

引用格式: 王金禹, 刘娟, 杨宏羽, 等. 6-苄氨基嘌呤对马铃薯气孔特征、干物质分配和块茎产量的影响[J]. 西北植物学报, 2025, 45(2): 0000-0000. [WANG J Y, LIU J, YANG H Y, *et al.* Effects of 6-benzyl aminopurine on stomatal characteristics, dry matter distribution, and tuber yield of potatoes[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2025, 45(2): 0000-0000.] DOI:10.7606/j.issn.1000-4025.20240533

6-苄氨基嘌呤对马铃薯气孔特征、 干物质分配和块茎产量的影响

王金禹^{1,2}, 刘娟³, 杨宏羽⁴, 张忠福⁵, 程李香², 余斌²

(1 甘肃农业大学 农学院, 兰州 730070; 2 甘肃农业大学 省部共建干旱生境作物学国家重点实验室, 兰州 730070; 3 甘肃农业大学 水利水电工程学院, 兰州 730070; 4 甘肃农业大学 园艺学院, 兰州 730070; 5 张掖市山丹县种子产业发展中心, 甘肃张掖 734100)

摘要 【目的】探究不同浓度 6-苄氨基嘌呤(6-BA)对马铃薯叶片气孔特征、干物质分配和产量的影响, 为有效利用植物生长调节剂促进马铃薯生产提供依据。【方法】以人工气候室内盆栽马铃薯品种‘费乌瑞它’为材料, 设置 0 (CK), 15, 25, 35 mg/L 6-BA 叶面喷施处理, 在不同生长期观测叶片气孔特征和植株生长、生理指标, 成熟后收获统计干物质分配及产量构成指标。【结果】与 CK 相比, 马铃薯的各项指标在 15 mg/L 6-BA 处理下均得到提高和改善, 在其他浓度处理下反而降低和受到抑制。在 15 mg/L 6-BA 处理下, 马铃薯叶片近轴面和远轴面气孔密度较 CK 分别显著增加 27.36%、3.24%, 叶片相对含水率和蒸腾速率分别升高 6.32%、2.75%。15 mg/L 6-BA 处理干物质在块茎中的分配占比、单株产量、单株结薯数和块茎鲜重分别比对照提高 9.33%、40.49%、20.09%、17.31%。马铃薯叶片近轴面和远轴面气孔密度与单株结薯数显著正相关($P < 0.05$)。【结论】适宜浓度外源 6-BA 处理可显著增加马铃薯叶片气孔密度, 提高干物质在块茎中的分配占比和块茎产量, 并以 15 mg/L 浓度效果最佳。

关键词 马铃薯; 6-BA; 气孔; 干物质分配; 块茎产量

中图分类号 Q945; S532 **文献标志码** A

Effects of 6-benzyl aminopurine on stomatal characteristics, dry matter distribution, and tuber yield of potatoes

WANG Jinyu^{1,2}, LIU Juan³, YANG Hongyu⁴, ZHANG Zhongfu⁵, CHENG Lixiang², YU Bin²

(1 College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2 State Key Laboratory of Arid Land Crop Science, Lanzhou 730070, China; 3 College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 4 College of Horticulture, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 5 Seed Industry Development Center of Shandan County, Zhangye, Gansu 734100, China)

Abstract [Objective] The effects of 6-benzyl aminopurine (6-BA) on leaf stomatal characteristics, dry matter distribution, and yield of potatoes were investigated in order to provide a basis for the application of exogenous hormones to promote potato production. [Methods] The potato variety ‘Favorita’ grown in climate chamber was used as materials, and foliar spraying treatments with 0 (CK), 15, 25, and 35 mg/L 6-BA were set up, respectively. Leaf stomatal characteristics and growth and physiological indexes were analyzed at different growth stages. After harvest, dry matter distribution and yield formation factors were analyzed. [Results] Compared with CK, potato indexes were improved under the treatment of 15 mg/L,

收稿日期: 2024-09-30; 修改稿收到日期: 2024-11-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(32360091); 兰州市人才创新创业项目(2022-RC-40); 甘肃省高校青年博士支持项目(2024QB-061); 甘肃省科技计划项目(24YFNG001); 甘肃省科技厅乡村振兴专项(23CXNA0008)

作者简介: 王金禹(2000—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事马铃薯遗传育种研究。E-mail: 2420672571@qq.com

通信作者: 余斌, 男, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事马铃薯遗传育种研究。E-mail: yubin@gsau.edu.cn

but were decreased at other concentrations. At 15 mg/L 6-BA, the stomatal density on the adaxial and abaxial surfaces of the leaves was increased by 27.36% and 3.24%, respectively, compared with CK. The relative water content and transpiration rate of the leaves were increased by 6.32% and 2.75%, respectively. Treatment with 15 mg/L 6-BA increased the tuber distribution of dry matter, yield per plant, tuber number per plant, and tuber fresh weight by 9.33%, 40.49%, 20.09%, and 17.31%, respectively, compared with the control. The stomatal density of the adaxial and abaxial surfaces of the leaves was positively correlated with the number of tubers per plant ($P < 0.05$). [Conclusion] Favorable concentration of exogenous 6-BA treatment could significantly increase the stomatal density of potato leaves, the proportion of dry matter in tubers, and tuber yield, with the optimal concentration of 15 mg/L.

Key words potato; 6-BA; porosity; dry matter distribution; tuber yield

马铃薯 (*Solanum tuberosum* L.) 是重要的非谷类粮食作物, 其植株生长发育过程受多种激素的综合调控^[1]。探明植物生长调节剂对马铃薯植株生长、气孔发育、干物质分配和块茎产量的影响, 对有效利用植物生长调节剂促进马铃薯生产具有重要意义。研究表明, 植物激素可在植株体内协调细胞和器官的发育和分布模式, 广泛参与调节植株生长^[2]。细胞分裂素可以促进植物细胞的分裂与膨大, 它在马铃薯生长发育过程中可打破植株顶端优势、延缓衰老、延长开花期及对逆境胁迫的响应等^[3-5]。同时, 细胞分裂素可直接诱导细胞质膜的超极化反应或间接通过调节保卫细胞中 NO 和 H₂O₂ 的水平, 促进叶片气孔开放, 提高叶片蒸腾速率^[6-9]。

细胞分裂素类别多样, 其中 6-BA (6-苄氨基嘌呤) 主要通过刺激细胞分裂以促进植株生长发育, 并抑制植物体内叶绿素、核酸、蛋白质的分解, 进而延缓植株衰老。研究表明, 植株生长过程中不施加 6-BA 比施加 6-BA 会更早出现叶片黄化和植株衰老现象^[11]。施加外源 6-BA 会提高抗氧化酶活性, 抑制膜脂氧化程度, 减小叶片气孔阻力, 延缓小麦旗叶衰老及甘蓝型油菜光合色素含量降低^[12-13], 增强叶片光合能力, 提高植株对低温弱光环境的抵御能力^[14-15]。外源 6-BA 可促进烟草植株生长, 增加烟草种子粒数和千粒重, 进而提高种子产量^[16]。马铃薯生长发育过程中施加外源 6-BA 可影响 IAA、GA₃、6-BA 等内源激素含量变化, 加快解除马铃薯块茎休眠^[17], 促进马铃薯脱毒苗的叶片生长^[18], 低浓度的 6-BA 还可刺激马铃薯块茎形成, 增加块茎鲜重和块茎产量。目前, 6-BA 在马铃薯生长发育方面的应用主要集中于植株生理指标, 缺少对叶片气孔密度和干物质分配影响的研究, 通过调控气孔密度和干物质分配进而影响块茎产量的研究也鲜有报道。本研究以马铃薯品种‘费乌瑞它’为试验材料, 对其叶面喷施不同浓度 6-BA, 探究不同浓度 6-BA 对马铃薯植株生长、叶片气孔特征和干物质分配特

征及块茎产量形成组分的调控作用, 为促进植物生长调节剂在马铃薯生产中的应用提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

选用马铃薯品种‘费乌瑞它’(Favorita) 为试验材料, 其试管苗由甘肃农业大学省部共建干旱生境作物学国家重点实验室提供。

1.2 试验设计

挑选无病害、健康马铃薯试管苗进行继代培养, 30 d 后选取长势一致的幼苗炼苗 2 d 后移栽至装有蛭石的花盆(直径 12 cm、深度 10 cm), 每盆 1 株, 置于光照培养箱[光强 250 μmol/(m²·s), 温度 22 °C, 光照 16 h, 黑暗 8 h]培养 7 d, 再选择长势一致、健壮的植株转移至人工气候室(温度 22 °C, 光照 16 h, 黑暗 8 h)继续培养。试验共设置 0, 15, 25, 35 mg/L 6-BA 4 个处理, 每个处理 6 盆(重复)。每盆叶面喷施设置浓度的处理液 50 mL, 处理前及处理后每 5 d 测量 1 次植株形态指标和生理指标, 共测定 7 次, 待结薯后再对块茎产量性状进行统计。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 形态指标

参照张永成等^[19]方法对所有植株进行测定。株高: 用直尺测量从茎基部到顶端生长点的高度; 茎粗: 用游标卡尺测量茎顶端到茎基部第 3 茎节间的直径; 根长: 测量从根顶部生长点到根茎之间的长度; 根、茎、叶干重: 取植株冲洗后擦干表面水分, 每 1 株的根、茎、叶分离后分别放入 110 °C 烘箱中 4 h 后, 置于室温下冷却至恒重, 测定其干重。

1.3.2 生理指标

叶片相对含水率: 取新鲜叶片称重(w_F), 再浸入水中 2 h 后进行称重(w_T), 然后在 110 °C 烘箱中 2 h 后, 置于室温下冷却至恒重后称重(w_D)。据此计算叶片相对含水率(c_{RW})。

$$c_{RW} = [(w_F - w_D) / (w_T - w_D)] \times 100\% \quad (1)$$

叶片叶绿素含量:称取 0.1 g 新鲜叶片,剪碎放入棕色离心管中,加入无水乙醇 5 mL,充分振荡使叶片均匀分布,60 °C 水浴锅中加热 6 h,至叶片完全发白时自然冷却。使用分光光度计(Thermo Fisher Scientific 201 PC, USA),以无水乙醇为对照,在 645,663 nm 波长下测量光密度 D_{663} 和 D_{645} ,依据公式计算叶绿素 a 含量(C_a)、叶绿素 b 含量(C_b)和叶绿素总含量(C_t)^[20]。

$$C_a = 12.7D_{663} - 2.69D_{645} \quad (2)$$

$$C_b = 22.9D_{645} - 2.69D_{663} \quad (3)$$

$$C_t = C_a + C_b = 20.21D_{645} + 8.02D_{663} \quad (4)$$

叶片蒸腾速率:参照蒋高明^[21]方法,在人工气候室环境中,同一时间使用便携式光合仪(Li-6400XT, Li-COR, USA)测定叶片蒸腾速率。

1.3.3 气孔指标

气孔密度:参照朱济友等^[22]方法测定气孔密度。取植株自上向下第 3 叶片,近轴面气孔提取采用指甲油印迹法,远轴面气孔提取采用胶带撕取法。使用正倒置一体荧光显微镜(RVL-100-G ECHO, USA)观察气孔,各玻片取 3 个视野(目镜×10,物镜×20)进行计数,据此计算气孔密度(视野气孔个数/视野面积)。

气孔大小:采用正倒置一体荧光显微镜(RVL-100-G ECHO, USA),各玻片视野(目镜×10,物镜

×20)随机选取 20 个气孔,后使用 Image J(1.8.0)软件测量其长度和宽度。

1.3.4 块茎产量指标

取新鲜块茎冲洗后擦干表面水分,使用电子分析天平测定块茎鲜重,再放入 110 °C 烘箱中 12 h 后,置于室温下冷却至恒重,测定块茎干重。使用电子游标卡尺测量块茎长度和宽度。另外,对各盆栽的结薯株数及结薯数进行计数,并计算植株结薯率(结薯株数/总株数×100%)和单株结薯数(结薯总数/结薯株数)。

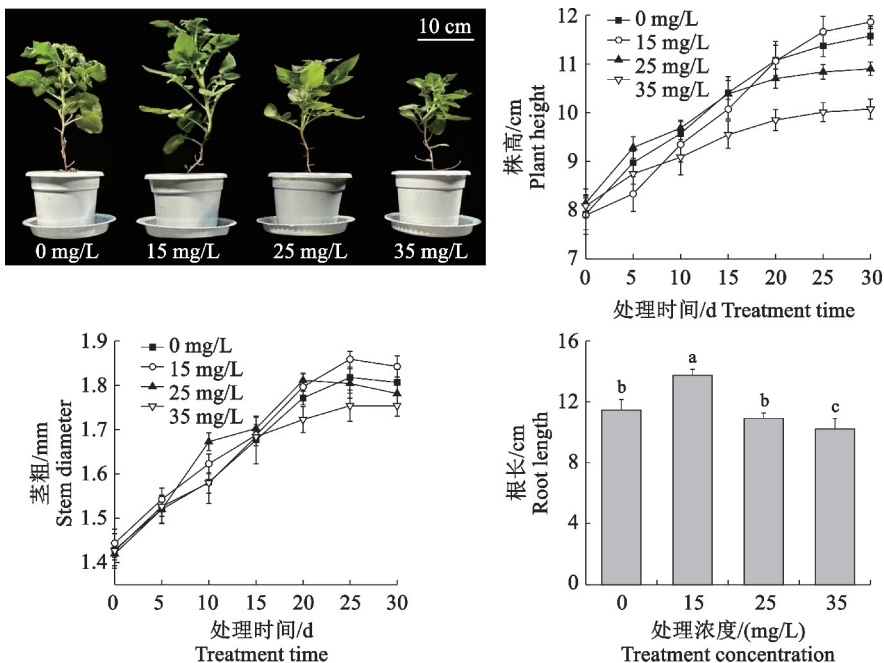
1.4 数据分析

用 Excel 2021 软件整理数据,用 IBM SPSS Statistics 27 和 Origin 2022 统计分析与制作图表。

2 结果与分析

2.1 不同浓度 6-BA 对马铃薯植株生长的影响

图 1 显示,马铃薯株高、茎粗和根长在 15 mg/L 6-BA 处理下均得到促进,在 25 mg/L 和 35 mg/L 6-BA 处理下都受到不同程度抑制。其中,处理 30 d 时,马铃薯株高、茎粗和根长在 15 mg/L 6-BA 处理下分别比 CK(0 mg/L)显著增加 3.35%、2.01%、19.87%,在 25 mg/L 6-BA 处理下较 CK 分别降低 5.63%、1.38%、4.69%,在 35 mg/L 6-BA 处理较 CK 分别显著降低 12.23%、2.91%、10.70%(图 1)。



不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

图 1 不同浓度 6-BA 处理对马铃薯植株生长的影响

Different lowercase letters indicate significant difference between treatments ($P < 0.05$).

Fig. 1 Effects of different concentrations of 6-BA on the growth of potato plants

2.2 不同浓度 6-BA 对马铃薯叶片生理特性的影响

表 1 显示,马铃薯叶片相对含水率在外源 6-BA 处理 10 d 时处于相对较高水平,此时 15 mg/L 6-BA 处理较 CK 显著升高 3.20%,而 25 mg/L 和 35 mg/L 6-BA 处理均较 CK 不同程度降低,而在处理 30 d 时处于相对较低水平,15 mg/L 6-BA 仍显著高于 CK 6.32%,25 mg/L 和 35 mg/L 6-BA 处理均与 CK 相近。叶片蒸腾速率在外源 6-BA 处理 15 d 时达到最高值,15 mg/L 和 25 mg/L 6-BA 处理较 CK 分别显著升高 17.69%、12.24%,35 mg/L 6-BA 处理较 CK 显著降低 30.61%;在处理 30 d 时,叶片蒸腾速率在 15 mg/L 6-BA 处理下比 CK 显著升高 2.75%,在 25 mg/L 6-BA 处理下与 CK 无显

著差异,在 35 mg/L 6-BA 处理下比 CK 显著降低 10.64%。叶片叶绿素含量在 6-BA 处理 20 d 时达到最高值,15 mg/L、35 mg/L 6-BA 处理叶绿素总含量较 CK 分别显著降低 12.48%、15.25%,叶绿素 a 含量较 CK 分别显著降低 10.95%、13.33%,叶绿素 b 含量较 CK 分别显著降低 14.47%、18.42%,而 25 mg/L 处理叶绿素含量与 CK 无显著差异;在处理 30 d 时,各处理叶绿素含量随外源 6-BA 处理浓度增加逐渐降低,叶绿素总含量较 CK 显著降低 2.08%~17.67%,叶绿素 b 含量较 CK 显著降低 14.66%~30.58%,而叶绿素 a 含量在 15 mg/L 和 25 mg/L 6-BA 处理与 CK 无显著差异,在 35 mg/L 6-BA 处理下显著降低 12.23%(表 1)。

表 1 不同浓度 6-BA 处理对马铃薯叶片生理特性的影响

Table 1 Effects of different concentrations of 6-BA treatments on the physiological characteristics of potato leaves

处理时间/d Treatment time	6-BA 浓度/ (mg/L) 6-BA concentration	相对含水率/% Relative water content	蒸腾速率/ [mmol/(m ² ·s)] Transpiration rate	叶绿素总含量/ (mg/g) Total chlorophyll content	叶绿素 a 含量/ (mg/g) Chlorophyll a content	叶绿素 b 含量/ (mg/g) Chlorophyll b content
5	0(CK)	83.18±0.03a	0.86±0.01a	1.68±0.03b	1.20±0.01b	0.48±0.02b
	15	80.80±0.01ab	0.88±0.01a	1.70±0.03b	1.25±0.03a	0.46±0.02b
	25	80.97±0.02ab	0.83±0.06a	1.87±0.01a	1.28±0.01a	0.59±0.01a
	35	79.97±0.01b	0.75±0.01b	1.68±0.02b	1.11±0.03c	0.57±0.02a
10	0(CK)	83.73±0.01b	1.14±0.01c	1.88±0.05a	1.23±0.01b	0.64±0.06a
	15	86.18±0.01a	1.48±0.01a	1.76±0.03b	1.25±0.03b	0.51±0.03b
	25	82.55±0.02b	1.23±0.06b	1.86±0.04a	1.40±0.08a	0.46±0.04b
	35	82.43±0.01b	1.08±0.05c	1.76±0.02b	1.26±0.03b	0.49±0.02b
15	0(CK)	82.19±0.01b	1.47±0.07b	1.92±0.04a	1.06±0.06b	0.86±0.03a
	15	85.13±0.02a	1.73±0.03a	1.93±0.02a	1.13±0.01ab	0.80±0.01b
	25	82.70±0.01b	1.65±0.01a	1.88±0.03a	1.16±0.02a	0.72±0.04c
	35	81.44±0.01b	1.02±0.11c	1.79±0.04b	1.15±0.05a	0.64±0.02d
20	0(CK)	81.39±0.01b	1.25±0.06c	2.16±0.01a	1.40±0.01a	0.76±0.01a
	15	85.01±0.03a	1.60±0.01a	1.89±0.01b	1.25±0.01b	0.65±0.01b
	25	83.61±0.01ab	1.36±0.01b	2.18±0.03a	1.42±0.04a	0.75±0.02a
	35	80.32±0.01b	0.99±0.01d	1.83±0.01c	1.21±0.04b	0.62±0.05b
25	0(CK)	80.79±0.01b	1.04±0.06ab	2.08±0.01a	1.23±0.01b	0.85±0.01a
	15	83.56±0.01a	1.09±0.01a	2.04±0.01b	1.26±0.01b	0.78±0.01b
	25	80.73±0.02b	1.00±0.05bc	2.08±0.02a	1.37±0.06a	0.71±0.05c
	35	80.29±0.01b	0.96±0.01c	1.73±0.02c	1.16±0.01c	0.57±0.01d
30	0(CK)	78.00±0.02b	0.87±0.02b	1.97±0.01a	1.39±0.01ab	0.58±0.01a
	15	82.93±0.03a	0.90±0.01a	1.93±0.02b	1.43±0.02a	0.49±0.02b
	25	79.15±0.01b	0.87±0.01b	1.86±0.04c	1.38±0.05b	0.48±0.01b
	35	77.03±0.01b	0.78±0.01c	1.62±0.01d	1.22±0.01c	0.40±0.02c

注:同期同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same column and treatment time indicate significant differences between treatments ($P<0.05$).

2.3 不同浓度 6-BA 对马铃薯气孔特征的影响

图 2 显示,马铃薯叶片近轴面和远轴面气孔密度和大小在 15 mg/L 6-BA 处理下得到促进,叶片近轴面和远轴面气孔密度较 CK 分别显著增加 27.36%、3.24%,气孔长度分别显著增加 10.94%、12.55%,气孔宽度分别显著增加 2.99%、8.48%;叶片近轴面和远轴面气孔密度和长度及近轴面气孔宽度在 25 mg/L 6-BA 处理下得到促进,而远轴面气孔宽度受到抑

制,叶片近轴面和远轴面气孔密度较 CK 分别增加 8.49%、0.81%,气孔长度分别增加 9.79%、3.95%,近轴面气孔宽度显著增加 6.31%,远轴面气孔宽度显著降低 4.07%;叶片近轴面和远轴面气孔密度和宽度在 35 mg/L 6-BA 处理下受到抑制,而气孔长度得到促进,近轴面和远轴面气孔密度较 CK 分别显著降低 6.60%、4.05%,气孔宽度分别显著降低 2.49%、5.87%,气孔长度分别增加 2.81%、6.67%(图 2、表 2)。

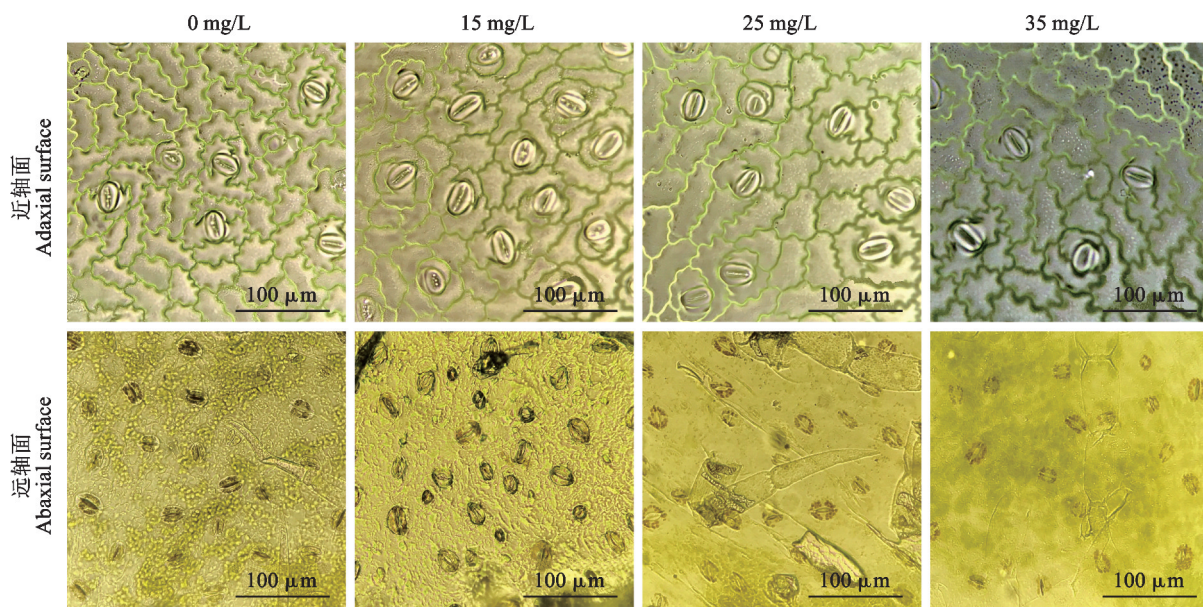


图 2 不同浓度 6-BA 处理下马铃薯叶片近轴面和远轴面气孔特征

Fig. 2 Stomatal characteristics on the adaxial and abaxial surfaces of the potato leaves under different concentrations of 6-BA treatments

表 2 不同浓度 6-BA 处理对马铃薯叶片气孔特征的影响

Table 2 Effects of different concentrations of 6-BA on stomatal characteristics of potato leaves

6-BA 浓度/ (mg/L) 6-BA concentration	气孔密度/(mm ⁻²) Stomatal density		气孔长度/μm Stomatal length		气孔宽度/μm Stomatal width	
	近轴面 Adaxial surface	远轴面 Abaxial surface	近轴面 Adaxial surface	远轴面 Abaxial surface	近轴面 Adaxial surface	远轴面 Abaxial surface
0(CK)	17.67±0.29c	82.33±1.04b	32.00±0.20b	25.50±0.30c	20.07±0.25c	18.43±0.21b
15	22.50±1.00a	85.00±1.00a	35.50±0.44a	28.70±0.66a	20.67±0.32b	20.00±0.26a
25	19.17±0.29b	83.00±1.73ab	35.13±0.61a	26.50±0.26bc	21.33±0.31a	17.67±0.35c
35	16.50±0.50d	79.00±0.87c	32.90±0.85b	27.20±0.85b	19.57±0.12d	17.37±0.31c

注:同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$). The same as below.

2.4 不同浓度 6-BA 对马铃薯块茎产量及干物质分配的影响

马铃薯结薯率在 15 mg/L 和 25 mg/L 6-BA 处理下均达到 100%,与 CK 相同,而在 35 mg/L 6-BA

处理下为 71.43%;马铃薯平均单株结薯数和平均块茎鲜重在 15 mg/L 6-BA 处理下分别比 CK 增加 20.00%和 17.23%,但均未达到显著水平,在 25 mg/L 和 35 mg/L 6-BA 处理下均比 CK 不同程度降低,但仅平均

单株结薯数降幅达到显著水平,分别显著降低46.67%、66.67%;马铃薯单株平均产量在15 mg/L 6-BA 处理下较 CK 显著增加40.49%,在25 mg/L 和35 mg/L 处理下较 CK 分别显著降低57.72%和69.57%;马铃薯块茎长度和宽度在15 mg/L 6-BA 处

理下均与 CK 相近,在25 mg/L 和35 mg/L 6-BA 处理下均比 CK 显著降低(图3、表3)。可见,适宜浓度(15 mg/L)外源6-BA 可一定程度促进马铃薯单株结薯数、块茎鲜重增加,显著提高单株块茎产量,但过高浓度6-BA 处理则会显著抑制块茎生长。



图3 不同浓度6-BA 处理下马铃薯块茎大小及数量

Fig. 3 The size and number of potato tubers under the treatment of different concentrations of 6-BA

表3 不同浓度6-BA 处理对马铃薯结薯和块茎生长状况的影响

Table 3 Effects of different concentrations of 6-BA treatments on potato tuberization and growth status

6-BA 浓度/ (mg/L) 6-BA concentration	结薯率/% Tuberization rate	平均单株结薯数 Average tuber number per plant	平均块茎鲜重/g Average tuber fresh weight	平均单株产量/g Average tuber yield per plant	块茎长度/mm Tuber length	块茎宽度/mm Tuber width
0(CK)	100.00	2.14±0.38a	2.08±0.72ab	4.47±1.06b	20.79±1.04a	13.44±1.03a
15	100.00	2.57±0.53a	2.44±0.65a	6.28±1.03a	20.57±0.79a	13.82±1.29a
25	100.00	1.14±0.38b	1.66±0.37b	1.89±0.88c	18.60±0.91c	12.09±0.77b
35	71.43	0.71±0.45b	1.90±0.27ab	1.36±0.95c	19.60±0.73b	13.07±1.30ab

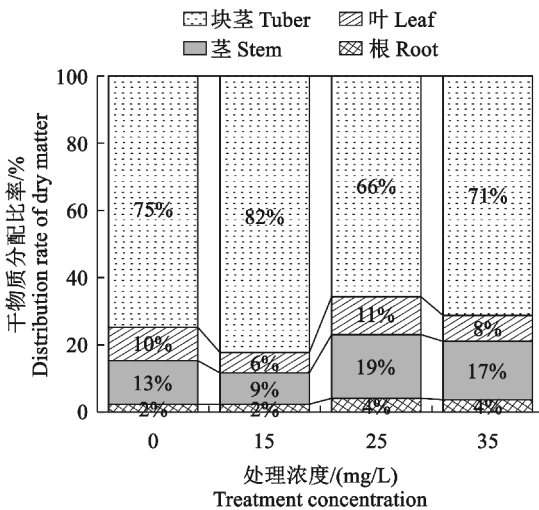


图4 不同浓度6-BA 处理的马铃薯干物质分配率

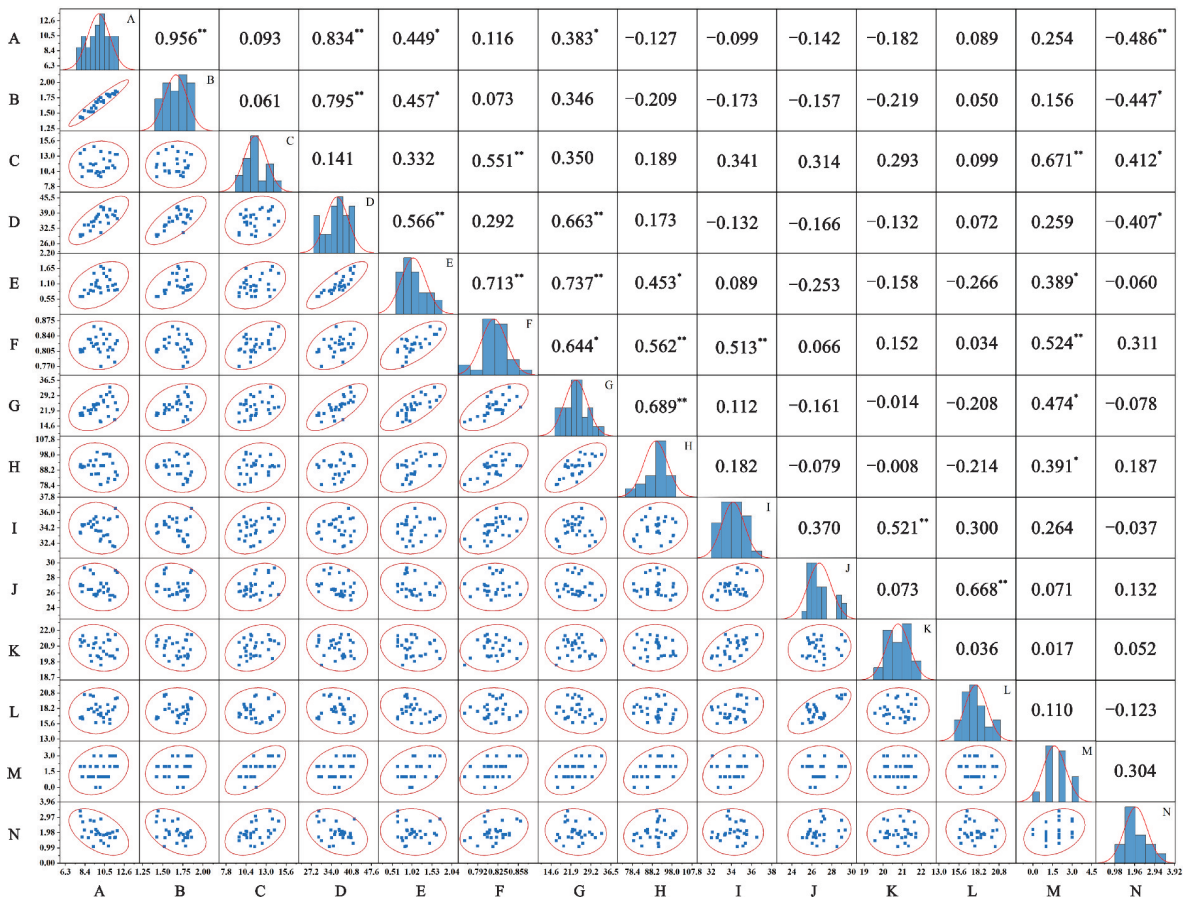
Fig. 4 Dry matter distribution rate in potatoes under the treatment of different concentrations of 6-BA

由图4可知,马铃薯块茎干物质分配占比最高(66%~82%),然后依次是茎(9%~19%)、叶(6%

~11%)、根(2%~4%)。其中,块茎干物质分配占比在15 mg/L 6-BA 处理下明显比 CK(75%)增加(82%),在25 mg/L 和35 mg/L 6-BA 处理下(分别为66%和71%)均比 CK 减少,15 mg/L 6-BA 处理明显高于对照和其他浓度处理。可见,适宜浓度6-BA 处理能明显提高马铃薯块茎干物质分配率,促进干物质在块茎中积累,浓度过高则产生负面影响(图4)。

2.5 马铃薯各性状之间相关性分析

马铃薯各性状相关性分析结果(图5)显示,叶片近轴面气孔密度与叶片叶绿素总含量、蒸腾速率和相对含水率呈极显著正相关($P < 0.01$, r 分别为0.663、0.737、0.644),与远轴面气孔密度呈极显著正相关($P < 0.01$, $r = 0.689$),与平均单株结薯数呈显著正相关($P < 0.05$, $r = 0.474$);叶片远轴面气孔密度与蒸腾速率和叶片相对含水率显著正相关($P < 0.05$, r 分别为0.453、0.562),与平均单株结薯数呈显著正相关($P < 0.05$, $r = 0.391$)。



A. 株高; B. 茎粗; C. 根长; D. 叶绿素总含量; E. 叶片蒸腾速率; F. 叶片相对含水量; G. 近轴面气孔密度; H. 远轴面气孔密度; I. 近轴面气孔长度; J. 远轴面气孔长度; K. 近轴面气孔宽度; L. 远轴面气孔宽度; M. 平均单株结薯数; N. 平均块茎鲜重。

* 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平显著相关。

图 5 马铃薯各性状间的相关性分析

A, plant height. B, stem diameter. C, root length. D, total chlorophyll content. E, leaf transpiration rate. F, leaf relative water content. G, stomatal density on the adaxial surface. H, stomatal density on the abaxial surface. I, stomatal length of adaxial surface. J, stomatal length of abaxial surface. K, stomatal width of adaxial surface. L, stomatal width of abaxial surface. M, average tuber number per plant. N, average tuber fresh weight. * and ** stand for significant correlation at 0.05 and 0.01 level, respectively.

Fig. 5 Correlation analysis between traits of the potatoes

3 讨论

3.1 6-BA 对马铃薯叶片气孔发育的影响

激素是调控气孔发育的重要因子^[23],在气孔发育过程中,IAA 能够参与控制气孔数目,生长素外运的阻断会表现出气孔的形态改变,化学阻断 IAA 转运过程会影响干细胞异常聚集^[24]。BR 信号途径的 BIN2 激酶能通过直接调节不对称细胞分裂从而调控气孔发育,BR 通过抑制 BIN2 介导的转录因子 SPCH (speechless)磷酸化和降解促进下胚轴气孔的形成^[6]。施加外源 ABA 会减少叶片气孔数目,随着 ABA 含量升高,马铃薯叶片气孔关闭,气孔密度下降,气孔导度减小,抑制蒸腾作用^[25],从而提高马铃薯抗旱能力;JA 与 ABA 功能相似,低浓度 JA 也可以促进叶片气孔关闭,减少蒸腾耗水量^[26]。细胞分裂素能够通过

调节保卫细胞中 NO 和 H₂O₂ 水平促进气孔开放,在脱毒马铃薯扦插苗的试验中发现,0.5 mg/L 6-BA 处理可降低叶片气孔导度,限制气孔运动,从而限制叶片光合作用^[17]。前人关于 6-BA 对植物气孔特征影响的研究多集中于气孔运动,而对马铃薯气孔发育影响的研究鲜有报道。本试验发现,叶面喷施不同浓度的 6-BA 对马铃薯叶片近轴面和远轴面气孔密度和大小影响有显著差异,施加 15 mg/L 6-BA 会增加叶片气孔密度和大小,叶片远轴面气孔密度与蒸腾速率和叶片相对含水量显著正相关,说明远轴面气孔特征可能是导致马铃薯抗旱性提高的重要因素。

3.2 6-BA 对马铃薯植株生长的影响

马铃薯生长发育受多种因素影响,植物生长调节剂对马铃薯生长发育有显著调节作用。前人研究发现,施加 GA₃ 显著促进马铃薯生长,使早熟品种

提前开花^[27];外源 ABA 增加马铃薯叶片叶绿素含量、可溶性糖含量,可作为叶片细胞的渗透调节物质,防止冷冻胁迫对马铃薯植株细胞膜的损伤,提高马铃薯抗寒能力^[28];施用 1.5~2.0 mg/L 6-BA 和 0.5~1.0 mg/L IAA 有利于马铃薯茎愈伤组织的生长、茎尖不定芽和叶的分化。6-BA 会增加马铃薯株高、茎鲜重、根鲜重,提高水分利用率、干物质积累量和根系活力^[29]。本试验结果表明,叶面喷施 15 mg/L 6-BA 可使马铃薯株高、茎粗和根长较 CK 分别显著增加 3.35%、2.01%、19.87%,叶片相对含水率和蒸腾速率较 CK 分别显著升高 6.32%、2.75%,从而有效促进马铃薯生长发育。本试验同时发现,在叶面喷施 6-BA 浓度达到 35 mg/L 时,对马铃薯株高、茎粗和根长均会产生抑制作用,此结果可为生产中使用时适宜浓度 6-BA 促进马铃薯生长提供参考依据。

3.3 6-BA 对马铃薯块茎产量的影响

6-BA 是马铃薯块茎发育过程中重要的调控因素。前人研究发现,在基质栽培试验中,施加 10 mg/L 6-BA 可增加马铃薯平均单株结薯数和块茎鲜重^[24];在黑暗诱导组培试验中,2.0 mg/L 6-BA 处理诱导下试管薯结薯率最高,平均块茎鲜重最高^[30];在诱导微型薯试验中,培养基施加 3.0 mg/L 6-BA 栽培的平均单株结薯数最多,7.0 mg/L 6-BA 处理的平均块茎鲜重最高^[31]。本试验结果表明,马铃薯叶面喷施 15 mg/L 6-BA 可使结薯率达到 100%,并可促进平均单株结薯数、平均块茎鲜重和平均单株产量;叶面喷施

25 mg/L 和 35 mg/L 6-BA 均抑制马铃薯平均单株结薯数和平均块茎鲜重。6-BA 对马铃薯产量形成的影响与前人结论基本一致。进一步的性状相关性分析发现,马铃薯叶片气孔密度与平均单株结薯数显著正相关,说明 6-BA 可能通过调节马铃薯叶片气孔密度从而调控产量形成。块茎是马铃薯的经济器官,其干物质的积累是形成马铃薯产量的基础^[25],干物质在马铃薯地上部分和地下部分的积累和分配对产量形成有重要作用,6-BA 是在叶片衰老过程中调节源-库分配的重要激素^[32]。本试验发现不同浓度 6-BA 处理马铃薯块茎获得的干物质分配比率不同,并以 15 mg/L 6-BA 处理下块茎干物质分配占比最大,说明施加适宜浓度外源 6-BA 对马铃薯不同器官的干物质分配具有正向调控作用,且以 15 mg/L 6-BA 处理最有利于块茎获得更高的干物质分配比率。

4 结论

叶面喷施 6-BA 对马铃薯植株生长、气孔发育有显著影响,适宜浓度 6-BA 有利于提高马铃薯干物质在块茎中的分配占比和块茎产量。其中叶面喷施 15 mg/L 6-BA 可显著增加马铃薯叶片气孔密度,有效提高叶片相对含水率和蒸腾速率,并且可通过提高干物质在块茎中的分配占比、单株结薯数、单株产量和块茎鲜重显著提高块茎产量,但叶面喷施高浓度(25 mg/L、35 mg/L) 6-BA 却抑制马铃薯生长,不利于块茎产量形成。

参考文献:

- [1] JI Y H, LIU Z, LIU C, *et al.* Genome-wide identification and drought stress-induced expression analysis of the *NHX* gene family in potato[J]. *Frontiers in Genetics*, 2024, 15: 1396375.
- [2] 陆维超, 赵建国, 张莉, 等. 植物茎尖分生组织分化调控机制研究进展[J]. *西北植物学报*, 2016, 36(5): 1055-1065.
LU W C, ZHAO J G, ZHANG L, *et al.* Differentiation and regulation of the shoot apical meristem[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2016, 36(5): 1055-1065.
- [3] 唐梦雪, 王克秀, 唐铭霞, 等. 外源激素及肥料调控对马铃薯雾培原种生长和产量的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(11): 42-52.
TANG M X, WANG K X, TANG M X, *et al.* Effects of hormone and fertilizer regulation on growth and yield of potato minituber under aeroponics[J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2022, 50(11): 42-52.
- [4] 魏晓琼, 贾文飞, 李林宇, 等. 不同时期喷施 6-BA 对越橘叶片生理特性及内源激素质量分数的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2023, 51(3): 31-35.
WEI X Q, JIA W F, LI L Y, *et al.* Effects of spraying 6-BA at different stages on physiological indices of leaves and endogenous hormones of blueberry[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2023, 51(3): 31-35.
- [5] 张勇. 内源细胞分裂素对水稻弱势发育的作用机理研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2022.
- [6] 薛红卫, 焦雨铃, 徐通达, 等. 植物细胞与发育生物学研究进展[J]. *植物生理学报*, 2023, 59(12): 2145-2187.
XUE H W, JIAO Y L, XU T D, *et al.* Recent advances in plant cell and developmental biology[J]. *Plant Physiology Journal*, 2023, 59(12): 2145-2187.
- [7] SU F, GILARD F, GUÉRARD F, *et al.* Spatio-temporal responses of *Arabidopsis* leaves in photosynthetic performance and metabolite contents to *Burkholderia phytofirmans* PsJN[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2016, 7: 403.
- [8] 张艳艳, 章文华, 薛丽, 等. 一氧化氮在植物生长发育和抗逆过程中的作用研究进展[J]. *西北植物学报*, 2012, 32(4): 835-842.
ZHANG Y Y, ZHANG W H, XUE L, *et al.* Advance on NO function in plant growth, development and abiotic stress tolerance[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2012, 32(4): 835-842.
- [9] SHAFFIQUE S, HUSSAIN S, KANG S M, *et al.* Phytohor-

- monal modulation of the drought stress in soybean: Outlook, research progress, and cross-talk[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1237295.
- [10] ARNAUD D, LEE S, TAKEBAYASHI Y, *et al.* Cytokinin-mediated regulation of reactive oxygen species homeostasis modulates stomatal immunity in *Arabidopsis*[J]. *The Plant Cell*, 2017, 29(3): 543-559.
- [11] 李胜, 杨德龙, 李唯, 等. 植物试管苗离体生根的研究进展[J]. 甘肃农业大学学报, 2003, 38(4): 373-384.
LI S, YANG D L, LI W, *et al.* Advances of research on rooting *in vitro* of plant test-tube plantlet[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2003, 38(4): 373-384.
- [12] 杨东清, 王振林, 尹燕桦, 等. 外源 ABA 和 6-BA 对不同持绿型小麦旗叶衰老的影响及其生理机制[J]. 作物学报, 2013, 39(6): 1096-1104.
YANG D Q, WANG Z L, YIN Y P, *et al.* Effects of exogenous ABA and 6-BA on flag leaf senescence in different types of stay-green wheat and relevant physiological mechanisms[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(6): 1096-1104.
- [13] 李玲, 李俊, 张春雷, 等. 外源 ABA 和 BR 在提高油菜幼苗耐渍性中的作用[J]. 中国油料作物学报, 2012, 34(5): 489-495.
LI L, LI J, ZHANG C L, *et al.* Effects of exogenous ABA and BR on waterlogging resistance of juvenile rapeseed[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2012, 34(5): 489-495.
- [14] HE H J, QIN J M, CHENG X X, *et al.* Effects of exogenous 6-BA and NAA on growth and contents of medicinal ingredient of *Phellodendron chinense* seedlings[J]. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 2018, 25(6): 1189-1195.
- [15] 王迎博. 外源 6-苊氨基嘌呤(6-BA)对玉米幼苗抗冷性的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2022.
- [16] 王兴松, 黄跃, 陈兴鹏, 等. 喷施不同浓度 6-BA 对烤烟光合特性及质量的影响[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(5): 113-118.
WANG X S, HANG Y, CHEN X P, *et al.* Effects of spraying different concentrations of 6-BA on photosynthetic characteristics and quality of flue-cured tobacco[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2024, 52(5): 113-118.
- [17] 车妍, 廖钰秋, 付学, 等. 6-BA 处理对马铃薯内源激素含量及 *StTCP15* 基因表达的影响[J]. 分子植物育种, 2022, 20(3): 852-858.
CHE Y, LIAO Y Q, FU X, *et al.* Effect of 6-BA treatment on endogenous hormone content and *StTCP15* gene expression in potato[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2022, 20(3): 852-858.
- [18] 张晓勇, 杨友联, 李树江, 等. 外源激素对低温胁迫下脱毒马铃薯扦插苗早衰的影响[J]. 作物杂志, 2018(4): 95-101.
ZHANG X Y, YANG Y L, LI S J, *et al.* Effects of exogenous GA₃ and 6-BA on leaf senescence in low temperature stress of virus-free potato cutting seedlings[J]. *Crops*, 2018(4): 95-101.
- [19] 张永成, 田丰. 马铃薯试验研究方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007: 117-123.
- [20] 杨敏文. 快速测定植物叶片叶绿素含量方法的探讨[J]. 光谱实验室, 2002, 19(4): 478-481.
YANG M W. Study on rapid determination of chlorophyll content of leaves[J]. *Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory*, 2002, 19(4): 478-481.
- [21] 蒋高明. Li-6400 光合作用测定系统: 原理、性能、基本操作与常见故障的排除[J]. 植物学通报, 1996, 13(增刊): 72-76.
JIANG G M. Li-6400 photosynthesis measuring system: Principle, performance, basic operation and troubleshooting[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 1996, 13(Suppl.): 72-76.
- [22] 朱济友, 徐程扬, 吴鞠. 基于 eCognition 植物叶片气孔密度及气孔面积快速测算方法[J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(5): 37-45.
ZHU J Y, XU C Y, WU J. Fast estimation of stomatal density and stomatal area of plant leaves based on eCognition[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2018, 40(5): 37-45.
- [23] 金彦君, 祝洪沙, 王金禹, 等. 不同光质对马铃薯生长及光合特性的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2024, 59(2): 45-53.
JIN Y J, ZHU H S, WANG J Y, *et al.* Effects of different light qualities on the growth and photosynthetic properties of potatoes[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2024, 59(2): 45-53.
- [24] 周丽娟, 陈尔娟, 韩笑, 等. 激素与气孔发育研究进展[J]. 西北植物学报, 2015, 35(4): 845-851.
ZHOU L J, CHEN E J, HAN X, *et al.* Review on the hormone regulation of stomatal development[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2015, 35(4): 845-851.
- [25] XUANYUAN G C, LU C M, ZHANG R F, *et al.* Overexpression of *StNF-YB3.1* reduces photosynthetic capacity and tuber production, and promotes ABA-mediated stomatal closure in potato (*Solanum tuberosum* L.)[J]. *Plant Science*, 2017, 261: 50-59.
- [26] WANG W L, WANG W Q, WU Y Z, *et al.* The involvement of wheat U-box E3 ubiquitin ligase TaPUB1 in salt stress tolerance[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2020, 62(5): 631-651.
- [27] 金晓蕾, 刘景辉, 罗中旺, 等. 叶面喷施 PP₃₃₃ 和 6-BA 对甜荞花芽分化及内源激素的影响[J]. 西北植物学报, 2019, 39(11): 1988-1997.
JIN X L, LIU J H, LUO Z W, *et al.* Effects of PP₃₃₃ and 6-BA on the bud differentiation and endogenous hormones of common buckwheat[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2019, 39(11): 1988-1997.
- [28] 王霞霞. 植物生长调节剂对马铃薯试管苗促生壮苗及干旱胁迫的调控[D]. 太谷: 山西农业大学, 2022.
- [29] 刘柯驿, 潘澈, 彭静, 等. 细胞分裂素生产菌对马铃薯早期生长生理的影响[J]. 湖南农业科学, 2012(1): 12-14.
LIU K Y, PAN C, PENG J, *et al.* Influences of cytokinin producing bacteria on growth and physiology of potato in early period[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2012(1): 12-14.
- [30] PENG M L, WANG X Y, LI L Q. The effect of plant growth regulator and active charcoal on the development of microtubers of potatoes[J]. *American Journal of Plant Sciences*, 2012, 3(11): 1535-1540.
- [31] 岳红, 卢其能, 赵昶灵, 等. 蔗糖浓度和外源激素对马铃薯微型薯诱导的影响[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(7): 58-60.
YUE H, LU Q N, ZHAO C L, *et al.* Effects of sucrose concentration and exogenous hormones on induction of potato mini-potato[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2012, 40(7): 58-60.
- [32] 李志康, 严冬, 薛张逸, 等. 细胞分裂素对植物生长发育的调控机理研究进展及其在水稻生产中的应用探讨[J]. 中国水稻科学, 2018, 32(4): 311-324.
LI Z K, YAN D, XUE Z Y, *et al.* Regulations of plant growth and development by cytokinins and their applications in rice production[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2018, 32(4): 311-324.