

DOI:10.16861/j.cnki.zggc.2025.0650

PEG 模拟干旱胁迫下萝卜种子萌发特性及抗旱性综合评价

摆福红¹, 王晓敏^{1,2,3}, 程国新^{1,2,3}, 郭 猛^{1,2,3}, 高艳明^{1,2,3}, 李建设^{1,2,3}, 伏小刚⁴

(1. 宁夏大学葡萄酒与园艺学院 银川 750021; 2. 宁夏现代设施园艺工程技术研究中心 银川 750021; 3. 宁夏优势特色作物现代分子育种重点实验室 银川 750021; 4. 宁夏旺吉农牧业发展有限公司 宁夏固原 756000)

摘要:为探究干旱胁迫对萝卜种子萌发特性的影响并筛选出抗旱性强的萝卜品种,以 24 个萝卜品种为试验材料,以蒸馏水处理为对照(CK),比较 5%、10%、15%和 20%浓度的聚乙二醇-6000(PEG-6000)溶液模拟干旱胁迫对萝卜相对发芽势、相对发芽率、相对发芽指数、相对活力指数、相对根长、相对芽长和相对鲜质量共 7 项抗旱评价指标的影响,运用隶属函数法进行萌发期抗旱性综合评价。结果表明,PEG 浓度、参试品种以及 PEG 浓度×参试品种间均存在极显著差异;5%和 10%的 PEG 胁迫对萝卜相对发芽势等萌发指标的影响较小,但对绝大多数供试萝卜品种的相对根长、相对芽长和相对鲜质量均具有促进作用;20%的 PEG 胁迫则明显抑制萝卜种子的萌发生长,表明 15% PEG 可作为萝卜种子萌发期抗旱性评价的适宜浓度。通过隶属函数法综合评价出 L17(春美丽)、L06(青峰 803)和 L19(盛萃一号)依次为种子萌发期抗旱性排序前 3 的萝卜品种,综合评价价值依次为 0.747、0.654 和 0.653。基于隶属函数综合评价值与聚类分析法将 24 个参试萝卜品种种子萌发期抗旱性分为 4 个组群,其中红心萝卜种子萌发期抗旱性整体相对较强。本研究结果为半干旱地区萝卜引种栽培和萝卜抗旱品种选育提供了理论参考。

关键词:萝卜;种子萌发期;PEG 胁迫;抗旱性;综合评价

中图分类号:S631.1 文献标志码:A 文章编号:1673-2871(2026)05-161-10

Comprehensive evaluation of radish seed germination characteristics and drought resistance under PEG simulated drought stress

BAI Fuhong¹, WANG Xiaomin^{1,2,3}, CHENG Guoxin^{1,2,3}, GUO Meng^{1,2,3}, GAO Yanming^{1,2,3}, LI Jian-she^{1,2,3}, FU Xiaogang⁴

(1. College of Enology and Horticulture, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China; 2. Ningxia Modern Facility Horticulture Engineering Technology Research Center, Yinchuan 750021, Ningxia, China; 3. Ningxia Key Laboratory of Modern Molecular Breeding of Dominant and Characteristic Crops, Yinchuan 750021, Ningxia, China; 4. Ningxia Wangji Agriculture and Animal Husbandry Development Limited Liability Company, Guyuan 756000, Ningxia, China)

Abstract: To investigate the effects of drought stress on seed germination characteristics of radish and screen varieties with strong drought resistance, this study used 24 radish varieties as experimental materials. Distilled water treatment served as the control (CK), while drought stress was simulated using PEG-6000 solutions at concentrations of 5%, 10%, 15%, and 20%. Seven drought resistance evaluation indicators, including relative germination potential, relative germination rate, relative germination index, relative vitality index, relative root length, relative bud length, and relative fresh mass, were compared across treatments. The membership function method was then used to comprehensively evaluate drought resistance at the germination stage. The results showed significant difference among PEG concentrations, tested varieties, and their interactions. PEG stress at 5% and 10% had minimal effects on germination potential indicators such as relative germination vigor but promoted relative root length, relative bud length, and relative fresh mass in most tested radish varieties. In contrast, 20% PEG stress significantly inhibited seed germination and growth. Therefore, 15% PEG was identified as the appropriate concentration for evaluating drought resistance during the radish seed germination stage.

收稿日期:2025-09-10;修回日期:2025-12-10

基金项目:国家重点研发计划(2021YFD1600300,2021YFD1600302);宁夏科技领军人才培养项目(2023GKLRX12);中央引导地方专项(2024FRD05010,2022FRD05040)

作者简介:摆福红,男,硕士,研究方向为蔬菜生物技术与遗传育种。E-mail:2932112030@qq.com

通信作者:王晓敏,女,教授,研究方向为蔬菜生物技术与遗传育种。E-mail:wangxiaomin_1981@163.com

Comprehensive evaluation using the membership function method revealed that the top three varieties with the highest drought resistance at the germination stage were L17(Chunmeili), L06(Qingfeng 803), and L19(Shengcui No. 1), with comprehensive evaluation values of 0.747, 0.654, and 0.653, respectively. Based on the comprehensive evaluation value from membership function method and cluster analysis, the 24 tested radish varieties were classified into four groups according to their drought resistance at the germination stage. Among them, red-fleshed radish varieties generally exhibited strong drought resistance. These results provide a theoretical reference for the introduction and cultivation of radish and the selection of drought resistant radish varieties in semi-arid areas.

Key words: Radish; Seed germination stage; PEG stress; Drought resistance; Comprehensive evaluation

萝卜(*Raphanus sativus* L.)是十字花科萝卜属一年生或二年生草本植物,富含维生素C和硫代葡萄糖苷等多种营养物质,是我国冷凉地区种植面积较大的蔬菜作物^[1-2]。萝卜在栽培过程中易受到干旱环境的影响,出现出苗率低、肉质根畸形、口感不佳等现象,严重影响萝卜的生产种植与品质^[3]。宁夏位于黄土高原地区,气候冷凉,适宜萝卜栽培,然而水资源的匮乏严重制约地区农业生产发展。因此,在宁夏地区开展萝卜抗旱品种的引种筛选以及抗旱萝卜品种选育是干旱条件下促进产业发展的重要途径。

目前,针对作物抗旱性研究的方法主要是人工控水干旱和化学试剂模拟干旱^[4-5]。相较于前者,选择化学试剂进行模拟干旱更加方便快捷。聚乙二醇(PEG)是具有便于操作等诸多特点的模拟干旱胁迫的化学试剂^[6-7]。目前,其已在花椰菜^[8]、番茄^[9]和朝天椒^[10]等多种作物中广泛应用。张思雨等^[11]以相对发芽势、相对发芽率等8项指标为评价指标,利用15%PEG胁迫从40份绿豆材料中筛选出了3份抗旱材料。白金顺等^[12]利用4个不同PEG浓度从14份代表性箭筈豌豆种质资源中筛选出1份强抗旱性箭筈豌豆种质资源。关于萝卜种子萌发期抗逆性研究在盐胁迫^[13]和重金属胁迫^[14]等方面已开展较多,而关于萝卜种子萌发期抗旱性研究的相关报道较少。赵淑玲等^[15]利用6个不同浓度的PEG胁迫对花樱萝卜种子的发芽率、发芽指数等萌发指标进行研究,结果表明,随着PEG浓度的增加,发芽率等指标逐渐下降,20%~30%PEG胁迫会严重抑制种子萌发。而目前关于不同类型的萝卜品种在不同干旱条件胁迫下的研究较少。

笔者设置0(CK)、5%、10%、15%和20%共5个不同浓度的PEG-6000溶液模拟干旱胁迫,通过测定不同类型的24个萝卜品种的相对发芽势、相对发芽率等共7项指标,明确不同萝卜品种在不同浓度PEG胁迫下的萌发情况,利用隶属函数法对参试萝卜品种的抗旱能力进行综合评价,以期筛选

出种子萌发期抗旱性强的萝卜品种,为后续大量抗旱萝卜种质的筛选与抗旱萝卜品种的选育奠定基础。

1 材料与方 法

1.1 材 料

参试萝卜品种由宁夏大学葡萄酒与园艺学院蔬菜课题组收集,共24个品种,其中包含8个青萝卜品种、3个水果型萝卜品种、4个白萝卜品种、5个红心萝卜品种以及4个其他类型品种,详细信息见表1。

1.2 试 验 设 计

试验于2022年4—5月在宁夏大学葡萄酒与园艺学院实验室进行,选用PEG-6000为模拟干旱试剂,设置0(CK)、5%、10%、15%和20%(w)5个干旱胁迫处理,其中CK为蒸馏水。选择颗粒饱满的萝卜种子分布于培养皿内,每个培养皿放置20粒种子,分别加入等量不同浓度的PEG-6000溶液,对照组加入等体积蒸馏水。将培养皿置于温度为(25±1)℃的培养箱中进行避光培养,每2d加入等体积的溶液,每个处理3次重复。

1.3 测 定 指 标 与 方 法

以种子突破种皮并超过自身直径的1/2算作发芽,第2天计算发芽势(GP),第7天结束试验统计发芽率(GR)。从每个培养皿中选取10株测量根长(RL)、芽长(BL)、鲜质量(FM)等指标。发芽率、发芽势、发芽指数(GI)、活力指数(VI)等指标以及各指标相对值的调查计算参照摆福红等^[16]的方法,按照公式(1)计算,即相对发芽势(RGP)、相对发芽率(RGR)、相对发芽指数(RGI)、相对活力指数(RVI)、相对根长(RRL)、相对芽长(RBL)和相对鲜质量(RFM)。参试的24个萝卜品种萌发期抗旱性综合评价参考朱世杨等^[8]的方法进行。

$$\text{指标相对值} = T_i / CK_i \quad (1)$$

式中: T_i 和 CK_i 分别表示第*i*个指标干旱胁迫和对照的测定值。

表1 24个参试萝卜品种信息
Table 1 Information of 24 tested radish varieties

品种编号 Variety No.	品种 Variety	产地 Origin	类型 Type	品种编号 Variety No.	品种 Variety	产地 Origin	类型 Type
L01	绿富士 5833 Lüfushi 5833	中国山东 Shandong, China	青萝卜 Green radish	L13	富帅二号 Fushuai No. 2	中国山东 Shandong, China	白萝卜 White radish
L02	亚美一号 Yamei No. 1	中国甘肃 Gansu, China	青萝卜 Green radish	L14	韩白玉春 Hanbaiyuchun	韩国 Republic of Korea	白萝卜 White radish
L03	绿富士 7号 Lüfushi No. 7	中国山东 Shandong, China	青萝卜 Green radish	L15	新白玉王 Xinbaiyuwang	中国北京 Beijing, China	白萝卜 White radish
L04	君川景福 Junchuanjingfu	中国北京 Beijing, China	青萝卜 Green radish	L16	满春红 Manchunhong	中国北京 Beijing, China	红心萝卜 Red radish
L05	义和青脆一号 Yiheqingcui No. 1	中国山东 Shandong, China	青萝卜 Green radish	L17	春美丽 Chunmeili	中国河北 Hebei, China	红心萝卜 Red radish
L06	青峰 803 Qingfeng 803	中国宁夏 Ningxia, China	青萝卜 Green radish	L18	心里美 Xinlimei	中国北京 Beijing, China	红心萝卜 Red radish
L07	招福 Zhaofu	韩国 Republic of Korea	青萝卜 Green radish	L19	盛萃一号 Shengcui No. 1	中国山东 Shandong, China	红心萝卜 Red radish
L08	佳美 2号 Jiamei No. 2	中国北京 Beijing, China	青萝卜 Green radish	L20	盛萃三号 Shengcui No. 3	中国山东 Shandong, China	红心萝卜 Red radish
L09	盛青 388 Shengqing 388	中国山东 Shandong, China	水果萝卜 Fruit radish	L21	彝红二号 Benhong No. 2	中国山东 Shandong, China	红皮萝卜 Red skinned radish
L10	盛青五号 Shengqing No. 5	中国山东 Shandong, China	水果萝卜 Fruit radish	L22	春红一号 Chunhong No. 1	中国山西 Shanxi, China	红皮萝卜 Red skinned radish
L11	德高宝玉 Degaobaoyu	中国山东 Shandong, China	水果萝卜 Fruit radish	L23	盛锦红一号 Shengjinhong No. 1	中国山东 Shandong, China	红皮萝卜 Red skinned radish
L12	富莹一号 Fuying No. 1	中国山东 Shandong, China	白萝卜 White radish	L24	速生樱桃萝卜 Fast-growing cherry radish	中国山东 Shandong, China	红皮萝卜 Red skinned radish

1.4 数据分析

利用 IBM SPSS Statistics 26 对参试萝卜品种种子萌发期各指标相对值进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 不同浓度 PEG 胁迫下萝卜种子各指标的方差分析

对 24 个参试萝卜品种在 4 个 PEG 浓度处理下的相对发芽率、相对发芽势、相对发芽指数、相对活力指数、相对根长、相对芽长和相对鲜质量共 7 项指标进行方差分析。由表 2 可知,上述 7 项指标在 PEG 浓度、参试品种、PEG 浓度×参试品种间均存在

极显著差异,表明 PEG 浓度和参试品种均对萝卜种子萌发指标有极显著影响。

2.2 PEG 胁迫对不同萝卜品种相对发芽势与相对发芽率的影响

不同浓度的 PEG 胁迫对 24 个萝卜品种相对发芽势与相对发芽率的影响如表 3 所示。从不同浓度 PEG 胁迫来看,大多数萝卜品种的相对发芽势与相对发芽率在 5%、10%和 15% PEG 胁迫下相差较小,在 20% PEG 胁迫下均达到最小值。

从相对发芽势来看,在 5% PEG 胁迫下各品种的相对发芽势存在显著差异,变化范围在 0.97~1.04;在 10% PEG 胁迫下,萝卜的发芽势存在受到不

表2 不同浓度 PEG 胁迫下萝卜种子萌发指标的方差分析

Table 2 Variance analysis of radish seed germination indicators under different concentrations of PEG stress

变异来源 Source of variation	F 值 F value						
	相对发芽 势 RGP	相对发芽 率 RGR	相对发芽 指数 RGI	相对活力 指数 RVI	相对根 长 RRL	相对芽 长 RBL	相对鲜 质量 RFM
PEG 浓度 PEG concentration (A)	2 975.94**	822.17**	3 269.66**	4 465.43**	828.19**	5 877.82**	11 984.56**
参试品种 Test varieties (B)	9.01**	9.07**	25.09**	45.29**	9.53**	56.46**	11.17**
A×B	4.43**	6.65**	6.82**	9.27**	2.87**	7.90**	6.25**

注:**表示在 0.01 水平差异极显著。

Note: ** indicates extremely significant difference at 0.01 level.

表3 干旱胁迫对萝卜相对发芽率与相对发芽势的影响
Table 3 Effects of drought stress on relative germination percentage and relative germination rate of radish

品种编号 Variety No.	相对发芽率 RGR									
	5% PEG	10% PEG	15% PEG	20% PEG	5% PEG	10% PEG	15% PEG	20% PEG	5% PEG	20% PEG
L01	1.00±0.00 abcA	0.86±0.03 defB	0.82±0.03 efgB	0.09±0.11 abcdefC	0.98±0.03 aA	0.96±0.03 abA	0.93±0.03 abcA	0.56±0.13 abcdB	0.98±0.03 aA	0.56±0.13 abcdB
L02	1.00±0.00 abcA	0.91±0.08 abcdeAB	0.83±0.07 efgB	0.04±0.06 defC	1.00±0.00 aA	1.02±0.03 aA	1.00±0.00 aA	0.19±0.03 fgB	1.00±0.00 aA	0.19±0.03 fgB
L03	0.98±0.03 bcA	0.85±0.09 defB	0.98±0.06 abA	0.02±0.03 efC	0.98±0.03 aA	1.00±0.00 abA	0.97±0.03 abcA	0.29±0.03 efB	0.97±0.03 abcA	0.29±0.03 efB
L04	1.00±0.00 abcA	0.90±0.05 bcdeB	0.97±0.03 abA	0.19±0.03 abcD	0.98±0.03 aA	0.98±0.03 abA	0.95±0.00 abcA	0.41±0.09 bcdefB	0.95±0.00 abcA	0.41±0.09 bcdefB
L05	1.00±0.00 abcA	0.83±0.01 efgA	0.96±0.03 abA	0.21±0.18 abcB	1.00±0.00 aA	1.00±0.00 abA	0.98±0.03 abA	0.57±0.27 abcdB	0.98±0.03 abA	0.57±0.27 abcdB
L06	1.04±0.03 aA	1.00±0.00 aA	1.00±0.00 aA	0.23±0.12 abB	1.02±0.03 aA	0.95±0.05 bcA	0.98±0.06 abA	0.58±0.04 abcB	0.98±0.06 abA	0.58±0.04 abcB
L07	1.00±0.00 abcA	0.98±0.03 abA	0.97±0.03 abA	0.13±0.07 abcdefB	0.98±0.03 aA	0.98±0.03 abA	1.00±0.00 aA	0.64±0.01 abB	1.00±0.00 aA	0.64±0.01 abB
L08	1.00±0.00 abcA	0.83±0.02 efgB	0.86±0.07 defB	0.18±0.03 abcC	0.98±0.03 aA	1.00±0.00 abA	0.96±0.03 abcA	0.36±0.06 cdefB	0.96±0.03 abcA	0.36±0.06 cdefB
L09	1.00±0.00 abcA	0.98±0.03 abA	0.95±0.06 abcA	0.16±0.1 abcdefB	0.98±0.03 aA	0.98±0.03 abA	0.98±0.03 abA	0.64±0.15 abB	0.98±0.03 abA	0.64±0.15 abB
L10	0.98±0.03 bcA	0.98±0.03 abA	0.95±0.00 abcA	0.07±0.03 bcdefB	0.98±0.03 aA	0.98±0.03 abA	0.97±0.03 abcA	0.54±0.09 abcdB	0.97±0.03 abcA	0.54±0.09 abcdB
L11	1.00±0.00 abcA	0.93±0.03 abcdeAB	0.88±0.03 cdeB	0.21±0.09 abcC	1.00±0.00 aA	1.00±0.00 abA	0.98±0.03 abA	0.61±0.22 abB	0.98±0.03 abA	0.61±0.22 abB
L12	1.00±0.00 abcA	0.77±0.06 fghB	0.67±0.06 hC	0.00±0.00 fD	0.97±0.03 aA	0.88±0.06 eB	0.81±0.05 eC	0.00±0.00 gD	0.81±0.05 eC	0.00±0.00 gD
L13	1.00±0.00 abcA	0.73±0.01 hiC	0.78±0.05 fgB	0.02±0.03 efD	0.98±0.03 aA	0.91±0.03 cdeA	0.89±0.09 cda	0.26±0.04 fB	0.89±0.09 cda	0.26±0.04 fB
L14	0.97±0.06 cA	0.98±0.03 abA	1.00±0.00 aA	0.03±0.03 defB	0.98±0.03 aA	1.00±0.00 abA	0.98±0.03 abA	0.58±0.16 abcB	0.98±0.03 abA	0.58±0.16 abcB
L15	1.00±0.00 abcA	0.92±0.08 abcdeA	0.95±0.05 abcA	0.19±0.06 abcdeB	0.98±0.03 aA	1.00±0.00 abA	0.95±0.00 abcA	0.49±0.10 abcdeB	0.95±0.00 abcA	0.49±0.10 abcdeB
L16	1.00±0.00 abcA	0.91±0.03 abcdeAB	0.82±0.06 efgB	0.19±0.08 abcdeC	1.00±0.00 aA	0.95±0.00 bcdA	1.00±0.05 aA	0.34±0.09 defB	1.00±0.05 aA	0.34±0.09 defB
L17	1.02±0.03 abA	0.76±0.08 ghiB	0.93±0.06 abcdeA	0.25±0.03 ac	1.02±0.03 aA	0.98±0.03 abA	0.98±0.03 abA	0.71±0.03 abB	0.98±0.03 abA	0.71±0.03 abB
L18	1.00±0.00 abcA	0.88±0.03 cdeAB	0.93±0.06 abcdeB	0.21±0.06 abcC	1.02±0.06 aA	1.00±0.00 abA	0.93±0.03 abcA	0.52±0.22 abcdB	0.93±0.03 abcA	0.52±0.22 abcdB
L19	1.02±0.03 abA	0.98±0.03 abB	0.96±0.03 abB	0.05±0.06 cdefC	1.02±0.03 aA	1.00±0.05 abA	0.96±0.03 abcA	0.70±0.06 abB	0.96±0.03 abcA	0.70±0.06 abB
L20	0.97±0.06 cA	0.90±0.05 bcdeB	0.90±0.05 bcdeB	0.08±0.03 abcdefC	1.00±0.00 aA	0.95±0.05 bcA	1.00±0.00 aA	0.60±0.05 abB	1.00±0.00 aA	0.60±0.05 abB
L21	1.00±0.00 abcA	0.86±0.03 defA	0.95±0.05 abcA	0.18±0.22 abcdeB	0.98±0.03 aA	1.02±0.03 aA	0.95±0.05 abcA	0.56±0.27 abcdB	0.95±0.05 abcA	0.56±0.27 abcdB
L22	0.98±0.03 bcA	0.97±0.03 abcA	0.82±0.03 efgB	0.18±0.06 abcdeC	0.98±0.03 aA	0.98±0.03 abA	1.00±0.00 aA	0.37±0.06 cdefB	1.00±0.00 aA	0.37±0.06 cdefB
L23	1.00±0.00 abcA	0.96±0.06 abcA	0.77±0.05 gB	0.12±0.06 abcdefC	0.98±0.03 aA	1.00±0.00 abA	0.91±0.03 bcdA	0.25±0.03 fB	0.91±0.03 bcdA	0.25±0.03 fB
L24	0.98±0.03 bcA	0.68±0.05 iB	0.63±0.05 hC	0.00±0.00 fD	0.98±0.03 aA	0.89±0.05 deAB	0.84±0.11 deB	0.00±0.00 gC	0.84±0.11 deB	0.00±0.00 gC

注：同列数字后不同小写字母表示同一PEG浓度胁迫下不同品种间在0.05水平差异显著；同行数字后不同大写字母表示同一品种在不同PEG浓度处理间在0.05水平差异显著。下同。
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference between different varieties at 0.05 level under the same concentration of PEG stress. Different capital letters in the same row indicate significant difference at 0.05 level between different concentrations of PEG treatments. The same below.

同程度的影响,相对发芽势的变化范围在 0.68~1.00;在 15% PEG 胁迫下,相对发芽势的范围在 0.63~1.00;在 20% PEG 胁迫下,萝卜种子的发芽势受到严重抑制,相对发芽势的范围在 0.00~0.25。结果表明,20%PEG 胁迫会严重影响萝卜种子萌发,同时在 PEG 胁迫下萝卜种子的相对发芽势比相对发芽率更加敏感。

从相对发芽率来看,在 5%PEG 胁迫下,各萝卜品种的相对发芽率无显著差异;在 10%PEG 胁迫下,萝卜相对发芽率的变化范围在 0.88~1.02;在 15% PEG 胁迫下,相对发芽率的变化范围在 0.81~1.00,其中 L12 的相对发芽率最低;在 20%PEG 胁迫下,各萝卜品种种子萌发受到严重抑制,L12 和 L24 的相对发芽率最低,均为 0.00,种子无萌发,L17 的相对发芽率最大,为 0.71。综上,从相对发芽势与相对发芽率来看,品种 L17 在种子萌发期具有高抗旱性。

2.3 PEG 胁迫对不同萝卜品种相对发芽指数与相对活力指数的影响

由表 4 可知,从不同浓度 PEG 胁迫来看,5%、10%和 15%PEG 胁迫对大多数萝卜品种的相对发芽指数与相对活力指数的影响差异显著,而 20% PEG 胁迫下相对发芽指数和相对活力指数均达到最小值,且与另外 3 个 PEG 浓度间有显著差异。说明参试萝卜品种的相对发芽指数和相对活力指数随着 PEG 浓度的增加呈下降趋势。在 5%PEG 胁迫下,L12 和 L21 的相对发芽指数最小,均为 0.96,L17 的相对发芽指数最大,为 1.00,其余参试萝卜品种的相对发芽指数间无显著差异;在 10%PEG 胁迫下,相对发芽指数的变化范围在 0.55~0.96;在 15% PEG 胁迫下,相对发芽指数的变化范围在 0.54~0.89;在 20%PEG 胁迫下,萝卜的相对发芽指数受到严重抑制,变化范围在 0.00~0.43,其中 L12 和 L24 的相对发芽指数最小,L04 的相对发芽指数最大。在 5% PEG 胁迫下,相对活力指数的变化范围在 0.93~1.62;在 10%PEG 胁迫下,相对活力指数的变化范围在 0.51~1.46;在 15%PEG 胁迫下,相对活力指数的变化范围在 0.22~0.87,L24 的相对活力指数最低,L18 的相对活力指数最高;在 20%PEG 胁迫下,萝卜种子的活力指数受到严重抑制,L04 的相对活力指数最大,为 0.09,L12 和 L24 的相对活力指数均为 0.00,表明达到了萌发生长的耐受阈值。

2.4 PEG 胁迫对不同萝卜品种相对根长、相对芽长和相对鲜质量的影响

由表 5 可知,从不同浓度 PEG 胁迫来看,5%和

10%PEG 胁迫对绝大多数萝卜品种的相对根长、相对芽长和相对鲜质量具有促进作用;15%PEG 胁迫对不同萝卜品种相对根长的影响不同,对相对芽长(除 L17 外)和相对鲜质量均有抑制作用;20%PEG 胁迫对相对根长、相对芽长和相对鲜质量均有显著抑制作用。在 5%PEG 和 10%PEG 胁迫下,相对根长均大于 1.00,表明 5%PEG 和 10%PEG 胁迫对根系伸长生长具有促进作用;在 15%PEG 胁迫下,相对根长的变化范围在 0.42~3.02;在 20%PEG 胁迫下,萝卜的根系生长受到严重抑制,相对根长的变化范围在 0.00~0.46,其中 L05、L12、L23 和 L24 的相对根长均为 0.00。在 5%PEG 胁迫下,萝卜相对芽长的变化范围在 0.95~1.64;在 10%PEG 胁迫下,相对芽长的变化范围在 0.93~1.80;在 15%PEG 胁迫下,相对芽长的变化范围在 0.40~1.17;在 20% PEG 胁迫下,相对芽长的变化范围在 0.00~0.25,L12 和 L24 的相对芽长最小,L13 的相对芽长最大。在 5%PEG 胁迫下,萝卜相对鲜质量的变化范围在 1.05~1.47;在 10%PEG 胁迫下,相对鲜质量的变化范围在 1.68~2.18;在 15%PEG 胁迫下,相对鲜质量的变化范围在 0.48~0.94,其中 L15 和 L17 的相对鲜质量显著高于其他品种;在 20%PEG 胁迫下,参试萝卜品种的鲜质量受到严重抑制,相对鲜质量的变化范围在 0.00~0.55。

综上表明,PEG 胁迫对萝卜萌发生长的影响与参试品种特性和胁迫浓度有关,低于 10%的 PEG 胁迫对萝卜萌发生长具有一定的促进作用,而 20%的 PEG 胁迫会严重抑制萝卜种子的萌发与生长,甚至会造成种子不发芽的情况。

2.5 萝卜萌发期抗旱性综合评价

由表 6 可知,24 个参试萝卜品种的综合评价值在 0.095~0.747,存在较大差异。依据综合评价值进行排序,种子萌发期抗旱性排序前 5 的萝卜品种依次为 L17、L06、L19、L11 和 L18,L24 种子萌发期抗旱性最弱。从不同类型来看,青萝卜中 L06 种子萌发期抗旱性好,水果型萝卜中 L11 种子萌发期抗旱性好,白萝卜中 L14 萌发期抗旱性较好,红心萝卜中 L17 和 L19 是萌发期抗旱性综合排序前 3 的品种,红皮白肉萝卜中 L23 萌发期抗旱性较好。

2.6 PEG 胁迫下萝卜种子萌发期抗旱性聚类分析

由图 1 可知,在平方欧式距离为 3 处将 24 个萝卜品种分为 4 个组群。第 I 组群仅有 L17 这 1 个萝卜品种,综合评价值为 0.747,抗旱性排序第 1,说明 L17 种子萌发期抗旱性强;第 II 组群包含 L04、

表4 干旱胁迫对萝卜品种相对发芽指数与相对活力指数影响的影响
Table 4 Effects of drought stress on the relative germination index and relative vitality index of radish varieties

品种编号 Variety No.	相对发芽指数 RGI								相对活力指数 RVI							
	5%PEG	10%PEG	15%PEG	20%PEG	5%PEG	10%PEG	15%PEG	20%PEG	5%PEG	10%PEG	15%PEG	20%PEG	5%PEG	10%PEG	15%PEG	20%PEG
L01	0.98±0.02 abA	0.86±0.03 bcdB	0.77±0.02 efghC	0.14±0.05 eFD	1.13±0.10 cdefGA	1.25±0.06 bcA	0.57±0.05 fghB	0.02±0.01 cdeC								
L02	0.99±0.02 abA	0.84±0.03 cdefB	0.67±0.06 ghiC	0.14±0.07 eFD	1.18±0.04 cdefA	1.19±0.05 cdA	0.61±0.05 defghB	0.01±0.01 deC								
L03	0.98±0.02 abA	0.74±0.02 hB	0.73±0.01 efghB	0.22±0.08 bcdefC	1.11±0.09 defGA	0.95±0.01 fghijA	0.62±0.03 defgB	0.03±0.01 bcdC								
L04	0.99±0.02 abA	0.88±0.05 abcB	0.86±0.02 abcB	0.43±0.07 aC	1.15±0.06 cdefA	1.09±0.05 deA	0.70±0.06 cdB	0.09±0.03 aC								
L05	0.99±0.01 abA	0.93±0.06 abAB	0.87±0.07 abB	0.27±0.03 bcdeC	1.00±0.03 ghB	1.26±0.09 bcA	0.62±0.05 defgC	0.03±0.01 bcdD								
L06	0.97±0.03 abA	0.84±0.04 cdefB	0.77±0.03 defC	0.25±0.15 bcdefD	1.12±0.06 defgB	1.46±0.14 aA	0.79±0.06 bc	0.02±0.01 cdeD								
L07	0.99±0.02 abA	0.82±0.06 cdefgB	0.80±0.04 bcdeB	0.26±0.14 bcdeC	1.09±0.05 defGA	0.94±0.13 ghijB	0.54±0.02 ghC	0.03±0.01 bcdD								
L08	0.98±0.02 abA	0.80±0.05 defghB	0.70±0.02 fghC	0.18±0.05 cdefD	1.20±0.11 cdeA	0.93±0.05 ghijB	0.44±0.02 iC	0.02±0.01 cdeD								
L09	0.99±0.02 abA	0.85±0.03 bcdeB	0.85±0.06 abcdeB	0.11±0.02 fgC	1.14±0.06 cdefGA	1.22±0.07 bcdeA	0.75±0.08 bcB	0.02±0.00 cdeC								
L10	0.98±0.02 abA	0.96±0.02 aA	0.86±0.02 abcB	0.22±0.05 bcdefC	1.16±0.11 cdefA	1.08±0.06 defA	0.58±0.02 fghB	0.03±0.01 bcdC								
L11	0.99±0.02 abA	0.95±0.02 aA	0.89±0.05 aA	0.35±0.10 abB	1.10±0.07 defgB	1.29±0.05 bcA	0.65±0.03 defC	0.07±0.02 aD								
L12	0.96±0.05 bA	0.82±0.05 cdefgB	0.78±0.09 cdefB	0.00±0.00 gC	1.02±0.05 fghB	1.25±0.10 bcA	0.53±0.05 hC	0.00±0.00 eD								
L13	0.99±0.02 abA	0.62±0.04 iB	0.60±0.05 ijB	0.31±0.09 abcdeC	1.22±0.06 cdeA	0.83±0.08 jB	0.31±0.01 jC	0.08±0.02 aD								
L14	0.99±0.02 abA	0.89±0.03 abcB	0.76±0.01 efgC	0.28±0.02 bcdeD	1.03±0.11 fghB	1.20±0.05 cdeA	0.63±0.03 defC	0.04±0.01 bcD								
L15	0.98±0.02 abA	0.77±0.04 efghB	0.76±0.06 efghB	0.19±0.02 cdefC	1.08±0.01 defGA	0.98±0.09 efghijB	0.39±0.04 jC	0.02±0.01 cdeD								
L16	0.99±0.02 abA	0.80±0.10 defghB	0.78±0.03 bcdefB	0.25±0.10 bcdefC	1.27±0.03 cA	1.00±0.11 efghB	0.59±0.05 efghC	0.02±0.01 cdeD								
L17	1.00±0.00 aA	0.82±0.03 cdefgB	0.56±0.02 jC	0.21±0.10 bcdefD	1.62±0.20 aA	0.85±0.05 ijB	0.33±0.01 jC	0.04±0.02 bcD								
L18	0.99±0.02 abA	0.75±0.03 ghB	0.74±0.04 efghB	0.19±0.03 cdefC	1.15±0.03 cdefgB	1.35±0.10 abA	0.87±0.10 aC	0.02±0.01 cdeD								
L19	0.98±0.01 abA	0.77±0.02 fghB	0.72±0.04 efghB	0.33±0.05 abcC	1.18±0.06 cdefA	0.97±0.05 efghijB	0.59±0.08 efghC	0.05±0.01 bD								
L20	0.99±0.01 abA	0.74±0.06 ghB	0.66±0.07 hiB	0.22±0.02 bcdefC	1.44±0.14 bA	0.90±0.04 hijB	0.53±0.05 hC	0.04±0.01 bcD								
L21	0.96±0.02 bA	0.80±0.03 defghB	0.78±0.04 bcdeB	0.22±0.13 bcdefC	1.09±0.06 defGA	1.04±0.05 efghB	0.59±0.03 fghC	0.02±0.01 cdeD								
L22	0.99±0.01 abA	0.80±0.04 defghB	0.72±0.02 efghB	0.15±0.09 eFC	1.05±0.01 efghA	1.04±0.05 efGA	0.68±0.02 cdeB	0.02±0.01 cdeC								
L23	0.99±0.02 abA	0.76±0.02 fghB	0.67±0.02 hiC	0.17±0.06 defD	1.14±0.09 cdefGA	0.89±0.01 hijB	0.35±0.03 jC	0.01±0.00 deD								
L24	0.98±0.02 abA	0.55±0.03 iB	0.54±0.06 jB	0.00±0.00 gC	0.93±0.06 hA	0.51±0.03 kB	0.22±0.04 kC	0.00±0.00 eD								

表5 干旱胁迫对萝卜品种相对根长、相对芽长与相对鲜质量的影响
Table 5 Effects of drought stress on relative root length, relative bud length, and relative fresh mass of radish varieties

品种编号 Variety No.	相对根长 RRL				相对芽长 RBL				相对鲜质量 RFM			
	5%PEG	10%PEG	15%PEG	20%PEG	5%PEG	10%PEG	15%PEG	20%PEG	5%PEG	10%PEG	15%PEG	20%PEG
L01	1.91±0.19 defgB	4.38±0.59 abcA	2.21±0.28 bcB	0.35±0.01 bcC	1.15±0.08 cdefB	1.41±0.01 bcdeA	0.90±0.03 cdC	0.18±0.00 bcD	1.05±0.03 cB	2.01±0.00 aA	0.71±0.00 eC	0.20±0.00 gD
L02	1.55±0.08 efgB	3.79±0.23 bcdeA	0.97±0.10 efgC	0.20±0.03 efgD	1.19±0.06 cdefB	1.29±0.03 efgA	0.85±0.04 cdefC	0.08±0.01 gD	1.06±0.04 cB	2.02±0.00 aA	0.60±0.00 hC	0.14±0.00 kD
L03	2.36±0.31 abcdb	3.71±0.26 bcdeA	1.88±0.15 cdC	0.13±0.02 ghD	1.13±0.08 defgB	1.45±0.03 bcA	0.79±0.07 fghcC	0.15±0.01 deD	1.07±0.03 cB	2.03±0.01 aA	0.65±0.00 gC	0.25±0.01 dD
L04	2.79±1.37 abA	3.52±1.63 cdefA	2.96±1.44 aA	0.34±0.13 bcB	1.16±0.07 cdefA	1.23±0.03 fghjA	0.81±0.07 efgB	0.20±0.04 bcC	1.07±0.04 cB	1.98±0.09 aA	0.57±0.01 iC	0.11±0.00 mD
L05	2.71±0.13 abcB	5.14±0.18 aA	0.60±0.18 gC	0.00±0.00 iD	1.00±0.02 ghA	1.03±0.03 klA	0.59±0.02 lmB	0.13±0.01 efc	1.08±0.03 cB	2.05±0.00 aA	0.69±0.00 fc	0.24±0.00 eD
L06	2.40±0.45 abcdb	3.28±0.65 cdefA	1.81±0.25 cdB	0.30±0.06 cdeC	1.15±0.03 cdefB	1.36±0.01 cdefA	0.71±0.01 ijK	0.10±0.01 fgD	1.06±0.13 cB	2.01±0.09 aA	0.73±0.00 dC	0.10±0.00 nD
L07	2.39±0.11 abcdb	3.70±0.15 bcdeA	1.95±0.06 cdC	0.44±0.04 abD	1.10±0.06 defgB	1.21±0.04 ghjA	0.79±0.01 fghicC	0.11±0.01 fgD	1.07±0.04 cB	1.99±0.05 aA	0.50±0.00 iC	0.13±0.00 oD
L08	1.79±0.18 defgB	3.10±0.23 defA	1.54±0.07 cdeC	0.06±0.10 hiD	1.22±0.10 cdeB	1.51±0.03 ba	0.68±0.01 jkC	0.09±0.01 gD	1.05±0.05 cB	1.97±0.06 aA	0.58±0.01 iC	0.24±0.00 eD
L09	2.22±0.33 bcdefgB	3.23±0.33 cdefA	0.90±0.09 efgC	0.29±0.07 cdeD	1.15±0.07 cdefgB	1.33±0.04 cdefgA	0.52±0.03 mC	0.16±0.01 cdeD	1.08±0.04 cAB	1.68±0.61 bA	0.50±0.03 iBC	0.16±0.01 jC
L10	2.28±0.36 bcdefB	3.34±0.61 cdefA	1.08±0.10 efgC	0.34±0.01 bcD	1.19±0.11 cdefB	1.36±0.09 cdefA	0.84±0.03 defgC	0.13±0.01 efd	1.06±0.06 cB	1.96±0.08 aA	0.65±0.00 gC	0.20±0.00 gD
L11	2.38±0.39 abcdb	4.18±0.65 abcdeA	1.78±0.17 cdC	0.24±0.05 defD	1.11±0.05 defgB	1.26±0.06 fghjA	0.51±0.01 mC	0.21±0.02 bD	1.11±0.05 cB	2.00±0.08 aA	0.86±0.00 bc	0.55±0.00 aD
L12	1.52±0.26 fgB	2.98±0.28 eFA	0.53±0.14 gC	0.00±0.00 iD	1.07±0.07 efgB	1.16±0.00 iJA	0.63±0.04 kIC	0.00±0.00 hD	1.08±0.05 cB	1.96±0.13 aA	0.56±0.00 jC	0.00±0.00 oD
L13	2.18±0.33 bcdefgB	3.15±0.32 defA	0.69±0.15 gC	0.30±0.04 cdeD	1.23±0.08 cdeB	1.43±0.05 bcdeA	0.89±0.05 cdeC	0.25±0.03 aD	1.05±0.02 cB	2.04±0.05 aA	0.60±0.00 hC	0.32±0.00 cD
L14	2.49±0.02 abcdb	4.06±0.08 abcdeA	1.41±0.18 defC	0.23±0.06 defD	1.07±0.10 fghA	1.14±0.09 jkA	0.67±0.03 jkIB	0.15±0.02 cdeC	1.07±0.08 cB	2.06±0.03 aA	0.50±0.00 iC	0.18±0.01 iD
L15	1.92±0.21 defgB	3.48±0.17 cdefA	1.96±0.24 cdB	0.30±0.09 cdeC	1.10±0.01 defgA	1.13±0.04 jkA	0.68±0.04 jkIB	0.13±0.02 efc	1.16±0.21 bcB	2.04±0.07 aA	0.94±0.00 aC	0.19±0.00 hD
L16	2.75±0.36 abcB	4.77±0.54 abA	2.74±0.21 abB	0.18±0.02 fgC	1.28±0.04 cB	1.35±0.03 cdefA	0.73±0.01 hijC	0.10±0.01 fgD	1.17±0.15 bcB	2.05±0.05 aA	0.68±0.00 fc	0.23±0.00 fd
L17	2.45±0.30 abcdb	4.22±0.43 abcdeA	2.21±0.06 bcB	0.41±0.04 abcC	1.64±0.20 aA	1.80±0.21 aA	1.17±0.13 ab	0.20±0.04 bcC	1.17±0.14 bcB	2.18±0.02 aA	0.93±0.00 aC	0.46±0.00 bD
L18	2.87±0.21 abA	2.47±0.24 fA	2.68±0.40 abA	0.46±0.05 abB	1.16±0.02 cdefB	1.27±0.05 fghjA	0.81±0.10 defghc	0.09±0.02 gD	1.47±0.38 ab	2.16±0.20 aA	0.77±0.01 cC	0.18±0.00 iD
L19	2.31±0.17 abcdeC	4.25±0.27 abcdeA	3.02±0.21 aB	0.41±0.02 abD	1.20±0.05 cdefB	1.30±0.05 efgA	0.94±0.02 cC	0.15±0.01 deD	1.39±0.32 ab	2.15±0.14 aA	0.68±0.00 fc	0.23±0.00 fd
L20	1.98±0.37 cdefgB	4.25±0.58 abcdeA	2.75±0.19 abAB	0.45±0.11 aC	1.45±0.13 bB	1.74±0.14 aA	1.03±0.08 bcC	0.16±0.02 cdD	1.31±0.26 abB	2.09±0.14 aA	0.74±0.00 dC	0.19±0.00 hD
L21	1.49±0.33 gB	3.34±0.71 cdefA	1.77±0.47 cdB	0.25±0.02 cdefc	1.13±0.05 defgB	1.31±0.01 defgA	0.75±0.00 ghjC	0.09±0.01 gD	1.08±0.05 cB	2.03±0.01 aA	0.53±0.01 kC	0.11±0.00 mD
L22	1.84±0.21 defgB	3.18±0.29 defA	0.80±0.11 fgC	0.27±0.05 cdefd	1.05±0.01 fghB	1.17±0.03 hijA	0.52±0.03 mC	0.15±0.02 deD	1.06±0.03 cB	1.99±0.08 aA	0.53±0.01 kC	0.16±0.00 jD
L23	3.06±0.36 abB	5.09±1.26 aA	0.48±0.06 gC	0.00±0.00 iD	1.16±0.10 cdefB	1.26±0.04 fghjA	0.75±0.04 ghjC	0.09±0.01 gD	1.06±0.03 cB	1.97±0.08 aA	0.64±0.00 gC	0.18±0.00 iD
L24	1.86±0.25 defgB	3.15±0.34 defA	0.42±0.06 gC	0.00±0.00 iD	0.95±0.08 hA	0.93±0.04 lA	0.40±0.03 nB	0.00±0.00 hC	1.05±0.02 cB	1.95±0.12 aA	0.48±0.00 mC	0.00±0.00 oD

表6 24个萝卜品种各指标隶属函数值及综合评价

Table 6 Membership function value and comprehensive evaluation of 24 radish varieties for each index

品种编号 Variety No.	隶属函数值 Subordinate function value							综合评价价值 Comprehensive evaluation value	排序 Rank
	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	相对根长 RRL	相对芽长 RBL	相对鲜质量 RFM		
L01	0.57	0.48	0.52	0.46	0.61	0.55	0.38	0.507	11
L02	0.72	0.47	0.54	0.45	0.29	0.42	0.30	0.442	18
L03	0.53	0.43	0.50	0.42	0.47	0.49	0.39	0.459	16
L04	0.63	0.71	0.87	0.67	0.73	0.50	0.32	0.610	6
L05	0.82	0.67	0.81	0.46	0.46	0.24	0.43	0.531	9
L06	0.86	0.45	0.66	0.77	0.61	0.67	0.59	0.654	2
L07	0.78	0.72	0.69	0.38	0.64	0.37	0.24	0.523	10
L08	0.54	0.57	0.50	0.35	0.25	0.45	0.31	0.411	21
L09	0.75	0.73	0.66	0.52	0.39	0.39	0.11	0.477	15
L10	0.62	0.57	0.73	0.46	0.46	0.48	0.33	0.505	12
L11	0.84	0.69	0.88	0.63	0.56	0.40	0.65	0.650	4
L12	0.00	0.22	0.34	0.35	0.06	0.18	0.20	0.188	23
L13	0.50	0.27	0.45	0.45	0.36	0.65	0.39	0.442	17
L14	0.73	0.53	0.71	0.49	0.53	0.34	0.30	0.499	13
L15	0.57	0.71	0.53	0.30	0.47	0.33	0.58	0.496	14
L16	0.77	0.62	0.66	0.45	0.74	0.45	0.47	0.583	7
L17	0.97	0.70	0.55	0.49	0.71	0.95	0.78	0.747	1
L18	0.84	0.69	0.56	0.61	0.69	0.40	0.73	0.642	5
L19	0.86	0.70	0.58	0.49	0.77	0.52	0.65	0.653	3
L20	0.76	0.81	0.41	0.35	0.69	0.50	0.35	0.545	8
L21	0.43	0.65	0.45	0.40	0.35	0.38	0.27	0.406	22
L22	0.68	0.59	0.56	0.42	0.31	0.29	0.26	0.423	20
L23	0.52	0.56	0.51	0.25	0.50	0.37	0.32	0.425	19
L24	0.26	0.04	0.13	0.00	0.12	0.00	0.14	0.095	24

L06、L11、L16、L18 和 L19 共 6 个萝卜品种,综合评价价值依次为 0.610、0.654、0.650、0.583、0.642 和 0.653,种子萌发期抗旱性排序靠前;第Ⅲ组群包含 L01、L02 等 15 个萝卜品种,综合评价价值在 0.406~0.545,说明这些品种种子萌发期抗旱性一般;第Ⅳ组群包含 L12 和 L24 这 2 个萝卜品种,综合评价价值分别为 0.188 和 0.095,抗旱性排序为 23 和 24,表明这 2 个萝卜品种种子萌发期对于旱敏感。从萝卜类型来看,红心萝卜在种子萌发期抗旱性整体相对较强,青萝卜和白萝卜抗旱性整体相对一般,红皮萝卜抗旱性整体相对较弱。

3 讨论与结论

作物种子萌发期是对水分需求的敏感时期,也是评价作物抗旱性强弱的关键时期^[17]。笔者对 24 个参试萝卜品种的 7 项抗旱指标进行方差分析,结果表明 PEG 浓度、各参试品种以及 PEG 浓度×参试品种之间均存在极显著差异。与其他多数研究^[18-19]

设置单一浓度 PEG 胁迫不同,本研究设置了 5%、10%、15%和 20%共 4 个 PEG 浓度为萝卜种子萌发期抗旱性评价提供更多的参考信息,同时明确了不同类型萝卜在不同浓度的 PEG-6000 模拟干旱胁迫下的响应特征。本研究结果表明,5%PEG 和 10%PEG 胁迫对大多数参试萝卜品种的相对发芽率、相对发芽势、相对发芽指数和相对活力指数的影响相对较小,这与朱小慧^[20]、Batool^[21]以及刘翔等^[22]的研究结果相似。而在 20%PEG 胁迫下不同萝卜品种的相对发芽率与相对发芽势间有较大差异,这与朱世杨等^[8]的研究结果相似。

在干旱环境下,种子萌发的生长量也是反映抗旱性的重要指标。本研究结果表明,5%和 10%PEG 胁迫对相对根长、相对芽长和相对鲜质量均有不同程度的促进作用,这与陈致富等^[23]的研究结果相似。20%PEG 胁迫对相对根长、相对芽长与相对鲜质量均有显著抑制作用。说明 PEG 胁迫对萝卜萌发期各指标的影响与品种和 PEG 浓度有关,同时不

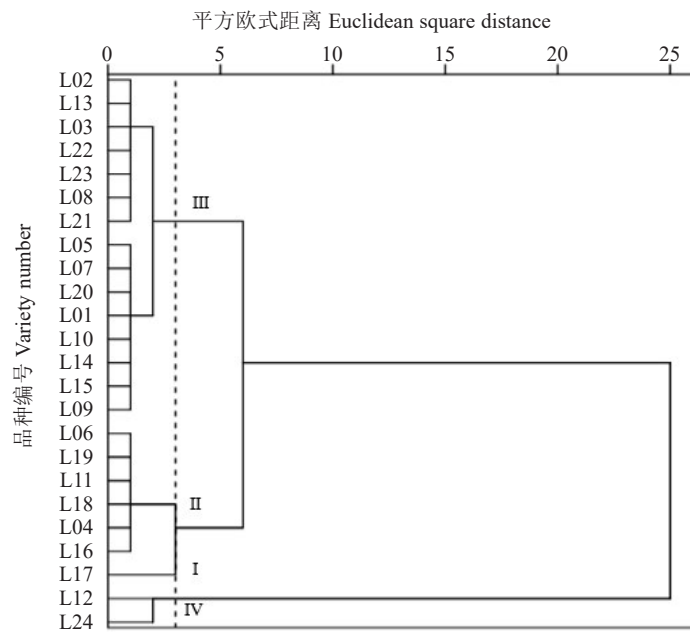


图1 供试萝卜品种种子萌发期抗旱性聚类分析

Fig. 1 Cluster analysis of drought resistance of tested radish varieties during seed germination stage

同萝卜品种、不同指标对干旱胁迫的敏感程度也不同,表明选择合适的多个指标是客观评价作物抗旱性的基础^[24-25]。本研究结果表明,低浓度(5%~10%)PEG胁迫对萝卜种子萌发生长影响不大,甚至有一定促进作用,这与朱世杨等^[8]、陈致富等^[23]和 Chimumgu 等^[26]的研究结果相近;而 20%PEG胁迫会明显抑制其萌发生长。综上所述,萝卜种子萌发期抗旱性评价的 PEG 适宜浓度为 15%。目前,作物种子萌发期抗旱性评价的方法有抗旱系数和抗旱指数等单项指标评价,也有利用主成分分析、隶属函数法、灰色关联法等进行综合评价^[18-19,27]。本研究则利用不同浓度的 PEG 胁迫和相对发芽率等 7 项指标结合隶属函数法对参试的 24 个萝卜品种进行萌发期抗旱性综合评价。

本研究筛选出萌发期抗旱性最强的萝卜品种为 L17(春美丽),抗旱性最弱的品种为 L24(速生樱桃萝卜)。利用综合价值进行聚类分析可将 24 个萝卜品种分为 4 个组群。同时,本研究参试萝卜品种包含青萝卜、水果萝卜、白萝卜、红心萝卜等多个常见萝卜类型,研究结果为今后不同类型萝卜抗旱品种的研究与选育提供了理论参考。

参考文献

[1] 袁伟玲,袁尚勇,崔磊,等.水果萝卜肉质根和叶片硫代葡萄糖苷鉴定及含量分析[J].中国蔬菜,2017(11):27-32.
[2] MOHAMED A F, AMIRA A M. Sulforaphane composition, cytotoxic and antioxidant activity of crucifer vegetables[J]. Journal of Advanced Research, 2010, 1(1):65-70.

[3] 许媛君,张生萍,马晓岗,等.白菜型油菜种质资源抗旱鉴定[J].青海大学学报(自然科学版),2016,34(1):1-8.
[4] 陈简村,史莹莹,何栋,等.4种报春苜蓿对干旱胁迫的生理响应及抗旱性评价[J].安徽农业大学学报,2021,48(5):757-762.
[5] 孔佳茜,赵铭森,孟晓康,等.PEG模拟干旱胁迫对大麻种子萌发的影响[J].种子,2020,39(9):26-30.
[6] ZHANG C M, SHI S L, LIU Z, et al. Drought tolerance in alfalfa (*Medicago sativa* L.) varieties is associated with enhanced anti-oxidative protection and declined lipid peroxidation[J]. Journal of Plant Physiology, 2019, 232:226-240.
[7] LEI C, BAGAVATHIANNAN M, WANG H Y, et al. Osmopriming with polyethylene glycol (PEG) for abiotic stress tolerance in germinating crop seeds: A Review[J]. Agronomy, 2021, 11(11):2194.
[8] 朱世杨,张小玲,刘庆,等.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[J].核农学报,2019,33(9):1833-1840.
[9] GEORGE S, MINHAS N M, JATOI S A, et al. Impact of polyethylene glycol on proline and membrane stability index for water stress regime in tomato (*Solanum lycopersicum*) [J]. Pakistan Journal of Botany, 2015:835-844.
[10] 张菊平,汪士杰,张会灵,等.十个朝天椒品种的萌发特性与抗旱性评价[J].北方园艺,2022(22):31-36.
[11] 张思雨,郭亚宁,艾静,等.绿豆资源萌发期抗旱指标筛选及抗旱性鉴定[J].山西农业科学,2023,51(2):143-150.
[12] 白金顺,王雪翠,王艳秋.箭筈豌豆种质资源萌发期抗旱指标筛选及抗旱性评价[J].植物营养与肥料学报,2020,26(12):2253-2263.
[13] 郝转.SA对盐胁迫下萝卜种子萌发和幼苗生长的影响[J].中国瓜菜,2019,32(1):33-36.
[14] 邹文桐.锌胁迫对白萝卜种子萌发、幼苗生长和生理的影响[J].

- 江苏农业科学,2020,48(3):141-146.
- [15] 赵淑玲,陈强,王一峰,等. PEG-6000 模拟干旱对花樱萝卜种子萌发及生长的影响[J]. 种子,2019,38(5):103-106.
- [16] 摆福红,王凯彬,马小红,等. 不同萝卜品种种子萌发期抗旱性综合评价及抗旱指标筛选[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2024,52(8):70-81.
- [17] 赵彤,余青兰,姚艳梅,等. 不同品种甘蓝型油菜的抗旱性评价[J]. 甘肃农业大学学报,2021,56(1):85-93.
- [18] 马玉慧,张小虎,马小乐,等. 干旱胁迫下春小麦品种(系)萌发期抗旱性鉴定与评价[J]. 分子植物育种,2022,20(19):6459-6473.
- [19] 邹成林,黄开健,翟瑞宁,等. 基于隶属函数法和主成分分析评价玉米萌发期抗旱性[J]. 江苏农业科学,2022,50(13):7-13.
- [20] 朱小慧. 甘蓝型油菜种质抗旱评价与生理机制研究[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2022.
- [21] BATOOL M. PEG-6000 胁迫下不同甘蓝型油菜种子萌发期的生理响应研究[D]. 武汉:华中农业大学,2021.
- [22] 刘翔,左凯峰,许伟,等. PEG 6000 模拟干旱胁迫下甘蓝型油菜芽期及苗期抗旱指标筛选[J]. 干旱地区农业研究,2021,39(5):66-70.
- [23] 陈致富,李勤菲,张永晶,等. 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.
- [24] GUPTA A, RICO-MEDINA A, CAÑO-DELGADO A I. The physiology of plant responses to drought[J]. Science, 2020, 368(6488):266-269.
- [25] 张娟伟,石亚飞,路旭平,等. 种子萌发期粳稻种质资源耐旱性综合评价[J]. 核农学报,2022,36(11):2093-2103.
- [26] CHIMUNGU J G, BROWN K M, LYNCH J P. Reduced root cortical cell file number improves drought tolerance in maize[J]. Plant Physiology, 2014, 166(4):1943-1955.
- [27] LEARNMORE M, HUSSEIN S, SAMSON T, et al. Screening of bread wheat genotypes for drought tolerance using phenotypic and proline analyses[J]. Frontiers in Plant Science, 2016, 7: 1276.