西北农业学报 2024,33(3):511-520
Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica

doi:10.7606/j.issn.1004-1389.2024.03.013
https://doi.org/10.7606/j.issn.1004-1389.2024.03.013

不同油麦菜品种萌发期耐热指标筛选及耐热性评价

姚佳睿,吕金钊,陈 康,李玉红
(西北农林科技大学 园艺学院,陕西杨凌 712100)

摘 要 为筛选油麦菜萌发期耐热性的鉴定指标,初步构建耐热性评价体系,为生产上快速筛选耐热的油麦菜品种及提高耐热油麦菜育种效率提供依据,本研究以15个油麦菜品种为试材,以筛选出的35 ℃高温胁迫条件为基础,通过设置正常和35 ℃高温2个处理,测定不同油麦菜品种萌发期的7个形态指标,并计算耐热系数;以各指标的耐热系数为基础,利用相关性分析、主成分分析、隶属函数分析、逐步回归分析、聚类分析等方法对各参试油麦菜品种萌发期的耐热性进行综合评价并对耐热指标进行筛选,并结合各参试油麦菜品种田间耐热性对萌发期的耐热性鉴定结果进行验证。结果表明,35 ℃高温处理后,不同品种的发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数、芽根比、芽粗及鲜质量等均显著下降。对这7个单项指标进行多元统计综合评价及相关性分析发现,除芽根比外,其余单项指标耐热性系数之间存在极显著正相关。主成分分析从这7个指标提取出2个相互独立的主成分,可概括参试油麦菜品种萌发期耐热性原始信息量的90.70%。通过隶属函数分析得出耐热性综合评价值(*D*值),并进行排序得出'脆香油麦菜'耐热性最强、'圣美紫油麦菜'耐热性最差。通过聚类分析将15个参试品种分为耐热型、中等耐热型、不耐热型3类,综合主成分分析和逐步回归分析的结果得出,发芽率、芽根比、活力指数为油麦菜萌发期耐热性鉴定重要指标。各参试品种萌发期耐热性鉴定结果与田间成株期鉴定结果基本一致。

关键词 油麦菜;萌发期;耐热指标;耐热性评价

油麦菜(*Lactuca sativa* var *longifolia* Lam.)为菊科莴苣属[1],因其富含较高的维生素C并具有保健功能,食用方法多样,既可生食又可以熟用[2],是人们日常生活中极其常见的蔬菜种类;具有容易种植、较短的生长周期、可灵活采收且复种指数高[3]等特点,在全国各地广泛种植,为平衡调节蔬菜市场供应起着重要作用。油麦菜为半耐寒性蔬菜,生长适宜温度为15 ℃~25 ℃[4],高温胁迫会造成油麦菜生长发育缓慢、叶片变黄皱缩、产量显著下降[5]、纤维增多、品质变劣甚至植株死亡等现象[6]。在北方地区每年6月下旬至9月上旬称为蔬菜伏缺期[7],该时期处于上半年春季蔬菜拉秧结束,下半年夏秋蔬菜育苗阶段,由于夏季高温多雨、昼夜温差小、光照强度大和病虫害易发等环境因素,以及在技术方面缺少耐热性较强的蔬菜品种导致蔬菜减产、蔬菜安全品质下降、蔬菜生产管理难度加大,同时因持续高温致使蔬菜在储藏、运输、销售等环节出现问题,导致蔬菜尤其是叶菜方面供应不足。在实践研究中,鉴定选育耐热性较强的蔬菜品种以及合理的栽培技术措施是解决伏缺期高温生产障碍,提高蔬菜品质与产量的主要途径。

蔬菜作物耐热性鉴定根据时期可分为萌发期鉴定、苗期鉴定、成株期鉴定[8]。相比之下,萌发期鉴定具有可短时间内完成、易操作、效率高、低成本等优点,该鉴定主要以发芽率、发芽指数、出苗率等形态学指标或脯氨酸、丙二醛(MDA)、抗氧化酶活性、电导率等生理指标,利用多元分析方法进行综合评价判断植株耐热性强弱。目前耐热性鉴定方法在白菜[9]、苦瓜[10]、菜心[11]、番茄[12]、黄瓜[13]等蔬菜上已有报道,对于油麦菜耐热性鉴定,仅以产量[14]和抽薹率[15]等单个指标为评价依据进行耐热品种筛选,但在油麦菜种子萌发期进行耐热种质或品种筛选及鉴定指标研究还尚未见报道。

因此本研究以在生产上有一定栽培面积,相

收稿日期:2022-12-25 **修回日期**:2023-02-10
基金项目:西安市科技计划(20NYYF0053);陕西省重点研发计划(2019TSLNY01-04)。
第一作者:姚佳睿,女,硕士研究生,研究方向为伏缺期耐热叶菜品种筛选及栽培技术。E-mail:404505098@qq.com
通信作者:李玉红,女,教授,博士生导师,研究方向为蔬菜无公害生产。E-mail:liyuhong73@126.com

对耐热的 15 个油麦菜品种为材料，通过设置不同温度进行萌发期模拟高温胁迫，测量不同温度下油麦菜的萌发指标，分析比较各参试品种在不同温度处理下的萌发特性，确定油麦菜萌发期耐热性鉴定温度；并以此温度进行高温胁迫处理，对不同油麦菜品种的萌发期形态指标进行测定，并以各指标耐热系数为依据进行多元统计分析，对各参试油麦菜品种耐热性的强弱进行鉴定和分类，确定油麦菜芽期的耐热鉴定指标，并结合田间自然鉴定结果对其进行验证，以期建立油麦菜品种耐热性综合评价体系并简化鉴定工作，为油麦菜耐热品种的选育及在高温下油麦菜种植品种的选择提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于陕西杨凌综合试验站和西北农林科技大学园艺学院蔬菜生理生态研究实验室进行。供试品种名称分别为‘亮剑’‘冯子龙’‘圣美紫’‘宽叶香甜’‘彩云香’‘欧兰德’‘特高尖叶’‘秀禾碧剑’‘米香’‘纯香’‘美冠’‘脆香’‘茂华无斑’‘萨娃提’和‘金品香’。

1.2 试验方法

1.2.1 种子萌发期的高温处理 参照庞强强等[8]的方法进行油麦菜种子萌发试验并略有改动。以 25 ℃作为对照(CK)，高温胁迫温度设置为 30 ℃和 35 ℃ 2 个处理，每处理重复 3 次，每重复选取 100 粒饱满种子，浸种 1 h 后，将种子放置于铺有 2 层滤纸的培养皿中，将其放入恒温培养箱中进行发芽试验。7 d 后，从各重复中随机取出油麦菜芽苗 10 株，测定芽长、芽粗、鲜质量、胚根长，并计算：发芽率(GR)、发芽势(GE)以第 3 天和第 7 天正常发芽种子数除以供试种子数即发芽势和发芽率；芽根比(SSR)＝芽长/根长；活力指数(VI)＝发芽指数×鲜质量；发芽指数(GI)＝∑(Gt/Dt)，Gt 为在 t 日的发芽数，Dt 为相应的发芽天数。根据种子萌发情况确定耐热性鉴定温度，并计算耐热系数(α)＝处理组测定值/对照组测定值。

1.2.2 油麦菜成株期田间耐热性鉴定 15 个油麦菜品种采取完全随机设计，于 2022 年 7 月 5 日人工开沟播种到塑料大棚内，每品种重复 3 次，试验小区面积为 2 m×2 m＝4 m^2，行距为 10 cm 撒播量为 0.60 kg/667m^2，播种后 45 d 进行采收，参照庞强强等[9]的方法调查热害症状，计算热害指数(Heat damage index)＝$\sum(X\times X_i)/(A\times N)$。$X$ 为热害级数。X_i 为 X 热害级数下植株数，A 为最高级数，N 为调查总株数。

1.3 数据分析

参照朱亚迪等[16]的方法对油麦菜种子萌发期各项指标耐热系数分别进行描述性分析、相关性分析、主成分分析。采用 Microsoft Excel 2007 软件对试验数据进行初步处理，并使用 SPSS 24.0 软件将数据标准化后进行主成分分析、聚类分析、隶属函数分析和多元回归分析。

油麦菜萌发期耐热性综合指标值计算公式为：

$$CI_i=\sum_{j=1}^{n}E_{ij}\cdot X_j',i=1,2,3,\cdots;j=1,2,3,\cdots,n \quad (1)$$

式中：CI_i 为第 i 个主成分得分(耐热性综合指标值)，E_{ij} 为第 i 个主成分第 j 个单项指标对应的特征向量，X_j' 表示第 j 个单项指标标准化值。

油麦菜萌发期耐热性综合指标隶属函数值公式为：

$$u(X_i)=(X_i-X_{\min})/(X_{\max}-X_{\min}),i=1,2,3,\cdots,n \quad (2)$$

式中：$u(X_i)$为第 i 个综合指标的隶属函数值，X_i 为第 i 个综合指标值，$X_{\min}$、$X_{\max}$ 分别为该综合指标的最小值和最大值。

油麦菜萌发期耐热性综合指标权重计算公式为：

$$W_i=P_i/\sum_{i=1}^{n}P_i,i=1,2,3,\cdots,n \quad (3)$$

式中：W_i 为第 i 个综合指标在所有综合指标中的重要程度，P_i 为第 i 个综合指标的贡献率。

油麦菜萌发期耐热性高温胁迫下的综合耐热评价值(D 值)计算公式为：

$$D=\sum_{i=1}^{n}[u(X_i)\cdot W_i],i=1,2,3,\cdots,n \quad (4)$$

2 结果与分析

2.1 芽期高温对各油麦菜品种萌发相关指标的影响

随着处理温度的升高，油麦菜种子的发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数逐渐降低(表 1)。25 ℃条件下，种子发芽率最高，平均发芽率为 87.6%；30 ℃条件下，油麦菜种子平均发芽率为 58.9%，在 35 ℃条件下，种子发芽率最低，平均发芽率为 34.0%。3 个温度条件下，种子发芽率变

异系数分别为 6.1%、36.6%、67.1%。25 ℃下种子发芽率变异系数最小，说明正常温度条件下，各参试品种之间差异较小，35 ℃下种子发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数的变异系数明显高于 25 ℃和 30 ℃，说明各参试品种之间差异较大，离散程度大。能更好地区分不同品种之间耐热性差异，因此 35 ℃可作为油麦菜萌发期耐热性鉴定的高温胁迫温度。

表 1　温度对 15 个油麦菜品种萌发指标的影响

Table 1　Effects of different temperature treatments on germination index of 15 varieties of lettuce

统计指标 Indicator	GR/%			GE/%			GI			VI		
	25 ℃	30 ℃	35 ℃	25 ℃	30 ℃	35 ℃	25 ℃	30 ℃	35 ℃	25 ℃	30 ℃	35 ℃
平均 Average	87.6	58.9	34.0	70.4	24.1	13.4	39.5	20.7	11.9	110.9	46.5	14.5
标准差 Standard deviation	5.3	21.6	22.8	18.0	15.1	13.9	5.7	8.4	8.8	34.7	22.9	14.2
变异系数/% Variation coefficient	6.1	36.6	67.1	25.5	62.5	103.7	14.5	40.3	74.2	31.2	49.5	97.9

注：GR. 发芽率；GE. 发芽势；GI. 发芽指数；VI. 活力指数。

Note: GR. Germination rate; GE. Germination energy; GI. Germination index; VI. Vitality index.

2.2　油麦菜萌发期各指标耐热系数和相关性分析

以 35 ℃为油麦菜种子萌发期耐热性鉴定温度，计算耐热系数。结果表明（表 2），不同油麦菜品种高温胁迫后发芽率、发芽势、发芽指数、鲜质量、芽根比、芽粗、活力指数的平均值与对照相比均下降（耐热系数 $\alpha<1$）。高温胁迫下，15 种油麦菜萌发期各指标耐热系数的变异系数为 10.88%～110.56%，说明各参试品种之间各指标对高温胁迫的反映存在差异，其中发芽势、活力指数、发芽指数、发芽率的耐热系数的变异系数均在 50%以上，分别为 110.56%、98.13%、76.62%、66.70%，说明这 4 个指标易受到高温的影响。芽根比、芽粗耐热系数的变异系数均小于 20%，分别为 10.88%、14.61%，说明高温胁迫对各参试品种的这两个指标影响较小。综合而言，参试品种的不同单项指标之间表现不同，仅凭单一指标无法判断品种的耐热性，需进行综合分析。

表 2　油麦菜萌发期各指标耐热系数及变异（$\bar{x}\pm s$）

Table 2　Heat tolerance coefficient and variation of indicators in germination period of lettuce

品种名称 Cultivar	发芽率 GR	发芽势 GE	发芽指数 GI	活力指数 VI	鲜质量 FW	芽根比 SSR	芽粗 BD
亮剑 Liangjian	0.45±0.03 c	0.34±0.02 c	0.40±0.02 d	0.22±0.04 bc	0.55±0.06 a	1.10±0.02 a	0.91±0.02 a
冯子龙 Fengzilong	0.25±0.02 e	0.03±0.02 f	0.15±0.02 g	0.05±0.01 e	0.33±0.07 def	0.75±0.03 g	0.80±0.01 d
圣美紫 Shengmeizi	0.07±0.02 h	0.05±0.02 f	0.07±0.01 h	0.01±0.01 e	0.20±0.09 gh	0.88±0.05 cdef	0.64±0.01 fg
宽叶香甜 Kuanyexiangtian	0.09±0.02 gh	0.03±0.01 f	0.06±0.01 h	0.01±0.00 e	0.12±0.03 h	0.96±0.01 bc	0.73±0.04 e
彩云香 Caiyunxiang	0.35±0.05 d	0.13±0.03 e	0.25±0.01 f	0.06±0.02 e	0.25±0.06 efg	0.82±0.02 efg	0.68±0.02 f
欧兰德 Oulande	0.74±0.08 a	0.67±0.04 b	0.71±0.04 a	0.26±0.04 b	0.37±0.04 cde	0.84±0.08 defg	0.89±0.03 ab
特高尖叶 Tegaojianye	0.71±0.07 ab	0.32±0.03 cd	0.53±0.01 b	0.26±0.03 b	0.49±0.05 ab	0.92±0.02 bcde	0.84±0.01 c
秀禾碧剑 Xiuhebijian	0.14±0.03 gh	0.01±0.01 f	0.08±0.02 h	0.02±0.01 e	0.23±0.03 fgh	0.81±0.07 fg	0.74±0.04 e
米香 Mixiang	0.71±0.03 ab	0.17±0.02 e	0.46±0.01 c	0.22±0.04 bc	0.47±0.07 abc	0.98±0.06 b	0.92±0.02 a
纯香 Chunxiang	0.43±0.04 c	0.26±0.05 d	0.35±0.05 e	0.12±0.04 d	0.33±0.07 def	0.85±0.02 def	0.77±0.02 de
美冠 Meiguan	0.10±0.03 gh	0.02±0.00 f	0.06±0.02 h	0.01±0.01 e	0.18±0.05 gh	0.87±0.11 cdef	0.67±0.02 f
脆香 Cuixiang	0.71±0.02 ab	0.74±0.12 a	0.72±0.07 a	0.41±0.06 a	0.57±0.11 a	0.93±0.02 bcd	0.90±0.03 a
茂华无斑 Maohuawuban	0.21±0.05 ef	0.05±0.02 f	0.14±0.02 g	0.04±0.01 e	0.30±0.04 defg	0.99±0.05 b	0.62±0.02 g
萨娃提 Sawati	0.15±0.01 fg	0.02±0.00 f	0.09±0.01 h	0.02±0.00 e	0.21±0.06 fgh	0.98±0.07 b	0.60±0.02 h
金品香 Jingpinxiang	0.65±0.03 b	0.28±0.02 cd	0.47±0.02 c	0.19±0.06 c	0.41±0.12 bcd	0.87±0.06 cdef	0.86±0.02 bc
平均值 Average	0.39	0.21	0.30	0.13	0.33	0.90	0.77
标准差 Standard deviation	0.26	0.23	0.23	0.13	0.15	0.10	0.11
变异系数/% Variation coefficient	66.70	110.56	76.22	98.13	44.78	10.88	14.61

注：同一列不同小写字母表示不同品种间水平差异显著（$P<0.05$）。

Note: Different lowercase letters within the same columns indicate significant level differences among different cultivars ($P<0.05$).

各指标耐热系数的相关性分析结果表明(表3),各指标(除芽根比)耐热系数之间存在极显著正相关关系,发芽率与发芽势、活力指数相关系数较大,分别为0.970、0.974;鲜质量与发芽指数、活力指数相关系数较大,分别为0.921、0.946。各指标耐热系数的相关系数均大于0.700,说明这些指标的变化趋势具有一致性,各指标之间存在信息重叠与交叉现象,对各参试品种的耐热性评价以及鉴定指标筛选结果有影响,需采用多元统计方法将各项指标进一步分析。

表3 油麦菜萌发期各指标耐热系数的相关性矩阵

Table 3 Correlation matrix of heat resistance coefficient of each index of lettuce at germination stage

指标 Indicator	GR	GE	GI	VI	FW	BD	SSR
GR	1.000						
GE	0.823**	1.000					
GI	0.970**	0.857**	1.000				
VI	0.974**	0.859**	0.984**	1.000			
FW	0.890**	0.802**	0.921**	0.946**	1.000		
BD	0.796**	0.705**	0.765**	0.807**	0.831**	1.000	
SSR	0.039	0.169	0.033	0.083	0.192	0.041	1.000

注:** 表示 $P<0.01$ 的显著水平。

Note: ** Indicates a significant level of $P<0.01$.

2.3 耐热性综合评价

2.3.1 主成分分析 将各参试品种萌发期各项指标耐热系数标准化后进行主成分分析,根据特征值大于1的原则,可从萌发期7个指标提取出2个相互独立的主成分(表4)。主成分1(P_1)、主成分2(P_2)的贡献率分别为76.08%、14.63%,累计贡献率分别达到76.08%、90.71%,表明这2个主成分能概括包括15个参试品种萌发期耐热性的绝大部分信息,可作为油麦菜萌发期耐热性主要评价因子。主成分1(P_1)中除芽根比(SSR)外各项指标特征向量均在0.900左右;主成分2(P_2)中芽根比(SSR)特征向量最大,为0.970。

表4 15个油麦菜品种综合指标的特征向量及贡献率

Table 4 Characteristic vector and contribution rate of comprehensive indexes of 15 lettuce varieties

主成分 Principal component		P_1	P_2
特征值 Eigenvalue		5.325	1.024
贡献率/% Contribution rate		76.08	14.63
累计贡献率/% Cumulative contribution rate		76.08	90.71
特征向量 Feature vector	发芽率 GR	0.952	−0.114
	发芽势 GE	0.902	−0.130
	发芽指数 GI	0.977	−0.125
	活力指数 VI	0.986	0.026
	鲜质量 FM	0.918	0.182
	芽粗 BD	0.890	−0.058
	芽根比 SSR	0.214	0.970

注:P_1.主成分1;P_2.主成分2。

Note: P_1: Principal component 1; P_2: Principal component 2.

2.3.2 耐热性综合分析 采用隶属函数法对参试品种萌发期耐热性进行综合评价,根据公式(1)和公式(2)分别进行计算得出各参试品种耐热综合指标值和隶属函数值,根据公式(3)计算出各耐热指标综合值得权重,分别为83.87%和16.13%(表5),根据公式(4)得出各参试油麦菜品种萌发期耐热性综合评价值(D值),并根据D值的大小对各参试品种的耐热性进行鉴定,参试油麦菜品种耐热性强弱从大到小依次为'脆香''亮剑''欧兰德''米香''特高尖叶''金品香''纯香''茂华无斑''彩云香''冯子龙''宽叶香甜''秀禾碧剑''美冠'和'圣美紫'。

表 5　15 个油麦菜品种耐热性综合评价

Table 5　Comprehensive evaluation of heat tolerance of 15 lettuce varieties

品种名称 Cultivar	综合指标值 Comprehensive index value		隶属函数值 Membership function value		*D* 值 *D* value	综合排名 Comprehensive evaluation
	CI1	CI2	μ1	μ2		
脆香 Cuixiang	1.849	−0.070	1.000	0.379	0.900	1
亮剑 Liangjian	0.915	2.166	0.679	1.000	0.730	2
欧兰德 Oulande	1.287	−1.276	0.807	0.043	0.683	3
米香 Mixiang	0.879	0.733	0.666	0.602	0.656	4
特高尖叶 Tegaojianye	0.980	0.050	0.701	0.412	0.654	5
金品香 Jingpinxiang	0.668	−0.529	0.594	0.251	0.538	6
纯香 Chunxiang	0.064	−0.645	0.386	0.219	0.359	7
茂华无斑 Maohuawuban	−0.719	1.185	0.116	0.727	0.215	8
彩云香 Caiyunxiang	−0.498	−0.875	0.192	0.155	0.186	9
冯子龙 Fengzilong	−0.487	−1.432	0.196	0.000	0.165	10
萨娃提 Sawati	−0.996	1.038	0.021	0.686	0.128	11
宽叶香甜 Kuanyexiangtian	−0.994	0.679	0.022	0.587	0.113	12
秀禾碧剑 Xiuhebijian	−0.862	−0.802	0.067	0.175	0.085	13
美冠 Meiguan	−1.029	−0.188	0.010	0.346	0.064	14
圣美紫 Shengmeizi	−1.057	−0.033	0.000	0.389	0.063	15
权重 Weight			83.87%	16.13%		

注：*D* 值：耐热性综合指标值。

Note：*D* value：Comprehensive index value of heat resistance.

根据萌发期各指标耐热系数主成分分析绘制主成分得分图（图 1），可直观地看出各品种与萌发期各项指标之间的关系。如图 1 所示，‘亮剑’‘米香’‘特高尖叶’在第一区间，表明这 3 个品种发芽率等 7 指标值较大；‘茂华无斑’‘萨娃提’‘宽叶香甜’在第二区间，表明这 3 个品种活力指数等 6 个指标值较小，芽根比指标值较大；‘圣美紫’‘美冠’‘秀禾碧剑’‘彩云香’‘冯子龙’在第三区间，表明这5个品种发芽率等7个指标值较小。

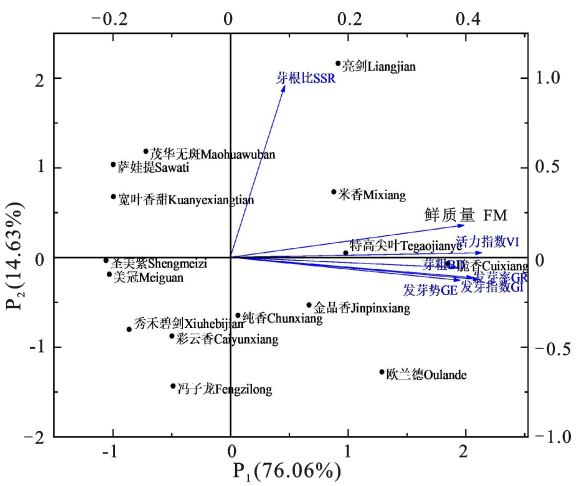

图 1　15 个油麦菜品种主成分得分

Fig. 1　Main component score of 15 lettuce varieties

‘纯香’‘金品香’‘欧兰德’‘脆香’在第四区间表明这 4 个品种活力指数等 6 个指标值较大，芽根比指标值较小。

2.4　萌发期耐热性鉴定指标筛选

为筛选出油麦菜萌发期耐热性鉴定指标，将耐热性综合评价值（*D* 值）作为因变量，萌发期 7 个指标的耐热系数作为自变量进行逐步回归（前进法）分析，得出鉴定不同油麦菜品种萌发期耐热强弱的回归方程为：

$$D=-0.647+0.321_{GR}+0.596_{SSR}+1.575_{VI}$$

（$R^2=0.987$，$F=282.658$，$P=0.000<0.05$）。由方程可知，7 个单项指标中发芽率、芽根比、活力指数 3 个指标对油麦菜萌发期耐热性有显著影响，可作为油麦菜萌发期耐热性鉴定指标。

结合主成分分析，逐步回归分析筛选出的共同指标作为油麦菜萌发期耐热性鉴定的指标，即发芽率、芽根比、活力指数。

2.5　耐热性分类

2.5.1　油麦菜萌发期耐热性聚类分析　以耐热综合值（*D* 值）为依据进行聚类分析，如图 2 所示，15 个油麦菜品种分为 3 类：耐热型、中等耐热型、不耐热型。其中耐热型 1 种，为‘脆香’；中等耐热型 5 种，分别为‘亮剑’‘欧兰德’‘米香’‘特高

尖叶’‘金品香’;不耐热型有 9 种,分别为‘纯香’‘茂华无斑’‘彩云香’‘冯子龙’‘萨娃提’‘宽叶香甜’‘秀禾碧剑’‘美冠’‘圣美紫’。

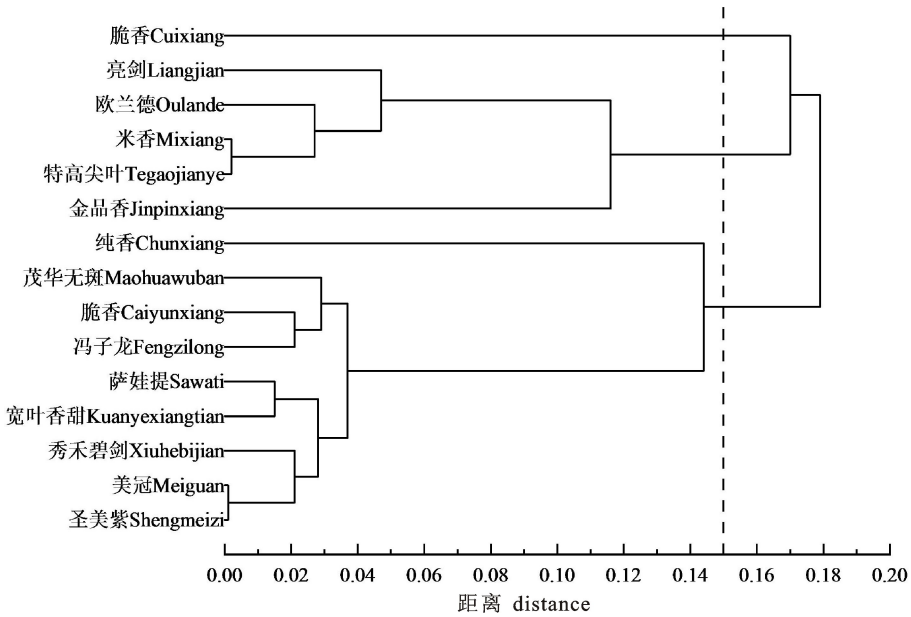

图 2 15 种油麦菜品种萌发期耐热性聚类分析结果

Fig. 2 Cluster analysis results of heat tolerance of 15 lettuce varieties during germination stage

2.5.2 油麦菜成株期田间热害指数与 D 值相关性分析及耐热性聚类分析 为验证不同油麦菜萌发期耐热性评价结果的准确性,对 15 个油麦菜品种成株期田间热害指数进行调查(表 6),并将田间热害指数与萌发期耐热综合评价值(D 值)进行相关性分析,结果表明(表 7),成株期田间热害指数与 D 值呈极显著负相关关系。以田间热害指数为依据进行聚类分析,可将参试的 15 个品种进行耐热性强弱划分成 3 类(表 6,图 3),其中耐热型品种有‘欧兰德’‘脆香’;中等耐热型品种有‘亮剑’‘米香’‘特高尖叶’‘金品香’‘纯香’;不耐热品种有‘彩云香’‘萨娃提’‘秀禾碧剑’‘冯子龙’‘茂华无斑’‘圣美紫’‘美冠’和‘宽叶香甜’。综合图 2、表 6 和图 3 结果来看,除品种‘欧兰德’和‘纯香’以外其余 13 个油麦菜品种萌发期耐热性鉴定结果与田间耐热性鉴定结果基本一致。

表 6 15 个油麦菜品种热害指数及耐热性分析

Table 6 Analysis of heat injury index and heat tolerance of 15 lettuce varieties

品种名称 Cultivar	热害指数 Heat damage index	类别 Tolerance type
欧兰德 Oulande	0.17	耐热 Heat tolerance
脆香 Cuixiang	0.19	耐热 Heat tolerance
亮剑 Liangjian	0.22	中等耐热 Medium heat tolerance
米香 Mixiang	0.23	中等耐热 Medium heat tolerance
特高尖叶 Tegaojianye	0.24	中等耐热 Medium heat tolerance
金品香 Jingpinxiang	0.26	中等耐热 Medium heat tolerance
纯香 Chunxiang	0.26	中等耐热 Medium heat tolerance
彩云香 Caiyunxiang	0.32	不耐热 Heat intolerance
萨娃提 Sawati	0.34	不耐热 Heat intolerance
秀禾碧剑 Xiuhebijian	0.34	不耐热 Heat intolerance
冯子龙 Fengzilong	0.35	不耐热 Heat intolerance
茂华无斑 Maohuawuban	0.36	不耐热 Heat intolerance
圣美紫 Shengmeizi	0.37	不耐热 Heat intolerance
美冠 Meiguan	0.39	不耐热 Heat intolerance
宽叶香甜 Kuanyexiangtian	0.40	不耐热 Heat intolerance

表 7　15 个油麦菜品种成株期热害指数与萌发期耐热综合评价值相关性

Table 7　Correlation between heat damage index at maturity stage and comprehensive evaluation value of heat tolerance at germination stage of 15 lettuce varieties

指标 Indicator	*D* 值 *D* value	热害指数 Heat damage index
D 值 *D* value	1.000	
热害指数 Heat damage index	−0.942**	1.000

注：** 表示 $P<0.01$ 的显著水平。

Note：** Indicates a significant level of $P<0.01$.

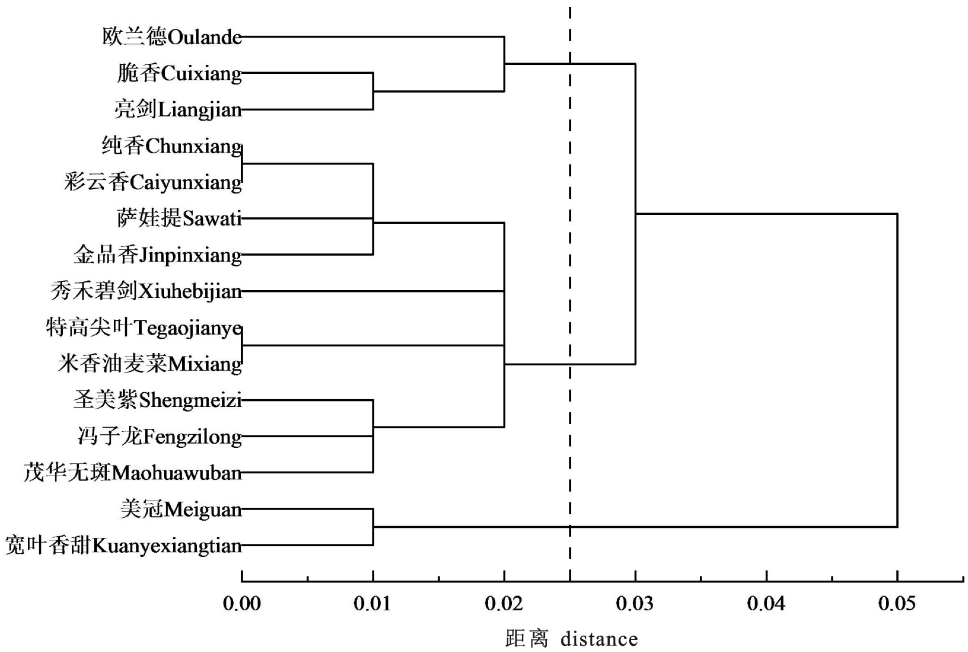

图 3　15 个油麦菜品种田间耐热性聚类分析结果

Fig. 3　Cluster analysis results of field heat tolerance of 15 lettuce varieties

3　讨论

3.1　高温胁迫下油麦菜种子的萌发特性及耐热性鉴定温度

温度是影响种子萌发的重要因素之一[17]，高温对种子萌发影响显著，前人研究表明，油麦菜发芽适宜温度在 20 ℃～25 ℃[18]，超过适宜发芽温度后，随着温度的升高，油麦菜种子发芽率，发芽势、发芽指数等指标均下降，且耐热性越差的品种，下降程度越明显[19]，这与本研究结果一致，类似结果也出现在速生白菜[8]、菠菜[20]等蔬菜作物上。但不同作物萌发期耐热性鉴定温度不同，如生菜为 30 ℃[21]，白菜为 39 ℃[9]，黄瓜为 40 ℃[22]。本研究结果发现，35 ℃条件下，油麦菜萌发期发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数等指标的变异系数明显高于 30 ℃温度处理，能更好地反映不同品种之间萌发期耐热性的强弱，因此油麦菜萌发期耐热性鉴定温度为 35 ℃，该结果与张桥等[19]一致。

3.2　油麦菜萌发期耐热性鉴定及指标筛选

植物耐热性是一个由多基因控制的复杂性状[23]，易被植物自身遗传因素和环境因素所影响，而较少的指标不能全面、准确地反映植物耐热性的本质[16]。因此植物耐热性鉴定需要选择正确、高效的方法及指标。目前对于植物耐热性鉴定方法通常是利用多元统计分析进行综合评价的方法，主要是利用主成分分析和隶属函数法消除各指标之间因单位不同存在信息重叠以及交叉的现象，从原有的指标中提取出新的相互独立、具有概括性、可快速筛选的综合指标，并计算出耐热性综合值，从而鉴定植物的耐热性。如郭元元等[24]对 11 份香葱种种质进行多元综合评价，筛选出 2 个耐热性强的种质，并得到了单株质量、分蘖数两个耐热性评价指标；Truong 等[25]对 5 份小麦种子进行隶属函数分析比较获得 1 份耐热小麦种子，并认为小麦在 40 ℃高温致死温度下可快速筛

选出耐热性较强的品种；朱亚迪等[16]利用主成分分析、逐步回归分析等方法确定可通过穗粒质量、籽粒产量等 6 个指标可以鉴定玉米 V12 期的耐热性；程智慧等[26]采用逐步回归分析筛选出种子活力指数、去子叶鲜质量这两个指标可用作黄瓜芽苗期耐热性鉴定。但目前对于油麦菜耐热性研究鲜有报道，仅通过田间各品种产量[14]、抽薹率[15]等单一指标进行耐热品种筛选，有关油麦菜萌发期耐热性鉴定等相关研究尚未报道。本研究选用 7 个较为直观便捷的形态学指标进行测定，并计算得出其耐热系数。通过主成分分析将 7 个单项指标耐热系数转换为 2 个新的相互独立的综合指标，根据各综合指标的权重，通过隶属函数分析法得出耐热性评价综合值（D 值），并以 D 值为依据进行聚类分析，较为客观地筛选出 1 个耐热品种，5 个中等耐热型品种，9 个不耐热品种，并将萌发期耐热性鉴定与田间耐热性鉴定结果进行比较，其筛选结果基本一致，同时利用逐步回归分析建立了油麦菜萌发期耐热性评价回归模型，结合主成分分析筛选出 3 个对油麦菜耐热能力有显著影响的指标：即发芽率、芽根比和活力指数。

植物的耐热性是由复杂性状控制的，耐热性鉴定可从生理指标和形态指标两方面进行，且植物对高温的耐受力在生长发育各个时期表现不同，形态学指标与生理指标相比更易直接观测和获取，本试验仅对油麦菜萌发期的萌发指标、芽长、根长、芽粗等形态指标进行测量，缺乏油麦菜各个生长发育时期的指标。在后续研究中将扩大到油麦菜各个生长发育时期，增加生理和形态方面的指标，完善油麦菜耐热性综合评价 体系。

4 结 论

高温胁迫对油麦菜各单项指标均有影响，油麦菜萌发期 35 ℃高温胁迫可以较好地反映不同品种间耐热性的差异，通过多元综合分析评价方法筛选出 1 个耐热品种、5 个中等耐热品种、9 个不耐热品种，且萌发期种子耐热性鉴定与成株期田间种子耐热性鉴定结果基本一致；发芽率、芽根比、活力指数此 3 个指标可作为油麦菜耐热性鉴定的首选指标。

参考文献 Reference：

[1] 张植元，魏 东，刘浩翔，等. 油麦菜对鱼菜共生立体种养殖系统中水质的净化效果研究[J]. 安徽农业科学，2022，50(21)：96-101.
ZHANG ZH Y，WEI D，LIU H X，*et al*. Study on the water purification effect of *Lactuca sativa* L. in the aquaponics three-dimensional planting and farming system[J]. *Anhui Agricultural Science*，2022，50(21)：96-101.

[2] 章 凤，董四洪，陈树国，等. 云南油麦菜周年高效绿色生产技术[J]. 长江蔬菜，2022(13)：38-40.
ZHANG F，DONG S H，CHEN SH G，*et al*. High efficient green production technology of Yunnan lettuce [J]. *Journal of Changjiang Vegetables*，2022(13)：38-40.

[3] 邵 锋，李 鹏，孟凡磊. 上海绿叶蔬菜主栽品种及周年生产高效茬口模式[J]. 上海蔬菜，2017(4)：45-46，48.
SHAO F，LI P，MENG F L. The main varieties of green leafy vegetables in Shanghai and the efficient stubble mode for annual production [J]. *Shanghai Vegetables*，2017(4)：45-46，48.

[4] 金玉忠，马艺荞，谭 克，等. 绿色食品——设施油麦菜生产技术规程[J]. 吉林蔬菜，2018(9)：22-23.
JIN Y ZH，MA Y Q，TAN K，*et al*. Green food—technical procedures for production of facilities lettuce [J]. *Jilin Vegetables*，2018(9)：22-23.

[5] 李秉妍，张梦佳，李 凡，等. 叶用莴苣高温抽薹过程中茎长和花芽分化的观察[J]. 北京农学院学报，2019，34(3)：55-58.
LI B Y，ZHANG M J，LI F，*et al*. Observation on stem length and flower bud differentiation of lettuce during bolting induce by high temperature [J]. *Journal of Beijing University of Agriculture*，2019，34(3)：55-58.

[6] 马 通，李 敏. 叶用莴苣耐热品种筛选[J]. 中国蔬菜，2015(9)：53-57.
MA T，LI M. Screen of leaf lettuce (*Lactuca sativa* L.) with heat tolerance [J]. *China Vegetables*，2015(9)：53-57.

[7] 盛锦根. 伏缺期蔬菜设施抗逆栽培示范及综合表现与分析[J]. 安徽农学通报，2016，22(8)：49-51，86.
SHENG J G. Demonstration and comprehensive performance and analysis of protected stress resistant cultivation of vegetables in summer and winter [J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*，2016，22(8)：49-51，86.

[8] 庞强强，孙晓东，蔡兴来，等. 不同快菜品系萌发期耐热指标筛选及耐热性评价[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2021，49(4)：81-92.
PANG Q Q，SUN X D，CAI X L，*et al*. Indexes screening and identification of heat tolerance at germination stage in different lines of seeding-edible Chinese cabbage [J]. *Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition)*，2021，49(4)：81-92.

[9] 庞强强，蔡兴来，孙晓东，等. 不同速生白菜苗期耐热性室内鉴定及耐热指标筛选[J]. 基因组学与应用生物学，2021，40(Z2)：2775-2784.
PANG Q Q，CAI X L，SUN X D，*et al*. Comprehensive evaluation and indices screening of heat tolerance in different Chinese cabbage cultivars at seedling stage [J]. *Genomics*

and Applied Biology,2021,40(Z2):2775-2784.

[10] 陈中钐,杜文丽,许端祥,等.苦瓜苗期耐热性综合评价及其鉴定指标的筛选[J].江西农业学报,2022,34(3):1-7.
CHEN ZH SH,DU W L,XU D X,*et al*. Comprehensive evaluation of momordica charantia heat tolerance at seedling stage and screening of identification indexes [J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*,2022,34(3):1-7.

[11] 庞强强,周　曼,孙晓东,等.不同菜心品种萌发期和苗期耐热性分析及其鉴定指标筛选[J].西北农业学报,2020,29(2):295-305.
PANG Q Q,ZHOU M,SUN X D,*et al*. Comprehenive evaluation and indexes screening of heat tolerance at germination and seedling stages in different cultivars of Chinese flowering cabbage [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*,2020,29(2):295-305.

[12] AYENAN M A T,DANQUAH A,HANSON P,*et al*. Identification of new sources of heat tolerance in cultivated and wild tomatoes[J]. *Euphytica*,2021,217(3):1-16.

[13] LIU M,HAI CH,CHAO Y Y. Kaohsiung No. 3 cucumber:An early flowering variety tolerant to heat and moisture[J]. *Horticultural Science*,2017,52(10):1435-1437.

[14] 张铜庆,李君平,范双喜.叶用莴苣品种比较试验[J].北方园艺,2014(5):30-32.
ZHANG T Q,LI J P,FAN SH X. Study on variety comparison test of leaf lettuce [J]. *Northern Horticulture*,2014(5):30-32.

[15] 陈青君,韩莹琰,谷建田,等.叶用莴苣种质资源的主要农艺性状鉴定与耐热性评价[J].中国蔬菜,2011(20):20-27.
CHEN Q J,HAN Y Y,GU J T,*et al*. Evaluation of major agronomic traits and heat tolerance of lettuce germplasm resources [J]. *China Vegetable*,2011(20):20-27.

[16] 朱亚迪,王慧琴,王洪章,等.不同夏玉米品种大喇叭口期耐热性评价和鉴定指标筛选[J].作物学报,2022,48(12):3130-3143.
ZHU Y D,WANG H Q,WANG H ZH,*et al*. Evaluation and identification index screening of heat resistance of different summer maize varieties at the big bell mouth stage [J]. *Acta Agronomica Sinica*,2022,48(12):3130-3143.

[17] NEHA,TWINKLE,MOHAPATRA S,*et al*. Seed priming with brassinolides improves growth and reinforces anti-oxidative defenses under normal and heat stress conditions in seedlings of *Brassica juncea* [J]. *Physiologia Plantarum*,2022,174(6):e13814.

[18] 许钰颖,许小娣,方　勇,等.不同温度对油麦菜种子发芽的影响[J].现代农业科技,2021(6):58-60.
XU Y Y,XU X D,FANG Y,*et al*. Effects of different temperatures on seed germination of lettuce [J]. *Modern Agricultural Science and Technology*,2021(6):58-60.

[19] 张　侨,韩莹琰,范双喜,等.高温胁迫下不同品种叶用莴苣种子萌发特性[J].西北农业学报,2010,19(5):171-176.
ZHANG Q,HAN Y Y,FAN SH X,*et al*. Germination characteristics of *Lactuca staive* L under different heat stress [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*,2010,19(5):171-176.

[20] 沈丹婷,刘晓嵩,唐东梅,等.高温胁迫下菠菜种子萌发特性及耐热性[J].上海交通大学学报(农业科学版),2012,30(4):31-38.
SHEN D T,LIU X S,TANG D M,*et al*. Germination characteristics and heat tolerance in seeds of *Spinacia oleracea* L under various high temperature stress [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*(*Agricultural Science*),2012,30(4):31-38.

[21] 宋云鹏,刘凯歌,龚繁荣.不同生菜品种苗期耐热性的综合评价[J].浙江农业学报,2015,27(2):176-181.
SONG Y P,LIU K G,GONG F R. Comprehensive evaluation of heat resistance of various lettuce seedling [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*,2015,27(2):176-181.

[22] 黄建都,林翮飞,王艳娜,等.黄瓜芽期耐热相关指标的筛选及预测方程的建立[J].江西农业学报,2019,31(12):8-12.
HUANG J D,LIN H F,WANG Y N,*et al*. Screening of relevant indexes of hot tolerance at seed germination stage and establishment of forecast equation for cucumber [J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*,2019,31(12):8-12.

[23] WU CH M. Patatin-like phospholipase A-induced alterations in lipid metabolism and jasmonic acid production affect the heat tolerance of *Gracilariopsis lemaneiformis* [J]. *Marine Environmental Research*,2022,179:105688.

[24] 郭元元,张　力,文俊丽,等.11 份越夏香葱种质资源农艺性状鉴定及耐热性评价[J].中国蔬菜,2022(2):33-39.
GUO Y Y,ZHANG L,WEN J L,*et al*. Agronomic character identification and heat tolerance evaluation of 11 accessions of over summer chives (*Allium fistulosum* L. var *caespitosum* Mkino) [J]. *China Vegetables*,2022(2):33-39.

[25] TRUONG H A,JEONG C Y,LEE W J,*et al*. Evaluation of a rapid method for screening heat stress tolerance using three Korean wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*,2017,65(28):5589-5597.

[26] 程智慧,聂文娟,孟焕文,等.黄瓜耐热性芽苗期鉴定指标筛选及预测方程的建立[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2011,39(4):121-126.
CHENG ZH H,NIE W J,MENG H W,*et al*. Screening of identification indexes at seed germination stage and establishment of the forecast equations for cucumber hot tolerance [J]. *Journal of Northwest A & F University*(*Natural Science Edition*),2011,39(4):121-126.

Screening of Indexes for Heat Tolerance Assessment during Germination in Various Lettuce Varieties

YAO Jiarui, LÜ Jinzhao, CHEN Kang and LI Yuhong

(College of Horticulture, Northwest A&F University, Yangling Shaanxi 712100, China)

Abstract To assess the heat tolerance of different lettuce varieties during the germination stage, methods such as principal component analysis, subordination function analysis, stepwise regression analysis, cluster analysis and others were performed. The heat tolerance indexes were identified, and the results of heat tolerance during the germination period were verified by comparing them with the heat tolerance observed in the field for the tested lettuce varieties. The results showed that after 35 ℃ high temperature treatment, the germination percentage, germination potential, germination index, vigor index, ratio of bud to root, bud diameter and fresh mass of different varieties decreased significantly. Multivariate statistical comprehensive evaluation and correlation analysis of the seven individual indicators showed that there was a very significant positive correlation between the heat tolerance coefficients of other individual indicators except for the ratio of buds to roots. The principal component analysis extracted two independent principal components from these seven indicators, which could sum up 90.70% of the original information of heat tolerance of the tested lettuces at the germination stage. The comprehensive evaluation value of heat tolerance (*D* value) was obtained through the analysis of membership function, and the results showed that the heat tolerance of 'Cuixiang' was the strongest, while 'Shengmeizi' was the worst. By cluster analysis, 15 varieties were divided into three types: heat tolerance, heat intolerancee, and medium heat tolerance. The results of principal component analysis and stepwise regression analysis showed that germination percentage, shoot root ratio, and vigor index were important indicators for heat tolerance identification of rapeseed during germination. The heat tolerance identification results for all tested varieties during the germination stage were generally consistent with those obtained at the mature field stage.

Key words Lettuce; Germination stage; Heat tolerance index; Heat resistance evaluation

Received 2022-12-25 **Returned** 2023-02-10

Foundation item Science and Technology Plan of Xi'an Municipality (No. 20NYYF0053); Key Research and Development Program of Shaanxi Province (No. 2019TSLNY01-04).

First author YAO Jiarui, female, master student. Research area: selection and cultivation techniques of heat resistant leaf vegetable cultivars in the mature period. E-mail: 404505098@qq.com

Corresponding author LI Yuhong, female, professor, doctoral supervisor. Research area: pollution-free production of vegetables. E-mail: liyuhong73@126.com

(责任编辑:潘学燕 **Responsible editor: PAN Xueyan**)