

不同基因型苦瓜幼苗耐低温鉴定及评价指标筛选

汪自松¹, 沈伟¹, 方利娟¹, 杨静², 王涛涛², 李荣峰¹

(1. 百色学院农业与食品工程学院 广西百色 533000; 2. 华中农业大学园艺林学学院·
园艺植物生物学教育部重点实验室 武汉 430070)

摘要: 以 41 个苦瓜自交系幼苗为试材, 研究低温胁迫对苦瓜生理生化的影响, 采用相关性、主因子和隶属函数分析方法综合评价了苦瓜幼苗耐低温能力, 进行耐低温材料鉴定及评价指标筛选。结果表明, 12 个生理生化指标在参试的 41 个苦瓜自交系的变异系数 5%~150%, 可转换为 5 个相互独立的综合指标, 主因子累计贡献率达 74.22%, 相关性分析表明, F_v/F_m 与丙二醛含量、可溶性糖含量呈显著负相关; 41 个不同基因型苦瓜自交系, 依据隶属函数法评定的耐低温性强弱可划分为 5 类; 筛选出 6 个高耐低温自交系, 并建立了以脯氨酸含量、超氧化物歧化酶活性、 F_v/F_m 、丙二醛含量、胞间 CO_2 浓度为耐低温性的评价指标。研究结果为苦瓜早熟育种及耐低温材料鉴定提供了较为高效与适用的方法。

关键词: 苦瓜; 低温胁迫; 主因子分析; 隶属函数; 评价指标

中图分类号: S642.5

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2025)11-036-08

Identification and evaluation index screening of low temperature tolerance of bitter gourd seedling of different genotypes

WANG Zisong¹, SHEN Wei¹, FANG Lijuan¹, YANG Jing², WANG Taotao², LI Rongfeng¹

(1. College of Agriculture and Food Engineering, Baise University, Baise 533000, Guangxi, China; 2. College of Horticulture and Forestry, Huazhong Agricultural University/Key Laboratory of Horticultural Plant Biology of Ministry of Education, Wuhan 430070, Hubei, China)

Abstract: The effects of low temperature stress on physiology and biochemistry of *Momordica charantia* L. were studied to screen low-temperature-tolerant materials and evaluation indicators in 41 inbred seedlings. The results showed that the variation coefficient of 12 physiological and biochemical indicators among the 41 bitter gourd inbred lines were 5%-150%, which could be transformed into 5 independent comprehensive indicators. The cumulative contribution rate of the main factors reached 74.22%. Correlation analysis indicated that F_v/F_m was significantly negatively correlated with MDA content and soluble sugar content. The 41 different genotypes of bitter gourd inbred lines could be classified into 5 categories based on the strength of low-temperature tolerance evaluated by the membership function method. Six inbred lines with relatively strong low-temperature tolerance were screened out, and Pro content, SOD activity, F_v/F_m , MDA content and C_i were established as the evaluation indicators of low-temperature tolerance, which provides a relatively efficient and applicable method for the efficient and early-maturing breeding of bitter gourd and the identification of low-temperature tolerance materials.

Key words: Bitter gourd; Low temperature stress; Principal factor analysis; Membership function; Evaluation index

苦瓜(*Momordica charantia* L.)起源于热带非洲的沙漠边缘, 是适合在热带和温带地区及设施农业中生长的蔬菜和草本药用植物, 富含维生素 C 和铁^[1], 果肉及其种子还含有抗糖尿病^[2]和降糖化合物^[3], 作为一种食疗蔬菜深受中老年人的喜爱。我

国中南部地区冬春季节持续的低温环境影响苦瓜的熟性和品质, 培育耐低温的苦瓜品种有利于提早苦瓜收获期, 增加农户经济收益。因此, 评价苦瓜自交系低温耐受性, 鉴定并筛选耐低温的苦瓜种质资源进行早熟及抗性育种具有重要意义。

收稿日期: 2025-04-10; 修回日期: 2025-06-04

基金项目: 武汉市重点研发项目(2023020403010777); 百色学院科研启动金项目(DC2000002728)

作者简介: 汪自松, 男, 助理研究员, 研究方向为园艺植物育种及营养学。E-mail: 1006139505@qq.com

通信作者: 杨静, 女, 讲师, 研究方向为葫芦科作物育种。E-mail: yangjing80@mail.hzau.edu.cn

李荣峰, 女, 教授, 研究方向为植物资源开发利用。E-mail: 77257057@qq.com

低温限制植物种子萌发、幼苗生长和地理分布^[4-5],国内外学者普遍认为,植物耐低温是一个数量遗传性状,大多通过苗期形态鉴定与苗期生理生化指标鉴定的综合方法进行评价。这种评价方法在水稻^[6]、花生^[7]、马铃薯^[8]等作物上得到广泛应用。利用生理指标与光合和荧光参数进行联合分析的研究也多有报道,如水稻^[9]。在苦瓜耐低温弱光的综合评价方面,陈小凤等^[10]研究苦瓜苗期的低温鉴定时间,发现苦瓜幼苗适宜取材时期为低温 10℃处理后 10 d,高山等^[11]通过苦瓜幼苗叶绿素荧光参数联合生理指标参数研究 23 份自交系的耐低温弱光性,筛选出 6 个耐寒性鉴定指标,用于苦瓜种质资源耐低温弱光的快速鉴定和预测。杜卓涛等^[12]研究了不同砧木对嫁接苦瓜抗寒性的影响,结果表明,通过嫁接,苦瓜幼苗的耐冷性显著提高,能降低低温胁迫对苦瓜幼苗生长的影响。然而,有关苦瓜耐低温鉴定指标及综合评价方面的研究较少。鉴于此,笔者通过模拟我国中南部冬春季节的连续阴雨导致的低温环境,通过持续变温,测定低温胁迫下不同苦瓜的光合反应、荧光反应以及生理生化指标的变化,对其种质资源耐低温特性进行鉴定,初步筛选出耐低温能力强的优异苦瓜自交系,以期对苦瓜种质资源创新和早熟及抗性育种提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试材料由百色学院农业与食品工程学院苦瓜课题组提供,41 份材料均为高世代自交系,来源和主要特征见汪自松等^[13]的研究报道。2024 年 6 月,将 41 份苦瓜自交系种子在 50~60℃温水中杀菌,搅动到常温浸泡 8 h 后播种。选取直径 2.0 cm、高 8.0 cm 的育苗杯,装入泥炭土、珍珠岩和蛭石体积比为 6:1:3 的基质,置于百色学院广西芒果生物学重点实验室人工气候箱 PGX-450B(上海百典仪器设备有限公司)内催芽。催芽温度:日温(12 h) 32℃,夜温(12 h) 28℃,出苗后转入日温(12 h) 28℃,夜温(12 h) 20℃环境中培养,每份材料 40 株,苗龄 10 d 后,间隔 3 d 定量补充腐熟羊粪浸出液(水、羊粪体积比 300:1)。

1.2 方法

在 3 叶 1 心时,每份材料选择 30 株健康幼苗(出苗不足 30 株苦瓜自交系,不进行下阶段试验)进行低温处理,随机分组,3 次重复。亚适温处理(对照):昼/夜温度 22℃/17℃,平均湿度 80%,光

照培养 12 h,光照度 300 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,黑暗培养 12 h; 10 d 后,进行低温胁迫处理:昼/夜温度 15℃/10℃,其他处理与亚适温处理一致。

1.2.1 各生理指标的测定 利用 Lcpro-SD 光合仪(北京澳作生态仪器有限公司)测量叶片光合参数,包括净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、胞间 CO_2 浓度(C_i) 3 个指标;利用 PAM-2500 型便携式叶绿素荧光仪(德国 WALZ 公司)测定苦瓜叶片叶绿素荧光参数,包括 F_0 (初始荧光)、 F_m (最大荧光)、PSII(光系统 II)光化学量子产能,PSII 最大光化学量子产量 4 个指标;利用 MPM-100 原位植物多色素测量仪(北京澳作生态仪器有限公司)测定叶绿素含量,以上均测定苦瓜幼苗从顶部往下第 3 片功能叶,每组叶片测定 10 次。使用南京建成生物科技有限公司提供的生理指标试剂盒测定叶片超氧化物歧化酶(SOD)活性、脯氨酸(Pro)含量、丙二醛(MDA)含量;采用陈建勋等^[14]的方法测定苦瓜叶片可溶性糖含量。

1.2.2 数据处理 采用 Excel 2015 软件整理基础数据,采用 SPSS 22.0 进行相关分析,主因子分析,隶属函数和聚类分析等多元分析。

耐低温弱光系数(α)/%=处理平均值/对照平均值 $\times 100$ 。

隶属函数值: $\mu(X_i)=(X_i-X_{\min})/(X_{\max}-X_{\min})$, $i=1, 2, \dots, n$ 。式中, X_i 为第 i 个综合指标, X_{\min} 为第 i 个综合指标的最小值, X_{\max} 为第 i 个综合指标的最大值。综合指标权重: $W_i=P_i/\sum P_i$, $i=1, 2, \dots, n$ 。式中, W_i 为第 i 个综合指标在所有综合指标中的权重, P_i 为各自交系第 i 个综合指标的贡献率。

综合评价值: $D=\sum[\mu(X_i)\times W_i]$, $i=1, 2, \dots, n$ 。式中, D 值为各材料在冷害胁迫条件下用综合指标计算所得的耐低温胁迫综合评价值。

2 结果与分析

2.1 各单项指标的耐低温系数 α 值

由表 1 可知,经过亚适温和低温胁迫处理后,不同基因型苦瓜幼苗同一单项指标的耐低温系数差异较大。12 个生理生化指标仅 SOD 活性的耐低温系数表现出一致性降低,其中自交系 168-1 降低的幅度最小($\alpha=97.4\%$)。大多数自交系的 P_n 、 C_i 、叶绿素含量的耐低温系数趋向下降,表明低温对光合作用和叶片叶绿素含量具有负向效应。其中,自交系 11-1、2112、23-1、51-1-1、66-1 的 C_i 耐低温系数较低($\alpha<60.0\%$)。自交系 13-1、2101-1-9、2115、2116

表 1 苦瓜不同基因型各项指标的耐低温系数 α 值
Table 1 α value of every index's tolerant to low temperature intensity in different bitter gourd genotypes at seeding stage %

编号 Number	自交系 Inbred line	净光合 速率 P_n	胞间 CO ₂ 浓度 C_i	蒸腾 速率 T_r	SPAD 值 SPAD value	最大 荧光 F_m	初始 荧光 F_o	PSII 光化 学量子产 能 F_v/F_o	PSII 最大光 化学量子产 量 F_v/F_m	丙二醛 含量 MDA content	脯氨酸 含量 Pro content	超氧化物歧 化酶活性 SOD activity	可溶性糖含量 Soluble sugar content
1	11-1	82.1	48.3	54.8	76.7	99.0	116.3	94.7	81.4	42.6	119.8	45.4	281.4
2	13-1	53.4	77.6	107.9	108.3	102.4	84.2	104.8	124.5	54.5	88.0	51.4	91.5
3	132-1	33.7	60.7	60.2	88.1	97.6	104.5	98.0	93.8	23.6	103.2	67.0	78.7
4	135-1	46.2	91.3	136.5	90.8	89.7	99.7	93.1	93.4	82.4	145.3	17.3	103.1
5	138-1	44.2	107.0	156.5	93.4	98.2	113.7	96.4	84.8	50.2	93.9	64.2	94.1
6	15-1	24.3	70.6	85.2	55.5	99.0	96.3	102.8	106.8	73.2	72.5	74.4	76.0
7	17-1	49.0	71.8	129.9	125.9	96.5	100.7	90.3	89.7	145.1	68.2	55.4	201.9
8	18-1	95.2	97.9	149.1	116.3	88.6	116.4	91.5	78.6	77.2	162.8	56.1	75.3
9	2101-1-8	22.8	70.1	123.2	75.9	107.7	117.0	99.5	85.0	83.3	72.1	62.0	87.8
10	2101-1-9	28.7	77.2	90.9	113.2	103.4	78.1	100.8	129.1	62.5	85.8	58.8	101.2
11	2101-2	47.3	64.0	106.3	67.3	91.1	96.9	95.3	98.3	149.7	87.0	64.7	91.6
12	2101-3	31.4	71.6	106.9	65.6	88.5	94.7	95.2	100.6	52.9	105.9	86.5	103.8
13	2102-4	66.4	81.7	110.1	77.3	79.4	92.7	95.7	103.2	105.9	76.8	57.4	196.0
14	2102-7	24.3	90.0	148.1	94.8	116.9	103.1	94.1	91.3	59.4	77.1	48.6	164.7
15	2106-1	71.6	77.1	114.7	104.9	98.9	82.6	99.6	120.6	123.0	98.6	66.3	103.6
16	2106-4	58.1	83.3	135.3	87.6	104.5	90.8	102.4	112.7	49.3	105.4	49.1	96.0
17	2112	58.6	52.9	87.2	79.4	85.6	122.2	88.4	72.3	52.6	75.5	55.9	72.9
18	2113	28.0	77.9	105.0	101.7	103.7	110.1	97.1	88.2	170.0	119.4	43.3	186.3
19	2115	66.7	92.3	110.8	98.3	97.1	83.0	104.9	126.5	33.5	78.4	71.3	110.2
20	2116	50.2	75.3	134.9	127.0	105.7	77.0	106.0	137.6	81.1	66.6	54.9	251.5
21	2141	61.2	101.0	104.0	101.4	111.3	107.7	98.7	91.6	48.1	81.1	61.3	263.3
22	23-1	81.6	50.9	63.7	143.1	109.1	85.5	101.7	119.0	32.7	77.1	81.9	91.2
23	2538	80.3	80.4	111.9	81.5	106.1	89.0	99.4	111.7	38.3	97.1	57.5	172.4
24	2544	71.0	62.5	131.2	121.5	95.5	101.3	98.3	97.1	15.8	75.2	64.6	53.7
25	2148	51.1	78.5	124.7	53.9	71.6	116.7	94.3	80.8	159.8	68.7	80.1	141.5
26	31-1	68.4	90.9	120.6	84.9	87.3	103.6	90.4	87.2	62.5	125.8	61.7	222.5
27	35-1	43.0	72.5	106.8	98.7	94.1	105.4	99.5	94.3	119.5	92.2	53.0	118.6
28	40-1-1	47.6	61.4	146.8	68.0	105.1	108.4	98.2	90.6	49.5	85.1	77.8	175.0
29	46-1-1	21.6	81.0	131.4	81.7	94.1	98.4	98.4	100.0	28.1	82.0	56.5	72.4
30	51-1-1	65.0	53.0	80.6	78.2	70.0	42.6	107.9	253.3	35.3	119.4	62.2	148.6
31	5325	35.5	84.5	107.9	97.0	97.7	114.8	95.7	83.4	43.2	90.3	50.6	124.9
32	63-1	21.2	71.6	86.4	71.2	88.2	103.6	92.8	89.5	40.2	92.8	50.5	85.6
33	66-1	20.3	51.6	74.2	53.8	106.2	96.4	102.4	106.1	33.5	84.3	60.7	64.0
34	67-1	117.0	129.7	150.3	61.5	92.2	128.5	95.6	74.3	65.2	117.8	85.2	148.3
35	71-1	57.3	109.4	173.7	62.5	90.3	107.4	88.7	82.6	55.5	115.5	57.3	140.6
36	72-1	36.6	79.2	118.5	94.6	87.2	82.6	96.7	117.0	122.7	102.4	41.8	100.4
37	77-1	42.3	98.7	111.8	91.1	94.1	118.3	98.8	83.5	42.3	103.4	45.3	81.2
38	79-7	20.5	79.4	143.4	84.6	93.9	150.2	91.6	61.0	29.9	115.0	62.9	230.2
39	80-1	94.5	89.2	109.5	76.3	102.7	122.2	90.6	74.2	169.0	91.8	55.6	372.6
40	81-1	25.8	61.0	58.8	83.9	106.5	126.2	96.1	76.2	86.2	84.5	44.2	102.6
41	168-1	96.3	65.9	63.8	93.1	76.3	98.3	91.7	93.3	47.8	67.3	97.4	222.3

和 51-1-1 的 F_v/F_m 耐低温系数较高($\alpha>124.0\%$), 自交系 17-1、2101-2、2113、2148、80-1 的 MDA 含量的耐低温系数急剧上升($\alpha>145.0\%$), 自交系 17-1、

2116、2148、168-1 的 Pro 含量的耐低温系数较低($\alpha<70.0\%$)。光合与荧光系统中 C_i 和 F_v/F_m 、增强植物抗寒性的 Pro 和可溶性糖含量及与植物抗氧化能

力相关的 MDA 含量和 SOD 活性均与苦瓜幼苗耐低温胁迫相关性较为密切;而通过耐低温系数分析,表明以单一指标的耐低温系数评估苦瓜耐低温性,其结果差异性较大,需通过其他方法进一步综合分析。

2.2 苦瓜叶片低温胁迫后各生理指标的差异分析

由表 2 可知,22~17 °C 亚适温胁迫后,变异系数从大到小依次是 MDA 含量> P_n >可溶性糖含量>Pro 含量>SOD 活性>SPAD 值,其余指标的变异系数均小于 20%;15~10 °C 低温胁迫后,变异

系数从大到小依次是 MDA 含量>SOD 活性>可溶性糖含量= P_n >Pro 含量> F_v/F_m > T_r ,其余指标的变异系数也均小于 20%。15~10 °C 低温胁迫的变异系数大于 22~17 °C 亚适温的生理指标有 C_i 、 T_r 、 F_m 、 F_o 、 F_v/F_m 、Pro 含量、SOD 活性和可溶性糖含量;不同低温胁迫后, F_m 变异系数变化较小。鉴定不同自交系苦瓜的耐寒性需要足够的低温胁迫,15~10 °C 的低温胁迫比 22~17 °C 亚适温效果更好,而单一生理指标鉴定苦瓜幼苗耐低温能力并不充分,需要以 15~10 °C 的低温胁迫的多项生理指标进行

表 2 41 个苦瓜自交系不同低温胁迫后各指标的差异
Table 2 The difference of indices of 41 bitter gourd inbred lines under different low temperature stress

指标 Index	平均值 Average	最大值 Max	最小值 Min	标准偏差 Standard deviation	峰度 Kurtosis	偏度 Skewness	变异系数 CV/%
22~17 °C 净光合速率 $P_n/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	1.44	2.99	0.40	0.65	2.92	0.35	45
15~10 °C 净光合速率 $P_n/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	0.66	1.37	0.35	0.24	-0.70	1.50	36
22~17 °C 胞间 CO_2 浓度 $C_i/(\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1})$	660.03	795.80	515.50	67.15	1.95	-0.23	10
15~10 °C 胞间 CO_2 浓度 $C_i/(\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1})$	508.43	760.60	33.90	99.13	0.40	0.28	19
22~17 °C 蒸腾速率 $T_r/(\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	0.41	0.57	0.28	0.07	0.10	0.41	17
15~10 °C 蒸腾速率 $T_r/(\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	0.44	0.71	0.26	0.10	1.20	0.78	23
22~17 °C SPAD 值 SPAD value	0.53	0.76	0.34	0.11	-0.74	0.31	21
15~10 °C SPAD 值 SPAD value	0.45	0.58	0.32	0.06	-0.31	0.19	13
22~17 °C 最大荧光 F_m	1 339.84	1 726.00	1 214.70	105.68	4.34	1.86	8
15~10 °C 最大荧光 F_m	1 278.79	1 549.80	1 030.30	110.47	0.04	-0.22	9
22~17 °C 初始荧光 F_o	285.69	369.50	245.90	27.76	1.91	1.40	10
15~10 °C 初始荧光 F_o	290.74	390.50	125.60	51.62	1.34	-0.95	18
22~17 °C PSII 光化学量子产能 F_v/F_o	0.78	0.85	0.76	0.14	6.40	1.79	18
15~10 °C PSII 光化学量子产能 F_v/F_o	0.76	0.87	0.68	0.04	0.26	0.52	5
22~17 °C PSII 最大光化学量子产量 F_v/F_m	3.68	4.08	3.20	0.22	-0.49	-0.24	6
15~10 °C PSII 最大光化学量子产量 F_v/F_m	3.52	6.57	2.28	0.99	2.83	1.71	28
22~17 °C $b(\text{MDA})/(\text{nmol}\cdot\text{g}^{-1})$	2.65	8.14	0.72	1.22	9.48	2.31	150
15~10 °C $b(\text{MDA})/(\text{nmol}\cdot\text{g}^{-1})$	1.61	3.21	0.46	0.69	-0.77	0.46	48
22~17 °C $w(\text{Pro})/(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$	779.19	1 306.80	498.60	196.22	0.40	0.77	25
15~10 °C $w(\text{Pro})/(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$	680.38	1 288.30	275.50	225.10	0.18	0.36	33
22~17 °C 超氧化物歧化酶活性 SOD activity/ $(\text{U}\cdot\text{mg}^{-1})$	3.81	5.09	1.10	0.83	1.71	-0.87	22
15~10 °C 超氧化物歧化酶活性 SOD activity/ $(\text{U}\cdot\text{mg}^{-1})$	2.09	4.29	0.53	0.85	0.12	-0.20	41
22~17 °C $w(\text{可溶性糖})$ Soluble sugar content/%	0.98	1.84	0.50	0.34	-0.75	0.37	35
15~10 °C $w(\text{可溶性糖})$ Soluble sugar content/%	1.21	2.26	0.52	0.44	-0.24	0.67	36

综合鉴定。

2.3 15~10 °C 低温胁迫下各生理指标相关性分析

12 个生理指标相关性分析的结果如表 3 所示,叶片 C_i 与 P_n 呈显著正相关,与 T_r 呈极显著正相关; F_m 与 F_v/F_o 、 F_v/F_m 均呈显著正相关, F_o 与 F_v/F_o 、 F_v/F_m 均呈极显著负相关; F_v/F_m 与 MDA 含量、可溶性糖含量均呈显著负相关;MDA 含量与 Pro 含量呈显著正相关,SOD 活性与 Pro 含量、可溶性糖含量均呈显著负相关。

2.4 主成分因子分析

由表 4 可知,依照主因子分析,根据苦瓜幼苗低温胁迫后的 12 个独立生理指标数据,得出相互独立的综合评价值指标贡献率,依据特征值大于 1 的原则,提取出 5 个主成分,从高到低贡献率分别为 25.35%、16.60%、13.59%、9.90% 和 8.78%,累计贡献率达 74.22%,表明前 5 个综合指标代表了所有原始指标的大部分信息。其中,因子 1 中 F_o 载荷值 0.765, F_v/F_o 和 F_v/F_m 的载荷分别为 -0.804 和 -0.881,

表 3 15~10 °C低温胁迫下各生理指标间相关性分析
Table 3 Correlation analysis of physiological indexes after 15-10 °C low temperature stress

指标 Index	净光合 速率 P_n	胞间 CO_2 浓度 C_i	蒸腾速 率 T_r	SPAD 值 SPAD value	最大荧 光 F_m	最初荧 光 F_o	PSII 光化 学量子产 能 F_v/F_o	PSII 最大光 化学量子产 量 F_v/F_m	丙二醛 含量 MDA content	脯氨酸 含量 Pro content	超氧化物 歧化酶活性 SOD activity	可溶性 糖含量 Soluble sugar content
净光合速率 P_n	1.000											
胞间 CO_2 浓度 C_i	0.216*	1.000										
蒸腾速率 T_r	0.185	0.760**	1.000									
SPAD 值 SPAD value	0.129	0.184	0.136	1.000								
最大荧光 F_m	0.013	-0.141	-0.210	0.033	1.000							
最初荧光 F_o	0.143	0.027	0.066	0.040	0.037	1.000						
PSII 光化学量子产能 F_v/F_o	-0.070	-0.090	-0.120	-0.026	0.241*	-0.624**	1.000					
PSII 最大光化学量子产量 F_v/F_m	-0.105	-0.082	-0.126	-0.002	0.223*	-0.624**	0.748**	1.000				
丙二醛含量 MDA content	0.065	0.141	0.125	-0.079	-0.102	0.080	-0.134	-0.218*	1.000			
脯氨酸含量 Pro content	-0.065	0.149	0.159	-0.094	-0.159	0.034	-0.200	-0.153	0.232*	1.000		
超氧化物歧化酶活性 SOD activity	0.068	-0.013	-0.106	-0.056	0.096	-0.094	0.143	-0.120	-0.094	-0.245*	1.000	
可溶性糖含量 Soluble sugar content	0.074	0.024	0.125	0.062	-0.185	0.193	-0.198	-0.255*	0.205	0.129	-0.262*	1.000

注:*表示在 0.05 水平显著相关;**表示在 0.01 水平极显著相关。
Note:* represents significant correlation at 0.05 level; ** represents extremely significant correlation at 0.01 level.

表 4 12 个生理性状综合指标系数及贡献率
Table 4 Comprehensive index coefficient and contribution rate of 12 physiological traits

指标 Index	主成分 Principal component				
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
净光合速率 P_n	0.133	-0.043	0.482	-0.271	0.584
胞间 CO_2 浓度 C_i	0.527	0.752	0.264	0.005	0.003
蒸腾速率 T_r	0.561	0.719	0.260	-0.048	-0.025
SPAD 值 SPAD value	0.052	0.295	0.321	0.568	0.249
最大荧光 F_m	-0.242	-0.421	0.328	0.471	0.120
最初荧光 F_o	0.765	-0.472	0.295	0.207	-0.038
PSII 光化学量子产能 F_v/F_o	-0.804	0.436	-0.002	0.132	0.197
PSII 最大光化学量子产量 F_v/F_m	-0.881	0.367	-0.042	0.084	0.028
丙二醛含量 MDA content	0.098	-0.162	-0.351	-0.189	0.752
脯氨酸含量 Pro content	0.385	0.218	-0.532	-0.254	0.048
超氧化物歧化酶活性 SOD activity	-0.250	-0.134	0.621	-0.415	-0.044
可溶性糖含量 Soluble sugar content	0.378	0.059	-0.412	0.477	0.158
特征值 Characteristic value	3.042	1.991	1.631	1.188	1.054
方差贡献率 Variance contribution rate/%	25.35	16.60	13.59	9.90	8.78
累计贡献率 Accumulative contribution rate/%	25.35	41.95	55.54	65.44	74.22

绝对值高于其他指标且与叶片荧光反应相关,称为荧光因子;因子 2 中 C_i 和 T_r 正向载荷较高,分别为 0.752 和 0.719,表明该因子与光合反应相关,称为光合因子;因子 3 中 Pro 含量、SOD 活性、可溶性糖含量载荷分别为-0.532、0.621 和-0.412,表明该因

子与抗性相关;因子 4 中叶绿素含量载荷为 0.568,远高于其他因子,称为叶色素因子;因子 5 中 MDA 含量载荷为 0.752,称为 MDA 因子。因子 1 和因子 2 之间的联系较为紧密,表明荧光反应与光合反应之间存在较为紧密的关系。因子 3 和因子 5 中 P_n

载荷值也较高,表明净光合速率与抗氧化和 MDA 含量关系较为紧密。综合指标包括光合作用、荧光反应和抗性因子等方面,代谢过程差异也较大,其贡献率都未占据绝对多数,需通过综合分析进一步

研究。

2.5 隶属函数分析

由表 5 可知,自交系 2101-1-9 的 $\mu(X_1)$ 数值为 1.000,在 CI1 中表现最强的耐低温胁迫能力;而

表 5 苦瓜自交系综合评价

Table 5 Comprehensive evaluation of bitter gourd of different genotypes

编号 Number	自交系 Inbred line	CI1	CI2	CI3	CI4	CI5	$\mu(X_1)$	$\mu(X_2)$	$\mu(X_3)$	$\mu(X_4)$	$\mu(X_5)$	D 值 D-value	综合排名 Comprehensive ranking	综合评价 Comprehensive evaluation
1	11-1	-0.819	-1.688	1.558	-0.075	0.362	0.152	-0.102	0.761	0.403	0.380	0.267	32	IV
2	13-1	1.724	0.587	0.158	0.265	-1.101	0.791	0.494	0.359	0.495	0.014	0.514	6	I
3	132-1	-0.328	-1.198	-1.078	-0.158	-1.228	0.275	0.027	0.004	0.381	-0.018	0.150	39	V
4	135-1	-0.417	0.203	0.626	-1.097	1.037	0.253	0.394	0.493	0.127	0.548	0.347	18	III
5	138-1	-0.260	2.127	-0.305	0.281	-0.584	0.292	0.898	0.226	0.499	0.143	0.426	9	II
6	15-1	0.147	-0.684	-2.367	-0.278	-0.037	0.395	0.161	-0.366	0.348	0.280	0.183	36	V
7	17-1	-1.241	-0.189	0.410	0.183	0.797	0.046	0.291	0.431	0.473	0.488	0.281	31	IV
8	18-1	-0.601	1.898	-0.659	-0.119	-0.871	0.207	0.838	0.124	0.391	0.071	0.341	20	III
9	2101-1-8	-0.172	-0.353	-1.631	-0.205	-0.539	0.314	0.248	-0.155	0.368	0.154	0.202	35	V
10	2101-1-9	2.556	0.225	1.319	0.955	-0.599	1.000	0.399	0.692	0.681	0.139	0.665	1	I
11	2101-2	-0.366	-0.393	-0.696	-0.626	0.416	0.266	0.238	0.114	0.254	0.393	0.245	34	IV
12	2101-3	-0.273	-0.059	-1.044	0.321	1.450	0.289	0.325	0.014	0.510	0.652	0.319	24	III
13	2102-4	0.912	0.251	0.667	-1.570	0.236	0.587	0.406	0.505	-0.001	0.348	0.425	11	II
14	2102-7	-1.019	-0.054	-0.483	2.134	0.870	0.102	0.326	0.175	1.000	0.507	0.333	21	III
15	2106-1	0.507	0.611	-1.894	-1.320	2.843	0.485	0.500	-0.230	0.067	1.000	0.363	16	III
16	2106-4	0.832	1.097	-0.545	1.460	0.458	0.567	0.628	0.157	0.818	0.404	0.520	5	I
17	2112	-1.014	-0.727	-0.249	-0.784	-1.031	0.103	0.150	0.242	0.212	0.031	0.145	40	V
18	2113	-0.161	0.076	0.912	-0.273	1.733	0.317	0.360	0.575	0.350	0.722	0.426	9	II
19	2115	-0.819	-1.688	1.558	-0.075	0.362	0.790	-0.102	0.761	0.403	0.380	0.534	3	I
20	2116	1.721	0.569	-0.455	0.841	0.012	0.955	0.489	0.183	0.651	0.292	0.601	2	I
21	2141	2.378	0.191	0.630	0.118	0.053	0.342	0.391	0.494	0.456	0.302	0.469	7	II
22	23-1	-0.063	-0.285	2.392	0.962	-0.550	0.509	0.266	1.000	0.683	0.151	0.171	38	V
23	2538	0.602	-1.663	-0.916	1.729	-0.793	0.213	-0.095	0.051	0.891	0.091	0.291	28	IV
24	2544	-0.576	0.933	-0.157	0.010	-0.641	0.404	0.585	0.268	0.426	0.129	0.325	23	III
25	2148	0.184	-0.059	-0.658	1.078	2.098	0.138	0.325	0.125	0.715	0.814	0.425	11	II
26	31-1	-0.876	-0.602	0.565	-1.568	-1.297	0.153	0.183	0.476	0.000	-0.035	0.288	30	IV
27	35-1	-0.815	0.199	0.617	-0.671	-0.286	0.418	0.393	0.490	0.242	0.217	0.530	4	I
28	40-1-1	0.239	0.435	1.046	1.504	0.963	0.332	0.454	0.614	0.830	0.530	0.262	33	IV
29	46-1-1	-0.101	-0.970	-0.432	0.258	-0.198	0.443	0.087	0.190	0.493	0.240	0.291	28	IV
30	51-1-1	0.340	0.163	-0.780	-0.513	-1.156	0.990	0.383	0.090	0.285	0.000	0.432	8	II
31	5325	2.517	-0.685	-0.092	-2.135	-0.293	0.307	0.161	0.287	-0.153	0.216	0.342	19	III
32	63-1	-0.202	0.183	-0.196	0.859	-0.607	0.359	0.388	0.257	0.656	0.137	0.317	25	III
33	66-1	0.005	-0.539	0.978	-0.699	-0.817	0.381	0.199	0.594	0.235	0.085	0.180	37	V
34	67-1	0.091	-1.593	-1.092	0.486	-1.388	0.193	-0.077	0.000	0.555	-0.058	0.398	15	III
35	71-1	-0.657	2.518	0.564	-1.177	-0.900	0.098	1.000	0.475	0.106	0.064	0.328	22	III
36	72-1	-1.034	1.967	-0.540	-0.229	-0.291	0.461	0.856	0.159	0.362	0.216	0.384	15	III
37	77-1	0.412	-1.046	1.487	-1.745	1.637	0.289	0.066	0.740	-0.048	0.698	0.416	13	II
38	79-7	-0.273	0.963	0.412	0.507	-0.100	0.000	0.593	0.432	0.560	0.264	0.302	26	III
39	80-1	-1.424	0.325	0.932	-0.127	0.465	0.117	0.426	0.581	0.389	0.405	0.349	17	III
40	81-1	-0.958	-0.422	1.313	1.614	-0.584	0.256	0.230	0.690	0.860	0.143	0.292	27	IV
41	168-1	-0.407	-1.300	0.177	0.519	0.982	0.078	0.000	0.364	0.564	0.535	0.125	41	V
权重 Weight							0.342	0.224	0.183	0.133	0.118			

79-7 的 $\mu(X_1)$ 为 0.000, 在 CI1 中表现出耐低温胁迫能力最弱。相对于其他综合指标, 如 CI2、CI3、CI4、CI5、71-1 的 $\mu(X_2)$ 、23-1 的 $\mu(X_3)$ 、2102-7 的 $\mu(X_4)$ 、2106-1 的 $\mu(X_5)$ 均为 1.000, 均高于其他自交系, 表明在各自对应指标上, 这 4 个自交系均表现出最强的耐低温胁迫能力。根据隶属函数综合指标权重计算各指标的对应权重, 计算综合评价值 (D), 根据 D 值对 41 份自交系材料的耐低温胁迫能力进行排序, 2101-1-9 的 D 值最大, 表明其耐低温胁迫能力最强, 168-1 的 D 值最小, 表明其耐低温胁迫能力最弱。

根据 D 值大小, 将 41 个苦瓜自交系初步划分为 5 个等级。I 级为高耐低温胁迫的苦瓜自交系, 有 6 个 ($D \geq 0.514$), 分别是 2101-1-9、2106-4、2115、2116、35-1、13-1, 占供试材料的 14.63%; II 级为较耐低温自交系, 有 7 个 ($0.416 \leq D < 0.514$), 占供试材料的 17.07%, III 级为中间型, 有 13 个 ($0.302 \leq D < 0.416$), 占供试材料的 31.70%, 其余 15 份材料为耐低温敏感和高敏感类型, 占供试材料的 36.59%。

3 讨论与结论

国内中南部地区冬春季节栽培苦瓜, 为提早采收, 设施栽培苦瓜成为最佳的选择。苦瓜苗期长期处在亚适温[昼/夜, (15~20 °C/(8~12 °C))]环境中, 低温是影响苦瓜苗期生长的主要因素。因此, 笔者采用人工气候箱模拟苦瓜幼苗的不同低温胁迫环境, 苦瓜幼苗受低温胁迫和适应低温而产生不同的生理生化变化。高山等^[11]认为多因子影响苦瓜低温耐受性, 单项指标无法评价苦瓜耐受性的本质。陈云等^[15]利用叶绿素荧光系统, 并测定 MDA 含量、SOD 活性等生理指标评价黑壳楠幼苗耐低温胁迫的能力, 唐军等^[16]分析了木豆幼苗低温胁迫下的 8 个生理指标, 采用隶属函数综合分析法鉴定其耐寒性。利用多指标鉴定体系, 采用多元分析方法评价植物种质资源的耐低温能力成为较普遍且有效的方法^[17-18]。

笔者在本试验中通过主成分因子分析, 得到荧光因子、光合作用因子、抗性相关因子、叶绿素因子和 MDA 因子 5 个相对独立的因子, 累计贡献率达 74.22%, 其中荧光因子和光合作用因子分别占 25.35% 和 16.60%, 表明低温胁迫主要影响苦瓜幼苗的光化学反应。隶属函数法是一种综合评价方法, 适用于多指标测定数据的分析, 具有较高准确性的鉴定结果^[19]。利用隶属函数分析了 6 个综合因子, 并计算了各自交系的 D 值, 根据耐低温胁迫能力大

小, 41 个自交系苦瓜材料分为 5 个大类。

低温胁迫不仅改变苦瓜的生理代谢, 也会对苦瓜造成伤害, 其影响是多方面的。杜文丽等^[20]研究表明, 苦瓜幼苗在 8 °C 低温胁迫下表现出耐低温适应性, 低温胁迫下 MDA、Pro 含量呈显著变化, 均呈先上升后下降的趋势, 在本试验中, 22~17 °C 亚适温胁迫下, 较为耐低温的自交系 MDA 和 Pro 含量较高, 而在 15~10 °C 低温胁迫下, 其 MDA 和 Pro 含量降低, 与杜文丽等^[20]的研究结果相符。程世强等^[21]研究表明, 低温胁迫使苦瓜幼苗叶片 SOD 活性、可溶性糖含量升高, 与本研究结果存在差异, 15~10 °C 低温胁迫下 SOD 活性下降而可溶性糖含量上升, 可能与参试样本数量大小相关。赵春梅等^[22]研究表明, 甜瓜低温胁迫 24 h 后, 除 POD 活性仍持续上升外, 其他酶活性基本呈下降趋势, 与本试验结果一致。Niu 等^[23]研究表明, 苦瓜幼苗在低温胁迫下, MDA 含量、过氧化氢酶活性和 Pro 含量升高, 与本试验中综合指标评价值 D 较高的 13-1, 2116、2101-1-9、2115 等自交系较低的 MDA 和 Pro 含量相符。本研究结果表明, 15~10 °C 低温胁迫后, F_v/F_m 下降幅度大, 不耐低温自交系的 PSII 最大光化学量子产量受到伤害较重, 光量子的吸收受到影响, 严重抑制光合作用, 净光合速率下降, 植株因缺乏足够的碳水化合物导致抵御或适应低温胁迫的能力下降, 与低温弱光胁迫下苦瓜^[11]、棉花^[24]的研究结果相似, 而颜建明等^[25]则认为, 供试材料的耐寒性与 F_v/F_m 变化相关性不显著, 不能将该指标作为鉴定辣椒耐低温弱光能力的有效指标。造成这种现象可能是因为试验材料不同或低温胁迫处理幼苗的时间不同。

综上所述, 笔者对 41 个不同苦瓜自交系耐寒性进行了人工气候箱鉴定, 通过隶属函数法、相关性分析及主成分分析, 鉴定出 5 个较耐寒自交系, 苗期叶片 MDA 含量、Pro 含量、SOD 活性、荧光 F_v/F_m 变化以及光合作用过程中胞间 CO_2 浓度等指标可以作为鉴定苦瓜种质资源耐低温胁迫能力的关键指标。研究结果为苦瓜种质资源早期耐寒性鉴定及抗寒育种奠定了基础。

参考文献

- [1] JADHAV K A, GAYADB B V, DHUMAL D B, et al. Heterosis in bitter gourd (*Momordica Charantia* L.) [J]. Vegetable Science, 2016, 36(1): 119-121.
- [2] CHEN Q X, CHAN L L Y, EDMUND T S L. Bitter melon (*Momordica charantia*) reduces adiposity, lowers serum insulin and normalizes glucose tolerance in rats fed a high fat diet [J]. The

- Journal of nutrition, 2003, 133(4): 1088-1093.
- [3] JAYASOORIYA P A, SAKONO M, YUKIZAKI C, et al. Effects of *Momordica charantia* powder on serum glucose levels and various lipid parameters in rats fed with cholesterol-free and cholesterol- enriched diets[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2000, 72(1/2): 331-336.
- [4] WANI M A, JAN N, QAZI H A, et al. Cold stress induces biochemical changes, fatty acid profile, antioxidant system and gene expression in *Capsella bursa pastoris* L.[J]. Acta Physiologica Plantarum, 2018, 40(9): 1-14.
- [5] PENG M G, CHANG Y L, CHU G M, et al. Low-temperature tolerance and transcriptome analyses during seed germination of *Anabasis aphylla*[J]. Journal of Plant Interactions, 2019, 14(1): 254-264.
- [6] 潘晓雪, 胡明瑜, 王忠伟, 等. 不同水稻种质资源重要农艺性状与发芽期耐寒性鉴定研究[J]. 作物杂志, 2021(1): 47-53.
- [7] 白冬梅, 薛云云, 黄莉, 等. 不同花生品种芽期耐寒性鉴定及评价指标筛选[J]. 作物学报, 2022, 48(8): 2066-2079.
- [8] 罗文彬, 李华伟, 许国春, 等. 南方冬作区马铃薯新品种闽薯2号耐寒性鉴定[J]. 中国蔬菜, 2022(9): 63-67.
- [9] 程露, 职铭阳, 吴迪, 等. 基于光合和荧光参数探讨不同水稻品种苗期耐寒性差异[J]. 种子, 2022, 41(2): 25-30.
- [10] 陈小凤, 黄如葵, 黄玉辉, 等. 低温胁迫下苦瓜苗期生理变化与耐冷性评价的关系分析[J]. 南方农业学报, 2017, 48(7): 1237-1241.
- [11] 高山, 钟开勤, 许端祥, 等. 不同基因型苦瓜幼苗耐低温弱光综合评价及鉴定指标筛选[J]. 热带作物学报, 2014, 35(11): 2191-2198.
- [12] 杜卓涛, 朱白婢, 赖彩余, 等. 不同砧木嫁接对苦瓜幼苗抗冷性的影响[J]. 热带作物学报, 2016, 37(12): 2306-2311.
- [13] 汪自松, 李兆佳, 罗厚仟, 等. 苦瓜种质资源农艺和品质性状遗传多样性分析[J]. 中国蔬菜, 2024(3): 104-110.
- [14] 陈建勋, 王晓峰. 植物生理学实验指导[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2002.
- [15] 陈云, 张新, 刘静, 等. 低温胁迫对黑壳楠幼苗生长及生理特性的影响[J]. 植物生理学报, 2024, 60(12): 1759-1768.
- [16] 唐军, 王文强, 丁西朋, 等. 不同木豆幼苗低温胁迫下的生理响应及耐寒性鉴定[J]. 热带作物学报, 2024, 45(8): 1633-1640.
- [17] 杨朝伟, 安明珠, 任伟, 等. 两个黑麦品种种子萌发期和幼苗期耐寒性差异及其生理机制[J]. 中国草地学报, 2024, 46(6): 1-9.
- [18] 杨佳维, 高星, 赵婷婷, 等. 自然低温下8个欧洲报春品种的耐寒性评价[J/OL]. 分子植物育种, 1-15 (2024-04-30). <https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20240429.2056.006>.
- [19] 谢小玉, 张霞, 张兵. 油菜苗期抗旱性评价及抗旱相关指标变化分析[J]. 中国农业科学, 2013, 46(3): 476-485.
- [20] 杜文丽, 陈中钊, 许端祥, 等. 低温胁迫下苦瓜叶片转录组差异基因分析及生理响应特征[J]. 核农学报, 2021, 35(2): 338-348.
- [21] 程世强, 吴智明, 曾晶, 等. 低温胁迫对苦瓜成苗及幼苗生理生化特性的影响[J]. 热带作物学报, 2011, 32(11): 2099-2103.
- [22] 赵春梅, 金荣荣, 郭旭欣. 低温胁迫下薄皮甜瓜 ABA 含量及活性氧清除酶活性研究[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(36): 12816-12817.
- [23] NIU Y, LIU Z J, HE H, et al. Gene expression and metabolic changes of *Momordica charantia* L. seedlings in response to low temperature stress[J]. PLoS One, 2020, 15(5): e0233130.
- [24] 武辉, 周艳飞, 侯丽丽, 等. 低温弱光胁迫对棉花幼苗叶绿素荧光特性及能量分配的影响[J]. 新疆农业科学, 2012, 49(3): 393-399.
- [25] 颜建明, 郁继华, 黄高宝, 等. 低温弱光下辣椒叶片 PSII 光能吸收和转换变化及与品种耐性的关系[J]. 中国农业科学, 2011, 44(9): 1855-1862.