

# 新疆冬小麦萌发期抗旱性综合评价

张芳<sup>1</sup>, 颜安<sup>2</sup>, 任毅<sup>1</sup>, 杨卫君<sup>1</sup>, 耿洪伟<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>新疆农业大学农学院生物技术重点实验室, 乌鲁木齐 830052; <sup>2</sup>新疆农业大学草业与环境科学学院, 乌鲁木齐 830052)

**摘要:** 研究新疆冬小麦萌发期对旱胁迫的响应, 并进行抗旱性综合评价, 为小麦萌发期抗旱品种的评价和筛选提供理论依据。本研究采用 20% PEG-6000 胁迫剂并利用位于 5BS 染色体上的功能标记 *TaNRX-a1* 和 *TaNRX-b1* 分别进行萌发期抗旱鉴定和分子标记检测, 从而对 83 份新疆冬小麦品种(系)进行萌发期抗旱性综合评价。测定小麦发芽率、发芽势、发芽指数、根数、最长根长、苗高和胚芽鞘长度 7 个指标, 结果表明, 旱胁迫均值较对照处理分别下降 30.86%、23.91%、31.37%、0.43%、31.07%、50.27% 和 6.61%。在 83 份新疆冬小麦品种(系)中 *TaNRX-a* 和 *TaNRX-b* 变异类型频率分别占 83.1% 和 16.9%。具有种子萌发期高抗旱能力等位变异 *TaNRX-a* 为优势等位变异。在种子萌发期高抗旱能力的优势等位变异 *TaNRX-a* 变异类型的材料中地方品种、引进品种和自育品种的频率依次为 93.8%、82.1% 和 79.5%。通过加权隶属函数法及分子标记检测相结合表明, 抗旱性最强且具有 *TaNRX-a* 变异类型的品种(系)有昌冬 5 号、早洋麦、卡衣木红、纳瓦提然和高加索。相关性分析表明, 胚芽鞘长、最长根长分别与萌发期综合评价值 *D* 值的相关性较大分别为 0.557、0.516, 可作为小麦抗旱性快速鉴定指标。本研究将表型和分子标记相结合, 能更有效地评价小麦萌发期抗旱能力。

**关键词:** 小麦; 萌发期; 抗旱性; 隶属函数法; 功能标记

## Evaluation on Drought Resistance of Winter Wheat Cultivars in Xinjiang

ZHANG Fang<sup>1</sup>, YAN An<sup>2</sup>, REN Yi<sup>1</sup>, YANG Wei-jun<sup>1</sup>, GENG Hong-wei<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Key Laboratory of Agricultural College Biological Technology, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052;

<sup>2</sup>College of Pratacultural and Environmental Sciences, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052)

**Abstract:** The comprehensive evaluation of drought resistance at the germination stage was conducted in winter wheat cultivars from Xinjiang, which provided the theoretical basis for the evaluation and selection of drought resistant wheat varieties during the germination period. In this study, two methods that possessed 20% PEG-6000 treatment and marker-assisted selection (MAS) with the functional markers *TaNRX-a1* and *TaNRX-b1* located on the 5BS chromosome, were used for adjusting drought resistance in 83 Xinjiang winter wheat cultivars at the germination stage. Seven indexes including germination rate, germinating energy, germination index, root number, root length, seedling height and coleoptile length were measured, and the results suggested that the seven indexes average of drought resistance were decreased by 30.86%, 23.91%, 31.37%, 0.43%, 31.07%, 50.27% and 6.61%, respectively. The allele frequency of *TaNRX-a* and *TaNRX-b* in 83 winter wheat cultivars accounted for 83.1% and 16.9%, respectively. The *TaNRX-a* allele with high drought resistance during seed germination is predominant, while this allele was observed 93.8%, 82.1% and 79.5% of local varieties, introduced varieties and improved varieties, respectively. By applying the weighted membership function method together with MAS for *TaNRX-a*, the cultivars Changdong 5, Hanyangmai, Kayimuhong, Nawatiran, and Gaojiasuo represented higher drought resistance. The correlation analysis showed, that both the root length and the coleoptile length were highly

收稿日期: 2018-05-07 修回日期: 2018-06-26 网络出版日期: 2018-10-14

URL: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4996.S.20181012.1525.001.html>

第一作者主要从事小麦分子育种研究, E-mail: 1807681776@qq.com

通信作者: 耿洪伟, 主要从事小麦分子育种研究, E-mail: hw-geng@163.com

基金项目: 新疆农业大学-南京农业大学联合基金项目(KXYJ201602)

Foundation project: Xinjiang Agricultural University and Nanjing Agricultural University Joint Fund Project (KXYJ201602)

correlated with *D* value (0.557 and 0.516), and they could be served as a sign in selecting for drought resistance of wheat. Thus, taking use of phenotype datasets and molecular markers, this work suggested a way to effectively evaluate the drought resistance of wheat during germination stage.

**Key words:** wheat; germination stage; drought resistance; membership function; functional marker

小麦 (*Triticum aestivum* L.) 是全球重要的粮食作物之一,也是我国第三大粮食作物,小麦稳产高产将直接影响我国的粮食安全和社会稳定<sup>[1]</sup>。全球 70% 的小麦种植于干旱半干旱地区,干旱已是影响小麦生长发育和限制产量的主要非生物胁迫因素,实践证明,筛选或培育抗旱小麦品种是解决干旱问题最有效的途径之一<sup>[2-3]</sup>。新疆属于典型的大陆性气候,光热资源充足,水分蒸发量大,年均降雨量远小于蒸发量,致使新疆干旱、极热等自然灾害日趋频发<sup>[4-6]</sup>。近年随着气候变化和降雨(雪)量减少,天山雪线逐年升高,灌溉水源不断减少,对小麦抗旱能力有了更高要求。因此,对新疆小麦资源进行抗旱性鉴定和评价,并筛选出强抗旱性小麦品种,既是实现小麦高产稳产和增加经济效益的重要保障,也对新疆乃至全国小麦抗旱育种具有重要意义。

萌发期是小麦生育期的起始阶段,将直接影响小麦生长发育和产量建成,因此也是衡量小麦抗旱性强弱的关键时期<sup>[7-8]</sup>。前人多以聚乙二醇(PEG-6000)溶液为早胁迫渗透剂,用其检测小麦萌发期抗旱性具有较高的准确性<sup>[9]</sup>。目前,国内外学者开展了许多作物抗旱性鉴定筛选工作,并从作物种类、形态和生长发育等不同方面提出了一些有效鉴定方法和筛选指标<sup>[8, 10-18]</sup>。杨子光等<sup>[19]</sup>利用聚乙二醇模拟干旱的方法对 15 个品种(系)进行了萌发期抗旱性指标研究,认为在根数、最长根长、芽长、胚芽鞘长、发芽率等指标中,胚芽鞘是较为可靠指标。李国瑞等<sup>[3]</sup>也采用聚乙二醇胁迫法对 41 个小麦品种(系)萌发期的发芽率、发芽势、发芽指数、苗高、胚芽鞘长、胚根长、胚根数等性状进行了测定,发现发芽指数和发芽率也可作为萌发期抗旱性准确而快速鉴定指标。还有报道<sup>[20-22]</sup>指出渗透胁迫下小麦胚芽鞘长与抗旱性符合度最好,根数、最长根长等指标也与其抗旱性密切相关。但相关程度存在差异,且仅从表型进行抗旱性评价不够全面。

随着分子生物学的不断发展,小麦抗旱研究取得了较大进展,而分子标记技术不断优化与完善,使得分子标记技术更为有效和便捷,应用分子标记技术开展小麦抗旱性研究日益成为小麦热点研究领域之一<sup>[23-25]</sup>。研究表明硫氧还蛋白(Trx,

Thioredoxin) 广泛存在于多种植物中,并与抗逆性密切相关<sup>[26]</sup>。在小麦中 *TaNRX* 基因调控干旱胁迫的生理适应过程并发挥重要作用<sup>[27]</sup>。张帆等<sup>[27]</sup>进一步获得了位于小麦 5B 染色体短臂上普通小麦 Trx 超家族的新基因 *TaNRX*, 并基于该基因等位变异 *TaNRX-a* 和 *TaNRX-b* 的内含子区 Del 位点和紧邻的 3 个 SNP 位点,开发了与小麦抗旱性相关的一对显性互补 STS 标记 *TaNRX-a1* 和 *TaNRX-b1*。其中, *TaNRX-a1* 可在具有强抗旱性变异类型 *TaNRX-a* 的材料中扩增出 841 bp 的 DNA 片段,而在具有变异类型 *TaNRX-b* 的材料中无扩增产物; *TaNRX-b1* 可在具有弱抗旱性变异类型 *TaNRX-b* 的材料可扩增出 870 bp 的 DNA 片段,而在变异类型 *TaNRX-a* 的材料中无扩增产物。*TaFer* 基因也能够明显改善和提高拟南芥对干旱胁迫的耐受性;随后,鞠丽萍等<sup>[28]</sup>开发了一个共显性标记 *FerA1-inter*, 具有变异类型 *TaFer-A1a* (与强抗旱性相关) 的小麦材料中可扩增 167 bp 的 DNA 片段,而在具有变异类型 *TaFer-A1b* (与弱抗旱性相关) 的小麦材料中可扩增 170 bp 的 DNA 片段。同时用 *FerA1-inter* 标记对 150 份全国小麦品种(系)分子标记检测,表明该标记能有效应用于小麦分子育种实践,其中含有 *TaFer-A1a* 变异类型材料频率高于含有 *TaFer-A1b* 变异类型材料频率。Wang 等<sup>[29]</sup>基于 *TaCRT-D* 基因开发 RFLP 标记对小麦早胁迫起重要作用,研究表明抗旱分子标记的有效性评价对抗旱小麦新品种的选育也具有重要意义。

虽然许多研究对小麦萌发期抗旱性进行了相关报道,并基于 *TaNRX-B1* 基因开发的一对显性互补标记 *TaNRX-a1* 和 *TaNRX-b1* 对全国不同区域小麦品种(系)进行分子标记检测,但目前小麦萌发期表型结合分子标记对新疆小麦品种(系)进行抗旱性评价及其分布频率未见系统报道,且小麦抗旱性研究及早地小麦育种已成为重要课题之一。因此本研究通过对 83 份新疆冬小麦品种(系)萌发期表型和标记检测,并基于表型结合分子水平共同鉴定,旨在为筛选出萌发期抗旱性较强的小麦品种(系)及抗旱性改良奠定基础,从而为新疆乃至全国小麦抗旱育种提供材料与理论基础和干旱地区小麦的稳产高

产实践提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

83份新疆冬小麦品种(系)中,16份是地方品

种(系),编号为1~16;39份是自育品种(系),编号为17~55;28份是引进品种(系),编号为56~83。上述材料均由新疆农业大学农学院小麦课题组提供,其代表性较好,是主要种植区使用的冬小麦品种(系),见表1。

表1 83份新疆冬小麦品种(系)

Table 1 Information of 83 Xinjiang winter wheat cultivars ( lines )

编号 Code	品种(系) Cultivar ( lines )	选育年代 Bred year	编号 Code	品种(系) Cultivar ( lines )	选育年代 Bred year
1	阿伯格其力格	20世纪50年代	43	伊农21	21世纪00年代
2	阿克不大衣	20世纪50年代	44	新冬31号	21世纪00年代
3	阿克库孜盖	20世纪50年代	45	新冬32号	21世纪00年代
4	白冬麦	20世纪50年代	46	新冬33号	21世纪00年代
5	哈阿热托司曼	20世纪50年代	47	新冬34号	21世纪00年代
6	卡衣木红	20世纪50年代	48	昌冬5号	20世纪80年代
7	可孜不大衣	20世纪50年代	49	九冬1号	—
8	库车白冬麦	20世纪50年代	50	九冬2号	—
9	拉瓦得郎	20世纪50年代	51	喀冬1号	20世纪70年代
10	麦洛瓦西	20世纪50年代	52	喀冬4号	20世纪70年代
11	纳瓦提然	20世纪50年代	53	新冬2号	20世纪90年代
12	其力克	20世纪50年代	54	新冬5号	20世纪60年代
13	热衣木夏	20世纪50年代	55	新冬7号	20世纪60年代
14	绥来小红冬麦	20世纪50年代	56	邯5316	20世纪90年代
15	小白冬麦	20世纪50年代	57	F49-70	—
16	长巴什曼	20世纪50年代	58	阿美乐尔	20世纪70年代
17	红直头/10	20世纪90年代	59	敖德萨16	20世纪50年代
18	奎冬4号	20世纪90年代	60	北京8号	20世纪80年代
19	奎花1号	20世纪90年代	61	碧蚂1号	20世纪40年代
20	奎花2号	20世纪90年代	62	碧蚂4号	20世纪40年代
21	石冬7号	20世纪90年代	63	碧蚂6号	20世纪40年代
22	石冬8号	21世纪00年代	64	高加索	20世纪70年代
23	新冬15号	20世纪80年代	65	工农19	—
24	新冬17号	20世纪90年代	66	红旗1号	—
25	新冬18号	20世纪90年代	67	华北187	20世纪90年代
26	新冬19号	20世纪90年代	68	华北497	20世纪90年代
27	新冬20号	20世纪90年代	69	济南4号	—
28	新冬21号	20世纪90年代	70	洛夫林10号	20世纪70年代
29	新冬22号	20世纪90年代	71	洛夫林13号	20世纪70年代
30	新冬23号	21世纪00年代	72	米罗诺夫纪念麦50	20世纪70年代
31	新冬24号	21世纪00年代	73	农大183	20世纪60年代
32	新冬27号	21世纪00年代	74	山前2号	—
33	新冬28号	21世纪00年代	75	无芒1号	—
34	新冬29号	21世纪00年代	76	无芒4号	—
35	新冬30号	21世纪00年代	77	小鹅186	—
36	新冬36号	21世纪00年代	78	小黑麦46/131	20世纪50年代
37	新冬37号	21世纪10年代	79	新乌克兰83	20世纪50年代
38	新冬41号	21世纪10年代	80	新乌克兰84	20世纪50年代
39	伊农16	20世纪90年代	81	尤皮来那1	—
40	伊农18	20世纪90年代	82	蚰包	—
41	伊农19	21世纪00年代	83	旱洋麦	—
42	伊农20	21世纪00年代			

“—”表示品种(系)年代不详

“—” unknown the bredyear of cultivars ( lines )

## 1.2 试验方法

**1.2.1 表型测定** 83 份新疆冬小麦品种(系)参考小麦抗旱性鉴定评价技术规范 GB/T21127-2007 萌发型抗旱性鉴定<sup>[30]</sup>的参数进行试验设计,并利用李国瑞等<sup>[3]</sup>的方法进行相关指标统计计算。挑选各供试品种(品系)发育正常的小麦种子 400 粒,首先用 70% 乙醇消毒 1 min,蒸馏水反复冲洗 5 次;其次用 0.1% 氯化汞消毒 15 min,蒸馏水反复冲洗 5 次;最后用适量的蒸馏水浸泡种子。取完整饱满的种子,腹沟向下均匀地放入铺有一层滤纸的发芽盒中,每盒 100 粒,20% 聚乙二醇溶液为处理,无离子水为对照,3 次重复。将种子发芽盒置于 20 ℃ 培养箱中,12 h 光照/12 h 暗培养,第 3 天统计发芽势,第 7 天进行相关指标测量及统计种子发芽数(当根长 ≥ 种子长或芽长 ≥ 1/2 种子长时视为发芽)。随机挑选 10 株长势一致的幼苗调查其根数、最长根长、苗高、胚芽鞘长度,并进行相关计算。

发芽率(%) = 发芽总数 / 供试种子数 × 100%;

发芽势(%) = 第 3 天的发芽种子数 / 供试种子数 × 100%;

发芽指数 =  $\sum (Gt/Dt)$ , Gt 为在时间 t 内的发芽个数, Dt 为 Gt 相应的发芽天数;

抗旱系数 = PEG 胁迫处理的测定值 / 对照的测定值 × 100%;

综合抗旱系数 = 品种所有测定指标抗旱系数的加权平均值。

表 2 *TaNRX* 基因分子标记

Table 2 Information of molecular markers *TaNRX-a1* and *TaNRX-b1*

标记 Marker	序列(5'-3') Sequence(5'-3')	产物大小(bp) Product size	退火温度(℃) Annealing temp	等位基因 Allele
<i>TaNRX-a1</i>	正向引物: CATGGCTCTTCCTGTGCG	841	52	<i>TaNRX-a</i>
	反向引物: CTGAATCGCTATGGAAAG			
<i>TaNRX-b1</i>	正向引物: TCTCCCGCACTGTGCCTG	870	56	<i>TaNRX-b</i>
	反向引物: CTGAATCGCTATGGAAAG			

## 1.3 数据处理

采用 Excel 2007 进行数据基本处理和 SPSS 21 软件进行相关性分析及聚类分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 PEG 胁迫对萌发型各指标的影响

在干旱胁迫下,除根数外其他指标均受到不同程度的影响(表 3)。其中,受影响最大的指标

通过各指标的抗旱系数可获得隶属函数值,再由其权重,利用加权隶属函数法求出萌发型综合评价值(*D* 值),从而确定 83 份品种(系)的抗旱性。加权隶属函数法被广泛应用于油菜<sup>[31]</sup>、玉米<sup>[32]</sup>、绿豆<sup>[33]</sup>和小麦<sup>[20,34-35]</sup>的抗旱性评价研究,且具有较好的效果,可较为准确地评价品种(系)间的抗旱性差异。*D* 值的大小则代表抗旱性的强弱,即  $D \geq 0.80$  为 1 级抗旱型(强抗),  $0.60 \leq D < 0.80$  为 2 级抗旱型(抗),  $0.40 \leq D < 0.60$  为 3 级抗旱型(中抗),  $0.20 \leq D < 0.40$  为 4 级抗旱型(弱抗),  $D < 0.20$  为 5 级抗旱型(不抗)。

$$U(X_j) = \frac{[X_{ij} - X_{j\max}]}{[X_{j\max} - X_{j\min}]}, j=1,2,3,\dots,7, i=1,2,3,\dots,83$$

$$D = \sum_{j=1}^n [U(X_j) (|r_j| / \sum_{j=1}^n |r_j|)], j=1,2,3,\dots,7$$

其中,  $U(X_j)$  为第 *j* 个指标的隶属函数值,  $X_{ij}$  为第 *i* 个材料第 *j* 个指标的抗旱系数;  $X_{j\max}$  和  $X_{j\min}$  分别为各参试材料中第 *j* 个指标抗旱系数的最大值和最小值。  $r_j$  为第 *j* 个指标与综合抗旱系数间的相关系数,  $(|r_j| / \sum_{j=1}^n |r_j|)$  为指标权数,表示第 *j* 个指标在所有指标中的重要程度。

**1.2.2 分子标记检测** 本文采纳 Lagudah 等<sup>[36]</sup>的方法选取 3 粒粒型均匀的种子提取 DNA,随后利用已开发的分子标记 *TaNRX-a1* 和 *TaNRX-b1* 进行检测(表 2),并根据每个品种(系)DNA 的功能标记判断该品种的基因型。

为苗高,均值为 3.63,较对照下降 50.27%。发芽率、发芽势、发芽指数、根数、最长根长、胚芽鞘长均值较对照分别下降 30.86%、23.91%、31.37%、0.43%、31.07% 和 6.61%。与对照相比,干旱胁迫下发芽率、发芽势和发芽指数的变异系数均增加,其中变异系数增加最大是发芽率。以上结果表明旱胁迫下品种间各指标均有差异,仅用单个指标对小麦萌发型抗旱性进行评价缺乏准确性,需用多个指标进行综合评价。

表3 旱胁迫下小麦萌发期各指标的变化

Table 3 Statistical analysis of the indexes of wheat germination under drought stress

处理 Treatment	参数 Parameter	发芽率(%) GT	发芽势(%) GP	发芽指数 GI	根数 RN	最长根长(cm) RL	苗高(cm) SH	胚芽鞘长(cm) CL
对照 Control	最大值	100.00	73.00	0.74	6.70	13.68	12.13	4.49
	最小值	22.00	13.00	0.14	3.10	1.73	1.92	1.26
	均值	81.00	46.00	0.51	4.70	7.82	7.30	2.42
	标准差	17.00	15.00	0.14	0.58	3.05	2.73	0.58
	变异系数(%)	21.00	34.00	0.28	0.12	0.39	0.37	0.24
旱胁迫 Drought stress	最大值	96.00	64.00	0.57	6.30	9.49	6.30	3.37
	最小值	20.00	6.00	0.10	3.00	2.81	0.84	0.84
	均值	56.00	35.00	0.35	4.68	5.39	3.63	2.26
	标准差	17.00	13.00	0.11	0.70	1.53	1.17	0.54
	变异系数(%)	31.00	37.00	0.33	0.15	0.28	0.32	0.24

GT: Germination rate, GP: Germination potentia, GI: Germination index, RN: Radical number, RL: Radical length, SH: Shoot height, CL: Coleoptile length. The same as below

方差分析表明(表4),各指标在品种(系)间均呈极显著差异,表明品种(系)间种子萌发期抗旱性使用这些指标可做到有效鉴定;除根数外,其他指

标均受 PEG 胁迫的影响且呈极显著或显著水平;而品种(系)与 PEG 胁迫的互作效应均达极显著,表明不同品种(系)对干旱胁迫的应答不同。

表4 方差分析(F值)

Table 4 Analysis of variance(F value)

变异来源 Variation source	df	发芽率 GT	发芽势 GP	发芽指数 GI	根数 RN	最长根长 RL	苗高 SH	胚芽鞘长 CL
A	1	675.44**	149.30**	613.14**	0.24	373.28**	1047.51**	10.16*
B	82	12.26**	11.60**	15.53**	8.31**	10.66**	10.05**	10.71**
A × B	82	2.63**	1.92**	2.38**	3.33**	6.35**	6.43**	3.18**

\*和\*\*分别表示在0.05和0.01水平上相关显著,下同。A: PEG-6000浓度;B:品种(系)

\*and\*\* denote significant correlations at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively, the same as below. A: PEG-6000 concentration, B: Varieties (Lines)

## 2.2 各指标抗旱系数的相关性

旱胁迫下,通过对83份新疆冬小麦品种(系)的7个指标及D值相关性分析表明(表5),根数、最长根长、苗高、胚芽鞘长之间均呈极显著正相关,且与D值分别呈极显著正相关( $P<0.01$ ),表明这4个指标间相关性较好且与抗旱性密切相关。其中苗高与胚芽鞘长的相关系数最高,达到了0.815;发芽率、发芽势均与发芽指数呈极显著正相关( $P<0.01$ ),相关系数分别为0.783和0.790;最长根长与苗高、胚芽鞘长呈极显著正相关( $P<0.01$ ),相关系数分别为0.809和0.741。其他指标之间虽呈显著或极显著相关,但相关系数较小。根数、最长根长、苗高和胚芽鞘长与D值呈极显著正相

关( $P<0.01$ ),相关系数分别为0.344、0.516、0.502、0.557,表明这4个指标可优先作为小麦萌发期抗旱性筛选指标。

## 2.3 小麦萌发期抗旱性综合评价

参照李国瑞等<sup>[3]</sup>多指标综合评价对83份新疆冬小麦品种(系)进行了萌发期抗旱性综合评价(表6)。结果表明,D值变化范围为0.06~0.86,其中昌冬5号、旱洋麦、卡衣木红的抗旱性综合评价D值较大,分别为0.86、0.85、0.77,表明这3个品种(系)具有强抗旱性,可作为优异抗旱基因源应用于小麦抗旱性遗传改良育种;而洛夫林13号、新冬5号、邯5316的抗旱性综合评价D值较小,分别为0.06、0.10、0.10,表明此类为不抗品种(系),不适宜

表 5 干旱胁迫下各指标的相关系数

Table 5 Correlation coefficient of each index under drought stress

指标 Index	发芽率 GT	发芽势 GP	发芽指数 GI	根数 RN	最长根长 RL	苗高 SH	胚芽鞘长 CL	D 值 D value
发芽率	1							
发芽势	0.452**	1						
发芽指数	0.783**	0.790**	1					
根数	0.233*	0.354**	0.395**	1				
最长根长	0.113	0.368**	0.251*	0.478**	1			
苗高	0.145	0.279*	0.209	0.559**	0.809**	1		
胚芽鞘长	0.264*	0.465**	0.387**	0.598**	0.741**	0.815**	1	
D 值	0.085	0.269*	0.139	0.344**	0.516**	0.502**	0.557**	1

表 6 PEG 胁迫下各指标抗旱系数的隶属函数值

Table 6 Subordinate function values of drought resistance coefficient of different indicators under PEG stress

编号 Code	综合抗旱系数		隶属函数值 The subordinate function values						D 值 D value
	Comprehensive drought resistance coefficient	发芽率 GT	发芽势 GP	发芽指数 GI	根数 RN	最长根长 RL	苗高 SH	胚芽鞘长 CL	
1	0.95	0.13	0.57	0.56	0.52	0.20	0.18	0.35	0.36
2	0.80	0.41	0.34	0.42	0.30	0.09	0.12	0.33	0.23
3	0.84	0.36	0.56	0.61	0.12	0.11	0.14	0.36	0.25
4	1.32	0.49	0.47	0.54	0.41	0.49	0.75	0.82	0.60
5	1.19	0.45	0.35	0.38	0.50	0.43	0.70	0.54	0.50
6	1.45	0.40	0.46	0.50	1.00	0.47	0.96	1.00	0.77
7	0.96	0.19	0.31	0.30	0.46	0.29	0.37	0.39	0.36
8	0.74	0.39	0.30	0.38	0.39	0.08	0.03	0.17	0.18
9	1.29	0.00	0.21	0.18	0.84	0.65	0.69	0.95	0.66
10	1.12	0.02	0.02	0.00	0.46	0.65	0.60	0.35	0.44
11	1.54	0.29	0.91	0.91	0.64	0.83	0.53	0.87	0.75
12	0.83	0.25	0.75	0.74	0.00	0.15	0.05	0.16	0.20
13	0.66	0.30	0.19	0.21	0.44	0.02	0.03	0.11	0.14
14	0.74	0.45	0.41	0.47	0.35	0.02	0.06	0.16	0.18
15	0.73	0.53	0.37	0.46	0.26	0.08	0.05	0.00	0.14
16	0.80	0.68	0.45	0.62	0.27	0.08	0.03	0.11	0.18
17	0.83	0.81	0.49	0.21	0.15	0.05	0.35	0.11	0.19
18	0.98	0.73	0.85	0.37	0.06	0.09	0.44	0.12	0.24
19	0.76	0.88	0.38	0.14	0.13	0.08	0.25	0.09	0.16
20	1.30	0.25	0.93	0.79	0.23	0.10	0.35	0.23	0.28
21	0.86	0.52	0.45	0.26	0.03	0.07	0.22	0.11	0.14
22	1.15	0.26	0.72	0.95	0.20	0.06	0.20	0.15	0.19
23	0.90	0.59	0.55	0.34	0.12	0.05	0.17	0.15	0.15
24	0.62	0.53	0.02	0.52	0.28	0.24	0.25	0.56	0.34
25	0.62	0.30	0.46	0.41	0.09	0.27	0.15	0.37	0.30
26	0.55	0.87	0.09	0.60	0.31	0.13	0.00	0.00	0.24
27	0.54	0.40	0.30	0.33	0.10	0.00	0.10	0.46	0.24
28	0.87	0.67	0.38	0.50	0.93	0.48	0.44	0.79	0.59
29	0.73	0.30	0.48	0.52	0.94	0.27	0.20	0.51	0.43

表 6(续)

编号 Code	综合抗旱系数 Comprehensive drought resistance coefficient	隶属函数值 The subordinate function values							D 值 D value
		发芽率 GT	发芽势 GP	发芽指数 GI	根数 RN	最长根长 RL	苗高 SH	胚芽鞘长 CL	
30	0.85	0.53	0.30	0.41	0.19	0.63	0.71	1.00	0.56
31	0.69	0.51	0.23	0.40	0.35	0.45	0.25	0.64	0.40
32	0.60	0.23	0.06	0.07	0.23	0.51	0.19	0.57	0.27
33	0.71	0.39	0.27	0.38	0.38	0.54	0.45	0.65	0.44
34	0.80	0.85	0.22	0.48	0.51	0.44	0.41	0.77	0.51
35	0.92	0.71	0.76	0.79	0.61	0.54	0.43	0.79	0.65
36	0.62	0.20	0.18	0.18	0.39	0.42	0.25	0.44	0.31
37	0.87	0.47	0.16	0.35	0.51	0.81	0.82	0.74	0.56
38	0.78	0.24	0.30	0.45	0.69	0.43	0.44	0.82	0.50
39	0.74	0.41	0.31	0.46	0.22	0.60	0.43	0.69	0.44
40	0.99	0.64	0.75	0.76	0.54	0.66	0.59	0.91	0.71
41	1.04	0.72	0.62	0.66	0.34	0.46	0.11	0.35	0.36
42	0.90	0.41	0.42	0.42	0.33	0.28	0.08	0.34	0.28
43	0.90	0.35	0.47	0.42	0.18	0.20	0.16	0.63	0.31
44	0.58	0.18	0.24	0.23	0.42	0.29	0.17	0.39	0.26
45	0.91	0.60	0.56	0.83	0.58	0.68	0.51	0.72	0.64
46	0.99	0.34	0.63	0.69	0.77	1.00	0.67	0.84	0.72
47	0.66	0.36	0.20	0.29	0.33	0.40	0.27	0.58	0.35
48	1.01	0.81	0.82	0.84	0.71	0.97	0.80	0.94	0.86
49	0.54	0.24	0.40	0.37	0.48	0.19	0.27	0.17	0.29
50	0.75	0.68	0.57	0.66	0.56	0.39	0.33	0.50	0.51
51	0.66	0.29	0.23	0.24	0.66	0.38	0.44	0.67	0.39
52	0.59	0.35	0.27	0.34	0.64	0.23	0.15	0.37	0.31
53	0.79	0.26	0.87	0.69	0.31	0.11	0.27	0.33	0.37
54	0.65	0.09	0.23	0.18	0.21	0.08	0.00	0.10	0.10
55	0.75	0.41	0.25	0.48	0.43	0.28	0.20	0.24	0.29
56	0.81	0.75	0.51	0.18	0.07	0.08	0.04	0.09	0.10
57	0.64	0.19	0.27	0.28	0.17	0.05	0.01	0.13	0.12
58	0.70	0.19	0.30	0.32	0.24	0.07	0.05	0.20	0.16
59	0.55	0.52	0.42	0.40	0.10	0.15	0.08	0.28	0.29
60	0.79	0.93	0.80	0.88	0.69	0.28	0.22	0.27	0.57
61	0.67	0.44	0.43	0.48	0.69	0.26	0.25	0.48	0.42
62	0.76	0.45	0.70	0.57	0.83	0.35	0.37	0.48	0.51
63	0.70	0.15	0.22	0.22	0.97	0.57	0.55	0.61	0.42
64	0.95	0.79	0.88	0.76	0.76	0.71	0.77	0.66	0.75
65	0.73	0.31	0.42	0.43	1.00	0.65	0.36	0.36	0.46
66	0.71	0.54	0.57	0.60	0.56	0.47	0.45	0.28	0.49
67	0.57	0.41	0.39	0.40	0.53	0.23	0.17	0.16	0.31
68	0.57	0.37	0.40	0.34	0.49	0.15	0.23	0.26	0.30
69	0.79	0.38	0.74	0.62	0.67	0.53	0.50	0.56	0.57
70	0.77	0.78	0.64	0.68	0.64	0.36	0.22	0.48	0.52

表 6(续)

编号 Code	综合抗旱系数 Comprehensive drought resistance coefficient	隶属函数值 The subordinate function values							D 值 D value
		发芽率 GT	发芽势 GP	发芽指数 GI	根数 RN	最长根长 RL	苗高 SH	胚芽鞘长 CL	
71	0.37	0.03	0.04	0.04	0.31	0.05	0.11	0.02	0.06
72	0.70	0.56	0.55	0.51	0.85	0.24	0.23	0.38	0.45
73	0.76	0.70	0.63	0.68	0.66	0.35	0.32	0.43	0.52
74	0.62	0.31	0.54	0.39	0.55	0.13	0.13	0.48	0.34
75	0.77	0.43	0.54	0.45	0.75	0.10	0.21	0.31	0.33
76	0.77	0.46	0.44	0.63	0.66	0.20	0.18	0.29	0.34
77	0.70	0.38	0.25	0.17	0.20	0.06	0.16	0.33	0.20
78	0.73	0.45	0.21	0.36	0.99	0.07	0.22	0.11	0.24
79	0.78	0.32	0.52	0.70	0.14	0.49	0.27	0.24	0.39
80	0.91	0.39	0.62	0.59	0.48	0.75	0.75	0.54	0.64
81	0.75	1.00	0.18	0.51	0.43	0.06	0.19	0.24	0.29
82	0.79	0.49	0.34	0.42	0.40	0.39	0.45	0.34	0.40
83	1.00	0.71	0.43	0.59	0.72	1.00	1.00	1.00	0.85
平均 Mean	—	0.45	0.43	0.46	0.45	0.33	0.32	0.43	—
权重 Weight	—	0.08	0.12	0.12	0.11	0.19	0.19	0.19	—

在灌溉条件不充分的干旱地区种植。就隶属函数值的均值来看,发芽指数的隶属函数值最大(0.46),苗高的隶属函数值最小(0.32);从权重来看,最长根长、苗高和胚芽鞘长的权重值相对较大,均为0.19。整体来看,83份新疆冬小麦品种(系)中4级抗旱型最多且占总品种(系)的39.76%,而1~2级抗旱型品种(系)仅占总品种(系)的13.3%(图1)。这也表现在:地方品种(系)、自育品种(系)、引进品种(系)中1~2级抗旱型材料分别有3个(18.8%)、5个(12.8%)和3个(10.7%)。由于根数、最长根长、胚芽鞘长和苗高这4个指标与D值呈极显著正相关( $P<0.01$ ),因此对其抗旱系数作了进一步分析。结果表明,不同小麦品种(系)各指标抗旱系数均不同,同一品种(系)不同指标间的抗旱系数也有差异。从最长根长来看,83份品种(系)抗旱系数大于1的有21份,其中纳瓦提然、麦洛瓦西和拉瓦得郎抗旱系数较大,分别为2.78、2.48、2.18;从胚芽鞘长来看,83份品种(系)抗旱系数大于1的有38份,其中卡衣木红、拉瓦得郎和纳瓦提然抗旱系数较大,分别为1.82、1.76、1.67;从苗高来看,83份品种(系)抗旱系数大于1的有9份,其中卡衣木红和白冬麦抗旱系数较大,分别为2.55、2.10。同时利用分子标记 *TaNRX-a1* 和 *TaNRX-b1* 对材料进行检测,将表型和分子标记检测相结合进行综合评价,获得抗旱性较强的品种(系)有昌冬5号、旱洋麦、卡衣木红、纳瓦提然和高加索。

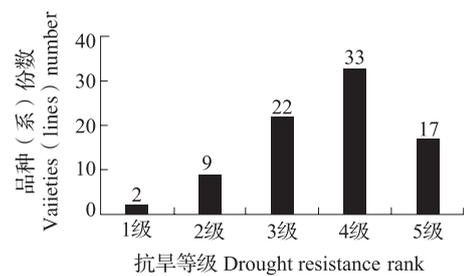


图 1 83份新疆冬小麦萌发期综合抗旱等级

Fig. 1 Assignment of drought resistance in 83 Xinjiang winter wheat

## 2.4 小麦萌发期抗旱性聚类分析

通过对供试材料7个测定指标的抗旱系数进行系统聚类分析,结果表明(图2),83份小麦品种(系)在欧式距离9.50时可聚为5类,第I类为4级抗旱型(弱抗),包括75份材料,分别为新冬2号、九冬1号、济南4号、工农19、小白冬麦等,其中有37个自育品种(系)、28个引进品种(系)、10个地方品种(系);第II类为5级抗旱型(不抗),包括2份材料,以自育品种(系)为主,分别为奎花2号、石冬8号;第III类为2级抗旱型(抗),包括4份材料,以地方品种(系)为主,分别为白冬麦、哈阿热托司曼、卡衣木红、拉瓦得郎;第IV类为3级抗旱型(中抗),仅包括1份材料,为地方品种(系)麦洛瓦西;第V类为1级抗旱型(强抗),仅包括1份材料,为地方品种(系)纳瓦提然;这5种类型的小麦品种(系)数量分别占总品种(系)的90.36%、2.41%、

4.82%、1.20%、1.20%，强抗旱型品种(系)较少，弱抗旱型品种(系)较多。

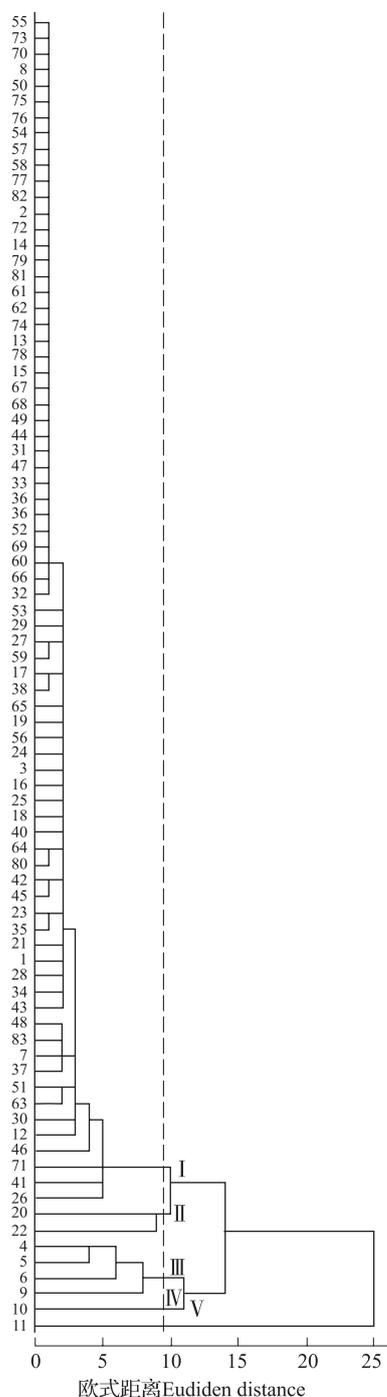


图2 系统聚类分析

Fig. 2 Cluster analysis based on seven indexes

## 2.5 新疆冬小麦材料的 *TaNRX-a* 和 *TaNRX-b* 等位变异类型及分布频率

利用互补显性功能标记 *TaNRX-a1* 和 *TaNRX-b1* 对 83 份新疆冬小麦品种(系)进行分子标记检测,其中扩增出 841 bp 片段的 *TaNRX-a* 变异类型有 69 份,其分布频率为 83.1%;扩增出 870 bp 片

段的 *TaNRX-b* 变异类型有 14 份,其分布频率为 16.9%。按不同品种(系)类型来看,16 份地方品种(系)中,具有 *TaNRX-a* 变异类型的小麦品种(系)有 15 份(93.8%),具有 *TaNRX-b* 变异类型的小麦品种(系)有 1 份(6.2%);28 份引进品种(系)中,具有 *TaNRX-a* 变异类型的小麦品种(系)有 23 份(82.1%),具有 *TaNRX-b* 变异类型的小麦品种(系)有 5 份(17.9%);39 份自育品种(系)中,具有 *TaNRX-a* 变异类型的小麦品种(系)有 31 份(79.5%),具有 *TaNRX-b* 变异类型的小麦品种(系)有 8 份(20.5%)。总体表明,新疆冬小麦地方品种(系)含有类型 *TaNRX-a* 的频率明显高于 *TaNRX-b* 变异类型。不同品种(系)类型中含有 *TaNRX-a* 变异类型的频率大小表现为地方品种(系) > 引进品种(系) > 自育品种(系)(表 7)。

## 3 讨论

### 3.1 小麦萌发期抗旱性鉴定指标的选择

农作物抗旱性鉴定一般分为萌发期鉴定、苗期鉴定和全生育期鉴定,而种子萌发期的抗旱性关乎其出苗率及后续生长状况。通过对小麦萌发期抗旱指标的筛选,可准确、有效地评价品种的抗旱性。本研究结果表明,7 个测量指标间呈显著或极显著相关,且 *D* 值与根数、最长根长、胚芽鞘长、苗高的相关性呈极显著正相关( $P < 0.01$ )。杨子光等<sup>[19]</sup>采用聚乙二醇方法对小麦材料进行种子萌发期抗旱性鉴定,认为根长和胚芽鞘长可较好评价小麦萌发期抗旱性。田梦雨<sup>[34]</sup>也利用聚乙二醇方法,对水分胁迫敏感性不同的 2 个小麦材料进行了苗期生长和根系研究,发现根系应对干旱胁迫综合性状表现在幼苗阶段最直观,可进行抗旱性相关探讨。王伟等<sup>[20]</sup>、钱雪娅等<sup>[35]</sup>表明渗透胁迫下小麦胚芽鞘长与抗旱性符合度最好,能有效反映品种(系)的抗旱性,本研究与前人的研究结果基本一致。将胚芽鞘长和最长根长指标进行参试材料抗旱性评价,其 1~2 级抗旱型材料占比 19.3%,其结果与多指标综合评价基本一致。因此,可以把胚芽鞘长和最长根长作为小麦萌发期大规模筛选和鉴定的优选指标,从而在不影响筛选准确性的同时可极大提升筛选规模和速度。

### 3.2 小麦萌发期综合评价

萌发期抗旱性直接决定小麦的出苗率,是干旱地区小麦品种(系)最为看重的基本特性。李国瑞等<sup>[37]</sup>对 20 份小麦萌发期抗旱性综合鉴定研究表明,

表 7 不同类型冬小麦品种(系)的 *TaNRX-a*/*TaNRX-b* 基因分布频率Table 7 Frequency of *TaNRX-a*/*TaNRX-b* in different types of winter wheat varieties (lines)

基因型 Genotype	全部品种(系) All varieties (lines)		地方品种(系) Local varieties (lines)		引进品种(系) Introduced varieties (lines)		自育品种(系) Bred varieties (lines) of agriculture	
	样品数 Sample No.	频率(%) Frequency	样品数 Sample No.	频率(%) Frequency	样品数 Sample No.	频率(%) Frequency	样品数 Sample No.	频率(%) Frequency
	<i>TaNRX-a</i>	69	83.1	15	93.8	23	82.1	31
<i>TaNRX-b</i>	14	16.9	1	6.2	5	17.9	8	20.5

抗旱型材料占比 5%; 孙绿等<sup>[38]</sup>也综合评价了 119 份全国冬小麦的抗旱性, 其抗旱型材料达 31.9%。本研究对 83 份小麦材料萌发期抗旱性综合鉴定表明, 1~2 级抗旱型材料仅占总材料的 13.3%, 抗旱型材料的占比远低于全国冬小麦平均水平。由此反映出新疆小麦品种(系)以不抗旱材料为主, 且抗旱型材料低于全国水平, 这与新疆小麦材料抗旱性普遍较强的传统认识有所不同。按不同类型来看, 属抗旱型的新疆冬小麦材料中地方品种(系)的占比最高, 地方品种(系)、自育品种(系)和引进品种(系)占比依次为 18.8%、12.8% 和 10.7%, 而在新疆生产实践中则多以自育品种(系)为主<sup>[39]</sup>。究其原因, 一是新疆虽处干旱地区但小麦全生育期内灌溉充足从而减轻旱害; 二是其他省份降雨充沛而局部地区特别是小麦关键时期严重缺水, 因而对小麦抗旱性要求较高。但就不同类型的冬小麦来看, 地方品种(系)中抗旱材料占比显著高于自育品种(系)和引进品种(系)的原因在于从 20 世纪 50 年代至 60 年代, 受制于生产水平不高以及育种技术水平不高, 新疆小麦的主栽品种以地方品种(系)为主<sup>[39-40]</sup>。新疆冬小麦主要种植于降水稀少的平原区和准噶尔盆地及塔里木盆地的盆缘地区<sup>[5]</sup>, 且当时农田水利基础设施严重不足, 只有强抗旱性小麦品种(系)才更能适应新疆较为干旱的环境, 抗旱性强则是对该时期主栽品种的基本要求。因此地方品种(系)中抗旱材料占比最高。而进入 21 世纪, 优质、高产成为小麦重要育种目标, 且随着育种和新疆农田水利等基础设施体系的不断完善和优化, 尤其是小麦节水滴灌技术被广泛运用, 极大缓解了小麦受干旱胁迫的危害<sup>[41]</sup>, 从而极大程度地降低了这一时期对小麦全生育期抗旱能力的要求。随着新疆小麦育种水平的显著提高, 基于地方品种和针对性的外引品种的充分交流, 适应当前生产水平的自育品种不断涌现, 逐步替换了地方品种, 成为新疆主栽品种。因此目前地处干旱区的新疆主栽品种仍以不抗旱的品种(系)为主。分子标记检测也表明强抗旱性品种

(系)远超前于弱抗旱性品种(系), 且含有 *TaNRX-a* (强抗旱性) 变异类型分布频率在地方品种(系)、引进品种(系)、自育品种(系)中分别为 93.8%、82.1%、79.5%, 下一步我们将对地方品种(系)进行基因发掘与利用, 在抗旱性研究中加强对地方品种(系)的重视。

### 3.3 新疆冬小麦品种(系) *TaNRX* 等位基因的分布频率

对优异抗旱基因进行挖掘和利用能显著加快小麦抗旱性遗传改良的研究进程。通过大量的研究表明 *TaNRX-a* 变异类型为优势等位变异<sup>[42]</sup>。张帆等<sup>[27]</sup>开发 *TaNRX-a1* 和 *TaNRX-b1* 功能标记对全国 150 份品种(系)进行等位基因检测, 结果表明含有 *TaNRX-a* (61.3%) 变异类型材料高于含有 *TaNRX-b* (38.7%) 变异类型材料。刘芳军等<sup>[43]</sup>利用此标记对宁夏 117 份小麦品种(系)做了相关研究, 表明 *TaNRX-a* 变异类型为优势等位变异, 其分布频率为 65%。本研究也利用 *TaNRX-a1* 和 *TaNRX-b1* 功能标记对 83 份新疆冬小麦品种(系)进行检测, 其结果与前人研究基本一致, 其中含有 *TaNRX-a* 变异类型与含有 *TaNRX-b* 变异类型的分布频率分别为 83.1%、16.9%。新疆冬小麦品种(系)含有 *TaNRX-a* 变异类型频率超过其他地区频率, 这表明新疆小麦品种(系)是培养 *TaNRX-a* (强抗旱性) 品种(系)的优异基因源, 可作为基础研究材料。然而含有 *TaNRX-a* (强抗旱性) 品种(系)表型与标记间无显著性差异, 究其原因是样本材料不够大; 也可能是本研究在种子萌发期表型检测中对 GB/T 21127-2007 技术规范略有调整, 这与张帆等<sup>[27]</sup>开发此标记时所用表型鉴定方法存在一些差异; 另外, 由于抗旱性状为多基因控制的复杂的数量性状<sup>[43]</sup>, 仅含有 *TaNRX-a* 等位变异突显抗旱性影响较小, 需多基因共同作用方能更加准确、有效地评价材料的抗旱性使其影响显著。

新疆冬小麦材料中地方品种(系)、引进品种(系)和自育品种(系)含有 *TaNRX-a* 变异类型的分

布频率依次降低,它与新疆小麦品种(系)的演变相一致<sup>[40]</sup>。其中,地方品种(系)的 *TaNRX-a* 变异类型分布频率最高(93.8%),表明新疆小麦地方品种(系)抗旱能力比其他材料占优势,应加强对新疆地方品种(系)的开发利用及为其他地区提供研究材料。引进品种(系)中 *TaNRX-a* 变异类型分布频率介于两者之间,表明种质资源交换对推动新品种的选育也具有重要意义,应加大对国外及国内优良品种的引进<sup>[25]</sup>。下一步我们的工作将通过对抗旱相关基因紧密连锁的分子标记辅助选择的手段,找到一些主效位点并进行多位点结合筛选,从而提高选育效率,为小麦抗旱性育种提供优异基因源。

### 参考文献

- [1] Taregh G, Mostafa V, Reza S, Hossein S, Vahid M. Effect of PEG stress on germination indices and seedling growth of 12 bread wheat genotypes. *Advances in Environmental Biology*, 2011, 5(6): 1034-1039
- [2] 张军, 吴秀宁, 鲁敏, 麻珊珊, 赵继新, 陈新宏, 武军. 拔节期水分胁迫对冬小麦生理特性的影响. *华北农学报*, 2014, 29(1): 129-134  
Zhang J, Wu X N, Lu M, Ma S S, Zhao J X, Chen X H, Wu J. Effect of water stress on physiological characteristics of winter wheat at jointing stage. *Acta Agricultural Boreali-Sinica*, 2014, 29(1): 129-134
- [3] 李国瑞, 马宏亮, 胡雯媚, 汤永禄, 荣晓椒, 樊高琼. 西南麦区小麦品种萌发期抗旱性的综合鉴定及评价. *麦类作物学报*, 2015, 35(4): 479-487  
Li G R, Ma H L, Hu W M, Tang Y L, Rong X J, Fan G Q. Identification and evaluation of wheat cultivars for drought resistance during germination in southwest area. *Journal of Triticeae Crops*, 2015, 35(4): 479-487
- [4] 邓振镛, 王强, 张强, 倾继祖, 杨启国, 袁志鹏, 刘文婧, 徐金芳. 中国北方气候暖干化对粮食作物的影响及应对措施. *生态学报*, 2010, 30(22): 6278-6288  
Deng Z Y, Wang Q, Zhang Q, Qing J Z, Yang Q G, Yuan Z P, Liu W J, Xu J F. Impact of climate warming and drying on food crops in northern China and the countermeasures. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(22): 6278-6288
- [5] 覃祥安. 新疆小麦地方品种鉴定及利用研究. *作物品种资源*, 1992(4): 9-11  
Tan X A. Identification and utilization of wheat landraces in Xinjiang. *Crop Species Resources*, 1992(4): 9-11
- [6] 俞天胜, 曾潮武, 王威, 苗雨, 李玉峰, 叶凯. 人工合成小麦种质资源抗旱性评价及筛选. *新疆农业科学*, 2015, 52(10): 1953-1960  
Yu T S, Zeng C W, Wang W, Miao Y, Li Y F, Ye K. Evaluation and screening of drought resistance of synthetic wheat germplasm resources. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2015, 52(10): 1953-1960
- [7] 鞠乐, 齐军仓, 贺雪, 王丹, 侯忠庆, 付强, 熊显鹏. 大麦种子萌发期对渗透胁迫的响应及抗旱性鉴定指标的筛选. *干旱地区农业研究*, 2013, 31(1): 172-176  
Ju L, Qi J C, He X, Wang D, Hou Z Q, Fu Q, Xiong X P. The response of barley to osmotic stress during germination stage and screening of drought resistance indicators. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2013, 31(1): 172-176
- [8] 李培英, 孙宗玖, 阿不来提. PEG胁迫下29份偃麦草种质种子萌发期抗旱性评价. *中国草地学报*, 2010, 32(1): 32-39  
Li P Y, Sun Z J, A B L T. Evaluation of drought resistance of 29 accessions of *Elytrigia repens* at seed germination stage under PEG-6000 Stress. *Acta Agrestia Sinica*, 2010, 32(1): 32-39
- [9] 李凤珍, 马晓岗. PEG处理下青海栽培小麦萌发期及幼苗期抗旱性研究. *中国农学通报*, 2011, 27(21): 44-48  
Li F Z, Ma X G. Study on drought resistance of wheat at germination stage and seedling in Qinghai. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(21): 44-48
- [10] 敬礼恒, 刘利成, 梅坤, 陈光辉. 水稻抗旱性能鉴定方法及评价指标研究进展. *中国农学通报*, 2013, 29(12): 1-5  
Jing L H, Liu L C, Mei S, Chen G H. Research progress of drought resistance identification and evaluation in rice. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(12): 1-5
- [11] 张文英, 柳斌辉, 彭海城, 李爱国, 栗雨勤. 小麦品种抗旱性鉴定指标遗传规律研究. *华北农学报*, 2008, 23(S): 92-95  
Zhang W Y, Liu B H, Peng H C, Li A G, Li Y Q. Study on inheritance of the drought resistance identification indices in wheat varieties. *Acta Agricultural Boreali-Sinica*, 2008, 23(S): 92-95
- [12] 贾寿山, 朱俊刚, 王曙光, 史雨刚, 孙黛珍. 山西小麦地方品种萌发期的抗旱性. *华北农学报*, 2011, 26(2): 213-217  
Jia S S, Zhu J G, Wang S G, Shi Y G, Sun D Z. Drought resistance of Shanxi wheat landraces at sprouting stage. *Acta Agricultural Boreali-Sinica*, 2011, 26(2): 213-217
- [13] 张立生, 温辉芹, 程天灵, 李雪, 李生海. 小麦高产抗旱育种实践. *山西农业科学*, 2011, 39(12): 1243-1246  
Zhang L S, Wen H J, Cheng T L, Li X, Li S H. Breeding practice of high yield and drought resistance wheat. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2011, 39(12): 1243-1246
- [14] 冷益丰, 张彪, 赵久然, 杨俊品, 刘亚, 康继伟, 陈洁, 唐海涛, 谭君, 何文铸. 转基因玉米种子萌发期抗旱性鉴定. *干旱地区农业研究*, 2013, 31(1): 177-182  
Leng Y F, Zhang B, Zhao J R, Yang J P, Liu Y, Kang J W, Chen J, Tang H T, Tan J, He W T. Identification of drought resistance of transgenic maize during seed germination stage. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2013, 31(1): 177-182
- [15] 陈新, 宋高原, 张宗文, 吴斌. PEG-6000胁迫下裸燕麦萌发期抗旱性鉴定与评价. *植物遗传资源学报*, 2014, 15(6): 1188-1195  
Chen X, Song G Y, Zhang Z W, Wu B. Identification and evaluation of drought resistance of naked oat (*Avena nuda* L.) under PEG-6000 stress at germination stage. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2014, 15(6): 1188-1195
- [16] 张彦军, 苟作旺, 王兴荣, 陈伟英, 祁旭升. 胡麻种质萌发期抗旱性综合评价. *植物遗传资源学报*, 2015, 16(3): 520-527  
Zhang Y J, Gou Z W, Wang X R, Chen W Y, Qi X S. Comprehensive valuation of drought resistance of flax germplasm in germination. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2015, 16(3): 520-527
- [17] 陈致富, 李勤菲, 张永晶, 崔艺馨, 许汪洁, 贺亚军, 万华方, 李晓荣, 钱伟. 白菜型油菜品种萌发期的抗旱性鉴定与筛

- 选. 植物遗传资源学报, 2015, 16(1): 15-22  
Chen Z F, Li Q F, Zhang Y J, Cui Y X, Xu W J, He Y J, Wan H F, Li X R, Qian W. Identification and screening of resources with tolerance against drought stress in brassica rapa during germination stage. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2015, 16(1): 15-22
- [18] 刘永惠, 詹成芳, 沈一, 陈志德. 不同花生品种(系)萌发期抗旱性鉴定评价. 植物遗传资源学报, 2016, 17(2): 233-238  
Liu Y H, Lu C F, Shen Y, Chen Z D. Identification of drought tolerance in peanut varieties /lines at the germination stage. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2016, 17(2): 233-238
- [19] 杨子光, 张灿军, 翼天会, 孟丽梅, 郭军伟, 张珂. 小麦抗旱性鉴定方法及评价指标研究 IV 萌发期抗旱指标的比较研究. 中国农学通报, 2007, 23(12): 173-176  
Yang Z G, Zhang C J, Ji T H, Meng L M, Guo J W, Zhang K. Study on resistance drought identify method and evaluation index of wheat IV the comparative study on resistance drought index of wheat in germination. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(12): 173-176
- [20] 王玮, 邹琦. 胚芽鞘长度作为冬小麦抗旱性鉴定指标的研究. 作物学报, 1997, 23(4): 459-467  
Wang W, Zhou Q. Studies on coleoptile length as an index of drought resistance in winter wheat. *Acta Agronomica Sinica*, 1997, 23(4): 459-467
- [21] 关周博, 王士强, 陈亮, 唐娜, 胡银岗. 模拟干旱胁迫下冬小麦胚芽鞘长度变化及与抗旱性的关系研究. 干旱地区农业研究, 2009, 27(4): 125-130  
Guan Z B, Wang S Q, Chen L, Tang N, Hu Y G. Variation of coleoptile length in winter wheat varieties under PEG simulated drought stress and its association with their drought tolerance. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2009, 27(4): 125-130
- [22] 赖运平, 李俊, 张泽全, 董雪芳, 刘新春, 魏会廷, 胡晓蓉, 彭正松, 杨武云. 小麦苗期抗旱相关形态指标的灰色关联度分析. 麦类作物学报, 2009, 29(6): 1055-1059  
Lai Y P, Li J, Zhang Z Q, Dong X F, Liu X C, Wei H T, Hu X R, Peng Z S, Yang W Y. Grey correlation analysis of morphological traits related to drought tolerance of wheat at seedling stage. *Journal of Triticeae Crops*, 2009, 29(6): 1055-1059
- [23] 高宁, 景蕊莲, 陈耀锋, 张传福. 作物抗旱相关分子标记及其辅助选择的研究进展. 植物遗传资源学报, 2003, 4(3): 274-278  
Gao N, Jing R L, Chen Y F, Zhang C F. Research advances on molecular markers related to drought tolerance and their auxiliary selection in crops. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2003, 4(3): 274-278
- [24] 李卫涛, 陈秋芳, 押辉远, 谷运红. 利用 IRAP 分子标记对小麦抗旱品种筛选的研究. 华北农学通报, 2014, 29(3): 105-108  
Li W T, Chen Q F, Ya H Y, Gu Y H. Screening wheat drought resistant varieties by using IRAP molecular markers. *Acta Agronomica Boreali Sinica*, 2014, 29(3): 105-108
- [25] 何中虎, 夏先春, 陈新民, 于振文, 赵振东, 刘旭. 中国小麦产业发展与科技进步. 农学学报, 2018, 37(2): 202-215  
He Z H, Xia X C, Chen X M, Yu Z W, Zhao Z D, Liu X. China wheat industry development and scientific and technological progress. *Acta Agronomica Sinica*, 2018, 37(2): 202-215
- [26] 郑琼, 马旭俊, 杨传平. 硫氧还蛋白(Trx)的研究进展. 分子植物育种, 2006, 4(6): 78-82  
Zheng Q, Ma X J, Yang C P. Functional roles of Thioredoxin (Trx). *Molecular Plant Breeding*, 2006, 4(6): 78-82
- [27] 张帆, 蒋雷, 鞠丽萍, 金秀锋, 王轩, 张晓科, 王宏礼, 付晓洁. 一个普通小麦 Trx 超家族新基因 *TaNrx* 的克隆与抗旱相关标记开发. 作物学报, 2014, 40(1): 29-36  
Zhang F, Jiang L, Ju L P, Jin X F, Wang X, Zhang X K, Wang H L, Fu X J. Cloning a novel gene *TaNrx* of Trx superfamily and developing its molecular markers related to drought resistance in common wheat. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(1): 29-36
- [28] 鞠丽萍, 张帆, 蒋雷, 金秀锋, 王轩, 张晓科, 刘书慧, 王宏礼, 付晓洁. 小麦 *TaFer-Al* 基因抗旱相关分子标记的开发. 麦类作物学报, 2013, 33(5): 901-906  
Ju L P, Zhang F, Jiang L, Jin X F, Wang X, Zhang X K, Liu S H, Wang H L, Fu X J. Development of a specific molecular marker of *TaFer-Al* for improving drought resistance in wheat. *Journal of Triticeae Crops*, 2013, 33(5): 901-906
- [29] Wang J P, Li R Z, Mao X G, Jing R L. Functional analysis and marker development of *TaCRT-D* gene in common wheat. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8: 1557-1571
- [30] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 中华人民共和国国家标准 GB/T21127-2007, 小麦抗旱性鉴定评价技术规范. 北京: 中国标准出版社, 2007: 10  
Standardization Administration of the People's Republic of China. Technical specification of identification and evaluation for drought resistance in wheat: GB/T 21127-2007. Beijing: Standards Press of China, 2007: 10
- [31] 谢小玉, 张霞, 张兵. 油菜苗期抗旱性评价及抗旱相关指标变化分析. 中国农业科学, 2013, 46(3): 476-485  
Xie X Y, Zhang X, Zhang B. Evaluation of drought resistance and analysis of variation of relevant parameters at seedling stage of rapeseed. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(3): 476-485
- [32] 杜彩艳, 段宗颜, 王建新, 张乃明, 杨志新, 雷宝坤, 胡万里, 陈拾华, 潘艳华. 云南 8 个玉米品种苗期抗旱性研究. 西北农业学报, 2014, 23(10): 82-89  
Du C Y, Duan Z Y, Wang J X, Zhang N M, Yang Z X, Lei B K, Hu W L, Chen S H, Pan Y H. Studies on the drought resistance of eight maize varieties of Yunnan at the seedling stage. *Acta Agronomica Boreali-occidentalis Sinica*, 2014, 23(10): 82-89
- [33] 王兰芬, 武晶, 景蕊莲, 程须珍, 王述民. 绿豆种质资源苗期抗旱性鉴定. 作物学报, 2015, 41(1): 145-153  
Wang L F, Wu J, Jing R L, Cheng X Z, Wang S M. Drought resistance identification of mungbean germplasm resources at seedling stage. *Acta Agronomica Sinica*, 2015, 41(1): 145-153
- [34] 田梦雨. 干旱胁迫对小麦苗期生长的影响及生理机制. 南京: 南京农业大学, 2009  
Tian M Y. Effects of drought stress on the growth of wheat seedling and the physiological mechanism. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2009
- [35] 钱雪娅, 景蕊莲, 王辉, 昌小平. 不同处理条件下小麦胚芽鞘生长的遗传分析. 西北植物学报, 2008, 28(12): 2436-2441  
Qian X Y, Jing R L, Wang H, Chang X P. Genetic analysis of coleoptile length in wheat under different treatments. *Acta Botanica Boreali-Occidentalis Sinica*, 2008, 28(12): 2436-2441
- [36] Lagudah E S, Apples R, Mcneil D. The Nor-D 3 locus of *Triticum tauschii*: natural variation and genetic linkage to

- markers in chromosome 5. *Genome*, 1991, 34: 387-395
- [ 37 ] 李国瑞, 李朝苏, 吴春, 汤永禄, 樊高琼. 西南地区小麦品种萌发期抗旱性分析. *干旱地区农业研究*, 2015, 33(4): 212-219  
Li G R, Li C S, Wu C, Tang Y L, Fan G Q. The analysis of drought resistance in different wheat varieties during germination in southwest area of China. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2015, 33(4): 212-219
- [ 38 ] 孙绿, 李玉刚, 王圣键, 刘亚东, 王志英, 刘丹, 李娜娜, 赵长星, 盖红梅. 模拟干旱条件下冬小麦品种萌发期抗旱性评价. *干旱地区农业研究*, 2017, 35(6): 110-115  
Sun L, Li Y G, Wang S J, Liu Y D, Wang Z Y, Liu D, Li N N, Zhao C X, Gai H M. Evaluation of drought resistance of winter wheat under drought stress simulation at germination stage. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2017, 35(6): 110-115
- [ 39 ] 简大卫, 周阳, 刘宏伟, 杨丽, 买春艳, 于立强, 韩新年, 张宏军, 李洪杰. 利用功能标记揭示新疆小麦改良品种与地方品种的遗传变异. *作物学报*, 2018, 44(5): 657-671  
Jian D W, Zhou Y, Liu H W, Yang L, Mai C Y, Yu L Q, Han X N, Zhang H J, Li H J. Use of functional markers reveal genetic variations in wheat improved cultivars and landraces from Xinjiang. *Acta Agronomica Sinica*, 2018, 44(5): 657-671
- [ 40 ] 曹连莆, 艾尼瓦尔. 新疆小麦高产优质育种的进展与策略. *石河子大学学报*, 1998(S1): 1-7  
Gao L P, Aini waer. The progress and strategy on high yield and superior quality about wheat breeding in Xinjiang. *Journal of Shihezi University*, 1998(S1): 1-7
- [ 41 ] 武继承, 杨永辉, 潘晓莹, 丁晋利, 韩伟锋, 何方. 小麦-玉米滴灌水肥一体化的节水增长效应. *河南农业科学*, 2017, 46(22): 16-21  
Wu J C, Yang Y H, Pan X Y, Ding J L, Han W F, He F. Effect of drop irrigation fertigation on water-saving and yield-increasing of wheat-corn system. *Journal of Henan Agricultural*, 2017, 46(22): 16-21
- [ 42 ] 白璐, 杨春艳, 苏秀娟, 茹仙古丽·牙生, 禹飞雄, 任毅, 时佳, 耿洪伟. 新疆小麦籽粒硬度 *Puroindoline b* 相关基因等位变异的分子检测. *分子植物育种*, 2017, 15(3): 956-964  
Bai L, Yang C Y, Su X J, Ruxianguli yasheng, Yu F X, Ren Y, Shi J, Geng H W. Molecular detection of allelic variations of *Puroindoline b* genes in Xinjiang wheat. *Molecular Plant Breeding*, 2017, 15(3): 956-964
- [ 43 ] 刘芳军, 王宪国, 桂安胜, 杨杰, 白升升, 马械灵, 张晓科, 陈东升. 宁夏小麦 *TaNrx-B1* 和 *TaFer-A1* 基因组成及其与相对发芽率的关系. *麦类作物学报*, 2015, 35(11): 2436-2441  
Liu F J, Wang X G, Gui A S, Yang J, Bai S S, Ma Y L, Zhang X K, Chen D S. Composition of *TaNrx-B1* and *TaFer-A1* genes and the association with relative germination rate of Ningxia wheat. *Journal of Triticeae Crops*, 2015, 35(11): 2436-2441