

# GA<sub>3</sub>和6-BA对高温胁迫下荠菜种子萌发的影响

葛礼姣, 程玉静, 王小秋, 仇亮, 翟彩娇, 刘水东

(江苏沿江地区农业科学研究所 江苏南通 226012)

**摘要:**以板叶荠菜种子为试验材料,研究了不同温度下荠菜种子的萌发特性及赤霉素(GA<sub>3</sub>)和6-苄基腺嘌呤(6-BA)浸种处理对高温胁迫下荠菜种子萌发和幼苗生长的影响。结果表明,25℃处理下,荠菜的苗高、发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数等发芽指标显著高于其他温度处理,为荠菜种子的最佳萌发温度。30℃高温胁迫时,7.5 mg·L<sup>-1</sup> GA<sub>3</sub>和7.5 mg·L<sup>-1</sup> (GA<sub>3</sub>+6-BA)处理下荠菜种子的活力指数和7个发芽指标(苗高、胚根长、鲜质量、发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数)的隶属函数平均值最高;35℃高温胁迫时,7.5 mg·L<sup>-1</sup> 6-BA和7.5 mg·L<sup>-1</sup> (GA<sub>3</sub>+6-BA)处理下种子发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数和7个发芽指标的隶属函数平均值最高,说明适宜浓度的GA<sub>3</sub>、6-BA和GA<sub>3</sub>+6-BA浸种处理可显著促进高温胁迫下荠菜种子的萌发和幼苗生长。

**关键词:** 荠菜; 高温胁迫; GA<sub>3</sub>; 6-BA; 种子萌发

中图分类号: S647

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2023)09-108-08

## Effects of GA<sub>3</sub> and 6-BA on seed germination of *Capsella bursa-pastoris* under high temperature stress

GE Lijiao, CHENG Yujing, WANG Xiaoqiu, QIU Liang, ZHAI Caijiao, LIU Shuidong

(Jiangsu Yanjiang Institute of Agricultural Sciences, Nantong 226012, Jiangsu, China)

**Abstract:** Taking the seeds of *Capsella bursa-pastoris* Banya as materials, the germination characteristics of *Capsella bursa-pastoris* seeds at different temperatures and the effects of gibberellin (GA<sub>3</sub>) and 6-benzyladenine (6-BA) on seed germination and seedling growth of *Capsella bursa-pastoris* under high temperature stress were studied in this experiment, which provided the basis for solving the problem of thermal dormancy of seeds and the physiological study of resistance to high temperature stress. The results showed that under 25 °C, the seedling height, germination rate, germination potential, germination index, and vigor index of *Capsella bursa-pastoris* were significantly higher than those under the other temperature treatments, which was the best germination temperature for *Capsella bursa-pastoris* seeds. Under 30 °C high temperature stress, the vigor index and the average value of membership function of 7 germination indexes (seedling height, radicle length, fresh weight, germination rate, germination potential, germination index, and vigor index) reached the highest values under 7.5 mg·L<sup>-1</sup> GA<sub>3</sub> and 7.5 mg·L<sup>-1</sup> (GA<sub>3</sub>+6-BA) treatments. While under 35 °C, the germination rate, germination potential, germination index, vigor index, and the average value of membership function of 7 germination indexes treated with 7.5 mg·L<sup>-1</sup> 6-BA and 7.5 mg·L<sup>-1</sup> (GA<sub>3</sub>+6-BA) were highest, indicating that suitable concentration of GA<sub>3</sub>, 6-BA, and GA<sub>3</sub>+6-BA soaking treatments could significantly promote seed germination and seedling growth of *Capsella bursa-pastoris* under high temperature stress.

**Key words:** *Capsella bursa-pastoris*; High temperature stress; GA<sub>3</sub>; 6-BA; Seed germination

荠菜[*Capsella bursa-pastoris*(L.)Medic]是十字花科一、二年生草本植物,以嫩茎叶供食,含有丰富的蛋白质、胡萝卜素、维生素C、Ca、P、Fe等营养成分,具有凉肝止血、平肝明目、清热利湿等功效,是我国重要的鲜食和加工蔬菜<sup>[1-4]</sup>。随着生活水平的提高,人们对食品的口感风味和营养价值有了更

新、更高的要求,荠菜因特殊的香气以及极高的营养价值和药用价值而深受消费者喜爱,国内外对荠菜的需求量越来越大,荠菜的周年栽培势在必行。然而当前全球气温变暖,荠菜在夏季播种时常遭遇35~40℃的高温,且在8月底到9月中旬的秋播期间,高温天气也时有发生,荠菜种子萌发受到高温

收稿日期: 2023-01-12; 修回日期: 2023-07-03

基金项目: 江苏省农业农村厅农机项目(NJ2021-04)

作者简介: 葛礼姣,女,研究实习员,研究方向为蔬菜栽培与育种。E-mail: 1724152223@qq.com

通信作者: 程玉静,女,副研究员,研究方向为蔬菜高效栽培。E-mail: yjcheng\_1699@163.com

热害的抑制,产量和品质持续降低,严重限制了芥菜的周年供应,难以满足人们对新鲜芥菜的常年需求。

研究发现,使用外源激素浸种可以打破种子休眠,破坏妨碍种子萌发的活性物质,有效提高种子发芽率<sup>[5-7]</sup>。其中,GA<sub>3</sub>可促进生长素类物质的合成,提高种子内淀粉酶活性,加快种子代谢活动,从而提高种子发芽能力<sup>[8]</sup>;6-BA作为一种细胞分裂素,可促进细胞分裂,诱导芽分化<sup>[9]</sup>。近年来,GA<sub>3</sub>和6-BA促进种子萌发的相关研究在薰衣草<sup>[10]</sup>、莴苣<sup>[11]</sup>、紫花苜蓿<sup>[12]</sup>等作物中已有大量报道。常文静<sup>[10]</sup>设置不同浓度的GA<sub>3</sub>和6-BA对薰衣草种子进行浸种处理后发现,2种激素均可显著提高薰衣草种子的发芽率和发芽势,GA<sub>3</sub>对薰衣草种子的引发效果优于6-BA。湛润生等<sup>[12]</sup>发现,1.5 mg·L<sup>-1</sup> 6-BA和50 mg·L<sup>-1</sup> GA<sub>3</sub>的浸种处理有效提高了紫花苜蓿种子的发芽率和发芽势,在一定浓度范围内延长浸种时间可促进种子萌发。曹菲菲<sup>[11]</sup>指出,高温胁迫下,GA<sub>3</sub>+6-BA浸种处理对莴苣种子的引发效果优于单一激素,二者在莴苣种子萌发和幼苗生长中起协同作用。

目前,人们对叶用芥菜的研究主要集中在资源收集<sup>[13]</sup>、栽培技术创新<sup>[14]</sup>和耐盐胁迫<sup>[15]</sup>等方面,而打破高温胁迫下种子萌发障碍的相关研究鲜见报道。为此,笔者设置了不同萌发温度环境,明确了高温胁迫下芥菜种子的萌发特性,并探讨了不同浓度外源GA<sub>3</sub>和6-BA浸种处理对高温胁迫下芥菜种子萌发及幼苗生长的影响,为实现芥菜周年稳定供应、打破芥菜种子热休眠、提高芥菜耐热性提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材 料

试验于2022年8—11月在江苏沿江地区农业科学研究所科创中心进行,供试材料为板叶芥菜,由江苏沿江地区农业科学研究所提供。

### 1.2 方 法

1.2.1 不同温度处理对芥菜种子萌发的影响 挑选大小均匀、健康饱满的芥菜种子,用75%的酒精消毒30 s,蒸馏水洗净。取定性滤纸铺于无菌干燥的直径为10 cm的玻璃培养皿中,将60粒消毒处理的芥菜种子均匀置于双层滤纸上,加入4 mL的蒸馏水,盖好盖子后分别置于20、25、30、35和40℃光照培养箱中进行暗培养,每个处理3次重复。

1.2.2 不同浓度激素处理对高温胁迫下芥菜种子萌发的影响 试验设置3种激素处理,分别为GA<sub>3</sub>、6-BA和GA<sub>3</sub>+6-BA处理,各激素处理均设0、2.5、5.0、7.5、10.0 mg·L<sup>-1</sup>浸种质量浓度,其中GA<sub>3</sub>+6-BA处理溶液由质量比1:1的GA<sub>3</sub>和6-BA混合配置而成(表1)。挑选大小均匀、健康饱满的芥菜种子,用75%的酒精消毒30 s,蒸馏水洗净后,分别置于GA<sub>3</sub>、6-BA、GA<sub>3</sub>+6-BA溶液中进行浸种处理,浸种12 h后取出,蒸馏水冲洗3次。取双层定性滤纸铺于无菌干燥的直径为10 cm的玻璃培养皿中,将60粒处理后的芥菜种子均匀置于滤纸上,加入4 mL的蒸馏水,在30和35℃度光照培养箱中进行暗培养,每个处理3次重复。

表1 不同浓度GA<sub>3</sub>+6-BA处理溶液中各成分用量  
Table 1 Concentration of each component in different concentration of GA<sub>3</sub>+6-BA treatment solutions

处理	成分	$\rho/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$
0 mg·L <sup>-1</sup> (GA <sub>3</sub> +6-BA)	GA <sub>3</sub>	0.0
	6-BA	0.0
2.5 mg·L <sup>-1</sup> (GA <sub>3</sub> +6-BA)	GA <sub>3</sub>	2.5
	6-BA	2.5
5.0 mg·L <sup>-1</sup> (GA <sub>3</sub> +6-BA)	GA <sub>3</sub>	5.0
	6-BA	5.0
7.5 mg·L <sup>-1</sup> (GA <sub>3</sub> +6-BA)	GA <sub>3</sub>	7.5
	6-BA	7.5
10.0 mg·L <sup>-1</sup> (GA <sub>3</sub> +6-BA)	GA <sub>3</sub>	10.0
	6-BA	10.0

### 1.3 指标测定

以胚根长达到种子1/2时为发芽标志,每天统计发芽种子数。试验6 d结束时,每处理随机取10粒种子,用直尺测定苗高和胚根长;鲜质量为每重复全部发芽种子鲜质量的平均值,采用电子天平测定;种子发芽势、发芽率、发芽指数及活力指数按下列公式计算:

发芽势/%=(第3日发芽种子数/供试种子总数)×100;

发芽率/%=(第6日发芽种子数/供试种子总数)×100;

发芽指数(GI)= $\sum(Gt/Dt)$ , Gt为t日的发芽数, Dt为相应的发芽日数。

活力指数(VI)=GI×幼苗鲜质量。

### 1.4 数据处理和统计分析

1.4.1 统计分析及绘图 采用Excel 2019软件进行数据初步统计与整理,采用SPSS 22.0软件进行单因素方差分析,采用Duncan法进行多重比较分析。

1.4.2 不同浓度激素处理下各指标隶属函数值计

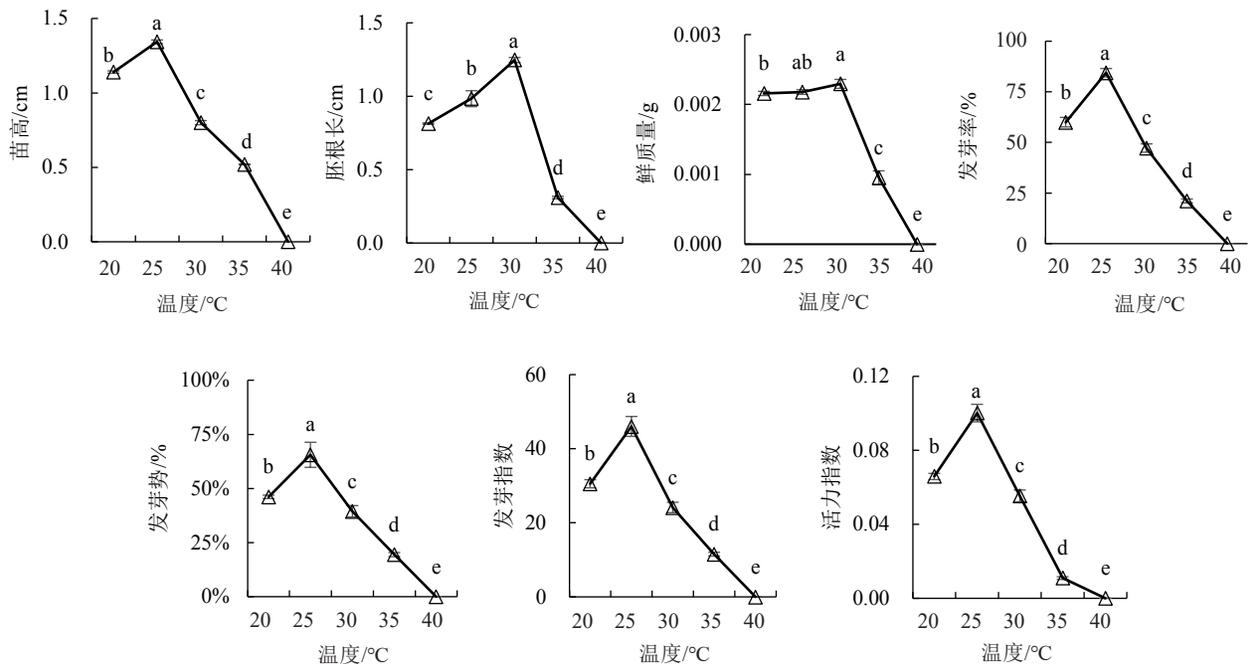
算 采用隶属函数法<sup>[16]</sup>,计算每个指标隶属函数值 ( $U$ ):  $U=(F - F_{\min})/(F_{\max} - F_{\min})$ 。其中,  $F$  为某一处理某一指标测定值,  $F_{\max}$  和  $F_{\min}$  分别为所有处理下某一指标测定值的最大值和最小值。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同温度处理对芥菜种子萌发的影响

由图 1 可知,不同温度处理对芥菜的苗高、胚根长、鲜质量、发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数等 7 个发芽指标有显著影响,这 7 个指标随温度的升高呈先上升后下降的趋势。25 °C 处理下,芥菜的苗高、发芽率、发芽势、发芽指数和活

力指数均达到最高值,分别较 20 °C 处理显著高 17.54%、40.73%、42.18%、50.69%、42.85%,较 30 °C 处理显著高 67.50%、78.71%、66.23%、90.64%、66.67%,较 35 °C 处理显著高 157.69%、300.00%、237.24%、299.13%、900.00%。30 °C 处理下,芥菜的胚根长显著高于其他温度处理,相比于 20、25 和 35 °C 处理,分别高出 54.32%、27.55% 和 303.23%。超过 30 °C 后,芥菜的苗高、胚根长、鲜质量、发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数直线下降,40 °C 处理下,芥菜种子的发芽率为 0。高温处理显著抑制了芥菜种子的萌发,25 °C 为芥菜种子的最适萌发温度。



注:不同字母表示处理之间在 0.05 水平差异显著。下同。

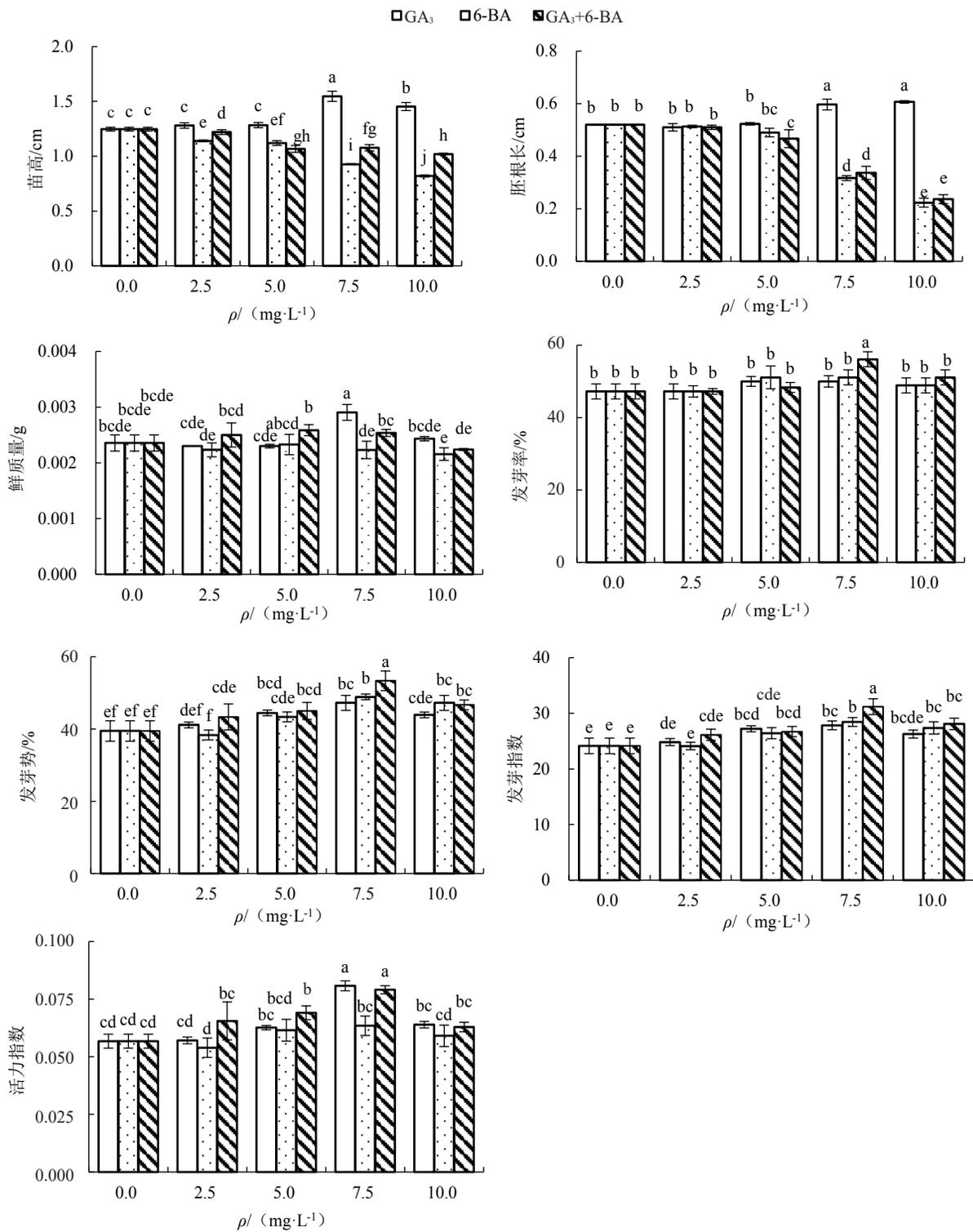
图 1 不同温度处理对芥菜种子萌发的影响

Fig. 1 Effects of different temperature treatments on germination of *Capsella bursa-pastoris* seeds

### 2.2 不同浓度激素处理对高温胁迫下芥菜种子萌发的影响

2.2.1 30 °C 高温胁迫下不同浓度激素处理对芥菜种子萌发的影响 由图 2 可知,30 °C 高温胁迫下,适宜浓度的  $GA_3$  和 6-BA 浸种处理可以促进种子萌发,而高浓度的  $GA_3$  和 6-BA 浸种处理则抑制种子萌发。单一  $GA_3$  处理下, $GA_3$  质量浓度为 7.5  $mg \cdot L^{-1}$  时,芥菜的苗高、鲜质量、发芽势、发芽指数和活力指数最高,其中,苗高、鲜质量和活力指数显著高于其他浓度处理,分别高出 0  $mg \cdot L^{-1}$   $GA_3$  处理 24.06%、23.31%、42.11%;高出 2.5  $mg \cdot L^{-1}$   $GA_3$  处理

20.84%、26.52%、41.44%;高出 5.0  $mg \cdot L^{-1}$   $GA_3$  处理 20.53%、26.52%、28.99%;高出 10.0  $mg \cdot L^{-1}$   $GA_3$  处理的 6.43%、19.75%、26.43%。单一 6-BA 处理和  $GA_3$ +6-BA 处理下,芥菜的苗高、胚根长随 6-BA 处理浓度的增加而降低。单一 6-BA 处理下,6-BA 质量浓度为 7.5  $mg \cdot L^{-1}$  时,芥菜的发芽势、发芽指数和活力指数达到最高值,其中,发芽势和发芽指数显著高于 0、2.5 和 5.0  $mg \cdot L^{-1}$  处理。 $GA_3$ +6-BA 处理下,芥菜的鲜质量在质量浓度为 5.0  $mg \cdot L^{-1}$  时达到最高值;7.5  $mg \cdot L^{-1}$  ( $GA_3$ +6-BA) 处理下,芥菜的发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数显著高于其



注:不同小写字母表示各处理之间在 0.05 水平差异显著。下同。

图 2 不同浓度激素处理对 30 °C 高温胁迫下芥菜种子萌发的影响

Fig. 2 Effects of different concentration of hormone treatments on germination of *Capsella bursa-pastoris* seeds under 30 °C high temperature stress

他浓度 GA<sub>3</sub>+6-BA 处理,分别高出 0 mg·L<sup>-1</sup> GA<sub>3</sub>+6-BA 处理 18.83%、35.22%、29.20%、39.22%,高出 2.5 mg·L<sup>-1</sup> GA<sub>3</sub>+6-BA 处理 18.83%、23.08%、19.34%、20.59%,高出 5.0 mg·L<sup>-1</sup> GA<sub>3</sub>+6-BA 处理

16.10%、18.51%、16.76%、14.43%,高出 10.0 mg·L<sup>-1</sup> GA<sub>3</sub>+6-BA 处理 9.78%、14.27%、11.03%、25.67%。

比较 30 °C 高温胁迫下不同浓度 GA<sub>3</sub>、6-BA 和 GA<sub>3</sub>+6-BA 处理对芥菜种子萌发的影响发现,相比

于其他处理,7.5 mg·L<sup>-1</sup> GA<sub>3</sub>处理显著提高了芥菜的苗高和鲜质量,7.5 mg·L<sup>-1</sup> (GA<sub>3</sub>+6-BA)处理则显著提高了芥菜的发芽率、发芽势和发芽指数;同时,7.5 mg·L<sup>-1</sup> GA<sub>3</sub>处理和7.5 mg·L<sup>-1</sup> (GA<sub>3</sub>+6-BA)处理下,芥菜的活力指数达到最高值,显著高于其

他处理。综上所述,30 °C高温胁迫下,7.5 mg·L<sup>-1</sup> GA<sub>3</sub>和7.5 mg·L<sup>-1</sup> GA<sub>3</sub>+6-BA浸种处理可有效提高芥菜种子的发芽率和活力指数。

2.2.2 35 °C高温胁迫下不同浓度激素处理对芥菜种子萌发的影响 由图3可知,35 °C高温胁迫下,

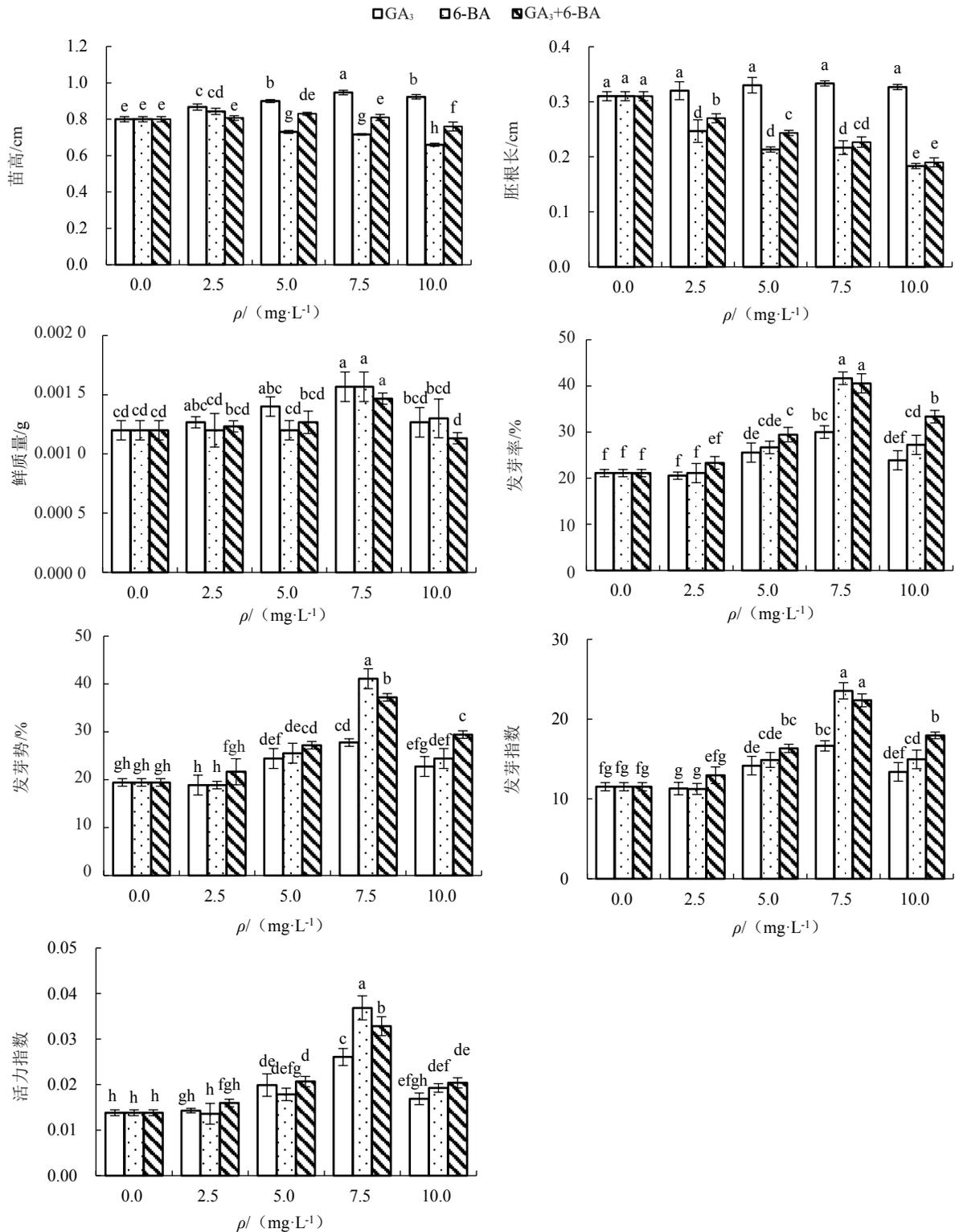


图3 不同浓度激素处理对35 °C高温胁迫下芥菜种子萌发的影响

Fig. 3 Effects of different concentration of hormone treatments on germination of *Capsella bursa-pastoris* seeds under 35 °C high temperature stress

芥菜的萌发指标与 GA<sub>3</sub> 和 6-BA 处理浓度呈非线性相关,适宜浓度的 GA<sub>3</sub> 和 6-BA 浸种处理有效提高了芥菜种子的鲜质量、发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数指标。单一 GA<sub>3</sub> 处理条件下,质量浓度为 7.5 mg·L<sup>-1</sup> 时,芥菜的苗高、胚根长、鲜质量、发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数等 7 项指标均达到最高值,其中,苗高、发芽率、发芽指数和活力指数显著高于其他浓度 GA<sub>3</sub> 处理,分别高出 0 mg·L<sup>-1</sup> GA<sub>3</sub> 处理 18.34%、42.11%、44.41%、88.71%, 2.5 mg·L<sup>-1</sup> GA<sub>3</sub> 处理 9.23%、45.91%、47.39%、82.50%, 5.0 mg·L<sup>-1</sup> GA<sub>3</sub> 处理 5.19%、17.37%、17.48%、30.99%, 10.0 mg·L<sup>-1</sup> GA<sub>3</sub> 处理 2.53%、25.58%、24.35%、54.51%。单一 6-BA 处理和 GA<sub>3</sub>+6-BA 处理条件下,芥菜的胚根长随处理浓度的增加而降低。单一 6-BA 处理下,6-BA 质量浓度为 7.5 mg·L<sup>-1</sup> 时,芥菜的发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数显著高于其他浓度 6-BA 处理,分别高出 0 mg·L<sup>-1</sup> 6-BA 处理 97.39%、111.47%、104.24%、172.32%, 2.5 mg·L<sup>-1</sup> 6-BA 处理 97.39%、117.63%、109.28%、171.18%, 5.0 mg·L<sup>-1</sup> 6-BA 处理 56.24%、60.84%、58.15%、106.42%, 10.0 mg·L<sup>-1</sup> 6-BA 处理 53.09%、68.21%、

57.45%、91.31%。GA<sub>3</sub>+6-BA 处理下,质量浓度为 7.5 mg·L<sup>-1</sup> 时,芥菜的鲜质量、发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数显著高于其他浓度 GA<sub>3</sub>+6-BA 处理,分别高出 0 mg·L<sup>-1</sup> (GA<sub>3</sub>+6-BA) 处理 22.50%、92.14%、91.46%、93.93%、137.78%, 2.5 mg·L<sup>-1</sup> (GA<sub>3</sub>+6-BA) 处理 19.51%、73.85%、71.76%、72.49%、105.86%, 5.0 mg·L<sup>-1</sup> (GA<sub>3</sub>+6-BA) 处理 15.75%、37.77%、36.74%、36.90%、58.91%, 10.0 mg·L<sup>-1</sup> (GA<sub>3</sub>+6-BA) 处理 30.09%、21.69%、26.43%、24.45%、61.13%。

比较 35 °C 高温胁迫下不同浓度 GA<sub>3</sub>、6-BA 和 GA<sub>3</sub>+6-BA 处理对芥菜种子萌发的影响,发现芥菜的苗高和胚根长在 GA<sub>3</sub> 处理下最高,在 GA<sub>3</sub>+6-BA 处理下次之,在 6-BA 处理下最低,说明 GA<sub>3</sub> 可以缓解高浓度 6-BA 对芥菜苗高和胚根长的抑制作用。7.5 mg·L<sup>-1</sup> 6-BA 和 7.5 mg·L<sup>-1</sup> (GA<sub>3</sub>+6-BA) 处理下,芥菜的发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数显著高于其他处理。

### 2.3 不同高温胁迫下不同浓度激素处理对芥菜种子萌发影响的综合评价

利用隶属函数法综合评价 30、35 °C 高温胁迫

表 2 不同高温胁迫和不同浓度激素处理下芥菜各发芽指标的隶属函数值

Table 2 Membership function value of germination indexes of *Capsella bursa-pastoris* under different high temperature stress and different concentration of hormone treatments

温度	$\rho/(mg \cdot L^{-1})$	苗高	胚根长	鲜质量	发芽率	发芽势	发芽指数	活力指数	平均值
30 °C	0	0.59	0.77	0.27	0.00	0.07	0.00	0.10	0.26
	GA <sub>3</sub> 2.5	0.63	0.75	0.19	0.00	0.19	0.10	0.11	0.28
	GA <sub>3</sub> 5.0	0.64	0.78	0.19	0.31	0.41	0.44	0.32	0.44
	GA <sub>3</sub> 7.5	1.00	0.97	1.00	0.38	0.59	0.53	0.99	0.78
	GA <sub>3</sub> 10.0	0.87	1.00	0.37	0.19	0.37	0.30	0.37	0.50
	6-BA 2.5	0.44	0.76	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.19
	6-BA 5.0	0.41	0.70	0.23	0.44	0.33	0.33	0.28	0.39
	6-BA 7.5	0.15	0.24	0.10	0.44	0.70	0.61	0.35	0.37
	6-BA 10.0	0.00	0.00	0.00	0.19	0.59	0.46	0.19	0.20
	(GA <sub>3</sub> +6-BA) 2.5	0.55	0.75	0.46	0.00	0.33	0.29	0.43	0.40
	(GA <sub>3</sub> +6-BA) 5.0	0.34	0.63	0.57	0.13	0.44	0.37	0.56	0.43
	(GA <sub>3</sub> +6-BA) 7.5	0.35	0.30	0.51	1.00	1.00	1.00	0.93	0.73
(GA <sub>3</sub> +6-BA) 10.0	0.28	0.03	0.11	0.44	0.56	0.56	0.33	0.33	
35 °C	0	0.49	0.84	0.15	0.03	0.02	0.02	0.01	0.22
	GA <sub>3</sub> 2.5	0.72	0.91	0.31	0.00	0.00	0.00	0.03	0.28
	GA <sub>3</sub> 5.0	0.84	0.98	0.62	0.24	0.25	0.24	0.27	0.49
	GA <sub>3</sub> 7.5	1.00	1.00	1.00	0.45	0.40	0.44	0.54	0.69
	GA <sub>3</sub> 10.0	0.92	0.96	0.31	0.16	0.17	0.17	0.14	0.40
	6-BA 2.5	0.64	0.42	0.15	0.03	0.00	0.00	0.00	0.18
	6-BA 5.0	0.24	0.20	0.15	0.29	0.30	0.30	0.18	0.24
	6-BA 7.5	0.20	0.22	1.00	1.00	1.00	1.00	0.10	0.77
	6-BA 10.0	0.00	0.00	0.38	0.32	0.25	0.30	0.24	0.21
	(GA <sub>3</sub> +6-BA) 2.5	0.51	0.58	0.23	0.13	0.12	0.14	0.10	0.26
	(GA <sub>3</sub> +6-BA) 5.0	0.59	0.40	0.31	0.42	0.37	0.41	0.30	0.40
	(GA <sub>3</sub> +6-BA) 7.5	0.52	0.29	0.77	0.95	0.83	0.90	0.83	0.73
(GA <sub>3</sub> +6-BA) 10.0	0.35	0.04	0.00	0.61	0.47	0.55	0.29	0.33	

下不同浓度  $GA_3$ 、6-BA 和  $GA_3+6-BA$  浸种处理对芥菜种子萌发的影响(表 2)。结果显示,不同高温胁迫下,芥菜的 7 个发芽指标隶属函数平均值随浸种激素浓度的增加呈先上升后下降的趋势。其中,单一  $GA_3$  处理和  $GA_3+6-BA$  处理下,各发芽指标的隶属函数平均值在质量浓度为  $7.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时达到最高;单一 6-BA 处理下,30 °C 高温胁迫时,各发芽指标隶属函数平均值在质量浓度为  $5.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时达到最高,35 °C 高温胁迫时,各发芽指标的隶属函数平均值则在质量浓度为  $7.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时达到最高。相比于其他处理,30 °C 高温胁迫时, $7.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$   $GA_3$  和  $7.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  ( $GA_3+6-BA$ ) 处理下各发芽指标隶属函数平均值最高,均达 0.70 以上,分别为 0.78 和 0.73;然而,35 °C 高温胁迫时, $7.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  6-BA 和  $7.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  ( $GA_3+6-BA$ ) 处理下各发芽指标隶属函数平均值最高,分别为 0.77 和 0.73。不同高温胁迫下,2.5  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  6-BA 和 10.0  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  6-BA 处理的各发芽指标隶属函数平均值最低,介于 0.18~0.21 之间。

### 3 讨论与结论

温度是影响种子萌发的关键因素,植物种子萌发的适宜温度是其长期以来对自然环境所表现的一种生态适应性<sup>[17]</sup>。研究发现,高温能够破坏植物细胞膜的稳定性,抑制作物光合速率,降低作物光能的截获量,进而抑制植株生长发育<sup>[18]</sup>。笔者在本试验中观测不同温度下芥菜种子萌发特性,发现 25 °C 为芥菜种子最佳萌发温度,当温度超过 25 °C 时,种子发芽率急剧下降,温度达到 40 °C 时种子完全休眠。高温胁迫下,芥菜种子萌发受到明显抑制,这与前人的研究结果相一致<sup>[19-21]</sup>。

在实际生产中,种植户难以创造种子萌发的适宜条件,外源激素浸种是一种提升种子耐高温能力的广为应用的方法<sup>[22]</sup>。前人的研究表明,用  $GA_3$  和 6-BA 对植物种子进行浸种处理可提高其发芽率,但有一定浓度范围,超过该范围,则会出现抑制作用<sup>[10,23]</sup>。本试验结果表明,不同高温胁迫下,芥菜种子的萌发指标随着  $GA_3$  处理浓度的增加呈先上升后下降的趋势,在  $7.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的  $GA_3$  处理下,各萌发指标整体达到最高值。同时,发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数指标随 6-BA 处理浓度和  $GA_3+6-BA$  处理浓度的增加呈先上升后下降的趋势,在  $7.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的处理下达到最高值。30 °C 高温胁迫下,芥菜的苗高、胚根长随 6-BA 处理浓度和  $GA_3+6-BA$  处理浓度的增加而降低;35 °C 高温胁迫下,胚

根长随 6-BA 处理浓度和  $GA_3+6-BA$  处理浓度的增加而降低。不同浓度  $GA_3+6-BA$  处理下,种子的整体苗高和胚根长高于 6-BA 处理,低于  $GA_3$  处理,说明适宜浓度  $GA_3$  处理可促进芥菜幼苗的生长,施加适量  $GA_3$  可缓解高浓度 6-BA 对芥菜幼苗生长的抑制作用。

前人的研究指出,植物激素能促进种子萌发,但不同激素种类、不同浓度、不同处理时间的促进效果不同<sup>[9]</sup>。笔者利用单因素方差分析和隶属函数分析法,综合评价高温胁迫下不同浓度激素浸种处理促进芥菜种子萌发的效果,发现不同高温胁迫下,芥菜的最佳浸种激素和浓度不同。30 °C 高温胁迫下, $7.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$   $GA_3$  和  $7.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  ( $GA_3+6-BA$ ) 浸种处理可有效提高芥菜种子的发芽率和活力指数,提高幼苗的生长速度,此时各发芽指标隶属函数平均值最高,促进种子萌发效果最佳。然而,35 °C 高温胁迫时, $7.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  6-BA 和  $7.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  ( $GA_3+6-BA$ ) 浸种处理下,芥菜的发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数和各发芽指标隶属函数平均值达到最高值,效果最佳。因此,只有正确掌握所用激素的种类、施用浓度和施用条件,才能达到促进芥菜种子萌发的最佳效果。不同高温胁迫下,不同浓度激素浸种处理影响芥菜种子萌发的内在机制有待进一步探讨。

25 °C 为芥菜最适宜的萌发温度,高温抑制了芥菜种子的萌发。适当浓度的  $GA_3$ 、6-BA 和  $GA_3+6-BA$  浸种处理可显著促进高温胁迫下芥菜种子的萌发及幼苗生长。不同高温胁迫下促进芥菜种子萌发的最适浸种处理不同, $7.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$   $GA_3$  和  $7.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  ( $GA_3+6-BA$ ) 为 30 °C 高温胁迫下的最佳浸种处理,而  $7.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  6-BA 和  $7.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  ( $GA_3+6-BA$ ) 则为 35 °C 高温胁迫下的最佳浸种处理。笔者的研究结果可为  $GA_3$  和 6-BA 提高芥菜耐热性在生产中的应用提供参考。

#### 参考文献

- [1] 程玉静,袁春新,唐明霞,等.芥菜高产栽培技术[J].农业开发与装备,2018(11):198-199.
- [2] 赵秀玲.芥菜及其研究开发现状[J].中国林副特产,2009(6):97-99.
- [3] 黎淑贞.可药可食的野蔬芥菜[J].家庭医学,2022(3):39.
- [4] 闫福军,张娟.不同化学药剂处理对芥菜种子萌发的影响[J].北方园艺,2013(10):22-24.
- [5] 贺志文,李灵芝,陶虹蓉,等.几种外源激素对番茄种子萌发及幼苗生长的影响[J].山西农业科学,2017,45(4):534-537.
- [6] 殷武平,袁祖华,彭莹,等.不同浸种和催芽处理对芥菜种子发

- 芽的影响[J]. 中国瓜菜, 2021, 34(11): 100-103.
- [7] 屈旭, 焦禹顺, 王仁汉, 等. 赤霉素和复硝酚钠对辣椒种子萌发及幼苗活力的影响[J]. 中国瓜菜, 2019, 32(11): 59-63.
- [8] 裴东升. 植物生长调节剂对朱顶红不定芽诱导影响的研究[J]. 山西农业科学, 2008, 36(6): 62-63.
- [9] 张海娜, 李存东, 肖凯. 外源细胞分裂素调控小麦生长及衰老特性的生理机制[J]. 华北农学报, 2007, 22(5): 1-7.
- [10] 常文静. GA<sub>3</sub>和6-BA浸种对薰衣草种子萌发的影响[J]. 天津农业科学, 2019, 25(4): 15-17.
- [11] 曹菲菲. 6-BA和GA<sub>3</sub>对高温胁迫下叶用莴苣种子萌发及幼苗生长的影响[D]. 河北邯郸: 河北工程大学, 2017.
- [12] 湛润生, 岳新丽, 刘根科, 等. GA<sub>3</sub>和6-BA对紫花苜蓿种子萌发的影响[J]. 山西农业科学, 2010, 38(3): 16-17.
- [13] 李恒艳, 楚合拉·恩德马克, 李璐, 等. 不同生境下芥菜种群构件生物量分配特征[J]. 长春师范大学学报, 2022, 41(6): 79-83.
- [14] 戴明红. 小拱棚芋/囊荷-芥菜栽培模式[J]. 上海蔬菜, 2022(2): 34-37.
- [15] 俞秀兰, 张边江, 王小平. 盐胁迫对芥菜幼苗生长及品质的影响[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(16): 8864-9038.
- [16] 王佼, 苏秀敏, 韩文清, 等. 基于隶属函数法对15种旱地番茄品质的综合评价[J]. 浙江农业科学, 2020, 61(12): 2586-2589.
- [17] OROZCO-ALMANZA M S, DE LEON-GARCIA L P, GREYER R, et al. Germination of four species of the genus *Mimosa* (Leguminosae) in a semi-arid zone of Central Mexico[J]. *Journal of Arid Environments*, 2003, 55(1): 75-92.
- [18] 刘子禄, 陈桂华, 张晶, 等. 外源2,4-表油菜素内酯对高温胁迫下水稻种子萌发及生理特性的影响[J]. 分子植物育种, 2021: 1-12. [2001-04-30]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20210429.1749.013.html>.
- [19] 杨洪兵. 高温胁迫下外源氨基酸对芥菜种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 河南农业科学, 2014, 43(11): 20-23.
- [20] 杨雲雲, 陈鑫, 陈启洲, 等. 脱落酸对水稻种子萌发期耐高温胁迫的诱抗效应[J]. 华北农学报, 2021, 36(3): 185-194.
- [21] 盛伟, 王艳芳, 于茜, 等. 引发对高温胁迫下莴苣种子萌发及生理生化特性的影响[J]. 种子, 2016, 35(4): 44-47.
- [22] 孙梦遥, 付炳堃, 刘天丽, 等. 引发处理对高温胁迫下芥菜种子萌发与激素的影响[J]. 种子, 2017, 36(12): 25-29.
- [23] 韩晶宏, 史宝胜, 李淑晓. 6-BA和GA<sub>3</sub>浸种对麦冬种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 江苏农业科学, 2011, 39(4): 189-190.