

青稞种质资源抗旱性鉴定评价

崔永梅, 李洁, 张丽, 姚有华, 姚晓华, 吴昆仑

(青海大学农林科学院/青藏高原种质资源研究与利用实验室/青海省青稞遗传育种重点实验室/国家麦类改良中心青海青稞分中心, 西宁810016)

摘要: 干旱是青藏高原地区影响青稞稳产增产的最主要逆境因子之一。鉴定青稞抗旱代表性种质资源、培育抗逆新品种,是提高青稞抗旱性的有效措施。本研究对由246份青稞种质组成的自然群体开展苗期与成株期抗旱性鉴定,系统分析了青稞种质资源不同发育阶段的抗旱性特征。在苗期通过相对离子渗漏率对群体抗旱性进行逐级分类;在成株期测定株高、穗长、单穗粒数、千粒重4个产量相关性状,利用多种分析方法综合评价成株期抗旱性,并建立了成株期抗旱性综合评价模型和筛选指标。结果表明,成株期干旱胁迫导致抗旱相关指标显著降低5.39%~18.87%,其中穗长对干旱胁迫最为敏感和显著相关。此外,4个成株期抗旱性状的种质间变异系数范围在11.98%~24.96%之间,说明不同种质间的抗旱性也存在明显差异。苗期和成株期分别鉴定到21份和36份极强抗旱或强抗旱材料,84份和71份极弱抗旱或弱抗旱材料。结合苗期和成株期抗旱性鉴定结果,共鉴定出3份均表现极强抗旱或强抗旱材料,26份均表现为极弱抗旱或弱抗旱材料。相关性分析表明,苗期的相对离子渗漏率和成株期的综合抗旱性评价D值之间相关性不显著。以上鉴定到的抗性材料,可为抗旱育种提供亲本材料,并解析青稞关键生长期抗旱作用机制提供基础研究材料。

关键词: 青稞; 苗期; 成株期; 种质资源筛选; 抗旱性综合评价

Drought-Resistance Evaluation of Qingke Germplasm Resources

CUI Yongmei, LI Jie, ZHANG Li, YAO Youhua, YAO Xiaohua, WU Kunlun

(Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Qinghai University / Laboratory for Research and Utilization of Qinghai Tibet Plateau Germplasm Resources / Qinghai Key Laboratory of Hulless Barley Genetics and Breeding / Qinghai Hulless Barley Subcenter of National Triticeae Improvement Center, Xining 810016)

Abstract: Drought is one of significant environmental stresses in the Tibetan Plateau region. Breeding drought-tolerant varieties in Qingke (Tibetan hulless barley) is an effective strategy to enhance its drought resistance. In this study, we evaluated the drought resistance of 246 Qingke germplasm resources at both the seedling and reproductive stages. The drought resistance was classified by measuring relative electrolyte leakage at the seedling stage, and at the reproductive stage, plant height (PH), spike length (SL), kernels per ear (KN), and thousand grain weight (TGW) were measured and analyzed. A comprehensive evaluation model (D-value) was developed to identify suitable evaluation indices for drought resistance. The results showed that drought stress resulted in a significant decrease of 5.39% to 18.87% in the four drought-related traits at the reproductive stage, with spike length being the most sensitive and significantly correlated with drought resistance. The coefficients of variation of these traits ranged from 11.98% to 24.96%, highlighting substantial variation in drought resistance among the germplasms. Specifically at the seedling and reproductive stages, 21

收稿日期: 2024-06-19 网络出版日期: 2024-12-04

URL: <https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20240619001>

第一作者研究方向为青稞遗传育种, E-mail: 15251892177@163.com

通信作者: 吴昆仑, 研究方向为青稞遗传育种, E-mail: wklqaaf@163.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(32260456); 青海省自然科学基金(2023-ZJ-969Q)

Foundation projects: National Natural Science Foundation of China (32260456); Qinghai Provincial Natural Science Foundation for Young Scholars (2023-ZJ-969Q)

and 36 were identified as highly-resistant/resistant accessions, respectively, and 84 and 71 were identified as highly-sensitive/sensitive accessions, respectively. When combining the results from both stages, three accessions showed highly-resistant/resistant, and 26 accessions showed highly-sensitive/sensitive. However, there was no significant correlation between relative electrolyte leakage and the comprehensive evaluation D-value. Collectively, this study provides valuable germplasm resources for future breeding programs and deciphering the drought-tolerance mechanisms during critical growth periods of Qingke.

Key words: Qingke; seedling stage; reproductive stage; screening of germplasm resources; drought-resistance comprehensive evaluation

青稞(*Hordeum vulgare* L. var. *nudum* Hook. F)与其近缘种普通栽培大麦相比,其种子形态上表现出明显不同的内、外颖壳分离表型,故又称“裸大麦”(Hulless barley)^[1]。青稞主要分布在中国西藏自治区、青海省、四川省及甘肃省等干旱半干旱地区^[2]。受种植区域地理位置分布以及高原地区特殊的生态环境等因素影响,青稞春夏两季极易遭受干旱胁迫,春播期干旱胁迫影响出苗率和后期壮苗,夏季高温旱灾影响灌浆和开花、降低结实率和籽粒充实度,进而严重影响青稞商品性和产量^[2]。青稞高原地区作为青稞的主产区,地形复杂、高寒缺氧、生态多样,蕴藏着丰富的青稞种质资源^[3]。因此,广泛收集背景丰富的青稞种质资源,开展青稞品种抗旱性鉴定及综合评价方法和鉴定指标的研究,对青稞资源利用、抗旱育种及新品种生产应用具有重要意义。

我国近47%的国土面积处于干旱和半干旱状态,水资源严重短缺,这已成为阻碍农业生产可持续发展的核心问题。研究表明,干旱导致大麦产量下降49%~87%^[4,5]。近年来,许多学者从形态学、生理学、生长发育以及生化等多个方面对大麦生长初期的抗旱性进行了深入研究。蒋花^[6]采用渗透胁迫技术模拟干旱条件,全面评估了大麦在初期生长阶段的表现以及多项生理指标,并确定了发芽率等10项核心指标,这些指标可作为评价大麦幼苗期抗旱性的依据。鞠乐等^[7]采用模拟干旱胁迫方法深入探究植物的抗旱性机制,共筛选出发芽势等9项关键形态指标、胚根长等4项生长发育指标,以及过氧化氢酶等3项生化指标作为抗旱性鉴定的关键参数。惠宏杉等^[8]通过盆栽控制土壤含水量模拟干旱条件,发现幼苗根系的形态变化可以作为大麦抗旱性的筛选指标。徐银萍等^[9]采用反复干旱胁迫结合综合评价法,对30份大麦种质幼苗的株高、总干重等8项指标进行了鉴定与评价,结果表明,株高和总干重是大麦种质资源苗期抗旱性的重要衡量标准。

此外,也有许多研究对大麦成株期的抗旱性进行了鉴定,筛选出的抗旱性鉴定指标,为培育抗旱产量型品种提供了重要依据。王兴荣等^[10]采用综合评价法对238份青稞种质的株高、单株穗数等7项指标进行了鉴定与评价,结果表明株高、单株穗数、千粒重、产量及单株生物量可以作为青稞成株期抗旱性的关键指标。徐银萍等^[11]采用综合评价法,对30份大麦种质材料的株高、穗长等8项关键指标进行了鉴定与评价;基于D值的聚类分析,将供试大麦种质资源的抗旱性划分为5个等级,明确穗长、单株粒数、单株粒重、穗粒数和产量可作为大麦种质资源成株期抗旱性的直观且实用的指标。张毅等^[12]采用综合评价法对100份大麦种质材料的株高等8项指标进行了鉴定与评价,依据综合抗旱系数(CDC, comprehensive drought resistance coefficient)值将其分为高度抗旱型、抗旱型、中等抗旱型、敏感型、高度敏感型5个抗旱等级,此外,研究还揭示了单株生物量、穗粒数、分蘖数、有效分蘖和株高可作为评估大麦成株期抗旱性的重要指标。综上,目前大麦(青稞)抗旱性综合评价和种质资源筛选多数针对特定生育时期开展,缺乏对同一品种不同生育期抗旱性的比较,对重要品种的抗旱性缺乏整体认知,限制了品种抗旱性提升的潜力。

利用不同背景的青稞遗传资源、可靠的性状、精准的表型鉴定方法,在关键生长阶段进行抗旱性综合评价是鉴定抗旱优异青稞种质资源的有效策略。本研究为鉴定在不同生育时期抗旱性稳定的广适性青稞种质资源,以246份具有广泛遗传背景的青稞种质资源为材料,开展室内苗期和青稞主产区成株期的抗旱性鉴定;利用群体逐级分类法以及相关性分析、隶属函数分析、聚类分析和逐步回归分析等方法,对苗期和成株期的抗旱性进行了系统分类和综合评价。研究旨在综合评价246份青稞种质在苗期和成株期的

抗旱性,筛选出具有抗旱性强的青稞种质及与青稞种质抗旱性评价密切相关的指标,为青稞抗旱育种、抗旱机理的深入研究以及干旱条件下的青稞生产提供有效的调控策略,同时为后续抗旱品种的选育提供了宝贵资源。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

研究材料是由农家品种、地方品种和野生资源组成的青稞自然群体(详见 <https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20240916001>,附表1),其中农家品种45份、地方品种179份和野生资源22份。

1.2 苗期抗旱性鉴定

苗期种植:每份种质挑选20粒饱满健康的种子,均匀种在4 cm×4 cm的土培穴盘里,每个土培穴盘中5 L土壤,土壤配比为蛭石:营养土:草炭=3 L:1 L:1 L,加入1.8 L水。将种植材料的土培穴盘置于人工智能气候培养箱,生长条件为26 ℃/14 ℃(14 h光照/10 h黑暗),光照强度为7000 Lx,相对湿度为65%。

抗旱性鉴定:正常浇水生长至8 d的幼苗,不再继续浇水,进行自然失水干旱胁迫处理,处理至14 d取样,进行相对离子渗漏率(REL, relative electrolyte leakage)测定。具体方法如下:取第二叶用ddH₂O清洗干净,将叶片剪成1 cm长的小段,并置于15 mL浓度为0.4 mol/L的甘露醇溶液中,设置3个生物学重复,每个重复至少取3株植株叶片;将摇床调至26 ℃ 100 r/min将样品持续振荡摇晃3 h后,使用电导仪对振荡后的样品进行离子渗漏率值测定,获取初始离子渗漏率值S₁;再将样品置于85 ℃水浴20 min,随后,将样品从水浴中取出,让其自然冷却至室温,待样品温度稳定后,获取最终离子渗漏率值S₂;0.4 mol/L甘露醇溶液为空白对照,并将其离子渗漏率值记录为S₀。相对离子渗漏率=(S₁-S₀)/(S₂-S₀)。

1.3 成株期抗旱性鉴定

田间种植:2023年4月1日和4月19日,将246份青稞种质资源分别种植在青海省西宁市青海大学作物栽培与育种试验场和海西州都兰县香日德农场。每个地点均设置正常灌溉和干旱胁迫2种处理,每个处理每份青稞种质材料均种植3行,3个重复,行长1.6 m,每行均匀播种50粒种子。播种行与区组走向垂直,试验地四周播种3 m保护行。正常灌溉处理,播种前、苗期、拔节期和灌浆期进行5次正常灌溉(苗期灌溉2次);干旱胁迫处理,仅于播种

前、苗期和灌浆期进行3次正常灌溉。青海省西宁市青海大学作物栽培与育种试验场属大陆性高原半干旱气候,2023年年平均气温7 ℃,年降水量约为500 mm,年均日照时数1939 h,海拔2248 m,年蒸发量为1363.6 mm。海西州都兰县香日德农场属典型的大陆性荒漠气候,2023年年均气温3.7 ℃,年均降水量166.8 mm,年均日照时数2904 h,海拔2950 m,年蒸发量为2285.44 mm。

抗旱性鉴定:待完熟期于每个小区中间位置随机选取10株,参照《大麦种植资源描述规范和数据标准》^[13]的相关方法,测定株高、穗长、单穗粒数和千粒重。株高为植株基部(通常是土壤表面与植株主干的交界处)到穗顶端(不包括穗的芒部分)的垂直距离。穗长为主效穗基部到顶端的长度。单穗粒数为主效穗的总籽粒数。每个品种随机挑选出饱满的100粒种子,使用精度达到千分之一的电子天平,进行至少3次的重复称量,并对其结果进行统计分析求平均值,从而得到百粒重(HKW, hundred kernel weight),再换算为千粒重(TKW, thousand kernel weight)^[14]。

1.4 数据分析

使用Excel进行数据整理。使用SPSS 21.0对数据进行以下相关数据的统计分析。

基于抗旱系数(DC, drought-resistance coefficient)、干旱伤害率(DIR, drought injury rate)、模糊隶属函数法(MFC, membership function value)、综合抗旱性度量值(D, drought resistance evaluation value)进行抗旱性综合评价,计算公式如下。

$$\text{抗旱系数: } DC = X_d / X_c \quad (1)$$

$$\text{干旱伤害率: } DIR(\%) = (X_c - X_d) / X_c \times 100\% \quad (2)$$

各性状指标的隶属函数值:

$$U(X_j) = (X_j - X_{j\min}) / (X_{j\max} - X_{j\min}) \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

$$\text{综合抗旱性度量值: } D = \sum (\mu(X_j) / n) \quad (4)$$

式中, X_d、X_c分别为干旱胁迫、正常灌溉条件下测定性状的平均值。对于每一个性状j,计算其在干旱条件下的指标值X_j,确定该性状的最小值X_{jmin}和最大值X_{jmax},利用公式(3)计算每个性状指标的隶属函数值U(X_j)。D为供试种质抗旱性的综合评价值,D值越大抗旱性越强^[15],n代表品种数量。

聚类分析:根据D值大小,采用欧式“complete”法,利用Origin 2021对246份青稞种质抗旱性进行分类,并按照D值大小定义青稞种质的抗旱性。

逐步回归分析:以成株期抗旱性综合评价值D值为因变量,4个性状的抗旱系数为自变量进行逐

步回归分析,得到回归方程。

灰色关联度分析:采用SPSS 21.0软件,以各指标抗旱系数为比较序列,D值为参考序列进行灰色关联度分析,获得各指标抗旱系数与D值间的关联度。

相关性分析:采用SPSS 21.0软件进行相关性分析。

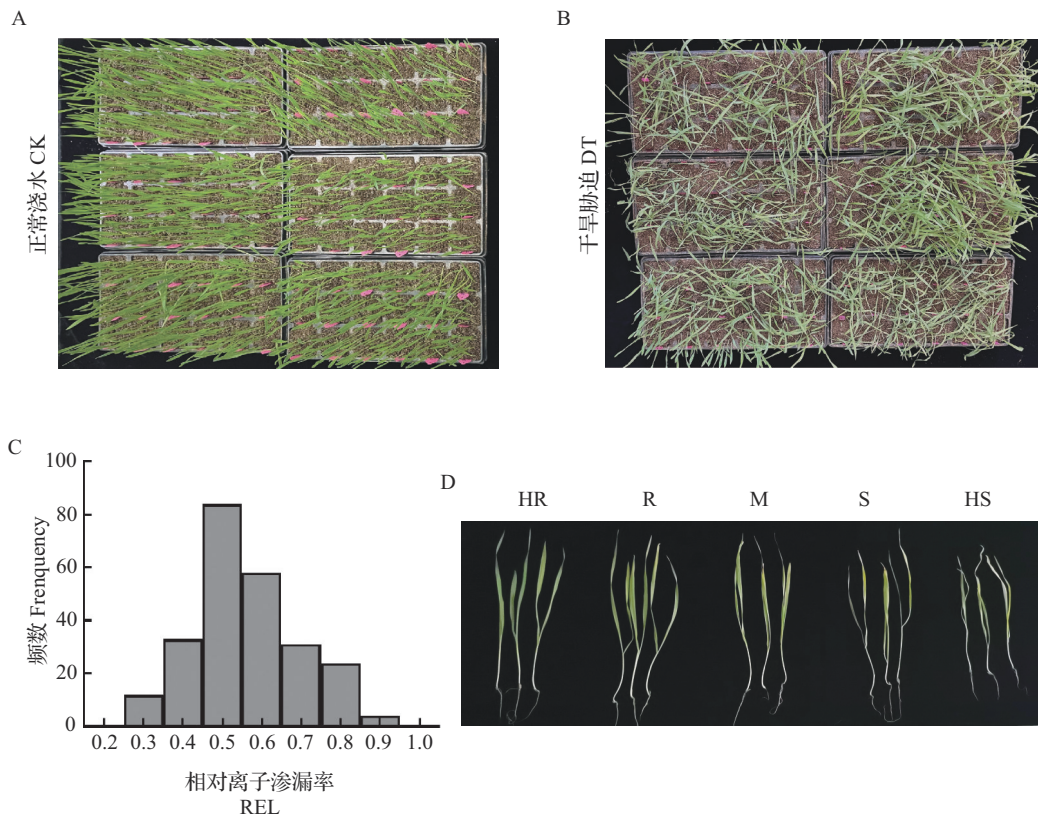
2 结果与分析

2.1 苗期抗旱种质筛选

2.1.1 苗期抗旱性状的描述性分析 对246份生长至第8天的青稞幼苗进行自然失水干旱胁迫处理,待处理至14 d品种间表型差异明显时,测定各种质相对离子渗漏率(图1A、B)。结果表明,在干旱胁迫下,246份青稞种质的苗期相对离子渗漏的平均值和标准差分别为0.57和0.12。进一步分析发现,相对离子渗漏率的偏度系数大于0,为0.23,表明频

数分布的高峰向左偏移,长尾向右延伸,呈现出正偏态分布的特点。同时,峰度系数也大于0,为0.34,说明数据分布的峰态相对于正态分布更为陡峭,且两侧极端数据相对较少。不同种质间的变异系数为21.05%,说明246份青稞种质苗期在干旱胁迫条件下表现呈多样性。

2.1.2 苗期抗旱性鉴定结果 根据246份青稞种质资源的抗旱性状测定结果(详见<https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20240619001>,附表2)进行群体抗旱性逐级分类。结果表明,干旱胁迫后,246份青稞种质的相对离子渗漏率呈正态分布(图1C),说明群体品种间的耐旱性差异明显。通过干旱胁迫后的生长表型以及相对离子渗漏率,本研究将246份青稞种质划分为5个抗旱类型(图1D): $0 < REL \leq 0.3$ 为极强抗旱、 $0.3 < REL \leq 0.4$ 为强抗旱、 $0.4 < REL \leq 0.6$ 为中度抗旱、 $0.6 < REL \leq 0.8$ 为弱抗、 $0.8 < REL \leq 1.0$ 为极弱抗旱。



A: 正常浇水;B: 干旱胁迫;C: 相对离子渗漏率频次分布;D: 抗旱性分类表型,HR: 极强抗旱,R: 强抗旱,M: 中度抗旱,S: 弱抗旱,HS: 极弱抗旱,下同

A: Normal watering(CK);B:Drought stress treatment(DT); C: Frequency distribution of the relative electrolyte leakage(REL);

D: Classification of the drought-resistance,HR: Highly resistant, R: Resistant, M: Medium resistance, S: Sensitive,

HS: Highly sensitive, the same as below

图1 干旱胁迫处理下青稞苗期种质资源的抗旱性鉴定与分类

Fig. 1 Identification and classification of drought-resistance of Qingke germplasm resources at the seedling stage under drought stress treatment

根据抗旱性分类标准,对246份青稞种质资源进行苗期抗旱性归类,其中属于极强抗旱的种质有4份,占总数的1.63%;属于强抗旱的种质有17份,占总数的6.91%;属于中度抗旱的种质有141份,占总数的57.32%;属于弱抗旱的种质有75份,占总数的30.48%;属于极弱抗旱的种质有9份,占总数的3.66%(图2)。

2.2 成株期抗旱性状分析

对在西宁和海西两个环境的正常灌溉或干旱胁迫条件下的株高、穗长、单穗粒数和千粒重4个性状进行测定和分析。结果表明,株高、穗长、单穗粒数、千粒重在不同种质间均存在显著差异(表1)。上述4个性状在正常灌溉和干旱处理条件下,种质间的变异系数范围在11.98%~24.96%之间,充分证明了试验群体的广泛代表性和研究材料的丰富性。进一步*t*检验分析(图3)表明,各性状在正常灌溉和干旱胁迫间均存在极显著差异,说明干旱胁迫的有效性和所选指标对干旱

的敏感性。此外,在正常灌溉和干旱胁迫下,供试青稞种质的相关系数在0.57~0.89之间,反映了4个成株期抗旱性状对干旱胁迫响应的敏感程度存在差异,为青稞抗旱育种提供了重要的参考依据(表1)。干旱胁迫后,株高平均值较正常灌溉

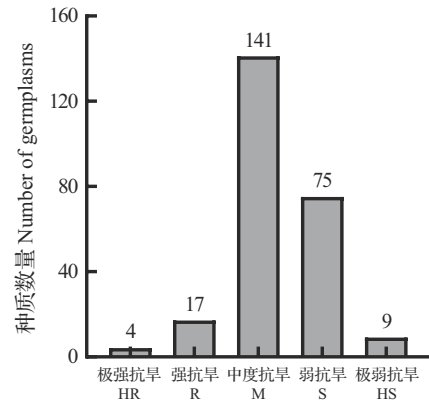


图2 苗期抗旱性鉴定结果

Fig. 2 The result of drought-resistance at the seedling stage

表1 干旱胁迫下246份青稞种质资源成株期各性状均值差异性分析

Table 1 Statistics of multiple traits of 246 Qingke germplasm resources under drought treatment conditions at the reproductive stage

处理 Treatment	参数 Parameter	株高(cm) PH	穗长(cm) SL	单穗粒数 KN	千粒重(g) TGW
正常灌溉 CK	最大值	136	10	90	72
	最小值	64	4	21	29
	均值	106.96**	8.32**	65.48**	48.24**
	标准差	12.82	1.54	16.34	7.65
	变异系数(%)	11.98	18.49	24.96	15.87
干旱胁迫 DT	最大值	128	10	125	61
	最小值	63	4	18	25
	均值	99.54**	6.75**	57.05**	45.64**
	标准差	13.03	1.06	14.02	6.33
	变异系数(%)	13.08	15.72	24.57	13.87
较对照变化 Comparison with the control	均值	7.42	1.57	8.43	2.60
	标准差	8.79	1.16	12.90	6.60
	变异系数(%)	11.84	73.68	15.32	25.54
	<i>t</i> 值	13.24	21.29	10.24	6.17
	<i>P</i> 值	<i>P</i> <0.001	<i>P</i> <0.001	<i>P</i> <0.001	<i>P</i> <0.001
	相关系数	0.77	0.66	0.89	0.57

*t*值: 配对样本*T*检验, 检验各抗旱性状在正常灌溉与干旱胁迫条件下的差异性; 相关系数: 各抗旱性状在正常灌溉与干旱胁迫条件下的相关性; **表示 *P*<0.01 水平上差异显著; 下同

t value: The paired sample *T* test was used to test significant differences of drought resistance traits between control and drought stress conditions; Correlation coefficient: The correlation of drought resistance traits between control and drought stress conditions; ** indicates a significant difference at *P*<0.01 probability level; PH: Plant height; SL: Spike length; TGW: 1000-grain weigh; KN: Kernels per ear; The same as below

下降了6.94%,穗长平均值较正常灌溉下降了18.87%,单穗粒数平均值较正常灌溉下降了12.87%,千粒重平均值较正常灌溉下降了5.39%(表1)。综

上,相比正常灌溉,干旱胁迫组中穗长的平均值下降幅度最大,对干旱胁迫最为敏感,单穗粒数次之,株高和千粒重受胁迫影响较小。

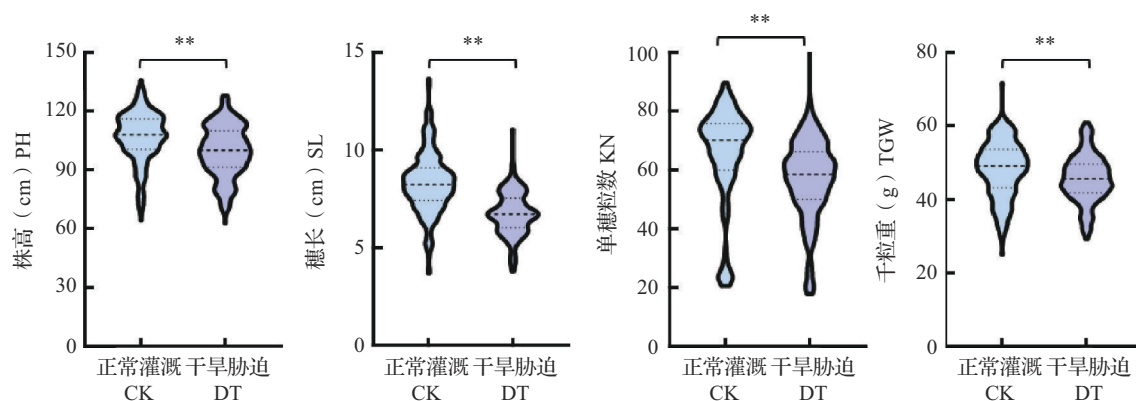


图3 干旱胁迫处理对青稞种质资源成株期各性状的影响

Fig. 3 Effect of drought stress on multiple traits of the Qingke germplasm resources at the reproductive stage

2.3 成株期各性状抗旱系数及相关性分析

分析各性状抗旱系数,结果表明,与正常灌溉处理相比,在成株期经历持续干旱胁迫的青稞品种株高、穗长、单穗粒数、千粒重的抗旱系数均出现了显著的差异。株高、穗长、单穗粒数和千粒重的抗旱系数最大值与最小值差值分别为0.67、0.72、2.27和1.30(表2),表明不同种质在干旱胁迫下的耐受性差异显著。4个抗旱性状抗旱系数的变异系数范

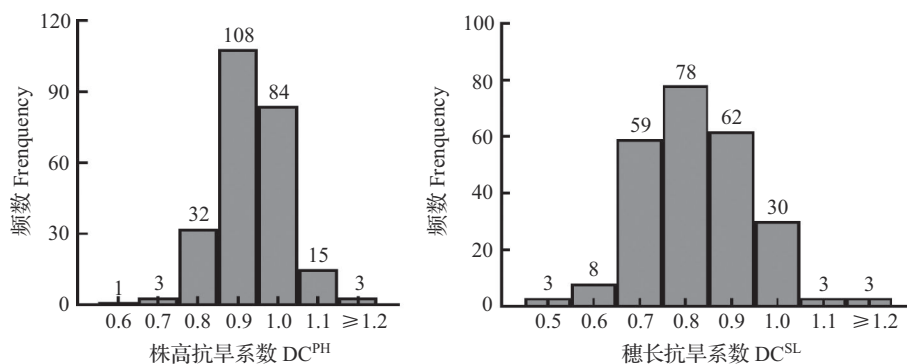
围为9.68%~30.76%,说明不同性状对干旱胁迫的响应程度不同。各性状抗旱系数频次分布表明,同一区间抗旱系数的分布次数和频率相差较大,抗旱系数 ≥ 0.9 的株高、穗长、千粒重和单穗粒数的频率分别为67.89%、26.02%、90.24%和40.65%(图4),表明穗长对干旱程度最为敏感,其次为单穗粒数和株高,千粒重最为不敏感。因此,采用单个性状的抗旱系数不能准确评价不同青稞种质的抗旱能力。

表2 成株期各性状的抗旱系数

Table 2 Drought-resistance coefficient of multiple traits at the reproductive stage

抗旱系数 DC	最大值 Max.	最小值 Min.	均值 Average	标准差 SD	变异系数(%) CV
株高抗旱系数 DC^{PH}	1.40	0.73	0.93	0.09	9.68
穗长抗旱系数 DC^{SL}	1.20	0.48	0.83	0.13	15.66
单穗粒数抗旱系数 DC^{KN}	2.52	0.25	0.91	0.28	30.76
千粒重抗旱系数 DC^{TGW}	1.92	0.62	1.06	0.16	15.09

DC: Drought-resistance coefficient; DC^{PH} , DC^{SL} , DC^{KN} and DC^{TGW} indicate the drought-resistance coefficient of plant height, spike length, kernels per ear and thousand kernel weight, respectively; The same as below



(图4)

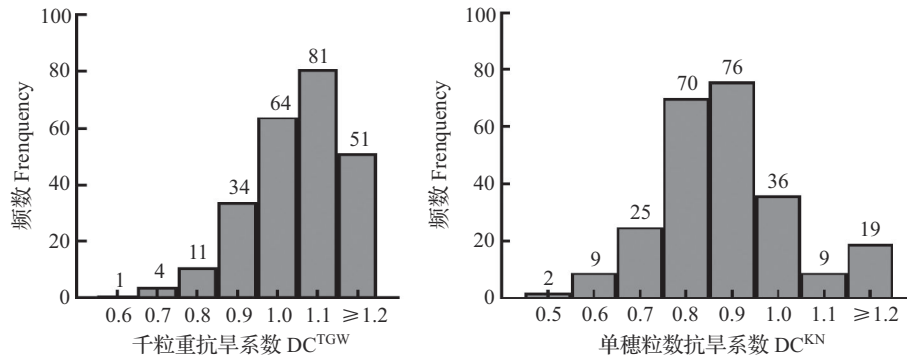


图4 成株期各性状抗旱系数频次分布

Fig. 4 Frequency distribution of drought-resistance coefficients of multiple traits at the reproductive stage

进一步对青稞成株期4个性状的抗旱系数进行相关性分析,结果表明株高抗旱系数与穗长、单穗粒数、千粒重的抗旱系数均无显著相关性,穗长抗旱系数与单穗粒数、千粒重的抗旱系数之间均呈极

显著正相关。而株高、穗长、单穗粒数和千粒重的抗旱系数均与干旱伤害率呈极显著或显著负相关(表3),表明本研究所选性状对干旱胁迫程度反应敏感。

表3 成株期各性状抗旱系数相关性分析

Table 3 Correlation analysis of drought-resistance coefficient of multiple traits at the reproductive stage

指标 Index	株高抗旱系数 DC ^{PH}	穗长抗旱系数 DC ^{SL}	单穗粒数抗旱系数 DC ^{KN}	千粒重抗旱系数 DC ^{TGW}	干旱伤害率 DIR
株高抗旱系数 DC ^{PH}	1				
穗长抗旱系数 DC ^{SL}	0.022	1			
单穗粒数抗旱系数 DC ^{KN}	-0.045	0.191**	1		
千粒重抗旱系数 DC ^{TGW}	0.025	0.190**	-0.234	1	
干旱伤害率 DIR	-0.222**	-0.402**	-0.642**	-0.137*	1

*和**分别表示 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平上显著相关

* and ** indicate a significant correlation at $P < 0.05$ and $P < 0.01$ probability levels, respectively; DIR: Drought injury rate

2.4 成株期抗旱性综合评价及聚类分析

2.4.1 抗旱系数主成分分析

对成株期4个抗旱性状的抗旱系数进行主成分分析,按照特征值 >1 的原则,转化为2个独立的综合指标,累计贡献率为78.19%,具有较强的信息代表性,可用于对青稞不同品种的抗旱性评价。其中,第1主成分的特征值为2.02,可反应原始数据的50.47%,与穗长和单穗粒数的抗旱系数相关性最大。第2主成分的特征值为1.11,可反应原始数据的27.72%,与株高和千粒重的抗旱系数相关性最大(表4)。

2.4.2 抗旱性综合评价

利用模糊隶属函数法,基于2个主成分计算出各自的隶属函数值,根据2个主成分的方差贡献率大小确定各自的权重,分别为0.65和0.35。进一步计算抗旱性综合评价D值(详见 <https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20240619001>,附表3),根据D值的大小对246份青稞种质资源进行抗旱性评价,D值越大,抗旱性越强。246份青稞

种质资源D值平均值为0.41,其中,C192(顺大麦)综合抗旱性最强,D值为0.96;C190(宣平短方头)综合抗旱性最弱,D值为0.06。

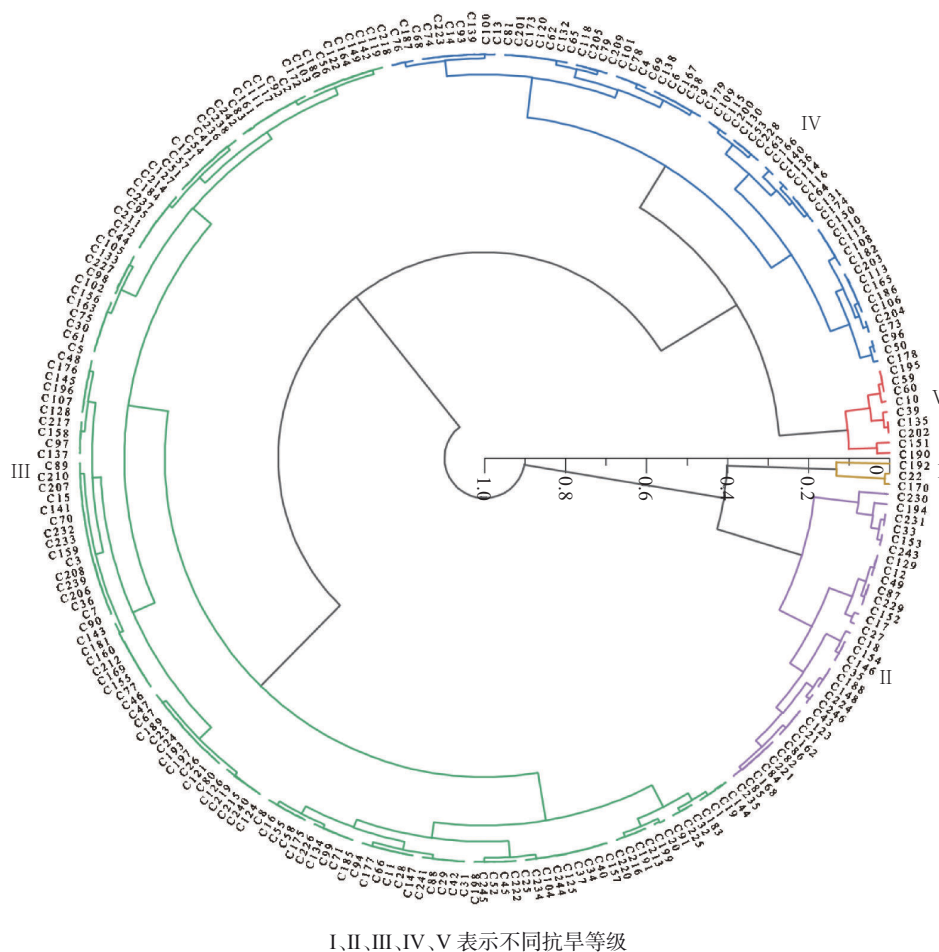
表4 各性状主成分的特征向量及贡献率

Table 4 Eigenvector and contribution rate of principal components of drought-resistance coefficient of multiple traits

指标 Index	主成分 Principal component	
	PC1	PC2
株高抗旱系数 DC ^{PH}	-0.48	0.76
穗长抗旱系数 DC ^{SL}	0.86	0.35
单穗粒数抗旱系数 DC ^{KN}	0.99	-0.12
千粒重抗旱系数 DC ^{TGW}	0.29	0.63
特征值 Eigen value	2.02	1.11
贡献率(%) Contribution rate	50.47	27.72
累计贡献率(%) Cumulative contribution ratio	50.47	78.19
权重 Weight	0.65	0.35

2.4.3 抗旱性分类 采用欧式“complete”法对综合评价D值进行聚类分析,根据聚类结果将246份青稞种质资源分为5类(图5)。其中,第I类材料为极强抗旱品种,包含3份种质资源,占总数的1.22%;第II类材料为强抗旱品种,包含33份种质资源,占总

数的13.41%;第III类材料为中度抗旱品种,包含139份种质资源,占总数的56.51%;第IV类材料为弱抗旱品种,包含62份种质资源,占总数的25.20%;第V类材料为极弱抗旱品种,包含9份种质资源,占总数的3.66%。



I、II、III、IV、V 表示不同抗旱等级
I, II, III, IV, and V represent different drought resistance levels

图5 基于D值的青稞种质资源成株期抗旱性系统聚类分析

Fig. 5 Fuzzy clustering analysis of drought-resistance of Qingke germplasm resources based on D values at the reproductive stage

2.5 成株期抗旱性指标的筛选

2.5.1 逐步回归分析 为明确青稞成株期各性状与抗旱性之间的关系,筛选出有效的抗旱性评价指标,并构建可用于精确评估青稞抗旱性的回归模型,以4个性状的抗旱系数作为自变量,抗旱性综合评价D值设为因变量,通过逐步回归分析,得到方程: $D=0.644 \times DC^{SL} + 0.305 \times DC^{KN} + 0.388 \times DC^{TGW} - 0.804$ ($R^2 \approx 1, P < 0.001$),表明穗长、单穗粒数和千粒重可作为青稞成株期抗旱性鉴定指标。用该回归方程对青稞成株期的抗旱能力进行预测,其预测值与综合评价D值之间显著正相关($r \approx 1$),表明该回归方程可用于准确预测青稞成株期抗旱能力。

2.5.2 各性状抗旱系数与D值的相关性分析 对各性状抗旱系数与抗旱性综合评价D值进行相关性分析,发现D值与穗长、单穗粒数和千粒重的抗旱系数呈显著正相关,与穗长抗旱系数相关性最为密切($r=0.899$) (表5),以上3个性状可用于青稞成株期抗旱性评价。

2.5.3 灰色关联度分析 对各性状抗旱系数与抗旱性综合评价D值进行灰色关联度分析,结果显示,穗长抗旱系数与综合评价D值的关联度最高,为0.823。株高抗旱系数与综合评价D值的关联度最低,为0.741(表6)。各性状抗旱系数与D值的密切程度依次为穗长、千粒重、单穗粒数和株高,这与各性状对干旱胁迫反应的敏感程度基本吻合。

表5 各性状抗旱系数与综合评价D值相关性分析

Table 5 Correlation analysis between drought-resistance coefficient of multiple traits and comprehensive evaluation D-value

抗旱系数 DC	相关系数 Correlation coefficient	P 值 P-value
株高抗旱系数 DC ^{PH}	-0.245	0.014
穗长抗旱系数 DC ^{SL}	0.899	0
单穗粒数抗旱系数 DC ^{KN}	0.297	0.003
千粒重抗旱系数 DC ^{TGW}	0.576	0

表6 各性状抗旱系数与综合评价D值的灰色关联度

Table 6 Grey relational degree between drought-resistance coefficient of multiple traits and comprehensive evaluation D-value

抗旱系数 DC	关联度 Correlational degree	排序 Ranking
穗长抗旱系数 DC ^{SL}	0.823	1
千粒重抗旱系数 DC ^{TGW}	0.785	2
单穗粒数抗旱系数 DC ^{KN}	0.767	3
株高抗旱系数 DC ^{PH}	0.741	4

2.6 苗期与成株期抗旱性关系

为了分析246份青稞种质资源苗期与成株期抗旱性的关系,对苗期相对离子渗漏率和成株期的综合抗旱性评价D值进行相关性分析(图6)。结果显示,苗期与成株期抗旱性无显著相关性,相关系数数值仅为-0.035。进一步分析发现,多数材料在

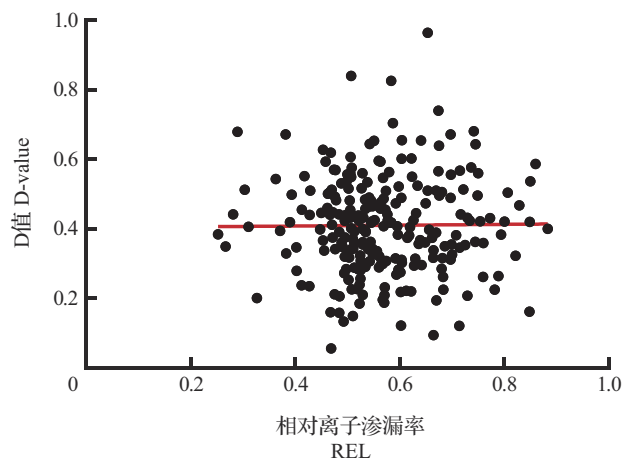


图6 苗期相对离子渗漏率与成株期抗旱性综合评价D值相关性分析

Fig. 6 Correlation analysis between relative electrolyte leakage at the seedling stage and comprehensive evaluation D-value at the reproductive stage

不同生育时期的抗旱性存在较大差异,如C192(顺大麦)在成株期表现为极强抗旱,但在苗期却属于弱抗旱,而C190(宣平短方头)在成株期表现为极弱抗旱,但在苗期则属于中度抗旱。其中,有3份材料在苗期和成株期均表现为极强抗旱或强抗旱,分别为C33(达坝青稞)、C148(擦旺青稞)和C243(ZDM9782藏831597);82份材料在苗期和成株期均表现为中度抗旱;26份材料在苗期和成株期均表现为弱抗旱或极弱抗旱;C195(宣思米麦-1)在苗期和成株期均表现极弱抗旱(详见<https://doi.org/10.13430/j.cnki.jjpr.20240619001>,附图1)。

3 讨论

3.1 青稞抗旱性鉴定方法与指标筛选

采用不同背景的遗传种质资源、可靠的表型性状、精准的表型鉴定方法,以及选择易发生干旱胁迫的生长阶段,是鉴定核心耐旱种质的关键,同时也是改良育种材料的先决条件^[16]。目前,已有学者在大麦(青稞)抗旱性鉴定方面开展了大量研究工作,采用单指标和多性状综合分析两大类方法提出了多种抗旱性评价方法和鉴定指标^[6-12]。为系统了解青稞不同生育期抗旱机制,本研究分别于苗期和成株期在室内和青稞主产区开展了246份青稞种质资源的抗旱性鉴定和评价。逆境胁迫条件下,植物体内积累过量的活性氧(ROS, reactive oxygen species)使细胞膜受损,膜渗透性增加,进而导致细胞中的电解质泄漏^[17]。因此,离子渗漏作为衡量植物细胞膜稳定性和完整性的重要参数,不仅揭示了植物对逆境的响应机制,而且是评价植物抗逆性的重要指标之一。在苗期,本研究测定了246份青稞种质在干旱胁迫条件下的相对离子渗漏率,采用群体逐级分类法进行抗旱性鉴定和分类,结果表明该群体干旱胁迫后的相对离子渗漏率呈正态分布,说明该群体品种间的抗旱差异性比较丰富;依据抗旱性分类标准,将246份青稞种质资源归类为5种不同的抗旱类型。在成株期,本研究测定了与产量相关的4个性状,利用综合评价D值对246份青稞种质资源进行成株期抗旱性综合评价。在干旱胁迫条件下,4个表型性状表现出广泛的变异,且均值较正常灌溉均呈现不同程度的下降,表明所选指标对于干旱较为敏感。利用综合评价D值,将246份青稞种质资源分为5种不同的抗旱类型,并建立了青稞成株期抗旱性评价的回归模型,结合与各性状抗旱系数的相关性分析以及灰色关联度分析,确定穗

长、单穗粒数和千粒重可作为青稞成株期抗旱性鉴定的指标。本研究鉴定的246份资源品种多,遗传多样性丰富,鉴定时期关键,筛选地点具有生产代表性,可加强对青稞不同生育时期抗旱特性的全面认识,为筛选广适性品种、指导青稞抗旱育种提供重要的理论依据。

3.2 青稞苗期与成株期抗旱性的关系

抗旱性是植物在应对干旱胁迫时展现出的重要适应性特征,这一特性由多个基因共同调控,是复杂的数量性状,经过长期自然选择与进化,植物已经发展出多种策略来抵御干旱带来的威胁。这些策略不仅体现在植物形态结构的适应性变化上,如叶片卷曲、根系扩展等,还涉及到生理代谢的精细调控,如气孔行为、水分运输等^[18]。通过这些机制,植物能够在艰苦的干旱环境中维持生命活动,确保生长与繁衍的顺利进行^[19]。青稞生长季节较长,主要分布在海拔2700 m以上的干旱、半干旱地区,其生长环境具有光照强度高、气候干燥、降雨量少等特点,春播期少雨干旱和夏季高温旱灾成为制约高原地区青稞增产稳产的主要逆境因子。春播苗期干旱影响幼苗率和后期形态建成。成株期高温旱灾影响灌浆和结实率,从而对商品性和产量产生严重影响。产量作为综合抗性评价的最终标准,为提高存活能力而忽略产量筛选的种质筛选策略不具科学性和实践性。因此,结合不同生育期筛选广适性的抗旱核心品种是种质资源保护与利用的关键。本研究发现,苗期相对离子渗漏率与抗旱性综合评价D值之间相关不显著,这与李龙等^[20]、常利芳等^[4]结果一致。本研究中,苗期极强抗旱品种C102(查不来)、C117(雪堆青稞)和C193(米大麦)在成株期均表现为中度抗旱,成株期极强抗旱品种C192(顺大麦)、C22(特鄂)和C170(ZDM9495通鉴63)在苗期表现为弱抗旱和中度抗旱。总之,作物不同生育阶段的抗旱机制在渗透调节、光合作用、活性氧清除、激素调节或基因网络调控等生理生化和分子调控机制上有所独立或交叉,因此需从多层面多角度在作物的不同生育阶段系统解析抗旱机制,进而提高抗逆育种精准度。

3.3 青稞抗旱种质筛选

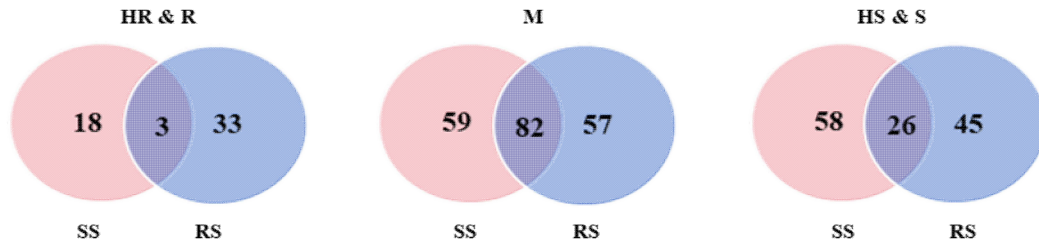
优异抗旱种质资源是青稞抗旱性育种及遗传研究的基础。本研究所采用的群体包含广泛收集的农家品种、地方品种和野生资源,并已完成全基因组简化测序^[21],是青稞育种及遗传改良的宝贵资

源库,研究团队通过杂交创制出了如昆仑14号、昆仑16号等广适性好、产量高的优异品种。本研究基于群体逐级分类和抗旱性综合评价D值,苗期筛选到4份极强抗旱品种,17份强抗旱品种,占总数的8.54%;成株期筛选到3份极强抗旱品种,33份强抗旱品种,占总数的14.63%。其中,仅有3份材料在苗期和成株期均表现极强抗或强抗旱性,分别为C33(达坝青稞)、C148(擦旺青稞)和C243(ZDM9782藏831597)。优良亲本的选用是育种环节的关键,今后可重点关注本研究鉴定的优异抗旱种质的综合表现,并基于本研究抗旱性鉴定数据,通过群体遗传力评估、全基因组选择、候选基因与目标性状的关联分析,开展青稞种质资源形成和演化研究,挖掘控制抗逆复杂性状的关键基因及调控元件,明确其功能及调控网络,并揭示其分子机理,进而创制性能优质稳定的种源品种。

参考文献

- [1] 陈林.青稞紫粒花青素合成相关MBW复合物的筛选及功能研究.西宁:青海大学,2023
Chen L. Screening and functional study of MBW complex related to anthocyanin synthesis in purple grains of Qingke. Xining: Qinghai University, 2023
- [2] 王玉林,徐齐君,原红军,曾兴权,尼玛扎西.PEG模拟干旱胁迫处理对青稞幼苗生长和生理特性的影响.大麦与谷类科学,2018,35(1):6-12
Wang Y L, Xu Q J, Yuan H J, Zeng X Q, Nyima Z S. Impact of drought stress induced by polyethylene glycol on the growth and physiological characteristics of hulless barley seedlings. *Barley and Cereal Sciences*, 2018, 35(1): 6-12
- [3] 姚晓华,吴昆仑.PEG预处理对青稞种子萌发、幼苗生长和抗旱性的影响.中国农业大学学报,2013,18(6):80-87
Yao X H, Wu K L. Effect of PEG pretreatment on germination, growth and its drought-resistance of hulless barley. *Journal of China Agricultural University*, 2013, 18(6): 80-87
- [4] 常利芳,乔彦玮,陈芳,乔麟轶,郭慧娟,李欣,张树伟,畅志坚,张晓军.小偃麦衍生系萌发期和成株期抗旱性综合评价.植物遗传资源学报,2023,24(5):1321-1333
Chang L F, Qiao Y W, Chen F, Qiao L Y, Guo H J, Li X, Zhang S W, Chang Z J, Zhang X J. Comprehensive evaluation on drought resistance of wheat-*Thinopyrum intermedium* lines at germination and adult stages. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2023, 24(5): 1321-1333
- [5] Kebede A, Kang M S, Bekele E. Advances in mechanisms of drought tolerance in crops, with emphasis on barley. *Advances in Agronomy*, 2019, 156: 265-314
- [6] 蒋花.大麦生长初期的抗旱生理特性研究.杨凌:西北农林科

- 技大学, 2012
- Jiang H. Study on physiologic characteristics of initial growth barley materials related to drought-resistance. Yangling: Northwest A&F University, 2012
- [7] 鞠乐, 齐军仓, 贺雪, 王丹, 侯忠庆, 付强, 熊显鹏. 大麦种子萌发期抗旱性鉴定指标的筛选及抗旱性评价. 新疆农业科学, 2016, 53(11): 2008-2014
- Ju L, Qi J C, He X, Wang D, Hou Z Q, Fu Q, Xiong X P. Screening drought resistance identification indices and drought resistance evaluation in barley during seed germination stage. Xinjiang Agricultural Science, 2016, 53(11): 2008-2014
- [8] 惠宏杉, 林立昊, 齐军仓, 廖乐, 王超龙, 程海涛. 干旱胁迫对大麦幼苗根系的影响. 麦类作物学报, 2015, 35(9): 1291-1297
- Hui H S, Lin L H, Qi J C, Liao L, Wang C H, Cheng H T. Effects of drought stress on the root of barley seedlings. Journal of Triticeae Crops, 2015, 35(9): 1291-1297
- [9] 徐银萍, 潘永东, 张廷红, 刘梅金, 任诚, 姚元虎, 贾延春, 陈文庆, 赵峰, 包奇军, 火克仓, 牛小霞. 30份大麦种质资源的苗期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选. 甘肃农业科技, 2021, 52(9): 56-67
- Xu Y P, Pan Y D, Zhang T H, Liu M J, Ren C, Yao Y H, Jia Y C, Chen W Q, Zhao F, Bao Q J, Huo K C, Niu X X. Drought resistance identification and drought resistance indices screening of 30 barley germplasm resources at seedling stage. Gansu Agricultural Science and Technology, 2021, 52(9): 56-67
- [10] 王兴荣, 李玥, 张彦军, 李永生, 汪军成, 徐银萍, 祁旭升. 青稞种质资源成株期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选. 作物学报, 2022, 48(5): 1279-1287
- Wang X R, Li Y, Zhang Y J, Li Y S, Wang J C, Xu Y P, Qi X S. Drought resistance identification and drought resistance indexes screening of Tibetan hulless barley resources at adult stage. Acta Agronomica Sinica, 2022, 48(5): 1279-1287
- [11] 徐银萍, 潘永东, 刘强德, 姚元虎, 贾延春, 任诚, 火克仓, 陈文庆, 赵峰, 包奇军, 张华瑜. 大麦种质资源成株期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选. 作物学报, 2020, 46(3): 448-461
- Xu Y P, Pan Y D, Liu Q D, Yao Y H, Jia Y C, Ren C, Huo K C, Chen W Q, Zhao F, Bao Q J, Zhang H Y. Drought resistance identification and drought resistance indexes screening of barley resources at mature period. Acta Agronomica Sinica, 2020, 46(3): 448-461
- [12] 张毅, 杨轲, 汪军成, 姚立蓉, 司二静, 马小乐, 李葆春, 尚勋武, 王化俊, 孟亚雄. 100份大麦种质资源成株期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选. 麦类作物学报, 2022, 42(4): 441-450
- Zhang Y, Yang K, Wang J C, Yao L R, Si E J, Ma X L, Li B C, Shang X W, Wang H J, Meng Y X. Drought resistance identification and drought resistance indices screening of 100 barley germplasm resources at reproductive stage. Journal of Triticeae Crops, 2022, 42(4): 441-450
- [13] 张京. 大麦种质资源描述规范和数据标准. 北京: 中国农业出版社, 2006: 17-24
- Zhang J. Description specification and data standard of barley germplasm resources. Beijing: China Agriculture Press, 2006: 17-24
- [14] 周红. 野生大麦重要农艺性状的遗传解析及 ceRNA 调控网络挖掘. 雅安: 四川农业大学, 2020
- Zhou H. The genetic analysis for important agronomic traits from wild barley and construction of ceRNA regulatory networks. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2020
- [15] 裴玉贺, 轩慧冬, 宋希云. 不同玉米品种萌芽期抗旱筛选. 山东农业科学, 2017, 49(2): 30-35
- Pei Y H, Xuan H D, Song X Y. Drought resistance screening of different maize varieties at germination stage. Shandong Agricultural Science, 2017, 49(2): 30-35
- [16] 赵萌. 大豆芽期耐旱种质资源鉴定及耐旱基因挖掘. 长春: 吉林农业大学, 2023
- Zhao M. Identification of drought-tolerant germplasm resources and mining of drought-tolerant genes in soybean at germination stage. Changchun: Jilin Agricultural University, 2023
- [17] 师进霖, 陈恩波, 姜跃丽. PEG6000 渗透胁迫对甜瓜幼苗叶片渗透调节物质及膜脂过氧化的影响. 西北农业学报, 2010, 19(1): 182-185
- Shi J L, Chen E B, Jiang Y L. Effects of osmotic stress with PEG6000 on osmotic regulator and lipid peroxidation in muskmelon seedling leaves. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2010, 19(1): 182-185
- [18] Wach D, Piotr S. An overview of plant responses to the drought stress at morphological, physiological and biochemical levels. Polish Journal of Agronomy, 2022, 50: 25-34
- [19] Yang X Y, Lu M Q, Wang Y F, Wang Y R, Liu Z J, Chen S. Response mechanism of plants to drought stress. Horticulturae, 2021, 7(3): 50
- [20] 李龙, 毛新国, 王景一, 吕小平, 柳玉平, 景蕊莲. 小麦种质资源抗旱性鉴定评价. 作物学报, 2018, 44(7): 988-999
- Li L, Mao X G, Wang J Y, Chang X P, Liu Y P, Jing R L. Drought tolerance evaluation of wheat germplasm resources. Acta Agronomica Sinica, 2018, 44(7): 988-999
- [21] Li J, Yao X H, Yao Y H, An L K, Feng Z Y, Wu K L. Genome-wide association map of hulless barley phenotypes in drought environment. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 924892



HR & R: 极强抗旱性和强抗旱; M: 中度抗旱; HS & S: 极弱抗旱和弱抗旱; SS : 苗期; RS: 成株期

HR & R: HR: Highly resistant and Resistant; M: Medium resistance; HS: Highly sensitive and Sensitive; SS: seedling stage; RS:

Reproductive stage

附图 1 青稞种质资源苗期和成株期抗旱等级比较

Fig. S1 Comparative analysis of drought-resistance grade of Qingke germplasm resources at seedling and reproductive stage of lines

附表 1 246 份青稞编号及种质名称

Table S1 246 Qingke number and germplasm names

品种编号 Variety number	种质名称 Name of germplasms	品种编号 Variety number	种质名称 Name of germplasms	品种编号 Variety number	种质名称 Name of germplasms	品种编号 Variety number	种质名称 Name of germplasms
C1	白 91-97-3	C63	湘 84-26-174	C125	藏青 148 号	C187	青永 161
C2	GY027	C64	苏农 401	C126	藏青 311 号	C188	秃露仁
C3	藏 902960 ZDM9851	C65	东元 87-14	C127	藏青 320 号	C189	海青 1 号
C4	阿 127 ZDM9650	C66	苏农 0006	C128	IG120542	C190	宣平短方头
C5	青 6278	C67	藏 852270	C129	紫青稞	C191	云和青稞麦
C6	大粒 98-71415	C68	矮秆青稞	C130	青永 5310	C192	顺大麦
C7	北青 9 号	C69	杈棵青稞	C131	WDM00420	C193	米大麦
C8	昆仑 12 号	C70	达章紫 ZDM7558	C132	青永 3455	C194	ZDM0618 巩乃
C9	昆仑 16 号	C71	北青 3 号	C133	青永 0240	C195	宣思米麦-1
C10	昆仑 17 号	C72	福 9	C134	二棱青稞	C196	ZDM09670 甘孜 88137-1
C11	柴青 1 号	C73	康青 2 号	C135	青永 1421	C197	藏 84066
C12	2018-238	C74	康青 4 号	C136	青永 4080	C198	冬青 3 号
C13	湘 1052-4	C75	康青 6 号	C137	青永 5365	C199	冬青 5 号
C14	湘 0888	C76	康青 8 号	C138	企 2997	C200	冬青 6 号
C15	湘 1146	C77	北青 4 号	C139	藏 831234	C201	ZDM1078 长芒米麦
C16	浙 86-166 二棱皮	C78	北青 5 号	C140	ZYM1900	C202	ZYM02203
C17	甘青 2 号	C79	巴青 1 号	C141	长芒紫青稞	C203	ZYM03220
C18	黄青 1 号	C80	巴青 2 号	C142	ZYM2048	C204	WDM00202
C19	二道眉白青稞(称多)	C81	甘青 4 号	C143	红青稞	C205	ZDM6006 白金紫
C20	紫康青(囊谦)	C82	甘青 5 号	C144	ZDM9850	C206	Z1580014

C21	贵德杂青稞	C83	黄青 2 号	C145	ZDM06763	C207	ZDM6277 羊孙嘎布
C22	特鄂	C84	西藏黑青稞	C146	紫壳扎尼玛	C208	ZDM4436 紫青稞-2
C23	嘉玉桥	C85	黑青稞	C147	蓝青稞	C209	ZDM9734 藏 815007
C24	硕般多	C86	康青 9 号	C148	擦旺青稞	C210	ZDM4256 蓝青稞
C25	墨竹青稞	C87	西宁红胶泥	C149	ZDM19775	C211	ZDM4343 黑颖青稞
C26	白玉青稞	C88	长芒蓝青稞(玉树)	C150	ZYM1961	C212	ZDM5894 白青稞
C27	碌曲紫青稞	C89	二长四短芒白青稞(玉树)	C151	ZDM07395 藏 2972	C213	ZDM6115 对芒白青稞
C28	宕昌青稞(蓝)	C90	长芒红青稞(称多)	C152	ZDM06262 藏 1839	C214	ZDM6746 俄莫洋测
C29	东都红胶泥-1	C91	湟源白浪散	C153	ZDM9846 藏 3152	C215	ZDM6763 洛扎红青稞
C30	化隆紫四棱	C92	大通红六棱	C154	藏青 772	C216	ZDM6826 家不香
C31	化隆红青稞	C93	红青稞(班玛)	C155	米如白	C217	ZDM6904 绿青稞
C32	兴青稞	C94	黑老鸦	C156	藏 514054	C218	ZDM6968 紫青稞
C33	达坝青稞	C95	山南地区青稞	C157	西藏-76	C219	ZDM7021 紫青稞
C34	喜拉 22	C96	拉萨市青稞	C158	循化山地黑青稞	C220	ZDM7051 紫钩芒青稞
C35	喜拉 19	C97	曲水青稞	C159	矮秆齐	C221	ZDM7179 短芒紫青稞
C36	20130006	C98	囊嘎子宗	C160	西藏-46	C222	ZDM7180 短芒紫青稞
C37	2018-300	C99	热萨青稞	C161	西藏-42	C223	ZDM7255 蓝青稞
C38	藏青 320	C100	汤麦青稞	C162	12YN-1291192	C224	ZDM7267 蓝青稞
C39	2012-03 青 24	C101	佳庆则早熟青稞	C163	昆仑 14 号	C225	ZDM7393 嘎夏
C40	藏青 2000	C102	查不来	C164	昆仑 15 号	C226	ZDM7437 擦旺青稞
C41	藏青 25	C103	旱地紫青稞	C165	14 海晏	C227	ZDM7438 藏嘎达仁
C42	藏青 3179	C104	丹巴黑青稞	C166	喜马拉雅 14	C228	ZDM7524 尼日欧豆

C43	藏青 690	C105	乌麦	C167	高原早 1 号	C229	ZDM7575 米如白
C44	2013-0016	C106	甘孜黑六棱	C168	ZDM9671 甘孜 88140-5-6	C230	ZDM8351 藏日 69023
C45	甘孜 88140-5-6 ZDM9671	C107	岷县青稞	C169	ZDM9660 阿 7019	C231	ZDM8357 藏日 83020
C46	藏 815007 ZDM9851	C108	瓦蓝青稞	C170	ZDM9495 通鉴 63	C232	ZDM5772 藏 1373
C47	阿 7019 ZDM9660	C109	互助黑青稞	C171	ZDM9650 阿 127	C233	ZDM8764 玳瑁大麦
C48	通鉴 63 ZDM9495	C110	大通黑青稞	C172	ZDM8694 宣恩米麦-1	C234	ZDM8772 孔龙紫青稞
C49	藏 900410 ZDM9843	C111	化隆红胶泥四棱	C173	青 6277	C235	ZDM5630 扎尼嘎不
C50	阿 127 ZDM9650	C112	循化黑青稞	C174	青 4772	C236	ZDM6006 白金紫
C51	昆仑 13 号	C113	循化红青稞	C175	青 6284	C237	ZDM9647 阿 014-1
C52	昆仑 8 号	C114	贵德黑青稞	C176	青 6265	C238	ZDM9733 藏 814054
C53	2018-217	C115	海南紫青稞	C177	ZDM9334 1965D	C239	ZDM9735 藏 815004
C54	南繁 3 号	C116	德令哈青稞	C178	青 6556	C240	ZDM9762 藏 830649
C55	福 8-4	C117	雪堆青稞	C179	18-171	C241	ZDM9755 藏 830457
C56	足捉春青稞(甘孜)	C118	昌都青稞	C180	XZW011	C242	ZDM9777 藏 831247
C57	丹巴黑青稞(甘孜)	C119	光头大麦	C181	旱地紫	C243	ZDM9782 藏 831597
C58	小金新宅黑(甘孜)	C120	藏青 22 号	C182	北青 9 号/紫青 1 号	C244	ZDM9785 藏 830600
C59	长芒红四棱(甘孜)	C121	藏青 25 号	C183	兰福 8-41/冬青 8 号	C245	ZDM9788 藏 830015
C60	迭部紫青稞(甘南)	C122	藏青 28 号	C184	IG107018	C246	ZDM9802 藏 830714
C61	无叶耳紫青稞	C123	藏青 78 号	C185	ZDM9801 藏 84066		
C62	康青 3 号	C124	藏青 80 号	C186	ZYM1847		

附表 2 246 份青稞种质资源苗期抗旱性归类

Table S2 Classification of drought resistance of 246 Qingke germplasm resources at seedling stage

抗旱类型	数量	编号
Types	Number	Code
极强抗旱 HR	4	C33、C102、C117、C193
强抗旱 R	17	C32、C34、C40、C52、C61、C125、C141、C147、C148、C179、C199、C204、C212、C214、C217、C218、C243
中度抗旱 M	137	C1、2、C3、C4、C5、C6、C7、C8、C9、C10、C11、C14、C15、C17、C18、C20、C21、C22、C23、C24、C25、C26、C27、C28、C30、C31、C35、C38、C39、C41、C42、C43、C44、C45、C46、C47、C49、C51、C54、C55、C56、C57、C58、C59、C60、C63、C64、C65、C66、C67、C68、C69、C70、C72、C73、C74、C75、C76、C77、C78、C79、C81、C82、C83、C84、C85、C88、C89、C91、C92、C93、C94、C97、C98、C99、C103、C104、C106、C107、C109、C112、C114、C115、C116、C118、C119、C121、C122、C123、C124、C126、C131、C134、C137、C139、C140、C142、C143、C144、C145、C155、C156、C163、C164、C165、C166、C167、C168、C169、C170、C174、C176、C177、C178、C183、C184、C188、C189、C190、C191、C192、C194、C200、C205、C206、C208、C209、C210、C215、C216、C219、C220、C234、C237、C240、C241
弱抗旱 S	79	C12、C13、C16、C19、C29、C36、C37、C48、C53、C62、C71、C80、C86、C87、C90、C95、C96、C100、C101、C105、C108、C110、C111、C113、C120、C127、C128、C129、C132、C133、C135、C136、C138、C146、C149、C150、C151、C152、C153、C154、C157、C158、C159、C160、C161、C162、C171、C173、C175、C180、C181、C182、C185、C186、C187、C197、C198、C201、C202、C203、C207、C211、C213、C221、C222、C223、C227、C228、C229、C230、C231、C235、C236、C238、C239、C242、C244、C245、C246
极弱抗旱 HS	9	C130、C172、C195、C196、C224、C225、C226、C232、C233

附表 3 246 份青稞种质资源成株期抗旱性评价的隶属函数值、D 值、预测值 PV 及排名

Table S3 246 Qingke germplasm resources's subordinate function value, D-value, predict value and ranking based of drought-resistance evaluation at reproductive stage

品种编号 Variety number	综合指标值 CIV		隶属函数值 MF		D 值	预测值	排序
	CI ₁	CI ₂	U(X ₁)	U(X ₂)	D-value	PV	Rank
C192	2.13	2.15	0.94	1.00	0.96	0.96	1
C22	2.21	1.75	1.00	0.55	0.84	0.84	2
C170	2.09	1.86	0.91	0.67	0.83	0.83	3
C230	1.97	1.78	0.83	0.58	0.74	0.74	4
C194	1.86	1.82	0.75	0.62	0.70	0.70	5
C231	1.76	1.87	0.68	0.69	0.68	0.68	6
C33	2.05	1.54	0.89	0.30	0.68	0.68	7
C243	1.73	1.88	0.66	0.69	0.67	0.67	8
C153	1.99	1.59	0.84	0.36	0.67	0.67	9
C12	1.94	1.60	0.81	0.37	0.65	0.66	10
C129	1.82	1.74	0.72	0.54	0.65	0.66	11
C49	1.96	1.58	0.82	0.34	0.65	0.65	12
C229	1.82	1.72	0.72	0.51	0.64	0.64	13
C87	2.00	1.52	0.85	0.28	0.64	0.64	14
C152	1.79	1.74	0.70	0.53	0.64	0.64	15
C17	1.96	1.52	0.82	0.28	0.63	0.63	16
C27	1.87	1.59	0.76	0.36	0.62	0.62	17
C18	1.83	1.61	0.73	0.38	0.61	0.61	18
C154	1.77	1.67	0.69	0.45	0.60	0.60	19
C146	1.65	1.80	0.60	0.60	0.60	0.60	20
C35	1.69	1.74	0.63	0.53	0.60	0.60	21
C148	1.75	1.67	0.67	0.45	0.59	0.59	22
C188	1.75	1.67	0.67	0.45	0.59	0.59	23
C224	1.71	1.70	0.64	0.48	0.59	0.59	24
C246	1.79	1.58	0.70	0.35	0.58	0.58	25
C43	1.77	1.61	0.68	0.38	0.58	0.58	26
C123	1.74	1.62	0.66	0.40	0.57	0.57	27
C21	1.77	1.59	0.68	0.36	0.57	0.57	28
C86	1.75	1.60	0.67	0.37	0.57	0.57	29

C162	1.70	1.66	0.64	0.44	0.57	0.57	30
C82	1.79	1.55	0.70	0.31	0.56	0.56	31
C168	1.62	1.73	0.58	0.52	0.56	0.56	32
C221	1.60	1.75	0.57	0.54	0.56	0.56	33
C84	1.79	1.54	0.70	0.30	0.56	0.56	34
C85	1.81	1.52	0.71	0.28	0.56	0.56	35
C235	1.74	1.58	0.67	0.35	0.56	0.56	36
C144	1.69	1.63	0.63	0.41	0.55	0.55	37
C1	1.77	1.54	0.69	0.30	0.55	0.55	38
C19	1.87	1.43	0.76	0.17	0.55	0.55	39
C183	1.91	1.37	0.79	0.11	0.55	0.54	40
C32	1.84	1.44	0.74	0.19	0.54	0.54	41
C225	1.61	1.69	0.57	0.48	0.54	0.54	42
C91	1.75	1.53	0.67	0.28	0.54	0.54	43
C20	1.68	1.60	0.62	0.37	0.53	0.53	44
C199	1.24	2.09	0.31	0.94	0.53	0.53	45
C213	1.57	1.71	0.54	0.49	0.52	0.52	46
C191	1.69	1.56	0.63	0.33	0.52	0.52	47
C216	1.63	1.62	0.59	0.39	0.52	0.52	48
C220	1.60	1.65	0.56	0.43	0.52	0.52	49
C157	1.65	1.58	0.60	0.35	0.51	0.51	50
C40	1.74	1.48	0.66	0.24	0.51	0.51	51
C37	1.66	1.56	0.61	0.33	0.51	0.51	52
C244	1.55	1.69	0.53	0.48	0.51	0.51	53
C125	1.60	1.64	0.56	0.41	0.51	0.51	54
C34	1.85	1.36	0.74	0.09	0.51	0.51	55
C104	1.83	1.37	0.73	0.11	0.51	0.51	56
C25	1.66	1.55	0.61	0.32	0.51	0.51	57
C222	1.46	1.77	0.47	0.57	0.50	0.50	58
C234	1.76	1.44	0.68	0.19	0.51	0.50	59
C45	1.66	1.55	0.61	0.31	0.50	0.50	60
C52	1.61	1.60	0.57	0.37	0.50	0.50	61
C245	1.57	1.63	0.54	0.41	0.50	0.50	62
C198	1.42	1.81	0.43	0.61	0.50	0.50	63

C31	1.70	1.48	0.64	0.23	0.49	0.49	64
C42	1.62	1.56	0.58	0.32	0.49	0.49	65
C88	1.57	1.62	0.54	0.39	0.49	0.49	66
C29	1.76	1.41	0.68	0.15	0.49	0.48	67
C241	1.69	1.47	0.63	0.22	0.49	0.48	68
C147	1.65	1.51	0.60	0.27	0.48	0.48	69
C28	1.69	1.46	0.63	0.21	0.48	0.48	70
C66	1.60	1.56	0.56	0.33	0.48	0.48	71
C11	1.65	1.50	0.60	0.26	0.48	0.48	72
C94	1.47	1.69	0.47	0.48	0.48	0.48	73
C177	1.33	1.86	0.37	0.67	0.48	0.48	74
C71	1.62	1.52	0.58	0.28	0.47	0.47	75
C185	1.68	1.46	0.62	0.20	0.47	0.47	76
C99	1.64	1.50	0.59	0.25	0.47	0.47	77
C134	1.39	1.77	0.42	0.56	0.47	0.47	78
C226	1.56	1.58	0.53	0.34	0.47	0.47	79
C175	1.36	1.79	0.39	0.59	0.46	0.46	80
C58	1.60	1.52	0.56	0.28	0.46	0.46	81
C8	1.53	1.58	0.52	0.35	0.46	0.46	82
C16	1.67	1.42	0.62	0.17	0.46	0.46	83
C124	1.50	1.62	0.49	0.39	0.45	0.46	84
C240	1.43	1.69	0.44	0.47	0.45	0.46	85
C55	1.76	1.33	0.68	0.06	0.46	0.45	86
C215	1.40	1.72	0.42	0.51	0.45	0.45	87
C219	1.42	1.68	0.44	0.47	0.45	0.45	88
C126	1.53	1.56	0.51	0.32	0.45	0.45	89
C80	1.51	1.57	0.50	0.34	0.44	0.45	90
C24	1.62	1.44	0.58	0.18	0.44	0.44	91
C26	1.41	1.68	0.43	0.46	0.44	0.44	92
C197	1.41	1.68	0.43	0.46	0.44	0.44	93
C121	1.36	1.73	0.40	0.52	0.44	0.44	94
C193	1.49	1.58	0.49	0.35	0.44	0.44	95
C23	1.53	1.54	0.52	0.30	0.44	0.44	96
C189	1.38	1.71	0.41	0.50	0.44	0.44	97

C67	1.52	1.54	0.51	0.30	0.44	0.44	98
C47	1.52	1.55	0.50	0.31	0.44	0.44	99
C46	1.58	1.47	0.55	0.22	0.43	0.43	100
C77	1.44	1.63	0.45	0.40	0.43	0.43	101
C155	1.38	1.69	0.41	0.47	0.43	0.43	102
C169	1.40	1.67	0.42	0.45	0.43	0.43	103
C212	1.48	1.58	0.48	0.34	0.43	0.43	104
C160	1.46	1.60	0.46	0.37	0.43	0.43	105
C143	1.42	1.64	0.44	0.42	0.43	0.43	106
C181	1.37	1.70	0.40	0.49	0.43	0.43	107
C7	1.47	1.58	0.47	0.34	0.42	0.43	108
C36	1.44	1.61	0.45	0.38	0.42	0.42	109
C90	1.56	1.47	0.54	0.22	0.42	0.42	110
C206	1.46	1.58	0.47	0.34	0.42	0.42	111
C239	1.42	1.62	0.44	0.40	0.42	0.42	112
C3	1.60	1.42	0.56	0.16	0.42	0.42	113
C159	1.47	1.56	0.47	0.32	0.42	0.42	114
C208	1.25	1.81	0.32	0.61	0.42	0.42	115
C233	1.52	1.51	0.50	0.27	0.42	0.42	116
C232	1.42	1.61	0.44	0.39	0.42	0.42	117
C141	1.48	1.55	0.48	0.31	0.42	0.42	118
C70	1.54	1.48	0.52	0.23	0.42	0.42	119
C15	1.51	1.50	0.50	0.26	0.42	0.42	120
C210	1.43	1.60	0.44	0.37	0.42	0.42	121
C89	1.43	1.60	0.44	0.37	0.42	0.42	122
C207	1.50	1.52	0.49	0.28	0.42	0.42	123
C137	1.45	1.56	0.46	0.32	0.41	0.41	124
C158	1.54	1.45	0.52	0.20	0.41	0.41	125
C97	1.54	1.45	0.52	0.20	0.41	0.41	126
C217	1.42	1.58	0.44	0.35	0.41	0.41	127
C128	1.44	1.56	0.45	0.33	0.40	0.41	128
C107	1.43	1.56	0.44	0.33	0.40	0.40	129
C196	1.41	1.58	0.43	0.34	0.40	0.40	130
C145	1.46	1.52	0.47	0.27	0.40	0.40	131

C48	1.54	1.43	0.52	0.17	0.40	0.40	132
C176	1.63	1.32	0.59	0.05	0.40	0.40	133
C61	1.50	1.46	0.49	0.21	0.39	0.39	134
C30	1.35	1.62	0.39	0.39	0.39	0.39	135
C75	1.39	1.57	0.42	0.34	0.39	0.39	136
C163	1.50	1.45	0.49	0.20	0.39	0.39	137
C156	1.57	1.37	0.54	0.11	0.39	0.39	138
C5	1.08	1.93	0.20	0.75	0.39	0.39	139
C102	1.28	1.68	0.34	0.46	0.38	0.38	140
C98	1.45	1.49	0.46	0.24	0.38	0.38	141
C227	1.37	1.58	0.40	0.35	0.38	0.38	142
C133	1.47	1.46	0.47	0.21	0.38	0.38	143
C105	1.42	1.51	0.44	0.27	0.38	0.38	144
C44	1.49	1.43	0.49	0.17	0.37	0.38	145
C72	1.42	1.51	0.44	0.26	0.37	0.38	146
C211	1.46	1.46	0.46	0.21	0.37	0.37	147
C95	1.38	1.55	0.41	0.31	0.37	0.37	148
C237	1.32	1.61	0.37	0.38	0.37	0.37	149
C184	1.44	1.46	0.45	0.21	0.37	0.37	150
C214	1.29	1.63	0.34	0.41	0.37	0.37	151
C127	1.32	1.59	0.37	0.36	0.36	0.36	152
C51	1.45	1.45	0.46	0.19	0.36	0.36	153
C57	1.49	1.39	0.49	0.13	0.36	0.36	154
C41	1.40	1.50	0.42	0.25	0.36	0.36	155
C171	1.30	1.61	0.35	0.38	0.36	0.36	156
C54	1.44	1.45	0.45	0.20	0.36	0.36	157
C236	1.30	1.60	0.35	0.37	0.36	0.36	158
C238	1.49	1.38	0.49	0.12	0.36	0.36	159
C83	1.35	1.54	0.39	0.30	0.35	0.36	160
C161	1.36	1.52	0.39	0.28	0.35	0.35	161
C242	1.19	1.71	0.27	0.50	0.35	0.35	162
C111	1.21	1.68	0.29	0.46	0.35	0.35	163
C92	1.33	1.54	0.37	0.30	0.35	0.35	164
C117	1.16	1.74	0.25	0.53	0.35	0.35	165

C2	1.38	1.49	0.41	0.24	0.35	0.35	166
C172	1.30	1.57	0.35	0.34	0.35	0.35	167
C103	1.23	1.64	0.30	0.41	0.34	0.34	168
C56	1.39	1.45	0.42	0.20	0.34	0.34	169
C164	1.29	1.57	0.34	0.34	0.34	0.34	170
C122	1.22	1.65	0.30	0.42	0.34	0.34	171
C180	1.15	1.73	0.25	0.52	0.34	0.34	172
C149	1.33	1.52	0.37	0.28	0.34	0.34	173
C142	1.24	1.62	0.31	0.39	0.34	0.34	174
C119	1.09	1.78	0.20	0.58	0.34	0.33	175
C218	1.44	1.37	0.45	0.10	0.33	0.33	176
C187	1.27	1.55	0.33	0.31	0.33	0.33	177
C76	1.22	1.61	0.30	0.38	0.33	0.33	178
C74	1.31	1.51	0.36	0.26	0.32	0.32	179
C223	1.31	1.50	0.36	0.26	0.32	0.32	180
C68	1.14	1.70	0.24	0.48	0.32	0.32	181
C14	1.38	1.42	0.41	0.16	0.32	0.32	182
C93	1.21	1.60	0.29	0.38	0.32	0.32	183
C139	1.38	1.40	0.41	0.14	0.32	0.32	184
C100	1.33	1.46	0.37	0.21	0.32	0.32	185
C13	1.37	1.41	0.40	0.15	0.32	0.32	186
C81	1.31	1.48	0.36	0.23	0.31	0.32	187
C201	1.21	1.59	0.29	0.36	0.31	0.31	188
C120	1.27	1.52	0.33	0.28	0.31	0.31	189
C173	1.15	1.66	0.24	0.44	0.31	0.31	190
C62	1.31	1.47	0.36	0.22	0.31	0.31	191
C132	1.30	1.48	0.35	0.23	0.31	0.31	192
C65	1.18	1.61	0.27	0.38	0.31	0.31	193
C118	1.16	1.62	0.25	0.39	0.30	0.30	194
C205	1.30	1.45	0.35	0.20	0.30	0.30	195
C79	1.44	1.29	0.45	0.02	0.30	0.30	196
C209	1.32	1.42	0.37	0.16	0.30	0.30	197
C101	1.45	1.28	0.46	0.00	0.29	0.29	198
C78	1.24	1.50	0.31	0.26	0.29	0.29	199

C69	1.36	1.36	0.39	0.10	0.29	0.29	200
C138	1.23	1.50	0.30	0.26	0.28	0.29	201
C6	1.28	1.45	0.33	0.19	0.28	0.28	202
C4	1.10	1.65	0.21	0.43	0.29	0.28	203
C167	1.10	1.64	0.21	0.41	0.28	0.28	204
C9	1.41	1.28	0.43	0.01	0.28	0.28	205
C38	1.16	1.57	0.25	0.34	0.28	0.28	206
C179	1.18	1.53	0.27	0.30	0.28	0.28	207
C109	1.21	1.49	0.29	0.25	0.27	0.28	208
C115	1.11	1.60	0.22	0.37	0.27	0.27	209
C200	1.19	1.50	0.27	0.26	0.27	0.27	210
C130	1.30	1.37	0.35	0.10	0.26	0.26	211
C53	1.27	1.40	0.33	0.14	0.26	0.26	212
C228	1.08	1.61	0.19	0.38	0.26	0.26	213
C63	1.24	1.42	0.31	0.16	0.26	0.26	214
C140	1.17	1.49	0.26	0.24	0.25	0.25	215
C166	1.12	1.55	0.22	0.31	0.25	0.25	216
C136	1.18	1.44	0.27	0.19	0.24	0.24	217
C114	1.15	1.48	0.24	0.23	0.24	0.24	218
C116	1.16	1.45	0.25	0.20	0.23	0.24	219
C64	1.15	1.45	0.25	0.20	0.23	0.23	220
C131	1.17	1.43	0.26	0.17	0.23	0.23	221
C110	1.16	1.43	0.25	0.18	0.22	0.22	222
C150	1.08	1.52	0.19	0.28	0.22	0.22	223
C112	1.15	1.44	0.24	0.18	0.22	0.22	224
C174	1.00	1.61	0.14	0.38	0.23	0.22	225
C108	1.11	1.48	0.21	0.23	0.22	0.22	226
C182	1.12	1.45	0.23	0.20	0.22	0.22	227
C113	1.12	1.44	0.22	0.19	0.21	0.21	228
C165	1.09	1.47	0.20	0.22	0.21	0.21	229
C186	1.08	1.47	0.20	0.22	0.21	0.21	230
C106	1.10	1.45	0.21	0.20	0.21	0.21	231
C203	0.87	1.72	0.05	0.51	0.21	0.20	232
C204	0.97	1.59	0.12	0.36	0.20	0.20	233

C73	1.13	1.39	0.23	0.13	0.20	0.20	234
C96	1.03	1.50	0.16	0.26	0.19	0.20	235
C50	1.20	1.29	0.28	0.02	0.19	0.19	236
C178	1.06	1.45	0.18	0.20	0.18	0.18	237
C195	0.96	1.50	0.11	0.26	0.16	0.16	238
C59	1.10	1.34	0.21	0.07	0.16	0.16	239
C60	0.96	1.49	0.11	0.24	0.16	0.16	240
C10	1.04	1.38	0.16	0.12	0.15	0.15	241
C39	0.98	1.41	0.12	0.15	0.13	0.13	242
C135	1.07	1.28	0.19	0.00	0.12	0.12	243
C202	0.81	1.57	0.00	0.34	0.12	0.12	244
C151	0.87	1.43	0.05	0.18	0.09	0.10	245
C190	0.86	1.35	0.04	0.08	0.06	0.06	246

CIV: Comprehensive index value; MF: Membership function