

苦荞种质资源萌发期抗旱性综合评价

赵少迪^{1,2}, 胡传伟^{1,2}, 张玉莲³, 吕娜^{1,2},
曹利萍¹, 马名川¹, 刘璋¹, 刘龙龙¹, 张丽君¹

(1.山西农业大学农业基因资源研究中心,山西太原 030031; 2.山西农业大学农学院,山西晋中 030801;

3.山西农业大学经济作物研究所,山西太原 030031)

摘要:以 PEG-6000 为渗透剂对 110 份苦荞种质资源进行模拟干旱处理,研究了苦荞种子在 0、5%、10%、15%、20% 的 PEG-6000 溶液胁迫下的萌发情况,分析了种子的相对发芽势、相对发芽率、相对萌发指数、相对胚根长和相对胚根粗和萌发耐旱指数的变化。结果表明:15% PEG-6000 可以作为苦荞种子萌发期耐旱性鉴定的适宜浓度;通过主成分分析法确定了相对发芽势、相对发芽率、相对萌发指数为关键指标,利用隶属函数结合权重分析法得到了萌发期苦荞种质资源耐旱性的综合评价值 D 。根据 D 值排序,筛选鉴定到耐旱型 5 份、较耐旱型 28 份、中间型 48 份、敏感型 29 份。通过聚类分析将 110 份苦荞种质资源划分为 5 个亚群,亚群 I 是一类耐旱能力较强的亚群,亚群 II 和亚群 III 为中度耐旱亚群,亚群 IV 和亚群 V 为典型的旱敏感亚群。

关键词:苦荞;种质;PEG 胁迫;萌发期;抗旱性评价

中图分类号:S517 **文献标志码:**A

Comprehensive evaluation of drought resistance of Tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum*) germplasm resources at germination stage

ZHAO Shaodi^{1,2}, HU Chuanwei^{1,2}, ZHANG Yulian³, LV Na^{1,2}, CAO Liping¹,
MA Mingchuan¹, LIU Zhang¹, LIU Longlong¹, ZHANG Lijun¹

(1. Agricultural Gene Resources Research Center of Shanxi Agricultural University, Taiyuan, Shanxi 030031, China;

2. College of Agriculture, Shanxi Agricultural University, Jinzhong, Shanxi 030801, China;

3. Institute of Economic Crops, Shanxi Agricultural University, Taiyuan, Shanxi 030031, China)

Abstract: 110 Tartary buckwheat germplasm resources were treated with PEG-6000 as an osmotic agent to simulate drought treatment. The germination of Tartary buckwheat seeds under 0, 5%, 10%, 15% and 20% PEG-6000 solution stress were studied. The changes of relative germination potential, relative germination rate, relative germination index, relative radicle length and relative radicle diameter and germination drought tolerance index of seeds were analyzed. The results showed that 15% PEG-6000 was the suitable concentration for the identification of drought tolerance of Tartary buckwheat seeds during germination. The relative germination potential, relative germination rate and relative germination index were determined as the key indexes by principal component analysis. The comprehensive evaluation value D of drought tolerance of Tartary buckwheat germplasm resources at germination stage was obtained by membership function combined with weight analysis. According to the D value, 5 drought-tolerant types, 28 drought-tolerant types, 48 intermediate types and 29 sensitive types were screened and identified. 110 Tartary buckwheat germplasm resources were divided into 5 subgroups by cluster analysis. Subgroup I was a subgroup with strong drought tolerance, subgroup II and subgroup III were moderate drought tolerance subgroups, and subgroup IV and subgroup V were typical drought sensitive subgroups.

收稿日期:2023-12-18

修回日期:2024-02-26

基金项目:中央引导地方科技发展资金项目(YDJJSX2021A031);山西省基础研究计划项目(202103021224159);山西省现代产业技术体系建设(2023CYJSTX03-11);财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系(CARS-07-A-2);山西农业大学博士项目(2021BQ38);山西省高等学校科技创新项目(2022L092)

作者简介:赵少迪(1997-),女,河南洛阳人,硕士研究生,研究方向为燕荞麦种质资源及育种。E-mail:1121999289@qq.com

通信作者:张丽君(1981-),女,河北行唐人,研究员,主要从事燕、荞麦种质资源及育种研究。E-mail:15034054161@163.com

Keywords: Tartary buckwheat; germplasm; PEG stress; germination period; drought resistance evaluation

随着气候暖干化趋势的加重,降雨量减少,干旱频发,导致作物的生长发育受到限制,从而影响作物产量和品质^[1]。种子萌发期是作物对干旱的敏感时期,是体现作物抗旱能力的重要时期,萌发期的抗旱评价是筛选抗旱作物品种的重要途径之一^[2-3],聚乙二醇(PEG)作为一种模拟干旱胁迫的渗透剂已在谷子^[4]、大豆^[5]、绿豆^[6]等作物的萌发期抗旱评价和抗旱指标筛选中得到应用。熊雪等^[7]研究认为,相对发芽势、相对发芽率、相对胚根长和抗旱指数等可以更好地反映谷子品种的抗旱性;张娟伟等^[8]明确了隶属函数分析法是进行作物抗旱性评价的适宜方法,聚类分析法也可以用来划分抗旱等级。

苦荞(*Fagopyrum tataricum* (L.) Gaertn)是我国传统的特色杂粮作物之一,因其籽粒中蛋白质、类黄酮及微量元素含量较高,受到广大消费者的青睐^[9-10]。苦荞抗旱、耐贫瘠,对环境有较高的适应性,与玉米、小麦等大宗作物相比,苦荞种子萌发的需水量较低,但其在萌发期对水分较为敏感,因此提高苦荞萌发期的抗旱能力,是保证苦荞出苗的重要环节^[11-12]。欧阳建勇等^[13]研究发现,不同浓度的 PEG-6000 处理苦荞种子可促进或抑制其萌发;贾婷等^[14]研究认为,甜荞种子的发芽率、发芽势、胚根长度和发芽指数等可以作为甜荞萌发期抗旱性鉴定的指标。杨迪^[15]通过隶属函数法对 290 份苦荞材料的抗旱性进行了分类。

本研究结合以上文献报道,选择相对发芽势、相对发芽率、相对萌发指数、相对胚根长和相对胚根粗 5 个指标进行试验。筛选出苦荞萌发期模拟干旱胁迫(PEG-6000)的适宜浓度,而后针对 110 份不同来源苦荞种质资源进行萌发期耐旱性鉴定;在此基础上,利用变异系数分析、主成分分析、隶属函数分析和聚类分析进行综合性评价分析。以期鉴定出较为理想的耐旱种质,为苦荞西北旱作区耐旱新品种选育提供耐旱种质资源。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验选用的 110 份苦荞种质资源主要来源为:山西 73 份、陕西 5 份、甘肃 14 份、贵州 7 份、青海 6 份、云南 5 份,具体信息见表 1,所有种质均由山西农业大学基因资源研究中心提供。

1.2 试验方法

挑选颗粒饱满、大小一致、种子壳完整无破损、无病虫害的种子,每组 30 粒,共 5 组,试验前先将种

子用自来水冲洗 30 min 以上,再用 5% 的次氯酸钠溶液浸泡 30 min,用蒸馏水冲洗 3~5 遍后自然晾干。将其接种于铺有滤纸加吸水纸的滤纸盘上,分别注入一定量的 ddH₂O (CK) 和不同浓度的 PEG-6000 溶液(5%、10%、15%、20%)。处理好的发芽盘封上保鲜膜,置于 25℃ 恒温种子萌发室中于 16 h/8 h 的光/暗条件培养,培养过程中相同时间分别添加等量的 ddH₂O 和 PEG-6000 溶液,胁迫处理共 7 d。

1.3 测定指标

分别于第 1、3、5、7 天记录发芽数,并在第 7 天随机选择 10 株芽苗用游标卡尺测量胚根长(RL)、胚根粗(RT),然后根据公式计算种子发芽势(GR)、发芽率(GP)、种子萌发指数(GI)、相对发芽势(RGR)、相对发芽率(RGP)、相对萌发指数(RGI)、相对胚根长(RRL)和相对胚根粗(RRT)^[16]。

发芽势 = 3 d 内种子发芽数 / 供试种子数 × 100%

(1)

发芽率 = $n/N \times 100\%$

(2)

式中, n 为萌发种子总数, N 为供试种子数。

种子萌发指数 = $1.00nd_1 + 0.75nd_3 + 0.50nd_5 + 0.25nd_7$

(3)

式中, nd_1 、 nd_3 、 nd_5 、 nd_7 分别为第 1、3、5、7 天的发芽率, 1.00、0.75、0.50、0.25 分别为对应发芽天数的抗旱系数。

相对发芽势 = (处理组发芽势 / 对照组发芽势) × 100%

(4)

相对发芽率 = (处理组发芽率 / 对照组发芽率) × 100%

(5)

相对萌发指数 = (干旱胁迫下种子萌发指数 / 对照种子萌发指数) × 100%

(6)

相对胚根长 = (处理组胚根长 / 对照组胚根长) × 100%

(7)

相对胚根粗 = (处理组胚根粗 / 对照组胚根粗) × 100%

(8)

1.4 数据分析

根据文献[17]计算出所有指标的抗旱隶属平均值 D 值;用 Excel 2016 软件整理数据,用 IBM SPSS Statistics 21 软件进行相关性分析和主成分分析,用 TBtools 软件进行聚类分析。

2 结果与分析

2.1 模拟干旱胁迫 PEG-6000 最适浓度筛选

由表 2 可知,5% PEG-6000 的处理组中,发芽率 ≥ 90% 的种子占 95.5%,其中与 CK 组相比,发芽

表1 供试苦荞种质材料
Table 1 Experimental Tartary buckwheat germplasm materials

编号 No.	名称 Name	来源 Origin	D 值 D value	排名 Rank	编号 No.	名称 Name	来源 Origin	D 值 D value	排名 Rank
1	蔓巧则 Manqiaoze	山西 Shanxi	0.21	76	29	左权苦荞 Zuoquan Tartary buckwheat	山西 Shanxi	0.31	57
2	中阳苦荞 Zhongyang Tartary buckwheat	山西 Shanxi	0.2	80	30	左权苦荞 Zuoquan Tartary buckwheat	山西 Shanxi	0.36	45
3	汾西苦荞 Fenxi Tartary buckwheat	山西 Shanxi	0.14	90	31	中阳野苦荞 Zhongyang Tartary buckwheat	山西 Shanxi	0.53	13
4	汾西苦荞 Fenxi Tartary buckwheat	山西 Shanxi	0.12	93	32	汾西苦荞 Fenxi Tartary buckwheat	山西 Shanxi	0.3	61
5	汾西苦荞 Fenxi Tartary buckwheat	山西 Shanxi	0.09	95	33	汾西苦荞 Fenxi Tartary buckwheat	山西 Shanxi	0.36	44
6	汾西苦荞 Fenxi Tartary buckwheat	山西 Shanxi	0.21	77	34	灵丘苦荞 Lingqiu Tartary buckwheat	山西 Shanxi	0.28	65
7	01/1	山西 Shanxi	0.41	30	35	创新材料 Chuangxincailiao	山西 Shanxi	0.21	79
8	01/2	山西 Shanxi	0.45	25	36	天镇苦荞 Tianzhen Tartary buckwheat	山西 Shanxi	0.41	31
9	03-02M4	山西 Shanxi	0.51	15	37	三棱荞 Sanlengqiao	山西 Shanxi	0.33	54
10	05-01M5	山西 Shanxi	0.47	18	38	本地荞 Bendiqiao	山西 Shanxi	0.4	32
11	05/12	山西 Shanxi	0.44	26	39	苦荞 Tartary buckwheat	山西 Shanxi	0.39	34
12	05/11	山西 Shanxi	0.39	35	40	夏荞 Xiaqiao	山西 Shanxi	0.37	39
13	15/01	山西 Shanxi	0.35	48	41	苦荞 Tartary buckwheat	山西 Shanxi	0.54	10
14	榆6-21 Yu6-21	陕西 Shaanxi	0.46	20	42	苦荞 Tartary buckwheat	山西 Shanxi	0.35	47
15	中阳苦荞 Zhongyang Tartary buckwheat	山西 Shanxi	0.46	22	43	繁峙苦荞 Fanzhi Tartary buckwheat	山西 Shanxi	0.47	19
16	五台苦荞 Wutai Tartary buckwheat	山西 Shanxi	0.39	37	44	五台苦荞 Wutai Tartary buckwheat	山西 Shanxi	0.54	11
17	中阳苦荞 Zhongyang Tartary buckwheat	山西 Shanxi	0.39	38	45	苦荞 Tartary buckwheat	山西 Shanxi	0.27	69
18	中阳苦荞 Zhongyang Tartary buckwheat	山西 Shanxi	0.4	33	46	阳曲苦荞 Yangqu Tartary buckwheat	山西 Shanxi	0.39	36
19	左权苦荞 Zuoquan Tartary buckwheat	山西 Shanxi	0.42	29	47	苦荞子 Tartary buckwheat	山西 Shanxi	0.37	42
20	汾西苦荞 Fenxi Tartary buckwheat	山西 Shanxi	0.43	27	48	平定苦荞 Pingding Tartary buckwheat	山西 Shanxi	0.23	75
21	中阳苦荞 Zhongyang Tartary buckwheat	山西 Shanxi	0.45	24	49	昔阳苦荞 Xiyang Tartary buckwheat	山西 Shanxi	0.15	89
22	中阳苦荞 Zhongyang Tartary buckwheat	山西 Shanxi	0.37	40	50	苦条子 Kutiaozi	山西 Shanxi	0.07	98
23	创新材料 Chuangxincailiao	山西 Shanxi	0.19	82	51	和顺苦荞 Heshun Tartary buckwheat	山西 Shanxi	0.12	91
24	左权苦荞 Zuoquan Tartary buckwheat	山西 Shanxi	0.32	56	52	苦荞 Tartary buckwheat	山西 Shanxi	0.07	97
25	左权苦荞 Zuoquan Tartary buckwheat	山西 Shanxi	0.32	55	53	本地荞 Bendiqiao	山西 Shanxi	0.18	86
26	左权苦荞 Zuoquan Tartary buckwheat	山西 Shanxi	0.29	62	54	苦荞 Tartary buckwheat	山西 Shanxi	0.37	41
27	左权苦荞 Zuoquan Tartary buckwheat	山西 Shanxi	0.26	71	55	苦荞 Tartary buckwheat	山西 Shanxi	0.18	85
28	左权苦荞 Zuoquan Tartary buckwheat	山西 Shanxi	0.28	66	56	秃荞 Tuqiao	山西 Shanxi	0.09	96

续表 1

Continued table 1

编号 No.	名称 Name	来源 Origin	D 值 D value	排名 Rank	编号 No.	名称 Name	来源 Origin	D 值 D value	排名 Rank
57	苦荞 Tartary buckwheat	山西 Shanxi	0	103	84	麻苦荞 Makuqiao	甘肃 Gansu	0.43	28
58	灵石苦荞 Lingshi Tartary buckwheat	山西 Shanxi	0	104	85	黑苦荞 Heikuqiao	甘肃 Gansu	0.3	60
59	苦荞 Tartary buckwheat	山西 Shanxi	0	105	86	苦荞 Tartary buckwheat	甘肃 Gansu	0.35	50
60	本地荞麦 Bendi Tartary buckwheat	山西 Shanxi	0	106	87	苦荞麦 Tartary buckwheat	甘肃 Gansu	0.21	78
61	苦荞 Tartary buckwheat	山西 Shanxi	0	107	88	苦荞 Tartary buckwheat	青海 Qinghai	0.12	94
62	苦荞 Tartary buckwheat	山西 Shanxi	0.03	100	89	苦荞 Tartary buckwheat	青海 Qinghai	0.27	67
63	苦荞 Tartary buckwheat	山西 Shanxi	0.05	99	90	大白苦荞 Dabai Tartary buckwheat	贵州 Guizhou	0.29	64
64	汾西苦荞 Fenxi Tartary buckwheat	山西 Shanxi	0.02	101	91	黑苦荞 Heikuqiao	贵州 Guizhou	0.26	70
65	苦荞 Tartary buckwheat	山西 Shanxi	0.01	102	92	苦荞 Tartary buckwheat	贵州 Guizhou	0.3	59
66	苦荞 Tartary buckwheat	山西 Shanxi	0	108	93	二白苦荞 Er bai Tartary buckwheat	贵州 Guizhou	0.29	63
67	苦荞 Tartary buckwheat	山西 Shanxi	0.16	87	94	棱角荞 Lengjiaoqiao	贵州 Guizhou	0.2	81
68	苦荞 Tartary buckwheat	山西 Shanxi	0.12	92	95	苦荞 Tartary buckwheat	贵州 Guizhou	0.33	53
69	苦荞 Tartary buckwheat	山西 Shanxi	0.19	84	96	大方苦荞 Dafang Tartary buckwheat	贵州 Guizhou	0.37	43
70	老鸦咀苦荞 Laoyazui Tartary buckwheat	陕西 Shaanxi	0.46	21	97	贡山苦荞 Gongshan Tartary buckwheat	云南 Yunnan	0.72	1
71	苦荞麦 Tartary buckwheat	陕西 Shaanxi	0.52	14	98	福贡苦荞 Fugong Tartary buckwheat	云南 Yunnan	0.34	51
72	苦荞 Tartary buckwheat	陕西 Shaanxi	0.53	12	99	黑扁籽苦荞 Heibianzi Tartary buckwheat	云南 Yunnan	0.3	58
73	苦荞 Tartary buckwheat	陕西 Shaanxi	0.55	8	100	米苦荞 Mikuqiao	云南 Yunnan	0.27	68
74	麻苦荞 Makuqiao	甘肃 Gansu	0.55	7	101	园籽荞 Yuanziqiao	云南 Yunnan	0.19	83
75	荞麦 Tartary buckwheat	甘肃 Gansu	0.64	3	102	苦荞麦 Tartary buckwheat	青海 Qinghai	0.23	74
76	苦荞 Tartary buckwheat	甘肃 Gansu	0.65	2	103	黑苦荞 Heikuqiao	青海 Qinghai	0	109
77	麻绿荞 Malvqiao	甘肃 Gansu	0.59	6	104	荞麦 Tartary buckwheat	青海 Qinghai	0.35	49
78	小荞 Xiaoqiao	甘肃 Gansu	0.63	4	105	苦荞 Tartary buckwheat	青海 Qinghai	0.35	46
79	小荞 Xiaoqiao	甘肃 Gansu	0.62	5	106	苦荞麦 Tartary buckwheat	山西 Shanxi	0.34	52
80	麻绿荞 Malvqiao	甘肃 Gansu	0.49	17	107	苦荞 Tartary buckwheat	山西 Shanxi	0.25	72
81	白绿荞 Bailvqiao	甘肃 Gansu	0.55	9	108	野荞麦 Ye qiaomai	山西 Shanxi	0.16	88
82	黑绿荞 Heilvqiao	甘肃 Gansu	0.45	23	109	苦荞麦 Tartary buckwheat	山西 Shanxi	0.24	73
83	小荞 Xiaoqiao	甘肃 Gansu	0.5	16	110	长沟苦荞 Changgou Tartary buckwheat	山西 Shanxi	0	110

率 $\geq 80\%$ 的种子达到100%;10% PEG-6000处理时,萌发率 $\geq 90\%$ 的种子占72.7%;15% PEG-6000处理时,萌发率 $\geq 90\%$ 的种子仅占12.7%,而萌发率 $\leq 50\%$ 的占到40.9%;20% PEG-6000处理时,仅有8份种质资源的萌发率达到70%以上,占7.3%,萌发率 $\leq 50\%$ 的种子97份,其中有68份苦荞资源不萌发,占61.8%。

通过对6个省份不同PEG-6000浓度下种子萌发期抗旱相关指标的统计可知(表3),不同浓度处理对不同地区的作用效果存在差异。结果表明,5%~10%的PEG-6000对各省份的材料发芽影响不明显,当浓度为15%~20%,各种质材料的发芽明显受到抑制。从相对萌发指数来看,当浓度为10%~20%对各地苦荞材料均有明显的抑制,且抑制效果随浓度的增加而加深。

从全部110份材料分析,当浓度为10%、15%和20%时,种子的萌发率都受到了抑制,尤其是浓度为

20%时,60%以上的品种全致死;种子受到的抑制在浓度为15%时比浓度为10%更强,浓度为10%时,4/5的品种萌发率超80%,浓度为15%时半致死;而对照组,剩余未完全萌发的品种萌发率大部分都在95%以上;浓度为5%时,PEG-6000对种子的萌发起到了轻微的促进作用。根据试验结果,选用PEG-6000浓度为15%进行抗旱性综合评价。

表2 不同发芽率下各处理所对应的材料数量/份

Table 2 Number of materials corresponding to each treatment under different germination rates/Number of copies

发芽率 GP	CK	5% PEG	10% PEG	15% PEG	20% PEG
<50%	0	0	1	39	97
50%~60%	0	0	6	17	3
60%~70%	0	0	3	17	2
70%~80%	1	0	6	13	2
80%~90%	3	5	14	10	1
$\geq 90\%$	106	105	80	14	5

表3 不同PEG-6000浓度对不同省份种质萌发期抗旱相关指标的影响

Table 3 Effects of different PEG-6000 concentrations on drought resistance related indexes in different provinces during germination period

省份 Province	名称 Name	PEG-6000 浓度 PEG-6000 concentration/%	相对发芽势 RGP/%	相对发芽率 RGR/%	相对萌发指数 RGI/%	相对胚根长 RRL/%	相对胚根粗 RRT/%
		5	100.0 \pm 0.0a	100.0 \pm 0.0a	89.3 \pm 2.3a	73.2 \pm 29.0a	63.9 \pm 20.7a
甘肃 Gansu	黑苦荞 85 号 Heikuqiao-85	10	100.0 \pm 0.0a	100.0 \pm 0.0a	68.0 \pm 6.9b	58.3 \pm 30.2a	67.6 \pm 24.5a
		15	46.7 \pm 11.6b	60.0 \pm 0.0b	32.0 \pm 3.5c	0.0 \pm 0.0b	0.0 \pm 0.0b
		20	0.0 \pm 0.0a	0.0 \pm 0.0c	0.0 \pm 0.0d	0.0 \pm 0.0b	0.0 \pm 0.0b
贵州 Guizhou	苦荞 95 号 Tartary buckwheat-95	5	100.0 \pm 0.0a	100.0 \pm 0.0a	79.8 \pm 6.6a	22.3 \pm 14.5a	96.3 \pm 40.0a
		10	76.7 \pm 5.8b	80.0 \pm 0.0b	49.0 \pm 1.8b	16.2 \pm 13.3a	113.7 \pm 41.3a
		15	53.3 \pm 11.6c	63.33 \pm 5.8b	35.5 \pm 2.3c	0.0 \pm 0.0b	0.0 \pm 0.0b
青海 Qinghai	苦荞麦 102 号 Tartary buckwheat-102	20	30.0 \pm 0.0d	40.0 \pm 17.3c	21.3 \pm 5.8d	0.0 \pm 0.0b	0.0 \pm 0.0b
		5	79.3 \pm 1.3a	80.0 \pm 0.0a	71.2 \pm 7.2a	18.0 \pm 6.9a	106.1 \pm 40.6a
		10	48.9 \pm 15.4b	56.7 \pm 5.8b	41.6 \pm 13.6b	23.6 \pm 23.6a	82.9 \pm 6.9a
山西 Shanxi	繁峙苦荞 43 号 Fanzhi Tartary buckwheat-43	15	34.8 \pm 8.3b	46.7 \pm 11.5b	25.5 \pm 7.1c	0.0 \pm 0.0b	0.0 \pm 0.0b
		20	0.0 \pm 0.0c	0.0 \pm 0.0c	0.0 \pm 0.0d	0.0 \pm 0.0b	0.0 \pm 0.0b
		5	100.0 \pm 0.0a	100.0 \pm 0.0a	112.5 \pm 7.1a	59.1 \pm 35.9a	75.2 \pm 19.2a
陕西 Shaanxi	老鸦咀苦 荞 70 号 Laoyazui Tartary buckwheat-70	10	100.0 \pm 0.0a	100.0 \pm 0.0a	92.2 \pm 6.8b	28.5 \pm 14.0b	56.4 \pm 28.4a
		15	66.7 \pm 5.8b	73.3 \pm 5.8b	64.5 \pm 3.7c	2.5 \pm 3.7c	50.3 \pm 17.0a
		20	0.0 \pm 0.0c	0.0 \pm 0.0c	0.0 \pm 0.0d	0.0 \pm 0.0c	0.0 \pm 0.0b
云南 Yunnan	福贡苦荞 98 号 Fugong Tartary buckwheat-98	5	100.0 \pm 0.0a	100.0 \pm 0.0a	98.7 \pm 2.3a	60.0 \pm 44.6a	100.0 \pm 38.2a
		10	100.0 \pm 0.0a	100.0 \pm 0.0a	74.7 \pm 4.6b	21.6 \pm 27.2b	84.5 \pm 21.6a
		15	73.3 \pm 5.8b	90.0 \pm 10.0a	49.0 \pm 3.5c	0.0 \pm 0.0b	0.0 \pm 0.0b
		20	30.0 \pm 0.0c	50.0 \pm 10.0b	24.0 \pm 3.0d	0.0 \pm 0.0b	0.0 \pm 0.0b
		5	103.6 \pm 6.4a	100.0 \pm 0.0a	83.2 \pm 6.5a	38.1 \pm 20.4a	77.0 \pm 14.4a
		10	96.4 \pm 6.4a	100.0 \pm 0.0a	74.1 \pm 2.3a	39.9 \pm 20.7a	108.6 \pm 35.7a
		15	53.6 \pm 13.4b	62.2 \pm 3.9b	40.8 \pm 5.2b	0.0 \pm 0.0b	0.0 \pm 0.0b
		20	25.0 \pm 13.5c	38.5 \pm 14.8c	22.4 \pm 8.2c	0.0 \pm 0.0b	0.0 \pm 0.0b

注:同列不同小写字母表示不同干旱胁迫条件下的差异显著性($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate different significances under different drought stress conditions ($P < 0.05$).

2.2 苦荞种子萌发期各指标对干旱胁迫的响应

由表 4 可知,15% PEG-6000 处理下,110 份苦荞种质资源相对发芽势范围为 0~100%,均值为 47.82%;相对发芽率范围为 0~100%,均值为 56.06%;相对萌发指数是 0~74.03%,均值为 34.26%。由此可知,苦荞种子响应干旱胁迫的能力存在明显的品种间差异。苦荞萌发期的抗旱相关指标变异系数变幅为 48.59%~373.28%,说明各性状对 15% PEG-6000 胁迫的敏感程度存在差异。其中,相对胚根长和相对胚根粗在品种间差异最大,变异系数都超过 100%;相对发芽势、相对发芽率和萌发抗旱指数的变异系数相对较小,其中相对萌发率的变异系数最小,为 48.6%。

2.3 干旱胁迫下苦荞相关抗旱指标的相关性分析和主成分分析

在 15% PEG-6000 处理下,针对相对发芽势、相对发芽率、相对萌发指数、相对胚根长、相对胚根粗 5 个萌发期耐旱相关指标进行相关性分析。由表 5 可知,5 个耐旱相关指标间均呈极显著正相关,其中,相对发芽势与相对发芽率、相对发芽势与相对萌发指数、相对发芽率与相对萌发指数、相对胚根长与相对胚根粗,两两指标之间的相关系数达到 0.6 以上,说明这些指标的变化趋于一致。

由表 6 可知,主成分 1 的特征值为 1.833,贡献率为 67.21%,其中相对发芽势、相对发芽率和相对萌发指数的载荷值分别为 0.513、0.511 和 0.517,这 3 个指标的载荷值相对较高,是该成分的主要作用因子,主要反映种子的萌发情况;主成分 2 特征值为 1.105,贡献率为 24.44%,相对胚根长和相对胚根粗的载荷值分别为 0.643 和 0.616,说明主成分 2 主要由相对胚根长和相对胚根粗决定,反映胚根的生长情况,这两个因子的累计贡献率达到 91.65%,可有效反映苦荞萌发期的抗旱性。综合考虑,将相对发芽势、相对萌发指数作为苦荞种子萌发期抗旱性评价的关键指标。

表 4 萌发期各指标对干旱胁迫的响应

Table 4 Response of each index to drought stress at germination stage

指标 Index	范围 Range/%	均值 Average/%	标准差 Standard deviation (SD)	变异系数 CV/%
RGP	0~100.00	47.82	0.30	62.34
RGR	0~100.00	56.06	0.27	48.59
RGI	0~74.03	34.26	0.19	54.15
RRL	0~42.70	1.47	0.06	373.28
RRT	0~114.58	10.19	0.24	238.65

2.4 苦荞种质资源抗旱性综合评价

利用隶属函数对 110 份材料的相对发芽势、相对发芽率、相对萌发指数、相对胚根长及相对胚根粗进行综合评价,计算出 D 值,根据 D 值大小将 110 份苦荞种质分成 4 个等级(表 7):耐旱型 1 级($0.600 \leq D < 0.800$)、较耐旱型 2 级($0.400 \leq D < 0.600$)、中间型 3 级($0.200 \leq D < 0.400$)、敏感型 4 级($0.000 \leq D < 0.200$),4 个等级的种质分别有 5、28、48、29 份。

表 5 15% PEG-6000 胁迫下苦荞种质资源各指标相关性分析
Table 5 Correlation analysis of each index of Tartary buckwheat germplasm resources under 15% PEG-6000 stress

指标 Index	RGP	RGR	RGI	RRL	RRT
RGP	1.000				
RGR	0.948**	1.000			
RGI	0.958**	0.968**	1.000		
RRL	0.362**	0.340**	0.318**	1.000	
RRT	0.359**	0.339**	0.406**	0.665**	1.000

注: ** 表示极显著差异($P < 0.01$)。

Note: ** indicates significant correlation at $P < 0.01$ level.

表 6 苦荞品种各指标主成分的特征向量及贡献率

Table 6 Characteristic vectors and contribution rate of principal components of each index of Tartary buckwheat varieties

指标 Index	主成分 Principal component	
	1	2
RGP	0.513	-0.254
RGR	0.511	-0.278
RGI	0.517	-0.256
RRL	0.315	0.643
RRT	0.330	0.616
特征值 Eigen value	1.833	1.105
贡献率 Contribution/%	67.211	24.441
累计贡献率 Cumulative contribution/%	67.211	91.653

表 7 110 份材料耐旱等级划分表

Table 7 Classification of drought resistance grades of 110 materials

耐旱等级 Drought grade	范围 Scope	平均隶属函数值 Membership function value	种质数/份 Species primes per portion
耐旱型 1 级 Drought-tolerant type 1	[0.600,0.800)	0.652	5
较耐旱型 2 级 Drought-tolerant type 2	[0.400,0.600)	0.479	28
中间型 3 级 Intermediate type 3	[0.200,0.400)	0.306	48
敏感型 4 级 Sensitive type 4	[0.000,0.200)	0.084	29

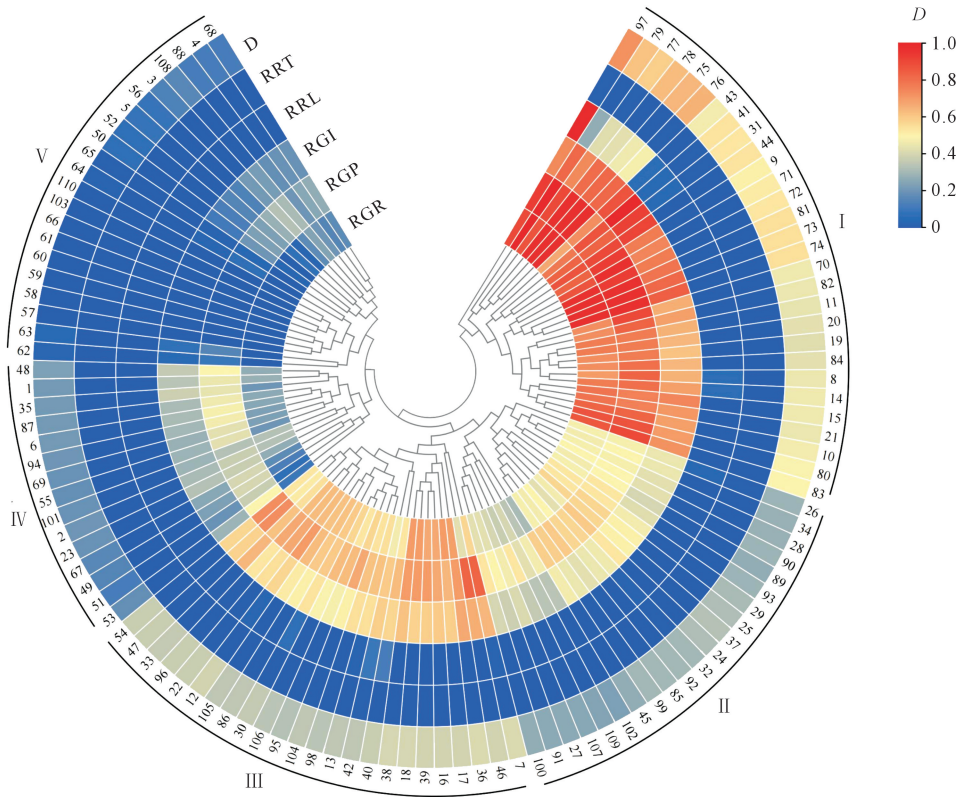


图1 110份材料耐旱性指标聚类图

Fig.1 Cluster diagram of drought tolerance index of 110 materials

将 D 值以及抗旱相关指标数据进行系统聚类分析。结果表明,110份苦荞种质可被划分为五大类群(图1)。其中,亚群 I 是一类耐旱能力较强的亚群,共有 29 份,占总种质资源的 26.4%,包括耐旱型 1 级的种质 5 份,较耐旱型 2 级种质 24 份。亚群 II 是属中度耐旱亚群,共有 21 份,占 19.1%。亚群 III 为中度耐旱亚群,共有 24 份,占 21.8%,包括较耐旱 2 级种质 2 份,中间型 3 级种质 22 份。亚群 IV 为旱敏感亚群,共有 15 份,占 13.6%,包括中间型 3 级种质 7 份,敏感型 4 级种质 8 份。亚群 V 为典型的旱敏感亚群,共有 21 份,占 19.1%。

2.5 苦荞种质资源抗旱性地域差异比较

110份苦荞种质材料分别来源于我国甘肃、贵州、青海、云南、陕西以及山西省,为了进一步探究苦荞种质萌发期抗旱性是否存在地域差异,对抗旱鉴定指标进行了不同省份差异显著性比较分析。由表8可知,来自贵州、青海和山西省的种质材料的抗旱关键指标以及 D 值显著低于其他省份,总体表现为中间型。种子萌发期种质材料抗旱性存在地域差异,甘肃、陕西省的材料抗旱性总体较强,其次是云南省。

表8 不同省份苦荞种质资源萌发期抗旱性差异比较

Table 8 Comparison of drought resistance of Tartary buckwheat germplasm resources in different provinces at germination stage

省份 Province	RGP/%	RGR/%	RGI/%	RRL/%	RRT/%	D 值 D value
甘肃 Gansu	80.40a	84.40a	50.90ab	6.40a	20.86a	0.50a
贵州 Guizhou	47.14b	55.29b	31.57c	0.00b	0.00b	0.29b
青海 Qinghai	36.67b	41.17b	23.83c	0.00b	0.00b	0.22b
山西 Shanxi	39.56b	49.27b	30.67c	0.38b	9.36a	0.26b
陕西 Shaanxi	86.00a	91.40a	54.80a	0.60b	8.20a	0.50a
云南 Yunnan	53.60b	60.00b	36.00bc	8.60a	21.20a	0.36ab

3 讨论

3.1 不同浓度 PEG-6000 对苦荞种子萌发的影响

PEG-6000 作为模拟干旱胁迫的试剂,在植物种质资源萌发期或苗期抗旱性筛选和评价中应用广泛^[18]。邹成林等^[19]研究表明增加 PEG 浓度能延缓玉米种子发芽时间,降低发芽能力,限制胚根、胚芽的生长发育,使贮藏物质运转率降低;在评价硬粒型玉米种子抗旱性时,采用 PEG 模拟轻度干旱胁迫浓度为 5% 或 10%,中度干旱胁迫浓度为 15% 或 20%,重度干旱胁迫浓度为 25%,与李安等^[20] 研究结果基本一致。贾婷^[14] 研究表明,随着 PEG 浓度

的增加,荞麦种子的相对发芽率、发芽势、胚根长度、胚芽长度、发芽指数等相关萌发指标均呈不同程度的下降趋势;5%~10% PEG 对荞麦萌发指标的影响较小,15%~20% PEG 对荞麦种子萌发及其胚根、胚芽的生长具有不同程度的抑制作用,25%PEG 对种子萌发具有较强的抑制作用,与夏宇飞^[12]研究结果基本一致。本研究利用不同浓度 PEG-6000 处理对 110 份苦荞种质资源进行胁迫,发现 5% PEG-6000 胁迫可以促进苦荞种子萌发,促进胚根的长度增加,15% PEG-6000 胁迫抑制种子萌发,胚根长度受到抑制,这与欧阳建勇等^[13]研究结果一致。

3.2 苦荞种质资源抗旱性综合评价

萌发期是植物生长的开端,水分在种子萌发过程中起重要作用,干旱胁迫会影响种子的萌发,随着干旱程度的增加,种子的发芽指数以及生长指数将会随之受到影响^[21-22],因此萌发期抗旱能力的鉴定对研究作物抗旱能力强弱非常重要^[23]。作物的抗旱性是一个复杂的数量性状,由多种基因调控,在进行抗旱性鉴定时宜采用多项指标综合评价的方式来保证结果的准确性^[24]。前人在进行作物萌发期抗旱性鉴定与评价的研究中,常选择发芽率、根长、鲜质量、抗旱萌发指数和活力指数等指标或相对值作为抗旱鉴定指标。侯泽豪等^[25]在甜荞种子萌发期耐旱性鉴定时选择种子的相对发芽率、萌发抗旱指数、相对根长等作为鉴定指标;樊瑛等^[26]则选择发芽势、萌发指数、根长、芽长、根鲜质量等作为谷子萌发期耐旱性鉴定指标;本试验选择相对发芽势、相对发芽率、相对萌发指数、相对胚根长和相对胚根粗 5 项指标作为萌发期抗旱性鉴定指标,这与李云等^[4]的研究结论一致。

在小麦^[27]、玉米^[28]、水稻^[29]等大多数作物中进行抗旱性评价时,常采用相关性分析、主成分分析、隶属函数分析以及聚类分析相结合的方式,综合性的评价方式使结果具有较高的可靠性。本研究同样采用综合评价方式,根据隶属函数平均值(D 值),将 110 份苦荞种质材料划分为 4 个等级,又通过聚类分析将其划分为 5 个亚群。从聚类图中可清楚地看出,相对发芽率、相对发芽势、相对萌发指数与 D 值表现出较好的一致性,说明这 3 个指标在苦荞萌发期抗旱性评价中起到关键作用。

4 结 论

15% PEG 处理下,苦荞种子的发芽率降低,并且干旱胁迫抑制了苦荞胚根的生长。根据综合评价结果,将 110 份苦荞种质分为 4 种抗旱类型,即耐

旱型 5 份、较耐旱型 28 份、中间型 48 份、敏感型 29 份。

参 考 文 献:

- [1] 赵海燕,侯美亭,刘文平,等. 干旱指数在山西逐日监测中的适用性研究[J]. 干旱气象, 2014, 32(4): 505-515.
ZHAO H Y, HOU M T, LIU W P, et al. Application of drought index in daily monitoring in Shanxi[J]. Journal of Arid Meteorology, 2014, 32(4): 505-515.
- [2] 曾泽堂,罗永忠,柳佳,等. 我国西北地区 3 个广泛种植苜蓿品种的萌发和生长对干旱胁迫的响应[J]. 畜牧与饲料科学, 2018, 39(7): 53-60.
ZENG Z T, LUO Y Z, LIU J, et al. Responses of germination and growth of three varieties of alfalfa widely cultivated in northwest China against drought stress[J]. Animal Husbandry and Feed Science, 2018, 39(7): 53-60.
- [3] LIU Z X, LI H H, GOU Z W, et al. Genome-wide association study of soybean seed germination under drought stress[J]. Molecular Genetics and Genomics, 2020, 295(3): 661-673.
- [4] 李云,杨梦涵,王健,等. PEG 胁迫下谷子品种(系)萌发期耐旱性鉴定及评价[J]. 种子, 2022, 41(4): 29-35, 43.
LI Y, YANG M H, WANG J, et al. Identification and evaluation of drought tolerance of millet varieties (lines) at germination stage under PEG stress[J]. Seed, 2022, 41(4): 29-35, 43.
- [5] 邓思雪. 干旱胁迫下不同大豆品种萌发特性及其耐旱性评价[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018.
DENG S X. Germination characteristic under drought stress and evaluation of drought tolerance of soybean varieties [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2018.
- [6] 黄年英. 绿豆种质萌发期耐旱鉴定和遗传多样性分析[D]. 荆州: 长江大学, 2021.
HUANG N Y. Drought tolerance identification and genetic diversity analysis at germination stage of mung bean germplasm [D]. Jingzhou: Yangtze University, 2021.
- [7] 熊雪,郎万鑫,王春芳,等. 不同谷子品种萌发期抗旱性综合评价[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(23): 93-97.
XIONG X, LANG W X, WANG C F, et al. Comprehensive evaluation of drought resistance of different millet varieties at germination stage [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2021, 49(23): 93-97.
- [8] 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.
ZHANG J W, SHI Y F, LU X P, et al. Comprehensive evaluation of drought tolerance of japonica rice germplasm resources at seed germination stage [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2022, 36(11): 2093-2103.
- [9] 何伟俊,曾荣,白永亮,等. 苦荞麦的营养价值及开发利用研究进展[J]. 农产品加工, 2019,(23): 69-75.
HE W J, ZENG R, BAI Y L, et al. The nutritive value and progress in development and utilization of Tartary buckwheat [J]. Farm Products Processing, 2019,(23): 69-75.
- [10] NOREEN S, RIZWAN B, KHAN M, et al. Health benefits of buckwheat (*Fagopyrum esculentum*), potential remedy for diseases, rare to cancer: a mini review [J]. Infectious Disorders Drug Targets,

- 2021, 21(6): e170721189478.
- [11] TIAN X, WEIXIE L, WANG S, et al. Effect of polylactic acid microplastics and lead on the growth and physiological characteristics of buckwheat[J]. *Chemosphere*, 2023, 337: 139356.
- [12] 夏宇飞. 苦荞抗旱性鉴定及其SSR分子标记研究[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2022.
- XIA Y F. The identification of Tartary buckwheat resistance to drought stress and its SSR molecular markers[D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2022.
- [13] 欧阳建勇, 万燕, 马成瑞, 等. 不同浓度PEG-6000对苦荞种子萌发的影响及抗旱性评价[J]. *种子*, 2020, 39(4): 12-16, 21.
- OU YANG J Y, WAN Y, MA C R, et al. Effects of different concentrations of PEG-6000 on seed germination and drought resistance of Tartary buckwheat[J]. *Seed*, 2020, 39(4): 12-16, 21.
- [14] 贾婷. 干旱胁迫对荞麦种子萌发及苗期生理特性的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2012.
- JIA T. The effect of drought stress on physiological characteristics of seed germination and seedling stage in buckwheat[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2012.
- [15] 杨迪. 苦荞种质资源抗旱性评价及相关基因的挖掘和功能分析[D]. 兰州: 兰州大学, 2021.
- YANG D. Drought tolerance evaluation of Tartary buckwheat germplasm resources and discovery and functional analysis of associated genes[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2021.
- [16] 彭玉琳, 曾凡茹, 东强, 等. 干旱胁迫对青稞种子萌发期的影响及抗旱性评价[J]. *江苏农业科学*, 2023, 51(4): 91-99.
- PENG Y L, ZENG F R, DONG Q, et al. Effects of drought stress on germination stage of barley seeds and evaluation of drought resistance[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2023, 51(4): 91-99.
- [17] 孙东雷, 卞能飞, 王幸, 等. 高油酸花生萌发期耐冷性综合评价及种质筛选[J]. *核农学报*, 2021, 35(6): 1263-1272.
- SUN D L, BIAN N F, WANG X, et al. Comprehensive evaluation of cold tolerance and germplasm screening of high oleic acid peanut at germination stage[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2021, 35(6): 1263-1272.
- [18] 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.
- ZHU S Y, ZHANG X L, LIU Q, et al. Germination characteristics and drought resistance of cauliflower germplasms under PEG simulated drought stress[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2019, 33(9): 1833-1840.
- [19] 邹成林, 翟瑞宁, 钦洁, 等. 不同浓度PEG模拟干旱胁迫对玉米种子萌发特性的影响[J]. *玉米科学*, 2021, 29(6): 68-75.
- ZOU C L, ZHAI R N, QIN J, et al. Effects of simulated drought stress with different concentrations of PEG on germination characteristics of maize seed[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2021, 29(6): 68-75.
- [20] 李安, 舒建虹, 刘晓霞, 等. PEG不同处理对玉米萌发的影响[J]. *耕作与栽培*, 2022, 42(2): 55-59, 65.
- LI A, SHU J H, LIU X X, et al. Effects of different PEG treatments on maize germination[J]. *Tillage and Cultivation*, 2022, 42(2): 55-59, 65.
- [21] 任毅, 颜安, 张芳, 等. 国内外301份小麦品种(系)种子萌发期抗旱性鉴定及评价[J]. *干旱地区农业研究*, 2019, 37(3): 1-14.
- REN Y, YAN A, ZHANG F, et al. Identification and evaluation of drought tolerance of 301 wheat varieties (lines) at germination stage[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2019, 37(3): 1-14.
- [22] HUANG J, CHEN Q J, RONG Y P, et al. Transcriptome analysis revealed gene regulatory network involved in PEG-induced drought stress in Tartary buckwheat (*Fagopyrum Tararicum*) [J]. *PeerJ*, 2021, 9: e11136.
- [23] 李兴美, 何勇, 周艳苹, 等. 荞麦种子萌发的抗逆性研究[J]. *饲料研究*, 2022, 45(11): 76-79.
- LI X M, HE Y, ZHOU Y P, et al. Study on stress resistance of buckwheat seed germination[J]. *Feed Research*, 2022, 45(11): 76-79.
- [24] MAGAR M M, PARAJULI A, SAH B P, et al. Effect of PEG induced drought stress on germination and seedling traits of maize (*Zea mays* L.) lines[J]. *Turkish Journal of Agricultural and Natural Sciences*, 2019, 6(2): 196-205.
- [25] 侯泽豪, 卢奕霏, 孙坤坤, 等. 甜荞资源萌发期耐旱性鉴定体系建立与种质筛选[J]. *干旱地区农业研究*, 2021, 39(1): 95-102.
- HOU Z H, LU Y F, SUN K K, et al. Establishment of buckwheat drought tolerance identification system at germination stage and screening of drought-tolerance germplasms[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2021, 39(1): 95-102.
- [26] 樊瑛, 董淑琦, 原向阳, 等. 谷子种质资源萌发期抗旱性综合评价及抗旱指标筛选[J]. *中国农业大学学报*, 2022, 27(6): 42-54.
- FAN Y, DONG S Q, YUAN X Y, et al. Comprehensive evaluation of drought resistance of foxtail millet germplasm resources during germination period and drought resistance index screening[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2022, 27(6): 42-54.
- [27] 陈卫国, 张政, 史雨刚, 等. 211份小麦种质资源抗旱性的评价[J]. *作物杂志*, 2020, (4): 53-63.
- CHEN W G, ZHANG Z, SHI Y G, et al. Drought-tolerance evaluation of 211 wheat germplasm resources[J]. *Crops*, 2020, (4): 53-63.
- [28] 周芳, 曹国璠, 杨娟, 等. 20个玉米品种发芽期抗旱性鉴定与评价[J]. *种子*, 2020, 39(12): 73-79.
- ZHOU F, CAO G F, YANG J, et al. Identification and evaluation of drought resistance of twenty maize varieties in germination period[J]. *Seed*, 2020, 39(12): 73-79.
- [29] 张军, 崔潇, 赵章因, 等. 7份喀麦隆水稻种质资源萌发期抗旱性综合鉴定[J]. *陕西农业科学*, 2019, 65(4): 32-34, 53.
- ZHANG J, CUI X, ZHAO Z N, et al. Comprehensive identification of drought resistance of 7 Cameroon rice germplasm resources at germination stage[J]. *Shaanxi Journal of Agricultural Sciences*, 2019, 65(4): 32-34, 53.