

植物生长抑制剂对甘蓝幼苗生长发育的影响

马 玲, 高艳明, 李建设

(宁夏大学葡萄酒与园艺学院 银川 750021)

摘 要:为培育适宜机械化移栽的甘蓝幼苗,本研究以 YR 中甘 21 甘蓝品种为试材,在 1 叶 1 心时分别叶面喷施叶绿精(20、30、40 mg·L⁻¹, 记为 T1、T2、T3)、多效唑(150、300、450 mg·L⁻¹, 记为 T4、T5、T6)、烯效唑(20、40、60 mg·L⁻¹, 分别记为 T7、T8、T9)和比久(1500、2500、3500 mg·L⁻¹, 记为 T10、T11、T12),以喷施清水为对照(CK),分析不同植物生长抑制剂对甘蓝幼苗生长和机械化移栽适配性的影响。结果表明,各植物生长抑制剂处理均可在不同程度上缓解甘蓝幼苗徒长,其中 T2、T6 处理壮苗指数较高,分别为 0.09、0.10,均高于 CK,散坨率分别为 11.39%、10.41%,均显著低于 CK,根坨完整性和移栽机适配性较好;T6 处理对株高、下胚轴长和展幅的抑制作用最强,可使株型更紧凑并降低移栽“卡苗”风险;T2 处理 POD 活性较高,T6 处理 SPAD 值最高且根系活力最强。综合株型、壮苗指数、散坨率和生理指标,甘蓝幼苗 1 叶 1 心期叶面喷施 30 mg·L⁻¹ 叶绿精或 450 mg·L⁻¹ 多效唑,可有效抑制徒长并培育适宜机械化移栽的壮苗。

关键词:甘蓝;幼苗;植物生长抑制剂;生长发育

中图分类号:S635

文献标志码:A

文章编号:1673-2871(2026)08-167-09

Effects of plant growth inhibitors on growth and development of cabbage seedlings

Ma Ling, Gao Yanming, Li Jianshe

(College of Wine and Horticulture, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China)

Abstract: To cultivate cabbage seedlings suitable for mechanical transplanting, this study used the cabbage variety YR Zhonggan 21 as the test material. At the one-leaf one-heart stage, foliar sprays of chlorophyll extract (20, 30, 40 mg·L⁻¹, labeled T1, T2, T3), paclobutrazol (150, 300, 450 mg·L⁻¹, labeled T4, T5, T6), uniconazole (20, 40, 60 mg·L⁻¹, labeled T7, T8, T9), and daminozide (1500, 2500, 3500 mg·L⁻¹, labeled T10, T11, T12) were applied, with water spray as the control (CK). The effects of different plant growth inhibitors on cabbage seedling growth and adaptability to mechanical transplanting were analyzed. The results showed that all plant growth inhibitor treatments alleviated excessive elongation of cabbage seedlings to varying degrees. Among them, T2 and T6 treatments exhibited higher seedling vigor indices of 0.09 and 0.10, respectively, both higher than that of CK. Their substrate-scattering rates were 11.39% and 10.41%, respectively, which were significantly lower than that of CK, indicating better root ball integrity and adaptability to the transplanter. T6 treatment exhibited the strongest inhibitory effect on plant height, hypocotyl length, and spread width, promoting a more compact plant architecture and reducing the risk of seedling jamming during transplanting. T2 treatment showed higher POD activity, T6 treatment had the highest SPAD value and the strongest root activity. Considering plant architecture, seedling strength index, substrate-scattering rate and physiological indicators, foliar application of 30 mg·L⁻¹ chlorophyll extract or 450 mg·L⁻¹ paclobutrazol at the one-leaf one-heart stage of cabbage seedlings can effectively inhibit excessive elongation and cultivate robust seedlings suitable for mechanical transplanting.

Key words: Cabbage; Seedling; Plant growth inhibitor; Growth and development

甘蓝 (*Brassica oleracea* L. var. *capitata* L.), 别名卷心菜、包菜、莲花白等,为十字花科芸薹属的一年生或两年生的草本植物^[1],原产于地中海,在 16

世纪中叶从南北两路传入中国,现中国各地均有栽培。甘蓝叶具有清利湿热,散结止痛,抗肿瘤等作用^[2]。育苗是蔬菜种植的首要步骤,对提高蔬菜产

收稿日期:2025-08-13;修回日期:2026-05-08

基金项目:国家重点研发计划(2021YFD1600302)

作者简介:马 玲,女,在读硕士研究生,研究方向为设施蔬菜栽培。E-mail: 1329310443@qq.com

通信作者:李建设,男,教授,研究方向为冷凉干旱区蔬菜节水高效栽培。E-mail: jslnxcn@163.com

量和品质至关重要^[3]。传统育苗方式存在劳动强度大、效率低等问题^[4-5]，而集约化穴盘育苗作为一种机械化、规模化的育苗方式，具有占地面积小、节省育苗时间、提高育苗质量、适于大规模生产和机械化移栽等优势^[6]，且可实现全年持续供应。

夏季集约化育苗时易出现昼夜温度均较高、温差小等问题，导致幼苗徒长，影响幼苗质量^[7]。徒长苗茎秆细弱、节间过长、叶片薄弱、颜色浅绿、根系不发达等，定植后缓苗慢，会导致产量降低^[8]。

因此，为了实现集约化育苗的全年生产以及早熟丰产的目标，需要控制幼苗徒长并培育健壮的幼苗，这是实现高效育苗，促进农业发展的关键^[9]。当前生产上应用最多、见效最快的抑制徒长的方法是应用植物生长抑制剂。植物生长抑制剂可增加植株茎粗、缩短节间长度^[10]。常见的植物生长抑制剂有叶绿精、多效唑、烯效唑、比久、矮壮素、缩节胺等^[11-12]，可通过影响植物内源激素的合成及运输从而控制植物枝梢与叶片生长，达到控制植物生长、矮化植株的目的^[13]。李明玉等^[14]研究表明，高浓度叶绿精（高效三元复合肥料）会抑制植物生长，可作为激素类生长抑制剂的替代营养调控方案，但未明确具体用量。

随着我国劳动力的日益匮乏，“机器人”已成为农业发展的必然趋势，蔬菜种植作为一项劳动密集型产业，已成为我国农业机械化应用的重要领域^[15-16]。移栽是甘蓝机械化生产环节中最重要的一环，不仅影响定植后的成活率，也对甘蓝植株生长有较大影响^[17]。在农业生产中，若甘蓝苗过高、冠幅过宽或锥角过大，易导致拖苗、挂苗或卡苗；若根系过长、过短或根坨完整性差，则易出现裸苗、埋苗或成苗不能带坨出土等问题，对机械化移栽质量和定植成活率产生不利影响^[18-19]。因此，适宜机械化移栽的甘蓝壮苗并非越小越好，而应兼具株型紧凑、根系发育良好、根坨完整、散坨率低和生理活力较强等特征。

植物生长抑制剂现已大量应用于实际生产中，但在防止甘蓝幼苗徒长方面的研究较少。本研究通过比较不同激素类植物生长抑制剂种类、浓度以及不同叶绿精浓度对甘蓝幼苗生长发育的影响，以期为防止幼苗徒长、培育适于机械化移栽的甘蓝幼苗提供技术和理论支持。

1 材料与方法

试验于 2024 年 5—10 月在宁夏贺兰县园艺产

业园科研开发区智能玻璃温室内进行。

1.1 材料

供试甘蓝品种为 YR 中甘 21[中蔬种业科技(北京)有限公司]；育苗基质(草炭:蛭石:珍珠岩=3:1:1, 体积比)购自宁夏中青生物科技有限公司。

激素类植物生长抑制剂:多效唑(有效成分为 15%多效唑,可湿性粉剂,四川润尔科技有限公司)、烯效唑(有效成分为 5%烯效唑,可湿性粉剂,四川润尔科技有限公司)和比久(有效成分为 50%比久,可溶粉剂,四川润尔科技有限公司)。

高效三元复合肥料:叶绿精(N、P、K 质量比为 15:10:15),农友种苗(中国)有限公司。

1.2 试验设计

试验采用随机区组设计,植物生长抑制剂浓度参考前期预试验结果(未发表)及在园艺作物上的常用浓度。以喷施清水为对照(CK),共 13 个处理,详见表 1。采用 128 孔穴盘育苗,每处理 3 盘,3 次重复。待甘蓝幼苗 1 叶 1 心时叶面喷施 1 次植物生长抑制剂。药剂喷施设备为手持压力式喷雾器,施药量以甘蓝幼苗叶片刚滴水为宜,喷药宜选在晴朗无风天的早晨。处理间设置隔离屏障,避免不同植物生长抑制剂以及同一植物生长抑制剂不同浓度间产生交叉影响^[20]。

表 1 试验设计
Table 1 Experiment design

处理 Treatment	试剂 Reagent	$\rho/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$
CK	清水 Water	0
T1	叶绿精	20
T2	Chlorophyll	30
T3		40
T4	多效唑	150
T5	Diazinon	300
T6		450
T7	烯效唑	20
T8	Ethylene zinc	40
T9		60
T10	比久	1500
T11	Bijiu	2500
T12		3500

1.3 指标测定

1.3.1 甘蓝幼苗形态指标 喷施后第 4、8、12、16 天随机选取 10 株甘蓝幼苗测量株高和下胚轴长度,喷施后第 16 天测定展幅。以幼苗茎部露出土表位置到幼苗最高点的垂直高度为株高;以植株茎基部至子叶节之间的距离为下胚轴长度;以苗冠水

平投影面的平均长为展幅。喷施后第16天,拍摄甘蓝幼苗表型特征图片,之后用清水洗净甘蓝幼苗根部基质,尽量不破坏根系完整性,用根系扫描仪(LA-S植物根系分析仪,杭州万深检测科技有限公司)测定幼苗根总长、根总表面积和根总体积。

1.3.2 甘蓝幼苗壮苗指数、根冠比 喷施后第16天将甘蓝幼苗分为地上部和地下部,分别称量鲜质量;随后置于烘箱中105℃杀青15 min,于75℃烘干至恒质量,准确称量地上部、地下部及全株干质量。计算干质量根冠比、鲜质量根冠比与壮苗指数^[21]。干质量根冠比可作为评价根系与地上部生长协调性的主要指标,鲜质量根冠比为辅助指标。

壮苗指数=(茎粗/株高+地下部干质量/地上部干质量)×全株干质量。(1)

鲜质量根冠比=地下部鲜质量/地上部鲜质量。(2)

干质量根冠比=地下部干质量/地上部干质量。(3)

1.3.3 甘蓝幼苗散坨率的测定 喷施后第16天参照唐玉新等^[22]的方法测定散坨率,即在苗盘浇水2~3 h后,随机选取20株甘蓝幼苗,将测试钵苗自60 cm处释放,自由落体至符合田间机械移栽条件的地面,收集散坨质量,散坨质量与原坨质量比≥20%的植株为散坨株。统计散坨株数,并计算散坨率,散坨率=散坨株数/供试总株数×100%。幼苗的散坨率<20%时适宜机械化移栽。

1.3.4 甘蓝幼苗生理指标的测定 喷施后第16天,采用氯化三苯基四氮唑(TTC)还原法^[23]测定幼苗根系活力;采用紫外分光光度法^[24]测定过氧化氢酶(CAT)活性;采用愈创木酚法^[25]测定过氧化物酶(POD)活性;采用氮蓝四唑法^[26]测定超氧化物歧化酶(SOD)活性;采用蒽酮比色法^[26]测定可溶性糖含量;采用硫代巴比妥酸显色法^[27]测定丙二醛(MDA)含量。

甘蓝叶片叶绿素相对含量以SPAD值表示。喷施后第16天,在每个处理穴盘相同位置随机选取长势均匀一致的甘蓝幼苗,使用便携式SPAD叶绿素仪(SPAD-502Plus,上海沪粤明科学仪器有限公司)测定第2片完全展开真叶的叶绿素相对含量;每片叶避开主脉选取3个位置测量并取平均值,每个处理3次重复。

喷施后第16天测定甘蓝叶片叶绿素荧光参数。在各处理穴盘相同区域取样,选取长势均匀一致的3株甘蓝幼苗,使用OS-1P型叶绿素荧光仪(OPTI-sciences,北京华仪通泰环保科技有限公司)

在第2片真叶叶脉两侧位置测定。测量前叶片暗处理30 min,避开叶脉测量初始荧光参数(F_0)、最大荧光参数(F_m)、最大光化学效率(F_v/F_m)和光化学猝灭系数(qP),每个处理3次重复。

1.4 数据分析

采用Excel 2016进行数据统计;采用SPSS 19.0进行数据分析。

2 结果与分析

2.1 不同处理对甘蓝幼苗生长指标的影响

不同植物生长抑制剂处理的甘蓝幼苗表型特征如图1所示。CK甘蓝幼苗株高较高、展幅较大。与CK相比,各植物生长抑制剂处理甘蓝幼苗株高和展幅均受到不同程度抑制,其中T4、T5、T6、T9和T12处理株型较为紧凑,株高和展幅较小,T6处理株高和展幅最小。

2.1.1 不同处理对甘蓝幼苗株高与下胚轴长的影响 由表2可知,喷施不同植物生长抑制剂后4~16 d,CK株高均最高。喷施后4、8、12 d,各叶绿精处理(T1、T2、T3)株高与CK差异均不显著。喷施后16 d,叶绿精处理株高整体较高,说明叶绿精对株高抑制作用较弱。喷施后8、12、16 d,多效唑处理(T4、T5、T6)株高均较低,说明多效唑对株高的抑制效果较强。喷施后16 d,T6处理株高最低,为4.10 cm,较CK显著降低了38.75%。

由表2可知,与CK相比,喷施不同植物生长抑制剂对甘蓝幼苗下胚轴长影响较大。喷施后4~16 d,CK下胚轴长均最长;叶绿精处理下胚轴长均较长,说明其对下胚轴伸长的抑制作用较弱;多效唑处理下胚轴长整体均较短,说明其抑制效果较强。喷施后16 d,T6处理下胚轴长最短,为1.60 cm,较CK显著缩小21.18%,对甘蓝幼苗下胚轴伸长的抑制作用最强。

2.1.2 不同处理对甘蓝幼苗展幅的影响 由图2可知,喷施植物生长抑制剂后甘蓝幼苗展幅均较CK降低。T1处理展幅较高,与CK差异不显著;多效唑处理展幅整体较低,说明多效唑对展幅的抑制效果较强。T6处理展幅最低,较CK显著降低37.42%,对甘蓝幼苗展幅的抑制作用最强。需要指出的是,适宜机械化移栽的幼苗并非越小越好,应与壮苗指数、根坨完整性和根系活力等指标综合评价。

2.1.3 不同处理对甘蓝幼苗干质量、鲜质量及根冠比的影响 根冠比是反映植物根系与地上部分生长协调的重要指标。由表3可知,喷施植物生长抑



图1 不同处理甘蓝幼苗的表型特征

Fig. 1 Phenotypic characteristics of cabbage seedlings under different treatments

制剂后甘蓝幼苗地上部鲜质量均较 CK 显著降低; T3、T8、T12 处理地下部鲜质量均显著低于 CK, 其中 T3 处理地下部鲜质量最低, 为 0.127 g。T4、T5、T6、T9 处理鲜质量根冠比均显著高于 CK, T5、T6 处理较高, 均为 0.15。T3、T4、T5、T6、T8、T9、T12 处理地上部干质量均显著低于 CK; T3、T8、T9、T12 处理地下部干质量均显著低于 CK。干质量根冠比 T4 处理最高, 为 0.13, T4、T5、T6 处理均显著高于 CK, 说明其根系与地上部干物质分配更协调。

2.1.4 不同处理对甘蓝幼苗壮苗指数和散坨率的影响 壮苗指数是评价幼苗质量的重要指标, 可综合反映幼苗生长状况。由表 4 可知, T2、T6 处理壮苗指数均高于 CK, 其中 T6 处理最高, 为 0.10, 显著高于 T4、T8、T9、T12 处理。根据大田全自动移栽机和半自动移栽机实际操作需求, 散坨率 < 20% 的幼苗适合机械化移栽。由表 4 可知, 所有处理散坨率均 < 20%, 其中 T6 处理散坨率最低, 为 10.41%, T2、T3、T5、T10 处理散坨率也均较低, 均 < 12.00%, 说明其根坨完整性较好。

2.2 不同处理对甘蓝幼苗生理指标的影响

由表 5 可知, T8~T12 处理甘蓝幼苗叶片 CAT 活性均显著高于 CK, 其中 T10、T11 处理 CAT 活性较高, 分别为 $1\,162.19$ 、 $1\,110.45\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$, 较 CK 分别显著增高 32.73%、26.82%, 说明其清除

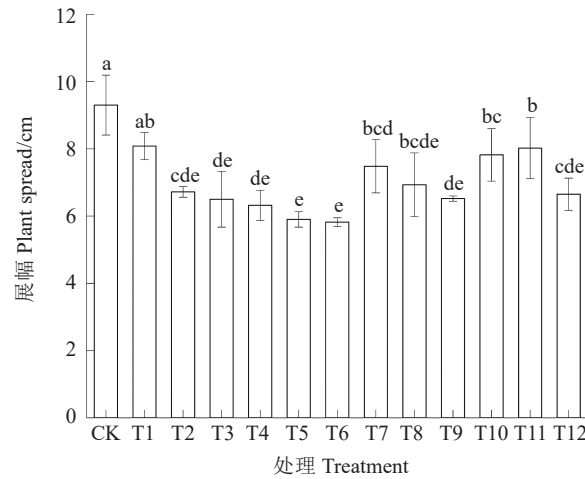
过氧化氢的能力较强; T1、T5、T6 处理 CAT 活性均显著低于 CK, 其中 T5 处理最低, 为 $740.30\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$, 较 CK 显著降低 15.45%。T1、T2、T3、T4 处理 POD 活性均显著高于 CK, 分别为 $2\,825.87$ 、 $2\,716.42$ 、 $2\,736.32$ 、 $2\,577.11\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$, 较 CK 分别增高 15.45%、10.98%、11.79%、5.28%, 说明其过氧化物清除能力较强; T8、T9、T10、T11 处理 POD 活性均显著低于 CK, 其中 T10 处理最低, 为 $2\,228.86\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$, 较 CK 降低了 8.94%。CK 甘蓝幼苗叶片 SOD 活性最高, T7 处理显著低于 CK, 为 $678.96\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$, 较 CK 降低 6.09%, 其他处理与 CK 差异均不显著。

由表 5 可知, T2、T3、T10、T11、T12 处理甘蓝幼苗叶片可溶性糖含量均显著高于 CK, 其中 T11 处理最高, 为 3.30%, 较 CK 增加 1.11 百分点; T6 处理最低, 为 1.89%, 较 CK 显著降低 0.30 百分点。MDA 含量越高, 说明甘蓝幼苗膜脂过氧化程度越高、抗氧化保护能力越弱。CK 的 MDA 含量 (b, 后同) 最高, 为 $2.26\text{ nmol}\cdot\text{g}^{-1}$; 除 T9 处理与 CK 差异不显著外, 其他处理 MDA 含量均显著低于 CK, 其中 T12、T2 处理较低, 分别为 1.25 、 $1.65\text{ nmol}\cdot\text{g}^{-1}$, 较 CK 分别降低 44.69%、26.99%。不同植物生长抑制剂对甘蓝幼苗 SPAD 值影响不同, T1、T2、T3、T4、T5、T6、T7 处理均显著高于 CK, 其中 T6 处理最高,

表 2 不同处理对甘蓝幼苗株高、下胚轴长的影响
Table 2 Effects of different treatments on plant height and hypocotyl length of cabbage seedlings

指标 Indicator	处理 Treatment	处理后时间 Post-treatment time/d			
		4	8	12	16
株高 Plant height/cm	CK	4.97±0.29 a	6.13±1.00 a	7.10±0.70 a	8.77±0.64 a
	T1	4.83±0.15 a	5.83±0.68 ab	6.63±0.68 ab	7.73±0.78 ab
	T2	4.80±0.10 ab	5.53±0.38 ab	6.23±0.25 abc	7.13±0.45 bc
	T3	4.63±0.15 abc	5.20±0.20 abc	6.03±0.12 abcd	6.63±0.12 bcd
	T4	4.27±0.40 cd	4.40±0.52 cde	5.23±1.69 bcde	5.43±0.57 ef
	T5	4.17±0.31 cde	4.27±0.40 cde	4.37±1.24 de	4.73±0.15 fg
	T6	3.73±0.12 e	3.80±0.20 e	3.87±0.59 e	4.10±0.20 g
	T7	4.10±0.10 de	4.87±0.49 bcd	6.13±0.06 abc	6.57±0.86 cde
	T8	4.00±0.10 de	4.30±0.61 cde	5.43±0.35 abcde	5.73±1.07 def
	T9	3.93±0.06 de	4.07±0.46 de	4.57±0.15 cde	5.17±0.21 fg
	T10	4.33±0.32 bcd	5.67±0.25 ab	6.67±0.47 ab	7.07±0.06 bc
	T11	4.23±0.35 cd	4.97±0.65 bcd	5.83±1.46 abcd	6.53±0.65 cde
下胚轴长 Hypocotyl length/cm	CK	1.87±0.06 a	1.93±0.06 a	1.97±0.06 a	2.03±0.06 a
	T1	1.77±0.06 ab	1.83±0.06 ab	1.90±0.00 ab	1.93±0.06 b
	T2	1.73±0.06 bc	1.77±0.06 bc	1.87±0.06 ab	1.90±0.00 bc
	T3	1.70±0.00 bc	1.73±0.06 bc	1.83±0.06 b	1.87±0.06 bc
	T4	1.63±0.06 cd	1.67±0.06 cd	1.67±0.06 de	1.70±0.00 de
	T5	1.53±0.06 de	1.57±0.06 de	1.60±0.10 de	1.63±0.06 ef
	T6	1.43±0.06 e	1.47±0.06 e	1.57±0.06 e	1.60±0.00 f
	T7	1.70±0.00 bc	1.77±0.06 bc	1.83±0.06 b	1.87±0.06 bc
	T8	1.67±0.06 bc	1.73±0.12 bc	1.80±0.00 bc	1.83±0.06 c
	T9	1.63±0.06 cd	1.67±0.06 cd	1.70±0.00 cd	1.73±0.06 d
	T10	1.73±0.06 bc	1.83±0.06 ab	1.87±0.06 ab	1.90±0.00 bc
	T11	1.67±0.06 bc	1.80±0.00 b	1.83±0.06 b	1.87±0.06 bc
	T12	1.63±0.06 cd	1.77±0.06 bc	1.80±0.00 bc	1.83±0.06 c

注:不同小写字母表示同一时期不同处理在 0.05 水平差异显著。
Note: Different small letters indicate significant difference among different treatments at 0.05 level at the same stage.



注:不同小写字母表示不同处理在 0.05 水平差异显著。下同。
Note: Different small letters indicate significant difference among different treatments at 0.05 level . The same below.

图 2 不同处理对甘蓝幼苗展幅的影响
Fig. 2 Effects of different treatments on the spread of cabbage seedlings

表 3 不同处理对甘蓝幼苗干质量、鲜质量及根冠比的影响

Table 3 Effects of different treatments on dry mass, fresh mass and root-shoot ratio of cabbage seedlings						
处理 Treatment	地上部鲜质量 Shoot fresh mass/g	地下部鲜质量 Underground fresh mass/g	鲜质量根冠比 Fresh root-shoot ratio	地上部干质量 Shoot dry mass/g	地下部干质量 Underground dry mass/g	干质量根冠比 Dry root-shoot ratio
CK	2.46±0.15 a	0.203±0.006 a	0.08±0.01 c	0.207±0.012 a	0.020±0.000 a	0.08±0.01 bc
T1	1.94±0.11 b	0.197±0.006 ab	0.10±0.01 bc	0.193±0.006 a	0.013±0.006 ab	0.07±0.03 bc
T2	1.78±0.09 bc	0.167±0.035 abcd	0.09±0.02 c	0.190±0.020 a	0.017±0.006 ab	0.09±0.02 bc
T3	1.26±0.11 e	0.127±0.015 d	0.10±0.01 bc	0.143±0.006 bc	0.010±0.000 b	0.10±0.01 b
T4	1.25±0.16 e	0.157±0.012 abcd	0.13±0.02 ab	0.127±0.015 c	0.020±0.000 a	0.13±0.01 a
T5	1.15±0.31 e	0.173±0.047 abcd	0.15±0.03 a	0.117±0.025 c	0.017±0.006 ab	0.12±0.01 a
T6	1.29±0.15 e	0.197±0.006 ab	0.15±0.02 a	0.143±0.012 bc	0.020±0.000 a	0.12±0.01 a
T7	1.73±0.21 bcd	0.163±0.015 abcd	0.09±0.02 c	0.173±0.015 ab	0.017±0.006 ab	0.09±0.01 bc
T8	1.38±0.18 cde	0.153±0.015 bcd	0.11±0.00 bc	0.120±0.010 c	0.010±0.000 b	0.10±0.01 b
T9	1.33±0.24 e	0.187±0.015 abc	0.14±0.02 a	0.123±0.015 c	0.010±0.000 b	0.09±0.01 bc
T10	1.93±0.09 b	0.190±0.017 abc	0.10±0.01 bc	0.207±0.055 a	0.013±0.006 ab	0.07±0.02 c
T11	1.90±0.20 b	0.170±0.030 abcd	0.09±0.01 c	0.177±0.025 ab	0.013±0.006 ab	0.08±0.01 bc
T12	1.34±0.35 de	0.147±0.040 cd	0.11±0.01 bc	0.137±0.031 bc	0.010±0.000 b	0.09±0.01 bc

注:不同小写字母表示不同处理在 0.05 水平差异显著。下同。
Note: Different small letters indicate significant difference among different treatments at 0.05 level. The same below.

表 4 不同处理对甘蓝幼苗壮苗指数和散坨率的影响
Table 4 Effects of different treatments on seedling vigor index and substrate-scattering rate of cabbage seedlings

处理 Treatment	壮苗指数 Seedling vigor index	散坨率 Substrate- scattering rate/%
CK	0.08±0.01 ab	16.52±1.56 ab
T1	0.08±0.02 ab	13.14±2.69 abc
T2	0.09±0.02 ab	11.39±0.42 c
T3	0.07±0.01 ab	11.57±1.24 c
T4	0.07±0.00 b	13.36±3.98 abc
T5	0.08±0.02 ab	11.85±0.48 c
T6	0.10±0.00 a	10.41±0.53 c
T7	0.08±0.02 ab	13.98±0.98 abc
T8	0.06±0.01 b	16.79±2.65 a
T9	0.07±0.01 b	12.07±3.52 c
T10	0.08±0.02 ab	11.11±0.96 c
T11	0.08±0.01 ab	12.63±1.02 bc
T12	0.06±0.02 b	12.10±0.92 c

为 47.33,较 CK 增大 40.03%。

2.3 不同处理对甘蓝幼苗叶片叶绿素荧光参数的影响

由表 6 可知,T8 处理甘蓝幼苗叶片初始荧光参数(F_0)和最大荧光参数(F_m)均最高,且均显著高于 CK。T6 处理甘蓝幼苗叶片最大光化学效率(F_v/F_m)最高,但除显著高于 T12 外,与其他处理差异均不显著。CK 甘蓝幼苗叶片光化学猝灭系数(qP)最高,显著高于 T1、T2、T3、T4、T8、T10 处理。

2.4 不同处理对甘蓝幼苗根系活力的影响

由图 3 可知,除 T1 处理外,其他处理甘蓝幼苗根系活力均显著高于 CK。其中,T6 处理根系活力最高,为 $0.97\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$,CK 的根系活力最低,仅为 $0.16\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

3 讨论与结论

本试验探究了不同植物生长抑制剂处理对甘蓝幼苗生长、生理特性和机械化移栽适配性的影响。结果表明,30 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 叶绿精(T2)和 450 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 多效唑(T6)综合表现较优,二者均可在甘蓝幼苗 1 叶 1 心期有效缓解徒长并改善机械化移栽适配性。其中,T2 处理壮苗指数较高、散坨率较低,POD 活性较强,说明其在保持根坨完整性和增强幼苗抗氧化能力方面具有优势;T6 处理对株高、下胚轴长和展幅的抑制作用最明显,同时 SPAD 值、根系活力以及壮苗指数均最高,散坨率最低,说明其更有利于形成株型紧凑、根系活力较强且适宜机械化移栽的甘蓝壮苗。因此,T2 和 T6 处理并非单纯依靠降低幼苗大小发挥作用,而是通过株型、生物量、根坨稳定性和生理活性等多方面共同改善幼苗质量。

从形态指标看,T6 处理显著降低了甘蓝幼苗株高、下胚轴长和展幅,与 CK 相比,株高、下胚轴、展幅分别显著降低了 38.75%、21.18%、37.42%,说明 450 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 多效唑对甘蓝幼苗地上部生长的抑制作用最强。适宜机械化移栽的幼苗要求株型紧凑、苗

表 5 不同处理对甘蓝幼苗生理指标的影响

Table 5 Effects of different treatments on physiological indexes of cabbage seedlings

处理 Treatment	过氧化氢酶活性 CAT activity/ (U·g ⁻¹ ·min ⁻¹)	过氧化物酶活性 POD activity/ (U·g ⁻¹ ·min ⁻¹)	超氧化物歧化酶活性 SOD activity/ (U·g ⁻¹ ·h ⁻¹)	w(可溶性糖) Soluble sugar content/%	b(丙二醛) MDA content/ (nmol·g ⁻¹)	SPAD 值 SPAD value
CK	875.62±24.86 e	2447.76±29.85 d	722.99±17.79 a	2.19±0.09 de	2.26±0.08 a	33.80±3.24 d
T1	748.26±13.79 f	2 825.87±17.23 a	715.33±26.41 ab	2.03±0.09 ef	1.90±0.00 bc	41.47±1.85 bc
T2	851.74±18.24 e	2 716.42±59.70 b	715.33±13.58 ab	2.46±0.09 c	1.65±0.02 e	41.13±1.19 bc
T3	847.76±31.59 e	2 736.32±45.60 b	707.04±9.05 ab	3.14±0.07 ab	1.99±0.02 b	41.23±0.57 bc
T4	851.74±24.86 e	2 577.11±17.23 c	709.59±5.85 ab	2.17±0.08 de	1.86±0.02 c	43.50±1.56 ab
T5	740.30±11.94 f	2 417.91±59.70 def	708.95±11.70 ab	2.28±0.13 cd	1.67±0.03 e	41.47±3.04 bc
T6	744.28±13.79 f	2 417.91±29.85 def	717.25±16.28 ab	1.89±0.11 f	1.90±0.02 bc	47.33±1.74 a
T7	867.66±18.24 e	2 457.71±17.23 d	678.96±5.85 b	2.34±0.08 cd	1.71±0.06 e	41.07±1.63 bc
T8	967.16±11.94 d	2 358.21±29.85 ef	704.48±11.49 ab	2.27±0.09 d	1.82±0.02 cd	36.03±2.66 cd
T9	1 058.71±30.05 c	2 248.76±45.60 g	720.44±3.98 a	1.93±0.03 f	2.18±0.03 a	39.10±2.26 bcd
T10	1 162.19±24.86 a	2 228.86±34.47 g	691.72±38.73 ab	2.99±0.06 b	1.90±0.05 bc	35.07±4.26 d
T11	1 110.45±23.88 b	2 348.26±45.60 f	687.89±22.35 ab	3.30±0.07 a	1.72±0.12 de	35.20±1.05 d
T12	927.36±6.89 d	2 427.86±34.47 de	691.08±15.32 ab	3.16±0.18 ab	1.25±0.04 f	38.80±6.06 bcd

表 6 不同处理对甘蓝幼苗叶绿素荧光参数的影响

Table 6 Effects of different treatments on chlorophyll fluorescence parameters of cabbage seedlings

处理 Treatment	初始荧光参数 F_o	最大荧光参数 F_m	最大光化学效率 F_v/F_m	光化学猝灭系数 qP
CK	349.67±14.57 g	1 426.00±324.56 f	0.79±0.01 ab	0.40±0.07 a
T1	410.33±12.66 ef	1 970.67±37.22 de	0.79±0.01 ab	0.26±0.03 cd
T2	370.67±6.51 fg	1 779.33±40.82 e	0.79±0.01 ab	0.30±0.03 bcd
T3	499.33±20.21 b	2 486.67±198.03 ab	0.79±0.01 ab	0.26±0.05 cd
T4	517.67±30.86 b	2 324.67±26.76 bc	0.80±0.01 ab	0.30±0.06 bcd
T5	494.00±8.89 bc	1 931.67±78.93 de	0.79±0.01 ab	0.33±0.05 abc
T6	403.33±7.57 efg	2 038.67±57.13 d	0.80±0.01 a	0.34±0.05 abc
T7	361.00±11.53 fg	1 972.33±70.53 de	0.79±0.01 ab	0.33±0.03 abc
T8	582.00±10.15 a	2 625.00±51.03 a	0.79±0.01 ab	0.24±0.01 d
T9	431.33±22.14 de	1 975.33±57.46 de	0.80±0.01 ab	0.34±0.02 abc
T10	440.00±2.65 cde	2 090.00±42.14 cd	0.79±0.01 ab	0.30±0.04 bcd
T11	514.33±7.51 b	2 479.67±60.71 ab	0.79±0.00 ab	0.36±0.03 ab
T12	477.33±82.08 bcd	1 967.33±68.81 de	0.78±0.00 b	0.35±0.05 ab

冠不过度扩展、下胚轴不过长,以减少拖苗、挂苗和卡苗风险。本研究中 T6 处理能够明显压低株高和展幅,与隗正阳等^[28]、王婧等^[29]多效唑可抑制作物茎秆伸长的研究结果一致。这可能与多效唑可抑制赤霉素生物合成、降低细胞伸长速率有关^[30-31]。T2 处理对下胚轴长和展幅的抑制作用弱于 T6,但散坨率较低,说明 30 mg·L⁻¹ 叶绿精对甘蓝壮苗质量的提升可能更多体现在根坨完整性和生理抗性改善,而不是强烈矮化株型。

从鲜质量、干质量和根冠比来看,植物生长抑制剂处理后甘蓝幼苗地上部鲜质量均显著低于 CK,说明各处理均在一定程度上限制了地上部过快

生长。但地上部生物量降低并不等同于壮苗质量提高,还需结合根系生长和根冠协调性综合判断。T6 处理鲜质量和干质量根冠比均显著高于 CK,表明 450 mg·L⁻¹ 多效唑在抑制地上部生长的同时,促进了根系生长,使根系与地上部生长协调。研究表明,适宜浓度的多效唑均可抑制一串红伸长生长并提高根冠比^[32-33],与本研究结果一致。T2 处理干质量根冠比虽不及 T6 突出,但其散坨率较低,说明 30 mg·L⁻¹ 叶绿精可能主要通过改善根坨质量来提升机械化移栽适配性。

从抗氧化酶活性、可溶性糖和 MDA 含量来看, T2 处理 POD 活性、可溶性糖含量均显著高于 CK,

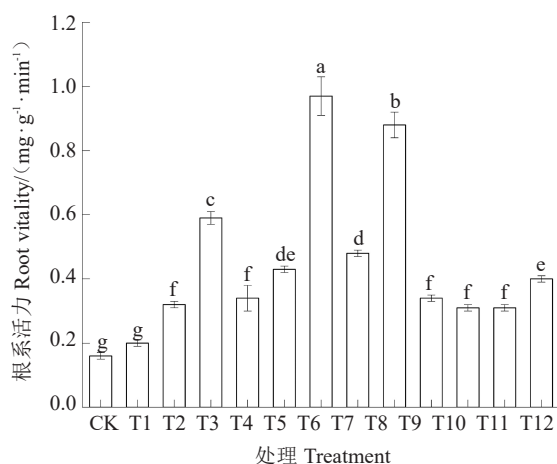


图3 不同处理对甘蓝幼苗根系活力的影响

Fig. 3 Effects of different treatments on root vitality of cabbage seedlings

MDA 含量较低,显著低于 CK,表明该浓度叶绿精有利于增强过氧化物清除能力、减轻膜脂过氧化程度并可使植株光合碳代谢旺盛,物质积累增强。

从 SPAD 值和叶绿素荧光参数来看,T6 处理 SPAD 值最高,较 CK 显著增大 40.03%,最大光化学效率(F_v/F_m)也最高,但除显著高于 T12 外,与其他处理差异均不显著,说明 450 mg·L⁻¹多效唑处理在提高叶绿素相对含量的同时,未对 PSII 潜在光化学效率造成明显抑制。钟舒豪等^[34]对桉树苗木的研究也表明,适宜浓度的多效唑可提高桉树苗木 SPAD 值。T2 处理 F_v 和 F_v/F_m 与 CK 差异均不显著,但其 POD 活性较高、MDA 含量较低,说明 T2 处理更可能通过提高抗氧化保护能力维持叶片功能。

从根系活力看,T6 处理根系活力最强,说明其在抑制地上部徒长的同时维持了较强的根系功能。陈晓娜等^[35]研究表明,适宜浓度的多效唑可改善羊柴根系形态并提高根系活力。这与本研究多效唑可提高根系活力的结果一致。

综上,在本试验条件下,不同植物生长抑制剂处理均可不同程度地抑制甘蓝幼苗徒长。壮苗指数和散坨率是评价甘蓝幼苗机械化移栽适配性的重要指标。T2、T6 处理壮苗指数较高,分别为 0.09、0.10,散坨率分别为 11.39%、10.41%,均显著低于 CK 且低于 20%,表明根坨完整性和移栽机适配性较好。T6 处理对株高、下胚轴长和展幅的抑制效果最显著,可使株型更紧凑并降低机械化移栽过程中的“卡苗”风险。T2 处理 POD 活性较高,T6 处理 SPAD 值最高、根系活力最强,说明二者分别在抗氧

化能力和根系生理活性方面表现出优势。综上,甘蓝幼苗 1 叶 1 心期叶面喷施 1 次 30 mg·L⁻¹叶绿精或 450 mg·L⁻¹多效唑,可有效抑制徒长并培育适宜机械化移栽的壮苗。

参考文献

- [1] 邓耀华,黄兴学,周国林,等.武汉地区春夏甘蓝栽培技术要点[J].长江蔬菜,2021(22):61-62.
- [2] 俞晓琴.甘蓝营养价值及春季栽培技术[J].上海蔬菜,2011(5):27-28.
- [3] 郭孟报,杨明金,刘斌,等.我国蔬菜育苗产业现状及发展动态[J].农机化研究,2015,37(1):250-253.
- [4] 蒋卓华.温室钵苗移栽机的优化设计及移栽过程力学分析[D].杭州:浙江大学,2017.
- [5] Choudhary V, Machavaram R. Need of automation in paddy nurseries for raising paddy seedlings in india: A review[J]. Journal of Biosystems Engineering, 2022, 47(2):209-222.
- [6] 杨先超,马月虹.设施内蔬菜机械化育苗移栽的现状与发展趋势[J].农机化研究,2022,44(7):8-13.
- [7] 张剑,隋艳晖.抑制穴盘苗徒长的环境调控技术[J].农业工程技术(温室园艺),2006(11):42-43.
- [8] 张志刚,董春娟,尚庆茂.蔬菜幼苗徒长防控操作技术规程[J].中国园艺文摘,2017,33(10):64-66.
- [9] 梁欢,葛米红,王德欢,等.3 种生长调节剂对辣椒穴盘苗株型调控的效果分析[J].长江蔬菜,2020(22):14-16.
- [10] 董志君,张建军,范永明,等.3 种植物生长延缓剂对盆栽芍药的矮化效应[J].东北林业大学学报,2020,48(9):62-66.
- [11] Desta B, Amare G. Paclobutrazol as a plant growth regulator[J]. Chemical and Biological Technologies in Agriculture, 2021, 8(1):1.
- [12] Khalilzadeh R, Sharifi R S, Jalilian J. Antioxidant status and physiological responses of wheat (*Triticum aestivum* L.) to cycocel application and bio fertilizers under water limitation condition[J]. Journal of Plant Interactions, 2016, 11(1):130-137.
- [13] Gaspar T, Kevers C, Penel C, et al. Plant hormones and plant growth regulators in plant tissue culture[J]. In *Vitro Cellular and Developmental Biology-Plant*, 1996(32):272-289.
- [14] 李明玉,刘彩霞.“三精”肥料效果奇妙[J].石河子科技,2002(6):39-40.
- [15] 糜南宏,赵映,秦广明,等.蔬菜全程机械化研究现状与对策[J].中国农机化学报,2014,35(3):66-69.
- [16] Liu Q H, Zhou X B, Li J L, et al. Effects of seedling age and cultivation density on agronomic characteristics and grain yield of mechanically transplanted rice[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1):14072.
- [17] 张兆辉,田守波,陈春宏,等.适合机械化移栽的甘蓝植株形态特征研究[J].上海农业学报,2021,37(5):101-107.
- [18] 刘明峰,胡先朋,廖宜涛,等.不同油菜品种适栽期机械化移栽植株形态特征研究[J].农业工程学报,2015,31(增刊 1):79-88.

- [19] 张浩然,高艳明,李建设,等.不同菌剂处理下甘蓝幼苗对机械化移栽的适配性研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2025,53(1):122-132.
- [20] 许丽娟.生长抑制剂对大叶黄杨枝叶生长的生理调控机制[D].北京:北京林业大学,2020.
- [21] 葛晓光.果菜壮苗指标研究的概况[J].中国蔬菜,1987(1):32-34.
- [22] 唐玉新,曲萍,陆岱鹏,等.适合机械化移栽的番茄穴盘育苗基质配方筛选[J].江苏农业学报,2017,33(6):1342-1348.
- [23] 张永平.季米里亚捷夫农学院植物生理学实验指导[J].植物生理学通讯,1957(6):45-75.
- [24] 蔡永萍.植物生理学实验指导[M].北京:中国农业大学出版社,2014.
- [25] 赵立琴(Arun Sebastian).干旱胁迫对大豆抗旱生理指标及产量和品质影响[D].哈尔滨:东北农业大学,2014.
- [26] 李合生.植物生理生化实验原理与技术[M].北京:高等教育出版社,2000.
- [27] 高俊凤.植物生理学实验指导[M].北京:高等教育出版社,2006.
- [28] 隗正阳,周霞丽,石明权,等.初花期喷施多效唑对芝麻生长发育及产量的影响[J].种业导刊,2025(3):57-61.
- [29] 王婧,石文鑫,孙瑞卿,等.喷施不同植物生长调节剂及其浓度对燕麦倒伏性及产量的影响[J/OL].作物杂志,1-9(2025-12-03)[2026-05-25].<https://link.cnki.net/urlid/11.1808.s.20251203.1525.004>.
- [30] 童忠骞,刘春,房世明,等.多效唑浸种对盐胁迫下辣椒幼苗生长效应及其生理机制研究[J].廊坊师范学院学报(自然科学版),2025,25(4):89-95.
- [31] 周晓红,齐军航.不同浓度多效唑对比对甜瓜幼苗质量的影响[J].河南农业,2025(9):20-21.
- [32] 贺茵莹,孙振元,葛红.植物生长延缓剂在观赏植物上的应用研究[J].农学报,2018,8(6):53-57.
- [33] 毛龙生,高勇,姚亚英,等.PP333、B9、CCC对盆栽一串红矮化效应研究[J].园艺学报,1991,18(2):177-179.
- [34] 钟舒豪,洪浩彬,杨柳辉,等.多种生长调节剂对桉树苗木矮化效果[J].林业科技通讯,2024(9):66-71.
- [35] 陈晓娜,高永,党晓宏,等.植物延缓剂对盐碱胁迫下羊柴幼苗根系形态的影响[J].水土保持研究,2017,24(4):187-190.