



农业资源与环境学报

中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

芸苔素内酯·吡啶乙酸·赤霉酸在不同氮浓度下对小白菜产量和品质的影响

王庆彬, 彭春娥, 孟慧, 王洪凤, 王晓琪, 贾春花, 李泽丽, 李洋, 耿全政, 刘之广, 张民

引用本文:

王庆彬, 彭春娥, 孟慧, 等. 芸苔素内酯·吡啶乙酸·赤霉酸在不同氮浓度下对小白菜产量和品质的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(4): 626–635.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0486>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

超微细活化磷肥对小白菜生长及磷利用的影响

王桂伟, 陈宝成, 王国鹏, 李晗灏, 梁海, 周华敏, 陈剑秋

农业资源与环境学报. 2019, 36(1): 9–15 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0065>

土壤盐分离子对乌鲁木齐小白菜Pb含量的影响研究

李萍, 李阳, 李柯, 王文全, 刘师豆, 吴相南

农业资源与环境学报. 2018, 35(2): 147–154 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0209>

木霉菌M2的鉴定及其对小白菜促生效果研究

邢芳芳, 高明夫, 胡兆平, 范玲超

农业资源与环境学报. 2017, 34(1): 80–85 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2016.0197>

不同有机物料与外源锌对土壤锌形态及生物有效性的影响

郝佳丽, 卜玉山, 贾峥嵘, 席吉龙, 姚景珍, 段超

农业资源与环境学报. 2015(3): 263–268 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2014.0298>

纳米氧化锌对两种蔬菜种子发芽及幼苗生长的影响

林茂宏, 沈玫玫, 吴佳妮, 陈慧玲, 徐艺萌, 刘维涛

农业资源与环境学报. 2021, 38(1): 72–78 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0099>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王庆彬, 彭春娥, 孟慧, 等. 芸苔素内酯·吲哚乙酸·赤霉素在不同氮浓度下对小白菜产量和品质的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(4): 626–635.

WANG Qing-bin, PENG Chun-e, MENG Hui, et al. Effects of brassinolactone · indoleacetic acid · gibberellic acid on the yield and quality of pakchoi (*Brassica chinensis* L.) under different nitrogen concentrations[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(4): 626–635.



开放科学 OSID

芸苔素内酯·吲哚乙酸·赤霉素在不同氮浓度下对小白菜产量和品质的影响

王庆彬^{1,2}, 彭春娥³, 孟慧², 王洪凤², 王晓琪¹, 贾春花¹, 李泽丽¹, 李洋², 耿全政², 刘之广^{1*}, 张民^{1*}

(1. 土壤资源高效利用国家工程实验室, 山东农业大学资源与环境学院, 山东 泰安 271018; 2. 山东蓬勃生物科技有限公司, 山东 泰安 271018; 3. 作物生物学国家重点实验室, 山东农业大学生命科学学院, 山东 泰安 271018)

摘 要:芸苔素内酯·吲哚乙酸·赤霉素(BHG)对多种农作物增产提质效果显著,但BHG增产提质效果与所处氮水平的关系及相应作用机理尚不清晰。为探讨小白菜产量、品质和有机酸与不同外源氮水平条件下BHG的响应关系及作用机理,采用人工气候室水培法,以小白菜(*Brassica chinensis* L., 速生绿秀)为试验材料,设1、3、10 mmol·L⁻¹ 3个氮浓度,比较5 μg·L⁻¹ BHG和清水处理对小白菜生长指标、产量、品质及有机酸、氮磷钾养分、激素含量的影响。3 mmol·L⁻¹氮水平下,添加BHG显著提高小白菜产量14.87%、可溶性蛋白0.05个百分点、根质量22.95%、根有机酸含量23.89%、钾含量2.64个百分点,ZT/ABA(玉米素/脱落酸)、IAA/ABA(吲哚乙酸/脱落酸)值分别升高97.66%、58.88%。1 mmol·L⁻¹氮水平下,添加BHG使小白菜可溶性蛋白降低0.04个百分点,糖酸比升高637.86%,ZT/ABA值降低15.19%,IAA/ABA值降低58.36%,根长、根鲜质量降低12.50%、15.16%,但对小白菜产量无显著影响。10 mmol·L⁻¹氮水平下,BHG显著提高小白菜可溶性糖0.09个百分点、有机酸含量12.97%、根长20.84%、根部有机酸36.18%、营养液有机酸16.21%、吲哚乙酸含量17.74%、玉米素含量11.62%、水杨酸含量23.57%,使ZT/ABA、IAA/ABA值分别升高38.50%和46.08%,可溶性蛋白显著降低0.07个百分点,但对小白菜产量无显著影响。研究表明,BHG对小白菜产量、品质的影响与其所处氮水平密切相关,BHG在3 mmol·L⁻¹氮水平显著增产提质,主要机理为调控小白菜内源激素含量,提高ZT/ABA、IAA/ABA值及根质量和有机酸含量,进而提高小白菜营养元素的积累和利用。

关键词:芸苔素内酯·吲哚乙酸·赤霉素(BHG); 营养液氮浓度; 小白菜; 产量; 品质; 植物内源激素

中图分类号: TQ449+.4

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2021)04-0626-10

doi: 10.13254/j.jare.2020.0486

Effects of brassinolactone · indoleacetic acid · gibberellic acid on the yield and quality of pakchoi (*Brassica chinensis* L.) under different nitrogen concentrations

WANG Qing-bin^{1,2}, PENG Chun-e³, MENG Hui², WANG Hong-feng², WANG Xiao-qi¹, JIA Chun-hua¹, LI Ze-li¹, LI Yang², GENG Quan-zheng², LIU Zhi-guang^{1*}, ZHANG Min^{1*}

(1. National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China; 2. Shandong Pengbo Biotechnology Co., Ltd., Tai'an 271018, China; 3. State Key Laboratory of Crop Biology, College of Life Sciences, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China)

收稿日期: 2020-09-02 录用日期: 2020-10-15

作者简介: 王庆彬(1989—),男,山东菏泽人,博士研究生,从事新型肥料的研制与应用研究。E-mail: wangqingbin1203@163.com

*通信作者: 刘之广 liuzhiguang8235126@126.com; 张民 E-mail: minzhang-2002@163.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0200706); 山东省重点研发计划项目(2019GNC106011); 山东省重点研发计划重大科技创新工程项目(2019JZZY020608)

Project supported: National Key Research and Development Program of China (2017YFD0200706); Key Research and Development Program of Shandong Province (2019GNC106011); Major Science and Technology Innovation Projects in Shandong Province (2019JZZY020608)

Abstract: Brassinolactone·indoleacetic acid·gibberellic acid(BHG) has a significant effect on improving the yield and quality of a variety of crops. However, the relationship between the nitrogen level and the increased yield and enhanced quality due to BHG, as well as the mechanism underlying these effects, are still unclear. This study aimed to investigate the effects of BHG on the yield and quality of pakchoi (*Brassica chinensis* L.) under different nitrogen levels. Then, the mechanism by which BHG influenced the yield and quality of pakchoi and the relationship between the yield increase and quality change due to BHG and the nitrogen level was discussed to provide a basis for reducing the weight and increasing the efficiency of nitrogen fertilizer in order to achieve high-efficiency and high-yield production of pakchoi. The study was carried out with *Brassica chinensis* L. (Su sheng lv xiu) as test materials, adopting an artificial climate chamber hydroponic method. Under conditions of 1, 3 mmol·L⁻¹, and 10 mmol·L⁻¹ nitrogen concentrations, 5 μg·L⁻¹ of BHG and deionized water (control) were added respectively for six treatments, with six repetitions. The growth index, yield, NPK content, organic acid, endogenous kinin content, water-soluble protein, and water-soluble sugar of pakchoi were compared. The results showed at the nitrogen level of 3 mmol·L⁻¹, adding BHG significantly increased the yield of pakchoi by 14.87%, soluble protein by 0.05 percentage point, root weight by 22.95%, root organic acid content by 23.89%, potassium content by 2.64 percentage point, and ZT/ABA (zeatin/abscisic acid) and IAA/ABA (indoleacetic acid/abscisic acid) values by 97.66% and 58.88%, respectively. At the nitrogen level of 1 mmol·L⁻¹, adding BHG reduced the soluble protein of pakchoi by 0.04 percentage point, increased the sugar-acid ratio by 637.86%, decreased the ZT/ABA value by 15.19%, and the IAA/ABA ratio by 58.36%. However, there was no significant effect on the yield of pakchoi. The root length and fresh weight of pakchoi decreased by 12.50% and 15.16%. At the 10 mmol·L⁻¹ nitrogen levels, BHG significantly improved pakchoi soluble sugar by 0.09 percentage point, organic acid content by 12.97%, the root length by 20.84%, the root organic acid by 36.18%, organic nutrient solution by 16.21%, indoleacetic acid content by 17.74%, zeatin content by 11.62%, the salicylic acid content by 23.57%, and ZT/ABA and IAA/ABA ratio values by 38.50% and 46.08%, respectively. However, the BHG did not significantly impact the yield of pakchoi, whereas soluble protein significantly reduced by 0.07 percentage point. The effect of BHG on the growth, yield, and quality of pakchoi was closely related to the level of nitrogen fertilizer supplied. BHG significantly increased yield and improved quality at the 3 mmol·L⁻¹ nitrogen level. The main mechanism by which this enhancement occurred was the regulation of the endogenous hormone content, the ZT/ABA and IAA/ABA ratios, root weight, dry root weight, and organic acid content of pakchoi to improve the accumulation and utilization of nutritional elements in it.

Keywords: brassinolactone·indoleacetic acid·gibberellic acid(BHG); nitrogen concentration of nutrient liquid; pakchoi; yield; quality; plant endogenous hormones

我国是世界上最大的蔬菜生产国和消费国,国家统计局数据显示,2017年我国蔬菜播种面积为1 953.33万hm²,总产量约为7.89亿t。白菜起源于中国,是我国栽培面积和生产供应数量最大的蔬菜作物,在我国周年生产、供应和稳定蔬菜市场等方面发挥重要作用,作为叶菜,其生产过程中需要投入大量的氮肥^[1]。在小白菜生产中氮素发挥关键作用,适当提高供氮浓度可提高小白菜产量^[2]和可溶性蛋白的含量,但是供氮浓度过高则会造成小白菜减产,品质下降^[3-6],抗病性减弱,同时还会造成土壤酸化和板结、水体富营养化、温室效应等一系列环境问题^[7]。提高氮肥利用率,进而提升作物产量和品质,是我国蔬菜产业健康发展过程中亟需解决的问题。

碧护(BHG)是复合型的植物源生长免疫诱导剂,主要成分为0.136%的芸苔素内酯·吲哚乙酸·赤霉素,含有黄酮类催化平衡成分、氨基酸化合物、抗逆诱导剂等多种植物活性物质^[8]。在提高作物氮肥利用率方面具有显著效果,可提高水稻、苹果、小麦、花生

等作物产量和品质^[9-14]。芸苔素内酯(BR)可通过与受体BAK1的结合激活BR信号转导路径中BSK3激酶,调节作物根系生长^[15];可通过BZR1信号激发作物体内自噬相关基因(ATGs)的转录和自噬体的形成,增强叶绿素含量,减少泛素化蛋白的积累,进而提高植物获取氮营养能力^[16]。外源BR显著影响作物内源激素吲哚乙酸(IAA)、赤霉素(GA)、脱落酸(ABA)相关基因MdBAK1、MdBR11、MdBZR1等的表达和转录,显著提高关键生长素合成和转运基因,促进根和茎内生长素含量,降低ABA和GA₃含量,影响侧根发育^[17-20]。Zhang等^[21]研究指出外源IAA、GA对玉米的内源激素合成路径同样有显著影响。Haruta等^[22]报道指出激素途径的变化显著影响植物体内有机酸的分泌。而有机酸一方面显著影响作物的外观品质和食味品质^[23],另一方面通过改善植物生长环境,促进植物对矿质养分的吸收利用,提高植物对养分的利用效率,且能在用肥量过大时缓解肥害^[24]。

激素信号反馈控制氮素调控、代谢的分子网络路

径,而激素的合成、耦合、降解、转运和信号转导又受外源氮素的调控,这是由于氮素除了作为营养物质外,还作为植物生长发育调控通路的重要触发因子与激素路径交叉互作^[25]。但是氮素用量和BHG耦合对蔬菜作物产量、品质的影响及作用机理研究鲜有报道,本研究以水培为培养条件,小白菜为研究对象,探讨其产量、品质与不同外源氮水平条件下BHG的响应关系,为实现氮肥的减肥增效和小白菜的高产高质提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料和培养方法

试验于2019年5月2日—2019年6月3日在山东农业大学土肥资源高效利用国家工程实验室人工智能光照培养箱(GXZ,宁波江南)中进行培养。供试小白菜(*Brassica chinensis* L.)品种“速生绿秀”。BHG由上海拜诺国际生物科技进出口公司提供。

小白菜培养:小白菜种子在纯净水中浸泡12 h,70%乙醇灭菌1 min,在无菌蒸馏水中洗涤3次。2%的次氯酸钠浸泡5 min,在无菌蒸馏水中漂洗5次,播种于128格海绵块育苗盘。参数设置如下:日/夜温度25℃/20℃,光强380 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,由日光灯提供,光照周期为12 h,日/夜湿度60%/40%。小白菜幼苗在两叶一心期移栽到水培培养箱中,水培营养液内含有2 mmol·L⁻¹ KH₂PO₄,4 mmol·L⁻¹ CaCl₂,1.4 mmol·L⁻¹ MgSO₄·7H₂O,2 mmol·L⁻¹ K₂SO₄,0.4 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ CuSO₄·5H₂O,0.1 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaMoO₄·2H₂O,8 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ H₃BO₃,10 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MnCl₂,1 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ZnSO₄·7H₂O,18.3 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ FeSO₄·7H₂O,5 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Na₂EDTA,pH调整为6.2。氮源为甘氨酸和硝酸铵混合液(摩尔比为1:1),根据设计的氮水平添加相应氮源剂量^[26]。通气泵无间隔通气,第10 d和第20 d分别调节pH为6.2,处理

时间为30 d。

1.2 试验设计

培养液设计1、3、10 mmol·L⁻¹ 3个氮浓度,在每个氮浓度培养液中分别添加去离子水和BHG(5 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$),共6个处理(表1),6次重复。

1.3 测定项目和方法

1.3.1 小白菜长势指标

小白菜移栽30 d后,统计叶片数量,地上部及根鲜质量、长度分别由电子天平和直尺测得,计算根冠比;鲜样在烘箱内105℃杀青30 min,85℃烘干至恒质量,称量干质量。

1.3.2 叶片可溶性蛋白和可溶性糖

小白菜收获后,硫酸-萘酚比色法测定可溶性糖含量,考马斯亮蓝法测定可溶性蛋白含量^[27]。

1.3.3 小白菜氮磷钾含量

干样磨碎过0.25 mm筛,称取0.20 g,H₂O₂-H₂SO₄消煮,测定氮、磷、钾含量,氮含量根据凯氏定氮法测定,磷含量根据钼锑抗比色法测定,钾含量根据火焰光度计法^[28]测定。

1.3.4 有机酸

高效液相色谱法检测叶片、根部及营养液中草酸的含量。液氮研磨处理后,称取0.20 g样品,4 mL超纯水悬起,超声15 min,4℃下15 000 g离心20 min;用0.22 μm 滤膜抽滤上清液用于上样。流动相A:10 mmol·L⁻¹ 磷酸氢二铵,pH 2.45(用磷酸调节),流动相B:甲醇,分析柱:Inertsil ODS-3(150 mm×4.6 mm,5 μm),柱温为30℃,检测波长为210 nm。流速0.4 mL·min⁻¹,洗脱程序如下:0~5 min,甲醇比例由3%线性增加至8%;5~15 min,甲醇比例由8%线性降至3%。有机酸标准品购自美国Sigma公司。

1.3.5 叶片激素

高效液相色谱法测定内源激素的含量,称取0.20 g叶片,加入2 mL pH 7.2的磷酸缓冲盐(Phosphate buffer saline,PBS,pH7.2)溶液,冰浴研磨,4℃下15 000 g离心10 min,取上清。流动相为甲醇:乙腈:0.6%乙酸=50:45:5(V/V),分析柱为Symmetry C18(150 mm×4.6 mm,5 μm),柱温25℃,流动相流速0.6 mL·min⁻¹,检测波长为264 nm。GA、IAA、ABA、玉米素(ZT)、水杨酸(SA)标准品均购自美国Sigma公司^[29]。

1.4 数据处理

采用Excel 2007软件对数据进行整理,采用SAS V8数据处理系统进行方差分析,采用Duncan新复极

表1 试验处理

Table 1 Treatments for experiment

添加物 Additives	处理 Treatment	添加物浓度 Concentration of additives/($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	营养液氮浓度 Nitrogen concentration of nutrition solution/ (mmol·L ⁻¹)
去离子水 (ddH ₂ O) Deionized water	CKN1	0	1
	CKN3	0	3
	CKN10	0	10
碧护(BHG) Bihu	BHGN1	5	1
	BHGN3	5	3
	BHGN10	5	10

差法进行差异显著性检验($\alpha=0.05$)。采用 Origin 8.0 绘制图表。

2 结果与分析

2.1 不同氮浓度下 BHG 对小白菜产量及品质的影响

2.1.1 氮水平和 BHG 互作对小白菜产量的影响

氮浓度对小白菜产量和干质量均影响显著(表 2),不添加 BHG 处理随着氮浓度的升高,小白菜产量和干质量呈现增加趋势。CKN1 比 CKN3 处理减产 33.86%。CKN10 比 CKN3 增产 13.65%。BHG3 较

CKN3 增产 14.87%,与 CKN10 产量相当;BHGN1 与 CKN1 产量无显著差异,BHGN10 较 CKN10 减产 7.69%,但差异不显著。BHGN3 较 CKN3 总干质量增加 5.32%,BHGN1 和 BHGN10 较相同氮水平清水处理总干质量显著降低 9.02% 和 16.91%。

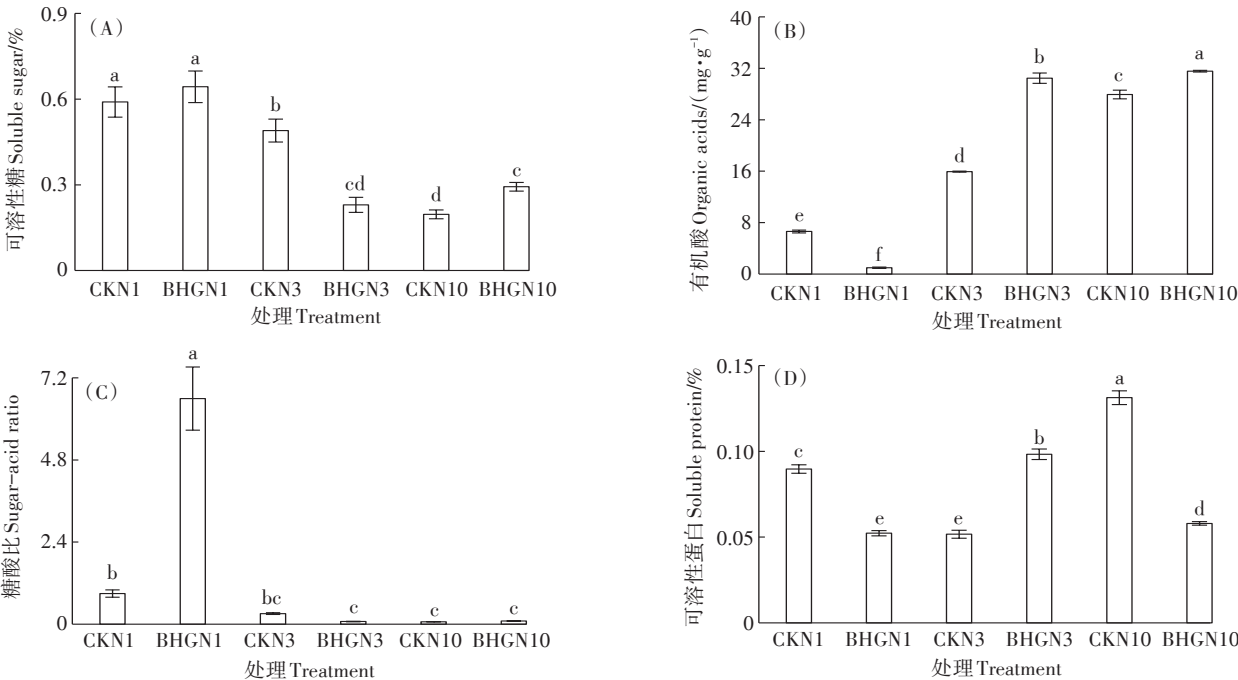
2.1.2 氮水平和 BHG 互作对小白菜品质的影响

由图 1 可知,随着氮浓度的提高,CK 处理叶片中可溶性糖含量逐渐降低,有机酸含量逐渐升高,糖酸比逐渐降低,可溶性蛋白先降低后升高。BHG 处理可溶性糖先降低后升高,有机酸含量逐渐升高,糖酸

表 2 不同处理小白菜的生物量
Table 2 Biomass of pakchoi with different treatments

处理 Treatment	单株叶片鲜质量 Fresh weight of leaves per plant/g	增产率 Increase rate/%	单株叶片干质量 Dry weight of leaves per plant/g	叶片平均含水量 Average water content in of leaves/%	单株总干质量 Dry weight per plant/g
CKN1	22.78±1.74d	-33.86	2.11±0.01d	90.74	2.44±0.02e
BHGN1	19.78±0.80d	-42.57	1.96±0.13d	90.09	2.22±0.10f
CKN3	34.44±0.84c	—	2.81±0.07b	91.85	3.01±0.10c
BHGN3	39.56±2.05a	14.87	2.92±0.01b	92.62	3.17±0.04b
CKN10	39.14±0.88ab	13.65	3.17±0.11a	91.91	3.37±0.10a
BHGN10	36.13±2.86bc	4.91	2.61±0.11c	92.77	2.80±0.11d

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。
Note: Different lowercase letters in the same column mean significant difference among treatments ($P<0.05$). The same below.



不同小写字母表示处理之间差异显著($P<0.05$)。下同
Differenct lowercase letters above the bars indicate significant differences among the treatments ($P<0.05$). The same below

图 1 不同处理小白菜可溶性糖、可溶性蛋白和有机酸的含量及糖酸比

Figure 1 Soluble sugar, soluble protein, organic acid, and sugar-acid ratio in pakchoi with different treatments

比先降低后保持稳定,可溶性蛋白先升高后降低,与CK处理的变化趋势不同。BHGN3较CKN3小白菜中可溶性糖的含量显著降低0.26个百分点,有机酸含量显著提高91.28%,糖酸比降低75.46%,可溶性蛋白含量显著升高0.05个百分点;BHGN1较CKN1有机酸和可溶性蛋白分别显著降低85.14%和0.04个百分点,糖酸比显著升高637.86%;BHGN10较CKN10小白菜中可溶性糖、有机酸含量分别显著升高0.09个百分点和12.97%,可溶性蛋白显著降低0.07个百分点。

对小白菜根部和营养液内有机酸检测结果如图2所示,小白菜根部和培养液内有机酸的含量随着氮浓度升高均明显升高,水培条件下,成熟小白菜内有机酸主要为草酸,而酒石酸、苹果酸、柠檬酸、琥珀酸含量极少,未检出(图2C)。BHGN3较CKN3根部和营养液内的有机酸显著提高23.89%、149.18%,BHGN10较CKN10根部和营养液内的有机酸显著升高36.18%、16.21%。

由图3可知,随着氮浓度的提升,小白菜叶内生长相关激素IAA、GA、ABA、ZT含量均表现为先升高后降低,而抗病相关激素SA含量呈现逐渐降低的趋势。BHGN3处理较CKN3处理的IAA、ABA、GA、SA显著降低12.55%、44.96%、66.13%、50.65%,ZT含量显著升高8.79%;BHGN1处理较CKN1处理中IAA和SA的含量显著下降17.50%、89.45%,GA、ABA、ZT含量显著升高204.85%、98.11%、68.02%;BHGN10处理较CKN10处理中IAA、ZT、SA的含量显著升高17.74%、11.62%、23.57%,ABA、GA的含量显著降低19.40%、38.87%。BHGN1、BHGN3、BHGN10处理的IAA/ABA分别为等氮条件下对照处理的41.67%、158.88%、146.08%,ZT/ABA比值分别为等氮条件下对照处理的84.81%、197.66%、138.50%。

2.2 氮水平和BHG互作对小白菜表型的影响

CKN3处理较CKN1处理小白菜株高显著增高(表3),CKN10处理与CKN3处理间,株高无显著差异;随着氮浓度提高,小白菜根冠比显著减小,根长显著变短。BHGN3处理较CKN3处理根鲜质量、根干质量显著增加22.95%、25.00%;BHGN1处理较CKN1处理的根长、根鲜质量、根干质量显著下降12.50%、15.16%、21.21%;BHGN10处理较CKN10处理叶片数量显著增加9.80%,根长显著增加20.84%。

2.3 氮水平和BHG互作对小白菜养分吸收和利用的影响

随着氮浓度的升高,CK处理小白菜叶片和根部

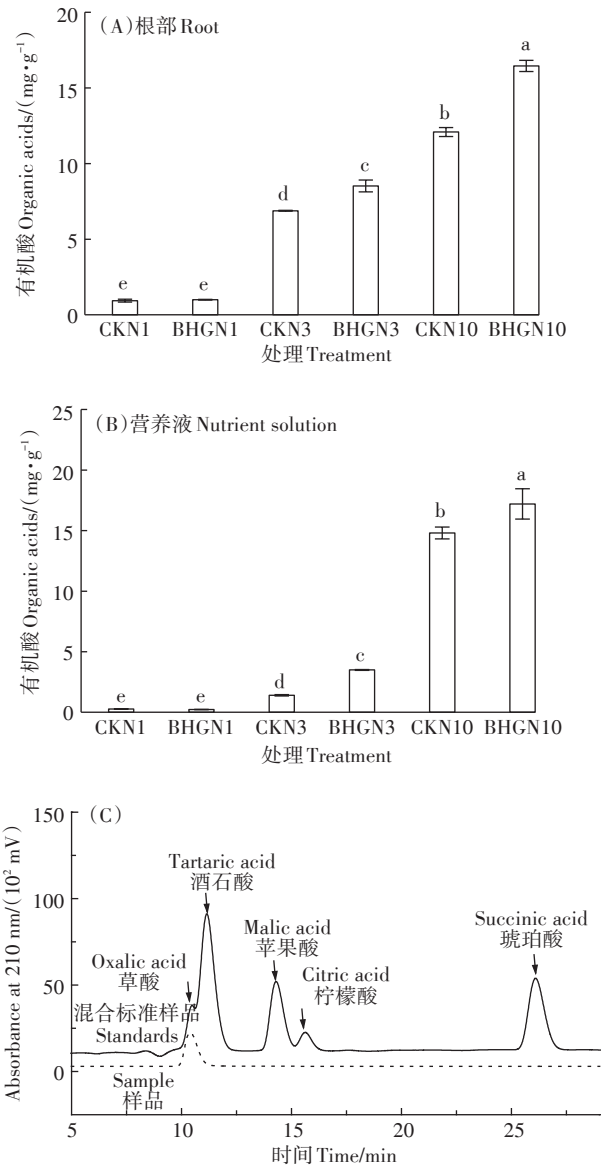


图2 不同处理小白菜根及营养液内有机酸的含量

Figure 2 Organic acids content in pakchoi root and nutrient solution with different treatments

中氮、磷、钾总含量先升高后保持稳定,添加BHG后叶片中氮、磷、钾总含量先升高后下降,根部变化趋势与CK处理一致(图4A、图4B);BHG的添加显著促进了3 mmol·L⁻¹氮水平下小白菜氮、磷、钾总量的积累,显著降低了10 mmol·L⁻¹氮水平下氮、磷、钾总量的积累。小白菜中氮的含量随着供氮水平的升高显著升高(图4C),各处理磷的含量无显著差异(图4D),钾的含量随着供氮水平的升高先升高后降低(图4E);添加BHG的处理中,在3 mmol·L⁻¹氮水平时小白菜钾的含量显著提高了2.64个百分点,但氮的含量显著降低0.37个百分点,在1 mmol·L⁻¹和10 mmol·L⁻¹氮水平下

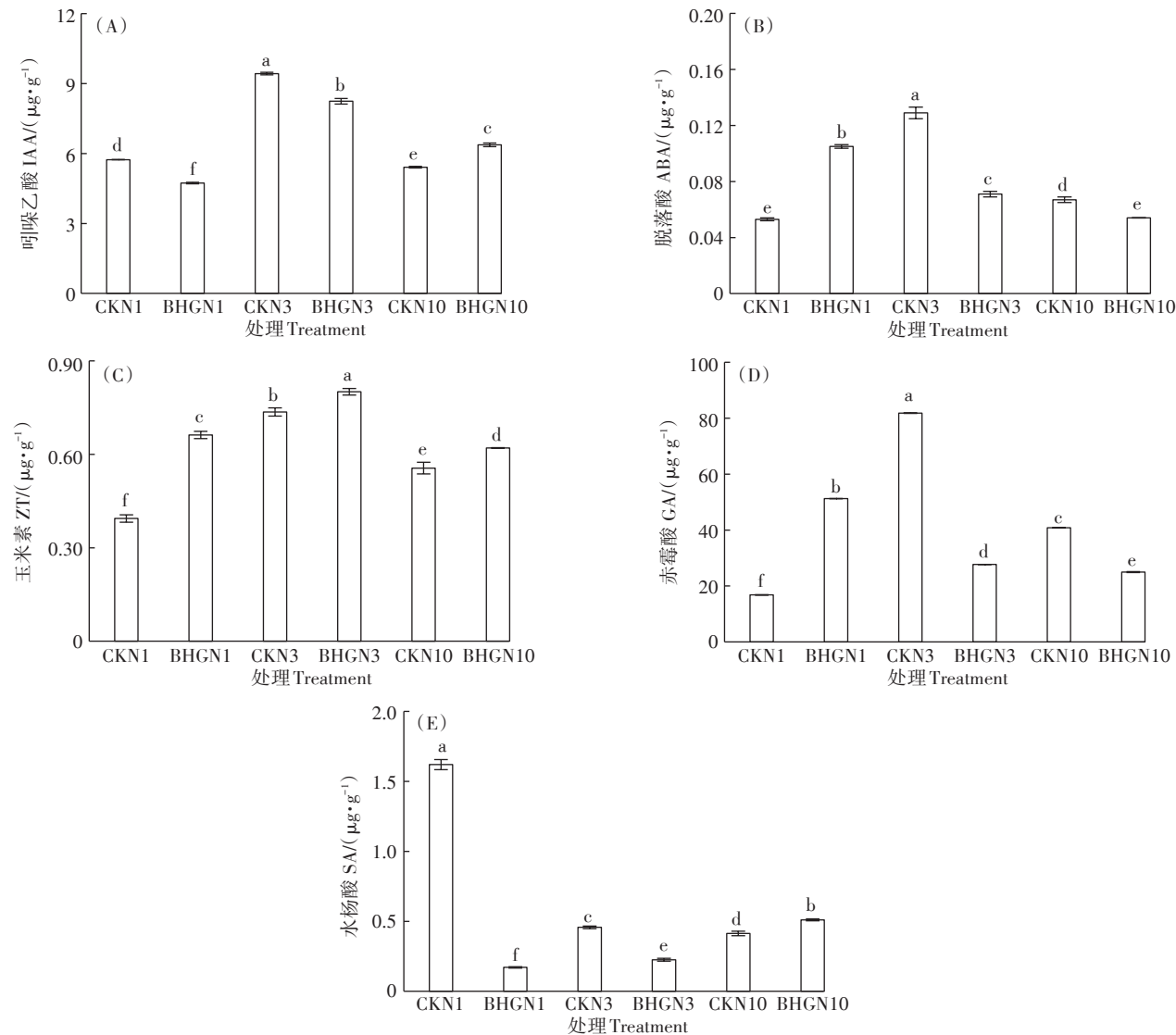


图3 不同处理小白菜激素的含量

Figure 3 Hormone content in pakchoi with different treatments

表3 不同处理下小白菜表型指标

Table 3 Phenotypic characteristics of pakchoi with different treatments

处理 Treatment	叶片数 Number of leaves	根冠比 Root cap rate	根长 Length of root/cm	株高 Plant height/cm	单株根鲜质量 Fresh weight of root per plant/g	单株根干质量 Dry weight of root per plant/g
CKN1	12.00±0.82cd	0.14±0.01a	50.80±3.32a	17.28±0.82b	3.10±0.03a	0.33±0.02a
BHGN1	11.50±0.58d	0.13±0.01a	44.45±2.18b	16.60±0.85b	2.63±0.04b	0.26±0.04b
CKN3	13.00±0.82abc	0.07±0.00b	42.55±2.32b	24.17±2.35a	2.44±0.08c	0.20±0.03c
BHGN3	13.25±0.50ab	0.08±0.01b	40.98±3.73b	25.37±1.18a	3.00±0.10a	0.25±0.01b
CKN10	12.75±0.96bc	0.06±0.00c	26.30±0.50d	23.55±2.08a	2.27±0.13d	0.20±0.01c
BHGN10	14.00±0.82a	0.06±0.01c	31.78±2.03c	22.85±0.28a	2.11±0.06d	0.19±0.01c

小白菜钾的含量分别显著降低了0.36、0.70个百分点。

乙酸·赤霉素,这些外源激素的添加显著影响小白菜内源激素的含量。而植物内源激素是植物体内可自身合成的微量有机物,可通过与其他激素的互作在非常低的浓度条件下调控植物生长发育^[30]。植物内源

3 讨论

BHG 的主要成分为0.136%的芸苔素内酯·吲哚

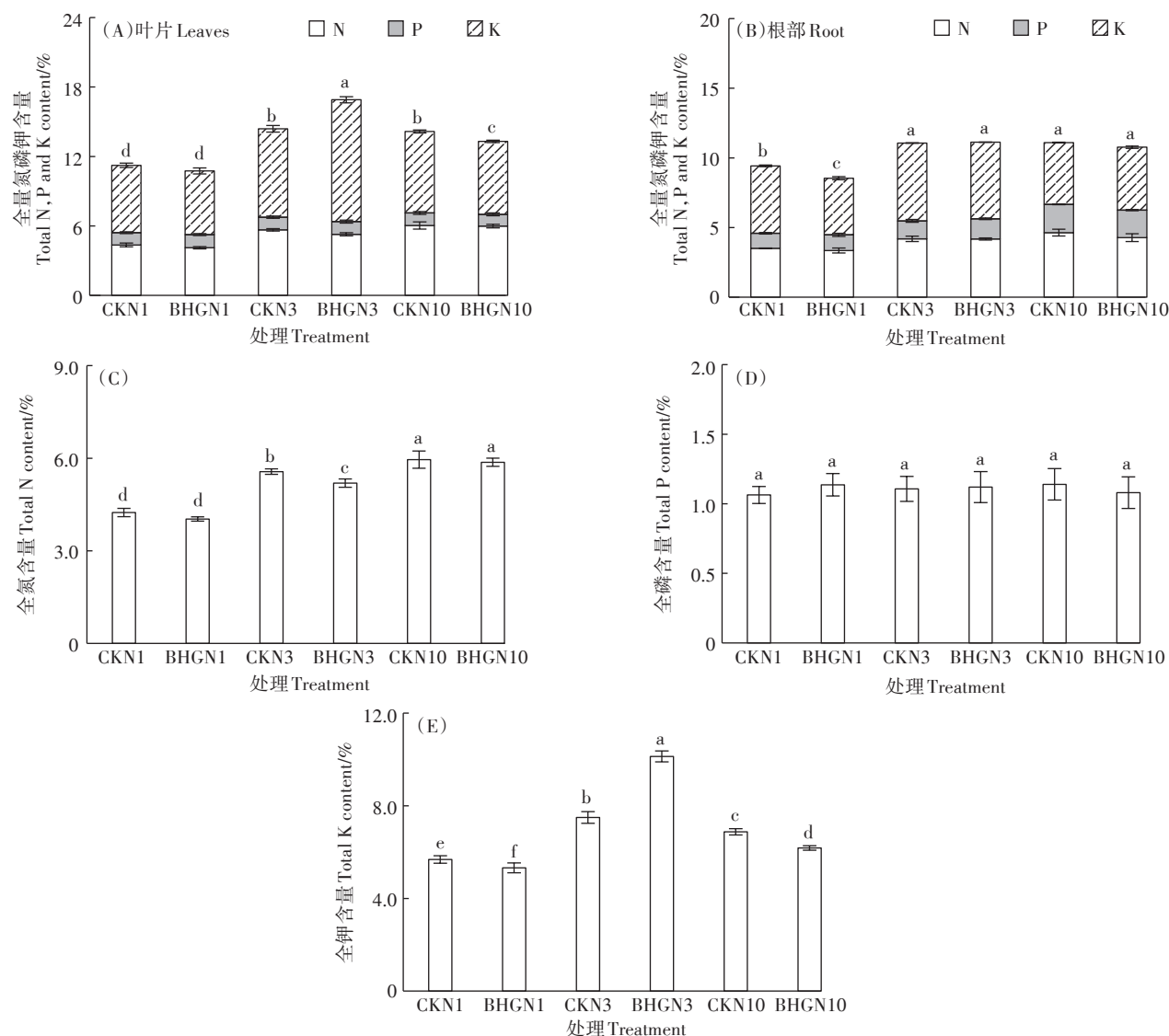


图4 不同处理小白菜氮磷钾的含量

Figure 4 NPK contents in pakchoi with different treatments

激素同样受外源氮素含量波动的影响^[31]。在低氮环境下植物通过 *NRT1.1* 转运出侧根内 IAA 来抑制侧根的伸长,促进主根的发育^[32];高氮条件下,植物体内氮素的积累提高了 β -糖苷酶 1 的表达量,降解了储存在根分生区内 ABA-糖苷酯,释放出 ABA,进而抑制根系的伸长和发育^[33];高氮水平下作物还会降低高亲和力蛋白基因 *NRT1.1*、*NRT1.2* 等表达,减少氮源的摄入,同时通过 ZT 信号反馈途径抑制根系吸收氮,如抑制根系摄取硝酸盐和木质部转运的 *AtNRs* 基因表达,上调地上部氮吸收、转运 *AtNRTs* 基因表达,增强硝酸盐在茎叶中的分配和转运^[34]。植物内其他激素,如 GA,可与氮相互协调来调控作物开花周期^[35]。本研究中,BHG 在与 $3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 氮耦合互作下,显著影响

了激素间的平衡关系,而这些平衡关系显著影响作物的生长,如 ZT/ABA 值的改变会影响植物的生长势^[36], IAA/ABA 值的改变会影响作物根体积、根质量^[37]。因此,BHGN3 的 IAA/ABA 和 ZT/ABA 值分别为等氮条件下对照的 158.88% 和 197.66% 时,根鲜质量、根干质量显著增加 22.95%、25.00%。邹晓霞等^[37]发现 IAA/ABA、ZR/ABA 与作物根系干质量、总长度、体积和表面积呈显著或极显著正相关,这与本研究的结果相一致。说明 BHG 的添加在适宜氮水平下有利于小白菜根系的生长,改变了作物表型。可能原因是 BHG 对 *IPSI*、*PHT1*、*LPR1b*、*KRPs*、*EXPB1-4* 等根系发育相关基因的表达产生显著影响,进一步影响根部轴向根伸长、侧根密度和长度,调控作物根系形态。

BHG改变的激素途径对植物内有机酸的分泌影响显著^[22],而根系分泌的有机酸具有改善作物品质、增强抗逆性、提高肥料利用率等生物功能^[38-41]。戴林等^[39]、常二华等^[41]研究表明水稻根系分泌的草酸、柠檬酸对稻米食味品质有明显影响。本研究中,BHGN3处理较CKN3处理根部和营养液内的有机酸显著提高23.89%、149.18%,显著改变了小白菜品质,小白菜中有机酸含量显著提高91.28%,糖酸比降低75.46%,可溶性蛋白含量显著升高0.05个百分点。这与贾春花等^[8]研究BHGN3对樱桃萝卜产量和品质影响得出的BHGN3降低樱桃萝卜品质的结论不同,这可能是因为栽培方式和肥料施用水平有差异。陈露等^[42]研究表明紫色小白菜内有机酸主要为苹果酸、柠檬酸、丙二酸、琥珀酸和酒石酸,而本试验条件下,供试小白菜分泌积累的有机酸主要是草酸,与其存在差异,可能是由于小白菜品种不同。

BHG同样可调控激素路径,进而影响作物对营养的吸收利用,如基质培养BR可通过BZR1信号激发作物体内自噬体的形成,增强叶绿素含量而减少泛素化蛋白的积累,进而提高植物获取氮营养能力^[16]。IAA可提高大田正常供钾植株的根系 V_{max} 值(根系钾吸收动力学参数)和内流型钾离子通道基因 $NKT2$ 、 $NtKCI$ 的表达量,显著增加地上部和地下部干质量6.05%、8.54%^[43]。Zhang等^[21]研究指出外源IAA、GA通过影响 $IPS1$ 、 $PHT1$ 、 $LPR1b$ 、 $KRP5$ 、 $EXPB1-4$ 等根系发育相关基因的表达,调控玉米根系形态,提高大田玉米对磷的吸收和积累。本研究中BHGN3的添加,在3 mmol·L⁻¹氮水平时小白菜内钾的含量显著提高了2.64个百分点,但氮的含量显著降低0.37个百分点。可能原因是不同培养环境下,不同作物的氮、磷养分吸收状况对BHGN3的响应存在差异,而BHGN3使植物体内有机酸含量提高,显著促进作物对钾素的吸收利用。BHGN3可提高水稻、苹果、小麦、花生等作物产量^[9-14],本研究发现BHGN3较CKN3显著增产14.87%,干质量增加5.32%;BHGN1较CKN1增产不显著,干质量显著降低9.02%。可能原因是1 mmol·L⁻¹氮水平下,氮素成为限制小白菜产量的主要因子,BHGN3内激素过分刺激小白菜引起了小白菜的早衰。10 mmol·L⁻¹高氮条件下,添加BHGN3的处理中,小白菜ZT/ABA、IAA/ABA值比CKN10升高38.50%和46.08%,根长显著增加20.84%,根系有机酸、体内SA含量显著提高36.18%、23.57%,但产量无显著差异。可能的原因是作物在不同氮水平下启动的氮吸收、转

运蛋白的分子网络和激素调控途径不同^[44],高氮水平下BHGN3激发SA路径,提高作物抗胁迫能力需要消耗更多营养和能量^[22,31]。综上说明作物对BHGN3的响应与施氮水平密切相关。

4 结论

(1)BHGN3对小白菜产量、品质的影响与施氮水平密切相关,主要机理为调控小白菜内源激素含量。

(2)与对照相比,BHGN3在3 mmol·L⁻¹氮水平显著增产,小白菜ZT/ABA、IAA/ABA值提高97.66%、58.88%,根鲜质量、根干质量提高22.95%、25.00%,根部有机酸含量增加23.89%,植株有机酸含量91.28%,钾含量增加2.64个百分点,最终产量提高14.87%;BHGN3在1、10 mmol·L⁻¹氮水平下对小白菜产量无显著影响。

因此,针对养分状况合理施用BHGN3是小白菜优质高产的有效手段。

参考文献:

- [1] 陈亚男,吕晓惠,丁谦,等. 大白菜对氮素响应的基因型差异及相关特征分析[J]. 华北农学报, 2020, 35(1): 131-140. CHEN Ya-nan, LÜ Xiao-hui, DING Qian, et al. Genotypic difference and characteristic analysis of nitrogen response in Chinese cabbage[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2020, 35(1): 131-140.
- [2] 张苗,陈伟,严少华,等. 不同施氮水平对无土栽培白菜生长及氮肥利用率的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(12): 186-189. ZHANG Miao, CHEN Wei, YAN Shao-hua, et al. Effects of different nitrogen levels on growth and nitrogen use efficiency of soilless cultured Chinese cabbage[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 47(12): 186-189.
- [3] 杨仕曦,陈益,杨东,等. 不同氮钾肥配施对两种紫色土白菜产量和品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019(3): 115-121. YANG Shi-xi, CHEN Yi, YANG Dong, et al. Effects of nitrogen and potassium fertilizer on yield and quality of two purple cabbage[J]. *Chinese Soil and Fertilizer*, 2019(3): 115-121.
- [4] 闫世江,张继宁,刘洁. 大白菜品质研究进展[J]. 蔬菜, 2010(11): 32-35. YAN Shi-jiang, ZHANG Ji-ning, LIU Jie. Research progress on quality of Chinese cabbage[J]. *Vegetables*, 2010(11): 32-35.
- [5] 龚振平,于拴仓,张凤兰,等. 大白菜感官品质评价及其与营养成分含量的关系[J]. 农业科学与技术(英文版), 2016, 17(7): 1592-1596. GONG Zhen-ping, YU Shuan-cang, ZHANG Feng-lan, et al. Evaluation of Chinese cabbage sensory quality and its relationship with contents of main nutrient components[J]. *Agricultural Science and Technology*, 2016, 17(7): 1592-1596.
- [6] 董辉,顾爱侠,王彦华,等. 大白菜-结球甘蓝单倍体附加系AC5及其亲本营养品质分析与评价[J]. 中国食品学报, 2016, 16(9): 199-205. DONG Hui, GU Ai-xia, WANG Yan-hua, et al. Analysis and

- evaluation of nutritive composition in Chinese cabbage-cabbage monosomic alien addition line AC5 and its parents[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2016, 16(9):199-205.
- [7] Zhang F S, Chen X P, Vitousek P. An experiment for the world[J]. *Nature*, 2013, 497(7447):33-35.
- [8] 贾春花, 刘之广, 张民, 等. 宛氏拟青霉提取物对樱桃萝卜产量及品质的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(2):176-183. JIA Chun-hua, LIU Zhi-guang, ZHANG Min, et al. Effects of extracts of *Paecilomyces variabilis* on the yield and quality of cherry radish (*Raphanus sativus* L. var. *radculus pers*) [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(2):176-183.
- [9] 张承, 王秋萍, 龙友华, 等. 碧护浸种对桔梗种子萌发及生长的影响[J]. 种子, 2016, 35(2):42-44. ZHANG Cheng, WANG Qiu-ping, LONG You-hua, et al. Effect of seed soaking with Bihu on seed germination and seedling growth of *Platycodon grandiflorum* [J]. *Seed*, 2016, 35(2):42-44.
- [10] 彭昌家, 白体坤, 丁攀, 等. 生物农药防治棚室秋番茄病毒病效果探讨[J]. 中国农学通报, 2016, 32(7):104-108. PENG Chang-jia, BAI Ti-kun, DING Pan, et al. Effect of biological pesticide on prevention and treatment of autumn tomato virus disease in greenhouse[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016, 32(7):104-108.
- [11] 朱聪聪, 邓建平, 张洪程, 等. 生化试剂对机插水稻产量及生理生态特征的影响[J]. 中国稻米, 2015, 21(6):28-31. ZHU Cong-cong, DENG Jian-ping, ZHANG Hong-cheng, et al. Effects of biochemical reagents on yield and physiological and ecological characteristics of mechanical-transplanting rice[J]. *China Rice*, 2015, 21(6):28-31.
- [12] 彭昌家, 白体坤, 丁攀, 等. 生物农药和生化复配制剂防治设施秋番茄温室白粉虱效果研究[J]. 农学学报, 2016, 6(5):23-27. PENG Chang-jia, BAI Ti-kun, DING Pan, et al. Prevention and treatment effect of biopesticide and biochemical compounded preparation on autumn tomato greenhouse whitefly[J]. *Journal of Agriculture*, 2016, 6(5):23-27.
- [13] 王京, 梁微, 王磊, 等. “碧护”对苹果幼苗生长和养分积累的效应[J]. 北方园艺, 2019(4):24-30. WANG Jing, LIANG Wei, WANG Lei, et al. Effects of ‘BIHU’ on growth and nutrient accumulation of apple seedlings[J]. *Northern Horticulture*, 2019(4):24-30.
- [14] 苟建华, 彭昌家, 白体坤, 等. 生物农药防治温室秋番茄病毒病效果研究[J]. 安徽农学通报, 2016, 22(5):61-64. GOU Jian-hua, PENG Chang-jia, BAI Ti-kun, et al. Effect of biological pesticides on the prevention and treatment of autumn tomato virus diseases in greenhouse[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2016, 22(5):61-64.
- [15] Jia Z T, Giehl R, Meyer R C, et al. Natural variation of BSK3 tunes brassinosteroid signaling to regulate root foraging under low nitrogen [J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1):2378.
- [16] Wang Y, Cao J J, Wang K X, et al. BZR1 mediates brassinosteroid-induced autophagy and nitrogen starvation in tomato[J]. *Plant Physiology*, 2019, 179(2):671-685.
- [17] Planas-Riverola A, Gupta A, Betegón-Putze I, et al. Brassinosteroid signaling in plant development and adaptation to stress[J]. *Development (Cambridge)*, 2019, 146(5):151894.
- [18] Yu M H, Zhao Z Z, He J X. Brassinosteroid signaling in plant-microbe interactions[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2018, 19(12):4091.
- [19] Zheng L W, Yang Y L, Gao C, et al. Transcriptome analysis reveals new insights into *MdBAK1*-mediated plant growth in *malus domestica* [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67(35):9757-9771.
- [20] Zheng L W, Zhao C D, Mao J P, et al. Genome-wide identification and expression analysis of brassinosteroid biosynthesis and metabolism genes regulating apple tree shoot and lateral root growth[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2018, 231:68-85.
- [21] Zhang X R, Wang B M, Zhao Y J, et al. Auxin and GA signaling play important roles in the maize response to phosphate deficiency[J]. *Plant Science*, 2019, 283:177-188.
- [22] Haruta M, Sussman M R. Ligand receptor-mediated regulation of growth in plants[J]. *Curr Top Dev Biol*, 2017, 123:331-363.
- [23] 刘燕, 姚媛媛, 杨越超, 等. 小分子有机酸钾对水稻种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(12):2142-2151. LIU Yan, YAO Yuan-yuan, YANG Yue-chao, et al. Effects of small molecule organic sylvites on seed germination and seedling growth of rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(12):2142-2151.
- [24] 刘小琥, 彭新湘, 陈德万. 烟草植株各部位的草酸含量变化[J]. 植物生理学通讯, 2001, 37(2):126-127. LIU Xiao-hu, PENG Xin-xiang, CHEN De-wan. Distribution of oxalate in tobacco plantlets[J]. *Plant Physiology Communications*, 2001, 37(2):126-127.
- [25] Vega A, O'Brien J A, Gutiérrez R A. Nitrate and hormonal signaling crosstalk for plant growth and development[J]. *Curr Opin Plant Biol*, 2019, 52:155-163.
- [26] Ma Q X, Cao X C, Wu L H, et al. Light intensity affects the uptake and metabolism of glycine by pakchoi (*Brassica chinensis* L.) [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1):21200.
- [27] 代新俊, 杨珍平, 陆梅, 等. 不同形态氮肥及其用量对强筋小麦氮素转运、产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(5):710-720. DAI Xin-jun, YANG Zhen-ping, LU Mei, et al. Effects of nitrogen forms and amounts on nitrogen translocation, yield and quality of strong-gluten wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(5):710-720.
- [28] 李洪娜, 许海港, 任怡华, 等. 不同施氮水平对矮化富士苹果幼树生长、氮素利用及内源激素含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(5):1304-1311. LI Hong-na, XU Hai-gang, REN Yi-hua, et al. Effect of different N application rates on plant growth, ¹⁵N-urea utilization and hormone content of dwarf apple trees[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(5):1304-1311.
- [29] 杨东清, 董文华, 骆永丽, 等. 外源6-BA对两种氮素水平下小麦幼苗叶片光合性能及内源激素含量的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(20):3871-3884. YANG Dong-qing, DONG Wen-hua, LUO Yong-li, et al. Effects of exogenous 6-BA on photosynthetic characteristics and endogenous hormone content in wheat leaves under two nitrogen application levels at seedling stage[J]. *Scientia Agricultura Si-*

- nica, 2017, 50(20):3871-3884.
- [30] 卢玉秋, 宋阿琳, 唐治玉, 等. UPLC-MS/MS同时测定土壤中19种植物激素方法的建立和验证[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(6):953-962. LU Yu-qiu, SONG A-lin, TANG Zhi-yu, et al. Establishment and validation of UPLC-MS/MS method for simultaneous determination of 19 phytohormones in soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(6):953-962.
- [31] Vanstraelen M, Benkova E. Hormonal interactions in the regulation of plant development[J]. *Annual Review of Cell and Developmental Biology*, 2012, 28:463-487.
- [32] Krouk G, Lacombe B, Bielach A, et al. Nitrate-regulated auxin transport by *NRT1.1* defines a mechanism for nutrient sensing in plants[J]. *Developmental Cell*, 2010, 18(6):927-937.
- [33] Ondizighi-Assoume C A, Chakraborty S, Harris J M. Environmental nitrate stimulates abscisic acid accumulation in *Arabidopsis* root tips by releasing it from inactive stores[J]. *Plant Cell*, 2016, 28(3):729-745.
- [34] Gu J F, Li Z K, Mao Y Q, et al. Roles of nitrogen and cytokinin signals in root and shoot communications in maximizing of plant productivity and their agronomic applications[J]. *Plant Science*, 2018, 274:320-331.
- [35] Gras D E, Vidal E A, Undurraga S F, et al. SMZ/SNZ and gibberellin signaling are required for nitrate-elicited delay of flowering time in *Arabidopsis thaliana*[J]. *J Exp Bot*, 2018, 69(3):619-631.
- [36] 李合生. 现代植物生理学[M]. 二版. 北京:高等教育出版社, 2006:193-242. LI He-sheng. Modern plant physiology[M]. 2nd Edition. Beijing:Higher Education Press, 2006:193-242.
- [37] 邹晓霞, 张晓军, 王铭伦, 等. 土壤容重对花生根系生长性状和内源激素含量的影响[J]. 植物生理学报, 2018, 54(6):1130-1136. ZOU Xiao-xia, ZHANG Xiao-jun, WANG Ming-lun, et al. Effects of soil bulk density on root growth traits and endogenous hormones contents in peanut (*Arachis hypogaea*) [J]. *Plant Physiology Journal*, 2018, 54(6):1130-1136.
- [38] 朱静平, 程凯. 3种水培植物根系分泌的有机酸对氮循环菌的影响[J]. 环境工程学报, 2011, 5(9):2139-2143. ZHU Jing-ping, CHENG Kai. Effect of organic acids exuded from hydroponic plants roots on nitrogen cycling bacteria[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2011, 5(9):2139-2143.
- [39] 戢林, 李廷轩, 张锡洲, 等. 水稻氮高效基因型根系分泌物中有机酸和氨基酸的变化特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(5):1046-1055. JI Lin, LI Ting-xuan, ZHANG Xi-zhou, et al. Characteristics of organic acid and amino acid in root exudates of rice genotype with high nitrogen efficiency[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(5):1046-1055.
- [40] 张治宏, 杨诗卡, 韩超, 等. 环境胁迫对水生植物根系分泌小分子量有机酸(LMWOAs)的影响特征[J]. 湖泊科学, 2020, 32(2):462-471. ZHANG Zhi-hong, YANG Shi-ka, HAN Chao, et al. Effects of environmental stress on characteristics of low molecular weight organic acids secreted by macrophyte roots[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, 32(2):462-471.
- [41] 常二华, 张耗, 张慎凤, 等. 结实期氮磷营养水平对水稻根系分泌物的影响及其与稻米品质的关系[J]. 作物学报, 2007, 33(12):1949-1959. CHANG Er-hua, ZHANG Hao, ZHANG Shen-feng, et al. Effects of nitrogen and phosphorus on the root exudates during grain filling and their relations with grain quality of rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33(12):1949-1959.
- [42] 陈露, 李家明, 林志强, 等. 紫色小白菜有机酸的提取优化及UPLC定量分析[J]. 天然产物研究与开发, 2019, 31(6):1038-1045. CHEN Lu, LI Jia-ming, LIN Zhi-qiang, et al. Optimization of organic acids and UPLC analysis of purple cabbage[J]. *Nat Prod Res Dev*, 2019, 31(6):1038-1045.
- [43] 郭泽, 李子绅, 代晓燕, 等. 低钾胁迫下外源生长素对烟草根系生长及钾吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(7):1173-1184. GUO Ze, LI Zi-shen, DAI Xiao-yan, et al. Effects of auxin on tobacco root growth and potassium uptake under low potassium stress [J]. *Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(7):1173-1184.
- [44] Gaudinier A, Rodriguez-Medina J, Zhang L, et al. Transcriptional regulation of nitrogen-associated metabolism and growth[J]. *Nature*, 2018, 563(7730):259-264.