网络出版时间:2026-02-04 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.08.004

165份谷子萌发期耐高温评价与种质筛选

王振华[1],刘鑫[1],刘红[1],田岗[1],张桂英[1],成锴[1],上官学平[2],李会霞[1]
(1 山西农业大学 谷子研究所,山西 长治 046000;2 晋城市农业农村局,山西 晋城 048026)

[摘 要] 【目的】系统研究高温胁迫对谷子萌发期关键形态和生理指标的影响,阐明各性状指标与谷子品种耐热性的关联机制,建立一套科学的谷子萌发期耐高温评价体系,为耐高温谷子表型鉴定、种质筛选及遗传机制解析提供理论和技术支撑。【方法】以165份谷子种质资源为试验材料,通过人工气候箱模拟高温胁迫环境,设置高温胁迫组(42 ℃)和常温对照组(26 ℃),在连续48 h胁迫处理后,测定各处理谷子幼苗鲜质量、中胚轴鲜质量、主根长、相对含水量、根冠比、幼苗干质量、中胚轴长、根鲜质量、根干质量和中胚轴干质量等10个关键生理指标,计算各指标的耐高温系数,采用主成分分析法(PCA)对10个单项指标进行降维处理,结合隶属函数法获得谷子萌发期耐热性综合评价值(*D*值),据此进行系统聚类分析,并通过逐步回归分析构建谷子萌发期耐高温预测模型。【结果】高温胁迫显著抑制了谷子萌发期地上部的生长,但促进了谷子根部的发育;与常温对照组相比,高温胁迫组谷子的幼苗鲜质量、幼苗干质量、中胚轴鲜质量和中胚轴长度分别显著降低了37.80%,9.30%,17.86% 和7.85%($P<0.05$),其主根长、根鲜质量、根干质量及根冠比分别显著增加11.80%,5.88%,16.00% 和28.71%($P<0.05$)。基于主成分分析(PCA),从10个单项指标中提取4个主成分因子,进一步利用隶属函数法计算165份谷子种质的耐热性综合评价值(*D*值),通过聚类分析,将165份谷子材料划分为5类,分别为极耐高温型2份、较耐高温型8份、耐高温中间型14份、耐高温较敏感型90份和耐高温敏感型51份。采用逐步回归分析法建立最优回归方程,筛选出根鲜质量、根干质量、中胚轴干质量、幼苗干质量、根冠比和主根长6个指标,作为谷子萌发期耐高温评价的核心指标。基于模型预测值并结合田间试验验证,筛选出'鑫谷4号'、'中谷25'、'张杂谷5号'、'济谷23'、'冀谷42'和'19-5-12恢'共6份耐高温谷子材料。【结论】高温胁迫改变了谷子生物量的分配模式,使其优先将光合产物供给根系,从而增强抗逆性和资源获取能力,同时减缓地上部生长。根鲜质量、根干质量、中胚轴干质量、幼苗干质量、根冠比和主根长等6个关键指标可作为谷子种质资源耐高温鉴定的核心评价指标,'鑫谷4号'、'中谷25'、'张杂谷5号'、'济谷23'、'冀谷42'以及'19-5-12恢'等6份为耐高温谷子种质资源。

[关键词] 谷子;萌发期;高温胁迫;种质筛选;谷子育种
[中图分类号] S515.037;S332.5 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)08-0025-13

High-temperature tolerance assessment and screening of 165 foxtail millet accessions at germination

WANG Zhenhua[1],LIU Xin[1],LIU Hong[1],TIAN Gang[1],ZHANG Guiying[1],
CHENG Kai[1],SHANGGUAN Xueping[2],LI Huixia[1]
(1 *Millet Research Institute,Shanxi Agricultural University,Changzhi,Shanxi* 046000,*China*;
2 *Jincheng Municipal Bureau of Agriculture and Rural Affairs,Jincheng,Shanxi* 048026,*China*)

Abstract:【Objective】The study aimed to systematically study the effects of high-temperature stress on key morphological and physiological indicators of foxtail millet during the germination stage,elucidate the corre-

[收稿日期] 2025-06-25 [修回日期] 2025-12-01
[基金项目] 山西农业大学科技创新提升工程项目(CXGC2023062);山西省重点研发计划项目(2022ZDYF107);山西农业大学生物育种工程项目(YZGC027);谷子遗传改良长治市重点实验室项目(2024sy005)
[作者简介] 王振华(1988—),男,山西长治人,助理研究员,硕士,主要从事谷子栽培及新品种选育。E-mail:wangzhenhua_allen@163.com
[通信作者] 李会霞(1970—),女,山西运城人,研究员,硕士,主要从事谷子杂种优势利用及育种研究。E-mail:nkygzslhx@163.com

lation mechanisms between various trait indicators and the heat tolerance of foxtail millet varieties, and establish a scientific evaluation system for high-temperature tolerance during the germination stage of foxtail millet, thereby providing theoretical and technical support for phenotyping, germplasm screening, and genetic analysis of high-temperature tolerance in foxtail millet.【Method】This study employed 165 foxtail millet germplasm accessions. A high temperature stress environment was simulated using an artificial climate chamber. A high temperature stress group (42 ℃) and a normal temperature control group (26 ℃) were set up. After 48 hours of continuous stress treatment, ten key physiological indicators were measured, including seedling fresh mass, mesocotyl fresh mass, main root length, relative water content, root shoot ratio, seedling dry mass, mesocotyl length, root fresh weight, root dry mass, and mesocotyl dry mass. The high temperature tolerance coefficient for each indicator was calculated. Principal component analysis (PCA) was conducted to reduce the dimensiona-lity of the ten individual indicators. Combined with the membership function method, a comprehensive evaluation value (*D* value) for heat tolerance during the germination stage was obtained. Systematic cluster analysis was then performed based on this value. Finally, a predictive model for high temperature tolerance during the germination stage of foxtail millet was constructed using stepwise regression analysis.【Result】High temperature stress significantly inhibited the aboveground growth of foxtail millet during the germination stage. Compared with the control group, the seedling fresh mass, seedling dry mass, mesocotyl fresh mass, and mesocotyl length in the high temperature stress treatment group decreased by 37.80%, 9.30%, 17.86%, and 7.85%, respectively ($P<0.05$). In contrast, its root development was promoted, with significant increases of 11.80%, 5.88%, 16.00%, and 28.71% in the main root length, root fresh mass, root dry mass, and root shoot ratio, respectively ($P<0.05$). Based on principal component analysis (PCA) of the ten individual indicators, four principal components were extracted. The comprehensive evaluation value for heat tolerance (*D* value) was then calculated using the membership function method. Cluster analysis classified the 165 foxtail millet materials into five categories: highly heat-tolerant (2 accessions), moderately heat-tolerant (8), intermediate heat-tolerant (14), heat-sensitive (90), and highly heat-sensitive (51). Stepwise regression analysis was employed to establish an optimal regression model, which identified six key indicators for evaluating germination stage heat tolerance: fresh root mass, dry root mass, dry mesocotyl mass, seedling dry mass, root shoot ratio, and main root length. Model predictions, validated by field trials, ultimately identified six high temperature tolerant foxtail millet materials: Xingu 4, Zhonggu 25, Zhangzagu 5, Jigu 23, Jigu 42, and 19-5-12 Hui.【Conclusion】High temperature stress altered the biomass allocation pattern of foxtail millet, prioritizing the allocation of photosynthetic products to the roots to enhance stress resistance and resource acquisition capacity while slowing aboveground growth. Six key indicators, including root fresh mass, root dry mass, mesocotyl dry mass, seedling dry mass, root shoot ratio, and main root length, were selected as effective criteria for evaluating high temperature tolerance in foxtail millet germplasm resources. Based on these indicators, six heat-tolerant germplasm resources were identified, namely: Xingu 4, Zhonggu 25, Zhangzagu 5, Jigu 23, Jigu 42, and 19-5-12 Hui.

Key words: millet; germination stage; high temperature tolerance; germplasm screening; millet breeding

谷子(*Setaria italica* Beauv.)属于禾本科一年生作物,原产于中国北方,其驯化与栽培历史可追溯至16 000年前。作为我国传统的粮草兼用作物,谷子主要种植于北方干旱及半干旱地区,具有抗旱性强、耐瘠薄、水分利用效率高以及适应性强等特点[1-2]。在全球变暖持续加剧的背景下,我国极端高温事件日趋频繁[3]。近年来,华北和黄淮海地区5月中旬至6月上旬多次出现阶段性高温天气,部分地区最高气温突破40 ℃[4-5]。此时恰逢谷子播种至出苗的关键生育阶段,持续高温天气会灼伤种子,破坏酶活性,导致种子发芽慢而不齐,甚至失去萌发能力成为哑种;对已发芽的种子易发生烧芽现象,轻者芽鞘尖出现黄斑或畸形芽,重者导致芽鞘尖与根尖枯死,造成死苗[6-7]。因此,挖掘萌发期耐高温谷子种质,对保障华北地区高温季节谷子播种出苗具有重要实践价值。

高温胁迫是指环境温度持续超出植物适宜生长范围，导致植物受到损害的非生物逆境[8]。高温胁迫会诱导植物体内活性氧积累，损伤细胞膜结构[9-10]，进而抑制生长、降低光合效率并缩短生育期，最终影响产量和品质[11-12]。当前研究多集中于水稻[13]、小麦[14]、玉米[15]等作物耐高温种质筛选与评价，而有关谷子耐热性方面的研究报道甚少，刘航江[16]对2 000份粳稻种质资源进行鉴定，最终筛选出39份优质且具有耐高温特性的水稻品种。靳路真等[17]基于主成分-隶属函数分析，从155份大豆种质中鉴定出4份耐热品种和63份热敏感品种，并确定了开花期和鼓粒期耐热性的7个关键鉴定指标。李敏等[18]通过主成分-隶属函数分析，将20个小麦品种的9个耐热性指标降维成3个综合指标，筛选出SOD活性、CAT活性、单穗粒质量等7个灌浆后期耐热性关键参数。本研究以165份（包括育成品种81份、恢复系61份、不育系15份及地方农家种8份）谷子材料为研究对象，采用人工气候箱模拟高温环境，系统分析谷子萌发期对高温胁迫的生理响应，以期构建一套科学合理的谷子萌发期耐高温综合评价体系，筛选耐高温优异谷子种质，为谷子耐高温育种及机理研究提供参考。

1　材料与方法

1.1　试验材料

本研究选用的165份谷子材料均由山西农业大学谷子研究所提供，其具体品种/品系名称详见表1。为保证试验材料的种子质量和遗传纯度，所有材料均于2023年在同一试验田进行统一繁种，并在成熟后采用标准化的种子贮藏条件进行保存，以确保材料间具有可比性。

表1　165份参试谷子材料信息

Table 1　Information on 165 tested millet materials

编号 No.	名称 Varieties	类型 Type	编号 No.	名称 Varieties	类型 Type
SP001	长谷K6 Changgu K6	B	SP084	济中矮19 Jizhongai 19	B
SP002	长农47 Changnong 47	B	SP085	济叶冲6 Jiyechong 6	B
SP003	长谷13 Changgu 13	B	SP086	济叶冲8 Jiyechong 8	B
SP004	长谷15 Changgu 15	B	SP087	济叶冲15 Jiyechong 15	B
SP005	长生07 Changsheng 07	B	SP088	济叶冲16 Jiyechong 16	B
SP006	冀谷40 Jigu 40	B	SP089	济叶冲18 Jiyechong 18	B
SP007	中谷19 Zhonggu 19	B	SP090	济叶冲25 Jiyechong 25	B
SP008	中谷25 Zhonggu 25	B	SP091	济长穗14 Jichangsui 14	B
SP009	济谷21 Jigu 21	B	SP092	济谷23 Jigu 23	B
SP010	长农35 Changnong 35	B	SP093	济谷40 Jigu 40	B
SP011	齐谷20 Qigu 20	B	SP094	济谷5 Jigu 5	B
SP012	鑫谷4号 Xingu 4	B	SP095	济谷44 Jigu 44	B
SP013	张杂谷5号 Zhangzagu 5	B	SP096	赤谷20 Chigu 20	B
SP014	九谷23 Jiugu 23	B	SP097	长农44 Changnong 44	B
SP015	沁黄2号 Qinhuang 2	B	SP098	豫谷31 Yugu 31	B
SP016	神谷5号 Shengu 5	B	SP099	豫谷32 Yugu 32	B
SP017	矮88 Ai 88	B	SP100	豫谷34 Yugu 34	B
SP018	疙瘩谷 Gedagu	L	SP101	长谷478 Changgu 478	B
SP019	晋谷21号 Jingu 21	B	SP102	冀谷168 Jigu 168	B
SP020	中谷2号 Zhonggu 2	B	SP103	宫米1号 Gongmi 1	B
SP021	中谷989 Zhonggu 989	B	SP104	长农43 Changnong 43	B
SP022	豫谷35 Yugu 35	B	SP105	冀谷33 Jigu 33	B
SP023	豫谷36 Yugu 36	B	SP106	冀谷34 Jigu 34	B
SP024	保谷22 Baogu 22	B	SP107	冀谷35 Jigu 35	B
SP025	保谷928 Baogu 928	B	SP108	冀谷43 Jigu 43	B
SP026	京谷2号 Jinggu 2	B	SP109	冀谷37 Jigu 37	B
SP027	大白毛 Dabaimao	L	SP110	冀谷41 Jigu 41	B
SP028	延夏谷1号 Yanxiagu 1	B	SP111	大白谷 Dabaigu	L
SP029	黄粘谷 Huangniangu	L	SP112	19-5-88恢 19-5-88 Hui	H
SP030	大乌谷 Dawugu	L	SP113	19-5-08恢 19-5-08 Hui	H
SP031	小乌谷 Xiaowugu	L	SP114	19-5-12恢 19-5-12 Hui	H
SP032	汾选3号 Fenxuan 3	B	SP115	19-5-16恢 19-5-16 Hui	H

表1(续) Table 1(continued)

编号 No.	名称 Varieties	类型 Type	编号 No.	名称 Varieties	类型 Type
SP033	汾选4号 Fenxuan 4	B	SP116	19-5-20恢 19-5-20 Hui	H
SP034	长杂谷466 Changzagu 466	B	SP117	19-5-24恢 19-5-24 Hui	H
SP035	翠优新谷 Cuiyouxingu	B	SP118	19-5-28恢 19-5-28 Hui	H
SP036	金苗K1 Jinmiao K1	B	SP119	19-5-29恢 19-5-29 Hui	H
SP037	赤谷K1 Chigu K1	B	SP120	19-5-41恢 19-5-41 Hui	H
SP038	裕谷2号 Yugu 2	B	SP121	19-5-45恢 19-5-45 Hui	H
SP039	天粟金米 Tiansujinmi	B	SP122	19-5-53恢 19-5-53 Hui	H
SP040	赤谷19 Chigu 19	B	SP123	19-5-61恢 19-5-61 Hui	H
SP041	天粟9号 Tiansu 9	B	SP124	19-5-69恢 19-5-69 Hui	H
SP042	长生13 Chengsheng 13	B	SP125	M21恢 M21 Hui	H
SP043	中谷5号 Zhonggu 5	B	SP126	M22恢 M22 Hui	H
SP044	长杂谷2922 Changzagu 2922	B	SP127	冀谷39 Jigu 39	B
SP045	22-5-04恢 22-5-04 Hui	H	SP128	通谷2号 Tonggu 2	B
SP046	22-5-16恢 22-5-16 Hui	H	SP129	蒙龙香谷 Menglongxianggu	B
SP047	22-5-17恢 22-5-17 Hui	H	SP130	天粟5号 Tiansu 5	B
SP048	22-5-05恢 22-5-05 Hui	H	SP131	天粟8号 Tiansu 8	B
SP049	22-5-08恢 22-5-08 Hui	H	SP132	豫谷18 Yugu 18	B
SP050	22-5-10恢 22-5-10 Hui	H	SP133	黄赤谷 Huangchigu	L
SP051	22-5-06恢 22-5-06 Hui	H	SP134	通谷1号 Tonggu 1	B
SP052	22-5-09恢 22-5-09 Hui	H	SP135	冀谷42 Jigu 42	B
SP053	22-5-15恢 22-5-15 Hui	H	SP136	高51A Gao 51A	A
SP054	21-6-05恢 21-6-05 Hui	H	SP137	晋29A Jin 29A	A
SP055	19-4-74恢 19-4-74 Hui	H	SP138	晋26A Jin 26A	A
SP056	21-5-57恢 21-5-57 Hui	H	SP139	谷3A Gu 3A	A
SP057	20-5-33恢 20-5-33 Hui	H	SP140	高45A Gao 45A	A
SP058	20-5-47恢 20-5-47 Hui	H	SP141	晋1A Jin 1A	A
SP059	20-5-70恢 20-5-70 Hui	H	SP142	高10A Gao 10A	A
SP060	20-5-65恢 20-5-65 Hui	H	SP143	高44A Gao 44A	A
SP061	20-5-456恢 20-5-456 Hui	H	SP144	高522A Gao 522A	A
SP062	21-4-10恢 21-4-10 Hui	H	SP145	高219A Gao 219A	A
SP063	21-5-40恢 21-5-40 Hui	H	SP146	高56A Gao 56A	A
SP064	21-5-77恢 21-5-77 Hui	H	SP147	高910A Gao 910A	A
SP065	21-5-24恢 21-5-24 Hui	H	SP148	高425A Gao 425A	A
SP066	21-5-34恢 21-5-34 Hui	H	SP149	高131A Gao 131A	A
SP067	21-5-37恢 21-5-37 Hui	H	SP150	高68A Gao 68A	A
SP068	21-5-54恢 21-5-54 Hui	H	SP151	24-6-45恢 24-6-45 Hui	H
SP069	21-5-67恢 21-5-67 Hui	H	SP152	24-6-180恢 24-6-180 Hui	H
SP070	22-5-47恢 22-5-47 Hui	H	SP153	24-6-189恢 24-6-189 Hui	H
SP071	22-5-23恢 22-5-23 Hui	H	SP154	24-6-232恢 24-6-232 Hui	H
SP072	23-4-30恢 23-4-30 Hui	H	SP155	24-6-234恢 24-6-234 Hui	H
SP073	23-4-36恢 23-4-36 Hui	H	SP156	24-6-238恢 24-6-238 Hui	H
SP074	23-4-110恢 23-4-110 Hui	H	SP157	24-6-636恢 24-6-636 Hui	H
SP075	23-5-48恢 23-5-48 Hui	H	SP158	24-6-678恢 24-6-678 Hui	H
SP076	长谷422 Changgu 422	B	SP159	24-6-688恢 24-6-688 Hui	H
SP077	红苗谷 Hongmiaogu	L	SP160	24-6-697恢 24-6-697 Hui	H
SP078	济优米2 Jiyoumi 2	B	SP161	24-6-708恢 24-6-708 Hui	H
SP079	济叶冲5 Jiyechong 5	B	SP162	24-6-786恢 24-6-786 Hui	H
SP080	济丰22 Jifeng 22	B	SP163	24-6-806恢 24-6-806 Hui	H
SP081	汾选8号 Fenxuan 8	B	SP164	24-6-170恢 24-6-170 Hui	H
SP082	济优米4 Jiyoumi 4	B	SP165	24-6-819恢 24-6-819 Hui	H
SP083	济中矮15 Jizhongai 15	B			

注:材料类型列中B代表育成品种,L代表地方农家种,H代表恢复系,A代表不育系。

Note: In the material type column, B represents bred varieties, L represents local farmer varieties, H represents restorer lines, and A represents sterile lines.

1.2　试验设计

试验采用沙壤土作为栽培基质。播种前先将谷子种子置于质量分数1%次氯酸钠溶液中浸泡15 min进行表面消毒，随后用无菌水冲洗3次以去除残留消毒剂。分别选用颗粒饱满均匀的种子100粒，播种于直径10 cm、高15 cm的圆形塑料盆中，播种深度控制在3 cm。将播种后的培养盆置于人工气候培养箱中进行萌发培养，72 h后筛选萌发状态一致的幼苗用于后续试验。试验设置高温胁迫组和常温对照组，其中高温胁迫组在温度40 ℃、相对湿度60%条件下培养，光周期为12 h光照/12 h黑暗；常温对照组在温度26 ℃、相对湿度60%条件下培养，光周期与高温胁迫组一致，每处理设置3个生物学重复，每个重复使用1个独立培养盆。培养过程中，使用温湿度记录仪（零诺LRJD-TH21R）实时监测环境参数，并设定每小时自动记录数据，高温胁迫持续48 h后导出监测数据，并按12 h间隔计算温湿度平均值用于后续分析。

1.3　测定指标与方法

系统测定谷子萌发期的10个关键生理指标，包括幼苗鲜质量、幼苗干质量、中胚轴鲜质量、中胚轴干质量、根鲜质量、根干质量、主根长、中胚轴长、相对含水量和根冠比。

测定时，先用吸水纸吸干幼苗表面水分后，使用电子天平测定整株幼苗鲜质量，并剪取根部和中胚轴后单独称量根鲜质量和中胚轴鲜质量；将称量过鲜质量的材料分别装入牛皮纸袋，置于105 ℃恒温烘箱中烘至质量恒定，使用电子天平分别测定整株幼苗、根部和中胚轴干质量，计算相对含水量和根冠比；采用直尺测量谷子种子主根长度和中胚轴长度。

相对含水量＝（幼苗鲜质量－幼苗干质量）/幼苗鲜质量×100%；　　（1）

根冠比＝根鲜质量（或干质量）/地上部鲜质量（或干质量）。　　（2）

1.4　数据处理与分析

使用Microsoft Excel 2022对试验数据进行整理与统计分析，借助SPSS 26.0软件进行主成分分析、相关性分析、隶属函数分析、聚类分析及多元回归分析，并通过R语言实现数据可视化，相关指标计算参考文献[19-20]。

耐高温系数＝高温胁迫组测定值/常温对照组测定值×100%；　　（3）

$$U(X_j)=\left(X_j-X_{\min}\right)/\left(X_{\max}-X_{\min}\right),(j=1,2,3,\cdots,n);\quad(4)$$

$$W_j=P_j/\sum_{j=1}^{n}P_j,(j=1,2,3,\cdots,n);\quad(5)$$

$$D=\sum_{j=1}^{n}\left[U(X_j)\times W_j\right],(j=1,2,3,\cdots,n)。\quad(6)$$

式中：$U(X_j)$表示第j个主成分的隶属函数值；X_j表示第j个主成分的综合指标；$X_{\min}$表示第j个综合指标的最小值；$X_{\max}$表示第j个综合指标的最大值；W_j表示第j个主成分在所有主成分中的权重；P_j为主成分分析中第j个主成分的方差贡献率；D表示耐高温性综合评价值。

2　结果与分析

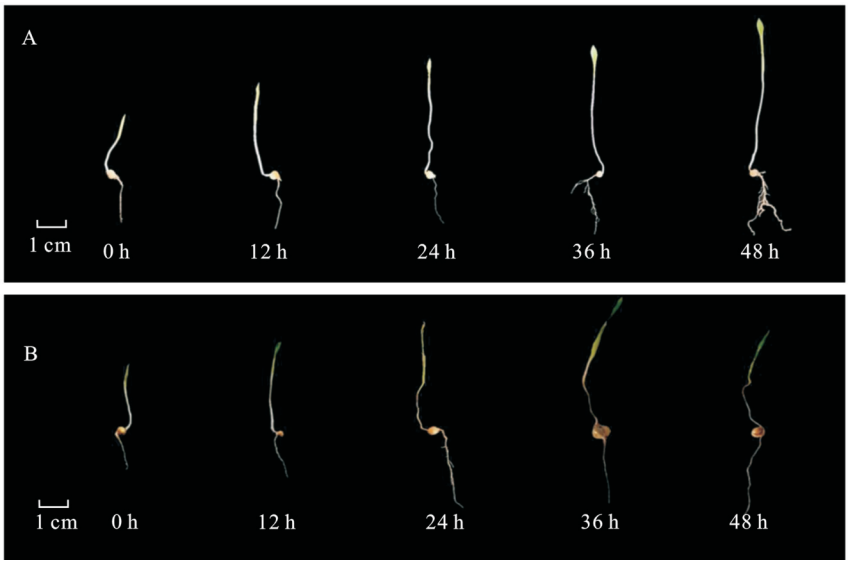
2.1　高温胁迫对耐热型和热敏感型谷子幼苗形态特征的影响

高温胁迫下，谷子耐热型材料‘19-5-12恢’及热敏感型材料‘长谷15’幼苗的外观形态差异显著。由图1可知，未受到高温胁迫时，耐热型材料‘19-5-12恢’和热敏感型材料‘长谷15’幼苗的外观形态及大小基本一致。随着高温胁迫时间的延长，耐热型材料19-5-12恢幼苗整体保持较为稳定的形态，无明显萎蔫；当高温胁迫超过24 h，其幼苗地上部生长变缓，地下部根系生物量明显增加，大量新生侧根和须根密集生长。与耐热型材料‘19-5-12恢’相比，热敏感型材料‘长谷15’在高温胁迫下表现出明显的生长抑制和形态损伤，特别是中胚轴的进行性细缩可作为热害程度的重要形态标志。高温胁迫12 h后，叶片边缘呈现轻微卷曲黄化，中胚轴直径显著减小，机械支撑能力下降，根系暂时性刺激生长，新生少量短而脆弱的毛细根；随着胁迫时间延长至36 h，叶片萎蔫程度加剧，中胚轴呈明显的“细颈瓶”状畸形；高温胁迫48 h时，幼苗整体严重脱水倒伏，中胚轴干瘪皱缩，根系萎缩呈深褐色。

2.2　高温胁迫对谷子萌发期生理指标的影响

由表2可知，高温胁迫对谷子萌发期的生长性状产生了显著影响（$P<0.05$）。与常温对照组相比，高温胁迫组幼苗鲜质量、幼苗干质量、相对含水量、中胚轴鲜质量和中胚轴长显著降低，降幅分别为37.80%，9.30%，20.89%，17.86%和7.85%，主根长、根鲜质量、根干质量、中胚轴干质量和根冠比则分别显著增加了11.80%，5.88%，16.00%，20.00%和28.71%，表明高温胁迫显著改变了谷子幼苗的生长模式。在165份材料中，92.12%材料的幼苗鲜质量下降，73.33%材料的中胚轴鲜质量降低，63.03%材料的中胚轴长度缩短，说明高温抑制

了谷子地上部生长。与之相反,80.06%材料的主根长增加,69.70%材料的中胚轴干质量增加,76.36%材料的根冠比提高,显示谷子地下部发育增强。上述结果表明,谷子植株通过抑制地上部器官的生长,将更多的光合产物和资源分配给根系发育,这种"抑地上、促地下"的生长策略,通过资源重新分配优先保障根系发育,以增强高水分和养分的吸收能力,从而更好地适应高温胁迫环境。



A. 耐热型'19-5-12恢'幼苗;B. 热敏感型'长谷15'幼苗。

A. Seedling of the heat-tolerant accession 19-5-12 Hui; B. Seedling of the heat-sensitive accession Changgu 15.

图1 高温胁迫下耐高温型和高温敏感型谷子幼苗的形态

Fig. 1 Morphology of heat-tolerant and heat-sensitive foxtail millet seedlings under high-temperature stress

表2 高温胁迫对谷子萌发期生理指标的影响

Table 2 Effects of heat stress on physiological parameters of germinating foxtail millet

生理指标 Physiological indicators	常温对照组 Control group	高温胁迫组 Heat stress group	变幅/% Range	*F*值 *F* value
幼苗鲜质量/(g·株$^{-1}$)Seedling fresh mass	0.016 4±0.004 0	0.010 2±0.003 9	−37.80	0.377**
幼苗干质量/(g·株$^{-1}$)Seedling dry mass	0.004 3±0.001 8	0.003 9±0.001 3	−9.30	1.412**
相对含水量/% Relative moisture content	0.728 3±0.096 2	0.576 1±0.159 3	−20.89	134.141**
主根长/cm Main root length	3.561 9±1.095 5	3.982 1±1.284 4	11.80	21.608**
中胚轴长/cm Mesocotyl length	4.370 2±1.769 4	4.027 1±1.842 9	−7.85	0.045**
根鲜质量/(g·株$^{-1}$)Root fresh mass	0.005 1±0.001 5	0.005 4±0.001 7	5.88	3.721**
中胚轴鲜质量/(g·株$^{-1}$)Mesocotyl fresh mass	0.005 6±0.002 0	0.004 6±0.001 8	−17.86	8.637**
根干质量/(g·株$^{-1}$) Root dry mass	0.002 5±0.001 1	0.002 9±0.001 2	16.00	8.808**
中胚轴干质量/(g·株$^{-1}$)Mesocotyl dry mass	0.001 5±0.000 6	0.001 8±0.001 0	20.00	22.582**
根冠比 Root shoot ratio	0.976 5±0.348 2	1.256 9±0.364 2	28.71	0.055**

注:*和**分别表示在0.05和0.01概率水平差异显著。

Note: * and ** indicate significant differences at $P<0.05$ and $P<0.01$, respectively.

2.3 高温胁迫下谷子萌发期各生理指标耐高温系数的变异性分析

高温胁迫显著影响谷子萌发期的农艺性状,通过耐高温系数分析发现,谷子萌发期各农艺性状对高温胁迫的响应存在明显差异。变异系数分析结果(表3)表明,中胚轴相关性状表现出极强的变异敏感性,其中中胚轴鲜质量和中胚轴干质量分别为0.156 5~5.248 2和0.457 8~5.810 8 g/株,其变异系数较高,分别为51%和48%,极差显著;中胚轴长度为0.219 3~3.338 7 cm,变异系数为49%,上述结果表明谷子萌发期中胚轴发育对高温胁迫最为敏感,是高温胁迫下的关键响应部位。根冠比为0.311 2~4.159 0,表现出较高的变异,变异系数为45%,说明不同材料在光合产物分配策略上存在显著差异。相比之下,主根长(变异系数为20%)和根鲜质量(变异系数为25%)等性状的变异系数较低,数值分布相对集中,表明这些性状在高温环境下相对稳定。鉴于不同性状对高温胁迫的敏感性差异显著,有必要建立多性状综合评价体系,以提高耐高温性鉴定的准确性。

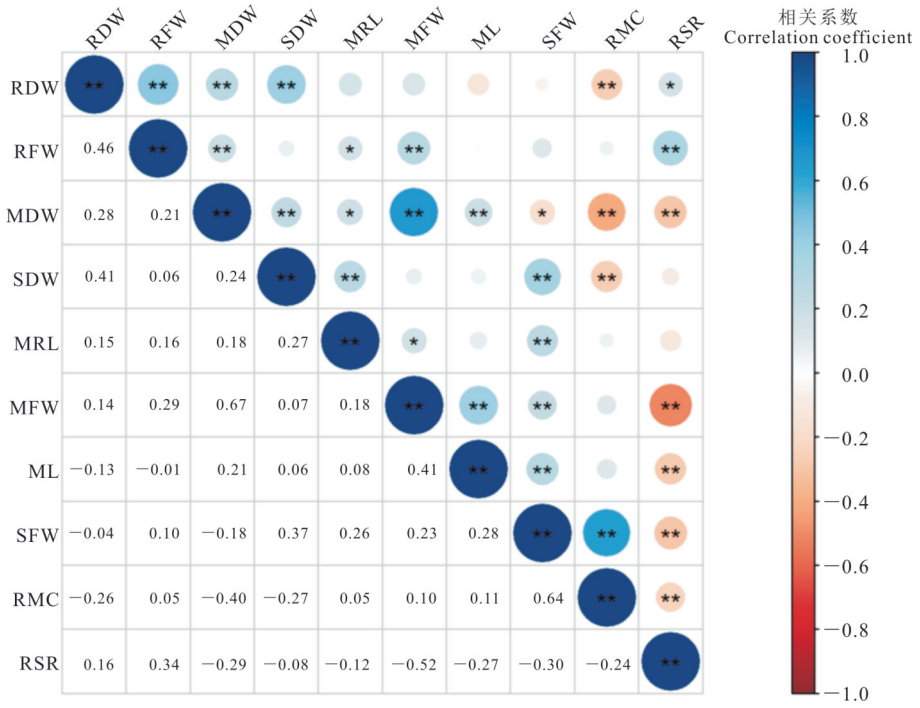
表 3　高温胁迫下谷子萌发期各生理指标耐高温系数变异性分析

Table 3　Variation analysis of high temperature tolerance coefficients for physiological indicators in germinating foxtail millet under heat stress

生理指标 Physiological indicators	最小值 Minimum	最大值 Maximum	耐高温系数 High temperature resistance coefficient	变异系数/% Coefficient of variation
幼苗鲜质量/(g·株$^{-1}$) Seedling fresh mass	0.240 3	1.395 9	0.640 3±0.236 3	37
幼苗干质量/(g·株$^{-1}$) Seedling dry mass	0.234 4	2.539 3	0.956 6±0.328 5	34
相对含水量/% Relative moisture content	0.144 9	1.226 3	0.793 3±0.206 7	26
主根长/cm Main root length	0.309 7	1.906 0	1.135 0±0.231 6	20
中胚轴长/cm Mesocotyl length	0.219 3	3.338 7	0.998 0±0.487 7	49
根鲜质量/(g·株$^{-1}$) Root fresh mass	0.410 7	2.009 1	1.089 8±0.272 1	25
中胚轴鲜质量/(g·株$^{-1}$) Mesocotyl fresh mass	0.156 5	5.248 2	0.872 4±0.442 7	51
根干质量/(g·株$^{-1}$) Root dry mass	0.465 1	3.400 0	1.220 1±0.382 0	31
中胚轴干质量/(g·株$^{-1}$) Mesocotyl dry mass	0.457 8	5.810 8	1.283 6±0.617 8	48
根冠比 Root shoot ratio	0.311 2	4.159 0	1.421 1±0.640 4	45

2.4　谷子萌发期生理指标耐高温系数的相关性分析

为更准确评估谷子萌发期的耐高温能力，避免各性状指标间的信息重叠，本研究对165份谷子材料基于10个指标的耐高温系数进行了相关性分析。结果（图2）表明，中胚轴鲜质量（MFW）与中胚轴干质量（MDW）、中胚轴长度（ML）及根鲜质量（RFW）均呈极显著正相关（$P<0.01$）；幼苗干质量（SDW）除与中胚轴性状相关外，也与幼苗鲜质量（SFW）、根干质量（RDW）和主根长（MRL）呈极显著正相关（$P<0.01$）；此外，根干质量（RDW）与其鲜质量（RFW）及幼苗干质量（SDW）也呈极显著正相关（$P<0.01$）。值得注意的是，相对含水量（RMC）与多个性状呈极显著负相关（$P<0.01$）。在高温胁迫下谷子萌发期各评价指标间存在显著相关性，表明上述指标在耐高温性评价中具有协同响应特征，为进一步构建科学的评价体系，需通过主成分分析或因子分析等方法，消除性状间的多重共线性，筛选出独立且具有代表性的核心指标，以提高耐高温性评价的准确性和可靠性。



RDW. 根干质量；RFW. 根鲜质量；SDW. 幼苗干质量；MDW. 中胚轴干质量；MRL. 主根长；MFW. 中胚轴鲜质量；ML. 中胚轴长；SFW. 幼苗鲜质量；RMC. 相对含水量；RSR. 根冠比。

RDW. Root dry mass；RFW. Root fresh mass；SDW. Seedling dry mass；MDW. Mesocotyl dry mass；MRL. Main root length；MFW. Mesocotyl fresh mass；ML. Mesocotyl length；SFW. Seedling fresh mass；RMC. Relative moisture content；RSR. Root shoot ratio.

图2　谷子萌发期生理指标耐高温系数的相关性分析

Fig. 2　Correlations analysis among high temperature resistance coefficients of different traits in germinating foxtail millet

2.5 谷子萌发期各生理指标耐高温系数的主成分分析

本研究通过主成分分析对165份谷子材料在高温胁迫下各生理指标的耐高温系数进行降维处理,以特征值大于1为筛选标准,从10个初始指标中提取出4个主成分因子,累计方差贡献率为75.233%(表4)。第1主成分的方差贡献率达到25.683%,其中中胚轴鲜质量、中胚轴干质量和中胚轴长的载荷较高,表明高温胁迫对谷子中胚轴的生长影响较大;第2主成分的方差贡献率为21.788%,其中根冠比、根干质量及中胚轴干质量的载荷较高,表明其集中反映了高温胁迫下植株地上部与地下部生物量分配的响应;第3主成分的方差贡献率为15.846%,其中幼苗鲜质量和根鲜质量对该成分的贡献较大,表明其主要反映了植株在高温胁迫下总生物量的积累特征;第4主成分的方差贡献率为11.916%,主要反映了高温胁迫对谷子根鲜质量的影响较大。

由表4可知,中胚轴干质量在第1主成分和第2主成分中均具有较高载荷,根鲜质量在第3主成分和第4主成分中均具有较高载荷,表明中胚轴干质量和根鲜质量这2个指标在多个变异性维度上的重要性,这可能是因为中胚轴干质量和根鲜质量受到多种因素的影响,或者在不同的生物学过程中都有显著表现。

表4 谷子萌发期生理指标耐高温系数的主成分分析

Table 4 Principal component analysis of high-temperature resistance coefficients in germinating foxtail millet

指标 Item	载荷矩阵 Loading matrix			
	第1主成分 PC1	第2主成分 PC2	第3主成分 PC3	第4主成分 PC4
幼苗鲜质量 Seedling fresh mass	0.468	−0.591	0.552	−0.148
幼苗干质量 Seedling dry mass	0.464	0.294	0.341	−0.661
相对含水量 Relative moisture content	0.078	−0.794	0.392	0.305
主根长 Main root length	0.464	0.034	0.328	−0.240
中胚轴长 Mesocotyl length	0.503	−0.319	−0.227	0.096
根鲜质量 Root fresh mass	0.315	0.393	0.501	0.631
中胚轴鲜质量 Mesocotyl fresh mass	0.832	−0.048	−0.284	0.340
根干质量 Root dry mass	0.329	0.656	0.380	0.021
中胚轴干质量 Mesocotyl dry mass	0.678	0.450	−0.448	0.077
根冠比 Root shoot ratio	−0.548	0.470	0.417	0.229
特征值 Eigenvectors	2.568	2.179	1.593	1.198
方差贡献率/% Contribution ratio	25.683	21.788	15.846	11.916
累计方差贡献率/% Cumulative contribution ratio	25.683	47.471	63.317	75.233

2.6 谷子萌发期耐高温综合评价及聚类分析

根据主成分分析结果和公式(4)分别得出165份谷子材料的综合指标X_j和隶属函数值$U(X_j)$,利用公式(5)求得各综合指标的权重,再根据公式(6)计算165份谷子材料萌发期耐高温综合评价值(D值),D值大小与该材料的耐高温性呈正相关,D值越高表明材料的耐高温能力越强,反之则越弱。本研究采用R语言统计软件中的层次聚类分析方法,使用平均连接法(UPGMA)进行系统聚类。由图3可知,165份材料聚为5类,Ⅰ类为极耐高温型材料2份,占供试材料的1.2%;Ⅱ类为较耐高温型材料8份,占供试材料的4.9%;Ⅲ类为耐高温中间型材料14份,占供试材料的8.5%;Ⅳ类为耐高温较敏感型材料90份,占供试材料的54.5%;Ⅴ类为耐高温敏感型材料51份,占供试材料的30.9%。

2.7 回归方程的建立与耐高温指标筛选

为筛选谷子萌发期耐高温核心鉴定指标并揭示各指标与耐高温性的关联性,本研究以谷子萌发期各生理指标的耐高温系数为自变量,耐高温综合评价D值为因变量,采用逐步回归分析方法构建耐高温评价预测模型,得到回归方程为$Y=0.037+0.135X_1+0.077X_2+0.038X_3+0.028X_4+0.020X_5+0.041X_6$($R^2=0.983$,$P\leqslant0.001$),筛选出根鲜质量($X_1$)、根干质量($X_2$)、中胚轴干质量($X_3$)、幼苗干质量($X_4$)、根冠比($X_5$)和主根长($X_6$)共6个指标,作为谷子萌发期耐高温评价的核心指标。将165份材料各生理指标的耐高温系数代入回归方程,得到其耐高温性预测值P(表5)。预测值P与耐高温综合评价值(D值)的相关系数为0.995($P<0.01$),表明该回归方程对D值具有极强的预测能

力。因此，在实际应用中，可通过该预测模型高效鉴定谷子萌发期的耐高温性，实现种质资源的快速筛选。基于模型预测值，并结合田间试验验证，最终筛选‘鑫谷4号’、‘中谷25’、‘张杂谷5号’、‘济谷23’、‘冀谷42’和‘19-5-12恢’共6份耐高温谷子材料。

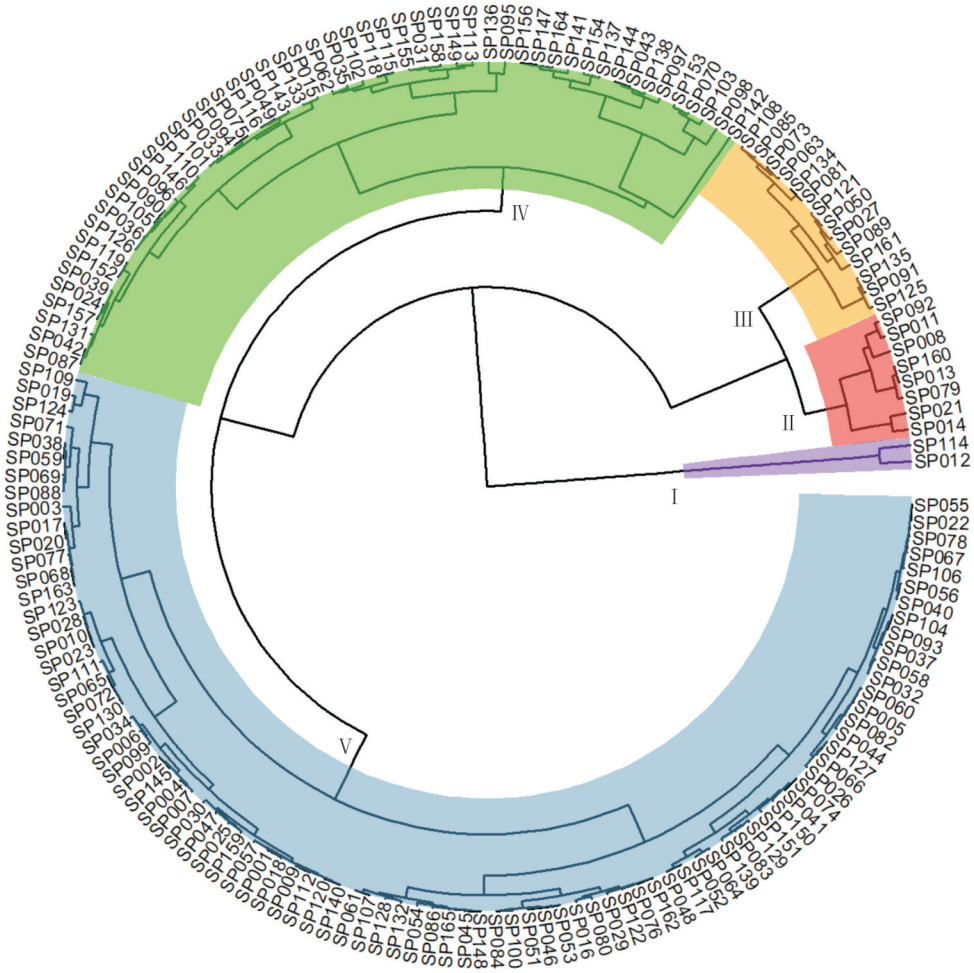


图3　165份谷子材料基于*D*值的聚类分析

Fig. 3　Cluster analysis of 165 foxtail millet accessions based on *D* values

表5　165份谷子参试材料萌发期高温综合评价值*D*和预测值*P*

Table 5　*D* values and *P* values for high-temperature tolerance evaluation of 165 foxtail millet accessions at germination stage

编号 No.	*D*值 *D* value	预测值*P* *P* value	编号 No.	*D*值 *D* value	预测值*P* *P* value	编号 No.	*D*值 *D* value	预测值*P* *P* value
SP001	0.462 3	0.454 8	SP056	0.421 6	0.414 9	SP111	0.474 9	0.470 0
SP002	0.457 6	0.439 5	SP057	0.461 2	0.452 0	SP112	0.462 8	0.454 4
SP003	0.491 4	0.485 9	SP058	0.417 6	0.378 3	SP113	0.356 8	0.330 5
SP004	0.456 7	0.449 6	SP059	0.486 1	0.473 8	SP114	0.695 0	0.651 6
SP005	0.424 4	0.421 9	SP060	0.423 9	0.433 6	SP115	0.346 1	0.328 8
SP006	0.452 2	0.442 2	SP061	0.448 0	0.440 4	SP116	0.373 3	0.360 5
SP007	0.456 1	0.445 4	SP062	0.350 6	0.342 6	SP117	0.402 1	0.394 8
SP008	0.622 4	0.606 5	SP063	0.526 0	0.497 5	SP118	0.345 9	0.340 6
SP009	0.462 9	0.454 8	SP064	0.404 6	0.395 3	SP119	0.396 2	0.386 2
SP010	0.470 8	0.445 8	SP065	0.476 4	0.461 9	SP120	0.463 7	0.455 7
SP011	0.612 5	0.602 6	SP066	0.426 7	0.420 9	SP121	0.535 7	0.529 6
SP012	0.715 2	0.671 6	SP067	0.419 7	0.417 1	SP122	0.437 0	0.432 3
SP013	0.598 5	0.580 6	SP068	0.495 1	0.491 7	SP123	0.470 0	0.462 1
SP014	0.575 9	0.575 8	SP069	0.488 0	0.479 8	SP124	0.510 9	0.508 8
SP015	0.376 3	0.366 7	SP070	0.292 0	0.289 7	SP125	0.546 6	0.538 0

表5(续) Table 5(continued)

编号 No.	D值 D value	预测值P P value	编号 No.	D值 D value	预测值P P value	编号 No.	D值 D value	预测值P P value
SP016	0.440 0	0.418 7	SP071	0.482 6	0.478 7	SP126	0.384 0	0.381 1
SP017	0.497 0	0.476 9	SP072	0.476 7	0.463 8	SP127	0.427 1	0.425 0
SP018	0.462 0	0.453 2	SP073	0.525 5	0.513 6	SP128	0.445 4	0.440 8
SP019	0.508 9	0.497 9	SP074	0.409 8	0.386 3	SP129	0.412 2	0.406 5
SP020	0.497 0	0.482 3	SP075	0.371 4	0.363 3	SP130	0.476 6	0.467 2
SP021	0.565 7	0.552 1	SP076	0.436 6	0.433 2	SP131	0.388 2	0.383 8
SP022	0.420 2	0.414 8	SP077	0.496 0	0.488 0	SP132	0.446 6	0.443 4
SP023	0.470 7	0.463 8	SP078	0.420 6	0.410 7	SP133	0.377 2	0.368 9
SP024	0.391 8	0.382 4	SP079	0.601 3	0.594 0	SP134	0.522 3	0.515 9
SP025	0.465 7	0.458 5	SP080	0.438 6	0.434 1	SP135	0.549 4	0.544 5
SP026	0.427 7	0.421 3	SP081	0.522 3	0.499 7	SP136	0.330 9	0.325 0
SP027	0.537 4	0.527 7	SP082	0.424 9	0.420 5	SP137	0.307 6	0.288 3
SP028	0.471 1	0.458 1	SP083	0.413 1	0.411 7	SP138	0.323 8	0.323 9
SP029	0.435 7	0.428 7	SP084	0.432 1	0.422 2	SP139	0.411 2	0.407 3
SP030	0.467 9	0.461 0	SP085	0.527 1	0.515 2	SP140	0.463 3	0.438 9
SP031	0.358 4	0.345 1	SP086	0.443 5	0.447 0	SP141	0.315 4	0.313 7
SP032	0.416 7	0.405 8	SP087	0.390 1	0.391 4	SP142	0.245 8	0.231 4
SP033	0.369 9	0.375 3	SP088	0.487 1	0.489 8	SP143	0.374 1	0.363 5
SP034	0.454 5	0.445 8	SP089	0.532 5	0.525 1	SP144	0.322 6	0.320 1
SP035	0.348 9	0.350 4	SP090	0.382 9	0.381 3	SP145	0.457 7	0.452 5
SP036	0.383 6	0.376 6	SP091	0.548 5	0.543 8	SP146	0.386 8	0.381 0
SP037	0.414 6	0.418 3	SP092	0.609 6	0.603 5	SP147	0.313 2	0.318 9
SP038	0.486 1	0.483 1	SP093	0.415 5	0.414 6	SP148	0.444 5	0.429 1
SP039	0.392 9	0.383 4	SP094	0.371 6	0.368 3	SP149	0.354 9	0.345 2
SP040	0.422 1	0.417 7	SP095	0.338 2	0.332 6	SP150	0.408 5	0.400 0
SP041	0.409 7	0.405 5	SP096	0.381 0	0.382 2	SP151	0.407 1	0.416 5
SP042	0.390 0	0.396 1	SP097	0.319 8	0.305 5	SP152	0.395 7	0.396 7
SP043	0.322 5	0.324 8	SP098	0.281 8	0.284 3	SP153	0.293 3	0.281 9
SP044	0.423 1	0.421 2	SP099	0.453 3	0.447 2	SP154	0.307 1	0.309 8
SP045	0.444 4	0.441 7	SP100	0.432 4	0.451 6	SP155	0.359 1	0.364 1
SP046	0.431 2	0.426 3	SP101	0.369 2	0.365 4	SP156	0.313 3	0.314 6
SP047	0.464 6	0.454 7	SP102	0.352 6	0.351 5	SP157	0.391 5	0.390 0
SP048	0.401 9	0.388 7	SP103	0.295 7	0.289 8	SP158	0.360 0	0.359 3
SP049	0.373 2	0.364 2	SP104	0.415 6	0.406 9	SP159	0.466 6	0.466 1
SP050	0.535 1	0.528 5	SP105	0.382 9	0.373 1	SP160	0.598 0	0.598 5
SP051	0.431 3	0.425 9	SP106	0.419 1	0.413 1	SP161	0.541 2	0.528 8
SP052	0.405 1	0.399 3	SP107	0.448 1	0.440 7	SP162	0.436 7	0.443 1
SP053	0.431 0	0.427 7	SP108	0.528 2	0.523 3	SP163	0.495 4	0.491 5
SP054	0.442 3	0.438 4	SP109	0.503 1	0.503 5	SP164	0.312 7	0.316 7
SP055	0.420 2	0.414 0	SP110	0.385 4	0.377 7	SP165	0.444 0	0.440 8

3 讨 论

萌发期作为谷子生长发育的初始阶段,是其生命周期中对环境胁迫最为敏感的时期之一[21],这一时期谷子幼苗组织幼嫩,对温度波动表现出极强的响应。持续高温会显著干扰种子吸胀过程和酶活性,导致胚根伸长受阻、胚芽鞘畸形等表型变异,进而导致出苗率降低和幼苗活力下降。前人已在不同作物的耐高温性指标筛选方面进行了大量研究[22-24],张闪闪[25]对64份小麦材料苗期14个性状的耐高温性指标进行分析,最终筛选出幼苗干质量、根系表面积及根系体积等4个指标作为小麦苗期耐高温性鉴定的关键指标;栾瑞伟[26]对谷子灌浆期进行高温胁迫处理发现,谷子千粒质量、穗粒数和穗长显著降低,光合速率及茎叶中SOD、CAT活性显著升高。不同作物不同发育阶段的耐高温性受诸多因素的影响,包括遗传背景、环境条件以及栽培管理措施等[27],上述因素共同作用,导致作物在高温胁迫下表现出不同的生理生化响应。目前我国北方谷子主产区在播种期面临日益频发的极端高温天气,急需明确该阶段谷子对高温胁迫的响应模式及耐热指标体系。本研究模拟短时高温胁迫

（42 ℃，48 h），系统分析165份谷子材料萌发期的表型响应特征，旨在初步构建其耐高温评价指标体系。该处理强度既反映了田间极端情况，又保证了试验的可重复性。需要指出的是，自然条件下的高温胁迫往往与土壤水分蒸发加剧、光合有效辐射增强等伴生现象构成复合胁迫，这些因素的协同作用可能会改变单一高温处理的生理响应模式，因此，在构建耐高温评价体系的基础上，应进一步结合多点田间试验及多因子模拟试验，提升研究成果的稳定性和应用适宜性。同时，融合分子生物学手段解析其胁迫响应机制，为耐热种质资源筛选及耐热基因的挖掘提供理论支撑与技术路径。

高温对植物萌发期的影响具有显著的阶段性和物种差异性，适度高温可加快种子代谢进程、促进萌发，但超过临界温度则会抑制萌发速率，干扰细胞分裂与伸长，进而影响幼苗形态建成和初期生理代谢活动[28]。通常条件下，植物能够通过调整生物量的分配来应对不利条件，以保持其生长和生存能力[29]。李佳佳等[30]对385份大豆材料进行芽期高温胁迫处理后发现，其下胚轴长度受到显著抑制（$P<0.05$），降幅达10.9%；根系相关指标呈现极显著上升趋势（$P<0.01$），其中根鲜质量、根干质量和根冠比分别增加了13.10%，22.20%和16.90%。张闪闪等[31]对32份小麦新品系苗期耐热性研究表明，高温胁迫处理后的小麦幼苗鲜质量、幼苗干质量、根鲜质量、根干质量分别显著下降了64.04%，19.64%，9.86%和8.69%（$P<0.05$），而根冠比则显著增加了11.46%（$P<0.05$）。本研究发现，谷子在萌发期遭遇高温胁迫后，其地上部发育受到显著抑制，表现为幼苗鲜质量、干质量及中胚轴鲜质量和中胚轴长度均明显下降，表明高温可能限制了光合器官及支持结构的形成。而根部则呈现出一定的补偿性增强趋势，表现为根鲜质量、根干质量以及主根长均有不同程度的增加，导致根冠比显著提高。这种“地上抑制、地下促进”的生物量分配模式，很可能是谷子对高温胁迫的一种主动适应策略。其生态学意义在于：在高温诱导的蒸腾速率升高、水分获取受限条件下，优先生长根系有助于增强土壤水分和矿质元素的吸收，从而为地上部提供更稳定的水分供应，延缓胁迫造成的损伤。该响应模式在耐旱作物中较为常见，表明谷子作为旱地作物在热逆境下具有一定的生态适应潜力。从生理机制角度来看，高温胁迫可能通过诱导活性氧（ROS）积累、改变激素平衡或调节可溶性糖分配等方式，驱动生物量从地上部向根系转移，这与多种逆境响应过程中所观察到的“根系优先”调控策略一致。但在自然条件下，高温常与土壤水分亏缺同时出现，植物的实际响应机制可能更为复杂。因此，今后应在多因子模拟和多时间尺度上深入探索谷子萌发期耐热性的综合调控机制，并结合生理指标、激素水平及基因表达等多层次数据，建立更为完善的耐高温性评价体系，为谷子种质创新与精准栽培提供理论支持。

多元统计方法作为复杂性状综合评价的重要手段[32]，在本研究中有效提升了谷子萌发期耐高温性评估的科学性与精度。通过引入10个代表性形态与生理指标，不仅克服了单一指标对耐高温性评价片面、稳定性差的局限，而且在多指标间存在高度相关性和信息冗余的背景下，利用主成分分析方法将10个单项指标降维处理，转化为4个彼此独立的综合指标，将多个互相关联的原始变量转化为少数彼此独立的综合因子，突出了对高温胁迫反应最敏感的核心指标，提升了评价的代表性和解释力。在此基础上，构建的隶属函数模型与系统聚类分析进一步实现了不同材料的量化分级，建立了统一的综合评价指标体系（D值），可用于大规模种质资源的快速筛选。尤其在谷子遗传背景复杂、萌发期对高温响应具有连续性和隐蔽性的情况下，多元统计方法能够兼顾指标的差异性与内在联系，为耐热性材料的识别提供了系统性、可重复的技术路径。此外，D值与基于回归模型的预测值P之间表现出良好的拟合优度与预测精度，进一步验证了基于多元统计的综合评价方法在构建耐高温性评价体系中的适用性与可操作性。

4　结　论

本研究筛选出6个谷子萌发期耐高温核心鉴定指标，分别为根鲜质量、根干质量、中胚轴干质量、幼苗干质量、根冠比和主根长；建立了耐高温综合评价预测模型，筛选出6份耐高温的谷子优异种质资源，分别为‘鑫谷4号’、‘中谷25’、‘张杂谷5号’、‘济谷23’、‘冀谷42’和‘19-5-12恢’。该研究结果为耐高温谷子种质筛选及相关分子机制研究奠定了重要的材料基础。

[参考文献]

[1] 李顺国,刘斐,刘猛,等. 中国谷子种植历史演变及未来发展方向[J]. 粮油食品科技,2022,30(4):60-67,10.
LI S G,LIU F,LIU M,et al. Historical evolution and future development direction of foxtail millet planting in China[J]. Science and Technology of Cereals,Oils and Foods,2022,30(4):60-67,10.

[2] KHAN T,AHMAD AZAD A,ISLAM R U. Millets:a comprehensive review of nutritional,antinutritional,health,and processing aspects[J]. Journal of Food Composition and Analysis,2025,141:107364.

[3] DAMON MATTHEWS H,WYNES S. Current global efforts are insufficient to limit warming to 1.5 ℃[J]. Science,2022,376(6600):1404-1409.

[4] 罗澜. 世界气象组织:2023年气候变化和极端天气重创亚洲[J]. 生命与灾害,2024(7):12-13.
LUO L. World Meteorological Organization:climate change and extreme weather will hit Asia hard in 2023[J]. Life & Disasters,2024(7):12-13.

[5] 张书睿. 气象灾害对中国农业生产的影响[D]. 杭州:浙江大学,2023.
ZHANG S R. The impacts of meteorological disasters on agricultural production in China[D]. Hangzhou:Zhejiang University,2023.

[6] WEI W J,HU Y L,YANG W J,et al. S-nitrosoglutathion reductase activity modulates the thermotolerance of seeds germination by controlling ABI5 stability under high temperature[J]. Phyton,2021,90(4):1075-1087.

[7] JIANG Z Z,CHEN X Q,RUAN L L,et al. Molecular analyses of the tubby-like protein gene family and their response to salt and high temperature in the foxtail millet (*Setaria italica*)[J]. Functional & Integrative Genomics,2024,24(5):170.

[8] 江珊,吴龙英,赵宝生,等. 植物耐受高温胁迫的分子机制研究进展[J]. 中国农学通报,2024,40(9):132-138.
JIANG S,WU L Y,ZHAO B S,et al. Molecular mechanism of heat stress tolerance in plants:a review[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2024,40(9):132-138.

[9] SHARMA L,PRIYA M,KAUSHAL N,et al. Plant growth-regulating molecules as thermoprotectants:functional relevance and prospects for improving heat tolerance in food crops[J]. Journal of Experimental Botany,2020,71(2):569-594.

[10] JI D L,XIAO W H,SUN Z W,et al. Translocation and distribution of carbon-nitrogen in relation to rice yield and grain quality as affected by high temperature at early panicle initiation stage[J]. Rice Science,2023,30(6):598-612.

[11] JUMRANI K,BHATIA V S. Impact of combined stress of high temperature and water deficit on growth and seed yield of soybean[J]. Physiology and Molecular Biology of Plants,2018,24(1):37-50.

[12] 卢琼琼,宋新山,严登华. 高温胁迫对大豆幼苗生理特性的影响[J]. 河南师范大学学报(自然科学版),2012,40(1):112-115,124.
LU Q Q,SONG X S,YAN D H. Effects of high temperature stress on physiological characteristics in soybean seedings[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition),2012,40(1):112-115,124.

[13] VERONICA N,ASHOKA RANI Y,SUBRAHMANYAM D,et al. Evaluation of stress indices for screening of rice cultivars for high temperature tolerance[J]. Oryza-An International Journal on Rice,2019,56(4):341-351.

[14] 史冰新. 黄淮和长江中下游冬麦区小麦耐热种质资源筛选[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2023.
SHI B X. Screened for heat tolerance of wheat germplasm resources in the Yellow and Huai River valley winter wheat zone and the middle and lower Yangtze valley winter wheat zone[D]. Yangling,Shaanxi:Northwest A&F University,2023.

[15] 闫恒宇,李朝霞,李玉斌. 高温对玉米生长的影响及中国耐高温玉米筛选研究进展[J]. 植物学报,2024,59(6):1007-1023.
YAN H Y,LI Z X,LI Y B. Research progress on heat stress impact on maize growth and heat-tolerant maize screening in China[J]. Chinese Bulletin of Botany,2024,59(6):1007-1023.

[16] 刘航江. 中国核心粳稻种质资源耐高温特性的鉴定与筛选[D]. 武汉:华中农业大学,2020.
LIU H J. Identification and screening of high-temperature-tolerance characteristics of core Chinese Japonica rice germplasm resources[D]. Wuhan:Huazhong Agricultural University,2020.

[17] 靳路真,王洋,张伟,等. 大豆品种(系)耐热性鉴定及分级评鉴[J]. 中国油料作物学报,2016,38(1):77-87.
JIN L Z,WANG Y,ZHANG W,et al. Grading evaluation on heat-tolerance in soybean and identification of heat-tolerant cultivars[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences,2016,38(1):77-87.

[18] 李敏,苏慧,李阳阳,等. 黄淮海麦区小麦耐热性分析及其鉴定指标的筛选[J]. 中国农业科学,2021,54(16):3381-3393.
LI M,SU H,LI Y Y,et al. Analysis of heat tolerance of wheat with different genotypes and screening of identification indexes in Huang-Huai-Hai Region[J]. Scientia Agricultura Sinica,2021,54(16):3381-3393.

[19] 付丽军,李聪晓,苏胜宇,等. 黄瓜苗期耐热种质筛选与耐热性评价体系构建[J]. 植物生理学报,2020,56(7):1593-1604.
FU L J,LI C X,SU S Y,et al. Screening of cucumber germplasms in seedling stage and the construction of evaluation system for heat tolerance[J]. Plant Physiology Journal,2020,56(7):1593-1604.

[20] 张鲜,赵少迪,胡传伟,等. 不同苦荞种质资源耐荫性评价及鉴定指标的筛选[J]. 核农学报,2025,39(2):214-227.
ZHANG X,ZHAO S D,HU C W,et al. Evaluation of different *Tartary buckwheat* germplasm resources for shade tolerance and screening of identification indexes[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences,2025,39(2):214-227.

[21] 易燕莹,王茹,刘相泉,等. 干旱胁迫和盐胁迫对水杉种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 种子,2021,40(7):45-49.

YI Y Y, WANG R, LIU X Q, et al. Effects of drought stress and salt stress on seed germination and seedling growth of *Metasequoia glyptostroboides*[J]. Seed, 2021, 40(7): 45-49.

[22] LI J J, WU M Y, CHEN H R, et al. An integrated physiological indicator and transcriptomic analysis reveal the response of soybean buds to high-temperature stress[J]. BMC Plant Biology, 2024, 24(1): 1102.

[23] 戎亚思，李丰，张鹏钰，等. 基于主成分-聚类分析芝麻盛花期耐高温评价及品种筛选[J]. 中国农业科学，2024，57(20)：3957-3973.
RONG Y S, LI F, ZHANG P Y, et al. Evaluation of high temperature tolerance and selection of sesame (*Sesamum indicum* L.) cultivars at full flowering stage based on principal components-cluster analysis[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2024, 57(20): 3957-3973.

[24] 郭小红，韦清源，汤复跃，等. 萌发期耐高温大豆种质资源筛选及耐热指标评价[J]. 大豆科学，2022，41(5)：513-519.
GUO X H, WEI Q Y, TANG F Y, et al. Screening of high temperature tolerant soybean germplasms and evaluation of heat-tolerant indexes during germination stage[J]. Soybean Science, 2022, 41(5): 513-519.

[25] 张闪闪. 64份小麦新品系的室内苗期和田间成熟期耐热性评价[D]. 陕西杨凌：西北农林科技大学，2024.
ZHANG S S. Evaluation of heat tolerance of 64 new wheat lines at seedling stage in lab and mature stage in field[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2024.

[26] 栾瑞伟. 高温胁迫对谷子籽粒发育和产量形成的影响及外源物质的调控作用[D]. 山东泰安：山东农业大学，2024.
LUAN R W. Effects of heat stress on grain development and yield formation of *Setaria italica* and regulation of exogenous substances[D]. Taian, Shandong: Shandong Agricultural University, 2024.

[27] SHRESTHA S, MAHAT J, SHRESTHA J, et al. Influence of high-temperature stress on rice growth and development: a review[J]. Heliyon, 2022, 8(12): e12651.

[28] 冯玉超. 模拟南方红壤强度侵蚀区干旱高温对植物种子萌发及幼苗生长的影响[D]. 福州：福建农林大学，2019.
FENG Y C. Effects of simulated drought and high temperature on seeds germination and seedlings growth in red soil intensity erosion area of southern China[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2019.

[29] ZHANG H, ZHAO Y, ZHU J K. Thriving under stress: how plants balance growth and the stress response[J]. Developmental Cell, 2020, 55(5): 529-543.

[30] 李佳佳，龙群，朱尚尚，等. 大豆芽期耐高温评价方法构建及耐高温种质资源筛选[J]. 作物学报，2023，49(11)：2863-2875.
LI J J, LONG Q, ZHU S S, et al. Construction of evaluation method for tolerance to high-temperature and screening of heat-tolerant germplasm resources of bud stage in soybean[J]. Acta Agronomica Sinica, 2023, 49(11): 2863-2875.

[31] 张闪闪，张旭斌，田仁美，等. 小麦新品系苗期的耐热性评价[J]. 麦类作物学报，2024，44(10)：1279-1286.
ZHANG S S, ZHANG X B, TIAN R M, et al. Evaluation of heat resistance of new wheat advanced lines at seedling stage[J]. Journal of Triticeae Crops, 2024, 44(10): 1279-1286.

[32] YANG L Y, LIU X K, DUAN J H, et al. Comprehensive evaluation and screening identification indexes of heat-resistance indices in cotton (*Gossypium hirsutum* L.)[J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2024, 210(2): e12697.

（责任编辑：陈丽）

（上接第 9 页）

[24] HU Z C, CHEN P, WANG L L, et al. FGF6 promotes cardiac repair after myocardial infarction by inhibiting the Hippo pathway[J]. Cell Proliferation, 2022, 55(5): e13221.

[25] 杨德业，林素，黄晓燕，等. *FGF6*基因保护心肌细胞凋亡的实验研究[C]//中华医学会. 中华医学会第十五次全国心血管病学大会论文汇编. 北京：中华医学会杂志社，2013：510.
YANG D Y, LIN S, HUANG X Y, et al. Experimental study on the protective effect of *FGF6* gene against cardiomyocyte apoptosis[C]//Chinese Medical Association. Compilation of Papers of the 15th National Congress of Cardiovascular Diseases of the Chinese Medical Association. Beijing: Journal of the Chinese Medical Association, 2013: 510.

（责任编辑：马秋明）