

正交试验-DTOPSIS 联用筛选白菜 杂交种子高产农艺措施组合

马朝喜¹, 常魁革¹, 段栓成¹, 樊环环¹, 卢娇娇¹, 魏小春², 张晓伟²

(1. 河南省济源市农业科学院 河南济源 459000; 2. 河南省农业科学院蔬菜研究所 郑州 450002)

摘要: 为探讨 4 种农业技术及其组合对白菜杂交种子产量的影响, 采用正交试验设计方法, 系统分析 4 种农业技术(打顶、抽薹期喷硼、末花期掐花、末花期喷磷酸二氢钾)对白菜杂交种子产量的影响; 采用 DTOPSIS 对不同处理的产量构成因素进行解析和综合评价。结果表明, 影响产量的主要因素是打顶、抽薹期喷硼; 次要因素是末花期喷磷酸二氢钾; 第三因素是末花期掐花; 打顶+抽薹期喷硼+末花期喷磷酸二氢钾+末花期掐花为最优组合, 单株种子产量达 65.68 g。打顶与抽薹期喷硼是提高白菜杂交种子产量的关键措施, 正交试验与 DTOPSIS 联用方法为多因素农艺措施的快速筛选与综合评价提供了有效技术路径。

关键词: 白菜; 杂交种子; 农业技术措施; 正交试验设计; 单株种子产量; 优化生产

中图分类号: S634.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2026)07-187-06

Screening of high-yield agronomic measures for Chinese cabbage hybrid seeds using orthogonal testing and DTOPSIS method

Ma Chaoxi¹, Chang Kuige¹, Duan Shuancheng¹, Fan Huanhuan¹, Lu Jiaojiao¹, Wei Xiaochun², Zhang Xiaowei²

(1. Jiyuan Academy of Agricultural Sciences, Jiyuan 459000, Henan, China; 2. Institute of Vegetable Research, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, Henan, China)

Abstract: Using the orthogonal experimental design, this study systematically analyzed the effect of four agricultural techniques (topping, boron spraying during the bolting stage, flower pinching at the final flowering stage, and potassium dihydrogen phosphate spraying at the final flowering stage) on the yield of hybrid cabbage seeds. The DTOPSIS method was employed to analyze and comprehensively evaluate the yield components under different treatments. The results showed that the main factors affecting yield were topping and boron spraying during the bolting stage, followed by potassium dihydrogen phosphate spraying at the final flowering stage, while flower pinching at the final flowering stage had a relatively minor effect. The optimal combination of all the four factors (topping + boron spraying during the bolting stage + potassium dihydrogen phosphate spraying at the final flowering stage + flower pinching at the final flowering stage), resulted in seed yield per plant of 65.68 g. In conclusion, topping and boron spraying during the bolting stage are the key measures for improving hybrid cabbage seed yield. The combined use of orthogonal experimental design and DTOPSIS provides an effective technical approach for the rapid screening and comprehensive evaluation of multi-factor agronomic measures.

Key words: Chinese cabbage; Hybrid seed; Agricultural techniques; Orthogonal experimental design; Seed yield per plant; Production optimization

收稿日期: 2025-12-20; 修回日期: 2026-03-19

基金项目: 河南省农业良种联合攻关项目(2022010504); 河南省中央引导地方科技发展资金(2025ZYDD08); 河南省科协科普项目(HNKP2025233); 河南优特产业科技支撑行动计划(20240502007, 20250502007)

作者简介: 马朝喜, 男, 副研究员, 主要从事蔬菜高效栽培与制种技术研究。E-mail: 372954481@qq.com

通信作者: 魏小春, 男, 研究员, 研究方向为大白菜遗传育种。E-mail: jweixiaochun@126.com

张晓伟, 男, 研究员, 主要从事蔬菜遗传育种等研究工作。E-mail: xiaowei5737@163.com

白菜(*Brassica rapa* L.)是我国主要的蔬菜品类^[1],每年都需要大量的种子用于生产,随着种植面积的不断扩大,优质白菜种子的市场需求持续增长。然而,种子产量低而不稳定的问题仍然突出,严重制约了种业发展和农民增收。影响白菜种子产量的因素众多,主要包括气候条件、品种特性、栽培技术等。其中,农业技术措施的应用是关键可控因素。目前,打顶^[2-4]、抽薹期叶面喷硼^[5-6]、末花期掐花^[7-8]、喷施磷酸二氢钾^[9-10]等技术在白菜制种中已有应用,但关于这些技术组合效应的研究较少,探索并优化不同农业技术组合对提高白菜种子产量具有重要的生产指导意义。

单因素试验不仅工作量大,而且难以揭示不同技术措施间的交互作用,导致生产技术应用缺乏系统性指导。能够解决单因素试验缺陷比较好的办法就是采用正交试验设计^[11-12],正交试验设计是一种高效的多因素试验方法,通过科学的因素水平组合,以较少的试验处理全面考查各因素的主效应和交互效应。该方法已在西瓜^[13]、葡萄^[14]、玉米^[15]、小麦^[16]等作物的农技优化中表现出显著优势,但在大白菜制种领域的应用研究仍显不足。本研究以吉美双亲白菜为材料,采用正交试验设计方法,系统研究 4 种关键农业技术措施对白菜种子产量的影响,明确各技术措施对产量及其构成因素的影响程度;筛选最优的农技组合方案;建立适用于蔬菜制种的多因素评价体系,为白菜杂交种子高产高效生产提供理论依据和技术支持,同时对其他蔬菜作物的种子生产研究具有借鉴意义。

1 材料与方法

1.1 试验概况

试验于 2025 年 2—5 月在济源市农业科学院蔬菜研究中心试验基地进行。试验前采用五点取样法采集试验地土壤,取土深度为 0~30 cm,样品委

托农业农村部农产品质量监督检测测试中心(郑州)检测。结果显示,土壤 pH 7.34,有机质含量(w,下同) 20.12 g·kg⁻¹,全氮含量 1.52 g·kg⁻¹,有效磷含量 34.14 mg·kg⁻¹,速效钾含量 521.11 mg·kg⁻¹。

1.2 材料

1.2.1 白菜品种选择 吉美 2 号父母本种苗由河南省农业科学院蔬菜研究所提供。选取生长健壮、长势一致的吉美 2 号母本作为供试材料。父母本按行比 2:2 种植,测定母本结实情况,父本仅提供花粉,不纳入产量测定。该品种具有较高的种子产量潜力和良好的杂交特性。

1.2.2 农业技术措施与材料 打顶:当主茎抽薹高度达到 20 cm 时,摘除顶端生长点。

抽薹期叶面喷硼:河南加法作物保护有限公司生产的“液体硼”叶面肥,其中硼含量(ρ ,后同) 130 g·L⁻¹,钼含量 1.5 g·L⁻¹,锌含量 0.5 g·L⁻¹,在抽薹期喷施 2500 倍溶液,每隔 7 d 喷施 1 次,连续喷施 2 次。

末花期掐花:在末花期人工掐除枝条顶端的 3~5 朵无效小花。

末花期喷施磷酸二氢钾:选用什邡川西兴达化工有限公司生产的磷酸二氢钾,在末花期喷施 0.3% 溶液,每隔 7 d 喷施 1 次,连续喷施 3 次。

1.3 试验因素与水平

采用正交试验设计,设置 4 个因素,每个因素设置 2 个水平,详见表 1。

1.4 试验方案设计

根据正交表选用原则,采用正交表 L₈(2⁷)安排试验方案,即 8 个试验组合,预留 3 个空白列用于估计试验误差。试验组合如表 2。

每个处理 3 次重复,随机区组排列,小区面积 25 m²,种植 3500 株·667 m⁻²。试验期间,除上述农业技术措施外,其他管理措施与常规白菜种子生产相同。在白菜种子成熟期,采用五点取样法,每点

表 1 正交试验 L₈(2⁷)因素水平
Table 1 Orthogonal test L₈(2⁷) factor levels

水平 Level	因素(Factor)			
	A	B	C	D
	打顶 Topping	抽薹期叶面喷硼 Foliar spraying of boron during the bolting stage	末花期掐花 Pinching flowers at the end of the flowering period	末花期喷施磷酸二氢钾 Spray with monopotassium phosphate during the late flowering stage
1	不打顶 No topping	不喷 No spray	不掐花 No pluck flowers	不喷 No spray
2	打顶 Topping	喷 Spray	掐花 Pinch flowers	喷 Spray

表 2 L₈(2⁷)正交试验设计
Table 2 L₈(2⁷) Orthogonal test design

处理 Treatment	因素 Factor			
	A	B	C	D
T1	不打顶 No topping	不喷 No spray	不掐花 No pluck flowers	不喷 No spray
T2	不打顶 No topping	不喷 No spray	掐花 Pinch flowers	喷 Spray
T3	不打顶 No topping	喷 Spray	不掐花 No pluck flowers	不喷 No spray
T4	不打顶 No topping	喷 Spray	掐花 pinch flowers	喷 Spray
T5	打顶 Topping	不喷 No spray	不掐花 No pluck flowers	不喷 No spray
T6	打顶 Topping	不喷 No spray	掐花 Pinch flowers	喷 Spray
T7	打顶 Topping	喷 Spray	不掐花 No pluck flowers	不喷 No spray
T8	打顶 Topping	喷 Spray	掐花 Pinch flowers	喷 Spray

选取 4 株,每个小区共取 20 株,记录一级、二级、三级分枝荚数和总荚数以及单荚粒数,测定千粒重,计算单株产量。

1.5 数据采集与分析

采用 Excel 2023 对数据进行整理,用 DPS 7.5 软件进行极差分析,采用 DTOPSIS 法^[14]对各试验处理进行综合评价。

2 结果与分析

2.1 不同农技组合对白菜种子产量的影响

由表 3 可知,在 8 个试验处理中,单株白菜种子产量范围为 34.57~65.68 g,最大值与最小值之差为 31.11 g,标准差约为 9.42 g。所有试验的白菜平均单株产量为 51.67 g,中位数单株产量为 53.77 g。

处理 1 产量最低,为 34.57 g,处理 8 产量最高,为 65.68 g。

从处理 1、5,以及处理 2、6 的对比可以看出,打顶(A₂)可显著提高产量;从处理 1、3,以及处理 5、7 的对比可以看出,抽薹期叶面喷硼(B₂)对产量有显著的正面影响;从处理 1、2,以及处理 3、4 的对比可以看出,末花期掐花(C₂)和喷施磷酸二氢钾(D₂)有助于提高产量。打顶、抽薹期叶面喷硼和施磷酸二氢钾是提高白菜种子单株产量的有效措施,末花期掐花对产量的影响则不明显。

由表 4 可知,4 种农技措施对白菜单株产量影响的效果高低依次为:A(打顶)>B(抽薹期叶面喷硼)>D(末花期喷施磷酸二氢钾)>C(末花期掐花)。最佳试验组合是 A₂B₂C₂D₂,即打顶(A₂)、抽薹

表 3 不同农技组合对白菜种子产量的影响
Table 3 Effects of different agricultural technology combinations on cabbage seed yield

处理 Treatment	因素 Factor				单株种子产量 Single plant seed yield/g
	A	B	C	D	
T1	1	1	1	1	34.57 f
T2	1	1	2	2	41.48 e
T3	1	2	1	1	48.40 d
T4	1	2	2	2	54.13 c
T5	2	1	1	1	53.41 c
T6	2	1	2	2	59.74 b
T7	2	2	1	1	58.77 b
T8	2	2	2	2	65.68 a

注:同列数字后不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference at 0.05 level.

表 4 直观分析结果
Table 4 Intuitive analysis results

因素 Factor	K ₁ (单株种子产量) K ₁ (Yield per plant)/g	K ₂ (单株种子产量) K ₂ (Yield per plant)/g	极差 R Range
A	44.65	59.40	14.75
B	47.30	56.75	9.45
C	48.79	55.26	6.47
D	48.79	55.26	6.47

期叶面喷硼(B₂)、末花期掐花(C₂)、末花期喷施磷酸二氢钾(D₂),平均单株产量最高,达到 65.68 g(处理 8)。

2.2 不同农技组合对产量构成的影响

由表 5 可知,8 种不同的农技组合(处理 1~8)以及相应的产量构成指标主要包括一级分枝荚数、二级分枝荚数、三级分枝荚数、总荚数、单荚粒数、千粒重(g)和单株产量(g)。

一级分枝荚数分布在 224.51~323.36 个,平均一级分枝荚数为 280.51 个,处理 8(323.36)明显高于其他处理,表明该农技组合促进了一级分枝的形成;二级分枝荚数分布在 354.67~476.13 个,平均分枝结荚数为 413.46 个,处理 8(476.13)同样明显高于其他处理,进一步支持了处理 8 在促进分枝形成方面的优势;三级分枝结荚数分布在 214.34~421.38 个,平均分枝结荚数为 313.87 个,处理 8(421.38)在三级分枝的形成上也表现最佳;总荚数分布在 793.52~1 220.87 个,平均分枝荚数为 1 001.99 个,处理 8(1 220.87)的总荚数最多,得益于其在分枝形成上的优异表现;单荚粒数分布范围 10.43~21.37 粒,平均单荚籽粒数为 16.08 粒,处理 6(21.37)的单

荚粒数最多,说明该农技组合有助于提高单荚的种子数量;千粒重分布范围在 2.12~2.63 g,平均千粒重为 2.34 g,处理 8(2.63 g)的千粒重最高,表明该农技组合有助于提高种子千粒重。

2.3 种子产量构成综合评价

首先对表 5 中的数据进行向量归一化处理,然后根据各个性状在产量构成中的重要程度,分别赋予不同权重:一级分枝荚数权重为 0.065 898 405;二级分枝荚数权重为 0.052 979 369;三级分枝荚数权重为 0.313 210 019;总荚数权重为 0.115 091 556;单荚粒数权重为 0.299 510 005;千粒重权重为 0.016 740 774;单株产量权重为 0.107 339 652。利用各个产量构成的权重系数乘以归一化处理后的数据,获得决策矩阵 R(表 6)。

由表 6 决策矩阵可知,各产量构成的正理想解分别是:0.027 912 170、0.021 321 157、0.141 625 19、0.048 978 207、0.134 768 452、0.006 634 145、0.047 128 838;各产量构成的负理想解分别是:0.019 379 519、0.015 882 164、0.069 394 259、0.031 834 009、0.065 776 086、0.005 322 451、0.024 805 784。根据 Topsis 公式分别计算得出 8 个试验处理的正、负理想解相对接近距离及综合评价值,利用综合评价值的大小,对 8 个试验处理进行排名(表 7)。由表 7 可知,处理 8 的正理想解距离最小(0.005 675 789),表明其在正向指标上表现最佳;处理 1 的正理想解距离最大(0.102 461 803),表明其在正向指标上表现相对较差。处理 1 的负理想解距离最小(0.002 645 216),表明其在负向指标上表现

表 5 不同农技组合对产量构成的影响
Table 5 Effects of different agricultural technology combinations on yield composition

处理 Treatment	一级分枝荚数 Pod number of primary branch	二级分枝荚数 Pod number of secondary branch	三级分枝荚数 Pod number of tertiary branch	总荚数 Total pods	单荚粒数 Number of seeds per pod	千粒重 Thousand-grain mass/g	单株种子产量 Single plant seed yield/g
T1	224.51	354.67	214.34	793.52	10.43	2.12	34.57
T2	231.47	365.36	206.47	803.30	11.28	2.33	41.48
T3	228.33	356.27	223.58	808.18	11.89	2.11	48.40
T4	230.78	366.25	214.78	811.81	10.78	2.43	54.13
T5	291.86	461.07	405.26	1 158.19	20.88	2.24	53.41
T6	300.91	474.96	411.23	1 187.10	21.37	2.53	59.74
T7	305.21	463.15	415.74	1 184.10	21.22	2.33	58.77
T8	323.36	476.13	421.38	1 220.87	20.47	2.63	65.68
标准差 Standard deviation	39.18	54.43	99.49	192.39	4.97	0.17	9.53
变异系数 CV/%	14.67	13.12	31.67	19.32	30.96	0.07	0.18

表 6 决策矩阵
Table 6 Decision matrix

处理 Treatment	一级分枝荚数 Pod number of primary branch	二级分枝荚数 Pod number of secondary branch	三级分枝荚数 Pod number of tertiary branch	总荚数 Total pods	单荚粒数 Number of seeds per pod	千粒重 Thousand- grain mass	单株种子产量 Single plant seed yield
1	0.019 379 519	0.015 882 164	0.072 039 355	0.031 834 009	0.065 776 086	0.005 347 676	0.024 805 784
2	0.019 980 300	0.016 360 863	0.069 394 259	0.032 226 358	0.071 136 553	0.005 877 398	0.029 766 941
3	0.019 709 258	0.015 953 812	0.075 144 905	0.032 422 131	0.074 983 477	0.005 322 451	0.034 728 098
4	0.019 920 740	0.016 400 717	0.072 187 238	0.032 567 758	0.067 983 337	0.006 129 647	0.038 841 108
5	0.025 193 116	0.020 646 768	0.136 207 282	0.046 463 645	0.131 678 300	0.005 650 374	0.038 324 471
6	0.025 974 304	0.021 268 764	0.138 213 790	0.047 623 440	0.134 768 452	0.006 381 896	0.042 866 577
7	0.026 345 477	0.020 739 911	0.139 729 595	0.047 503 088	0.133 822 487	0.005 877 398	0.042 169 834
8	0.027 912 170	0.021 321 157	0.141 625 190	0.048 978 207	0.129 092 663	0.006 634 145	0.047 128 838

表 7 综合评价结果
Table 7 Comprehensive evaluation results

处理 Treatment	正理想解距离 Positive ideal solution distance	负理想解距离 Distance to the negative ideal solution	综合向量距离 Comprehensive vector distance	排名 Rank
1	0.102 461 803	0.002 645 216	0.025 166 878	8
2	0.099 681 882	0.007 375 614	0.068 893 952	7
3	0.092 301 518	0.014 722 705	0.137 564 227	5
4	0.098 530 190	0.014 540 109	0.128 593 532	6
5	0.011 469 897	0.096 231 335	0.893 502 641	4
6	0.005 954 965	0.100 723 393	0.944 178 322	3
7	0.005 883 950	0.100 979 367	0.944 939 476	2
8	0.005 675 789	0.100 611 371	0.946 599 487	1

最佳;处理 7 的负理想解距离最大(0.100 979 367),表明其在负向指标上表现相对较差。处理 8 综合评价值最大(0.946 599 487),表明其综合表现最佳;处理 1 综合评价值最小(0.025 166 878),表明其综合表现相对较差。

3 讨论与结论

通过正交试验与 DTOPSIS 联用,筛选出白菜杂交种生产最优农艺组合(A₃B₂C₂D₂),各因素影响程度依次为打顶>抽薹期叶面喷硼>末花期喷施磷酸二氢钾>末花期掐花。

打顶后顶端生长素合成减弱,侧芽生长素浓度上升,解除侧枝抑制^[17],碳同化产物由顶端优先转向侧枝与花荚^[18]。在本试验中,打顶使一级分枝荚数平均增加 29.3%,总荚数增加 53.8%,与孙守如等^[3]、肖林云等^[4]的结果一致。硼是花粉管萌发、伸长的必需元素,参与蔗糖合成酶和酸性转化酶活性的调控^[19-20]。硼肥对结实率有显著促进作用^[21],本试验喷硼使单荚粒数平均增加 22.5%。磷是种子贮藏物质合成的关键元素,磷供应不足导致胚乳发育停滞^[22]。钾肥通过酶参与碳氮代谢,促进籽粒灌

浆^[23]。值得注意的是,土壤速效钾含量已高达 521.11 mg·kg⁻¹,叶面喷钾仍能增产,可能是生殖器官对钾素需求具有时效性^[24],叶面喷施可绕过根系吸收时滞,快速满足结荚期的钾需求,这与土壤钾素充足时无需补钾的常规认知不完全一致,需后续增设植株各生育期钾素动态监测加以验证。掐花可以减少无效花消耗^[6-7],间接提高千粒重。

本研究结果为农技优化提供了理论支撑,也为同类蔬菜种子生产提供了可借鉴的思路,但也存在一些局限,如最优组合未经独立验证、土壤有效硼含量未测定、未测定内源激素及相关酶活性等。后续应补充验证试验,并结合生理生化分析,从激素调控和基因表达层面深入揭示多种农技措施协同增产的内在机制。

通过正交试验的因子均衡配置与统计分析,明确了 4 种农业技术措施对白菜种子产量影响的重要程度,即打顶>抽薹期叶面喷硼>末花期喷施磷酸二氢钾>末花期掐花。筛选出最优农技组合为 A₂B₂C₂D₂,打顶和抽薹期叶面喷硼是提高白菜种子产量的关键技术措施;末花期喷施磷酸二氢钾也能有效提高产量;末花期掐花可能对提高种子千粒重

有积极作用。

参考文献

- [1] 马朝喜,肖兴中,李冰,等.大白菜制种幼苗越冬预测模型的建立[J].北方园艺,2024(1):16-23.
- [2] 李进,顾绘,殷琳毅.四倍体南通矮白菜单株种子产量构成性状分析[J].安徽农业科学,2020,48(7):56-58.
- [3] 孙守如,李建吾,王卫东,等.打顶对大白菜种株产量及产量构成因素的影响[J].河南职技师院学报,1996,24(3):8-11.
- [4] 肖林云,高建东,姚永伟,等.摘心打顶技术对冬播白菜制种产量的影响[J].农技服务,2024,41(6):28-30.
- [5] 李秀英,石玉明,李瑞霞,等.大白菜花期喷施硼肥对种子产量和质量的影响[J].种子世界,2005(7):25.
- [6] 秦佳梅,别清进,梁树华.提高大白菜种子产量的技术关键[J].吉林农业,1998(10):11.
- [7] 白德进,张庆生,何明霞.大白菜露地越冬制种的几项关键技术措施[J].种子科技,2000(6):49.
- [8] 徐昆岩,高海峰.露地越冬大白菜杂交制种技术探讨[J].农业与技术,2019,39(7):106-107.
- [9] 代雯慈,王捧娜,翁颖,等.倒春寒逆境下叶面喷施磷酸二氢钾对小麦穗粒结实的影响[J].中国农业气象,2023,44(10):889-902.
- [10] 杨军,黄淑娥,曹娜,等.降温期灌水和叶面喷施磷酸二氢钾对早稻产量的影响[J].应用与环境生物学报,2018,24(5):1132-1138.
- [11] 何为,薛卫东,唐斌.优化试验设计方法及数据分析[M].北京:化学工业出版社,2012.
- [12] 明道绪,刘永建.生物统计附试验设计[M].6版.北京:中国农业出版社,1998.
- [13] 董艳.微型西瓜日光温室种植密度及整枝方式试验研究[J].中国果菜,2010(9):35-36.
- [14] 王梅,牛小沛,马朝喜,等.外源硒对“夏黑”葡萄果实硒含量与品质的影响[J].北方园艺,2025(4):68-75.
- [15] 徐灿,陈永伟,张敏,等.滴灌水肥一体化玉米株行距配置试验[J].江苏农业科学,2021,49(21):81-85.
- [16] 艾鹏飞,武玉芬,魏景芳.小麦 SRAP-PCR 体系的正交设计优化[J].安徽农业科学,2011,39(17):10121-10123.
- [17] 苍晶,李唯.植物生理学[M].北京:高等教育出版社,2017.
- [18] 王玲.油菜光合面积指数消长变化及高产群体指标研究[D].武汉:华中农业大学,2019.
- [19] 刘宇庆,刘燕,范红梅.硼对植物细胞的影响及与其它元素关系的研究进展[J].中国土壤与肥料,2009(5):1-4.
- [20] 施益华,刘鹏.硼在植物体内生理功能研究进展(综述)[J].亚热带植物科学,2002,31(2):64-69.
- [21] 陈道友,贾红杰,赵宏义,等.硼肥在两种不同土类上的施用方法对油菜生长和产量的影响初报[J].南方农业,2016,10(22):68-71.
- [22] 曾丽丽,江俊松.油菜临界磷浓度稀释曲线模型的构建和验证[J].河南农业科学,2023,52(4):51-59.
- [23] 陈亚萍,朱孝天,洪栋,等.叶面喷施含钾有机水溶肥对油菜生长发育和产量的影响[J].中国油料作物学报,2023,45(1):131-137.
- [24] 谷贺贺,崔鑫,李静,等.钾肥用量对油菜产量及品质的影响[J].植物营养与肥料学报,2023,29(6):1091-1102.