

DOI:10.16861/j.cnki.zggc.2025.0594

## 4种芸薹素内酯药剂产品对大白菜不同生长阶段持效期及农艺性状的影响

解紫薇<sup>1</sup>, 施春兰<sup>1</sup>, 杨德伟<sup>1</sup>, 王仕青<sup>2</sup>, 姜治国<sup>2</sup>, 吴国星<sup>1</sup>

(1. 云南农业大学植物保护学院 昆明 650201; 2. 国家芸薹素内酯类产品技术研究推广中心 昆明 650214)

**摘要:** 探究4种芸薹素内酯药剂产品对大白菜不同生长阶段的持效期及其对大白菜农艺和品质性状的影响。以83-1大白菜为研究对象,于幼苗期、莲座期叶面分别喷施4种产品,对照(CK)喷施等量清水,以大白菜两个时期(2024年,2025年)鲜质量增加率为指标,评估4种药剂的持效期,并在30d后测定大白菜的农艺和品质性状。结果表明,4种药剂的持效期存在差异,0.004%丙酰芸薹素内酯可溶液剂、0.004% 28-表高芸薹素内酯水剂、0.001 6% 28-表高芸薹素内酯水剂和0.01% 24-表芸薹素内酯可溶液剂在大白菜幼苗期的持效期分别为15、11、10和9d,莲座期持效期分别为14、10、6和5d。在施药30d后,4种芸薹素内酯药剂均能改良大白菜的农艺性状。其中,2024年0.004%丙酰芸薹素内酯可溶液剂的增产效果优于0.004% 28-表高芸薹素内酯水剂,2025年0.001 6% 28-表高芸薹素内酯水剂优于0.01% 24-表芸薹素内酯可溶液剂。同时,4种芸薹素内酯药剂处理的大白菜可溶性蛋白、游离氨基酸、可溶性糖及维生素C含量较CK均有所提高,品质性状得到改善。其中,0.004% 28-表高芸薹素内酯水剂提升效果优于0.004%丙酰芸薹素内酯可溶液剂,0.001 6% 28-表高芸薹素内酯水剂处理效果优于0.01% 24-表芸薹素内酯可溶液剂。此外,4种药剂在大白菜莲座期施用的提升效果优于幼苗期。综上,4种药剂均能促进大白菜生长和品质提升,且莲座期施用的效果优于幼苗期。其中,0.001 6% 28-表高芸薹素内酯水剂对农艺性状指标的提升和产量增长效果最佳;0.004% 28-表高芸薹素内酯水剂和0.001 6% 28-表高芸薹素内酯水剂对提升大白菜品质效果最优,可在生产中推广应用。

**关键词:** 大白菜;芸薹素内酯药剂;持效期;农艺性状;品质性状

中图分类号:S634.1

文献标志码:A

文章编号:1673-2871(2026)03-044-11

## Effects of four brassinolide formulation products on persistence periods and agronomic traits of Chinese cabbage at different growth stages

XIE Ziwei<sup>1</sup>, SHI Chunlan<sup>1</sup>, YANG Dewei<sup>1</sup>, WANG Shiqing<sup>2</sup>, JIANG Zhiguo<sup>2</sup>, WU Guoxing<sup>1</sup>

(1. College of Plant Protection, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, Yunnan, China; 2. National Brassinolide Products Technology Research and Promotion Center, Kunming 650214, Yunnan, China)

**Abstract:** A study was conducted to investigate the persistence periods of four brassinolide pesticide products at different growth stages of Chinese cabbage, as well as their effects on the agronomic and quality traits of the crop. Taking Chinese cabbage cultivar 83-1 as the test material, foliar spraying of the four products was carried out at the seedling stage and rosette stage of Chinese cabbage, respectively, with the control (CK) sprayed with an equal volume of clear water. The increment of living matter at the two growth stages was used as the indicator to evaluate the persistence periods of the four pesticides. In addition, the agronomic and quality traits of Chinese cabbage were determined 30 days after spraying. The results showed that there were differences in the persistence periods of the four agents. At the seedling stage of Chinese cabbage, the persistence periods of 0.004% propionyl brassinolide soluble concentrate, 0.004% 28-epihomobrassinolide aqueous solution, 0.001 6% 28-epihomobrassinolide aqueous solution and 0.01% 24-epibrassinolide soluble concentrate were 15, 11, 10 and 9 days, respectively; while at the rosette stage, their persistence periods were 14, 10, 6 and 5 days, respectively. In addition, 30 days after application, all four brassinolide agents could improve the agronomic traits of Chinese cabbage. Among them, the yield-increasing effect of 0.004% propionyl brassinolide soluble concentrate

收稿日期:2025-08-18;修回日期:2025-11-04

基金项目:云南省中青年学术和技术带头人后备人才项目(202105AC160037)

作者简介:解紫薇,女,在读硕士研究生,研究方向为生物农药开发与利用。E-mail:15368532538@163.com

通信作者:吴国星,男,教授,主要从事农业有害生物综合治理研究工作。E-mail:wugx1@163.com

was superior to that of 0.004% 28-epihomobrassinolide aqueous solution, and the effect of 0.001 6% 28-epihomobrassinolide aqueous solution was superior to that of 0.01% 24-epibrassinolide soluble concentrate. Meanwhile, compared with the CK, the content of soluble protein, free amino acids, soluble sugar and vitamin C in Chinese cabbage treated with the four brassinolide agents were all increased, and the quality traits were improved. Among these agents, in 2024, the enhancement effect of 0.004% 28-epihomobrassinolide aqueous solution was superior to that of 0.004% propionyl brassinolide soluble concentrate, in 2025, the effect of 0.001 6% 28-epihomobrassinolide aqueous solution was superior to that of 0.01% 24-epibrassinolide soluble concentrate. In addition, the enhancement effects of the four agents applied at the rosette stage of Chinese cabbage were better than those applied at the seedling stage. In conclusion, all the four agents could promote the growth and quality improvement of Chinese cabbage, with the application effect at the rosette stage being superior to that at the seedling stage. Among them, 0.001 6% 28-epihomobrassinolide aqueous solution exhibited the best performance in improving agronomic trait indices and increasing yield; both 0.004% 28-epihomobrassinolide aqueous solution and 0.001 6% 28-epihomobrassinolide aqueous solution showed the optimal effects in enhancing Chinese cabbage quality, and thus could be popularized and applied in production.

**Key words:** Chinese cabbage; Brassinolide formulations; Persistence period; Agronomic trait; Quality trait

大白菜为十字花科芸薹属植物,因其营养丰富、口感鲜美而备受青睐。随着人们生活水平的提高和健康饮食观念的普及,消费者对大白菜品质、口感、安全性等方面的要求越来越严格。绿色种植成为大白菜种植的重要发展方向,能最大程度地提高产量和营养品质,直接关系到农业的可持续发展。因此,越来越多的植物生长调节剂应用到大白菜的生产中。其中,芸薹素内酯(brassinolide,简称BR)是一种广谱高效的绿色植物生长调节剂,在促进植物生长、提高植物抗逆及抗病能力、改善植物品质等方面展现出了显著效果<sup>[1]</sup>。芸薹素内酯作为新型植物内源激素,与传统的植物激素(生长素、细胞分裂素、乙烯、赤霉素和脱落酸)处于同一地位,因其用量最小而效果好,于1998年被正式确认为第六大类植物内源激素<sup>[2]</sup>。其中,生物活性较高且具有实用价值的常见芸薹素内酯有28-高芸薹素内酯、28-表高芸薹素内酯、24-表芸薹素内酯和24-混表芸薹素内酯<sup>[3]</sup>。目前,国内登记生产芸薹素内酯原药的企业有8家,生产芸薹素药剂的企业有31家,共登记产品37个,芸薹素内酯和其他生长调节剂的复配药剂共登记8个,在20多种作物上得到登记<sup>[2]</sup>。

研究表明,芸薹素内酯生理活性广泛,不仅能促进植物生长和受精及果实膨大,还能增产提质、协调植物营养平衡和强力生根,也可以加快植物生长代谢及提高植物抗旱、抗寒、抗病和抗盐碱等抗逆能力,缓减药物迫害对农作物的影响,降低农药残留量<sup>[4-5]</sup>。农业生产证明芸薹素内酯适用于多种作物,对水稻、小麦、大豆、棉花和多种果蔬均表现出稳定的增产效果<sup>[2,6]</sup>。与传统的植物激素相比,芸薹素内酯适用于各种植物不同生长周期的任何阶段,可根据植物需求,作用于植物生长的各个生理

时期,有效促进农作物生产,提高农作物营养品质。苏正川等<sup>[1]</sup>研究表明,24-表芸薹素内酯和烯效唑复配使用对4个棉花品种的矮化、结铃数、单铃质量和籽棉产量具有增效作用。胡永波等<sup>[7]</sup>研究发现,叶面喷施芸薹素内酯能减轻黄瓜干旱胁迫,提高叶片超氧化物歧化酶(SOD)活性和脯氨酸含量,减少丙二醛积累,促进黄瓜幼苗生长和光合作用,增强其抗旱能力。李青超等<sup>[8]</sup>研究发现,0.003%丙酰芸薹素内酯水剂稀释2000倍液可增加水稻植株高度、节间长度、分蘖数和提高产量。郭巨先等<sup>[9]</sup>研究发现,喷施不同浓度的24-表芸薹素内酯会影响白菜的生长和品质。夏丽娟等<sup>[10]</sup>研究表明,丙酰芸薹素内酯可提高花生、辣椒、棉花生理功能相关基因的表达强度,增加产量,提高植物脂肪、蛋白质、维生素C含量等品质指标。此外,芸薹素内酯还可以减少农药残留量。廖灿<sup>[11]</sup>用稀释1000倍0.01% 28-高芸薹素内酯处理韭菜,韭菜中的溴氰菊酯残留量显著降低,稀释2000倍,丙溴磷残留量显著低于清水对照。

目前,由于普通芸薹素内酯持效期短,生产效率低下,因此对其进行结构改造,得到不同结构的持效期长的芸薹素内酯。例如,以28-表高芸薹素内酯和24-表芸薹素内酯作为原料,可经过简单的酯化反应得到长效性的芸薹素内酯<sup>[5]</sup>。其中丙酰基芸薹素内酯不仅具有普通芸薹素内酯的功能,且持效期长<sup>[12-13]</sup>。

尽管已有较多研究报道芸薹素内酯产品可改善作物的农艺性状和品质,但以往针对药剂在作物上的应用研究,多侧重于单一生长阶段或单一性状的影响,尚未有对多种长效、短效芸薹素内酯药剂产品在大白菜生产上的持效期及对多种性状的影响

响进行探究。鉴于此,笔者以大白菜为研究对象,将0.004%丙酰芸薹素内酯可溶液剂、0.004%28-表高芸薹素内酯水剂、0.001 6% 28-表高芸薹素内酯水剂和0.01% 24-表芸薹素内酯可溶液剂4种芸薹素药剂放在同一研究框架下进行试验,探究4种芸薹素内酯药剂在大白菜不同生长阶段中的持效期,并对大白菜12个主要农艺性状和4个品质性状进行评价,明确不同芸薹素药剂产品的差异,以期为筛选出适合大白菜不同生长阶段使用的药剂提供科学参考。这不仅是对药剂应用研究的一种补充和完善,更有助于推动大白菜种植中芸薹素药剂产品使用的精细化和高效化,具有重要的实际应用价值。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

供试大白菜品种为83-1,购自昆明市昆蔬种子有限责任公司。

4种供试芸薹素内酯药剂分别为0.004%丙酰芸薹素内酯可溶液剂、0.004% 28-表高芸薹素内酯水剂、0.001 6% 28-表高芸薹素内酯水剂和0.01% 24-表芸薹素内酯可溶液剂,下文中分别简称“B”“28a”“28b”和“24”。前3种药剂最适浓度( $\rho$ ,后同)均为 $0.013 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,最后一种为 $0.04 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,购自云南云大科技农化有限公司和兴农药业(中国)有限公司。

### 1.2 试验设计

试验分别于2024年8—10月和2025年5—7月在云南农业大学后山试验基地进行。供试大白菜种子经无菌水清洗、消毒后,使用育苗盘进行培育。待幼苗长至3~4片真叶时带土定植于云南农业大学后山试验基地,株行距均为30 cm。整个试验分两批完成,但方法保持完全一致。第一批试验(2024年8—10月)采用随机区组方法,划分为60个小区,设3个处理,分别为清水对照(CK)、0.004%丙酰芸薹素内酯可溶液剂(B)、0.004% 28-表高芸薹素内酯水剂(28a);每个处理20个小区,又将20个小区划分为5组(A~E),每组包含4个小区。对每个处理内的20个小区进行编号,然后对编号进行排序,按顺序依次将前4个编号归为A组,接下来4个归为B组,以此类推,直至完成5个组的划分。各组(A~E)在田间的空间分布不做刻意限制,完全遵循随机分配结果,以平衡田间微环境(如光照、土壤肥力)对同处理内不同组的潜在影响。第二批试验(2025年5—7月)采用上述相同操作方

法,设3个处理,分别为清水对照(CK)、0.001 6% 28-表高芸薹素内酯水剂(28b)、0.01% 24-表芸薹素内酯可溶液剂(24)。

供试大白菜整个生长期均不施用任何化学肥料和化学农药,采用人工除草、按需灌溉的基础栽培方式,在无外源化学物质干扰的条件下完成生长期培育,然后用于后续试验,以消除化肥、化学农药对试验结果的干扰。

### 1.3 4种芸薹素内酯药剂产品对大白菜持效期的影响

第一批试验:待移栽苗生长适应15 d后进行幼苗芸薹素内酯持效期试验。施药组分别喷施 $0.013 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的0.004%丙酰芸薹素内酯可溶液剂、0.004% 28-表高芸薹素内酯水剂,分别计为B-1、28a-1,对照组喷施等量清水,计为CK-1。在施药前取样1次,施药后每隔24 h,在施药组、清水对照组中各随机取10株长势一致的大白菜称质量(每次采样不重复使用同一植株,避免损伤植株影响后续数据),测定单株地上部分鲜质量,并计算当日鲜质量增加率,当鲜质量增加率与CK相同或持平,停止测定。以鲜质量增加率作为药剂效果,计算公式如下:鲜质量增加率/%=(当天大白菜鲜质量平均值-前一天大白菜鲜质量平均值)/前一天大白菜鲜质量平均值 $\times 100$ 。

待大白菜长至莲座期时,以上述操作方式进行莲座期芸薹素内酯持效期试验。处理分别对应计为B-2、28a-2、CK-2,同样计算鲜质量增加率作为药剂效果。

第二批试验:参照第一批的试验方法,以相同操作进行 $0.013 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的0.001 6% 28-表高芸薹素内酯水剂和 $0.04 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的0.01% 24-表芸薹素内酯可溶液剂的持效期试验。幼苗期处理分别计为28b-1、24-1、CK-1;莲座期处理分别记为28b-2、24-2、CK-2。

### 1.4 农艺性状测量

施药30 d后,参照邵贵荣等<sup>[14]</sup>和范伟强等<sup>[15]</sup>的方法进行农艺性状调查,统计的主要农艺性状有12个,包括株高、株幅、鲜质量、叶长、叶宽、叶柄长、叶柄宽、叶球质量、叶球纵径、叶球横径、根质量、根围。需特别说明,幼苗期大白菜尚未进入结球阶段,因此未对叶球质量、叶球纵径、叶球横径3项农艺性状进行测量,相关统计结果中以“-”标注。

### 1.5 品质性状测定

施药30 d后,以大白菜叶片组织为样本,分别

测定处理组大白菜的生理指标。采用苏州格锐思生物科技有限公司生产的试剂盒分别测定大白菜叶片中可溶性蛋白含量(考马斯亮蓝法,货号:G0417F)、游离氨基酸含量(茚三酮显色法,货号:G0415F)、可溶性糖含量(蒽酮比色法,货号:G0501F)和维生素C含量(红菲咯啉法,货号:G0201F)。

## 1.6 数据统计与分析

采用 Excel 2019、SPSS 26.0、Origin 2023 和 Graphpad Prism 2023 对试验数据进行处理分析和图表制作,采用 Duncan's 新复极差法检验不同处理间的差异显著性。

## 2 结果与分析

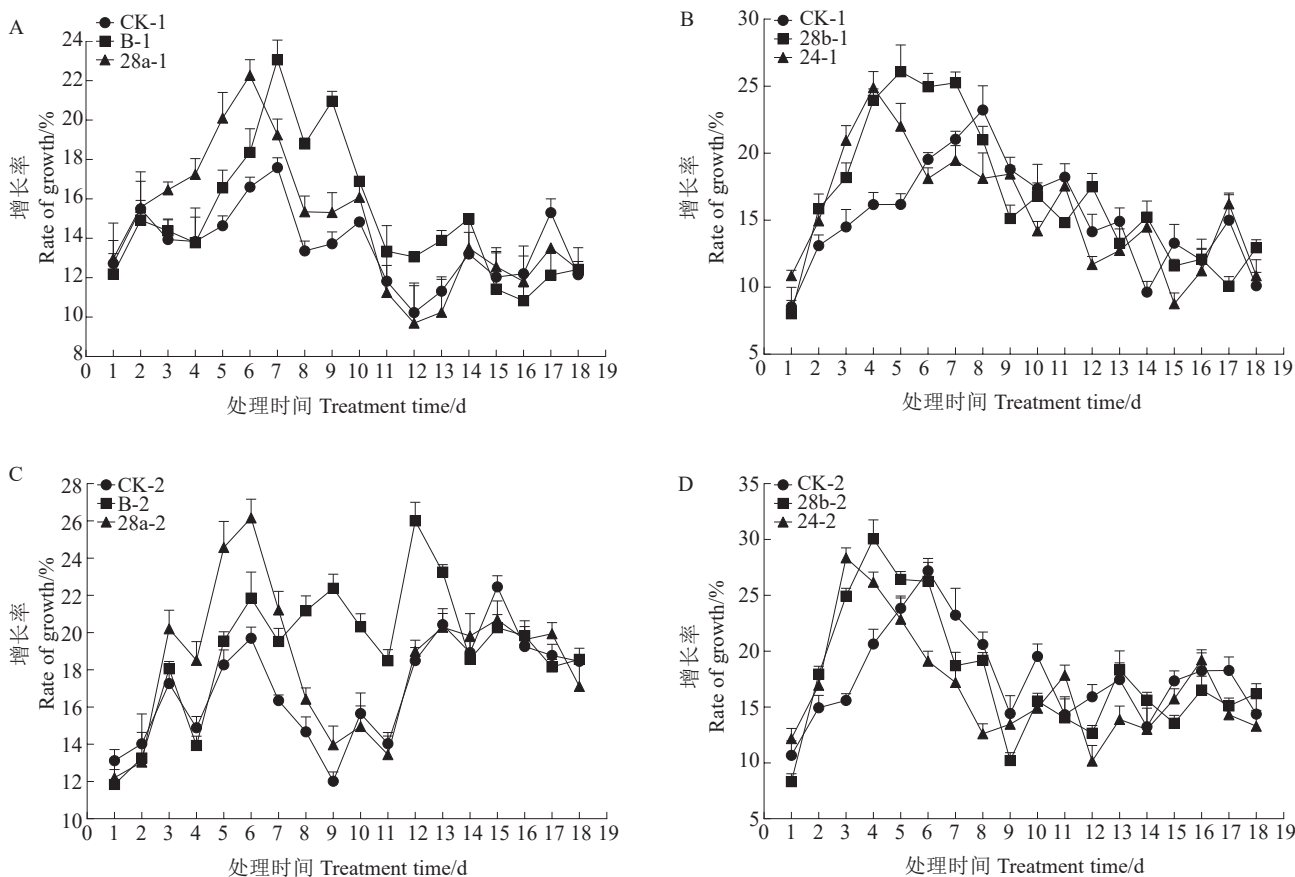
### 2.1 4种芸薹素药剂在大白菜不同生长期的持效期

将4种芸薹素内酯药剂处理过的大白菜与CK进行对比,计算各处理大白菜的鲜质量增长率,结果如图1所示。幼苗期大白菜的增长率如图1-A~B所示,B-1的最大增长率在第7天出现,为

23.06%,15 d后增长率与CK-1相持平,持效期结束;28a-1在第6天时达到最大增长率,为22.26%,然后开始下降,在11 d时增长率与CK-1持平;28b-1在第5天时达到最大增长率,为26.07%,然后开始下降,在10 d时增长率与CK-1持平;24-1的最大增长率在第4天出现,为24.89%,在9 d后增长率与CK-1相持平。

莲座期大白菜的增长率如图1-C~D所示,B-2在第12天时达到最大增长率,为26.00%,而28a-2则在第6天时达到最大增长率26.16%,两种处理分别在14、10 d与CK-2的增长率相持平;28b-2和24-2分别第4天和第3天达到最大增长率,分别为30.05%和29.35%,分别在6、5 d与CK-2的增长率相持平。

综合以上数据,“B”“28a”“28b”和“24”4种药剂产品对幼苗期大白菜的持效期分别为15、11、10和9 d,而对莲座期的持效期分别为14、10、6和5 d,表明4种药剂均对幼苗期的大白菜持效期更长。其中,“B”处理的持效期最长。



注:A和B表示幼苗期;C和D表示莲座期。

Note: A and B represent seedling stage; C and D represent rosette stage.

图1 4种芸薹素药剂对不同大白菜生长阶段的持效期

Fig. 1 Persistence periods of four brassinosteroid agents at different growth stages of Chinese cabbage

2.2 4种芸薹素药剂处理30 d后的农艺性状

由图2、图3、表1和表2可以看出,4种芸薹素内酯药剂对大白菜地下部分和地上部分的生长均有促进作用,生长势明显强于CK。

由表1可知,2024年第一批试验大白菜幼苗期经B-1、28a-1处理后的株高、株幅、鲜质量、叶长、叶宽、叶柄长、叶柄宽、根围均高于或等于(28a-1叶柄

宽)CK-1,但差异不显著,而根质量则显著高于CK-1。莲座期的大白菜经过处理后,B-2、28a-2的株高、株幅、鲜质量、叶长、叶宽、叶柄宽、叶球质量、叶球纵径、叶球横径、根质量和根围均高于CK-2,且鲜质量、叶球质量、叶球纵径均显著高于CK-2。

由表2可知,2025年第二批试验大白菜幼苗期经28b-1、24-1处理后,除叶柄宽显著高于CK-1外,

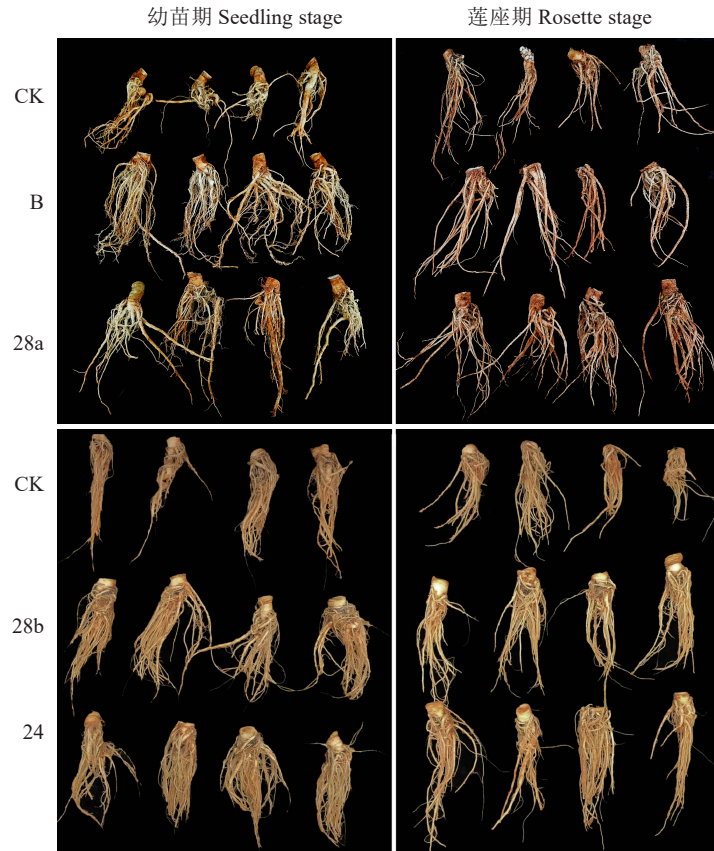


图2 4种芸薹素药剂处理对大白菜地下部分的影响

Fig. 2 Effects of four brassinosteroid agent treatments on the underground parts of Chinese cabbage



图3 4种芸薹素药剂处理对大白菜地上部分的影响

Fig. 3 Effects of four brassinosteroid agent treatments on the aboveground parts of Chinese cabbage

表1 第一批试验2种芸薹素药剂处理对大白菜农艺性状的影响  
Table 1 Effects of two brassinosteroid agent treatments on the agronomic traits of Chinese cabbage in the first batch of experiments

处理 Treatment	株高 Plant height/cm	株幅 Plant width/cm	鲜质量 Fresh mass/g	叶长 Leaf length/cm	叶宽 Leaf width/cm	叶柄长 Petiole length/cm	叶柄宽 Petiole width/cm	叶球质量 Head mass/g	叶球纵径 Head longitudinal diameter/cm	叶球横径 Head transverse diameter/cm	根质量 Root mass/g	根围 Root circumference/mm
CK-1	25.50±1.52 c	25.30±2.43 bc	380.25±21.70 c	25.28±1.54 b	13.85±1.61 c	13.33±1.11 c	3.28±0.15 c	-	-	-	8.45±0.65 b	6.71±0.37 d
B-1	27.28±2.22 bc	29.00±1.47 b	430.75±19.83 c	28.03±1.26 b	14.98±1.10 c	14.50±1.90 bc	3.73±0.40 c	-	-	-	12.10±0.74 a	8.83±0.88 c
28a-1	28.65±1.15 b	28.20±2.06 bc	410.83±20.01 c	26.03±2.72 b	14.85±1.51 c	14.58±1.36 bc	3.28±0.34 c	-	-	-	11.65±0.35 a	8.31±0.84 cd
CK-2	35.30±0.71 a	35.83±2.33 a	1 603.93±106.68 b	32.78±0.83 a	19.30±1.40 b	17.03±1.73 a	5.73±0.41 b	968.25±39.85 b	28.18±0.64 b	14.45±1.17 b	12.14±3.51 a	9.20±2.14 bc
B-2	37.30±0.27 a	37.43±1.66 a	1 853.33±78.75 a	36.15±0.50 a	23.75±1.60 a	18.20±0.84 a	7.65±0.36 a	1 123.30±85.52 a	30.58±0.93 a	17.65±1.92 a	13.35±1.27 a	11.64±0.53 a
28a-2	36.28±1.46 a	36.25±1.72 a	1 786.53±111.41 a	35.10±3.19 a	21.33±2.15 ab	16.38±0.53 ab	6.33±0.58 b	1 080.13±63.08 a	29.85±1.02 a	15.45±0.59 b	13.39±2.02 a	10.97±0.88 ab

注: 同列不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。下同。

Note: Different small letters in the same column indicate significant difference at 0.05 level. The same below.

表2 第二批试验2种芸薹素药剂处理对大白菜农艺性状的影响  
Table 2 Effects of two brassinosteroid agent treatments on the agronomic traits of Chinese cabbage in the second batch of experiments

处理 Treatment	株高 Plant height/cm	株幅 Plant width/cm	鲜质量 Fresh mass/g	叶长 Leaf length/cm	叶宽 Leaf width/cm	叶柄长 Petiole length/cm	叶柄宽 Petiole width/cm	叶球质量 Head mass/g	叶球纵径 Head longitudinal diameter/cm	叶球横径 Head transverse diameter/cm	根质量 Root mass/g	根围 Root circumference/mm
CK-1	27.85±1.05 b	30.15±1.83 a	834.13±252.49 b	29.03±1.26 d	14.88±1.41 b	16.13±1.02 d	4.28±1.01 b	-	-	-	15.88±1.34 a	6.55±0.57 a
28b-1	28.13±1.15 b	29.88±0.76 a	1 015.00±92.05 b	30.15±2.34 cd	16.70±1.35 ab	16.93±2.20 cd	5.48±0.30 a	-	-	-	16.75±3.65 a	6.75±0.73 a
24-1	32.18±1.70 a	31.90±1.94 a	1 001.00±165.99 b	32.20±2.44 bcd	17.68±1.78 a	17.63±0.96 bcd	5.50±0.31 a	-	-	-	16.00±2.09 a	6.65±0.50 a
CK-2	31.40±2.56 a	29.33±3.30 a	1 175.00±97.65 ab	33.30±1.33 abc	18.50±0.35 a	18.50±1.12 abc	5.23±0.23 a	644.13±52.35 b	29.38±0.96 c	10.88±1.08 b	16.00±0.35 a	7.08±0.53 a
28b-2	33.00±2.19 a	29.75±5.04 a	1 489.30±266.15 a	36.13±2.75 a	19.25±1.48 a	20.50±0.50 a	6.00±0.35 a	873.13±93.60 a	32.75±0.75 a	13.13±0.74 a	16.13±0.82 a	6.50±0.35 a

株幅、鲜质量、叶长、叶柄长、根质量、根围也均高于CK-1,但差异不显著。莲座期经28b-2、24-2处理的大白菜叶球质量、叶球纵径显著高于CK-2,株高、鲜质量、叶长、叶宽、叶柄长、叶柄宽、叶球横径均高于CK-2,根围低于CK-2,但差异均不显著。由图2和图3可以看出,4种药剂均能够促进大白菜根系的生长、分蘖和地上部分鲜质量的增加,促进了叶球的生长发育。

以上数据表明,4种芸薹素内酯药剂能促进大白菜的生长,并与CK具有显著差异。对于幼苗期处理,“B”“28a”“28b”和“24”使大白菜分别比CK增产了13.28%、8.04%、21.68%和20.01%;莲座期处理使大白菜分别增产15.55%、11.38%、26.75%和23.60%,表明4种药剂在大白菜莲座期施用的增产效果优于幼苗期,其中,“28b”的增产效果最好。

### 2.3 4种芸薹素药剂处理30 d后的品质性状

对不同处理的大白菜体内可溶性蛋白、游离氨基酸、可溶性糖、维生素C含量进行测定,结果如图4和图5所示。与CK相比,4种芸薹素内酯药剂均可以提高大白菜体内的可溶性蛋白含量。幼苗期的大白菜经处理后,B-1和28a-1提高了可溶性蛋白含量,但差异不显著(图4-A);而28b-1和24-1能显著提高可溶性蛋白含量(图5-A)。在大白菜莲座期施用,4种芸薹素内酯药剂使可溶性蛋白含量(w,后同)均得到显著提升(图4~5-A)。其中,B-2和28a-2的提升效果明显优于其他2种药剂,28a-2最优,为10.95 mg·g<sup>-1</sup>。

由图4-B和图5-B可知,幼苗期的大白菜经处

理后,4种芸薹素内酯药剂均显著提高了游离氨基酸含量,两种药剂间效果无显著差异。而莲座期的大白菜经过处理后,B-2、28a-2、28b-2与CK均无显著差异,而24-2显著高于CK2,为2243.16 μg·g<sup>-1</sup>。

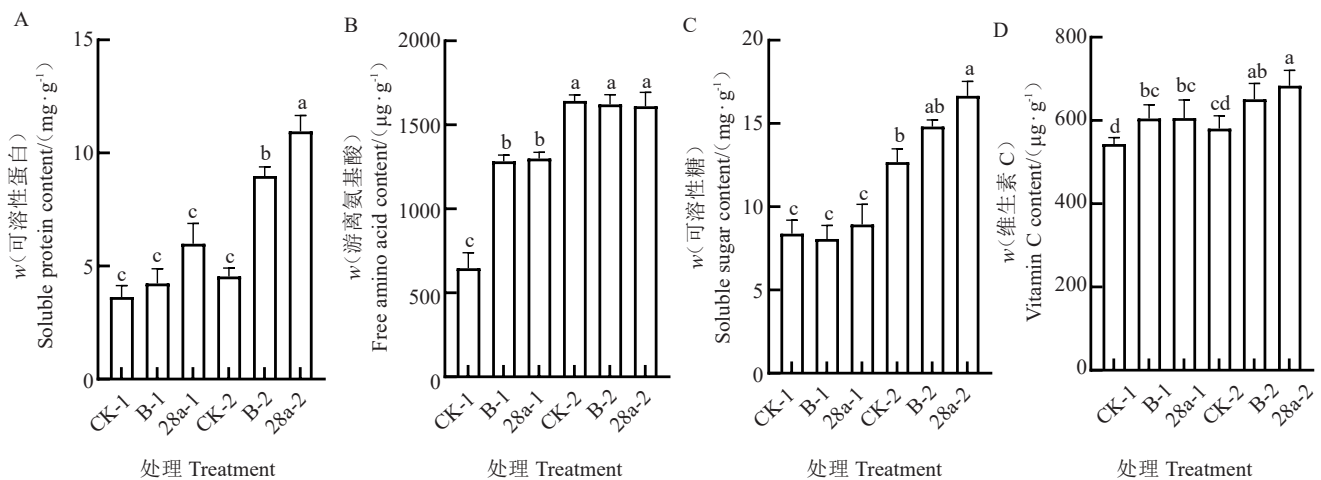
由图4-C和图5-C可知,幼苗期的大白菜经处理后,可溶性糖含量均无显著变化;而莲座期的大白菜与CK相比,28a-2、28b-2和24-2处理显著优于CK,其中,28a-2、28b-2效果最好,均为16.67 mg·g<sup>-1</sup>;而B-2与CK-2无显著差异。

由图4-D和图5-D可以看出,在大白菜幼苗期和莲座期,4种药剂处理均显著提高了大白菜体内的维生素C含量,其中,28b的效果最优,在两个时期分别为913.63和1011.00 μg·g<sup>-1</sup>。

以上结果表明,4种药剂处理能够显著改善大白菜的品质性状。在莲座期施用对大白菜品质的提升效果要优于幼苗期。综合来看,仅游离氨基酸含量提升以24处理更优,其余指标下,28a和28b的处理效果相当,且二者整体上要优于B处理和24处理。

### 2.4 农艺性状和品质性状相关性分析

16个主要农艺性状和品质性状相关性分析结果见图6和图7。从图6可以看出,B和28a处理后的白菜,农艺性状和品质性状之间主要呈正相关,且大都具有极显著相关。而叶球质量、叶球纵径、叶球横径与品质性状间主要呈负相关,但不显著。农艺性状指标之间,叶球质量、叶球纵径、叶球横径与其他农艺性状指标均呈不显著负相关,除此之外,其他农艺性状间多呈显著或极显著正相关。品质性状指标之间均呈极显著正相关。



注:不同小写字母表示在0.05水平差异显著。下同。  
 Note: Different small letters indicate significant difference at 0.05 level. The same below.

图4 第一批芸薹素药剂处理大白菜后的品质性状

Fig. 4 Quality traits of Chinese cabbage after the first batch of brassinosteroid agent treatments

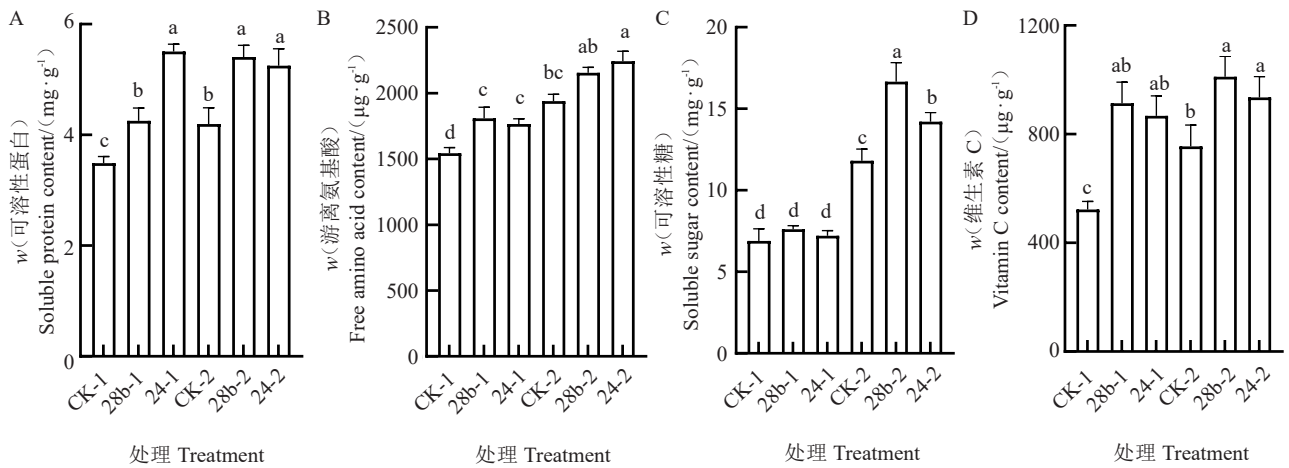
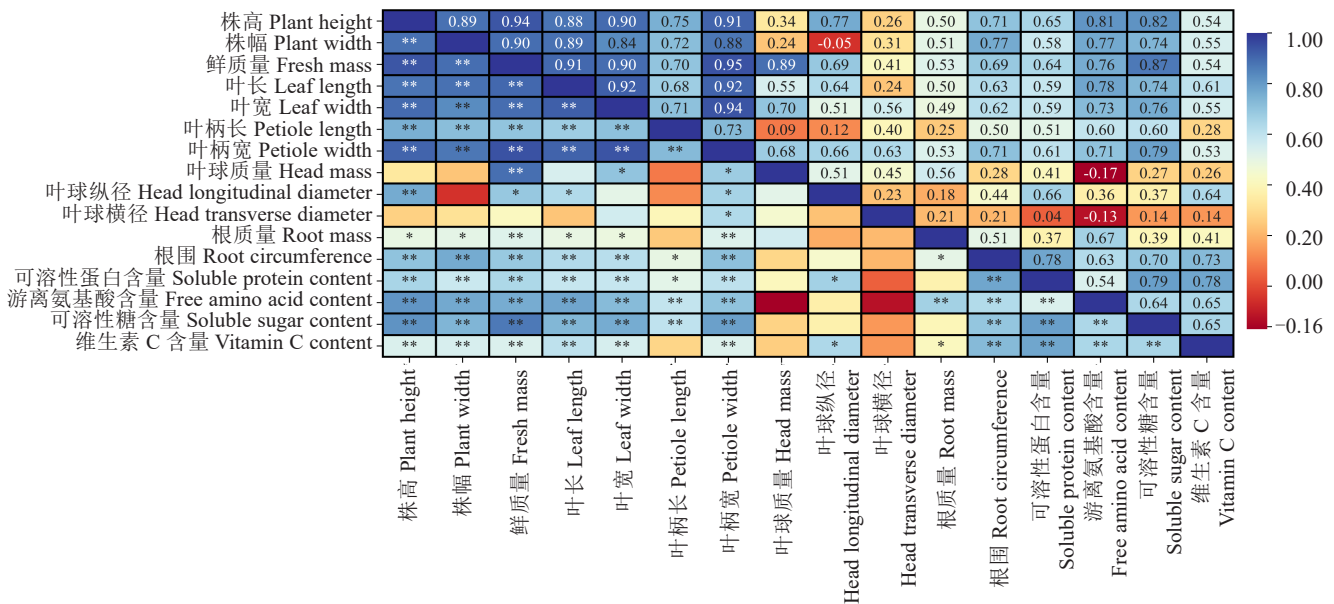


图5 第二批芸薹素药剂处理大白菜后的品质性状

Fig. 5 Quality traits of Chinese cabbage after the second batch of brassinosteroid agent treatments



注:\*表示显著相关( $P<0.05$ ),\*\*表示极显著相关( $P<0.01$ )。下同。

Note: \* indicates significant correlation ( $P<0.05$ ), \*\* indicates extremely significant correlation ( $P<0.01$ ). The same below.

图6 第一批试验大白菜农艺性状与品质性状的相关性热图

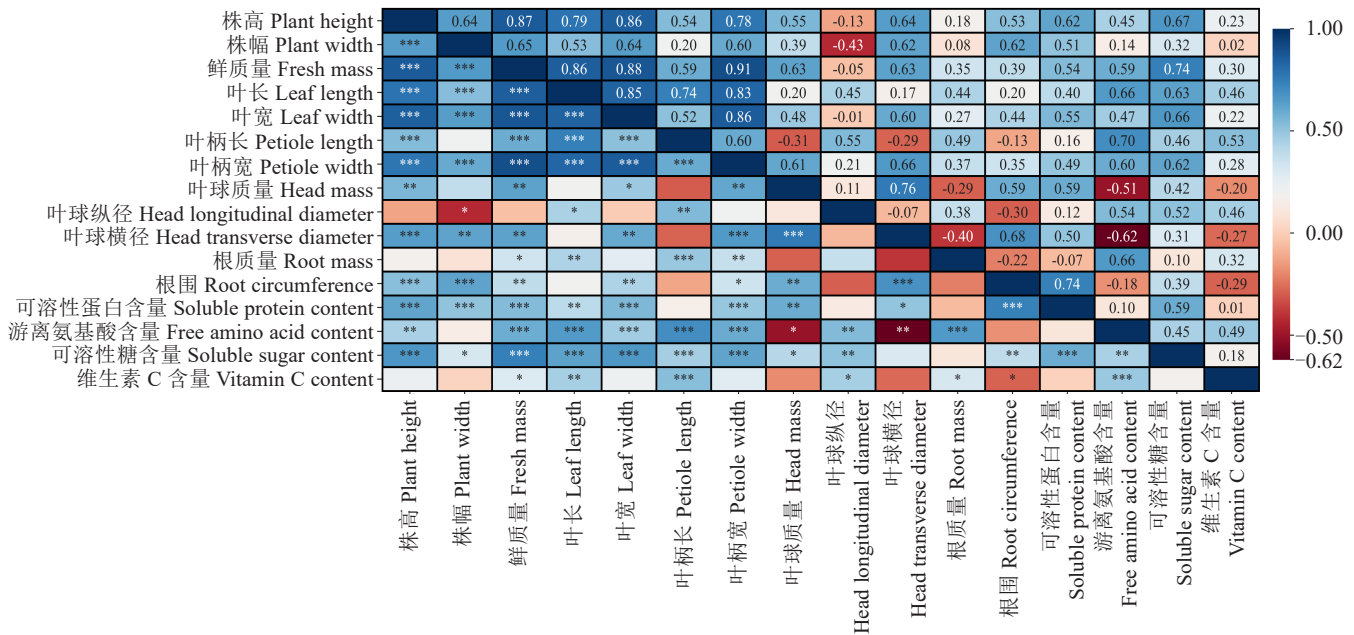
Fig. 6 Correlation heatmap of agronomic traits and quality traits of Chinese cabbage in the first batch of experiments

由图7可知,28b和24处理后的的大白菜,农艺性状与品质性状指标主要呈正相关,大多呈极显著正相关,而叶球质量、叶球横径与游离氨基酸含量呈显著负相关,与维生素C含量呈负相关。农艺性状指标之间,叶球质量、叶球纵径、叶球横径与其他农艺性状呈负相关,其他农艺性状指标间大多呈极显著相关。品质性状指标之间主要呈正相关。

### 3 讨论与结论

本试验结果表明,4种芸薹素内酯药剂B、28a、28b和24的持效期存在明显差异:B的持效期最长

(约15d),24的最短(约5d),28a和28b介于两者之间,表明了丙酰芸薹素内酯对大白菜不同生长阶段的活性和作用时间更长,持效期比普通芸薹素内酯(28-表高芸薹素内酯和24-表芸薹素内酯)长。相关研究表明,丙酰芸薹素内酯的化学结构上原来的2个羟基变为2个丙酰基,形成了所谓长效芸薹素内酯。而长效芸薹素内酯需要在植物体内转化成正常芸薹素内酯,才能发挥作用<sup>[13]</sup>。楚娟娟等<sup>[16]</sup>研究0.01%芸薹素内酯乳在4种蔬菜上的应用中,发现普通BR在同等施药天数下,间隔施药时间短、次数多比时间长、次数少的增产效果好,再次验证了



注:\*\*\*表示在 0.001 水平极显著相关。

Note: \*\*\* indicates extremely significant correlation at 0.001 level.

图7 第二批试验大白菜农艺性状与品质性状的相关性热图

Fig. 7 Correlation heatmap of agronomic traits and quality traits of Chinese cabbage in the second batch of experiments

普通 BR 的持效期较短。因此,在实际生产中,选用丙酰芸薹素内酯药剂可减少施用频率,节约资源,减少工作量和提高效率,而选用其他 3 种药剂在保证产量的前提下,需要多次施药。此外,施用丙酰芸薹素内酯药剂需严格控制末次施药与采收的间隔期(至少 17 d),避免残留累积;而其他 3 种药剂的短持效期可降低采收前的残留超标风险。了解持效期能帮助农民更好地规划施药时间和频率,提高农业生产效率并减少残留。

BR 作为一种广谱高效的植物生长调节剂,能显著提高蔬菜产量与改善品质已成学界共识,在多种蔬菜中得到验证。在芹菜上,外源喷施芸薹素可显著促进产量形成,每公顷芹菜增产达 17 000 kg,增产率高达 32.5%<sup>[17]</sup>;在番茄上,芸薹素内酯不仅能提高坐果率,使产量增幅维持在 10.11%~11.97%,还能对番茄果实品质产生一定的改善作用<sup>[18]</sup>;在甜菜上,喷施芸薹素类调节剂可通过调控植株生长形态(促进株高增加、叶片增厚浓绿、茎秆增粗),同时优化种球发育(使种球饱满均匀),最终实现 12.5%~14.4%的产量提升<sup>[19]</sup>。在大白菜中,外源 BR 可通过维持细胞壁结构稳定性、上调光合关键酶活性并抑制叶绿素降解基因表达,有效缓解钙缺乏导致的干烧心病害,显著提升植株生物量与商品品质<sup>[20]</sup>;此外,0.007 5%芸薹素内酯能够显著提高小白菜的株

高,增加叶片宽度、数量和生物量,使产量增加 8.42%~17.41%,且对小白菜品质也有一定的改善作用<sup>[21]</sup>。尽管 BR 对蔬菜生长的调控作用已得到广泛证实,但目前针对大白菜的系统性研究仍相对匮乏,尤其是不同 BR 类似物(如 28-表高芸薹素内酯、24-表芸薹素内酯)在大白菜产量形成关键期的施用效果、浓度效应及对品质指标(如游离氨基酸、可溶性糖含量等)的具体影响机制,相关报道仍较为零散。笔者在本研究中聚焦不同 BR 类药剂对大白菜的调控效应,明确了 4 种药剂的最优施用时期及增产优势,补充了 BR 在大白菜上的应用数据,不仅为大白菜优质高产栽培提供了实践指导,也为深入解析 BR 调控十字花科蔬菜生长发育的分子机制提供了基础参考,具有一定的理论与应用价值。

研究表明,BR 不仅能改善小白菜株高、根长、单株质量等农艺性状,还能改善品质<sup>[22]</sup>。0.007 5%芸薹素内酯水剂对小白菜的生长有明显的调节作用。在小白菜苗期、生长期喷施芸薹素内酯,可显著提高小白菜的株高,增加叶片宽度、数量和生物量<sup>[21]</sup>。本研究发现,经过 4 种 BR 产品处理的大白菜与 CK 相比具有显著差异。处理后大白菜的株幅、根围、鲜质量、叶球质量和叶球纵径等农艺性状均得到了改善。从大白菜的根系生长、分蘖情况和

叶片的生长情况可以看出, BR 能明显促进植株根系生长、株高增加、茎秆粗壮、叶面积扩大,有助于积累更多光合产物,促进大白菜的营养生长,进而达到增产效果。

可溶性蛋白是植物体内重要的营养物质,是氮素存在的一个主要形式,参与植物的各种代谢,对植物品质调控具有重要影响。研究发现,风味好的果蔬一般可溶性蛋白含量较高<sup>[6]</sup>。本试验分别对幼苗期和莲座期施用4种芸薹素内酯药剂的大白菜叶片中的可溶性蛋白含量进行测定,结果表明,芸薹素内酯处理与对照相比,提高了叶片可溶性蛋白含量,与韩云等<sup>[21]</sup>、吴金霏等<sup>[23]</sup>的研究结果相同。

游离氨基酸是植物体内重要的氮源之一,其含量反映了植物的生长状况和营养状况。同时作为重要的呈味物质,体现了食物丰富的味觉层次。因此,食品中游离氨基酸含量与种类是评价其食用品质的一项重要指标<sup>[24]</sup>。陆剑飞等<sup>[25]</sup>研究表明,施用2次0.0016%丙酰芸薹素内酯,不仅能促进茶叶生长,提高产量,还能提高氨基酸含量,进而提高茶叶品质。此外,代欢欢<sup>[26]</sup>研究发现,外源2,4-表油菜素内酯能影响盐胁迫下颠茄幼苗的氮代谢,提高含氮有机物含量。本试验结果表明,幼苗期的大白菜经过4种药剂处理后,叶片中的游离氨基酸含量显著高于CK,与上述研究结果一致。但在莲座期使用药剂后,游离氨基酸含量无明显变化,这可能是由于大白菜未施肥,生长后期生长元素不足,导致药剂处理与CK之间差异不显著。

可溶性糖含量可反映植物体内的碳素营养状况以及农产品的品质性状,影响大白菜的风味<sup>[6]</sup>。在本研究中,4种芸薹素内酯药剂处理大白菜,结果表明,莲座期处理的大白菜可溶性糖含量较对照均有所提高,与Wang等<sup>[27]</sup>在绿豆芽上得出芸薹素内酯可改变糖代谢,使葡萄糖、果糖、蔗糖含量增加的结论一致。此外,Xu等<sup>[28]</sup>研究发现,喷洒0.1 mg·L<sup>-1</sup>芸薹素内酯可提高茼蒿叶中可溶性糖和蛋白质含量,并提高香菜叶品质,Yu等<sup>[29]</sup>在施用了24-表油菜素内酯后,发现黄瓜中的可溶性糖含量增加。本试验的研究结果与前人的结论相符,但在幼苗期喷施两种药剂后发现,大白菜可溶性糖含量基本与CK持平,与鲍锐<sup>[30]</sup>在辣椒上的研究结果一致。这可能是因为芸薹素内酯的启动对可溶性糖含量的影响较为缓慢。

维生素C在人体内具有多种重要生理功能,如增强人体免疫力、抗氧化、抗自由基、促进吸收

等<sup>[31]</sup>。因此,大白菜中的维生素C含量对营养价值、健康益处以及品质评价具有重要意义。本研究与韩云等<sup>[21]</sup>、鲍锐<sup>[30]</sup>的研究结果一致,均显示芸薹素内酯能显著提高大白菜的维生素C含量。

本试验对大白菜的12个农艺性状和4个品质性状进行了相关性分析,结果表明,各性状间存在着不同程度的关联度,改变其中一个性状可能引起其他几个性状的相应变化<sup>[32]</sup>。鲜质量与株高、株幅、叶长、叶宽、叶柄长、叶柄宽等呈极显著正相关,与张淑霞等<sup>[33]</sup>、姚远<sup>[34]</sup>的研究结果相符。叶球纵径与株高呈极显著正相关,与马英夏等<sup>[35]</sup>的结论相符。此外,叶球质量与鲜质量、叶宽、叶柄宽呈显著正相关,因此,在大白菜生产中,为提高产量保障叶球质量,可以增加鲜质量、叶宽和叶柄宽为重要目标,在莲座期叶面喷施28b来提高产量。但叶球质量与品质性状呈负相关,意味着在增产的同时,大白菜品质会有所下降,为在保证产量的前提下尽可能提升品质,可在莲座期施用28b。4个品质性状与大多数农艺性状指标之间呈显著或极显著相关,因此保障大白菜品质的关键是确保大白菜有较好的生长状况。

综上所述,B处理(0.004%丙酰芸薹素内酯可溶性剂)持效期最长,可减少田间重复施药次数,降低成本;28b处理(0.0016%28-表高芸薹素内酯水剂)可显著提高大白菜鲜质量、叶球质量等相关产量指标,直接提升经济收益;28a(0.004%28-表高芸薹素内酯水剂)和28b处理可显著提升大白菜可溶性蛋白、维生素C含量等关键品质指标。综合考虑产量和品质双提升,28b是最优选择。此外,4种药剂在大白菜莲座期施用的增产效果和品质提升效果都要优于幼苗期,因此,建议4种药剂优先在大白菜莲座期施用,最大程度节约成本并达到增产提质的效果。本研究结果可为芸薹素内酯药剂在大白菜生产周期中的施用提供理论依据,利于优化芸薹素内酯药剂的应用策略,并提高其在农业生产中的效率和效果。

### 参考文献

- [1] 苏正川,卿尚飞,张亚彪.4.5%24-表芸薹素内酯·烯效唑悬浮剂对棉花的调节作用[J].农药科学与管理,2024,45(9):52-58.
- [2] 陈秀,方朝阳.植物生长调节剂芸薹素内酯在农业上的应用现状及前景[J].世界农药,2015,37(2):34-36.
- [3] 孙陈铭,蔡岩,苗志伟.新型绿色植物生长调节剂芸薹素内酯的研究进展[J].化学教育(中英文),2022,43(6):1-8.
- [4] 邓文凯.芸薹素内酯对骏枣坐果及果实品质的影响[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2024.

- [5] 叶翠娇. 长效芸薹素内酯的合成与硫酰氟促进的重氮化反应[D]. 南昌: 南昌大学, 2023.
- [6] 高飞. 不同品种大白菜生物学性状和品质比较研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2013.
- [7] 胡永波, 雷雨田, 杨永森, 等. 芸薹素内酯喷施对黄瓜幼苗耐旱性的影响[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(9): 195-203.
- [8] 李青超, 赵秀梅, 王立达, 等. 丙酰芸薹素内酯施用浓度对水稻植株性状和产量的影响[J]. 安徽农业科学, 2023, 51(21): 145-147.
- [9] 郭巨先, 王惠, 张亮, 等. 2,4-表油菜素内酯对菜心生长和菜薹营养品质的影响[J]. 广东农业科学, 2021, 48(4): 29-36.
- [10] 夏丽娟, 陈浩, 赵霞. 丙酰芸薹素内酯对3种作物产量品质及生化指标调节效果的研究[J]. 农药科学与管理, 2020, 41(5): 65-69.
- [11] 廖灿. 28-高芸薹素内酯对韭菜中溴氰菊酯和丙溴磷残留降解的影响[D]. 湖北荆州: 长江大学, 2023.
- [12] 吴俊颖. 丙酰芸薹素内酯的合成研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2020.
- [13] 张智杰. 两类芸薹素内酯异同初探[J]. 广东化工, 2009, 36(7): 310-311.
- [14] 邵贵荣, 曹萍, 朱彬, 等. 不结球白菜与苗用大白菜远缘杂交农艺性状的遗传分析[J]. 福建农业学报, 2023, 38(9): 1047-1053.
- [15] 范伟强, 尹婧, 王超楠, 等. 33个大白菜品种表型遗传多样性评价[J]. 中国瓜菜, 2021, 34(10): 32-38.
- [16] 楚娟娟, 李玉成, 李志江, 等. 0.01%芸薹素内酯乳油(威敌408)在蔬菜上的应用[J]. 湖北植保, 2011(2): 12-14.
- [17] 田红萍, 曲济兴, 白莲香, 等. 天丰素、芸薹素内酯在粮食、蔬菜上的应用效果[J]. 山西农业科学, 2004(1): 60-62.
- [18] 张惟, 刘亦学, 杨秀荣, 等. 芸薹素内酯水剂对番茄产量及品质的影响[J]. 天津农业科学, 2004(2): 23-25.
- [19] 岳林旭, 宋晴晴, 何群, 等. 芸薹素481对采种甜菜种子产量质量的影响[J]. 内蒙古农业科技, 2002(5): 17-18.
- [20] LI Y T, MA J Z, GAO X Q, et al. Exogenous brassinosteroids alleviate calcium deficiency-induced tip-burn by maintaining cell wall structural stability and higher photosynthesis in mini Chinese cabbage[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 999051.
- [21] 韩云, 闫凯莉, 吴建辉, 等. 0.007 5%芸薹素内酯水剂对小白菜生长和品质的影响[J]. 中国农学通报, 2015, 31(13): 81-84.
- [22] 孙晓. 三种不同结构的芸薹素内酯对4种作物的应用效果评价[D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2019.
- [23] 吴金霏, 张文元, 殷佑斗, 等. 28-高芸薹素内酯对油茶果实经济性状及营养品质的影响[J]. 经济林研究, 2023, 41(3): 197-205.
- [24] 刘伟, 张群, 李志坚, 等. 不同品种黄花菜游离氨基酸组成的主成分分析及聚类分析[J]. 食品科学, 2019, 40(10): 243-250.
- [25] 陆剑飞, 黄晓华, 殷琛. 0.0016%丙酰芸薹素内酯 AS 对茶叶生产的影响[J]. 浙江农业学报, 2011, 23(4): 763-765.
- [26] 代欢欢. 外源 2,4-表油菜素内酯对盐胁迫下颠茄幼苗初生代谢及次生代谢的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2020.
- [27] WANG H B, CHEN J H, GUO R J, et al. Exogenous brassinolide treatment regulates phenolic accumulation in mung bean sprouts through the modulation of sugar and energy metabolism[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2024, 104(3): 1656-1667.
- [28] XU Z Q, HUANG S C, XIE Y D, et al. Physiological responses of coriander (*Coriandrum sativum* L.) to exogenous 2,4-epibrassinolide at different concentrations[J]. *BMC Plant Biology*, 2023, 23(1): 649.
- [29] YU J Q, HUANG L F, HU W H, et al. A role for brassinosteroids in the regulation of photosynthesis in *Cucumis sativus*[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2004, 55(399): 1135-1143.
- [30] 鲍锐. 表油菜素内酯对辣椒抗寒性及生长发育的影响[D]. 长春: 吉林农业大学, 2008.
- [31] 曹长明, 曾凤, 黄丙玲. 施肥对大白菜产量和维生素 C 含量及经济效益的影响[J]. 农业科技通讯, 2022(9): 141-144.
- [32] 朱长志, 张志仙, 刘君, 等. 青花菜主要农艺性状相关性、主成分与聚类分析[J]. 中国农学通报, 2015, 31(4): 73-79.
- [33] 张淑霞, 杨晓云, 张清霞, 等. 苗用型大白菜单株产量与主要农艺性状关系分析[J]. 中国瓜菜, 2023, 36(7): 65-69.
- [34] 姚远. 不结球白菜耐热品种主要性状的评价及分析[D]. 南京: 南京农业大学, 2015.
- [35] 马英夏, 张恩慧, 杨安平, 等. 甘蓝杂种一代整齐度主要评判标准研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(9): 155-160.