

15 个小麦品种的苗期耐热性和耐旱热性评价

史永涛 赵雪妍 向阳 李琪 刘家慧 卢云泽

(河北工程大学园林与生态工程学院, 邯郸 056038)

摘要:建立合适的评价体系、筛选小麦耐热种质资源对小麦耐热研究和遗传改良具有重要意义,本研究以 15 份不同耐旱热性的小麦为试验材料,在萌发后 10d 进行热处理和旱热处理,测定根重、叶片性状、叶绿素含量等 14 个指标。结果表明,不同小麦材料对不同胁迫的响应能力存在较大差异,热胁迫和旱热胁迫对根重、地上重、1 叶黄比例、3 叶长、苗高、叶绿素 a 含量、类胡萝卜素含量、总叶绿素含量产生了显著影响。对热胁迫和旱热胁迫下的这 8 个指标进行主成分分析,各抽取到 3 个主成分,累计贡献率分别为 81.714% 和 78.902%。通过隶属函数值和权重进一步计算综合评价 D 值,根据 D 值将材料划分为不同耐受型,其中,在 2 种胁迫条件下,陇育 4 号均为敏感型,洛麦 29 和郑麦 366 均为中等敏感型,西农 9871 和晋麦 97 均为中等耐受型。因此,建议在进行大规模小麦材料耐热性筛选时可以选择根重、地上重、1 叶黄比例、3 叶长、苗高、叶绿素含量作为评价指标,通过主成分分析和隶属函数分析对小麦材料的耐热性进行综合评价。

关键词:小麦;苗期;热胁迫;旱热胁迫;主成分分析;隶属函数;综合评价

Evaluation of Heat and Drought–Heat Tolerance of 15 Wheat Varieties in Seedling Stage

SHI Yongtao, ZHAO Xueyan, XIANG Yang, LI Qi, LIU Jiahui, LU Yunze

(School of Landscape and Ecological Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, Hebei)

小麦是喜凉作物,热胁迫对其产量和品质可造成严重影响。相关研究表明,热胁迫可造成小麦减产 10%~20%^[1-2]。在全球气候变暖的背景下,热胁迫已然成为危害小麦生产的一种重要非生物胁迫。因此,评价和筛选小麦耐热种质资源,对小麦耐热分子机理研究和遗传改良具有重要意义。准确评价与鉴定小麦耐热性是小麦耐热种质资源再利用,如育种、QTL 定位、耐热基因挖掘与机理研究的关键基础。现阶段小麦耐热性评价方法主要有直接鉴定法和间接鉴定法。直接鉴定法是指在大田或者人工气候模拟条件下,直接以灌浆持续时间、

小穗数、穗粒数、千粒重、产量等性状指标进行小麦的耐热性评价。间接鉴定法则基于热胁迫测定小麦不同生理状态的变化,主要评价指标包括细胞膜热稳定性、叶绿素含量和叶绿素荧光参数、光合效率等^[1,3-4]。

陈冬梅等^[5]考察了 100 份黄淮海区小麦品种(系)的耐热性,以千粒重热感指数和产量热感指数将材料耐热性进行分级,并筛选到了 26 份耐热材料。李敏等^[6]测定了灌浆期热胁迫下 20 个小麦品种的旗叶叶绿素相对含量、超氧化物歧化酶活性等指标,利用主成分分析、隶属函数法、聚类分析等方法对小麦的耐热性进行了综合评价,并通过建模认为超氧化物歧化酶活性、单穗粒重、千粒重、冠层温度、丙二醛含量等指标可用于评估小麦耐热

基金项目:河北省省级科技计划(22326303D);河北省自然科学基金(C2024402008)

通信作者:卢云泽

性。张闪闪等^[7]测定了 32 个小麦新品系在苗期热胁迫下的根鲜重等指标,并通过主成分分析、隶属函数分析等综合评价将小麦材料划分成不同的耐热等级。

本研究以来自不同地区具有不同耐旱和耐热性的 15 个小麦品种为试验材料,在苗期施加热胁迫和旱热共胁迫,分析这些材料的耐热和耐旱热胁迫能力,以及相应的 8 个性状指标的变化方向,旨在筛选可用于评估小麦耐热性的指标和体系,为快速筛选耐热性小麦和深入发掘小麦耐热遗传改良机制提供材料基础和理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

参试材料为来自河北、河南、山西、陕西、甘肃等不同麦区的 15 份材料,具有不同的耐旱和耐热性,包括石家庄 8 号、西农 979、西农 9871、小偃 9 号、石麦 14、洛早 23、中洛 595、陇育 4 号、洛麦 29、郑麦 366、晋麦 97、运早 139、晋麦 98、晋麦 92、晋麦 91,其中小偃 9 号和中洛 595 为品系,其余材料均为已经通过审定且推广的品种,体现了不同的生态类型。

1.2 试验设计

从小麦品种中选取饱满、无病、均匀一致的种子,利用次氯酸钠进行表面消毒后,于 4℃ 环境中放置 3d。将种子转移至发芽盒中(12cm × 12cm × 5cm),添加霍格兰营养液,转移入植物光照培养箱中进行培养,培养条件:25℃ /15℃,14h/10h,每日更换霍格兰营养液。种子萌发后第 10 天进行热处理或旱热处理,胁迫时长为 7d,对照为正常培养幼苗。热处理条件:37℃ /25℃,14h/10h;旱热处理条件:37℃ /25℃,14/10h,并且将霍格兰营养液更换为 20% 的 PEG6000 溶液(以霍格兰营养液配制)。每个品种每种处理条件各培养 2 盒,每盒 9 棵苗。

1.3 表型测定

胁迫处理 7d 后,每盒取出均匀一致的 5 株植株,用清水清洗根系,利用电子天平分别称量得到小麦的地上、地下部鲜重。称重后,使用直尺测量苗高和从上到下第 1~4 片叶叶片长度、变黄或干枯的长度;取第 2 片真叶测定叶绿素含量,利用无水乙醇提取叶绿素后测定不同光波长 470nm、649nm、665nm 下的吸光度,并计算出总叶绿素含量。

1.4 数据分析

采用 Excel 2016 和 SPSS 26.0 进行耐胁迫指数、主成分分析、隶属函数、聚类分析各指标的计算,公式如下。耐胁迫指数 = 处理值 / 正常值;隶属函数 $U(X_i) = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$, $i=1,2,3 \cdots n$, 其中 X_i 为第 i 个主成分指标的综合值, X_{\min} 和 X_{\max} 为该指标上的最大值和最小值;权重 $W_i = P_i / \sum_{i=1}^n P_i$, W_i 表示第 i 个成分的权重, P_i 表示第 i 个成分在主成分分析中的贡献率;综合评价 $D = \sum_{i=1}^n [U(X_i) \times W_i]$, D 值表示各个材料在胁迫条件下的综合评价;聚类分析:根据 D 值,采用欧氏平均距离、组间平均连接法对所有材料进行聚类分析。

2 结果与分析

2.1 不同胁迫处理对小麦指标的影响

除个别品种(系)外,热胁迫和旱热胁迫对大部分材料的 1 叶长、2 叶长没有造成显著影响。除了石麦 14 外,热胁迫、旱热胁迫均使所有材料的叶绿素 a 和总叶绿素含量显著下降,且旱热共胁迫的损害比单一热胁迫更严重。在正常条件下未长出第 4 片叶的材料包括小偃 9 号、石麦 14、陇育 4 号、洛麦 29、郑麦 366、运早 139,而热胁迫和旱热胁迫均导致晋麦 97、晋麦 98、晋麦 92 未长出第 4 片叶,旱热胁迫还导致西农 9871、洛早 23、中洛 595、晋麦 91 不长第 4 片叶。陇育 4 号、郑麦 366、晋麦 97、运早 139、晋麦 91 的 3 叶黄比例在 3 种条件下均为 0,7 个品种(系)在正常条件下无 3 叶黄比例,但在 2 种胁迫条件下增加了 3 叶黄比例(表 1)。不同材料在 4 叶长和 3 叶黄比例的差异可能与发育速度有关。在根重、地上重、1 叶黄比例、2 叶黄比例、3 叶长、苗高、叶绿素 b 含量、类胡萝卜素含量这几个指标上,不同处理对供试小麦造成的影响不同,这与品种(系)本身的耐热性和耐旱性有关。由此可知,热胁迫和旱热胁迫对不同小麦材料生长发育的影响不同,利用单一指标不能很好地反映不同材料的耐受能力。

2.2 耐胁迫指数及相关性分析

抽取表 1 中胁迫处理下在大部分材料中均发生变化的指标进行耐胁迫指数分析,比较热胁迫和旱热胁迫下的耐胁迫指数。如表 2 所示,旱热胁迫降低了根重、地上重、3 叶长、苗高、叶绿素 a 含量、总

表 1 不同胁迫处理下小麦指标的变化

指标	处理	石家庄 8号	西农 979	西农 9871	小偃 9号	石麦 14	洛旱 23	中洛 595	陇育 4号	洛麦 29	郑麦 366	晋麦 97	运早 139	晋麦 98	晋麦 92	晋麦 91
根重 (g)	对照	0.27a	0.19a	0.13a	0.20a	0.22a	0.14a	0.09a	0.08a	0.09a	0.06a	0.12a	0.11a	0.12a	0.09a	0.11a
	热胁迫	0.13b	0.18a	0.15a	0.12b	0.12b	0.15a	0.12b	0.07a	0.08a	0.05a	0.08b	0.11a	0.11a	0.07a	0.06b
	旱热胁迫	0.15b	0.12b	0.14a	0.08c	0.12b	0.12b	0.13b	0.09a	0.07b	0.09b	0.06b	0.09b	0.10a	0.08a	0.07b
地上重 (g)	对照	0.36a	0.29a	0.30a	0.42a	0.38a	0.23a	0.24a	0.27a	0.31a	0.15a	0.23a	0.23a	0.32a	0.27a	0.29a
	热胁迫	0.20b	0.23b	0.27b	0.26b	0.26b	0.23a	0.31a	0.24a	0.29a	0.17a	0.25a	0.24a	0.19b	0.24a	0.27a
	旱热胁迫	0.17b	0.10c	0.21c	0.11c	0.23b	0.10b	0.18b	0.11b	0.19b	0.12a	0.09b	0.17b	0.30a	0.16b	0.14b
1叶长 (cm)	对照	4.78a	6.68a	7.38a	9.28a	8.60a	6.20a	7.84a	7.34a	8.36a	7.84a	5.96a	9.48a	7.80a	6.96a	5.02a
	热胁迫	4.44a	6.92a	7.64a	8.34a	7.88a	6.00a	7.72a	8.18a	7.88a	8.04a	6.16a	9.54a	7.68a	6.64a	5.50a
	旱热胁迫	5.12a	6.62a	7.50a	8.58a	8.40a	6.28a	7.46a	9.20b	8.14a	8.18a	5.44a	8.60b	7.82a	5.88a	5.44a
1叶黄 比例 (%)	对照	29.74a	25.87a	7.84a	1.10a	2.33a	2.15a	12.99a	6.67a	6.90a	9.19a	7.14a	1.02a	1.67a	10.29a	16.24a
	热胁迫	92.00b	41.01b	16.89b	5.13b	15.50b	3.46a	8.25a	5.13a	2.61a	19.35a	3.24a	2.10a	57.59b	81.31c	8.21a
	旱热胁迫	70.94b	59.72c	19.34b	34.86c	29.58c	65.33b	18.79a	33.74b	35.73b	24.79a	30.26b	14.62b	62.60b	62.21b	33.18b
2叶长 (cm)	对照	9.30a	10.32a	12.62a	17.70a	15.66a	8.20a	12.60a	14.66a	13.22a	9.12a	11.78a	16.18a	13.48a	14.26a	12.24a
	热胁迫	8.46a	10.48a	13.40a	17.30a	14.42a	8.70a	14.34b	15.38a	14.16a	12.72b	12.26a	16.70a	13.74a	13.80a	12.74a
	旱热胁迫	9.68a	9.20a	13.50a	18.88a	15.36a	7.62a	13.34a	14.72a	14.50a	12.74b	8.78b	16.16a	13.54a	13.44a	12.28a
2叶黄 比例 (%)	对照	0	2.70a	0.15a	0.72a	1.38a	0.48a	0.43a	0	0.71a	4.37a	0.37a	0	0	7.02a	0.64a
	热胁迫	12.93a	24.97b	9.75a	4.10a	6.38a	1.15a	1.40a	0	1.72a	3.91a	0.98a	0.83a	21.31a	35.77b	0.14a
	旱热胁迫	10.39a	28.86b	18.26b	28.34b	15.72b	50.83b	16.85b	33.20a	27.44b	8.15a	10.20b	11.34b	44.53b	10.68a	11.64b
3叶长 (cm)	对照	14.00a	14.74a	12.54a	18.76a	14.50a	10.44a	10.08b	13.18a	13.34a	6.66a	13.14b	8.18a	16.60a	11.66a	17.14a
	热胁迫	12.00a	14.02a	13.84a	11.20b	14.10a	11.28a	13.30a	10.92b	11.40b	5.38a	14.56a	7.90a	10.98b	10.52b	15.52b
	旱热胁迫	14.24a	11.72b	11.06b	4.68c	11.40b	9.28b	9.00b	0.38c	6.66c	2.66b	6.40c	3.18b	8.88b	7.62c	6.00c
3叶黄 比例 (%)	对照	0	0	0.31a	0	0.32a	0	1.18a	0	0	0	0	0	0	0	0
	热胁迫	3.20b	11.66a	4.33b	0.20a	2.76a	0.89a	0.16a	0	0.94a	0	0	0	4.07a	17.38b	0
	旱热胁迫	1.29a	14.28a	5.86b	26.63b	16.88b	29.11b	9.97b	0	8.60b	0	0	0	9.99a	2.70a	0
4叶长 (cm)	对照	14.52a	8.52a	2.96a	0	0	7.66a	1.94a	0	0	0	1.88a	0	8.01a	2.56a	7.38a
	热胁迫	6.62b	2.72b	0.80b	0	0	6.30a	1.94a	0	0	0	0	0	0	0	2.56b
	旱热胁迫	4.84b	0.70b	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
苗高 (cm)	对照	19.48a	18.48a	17.92a	24.14a	22.68a	13.52a	16.24a	19.40a	18.48a	11.98a	17.26b	18.28a	21.66a	18.26a	20.98a
	热胁迫	15.70b	17.68a	17.68a	23.24a	19.88b	14.30a	18.16a	19.30a	18.80a	15.84b	18.68a	20.48a	18.26b	18.20a	18.78b
	旱热胁迫	17.16b	14.84b	17.12a	22.50a	20.58b	12.30b	16.58a	17.98a	18.04a	15.96b	12.98c	19.36a	17.84b	17.68a	15.66c
叶绿素 a 含量 (mg/g)	对照	4.70a	2.64a	4.33a	4.23a	4.05a	5.55a	4.69a	4.34a	3.57a	4.80a	3.95a	4.20a	5.44a	5.21a	4.38a
	热胁迫	4.25b	1.83b	3.93b	3.41b	3.26b	4.12b	4.21b	2.71b	2.56b	3.01b	3.24b	3.42b	4.25b	3.50b	3.24b
	旱热胁迫	3.42c	1.42c	2.31c	2.57c	2.64b	3.06c	2.15c	1.32c	1.35c	1.97c	1.83c	1.53c	3.27c	1.98c	2.12c
叶绿素 b 含量 (mg/g)	对照	0.40a	0.20a	0.48a	0.42a	0.46a	0.50a	0.43a	0.45a	0.03a	0.03a	0.03a	0.02a	0.03a	0.01a	0.03a
	热胁迫	0.35a	0.19a	0.36b	0.32b	0.36b	0.40a	0.39a	0.37a	0.03a	0.02a	0.03a	0.03a	0.02a	0.03a	0.03a
	旱热胁迫	0.35a	0.20a	0.08c	0.28b	0.30b	0.27b	0.42a	0.01b	0.04a	0.02a	0.04a	0.09a	0.03a	0.02a	0.02a
类胡萝卜 素含量 (mg/g)	对照	1.27a	0.75a	0.84a	1.12a	1.14a	1.49a	1.30a	1.15a	0.23a	0.24a	0.23a	0.20a	0.21a	0.27a	0.23a
	热胁迫	1.14b	0.55b	0.68a	0.90a	0.93b	1.08b	1.10b	0.75b	0.25a	0.25b	0.23a	0.23a	0.22a	0.23a	0.23a
	旱热胁迫	0.94c	0.43c	0.80a	0.78b	0.82b	0.82c	0.77c	0.47b	0.27a	0.29c	0.26b	0.29a	0.23a	0.30a	0.26a
总叶绿素 含量 (mg/g)	对照	5.10a	2.85a	4.81a	4.65a	4.51a	6.04a	5.12a	4.78a	3.60a	4.83a	3.98a	4.22a	5.47a	5.22a	4.40a
	热胁迫	4.61b	2.02b	4.29b	3.73b	3.62b	4.52b	4.60b	3.07b	2.59b	3.03b	3.27b	3.44b	4.27b	3.53b	3.27b
	旱热胁迫	3.77c	1.62c	2.39c	2.84c	2.94b	3.33c	2.56c	1.31c	1.39c	1.99c	1.87c	1.62c	3.29c	2.00c	2.15c

1~4叶指植株从下到上的第1~4片叶;同列不同小写字母表示在0.05水平上存在显著差异

叶绿素含量的平均耐胁迫指数,大大增加了1叶黄比例的平均耐胁迫指数,早热共胁迫比单一热胁迫对小麦造成的伤害更加严重。热胁迫下叶绿素 a 含量和总叶绿素含量的耐胁迫指数在所有材料中均降低,其余指标有些材料可能降低(数值小于1),而有些材料反而增加(数值大于1),再次说明不同小麦材料在不同指标上的热胁迫响应存在较大区别。早热胁迫均降低了地上重、叶绿素 a 含量、总叶绿素含量的耐胁迫指数,而其余指标上不同小麦材料的早热胁迫响应有所不同。分析各个指标的变异系数可以发现,材料间表现出的耐胁迫能力差异较大,具有丰富的表型变化,但给耐热和耐早热评价增加了难度。

如表3所示,在热胁迫条件下,根重的耐胁迫指数与地上重、3叶长、苗高的耐胁迫指数呈显著正相关;地上重的耐胁迫指数与1叶黄比例的耐胁迫指数呈显著负相关,与3叶长、苗高的耐胁迫指数呈极显著正相关;1叶黄比例的耐胁迫指数与3叶长的耐胁迫指数呈显著负相关;叶绿素 a 含量的耐胁迫指数与总叶绿素含量的耐胁迫指数呈极显著正相

关。在早热胁迫条件下,根重的耐胁迫指数与地上重、苗高的耐胁迫指数呈极显著正相关,与叶绿素 a 含量、总叶绿素含量的耐胁迫指数呈显著负相关;地上重的耐胁迫指数与苗高、类胡萝卜素含量的耐胁迫指数呈显著正相关;3叶长的耐胁迫指数与叶绿素 a 含量、总叶绿素含量的耐胁迫指数呈显著或极显著正相关;叶绿素 a 含量的耐胁迫指数与总叶绿素含量的耐胁迫指数呈极显著正相关。总体来看,热胁迫和早热胁迫对各指标耐胁迫指数间关系的影响不同,在胁迫条件下更容易看出性状间的相互作用。

2.3 不同胁迫处理下耐胁迫指数的主成分分析

对表3中的8个指标的耐胁迫指数进行主成分分析,以特征向量值>1为标准提取到3个主成分,结果见表4。热胁迫下,主成分1的贡献率为36.954%,主要反映根重、地上重、3叶长、苗高耐胁迫指数的信息;主成分2的贡献率为29.459%,主要反映3叶长、叶绿素 a 含量、总叶绿素含量耐胁迫指数的信息;主成分3的贡献率为15.301%,主要反映

表2 参试小麦品种的耐胁迫指数

指标	热胁迫			早热胁迫		
	指数范围	平均值	变异系数(%)	指数范围	平均值	变异系数(%)
根重	0.47~1.30	0.85	27.36	0.41~1.39	0.84	34.44
地上重	0.54~1.27	0.89	23.04	0.26~0.94	0.57	32.46
1叶黄比例	0.38~34.38	4.60	179.68	1.45~37.38	10.69	111.06
3叶长	0.60~1.32	0.93	193.88	0.03~1.02	0.59	102.00
苗高	0.81~1.32	1.00	18.88	0.75~1.33	0.93	46.31
叶绿素 a 含量	0.62~0.91	0.77	75.65	0.30~0.73	0.50	70.13
类胡萝卜素含量	0.65~1.13	0.89	94.77	0.41~1.42	0.90	226.81
总叶绿素含量	0.63~0.90	0.77	12.48	0.27~0.74	0.50	14.83

表3 耐胁迫指数的相关性分析

指标	根重	地上重	1叶黄比例	3叶长	苗高	叶绿素 a 含量	类胡萝卜素含量	总叶绿素含量
根重		0.598**	-0.274	0.016	0.667**	-0.503*	-0.011	-0.501*
地上重	0.570*		0.065	0.127	0.485*	-0.131	0.507*	-0.124
1叶黄比例	-0.021	-0.510*		-0.122	-0.131	0.3461	-0.071	0.326
3叶长	0.533*	0.666**	-0.466*		-0.102	0.572*	-0.224	0.603**
苗高	0.442*	0.826**	-0.400	0.294		-0.366	0.207	-0.354
叶绿素 a 含量	0.079	-0.135	0.026	0.400	-0.308		-0.295	0.987**
类胡萝卜素含量	-0.125	0.199	0.175	-0.139	0.256	0.088		-0.281
总叶绿素含量	0.087	-0.132	0.017	0.416	-0.321	0.998**	0.066	

右上角为早热胁迫下的相关性分析,左下角为热胁迫下的相关性分析; *、** 分别表示在 0.05、0.01 水平上存在显著、极显著相关性

1 叶黄比例和类胡萝卜素含量耐胁迫指数的信息; 3 个主成分的累计贡献率达到了 81.714%。早热胁迫下,主成分 1 的贡献率为 41.602%,主要反映叶绿素 a 和总叶绿素含量耐胁迫指数的信息;主成分 2 的贡献率为 21.590%,主要反映地上重、3 叶长耐胁迫指数的信息;主成分 3 的贡献率为 15.709%,主要反映 1 叶黄比例和类胡萝卜素含量耐胁迫指数的信息;3 个主成分的累计贡献率达到了 78.902%。

2.4 小麦材料的耐热性和耐旱热性综合评价
分别计算热胁迫和早热胁迫处理条件下各

指标的隶属函数值和权重,并据此分别计算出不同处理下小麦材料的综合评价 *D* 值,结果见表 5。热胁迫条件下,3 个主成分的权重分别是 0.452、0.361、0.187,*D* 值变化范围为 0.285~0.905;*D* 值为 0.285~0.397 的材料为热敏感型,0.437~0.548 的材料为中等敏感型,0.697~0.736 的材料为中等耐受型;只有中洛 595 为耐受型,*D* 值为 0.905。早热胁迫条件下,3 个主成分的权重分别是 0.527、0.274、0.199,*D* 值变化范围为 0.133~0.811;只有陇育 4 号为敏感型,*D* 值为 0.133;*D* 值为 0.359~0.420 的材料

表 4 耐胁迫指数的主成分分析

指标	热胁迫处理			早热胁迫处理		
	主成分 1	主成分 2	主成分 3	主成分 1	主成分 2	主成分 3
特征值	2.956	2.357	1.224	3.328	1.727	1.257
贡献率(%)	36.954	29.459	15.301	41.602	21.590	15.709
累计贡献率(%)	36.954	66.413	81.714	41.602	63.193	78.902
根重	0.669	0.148	-0.037	-0.734	0.460	-0.330
地上重	0.959	-0.121	0.146	-0.484	0.734	0.356
1 叶黄比例	-0.599	0.007	0.374	0.356	0.053	0.656
3 叶长	0.757	0.507	-0.194	0.469	0.672	-0.376
苗高	0.808	-0.380	0.265	-0.665	0.447	-0.046
叶绿素 a 含量	-0.031	0.976	0.146	0.890	0.385	0.080
类胡萝卜素含量	0.051	-0.043	0.958	-0.437	0.106	0.661
总叶绿素含量	-0.025	0.982	0.120	0.886	0.404	0.068

表 5 不同小麦材料在胁迫下的 *D* 值及综合评价

材料名称	热胁迫		早热胁迫	
	<i>D</i> 值	综合评价	<i>D</i> 值	综合评价
石家庄 8 号	0.486	MS	0.811	HT
西农 979	0.394	S	0.555	MHT
西农 9871	0.722	MHT	0.554	MHT
小偃 9 号	0.353	S	0.655	HT
石麦 14	0.437	MS	0.749	HT
洛早 23	0.548	MS	0.665	HT
中洛 595	0.905	HT	0.475	MHT
陇育 4 号	0.285	S	0.133	S
洛麦 29	0.531	MS	0.390	MS
郑麦 366	0.511	MS	0.359	MS
晋麦 97	0.697	MHT	0.474	MHT
运早 139	0.736	MHT	0.420	MS
晋麦 98	0.397	S	0.805	HT
晋麦 92	0.383	S	0.404	MS
晋麦 91	0.471	MS	0.471	MHT

HT:耐受型;MHT:中等耐受型;MS:中等敏感型;S:敏感型

为中等敏感型;0.471~0.555 的材料为中等耐受型;0.665~0.811 的材料为耐受型。

对 *D* 值进行聚类分析并对材料的耐胁迫能力等级进行划分,结果见图 1。热胁迫处理下,15 个小麦品种可分为 4 类,西农 979、晋麦 98、晋麦 92、小偃 9 号、陇育 4 号为第 1 类,属于敏感型;洛早 23、洛麦 29、郑麦 366、石家庄 8 号、晋麦 91、石麦 14 为第 2 类,属于中等敏感型;西农 9871、运早 139、晋麦 97 为第 3 类,属于中等耐受型;中洛 595 为第 4 类,属于耐受型。早热胁迫处理下,15 个小麦品种可分为 3 类,陇育 4 号为第 1 类,属于敏感型;小偃 9 号、洛早 23、石家庄 8 号、晋麦 98、石麦 14 为第 2 类,属于耐受型;洛麦 29、晋麦 92、运早 139、郑麦 366、中洛 595、晋麦 97、晋麦 91、西农 979、西农 9871 为第 3 类,属于中等型。结合总叶绿素含量的胁迫指数,可将第 3 类进一步细分成 2 种类型:中等敏感型,包括洛麦 29、晋麦 92、运早 139、郑麦 366;中等耐受型,包括中洛 595、晋麦 97、晋麦 91、西农 979、西农 9871。

综合 2 种胁迫处理的评价结果可以发现,陇育 4 号均为敏感型,洛麦 29 和郑麦 366 均为中等敏

感型,西农 9871 和晋麦 97 均为中等耐受型,晋麦 92 在两种处理下分别为敏感型和中等敏感型,中洛 595 为耐受型和中等耐受型。

3 讨论

热胁迫是小麦生产中常见的非生物胁迫之一,建立小麦耐热评价体系并评估种质资源的耐热性对耐热小麦材料的推广利用具有重要意义。小麦耐热性是一个典型的微效多基因控制的数量性状,需要综合多个表型性状对小麦耐热性进行评估。本研究探究了苗期热胁迫和早热胁迫对小麦不同指标的影响,发现这 2 种胁迫均对根重、地上重、1 叶黄比例、3 叶长、苗高、叶绿素含量等产生了显著影响。张闪闪等^[7]对 32 个小麦品系的研究也发现苗期热胁迫可导致苗高、叶绿素含量等显著降低。对比热胁迫和早热胁迫的综合评价结果可以发现,只有 5 个材料在 2 种胁迫条件下表现出相同或相似的评价结果,这意味着小麦对这 2 种胁迫的响应方式和生理过程可能有明显的区别。因此,在评估小麦耐热性以及小麦耐热性机理研究中,不能够简单地将这 2 种胁迫化为同一种处理。

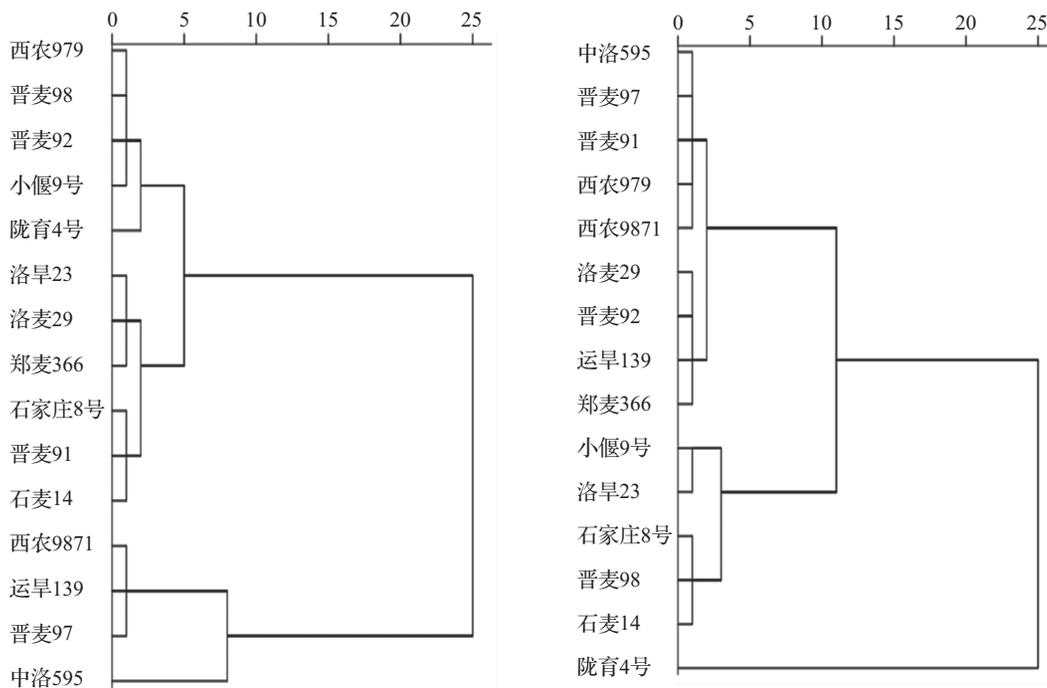


图 1 热胁迫(左)和早热胁迫(右)处理下小麦材料 *D* 值的聚类分析

本研究通过主成分分析将 8 个指标转化成了 3 个主成分进行分析,通过计算这些主成分的隶属函数和权重最终得出综合评价 D 值,结合聚类分析将材料划分成不同的耐胁迫等级,有效避免了单一指标评价带来的偏差。类似的方法已经大量应用于小麦耐热性、耐盐性评价等^[8-11],被证明是一种有效的评估方法,对未来的小麦种质资源耐热性和耐旱性评估工作具有重要意义。

本研究按照对胁迫的耐受型将小麦分成了 4 类:中洛 595 属于耐受型;西农 9871、晋麦 97、运早 139 属于中等耐受型;石家庄 8 号、石麦 14、晋麦 91、洛早 23、洛麦 29、郑麦 366 属于中等敏感型;西农 979、小偃 9 号、陇育 4 号、晋麦 98、晋麦 92 属于敏感型。西农 979 和石麦 14 在大田小麦灌浆期热胁迫研究中也属发现属于热敏感型材料^[5,8],这 2 个材料可能在苗期和生育后期均不耐热。石家庄 8 号、郑麦 366 在灌浆期热胁迫研究中发现分别属于抗热型材料^[5]、中等耐热型材料^[6],与本文研究结论不一致,可能是因为评估的时期和测定的指标不同。

综合本文试验结果,根重、地上重、1 叶黄比例、3 叶长、苗高、叶绿素含量可作为小麦材料苗期的耐热性和耐旱性的鉴定指标。当前,小麦种质资源耐热性评估的难点是缺乏系统的、统一的评价体系,导致不同研究可能出现不同甚至相反的结果,严重阻碍了对小麦耐热性的研究,应当加快建立完整的小麦耐热评估体系,以满足未来小麦耐热机理研究和耐热遗传改良的需要。

参考文献

- [1] 辛明明,彭惠茹,倪中福,姚颖垠,孙其信.小麦耐热性的生理遗传研究进展.中国农业科学,2017,50(5):783-791
- [2] 刘秀坤,王克森,翟胜男,张华锋,单宝雪,肖延军,李豪圣,刘建军,张玉梅,孟福燕,曹新有,赵振东.小麦灌浆期耐高温性状 QTL 定位与分析.山东农业科学,2022,54(11):1-10
- [3] 王松峰,王永霞,郭瑞.小麦耐热性研究进展.大麦与谷类科学,2024,41(5):1-7
- [4] 赵鹏,王小明,刘曼双,许盛宝.小麦种质资源耐热性评估研究进展.麦类作物学报,2021,41(5):569-576
- [5] 陈冬梅,马永安,刘保华,苏玉环,王雪香.小麦耐热种质资源的鉴定与筛选.河北农业科学,2017,21(4):64-69
- [6] 李敏,苏慧,李阳阳,李金鹏,李金才,朱玉磊,宋有洪.黄淮海麦区小麦耐热性分析及其鉴定指标的筛选.中国农业科学,2021,54(16):3381-3393
- [7] 张闪闪,张旭斌,田仁美,高志鹏,陈亮,胡银岗.小麦新品系苗期的耐热性评价.麦类作物学报,2024,44(10):1279-1286
- [8] 常明娟,楚宗艳,杜玉倍,赵国建,吴超,占亚楠,刘素玲,汤玉焯.高温胁迫下小麦生理指标的主成分分析及综合评价.湖南农业大学学报:自然科学版,2023,49(1):1-11
- [9] 孙现军,姜奇彦,胡正,李宏博,庞斌双,张凤廷,张胜全,张辉.小麦种质资源苗期耐盐性鉴定评价.作物学报,2023,49(4):1132-1139
- [10] 王昊博,夏建强,张鹏鹏,金永伟,张跃强,耿洪伟.春小麦种质资源耐热性筛选及鉴定.新疆农业科学,2025,62(7):1586-1594
- [11] 师毅君,王康君,郭明明,何宁秀,张广旭,谭一罗,李晓峰,何茂盛,樊继伟.高温胁迫对小麦农艺性状的影响及品种(系)综合评价.中国种业,2024(10):78-86

(收稿日期:2025-12-05)

(上接第 95 页)

- [4] 胡润慧,汪军成,司二静,张宏,李兴茂,马小乐,孟亚雄,王化俊,刘青,姚立蓉,李葆春.小麦苗期耐旱耐盐种质筛选及抗旱耐盐综合评价.作物学报,2025,51(9):2371-2386
- [5] 汪强,姜华,杨红燕,沈会权,徐肖,张英虎,程怡璠,梁志浩,薛松,郭爱奎,于文青,李宇星.盐碱地胁迫对江苏麦区小麦籽粒品质的影响.大麦与谷类科学,2025,42(5):36-41
- [6] 姜丽秋.小麦耐盐种质筛选及盐碱地栽培调控技术初步研究.扬州:扬州大学,2024
- [7] 李梦成,李明,郭波莉,赵海燕,唐娜,许锐,王伟伟.旱碱胁迫对小麦产量和籽粒品质的影响.核农学报,2025,39(2):351-359
- [8] 曹华宁.黄骅不同旱碱地小麦品种生育特性及产量比较试验.农业科技通讯,2023(6):65-67
- [9] 朱小乐.黄河三角洲地区盐碱地小麦栽培技术.河北农机,2025(3):97-99
- [10] 许肖云,郭玉婧.2023-2024 年度洛阳市小麦品种筛选试验.中国种业,2025(2):113-121
- [11] 刘昌文,张胜全,雷均杰,台外库力·吾斯曼,聂石辉,曲曼姑丽·库尔班,热依汉古丽·托合提夏,朱明慧,张永强,龚举武.喀什地区耐盐碱冬小麦品种(系)筛选研究.中国种业,2024(9):77-83

(收稿日期:2025-12-24)