

文章编号:1000-8551(2019)09-1833-08

PEG 模拟干旱胁迫下花椰菜种质资源萌发特性及抗旱性评价

朱世杨¹ 张小玲¹ 刘庆¹ 罗天宽¹ 唐征¹ 钟伟杰¹ 朱祝军^{2,*}¹温州科技职业学院,温州市农业科学研究院/浙南作物育种重点实验室,浙江 温州 325006;²浙江农林大学农业与食品科学学院,浙江 杭州 311300)

摘要:为鉴定和筛选花椰菜耐旱种质资源,以 12 个花椰菜种质资源为试验材料,测定不同浓度 PEG[0 (CK)、100、150 和 200 g·L⁻¹]模拟干旱胁迫对花椰菜的相对发芽率(RGP)、相对发芽势(RGR)、相对发芽指数(RGI)、相对活力指数(RVI)、相对苗高(RSH)和相对根长(RRL)等 6 个指标的影响,并采用隶属函数法进行抗旱性的综合评价。结果表明,100 g·L⁻¹PEG 胁迫对花椰菜种子萌发的影响不大,150~200 g·L⁻¹PEG 胁迫则显著抑制花椰菜种子萌发。100~150 g·L⁻¹PEG 胁迫对 RRL 具有一定的促进作用,而 150~200 g·L⁻¹PEG 胁迫则会明显抑制 RSH,表明 150~200 g·L⁻¹PEG 可作为花椰菜萌发期抗旱性筛选的适宜浓度。基于 RGP、RGR、RGI、RVI、RSH 和 RRL 6 个指标,通过隶属函数法综合评价发现,12 个花椰菜材料的抗旱性依次表现为 P3>P6>A1>P8>P7>P2>P1>P4>P5>A2>A3>P9。本研究结果为花椰菜抗旱品种选育提供了一定的理论依据。

关键词:花椰菜;萌发期;PEG;干旱胁迫;隶属函数法

DOI:10.11869/j.issn.100-8551.2019.09.1833

干旱是影响农作物生产的主要非生物胁迫因子之一^[1-2]。我国干旱、半干旱地区占国土面积的二分之一以上,其中耕地面积约 5.1×10⁷ hm²,约占总耕地面积的 51%^[3]。

花椰菜(*Brassica oleracea* L. var. *Botrytis* L.)是十字花科芸薹属甘蓝种中以花球为产品的一个变种,营养丰富,风味鲜美,是我国年栽培面积较大的主要蔬菜作物之一^[4]。在夏秋季节栽培中,花椰菜易受干旱气候的影响,播种后出现出苗率低,出苗不整齐,移栽后成活率低,缺苗断垄等现象,进而影响其最终的产量品质。通过对花椰菜抗旱性鉴定筛选可以为其抗旱性育种提供优质的种质资源。目前,关于不同干旱胁迫条件下花椰菜的生理生化变化的研究已有大量报道。陈国菊等^[5]研究了盆栽干旱胁迫对花椰菜叶片细胞保护酶及超微结构的影响;汪炳良等^[6]研究了 30~35℃ 高温胁迫下早熟花椰菜叶片抗氧化系统和叶绿素及其荧光参数的变化;王丽君等^[7]研究了大田人工控水条件下外源水杨酸对干旱胁迫下花椰菜叶片抗氧化作用

的影响;Wu 等^[8]研究了茉莉酸甲酯和冠菌素处理对花椰菜幼苗的耐旱性方面的生理评价;Hadi 等^[9]比较了聚乙二醇(polyethylene glycol, PEG)和甘露醇诱导干旱胁迫对花椰菜幼苗生长的影响。PEG 是研究植物干旱胁迫的良好材料,在水稻^[10-11]、玉米^[12-14]、花生^[15-16]、豌豆^[17]、豇豆^[18]、胡麻^[19-20]、番茄^[21]、芝麻^[22]等植物耐旱性研究中已有相关报道。而 PEG 干旱胁迫下对花椰菜资源材料抗旱性筛选方面的研究尚鲜见报道。

种子萌发期是作物生长中最为敏感的阶段之一,也是作物群体数量建成的关键阶段,极易受干旱环境的影响,因此在萌发期筛选出抗旱能力优异品种资源对于干旱地区农业生产及抗旱性育种具有重要意义^[23-24]。本研究通过分析不同浓度 PEG 模拟干旱胁迫对 12 个花椰菜资源材料萌发特性的影响,以明确萌发期抗旱性鉴定适宜的 PEG 浓度,筛选出优质抗旱性种质材料,为花椰菜耐旱机理及抗旱性育种提供一定的理论依据。

收稿日期:2018-04-09 接受日期:2018-07-24

基金项目:浙江省高校访问学者教师专业发展项目(FX2017138),温州市科技计划项目(Z20160006、Z20170006)

作者简介:朱世杨,男,副教授,主要从事花椰菜遗传育种研究。E-mail:zhushiyang2000@163.com

* 通讯作者:朱祝军,男,教授,主要从事蔬菜生理与分子生物学研究。E-mail:zhuzj@zafu.edu.cn

1 材料与方 法

1.1 试验材料

参试花椰菜资源材料均由浙江省温州市农业科学研究院花椰菜育种课题组提供,共计 12 份,其中自交系 9 份,不育系 3 份,均为 2017 年普通塑料大棚中采收的种子,其亲本来源如表 1 所示。

表 1 供试花椰菜材料及亲本来源

Table 1 Cauliflower materials tested and their parental origin

| 品种 Varieties | 亲本来源 Original of material | 资源类型 Type of material |
|-----------------|--------------------------------|--------------------------|
| A1 | 松花 120 天 Songhua 120 day | 不育系 |
| A2 | 一代神良 Yidaishenliang | 不育系 |
| A3 | 雪冠 108 天 Xueguan 108 day | 不育系 |
| P1 | 一代金光 50 天 Yidaijinguang 50 day | 自交系 |
| P2 | 厦门松花 65 天 Xiamensonghua 65 day | 自交系 |
| P3 | 松花 80 天 Songhua 80 day | 自交系 |
| P4 | 松美 80 天 Songmei 80 day | 自交系 |
| P5 | 漳花 80 天 Zhanghua 80 day | 自交系 |
| P6 | S120 | 自交系 |
| P7 | 文兴 80 天 Wenxing 80 day | 自交系 |
| P8 | 上海花菜 80 天 Shanghai 80 day | 自交系 |
| P9 | 神龙特大 60 天 Shenlongteda 60 day | 自交系 |

1.2 试验方法

1.2.1 PEG 模拟干旱胁迫处理 试验共设置 4 个处理,即 0(CK)、100、150 和 200 g·L⁻¹ PEG(用双蒸馏水和 PEG6000 配制)。选取 50 粒饱满的种子,置于预先用 15 mL 不同浓度 PEG 溶液湿润过的铺有 5 层吸水纸和 2 层滤纸的培养皿(直径 9 cm)中,盖上培养皿盖后,置于 25℃ 培养室(光照:黑暗=12:12)中连续培养 7 d。采用随机区组设计,每个处理 3 次重复。

1.2.2 性状指标测定 每天统计发芽的种子数,第 3 天统计发芽势(germination rate, GR),第 7 天统计发芽率(germination percentage, GP),并随机取 5 株生长 7 d 的幼苗测量苗高(seedling height, SH)和根长(root length, RL),若不足 5 株则全部测量。按照公式分别计算发芽势、发芽率、发芽指数(germination index, GI)、活力指数(vigor index, VI):

$$\text{发芽势} = \text{第 3 天发芽种子数} / \text{播种数} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{发芽率} = \text{第 7 天发芽种子数} / \text{播种数} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{发芽指数} = \sum G_t / D_t \quad (3)$$

$$\text{活力指数} = \text{根长} \times \sum G_t / D_t \quad (4)$$

式中, G_t : 第 t 天发芽种子数; D_t : 相应发芽的天数。

按照公式分别计算相对发芽率(relative germination percentage, RGP)、相对发芽势(relative germination rate, RGR)、相对发芽指数(relative germination index, RGI)、相对活力指数(relative vigor index, RVI)、相对苗高(relative seedling height, RSH)和相对根长(relative root length, RRL):

$$\text{RGP} = (\text{处理发芽率} / \text{对照发芽率}) \times 100\% \quad (5)$$

$$\text{RGR} = (\text{处理发芽势} / \text{对照发芽势}) \times 100\% \quad (6)$$

$$\text{RGI} = (\text{处理发芽指数} / \text{对照发芽指数}) \times 100\% \quad (7)$$

$$\text{RVI} = (\text{处理活力指数} / \text{对照活力指数}) \times 100\% \quad (8)$$

$$\text{RSH} = (\text{处理苗高} / \text{对照苗高}) \times 100\% \quad (9)$$

$$\text{RRL} = (\text{处理根长} / \text{对照根长}) \times 100\% \quad (10)$$

1.3 抗旱性综合评价

花椰菜材料萌发期的抗旱性评价参考崔宏亮等^[15]和李培英等^[25]的方法。首先,按照公式(11)计算每份材料在不同浓度 PEG 胁迫下 RGP、RGR、RGI、RVI、RSH 和 RRL 的具体隶属函数值:

$$X_{(\mu)} = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (11)$$

式中, X : 某一指标的测定值; X_{\max} 和 X_{\min} 分别表示该指标的最大值和最小值。

其次,将每个指标不同浓度 PEG 胁迫下的具体隶属函数值累加求平均值,按照公式(12)计算:

$$X_{(ij)} = \frac{\sum X_{(\mu)}}{n} \quad (12)$$

式中, $X_{(ij)}$: i 种类 j 指标的平均隶属函数值; n : PEG 浓度的种类(不含对照)。

然后,按照公式(13)计算标准差系数 V_j ,再按照公式(14)计算权重系数 W_j ,最后按照公式(15)计算每个材料所有指标的综合评价价值(D), D 数值越大,表示抗旱性越强,反之则抗旱性越弱。

$$V_j = \frac{\sqrt{\sum_1^i [X_{(ij)} - \bar{X}_{(ij)}]^2}}{\bar{X}_{(ij)}} \quad (13)$$

$$W_j = \frac{V_j}{\sum_1^j V_j} \quad (14)$$

$$D = \sum_1^j [X_{(ij)} \times W_j] \quad (15)$$

2 结果与分析

2.1 PEG 胁迫下花椰菜种子萌发和幼苗生长的方差分析

表 2 PEG 胁迫下花椰菜种质材料种子萌发和幼苗生长的方差分析

Table 2 Analysis of variance on seed germination and seedling growth of cauliflower materials under PEG stress

| 变异来源 Source of variation | F 值 F value | | | | | |
|---|-------------|-------------|-------------|-----------|-------------|-----------|
| | RGP | RGR | RGI | RVI | RSH | RRL |
| 处理 Treatment | 243.62 ** | 238.87 ** | 285.18 ** | 64.11 ** | 68.29 ** | 31.70 ** |
| 种质材料 Germplasm materials(A) | 47.69 ** | 39.01 ** | 50.37 ** | 20.26 ** | 16.23 ** | 14.71 ** |
| PEG 浓度 PEG concentration(B) | 3 754.48 ** | 3 790.70 ** | 4 615.62 ** | 938.69 ** | 1 062.55 ** | 417.59 ** |
| 种质材料×PEG 浓度 Germplasm materials×PEG concentration(A×B) | 22.42 ** | 15.90 ** | 8.92 ** | 6.53 ** | 3.93 ** | 5.10 ** |

注: ** 表示差异极显著 ($P < 0.01$)。下同。

Note: ** indicates extremely significant difference at 0.01 level. The same as following.

2.2 PEG 胁迫对花椰菜 RGP 和 RGR 的影响

由图 1 可知,在对照(CK)条件下,12 个花椰菜种质材料的种子发芽率平均值为 99.0%,变化幅度为

96.0%~100.0%,发芽势平均值为 98.7%,变化幅度为 94.7%~100.0%。参试的 12 个花椰菜种质材料初始的种子萌发情况良好。

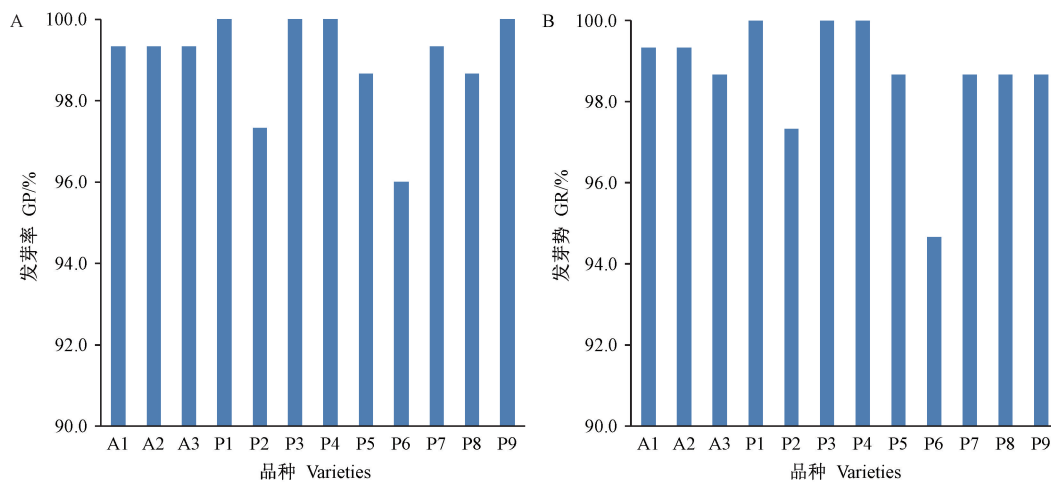


图 1 对照条件下花椰菜的发芽率和发芽势

Fig.1 The GP and GR of cauliflower under CK

由表 3 可知,不同浓度 PEG 胁迫下,所有花椰菜的 RGP 均随着干旱胁迫的增强呈降低趋势。100 $g \cdot L^{-1}$ PEG 对各花椰菜的 RGP 影响不大,甚至对个别材料的种子萌发有促进作用,RGP 在 97.3%~102.0% 之间;150 $g \cdot L^{-1}$ PEG 胁迫下,花椰菜的 RGP 变化范围在 73.3%~99.3% 之间;P3、P6 的 RGP 均较高,分别为 98.7% 和 99.3%,P9 的 RGP 较低,为 73.3%;200 $g \cdot L^{-1}$ PEG 胁迫下,各花椰菜种子萌发则受到严重抑制,P9 的 RGP 最低,仅为 1.3%,P3 和 P6 最高,均为

58.0%。说明 P3、P6 较耐旱。

不同浓度 PEG 胁迫下,所有花椰菜材料的 RGR 随着干旱胁迫的增强亦呈降低趋势。100、150 和 200 $g \cdot L^{-1}$ PEG 胁迫下,RGR 变化范围分别为 86.6%~101.4%、36.6%~100.0% 和 0.0%~15.3%。100 $g \cdot L^{-1}$ PEG 胁迫下,A1、A3、P1、P2、P3、P4、P6、P7、P8 的 RGR 均显著高于 A2、P9;150 $g \cdot L^{-1}$ PEG 胁迫下,A1、P3、P6、P7、P8 的 RGR 均显著高于其他材料;200 $g \cdot L^{-1}$ PEG 胁迫下,A2、A3、P9 种子尚未萌发,其他材

料的 RGR 也相对较低,其中 P3、A1 较高,分别为 15.3%和 14.8%。说明 100 g·L⁻¹ PEG 胁迫对花椰菜种子萌发影响不大,而 150~200 g·L⁻¹ PEG 胁迫则会严重抑制种子萌发,降低种子发芽速度。

表 3 PEG 胁迫对花椰菜 RGP 和 RGR 的影响

Table 3 Effect of PEG stress on RGP and RGR of cauliflower

| 指标 Indexs | 品种 Varieties | PEG 浓度 PEG concentration/(g·L ⁻¹) | | |
|--------------|-----------------|--|----------|----------|
| | | 100 | 150 | 200 |
| | | 相对发芽率 RGP/% | A1 | 99.3abcA |
| | A2 | 98.0bcA | 85.3cdB | 2.0fC |
| | A3 | 98.0bcA | 87.2bcdB | 2.0fC |
| | P1 | 99.3abcA | 96.0abA | 12.0deB |
| | P2 | 102.0aA | 88.4bcdB | 12.7dC |
| | P3 | 100.0abcA | 98.7aA | 58.0aB |
| | P4 | 100.0abcA | 80.7deB | 8.0defC |
| | P5 | 97.3cA | 85.1cdB | 3.3efC |
| | P6 | 100.0abcA | 99.3aA | 58.0aB |
| | P7 | 100.7abA | 92.0abcB | 25.3cC |
| | P8 | 101.3aA | 94.6abA | 22.7cB |
| | P9 | 99.3abcA | 73.3eB | 1.3fC |
| 相对发芽势 RGR/% | A1 | 97.3abA | 92.0aB | 14.8aC |
| | A2 | 86.6cA | 51.0cB | 0.0eC |
| | A3 | 98.7abA | 65.6bB | 0.0eC |
| | P1 | 98.0abA | 74.0bB | 6.7bcC |
| | P2 | 99.3abA | 66.4bB | 4.1cdeC |
| | P3 | 100.0abA | 95.3aA | 15.3aB |
| | P4 | 99.3abA | 45.3cdB | 2.0deC |
| | P5 | 95.2bA | 65.7bB | 0.7deC |
| | P6 | 101.4aA | 100.0aA | 9.8bB |
| | P7 | 98.0abA | 90.6aA | 3.4cdeB |
| | P8 | 101.3aA | 93.3aA | 4.7cdeB |
| | P9 | 89.3cA | 36.6dB | 0.0eC |

注:同行不同大写字母表示同一品种不同处理间差异显著($P < 0.05$);同列不同小写字母表示同一处理不同材料间差异显著($P < 0.05$)。下同。

Note: Different capital letters in the same line indicate significant difference under different treatments of the same variety at 0.05 level. Different lowercase letters indicate significant difference under the same treatments of different varieties at 0.05 level. The same as following.

2.3 PEG 胁迫对花椰菜 RGI 和 RVI 的影响

由表 4 可知,不同浓度 PEG 胁迫下,各花椰菜的 RGI 均随着干旱胁迫的增强而显著降低。100、150 和 200 g·L⁻¹ PEG 胁迫下,各花椰菜的 RGI 变化范围分别

为 83.7%~101.2%、49.2%~90.9%和 0.5%~26.1%。100 g·L⁻¹ PEG 胁迫下,P3、P4、P6、P7、P8 的 RGI 均显著高于 A1、A2、A3、P5、P9;150 g·L⁻¹ PEG 胁迫下,P3、P6 的 RGI 达到 90%以上,显著高于其他材料;200 g·L⁻¹ PEG 胁迫下,P3、P6 的 RGI 相对较高,分别为 26.1%、25.6%,而 A2、A3、P5、P9 的 RGI 相对较低,仅在 0.5%~1.3%之间。

表 4 PEG 胁迫对花椰菜 RGI 和 RVI 的影响

Table 4 Effect of PEG stress on RGI and RVI of cauliflower

| 指标 Indexs | 品种 Varieties | PEG 浓度 PEG concentration/(g·L ⁻¹) | | |
|--------------|-----------------|--|-----------|---------|
| | | 100 | 150 | 200 |
| | | 相对发芽指数 RGI/% | A1 | 83.7fA |
| | A2 | 87.0efA | 55.0efB | 1.0efC |
| | A3 | 89.0defA | 55.3efB | 0.6fC |
| | P1 | 94.5bedA | 66.5cdB | 8.2cdC |
| | P2 | 91.9cedA | 59.1deB | 5.9cdeC |
| | P3 | 99.4abA | 90.9aB | 26.1aC |
| | P4 | 97.0abcA | 53.9efB | 3.4defC |
| | P5 | 90.6deA | 60.5deB | 1.3efC |
| | P6 | 101.2aA | 90.4aB | 25.6aC |
| | P7 | 97.2abcA | 77.3bB | 10.9cC |
| | P8 | 98.7abA | 78.7bB | 10.6cC |
| | P9 | 90.4deA | 49.2fB | 0.5fC |
| 相对活力指数 RVI/% | A1 | 124.4abcdA | 97.8bcdB | 14.3bC |
| | A2 | 115.4bcdeA | 70.3defgB | 0.0eC |
| | A3 | 104.0deA | 46.0gB | 0.0eC |
| | P1 | 95.9eA | 79.4cdeB | 4.0cdeC |
| | P2 | 115.1bcdeA | 67.8efgB | 2.6cdeC |
| | P3 | 144.4aA | 162.9aA | 24.1aB |
| | P4 | 136.4abA | 69.1efgB | 0.7deC |
| | P5 | 132.8abcA | 82.4cdeB | 0.1eC |
| | P6 | 137.3abA | 117.4bB | 15.6bC |
| | P7 | 91.0eA | 83.7cdeA | 4.7cdB |
| | P8 | 95.6eA | 104.6bcA | 5.6cB |
| | P9 | 110.4cdeA | 52.3fgB | 0.0eC |

不同浓度 PEG 胁迫下,除 P3 和 P8 外,其他花椰菜的 RVI 均随着干旱胁迫的增强呈降低的趋势,各材料的 RVI 变化范围分别为 91.0%~144.4%、46.0%~162.9%和 0.0%~24.1%。100 g·L⁻¹ PEG 胁迫下,A1、P3、P4、P5、P6 的 RVI 均显著高于 P1、P7、P8;150 g·L⁻¹ PEG 胁迫下,P3、P6、P8 的 RVI 均相对较高,而

A3、P9 则相对较低,其他材料介于二者之间;200 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ PEG 胁迫下,P3 的 RVI 最高,为 24.1%,A2、A3、P9 的 RVI 均为 0.0%,达到了萌发生长的耐受阈限。RVI 能反映种子发芽速度,也能反映生长势和生长活力^[26]。表明 100 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ PEG 胁迫能够促进幼苗生长提高种子活力,而 150~200 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ PEG 胁迫则会抑制幼苗生长,降低种子活力。

2.4 PEG 胁迫对花椰菜 RSH 和 RRL 的影响

由表 5 可知,不同浓度 PEG 胁迫下,除 A1、P2 和 P4 外,其他材料的 RSH 随着干旱胁迫的增强呈显著降低的趋势。100 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ PEG 胁迫促进了 P3、P5、P6、P8 的苗高生长,而 150~200 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ PEG 胁迫明显抑制苗高生长,尤其是 200 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ PEG 胁迫下花椰菜苗高生长受到严重抑制。100 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ PEG 胁迫下,P3、P5、P6、P8 的 RSH 均显著高于 A3、P4、P9;150 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ PEG 胁迫下,A2、P2、P3 的 RSH 均显著高于 A3、P1、P9,其他材料介于二者之间;200 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ PEG 胁迫下,A1、P6、P2、P3 的 RSH 均相对较高,分别为 37.5%、29.5%、24.0%和 23.4%,而 A2、A3、P5、P9 的 RSH 相对较低,在 0.5%~3.1%之间。

不同浓度 PEG 胁迫对幼苗 RRL 的作用与 RSH 有所不同,其中,P1、P3、P7 和 P8 随着 PEG 胁迫的增强呈先增加后降低变化趋势,而其他材料呈下降趋势。100 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ PEG 胁迫下,A1、A2、P2、P3、P4、P5、P6 的 RRL 均显著高于 P7、P8;150 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ PEG 胁迫下,P3 的 RRL 最大,为 179.1%,A3 的 RRL 最小,为 82.9%;200 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ PEG 胁迫下,P3 的 RRL 最高,为 95.3%,A2、A3、P5、P9 的 RRL 均较低,仅在 2.8%~9.8%之间。综上表明,PEG 胁迫对幼苗生长的影响因品种和胁迫浓度而异,100~150 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ PEG 胁迫对花椰菜 RRL 有一定的促进作用,而 150~200 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ PEG 胁迫会严重抑制花椰菜 RSH。

2.5 12 个花椰菜萌发期抗旱性的综合评价

种子萌发期的抗旱性受多种因素的综合作用,单一指标评价不同品种材料的抗旱性存在一定的片面性^[27]。本研究利用隶属函数法对 PEG 胁迫下 12 个花椰菜的 RGP、RGR、RGI、RVI、RSH 和 RRL 6 个指标进行了综合评价分析。由表 6 可知,12 个花椰菜萌发期的 RGP、RGR、RGI、RVI、RSH 和 RRL 6 抗旱指标的隶属函数综合评价值(D)依次表现为 P3>P6>A1>P8>P7>P2>P1>P4>P5>A2>A3>P9,D 值越大,说明材料的抗旱性越强,由此可知,P3 抗旱性较强,P9 抗旱性最弱。

表 5 PEG 胁迫对花椰菜 RSH 和 RRL 的影响

Table 5 Effect of PEG stress on RSH and RRL of cauliflower

| 指标 Indexs | 品种 Varieties | PEG 浓度 | | | |
|--------------|-----------------|--|-----------|----------|---------|
| | | PEG concentration/($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) | | | |
| | | 100 | 150 | 200 | |
| 相对苗高 RSH/% | A1 | 93.4cdA | 78.7abB | 37.5aC | |
| | A2 | 91.9cdA | 83.5aA | 2.8efB | |
| | A3 | 75.4eA | 40.8eB | 2.8efC | |
| | P1 | 93.5cdA | 56.8dB | 12.8cdC | |
| | P2 | 96.9bcA | 84.7aA | 24.0bcB | |
| | P3 | 106.6abA | 80.9aB | 23.4bcC | |
| | P4 | 70.5eA | 64.8bcdA | 7.6defB | |
| | P5 | 100.4abcA | 80.2abB | 3.1efC | |
| | P6 | 100.7abcA | 74.5abcB | 29.5abC | |
| 相对根长 RRL/% | P7 | 94.8cdA | 77.4abcB | 16.9cdC | |
| | P8 | 108.8aA | 71.5abcdB | 18.3bcdC | |
| | P9 | 86.1dA | 62.5cdB | 0.5fC | |
| | 相对根长 RRL/% | A1 | 148.5aA | 136.0bB | 69.7bC |
| | | A2 | 132.8abcA | 128.1bA | 4.5dB |
| | | A3 | 116.4cdeA | 82.9cB | 9.8dC |
| | | P1 | 101.4defA | 118.9bA | 49.3bB |
| | | P2 | 125.3abcA | 113.8bcA | 43.8bcB |
| | | P3 | 145.3abB | 179.1aA | 95.3aC |
| P4 | | 140.6abA | 127.1bA | 21.4cdB | |
| P5 | | 146.5aA | 136.4bA | 2.9dB | |
| P6 | | 135.4abcA | 129.8bA | 61.2bB | |
| P7 | 93.7fA | 108.4bcA | 44.0bcB | | |
| P8 | 97.0efB | 132.8bA | 51.7bC | | |
| P9 | 122.1bcdA | 106.5bcB | 2.8dC | | |

3 讨论

PEG6000 是一种无毒渗透调节剂,已广泛用于多种作物萌发期抗旱性的鉴定与筛选^[28-29]。本研究中,随着 PEG 胁迫浓度的增加,各花椰菜的 RGP、RGR、RGI、RVI、RSH 均呈降低趋势,P3 和 P8 的 RVI 和 RRL 则呈先增加后降低的变化趋势,这与 Hadi 等^[9]的研究结果基本一致。本研究发现 100 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ PEG 胁迫对绝大多数花椰菜的 RGP、RGR、RGI、RVI、RSH、RRL 影响均不大,但对 RVI、RRL 有一定的促进作用;150 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ PEG 胁迫对花椰菜 RGR、RGI、RVI、RSH 有抑制作用,但对 RRL 有促进作用;

表 6 12 个花椰菜材料各指标隶属函数值及综合评价

Table 6 The subordinate function values and comprehensive evaluation of the twelve cauliflower materials

| 品种 Varieties | 隶属函数值 Value of subordinate function | | | | | | 综合评价值 Comprehensive evaluation value | 排序 Ranking |
|-----------------|-------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---|---------------|
| | RGP | RGR | RGI | RVI | RRL | RSH | | |
| A1 | 0.671 ⁽⁴⁾ | 0.853 ⁽³⁾ | 0.442 ⁽⁶⁾ | 0.553 ⁽³⁾ | 0.758 ⁽²⁾ | 0.819 ⁽²⁾ | 0.661 1 | 3 |
| A2 | 0.207 ⁽¹⁰⁾ | 0.076 ⁽¹¹⁾ | 0.115 ⁽¹²⁾ | 0.222 ⁽⁸⁾ | 0.400 ⁽⁷⁾ | 0.531 ⁽⁸⁾ | 0.241 7 | 10 |
| A3 | 0.231 ⁽⁹⁾ | 0.424 ⁽⁸⁾ | 0.151 ⁽¹⁰⁾ | 0.082 ⁽¹²⁾ | 0.164 ⁽¹²⁾ | 0.063 ⁽¹²⁾ | 0.181 8 | 11 |
| P1 | 0.494 ⁽⁷⁾ | 0.598 ⁽⁶⁾ | 0.443 ⁽⁵⁾ | 0.180 ⁽⁹⁾ | 0.339 ⁽⁹⁾ | 0.433 ⁽⁹⁾ | 0.401 9 | 7 |
| P2 | 0.592 ⁽⁶⁾ | 0.532 ⁽⁷⁾ | 0.306 ⁽⁸⁾ | 0.248 ⁽⁷⁾ | 0.447 ⁽⁶⁾ | 0.775 ⁽⁴⁾ | 0.454 4 | 6 |
| P3 | 0.835 ⁽²⁾ | 0.943 ⁽¹⁾ | 0.965 ⁽²⁾ | 1.000 ⁽¹⁾ | 0.981 ⁽¹⁾ | 0.825 ⁽¹⁾ | 0.933 2 | 1 |
| P4 | 0.322 ⁽⁸⁾ | 0.376 ⁽⁹⁾ | 0.328 ⁽⁷⁾ | 0.359 ⁽⁵⁾ | 0.505 ⁽⁵⁾ | 0.247 ⁽¹¹⁾ | 0.356 4 | 8 |
| P5 | 0.163 ⁽¹¹⁾ | 0.362 ⁽¹⁰⁾ | 0.232 ⁽⁹⁾ | 0.366 ⁽⁴⁾ | 0.507 ⁽⁴⁾ | 0.582 ⁽⁷⁾ | 0.355 8 | 9 |
| P6 | 0.858 ⁽¹⁾ | 0.881 ⁽²⁾ | 0.990 ⁽¹⁾ | 0.708 ⁽²⁾ | 0.627 ⁽³⁾ | 0.780 ⁽³⁾ | 0.811 3 | 2 |
| P7 | 0.613 ⁽⁵⁾ | 0.613 ⁽⁵⁾ | 0.618 ⁽⁴⁾ | 0.173 ⁽¹⁰⁾ | 0.237 ⁽¹¹⁾ | 0.637 ⁽⁶⁾ | 0.467 0 | 5 |
| P8 | 0.680 ⁽³⁾ | 0.733 ⁽⁴⁾ | 0.653 ⁽³⁾ | 0.273 ⁽⁶⁾ | 0.369 ⁽⁸⁾ | 0.727 ⁽⁵⁾ | 0.555 8 | 4 |
| P9 | 0.143 ⁽¹²⁾ | 0.060 ⁽¹²⁾ | 0.127 ⁽¹¹⁾ | 0.139 ⁽¹¹⁾ | 0.254 ⁽¹⁰⁾ | 0.300 ⁽¹⁰⁾ | 0.162 6 | 12 |

注:单一指标旁括号内数值为该指标耐旱性强弱的排序。

Note: The number in parentheses was the drought-tolerance ranking of single index RGP, RGR, RGI, RVI, RSH and RRL.

200 g·L⁻¹ PEG 胁迫对花椰菜 RGP、RGR、RGI、RVI、RSH、RRL 均有严重抑制作用。说明 PEG 胁迫对花椰菜萌发期各指标的影响因品种和浓度而异,总体表现为较低浓度 PEG (100 g·L⁻¹) 胁迫对萌发生长影响不大,甚至对个别材料萌发生长有促进作用,而较高浓度 PEG (150~200 g·L⁻¹) 胁迫会明显抑制萌发生长。综上可知,花椰菜萌发期抗旱性筛选的 PEG 适宜浓度为 150~200 g·L⁻¹,这与陈致富等^[28] 研究认为白菜型油菜资源 PEG6000 抗旱性筛选适宜浓度 200 g·L⁻¹ 的结果基本一致,但与张霞等^[29] 认为甘蓝型油菜萌发期 PEG6000 抗旱性筛选适宜浓度 100 g·L⁻¹ 的结论有所不同。这可能是由于不同作物种类对 PEG 抗旱性响应的浓度不同所致。

作物种子萌发期的抗旱性受多种因素作用,运用单个指标评价不同品种的抗旱能力具有一定的片面性^[24]。本研究发现 PEG 胁迫下不同指标对不同品种花椰菜的抗旱性强弱排序并不一致,如 150 g·L⁻¹ PEG 胁迫下,P6 的 RGP 和 RGR 最大,P3 的 RGI 和 RVI 最大,RSH 和 RRL 最大的分别是 P2 和 P3。说明单一指标所反映的抗旱性强弱具有局限性,只有通过多项指标进行综合评价才能客观评价不同花椰菜材料抗旱性的强弱。这与前人在花生^[15]、豌豆^[17] 等 PEG 抗旱性筛选中的结论一致。

应用模糊数学隶属函数法能够对植物的抗旱性进行综合评价,在花生^[15]、油菜^[28-29]、燕麦^[30] 等植物抗旱性研究中已有相关报道。本试验采用 RGP、RGR、

RGI、RVI、RSH、RRL 6 个指标结合隶属函数法对 12 个花椰菜的抗旱性进行评价,发现 12 个花椰菜的 RGP、RGR、RGI、RVI、RSH、RRL 的耐旱性排序不尽相同,这也说明花椰菜萌发期的抗旱性受多个因素影响,PEG 模拟干旱抗旱性评价中需要对多个指标进行综合性评价。根据综合评价隶属函数值排序,发现 12 个花椰菜种质材料的抗旱性依次表现为 P3>P6>A1>P8>P7>P2>P1>P4>P5>A2>A3>P9。本研究结果为今后开展花椰菜抗旱性育种提供了理论依据。

4 结论

本研究结果表明,PEG 胁迫下花椰菜萌发期 RGP、RGR、RGI、RVI、RSH、RRL 指标变化因品种和胁迫浓度而异,其中 100 g·L⁻¹ PEG 胁迫对萌发生长影响不大,150~200 g·L⁻¹ PEG 胁迫会明显抑制萌发生长。因此,150~200 g·L⁻¹ 可作为花椰菜萌发期抗旱性筛选的 PEG 适宜浓度。基于 RGP、RGR、RGI、RVI、RSH、RRL 指标的加权隶属函数值排序,12 个花椰菜种质材料的抗旱性依次表现为 P3>P6>A1>P8>P7>P2>P1>P4>P5>A2>A3>P9。今后可利用这些抗旱性强弱极端材料开展花椰菜抗旱性机理机制研究,还可以利用抗旱性较强的不育系与自交系杂交配组筛选耐旱性的杂交组合。

参考文献:

- [1] Ajithkumar I P, Panneerselvam R. ROS scavenging system, osmotic maintenance, pigment and growth status of *Panicum Sumatrense* Roth. under drought stress [J]. Cell Biochemistry and Biophysics, 2014, 68:587-595
- [2] Wu X J, Zeng F R, Zhang G P. PEG-simulated drought stress and spike *in vitro* culture are used to study the impact of water stress on barley malt quality [J]. Plant Growth Regulation, 2017, 81:243-252
- [3] 闫春娟, 宋书宏, 王文斌, 王昌陵. 大豆耐旱种质的鉴定 [J]. 大豆科学, 2015, 34(1):163-167
- [4] Yousef, E A A, Lampe C, Schmid K J. Evaluation of cauliflower genebank accessions under organic and conventional cultivation in Southern Germany [J]. Euphytica, 2015, 201:389-400
- [5] 陈国菊, 杨暹, 吴筱颖. 干旱胁迫对花椰菜叶片细胞保护酶及超微结构的影响 [J]. 中国蔬菜, 2002, 1(2): 8-11
- [6] 汪炳良, 徐敏, 史庆华, 曹家树. 高温胁迫对早熟花椰菜叶片抗氧化系统和叶绿素及其荧光参数的影响 [J]. 中国农业科学, 2004, 37(8):1245-1250
- [7] 王丽君, 张国斌, 周亚婷, 周德霞, 杨伟, 杨海兴, 郁继华. 外源水杨酸对干旱胁迫下花椰菜叶片抗氧化作用的影响 [J]. 中国农学通报, 2014, 30(25):91-96
- [8] Wu H L, Wu X L, Li Z H, Duan L S, Zhang M C. Physiological evaluation of drought stress tolerance and recovery in cauliflower (*Brassica oleracea* L.) seedlings treated with methyl jasmonate and coronatine [J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2012, 31:113-123
- [9] Hadi F, Ayaz M, Ali S, Shafiq M, Ullah R, Jan A U. Comparative effect of polyethylene glycol and mannitol induced drought on growth (*in vitro*) of canola (*Brassica napus*), cauliflower (*Brassica oleracea*) and tomato (*Lycopersicon esculentum*) seedlings [J]. International Journal of Biosciences, 2014, 4(9):34-41
- [10] 杨瑰丽, 杨美娜, 李帅良, 曲志恒, 黄明, 陈志强, 王慧. 水稻萌芽期抗旱指标筛选与抗旱性综合评价 [J]. 华南农业大学学报, 2015, 36(2):1-5
- [11] Li J Z, Chen Y P, Teng K Q, Qin L Z, Du Y X, Zhang J, Zhao Q Z. Rice leaf heterogeneity in chlorophyll fluorescence parameters under short-term osmotic stress [J]. Biologia Plantarum, 2015, 59(1):187-192
- [12] 王阳, 杨永志, 张玲, 侯佳明, 陈冰嫻, 高鸣, 胡喜连, 李继洪, 李淑杰, 高士杰. 玉米黄改系材料萌芽期耐旱性鉴定与评价 [J]. 玉米科学, 2016, 24(3):1-6
- [13] Shen J, Xu G X, Zheng H Q. Apoplastic barrier development and water transport in *Zea mays* seedling roots under salt and osmotic stresses [J]. Protoplasma, 2015, 252:173-180
- [14] 成锴, 苏晓慧, 栗建枝, 赵太存, 王国梁, 李洪. PEG-6000 胁迫下玉米品种萌发期抗旱性鉴定与评价 [J]. 玉米科学, 2017, 25(5):85-90
- [15] 崔宏亮, 姚庆, 李利民, 苗昊翠. PEG 模拟干旱胁迫下花生品种萌发特性与抗旱性评价 [J]. 核农学报, 2017, 31(7):1412-1418
- [16] 刘惠惠, 詹成芳, 沈一, 陈志德. 不同花生品种(系)萌发期抗旱性鉴定评价 [J]. 植物遗传资源学报, 2016, 17(2):233-238
- [17] 李玲, 沈宝宇, 张天静, 杨涛, 刘荣, 宗绪晓. 豌豆种质资源芽期耐旱性评价及耐旱种质筛选 [J]. 植物遗传资源学报, 2017, 18(4):778-785
- [18] 徐小玉, 张凤银, 李俊芳. PEG 渗透胁迫下 12 个豇豆品种萌芽期抗旱性评价 [J]. 东北农业大学学报, 2016, 47(1):15-20
- [19] 李娜, 罗俊杰, 张仁陟, 刘新星. 持续模拟干旱胁迫对胡麻萌发特性影响及品种抗旱性评价研究 [J]. 核农学报, 2016, 30(2):379-387
- [20] 王宗胜, 张建平, 米君, 李闰娟. PEG 胁迫下不同胡麻品种种子萌发期抗旱性鉴定 [J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(4):118-124
- [21] George S, Minhas N M, Jatoi S A, Siddiqui S U, Ghafoor A. Impact of polyethylene glycol on proline and membrane stability index for water stress regime in tomato (*Solanum Lycopersicum*) [J]. Pakistan Journal of Botany, 2015, 47(3):835-844
- [22] 黎冬华, 刘文萍, 张艳欣, 王林海, 危文亮, 高媛, 丁霞, 王蕾, 张秀荣. 芝麻耐旱性的鉴定方法及关联分析 [J]. 作物学报, 2013, 39(8):1425-1433
- [23] 翟荣荣, 叶胜海, 余鹏, 赵小燕, 金庆生, 张小明. 浙江省晚粳稻品种对 PEG 胁迫的反应和耐旱性鉴定 [J]. 核农学报, 2015, 29(10):1991-1997
- [24] 吴奇, 周宇飞, 高悦, 张姣, 陈冰嫻, 许文娟, 黄瑞冬. 不同高粱品种萌发期抗旱性筛选与鉴定 [J]. 作物学报, 2016, 42(8):1233-1246
- [25] 李培英, 孙宗玖, 阿不来提. PEG 模拟干旱胁迫下 29 份偃麦草种质种子萌发期抗旱性评价 [J]. 中国草地学报, 2010, 32(1):32-39
- [26] 董志刚, 程智慧. 番茄品种资源芽苗期和幼苗期的耐盐性及耐盐指标评价 [J]. 生态学报, 2009, 29(3):1348-1355
- [27] 裴帅帅, 尹美强, 温银元, 黄明镜, 张彬, 郭平毅, 王玉国, 原向阳. 不同品种谷子种子萌发期对干旱胁迫的生理响应及其抗旱性评价 [J]. 核农学报, 2014, 28(10):1897-1904
- [28] 陈致富, 李勤菲, 张永晶, 崔艺馨, 许汪洁, 贺亚军, 万华方, 李晓荣, 钱伟. 白菜型油菜品种萌发期的抗旱性鉴定与筛选 [J]. 植物遗传资源学报, 2015, 16(1):15-22
- [29] 张霞, 谢小玉. PEG 胁迫下甘蓝型油菜种子萌发期抗旱鉴定指标的研究 [J]. 西北农业学报, 2012, 21(2):72-77
- [30] 张宇君, 赵丽丽, 王普昶, 陈超, 康芙蓉. 燕麦萌发期抗旱指标体系构建及综合评价 [J]. 核农学报, 2017, 31(11):2236-2242

Germination Characteristics and Drought Resistance of Cauliflower Germplasms Under PEG Simulated Drought Stress

ZHU Shiyang¹ ZHANG Xiaoling¹ LIU Qing¹ LUO Tiankuan¹

TANG Zheng¹ ZHONG Weijie¹ ZHU Zhujun^{2,*}

(¹ Wenzhou Vocational College of Science and Technology, Wenzhou Academy of Agricultural Science/Key Laboratory of Crop Breeding in South Zhejiang, Wenzhou, Zhejiang 325006; ² College of Agricultural and Food Science, Zhejiang A&F University, Hangzhou, Zhejiang 311300)

Abstract: Twelve cauliflower materials were used to evaluate their drought tolerance by examining their relative germination percentage (RGP), relative germination rate (RGR), relative germination index (RGI), relative vigor index (RVI), relative seedling height (RSH) and relative root length (RRL) under different PEG concentrations including 0(CK), 100, 150 and 200 g·L⁻¹ by method of subordinate function. The results showed that, 100 g·L⁻¹ PEG stress presented lower effect on seed germinating, while 150 ~ 200 g·L⁻¹ PEG stress significantly inhibited seed germinating. The 100~150 g·L⁻¹ PEG stress had a promoting effect on RRL, while 150~200 g·L⁻¹ PEG stress presented significant inhibition on RSH. Therefore, 150 ~ 200 g·L⁻¹ PEG was most suitable for screening drought resistance of cauliflower at germination stage. According to comprehensive evaluation of subordinate function method based on RGP, RGR, RGI, RVI, RSH and RRL, the drought resistance of the 12 cauliflower materials followed the order of P3>P6>A1>P8>P7>P2>P1>P4>P5>A2>A3>P9. These results provide theoretical evidence for breeding of drought resistance in cauliflower.

Keywords: cauliflower, seed germination, PEG, drought resistance, subordinate function