

吴金怡, 常静静, 朱雪梅, 李静, 陈潇, 宋钊, 陈雷, 涂攀峰, 张白鸽. 生物刺激素对冬瓜幼苗生长的影响 [J]. 广东农业科学, 2025, 52 (1): 49–59.
WU Jinyi, CHANG Jingjing, ZHU Xuemei, LI Jing, CHEN Xiao, SONG Zhao, CHEN Lei, TU Panfeng, ZHANG Baige. Effects of biostimulants on the growth of wax gourd seedlings [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2025, 52 (1): 49–59.

生物刺激素对冬瓜幼苗生长的影响

吴金怡^{1,2}, 常静静², 朱雪梅², 李静², 陈潇², 宋钊², 陈雷², 涂攀峰¹, 张白鸽²

(1. 仲恺农业工程学院园艺园林学院, 广东 广州 510225; 2. 广东省农业科学院蔬菜研究所 / 广东省蔬菜新技术研究重点实验室, 广东 广州 510640)

摘要:【目的】筛选出有利于培育冬瓜壮苗的生物刺激素, 并确定最适宜的使用浓度。【方法】以‘铁柱 2 号’黑皮冬瓜为试验材料, 研究 8 种生物刺激素 (海藻精、海藻肥、多肽、褐藻寡糖、黄腐酸、虾红素、虾青素和乳糖肽) 对冬瓜幼苗质量的影响, 通过测定不同生物刺激素种类及浓度处理下冬瓜幼苗的壮苗指数和根系活力, 筛选出最适宜的生物刺激素浓度进行后续试验, 再对不同生物刺激素处理下冬瓜幼苗根系形态、叶面积、叶绿素含量等生理指标进行主成分分析, 对 8 种生物刺激素促进冬瓜幼苗生长的能力进行分析。【结果】适宜浓度的生物刺激素能显著提高冬瓜幼苗的生长质量, 表现为株高、茎粗、根系生长和光合能力的提升。0.2 g/L 褐藻寡糖为最佳处理, 该处理冬瓜幼苗的茎粗、株高、根体积、叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量和叶面积分别比对照提高 15.03%、43.42%、359.41%、121.62%、61.11% 和 58.30%。0.5 g/L 黄腐酸和 0.5 g/L 乳糖肽处理表现次优, 根系活力比对照提高 185.16% 和 14.34%、叶面积增加 50.04% 和 27.79%、叶绿素 a+b 总量提高 54.05% 和 51.35%。主成分分析结果表明, 各处理对冬瓜幼苗的促生效果表现为 0.2 g/L 褐藻寡糖 (得分 0.97) > 0.5 g/L 黄腐酸 (0.64) > 0.5 g/L 乳糖肽 (0.62), 显著优于对照 (0.10)。【结论】适宜浓度的生物刺激素能显著提高冬瓜幼苗的壮苗指数和根系活力, 其中褐藻寡糖在 0.2 g/L 浓度下效果最佳, 黄腐酸和乳糖肽在 0.5 g/L 浓度下表现出良好的壮苗效果。

关键词: 生物刺激素; 褐藻寡糖; 黄腐酸; 乳糖肽; 冬瓜; 育苗; 壮苗指数

中图分类号: S642.3

文献标志码: A

文章编号: 1004-874X (2025) 01-0049-11

Effects of Biostimulants on the Growth of Wax Gourd Seedlings

WU Jinyi^{1,2}, CHANG Jingjing², ZHU Xuemei², LI Jing², CHEN Xiao², SONG Zhao²,
CHEN Lei², TU Panfeng¹, ZHANG Baige²

(1. College of Horticulture and Landscape Architecture, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China; 2. Vegetable Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences / Guangdong Key Laboratory of Vegetable New Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: 【Objective】The study aims to identify biostimulants conducive to the cultivation of robust wax gourd seedlings and to determine the optimal concentration for their application. 【Method】The black wax gourd ‘Tiezhu 2’ was used as experimental material, the effects of eight biostimulants (seaweed extract, seaweed fertilizer, polypeptide, alginate oligosaccharide, fulvic acid, canthaxanthin, astaxanthin and lactosyl peptide) on the quality of wax gourd seedlings were studied. By measuring the seedling strength index and root vitality of plants under different types and concentrations of biostimulants,

收稿日期: 2024-08-18

基金项目: 广东省乡村振兴战略专项种业振兴行动项目 (2023-NJS-00-010); 国家大宗蔬菜产业技术体系广州综合试验站项目 (CARS-23-G50)

作者简介: 吴金怡 (2000—), 女, 在读硕士生, 研究方向为蔬菜品质改良, E-mail: 1404520290@qq.com

通信作者: 涂攀峰 (1982—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为园艺植物营养与栽培, E-mail: tupanfeng@163.com

the most suitable concentration of biostimulant was selected for subsequent experiments. The physiological indicators including root morphology, leaf area, and chlorophyll content of wax gourd seedlings under different biostimulant treatments were analyzed by principal component analysis, and the capacity of the 8 biostimulants in promoting the growth of wax gourd seedlings was ranked. 【Result】 Biostimulants with suitable concentrations could significantly improve the growth quality of wax gourd seedlings, as manifested by an increase in plant height, stem thickness, root system growth and photosynthetic capacity. Among them, the optimal treatment of 0.2 g/L alginate oligosaccharide significantly increased the stem thickness, plant height, root volume, chlorophyll a, chlorophyll b and leaf area of wax gourd seedlings by 15.03%, 43.42%, 359.41%, 121.62%, 61.11%, and 58.30% respectively compared with those of the control. In addition, the 0.5 g/L fulvic acid and 0.5 g/L lactosyl peptide treatments performed suboptimally, increasing root vitality by 185.16% and 14.34%, respectively, leaf area by 50.04% and 27.79%, respectively, and total chlorophyll a+b content by 54.05% and 51.35%, respectively. The results of the principal component analysis showed that the growth-promoting effects of different treatments on wax gourd seedlings ranked as: alginate oligosaccharide 0.2 g/L (score 0.97) > fulvic acid 0.5 g/L (0.64) > lactosyl peptide 0.5 g/L (0.62), which were significantly better than the control (0.10). 【Conclusion】 The biostimulants with optimal concentrations could significantly improve the seedling strength index and root vitality of wax gourd seedlings, the effect of alginate oligosaccharide was the best at 0.2 g/L, and fulvic acid and lactosyl peptide also showed good growth-promoting effect at a concentration of 0.5 g/L.

Key words: biostimulant; alginate oligosaccharide; fulvic acid; lactosyl peptide; wax gourd; seedling cultivation; seedling strength index

【研究意义】冬瓜〔*Benincasa hispida* (Thunb) Cogn〕起源于中国南部和东印度,是我国重要的经济作物之一^[1]。作为一种耐贮藏、经济效益高的蔬菜作物,冬瓜在我国广泛种植,其播种面积占全球总面积的 50%^[2]。在蔬菜产业中,育苗移栽是提高作物成活率和产量的重要环节。然而,冬瓜育苗期多处于早春或晚秋,温度波动频繁,易导致幼苗生长受阻,抗逆性降低,影响移栽成活率及产量品质^[3]。环境温度变化不仅会抑制幼苗的根系发育,还会降低光合效率,导致幼苗茎秆细弱、抗逆性下降^[4]。因此,通过科学手段培育根系发达、茎秆健壮的壮苗,对提升冬瓜种植效益至关重要。此外,优化冬瓜育苗技术能有效提高农业生产效率,促进农业向高效、绿色和可持续方向发展。【前人研究进展】生物刺激素是一类天然生物活性物质,具有促进植物生长、提高抗逆性、改善品质等功能,且对环境无负面影响^[5-6]。生物刺激素种类繁多,主要包括氨基酸类、多糖类、有机酸类等,不同类型的生物刺激素具有不同的生物活性和应用场景^[7-10]。例如,氨基酸类生物刺激素能够增强植物对营养物质的吸收^[8],多糖类生物刺激素则有助于植物根系发育^[9],而有机酸类生物刺激素能够改善土壤结构^[10]。因此,生物刺激素

的选用和使用方式应根据植物种类和生长阶段进行科学调整。研究表明,生物刺激素可以显著提高作物的产量和品质,如氨基酸类生物刺激素能促进小麦分蘖并增加穗粒数^[11-12],多糖类生物刺激素能提高番茄果实的品质和产量^[13-14]。同时,生物刺激素在提高植物抗逆性方面发挥了显著作用。黄腐酸和褐藻寡糖能显著增强植物的抗旱性和抗病性,促进植物在非生物胁迫下的发育^[15-17];海藻精和海藻肥则通过增强植物的渗透调节系统和光合作用能力,显著提高植物生物量,降低 MDA 的积累,缓解膜脂过氧化,从而提高植物抗逆性^[18];虾青素通过增强植物的抗氧化能力、调节基因生物合成途径,有效减轻植物的胁迫损伤^[19-20]。因此,合理应用生物刺激素不仅可以提升作物的产量和品质,还能增强其对病虫害和环境压力的抵抗力,对农业的可持续发展具有重要意义。越来越多的研究表明,生物刺激素在促进幼苗生长方面也展现出显著效果,尤其在育苗阶段的应用表现出积极作用。在水稻幼苗的培育中,适宜浓度的腐殖酸和多肽能够促进幼苗生长,通过增强光合作用和渗透调节系统,提高秧苗质量^[21-22]。在番茄幼苗研究中,Dong 等^[23]使用 Radifarm、Acadian 等生物刺激素促进幼苗生长;在高温胁迫下,方雪娟等^[24]通过混

合使用多效唑(0.2 g/L)、氨基酸类生物刺激素(0.6 g/L)和海藻类生物刺激素(1.4 g/L),显著降低了番茄幼苗的热害指数,有效提高了幼苗质量;李思琦等^[25]通过使用0.1 g/L矿源黄腐酸处理番茄幼苗取得类似效果。在小油菜研究中,生物刺激素与有机肥的联合使用比单独使用有机肥或生物刺激素更能显著改善作物的生长表现^[26]。上述研究表明,不同作物对生物刺激素的适宜种类和浓度需求各异,且存在明显的剂量效应,使用不当可能导致生长抑制,因此需根据作物特性合理调整生物刺激素的使用。【本研究切入点】关于冬瓜壮苗培育过程中生物刺激素类型及施用浓度的系统性研究尚不充分,这在一定程度上限制了生物刺激素在冬瓜育苗中的有效应用。为深入探讨这一问题,本研究选取8种不同类型的生物刺激素,系统评估其在不同浓度下对冬瓜幼苗生长的影响,旨在筛选出适合冬瓜壮苗培育的生物刺激素,并确定其最佳施用浓度。【拟解决的关键问题】通过应用生物刺激素优化冬瓜育苗技术,不仅为冬瓜壮苗的培育提供科学依据,也为冬瓜产业的绿色可持续发展提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验设计

供试品种为广东大型黑皮冬瓜‘铁柱二号’,由广东科农蔬菜种业有限公司提供。8种供试生物刺激素分别为海藻精(领先生物农业股份有限公司)、海藻肥(阿卡迪安肥料上海有限公司)、多肽(启藤科技北京有限公司)、褐藻寡糖(青岛博智汇力生物科技有限公司)、黄腐酸(以色列海法化学工业集团有限公司)、虾红素(蔚蓝生物股份有限公司)、虾青素(山东微研生物科技有限公司)和乳糖肽(成武县浩城生物科技有限公司),由广东省农业科学院蔬菜研究所提供。育苗基质为广东省生升农业有限公司产品。

试验于2023年6—7月在广东省农业科学院蔬菜研究所大丰试验基地育苗大棚内进行。生物刺激素浓度参考各公司提供的适宜施用浓度设置,每种生物刺激素均设4个浓度,其中海藻精、海藻肥、黄腐酸和乳糖肽设置浓度为2.0、1.0、0.5、0.25 g/L,虾红素、虾青素设置浓度为2.5、1.25、

0.5、0.25 g/L,褐藻寡糖设置浓度为0.5、0.2、0.1、0.05 g/L,多肽设置浓度为5.0、2.0、0.67、0.33 g/L。试验共设置33个处理,以未施加生物刺激素、仅使用清水进行相同灌溉处理为对照。每个处理3次重复,每个重复50株苗。

取健康饱满的冬瓜种子在2%次氯酸钠溶液中消毒,用蒸馏水冲洗5遍,将种子表面水分擦干,用蒸馏水浸泡6 h,之后于30~32℃催芽,以种子“露白”为萌发标准。将3 L基质、1 L生物刺激素溶液(按上述浓度)充分拌均,装入穴盘(50孔)中,随后播种。幼苗生长期间每隔7 d浇灌1 L生物刺激素,共浇灌3次。

1.2 测定指标及方法

1.2.1 株高和茎粗 冬瓜种子播种后约25 d,每个处理随机选取5株长势一致的幼苗,使用游标卡尺测量茎粗,使用直尺测量株高,拍照记录幼苗整体生长状况。

1.2.2 鲜质量、干质量和壮苗指数 每个处理随机选取5株长势一致的幼苗,用千分之一天平称量幼苗地上部和根系鲜质量;然后放入烘箱中烘干至恒重,称量样品干质量,壮苗指数=(茎粗/株高+根系干质量/地上部干质量)×全株干质量。

1.2.3 根系构型参数和叶面积 每个处理随机选取5株长势一致的幼苗,将根系和叶片洗净后,利用Microtek扫描仪器(ScanMaker i800 Plus,中国)对根系形态和叶片进行扫描,分别记录和分析根长、根表面积、根尖数和总叶面积。

1.2.4 根系活力 采用TTC还原法^[27]测定根系活力,步骤如下:称取0.5 g根尖样品,加入10 mL 0.4% TTC和磷酸缓冲液(1/15 mol/L, pH 7.0)的等量混合液,37℃下暗培养1.5 h,加入2 mL 1 mol/L硫酸,停止反应;取出根系,擦干表面水分,加入3~4 mL乙酸乙酯,在研钵内研磨成匀浆;用乙酸乙酯定容至10 mL,然后在波长485 nm下比色。用不同浓度的TTC作标准曲线,用四氮唑还原量计算根系活力($\mu\text{g/g} \cdot \text{h}$, Fw)。

1.2.5 叶绿素提取和测定 参考Arnon^[28]的方法略加修改,提取并测定叶绿素含量。选取幼苗生长点以上第2片真叶,避开叶脉,用打孔器(直径0.2 cm)将冬瓜叶片打成大小一致的小圆片,

称取 0.15 g 放入 25 mL 具塞刻度试管中, 加入 20 mL 95% 乙醇, 盖上塞子, 室温下暗处浸提至叶片发白, 然后用 95% 乙醇定容至 25 mL, 利用酶标仪在波长 665、649 处测定 OD 值, 计算公式如下:

$$C_a \text{ (mg/L)} = 13.95 \times A_{665} - 6.88 \times A_{649}$$

$$C_b \text{ (mg/L)} = 24.96 \times A_{649} - 7.32 \times A_{665}$$

$$\text{Chl a (mg/g)} = (C_a \times V_t) / (F_w \times 1000)$$

$$\text{Chl b (mg/g)} = (C_b \times V_t) / (F_w \times 1000)$$

式中, A_{665} 、 A_{649} 分别表示在波长 665、649 nm 处的吸光度 (OD 值), Chl a、Chl b 分别表示叶绿素 a、叶绿素 b, V_t 表示溶液总体积, F_w 代表样品的鲜质量。

1.3 数据分析

利用 SPSS 19.0 软件对试验数据进行统计分析, 采用 Duncan 检验法进行差异显著性分析及相关性分析, 不同字母表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著, 利用 Excel 2021 作图。

采用隶属函数对冬瓜幼苗不同处理的各项生理指标进行综合评价, 隶属函数值的计算方法为:

$$\mu(X_i) = (X_{ij} - X_{jmin}) / (X_{jmax} - X_{jmin})$$

式中, X_{ij} 表示根据主成分分析计算所得的综合指标值 j , X_{jmax} 和 X_{jmin} 分别表示为 j 指标的最大值和最小值。权重计算公式为:

$$W_i = P_i / (\sum_{j=1}^n P_j) \quad i = 1, 2, \dots$$

式中, P_i 为主成分分析第 i 个公因子对全部综合指标的贡献率。综合评价 D 的计算公式为:

$$D = \sum_{j=1}^n [\mu(X_i) \times W_i] \quad i = 1, 2, \dots$$

2 结果与分析

2.1 不同生物刺激素处理对冬瓜壮苗指数和根系活力的影响

由表 1 可知, 不同生物刺激素种类及浓度处理对冬瓜幼苗生长的影响表现出差异性。总体上, 随着生物刺激素浓度的降低, 冬瓜幼苗各项生长指标表现出一定的变化趋势, 表明每种生物刺激素处理存在一个适宜的浓度范围, 在此范围内生物刺激素能显著促进冬瓜幼苗生长。在所有处理中, 海藻精 0.5 g/L、海藻肥 0.5 g/L、黄腐酸 0.5 g/L、乳糖肽 0.5 g/L、虾红素 0.25 g/L、虾青素 0.5 g/L、褐藻寡糖 0.2 g/L、多肽 0.67 g/L 处理

的冬瓜幼苗, 其表现优于同组其他浓度处理, 且显著高于对照。与对照相比, 海藻精 0.5 g/L、海藻肥 0.5 g/L、黄腐酸 0.5 g/L、乳糖肽 0.5 g/L、虾红素 0.25 g/L、虾青素 0.5 g/L、褐藻寡糖 0.2 g/L、多肽 0.67 g/L 处理的冬瓜幼苗, 其茎粗和株高分别增加 13.47% 和 32.27%、10.54% 和 33.81%、12.67% 和 69.94%、9.72% 和 11.56%、9.72% 和 3.36%、21.80% 和 33.81%、15.03% 和 43.42%、14.57% 和 22.45%; 根和地上部干质量分别增加 66.93%、68.55%、128.23%、54.84%、37.9%、95.16%、96.77% 和 78.23%。

进一步分析发现, 不同生物刺激素的种类及浓度对冬瓜幼苗壮苗指数和根系活力的影响也表现出明显差异。随着生物刺激素浓度的降低, 冬瓜的壮苗指数和根系活力先上升后下降, 进一步验证了生物刺激素在适宜浓度范围内能显著促进冬瓜幼苗的生长。海藻精 0.5 g/L、海藻肥 0.5 g/L、黄腐酸 0.5 g/L、乳糖肽 0.5 g/L、虾红素 0.25 g/L、虾青素 0.5 g/L、褐藻寡糖 0.2 g/L、多肽 0.67 g/L 处理冬瓜幼苗的壮苗指数和根系活力均显著优于同组其他浓度处理, 且均显著高出对照 31.88% 和 151.76%、15.94% 和 40.65%、34.78% 和 185.16%、28.99% 和 14.34%、20.29% 和 14.32%、23.19% 和 143.12%、40.58% 和 0.23%、33.33% 和 153.76%。综上所述, 筛选出以下最适宜的生物刺激素浓度培育冬瓜壮苗: 海藻精 0.5 g/L、海藻肥 0.5 g/L、黄腐酸 0.5 g/L、乳糖肽 0.5 g/L、虾红素 0.25 g/L、虾青素 0.5 g/L、褐藻寡糖 0.2 g/L 和多肽 0.67 g/L, 并以此浓度展开后续试验。

2.2 不同生物刺激素处理对冬瓜幼苗根系的影响

由表 2 可知, 不同生物刺激剂处理对冬瓜幼苗根长、根面积和根体积均表现出不同程度的促进作用。与对照相比, 海藻精 0.5 g/L、海藻肥 0.5 g/L、黄腐酸 0.5 g/L、乳糖肽 0.5 g/L、虾红素 0.25 g/L、虾青素 0.5 g/L、褐藻寡糖 0.2 g/L 和多肽 0.67 g/L 处理的根系长度分别增长 65.05%、40.46%、67.97%、34.37%、34.47%、32.86%、64.48% 和 19.00%。海藻精 0.5 g/L、海藻肥 0.5 g/L、黄腐酸 0.5 g/L、乳糖肽 0.5 g/L 和褐藻寡糖 0.2 g/L 处理对冬瓜幼苗的根面积有显著的促进作用,

表 1 不同生物刺激素处理对冬瓜壮苗指数和根系活力的影响

Table 1 Effects of different biostimulant treaments on the seedling strength index and root vitality of wax gourd							
处理 Treatment	浓度 Concentration (g/L)	茎粗 Stem thickness (mm)	株高 Plant height (cm)	根干质量 Root dry weight (g)	地上部干质量 Above ground dry weight (g)	壮苗指数 Seedling strength index	根系活力 Root vatality (μg/g·h, Fw)
对照 Control	0	5.15 ± 0.12kl	14.97 ± 1.29j	0.22 ± 0.01bcdefg	1.02 ± 0.16m	0.69 ± 0.04g	102.70 ± 5.20ghijk
海藻精 Seaweed extract	2.0	4.70 ± 0.26m	16.77 ± 0.25hij	0.24 ± 0.03bcde	1.09 ± 0.18lm	0.68 ± 0.11g	74.23 ± 2.42jklm
	1.0	5.85 ± 0.11bcdefg	21.23 ± 2.53cd	0.22 ± 0.02bcdefg	1.92 ± 0.16defghijk	0.84 ± 0.07defg	76.07 ± 4.70jklm
	0.5	5.84 ± 0.46bcdefg	19.8 ± 1.67cdefg	0.26 ± 0.02b	1.81 ± 0.24efghijk	0.91 ± 0.05bcdef	258.48 ± 6.04b
	0.25	6.01 ± 0.50abcde	18.77 ± 0.97efgh	0.22 ± 0.07bcdefg	1.61 ± 0.42jk	0.83 ± 0.18defg	78.90 ± 4.52jklm
海藻肥 Seaweed fertilizer	2.0	5.27 ± 0.17ijkl	19.53 ± 2.16defg	0.26 ± 0.02bcd	2.06 ± 0.26defghij	0.92 ± 0.17bcde	96.00 ± 2.26ghijkl
	1.0	5.72 ± 0.90bcdefg	21.47 ± 0.93cd	0.23 ± 0.02bcdef	1.88 ± 0.22defghijk	0.82 ± 0.06defg	97.67 ± 4.20ghijkl
	0.5	5.69 ± 0.12cdefgh	21.03 ± 0.47cde	0.21 ± 0.02bcdefgh	1.88 ± 0.10defghijk	0.80 ± 0.05defg	144.41 ± 25.44de
	0.25	5.15 ± 0.12kl	14.97 ± 1.29j	0.22 ± 0.01bcdefg	1.02 ± 0.16m	1.23 ± 0.06a	91.37 ± 6.71ghijkl
黄腐酸 Fulvic acid	2.0	5.03 ± 0.12lm	21.20 ± 1.80cde	0.17 ± 0.04fghi	2.08 ± 0.48defghij	0.73 ± 0.17fg	88.34 ± 8.01ghijklm
	1.0	5.68 ± 0.15defgh	19.67 ± 2.40defg	0.21 ± 0.02bcdefgh	2.33 ± 0.47abcd	0.96 ± 0.08bed	72.28 ± 4.35klm
	0.5	5.80 ± 0.38bcdefg	25.47 ± 0.72a	0.26 ± 0.03bc	2.57 ± 0.25abc	0.93 ± 0.02bcde	293.18 ± 58.14a
	0.25	5.59 ± 0.30fghij	20.50 ± 0.10cdef	0.19 ± 0.01cdefgh	1.66 ± 0.17ijk	0.72 ± 0.06fg	196.79 ± 20.35c
乳糖肽 Lactosyl peptide	2.0	5.31 ± 0.20hijkl	16.43 ± 1.25ij	0.16 ± 0.02ghi	1.95 ± 0.13defghijk	0.85 ± 0.06defg	69.47 ± 2.93lm
	1.0	6.17 ± 0.30ab	21.07 ± 0.75cde	0.22 ± 0.03bcdefg	2.60 ± 0.08abc	1.06 ± 0.01b	56.04 ± 2.26m
	0.5	5.65 ± 0.13efghi	16.70 ± 0.82hij	0.21 ± 0.03bcdefgh	1.71 ± 0.11ghijk	0.89 ± 0.05bcdef	117.43 ± 5.32efg
	0.25	5.63 ± 0.09efghij	19.63 ± 1.22defg	0.22 ± 0.02bcdefg	1.76 ± 0.08fghijk	0.82 ± 0.09defg	86.38 ± 4.11ghijklm
虾红素 Canthaxanthin	2.5	6.08 ± 0.33abcd	20.73 ± 1.72cde	0.15 ± 0.05hi	2.31 ± 0.34abcde	0.88 ± 0.17cdef	89.53 ± 7.05ghijkl
	1.25	6.14 ± 0.09ab	21.20 ± 1.39cde	0.22 ± 0.03bcdefg	2.66 ± 0.26ab	1.07 ± 0.05b	106.28 ± 6.22ghij
	0.5	5.79 ± 0.17bcdefg	20.90 ± 0.46cde	0.19 ± 0.02defghi	1.99 ± 0.53defghijk	0.81 ± 0.16defg	85.93 ± 2.06ghijklm
	0.25	5.65 ± 0.13efghi	15.47 ± 1.90j	0.19 ± 0.03cdefgh	1.52 ± 0.50kl	0.84 ± 0.07defg	117.40 ± 8.31efg
虾青素 Astaxanthin	2.5	6.09 ± 0.14abc	22.17 ± 1.20bc	0.20 ± 0.01cdefgh	2.13 ± 0.05cdefghi	0.85 ± 0.06defg	81.55 ± 1.06ijklm
	1.25	5.65 ± 0.18efghi	21.33 ± 1.35cd	0.22 ± 0.04bcdefg	2.78 ± 0.08a	1.04 ± 0.08bc	138.11 ± 19.98def
	0.5	6.27 ± 0.27a	21.03 ± 0.87cde	0.12 ± 0.08hi	2.30 ± 0.35bcde	0.85 ± 0.10defg	249.67 ± 30.14b
	0.25	5.23 ± 0.14jkl	19.00 ± 1.11defgh	0.18 ± 0.03efghi	1.98 ± 0.04defghijk	0.8 ± 0.09defg	191.62 ± 25.39c
褐藻寡糖 Alginate oligosaccharide	0.5	5.11 ± 0.13kl	15.30 ± 0.82j	0.19 ± 0.04efghi	1.67 ± 0.17hijk	0.83 ± 0.09defg	112.20 ± 5.76fghi
	0.2	5.93 ± 0.34abcdef	21.47 ± 1.00cd	0.26 ± 0.02bc	2.18 ± 0.01bcdefgh	0.97 ± 0.07bed	102.94 ± 2.91ghijk
	0.1	5.42 ± 0.22ghijk	20.70 ± 0.75cde	0.23 ± 0.01bcdef	1.91 ± 0.36defghijk	0.83 ± 0.10defg	114.50 ± 4.48efgh
	0.05	5.11 ± 0.13kl	14.97 ± 0.55j	0.22 ± 0.06bcdefg	1.52 ± 0.18kl	0.84 ± 0.09defg	67.70 ± 2.25lm
多肽 Polypeptide	5.0	5.65 ± 0.18efghi	23.83 ± 0.76ab	0.18 ± 0.03fghi	2.24 ± 0.08bcdef	0.76 ± 0.05efg	159.98 ± 28.56c
	2.0	5.58 ± 0.29fghij	20.77 ± 0.21cde	0.22 ± 0.01bcdefgh	1.98 ± 0.11defghijk	0.83 ± 0.07defg	82.46 ± 5.77hijklm
	0.67	5.90 ± 0.31abcdef	18.33 ± 0.76fghi	0.19 ± 0.02cdefgh	2.02 ± 0.14defghijk	0.92 ± 0.06bcde	260.93 ± 27.62b
	0.33	6.01 ± 0.15abcde	18.10 ± 0.78ghi	0.20 ± 0.02bcdefgh	1.87 ± 0.24defghijk	0.91 ± 0.13bcdef	153.83 ± 25.35c

注：同列数据后小写英文字母不同者表示差异显著（ $P<0.05$ ）
Note: Different lowercase letters in the same column indicated significant differences ($P<0.05$).

表 2 不同生物刺激素处理对冬瓜幼苗根系的影响

Table 2 Effects of different biostimulant treatments on the root system of wax gourd seedlings			
处理 Treatment	根长 Root length (cm)	根面积 Root area (cm ²)	根体积 Root volume (cm ³)
对照 Control	105.3 ± 54.5b	11.4 ± 7.1c	0.2 ± 0.2c
海藻精 0.5 g/L Seaweed extract 0.5 g/L	173.8 ± 34.3a	20.0 ± 4.8b	0.6 ± 0.2b
海藻肥 0.5 g/L Seaweed fertilizer 0.5 g/L	147.9 ± 14.6a	21.2 ± 1.4a	0.9 ± 0.4a
黄腐酸 0.5 g/L Fulvic acid 0.5 g/L	176.8 ± 29.9a	20.3 ± 3.1a	0.5 ± 0.1c
乳糖肽 0.5 g/L Lactosyl peptide 0.5 g/L	141.5 ± 24.3a	22.8 ± 1.1a	1.0 ± 0.1a
虾红素 0.5 g/L Canthaxanthin 0.5 g/L	141.6 ± 26.0a	15.5 ± 1.5c	0.4 ± 0.1c
虾青素 0.25 g/L Astaxanthin 0.25 g/L	139.9 ± 25.0a	16.7 ± 7.3c	0.5 ± 0.4c
褐藻寡糖 0.2 g/L Alginate oligosaccharide 0.2 g/L	173.2 ± 38.1a	26.1 ± 2.7a	1.1 ± 0.3a
多肽 0.67 g/L Polypeptide 0.67 g/L	125.3 ± 9.8a	13.4 ± 0.3c	0.2 ± 0.1c

注：同列数据后小写英文字母不同表示差异显著（ $P<0.05$ ）。
Note: Different lowercase letters in the same column indicated significant differences ($P<0.05$).

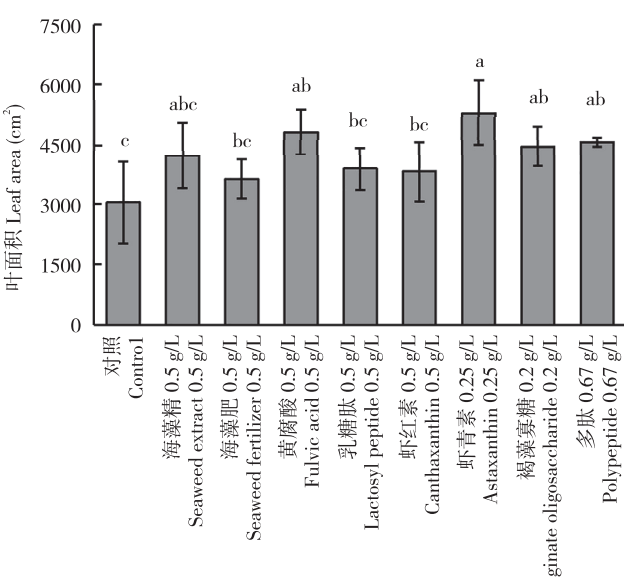
分别比对照增加 75.44%、85.96%、77.63%、100.00% 和 128.95%；虾红素 0.25 g/L、虾青素 0.5 g/L 和多肽 0.67 g/L 处理分别较对照增加 36.05%、46.49% 和 17.54%，但差异不显著。海藻精 0.5 g/L、海藻肥 0.5 g/L、乳糖肽 0.5 g/L 和褐藻寡糖 0.2 g/L 处理对冬瓜幼苗的根体积有显著的增长作用，较对照分别增加 160.68%、288.13%、298.81% 和 359.41%；而黄腐酸 0.5 g/L、虾红素 0.25 g/L、虾青素 0.5 g/L 和多肽 0.67 g/L 处理对根体积无显著促进作用。

2.3 不同生物刺激素处理对冬瓜幼苗叶面积的影响

由图 1 发现，适宜浓度的生物刺激素处理对冬瓜幼苗叶面积均有显著的促进作用，其中以虾青素 0.5 g/L 处理效果最为突出，与对照相比冬瓜叶面积增加 74.25%，显著高于其他处理组；褐藻寡糖 0.2 g/L 和黄腐酸 0.5 g/L 处理组次之，与对照相比分别提高 58.30% 和 50.04%；海藻精 0.5 g/L、多肽 0.67 g/L、乳糖肽 0.5 g/L 和虾红素 0.25 g/L 处理组增长幅度略低于前 3 组，但仍表现出显著差异，叶面积分别较对照增加 38.56%、46.32%、27.79% 和 25.40%。相较之下，海藻肥 0.5 g/L 处理冬瓜幼苗的叶面积增幅 19.25%，在所有处理中最低，但其效果仍显著高于对照。

2.4 不同生物刺激素处理对冬瓜幼苗叶片叶绿素含量的影响

由表 3 可知，与对照相比，不同生物刺激素



小写英文字母不同者表示差异显著（ $P<0.05$ ）

Different lowercase letters indicated significant differences ($P<0.05$)

图 1 不同生物刺激素处理对冬瓜幼苗叶面积的影响
Fig. 1 Effects of different biostimulant treatments on the leaf area of wax gourd seedlings

处理对冬瓜幼苗叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量、叶绿素 a+b 及叶绿素 a/b 影响不同。其中，黄腐酸 0.5 g/L、乳糖肽 0.5 g/L、虾青素 0.25 g/L、褐藻寡糖 0.2 g/L 和多肽 0.67 g/L 处理对冬瓜幼苗叶绿素含量均有显著的提升效果，叶绿素 a 和叶绿素 b 含量分别较对照提高 54.05% 和 33.33%、51.35% 和 38.89%、81.08% 和 50.00%、121.62% 和 61.11%；叶绿素 a+b 及叶绿素 a/b 增加 47.27% 和 21.21%、45.45% 和 14.14%、70.91% 和 24.75%、

表 3 不同生物刺激素处理对冬瓜幼苗叶片叶绿素含量的影响

Table 3 Effects of different biostimulant treaments on the chlorophyll content in wax gourd seedling leaves				
处理 Treatment	叶绿素 a 含量 Chlorophyll a content	叶绿素 b 含量 Chlorophyll b content	叶绿素 a+b 含量 Chlorophyll a+b content	叶绿素 a/b Chlorophyll a/b
对照 Control	0.37 ± 0.08e	0.18 ± 0.02d	0.55 ± 0.10e	1.98 ± 0.18d
海藻精 0.5 g/L Seaweedextract 0.5 g/L	0.34 ± 0.03e	0.17 ± 0.01d	0.51 ± 0.03c	2.05 ± 0.05cd
海藻肥 0.5 g/L Seaweedfertilizer 0.5 g/L	0.41 ± 0.02e	0.18 ± 0.01d	0.59 ± 0.03c	2.31 ± 0.10bcd
黄腐酸 0.5 g/L Fulvicacid 0.5 g/L	0.57 ± 0.11cd	0.24 ± 0.03c	0.81 ± 0.14b	2.40 ± 0.14bc
乳糖肽 0.5 g/L Lactopeptide 0.5 g/L	0.56 ± 0.02cd	0.25 ± 0.01bc	0.80 ± 0.01b	2.26 ± 0.21bcd
虾红素 0.5 g/L Canthaxanthin 0.5 g/L	0.44 ± 0.09de	0.19 ± 0.03d	0.63 ± 0.11c	2.30 ± 0.11bcd
虾青素 0.25 g/L Astaxanthin 0.25 g/L	0.67 ± 0.02bc	0.27 ± 0.01abc	0.94 ± 0.04ab	2.47 ± 0.03b
褐藻寡糖 0.2 g/L Brownalgaeligosaccharides 0.2 g/L	0.82 ± 0.12a	0.29 ± 0.03ab	1.11 ± 0.13a	2.89 ± 0.51a
多肽 0.67 g/L Polypeptide 0.67 g/L	0.76 ± 0.08ab	0.30 ± 0.03a	1.05 ± 0.12a	2.56 ± 0.01ab

注：同列数据后小写英文字母不同者表示差异显著（ $P<0.05$ ）。
Note: Different lowercase letters in the same column indicatea significant differences ($P<0.05$).

101.82% 和 45.96%、90.91% 和 29.29%；而海藻精 0.5 g/L、海藻肥 0.5 g/L、虾红素 0.5 g/L 处理对冬瓜幼苗叶片叶绿素含量无显著影响。

2.5 基于不同生物刺激素最优浓度对冬瓜幼苗影响的主成分分析

基于以上结果，对不同生物刺激素处理冬瓜幼苗叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量、叶绿素 a+b、叶绿素 a/b、叶面积、根长、根面积和根体积 8 个生理指标之间的相关性进行了分析，结果（表 4）表明，根长和根面积之间呈极显著正相关，根体积与根面积之间也表现出极显著正相关，

表明根系生长与其长度、面积及体积紧密相关。叶面积与各项叶绿素指标之间均表现出显著正相关，且叶绿素 a 含量和叶绿素 b 含量之间存在极显著正相关性。综上，根系的生长与叶绿素的合成之间存在密切的相关性。

为全面评价不同生物刺激素对冬瓜幼苗生长的影响，对上述 8 个生理指标进行了隶属函数分析， D 为综合评价得分， D 值越大，表示该生物刺激剂处理对冬瓜幼苗的促生效果越明显。表 5 显示，综合评价结果由低到高依次为对照、虾红素 0.5 g/L、多肽 0.67 g/L、海藻精 0.5 g/L、海藻

表 4 最优浓度生物刺激素处理冬瓜幼苗指标的相关矩阵

Table 4 Correlation matrix of indexes of wax gourd seedlings under optimal concentrations of biostimulant treatments								
指标 Index	根长 Root length	根面积 Root area	根体积 Root volume	叶面积 Leaf area	叶绿素 a 含量 Chlorophyll a content	叶绿素 b 含量 Chlorophyll b content	叶绿素 a+b 含量 Chlorophyll a+b content	叶绿素 a/b Chlorophyll a/b
根长 Root length	1							
根面积 Root area	0.781**	1						
根体积 Root volume	0.555	0.945**	1					
叶面积 Leaf area	0.468	0.222	0.029	1				
叶绿素 a 含量 Chlorophyll a content	0.137	0.270	0.202	0.651*	1			
叶绿素 b 含量 Chlorophyll b content	0.062	0.198	0.133	0.669*	0.978**	1		
叶绿素 a+b 含量 Chlorophyll a+b content	0.128	0.257	0.189	0.662*	0.999**	0.984**	1	
叶绿素 a/b Chlorophyll a/b	0.351	0.462	0.387	0.588*	0.916**	0.822**	0.903**	1

注：“*”表示显著相关，“**”表示极显著相关。
Note: “*” represented significant corelated, “**” represented extremely significant corelated.

表 5 不同生物刺激素处理对冬瓜幼苗 8 个生理指标的综合评价结果

处理 Treatment	X_{i1}	X_{i2}	μ_{i1}	μ_{i2}	D
对照 Control	-1.60	-0.92	0.00	0.309	0.10
海藻精 0.5 g/L Seaweedextract 0.5 g/L	-0.78	1.07	0.00	1.00	0.49
海藻肥 0.5 g/L Seaweedfertilizer 0.5 g/L	-0.52	1.05	0.10	1.00	0.54
黄腐酸 0.5 g/L Fulvicacid 0.5 g/L	0.40	0.26	0.47	0.71	0.64
乳糖肽 0.5 g/L Lactopeptide 0.5 g/L	0.15	0.60	0.77	0.83	0.62
虾红素 0.5 g/L Canthaxanthin 0.5 g/L	-0.71	-0.22	0.39	0.55	0.36
虾青素 0.2 g/L Astaxanthin 0.2 g/L	0.67	-0.85	1.00	0.32	0.57
褐藻寡糖 0.2 g/L Brownalgaoligosaccharides 0.2 g/L	1.73	0.77	1.00	0.85	0.97
多肽 0.67 g/L Polypeptide 0.67 g/L	0.69	-1.77	1.00	0.00	0.46

肥 0.5 g/L、虾青素 0.2 g/L、乳糖肽 0.5 g/L、黄腐酸 0.5 g/L、褐藻寡糖 0.2 g/L。综合得分最高的是 0.2 g/L 褐藻寡糖处理 (0.97)，其次是 0.5 g/L 黄腐酸 (0.64)，第三是 0.5 g/L 乳糖肽处理 (0.62)。

3 讨论

3.1 生物刺激素对冬瓜幼苗生长的影响

生物刺激素的施用浓度对冬瓜幼苗生长具有显著影响，在不同浓度下，其对植物生理过程的作用表现出差异性。适宜浓度的生物刺激素能显著提升幼苗的根系活力和地上部生长。在本研究中，褐藻寡糖在 0.2 g/L、黄腐酸和乳糖肽在 0.5 g/L 浓度下表现最佳。在此浓度下处理冬瓜幼苗，可有效促进植物根系的发育，增加叶面积和叶绿素含量，从而提高植株的光合作用效率和养分吸收能力。然而，过高或过低的浓度均可能抑制植物生长。在较高浓度下，海藻精和黄腐酸处理显著抑制了冬瓜幼苗的根系活力和壮苗指数，表明过高浓度的生物刺激素可能导致植株体内的代谢负荷过重，影响其正常生长发育，这与 Eduarda 等^[29]研究结果类似。在低浓度下，褐藻寡糖和乳糖肽对冬瓜幼苗的壮苗指数和根系活力具有抑制作用，这与 Wang 等^[30]“低浓度下褐藻寡糖能有效促进水稻根系的生长”的研究结果相反，这可能表明生物刺激素在不同作物中作用机制存在差异，其对不同作物的最适浓度与效果可能因作物生长环境、生理特性和品种不同而异。此外，本研究结果显示黄腐酸的最佳使用浓度为

0.5 g/L，浓度过低或过高均不能有效促进冬瓜幼苗生长，这与 Li 等^[31]研究结果一致，这可能是由于低浓度时刺激作用不足，高浓度则可能对植物产生胁迫效应，进而影响其正常代谢。因此，选择适宜的生物刺激素浓度对促进冬瓜幼苗健康生长至关重要。

3.2 生物刺激素对冬瓜幼苗根系生长的影响

根系作为植物获取水分和养分的主要器官，建立并保持健康发达的根系对地上部（茎、叶、果实）的正常发育至关重要^[32-33]。本研究发现，不同生物刺激素对冬瓜幼苗根系生长的促进作用存在显著差异。褐藻寡糖处理在促进冬瓜幼苗根长、根面积和根体积上表现突出，以上指标显著高于对照。根长增加意味着植株能更好地获取土壤中的水分和养分，而根面积和根体积的增大则进一步表明根系的吸收能力得到显著增强。褐藻寡糖的作用机制可能与其对植物根系 H⁺-ATP 酶活性的调节密切相关。已有研究表明，褐藻寡糖能够通过激活 H⁺-ATP 酶促进根细胞的离子交换和能量代谢，从而增强根系的水分和养分吸收能力^[34-37]。此外，乳糖肽、海藻肥和海藻精处理也显著促进了冬瓜幼苗根系的生长，尤其在促进根面积、根体积增长方面表现突出。乳糖肽可能通过调节植物内部激素（如生长素和细胞分裂素）水平来促进根系生长^[38]。海藻类生物刺激素富含多种生物活性物质，这些物质能够刺激根系生长并增强根系的吸收能力^[39]。黄腐酸则主要通过提高根长来促进根系的纵向生长，增加根系对

深层水分和养分的吸收能力^[40]。与上述处理相比,虾红素、虾青素和多肽对根系的促进效果较为有限,尽管它们在促进根长方面效果显著,但对根面积和根体积上未见显著影响,这可能与其在调节植物生长的机制方面有所不同,它们可能主要通过调节植物的抗逆性和生物防御机制来影响植物生长,因而对根系的直接促进作用较弱。

3.3 生物刺激素对冬瓜幼苗地上部生长的影响

植株的光合能力直接关系到地上部生长,叶片叶绿素含量和叶面积是影响植物光合作用效率和生物量积累的关键因素,也是衡量幼苗质量的重要指标^[41]。本研究结果表明,褐藻寡糖、黄腐酸和乳糖肽在提高叶绿素含量和叶面积方面均表现突出,能有效促进冬瓜幼苗地上部的生长。相关研究显示,黄腐酸、乳糖肽、虾红素、褐藻寡糖和多肽在促进叶片叶绿素含量方面效果显著,尤其是黄腐酸、乳糖肽和褐藻寡糖处理效果突出。进一步分析发现,褐藻寡糖、黄腐酸和乳糖肽处理不但可显著提高叶绿素 a+b 总量,还可显著提高叶绿素 a/b。叶绿素 a+b 总量的提高表明它们可能通过提升植物的光合作用效率促进植株生物量积累,进而促进植株生长。而叶绿素 a/b 的提高,可能意味着其在光合作用中对光能的吸收和转化更为高效。有研究证实,褐藻寡糖具有促进植物光合作用和提高叶绿素含量的作用^[42],褐藻寡糖可能通过增强叶绿体对光能的吸收与转化加速代谢过程,提高叶绿素含量。而黄腐酸则可能通过增强植株抗氧化酶系统的活性,从而减轻胁迫伤害、提高植株光合效率^[43]。目前针对乳糖肽在植物中的作用研究较少,尚缺乏直接证据支持其对光合作用或叶绿素含量的影响。

黄腐酸、乳糖肽和褐藻寡糖处理在促进植株叶面积生长上的效果也很显著。叶面积的显著增加能够为植物提供更大的光合表面积,从而增强光合能力,促进植物生物量的积累。乳糖肽处理对提高叶片叶绿素含量的促进作用显著,虽然叶面积增幅相对较小,表明乳糖肽可能通过增强光合作用而对植株生长产生间接影响。尽管虾青素处理能够促进叶片叶面积增加,但在提高叶绿素含量方面的效果并不显著,这可能表明该生物刺

激素能更好地增强植株抗逆性,而不是直接提升植株光合能力。

4 结论

适宜的生物刺激素处理能够显著提升冬瓜幼苗质量。通过试验筛选,确定最适宜的生物刺激素浓度为海藻精 0.5 g/L、海藻肥 0.5 g/L、黄腐酸 0.5 g/L、乳糖肽 0.5 g/L、虾红素 0.25 g/L、虾青素 0.5 g/L、褐藻寡糖 0.2 g/L 和多肽 0.67 g/L。褐藻寡糖 0.2 g/L、黄腐酸 0.5 g/L 和乳糖肽 0.5 g/L 能显著促进冬瓜幼苗的整体生长,且褐藻寡糖的促生效果最为显著,不仅在促进根系活力上表现突出,而且在提高叶面积和叶绿素含量方面显示出较好效果;黄腐酸和乳糖肽处理次之,其对冬瓜幼苗地上部生长的促进作用同样显著。综上,褐藻寡糖 0.2 g/L、黄腐酸 0.5 g/L 和乳糖肽 0.5 g/L 在冬瓜育苗中表现出明显优势,具有较好推广价值。

参考文献 (References):

- [1] 谢大森,江彪,刘文睿,薛舒丹,张白鸽. 优质、抗病冬瓜多样化育种研究进展[J]. 广东农业科学, 2020,47(11):50-59. DOI:10.16768/j.issn.1004-874X.2020.11.006.
XIE D S, JIANG B, LIU W R, XUE S D, ZHANG B G. Research progress on diversified breeding of high-quality and disease-resistant winter melo [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2020,47(11): 50-59. DOI: 10.16768/j.issn.1004-874X.2020.11.006.
- [2] 焦加斌,李金隆,郑朝元,谢大森,张白鸽. 减肥加镁对冬瓜产量及果实品质的影响[J]. 广东农业科学, 2021,48(9):124-132. DOI:10.16768/j.issn.1004-874X.2021.09.014.
JIAO J B, LI J L, ZHENG C Y, XIE D S, ZHANG B G. The effect of weight loss and magnesium addition on winter melon yield and fruit quality [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2021,48(9): 124-132. DOI: 10.16768/j.issn.1004-874X.2021.09.014.
- [3] 倪正斌,李建全,孙红芹,万林生,韩配配. 江苏沿海地区无公害黑皮冬瓜栽培技术初探[J]. 上海农业科技, 2021(1):75-76.
NI Z B, LI J Q, SUN H Q, WAN L S, HAN P P. Preliminary exploration of cultivation techniques for pollution-free black skinned winter melon in coastal areas of Jiangsu Province [J]. *Shanghai Agricultural Science and Technology*, 2021(1):75-76.
- [4] 辛福梅,王玉婷,李生茂,旦增罗布,普布次仁. 不同温度对巨柏幼苗光合及生根的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2019,45(1):102-108. DOI:10.3785/j.issn.1008-9209.2017.12.151.
XIN F M, WANG Y T, LI S M, D Z L B, P B C R. The effect of different temperatures on photosynthesis and rooting of giant cypress seedlings [J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences Edition)*, 2019, 45(1): 102-108. DOI: 10.3785/j.issn.1008-9209.2017.12.151.
- [5] YING M, HELENA F, CELESTE M D. Strategies and prospects for biostimulants to alleviate abiotic stress in plants [J]. *Frontiers in*

- Plant Science*, 2022, 13: 1–12. DOI:10.3389/fpls.2022.1012345.
- [6] 李进平, 周龙, 曾志伟, 王志刚, 徐晨, 杨德荣. 生物有机肥与生物刺激素协同对撂荒香蕉园土壤改良及枯萎病防治的影响[J]. 中国南方果树, 2019, 48(4): 57–63. DOI:10.13938/j.issn.1007-1431.20180629.
- LI J P, ZHOU L, ZENG Z W, WANG Z G, XU C, YANG D R. Effects of bio-organic fertilizer combined with bio-stimulants on soil improvement and Fusarium wilt control in abandoned banana orchards [J]. *South China Fruits*, 2019, 48(4): 57–63. DOI:10.13938/j.issn.1007-1431.20180629.
- [7] HUSSEN S M. Plant biostimulants in organic horticulture: A review [J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2022, 42(5): 2698–2710. DOI:10.1007/S00344-022-10738-7.
- [8] COLLA G, ROUBELAKIS-ANGELAKIS E, CARDARELLI M, SVECOVA E. Biostimulant action of a plant-derived protein hydrolysate produced through enzymatic hydrolysis [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2014, 5: 448. DOI:10.3389/fpls.2014.00448.
- [9] RISEH S R, VAZVANI G M, VATANKHAH M, KENNEDY J F. Chitosan coating of seeds improves the germination and growth performance of plants: A review [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 278: 134750. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2024.134750.
- [10] GEORGAKOPOULOU A, SPATHAS P, TSIROGIANNIS G, RÖMHELD J, SCHMIDHALTER M S, ANTONOPOULOS V. Biostimulants in the soil-plant interface: Agro-environmental implications—A review [J]. *Earth Systems and Environment*, 2023, 7(3): 583–600. DOI:10.1007/s41748-023-00349-x.
- [11] POPKO M, MICHALAK I, WILK R, GRAMZA M, CHOJNACKA K, GÓRCEKA H. Effect of the new plant growth biostimulants based on amino acids on yield and grain quality of winter wheat [J]. *Molecules*, 2018, 23(2): 470. DOI:10.3390/molecules23020470.
- [12] 罗晓辉, 唐旺全, 邱孟斌. 添加不同组合生物菌、 γ -聚谷氨酸、腐殖酸的新型肥料在小麦生产上的应用[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(12): 96–98. DOI:10.15889/j.issn.1002-1302.2014.12.030.
- LUO X H, TANG W Q, QIU M M. Application of new fertilizers with different combinations of biological bacteria, gamma polyglutamic acid, and humic acid in wheat production [J]. *Jiangsu Agricultural Science*, 2014, 42(12): 96–98. DOI: 10.15889/j.issn.1002-1302.2014.030.
- [13] MORALES G, CRISTINA C, VAN OOSTEN I, CARDARELLI V, GIACOMO C, BATTISTELLI M C. The application of a plant biostimulant based on seaweed and yeast extract improved tomato fruit development and quality [J]. *Biomolecules*, 2020, 10(12): 1662–1675. DOI:10.3390/biom10121662.
- [14] 曹颖, 余赞, 李晓林. 壳寡糖与海藻酸对番茄产量及品质的增效研究[J]. 北方园艺, 2022(2): 27–32. DOI: 10.11937/bfy.20212855.1001-0009.2022.02.005.
- CAO Y, YU Y, LI X L. Study on the enhancement of tomato yield and quality by chitosan oligosaccharides and alginate [J]. *Northern Horticulture*, 2022(2): 27–32. DOI: 10.11937/bfy.20212855.1001-0009.2022.02.005.
- [15] 张元, 冯琼, 杨小方, 谷春秀, 龚平. 黄腐酸对盐胁迫下红花种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. 腐植酸, 2016(2): 40. DOI: 10.19451/j.cnki.issn1671-9212.2016.02.015.
- ZHANG Y, FENG Q, YANG X F, GU C X, GONG P. The effect of humic acid on the germination of safflower seeds and physiological characteristics of seedlings under salt stress [J]. *Humic Acid*, 2016(2): 40. DOI: 10.19451/j.cnki.issn1671-9212.2016.02.015.
- [16] 张野, 叶长东, 陶伟, 李恩东, 王瑾, 苏天明, 何铁光, 王吉平, 李嘉维, 叶长成, 刘美卿. 黄腐酸有机-无机复混药肥在茄子栽培上的应用效果[J]. 江西农业学报, 2020, 32(12): 45–49. DOI:10.19386/j.cnki.jxnyxb.2020.12.09.
- ZHANG Y, YE C D, TAO W, LI E D, WANG J, SU T M, HE T G, WANG J P, LI J W, YE C C, LIU M Q. Application effect of fulvic acid organic-inorganic compound fertilizer on eggplant cultivation [J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2020, 32(12): 45–49. DOI:10.19386/j.cnki.jxnyxb.2020.12.09.
- [17] 刘瑞志. 褐藻寡糖促进植物生长与抗逆效应机理研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
- LIU R Z. Research on the mechanism of brown algae oligosaccharides promoting plant growth and stress resistance [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009.
- [18] 章希娟, 许玲, 魏秀清, 陈志峰, 余东, 许家辉. 不同防寒措施对莲雾抗寒性的影响[J]. 中国南方果树, 2019, 48(5): 24–27. DOI:10.13938/j.issn.1007-1431.20190275.
- ZHANG X J, XU L, WEI X Q, CHEN Z F, YU D, XU J H. Effects of different winter protection measures on cold resistance of wax apple [J]. *South China Fruits*, 2019, 48(5): 24–27. DOI:10.13938/j.issn.1007-1431.20190275.
- [19] YUE S, CHENFAN Z, RASBIN B, SHAN L, CHEN J H, MENG J. Astaxanthin synthesized gold nanoparticles enhance salt stress tolerance in rice by enhancing tetrapyrrole biosynthesis and scavenging reactive oxygen species *in vitro* [J]. *Plant Stress*, 2022, 6: 100122. DOI:10.1016/j.stress.2022.100122.
- [20] OZAVIZE F S, QIU W C, WU F. Astaxanthin induces plant tolerance against cadmium by reducing cadmium uptake and enhancing carotenoid metabolism for antioxidant defense in wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2024, 210: 108622. DOI: 10.1016/J.PLAPHY.2024.108622.
- [21] DEEPANJAN M, ISHITA P, AYAN D, IRAVATI R, ANTARA D, MADHURIMA J, ROY C N, SINGH B P B, TARIT R. Rice seed (IR64) priming with potassium humate for improvement of seed germination, seedling growth and antioxidant defense system under arsenic stress [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, 219: 112313. DOI: 10.1016/J.ECOENV.2021.112313.
- [22] 李永川, 王怀选, 朱如普, 郭志明, 徐谦, 何永国. 有机诱导抗病剂“多肽保”在高原水稻秧应用技术研究初报[J]. 云南农业, 2014(10): 17–18.
- LI Y C, WANG H X, ZHU R P, GUO Z M, XU Q, HE Y G. Preliminary report on the application technology of organic induced disease resistance agent “peptide protection” in high-altitude rice seedling cultivation [J]. *Yunnan Agriculture*, 2014(10): 17–18.
- [23] DONG C, WANG G, DU M, NIU C, ZHANG P, ZHANG X, MA D, MA F F, BAO Z L. Biostimulants promote plant vigor of tomato and strawberry after transplanting [J]. *Scientia Horticulturae*, 2020, 267: 109355. DOI:10.1016/j.scienta.2020.109355.
- [24] 方雪娟, 宋梦圆, 高丽红, 田永强. 多效唑和两种生物刺激素对番茄幼苗质量的影响[J]. 中国蔬菜, 2023(7): 57–62. DOI: 10.19928/j.cnki.1000-6346.2023.2030.
- FANG X J, SONG M Y, GAO L H, TIAN Y Q. The effects of paclobutrazol and two types of biostimulants on the quality of tomato seedlings [J]. *Chinese Vegetables*, 2023(7): 57–62. DOI: 10.19928/

- j.cnki.1000-6346.2023.2030.
- [25] 李思琦, 蒋芳玲, 周艳朝, 刘敏, 吴震. 叶面喷施生物刺激素对番茄幼苗高温胁迫的减缓效应[J]. 西北农业学报, 2021,30(2):224-233. LI S Q, JIANG F L, ZHOU Y C, LIU M, WU Z. The slowing effect of foliar application of biostimulants on high temperature stress in tomato seedlings[J]. *Northwest Agricultural Journal*, 2021, 30(2): 224-233.
- [26] 苏群, 孙磊, 王立华, 姚春雪, 宋佳. 不同植物生物刺激素复配有机肥对小油菜生长的效果试验[J]. 农业与技术, 2021,41(10): 24-26. DOI: 10.19754/j.nyyjs.20210530005. SU Q, SUN L, WANG L H, YAO C X, SONG J. Experimental study on the effect of different plant biostimulants combined with organic fertilizerson the growth of rapeseed[J]. *Agriculture and Technology*, 2021, 41(10): 24-26. DOI: 10.19754/j.nyyjs.20210530005.
- [27] CLEMENSSON L A. A method for measuring root vitality using triphenyltetrazolium chloride (TTC)[J]. *Physiologia Plantarum*, 1994, 92(3): 360-364. DOI: 10.1111/j.1399-3054.1994.tb02631.x.
- [28] ARNON D I. Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenol oxidase in *Beta vulgaris* [J]. *Plant Physiology*, 1949, 24(1): 1-15. DOI: 10.1104/pp.24.1.1.
- [29] EDUARDA O D, CARLA M N, ALMENDAGNA F R, OLIVEIRA H S D, FERREIRA L S D, DANIEL A M, GÓMEZ M A S, JOYCE D, MOACI P. Use of organic acids in micropropagation helps the production of salinity tolerant strawberry [J]. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, 2024, 156(3):71. DOI:10.1007/S11240-024-02684-X.
- [30] WANG Q, LI J, ZHANG Z. Effects of low-molecular-weight alginate oligosaccharides on rice root growth and water absorption [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2018, 128: 118-124. DOI: 10.1016/j.plaphy.2018.06.014.
- [31] LI S, ZHOU G, ZHANG H. Effect of fulvic acid on root growth and physiological characteristics of maize [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2015, 118: 65-72. DOI:10.1016/j.envexpbot.2015.05.012.
- [32] ZHANG H, FORDE B G. An *Arabidopsis* MADS box gene that controls nutrient-induced changes in root architecture [J]. *Science*, 1998,279:407-409.DOI: 10.1126/science.279.5349.407.
- [33] FRANCISCO L H R, W M S, JOSÉ L. Nutritional regulation of root development [J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews, Developmental Biology*, 2015, 4(4): 431-43. DOI:10.1002/wdev.183.
- [34] NATHAN C, IVE S D. The *Arabidopsis thaliana* CLAVATA3/EMBRYO-SURROUNDING REGION 26 (CLE26) peptide is able to alter root architecture of *Solanum lycopersicum* and *Brassica napus* [J]. *Plant Signaling & Behavior*, 2016, 11(1): e1118598. DOI: 10.1080/15592324.2015.1118598.
- [35] MORA N V, BACAICOA E, ZAMARRE O A, AGUIRRE E, GARNICA M, FUENTES M, MARIA J, GARC MINA A, 张世万, 周霞萍. 腐植酸对黄瓜植株生长的影响涉及与硝酸盐浓度有关的细胞分裂素、多胺、矿质营养素浓度在植株根系和芽中的变化[J]. 腐植酸, 2012(2):29-39. DOI:10.19451/j.cnki.issn1671-9212.2012.02.010. MORA N V, BACAICOA E, ZAMARE O A, AGUIRRE E, GARNICA M, FUENTES M, MARIA J, GARC MINA A, ZHANG S W, ZHOU X P. The effect of humic acid on the growth of cucumber plants involves changes in the concentrations of cytokinins, polyamines, and mineral nutrients related to nitrate concentration in the plant roots and shoots [J]. *Humic Acid*, 2012(2): 29-39. DOI: 10.19451/j.cnki. issn1671-9212.2012.02.010.
- [36] 严国富, 杜朋潮, 李方敏, 汤洁. 褐藻寡糖对草莓光合特性及植株形态的影响[J]. 现代农业科技, 2023(15):60-62,69. YAN G F, DU P C, LI F M, TANG J. The effect of alginate oligosaccharides on the photosynthetic characteristics and plant morphology of strawberries [J]. *Modern Agricultural Technology*, 2023(15): 60-62, 69.
- [37] 胡静, 彭守华, 张玉琴, 尉继强, 毛积磊, 邱杰, 胡怡林, 侯丽娟, 叶全. 褐藻寡糖对土壤养分、小麦生长以及根际微生物多样性的影响[J/OL]. 分子植物育种, 1-9 [2024-11-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20240220.1347.009.html>.
- [38] HU J, PENG S H, ZHANG Y Q, WEI J Q, MAO J L, QIU J, HU Y L, HOU L J, YE Q. The effects of brown algae oligosaccharides on soil nutrients, wheat growth, and rhizosphere microbial diversity [J/OL]. *Molecular Plant Breeding*, 1-9 [2022-11-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20240220.1347.009.html>.
- [39] ZHANG Y W, DUAN X L, XIE Y M, WEI X. Uncovering the function of peptides: Bridging hormone signaling, microbial interactions, and root development in plants [J]. *New Crops*, 2024: 1100011. DOI: 10.1016/J.NCROPS.2024.100011.
- [40] VIRUJA U, PERIASWAMY S S, GAURAV R, COLM O, BRIJESH K T. Advances in pre-treatment techniques and green extraction technologies for bioactives from seaweeds[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021: 90-106. DOI: 10.1016/j.tifs.2021.01.018.
- [41] 于晟阳, 牛银星, 王泽平, 李福贵, 柴龙行, 冯彪, 韩燕来, 王伟. 黄腐酸添加量对低氮胁迫下小麦生长和根系形态的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2023,29(2): 323-333. DOI: 10.11674/zwyf.2022259. YU S Y, NIU Y X, WANG Z P, LI F G, CHAI L X, FENG B, HAN Y L, WANG Y. The effect of humic acid addition on wheat growth and root morphology under low nitrogen stress [J]. *Chinese Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2023, 29(2): 323-333. DOI: 10.11674/zwyf.2022259.
- [42] 许大全. 光合速率、光合效率与作物产量[J]. 生物学通报, 1999(8):11-13. XU D Q. Photosynthetic rate, photosynthetic efficiency, and crop yield [J]. *Biology Bulletin*, 1999(8): 11-13.
- [43] 马冬冬, 李永富. 褐藻寡糖用于海水小球藻和盐生杜氏藻异养培养及其促生长作用机制[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2020,50(5): 40-45. DOI:10.16441/j.cnki.hdx.20190082. MA D D, LI Y F. Application of brown algae oligosaccharides in heterotrophic cultivation of marine microalgae and halophilic Dunaliella and their growth promoting mechanisms [J]. *Journal of Ocean University of China (Natural Science Edition)*, 2020, 50(5): 40-45. DOI: 10.16441/j.cnki.hdx.20190082.
- [44] 库惠洁, 孙明珠, 李世刚, 王东仙, 程泰, 蒋博, 陈爱武, 王晶, 赵杰, 汪波, 蒯婕, 徐正华. 黄腐酸、褐藻寡糖包衣对迟播油菜萌发成苗及产量的影响[J/OL]. 作物学报, 1-17 [2025-01-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20241220.1630.002.html>.
- [45] XIE H J, SUN M Z, LI S G, WANG D X, CHENG T, JIANG B, CHEN A W, WANG J, ZHAO J, WANG B, KUAI J, XU Z H. The effects of humic acid and brown algae oligosaccharide coating on the germination, seedling formation, and yield of late sown rapeseed [J/OL]. *Journal of Crop Science*, 1-17 [2020-01-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20241220.1630.002.html>.