



150 份青稞种质资源成株期耐旱性鉴定

李 洁^{1,2}

(1. 青海大学 农林科学院/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;

2. 四川农业大学 农学院, 成都 611130)

摘 要 为了解青藏高原地区青稞种质材料的耐旱性,有效利用青稞自身耐旱遗传潜力,为耐旱育种亲本选配提供参考,以 150 份青稞种质资源为研究材料,连续 2 a 检测在正常灌水和干旱胁迫 2 个水平处理下各青稞种质资源成熟期 7 个与产量相关的指标,利用耐旱性综合评价(D)、综合耐旱系数(CDC)和加权耐旱系数(WDC)相结合的方法进行耐旱指标筛选及资源的耐旱性鉴定。结果显示,利用主成分分析(PCA)可将 7 个与产量相关的指标简化为 4 个公因子,并携带原有 7 个指标 88.26% 的数据信息量,其中单株产量可作为比较直观的耐旱评价指标。综合这 3 种分析方法,筛选出 24、12、15、14、109、7 和 111 成株期耐旱性强的青稞种质资源。主穗穗数、单株粒质量、主穗长和单株粒数可以作为青稞成株期耐旱性简单且较为准确的评价指标。

关键词 青稞;种质资源;成株期;耐旱性;综合评价

中图分类号 S512.3

文献标志码 A

文章编号 1004-1389(2022)02-0164-11

青稞(*Hordeum vulgare* L. var. Hook. f.)属于禾本科大麦属^[1],在中国多种植于青藏高原地区,是该地区主要的粮食作物之一^[2]。具有生育期短、耐寒、耐旱、耐瘠薄的优点,是在海拔 2 800 m 以上地区可以正常成熟的饲料和粮食作物。目前青稞产业已成为青海省农牧业的主导产业及特色产业之一,在青海的播种面积逐渐扩大,近 10 a 在青海省的种植面积占当年粮食作物播种总面积的比重基本稳定在 20% 左右^[3],至 2019 年种植面积已经达到 63.85×10^3 hm²。因此,提高青稞的品质及产量,对发展相关省份,尤其是青海省的农业经济,扩大粮食生产具有重大意义。干旱是导致作物产量和品质降低的最主要原因之一,造成巨大的经济损失^[4-5]。在青海,青稞多种植于无灌溉设施的区域,完全依靠自然降水,而青海省常年干旱少雨,尤其春季在小麦、青稞等麦类作物出苗分蘖及夏季开花灌浆时降水稀少,降低最终穗数的形成、缩短籽粒灌浆时间最终影响产量。如何有效利用更多干旱的土地进行生产也是青稞育种遇到的机遇与挑战。因此,鉴定青稞种质资源的耐旱性,有效利用青稞因长期环境选择

而培育的自身耐旱遗传潜力,为青稞耐旱遗传育种研究及品种选育具有重要意义。

目前对大麦^[6]、小麦^[7-9]、玉米^[10]、高粱^[11]、棉花^[12]等作物的抗旱性评价方法研究较多,徐银萍等^[6]利用抗旱度量值、综合抗旱系数、加权抗旱系数等分析方法对 30 份大麦种质资源进行成株期抗旱评价,确定抗旱度量值为最适宜的抗旱鉴定指标,并筛选出 5 个成株期抗旱性强的资源。鞠乐等^[13]利用隶属函数法对 101 份大麦资源进行萌发期抗旱性鉴定,筛选出 2 个抗旱性极强的材料以及 2 个抗旱性极弱的材料。张毅等^[14]利用 PEG-6000 模拟干旱胁迫,对 3 个青稞品种的发芽率、苗(牙)长、根(胚)鲜质量、发芽指数等萌发特性及抗旱性进行评价。李洁等^[15]同样利用 PEG-6000 模拟干旱胁迫,对 280 份青稞种质资源的 13 个性状进行分析,通过主成分分析,结合耐旱系数以及聚类分析相结合的方法,对青稞苗期耐旱性进行综合评价,筛选出 9 份强耐旱种质资源。在青海地区青稞成株期的耐旱评价研究鲜见报道,为使现有的耐旱资源为后期生产和特定目的育种所用,本研究以 150 份青稞种质资源为

收稿日期:2021-03-12 **修回日期:**2021-05-28

基金项目:青海省农林科学院创新基金(2018-NKY-12);国家大麦产业技术体系(CARS-05);国家自然科学基金(32060480, 32060423, 31960427);青海省科技厅应用基础研究项目(2019-ZJ-7075)。

作者简介:李 洁,女,助理研究员,研究方向为青稞作物育种与栽培。E-mail:lij_28257@163.com

研究对象,综合运用目前常用于耐旱性评价的方法,耐旱性综合评价、综合耐旱系数和加权耐旱系数相结合对青稞成株期的主穗长、单株粒数、单株粒质量、千粒质量、主穗穗数、株高、有效穗数 7 个与产量相关的指标进行综合评价,以期为青稞种质耐旱资源的评价和筛选以及耐旱机理研究提供基础材料。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试青稞种质资源为青海大学农林科学院青稞育种课题组培育和收集的 150 份骨干种质(表 1)。

表 1 测试种质详情

Table 1 Details of tested germplasm

编号 ID	品种名 Variety	来源 Source	编号 ID	品种名 Variety	来源 Source	编号 ID	品种名 Variety	来源 Source
5	青 6278 Qing 6278	青海 Qinghai	91	巴青 2 号 Baqing 2	青海 Qinghai	181	ZDM06262	西藏 Tibet
6	大粒 98-71415 Dali 98-71415	青海 Qinghai	92	甘青 3 号 Ganqing 3	甘肃 Gansu	182	ZDM9846	西藏 Tibet
7	北青 9 号 Beiqing 9	青海 Qinghai	93	甘青 4 号 Ganqing 4	甘肃 Gansu	183	藏青 772 Zangqing 772	西藏 Tibet
8	昆仑 12 号 Kunlun 12	青海 Qinghai	94	甘青 5 号 Ganqing 5	甘肃 Gansu	184	米如白 Mirubai	西藏 Tibet
9	昆仑 16 号 Kunlun 16	青海 Qinghai	95	黄青 2 号 Huangqing 2	甘肃 Gansu	185	藏 514054 Zang 514054	西藏 Tibet
10	昆仑 17 号 Kunlun 17	青海 Qinghai	96	西藏黑青稞 Xizangheiqingke	西藏 Tibet	187	西藏-76 Xizang-76	西藏 Tibet
11	柴青 1 号 Chaiqing 1	青海 Qinghai	97	黑青稞 Heiqingke	青海 Qinghai	188	山地黑青稞 Shandiheiqingke	青海 Qinghai
12	肚里黄 Dulihuang	甘肃 Gansu	98	康青 9 号 Kangqing 9	四川 Sichuan	189	矮秆齐 Aaiganqi	丹麦 Denmark
13	湘 1052-4 Xiang 1052-4	湖南 Hunan	99	西宁红胶泥 Xining Hongjiaoni	青海 Qinghai	190	白 91-97-3 Bai 91-97-3	不详 Unknown
14	湘 0888 Xiang 0888	湖南 Hunan	100	长芒蓝青稞 Changmanglanqingke	青海 Qinghai	192	西藏-46 Xizang-46	西藏 Tibet
15	湘 1146 Xiang 1146	湖南 Hunan	102	长芒红青稞 Changmanghongqingke	青海 Qinghai	196	涅如姆扎 Nierumuzha	不详 Unknown
17	甘青 2 号 Ganqing 2	甘肃 Gansu	105	红青稞 Hongqingke	青海 Qinghai	198	昆仑 14 号 Kunlun 14	青海 Qinghai
19	二道眉白青稞 Erdaomeibaiqingke	青海 Qinghai	106	黑老鸦 Heilaoya	青海 Qinghai	199	昆仑 15 号 Kunlun 15	青海 Qinghai
23	嘉玉桥 Jiayubiao	西藏 Tibet	109	乾宁 Qian	四川 Sichuan	201	14 海晏 14Haiyan	青海 Qinghai
24	硕般多 Shuobanduo	西藏 Tibet	111	边坝青稞 Bianbaqingke	西藏 Tibet	205	藏 902960 Zang 902960	西藏 Tibet
25	墨竹青稞 Mozhuqingke	西藏 Tibet	114	热萨青稞 Resaqingke	西藏 Tibet	206	ZDM9660	四川 Sichuan
26	白玉青稞 Baiyu qingke	四川 Sichuan	115	汤麦青稞 Tangmaiqingke	四川 Sichuan	207	ZDM9495	青海 Qinghai
27	碌曲紫青稞 Luquzqingke	甘肃 Gansu	116	佳庆则早熟青稞 Jiaqingzezaoshuqingke	不详 Unknown	208	ZDM9650	四川 Sichuan
28	宕昌青稞 Dangchang qingke	甘肃 Gansu	118	旱地紫青稞 Handiziqingke	四川 Sichuan	213	青 6284 Qing 6284	青海 Qinghai
30	化隆紫四棱 Hualongzisi leng	青海 Qinghai	120	乌麦 Wumai	江苏 Jiangsu	214	青 6265 Qing 6265	青海 Qinghai
31	化隆红青稞 Hualonghongqingke	青海 Qinghai	121	甘孜黑六棱 Ganziheiliuleng	四川 Sichuan	216	青 6556 Qing 6556	青海 Qinghai
32	门源黑老鸦 Menyuanheilaoya	青海 Qinghai	122	岷县青稞 Mingxianqingke	甘肃 Gansu	218	迭部紫青稞 Diebuziqingke	甘肃 Gansu
35	喜拉 22 Xila 22	西藏 Tibet	126	大通黑青稞 Datongheiqingke	青海 Qinghai	231	海青 1 号 Haiqing 1	浙江 Zhejiang
39	ZDM7267	西藏 Tibet	127	红胶泥四棱 Hongjiaonisileng	青海 Qinghai	242	宣恩米麦-1 Xuanenmimai-1	湖北 Hubei

(续表 1 Continued table 1)

编号 ID	品种名 Variety	来源 Source	编号 ID	品种名 Variety	来源 Source	编号 ID	品种名 Variety	来源 Source
40	藏青 320 Zangqing 320	西藏 Tibet	128	化隆黑长芒 Hualongheichangmang	青海 Qinghai	247	冬青 6 号 Dongqing 6	西藏 Tibet
48	藏 815007 Zangqing 815007	西藏 Tibet	130	循化红青稞 Xunhuahongqingke	青海 Qinghai	249	ZYM02203	西藏 Tibet
49	阿 7019 A7019	四川 Sichuan	131	贵德黑青稞 Guideheiqingke	青海 Qinghai	251	ZYM03220	西藏 Tibet
52	阿 127 A 127	四川 Sichuan	132	海南紫青稞 Hainanziqingke	青海 Qinghai	253	ZDM6006	不详 Unknown
53	昆仑 13 号 Kunlun 13	青海 Qinghai	133	德令哈青稞 Delinghaqingke	青海 Qinghai	254	Z1580014	西藏 Tibet
55	藏青 2000 Zangqing 2000	西藏 Tibet	134	绒青稞 Rongqingke	青海 Qinghai	256	ZDM4436	不详 Unknown
58	足捉春青稞 Zuzhuochunqingke	四川 Sichuan	135	雪堆青稞 Xuduiqingke	西藏 Tibet	258	ZDM4256	不详 Unknown
59	小金沙龙狗尾 Xiaojingshaolonggouwei	四川 Sichuan	136	昌都青稞 Changduqingke	西藏 Tibet	259	ZDM4343	丹麦 Denmark
60	丹巴黑青稞 Danbaheiqingke	四川 Sichuan	138	藏青 22 号 Zangqing 22	西藏 Tibet	265	ZDM6826	西藏 Tibet
61	东升黑青稞 Dongshengheiqingke	四川 Sichuan	142	藏青 80 号 Zangqing 80	西藏 Tibet	267	ZDM6968	西藏 Tibet
68	湘 84-26-174 Xiang 84-26-174	湖南 Hunan	143	藏青 148 号 Zangqing 148	西藏 Tibet	274	ZDM7395	西藏 Tibet
71	苏农 0035 Sunong 0035	江苏 Jiangsu	148	青永 5310 Qingyong 5310	西藏 Tibet	275	ZDM7403	西藏 Tibet
72	苏农 0006 Sunong 0006	江苏 Jiangsu	149	WDM00420	西藏 Tibet	276	ZDM7393	西藏 Tibet
75	杈棵青稞 Chakeqingke	青海 Qinghai	150	康青 97-9 Kangqing 97-9	四川 Sichuan	281	ZDM8351	西藏 Tibet
76	达章紫 Dazhangzi	西藏 Tibet	152	青永 3455 Qingyong 3455	西藏 Tibet	282	ZDM8357	西藏 Tibet
77	北青 3 号 Beiqing 3	青海 Qinghai	153	青永 0240 Qingyong 0240	西藏 Tibet	283	ZDM5772	西藏 Tibet
78	福 9 Fu 9	青海 Qinghai	157	青永 1421 Qingyong 1421	西藏 Tibet	284	ZDM8764	四川 Sichuan
79	康青 2 号 Kangqing 2	四川 Sichuan	159	青永 4080 Qingyong 4080	西藏 Tibet	285	ZDM8772	四川 Sichuan
80	康青 3 号 Kangqing 3	四川 Sichuan	160	青永 5365 Qingyong 5365	西藏 Tibet	286	ZDM5630	西藏 Tibet
81	康青 4 号 Kangqing 4	四川 Sichuan	166	长芒紫青稞 Changmangziquingke	不详 Unknown	288	ZDM9647	四川 Sichuan
82	康青 6 号 Kangqing 6	四川 Sichuan	172	紫壳扎尼玛 Zikezhanima	西藏 Tibet	289	ZDM9671	四川 Sichuan
85	北青 5 号 Beiqing 5	青海 Qinghai	173	蓝青稞 Lanqingke	不详 Unknown	290	ZDM9733	西藏 Tibet
86	北青 6 号 Beiqing 6	青海 Qinghai	174	ZYM018838	不详 Unknown	291	ZDM9735	西藏 Tibet
88	北青 8 号 Beiqing 8	青海 Qinghai	177	ZDM05656	西藏 Tibet	292	ZDM9762	西藏 Tibet
89	青 6277 Qing 6277	青海 Qinghai	178	ZDM19775	西藏 Tibet	293	ZDM9755	西藏 Tibet
90	巴青 1 号 Baqing 1	青海 Qinghai	180	ZDM07395	西藏 Tibet	298	ZDM9788	西藏 Tibet

1.2 试验方法

2019 年和 2020 年在青海大学农林科学院实验地进行田间试验。该区海拔 2 320 m, 年均气温 5.7 ℃, 年降水量 361.5 mm, 为干旱、半干旱区。生长季 209 d 以上, 0 ℃ 以上积温

2 722.9 ℃。土质为栗钙土, pH 8.12, 含有机质 20.28 g · kg⁻¹、全氮 1.17 g · kg⁻¹、全磷 2.18 g · kg⁻¹、全钾 22.5 g · kg⁻¹、速效氮 69 mg · kg⁻¹、速效磷 65 mg · kg⁻¹、速效 229 mg · kg⁻¹。

分别于 2019-04-05 与 2020-03-31 以手锄开沟撒播,播种量 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。采取单因素随机区组设计,设置两种水分处理:正常处理(CK)和干旱胁迫处理(T),重复 3 次,行距 20 cm,种植 10 行,区组间隔 60 cm,试验地四周播种 10 行保护行。播前施含氮 46% 的尿素 $30 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、磷酸二铵 $112.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,作为基肥播种前一次性施入。播种时选择大小色泽一致、饱满、种皮完好的种子,干旱胁迫处理(T)材料种植在试验地旱棚中,胁迫处理水分控制指标结合青稞耐旱特性并参考汪灿等^[16]试验方法,分别于播种前和拔节期灌水至田间持水量的 55.0% 左右,其他时期不再灌水。对照正常大田生产管理,于播种前、拔节期、孕穗期和灌浆期进行灌水,灌水至田间持水量的 55.0%,其他时期依靠自然降水。

1.3 测定项目与方法

在成株期成熟前 3 d,从每小区随机拔取 9 株,测量主穗长和株高,调查主穗穗数、有效穗数,人工脱粒后统计单株粒数、待自然干燥后测定单株粒质量、千粒质量等指标。

1.4 数据处理与分析

以 2019 年和 2020 年数据的平均值为基础数

据,用 EXCEL 2010、SPSS 23.0 等统计分析软件对 150 份青稞种质资源的耐旱相关性状进行表型分析、主成分分析、相关性分析以及聚类分析,参照周广生等^[17]、袁闯等^[11]和徐银萍等^[6]利用的评价方法,对青稞种质资源的耐旱性进行综合评价。计算综合耐旱系数(CDC)、耐旱性综合评价(D),D 值为参考序列进行灰色关联度分析,得到两者之间关联度(γ_D),并计算各指标权重 $[\omega_{i(\gamma)}]$ 以及加权耐旱系数(WDC)。

2 结果与分析

2.1 两种处理下青稞种质资源成株期农艺性状

由表 2 可以看出,两种水分处理下,胁迫处理的各指标最大值、最小值以及平均值均低于正常水分处理,且差异均达到显著水平。各处理变异系数为 0.124~0.437,说明受试青稞种质资源各个性状的多态性较高、差异明显,具有代表性。在胁迫处理下,单株粒数的变异系数最大,单株粒质量的相关系数最小,说明水分对单株粒质量和单株粒数的影响最大。从两种处理的相关系数看,各指标对胁迫处理的反应不一致,直接使用单项指标鉴定青稞的耐旱性具有较大的局限性^[8,14]。

表 2 两种处理下供试青稞种质资源测定各指标基础分析

Table 2 Basic analysis of each index of tested hulless barley germplasm resources under two treatments

性状 Trait	处理 Treatment	最小值 Min	最大值 Max	平均值 Ave	变异系数 CV	标准误 SE	t 值 t-value	P 值 P-value	相关系数 r
主穗长/cm Main spike length	T	3.80	8.91	6.08	0.153	0.068	17.872	0.000 1**	0.681
	CK	4.69	11.03	7.30	0.153				
单株粒数 Grain number per plant	T	15.00	124.39	41.91	0.437	6.035	36.270	0.000 1**	0.394
	CK	80.39	508.00	260.82	0.304				
单株粒质量/g Grain mass per plant	T	0.44	3.53	1.44	0.423	0.315	36.633	0.000 1**	0.321
	CK	4.14	25.31	13.00	0.309				
千粒质量/g Thousand grain mass	T	22.41	45.42	33.92	0.150	0.572	27.588	0.000 1**	0.345
	CK	34.27	72.95	49.72	0.139				
主穗穗数 Spikelet number of main spike	T	9.10	23.78	15.65	0.175	0.248	26.422	0.000 1**	0.389
	CK	15.11	34.50	22.20	0.124				
株高/cm Plant height	T	36.20	76.97	58.05	0.136	1.122	49.943	0.000 1**	0.402
	CK	71.36	146.31	114.12	0.130				
有效穗数 Effective spike number per plant	T	1.00	4.06	1.81	0.344	0.168	29.799	0.000 1**	0.369
	CK	3.17	15.72	6.83	0.323				

注:T,干旱胁迫处理;CK,正常供水处理。**表示在 $P<0.01$ 水平差异显著。

Note: T, Drought treatments; CK, Normal water supply treatments. **, significant correlation at $P<0.01$.

2.2 青稞种质资源各农艺性状耐旱系数

由表 3 可知,与正常水分处理相比,干旱胁迫

处理下各指标均有所变化,各项指标耐旱系数小于 1.0,同一种质不同指标耐旱系数变化明显。

由表 3 可见, $DC>0.4$ 的主穗长、单株粒数、单株粒质量、千粒质量、主穗穗数、株高、有效穗数的分布频率分别为 100%、0%、0%、98.67%、100%、98.00%、12.07%, 各指标耐旱性敏感程度顺序为主穗穗数<主穗长<株高<单株粒质量<千粒质量<单株粒数<有效穗数。

表 3 供试青稞种质资源各指标耐旱系数分布

Table 3 Distribution of drought tolerance coefficient of tested hulless barley germplasm resources

性状 Trait	$0\leq DC<0.2$		$0.2\leq DC<0.4$		$0.4\leq DC<0.6$		$0.6\leq DC<0.8$		$0.8\leq DC<1.0$	
	次数 Times	频率/% Frequency	次数 Times	频率/% Frequency	次数 Times	频率/% Frequency	次数 Times	频率/% Frequency	次数 Times	频率/% Frequency
主穗长 Main spike length	0	0.00	0	0.00	2	1.33	40	26.67	108	72.00
单株粒数 Grain number per plant	105	70.00	45	30.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00
单株粒质量 Grain mass per plant	140	92.74	11	7.26	0	0.00	0	0.00	0	0.00
千粒质量 Thousand grain mass	105	70.00	43	16.67	2	1.33	0	0.00	0	0.00
主穗穗数 Spikelet number of main spike	0	0.00	0	0.00	24	15.84	90	59.94	36	23.98
株高 Plant height	0	0.00	3	2.00	121	80.66	26	17.33	0	0.00
有效穗数 Effective spike number per plant	25	16.65	108	71.28	15	10.74	2	1.33	0	0.00

表 4 结果显示, 各性状间存在着较为复杂的相关性, 其中主穗长与单株粒数、单株粒质量、主穗穗数、有效穗数呈极显著相关; 单株粒数与千粒质量外的其余指标均呈极显著相关; 单株粒质量与所有指标呈极显著相关; 千粒质量与单株粒质

量和株高呈极显著相关, 与有效穗数呈负相关; 主穗穗数与千粒质量外的指标均呈极显著相关; 进一步说明, 各指标中所携带信息存在重叠, 直接使用会影响青稞种质资源耐旱性评价的准确性。

表 4 供试青稞种质资源各指标耐旱系数的相关性

Table 4 Correlation coefficients among drought resistance coefficients of indexes

指标 Index	主穗长 Main spike length	单株粒数 Grain number per plant	单株粒质量 Grain mass per plant	千粒质量 Thousand grain mass	主穗穗数 Spikelet number of main Spike	株高 Plant height	有效穗数 Effective spike number per plant
主穗长 Main spike length	1.000						
单株粒数 Grain number per plant	0.377**	1.000					
单株粒质量 Grain mass per plant	0.378**	0.920**	1.000				
千粒质量 Thousand grain mass	0.048	0.038	0.370**	1.000			
主穗穗数 Spikelet number of main spike	0.555**	0.455**	0.442**	0.193	1.000		
株高 Plant height	0.137	0.451**	0.447**	0.209*	0.353**	1.000	
有效穗数 Effective spike number per plant	0.281**	0.589**	0.544**	-0.110	0.258**	0.177	1.000

注: * 和 ** 分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平显著相关, 下同。
Note: * and ** are significant correlation at $P<0.05$ and $P<0.01$, respectively, the same below.

2.3 青稞种质资源各农艺性状耐旱系数的主成分分析

为综合评价青稞种质资源成株期的耐旱性, 对所测形态指标进行主成分分析(表 5)。前 4 个综合指标贡献率分别为 46.46%、17.13%、14.22%、10.45%, 累积贡献率达 88.26%。这样

就将所选的 7 个指标简化为 4 个新的综合指标,可替代之前指标的大部分信息。通过分析 4 个主成分,第 1 主成分在单株粒数和单株粒质量的因子载荷系数较大;第 2 主成分在千粒质量和株高的因子载荷系数较大;第 3 主成分在主穗长、主

穗穗数的因子载荷系数较大,第 4 主成分在千粒质量的载荷系数最大。综上说明,这些指标均可归为生物产量,这类指标与青稞种质资源成株期的耐旱性有着直接联系,因此,可将这类指标作为鉴定青稞种质资源成株期耐旱性的参考指标。

表 5 青稞种质资源各指标主成分特征向量和贡献率
Table 5 Feature vectors and contribution rates of principal components

性状 Trait	因子载荷 Factor loading			
	CI ₁	CI ₂	CI ₃	CI ₄
主穗长 Main spike length	0.592	−0.130	0.687	0.074
单株粒数 Grain number per plant	0.893	−0.192	−0.249	0.017
单株粒质量 Grain mass per plant	0.910	0.082	−0.255	0.217
千粒质量 Thousand grain mass	0.258	0.856	−0.048	0.412
主穗穗数 Spikelet number of main spike	0.686	0.136	0.521	−0.178
株高 Plant height	0.577	0.336	−0.261	−0.656
有效穗数 Effective spike number per plant	0.638	−0.524	−0.230	0.216
特征根 Characteristic root	3.252	1.199	0.995	0.731
贡献率/% Contribution rate	46.464	17.134	14.215	10.445
累计贡献率/% Cumulative contribution rate	46.464	63.598	77.813	88.258
因子权重 Factor weight	0.526 4	0.194 1	0.161 1	0.118 3

2.4 不同评价方式对供试青稞种质资源的综合耐旱性评价

由于供试资源较多,选取极端材料进行说明,由表 6 可知,CDC 为 0.326~0.641,以该值对 150 个青稞种质资源的耐旱性强弱进行排序,排名靠前的 24、109、15 为耐旱性强的材料,274、128、127 为耐旱性弱的材料;D 值为 0.046~0.528,其中 24、12、15 为耐旱性强的材料,274、128、218 为耐旱性弱的材料;WDC 为 0.326~0.647,24、109、15 为对干旱相对不敏感的材料,274、128、218 为对干旱较为敏感的材料。利用 CDC 值、D 值和 WDC 值对供试资源耐旱性的评价结果中,耐旱性强的和耐旱性弱的材料各取前 10 份进行对比,分别有 7 份和 10 份材料是重合的,但排名略有差异,其评价结果基本吻合。

2.5 各指标灰色关联度分析

表 7 结果显示,青稞种质资源各性状 CDC 值与 D 值的关联度从大到小依次为主穗穗数、单株粒质量、主穗长、单株粒数、千粒质量、株高、有效穗数;各性状 CDC 值与 WDC 值的关联度从大到小依次为主穗穗数、单株粒质量、单株粒数、主穗长、株高、有效穗数、千粒质量,这与各性状 CDC 值与 D 值之前的关联度略有差异,但对 D 值与 CDC 值和 WDC 值的关联度进行分析发现,

关联度均在 0.95 以上(表 8),说明他们有密切相关性,根据袁闯等^[11]对甜高粱、徐银萍等^[6]对大麦、汪灿等^[16]对薏苡的分析,最终选择 D 值为最佳评价方法,以其他两种值为辅助评价指标进行评价是可行的。

2.6 聚类分析及青稞种质资源的耐旱性划分

根据计算得到的 D 值,将 150 份青稞种质资源利用系统聚类平均联结法进行聚类分析,在欧式距离为 10 时,可将其分为 4 大类(图 1),第Ⅰ类包含 62 个青稞种质品种(系),该组分 D 值为 0.142~0.299,此类青稞资源耐旱性较差;第Ⅱ类包含 76 个青稞种质品种(系),该组分 D 值为 0.308~0.464,此类品种(系)具有一定的耐旱性;第Ⅲ类包含 5 个青稞种质品种(系),该组分 D 值为 0.487~0.528,此类青稞种质资源(品种)耐旱性最佳;第Ⅳ类包含 7 个青稞种质品种(系),该组分 D 值为 0.046~0.120,此类品种(系)的耐旱性最弱,对干旱最敏感。各耐旱等级材料数目分别占总数的 41.33%、50.67%、3.33%和 4.67%。

以参试材料各表型性状及 D 值,构建线性回归方程用于干旱种质的筛选与鉴定^[18],构建方程为 $Y = -0.527 + 0.350X_1 + 0.160X_2 + 0.240X_3 + 0.271X_4 + 0.344X_5 + 0.065X_6 + 0.060X_7$,其中 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_5 、 X_6 、 X_7 分别代表主穗长、

表 6 利用 CDC 值、D 值、WDC 值评价耐旱性强和耐旱性弱的前十种资源列表

Table 6 List of top 10 resources with strong drought tolerance and weak drought tolerance evaluated by CDC value, D value and WDC value

排序 Ranking	编号 Code	CDC 值 CDC value	编号 Code	D 值 D value	编号 Code	WDC 值 WDC value
1	24	0.641	24	0.528	24	0.647
2	109	0.612	12	0.513	109	0.624
3	15	0.603	15	0.508	15	0.615
4	14	0.596	14	0.495	14	0.605
5	23	0.590	109	0.488	23	0.590
6	12	0.589	13	0.465	12	0.607
7	111	0.588	7	0.451	111	0.607
8	7	0.579	53	0.450	7	0.597
9	13	0.577	111	0.448	13	0.586
10	53	0.573	48	0.437	53	0.584
141	218	0.384	138	0.149	138	0.389
142	138	0.378	196	0.143	196	0.389
143	196	0.376	127	0.142	127	0.384
144	258	0.373	135	0.120	267	0.379
145	150	0.373	150	0.120	258	0.378
146	135	0.371	258	0.117	135	0.375
147	267	0.369	267	0.110	150	0.373
148	127	0.365	218	0.090	218	0.371
149	128	0.341	128	0.075	128	0.341
150	274	0.326	274	0.046	274	0.326

表 7 青稞种质资源各性状 CDC 值与 D 值和 WDC 值的相关性与权重系数

Table 7 Correlation degree and weight coefficient of CDC value, D value and WDC value of each trait of hulless barley germplasm

性状 Trait	D 值 D value			WDC 值 WDC value		
	相关性 Correlation	权重 Weight	排序 Rank	相关性 Correlation	权重 Weight	排序 Rank
主穗长 Main spike length	0.735 **	0.172	3	0.694 **	0.154	4
单株粒数 Grain numbler per plant	0.639 **	0.150	4	0.753 **	0.167	3
单株粒质量 Grain mass per plant	0.743 **	0.174	2	0.813 **	0.181	2
千粒质量 Thousand grain mass	0.479 **	0.112	5	0.375 **	0.083	7
主穗穗数 Spikelet number of main spike	0.837 **	0.196	1	0.818 **	0.182	1
株高 Plant height	0.445 **	0.104	6	0.530 **	0.118	5
有效穗数 Effective spike number per plant	0.390 **	0.091	7	0.519 **	0.115	6

单株粒数、单株粒质量、千粒质量、主穗穗数、株高、有效穗数, Y 表示 D 值。该回归方程的相关系数 $r=0.999$, 决定系数 $R^2=0.998$, 表明这 7 个自变量可决定总变异的 99.8%。表 8 显示, 7 个性状与 D 值的相关性研究结果表明, 7 个表型性状与 D 值均呈极显著相关, 该方程可用于耐旱青稞种质资源的综合评价。

3 讨论

干旱对青稞产量的影响目前已经是青藏高原地区该产业发展面临的主要障碍之一, 因此如何有效利用其自身的耐旱遗传潜力, 选育出更适应干旱环境的品种或将成为突破该障碍的有效手段。作物的耐旱是一个较为复杂的过程, 会引起

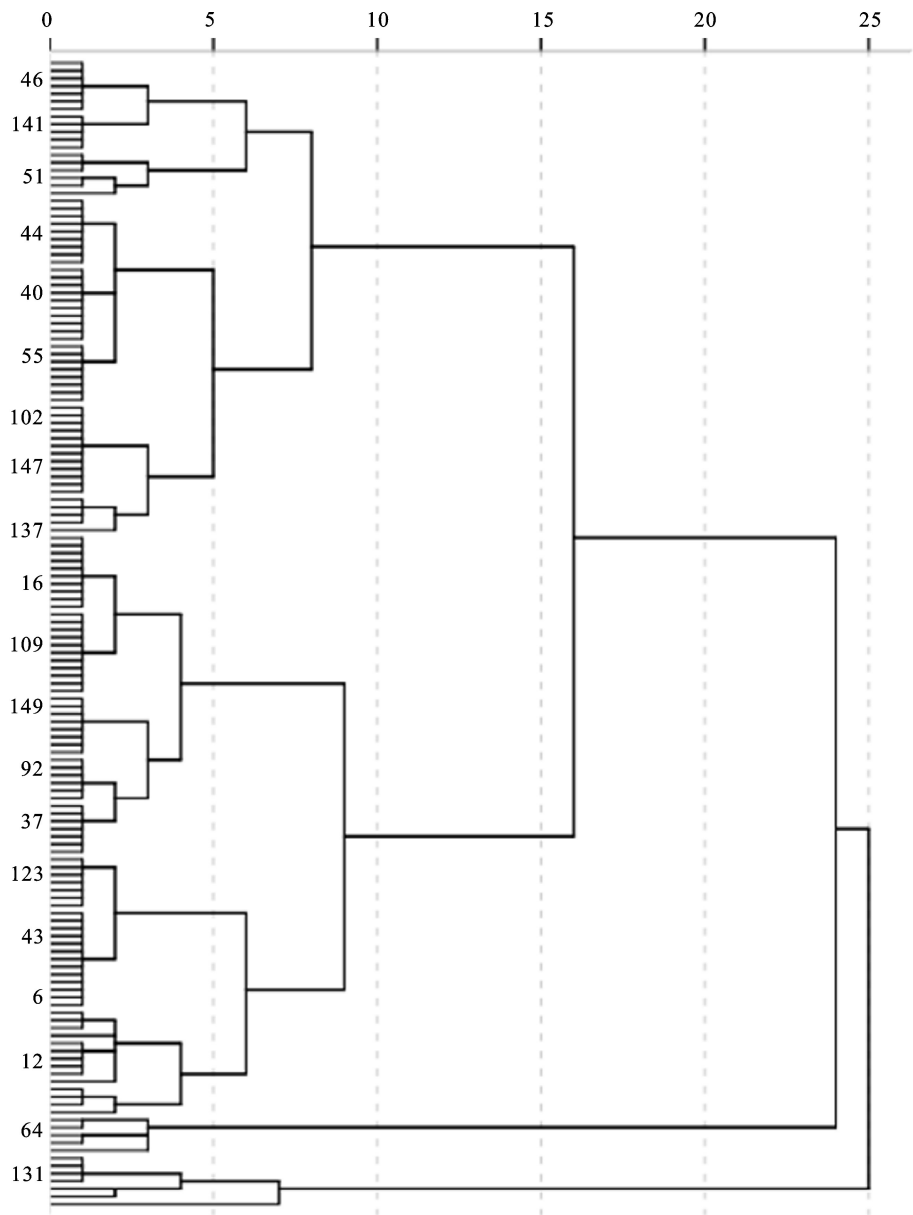


图 1 青稞种质 D 值聚类分析图

Fig. 1 Cluster analysis of D value of hulless barley germplasm

表 8 D 值、CDC 值和 WDC 值的关联度

Table 8 Correlation degree between D value and CDC value, and WDC value

值 Value	相关系数 Correlation		
	D 值 D value	CDC 值 CDC value	WDC 值 WDC value
D 值 D value	1		
CDC 值 CDC value	0.958**	1	
WDC 值 WDC value	0.979**	0.991**	1

多种生理生化反应,最终导致多种与产量相关的指标发生变化,因此单一指标的评价方式并不能合理、有效地对其耐旱性进行评价,选择多指标以及多种评价方式相结合成为众多科技工作者的

选择。

本研究综合隶属函数、主成分分析、灰色关联度分析等分析手段计算出各种质的 D 值、CDC 值和 WDC 值,对 150 份青稞种质资源的耐旱性进行鉴定,在每种鉴定方法排名前十的高耐旱型种质中,有 7 份种质是重复的,分别为 24、12、15、14、109、7、111,这 7 份材料可作为重要的耐旱资源,在后期的耐旱品种的选育与耐旱机理研究中加以利用。相关性分析表明 D 值与 CDC 值和 WDC 值之间均呈极显著正相关($P<0.01$),这与徐银萍等^[6]和袁闯等^[11]的研究结果一致。

目前,鉴定麦类作物的耐旱性指标分为形态

指标、生理指标以及产量指标,但研究表明产量指标相对最为重要,也是众多研究选用的主要指标^[6-7,19-20],如陈卫国等^[7]对干旱处理下小麦的株高、穗长、每穗小穗数、主穗粒数、单株产量和千粒质量等进行研究,发现这几个指标与综合评价值呈极显著正相关关系,徐银萍等^[6]对大麦种质资源成株期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选,从 8 个指标中筛选出株高、穗长、分蘖数、单株粒数和单株粒质量 5 个指标可有效鉴定大麦资源的抗旱性。由于青稞成株期耐旱性鉴定评价及指标筛选鲜有报道,根据之前对麦类作物的研究结果,本研究选取青稞成株期的主穗长、单株粒数、单株粒质量、千粒质量、主穗穗数、株高、有效穗数 7 个与产量相关的指标,结合主成分分析,将 7 个单项指标转换成 4 个新的综合指标,这些指标可归为单株产量,根据各指标与 *D* 值的相关性可确定为主穗穗数、单株粒质量、主穗长和单株粒数,这 4 个指标与青稞成株期耐旱性有直接联系,筛选出的指标与徐银萍等^[6]对大麦耐旱性鉴定指标筛选的 5 个指标中单株粒质量、主穗长、单株粒数等 3 个指标重叠,说明本试验结果的准确性较高。另一个指标不相同的原因可能是 2 个试验所考察的指标不全相同。因此筛选出的 4 个指标可作为鉴定青稞成株期耐旱性的参考指标,这与陈卫国等^[7]研究结果相似。

4 结 论

利用耐旱性综合评价、综合耐旱系数和加权耐旱系数综合对 150 份青稞种质资源进行耐旱性评价,共鉴定出 7 份高度耐旱青稞种质资源,分别为 24、12、15、14、109、7、111,从 7 个单向指标中筛选出主穗穗数、单株粒质量、主穗长和单株粒数 4 个指标,可以作为青稞成株期耐旱性简单且较为准确的评价指标。

参考文献 Reference:

- [1] 郭本兆. 青海经济植物志[M]. 西宁:青海人民出版社,1987:70.
- GUO B ZH. Economic Flora of Qinghai[M]. Xining:Qinghai People's Publishing House,1987:70.
- [2] 夏腾飞,王 蕾,徐金青,等. 267 份青藏高原青稞种质材料的表型多样性分析[J]. 西北农业学报,2018,27(2):182-193.
- XIA T F, WANG L, XU J Q, et al. The genotypic diversity analysis of 267 Six-rowed hulless barley accession from the

- Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Acta Agriculture Boreali-occidentalis Sinica*, 2018, 27(2):182-193.
- [3] 贾娟琪,李先德. 青海省青稞产业发展现状、问题和政策建议[J]. 中国食物营养,2016,22(11):21-24.
- JIA J Q, LI X D. Situation, problems and policy recommendations of highland barley industry in Qinghai province[J]. *Food and Nutrition in China*, 2016, 22(11):21-24.
- [4] 唐益苗,赵昌平,高世庆. 植物抗旱相关基因研究进展[J]. 麦类作物学报,2009,29(1):166-173.
- TANG Y M, ZHAO CH P, GAO SH Q. Advances in genes related to plant drought tolerance[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2009, 29(1):166-173.
- [5] 降云峰,赵晋峰,马宏斌,等. 作物干旱研究进展[J]. 中国农学通报,2013,29(3):1-5.
- JIANG Y F, ZHAO J F, MA H B, et al. The research progress of crop to erought[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(3):1-5.
- [6] 徐银萍,潘永东,刘强德,等. 大麦种质资源成株期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选[J]. 作物学报,2020,46(3):448-461.
- XU Y P, PAN Y D, LIU Q D, et al. Drought resistance identification and drought resistance indexes screening of barley resources at mature period [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2020, 46(3):448-461.
- [7] 陈卫国,张 政,史雨刚,等. 211 份小麦种质资源抗旱性的评价[J]. 作物杂志,2020(3):53-63.
- CHEN W G, ZHANG ZH, SHI Y G, et al. Drought-tolerance evaluation of 211 wheat germplasm resources [J]. *Crops*, 2020(3):53-63.
- [8] 白志英,李存东,孙红春,等. 小麦代换系抗旱生理指标的主成分分析及综合评价[J]. 中国农业科学,2008,41(12):4264-4272.
- BAI ZH Y, LI C D, SUN H CH, et al. Principal component analysis and comprehensive evaluation on physiological indices of erought resistance in wheat substitution[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(12):4264-4272.
- [9] 陈 伟. 中国地方小麦抗旱相关性状关联分析[D]. 四川雅安:四川农业大学,2016.
- CHEN W. Association analysis of drought resistance related traits in Chinese wheat landraces [D]. Ya'an Sichuan: Sichuan Agricultural University, 2016.
- [10] 杨 杰,雷志刚,梁晓玲,等. 新疆玉米新自交系耐旱性鉴定与评价[J]. 西北农业学报,2011,20(12):66-71.
- YANG J, LEI ZH G, LIANG X L, et al. Evaluation for drought tolerance of new maize inbred lines in Xinjiang [J]. *Acta Agriculture Boreali-occidentalis Sinica*, 2011, 20(12):66-71.
- [11] 袁 阔,许 兴,毛桂莲,等. 甜高粱成熟期抗旱性指标筛选与评价方法[J]. 干旱地区农业研究,2020,38(1):280-289.
- YUAN CH, XU X, MAO G L, et al. Screening and evaluation methods of drought resistance index of sweet sorghum at maturity[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*,

- 2020,38(1):280-289.
- [12] 陈玉梁,石有太,罗俊杰,等. 甘肃彩色棉花抗旱性农艺性状指标的筛选鉴定[J]. 作物学报,2012,38(9):1680-1687.
- CHEN Y L,SHI Y T,LUO J J, *et al.* Screening of drought tolerant agronomic trait indices of colored cotton varieties (lines) in Gansu province[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2012,38(9):1680-1687.
- [13] 鞠 乐,齐军仓,贺 雪,等. 大麦种子萌发期抗旱性鉴定指标的筛选及抗旱性评价[J]. 新疆农业科学,2016,53(11):2008-2014.
- JU L,QI J C,HE X. *et al.* Screening drought resistance identification index and drought resistance evaluation in barley during seed germination period [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2016,53(11):2008-2014.
- [14] 张 毅,韩玉娥,张银乐,等. PEG-6000 模拟干旱胁迫下 3 个青稞品种的萌发特性及耐旱性评价[J]. 江苏农业科学,2019,47(15):139-142.
- ZHANG Y,HAN Y E,ZHANG Y L, *et al.* Germination characteristics and drought resistance evaluation of three highland barley cultivars under PEG-6000 simulated drought stress[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019,47(15):139-142.
- [15] 李 洁,姚有华,邓智婷. 不同基因型青稞苗期耐旱综合评价[J]. 青海大学学报,2020,38(5):1-9.
- LI J,YAO Y H,DENG ZH T. Comprehensive evaluation of drought tolerance of different genotypes of highland barley at seedling stage[J]. *Journal of Qinghai University*, 2020,38(5):1-9.
- [16] 汪 灿,周棱波,张国兵,等. 薏苡种质资源成株期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选[J]. 作物学报,2017,43(9):1381-1394.
- WANG C,ZHOU L B,ZHANG G B, *et al.* Identification and indices screening of drought resistance at adult plant stage in Job's tears germplasm resources[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2017,43(9):1381-1394.
- [17] 周广生,梅方竹,周竹青,等. 小麦不同品种耐湿性生理指标综合评价及其预测[J]. 中国农业科学,2003,36(11):1378-1382.
- ZHOU G SH,MEI F ZH,ZHOU ZH Q, *et al.* Comprehensive evaluation and forecast on physiological indices of waterlogging resistance of different wheat varieties [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003,36(11):1378-1382.
- [18] 白羿雄,郑雪晴,姚有华,等. 青稞种质资源表型性状的遗传多样性分析及综合评价[J]. 中国农业科学,2019,52(23):4201-4214.
- BAI Y X,ZHENG X Q,YAO Y H, *et al.* Genetic diversity analysis and comprehensive evaluation of phenotypic traits in hulless barley germplasm resources[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019,52(23):4201-4214.
- [19] DAVID C. NIELSEN. Black bean sensitivity to water stress at various growth stages[J]. *Crop Science*, 1998,38(2):422-427.
- [20] 景蕊莲. 作物抗旱研究的现状与思考[J]. 干旱地区农业研究,1999,17(2):79-85.
- JING R L. Present situation and approach of study on crop drought resistance[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 1999,17(2):79-85.

Identification of Drought Tolerance of 150 Hulless Barley Germplasm Resources at Adult Stage

LI Jie^{1,2}

(1. Qinghai University Academy of Agricultural and Forestry Sciences/ Qinghai Key Laboratory of Hulless Barley Genetics and Breeding/ Qinghai Sub-center of National Hulless Barley Improvement, Xining 810016, China;

2. College of Agronomy, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

Abstract In order to understand hulless barley's tolerance to drought, hulless barley's excellent genetic potential in drought-tolerant was effectively exploited to provide references for selecting drought-tolerant parents in hulless barley breeding. Taking 150 accessions of hulless barley germplasm resources as materials, we counted seven indexes related to yield, such as main panicle length, grain number per plant, grain mass per plant, thousand grain mass, spikelet number of the main spike, plant height and effective panicle at the mature stage under normal irrigation and drought stress. The drought tolerance index was screened, and the drought tolerance of the resources was identified by combining drought tolerance evaluation (D), drought tolerance coefficient (CDC), and weighted drought tolerance coefficient (WDC). The results showed that the 7 indexes could be simplified into 4 common factors by using principal component analysis (PCA), which accounted for 88.26% of the original 7 indexes. Among them, the yield per plant could be used as a more intuitive evaluation index of drought tolerance. 24, 12, 15, 14, 109, 7 and 111 were identified as strong drought tolerance germplasm at the adult plant. The results showed that the spikelet number of the main spike, grain mass per plant, main spike length, and grain number per plant can be used as simple and accurate evaluation indexes for drought tolerance of hulless barley at the adult plant stage.

Key words Hulless barley; Hulless barley germplasm resources; Mature period; Drought resistance; Comprehensive evaluation

Received 2021-03-12

Returned 2021-05-28

Foundation item Innovation Fund of Qinghai Provincial Academy of Agriculture and Forestry (No. 2018-NKY-12); the Agriculture Research System (No. CARS-05); the National Natural Science Foundation of China (No. 32060480, No. 32060423, No. 31960427); Qinghai Science and Technology Support Project (No. 2019-ZJ-7075).

About author LI Jie, female, assistant research fellow. Research area: breeding and cultivation of hulless barley. E-mail: lij_28257@163.com

(责任编辑: 顾玉兰 Responsible editor: GU Yulan)