田生产一致。选用高产、抗倒伏性强的弱春性品系吨麦 99-1 为材料,由河南厚土农业发展有限公司提供。菌剂:由枯草芽孢杆菌 K02 发酵得到活菌数为 6.3×10⁹ CFU·mL⁻¹ 原液,地衣芽孢杆菌 D07 发酵得到 3.2×10⁹ CFU·mL⁻¹ 原液,巨大芽孢杆菌 J12 发酵得到 1.3×10⁹ CFU·mL⁻¹ 原液,3 种发酵原液按体积比 2:2:1 混合均匀得到复合菌剂;3 株菌株均为河南工业大学环境微生物实验室保藏菌种。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 小麦不同生育时期农艺性状

于 2024—2025 年小麦分蘖期、拔节期、孕穗

期,采用蛇形取样法在每小区取样 20 株,测定株高、单株分蘖数、地上部鲜重。

1.3.2 小麦不同时期生理活性指标

于 2024—2025 年小麦分蘖期、拔节期、孕穗期,采用蛇形取样法在各小区取 20 株麦苗的完全展开叶混合后进行液氮速冻,加入磷酸缓冲液后于冰浴条件下研磨成匀浆,将匀浆在 4 ℃ 低温离心,取上清液,用核黄素-NBT 法测定超氧化物歧化酶(SOD)的活性^[13];用紫外吸收法测定过氧化氢酶(CAT)的活性^[14];用愈创木酚法测定过氧化物酶(POD)的活性^[15];用硫代巴比妥酸法测定丙二醛(MDA)的含量^[16]。

1.3.3 小麦产量及构成要素

于 2024 年和 2025 年小麦成熟期,各小区取 1 m²(1 m×1 m)样方统计单位面积穗数;取 20 穗调查穗粒数;每小区收获 1 m²(1 m×1 m)样方将小麦脱粒后测定籽粒含水量,并按 13%标准含水率折算产量和千粒重。

1.3.4 小麦籽粒品质

对 2024 年和 2025 年收获的小麦籽粒,采用近红外谷物品质分析仪(FOSS Infratec™ 1241,瑞典)测定籽粒淀粉含量、粗蛋白(干基)含量、湿面筋含量、容重。

1.4 数据分析

利用 WPS Office 软件进行数据整理,利用 SPSS 27 软件进行单因素方差分析,并用 LSD 法进行差异显著性检验($P<0.05$),利用 Origin 2021 软件作图。

2 结果与分析

2.1 施用复合菌剂对小麦不同时期农艺性状的影响

复合菌剂处理对小麦农艺性状的影响在不同时期存在差异(图 1)。与 CK 相比,施用复合菌剂显著提高了小麦分蘖期、拔节期和孕穗期的株高、分蘖数、地上部鲜重($P<0.05$)。其中,小麦株高、地上部鲜重均随复合菌剂施用量增加而增加;单株分蘖数则表现为 $T3>T4>T2>T1>CK$, T3 处理较 CK 提高 56.00%,达到 7.80 个。从不同生育时期看,株高和地上部鲜重在拔节期的增幅高于分蘖期和孕穗期,拔节期 T4 处理株高较 CK 提高 24.48%,达到 33.36 cm,地上部鲜重提高 31.11%,达到 11.38 g。小麦株高、地上部鲜重在拔节期后持续增长,在孕穗期时分别达到最大值 62.80 cm、14.95 g。总体来看,施用复合菌剂能够促进小麦营养生长,提高株高、单株分蘖数和地上部鲜重,其中 T3 和 T4 处理效果较明显。

2.2 施用复合菌剂对小麦不同时期生理活性指标的影响

与 CK 相比,施用复合菌剂显著提高了小麦各时期 SOD、CAT、POD 活性,降低了 MDA 含量(图 2)。小麦 SOD、CAT、POD 活性均随复合菌剂施用量增加而增加,MDA 含量随复合菌剂施用量增加而降低。综合来看,复合菌剂处理能够在不同生育时期提高小麦叶片抗氧化酶活性并降低 MDA 含量,其中以 T4 处理效果最为明显,表明适宜施用量的复合菌剂有利于增强小麦抗氧化防御能力,减轻生长过程中的氧化损伤。

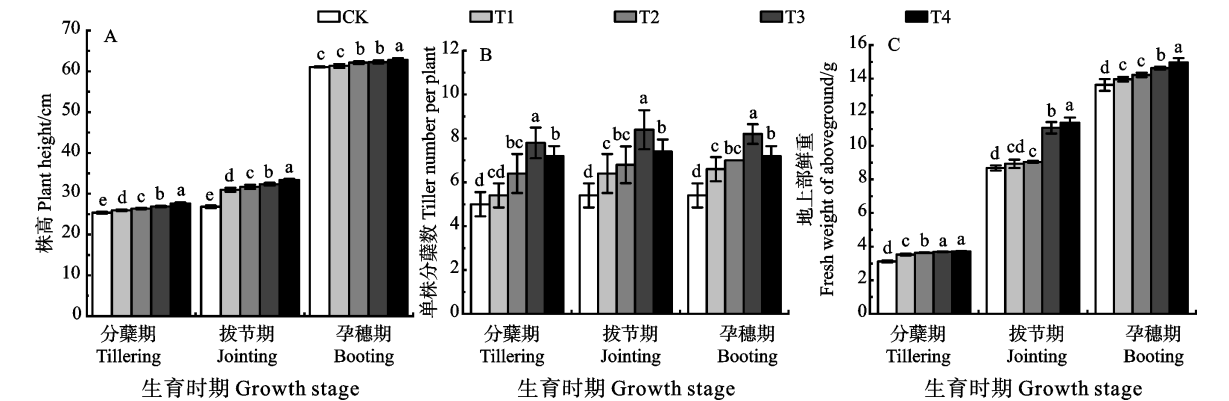


图 1 不同复合菌剂施用量对小麦不同时期农艺性状的影响

Fig. 1 Effects of different application rates of compound microbial inoculant on agronomic traits of wheat at different stages

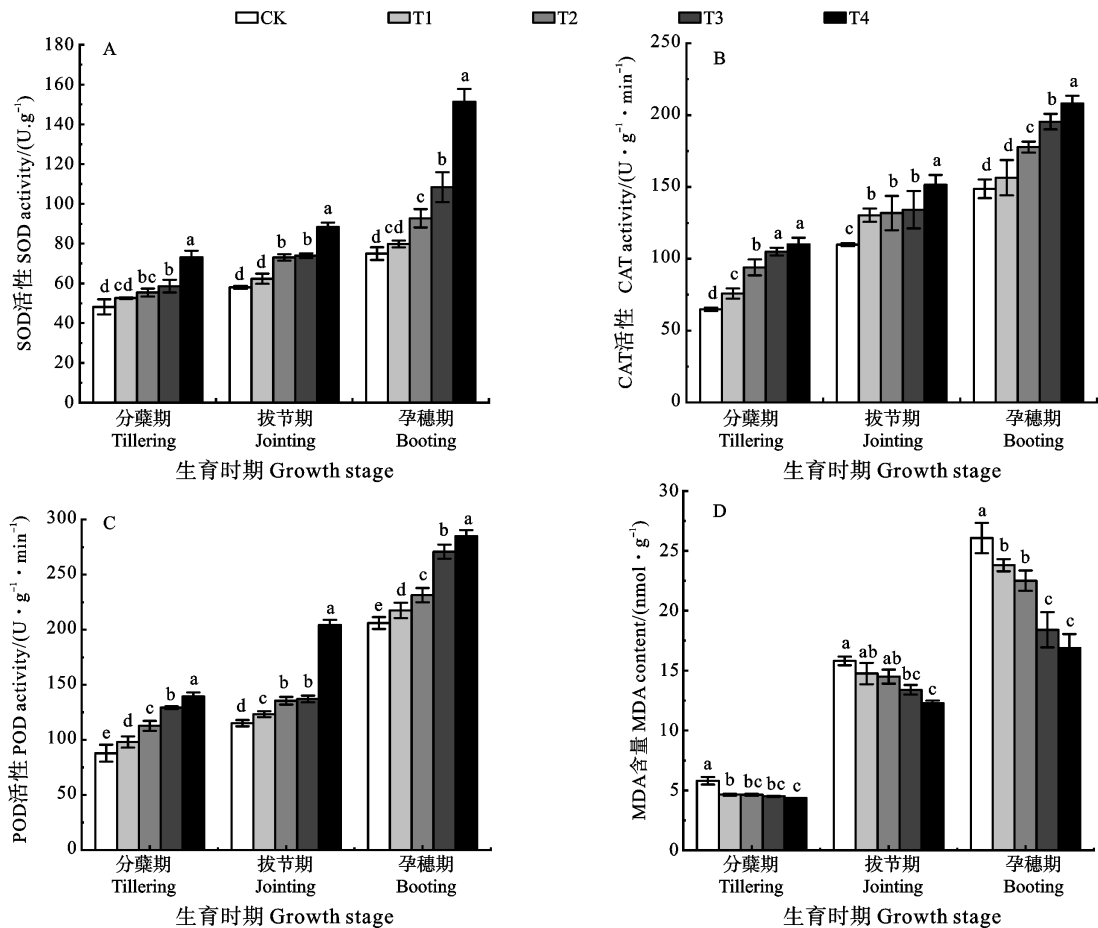


图 2 不同复合菌剂施用量对小麦不同时期生理活性指标的影响

Fig. 2 Effects of different application rates of compound microbial inoculant on physiological indices of wheat at different stages

2.3 施用复合菌剂对小麦产量及构成要素的影响

与 CK 相比,施用复合菌剂后小麦的穗粒数、穗数、千粒重和产量均有所提高(表 1)。在 2023—2024 年度,与 CK 相比,各复合菌剂处理小麦的穗粒数提高 0.33%~8.81%,千粒重提高 2.01%~10.41%,穗数提高 10.94%~32.55%,产量提高 11.60%~25.59%;2024—2025 年度穗粒数提高 1.06%~12.56%,千粒重提高 2.03%~5.52%,穗数提高 11.69%~30.63%,产量提高 5.68%~23.63%。综合两个生长季结果可见,穗粒数均以 T4 处理最高,分别为 59.01 和 60.33 个;穗数和产量均以 T3 处理最高,穗数分别为 598.32×10^4 和 $607.00 \times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$,产量分别达 $11\,258.56$ 和 $12\,046.48 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;千粒重在 2023—2024 生长季以 T3 处理最高,T4 次之,在 2024—2025 生长季则以 T4 处理最高,T3 次之,且两个生长季 T3 与 T4 处理间差异均不显著。总体来看,施用复合菌剂能够提高小麦产量及其构成要素,其中 T3 和 T4 处理提高幅度较大。

2.4 施用复合菌剂对小麦籽粒营养品质的影响

如表 2 所示,复合菌剂处理显著改善了小麦籽粒营养品质($P < 0.05$)。总体上,除 2024—2025 年 T1 处理的淀粉含量略低于 CK 外,其余处理各品质指标均高于 CK。在淀粉含量方面,2023—2024 生长季以 T3 处理最高,T4 处理次之;2024—2025 生长季则以 T4 处理最高,T3 处理次之,且两个生长季 T3 与 T4 处理间差异均不显著。粗蛋白含量、湿面筋含量和容重总体上均以 T4 处理最高。与 CK 相比,T4 处理在 2023—2024 和 2024—2025 年度淀粉含量分别提高了 1.08%、1.09%;粗蛋白含量分别提高 2.86%、1.81%;湿面筋含量分别提高 3.64%、3.25%;容重分别提高 0.91%、1.11%。总体来看,施用复合菌剂有助于改善小麦籽粒营养品质。多数品质指标随复合菌剂施用量增加而升高,其中 T3 和 T4 处理表现较好,且 T4 处理在粗蛋白含量、湿面筋含量和容重方面优势更为明显。

表 1 不同复合菌剂施用量对小麦产量及其构成要素的影响

Table 1 Effects of different application rates of compound microbial inoculant on wheat yield and its components

年度 Year	处理 Treatment	穗粒数 Grains per spike	穗数 Spike number/ ($\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)	千粒重 1 000-grain weight/g	产量 Yield/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
2023—2024	CK	54.23±0.84d	451.38±17.66e	46.22±0.46d	8 964.77±106.05e
	T1	54.41±0.77d	500.77±12.15d	47.15±0.29c	10 004.36±128.48d
	T2	55.66±0.46c	539.94±21.22c	49.88±0.16b	10 316.88±153.01c
	T3	58.69±1.06b	598.32±16.08a	51.03±0.21a	11 258.56±161.69a
	T4	59.01±1.19a	581.18±13.23b	50.85±0.08a	11 045.79±130.35b
2024—2025	CK	53.60±0.62c	464.67±17.02e	48.75±0.47d	9 744.00±124.35d
	T1	54.17±0.81c	519.00±12.00d	49.74±0.67c	10 297.59±109.66cd
	T2	54.88±1.48c	550.00±13.61c	50.73±0.05b	10 445.11±149.69c
	T3	58.24±0.96b	607.00±14.33a	51.09±0.09ab	12 046.48±264.32a
	T4	60.33±1.17a	575.33±11.88b	51.44±0.11a	11 386.83±280.97b

同一年度同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Different lowercase letters after the data of same column indicate significant differences between treatments($P<0.05$). The same in table 2.

表 2 不同复合菌剂施用量对小麦籽粒营养品质的影响

Table 2 Effects of different application rates of compound microbial inoculant on the nutritional quality of wheat grains

年度 Year	处理 Treatment	淀粉含量 Starch content/%	粗蛋白含量 Crude protein content/%	湿面筋含量 Wet gluten content/%	容重 Test weight/($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)
2023—2024	CK	56.70±0.12b	15.39±0.04d	30.79±0.06e	820.23±1.56c
	T1	56.71±0.25b	15.50±0.03c	31.06±0.05d	822.01±1.34bc
	T2	56.73±0.26b	15.69±0.04b	31.22±0.03c	822.19±0.89b
	T3	57.31±0.11a	15.71±0.04b	31.67±0.02b	827.33±0.43a
	T4	57.29±0.12a	15.83±0.04a	31.91±0.05a	827.68±0.78a
2024—2025	CK	56.71±0.23d	15.47±0.03d	31.98±0.07d	822.60±1.18b
	T1	56.68±0.38c	15.55±0.03c	32.17±0.09c	822.67±2.51b
	T2	57.08±0.31b	15.64±0.03b	32.35±0.15b	823.37±1.92b
	T3	57.27±0.19a	15.71±0.02a	32.88±0.06a	826.53±2.90b
	T4	57.33±0.15a	15.75±0.03a	33.02±0.05a	831.73±2.74a

3 讨论

3.1 施用复合菌剂对小麦不同时期农艺性状的影响

株高和分蘖数是决定营养生长向生殖生长过渡质量的关键指标,分蘖数直接影响着小麦的最终产量,二者协同反映了植株生长状况与产量潜力,而地上部鲜重可在一定程度上反映植株生长势和物质积累状况^[17-19]。拔节期作为小麦营养生长最旺盛的阶段,此时株高增加幅度最大,远高于分蘖期和孕穗期,此时期的 小麦株高适当增加有利于小麦茎秆伸长和带动叶片分层分布,形成立体的光合结构,提高光合效率从而增加碳水化合物积累,为幼穗分化提供能量^[20-21]。本研究中,拔

节期株高和地上部鲜重受复合菌剂促进效果最为显著,T4 处理的株高和鲜重等指标均为最佳,与 CK 相比分别增加了 24.48%、31.11%,且小麦株高和鲜重在拔节期后持续增长,在孕穗期时分别达 62.80 cm、14.95 g;T3 处理的小麦分蘖数达 7.80 个。这可能是由于拔节期茎尖分生组织与节间居间分生组织代谢旺盛,对菌源激素信号响应更为敏感;同时,菌剂可能通过活化土壤养分,提高植株对氮素等关键元素的吸收效率,进而支持快速生长所需的物质积累^[22-24]。本研究中,株高和分蘖数都能提高小麦最终产量,T3 处理的小麦产量高于 T4 处理,这表明在本试验条件下,分蘖数形成对产量提升的贡献可能大于株高变化。分蘖数效果最佳的处理组是 T3 处理,并不是复

合菌剂施用量最高 T4 处理,这说明菌剂存在调控阈值,过量使用可能导致根际微生物群落竞争加剧、局部微环境 pH 改变,甚至引发轻微的代谢胁迫,反而不利于作物的生长。这与 Etesami 等^[22]研究得出的结论一致。

3.2 施用复合菌剂对小麦生理活性指标的影响

施用复合菌剂对小麦体内抗氧化酶活性的提升作用已被广泛证实是微生物肥料促进作物生长的重要机制之一。植物在正常代谢及环境胁迫下会产生活性氧(ROS),若 ROS 大量积累,将引发氧化胁迫,损害细胞结构并抑制生长发育,丙二醛(MDA)作为膜脂过氧化的最终产物,具有较强反应活性,能抑制细胞膜蛋白质的合成、抑制植物的光合作用和呼吸作用,其积累水平已被广泛用作衡量氧化损伤程度的指标^[25-26]。本研究中,T4 处理下各时期小麦的 MDA 含量与 CK 相比降低幅度最大,在灌浆期较 CK 减少了 35.21%,说明在本试验设置的施用量范围内 MDA 含量随复合菌剂施用量的增加而减少。抗氧化酶系统(如 SOD、POD、CAT 等)是植物清除 ROS、维持氧化还原稳态的核心防御体系。复合菌剂中的有益微生物可通过多种途径激活这一系统,使抗氧化酶活性得到提升,从而增强对 ROS 的清除能力,遏制膜脂过氧化链式反应的启动。本研究所施用的复合菌剂可能是通过协同激活小麦不同生育时期的抗氧化防御系统,实现了 SOD、POD、CAT 等多种抗氧化酶活性的同步增强,各生育时期均以 T4 处理的提升幅度最大,表明在本试验施用范围内,复合菌剂施用量增加总体上有利于提高抗氧化酶活性。这种效应有助于构建高效的 ROS 清除屏障,从源头上减少膜脂过氧化底物的生成。MDA 含量的降低是膜系统得到有效保护的直接体现。这两方面生理指标的共同作用,有效减轻了小麦生长过程中遭受的氧化损伤,并可能在遭遇干旱^[27]、盐碱^[28]或温度胁迫^[29]时有助于增强植株抗逆潜力。张馨予^[30]、张岳伟^[31]和闫伸^[32]等的研究均指出,微生物菌肥通过改善抗氧化防御能力,能够显著促进作物在不同环境下的生长,从而为生物量积累、产量形成和品质改善奠定生理基础,本研究结论与其一致。

3.3 施用复合菌剂对小麦产量构成要素的影响

穗粒数、穗数、千粒重作为小麦产量的三大构成因子,共同决定了最终籽粒产量。其中,穗粒数直接反映单穗结实能力,千粒重反映籽粒大小和

饱满度,穗数是群体密度的直接体现,与播种量、分蘖成穗率相关^[33]。本研究结果表明,施用复合菌剂对 2023—2024 和 2024—2025 两个生长季小麦产量构成要素具有显著促进作用,施用不同剂量的复合菌剂对小麦产量构成要素的促进效果也不同。其中,T3 处理对穗数的促进效果最佳,分别达到 $598.32 \times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $607.00 \times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$ 。T4 处理对穗粒数提升效果最佳,T3 处理产量最高,分别为 $11\,258.56 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $12\,046.48 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。说明在本试验条件下,群体穗数对产量提升的贡献可能大于穗粒数。本研究发现,穗数并未随复合菌剂施用量增加而持续升高,这说明微生物肥料需要适宜浓度范围。过量使用可能导致根际微生物群落结构失衡,或引发局部代谢胁迫,反而不利于分蘖成穗^[22]。复合菌剂通过提高土壤养分有效性(如磷、钾及微量元素)和促进根系发育,增加植株对氮素等关键元素的吸收与同化效率,从而为穗分化提供充足的物质基础;此外,抗氧化酶活性的提升能减轻幼穗发育过程中的氧化胁迫,有利于提高小花可育性,进而提高穗粒数和千粒重^[23,34]。

本研究中产量最高的处理并非穗粒数最佳的处理,而是穗数优势最明显的处理。这说明在本试验条件下,群体穗数对最终产量的贡献大于穗粒数。复合菌剂通过优化分蘖成穗过程,在保证一定穗粒数的基础上显著提高了单位面积有效穗数,从而实现了产量最大化。该结果进一步印证了微生物肥料通过调控群体结构而实现增产的实践潜力。这与杨婷婷等^[35]得出的‘微生物菌肥能促进作物增产’的研究结论一致。

3.4 施用复合菌剂对小麦籽粒营养品质的影响

淀粉、蛋白质、湿面筋含量及容重是评价小麦籽粒加工品质、营养品质与储藏性能的核心指标。其中,淀粉作为小麦籽粒的主要成分,直接影响小麦的加工特性和食用品质;蛋白质是面粉主要的营养成分,含量越高,营养价值也越高;湿面筋含量与面团延展性、弹性密切相关;容重较好地反映了小麦籽粒的饱满程度、整齐度和密度,籽粒饱满的小麦不易发生霉变,耐储存^[35]。复合菌剂对小麦籽粒品质的调控效应,本质上源于其对土壤养分有效性、根系吸收能力以及植株碳氮代谢过程的影响。已有研究表明,根际有益微生物可通过固氮、溶磷、解钾等作用提高土壤中氮、磷、钾等矿质元素的生物有效性,促进小麦对氮素的吸收与

同化,从而为籽粒蛋白质的合成提供充足的氮源^[36-37]。2024—2025年度T1处理的籽粒淀粉含量与CK相比有所下降,可能与T1处理的复合菌剂施用量较少有关,微生物对土壤养分的活化作用有限,植株可能优先将有限的光合产物和氮素用于蛋白质合成;同时,低剂量菌剂可能尚未达到能有效调节根际微生态的阈值,其对叶片光合能力和花后光合产物向籽粒转运的促进作用有限^[38]。

总体上T4处理在粗蛋白、湿面筋和容重方面表现较优,而淀粉含量在不同年度间以T3或T4处理较高。被测多数品质指标总体上随复合菌剂施用量增加而提高。这说明菌剂对小麦品质的调控具有剂量依赖性,适宜剂量的复合菌剂能够建立高效的根际微生态环境,优化碳氮代谢途径,在提升产量的同时改善籽粒营养与加工品质。

4 结论

施用复合菌剂显著提高了小麦不同生育时期的关键生长指标及产量构成要素,使2023—2025年小麦产量最高达到11 258.56 kg·hm⁻²、12 046.48 kg·hm⁻²,较对照分别提高25.59%、23.63%,同时提高了小麦籽粒的淀粉含量、粗蛋白含量、湿面筋含量和容重等品质指标。本研究所施用的复合菌剂在小麦生产中具有较好的应用潜力。

参考文献:

- [1]XIAO J,LIU B,YAO YY,et al. Wheat genomic study for genetic improvement of traits in China [J]. *Science China Life Sciences*,2022,65(9):1718.
- [2]SENAPATIN,STRATONOVITCH P,PAUL M J,et al. Drought tolerance during reproductive development is important for increasing wheat yield potential under climate change in Europe [J]. *Journal of Experimental Botany*,2019,70(9):2549.
- [3]卜容燕,程文龙,武际,等.有机肥无机肥配施结合深耕提升稻油轮作系统生产力和养分利用效率[J].*中国农业科学*,2025,58(16):3178.
BU R Y,CHENG W L,WU J,et al. Organic-inorganic fertilization application and deep tillage enhance productivity and nutrient use efficiency in rice-rapeseed rotations [J]. *Scientia Agricultura Sinica*,2025,58(16):3178.
- [4]CAI S M,WANG J J,LV W G,et al. Nitrogen fertilization alters the effects of earthworms on soil physicochemical properties and bacterial community structure [J]. *Applied Soil Ecology*,2020,150:103478.
- [5]赵莉,尚焯,闫庚洋,等.枯草芽孢杆菌B2-GFP菌株对甜椒幼苗生长和生理特性的影响[J].*福建农业学报*,2024,39(4):448.
ZHAO L,SHANG Y,YAN G Y,et al. Application of *Bacillus subtilis* B2-GFP to promote growth of sweet pepper seedlings [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*,2024,39(4):448.
- [6]陈丽丽,何玲玲,赵雅,等.地衣芽孢杆菌W10对烟草的促进作用及机制[J].*江苏农业科学*,2016,44(5):152.
CHEN LL,HE L L,ZHAO Y,et al. Effect and mechanism of *Bacillus licheniformis* W10 on tobacco growth [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*,2016,44(5):152.
- [7]彭佳,汤俊瑜,王豪吉,等.不同生物有机肥改良次生盐渍化土壤及对洋桔梗生长的影响[J].*中国土壤与肥料*,2025(2):128.
PENG J,TANG J Y,WANG H J,et al. Effects of different bio-fertilizers on the improvement of secondary salinized soil and the growth of *Eustoma grandiflorum* [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*,2025(2):128.
- [8]候婷婷,于德水,何鑫,等.复合微生物菌剂对大豆生长发育、结瘤和产量的影响[J].*江苏农业科学*,2023,51(10):65.
HOU TT,YU D S,HE X,et al. Effects of compound micro-organisms on growth,nodulation and yield of soybean [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*,2023,51(10):65.
- [9]张晓尘,张红杰,李生兵,等.哈茨木霉EMF910对宁夏盐碱地区黄芩根腐病致病菌的防治作用[J].*微生物学通报*,2024,51(10):4162.
ZHANG X C,ZHANG H J,LI S B,et al. The control effect of *Trichoderma harzianum* EMF910 on the root rot pathogens of *Astragalus membranaceus* in Ningxia saline-alkali regions [J]. *Microbiology China*,2024,51(10):4162.
- [10]STAMENKOVIĆ S,BEŠKOSKI V,KARABEGOVIĆ I,et al. Microbial fertilizers: A comprehensive review of current findings and future perspectives [J]. *Spanish Journal of Agricultural Research*,2018,16(1):e09R01.
- [11]KÖHL J,KOLNAAR R,RAVENSBURG W J. Mode of action of microbial biological control agents against plant diseases:Relevance beyond efficacy [J]. *Frontiers in Plant Science*,2019,10:845.
- [12]张亚林,冯鸿杰,冯自力,等.复合微生物菌剂对作物黄萎病生防效果的研究[J].*植物保护*,2025,51(3):374.
ZHANG Y L,FENG H J,FENG Z L,et al. Biological control effect of composite microbial agent on crop *Verticillium* wilt disease [J]. *Plant Protection*,2025,51(3):374.
- [13]GIANNOPOLITIS C N,RIES S K. Superoxide dismutases: I. Occurrence in higher plants [J]. *Plant Physiology*,1977,59(2):309.
- [14]ZHANG C X,FU G F,YANG X Q,et al. Heat stress effects are stronger on spikelets than on flag leaves in rice due to differences in dissipation capacity [J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*,2016,202(5):394.
- [15]MAEHLY A C,CHANCE B. The assay of catalases and peroxidases [J]. *Methods of Biochemical Analysis*,1954,1:357.
- [16]王学奎,黄见良.植物生理生化实验原理与技术[M].3版.北京:高等教育出版社,2015:276.
WANG X K,HUANG J L. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment [M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press,2015:276.
- [17]尚毅,朱靖环,华为,等.南方冬麦区小麦耐迟播高分蘖资源的鉴定与筛选[J].*麦类作物学报*,2015,35(4):494.
SHANG Y,ZHU J H,HUA W,et al. Identification and selection of wheat germplasm with high tillering ability under late sowing for southern winter wheat zone [J]. *Journal of Triticeae Crops*,2015,35(4):494.
- [18]庞志远,程宇坤,郭小玲,等.水旱条件下小麦分蘖相关性状全基因组关联分析[J].*华北农学报*,2024,39(6):64.

- PANG Z Y, CHENG Y K, GUO X L, *et al.* Genome-wide association study of tiller related traits in wheat under water and drought conditions [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2024, 39(6): 64.
- [19] 周小忍, 张宇, 孟维伟, 等. 中、强筋小麦主茎和分蘖对产量与品质贡献差异研究[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(9): 87.
- ZHOU X R, ZHANG Y, MENG W W, *et al.* Study on difference in contribution of main stem and tiller to yield and quality of medium and strong gluten wheat [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2024, 52(9): 87.
- [20] 谢松鑫, 贾晓雯, 周苏玫, 等. 冬小麦根系发育特征及其与分蘖成穗的相关性[J]. 麦类作物学报, 2025, 45(8): 1109.
- XIE S X, JIA X W, ZHOU S M, *et al.* Development characteristics of root system and its correlation with tillering and panicle formation in wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2025, 45(8): 1109.
- [21] JI H T, XIAO L J, XIA Y M, *et al.* Effects of jointing and booting low temperature stresses on grain yield and yield components in wheat [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 243: 33.
- [22] ETESAMI H. The dual nature of plant growth-promoting bacteria: Benefits, risks, and pathways to sustainable deployment [J]. *Current Research in Microbial Sciences*, 2025, 9: 100421.
- [23] 李刚强, 王楠, 李永斌, 等. 两种固氮芽孢杆菌菌剂在小麦—玉米轮作区大田试验效果评价[J]. 中国农业科技导报, 2020, 22(4): 147.
- LI G Q, WANG N, LI Y B, *et al.* Effect evaluation of field experiment of two *Paenibacillus* sp. agents in wheat-maize rotation area [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2020, 22(4): 147.
- [24] 穆丹, 贾凡乐, 梁英辉, 等. 植物根际促生菌对幼苗生长的促生机制研究进展[J]. 江苏农业科学, 2025, 53(18): 1.
- MU D, JIA F L, LIANG Y H, *et al.* Research progress on growth promoting mechanism of plant growth promoting rhizobacteria on seedling growth [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2025, 53(18): 1.
- [25] 刘聪, 邓宇宏, 刘选明, 等. 过氧化氢酶在植物生长发育和胁迫响应中的功能研究进展[J]. 生命科学研究, 2023, 27(2): 128.
- LIU C, DENG Y H, LIU X M, *et al.* Research advances in the function of catalase in plant growth, development and stress response [J]. *Life Science Research*, 2023, 27(2): 128.
- [26] 王梦园, 杜延全, 朱建强. 复合促生菌对小麦苗期生长和土壤酶活的影响[J]. 中国农业科技导报(中英文), 2019, 21(10): 98.
- WANG M Y, DU Y Q, ZHU J Q. Influences compound probiotics on wheat growth in the seedling stage and soil enzyme activity [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2019, 21(10): 98.
- [27] 赵慧云, 戚名扬, 党长喜, 等. 植物根围促生菌诱导小麦幼苗耐旱性的研究[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2020, 35(1): 8.
- ZHAO H Y, QI M Y, DANG C X, *et al.* Study on drought tolerance of wheat seedlings induced by plantroot-promoting bacteria [J]. *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science)*, 2020, 35(1): 8.
- [28] 许庭旸, 刘雨辰, 王万鹏, 等. 喷施不同植物生长调节剂对盐碱地小麦生长发育的影响[J]. 植物学报, 2025, 60(3): 354.
- XU T Y, LIU Y C, WANG W P, *et al.* Effects of different plant growth regulators on wheat growth and development in the saline-alkali land [J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2025, 60(3): 354.
- [29] ALI A, DINDHORIA K, KUMAR R. *Acinetobacter oleivorans* IRS14 alleviates cold stress in wheat by regulating physiological and biochemical factors [J]. *J Appl Microbiol*, 2023; 134(8): 176.
- [30] 张馨予, 万永青, 李国庆, 等. 菌肥促进作物生长和抗逆性提升的作用机制综述[J]. 江苏农业科学, 2026, 54(2): 32.
- ZHANG X Y, WAN Y Q, LI G Q, *et al.* Mechanisms of bacterial fertilizers promote crop growth and enhance stress resistance: A review [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2026, 54(2): 32.
- [31] 张岳伟, 夏曾润, 李佳吕, 等. 生物菌肥与富硒有机肥配施对大豆产量和品质的提升作用[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2025, 40(5): 13.
- ZHANG Y W, XIA Z R, LI J L, *et al.* Enhancing effects of biofertilizer and selenium-rich organic fertilizer co-application on soybean yield and quality [J]. *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science)*, 2025, 40(5): 13.
- [32] 闫伸, 王鹏, 陈承亮, 等. 生物炭配施芽孢杆菌对植烟土壤微生物群落结构及烟叶质量的影响[J]. 江苏农业科学, 2025, 53(3): 222.
- YAN S, WANG P, CHEN C L, *et al.* Effects of biochar combined with bacillus on soil microbial community structure and tobacco leaf quality [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2025, 53(3): 222.
- [33] 刘玉涛, 杨斌, 张凯, 等. 链霉菌剂种子包衣对小麦幼穗分化及生物学特性的影响[J]. 麦类作物学报, 2020, 40(8): 990.
- LIU Y T, YANG B, ZHANG K, *et al.* Effect of seed coating with streptomycetes on panicle differentiation and biological characteristics of wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2020, 40(8): 990.
- [34] LIANG Z M, LI J, FENG J Y, *et al.* Brassinosteroids improve the redox state of wheat florets under low-nitrogen stress and alleviate degeneration [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2025, 24(8): 2920.
- [35] 杨婷婷, 闫素辉, Abdul Rehman, 等. 花后弱光对软质小麦籽粒产量与淀粉品质的影响[J]. 麦类作物学报, 2024, 44(11): 1431.
- YANG T T, YAN S H, REHMAN A, *et al.* Effect of weak light after anthesis on grain yield and starch quality in soft wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2024, 44(11): 1431.
- [36] 孟自力, 付胜昔, 高磊, 等. 小麦高产优质环境友好的氮肥-固氮菌肥最佳施用量研究[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(9): 62.
- MENG Z L, FU S X, GAO L, *et al.* Study on the optimal application rate of nitrogen fertilizer and nitrogen-fixing bacterial fertilizer for high-yield, high-quality and eco-friendly wheat [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2022, 50(9): 62.
- [37] 盛海君, 施凯峰, 牛东, 等. 秸秆添加快腐菌剂还田对麦季土壤养分和小麦产量与品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(19): 166.
- SHENG H J, SHI K F, NIU D, *et al.* Impacts of microbial inoculants used in straw decomposing on soil nutrients at wheat season and yield and quality of wheat [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, 45(19): 166.
- [38] CHEN R X, SUN L F, ZHANG X Y, *et al.* Effects of combined straw returning and microbial inoculant application on carbon-nitrogen metabolism in flag leaves and yield formation in winter wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2025, 51(7): 1901.