

# 商洛主栽玉米苗期耐热性鉴定与评价

李佳轩, 屈云龙\*, 闫思静, 张梅娟

商洛学院生物医药与食品工程学院, 陕西 商洛

收稿日期: 2026年2月16日; 录用日期: 2026年3月23日; 发布日期: 2026年4月1日

## 摘要

选育耐热品种是应对全球气候变暖、减轻高温热害对玉米生产影响的最根本措施。为筛选适宜商洛地区种植的耐热玉米品种,本研究以商洛14种常栽玉米品种为研究对象,播种后19 d后进行5 d的高温处理,测定株高、茎粗、根长、叶面积、地上部鲜重、地下部鲜重、地上部干重、地下部干重、叶绿素含量、总干重和根冠比11个性状的耐热系数,采用主成份分析与聚类分析相结合的方法,综合分析鉴定和评价了不同品种的抗热性。利用主成份分析方法,将11项指标分解为4个单独的综合指标,占总资料79.83%的信息。结果表明,利用隶属函数法和耐热综合评定D值,将14个玉米品种分为高耐热、中耐热、弱耐热、热敏感4大类,分别选出了SD22、SK9两个高耐热品种,两个热敏型品种DH11和QA23。本研究筛选出了适宜于商洛本地栽植的耐热品种,也为研究玉米耐热性基因资源发掘和耐热性品种培育奠定了理论依据。

## 关键词

玉米, 苗期, 耐热性, 筛选指标, 综合评价

# Identification and Evaluation of Heat Tolerance in Seedling Stage of Major Cultivated Maize in Shangluo

Jiaxuan Li, Yunlong Qu\*, Sijing Yan, Meijuan Zhang

College of Biology Pharmacy and Food Engineering, Shangluo University, Shangluo Shaanxi

Received: February 16, 2026; accepted: March 23, 2026; published: April 1, 2026

## Abstract

Developing heat-tolerant maize cultivars represents a fundamental approach to addressing the

\*通讯作者。

challenges posed by global climate warming and mitigating the detrimental effects of heat stress on maize production. This study aimed to identify maize varieties with superior heat tolerance suitable for cultivation in the Shangluo region. Fourteen commonly cultivated maize varieties were subjected to a five-day high-temperature treatment beginning 19 days after sowing. Eleven agronomic and physiological traits were evaluated, including plant height, stem diameter, root length, leaf area, aboveground fresh weight, belowground fresh weight, aboveground dry weight, belowground dry weight, chlorophyll content, total dry weight, and root-to-shoot ratio. Heat tolerance coefficients were calculated for each trait. Comprehensive evaluation of heat tolerance was conducted using a combination of Principal Component Analysis (PCA) and cluster analysis. PCA extracted four principal components explaining 79.83% of the total variance from the measured traits. Based on membership function analysis and the comprehensive heat tolerance index (D value), the fourteen maize varieties were classified into four categories: highly heat tolerant, moderately heat tolerant, weakly heat tolerant, and heat sensitive. Two varieties, SD22 and SK9, were identified as highly heat-tolerant, while DH11 and QA23 were classified as heat sensitive. The findings provide a theoretical foundation for the selection of heat-tolerant maize cultivars adapted to the Shangluo region and contribute to the exploration of heat tolerance gene resources and the breeding of heat-resilient maize varieties.

## Keywords

Maize, Seedling Stage, Heat Tolerance, Screening Indicators, Comprehensive Evaluation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

玉米(*Zea mays* L.)是我国重要的粮食和饲料作物,在国家粮食安全中占据关键地位[1]。玉米为喜温作物,对温度有较好的适应性,但日最高温超过 32℃时,玉米幼苗生长会受到抑制,严重时产量会显著降低[2]。随着全球气候变暖趋势加剧,极端高温天气频发,高温已成为制约我国玉米生产的主要非生物胁迫因子之一[3]。近年来,我国黄淮海及西北等玉米主产区高温热害发生时段呈现前移趋势,苗期遭遇高温胁迫的频率显著增加[4]。苗期是玉米生长发育的关键时期,此阶段遭遇高温会显著抑制幼苗光合作用,导致叶绿素降解、叶片卷曲萎蔫,膜脂过氧化加剧,导致植株发育受阻、干物质积累下降,并对后续生长产生持续性负面影响[5]-[7]。对于玉米,苗期日平均气温超过 29℃即可造成轻度热害,33℃为中度,36℃以上可能导致严重减产[8]。吴小娟等[9]以“郑单 958”为试验材料,研究了不同高温处理(25℃、34℃、38℃、42℃)对玉米幼苗生长的影响,结果表明,34℃以上高温对幼苗生长具有显著抑制作用,随着温度升高,幼苗的株高、主根长、单株鲜重及根冠比均呈下降趋势。因此,在玉米苗期遭遇高温胁迫将抑制光合作用,从而无法在苗期积累足够的营养物质[3] [10],严重影响植株的生长发育甚至后期的产量。

关于耐热性评价指标体系的构建,近年来研究者们采用了更为科学的多元统计分析方法。滕元旭等[11]采用主成分分析、隶属函数法、聚类分析和灰色关联度法相结合的方法,对 21 份玉米自交系的 10 项指标(株高、茎粗、叶面积、地上鲜重、地上部干重、胚根长、地下部干重、根冠比、SPAD 值等)进行综合评价,结果表明主成分分析可将 10 个单项指标转化为 3 个相互独立的综合指标,代表了 83.16%的原始信息量,为玉米苗期耐热性鉴定提供了简便直观的方法。牛丽等[12]同样采用多元统计分析方法,以根冠比、胚根长、叶面积、茎粗、叶绿素相对含量、干物质重量等为指标,将 24 个玉米品种分为热敏感型、

弱耐热型、中等耐热型和高耐热型 4 个等级,指出单一指标难以全面反映品种的耐热性,需结合多个性状的耐热系数进行综合评价。

商洛地处陕西东南部,属暖温带半湿润季风气候,夏季高温频发,严重威胁当地玉米苗期生长。前人在玉米耐热机理与鉴定方法上已有深入研究,但针对特定生态区主栽品种苗期耐热性的系统评价仍显不足。因此,本研究以 14 个商洛主栽玉米品种为材料,通过比较高温胁迫与适温对照条件下 11 项生长及生理指标的差异,采用主成分分析、隶属函数法和聚类分析相结合的方法进行综合评价,筛选适宜本地种植的耐热品种,以期商洛地区玉米耐热育种及抗逆栽培提供理论依据。

## 2. 材料与方法

### 2.1. 试验材料

供试材料为 14 个商洛地区主要栽植玉米品种,分别为登海 11 (DH11)、高科 168 (GK168)、张玉 1355 (ZY1355)、奥玉 026 (AY026)、正大 999 (ZD999)、安森 7 号 (AS7)、农科大 8 号 (NKD8)、陕科 9 号 (SK9)、潞玉 6 号 (LY6)、中金 368 (ZJ368)、陕单 22 (SD22)、改良商玉 2 号 (SY2)、秦奥 23 (QA23) 和奥利 10 号 (AL10)。

### 2.2. 试验方法

#### 2.2.1. 种子萌发与幼苗培养

挑选大小一致、籽粒饱满的玉米种子,播种并用播种盆进行土培,培养基质为田园土和营养土的混合土, V (营养土):V (田园土) = 1:1。每盆选择保留长势一致的幼苗 3 株,在 25℃ 条件下进行培养。

#### 2.2.2. 高温胁迫处理

待幼苗长至第 3 枚叶片完全展开后,置于植物光照培养箱中进行高温处理。对照组为 25/20℃ (日/夜),高温组为 38/33℃ (日/夜)。处理期间要及时浇水,每个品种处理组和对照组各 6 盆,每盆 3 株。高温处理 5 d 后,测定不同品种玉米幼苗对照组和处理组的株高、茎粗、叶面积、地上部鲜重、地上部干重、总干重、胚根长、地下部分干重、地下部鲜重、根冠比和叶绿素含量共 11 个性状的耐热系数。

### 2.3. 测定指标和方法

#### 2.3.1. 生长参数测定

其中株高即顶部展开叶拉直的最高点距地面的距离;茎粗即用数字游标卡尺测量茎最下部扁圆一面的直径;叶面积 = 叶片长 × 叶片最宽处宽度 × 0.75;胚根长即测量玉米主胚根的长度。

#### 2.3.2. 根冠比的测定

地上部干重即取地上部分于烘箱中 105℃ 杀青 30 min,80℃ 烘干至恒重并称重;地下部干重即取地下部分于烘箱中 105℃ 杀青 30 min,80℃ 烘干至恒重并称重;总干重即地上部干重和地下部干重之和;根冠比即地下部干重与地上部干重之比值。

#### 2.3.3. 叶绿素含量的测定

采用丙酮浸提法[13]测定叶绿素含量。采样后样品避光浸泡于 80% 的丙酮溶液中,测定 OD470, OD663, OD646 的吸光值,并计算总叶绿素的含量,每品种 3 次重复。按照以下公式计算总叶绿素的含量:

$$CT = 17.32 \times A_{646} - 7.18 \times A_{663}$$

$$X = (C \times VT) / (FW \times 1000) \times n$$

按照此公式计算叶绿素含量,公式中,C:叶绿体色素的浓度( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ );X:叶绿体色素的含量( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$  FW);FW:鲜重(g);VT:提取液终体积(mL);n:稀释倍数;CT:总叶绿素的含量。

## 2.4. 数据处理

数据处理采用 Excel 2010 软件进行, SAS 分析软件对数据进行主成分分析和聚类分析, 并使用 Excel 2010 进行了绘图。关于各性状耐热系数等指标计算公式如下。

### 2.4.1. 各性状耐热系数

$$\text{HTC} = \frac{\text{处理测定值}}{\text{对照测定值}} * 100\% \quad (1)$$

### 2.4.2. 不同玉米品种各综合指标的隶属函数值

$$u(x_j) = \frac{x_j - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式中,  $x_j$  表示第  $j$  个综合指标;  $x_{\min}$  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。

### 2.4.3. 各综合指标的权重

$$W_j = \frac{p_j}{\sum_{j=1}^n p_j} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

式中,  $W_j$  值表示第  $j$  个综合指标在所有综合指标中的重要程度即权重;  $p_j$  为经主成分分析所得各品种第  $j$  个综合指标的贡献率。

### 2.4.4. 各品种综合耐热能力的大小

$$D = \sum_{j=1}^n [u(X_j) * W_j] \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

式中,  $D$  值为各不同玉米品种在热胁迫下由综合指标评价所得的耐热性综合评价值。

## 3. 结果与分析

### 3.1. 高温胁迫对玉米幼苗各单项指标的影响

Table 1. Effects of high-temperature stress on various aboveground traits of maize

表 1. 高温胁迫对玉米地上部各项指标的影响

品种	处理	株高/cm	茎粗/cm	地上部鲜重/g	地上部干重/g	叶面积/cm <sup>2</sup>	叶绿素含量/mg·g <sup>-1</sup> FW
DH11	CK	25.16 ± 1.03 <sup>d</sup>	0.40 ± 0.01 <sup>b</sup>	2.33 ± 0.29 <sup>cd</sup>	0.17 ± 0.01 <sup>gh</sup>	28.43 ± 4.76 <sup>e</sup>	6.79 ± 0.03 <sup>c</sup>
	T	19.25 ± 1.03 <sup>ef</sup>	0.31 ± 0.01 <sup>d</sup>	1.53 ± 0.42 <sup>ef</sup>	0.16 ± 0.04 <sup>h</sup>	20.84 ± 3.70 <sup>h</sup>	2.98 ± 0.27 <sup>f</sup>
SY2	CK	30.74 ± 1.52 <sup>ab</sup>	0.36 ± 0.04 <sup>c</sup>	2.57 ± 0.41 <sup>bc</sup>	0.29 ± 0.01 <sup>b</sup>	32.57 ± 2.75 <sup>cd</sup>	8.28 ± 0.50 <sup>9ab</sup>
	T	25.26 ± 3.37 <sup>d</sup>	0.35 ± 0.02 <sup>c</sup>	1.49 ± 0.55 <sup>ef</sup>	0.14 ± 0.02 <sup>hi</sup>	19.55 ± 4.76 <sup>hi</sup>	6.39 ± 0.05 <sup>cd</sup>
GK168	CK	29.51 ± 1.40 <sup>b</sup>	0.40 ± 0.02 <sup>b</sup>	3.19 ± 0.70 <sup>ab</sup>	0.17 ± 0.01 <sup>gh</sup>	34.62 ± 3.77 <sup>bc</sup>	6.39 ± 0.05 <sup>cd</sup>
	T	23.27 ± 4.81 <sup>de</sup>	0.33 ± 0.04 <sup>cd</sup>	1.57 ± 0.75 <sup>ef</sup>	0.18 ± 0.05 <sup>fg</sup>	23.12 ± 5.91 <sup>g</sup>	5.45 ± 0.39 <sup>de</sup>
ZY1355	CK	29.54 ± 1.67 <sup>b</sup>	0.41 ± 0.01 <sup>b</sup>	2.41 ± 0.22 <sup>c</sup>	0.20 ± 0.01 <sup>ef</sup>	20.75 ± 1.13 <sup>h</sup>	7.55 ± 0.11 <sup>b</sup>

续表

	T	28.84 ± 1.92 <sup>bc</sup>	0.35 ± 0.04 <sup>c</sup>	2.18 ± 0.44 <sup>d</sup>	0.19 ± 0.07 <sup>ef</sup>	34.52 ± 6.21 <sup>bc</sup>	7.32 ± 0.23 <sup>bc</sup>
OY026	CK	31.70 ± 1.41 <sup>ab</sup>	0.39 ± 0.01 <sup>bc</sup>	2.47 ± 0.32 <sup>c</sup>	0.24 ± 0.01 <sup>cd</sup>	42.71 ± 3.63 <sup>a</sup>	6.61 ± 0.53 <sup>c</sup>
	T	21.13 ± 4.035 <sup>e</sup>	0.31 ± 0.04 <sup>d</sup>	1.58 ± 0.39 <sup>e</sup>	0.13 ± 0.02 <sup>i</sup>	26.04 ± 4.34 <sup>f</sup>	5.39 ± 0.45 <sup>de</sup>
ZD999	CK	30.47 ± 0.97 <sup>ab</sup>	0.39 ± 0.01 <sup>bc</sup>	3.00 ± 0.47 <sup>b</sup>	0.25 ± 0.01 <sup>c</sup>	31.94 ± 5.28 <sup>de</sup>	7.27 ± 0.21 <sup>bc</sup>
	T	27.34 ± 1.31 <sup>c</sup>	0.30 ± 0.01 <sup>d</sup>	1.62 ± 0.01 <sup>e</sup>	0.14 ± 0.01 <sup>hi</sup>	31.26 ± 4.71 <sup>de</sup>	4.43 ± 0.24 <sup>c</sup>
AS7	CK	30.77 ± 0.999 <sup>ab</sup>	0.40 ± 0.01 <sup>b</sup>	2.57 ± 0.18 <sup>bc</sup>	0.21 ± 0.01 <sup>de</sup>	35.13 ± 2.45 <sup>bc</sup>	6.36 ± 0.19 <sup>cd</sup>
	T	22.24 ± 2.49 <sup>de</sup>	0.29 ± 0.02 <sup>de</sup>	1.42 ± 0.19 <sup>ef</sup>	0.18 ± 0.01 <sup>fg</sup>	28.12 ± 4.64 <sup>e</sup>	6.13 ± 0.49 <sup>cd</sup>
NKD8	CK	31.17 ± 0.37 <sup>ab</sup>	0.39 ± 0.01 <sup>bc</sup>	2.31 ± 0.14 <sup>cd</sup>	0.19 ± 0.01 <sup>ef</sup>	32.09 ± 1.38 <sup>d</sup>	8.91 ± 0.13 <sup>ab</sup>
	T	27.65 ± 1.22 <sup>bc</sup>	0.34 ± 0.06 <sup>cd</sup>	1.65 ± 0.61 <sup>e</sup>	0.17 ± 0.06 <sup>gh</sup>	25.57 ± 4.19 <sup>fg</sup>	6.22 ± 0.30 <sup>cd</sup>
SK9	CK	30.10 ± 5.27 <sup>ab</sup>	0.40 ± 0.01 <sup>b</sup>	2.50 ± 0.13 <sup>c</sup>	0.25 ± 0.01 <sup>c</sup>	33.92 ± 3.06 <sup>bc</sup>	8.40 ± 0.54 <sup>ab</sup>
	T	27.26 ± 1.21 <sup>c</sup>	0.33 ± 0.04 <sup>cd</sup>	1.78 ± 0.16 <sup>de</sup>	0.18 ± 0.01 <sup>fg</sup>	27.83 ± 4.48 <sup>ef</sup>	7.70 ± 0.07 <sup>a</sup>
LY6	CK	32.86 ± 2.44 <sup>a</sup>	0.43 ± 0.03 <sup>a</sup>	3.45 ± 0.52 <sup>a</sup>	0.33 ± 0.02 <sup>a</sup>	44.77 ± 3.08 <sup>a</sup>	8.55 ± 0.45 <sup>ab</sup>
	T	22.46 ± 0.81 <sup>e</sup>	0.31 ± 0.01 <sup>d</sup>	1.23 ± 0.15 <sup>f</sup>	0.19 ± 0.02 <sup>ef</sup>	21.91 ± 2.74 <sup>gh</sup>	9.94 ± 0.51 <sup>a</sup>
ZJ368	CK	25.84 ± 1.90 <sup>d</sup>	0.395 ± 0.02 <sup>bc</sup>	2.26 ± 0.38 <sup>cd</sup>	0.17 ± 0.01 <sup>gh</sup>	24.01 ± 3.82 <sup>fg</sup>	5.99 ± 0.75 <sup>de</sup>
	T	28.63 ± 4.60 <sup>bc</sup>	0.327 ± 0.05 <sup>cd</sup>	1.89 ± 0.52 <sup>de</sup>	0.20 ± 0.05 <sup>ef</sup>	27.84 ± 9.29 <sup>ef</sup>	6.76 ± 0.09 <sup>c</sup>
SD22	CK	32.80 ± 2.77 <sup>a</sup>	0.375 ± 0.02 <sup>c</sup>	2.94 ± 0.27 <sup>b</sup>	0.24 ± 0.01 <sup>cd</sup>	43.35 ± 6.04 <sup>a</sup>	8.24 ± 0.59 <sup>ab</sup>
	T	30.63 ± 1.35 <sup>ab</sup>	0.301 ± 0.02 <sup>d</sup>	1.55 ± 0.34 <sup>ef</sup>	0.17 ± 0.01 <sup>gh</sup>	34.63 ± 5.77 <sup>bc</sup>	7.24 ± 0.33 <sup>bc</sup>
QA23	CK	31.53 ± 0.91 <sup>ab</sup>	0.401 ± 0.01 <sup>b</sup>	2.56 ± 0.28 <sup>bc</sup>	0.17 ± 0.02 <sup>gh</sup>	36.98 ± 2.62 <sup>b</sup>	7.84 ± 0.71 <sup>bc</sup>
	T	18.49 ± 4.27 <sup>f</sup>	0.275 ± 0.02 <sup>e</sup>	0.94 ± 0.26 <sup>g</sup>	0.11 ± 0.02 <sup>j</sup>	14.56 ± 4.99 <sup>i</sup>	5.03 ± 0.18 <sup>e</sup>
AL10	CK	28.20 ± 1.56 <sup>bc</sup>	0.355 ± 0.02 <sup>c</sup>	1.67 ± 0.20 <sup>e</sup>	0.17 ± 0.02 <sup>gh</sup>	32.54 ± 2.91 <sup>cd</sup>	7.11 ± 1.16 <sup>bc</sup>
	T	24.06 ± 6.91 <sup>de</sup>	0.281 ± 0.03 <sup>de</sup>	1.34 ± 0.36 <sup>f</sup>	0.14 ± 0.04 <sup>hi</sup>	25.56 ± 4.76 <sup>fg</sup>	5.49 ± 0.24 <sup>de</sup>

注：不同小写字母表示显著差异(P < 0.05)。

由表 1 可知，高温胁迫显著降低玉米的株高、茎粗、地上部鲜重、地上部干重、叶面积和叶绿素含量。如品种 SD22 与对照组(CK)相比较分别降低了 6.7%、19.7%、47.1%、31.7%、20.1%和 12.1%；品种 QA23 热处理后与对照组(CK)相比分别降低了 41.4%、31.4%、63.2%、35.1%、60.6%和 35.8%。通过对比可以发现，品种 SD22 相较于品种 QA23，受高温处理影响要小得多，耐热能力更强；品种 DH11 与对照组(CK)相比分别下降了 23.5%、32.5%、34.6%、8.2%、26.7%和 56.1%；品种 SK9 热处理后与对照组相比下降了 9.4%、17.5%、28.8%、28.4%、17.9%和 8.3%。结果表明，品种 DH11 比品种 SK9 耐热性要差。

由表 2 可知，高温胁迫影响幼苗的生长，表现为降低玉米的根长，根冠比，地下部鲜重，地下部干重和总干重，如品种 DH11 与对照组(CK)相比分别下降了 10.1%、69.9%、41.8%、73.2%和 46.3%；品种 SK9 与对照组相比降低了 22.1%、27.1%、15.7%、43.8%和 38.0%；品种 SD22 与对照组(CK)相比分别下降了 21.7%、35.9%、16.1%、17.1%和 18.9%；品种 QA23 与对照组相比较下降了 40.7%、41.2%、16.1%、36.7%和 36.8%。结果表明，品种 DH11 和品种 QA23 与对照组相比下降幅度较大，而品种 SK9 和品种 SD22 下降幅度较小，表明其有较强的耐热能力。

**Table 2.** Effects of high-temperature stress on individual underground indicators of maize seedlings  
**表 2.** 高温胁迫对玉米幼苗地下部单项指标的影响

品种	处理	根长/cm	根冠比	地下部鲜重/g	地下部干重/g	总干重/g
DH11	CK	11.84 ± 1.33 <sup>de</sup>	1.40 ± 0.25 <sup>a</sup>	1.39 ± 0.38 <sup>ab</sup>	0.20 ± 0.02 <sup>b</sup>	0.41 ± 0.05 <sup>bc</sup>
	T	10.65 ± 1.13 <sup>fg</sup>	0.42 ± 0.11 <sup>fg</sup>	0.81 ± 0.17 <sup>de</sup>	0.05 ± 0.02 <sup>e</sup>	0.22 ± 0.06 <sup>e</sup>
SY2	CK	11.68 ± 1.36 <sup>de</sup>	0.58 ± 0.07 <sup>ef</sup>	1.26 ± 0.19 <sup>c</sup>	0.17 ± 0.04 <sup>bc</sup>	0.47 ± 0.02 <sup>b</sup>
	T	13.19 ± 0.51 <sup>bc</sup>	0.69 ± 0.22 <sup>de</sup>	1.39 ± 0.40 <sup>ab</sup>	0.10 ± 0.03 <sup>de</sup>	0.24 ± 0.03 <sup>e</sup>
GK168	CK	10.87 ± 1.02 <sup>fg</sup>	0.91 ± 0.11 <sup>bc</sup>	1.17 ± 0.22 <sup>bcd</sup>	0.14 ± 0.03 <sup>cd</sup>	0.33 ± 0.02 <sup>d</sup>
	T	11.84 ± 1.52 <sup>de</sup>	0.83 ± 0.23 <sup>c</sup>	1.12 ± 0.32 <sup>ce</sup>	0.13 ± 0.32 <sup>d</sup>	0.32 ± 0.08 <sup>d</sup>
ZY1355	CK	13.89 ± 1.08 <sup>b</sup>	0.64 ± 0.25 <sup>de</sup>	0.80 ± 0.15 <sup>de</sup>	0.24 ± 0.01 <sup>ab</sup>	0.32 ± 0.05 <sup>d</sup>
	T	11.06 ± 1.40 <sup>f</sup>	0.39 ± 0.23 <sup>g</sup>	0.69 ± 0.16 <sup>f</sup>	0.06 ± 0.02 <sup>e</sup>	0.26 ± 0.07 <sup>de</sup>
OY026	CK	12.39 ± 0.99 <sup>d</sup>	0.63 ± 0.11 <sup>e</sup>	1.30 ± 0.35 <sup>bc</sup>	0.14 ± 0.05 <sup>cd</sup>	0.39 ± 0.04 <sup>c</sup>
	T	11.54 ± 2.07 <sup>de</sup>	1.12 ± 0.35 <sup>ab</sup>	0.78 ± 0.28 <sup>de</sup>	0.11 ± 0.03 <sup>de</sup>	0.27 ± 0.02 <sup>de</sup>
ZD999	CK	11.73 ± 0.40 <sup>de</sup>	0.54 ± 0.09 <sup>ef</sup>	1.37 ± 0.30 <sup>bc</sup>	0.13 ± 0.02 <sup>d</sup>	0.39 ± 0.04 <sup>cd</sup>
	T	11.49 ± 0.82 <sup>de</sup>	0.85 ± 0.27 <sup>c</sup>	1.14 ± 0.23 <sup>cd</sup>	0.12 ± 0.03 <sup>d</sup>	0.26 ± 0.02 <sup>de</sup>
AS7	CK	12.09 ± 0.92 <sup>d</sup>	0.70 ± 0.14 <sup>d</sup>	1.14 ± 0.23 <sup>cd</sup>	0.15 ± 0.04 <sup>c</sup>	0.36 ± 0.03 <sup>cd</sup>
	T	12.66 ± 1.12 <sup>cd</sup>	0.75 ± 0.15 <sup>d</sup>	1.18 ± 0.26 <sup>cd</sup>	0.15 ± 0.01 <sup>c</sup>	0.31 ± 0.03 <sup>d</sup>
NKD8	CK	11.64 ± 0.35 <sup>de</sup>	0.69 ± 0.02 <sup>de</sup>	1.43 ± 0.14 <sup>a</sup>	0.13 ± 0.01 <sup>d</sup>	0.32 ± 0.01 <sup>d</sup>
	T	11.69 ± 0.95 <sup>de</sup>	0.48 ± 0.18 <sup>fg</sup>	0.74 ± 0.10 <sup>e</sup>	0.07 ± 0.05 <sup>de</sup>	0.25 ± 0.05 <sup>e</sup>
SK9	CK	16.24 ± 1.51 <sup>a</sup>	0.86 ± 0.25 <sup>c</sup>	1.37 ± 0.34 <sup>bc</sup>	0.23 ± 0.05 <sup>ab</sup>	0.46 ± 0.06 <sup>b</sup>
	T	12.66 ± 1.15 <sup>cd</sup>	0.63 ± 0.30 <sup>e</sup>	1.16 ± 0.27 <sup>cd</sup>	0.14 ± 0.08 <sup>cd</sup>	0.29 ± 0.04 <sup>de</sup>
LY6	CK	13.09 ± 0.76 <sup>bc</sup>	0.67 ± 0.27 <sup>de</sup>	1.33 ± 0.25 <sup>bc</sup>	0.27 ± 0.04 <sup>a</sup>	0.55 ± 0.06 <sup>a</sup>
	T	11.29 ± 1.03 <sup>e</sup>	0.74 ± 0.21 <sup>d</sup>	0.79 ± 0.17 <sup>de</sup>	0.16 ± 0.02 <sup>bc</sup>	0.32 ± 0.05 <sup>d</sup>
ZJ368	CK	11.74 ± 0.61 <sup>de</sup>	0.84 ± 0.03 <sup>c</sup>	1.16 ± 0.15 <sup>cd</sup>	0.16 ± 0.06 <sup>bc</sup>	0.32 ± 0.02 <sup>d</sup>
	T	12.17 ± 2.22 <sup>d</sup>	0.90 ± 0.67 <sup>bc</sup>	0.60 ± 0.19 <sup>f</sup>	0.17 ± 0.09 <sup>bc</sup>	0.37 ± 0.09 <sup>cd</sup>
SD22	CK	12.99 ± 0.48 <sup>e</sup>	0.81 ± 0.34 <sup>cd</sup>	1.11 ± 0.22 <sup>cd</sup>	0.18 ± 0.03 <sup>bc</sup>	0.37 ± 0.09 <sup>cd</sup>
	T	10.10 ± 1.54 <sup>g</sup>	0.52 ± 0.27 <sup>f</sup>	0.93 ± 0.22 <sup>d</sup>	0.15 ± 0.02 <sup>c</sup>	0.30 ± 0.04 <sup>d</sup>
QA23	CK	11.56 ± 0.70 <sup>de</sup>	0.61 ± 0.05 <sup>e</sup>	0.74 ± 0.14 <sup>e</sup>	0.11 ± 0.02 <sup>de</sup>	0.28 ± 0.03 <sup>de</sup>
	T	11.11 ± 0.70 <sup>ef</sup>	0.58 ± 0.15 <sup>ef</sup>	0.62 ± 0.21 <sup>f</sup>	0.07 ± 0.02 <sup>e</sup>	0.18 ± 0.03 <sup>f</sup>
AL10	CK	9.41 ± 0.87 <sup>h</sup>	0.72 ± 0.19 <sup>d</sup>	0.739 ± 0.135 <sup>e</sup>	0.11 ± 0.01 <sup>de</sup>	0.28 ± 0.03 <sup>de</sup>
	T	11.26 ± 1.25 <sup>e</sup>	0.96 ± 0.46 <sup>bc</sup>	0.859 ± 0.308 <sup>d</sup>	0.11 ± 0.04 <sup>de</sup>	0.26 ± 0.02 <sup>de</sup>

注：不同小写字母表示显著差异(P < 0.05)。

### 3.2. 各单项指标的耐热系数及其相关分析

根据公式(1)得出各性状的耐热系数(HTC)。从表 3 可以看到, 各品种之间的变动情况并不完全一致, 有些指标升高(HTC > 100), 有些指标降低(HTC < 100)。在不同的品种和不同指标上, 其变化的幅度也是不一样的。

**Table 3.** Heat tolerance coefficients of various traits and the effects of high temperature on these traits  
**表 3.** 各性状的耐热系数及高温对各性状的影响

	株高	茎粗	根长	叶面积	地上部鲜重	地下部鲜重	地上部干重	地下部干重	总干重	根冠比	叶绿素含量
DH11	84	80	90	73	66	58	92	27	54	30	228
SY2	82	98	113	60	58	110	48	59	551	120	100
GK168	82	83	109	67	49	96	102	92	997	89	85
ZY1355	98	87	80	166	91	86	99	26	80	51	97
OY026	67	79	93	61	64	60	54	77	69	156	82
ZD999	90	76	98	98	54	83	58	87	68	151	61
AS7	72	72	105	80	55	104	85	101	88	106	96
NKD8	89	86	100	80	71	52	91	54	78	58	70
SK9	91	83	78	82	71	84	71	61	51	99	211
LY6	68	71	86	49	36	59	56	58	62	101	116
ZJ368	111	83	104	116	84	51	115	106	113	107	113
SD22	93	80	128	80	53	119	68	83	105	101	88
QA23	59	69	96	39	37	84	65	63	61	94	64
AL10	85	79	120	79	80	116	83	99	102	123	77

表 4 中 11 项指标的相关结果显示, 各个指标间存在着一定的相关关系。一些指标间具有极显著或极显著的相关, 株高、叶面积、地上部鲜重之间呈极显著; 株高、叶面积和地上部干重显著, 根冠比和地下部干重呈极显著, 和地上部干重显著, 根长和地下部鲜重、地下部干重显著。株高与茎粗、根长、叶面积、地上部鲜重、地上部干重、地下部干重、叶面积呈正相关, 和根冠比、总干重呈负相关, 表明各指标之间对耐热性有信息重叠, 也有各自不可或缺的作用。玉米的耐热性是一个综合性状, 在不同的耐热性条件下, 各个指标的影响程度也不尽相同, 为了弥补单一指标的耐热性不够全面的缺陷, 必须对各个指标进行综合评估。

**Table 4.** Correlation coefficient matrix of individual indicators at seedling stage for 14 maize varieties  
**表 4.** 14 种玉米品种苗期各单项指标的相关系数矩阵

指标	株高	茎粗	根长	叶面积	地上部鲜重	地下部鲜重	地上部干重	地下部干重	叶绿素含量	根冠比	总干重
株高	1										
茎粗	0.527	1									
根长	0.106	0.137	1								
叶面积	0.759**	0.329	-0.213	1							
地上部鲜重	0.726**	0.514	-0.116	0.774**	1						
地下部鲜重	-0.046	0.127	0.616*	-0.033	-0.115	1					
上部干重	0.578*	0.117	-0.002	0.555*	0.565*	-0.212	1				
地下部干重	0.070	-0.254	0.606*	-0.142	-0.104	0.309	0.088	1			

续表

叶绿素含量	0.180	0.116	-0.464	0.015	0.195	-0.257	0.149	-0.444	1		
根冠比	-0.207	-0.153	0.292	-0.259	-0.224	0.246	-0.568*	0.670**	-0.460	1	
总干重	-0.012	0.424	0.337	-0.181	-0.217	0.320	0.146	0.197	-0.159	0.019	1

### 3.3. 主成分分析

为克服单一指标评价的片面性并消除指标间信息重叠,采用主成分分析法对原有 11 项指标的耐热系数进行处理,提取出 4 个独立的综合指标(表 5)。由表 5 可得,4 个主成分的贡献率分别为 33.44%、23.64%、13.18%和 9.56%,累计贡献率为 79.83%,代表了原各单项指标绝大部分的信息量。主成分 1 反映了原始数据 36.29%的信息量,起主要作用的是地上部鲜重(0.812)、叶面积(0.780)、株高(0.740)、地上部干重(0.681)、叶绿素含量(0.475)5 个性状分量;主成分 2 代表了原始数据 21.77%的信息量,主要由根长(0.775)、地下部干重(0.635)、地下部鲜重(0.578)3 个性状分量决定;主成分 3 可以反映原始数据 14.51%的信息量,由总干重(0.696)和茎粗(0.547)这两个性状起主要作用;主成分 4 可以反映原始数据 7.26%的信息量,主要由根冠比(0.403)这一性状决定。结果表明,玉米苗期耐热性是由多重生理机制共同控制的复合性状,不同品种可能采取“维持地上部光合”或“促进根系发育”等差异化的生理策略来应对高温。鉴于各综合指标代表了不同的生理贡献维度,其权重各异,因此需利用隶属函数法对供试品种进行综合评价。

**Table 5.** Heat tolerance coefficient and contribution rate of each comprehensive index

**表 5.** 各综合指标的耐热系数及贡献率

综合指标		$CI_1$	$CI_2$	$CI_3$	$CI_4$
特征根		3.678	2.600	1.450	1.052
贡献率(%)		33.440	23.640	13.184	9.564
累计贡献率(%)		33.440	57.080	70.263	79.828
特征向量	株高	0.740	0.521	-0.136	0.069
	茎粗	0.463	0.436	0.547	0.441
	根长	-0.407	0.755	0.109	-0.133
	叶面积	0.780	0.325	-0.301	0.147
	地上部鲜重	0.812	0.337	-0.230	0.217
	地下部鲜重	-0.362	0.578	0.265	0.190
	地上部干重	0.681	0.295	-0.081	-0.653
	地下部干重	-0.463	0.635	-0.426	-0.271
	总干重	-0.173	0.459	0.696	-0.261
	根冠比	-0.647	0.317	-0.400	0.403
	叶绿素含量	0.475	-0.463	0.271	0.006

注:  $CI$  为综合指标(Comprehensive Index, CI)。

### 3.4. 耐热性综合评价

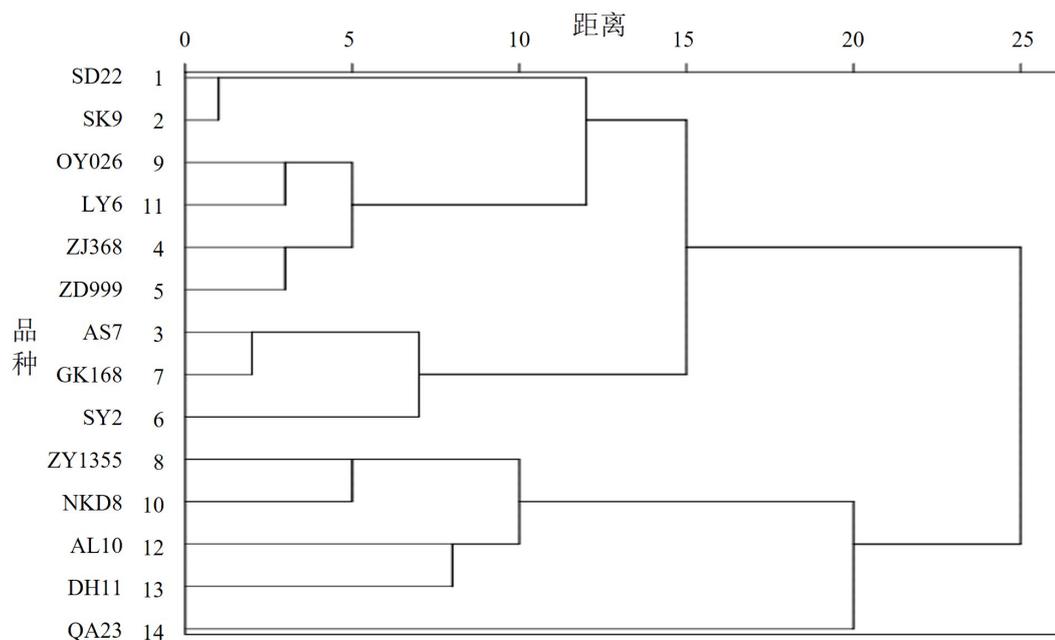
根据公式(2)计算参试玉米 4 个综合指标的隶属函数值,由表 6 看出,对同一综合指标,玉米 SY2 的  $u(x_2)$  值最大为 1,代表此品种在  $CI_2$  中耐热性最强,玉米 DH11 在  $u(x_2)$  中的值最小为 0,代表此品种在

CI2 中的耐热性最差。根据公式(3)计算参试玉米 4 个综合指标的权重, 分别为 0.42、0.30、0.17 和 0.12。按公式(4)计算出参试玉米的综合耐热指数 D, 按 D 值由大到小排列, 其中 SD22 的抗热性最好, D 值为 0.85。品种 QA23 的 D 值最小为 0.06, 表明其耐热能力最弱。

**Table 6.** System resulting data of standard experiment comprehensive indices, weights,  $u(x_j)$ ,  $D$  values, and comprehensive evaluation of each test material

**表 6.** 各参试材料的综合指标值、权重、 $u(x_j)$ 、 $D$  值与综合评价

品种	$CI_1$	$CI_2$	$CI_3$	$CI_4$	$u(x_1)$	$u(x_2)$	$u(x_3)$	$u(x_4)$	$D$ 值	综合评价
SD22	47.95	10.48	0.17	0.54	0.97	0.85	0.42	0.98	0.85	高耐热
SK9	45.41	10.32	0.15	0.52	0.87	0.78	0.32	0.94	0.76	高耐热
AS7	36.34	10.34	0.30	0.38	0.52	0.79	1.00	0.59	0.69	中耐热
ZJ368	41.70	9.65	0.21	0.55	0.73	0.48	0.58	1.00	0.66	中耐热
ZD999	42.31	9.41	0.25	0.43	0.75	0.38	0.77	0.72	0.64	中耐热
SY2	32.82	10.82	0.22	0.28	0.38	1.00	0.64	0.35	0.60	中耐热
GK168	34.90	9.68	0.29	0.32	0.46	0.50	0.98	0.46	0.56	中耐热
ZY1355	48.64	8.79	0.21	0.13	1.00	0.10	0.61	0.00	0.55	中耐热
OY026	34.03	9.24	0.25	0.51	0.43	0.30	0.78	0.90	0.51	中耐热
NKD8	39.41	9.30	0.21	0.21	0.64	0.33	0.60	0.19	0.49	弱耐热
LY6	33.79	9.08	0.18	0.53	0.42	0.23	0.45	0.96	0.43	弱耐热
AL10	36.05	9.07	0.14	0.35	0.51	0.23	0.28	0.53	0.39	弱耐热
DH11	31.46	8.55	0.18	0.17	0.33	0.00	0.47	0.08	0.22	热敏感
QA23	23.14	8.80	0.08	0.23	0.00	0.11	0.00	0.23	0.06	热敏感
权重					0.42	0.30	0.17	0.12		



**Figure 1.** Cluster tree of 14 maize varieties

**图 1.** 14 种玉米品种聚类树状图

通过对  $D$  值进行聚类分析, 由图 1 可以得出, 可以将 14 个玉米品种耐热性分为四类, SD22、SK9 为第一类, 属于高耐热品种; AS7、ZG368、ZD999、SY2、GK168、ZY1355 和 OY026 为第二类, 属于中耐热品种; NKD8、LY6 和 AL10 为第三类, 属于低耐热品种; DH11 和 QA23 为第四类, 属于热敏型品种。

#### 4. 讨论与结论

选育耐热型品种是应对高温热害最根本、最经济的措施[3]。玉米苗期是对高温胁迫极为敏感的关键阶段, 苗期耐热性的强弱直接影响植株后续的营养生长、生殖发育及最终产量形成[5] [11]。高温胁迫显著抑制玉米幼苗的株高增加、茎秆增粗、根系伸长及叶片扩展, 导致叶绿素降解、光合能力下降, 最终表现为植株矮小、叶片发黄枯槁[5] [6]。本研究通过对 14 个商洛主栽玉米品种进行高温胁迫处理发现, 各参试品种 11 个单项指标均有不同程度的下降, 但不同耐热类型品种表现出显著的生理差异。高耐热品种 SD22 的综合优势并非单一指标的突出, 而是源于其独特的根系维持策略: 在高温胁迫下, SD22 能够维持较高的根冠比和根系活力, 确保了水分和养分的吸收能力, 从而为地上部的生长提供了基础支撑; 相比之下, 部分热敏品种虽然叶绿素含量下降幅度较小, 但因根系生长受抑严重, 导致整体耐热性较差。这表明, 根系功能的稳定性可能是玉米苗期耐热的关键生理基础。

准确的耐热性评价和鉴定是选育耐热品种的重要前提。主成分分析、隶属函数法及聚类分析相结合的综合评价方法, 已被广泛应用于玉米、大豆、小麦等作物的耐热、耐盐、耐旱性鉴定中。玉米耐热性评价体系构建需考虑指标间的相关性, 通过降维处理提取综合指标, 以提高评价的科学性和准确性[3] [7]。玉米品种耐热性评价体系对耐热玉米品种的培育与鉴定十分重要, 且各指标之间具有很强的相关性, 本研究利用主成分分析将 11 个单项指标转化为相互独立的综合指标, 有效避免了指标间信息重叠对评价结果的干扰。评价结果显示, 根冠比作为关键的综合指标(CI4), 在耐热性筛选中具有决定性作用。耐热品种(如 SK9、SD22)在高温下仍能保持较高的根冠比, 说明其具有较强的碳同化物向根系分配的调控能力, 这是其适应高温环境的重要生理机制。通过隶属函数法与聚类分析, 本研究将 14 份玉米品种科学划分为高耐热、中耐热、弱耐热和热敏型 4 类, 验证了综合评价体系在玉米苗期耐热性鉴定中的适用性, 为耐热种质资源的精准筛选提供了方法参考。

我国玉米种植区域辽阔, 生态气候条件差异显著。东北、华北、西南是我国三大玉米主产区, 其中东北地区以硬粒型品种为主, 华北地区以马齿型品种为主, 西南地区则以半马齿型为主[14]。不同生态区高温热害的类型、程度和持续时间各异, 对玉米生产的影响也存在显著差异[15]。因此, 选育耐热性高的玉米品种必须考虑区域适应性, 针对不同生态区的气候特点选择适宜本地种植的种质资源。商洛地处陕西南部, 属暖温带半湿润季风气候, 夏季高温频发, 对玉米苗期生长构成严重威胁。本研究通过对商洛地区 14 个主栽玉米品种进行苗期耐热性鉴定, 筛选出 SK9 和 SD22 两个高耐热品种, 这两个品种在高温胁迫下表现出较强的生长维持能力和生理稳定性, 适宜在商洛地区推广种植; 而 DH11 和 QA23 耐热性较差, 易受高温影响, 在高温年份或高温区域种植风险较大。该研究结果可为商洛地区玉米耐热品种选育、品种布局及抗逆栽培提供理论依据。

#### 基金项目

陕西省大学生创新创业训练计划项目(S202411396089); 商洛学院科研基金项目(17SKY016)。

#### 参考文献

[1] 霍治国, 张海燕, 李春晖, 等. 中国玉米高温热害研究进展[J]. 应用气象学报, 2023, 34(1): 1-14.

- [2] 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.
- [3] 李汶哲, 王候文, 张润泽, 等. 玉米耐热性遗传改良研究进展[J]. 玉米科学, 2025, 33(8): 26-34.
- [4] 张艺桐. 气象条件对玉米生长发育关键期的影响研究[J]. 农业灾害研究, 2025, 15(5): 178-180.
- [5] 方芳, 何序晨, 张志豪, 等. 玉米自交系苗期对高温胁迫的响应机制及其抗逆性[J]. 浙江农业学报, 2019, 31(7): 1045-1056.
- [6] 李新浩, 邢梦柯, 周梓惠, 等. 外源褪黑素通过协调光反应与暗反应增强玉米苗期的耐热性[J]. 作物学报, 2026, 52(3): 839-856.
- [7] 胡俊杰. 玉米耐热性评价体系的建立和应用[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中农业大学, 2022.
- [8] 刘兆丽, 王同芹, 刘世敏, 等. 玉米耐热性评价研究进展[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(2): 16-18.
- [9] 吴小娟, 杨雯, 解如琳, 等. 高温胁迫对玉米品种‘郑单 958’幼苗生长及部分生理指标的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2018, 27(2): 117-119.
- [10] 齐红志, 马俊峰, 段俊枝, 等. 高温干旱复合胁迫对玉米器官发育、生理功能和产量形成的影响研究进展[J]. 江苏农业学报, 2025, 41(6): 1240-1248.
- [11] 滕元旭, 支梦婷, 李铭东, 等. 玉米自交系苗期耐热性综合评价[J]. 玉米科学, 2020, 28(1): 65-71.
- [12] 牛丽, 刘源, 于康珂, 等. 玉米杂交种苗期耐热性评价[J]. 玉米科学, 2015, 23(1): 107-114.
- [13] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [14] 曾苏明. 解析我国玉米种植分布与气候关系研究[J]. 农村实用技术, 2021(6): 35-36.
- [15] 杨坤, 付春香, 李俊芳, 等. 气候胁迫下玉米高产稳产育种研究进展与展望[J]. 黑龙江农业科学, 2025(9): 100-108.