

冬小麦苗期抗旱性综合评价与指标筛选

张育哲¹, 王博华¹, 孙娜^{1,2}, 程宇坤¹, 王兆强¹, 耿洪伟¹, 任毅¹

(1. 新疆农业大学农学院/新疆农业大学优质专用麦类作物工程技术研究中心, 新疆乌鲁木齐 830052;

2. 伊犁州农业科学研究所, 新疆伊宁 835000)

摘要:为明确不同小麦品种(系)苗期根系形态与抗旱性的关系,以20%聚乙二醇(PEG-6000)模拟干旱对300份国内外冬小麦品种(系)进行苗期抗旱性鉴定,测定了8个根系性状(根尖数、根体积、根表面积、根总长、根平均直径、最长根长、根干重和根鲜重),结合多元统计方法(相关性分析/隶属函数法/聚类分析/主成分分析)进行抗旱性综合评价。结果表明,与常规处理相比,干旱胁迫后各根系指标均极显著下降($P < 0.01$),说明苗期干旱胁迫会对小麦根系生长发育产生抑制作用。供试小麦的抗旱综合评价D值为0.09~0.86。通过聚类分析将供试材料抗旱类型分为5类,内乡5号和皖23094为高抗旱型,豫麦49、皖麦38、C39等21份材料为抗旱型,济麦20、Mantol、扬麦10号等70份材料为中抗旱型,中麦895、淮麦18、RE714等114份材料为干旱敏感型,繁6、宁麦9号、Aca 801等93份材料为干旱高敏感型。比较不同麦区苗期抗旱类型分布频率发现,黄淮冬麦区可作为筛选抗旱优异种质的重点麦区。主成分分析表明,苗期抗旱性鉴定可参考根表面积、根体积、根鲜重和根平均直径。

关键词: 冬小麦; 苗期; 抗旱性; 根系性状; 评价

中图分类号: S512.1; S332.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-1041(2025)12-1647-08

Comprehensive Evaluation and Indicator Screening of Drought Tolerance in Winter Wheat Seedlings

ZHANG Yuzhe¹, WANG Bohua¹, SUN Na^{1,2}, CHENG Yukun¹,
WANG Zhaoqiang¹, GENG Hongwei¹, REN Yi¹

(1. College of Agronomy/Special High Quality Triticeae Crops Engineering and Technology Research Center, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China; 2. Yili Institute of Agricultural Sciences, Yining, Xinjiang 835000, China)

Abstract: To clarify the relationship between root morphology at seedling stage and drought resistance characteristics of different wheat varieties (lines), this study simulated drought conditions using 20% polyethylene glycol (PEG-6000) to assess the drought resistance of 300 domestic and foreign winter wheat samples at the seedling stage. Eight root morphological indicators were determined: root tip number, root volume, root surface area, total root length, root average diameter, longest root length, root dry weight and root fresh weight, and a comprehensive evaluation of root traits was conducted using various statistical methods (correlation analysis, membership function method, cluster analysis, and principal component analysis). The results showed compared with the normal treatment, the measured indicators of wheat root under drought stress treatment decreased significantly ($P < 0.01$). Indicating that drought stress at the seedling stage significantly inhibited the root growth of wheat. The comprehensive drought resistance evaluation D value for the tested wheat varieties was

收稿日期: 2025-04-15 修回日期: 2025-06-18

基金项目: 新疆维吾尔自治区重点研发专项(2022B02015-2); 新疆维吾尔自治区教育厅高校基本科研业务费(XJEDU2023J015); 新疆维吾尔自治区人才发展基金“天池英才”引进计划项目; 新疆农业大学作物学重点学科发展基金项目(XNCDKY2023001)

第一作者 E-mail: 910021322@qq.com (张育哲)

通讯作者 E-mail: demo0999@163.com (任毅)

between 0.09 and 0.86. Cluster analysis categorized the tested materials into five types of drought resistance; Neixiang 5 and Wan 23094 were classified as highly drought-resistant, 21 samples including Yumai 49, Wanmai 38 and C39 were drought resistant type, 70 samples including Jimai 20, Mantol and Yangmai 10 were moderately drought resistant type, and 114 samples including Zhongmai 895, Huaimai 18 and RE714 were drought sensitive type, P3 samples including Fan 6, Ningmai 9 and Aca 801 were classified as highly drought sensitive. Comparing the distribution frequency of different drought resistance types across wheat growing regions revealed that the Huang-Huai winter wheat area is an important region for screening elite drought-resistant germplasm. Principal component analysis indicated that the assessment of seedling stage drought resistance refers to root surface area, root volume, root fresh weight and average root diameter. The results of this study may provide reference for the screening and utilization of drought-resistant germplasm in wheat.

Keywords: Winter wheat; Seedling stage; Drought resistance; Root character; Evaluation

小麦是全球三大主要粮食作物之一,丰富的碳水化合物、蛋白质和膳食纤维使其成为人们获取优质蛋白和热量的重要来源^[1]。随着全球人口持续增长,小麦将会产生巨大的产量缺口,亟需通过增加产量、减少损耗以应对全球人口高速增长带来的主粮危机^[2]。然而,全球极端天气频发、降水减少等因素,使得全球近 50% 的小麦产区遭受干旱,严重时小麦减产超过 70%^[3]。因此,培育抗旱小麦品种是干旱地区应对小麦减产的重要举措之一。

小麦苗期遭遇干旱时,生长和产量都会受到严重影响,其干旱适应性首先在苗期根系中表现出来^[4]。因此,苗期被认为是评估小麦抗旱性的最佳阶段^[5]。根系对作物水分和养分获取、环境适应及生长发育至关重要^[6]。干旱条件下,小麦根系通过改变其解剖结构和水分吸收动力应对干旱胁迫^[7];苗期的根系形态是成株期根系分布的基础,与产量形成密切相关^[8]。聚乙二醇(PEG-6000)易溶于水且无法透过植物细胞壁,可用于模拟植物干旱环境^[9]。采用 PEG-6000 模拟水分胁迫环境进行苗期抗旱性鉴定,可以快速评估材料的抗旱能力,为优质抗旱种质的选育提供指导。

小麦抗旱性受多基因调制,用单一指标对其抗旱性评价具有局限性。研究人员多采用主成分分析、聚类分析和隶属函数等多种方法,对小麦幼苗期抗旱性相关的多个指标进行综合评估^[10-12]。张军等^[13]对 8 份黄淮麦区主推强筋冬小麦品种用 20% PEG-6000 模拟干旱胁迫,分别进行萌发期和苗期的抗旱性鉴定,发现总根长是强筋小麦抗旱性评价的重要指标。Xue 等^[14]对国内 163 份小麦材料在萌发期和苗期进行 PEG-6000 模拟

干旱胁迫试验,依据抗旱性综合评价 D 值筛选到 14 份高抗旱性小麦品种(系)。周全等^[15]对来源不同的 244 份春小麦进行了苗期抗旱性鉴定,筛选出 22 份高抗旱材料,并认为根部生物量是评估苗期抗旱性的有效指标。陈春舟等^[16]则认为,总根体积和苗干重是甘肃春小麦苗期评价抗旱、耐盐性的有效指标。

虽然有关小麦苗期抗旱性研究较多,但所涉品种较少且来自同一麦区,没有对比不同生态区材料之间的抗旱性,不利于优异抗旱资源交流利用。本研究拟通过对不同来源的国内外 300 份冬小麦品种(系)进行苗期抗旱性鉴定,以期筛选到抗旱种质、获得评价抗旱性关键性状、解析中国冬麦区种质资源抗旱性分布规律,为小麦抗旱育种亲本选配提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

本研究选用由夏先春研究员团队提供的 300 份小麦种质为供试材料。其中,国外引进材料 65 份;国内材料 235 份,来自中国四大冬麦核心产区,即黄淮冬麦区(121 份)、北部冬麦区(51 份)、长江中下游冬麦区(41 份)和西南冬麦区(22 份)。

1.2 试验设计

经前期试验,确定 20% 为 PEG-6000 的理想干旱模拟浓度^[17]。该浓度可在保证植株存活的前提下对苗期小麦形成有效干旱胁迫。

选取籽粒饱满、无病理特征的小麦种子,用 5% 次氯酸钠溶液表面灭菌 15 min,经蒸馏水冲洗 3 次后转入铺有无菌湿润滤纸的育苗盒中培养。当幼苗发育至一叶一心期,选形态均一的一个

体,采用海绵固定装置将其固定于漂浮板,随后转移至盛装 10 L Hoagland 营养液的栽培容器进行培养。幼苗两叶一心期用 20% 的 PEG-6000 进行胁迫处理,以 Hoagland 营养液培养为对照;持续培养 21 d 后进行根系表型数据采集。试验全程温度为 23 ± 2 °C,光周期 12 h/12 h,采用气泵维持水体中的氧气含量,并于每周更新营养液,每份种质 3 次重复,每个重复 10 株幼苗^[18]。

1.3 根系性状的测定

单株根系经蒸馏水清洗后平铺于扫描平台,使用 MICROTEK Phantom 9900XL 扫描仪获取高清无重叠根系图像,并通过万深分析软件解析根总长(total root length, TRL)、根尖数(root tip number, RTN)、根系平均直径(root average diameter, RAD)、根体积(root volume, RV)及根表面积(root surface area, RSA)5 个指标。最长根长(longest root length, LRL)采用直尺测定。上述指标测量完成后使用天平(0.1 mg)测定根鲜重(root fresh weigh, RFW)。随后经过 105 °C 杀青 30 min 后,80 °C 烘干至恒重,测定根干重(root dry weight, RDW)。最终所有数据均为 3 次重复的平均值。

1.4 数据处理与分析

采用抗旱系数(drought tolerance coefficient, DTC)和综合抗旱系数(comprehensive drought tolerance coefficient, CDTC)直接评价方法、模糊隶属函数法以及基于模糊隶属函数法的抗旱综合评价(D 值)法对供试材料抗旱性进行评价。DTC 和 CDTC 的计算参考赵佳佳等^[8]的方法。

模糊隶属函数值和抗旱综合评价 D 值的计算参考任毅等^[19]的方法。

采用 Excel 2016、SPSS 27.0 对数据进行处理、t 检验、主成分分析、聚类分析和相关性分析等,主成分分析遵循 Kaiser-Guttman 准则($\lambda > 1$, 累计解释方差 $> 80\%$)选取主成分。

2 结果与分析

2.1 干旱对冬小麦苗期根系性状的影响

苗期根系表型分析结果(表 1)显示,供试材料的 8 个根系性状在干旱处理与对照间均存在广泛表型变异,变异系数分别为 18.17%~58.20% 和 20.06%~53.87%。干旱处理下,根尖数变异系数最大,达到 58.20%,最大值(129.92)接近最小值(8.50)的 15 倍;除根干重以外性状表型值较对

表 1 干旱胁迫下冬小麦苗期根系性状的变化

Table 1 Changes in root traits of winter wheat at seedling stage under drought stress

性状 Trait	处理 Treatment	最大值 Max.	最小值 Min.	平均值 Average	标准差 SD	变异系数 CV/%	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis
RTN	CK	178.17	15.25	63.12	34.01	53.87	0.60	-0.43
	DS	129.92	8.50	40.08**	23.33	58.20	1.20	1.26
RV/cm ³	CK	0.57	0.05	0.23	0.10	43.06	1.00	0.65
	DS	0.33	0.03	0.13**	0.06	46.14	1.30	1.83
RSA/cm ²	CK	18.22	3.66	9.66	2.75	28.51	0.47	-0.05
	DS	13.90	1.82	5.85**	1.91	32.64	0.72	0.99
TRL/cm	CK	97.17	21.89	50.61	15.35	30.32	0.34	-0.30
	DS	63.99	9.46	32.61**	9.78	29.98	0.42	0.24
RAD/mm	CK	1.05	0.39	0.67	0.14	20.83	0.25	-0.76
	DS	0.96	0.37	0.60**	0.11	18.17	0.63	0.24
LRL/cm	CK	39.12	6.92	17.41	4.46	25.61	0.55	1.81
	DS	22.37	4.78	13.52**	3.86	28.53	0.04	-0.73
RDW/mg	CK	113.33	15.33	47.35	9.50	20.06	0.56	0.61
	DS	102.00	9.67	50.30**	13.13	26.10	0.40	0.81
RFW/mg	CK	1 485.00	150.33	672.22	252.27	37.52	0.65	0.34
	DS	1 028.00	86.67	361.45**	160.15	44.30	1.09	1.10

RTN:根尖数;RV:根体积;RSA:根表面积;TRL:根总长;RAD:根平均直径;LRL:最长根长;RDW:根干重;RFW:根鲜重;CK:对照;DS:干旱处理。*: $P < 0.01$ 。

RTN: Root tip number; RV: Root volume; RSA: Root surface area; TRL: Total root length; RAD: Root average diameter; LRL: Longest root length; RDW: Root dry weight; RFW: Root fresh weight; CK: Control; DS: Drought treatment. **: $P < 0.01$.

照均极显著下降 ($P < 0.01$), 说明各根系性状在苗期受干旱胁迫影响显著。两种条件下各根系性状偏度及峰度的绝对值在 1 附近, 基本呈现出正态分布, 符合数量性状特点。综上所述, 各性状表型数据均呈连续性的分布且变异系数较大, 说明供试冬小麦品种具有较大的遗传变异。

2.2 苗期根系性状抗旱系数相关性分析

对各根系性状的抗旱系数进行相关性分析, 结果(表 2)表明, 根平均直径抗旱系数与最长根长抗旱系数无显著相关性, 与根总长抗旱系数和根尖数抗旱系数呈极显著负相关 ($P < 0.01$); 其余各性状抗旱系数间均呈极显著正相关, 其中根表面积抗旱系数与根体积抗旱系数相关性最高, 达到 0.93。这表明在 PEG-6000 胁迫下根系各性状所提供的信息有重叠现象。因此, 仅依靠上述小麦根系抗旱系数对不同品种(系)的抗旱性进行评价可能存在一定缺陷, 故引入抗旱综合评价指标 (D 值) 对小麦抗旱性进行综合评价。

2.3 小麦苗期抗旱性综合评价

对供试材料的 8 个根系性状的抗旱系数进行隶属函数值的计算, 并利用加权平均得到综合评价价值 (D 值)。结果发现, 参试材料 8 个性状的综合抗旱系数介于 0.32~1.56 之间, 各性状平均隶属函数值介于 0.23(根尖数)~0.49(最长根长)之间, 各性状权重范围在 0.06(根平均直径)~0.16(根表面积)间, D 值介于 0.05(藁城 8901)~0.88(内乡 5 号)。

2.4 苗期抗旱性聚类分析

采用 SPSS 21.0 以 D 值为因素对供试材料进行聚类分析, 在欧式距离为 5 处将其分为 5 大

类(表 3): I 类为高抗旱型, 包括内乡 5 号、皖 23094, 占供试材料的 0.67%, D 值平均为 0.86; II 类为抗旱型, 包括豫麦 49、皖麦 38、C39 等 21 个品种(系), 占供试材料的 7.00%, D 值平均为 0.65; III 类为中抗旱型, 包括济麦 20、Mantol、扬麦 10 号等 70 份品种(系), 占供试材料的 23.33%, D 值平均为 0.47; IV 类为干旱敏感型, 包括中麦 895、淮麦 18、RE714 等 114 个品种(系), 占供试材料的 38.00%, D 值平均为 0.33; V 类为干旱高敏感型, 包括繁 6、宁麦 9 号、Aca 801 等 93 个品种(系), 占供试材料的 31.00%, D 值平均为 0.19。国内品种(系)中等及以上抗旱型占比 31.48%, 高于国外品种(系)。

2.5 苗期不同抗旱类型品种(系)在不同麦区的分布

从表 4 可知, 高抗旱型小麦品种(系)共 2 份, 分别来自黄淮冬麦区和长江中下游冬麦区。在北部冬麦区、黄淮冬麦区、西南冬麦区及长江中下游冬麦区中, 抗旱类型为中等及以上的小麦品种(系)分别为 14 份(27.45%)、52 份(42.98%)、1 份(4.55%)和 7 份(17.08%)。由此可见, 四大冬麦区小麦品种(系)苗期抗旱性表现由强到弱依次为黄淮冬麦区、北部冬麦区、长江中下游冬麦区和西南冬麦区。

2.6 苗期根系性状抗旱系数的主成分分析

对各根系性状抗旱系数进行主成分分析, 根据主成分选取原则, 主成分 1 和主成分 2 的特征值 $\lambda > 1$, 其累计贡献率达 83.29%, 表明可将所测 8 个指标中具有相同效力的指标归为两个相互独立的综合指标(表 5)。主成分的载荷反映各性状对主成分的贡献大小, 即各性状的载荷值绝对值

表 2 苗期不同根系性状抗旱系数间的相关性

Table 2 Correlation between different drought tolerance coefficients of root traits at seedling stage

性状 Trait	DTC_LRL	DTC_TRL	DTC_RSA	DTC_RV	DTC_RAD	DTC_RTN	DTC_RFW
DTC_TRL	0.63**						
DTC_RSA	0.61**	0.87**					
DTC_RV	0.50**	0.67**	0.93**				
DTC_RAD	0.03	-0.15**	0.27**	0.50**			
DTC_RTN	0.49**	0.86**	0.74**	0.58**	-0.21**		
DTC_RFW	0.50**	0.70**	0.89**	0.86**	0.37**	0.61**	
DTC_RDW	0.46**	0.60**	0.74**	0.72**	0.37**	0.45**	0.75**

DTC_LRL、DTC_TRL、DTC_RSA、DTC_RV、DTC_RAD、DTC_RTN、DTC_RFW 和 DTC_RDW 分别表示最长根长、根总长、根表面积、根体积、根平均直径、根尖数、根鲜重和根干重的抗旱系数; 表 5 同。*: $P < 0.01$ 。

DTC_LRL, DTC_TRL, DTC_RSA, DTC_RV, DTC_RAD, DTC_RTN, DTC_RFW, and DTC_RDW represent the drought resistance coefficient of longest root length, total root length, root surface area, root volume, root average diameter, root tip number, root fresh weight, and root dry weight, respectively; The same in Fig. 5. *: $P < 0.01$.

表 3 供试材料苗期抗旱类型分布
Table 3 Distribution of drought tolerance types at seedling stage of the test materials

类型 Type	D 值 D value	全部材料 All material		国外材料 Foreign material		国内材料 Domestic material	
		数量 No.	频率 Frequency/%	数量 No.	频率 Frequency/%	数量 No.	频率 Frequency/%
I	0.86	2	0.67	0	0	2	0.85
II	0.65	21	7.00	4	6.15	17	7.23
III	0.47	70	23.33	15	23.08	55	23.40
IV	0.33	114	38.00	32	49.23	82	34.90
V	0.19	93	31.00	14	21.54	79	33.62
总计 Total	—	300	100	65	100	235	100

表 4 供试品种(系)苗期抗旱类型分布
Table 4 Distribution of drought tolerance types of varieties(lines) at seedling stage

类型 Type	北部冬麦区 NWWR		黄淮冬麦区 YHFWWR		西南冬麦区 SWWR		长江中下游冬麦区 MLYWWR	
	数量 No.	频率 Frequency/%	数量 No.	频率 Frequency/%	数量 No.	频率 Frequency/%	数量 No.	频率 Frequency/%
I	0	0.00	1	0.83	0	0.00	1	2.44
II	4	7.84	12	9.92	0	0.00	1	2.44
III	10	19.61	39	32.23	1	4.55	5	12.20
IV	21	41.18	31	25.62	12	54.55	18	43.90
V	16	31.37	38	31.40	9	40.90	16	39.02
总计 Total	51	100	121	100	22	100	41	100

NWWR: 北部冬麦区; YHFWWR: 黄淮冬麦区; SWWR: 西南冬麦区; MLYWWR: 长江中下游冬麦区。

NWWR: Northern winter wheat region; YHFWWR: Huang-Huai winter wheat region; SWWR: Southwestern winter wheat region; MLYWWR: Middle and lower Yangtze River winter wheat region.

表 5 主成分载荷矩阵及贡献率
Table 5 Principal component loading matrix and contribution rate

主成分 Principal component	载荷值 Loadings								特征值 Eigenvalue	贡献率/% Contribution	累计贡献率/% Cumulative contribution
	DTC_RTN	DTC_RV	DTC_RSA	DTC_TRL	DTC_RAD	DTC_LRL	DTC_RDW	DTC_RFW			
1	0.77	0.91	0.98	0.87	0.26	0.68	0.81	0.91	5.15	64.42	64.42
2	-0.49	0.29	0.02	-0.42	0.93	-0.22	0.25	0.18	1.51	18.87	83.29

越大,则在主成分中的作用就越大。主成分 1 中对抗旱性具有较高正向贡献的性状是根表面积(0.98)、根体积(0.91)和根鲜重(0.91);主成分 2 中根平均直径(0.93)的抗旱系数相关性最高。

3 讨论

3.1 小麦苗期抗旱性评价指标分析

本研究用 20% PEG-6000 胁迫处理后,小麦根系性状中除根平均直径与根干重外,其余性状相较对照的下降幅度均超过 20%。这与周全等^[15]对春小麦的最长根长、根鲜重以及吴秀宁

等^[11]对冬小麦最长根长的研究结果一致。然而,胡润慧等^[20]的研究中,干旱胁迫下根体积和根表面积较对照的降幅不足 10%,且根平均直径显著增大。该差异可能源于试验品种的不同。上述结果表明,根平均直径、根体积和根表面积与小麦抗旱性显著相关,可作为抗旱性研究的方向。

3.2 不同来源小麦抗旱类型的分布及抗旱种质的评价

小麦在全球范围内种植面积广,具有丰富的遗传变异,对主产区小麦品种(系)进行抗旱性鉴定时引入其他国家及地区的优异冬麦品种(系),

可以构建覆盖多生态区的抗旱评价体系,为精准鉴定小麦抗旱性及培育具有广适性的优异新种质提供遗传基础。

长江中下游及西南冬麦区年降水盈余量达 500 mm 以上,自然降水供给基本可以满足小麦全生育期水分需求,常规年份无需额外灌溉^[21]。且该区域春季频发持续性阴雨,夏季多雨易发生洪涝灾害,塑造了该区域内的品种(系)的生态适应性^[22]。本研究中,这两个麦区小麦中 80% 以上品种(系)对干旱敏感或高度敏感,这与胡雯媚等^[23]对西南麦区小麦品种(系)抗旱性鉴定的研究结果相似。

黄淮冬麦区抗旱性材料的占比远高于其他 3 个冬麦区。王志等^[24]采用 KASP 分型技术对 99 份黄淮冬麦区小麦品种(系)的 3 个关键抗旱基因(*COMT-3B*、*Dreb-B1*、*TaSST-4A*)进行检测,发现 99 个品种(系)均至少携带 1 个抗旱基因;44.44% 的材料同时携带 2 个及以上的抗旱基因。2023 年中国小麦播种面积共计 2 362 万 hm^2 ,属于黄淮冬麦区的山东省(400 万 hm^2)和河南省(568 万 hm^2)播种面积占全国总播种面积的 40.98%,区域内全年 $>10\text{ }^\circ\text{C}$ 积温约 4 100 $^\circ\text{C}$ 、日照时数 2 400 h、平均年气温 9~15 $^\circ\text{C}$,小麦生长期降水量在 150~300 mm 之间,低于小麦正常生长所需水量^[25-28]。因此黄淮冬麦区常作为小麦抗旱品种培育试验区。

对供试材料的抗旱指标 *D* 值评估中,内乡 5 号和皖 23094 为高抗旱型品种,丰产 3 号、烟农 15 等 21 个品种表现为抗旱型,上述品种主要分布于黄海及北部冬麦区。其中,内乡 5 号作为中国小麦育种里程碑种质,其直接衍生系(宁春系列和薄地犍系列)兼具耐旱早熟与耐贫瘠的特性^[29];其间接衍生系百农 AK58 累积推广面积达 1 187 万 hm^2 (中国种业大数据平台)。烟农 15 以高产耐肥抗旱著称(单产 7.25 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$),也是一个良好的抗旱亲本,其在 1996—2018 年间衍生出登海 202、鲁麦 22、北农 9549 等 17 个品种^[30]。这些材料为培育兼具抗旱性与高产稳产特性的小麦新品种提供了核心遗传种质,显著提高了培育抗旱优异新品种的效率。

3.3 小麦苗期抗旱性鉴定指标和评价方法

小麦苗期抗旱性鉴定是筛选耐旱品种的关键环节。孙楠楠等^[31]研究发现,小麦地下部干重可作为苗期抗旱性评价的有效指标。关月明^[32]的

研究发现,根表面积与根体积是鉴定小麦抗旱性的关键指标。本研究结果与其一致。Xue 等^[14]的研究也表明,根体积和根表面积可作为小麦苗期抗旱性评价的可靠参考指标。尽管上述研究在试验材料、方法及胁迫处理上存在差异,但所筛选的抗旱指标相同,说明其具有普适性和有效性。

单一评价方法难以全面反映作物的抗旱能力,其应用存在局限性,因此当前抗旱性研究普遍采用多维度综合指标评价体系,通过抗旱综合评价(*D* 值)、聚类分析、主成分分析等方法共同解析种质资源的抗旱能力^[20]。基于隶属函数法计算的 *D* 值可有效整合多性状的影响,在规避单一性状偏差的同时量化不同品种(系)的抗旱能力^[17]。白旭瑞^[33]通过 *D* 值聚类将 190 份黄淮冬麦区种质划分为 5 个抗旱等级,筛选出轮选 166、中麦 155 两个强抗旱品种。曲可佳等^[34]利用主成分分析法将春小麦 8 个根系形态学指标降维成两个主成分,其中根表面积与根平均直径的载荷值较高。本研究使用 *D* 值对不同小麦品种(系)苗期抗旱性进行排序,并使用聚类分析将其分为 5 个抗旱等级,主成分分析法将抗旱指标聚焦于根表面积、根体积、根鲜重和根平均直径 4 个性状。

4 结论

供试冬小麦品种(系)苗期抗旱等级可分为高抗旱型(2 份)、抗旱型(21 份)、中抗旱型(70 份)、干旱敏感型(114 份)及干旱高敏感型(93 份)。4 个麦区小麦苗期抗旱型占比表现为黄淮冬麦区 $>$ 北部冬麦区 $>$ 长江中下游冬麦区 $>$ 西南冬麦区。根表面积、根体积、根鲜重和根平均直径可作为小麦苗期抗旱性评价的主要参考指标。综合评价筛选到内乡 5 号和皖 23094 两个苗期高抗旱型品种。

参考文献:

- [1] 武丽芬,夏川,张立超,等. TaEMF2 调控小麦抽穗期的功能分析[J]. 作物学报, 2024, 50(12): 2940.
WU L F, XIA C, ZHANG L C, et al. Functional analysis of TaEMF2 in regulating wheat heading date [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2024, 50(12): 2940.
- [2] 王应党,林坤,郭凌云,等. 小麦抗旱鉴定和评价方法研究进展[J]. 中国种业, 2024(2): 1.
WANG Y D, LIN K, GUO L Y, et al. Research progress on identification and evaluation methods of drought resistance of wheat [J]. *China Seed Industry*, 2024(2): 1.
- [3] PAUDEL P, PANDEY M K, SUBEDI M, et al. Genomic ap-

- proaches for improving drought tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.): A comprehensive review [J]. *Plant Archives*, 2024, 24(1):1289.
- [4] FATIMA I, GAO Y T, XU X R, *et al.* Genome-wide association mapping of seedling biomass and root traits under different water conditions in wheat [J]. *Frontiers in Genetics*, 2021, 12:663557.
- [5] ROBIN A H K, GHOSH S, ABUSHAHED M. PEG-induced osmotic stress alters root morphology and root hair traits in wheat genotypes [J]. *Plants*, 2021, 10(6):1042.
- [6] LI C N, LI L, REYNOLDS M P, *et al.* Recognizing the hidden half in wheat: Root system attributes associated with drought tolerance [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2021, 72(14):5117.
- [7] 苗青霞, 方燕, 陈应龙. 小麦根系特征对干旱胁迫的响应[J]. *植物学报*, 2019, 54(5):652.
MIAO Q X, FANG Y, CHEN Y L. Studies in the responses of wheat root traits to drought stress [J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2019, 54(5):652.
- [8] 赵佳佳, 乔玲, 武棒棒, 等. 山西省小麦苗期根系性状及抗旱特性分析[J]. *作物学报*, 2021, 47(4):714.
ZHAO J J, QIAO L, WU B B, *et al.* Seedling root characteristics and drought resistance of wheat in Shanxi Province [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2021, 47(4):714.
- [9] 王玲, 周云莹, SAUBAN MUSA Jibril, 等. 满天星组培苗叶际内生细菌对聚乙二醇胁迫的响应[J]. *云南农业大学学报(自然科学)*, 2025, 40(1):51.
WANG L, ZHOU Y Y, JIBRIL S M, *et al.* Response of leaf endophytic bacteria in *Gypsophila paniculata* L. Tissue culture seedlings to polyethylene glycol stress [J]. *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science)*, 2025, 40(1):51.
- [10] 孙宪印, 吕广德, 许晓蕾, 等. 旱地与补灌条件下不同基因型小麦耐旱性评价[J]. *干旱地区农业研究*, 2025, 43(1):13.
SUN X Y, LV G D, QI X L, *et al.* Evaluation of drought tolerance of different wheat genotypes under dryland and supplementary irrigation conditions [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2025, 43(1):13.
- [11] 吴秀宁, 付鑫鑫, 陈月星, 等. 商洛主栽小麦品种苗期抗旱性综合评价[J]. *西北农业学报*, 2024, 33(7):1225.
WU X N, FU X X, CHEN Y X, *et al.* Comprehensive evaluation of drought resistance of main wheat varieties at seedling stage in Shangluo [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2024, 33(7):1225.
- [12] 杨丹丹, 韩雪, 孔欣欣, 等. 71份冬小麦苗期渗透胁迫抗性鉴定及相关农艺性状指标分析[J]. *作物杂志*, 2025(1):243.
YANG D D, HAN X, KONG X X, *et al.* Identification of osmotic stress resistance and analysis of related agronomic traits of 71 winter wheat seedlings [J]. *Crops*, 2025(1):243.
- [13] 张军, 魏国, 彭彦珉, 等. 8份强筋小麦品种抗旱性评价[J]. *麦类作物学报*, 2024, 44(4):442.
ZHANG J, WEI G, PENG Y M, *et al.* Drought resistance e-valuation of eight strong gluten wheat varieties [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2024, 44(4):442.
- [14] 薛振宇, 张康康, 张元元, 等. 优质抗旱小麦种质的筛选及功能基因检测[J]. *中国农业科技导报(中英文)*, 2025, 27(1):35.
XUE Z Y, ZHANG K K, ZHANG Y Y, *et al.* Screening and functional gene detection of high-quality and drought-resistant wheat germplasm [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2025, 27(1):35.
- [15] 周全, 路秋梅, 赵张晨, 等. 244份春小麦苗期抗旱性的鉴定[J]. *中国农业科学*, 2024, 57(9):1646.
ZHOU Q, LU Q M, ZHAO Z C, *et al.* Identification of drought resistance of 244 spring wheat varieties at seedling stage [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2024, 57(9):1646.
- [16] 陈春舟, 马占军, 孟亚雄, 等. 小麦种质资源抗旱耐盐性评价及种质筛选[J]. *分子植物育种*, 2021, 19(14):4820.
CHEN C Z, MA Z J, MENG Y X, *et al.* Evaluation and screening of wheat germplasm resources for drought and salt tolerance [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2021, 19(14):4820.
- [17] 李龙, 毛新国, 王景一, 等. 小麦种质资源抗旱性鉴定评价[J]. *作物学报*, 2018, 44(7):988.
LI L, MAO X G, WANG J Y, *et al.* Drought tolerance evaluation of wheat germplasm resources [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2018, 44(7):988.
- [18] 王博华, 任毅, 时晓磊, 等. 干旱胁迫下小麦苗期根系性状的全基因组关联分析[J]. *植物遗传资源学报*, 2022, 23(4):1111.
WANG B H, REN Y, SHI X L, *et al.* Genome-wide association study of root traits in wheat seedling under drought stress [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2022, 23(4):1113.
- [19] 任毅, 颜安, 张芳, 等. 国内外 301 份小麦品种(系)种子萌发期抗旱性鉴定及评价[J]. *干旱地区农业研究*, 2019, 37(3):3.
REN Y, YAN A, ZHANG F, *et al.* Identification and evaluation of drought tolerance of 301 wheat varieties (lines) at germination stage [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2019, 37(3):3.
- [20] 胡润慧, 汪军成, 司二静, 等. 小麦苗期耐旱耐盐种质筛选及耐旱耐盐综合评价[J/OL]. *作物学报*, 2025. (2025-06-11). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=XBZW20250610002&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
HU R H, WANG J C, SI E J, *et al.* Screening of drought and salt tolerant germplasm during wheat seedling stage and comprehensive evaluation of drought and salt tolerance [J/OL]. *Acta Agronomica Sinica*, 2025. (2025-06-11). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=XBZW20250610002&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [21] 马雪晴, 和骅芸, 赵金媛, 等. 1961—2020 年中国小麦生长季干湿时空变化分析[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2023, 31(4):608.
MA X Q, HE H Y, ZHAO J Y, *et al.* Spatiotemporal varia-

- tion of dry-wet climate during wheat growing seasons from 1961 to 2020 in China [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2023, 31(4): 608.
- [22] 黎景锐, 罗怀良, 刘晓冉. 气候变化背景下川中丘陵区水稻气候生产潜力分析[J]. *中国农业气象*, 2025, 46(4): 471.
- LI J R, LUO H L, LIU X R. Analysis of the climate production potential characteristics of rice under the background of climate change in hilly area of central Sichuan [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2025, 46(4): 471.
- [23] 胡雯媚, 王思宇, 樊高琼, 等. 西南麦区小麦品种苗期抗旱性鉴定及其指标筛选[J]. *麦类作物学报*, 2016, 36(2): 182.
- HU W M, WANG S Y, FAN G Q, *et al.* Analysis on the drought resistance and screening of drought resistance appraisal indexes of wheat cultivars in seedling stage in southwest area [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2016, 36(2): 182.
- [24] 王志, 李寒冰, 王伟, 等. 黄淮麦区小麦品种(系)品质与抗性基因的 KASP 分型检测[J]. *湖北农业科学*, 2025, 64(4): 51.
- WANG Z, LI H B, WANG W, *et al.* Detection of quality and resistance genes of wheat varieties (lines) in Huang-Huai wheat region by KASP genotyping technology [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2025, 64(4): 51.
- [25] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2024.
- National Bureau of Statistics of China. China statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2024.
- [26] 山东省统计局. 山东统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2024.
- Bureau of Statistics of Shandong Province. Shandong statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2024.
- [27] 河南省统计局. 河南统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2024.
- Bureau of Statistics of Henan Province. Henan statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2024.
- [28] 赵广才. 中国小麦种植区划研究(一)[J]. *麦类作物学报*, 2010, 30(5): 886.
- ZHAO G C. Study on Chinese wheat planting regionalization (I) [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2010, 30(5): 886.
- [29] 张志鹏. 20世纪中国小麦育种事业发展史研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
- ZHANG Z P. Study on the development history of Chinese wheat breeding in the 20th century [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2022.
- [30] 孙亮, 刘洁, 王鹏, 等. 烟农 15 的特性分析及育种应用[J]. *中国农技推广*, 2019, 35(8): 37.
- SUN L, LIU J, WANG P, *et al.* Characteristic analysis and breeding application of Yannong 15 [J]. *China Agricultural Technology Extension*, 2019, 35(8): 37.
- [31] 孙楠楠, 周全, 职蕾, 等. 240份小麦苗期抗旱性鉴定及抗旱指标与重要农艺性状的相关性分析[J]. *西北农业学报*, 2022, 31(2): 147.
- SUN N N, ZHOU Q, ZHI L, *et al.* Identification of drought resistance at seedling stage and correlation analysis between drought resistance indexes and important agronomic characters of 240 wheat materials [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2022, 31(2): 147.
- [32] 关月明. 旱作小麦耗水特性及高产抗旱品种筛选[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2024.
- GUAN Y M. Water consumption characteristics of dryland wheat and screening of high-yielding and drought-resistant varieties [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2024.
- [33] 白旭瑞. 小麦苗期抗旱性鉴定及抗旱品种筛选[D]. 保定: 河北农业大学, 2021.
- BAI X R. Identification of drought resistance of wheat at seedling stage and selection of drought resistant varieties [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2021.
- [34] 曲可佳, 时晓磊, 张恒, 等. PEG 处理下引进春小麦品种苗期抗旱性评价[J]. *新疆农业科学*, 2023, 60(6): 1363.
- QU K J, SHI X L, ZHANG H, *et al.* Evaluation of drought resistance of introduced spring wheat under PEG treatment [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2023, 60(6): 1363.