

DOI: 10.19462/j.cnki.zgzy.20240708003

高温胁迫对小麦农艺性状的影响及 品种(系)综合评价

师毅君¹ 王康君¹ 郭明明¹ 何宁秀² 张广旭¹ 谭一罗¹ 李晓峰¹ 何茂盛¹ 樊继伟¹
(¹江苏省连云港市农业科学院,连云港 222000;²江苏省连云港市农业信息中心,连云港 222000)

摘要:为探究不同小麦品种之间耐热性的差异,筛选耐热性好的优异种质,选用65个小麦品种(系),采用大棚覆膜增温的方式,研究花后高温胁迫对不同品种(系)植株形态和籽粒性状的影响,利用千粒重热感指数和相关性分析筛选出与耐热性相关的关键指标,采用隶属函数法、聚类分析对品种(系)进行耐热性综合评价。结果表明,高温胁迫下大多数小麦品种的株高、穗长、千粒重呈明显下降趋势,籽粒长的变化趋势不明显;相关性分析显示,千粒重、面积、粒宽、直径与所有籽粒性状的耐热系数均存在极显著相关,说明各性状的耐高温能力存在重叠;主成分分析将9个农艺性状划分成3个主成分,累计贡献率为83.781%;根据千粒重热感指数和综合评价筛选出烟农19、04中36、偃展4110、山农19、镇麦168、连麦6号共6个品种为极耐热品种,可作为小麦耐热育种的优良遗传资源。

关键词:小麦;高温胁迫;植株表型;籽粒性状;耐热性

Effect of High Temperature Stress on Agronomic Traits of Wheat and Varieties (Lines) Comprehensive Evaluation

SHI Yijun¹, WANG Kangjun¹, GUO Mingming¹, HE Ningxiu², ZHANG Guangxu¹,
TAN Yiluo¹, LI Xiaofeng¹, HE Maosheng¹, FAN Jiwei¹
(¹Lianyungang Academy of Agricultural Sciences, Lianyungang 222000, Jiangsu;
²Lianyungang Agricultural Information Center, Lianyungang 222000, Jiangsu)

小麦是我国最重要的粮食作物之一,随着温室效应的加剧,世界范围内极端高温天气频繁发生,对小麦生产造成较大影响。据报道,气温每升高1℃,全球小麦产量降低4.1%~6.4%^[1]。在我国小麦的主要产区,特别是黄淮海麦区和北部冬麦区,小麦生长后期经常面临超过30℃的高温挑战,同时这些区域还存在干旱、强光、干热风等不利条件,对小麦的产量和品质造成了较大影响,部分年份受影响的区域甚至占据全国小麦种植总面积的2/3以上,导致小麦产量减少10%~20%^[2-3]。全球气温的持续上升

使高温胁迫已经成为限制作物产量增长的关键因素^[4-5]。研究表明,高温对小麦生长不同阶段的影响存在差异,在小麦出苗到分蘖阶段,高温主要导致分蘖数量减少;在拔节至开花阶段,高温则使单株穗数、穗粒数和千粒重等关键生长指标降低;在开花后至成熟阶段,高温主要通过缩短灌浆期来降低籽粒重量,并影响籽粒的品质特性^[6-7]。值得注意的是,灌浆期是小麦生长周期中决定最终产量和品质的关键阶段,理想的灌浆期温度应在18~22℃之间,一旦日均气温超过26~28℃的上限,就会对小麦产生一定程度的高温胁迫^[8]。

众多学者对高温胁迫下小麦的生长发育、产量品质、生理生态等方面进行了研究,对指导小麦

基金项目:江苏省种业振兴“揭榜挂帅”项目[JBGS(2021)052];
连云港市财政局专项资金项目(QNJ2414)

通信作者:樊继伟

的生产和发展产生了极大的推动作用。杨绚等^[9]认为,小麦开花前期对高温较为敏感,越接近开花期,高温胁迫对产量影响越严重。费立伟等^[10]研究发现,高温胁迫下,晚播可延长小麦灌浆期,加快灌浆速率,从而使粒重增加,缓解高温胁迫带来的减产。小麦旗叶可溶性蛋白含量和可溶性糖含量在一定程度上可作为小麦耐热评价指标^[11]。本研究以65个小麦品种(系)为试验材料,采用大棚覆膜增温的方式模拟高温胁迫,探究不同品种在高温胁迫下的性状表达,采用隶属函数法和千粒重热感指数进行综合分析,对材料进行耐热性评价,以期创制具有优异耐热特性的小麦新品种提供基础材料。

1 材料与方法

1.1 试验材料 本研究选用65份小麦材料,包括连云港市农业科学院自育品种(系)11份,各麦区优异品种(系)54份,其中安徽省3份、河北省1份、河南省18份、江苏省14份、山东省9份、山西省1份、陕西省5份、北京市3份。

1.2 试验设计 试验于2022–2023年在连云港市农业科学院东辛试验基地进行(42°32′42″N, 119°12′12″E),试验地前茬为大豆。采用随机区组设计,设置高温和自然环境生长(对照)2种处理,3次重复。65份小麦材料随机排列,每份材料种植3行,行长1.5m,行间距25cm,生长季统一田间管理。

1.3 测定项目及方法 采用塑料大棚模拟高温环境,小麦灌浆期起覆棚膜至收获,每天增温时间段为9:00–17:00。利用精创温度记录仪实时监测田间和棚内温度变化,所有温度记录仪悬挂在小麦冠层处,每30min记录1次数据,取平均值计算处理期间不同时间段的温度,小麦生长期间温度变化情况见图1。于成熟期随机选取10株小麦,调查各品种

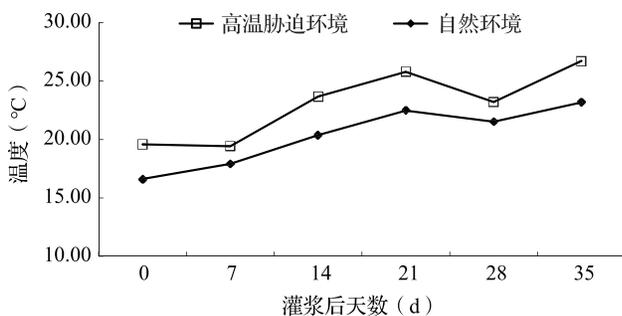


图1 小麦灌浆期自然环境和高温胁迫环境温度变化

(系)株高、穗长,收获后籽粒的千粒重和籽粒面积、周长、粒长、粒宽、直径、圆度用万深SC-G自动考种仪测定。

1.4 数据分析 采用Excel 2016和SPSS统计分析测得的数据,采用TBtools作图。相关指标计算如下。

(1)参照李敏等^[12]的方法计算耐热系数:耐热系数=高温胁迫性状值/对照性状值。

(2)根据李敏等^[12]、常明娟等^[13]的方法计算各综合指标的隶属函数值、权重和D值:隶属函数值: $\mu(X_j) = (X_j - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$,其中 $j=1, 2, 3, \dots, n$, X_j 表示第 j 个综合指标, X_{\min} 和 X_{\max} 分别表示每个主成分上各性状指标得分值的最小值和最大值; $w_j = p_j / \sum_{j=1}^n p_j$, w_j 表示第 j 个主成分的权重, p_j 表示提取的主成分所对应的特征值; $D = \sum_{j=1}^n [\mu(X_j) \times w_j]$, D 值表示各小麦品种在高温处理下由综合指标评价所得的耐热性综合评价。

(3)根据王小波等^[14]的方法,计算千粒重的热感指数(H): $H = (1 - T_1 / T_0) / (1 - \bar{T}_1 / \bar{T}_0)$ 。式中 T_1 为某一材料在高温胁迫下的千粒重, T_0 为自然环境下的千粒重。 \bar{T}_1 为高温胁迫环境下千粒重的平均值, \bar{T}_0 为自然环境下千粒重的平均值。以 H 为耐热性评价指标,评价标准如下: $H < 0.5$ 为极耐热材料, $0.5 \leq H < 1.0$ 为耐热材料, $1.0 \leq H < 1.5$ 为热敏感材料, $H \geq 1.5$ 为极敏感材料。

2 结果与分析

2.1 高温胁迫对小麦株高和籽粒性状的影响 高温胁迫下小麦的株高和籽粒性状与对照处理相比均呈下降趋势,变幅在-16.06%~0之间(表1)。其中株高和穗长较籽粒性状下降幅度较大,穗长下降幅度最大,为16.06%。籽粒性状中,千粒重下降幅

表1 高温胁迫下小麦各性状表型分析

性状	对照平均值	高温胁迫后平均值	变幅(%)
株高(cm)	79.06 ± 7.98	66.53 ± 7.16	-15.85
穗长(cm)	10.21 ± 1.03	8.57 ± 0.80	-16.06
千粒重(g)	43.85 ± 4.00	41.20 ± 3.64	-6.04
面积(mm ²)	16.89 ± 1.21	16.60 ± 1.10	-1.72
周长(mm)	16.96 ± 0.64	16.87 ± 0.61	-0.53
粒长(mm)	6.51 ± 0.32	6.51 ± 0.28	0
粒宽(mm)	3.30 ± 0.16	3.25 ± 0.15	-1.52
直径(mm)	4.62 ± 0.17	4.58 ± 0.15	-0.87
圆度	0.51 ± 0.04	0.50 ± 0.032	-1.96

度最大,为6.04%,其次为圆度、面积和粒宽,粒长基本无下降,说明造成千粒重下降的主要原因可能为籽粒饱满度降低。

2.2 各品种(系)不同性状耐热系数及其相关性分析 不同小麦品种(系)各性状的耐热系数存在较大差异(表2)。经高温处理后,株高和穗长耐热系数均降低(耐热系数小于1.00),说明受高温胁迫影响较大;除千粒重外,籽粒性状耐热系数的变化在不

同品种间表现差异较大,说明通过耐热系数对小麦品种进行评价存在片面性。因此,分析了65个品种(系)各性状耐热系数的相关性(表3)。千粒重、面积、粒宽、直径与所有籽粒性状的耐热系数均存在极显著相关性;周长、粒长与除圆度外的籽粒性状均存在极显著相关性;圆度与千粒重、面积、粒宽、直径呈极显著相关。由此可见,各性状的耐高温能力存在重叠,籽粒性状间相关性更大。

表2 不同小麦品种(系)各性状的耐热系数

品种(系)	株高	穗长	千粒重	面积	周长	粒长	粒宽	直径	圆度
烟农 19	0.81	0.86	0.99	1.10	1.02	1.04	1.05	1.05	1.02
新麦 19	0.88	0.84	1.00	1.07	0.98	1.03	1.04	1.03	1.02
04 中 36	0.84	0.77	1.07	1.17	1.03	1.06	1.10	1.08	1.04
偃展 4110	0.84	0.81	1.08	1.13	1.02	1.06	1.06	1.06	1.01
济麦 23	0.80	0.75	0.98	1.02	0.97	1.01	1.00	1.01	1.00
郑麦 136	0.87	0.85	0.91	1.05	0.97	1.03	1.01	1.02	0.99
丰德存麦 21 号	0.84	0.81	0.98	0.96	0.99	0.99	0.98	0.98	0.98
淮麦 33	0.89	0.81	1.03	0.99	0.99	0.98	1.00	0.99	1.02
中麦 895	0.97	0.79	1.02	0.98	0.99	0.99	1.00	0.99	1.01
山农 19	0.93	0.88	1.06	1.09	1.04	1.05	1.04	1.04	0.99
扬麦 20	0.87	0.78	0.87	0.93	0.98	1.01	0.93	0.97	0.93
西农 511	0.88	0.97	0.98	0.99	1.00	1.01	0.97	0.99	0.96
郑麦 0856	0.84	0.82	0.93	0.99	1.00	1.00	0.99	1.00	0.99
周麦 18	0.91	0.81	0.99	0.89	0.95	0.95	0.93	0.94	0.97
山农 20	0.86	0.80	1.00	1.01	1.00	0.98	1.02	1.01	1.03
西农 586	0.94	0.78	0.89	0.86	0.91	0.90	0.95	0.93	1.07
连麦 21105	0.80	0.82	1.01	1.07	1.03	1.03	1.03	1.04	0.99
郑麦 7698	0.85	0.82	0.99	0.95	0.97	0.96	0.98	0.97	1.02
济麦 229	0.87	0.85	0.94	0.95	0.99	0.98	0.96	0.97	0.97
镇麦 168	0.98	0.85	0.99	1.03	1.03	1.04	1.00	1.02	0.96
淮麦 20	0.77	0.83	0.97	0.96	0.99	1.01	0.97	0.98	0.96
淮麦 4046	0.90	0.85	0.90	0.92	0.97	0.98	0.93	0.96	0.95
连麦 2123	0.71	0.86	1.07	1.05	1.01	1.00	1.04	1.02	1.05
连麦 21136	0.81	0.83	1.10	1.06	1.01	1.01	1.05	1.03	1.05
连麦 6 号	0.95	0.85	1.11	1.06	1.04	1.03	1.03	1.03	1.00
连麦 7 号	0.87	0.97	0.96	0.95	0.98	0.97	0.98	0.98	1.00
连麦 9 号	0.82	0.88	0.95	0.99	1.00	1.01	0.98	0.99	0.97
连麦 10 号	0.85	0.89	0.97	0.98	1.00	1.01	0.97	0.99	0.96
连麦 11 号	0.80	0.89	0.92	0.95	0.99	1.00	0.95	0.97	0.95

表 2 (续)

品种(系)	株高	穗长	千粒重	面积	周长	粒长	粒宽	直径	圆度
连麦 12 号	0.80	0.90	0.91	0.96	1.00	1.01	0.96	0.98	0.95
连麦 185	0.77	0.86	0.92	0.84	1.00	0.96	0.90	0.92	0.93
连麦 186	0.81	0.87	0.87	0.90	0.97	0.99	0.91	0.95	0.93
华光 8 号	0.84	0.97	0.91	0.89	0.99	0.98	0.91	0.94	0.93
南淮麦 191	0.85	0.78	0.92	0.93	0.98	0.98	0.95	0.96	0.97
淮核 20258	0.86	0.73	0.91	0.95	0.99	0.97	0.98	0.97	1.00
西农 156	0.84	0.84	0.93	0.92	0.98	0.95	0.97	0.96	1.01
宁 S19029	0.77	0.85	0.89	0.93	1.00	1.00	0.95	0.97	0.95
荷麦 29	0.78	0.88	0.90	0.92	1.00	1.00	0.94	0.96	0.93
商麦 185	0.85	0.82	0.88	0.92	0.99	0.98	0.92	0.96	0.94
西农 1152	0.90	0.98	0.87	0.95	0.97	0.98	0.96	0.97	0.97
陕禾 1028	0.87	0.84	0.88	0.96	0.98	0.97	0.97	0.98	1.00
宿 078	0.78	0.83	0.87	0.95	0.98	1.01	0.93	0.97	0.93
农大 759	0.78	0.78	0.82	0.98	0.98	1.01	0.97	0.99	0.96
濮马 531	0.78	0.86	0.92	0.98	1.00	1.01	0.97	0.99	0.96
德宏福麦 21	0.81	0.90	0.85	0.98	1.00	1.02	0.96	0.99	0.94
漯丰 2101	0.87	0.96	0.90	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.00
淮核 21126	0.87	0.85	0.87	1.03	1.02	1.06	0.98	1.02	0.93
保丰 216	0.89	0.85	0.96	1.07	1.01	1.03	1.03	1.04	0.99
淮麦 2108	0.82	0.82	0.98	1.03	0.99	0.98	1.04	1.01	1.08
冀优 9415	0.79	0.81	0.86	0.98	0.99	1.01	0.97	0.99	0.96
山农 12 号	0.91	0.86	0.89	0.96	0.98	0.99	0.97	0.98	0.98
济麦 20	0.88	0.89	0.77	0.89	0.96	0.98	0.92	0.94	0.94
晋麦 92	0.87	0.76	0.86	0.94	0.99	1.00	0.95	0.97	0.95
安科 1604	0.85	0.80	0.87	0.93	0.98	1.00	0.94	0.97	0.93
华成 9137	0.84	0.84	0.96	1.02	1.00	1.00	1.02	1.01	1.02
淮麦 12334	0.81	0.76	0.91	0.96	0.98	0.98	0.99	0.98	1.01
周麦 42	0.75	0.86	0.92	0.99	1.00	0.99	1.00	1.00	1.00
烟农 118	0.80	0.79	0.88	0.95	0.96	0.97	0.98	0.97	1.01
丰德存麦 13 号	0.94	0.85	1.00	1.02	1.01	1.00	1.00	1.01	1.00
百农 1316	0.83	0.83	1.02	1.04	1.02	1.01	1.02	1.02	1.01
洛麦 27	0.82	0.86	0.88	0.99	0.99	1.00	0.99	0.99	0.99
轮选 125	0.80	0.82	0.93	1.04	1.03	1.04	1.01	1.02	0.96
存麦 16	0.80	0.85	0.97	1.02	1.01	1.00	1.01	1.01	1.00
徐麦 12178	0.78	0.76	0.95	1.02	0.99	1.00	1.00	1.01	1.00
博麦 9 号	0.86	0.88	0.93	1.02	1.02	1.00	1.03	1.01	1.02
平均值	0.84	0.84	0.94	0.98	0.99	1.00	0.98	0.99	0.84

表3 各性状耐热系数相关性分析

指标	相关系数								
	株高	穗长	千粒重	面积	周长	粒长	粒宽	直径	圆度
株高	1								
穗长	0.053	1							
千粒重	0.146	-0.078	1						
面积	0.022	-0.085	0.647**	1					
周长	-0.078	0.154	0.523**	0.708**	1				
粒长	-0.036	0.071	0.320**	0.786**	0.772**	1			
粒宽	0.039	-0.144	0.715**	0.931**	0.580**	0.529**	1		
直径	0.022	-0.086	0.643**	1.000**	0.708**	0.788**	0.930**	1	
圆度	0.103	-0.241	0.588**	0.499**	0.059	-0.125	0.768**	0.498**	1

**表示在 0.01 水平(双侧)上极显著相关

2.3 各品种(系)不同性状耐热系数主成分分析

按照特征值大于 1 的标准提取主成分,结果表明前 3 个综合指标的累计贡献率为 83.781%,可代表各品种(系) 9 个不同性状耐热系数的绝大部分信息(表 4)。主成分 1 的贡献率为 53.676%,特征值为 4.831,籽粒面积和直径的载荷值较大;主成分 2 的贡献率为 18.273%,特征值为 1.645,穗长、粒长和周长的载荷值较大;主成分 3 的贡献率为 11.832%,特征值为 1.065,株高、穗长的载荷值较大。

表4 单项指标耐热系数主成分分析

指标	主成分		
	1	2	3
株高	0.009	-0.149	0.794
穗长	-0.018	0.315	0.525
千粒重	0.158	-0.168	0.163
面积	0.203	0.035	-0.037
周长	0.158	0.295	0.013
粒长	0.151	0.365	-0.047
粒宽	0.196	-0.150	-0.026
直径	0.203	0.036	-0.038
圆度	0.115	-0.462	0.018
特征值	4.831	1.645	1.065
贡献率(%)	53.676	18.273	11.832
累计贡献率(%)	53.676	71.949	83.781

根据公式计算参试材料各综合指标的隶属函数值(表 5),在综合指标 1 中,隶属函数值最大的是 04 中 36,表明此品种在该综合指标下表现为耐

热性最强;西农 586 最小,表明此品种在这一综合指标处表现为对高温最敏感。根据各综合指标贡献率计算得出 3 个主成分综合指标的权重分别为 0.641、0.218、0.141。根据权重和隶属函数值计算 D 值,对 65 个小麦品种(系)的耐热性进行综合评价, D 值越大表明其耐高温能力越强。由表 5 可知,各品种(系)之间存在广泛的变异性, D 值在 0.8 以上的品种有山农 19 和 04 中 36,分别为 0.823 和 0.804,表明其耐热性较强。

2.4 各品种(系)千粒重热感指数比较 从表 6 可以看出,在 65 份供试品种(系)中,连麦 6 号等 24 份材料 $H < 0.5$,为极耐热品种,占 36.92%;保丰 216 等 5 份材料 $0.5 < H < 1.0$,为耐热品种,占 7.69%;热敏感品种($1.0 \leq H < 1.5$)和极敏感品种($H \geq 1.5$)分别为 12 份和 24 份,分别占 18.46%、36.92%。结合综合评价 D 值进行分析,烟农 19、04 中 36、偃展 4110、山农 19、镇麦 168、连麦 6 号的热感指数和综合评价值均属于极耐热品种,说明其耐高温性较强。

3 讨论与结论

在全球气候持续变迁的背景下,小麦在灌浆期遭遇高温天气的现象愈发频繁,这使得对小麦耐热性的深入研究变得尤为重要^[15]。王小波等^[14]采用热感指数法对国内外 1325 份小麦进行耐热性评价,筛选出 103 份优异耐热资源。耿晓丽等^[16]通过研究细胞膜热稳定性、容重热感指数以及千粒重热感指数等指标,成功筛选出了耐热性较强小麦品种。同时,大量研究还揭示了外部环境因素对小麦籽粒发育的重要性,灌浆期遇高温天气会对小麦籽粒产

表5 不同小麦品种(系)耐高温能力综合评价

品种(系)	综合指标值			隶属函数值			综合评价值 D
	1	2	3	μ_1	μ_2	μ_3	
烟农 19	1.699	0.444	-0.411	0.770	0.754	0.359	0.708
新麦 19	1.140	-0.548	0.451	0.650	0.585	0.582	0.626
04 中 36	2.775	-0.513	-0.845	1.000	0.591	0.246	0.804
偃展 4110	2.180	0.279	-0.293	0.873	0.726	0.389	0.772
济麦 23	0.268	-0.929	-1.535	0.463	0.520	0.067	0.420
郑麦 136	0.519	-0.020	0.333	0.517	0.675	0.552	0.556
丰德存麦 21 号	-0.167	-0.371	-0.264	0.370	0.615	0.397	0.427
淮麦 33	0.319	-1.201	0.684	0.474	0.474	0.643	0.498
中麦 895	0.281	-1.525	1.543	0.466	0.418	0.866	0.512
山农 19	1.850	0.900	1.678	0.802	0.832	0.901	0.823
扬麦 20	-0.962	0.562	-0.364	0.200	0.775	0.371	0.349
西农 511	0.014	1.212	1.851	0.409	0.886	0.946	0.588
郑麦 0856	0.117	-0.140	-0.247	0.431	0.655	0.401	0.475
周麦 18	-1.353	-1.468	0.944	0.116	0.428	0.710	0.268
山农 20	0.560	-1.315	-0.066	0.526	0.454	0.448	0.499
西农 586	-1.894	-3.974	1.051	0	0	0.738	0.104
连麦 21105	1.414	0.528	-0.780	0.708	0.769	0.263	0.659
郑麦 7698	-0.464	-1.597	0.147	0.306	0.406	0.503	0.356
济麦 229	-0.517	-0.096	0.538	0.295	0.662	0.605	0.419
镇麦 168	0.901	0.803	2.026	0.599	0.816	0.991	0.701
淮麦 20	-0.211	0.517	-1.007	0.361	0.767	0.204	0.427
淮麦 4046	-1.077	0.067	0.933	0.175	0.690	0.708	0.362
连麦 2123	1.298	-0.585	-1.568	0.684	0.579	0.058	0.573
连麦 21136	1.551	-1.036	-0.302	0.738	0.502	0.387	0.637
连麦 6 号	1.644	0.143	1.833	0.758	0.703	0.941	0.772
连麦 7 号	-0.453	-0.181	1.748	0.309	0.648	0.919	0.469
连麦 9 号	0.094	0.663	-0.001	0.426	0.792	0.465	0.511
连麦 10 号	0.013	0.703	0.639	0.408	0.799	0.631	0.525
连麦 11 号	-0.531	0.930	-0.139	0.292	0.838	0.429	0.430
连麦 12 号	-0.384	1.245	-0.117	0.323	0.891	0.435	0.463
连麦 185	-1.811	0.697	-0.698	0.018	0.798	0.284	0.225
连麦 186	-1.544	0.735	-0.227	0.075	0.804	0.406	0.281
华光 8 号	-1.369	1.418	1.212	0.112	0.921	0.780	0.383

表 5 (续)

品种(系)	综合指标值			隶属函数值			综合评价值 D
	1	2	3	μ_1	μ_2	μ_3	
南淮麦 191	-0.827	-0.436	-0.465	0.228	0.604	0.345	0.327
淮核 20258	-0.423	-1.236	-0.869	0.315	0.468	0.240	0.338
西农 156	-0.769	-1.103	0.157	0.241	0.490	0.506	0.333
宁 S19029	-0.709	1.034	-1.083	0.254	0.855	0.184	0.375
菏麦 29	-0.889	1.262	-0.570	0.215	0.894	0.317	0.378
商麦 185	-1.125	0.443	-0.237	0.165	0.754	0.404	0.327
西农 1152	-0.777	0.511	2.059	0.239	0.766	1.000	0.461
陕禾 1028	-0.563	-0.639	0.341	0.285	0.570	0.554	0.385
宿 078	-0.876	1.044	-1.183	0.218	0.857	0.158	0.349
农大 759	-0.508	0.332	-1.792	0.297	0.735	0	0.351
濮马 531	-0.131	0.817	-0.787	0.378	0.818	0.261	0.457
德宏福麦 21	-0.326	1.641	-0.193	0.336	0.959	0.415	0.483
漯丰 2101	0.424	0.722	1.340	0.497	0.802	0.813	0.608
淮核 21126	0.428	1.882	0.178	0.497	1.000	0.512	0.609
保丰 216	1.084	0.200	0.594	0.638	0.713	0.620	0.652
淮麦 2108	0.834	-1.810	-0.417	0.584	0.370	0.357	0.505
冀优 9415	-0.298	0.502	-1.282	0.342	0.764	0.133	0.404
山农 12 号	-0.452	-0.112	1.053	0.309	0.660	0.739	0.446
济麦 20	-1.802	0.582	0.804	0.020	0.778	0.674	0.277
晋麦 92	-0.808	0.060	-0.484	0.233	0.689	0.340	0.347
安科 1604	-0.941	0.522	-0.386	0.204	0.768	0.365	0.350
华成 9137	0.583	-0.376	-0.020	0.531	0.614	0.460	0.539
淮麦 12334	-0.319	-1.254	-1.344	0.337	0.465	0.116	0.334
周麦 42	0.107	0.085	-1.249	0.428	0.693	0.141	0.446
烟农 118	-0.694	-1.093	-1.237	0.257	0.492	0.144	0.292
丰德存麦 13 号	0.566	-0.504	1.616	0.527	0.593	0.885	0.592
百农 1316	1.025	-0.220	-0.301	0.625	0.641	0.387	0.595
洛麦 27	-0.079	0.168	-0.364	0.389	0.707	0.371	0.456
轮选 125	0.845	1.280	-0.922	0.587	0.897	0.226	0.603
存麦 16	0.496	-0.011	-0.594	0.512	0.677	0.311	0.520
徐麦 12178	0.343	-0.562	-1.743	0.479	0.583	0.013	0.436
博麦 9 号	0.678	-0.077	0.635	0.551	0.665	0.630	0.587
权重				0.641	0.218	0.141	

表 6 不同小麦品种(系)千粒重热感指数和分类

品种(系)	T ₀ (g)	T ₁ (g)	热感指数(H)	类型	品种(系)	T ₀ (g)	T ₁ (g)	热感指数(H)	类型
烟农 19	42.69	42.33	0.14	HR	南淮麦 191	40.30	37.09	1.32	S
新麦 19	43.05	43.09	-0.01	HR	淮核 20258	46.45	42.22	1.51	HS
04 中 36	38.36	41.16	-1.21	HR	西农 156	49.07	45.75	1.12	S
偃展 4110	41.89	45.33	-1.36	HR	宁 S19029	44.57	39.72	1.80	HS
济麦 23	48.71	47.79	0.31	HR	荷麦 29	49.53	44.51	1.68	HS
郑麦 136	49.06	44.72	1.46	S	商麦 185	46.18	40.47	2.05	HS
丰德存麦 21 号	41.35	40.58	0.31	HR	西农 1152	49.28	43.00	2.11	HS
淮麦 33	40.93	42.26	-0.54	HR	陕禾 1028	45.44	40.04	1.97	HS
中麦 895	50.75	52.00	-0.41	HR	宿 078	43.15	37.68	2.10	HS
山农 19	38.40	40.66	-0.97	HR	农大 759	45.08	36.95	2.99	HS
扬麦 20	49.18	42.59	2.22	HS	濮马 531	40.60	37.49	1.27	S
西农 511	42.48	41.71	0.30	HR	德宏福麦 21	42.80	36.44	2.46	HS
郑麦 0856	44.34	41.27	1.15	S	漯丰 2101	49.36	44.34	1.68	HS
周麦 18	43.95	43.69	0.10	HR	淮核 21126	44.74	38.99	2.13	HS
山农 20	42.57	42.56	0	HR	保丰 216	42.43	40.92	0.59	R
西农 586	44.18	39.29	1.83	HS	淮麦 2108	43.67	42.98	0.26	HR
连麦 21105	39.00	39.50	-0.21	HR	藁优 9415	38.57	33.10	2.34	HS
郑麦 7698	36.03	35.50	0.24	HR	山农 12 号	36.35	32.52	1.74	HS
济麦 229	37.21	34.96	1.00	S	济麦 20	47.04	36.27	3.79	HS
镇麦 168	43.93	43.62	0.12	HR	晋麦 92	46.35	39.83	2.33	HS
淮麦 20	43.92	42.72	0.45	HR	安科 1604	50.33	43.58	2.22	HS
淮麦 4046	40.41	36.44	1.63	HS	华成 9137	46.47	44.46	0.72	R
连麦 2123	38.01	40.69	-1.17	HR	淮麦 12334	42.96	38.93	1.55	HS
连麦 21136	34.44	37.87	-1.65	HR	周麦 42	45.50	41.81	1.34	S
连麦 6 号	38.12	42.24	-1.79	HR	烟农 118	47.54	41.68	2.04	HS
连麦 7 号	44.51	42.59	0.71	R	丰德存麦 13 号	46.21	46.03	0.07	HR
连麦 9 号	44.62	42.56	0.77	R	百农 1316	44.02	44.87	-0.32	HR
连麦 10 号	43.43	42.14	0.49	HR	洛麦 27	49.31	43.55	1.93	HS
连麦 11 号	41.33	38.11	1.29	S	轮选 125	45.44	42.09	1.22	S
连麦 12 号	37.42	34.16	1.44	S	存麦 16	45.18	44.01	0.43	HR
连麦 185	44.38	40.74	1.36	S	徐麦 12178	45.21	42.85	0.86	R
连麦 186	42.62	36.91	2.22	HS	博麦 9 号	47.27	43.92	1.17	S
华光 8 号	52.83	47.95	1.53	HS					

HS : 极敏感, S : 热敏感, R : 耐热, HR : 极耐热

生显著影响,除了会导致灌浆过程缩短,还会直接降低籽粒的质量^[17]。因此,对于小麦耐热性的研究,不仅要关注其生理生化特性和植株形态,更要深入研究其对籽粒性状的影响。本研究结果表明,高温胁迫能明显降低穗长、株高和千粒重,粒宽和圆度下降幅度较大,但粒长下降幅度不明显。

此外,相关性分析揭示了小麦品种的千粒重、面积、粒宽和直径与所有籽粒性状的耐热系数之间存在着极强的关联性,均为极显著相关。高温对小麦的影响并非单一因素所致,而是一个涉及形态、生理、产量乃至分子层面等多维度的复杂交织过程^[18-19]。鉴于小麦耐热性的评估标准多样且相互间具有密切联系,因此需要整合多个性状进行综合分析。多元统计分析方法已在多种作物的耐热性评估中发挥了关键作用。例如,李敏等^[12]成功运用了该方法,从9个关键指标中筛选出了7个具有代表性的因素,包括超氧化物歧化酶活性、单穗粒重、过氧化氢酶活性、千粒重、冠层温度、丙二醛含量以及产量,并据此构建了回归模型,用于精确地鉴定小麦品种的耐热性。本研究通过主成分分析将9项指标的抗逆系数综合成3个指标后计算D值,同时结合千粒重热感指数,将供试小麦品种(系)划分为极耐热、耐热、热敏感和极敏感4种类型,筛选出烟农19、04中36、偃展4110、山农19、镇麦168、连麦6号共6个品种为极耐热品种,这些指标综合反映了小麦在高温环境下的生长、生理特性及其适应性,可为小麦耐热性的评估提供依据。同时,未来应加强对小麦耐热机理的研究,为培育更多耐高温、高产优质的小麦品种奠定基础。

参考文献

- [1] 王妍,张晓龙,石嘉丽,沈彦军. 中国冬小麦主产区气候变化及其对小麦产量影响研究. 中国生态农业学报:中英文,2022,30(5): 723-734
- [2] Liu B, Asseng S, Müller C, Ewert F, Elliott J, Lobell D B, Martre P, Ruane A C, Wallach D, Jones J W, Rosenzweig C, Aggarwal P K, Alderman P D, Anothai J, Basso B, Biernath C, Cammarano D, Challinor A, Deryng D, Sanctis G D, Doltra J, Fereres E, Folberth C, Garcia-Vila M, Gayler S, Hoogenboom G, Hunt L A, Izaauralde R C, Jabloun M, Jones C D, Kersebaum K C, Kimball B A, Koehler A-K, Kumar S N, Nendel C, O, Leary G J, Olesen J E, Ottman M J, Palosuo T, Prasad P V V, Priesack E, Pugh T A M, Reynolds M, Rezaei E, Rötter R P, Schmid E, Semenov M A, Shcherbak I, Stehfest E, Stöckle C O, Stratonovitch P, Streck T, Supit I, Tao F, Thorburn P, Waha K, Wall G W, Wang E, White J W, Wolf J, Zhao Z, Zhu Y. Similar estimates of temperature impacts on global wheat yield by three independent methods. *Nature Climate Change*, 2016, 6(12): 1130-1136
- [3] 齐学礼,赵明忠,尹文生,李莹,郭瑞,焦竹青,张煜. 小麦耐高温特性的生理机制与基因挖掘研究进展. 南方农业学报, 2022, 53(10): 2885-2893
- [4] 张东正. 温度升高对我国冬小麦生产力影响的定量评估研究. 南京:南京农业大学, 2023
- [5] 任仰涛,金彦刚,李辉晖,李珍富,杨永乐,赵其兵,常东伟,满锡玉,宋红芳,夏中华. 江苏淮北地区29个玉米新品种耐高温胁迫筛选. 中国种业, 2019(6): 38-42
- [6] 陶源,赵凯敏,代存虎,刘明敏,朱敏,丁锦峰,李春燕,朱新开,郭文善. 花后短暂高低温胁迫对小麦产量形成的影响及减灾调控. 麦类作物学报, 2022, 42(12): 1557-1566
- [7] 曹彩云,党红凯,郑春莲,李科江,马俊永. 阶段高温对不同小麦品种产量的影响及其耐热性差异研究. 麦类作物学报, 2020, 40(3): 351-364
- [8] 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
- [9] 杨绚,汤绪,陈葆德,田展,钟洪麟. 气候变暖背景下高温胁迫对中国小麦产量的影响. 地理科学进展, 2013, 32(12): 1771-1779
- [10] 费立伟,代兴龙,张秀,初金鹏,李梅,郑飞娜,贺明荣. 花后高温胁迫下晚播对冬小麦灌浆特性和粒重的影响. 植物生理学报, 2020, 56(3): 479-488
- [11] 姜丽娜,杨娜娜,方保停,李向东,李春喜. 不同小麦品种对灌浆期高温的响应差异. 麦类作物学报, 2018, 38(11): 1365-1373
- [12] 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
- [13] 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
- [14] 王小波,关攀锋,辛明明,汪永法,陈希勇,赵爱菊,刘曼双,李红霞,张明义,逯腊虎,魏亦勤,刘旺清,张金波,倪中福,姚颖垠,胡兆荣,彭惠茹,孙其信. 小麦种质资源耐热性评价. 中国农业科学, 2019, 52(23): 4191-4200
- [15] 曹彩云,党红凯,郑春莲,李科江,马俊永. 灌浆中后期高温对小麦黏度的影响及品种耐热性研究. 麦类作物学报, 2019, 39(11): 1351-1360
- [16] 耿晓丽,张月伶,臧新山,赵月,张金波,尤明山,倪中福,姚颖垠,辛明明,彭惠茹,孙其信. 北方冬麦区与黄淮北片优良小麦品种(系)耐热性评价. 麦类作物学报, 2016, 36(2): 172-181
- [17] 顾晶晶,丁志强,杨乐,田文仲. 灌浆中后期高温胁迫对小麦品种耐热性的影响. 山西农业科学, 2021, 49(10): 1152-1157
- [18] Bhusal N, Sharma P, Sareen S, Sarial A K. Mapping QTLs for chlorophyll content and chlorophyll fluorescence in wheat under heat stress. *Biologia Plantarum*, 2018, 62(4): 721-731
- [19] 傅晓艺,史占良,曹巧,单子龙,韩然,高振贤,何明琦. 小麦耐热性鉴定和热处理对品质的影响. 种子, 2019, 38(8): 61-64

(收稿日期: 2024-07-08)