

网络出版时间:2026-06-25

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1359.S.20260625.1118.008

叶面喷施螯合钛对晚播冬小麦干物质积累和产量的影响

户美琳¹,王雪慧¹,郭飞²,张志林¹,程璠¹,田文强¹,
杨卫君¹,陈广周¹,王建华³,张金汕¹

(1. 新疆农业大学农学院,新疆乌鲁木齐 830052; 2. 新疆塔城地区农业技术推广中心,新疆塔城 834700;
3. 中国农业大学农学院,北京 100193)

摘要:为探究叶面喷施螯合钛对新疆晚播冬小麦干物质积累与产量形成的影响,筛选适宜喷施期和浓度,以新疆塔城盆地主栽冬小麦品种新冬18为材料,于2023–2025年度在塔城地区农业科学研究所示范基地开展田间双因素裂区试验,其中主区设置孕穗期(D1)和开花期(D2)两个叶面喷施时期,副区设置0 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ (C0,清水对照)、376 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ (C1)、501 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ (C2)、626 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ (C3)4个螯合钛喷施浓度,测定分析了不同处理下小麦农艺性状、干物质、灌浆进程、产量及其构成的特点。结果表明,在D1条件下,与C0相比,C2的小麦株高、平均茎粗及穗长增幅两年均最大,干物质积累量两年分别显著增加25.57%和14.20%;C2产量最高,两年度较C0分别增加5.06%和9.45%;干物质转运效率、灌浆速率、灌浆天数、穗粒数均显著增大;在D2条件下,喷施螯合钛对小麦株高、平均茎粗及穗长影响均不显著;C2的干物质积累较C0两年分别显著增加20.99%和15.35%,产量分别显著增加4.65%和5.54%,干物质转运效率、灌浆速率、灌浆天数、千粒重均显著增大。总体上,D1C2处理对晚播冬小麦生长的促进作用及增产效果最佳,可在一定程度上缓解晚播冬小麦干物质积累不足和灌浆时间缩短所以对产量形成的不利影响。

关键词:晚播冬小麦;螯合钛;干物质;产量

中图分类号:S512.1;S311

文献标识码:A

文章编号:1009-1041(2026)08-1110-10

Effects of Foliar Application of Chelated Titanium on Dry Matter Accumulation and Yield of Late-Sown Winter Wheat

Hu Meilin¹, Wang Xuehui¹, Guo Fei², Zhang Zhilin¹, Cheng Fan¹, Tian Wenqiang¹,
Yang Weijun¹, Chen Guangzhou¹, Wang Jianhua³, Zhang Jinshan¹

(1. College of Agriculture, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China; 2. Agricultural Technology Extension Center, Tacheng Prefecture, Xinjiang 834700, China; 3. College of Agriculture, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: To investigate the effects of foliar application of chelated titanium on dry matter accumulation and yield formation in late-sown winter wheat in Xinjiang, as well as to determine the optimal application timing and concentration, the study used Xindong 18, a winter wheat cultivar cultivated in the Ta'er Basin of Xinjiang. A two-factor split-plot field experiment was conducted at the demonstration base of the Tacheng Agricultural Science Research Institute in the Ta'er Basin from 2023 to 2025. The main plots were set up with two foliar application stages: the booting stage(D1) and the flowering stage(D2). The subplots were set up with four application concentrations: 0 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ (C0, distilled water control), 376 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ (C1), 501 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ (C2), and 626 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ (C3). We measured and analyzed the characteristics of wheat agronomic traits, dry matter, grain filling progress, yield, and yield components under different treatments. The results showed that under D1 conditions, com-

收稿日期:2025-12-12

修回日期:2026-01-21

基金项目:国家重点研发计划子课题(2024YFD2300203-3);新疆小麦产业技术体系(XJARS-01)

第一作者 E-mail:1936539692@qq.com(户美琳)

通讯作者 E-mail:zhangjinshan0530@sina.com(张金汕)

pared with C0, C2 exhibited the greatest increases in wheat plant height, average stem diameter, and spike length in both years. In 2023—2024 and 2024—2025, dry matter accumulation of C2 increased by 25.57% and 14.20%, yield increased by 5.06% and 9.45%, respectively, while dry matter transport efficiency, grain filling rate, grain filling duration, and number of grains per spike all increased significantly. Under D2 conditions, the application of chelated titanium had no significant effect on wheat plant height, average stem diameter, or spike length; compared to C0, dry matter accumulation in C2 increased by 20.99% and 15.35%, yield increased by 4.65% and 6.54% for the two consecutive years, respectively, while dry matter transport rate, grain filling rate, grain filling duration, and thousand-kernel weight all increased significantly. Overall, the D1C2 treatment had the best effect on promoting the growth and increasing the yield of late-sown winter wheat, which can address the yield reduction issues caused by reduced dry matter accumulation and shortened grain-filling duration in late-sown winter wheat.

Keywords: Late-sown winter wheat; Chelated titanium; Dry matter; Yield

小麦是中国主要粮食作物之一,其高产稳产直接关系到国家粮食安全^[1]。新疆为中国小麦主产区之一,近年来该地区的小麦单产持续攀升,为保障国家粮食安全发挥了重要作用^[2]。为克服该地区因棉、葵花等经济作物长期连作负效应日益加重问题,“小麦-棉花/葵花-小麦”轮作倒茬面积逐年增大,但同时导致小麦种植普遍晚播^[3-4]。因冬前光温不足,晚播冬小麦营养生长受限,植株弱小,在灌浆期易遇夏季高温和干热风,从而降低干物质积累和灌浆速率,最终影响产量^[5-7]。当前塔额盆地晚播冬小麦占当地冬小麦总面积约 61.36%,为保证晚播冬小麦稳产高产,生产中主要通过增加播量、追氮等来弥补晚播造成的群体生长量不足问题,但成本较大,通过喷施外源物调控晚播冬小麦物质生产是提高干物质积累和产量的重要途径之一^[8]。

钛(Ti)元素虽不是植物必需营养元素,但对植物生长发育有显著的促进作用,适量喷施钛能增加作物生物量和产量^[9]。研究表明,施用 TiO_2 可显著增加黑麦产量^[10];喷施适宜浓度 TiO_2 能促进番茄植株生长发育并起到增产作用,而过高的喷施浓度会产生抑制作用^[11]。这说明喷施钛对作物生产具有积极效果,但存在剂量效应^[12],因而需要根据作物特点确定最适浓度^[13]。目前,关于 TiO_2 对晚播冬小麦喷施的研究鲜见报道,适宜晚播冬小麦的螯合钛喷施时期和浓度有待明确。本研究通过田间试验设置螯合钛不同叶面喷施时期和浓度,探讨其对晚播冬小麦干物质和产量的影响,并筛选喷施最佳时期和浓度,以期对螯

合钛在晚播冬小麦高产栽培中的应用提供理论参考和技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2023—2025 年在新疆塔城地区农业科学研究示范基地($82^{\circ}55'19''\text{E}$, $46^{\circ}43'13''\text{N}$)进行,该地属于温带大陆性干旱气候区。两个生长季小麦生育期降水和温度变化见图 1(数据来源于中国气象数据网),试验地土壤基础肥力见表 1。

1.2 试验设计

供试冬小麦品种为新冬 18。试验采用双因素裂区设计,主区设置孕穗期(D1)和开花期(D2)两个叶面喷施时期,副区设置 $0 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ (C0, 清水对照)、 $376 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ (C1)、 $501 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ (C2)、 $626 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ (C3) 4 个螯合钛喷施浓度,每个处理 3 次重复。供试螯合钛来源于杨凌澳邦生物科学有限公司,有机螯合钛(有效成分为 TiO_2 12.0%,氨基氮 12%,螯合基质 33%),水溶 pH 值为 6,白色固体粉末。选择对应时期 18:00 用喷壶进行叶面喷施,并确保所有叶面均匀分布液滴。

本试验冬小麦播种时间分别为 2023 年 10 月 15 日和 2024 年 10 月 19 日,较当地适期播种时间(9 月 20 日—10 月 1 日)延迟 15~25 d,采用人工条播方式,行距 20 cm,深度 4 cm,播量 $360 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,小区面积 10 m^2 ($2.0 \text{ m} \times 5.0 \text{ m}$)。试验地四周设保护行,冬前不灌出苗水和越冬水,春后铺设滴灌带,毛管配置为 1 管 3 行,间距 60 cm,生育期滴灌返青起身水、拔节孕穗水、抽穗水和灌浆

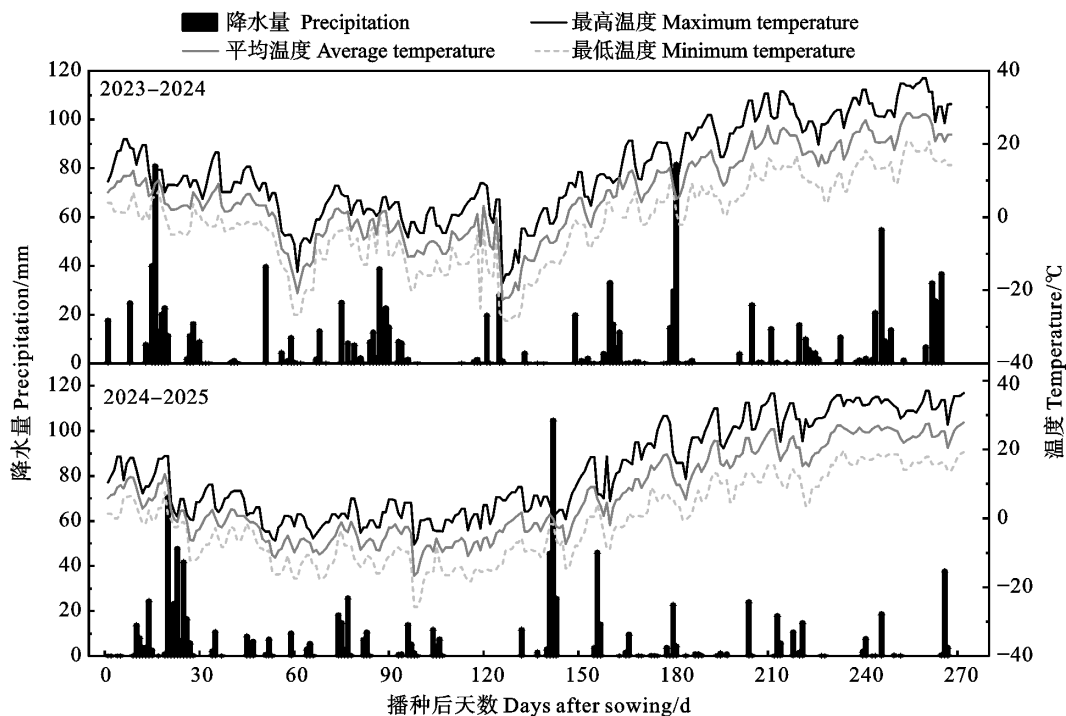


图 1 两年冬小麦生育期的气温和降水情况

Fig. 1 Temperature and precipitation throughout the growth period of winter wheat over the two years

表 1 0~20 cm 土壤基础肥力指标

Table 1 Soil basic fertility indicators at 0—20 cm depth

年份 Year	有机质 Organic matter/ (g · kg ⁻¹)	碱解氮 Alkaline hydrolyzable nitrogen/ (mg · kg ⁻¹)	速效磷 Available phosphorus/ (mg · kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium/ (mg · kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen/ (g · kg ⁻¹)	全磷 Total phosphorus/ (g · kg ⁻¹)	全钾 Total potassium/ (g · kg ⁻¹)	pH
2023	24.46	46	15.4	143	0.27	1.16	14.06	8.21
2024	24.26	41	38.9	193	1.62	1.30	7.37	8.69

水,追肥随水滴入,施肥量、灌水量等管理措施同当地大田生产一致。两年收获时间分别为 2024 年 7 月 8 日和 2025 年 7 月 17 日。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 干物质积累、分配及转运参数测定

于小麦的孕穗期、抽穗期、开花期、灌浆期及成熟期,每个小区采取具有代表性的 10 株小麦鲜样,去根后将植株分为叶片、茎鞘、颖壳+穗轴、籽粒部分,放入 105 ℃烘箱中杀青 15 min,80 ℃烘至恒重后称重,分别测定小麦植株各部分的干物质重量,计算干物质分配和转运相关参数。单株干物质分配率=器官干物质质量/干物质总量;花前营养器官干物质转运量=开花期营养器官干物质积累量-成熟期营养器官干物质积累量;花前营养器官干物质转运率=花前干物质转运量/花前干物质积累量;花后干物质积累量=成熟期籽粒

干重-开花前营养器官干物质转运量;花前干物质对籽粒产量的贡献率=花前干物质转运量/成熟期籽粒干重;花后干物质对籽粒产量的贡献率=花后干物质积累量/成熟期籽粒干重。

1.3.2 籽粒灌浆参数测定

于开花期每个小区选定 200 株主茎穗(同一天开花且穗型大小基本一致)并标记,从花后每 5 d 取样 1 次直至成熟,每次取 10 穗进行剥粒,放入 105 ℃杀青 10 min,80 ℃烘干至恒重,测籽粒干重。根据 Logistic 方程拟合籽粒灌浆特性,并计算相关参数^[14]。

1.3.3 农艺性状和产量及其构成因素

于成熟期每个小区选取长势一致的 10 株小麦,进行农艺性状测定。剪去地下部分,沿小麦基部自下而上测量节间长和直径,并测量整株的株高和麦穗长。收获时每个小区选取 1 m² 的单位面积

穗数,并进行人工收割,使用小型脱粒机脱粒,以小麦含水量 13%折算小麦千粒重和产量指标。

1.4 数据处理与统计分析

采用 Excel 2021 进行数据平均值、标准差及数据计算的处理,IBM SPSS Statistics 29.0 软件进行处理间差异显著性分析(最小显著差数法,least significant difference, LSD),使用 Origin 2024 作图。

2 结果与分析

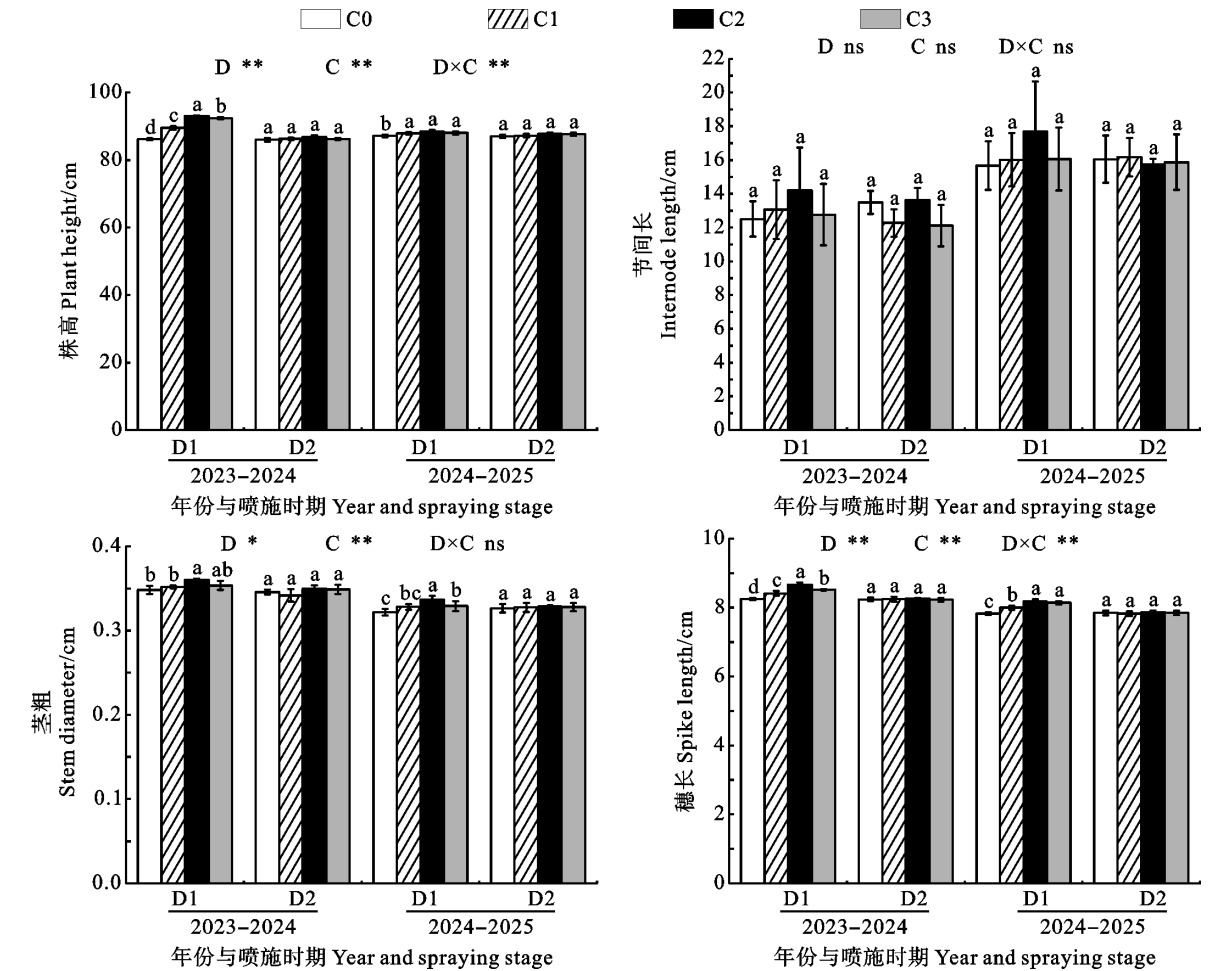
2.1 螯合钛喷施时期和浓度对晚播冬小麦农艺性状的影响

螯合钛喷施时期、浓度及其互作对小麦株高的影响均达显著水平($P<0.05$),对节间长均无显著影响。在 D1 条件下,与 C0 相比,2023—2024 年和 2024—2025 年喷施螯合钛处理后株

高、茎粗及穗长均增加,其中 C2 的增幅均最大,其株高增幅分别为 8.00%和 1.39%,茎粗增幅分别为 3.43%和 4.60%,穗长增幅分别为 5.01%和 4.41%,且差异均显著;但喷施螯合钛对 D1 下节间长和 D2 下各性状影响两年均不明显(图 2)。

2.2 螯合钛喷施时期和浓度对晚播冬小麦干物质积累的影响

小麦单株干物质积累量随生育进程呈上升趋势,在成熟期达到峰值(图 3)。在同一喷施时期,各生育时期的干物质积累量随喷施浓度的提高总体上呈先增后减趋势,其中 C2 均最高,与 C0 差异均显著;与 C0 相比,C2 的干物质积累量增幅在 D1 下两年分别为 25.57%和 14.20%,在 D2 下分别为 20.99%和 15.35%。相同喷施浓度下,D1 的干物质积累量略高于 D2。在所有处理中 D1C2 处理的冬小麦干物质积累最多。



D: 时期; C: 钛浓度; D×C: 互作。ns: $P>0.05$; *: $P<0.05$; **: $P<0.01$ 。图柱上不同小写字母表示相同喷施时期内不同浓度之间差异显著($P<0.05$)。图 3 同。
D: Stage; C: Titanium concentration; D×C: Interaction. ns: $P>0.05$; *: $P<0.05$; **: $P<0.01$. Different letters above the columns indicate significant differences among concentration levels at the same spraying stages at 0.05 level. The same in figure 3.

图 2 不同处理下晚播冬小麦农艺性状的变化
Fig. 2 Changes in agronomic traits of late-sown winter wheat under different treatments

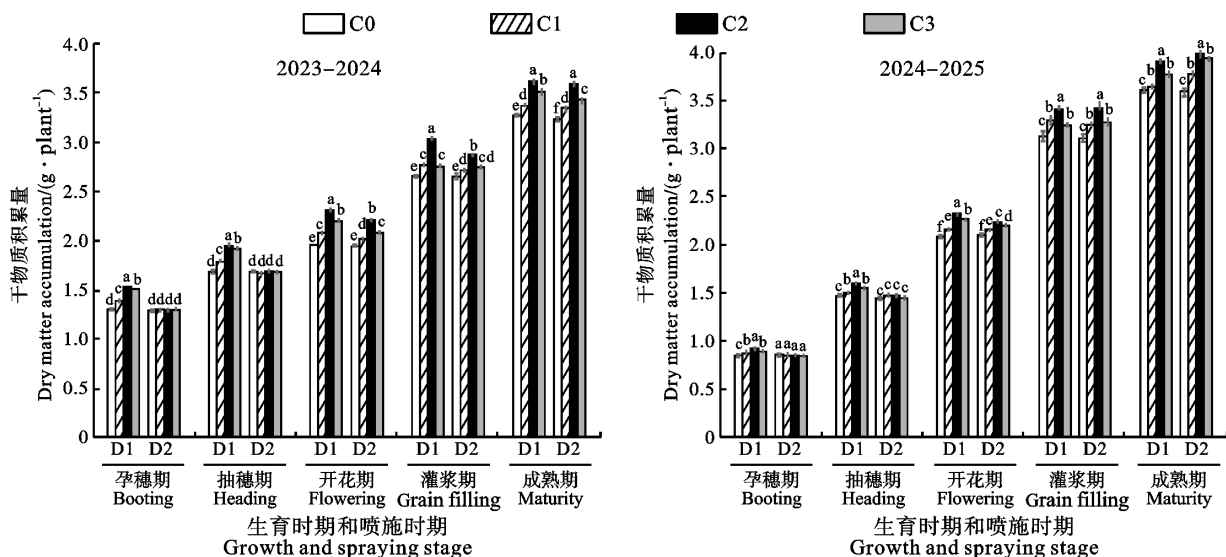


图3 不同处理下晚播冬小麦单株干物质积累量变化

Fig. 3 Changes in dry matter accumulation per plant of late-sown winter wheat under different treatments

2.3 螯合钛喷施时期和浓度对晚播冬小麦干物质分配与转运的影响

2.3.1 冬小麦成熟期干物质分配量及占比

在同一喷施时期,与C0相比,C2显著提高了小麦茎+叶鞘、叶、籽粒和穗轴+颖壳干物质分配量及籽粒干物质分配占比,其中干物质分配量在D1条件下2023—2024年分别提高13.51%、14.29%、35.57%、10.57%,在2024—2025年分别提高5.12%、13.79%、19.38%、4.54%;D2条件下在2023—2024年分别提高11.71%、7.14%、28.38%、6.98%,在2024—2025年分别提高6.96%、10.71%、22.50%、4.27%,但C2的穗轴和颖壳干物质分配量显著降低;相同喷施浓度下,D1的干物质分配量略高于D2(表2)。所有处理中,D1C2处理更有利于干物质向籽粒分配。

2.3.2 冬小麦花前花后干物质转运

螯合钛喷施时期、浓度及其互作对小麦干物质花前转运量、花后积累量及其对籽粒产量贡献率的影响均达显著水平($P < 0.01$)(表3)。在同一喷施时期,与C0相比,C1、C2、C3的花前干物质转运量、花前干物质转运效率均有所提升;花后干物质积累量随喷施浓度的提高总体上呈先增后减的趋势,其中C2为最高,两年分别在D1条件下显著增加44.08%和18.99%,D2下增加38.10%和34.43%。相同喷施浓度下,D1的花前干物质平均转运量和转运效率略高于D2,但花后干物质平均积累量2023—2024年D1略高于D2,2024—2025年D1略低于D2,花后干物质积累对籽粒产量的平均贡献率D2略高于D1。

2.4 螯合钛喷施时期和浓度对晚播冬小麦籽粒灌浆的影响

采用Logistic方程拟合小麦花后5~35 d籽粒灌浆过程, R^2 均高于0.99;其中,理论最大千粒重与实际千粒重两年变化趋势一致(表4)。在同一喷施时期,与C0相比,喷施螯合钛均延长灌浆总天数,总整体上表现为 $C2 > C3 > C1 > C0$,而最大灌浆速率和快速增长期持续时间整体上均以随喷施浓度的提高均呈先升后降的趋势,多数情况以C2下最大,在D1下2023—2024年分别增加5.22%、2.08%,2024—2025年分别增加0.69%、4.21%;D2下2023—2024年分别增加6.90%、1.37%,2024—2025年分别增加0.34%、5.04%。相同喷施浓度下,喷施螯合钛后,两年灌浆总天数在D1条件下分别延长0.37~0.81和0.28~1.02 d,D2下分别延长0.18~0.46和0.91~1.38 d,D2的最大灌浆速率和快速增长期持续时间略高于D1,但D1最大灌浆速率出现时间整体上略晚于D2。

2.5 螯合钛喷施时期和浓度对晚播冬小麦产量及其构成因素的影响

喷施时期和浓度及两因素互作均对穗粒数影响达到极显著水平(表5)。在同一喷施时期,与C0相比,螯合钛喷施后小麦的穗粒数、千粒重及产量均有提高,其中C2最高;相同喷施浓度下,D1的穗粒数显著提升,D2的千粒重显著提升,且D1的产量略高于D2。在所有处理中D1C2的产量高于同年其他处理,较D1C0处理两年分别增产5.06%和9.45%。

表 2 不同处理下晚播冬小麦成熟期干物质分配特点

Table 2 Dry matter allocation at maturity stage of late-sown winter wheat under different treatments

年份 Year	处理 Treatment	籽粒 Grain		穗轴+颖壳 Spike axis+glume		叶 Leaf		茎+叶鞘 Stem + leaf sheath	
		分配量 Allocation amount/g	占比 Ratio	分配量 Allocation amount/g	占比 Ratio	分配量 Allocation amount/g	占比 Ratio	分配量 Allocation amount/g	占比 Ratio
2023—	D1C0	1.49e	0.45	0.54a	0.17	0.14d	0.04	1.11d	0.34
2024	D1C1	1.89b	0.56	0.21f	0.06	0.15c	0.04	1.12d	0.33
	D1C2	2.02a	0.56	0.18f	0.05	0.16a	0.04	1.26a	0.35
	D1C3	1.77c	0.51	0.41c	0.12	0.15b	0.04	1.18c	0.34
	D2C0	1.48e	0.46	0.50b	0.16	0.14d	0.04	1.11d	0.34
	D2C1	1.67d	0.50	0.42c	0.12	0.14d	0.04	1.12d	0.33
	D2C2	1.90b	0.53	0.30e	0.08	0.15a	0.04	1.24b	0.35
	D2C3	1.76c	0.51	0.35d	0.10	0.14c	0.04	1.19c	0.34
2024—	D1C0	1.60g	0.44	0.56b	0.15	0.29e	0.08	1.17cd	0.32
2025	D1C1	1.81d	0.49	0.38e	0.10	0.29d	0.08	1.17cd	0.32
	D1C2	1.91b	0.49	0.45d	0.11	0.33a	0.08	1.23a	0.31
	D1C3	1.66f	0.44	0.62a	0.16	0.30c	0.08	1.20b	0.32
	D2C0	1.60g	0.45	0.55bc	0.15	0.28e	0.08	1.15e	0.32
	D2C1	1.74e	0.46	0.58ab	0.15	0.29e	0.08	1.16de	0.31
	D2C2	1.96a	0.49	0.50cd	0.13	0.31b	0.08	1.23a	0.31
	D2C3	1.85c	0.47	0.60ab	0.15	0.29d	0.07	1.21b	0.31

同列数据后不同小写字母表示同喷施时期内不同浓度之间差异显著($P<0.05$)。下表同。

Different letters indicate significant differences among different concentration levels within the same application stages at 0.05 level.

The same in tables 3 and 5.

表 3 不同处理下晚播冬小麦单株花前花后干物质转运特点

Table 3 Characteristics of dry matter transport before and after anthesis of late-sown winter wheat under different treatments

年份 Year	处理 Treatment	花前干物质 Dry matter before anthesis			花后干物质 Dry matter after anthesis	
		转运量 Transfer amount/g	转运效率 Transfer rate	贡献率 Contribution rate	积累量 Accumulation/g	贡献率 Contribution rate
2023—	D1C0	0.70e	0.36cd	0.47b	0.78e	0.53d
2024	D1C1	0.81c	0.39a	0.43de	1.08b	0.57ab
	D1C2	0.90a	0.39a	0.44cd	1.13a	0.56bc
	D1C3	0.87b	0.40a	0.50a	0.90d	0.51e
	D2C0	0.70e	0.36d	0.47b	0.78e	0.53d
	D2C1	0.75d	0.37b	0.45c	0.92d	0.55c
	D2C2	0.81c	0.37bc	0.43e	1.08b	0.57a
	D2C3	0.75d	0.36cd	0.43e	1.01c	0.57a
2024—	D1C0	0.64d	0.31f	0.40c	0.96d	0.60c
2025	D1C1	0.69b	0.32cd	0.38d	1.13b	0.62b
	D1C2	0.77a	0.33ab	0.40bc	1.14b	0.60cd
	D1C3	0.76a	0.34a	0.46a	0.90e	0.54e
	D2C0	0.67c	0.32de	0.42b	0.93d	0.58d
	D2C1	0.71b	0.33bc	0.41bc	1.03c	0.59cd
	D2C2	0.70b	0.31e	0.36e	1.26a	0.64a
	D2C3	0.70b	0.32de	0.38d	1.14b	0.62b
F 值	D	10.82**	1.98 ^{ns}	6.29*	2.45*	6.29*
F value	C	14.83**	1.27 ^{ns}	3.94*	40.74**	3.94*
	D×C	3.29*	0.83 ^{ns}	7.63**	12.46**	7.63**

D:时期;C:钛浓度;*: $P<0.05$; **: $P<0.01$;ns: $P>0.05$ 。下表同。

D: Stage; C: Titanium concentration; *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ns: $P > 0.05$. The same in tables 5.

表 4 不同处理下晚播冬小麦籽粒灌浆参数

Table 4 Grain filling related parameters of late-sown winter wheat under different treatments

年份 Year	处理 Treatment	拟合方程 Equation	t_m /d	Δt /d	T /d	$V_m/$ ($g \cdot d^{-1}$)	R^2
2023—	D1C0	$y=51.553\ 3/(1+e^{(3.7611-0.178302t)})$	21.09	14.77	33.20	2.30	0.99
2024	D1C1	$y=53.478\ 5/(1+e^{(3.6778-0.175679t)})$	20.93	14.99	33.57	2.35	0.99
	D1C2	$y=55.653\ 3/(1+e^{(3.6683-0.173946t)})$	21.09	15.14	33.89	2.42	0.99
	D1C3	$y=54.999\ 3/(1+e^{(3.6543-0.173225t)})$	21.10	15.21	34.01	2.38	0.99
	D2C0	$y=52.727\ 4/(1+e^{(3.7534-0.175661t)})$	21.37	14.99	33.69	2.32	0.99
	D2C1	$y=56.192\ 6/(1+e^{(3.6877-0.174204t)})$	21.17	15.12	33.87	2.45	0.99
	D2C2	$y=57.538\ 1/(1+e^{(3.6535-0.172475t)})$	21.18	15.27	34.15	2.48	0.99
	D2C3	$y=56.821\ 2/(1+e^{(3.6809-0.173560t)})$	21.21	15.18	33.98	2.47	0.99
2024—	D1C0	$y=55.435\ 5/(1+e^{(3.3382-0.209163t)})$	15.96	12.59	27.73	2.90	0.99
2025	D1C1	$y=56.555\ 2/(1+e^{(3.3167-0.206829t)})$	16.04	12.73	28.01	2.92	0.99
	D1C2	$y=58.121\ 5/(1+e^{(3.2486-0.200782t)})$	16.18	13.12	28.75	2.92	0.99
	D1C3	$y=56.718\ 0/(1+e^{(3.3052-0.206367t)})$	16.02	12.76	28.06	2.93	0.99
	D2C0	$y=55.033\ 0/(1+e^{(3.3680-0.212147t)})$	15.88	12.42	27.38	2.92	0.99
	D2C1	$y=57.464\ 3/(1+e^{(3.2837-0.203744t)})$	16.12	12.93	28.39	2.93	0.99
	D2C2	$y=58.364\ 8/(1+e^{(3.2447-0.200713t)})$	16.17	13.12	28.76	2.93	0.99
	D2C3	$y=57.461\ 0/(1+e^{(3.2811-0.204406t)})$	16.05	12.89	28.29	2.94	0.99

t_m : 最大灌浆速率出现时间; Δt : 快速增长期持续时间; V_m : 最大灌浆速率; T : 灌浆总天数。
 t_m : Time of maximum grain-filling rate; Δt : Duration of rapid growth period; V_m : Maximum grain-filling rate; T : Duration of total grain-filling stage.

表 5 不同处理下晚播冬小麦产量及其构成

Table 5 Yield and its components of late-sown winter wheat under different treatments

年份 Year	处理 Treatment	穗数 Spike number/($\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)	穗粒数 Grains per spike	千粒重 1 000-grain weight/g	产量 Yield/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
2023—	D1C0	746.39±7.52a	38.53±0.31d	40.11±0.71cd	8 298.71±79.06de
2024	D1C1	732.50±6.51b	39.67±0.50bc	41.03±0.63abc	8 450.93±88.02bcd
	D1C2	746.39±8.83a	41.67±0.31a	41.21±0.21ab	8 718.32±96.01a
	D1C3	755.00±12.33a	40.27±0.42b	41.15±0.67ab	8 623.13±190.55ab
	D2C0	751.67±5.20a	38.80±0.53d	38.97±0.60e	8 214.62±55.27e
	D2C1	744.44±3.76ab	36.40±0.60e	39.71±0.63de	8 287.43±105.77bde
	D2C2	748.33±8.21a	37.00±0.40e	41.33±0.47a	8 596.60±81.90abc
	D2C3	746.39±3.85a	38.93±0.70cd	40.27±0.57bcd	8 412.57±114.97cd
2024—	D1C0	561.04±8.03abc	37.35±0.57c	46.66±0.68b	6 571.16±121.71e
2025	D1C1	569.17±5.40a	39.00±0.71b	47.57±0.58ab	6 606.28±108.08de
	D1C2	554.38±9.21c	40.95±0.66a	47.77±0.60a	7 191.89±98.00a
	D1C3	556.67±6.45bc	39.30±0.76b	47.82±0.50a	6 853.00±121.56bc
	D2C0	558.92±8.95abc	37.30±0.53c	45.30±0.79c	6 569.91±143.66e
	D2C1	566.25±8.28ab	37.15±0.30c	46.55±0.033b	6 738.18±63.57cd
	D2C2	558.96±4.23abc	37.45±0.72c	47.78±0.95a	6 933.91±99.01b
	D2C3	555.58±7.80bc	38.00±0.59c	46.55±0.43b	6 873.01±74.82bc
F 值	D	0.001 ^{ns}	97.84 ^{**}	0.84 ^{ns}	0.105 ^{ns}
F value	C	0.002 ^{ns}	12.56 ^{**}	0.61 ^{ns}	0.694 ^{ns}
	D×C	0.005 ^{ns}	19.89 ^{**}	0.10 ^{ns}	0.034 ^{ns}

3 讨论

3.1 螯合钛对晚播冬小麦农艺性状的影响

晚播会降低小麦株高、茎粗及穗长^[15-17],而外源植物生长调节剂(如二氢赤霉素、乙矮合剂、褪黑素等)在小麦生育前期喷施能促进生长,改善农艺性状^[18-20]。研究发现,在水分亏缺或盐胁迫下叶面喷施适当浓度的 TiO_2 均显著改善小麦农艺性状^[22-23]。本研究结果也表明,叶面喷施螯合钛可显著增加晚播冬小麦株高、茎粗及穗长,其中孕穗期喷施 $501 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 螯合钛效果最佳,可促进干物质向籽粒分配,并提高穗粒数和千粒重,而在开花期喷施螯合钛时,因小麦已基本完成形态建成,各农艺性状无显著改善。

3.2 螯合钛对晚播冬小麦干物质的影响

晚播小麦的干物质积累显著减少,并在灌浆期易遇高温胁迫,从而影响产量形成。外源植物生长调节剂对小麦干物质积累、分配及转运有显著调节作用^[24-25]。例如,抽穗期、开花期叶面喷施 L-谷氨酸可显著促进干物质积累及其向穗部的分配^[26];逆境胁迫下喷施水杨酸和褪黑素亦可提高小麦抗逆性,有利于地上部干物质积累^[27-28];开花期喷施海藻糖有利于缓解小麦灌浆期高温胁迫对干物质积累的不利影响^[27]。本研究中,喷施螯合钛显著促进晚播冬小麦干物质积累和转运,有利于干物质向穗部分配,其中孕穗期喷施 $501 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 螯合钛后成熟期干物质积累量两年分别提高 25.57% 和 14.20%,并促进干物质向籽粒的分配,能够协调花前转运和花后物质积累的关系,为晚播冬小麦增产奠定物质基础。

3.3 螯合钛对晚播冬小麦灌浆速率的影响

叶面喷施植物生长调节剂或养分能缓解小麦灌浆期胁迫效应。在灌浆期高温胁迫下,喷施磷酸二氢钾可提高小麦籽粒灌浆速率,促进籽粒干物质积累,进而增加籽粒产量^[29]。孕穗期和开花期是影响小麦幼穗分化、穗粒数和粒重的关键时期^[30-31]。孕穗期喷施 6-BA 可显著提高小麦籽粒灌浆能力,从而减轻高温等环境胁迫对产量形成的影响^[14]。开花期喷施海藻糖可缓解小麦灌浆期遇高温胁迫所导致粒重降低等问题^[32]。本研究发现,在孕穗期和开花期分别喷施浓度为 $501 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 螯合钛均可提升小麦籽粒灌浆速率和延长灌浆天数,其中开花期喷施效果较优,这与开花期喷施螯合钛直接作用于籽粒形成有关。

3.4 螯合钛对晚播冬小麦产量及产量构成因素的影响

植物生长调节剂能促进小麦植株生长发育,提高产量^[25]。研究发现,喷施褐藻寡糖与植物黄金的混合物后,盐碱地小麦穗粒数和粒重显著增加^[33]。孕穗期喷施 6-BA 显著提高小麦产量,其原因主要是穗粒数和千粒重增加^[14,34]。开花期喷施褪黑素能够提升水分胁迫下小麦生产能力,增加穗粒数^[35]。这些效应在大麦等作物上也有发现^[11,36]。本研究结果也显示,喷施螯合钛可提高晚播冬小麦籽粒产量,其中孕穗期喷施 $501 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 螯合钛后小麦产量两年均最高,较对照分别增产 5.06% 和 9.45%。

4 结论

本试验条件下,孕穗期喷施 $501 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 螯合钛对晚播冬小麦效果最佳,能显著促进干物质积累及花前干物质转运,增强灌浆能力,增加穗粒数和千粒重,从而实现增产。

参考文献:

- [1]何中虎,庄巧生,程顺和,等.中国小麦产业发展与科技进步[J].农学学报,2018,8(1):107.
He Z H, Zhuang Q S, Cheng S H, et al. Wheat production and technology improvement in China [J]. *Journal of Agriculture*, 2018, 8(1):107.
- [2]Li X F, Zhao Y H, Ding B H, et al. Expanding border space improve both yield and stability in a high-density drip-irrigated spring wheat system in Xinjiang, China [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2025, 16:1655063.
- [3]Tsimba R, Edmeades G O, Millner J P, et al. The effect of planting date on maize grain yields and yield components [J]. *Field Crops Research*, 2013, 150:135.
- [4]赵广才.中国小麦种植区划研究[J].麦类作物学报,2010,30(6):1140.
Zhao G C. Research on wheat planting regionalization in China (II) [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2010, 30(6):1140.
- [5]李振恺,李洋,董世德,等.夏季覆盖种植对黄河三角洲盐碱耕地冬小麦耗水特性的影响[J].应用生态学报,2025,36(7):2064.
Li Z K, Li Y, Dong S D, et al. Effects of summer cover cropping on water consumption characteristics of winter wheat in saline-alkali land of Yellow River Delta [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2025, 36(7):2064.
- [6]刘青姗,刘娜,邵立威,等.气候变化背景下有限供水冬小麦的适宜播期研究[J].中国生态农业学报(中英文),2025,33(4):694.
Liu Q S, Liu N, Shao L W, et al. A study on the suitable sowing date of winter wheat with limited water supply under the

- background of climate change [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2025, 33(4): 694.
- [7] 赵花荣, 周广胜, 齐月, 等. 播期调整对华北北部冬小麦、夏玉米产量和品质的影响[J]. 中国农业科学, 2024, 57(15): 2964. Zhao H R, Zhou G S, Qi Y, *et al.* Effects of sowing date adjustment on yield and quality of winter wheat and summer maize in northern area of North China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2024, 57(15): 2964.
- [8] 张东旭, 胡丹珠, 闫金龙, 等. 放线菌剂使用方法对晚播冬小麦生长及光合性状的影响[J]. 麦类作物学报, 2023, 43(11): 1457. Zhang D X, Hu D Z, Yan J L, *et al.* Effects of different application methods of actinomycetes on growth and photosynthetic characteristics of late-sown winter wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2023, 43(11): 1457.
- [9] Lyu S H, Wei X Y, Chen J J, *et al.* Titanium as a beneficial element for crop production [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8: 597.
- [10] Šebesta M, Kolenčík M, Sunil B R, *et al.* Field application of ZnO and TiO₂ nanoparticles on agricultural plants [J]. *Agronomy*, 2021, 11(11): 2281.
- [11] Satti S H, Raja N I, Ikram M, *et al.* Plant-based titanium dioxide nanoparticles trigger biochemical and proteome modifications in *Triticum aestivum* L. under biotic stress of *Puccinia striiformis* [J]. *Molecules*, 2022, 27(13): 4274.
- [12] Carbajalvázquez V H, Gómezmerino F C, Alcántar-González E G, *et al.* Titanium increases the antioxidant activity and macronutrient concentration in tomato seedlings exposed to salinity in hydroponics [J]. *Plants*, 2022, 11(8): 1036.
- [13] Imtiaz M, Kamran M, Arshad A, *et al.* Effect of exogenous application of titanium dioxide nanoparticles on growth, yield, and yield components of wheat (*Triticum aestivum* L.) under drought stress conditions [J]. *Planta Animalia*, 2025, 4(5): 217.
- [14] 栾佳萌, 欧星雨, 姜悦和, 等. 外源 6-BA 缓解孕穗期低温胁迫对小麦光合性能、灌浆特性和产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2025, 31(5): 845. Luan J M, Ou X Y, Jiang Y H, *et al.* Effects of exogenous 6-BA on alleviating the impacts of low-temperature stress during booting stage on photosynthetic performance, grain-filling characteristics, and yield of wheat [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2025, 31(5): 845.
- [15] 柳明阳, 张敏, 王文政, 等. 晚播对强筋小麦籽粒产量和品质的影响[J]. 麦类作物学报, 2025, 45(1): 89. Liu M Y, Zhang M, Wang W Z, *et al.* Effects of late sowing on grain yield and quality of strong gluten wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2025, 45(1): 89.
- [16] 田文强, 张强斌, 张君, 等. 播期和播量对超晚播冬小麦基部节间显微结构及抗倒伏指数的影响[J]. 核农学报, 2025, 39(2): 377. Tian W Q, Zhang Q B, Zhang J, *et al.* Effects of sowing date and rate on the basal internode microstructure and lodging resistance index in ultra-Late sown wheat [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2025, 39(2): 377.
- [17] 吕丽华, 吴立勇, 李谦, 等. 播期对小麦产量形成及株型结构的影响[J]. 华北农学报, 2024, 39(S1): 53. Lü L H, Wu L Y, Li Q, *et al.* Effect of sowing date on yield formation and plant type structure of wheat [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2024, 39(S1): 53.
- [18] 闫秋艳, 鲁晋秀, 赵政萍, 等. 生长调节剂对黑小麦茎秆性状及其籽粒产量和品质的影响[J]. 麦类作物学报, 2020, 40(9): 1082. Yan Q Y, Lu J X, Zhao Z P, *et al.* Effect of growth regulator on stem characters, grain yield and quality of black-grained wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2020, 40(9): 1082.
- [19] 刘雨杭, 赵书宏, 祝婷婷, 等. 二氢赤霉素对不同种植密度下小麦抗倒伏能力及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2024, 44(12): 1606. Liu Y H, Zhao S H, Zhu T T, *et al.* Effects of 16, 17-dihydro gibberellin A5 on lodging resistance and yield of wheat under different planting densities [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2024, 44(12): 1606.
- [20] 孙通, 杨玉双, 马瑞琦, 等. 聚糖萜合剂和乙萜合剂对小麦抗倒伏能力、产量与品质的影响[J]. 作物杂志, 2024(2): 113. Sun T, Yang Y S, Ma R Q, *et al.* Effects of PASP-KT-NAA and ethylene-chlormequat-potassium on the lodging resistance, yield, and quality of wheat [J]. *Crops*, 2024(2): 113.
- [21] 苗含笑, 李东晓, 王久红, 等. 褪黑素对干旱胁迫下小麦生长发育和产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(5): 161. Miao H X, Li D X, Wang J H, *et al.* Effects of melatonin on the growth and yield of wheat under drought condition [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2020, 38(5): 161.
- [22] Jaberzadeh A, Moaveni P, Tohidi Moghadam H R, *et al.* Influence of bulk and nanoparticles titanium foliar application on some agronomic traits, seed gluten and starch contents of wheat subjected to water deficit stress [J]. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 2013, 41(1): 201.
- [23] Mustafa N, Raja N I, Ilyas N, *et al.* Foliar applications of plant-based titanium dioxide nanoparticles to improve agronomic and physiological attributes of wheat (*Triticum aestivum* L.) plants under salinity stress [J]. *Green Processing and Synthesis*, 2021, 10(1): 246.
- [24] 马尚宇, 王艳艳, 刘雅男, 等. 播期、播量和施氮量对小麦干物质积累、转运和分配及产量的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(3): 375. Ma S Y, Wang Y Y, Liu Y N, *et al.* Effect of sowing date, planting density, and nitrogen application on dry matter accumulation, transfer, distribution, and yield of wheat [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(3): 375.
- [25] 李宇星, 马亮亮, 张月, 等. 外源海藻糖对灌浆期高温胁迫下小麦旗叶生理特性和产量的影响[J]. 作物学报, 2023, 49(8): 2210. Li Y X, Ma L L, Zhang Y, *et al.* Effects of exogenous treha-

- lose on physiological characteristics and yield of wheat flag leaves under high temperature stress at grain filling stage [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2023, 49(8): 2210.
- [26] 李刚, 李超, 王焱栋, 等. 外源 L-谷氨酸对花后干旱胁迫下小麦干物质积累分配、籽粒灌浆特性及品质形成的调控效应 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2024, 30(5): 848.
- Li G, Li C, Wang Y D, *et al.* Effects of exogenous L-glutamic acid on dry matter accumulation distribution, grain filling characteristics and quality formation under post-anthesis drought stress in wheat [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2024, 30(5): 848.
- [27] 李春雨, 陈春宇, 毛浩田, 等. 干旱胁迫下外源褪黑素对小麦生长和光系统活性的影响 [J]. *麦类作物学报*, 2022, 42(7): 846.
- Li C Y, Chen C Y, Mao H T, *et al.* Effect of exogenous melatonin on the growth and photosystem activity of wheat under drought stress [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2022, 42(7): 846.
- [28] 宋佳敏, 何佳伟, 蒋伟勤, 等. 喷施水杨酸和褪黑素对药隔期低温胁迫下小麦产量及生理特性的影响 [J]. *江苏农业学报*, 2025, 41(3): 477.
- Song J M, He J W, Jiang W Q, *et al.* Effects of salicylic acid and melatonin on yield and physiological characteristics of wheat under low temperature stress at anther connective stage [J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2025, 41(3): 477.
- [29] 王思齐, 李昕悦, 陈润, 等. 喷施 KH_2PO_4 缓解小麦灌浆期高温胁迫对粒重形成抑制的作用机理 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2025, 31(5): 861.
- Wang S Q, Li X Y, Chen R, *et al.* Mechanism of KH_2PO_4 foliar application in alleviating the heat stress-induced inhibition of grain weight formation during the grain-filling stage of wheat [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2025, 31(5): 861.
- [30] Wu W, Wang Y, Wang L, *et al.* Booting stage is the key timing for split nitrogen application in improving grain yield and quality of wheat—a global meta-analysis [J]. *Field Crops Research*, 2022, 287: 108665.
- [31] Ullah A, Nadeem F, Nawaz A, *et al.* Heat stress effects on the reproductive physiology and yield of wheat [J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2022, 208(1): 1.
- [32] 崔国际, 王传伟, 贺威, 等. 外源海藻糖对灌浆期高温胁迫下小麦灌浆特性和糖组分含量的影响 [J]. *应用生态学报*, 2023, 34(11): 3021.
- Cui G J, Wang C W, He W, *et al.* Effects of exogenous trehalose on filling characteristics and sugar component content of wheat under high temperature stress during the filling period [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(11): 3021.
- [33] 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.
- [34] 周庭锐, 赵梦婷, 杨丽, 等. 外源 6-BA 对孕穗期低温胁迫后小麦旗叶生理、产量及品质的影响 [J]. *应用生态学报*, 2024, 35(6): 1573.
- Zhou Q R, Zhao M T, Yang L, *et al.* Effects of exogenous 6-BA on flag leaf physiology, yield, and quality of wheat after low temperature stress at booting stage [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(6): 1573.
- [35] 王璐媛, 刘淋茹, 袁鑫茹, 等. 干旱胁迫条件下外源褪黑素提高小麦穗花发育和穗粒数的机理 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2024, 30(8): 1477.
- Wang L Y, Liu L R, Yuan X R, *et al.* Mechanism of exogenous melatonin improving the development of spike and floret and grain numbers per spike in wheat under drought stress [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2024, 30(8): 1477.
- [36] Janmohammadi M, Amanzadeh T, Sabaghnia N, *et al.* Impact of foliar application of nano micronutrient fertilizers and titanium dioxide nanoparticles on the growth and yield components of barley under supplemental irrigation [J]. *Acta Agriculturae Slovenica*, 2016, 107(2): 265.