

158 份裸大麦种质资源主要性状的多样性分析与综合评价

李 赢¹ 刘海翠¹ 石晓旭¹ 梁志浩² 徐 肖² 刘 建¹ 沈会权² 魏亚凤¹

(¹江苏沿江地区农业科学研究所/南通市循环农业重点实验室, 226001, 江苏南通;

²江苏沿海地区农业科学研究所, 224002, 江苏盐城)

摘 要 为高效利用裸大麦种质资源, 对 158 份不同来源裸大麦种质的 15 个性状进行变异系数分析、Shannon-Wiener 遗传多样性指数分析、相关性分析、主成分分析及聚类分析, 通过综合评价筛选优异种质。结果表明, 15 个性状在不同裸大麦资源间存在丰富的变异, 变异系数在 7.84%~69.65%, 平均为 26.69%, 其中, 穗色的离散程度最高, 籽粒周长的变异系数最低; 多样性指数在 0.51~2.09, 平均值为 1.62, 其中, 籽粒宽度的多样性指数最高, 芒型的多样性指数最低。通过逐步回归建立回归方程, 千粒重、穗色、籽粒周长、 β -葡聚糖含量、棱型、籽粒面积和籽粒宽度可以作为筛选优异裸大麦种质的综合评价指标。主成分分析将 15 个单项指标转换为 6 个独立的综合指标, 累计贡献率达 82.111%。聚类分析将参试材料分为 5 类, 其中类群IV的 21 份材料平均 *D* 值最高, *D* 值前 5 位的品种依次为 Jet、Tet、22DJ2、藏青 3000 和 12-10-556, 可作为裸大麦育种的优良亲本。

关键词 裸大麦; 种质资源; 性状; 多样性; 综合评价

裸大麦 (*Hordeum vulgare* L. var. *nudum* Hook. f.) 属禾本科大麦属, 成熟后内外颖分离、籽粒裸露, 又称青稞、元麦和米大麦^[1]。裸大麦具有成熟期短、耐寒和抗逆性强等优点, 主要在环境条件相对恶劣、海拔较高的青藏高原地区种植, 在江苏地区主要用作水稻和玉米等的前茬作物^[2-5]。裸大麦籽粒富含膳食纤维、蛋白质、维生素、 β -葡聚糖和多种酚类物质, 有抗氧化、降低血脂和血糖效果, 可以预防高脂血症、糖尿病和动脉粥样硬化的发生^[6-8]。目前, 裸大麦因其丰富的功能性成分受到广泛关注, 市场潜力巨大, 培育高产优质的裸大麦品种对于推动裸大麦产业发展具有重要意义。

优异的种质资源是培育优良裸大麦品种的基础。对裸大麦资源进行综合评价有利于提高现有资源的利用效率。近年来, 许多学者^[9-12]围绕表型、籽粒外观和品质性状等方面对裸大麦资源进行综合评价, 将筛选出的一大批优异资源应用于专用型裸大麦品种的选育。牛小霞等^[9]对 40 份裸大麦种质资源的农艺和品质性状进行综合评价, 筛选出株高、穗长和第 2 茎节长等 7 个性状作为评价表型的主要指标。陈林等^[10]基于籽粒外观和品质性状对 117 份裸大麦品种进行评价, 发现千粒重、籽粒面

积、直链淀粉和支链淀粉的综合得分较高, 北青 6 号籽粒外观和品质综合表现最好。金彦龙等^[11]对 15 份裸大麦品种进行专用化鉴定与综合评价, 以株高、产量、抗倒伏性、粗蛋白含量、总可消化养分、相对饲用品质和每吨饲料产奶量 7 个农艺或品质性状为一级指标, 筛选出粮草双高型、籽粒高产型和青贮型青稞品种共 4 个。翟会生等^[12]测定了 72 份裸大麦资源的氨基酸组成, 筛选出 4 份氨基酸营养价值及风味氨基酸含量均较高的资源。此外, 裸大麦资源在抗旱性、抗倒伏和抗病性等方面也被广泛研究^[13-15], 然而, 涉及的裸大麦资源主要集中于青藏高原地区, 有关江苏地区裸大麦资源的主要性状鉴定和综合评价的研究较少。

江苏裸大麦种植历史悠久, 具有巨大的消费市场和发展前景, 然而现有江苏裸大麦品种的籽粒千粒重和 β -葡聚糖含量较西藏、青海和甘肃等地还存在较大差距, 难以满足市场需求^[16]。培育籽粒外观品质优异、 β -葡聚糖含量高的裸大麦新品种对于促进江苏地区裸大麦产业发展意义重大。本研究以 158 份国内外裸大麦资源为材料 (其中中国江苏材料 61 份), 基于植株性状、籽粒性状及 β -葡聚糖含量对其进行综合评价, 以期筛选出综合性状优良

作者简介: 李赢, 主要从事大麦种质资源筛选与遗传育种研究, E-mail: 1185077523@qq.com

魏亚凤为通信作者, 主要从事大麦种质资源筛选与遗传育种研究, E-mail: w-yafeng@163.com; 沈会权为共同通信作者, 主要从事大麦育种研究, E-mail: jsyeshq@163.com

基金项目: 江苏省农业科技自主创新资金项目[CX (24) 3089]; 南通市科技项目 (MS2024049); 国家大麦青稞产业技术体系 (CARS-05); 江苏沿江农科所学科基金项目[YJXK (2023) 202]

收稿日期: 2025-05-26; 修回日期: 2025-06-27; 网络出版日期: 2025-10-16

裸大麦种质用于优质高产多抗裸大麦新品种的选育，助力江苏地区裸大麦产业的健康发展。

1 材料与方法

1.1 试验材料

以国内外 158 份裸大麦资源为参试材料（表 1），其中国内裸大麦资源 116 份，包含江苏 61 份、西藏 31 份、青海 12 份、四川 8 份、云南 2 份、浙江 1 份和北京 1 份；国外裸大麦种质 42 份，包含日本 10 份、丹麦 7 份、墨西哥 6 份、加拿大 5 份、黎巴嫩 5 份、美国 3 份，捷克斯洛伐克、德国、叙利亚和尼泊尔各 1 份，来源不明的国外种质 2 份。

表 1 158 份裸大麦资源名称及来源
Table 1 Names and origins of 158 naked barley resources

编号 Code	名称 Name	来源 Origin	编号 Code	名称 Name	来源 Origin	编号 Code	名称 Name	来源 Origin
1	戴帽元麦	中国江苏	46	江苏元麦 95 号	中国江苏	91	光芒黄大麦	中国云南
2	青元麦	中国江苏	47	江苏元麦 9 号	中国江苏	92	阿 212	中国四川
3	建湖三月黄	中国江苏	48	苏 511 元麦	中国江苏	93	藏 830928	中国西藏
4	四棱元麦	中国江苏	49	苏 71-75-12	中国江苏	94	藏 840714	中国西藏
5	紫元麦	中国江苏	50	早芒 8 号	中国江苏	95	Jet	丹麦
6	6 棱孔麦	中国江苏	51	昆仑 12	中国青海	96	H.tetrast.L.V.viol	捷克斯洛伐克
7	淮安狗尾选系	中国江苏	52	昆仑 13	中国青海	97	670	国外（未知）
8	藏青 3000	中国西藏	53	昆仑 14	中国青海	98	Tet	国外（未知）
9	洋辣子	中国江苏	54	昆仑 15	中国青海	99	83	加拿大
10	紫元麦	中国江苏	55	柴青 1 号	中国青海	100	Black Hulless	丹麦
11	南通铁麦	中国江苏	56	苏裸麦 2 号	中国江苏	101	Black Hull-less C.I.596	美国
12	江都四棱子	中国江苏	57	通 0914	中国江苏	102	Black Hull-less C.I.1027	美国
13	太县洋 6 棱	中国江苏	58	紫元麦	中国西藏	103	Brachiki	墨西哥
14	句容 6 棱元麦	中国江苏	59	肚里黄	中国青海	104	C1334	加拿大
15	武进元麦	中国江苏	60	5171	中国西藏	105	Gaffel byg nøgen	丹麦
16	键米大麦	中国江苏	61	甘青 4 号	中国青海	106	H.polyst.V.trif.C	丹麦
17	常熟 6 棱元麦	中国江苏	62	东陈元麦	中国江苏	107	H.riol.B.Sch	丹麦
18	立新 2 号	中国江苏	63	泰兴元麦	中国江苏	108	Lyallpur	丹麦
19	通麦 3 号	中国江苏	64	罗道庄大麦	中国北京	109	SIBIRI"S"	墨西哥
20	江苏元麦 110 号	中国江苏	65	临海裸大麦	中国浙江	110	SNJCO"S"	墨西哥
21	江苏元麦 117 号	中国江苏	66	尼泊尔青稞	尼泊尔	111	C 2734	加拿大
22	江苏元麦 123 号	中国江苏	67	皮当蓝	中国西藏	112	MANKER-OREGANO	墨西哥
23	江苏元麦 124 号	中国江苏	68	西嘎果那	中国西藏	113	OREGANO	墨西哥
24	江苏元麦 140 号	中国江苏	69	竹居青	中国西藏	114	Streng	叙利亚
25	江苏元麦 141 号	中国江苏	70	色堆短芒	中国西藏	115	Japanische 419	德国
26	江苏元麦 143 号	中国江苏	71	沙尔兰	中国西藏	116	Muanbori	日本
27	江苏元麦 145 号	中国江苏	72	沃马紫	中国西藏	117	Scout	加拿大
28	江苏元麦 146 号	中国江苏	73	沃马兰	中国西藏	118	四国裸 46 号	日本
29	江苏元麦 151 号	中国江苏	74	油松	中国西藏	119	四国裸 87 号	日本
30	江苏元麦 156 号	中国江苏	75	定结牧紫	中国西藏	120	四国裸 88 号	日本
31	江苏元麦 157 号	中国江苏	76	孟德黄	中国西藏	121	御岛裸	日本
32	江苏元麦 160 号	中国江苏	77	雄马兰	中国西藏	122	III-526	日本
33	江苏元麦 162 号	中国江苏	78	二长四短芒白青稞	中国青海	123	III-558	日本
34	江苏元麦 164 号	中国江苏	79	藏青 2000	中国西藏	124	III-564	日本
35	江苏元麦 31 号	中国江苏	80	红胶泥	中国青海	125	III-570	日本
36	江苏元麦 44 号	中国江苏	81	钩芒紫青稞	中国青海	126	藏青 690	中国西藏
37	江苏元麦 48 号	中国江苏	82	黑青稞	中国青海	127	冬青 18	中国西藏
38	江苏元麦 50 号	中国江苏	83	蓝青稞	中国青海	128	2016-品比 36	中国西藏
39	江苏元麦 51 号	中国江苏	84	阿黑	中国四川	129	喜马拉雅 22	中国西藏
40	江苏元麦 53 号	中国江苏	85	色黑瑞朗	中国四川	130	藏青 25	中国西藏
41	江苏元麦 54 号	中国江苏	86	日大多	中国四川	131	喜马拉雅 19	中国西藏
42	江苏元麦 55 号	中国江苏	87	足木足大头 6 棱（绿）	中国四川	132	12-10-556	中国西藏
43	江苏元麦 62 号	中国江苏	88	小青稞（密）	中国四川	133	2016-品比 42	中国西藏
44	江苏元麦 65 号	中国江苏	89	莽窝青稞	中国四川	134	INBON-5	黎巴嫩
45	江苏元麦 78 号	中国江苏	90	长钩紫大麦	中国云南	135	藏青 17	中国西藏

续表1 Table 1 (continued)

编号 Code	名称 Name	来源 Origin	编号 Code	名称 Name	来源 Origin	编号 Code	名称 Name	来源 Origin
136	藏青 320	中国西藏	144	通麦 6 号	中国江苏	152	泽盖紫青稞	中国四川
137	INBON-12	黎巴嫩	145	苏裸麦 1 号	中国江苏	153	H.Viol B.8c H	丹麦
138	INBON-31	黎巴嫩	146	通麦 8 号	中国江苏	154	藏 85 品 3872	中国西藏
139	INBON-45	黎巴嫩	147	通 0612	中国江苏	155	Black Hull-less C.I.2320	美国
140	INBON-67	黎巴嫩	148	22DJ2	中国江苏	156	84	加拿大
141	紫钩元麦	中国西藏	149	通 1409	中国江苏	157	CMB-74A-1796-B-6B-1Y-1B-1Y	墨西哥
142	藏青 18	中国西藏	150	藏 830187	中国西藏	158	V-193	日本
143	盐食裸 2 号	中国江苏	151	苏 72-63	中国江苏			

1.2 试验设计

试验于 2023–2024 年在江苏沿海地区农业科学研究所南洋试验场（33°24′58″ N，120°12′15″ E）进行。每份种质种植 2 行，行长 1.50 m，行距 0.25 m，每行条播 100 粒。田间管理同大田常规生产。

1.3 测定项目与方法

田间调查裸大麦种质资源的芒型、棱型、穗色和株高。每份资源随机选取 10 穗，室内考察籽粒颜色、穗密度、穗长、千粒重和每穗实粒数。参照《大麦种质资源描述规范和数据标准》^[17]考察表型指标。

每份种质随机选取 200 粒，利用万深 SC-A 种子自动考种仪测定籽粒面积、籽粒周长、籽粒长度、籽粒宽度和长宽比，每份材料测定 2 个重复。参试资源中 Jet、Tet 和 22DJ2 的籽粒颜色为黑色，使用 Megazyme 公司生产的β-葡聚糖试剂盒（K-BGLU 02/17）测定β-葡聚糖含量，3 份样品均测定 3 个重复，其余资源利用波通 DA 7250 近红外分析仪测定各种质籽粒的β-葡聚糖含量，每份种质装盘 3 次，每次装盘扫描重复 2 次。测定标准见表 2。

1.4 数据处理

利用 Origin Pro 2022 软件整理各指标数据。对数量性状从第 1 级 [$X_i < (X - 2\sigma)$] 到第 10 级 [$X_i > (X + 2\sigma)$]，每 0.5σ 为 1 级进行分类，计算 Shannon-Wiener 多样性指数 (H')， $H' = -\sum [P_i \ln(P_i)]$ ，式中， P_i 为该性状第 i 级别内的材料份数占总份数的百分比，ln 为自然对数。使用 R 语言的 ggplot 包绘制相关性热图。参考文献^[18]对裸大麦种质进行综合评价，利用 IBM SPSS Statistics 27 软件进行主成分分析和聚类分析，计算各主成分的得分，结合模糊隶属函数法对各主成分得分进行归一化处理，计算各主成分的权重系数，计算各种质的综合得分 (D 值)。以 15 个性状数据作为自变量， D 值为因变量，构建回归方程并对评价指标进行进一步筛选。

表 2 裸大麦主要性状及测定标准

Table 2 The main traits and the scoring standards of naked barley

性状 Trait	记载标准 Recording standards
芒型 AT	1=无芒，2=短芒，3=长芒，4=短钩芒，5=长钩芒
棱型 RT	1=二棱，2=中间型，3=六棱
籽粒颜色 GC	1=黄，2=蓝，3=紫，4=褐，5=黑
穗密度 SD	1=稀，2=密，3=极密
穗色 SC	1=黄，2=灰，3=紫，4=褐，5=黑
株高 PH (cm)	成熟植株从主茎分蘖节到穗顶的高度，不含芒
穗长 SL (cm)	穗轴基部至穗顶部的长度（不包括芒）
千粒重 TGW (g)	1000 粒自然风干的大麦籽粒的重量
每穗实粒数 FGPS	每个穗子的实际结实数
籽粒面积 GA (mm ²)	成熟收获后籽粒的面积
籽粒周长 GP (mm)	成熟收获后籽粒的周长
籽粒长度 GL (mm)	成熟收获后籽粒的长度
籽粒宽度 GW (mm)	成熟收获后籽粒的宽度
籽粒长宽比 RLWG	成熟收获后籽粒长度与宽度的比值
β-葡聚糖含量 BG (%)	成熟后籽粒的β-葡聚糖含量

AT: 芒型; RT: 棱型; GC: 籽粒颜色; SD: 穗密度; SC: 穗色; PH: 株高; SL: 穗长; TGW: 千粒重; FGPS: 每穗实粒数; GA: 籽粒面积; GP: 籽粒周长; GL: 籽粒长度; GW: 籽粒宽度; RLWG: 籽粒长宽比; BG: β-葡聚糖含量。下同。
AT: awn type; RT: row type; GC: grain color; SD: spike density; SC: spike color; PH: plant height; SL: spike length; TGW: 1000-grain weight; FGPS: filled grains per spike; GA: grain area; GP: grain perimeter; GL: grain length; GW: grain width; RLWG: ratio of length to width for grain; BG: β-glucan content. The same below.

2 结果与分析

2.1 裸大麦 15 个性状的变异系数和遗传多样性分析

由表 3 可知，158 份裸大麦资源 15 个性状的变异系数在 7.84%~69.65%，平均为 26.69%，其中穗色的离散程度最高，籽粒颜色的离散程度次之，仅有籽粒周长（7.84%）、籽粒长度（8.51%）、籽粒宽度（8.46%）和长宽比（8.65%）的变异系数低于 10%。 H' 范围在 0.51~2.09，平均值为 1.62，其中籽粒宽度的 H' 最高，芒型的 H' 最低，株高（2.04）、穗长（2.02）、千粒重（2.01）、籽粒周长（2.05）、籽粒长度（2.06）、籽粒宽度（2.09）、长宽比（2.04）和β-葡聚糖含量（2.07）的 H' 均 > 2.00 ，表明参试的裸大麦资源整体遗传多样性较为丰富。

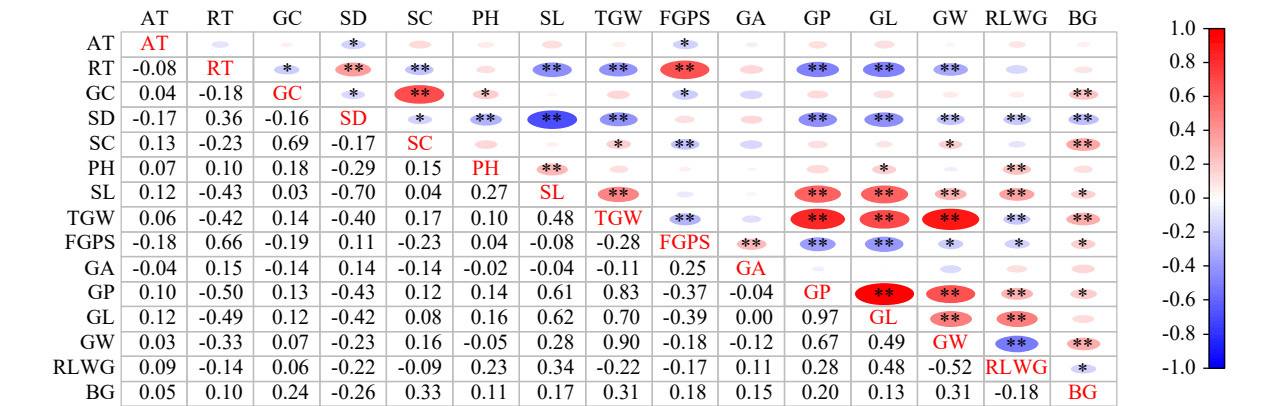
表 3 裸大麦 15 个性状的变异系数和遗传多样性系数
Table 3 Coefficients of variation and genetic diversity of 15 traits of naked barley

性状 Trait	平均值 Mean	标准差 SD	最大值 Max.	中位数 Median	最小值 Min.	极差 Range	变异系数 CV(%)	H'
AT	2.98	0.47	5.00	3.00	1.00	4.00	15.83	0.51
RT	2.23	0.71	3.00	2.00	1.00	2.00	31.62	1.02
GC	1.73	1.09	5.00	1.00	1.00	4.00	62.57	1.12
SD	1.59	0.74	3.00	1.00	1.00	2.00	46.43	0.97
SC	1.39	0.97	5.00	1.00	1.00	4.00	69.65	0.52
PH (cm)	96.58	13.71	125.50	97.63	51.00	74.50	14.20	2.04
SL (cm)	7.34	1.78	11.76	7.20	4.10	7.66	24.29	2.02
TGW (g)	40.92	9.76	67.51	38.79	19.31	48.20	23.85	2.01
FGPS	52.23	14.44	77.65	55.07	20.00	57.65	27.65	1.98
GA (mm ²)	33.75	12.03	61.97	29.38	16.89	45.08	35.64	1.84
GP (mm)	19.87	1.56	24.10	19.79	16.70	7.40	7.84	2.05
GL (mm)	8.00	0.68	10.11	7.95	6.52	3.59	8.51	2.06
GW (mm)	3.84	0.33	4.73	3.84	3.11	1.62	8.46	2.09
RLWG	2.10	0.18	2.65	2.08	1.75	0.90	8.65	2.04
BG (%)	4.10	0.62	6.30	4.09	2.75	3.55	15.20	2.07

2.2 裸大麦 15 个性状的相关性分析

相关性分析（图 1）表明参试裸大麦资源的 15 个性状之间存在不同程度的相关性，且大多呈显著或极显著相关。稃型与穗密度和每穗实粒数呈极显著正相关，与穗色、穗长、千粒重、籽粒周长、籽粒长度和籽粒宽度呈极显著负相关。穗密度与绝大部分性状均呈显著或极显著负相关。除籽粒宽度与籽粒长宽比之间呈极显著负相关外，籽粒周长、籽粒长度、籽粒宽度和籽粒长宽比两两之间均呈极显著正相关。千粒重与稃型、穗密度、每穗实粒数、籽粒长宽比均呈极显著负相关，与穗长、籽粒周长、

籽粒长度和籽粒宽度呈极显著正相关。在所有极显著负相关的性状中，稃型与千粒重相关系数的绝对值最大；在所有极显著正相关的性状中，籽粒宽度与千粒重相关系数的绝对值最大，表明稃型和籽粒宽度对千粒重起决定作用。籽粒β-葡聚糖含量与穗密度呈极显著负相关，与籽粒长宽比呈显著负相关，与穗长、每穗实粒数和籽粒周长呈显著正相关，与籽粒颜色、穗色、千粒重和籽粒宽度呈极显著正相关。在所有极显著关系中，穗色与β-葡聚糖相关系数的绝对值最大，表明穗色对β-葡聚糖含量起决定作用。



AT: 芒型; RT: 稃型; GC: 籽粒颜色; SD: 穗密度; SC: 穗色; PH: 株高; SL: 穗长; TGW: 千粒重; FGPS: 每穗实粒数; GA: 籽粒面积; GP: 籽粒周长; GL: 籽粒长度; GW: 籽粒宽度; RLWG: 籽粒长宽比; BG: β-葡聚糖含量。“*”和“**”分别表示在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平上差异显著。
AT: awn type; RT: row type; GC: grain color; SD: spike density; SC: spike color; PH: plant height; SL: spike length; TGW: 1000-grain weight; FGPS: filled grains per spike; GA: grain area; GP: grain perimeter; GL: grain length; GW: grain width; RLWG: ratio of length to width for grain; BG: β-glucan content. “*” and “**” indicate significant differences at $P < 0.05$ and $P < 0.01$ levels, respectively.

图 1 裸大麦种质资源 15 个性状的相关系数
Fig.1 Correlation coefficients among 15 traits of naked barley germplasm resources

2.3 裸大麦 15 个性状的主成分分析

基于 15 个性状进行主成分分析，根据累计贡

献率大于 80%的原则，共提取了 6 个主成分，其主成分特征值分别为 4.752、2.039、1.803、1.692、1.062

和 0.969; 主成分贡献率分别为 31.682%、13.592%、12.022%、11.281%、7.078%和 6.457%，前 6 个主成分的累积贡献率达到 82.111%，可以解释裸大麦资源性状的大部分信息（表 4）。

表 4 裸大麦种质资源主要性状的主成分分析
Table 4 Principal components analysis of main traits of naked barley germplasm resources

性状 Trait	主成分 Principal component					
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
AT	0.186	-0.115	0.207	-0.025	-0.279	0.887
RT	-0.655	0.129	-0.071	0.513	-0.069	0.008
GC	0.293	0.223	0.780	0.021	0.226	-0.152
SD	-0.633	0.198	-0.125	-0.312	0.379	0.015
SC	0.316	0.356	0.764	0.002	0.159	0.012
PH	0.213	-0.236	0.313	0.493	-0.266	-0.196
SL	0.712	-0.336	-0.100	0.302	-0.214	-0.060
TGW	0.847	0.369	-0.280	0.029	-0.011	-0.032
FGPS	-0.473	0.132	-0.210	0.694	-0.092	-0.088
GA	-0.155	-0.124	-0.237	0.402	0.686	0.281
GP	0.920	-0.075	-0.230	0.016	0.166	-0.026
GL	0.875	-0.271	-0.179	0.017	0.225	-0.019
GW	0.677	0.619	-0.348	-0.043	-0.043	0.010
RLWG	0.186	-0.891	0.183	0.086	0.239	-0.039
BG	0.282	0.447	0.147	0.585	0.165	0.161
特征值 Eigenvalue	4.752	2.039	1.803	1.692	1.062	0.969
方差贡献率 Variance contribution rate (%)	31.682	13.592	12.022	11.281	7.078	6.457
累计贡献率 Cumulative contribution rate (%)	31.682	45.273	57.295	68.576	75.654	82.111

PC1 中籽粒周长、籽粒长度和千粒重的特征向量值高于其他性状，说明这些指标在裸大麦主要性状和综合评价中起主导作用；PC2 中籽粒长宽比的特征向量值为负值，且绝对值最大，说明 PC2 为籽粒长宽比因子；PC3 中籽粒颜色和穗色具有较高的正向载荷，代表颜色因子；PC4 中每穗实粒数和β-葡聚糖含量具有较高的正向载荷，说明该成分是每穗实粒数和β-葡聚糖含量的综合反映；PC5 中籽粒面积的特征向量值最高，代表籽粒面积因子；PC6 中芒型的特征向量值最大，代表芒型因子。

2.4 裸大麦种质资源的综合评价

采用隶属函数法对参试资源的 6 个主成分得分进行归一化处理，根据 6 个主成分的方差贡献率计算权重系数，分别为 0.386、0.166、0.146、0.137、0.086 和 0.079，计算得到各裸大麦资源的综合得分值（表 5）。158 份裸大麦资源的综合得分值在

表 5 158 份裸大麦资源的综合得分 D 值
Table 5 D-values of 158 naked barley resources

编号 Code	D 值 D-value	编号 Code	D 值 D-value	编号 Code	D 值 D-value	编号 Code	D 值 D-value	编号 Code	D 值 D-value	编号 Code	D 值 D-value	编号 Code	D 值 D-value	编号 Code	D 值 D-value
1	0.359	19	0.463	37	0.428	55	0.577	73	0.529	91	0.403	109	0.428	127	0.456
2	0.360	20	0.435	38	0.464	56	0.386	74	0.513	92	0.389	110	0.376	128	0.576
3	0.434	21	0.389	39	0.422	57	0.598	75	0.454	93	0.548	111	0.415	129	0.513
4	0.416	22	0.377	40	0.374	58	0.580	76	0.447	94	0.500	112	0.425	130	0.481
5	0.428	23	0.384	41	0.418	59	0.628	77	0.417	95	0.712	113	0.351	131	0.534
6	0.397	24	0.409	42	0.424	60	0.608	78	0.492	96	0.470	114	0.279	132	0.643
7	0.354	25	0.399	43	0.383	61	0.577	79	0.528	97	0.582	115	0.390	133	0.561
8	0.680	26	0.415	44	0.427	62	0.365	80	0.394	98	0.710	116	0.253	134	0.551
9	0.414	27	0.542	45	0.338	63	0.432	81	0.473	99	0.516	117	0.454	135	0.602
10	0.392	28	0.359	46	0.370	64	0.414	82	0.451	100	0.554	118	0.343	136	0.600
11	0.371	29	0.414	47	0.386	65	0.359	83	0.407	101	0.520	119	0.371	137	0.568
12	0.330	30	0.421	48	0.482	66	0.440	84	0.513	102	0.502	120	0.368	138	0.598
13	0.322	31	0.377	49	0.410	67	0.380	85	0.449	103	0.288	121	0.344	139	0.606
14	0.414	32	0.462	50	0.322	68	0.626	86	0.489	104	0.464	122	0.485	140	0.538
15	0.426	33	0.303	51	0.546	69	0.516	87	0.458	105	0.357	123	0.458	141	0.551
16	0.397	34	0.373	52	0.551	70	0.429	88	0.489	106	0.393	124	0.498	142	0.498
17	0.403	35	0.310	53	0.563	71	0.512	89	0.545	107	0.512	125	0.415	143	0.518
18	0.396	36	0.408	54	0.603	72	0.516	90	0.513	108	0.487	126	0.541	144	0.458

0.253~0.712，平均值为 0.462，排名前 5 的资源依次为 Jet、Tet、22DJ2、藏青 3000 和 12-10-556，排名末 5 位的依次为 Muanbori、Streng、Brachiki、江苏元麦 162 号和江苏元麦 31 号。由表 6 可知，*D* 值排名前 5 位的平均千粒重（57.21 g）和β-葡聚糖含量（5.42%）明显高于排名末 5 位的资源的平均千粒重（25.26 g）和β-葡聚糖含量（3.36%），综合性状表现较好。

表 6 *D* 值排名末 5 位和前 5 位的裸大麦的数量性状
Table 6 Quantitative traits of the bottom five and the top five naked barley materials by *D*-value

材料 Material	PH (cm)	SL (cm)	TGW (g)	FGPS	GA (mm ²)	GP (mm)	GL (mm)	GW (mm)	RLWG	BG (%)	<i>D</i> 值 <i>D</i> -value
Muanbori	89.25	6.13	26.13	66.57	17.86	17.28	6.89	3.40	2.07	2.80	0.253
Streng	102.25	5.05	23.69	71.27	16.89	17.24	7.04	3.24	2.19	3.70	0.279
Brachiki	107.25	6.54	27.77	49.43	17.13	16.70	6.52	3.45	1.93	3.88	0.288
江苏元麦 162 号 Jiangsuyuanmai 162	102.00	5.62	24.25	75.00	49.63	17.20	6.90	3.33	2.10	3.53	0.303
江苏元麦 31 号 Jiangsuyuanmai 31	114.50	7.15	24.44	35.79	30.12	18.33	7.65	3.11	2.48	2.89	0.310
12-10-556	98.00	9.09	67.51	60.58	30.31	22.00	8.41	4.71	1.79	4.34	0.643
藏青 3000 Zangqing 3000	101.50	9.75	59.77	57.67	58.72	22.84	9.14	4.53	2.02	5.69	0.680
22DJ2	93.75	7.50	52.37	26.82	27.85	21.92	8.84	4.20	2.11	6.30	0.687
Tet	101.25	9.81	50.96	22.38	29.98	23.28	9.45	4.29	2.21	5.47	0.710
Jet	97.25	8.93	55.44	21.62	29.94	22.74	9.08	4.44	2.05	5.31	0.712

将 15 个性状与 *D* 值进行相关性分析，由表 7 可知，*D* 值与芒型呈显著正相关，与棱型、穗密度和每穗实粒数达极显著负相关，与籽粒颜色、穗色、穗长、千粒重、籽粒周长、籽粒长度、籽粒宽度和β-葡聚糖含量均呈极显著正相关。

表 7 裸大麦 15 个性状与综合得分 *D* 值间的相关性
Table 7 Correlations between 15 traits and comprehensive score *D*-value in naked barley

性状 Trait	<i>D</i> 值 <i>D</i> -value	性状 Trait	<i>D</i> 值 <i>D</i> -value
AT	0.166*	FGPS	-0.329**
RT	-0.515**	GA	0.016
GC	0.312**	GP	0.871**
SD	-0.498**	GL	0.778**
SC	0.377**	GW	0.821**
PH	0.106	RLWG	-0.058
SL	0.564**	BG	0.495**
TGW	0.911**		

“*”表示显著相关 ($P < 0.05$)，“**”表示极显著相关 ($P < 0.01$)。
“*” indicates significant correlation ($P < 0.05$), “**” indicates extremely significant correlation ($P < 0.01$).

2.5 回归模型构建与综合指标的筛选

以 *D* 值为因变量，15 个性状为自变量进行逐步回归分析，构建最优回归方程： $Y=0.027+0.305X_8+0.163X_5+0.382X_{11}+0.222X_{15}-0.146X_2+0.097X_{10}+0.157X_{13}$ ，式中， X_8 、 X_5 、 X_{11} 、 X_{15} 、 X_2 、 X_{10} 和 X_{13} 分别代表千粒重、穗色、籽粒周长、β-葡聚糖含量、棱型、籽粒面积和籽粒宽度。方程相关系数 $R=0.994$ ，决定系数 $R^2=0.988$ ，表明这 7 个性状可以决定 *D* 值总变异的 98.8%，*F* 值为 1802.327，方差极显著。由回归方程可知，以上 7 个性状对裸大

麦资源综合得分 *D* 值影响显著，可作为筛选裸大麦优异种质的关键指标。

2.6 裸大麦资源的聚类分析

基于 15 个性状和 *D* 值，以欧氏距离为遗传距离，采用组内联接法对参试裸大麦资源进行系统聚类。在遗传距离为 19.50 处时，158 份材料可分为 5 个类群（图 2）。

由表 8 可知，类群I包含 20 份资源，占参试材料的 12.66%，该类群 *D* 值表现中等，株高、每穗实粒数和β-葡聚糖含量在 5 个类群中最低，籽粒周长和籽粒长度最高。类群II包含 31 份资源，占参试材料的 19.62%，该类群的主要特点为株高最高、籽粒宽度最小和籽粒长宽比最大，*D* 值中等。类群III包含 50 份资源，占参试材料的 31.65%，该类群穗长、千粒重、籽粒周长、籽粒长度和 *D* 值在 5 个类群中最低，籽粒面积最高。类群IV包含 21 份资源，占参试材料的 13.29%，该类群的β-葡聚糖含量在 5 个类群中最高，籽粒面积和长宽比最低，*D* 值最高（0.55），综合表现最好。类群V包含 36 份资源，占比 22.78%，该类群的主要特点为穗长最长、千粒重最重、每穗实粒数最多和籽粒宽度最宽，*D* 值为 0.54，仅次于类群IV。

3 讨论

3.1 裸大麦种质资源的变异系数和遗传多样性分析
种质资源的变异系数和 *H'*能够反映性状变量的离散程度，体现不同资源的遗传背景和抵抗逆境

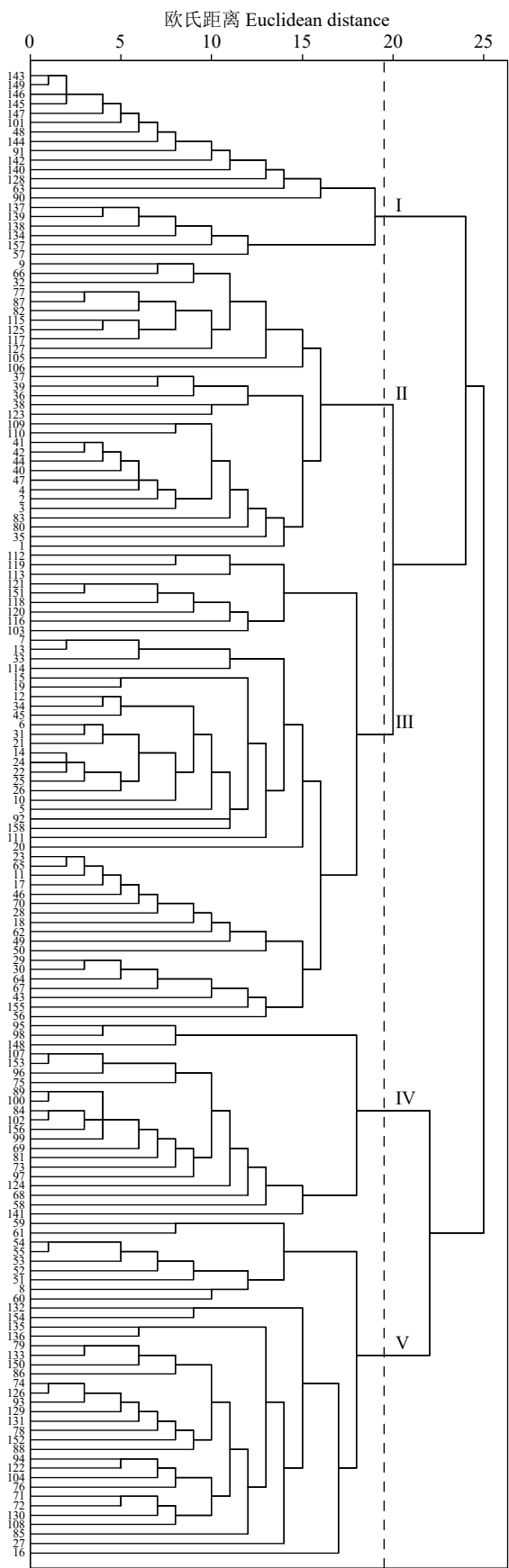


图 2 参试裸大麦资源聚类图
Fig.2 Cluster dendrogram of tested naked barley

表 8 参试裸大麦不同类群的主要性状及 D 值
Table 8 Main traits and D -value of different groups in naked barley

项目 Item	类群 Group				
	I	II	III	IV	V
份数 Number	20	31	50	21	36
PH (cm)	89.24	102.11	92.25	100.45	99.64
SL (cm)	8.15	8.25	5.66	7.39	8.41
TGW (g)	48.70	34.06	32.26	46.96	50.99
FGPS	26.31	55.08	59.09	43.63	59.67
GA (mm ²)	28.36	33.15	38.03	27.55	34.94
GP (mm)	21.59	19.47	18.45	20.24	21.01
GL (mm)	8.77	7.97	7.40	8.05	8.39
GW (mm)	4.07	3.53	3.65	4.03	4.15
RLWG	2.16	2.28	2.05	2.01	2.04
BG (%)	3.44	3.79	3.99	4.74	4.53
D 值 D -value	0.52	0.41	0.38	0.55	0.54

的能力,对现有种质资源分类、筛选与利用对专用型裸大麦新品种选育具有重要的参考价值^[19-20]。一般认为,变异系数 $>10\%$,样本间差异显著^[21]。本研究中,质量性状的变异系数在 $15.83\%\sim69.65\%$,数量性状的变异系数在 $7.84\%\sim35.64\%$,除籽粒周长、籽粒长度、籽粒宽度和长宽比外,其余性状的变异系数均 $>10\%$,表现出明显的差异性,有利于筛选优异裸大麦种质。参试资源的 H' 在 $0.51\sim2.09$,平均值为 1.62 ,表明参试资源的遗传变异较为丰富,可为后续品种改良提供种质基础。质量性状中粒色的 H' 最高,数量性状中籽粒宽度的 H' 最高,但变异系数最低, H' 和变异系数无明显相关性,这与徐肖等^[22]和夏腾飞等^[23]的研究结果较为一致。

3.2 裸大麦种质资源的相关性和主成分分析

相关性分析能够体现不同性状的关联程度。本研究对参试资源 15 个性状进行了相关性分析,结果显示大部分性状间存在显著或极显著相关性,其中 β -葡聚糖含量与穗密度呈极显著负相关,与籽粒长宽比呈显著负相关,与穗长、每穗实粒数和籽粒周长呈显著正相关,与籽粒颜色、穗色、千粒重和籽粒宽度呈极显著正相关,因此可利用穗密度、籽粒长宽比、穗长、每穗实粒数、籽粒周长、籽粒颜色、穗色、千粒重和籽粒宽度来调控裸大麦籽粒的 β -葡聚糖含量。然而,牛小霞等^[24]研究发现,裸大麦的 β -葡聚糖含量与粒型性状和千粒重无显著相关性,这可能由于测试资源的来源、数量、年份和环境不一致所致。

主成分分析可以将多个变量降维为少数不相关的综合指标,在简化原有信息的基础上更好地描述总变异构成特征^[18]。本研究共筛选出 6 个主成

分, PC1 为籽粒大小因子, PC2 为籽粒长宽比因子, PC3 代表颜色因子, PC4 是每穗实粒数和 β -葡聚糖含量的综合反映, PC5 为籽粒面积因子, PC6 代表芒型因子, 表明籽粒大小、颜色、芒型、每穗实粒数和 β -葡聚糖含量等性状对参试资源综合性状差异有较大的贡献。

3.3 裸大麦种质资源的隶属函数分析与综合评价

对种质资源进行综合评价能够为挖掘和利用优异资源提供理论和实践基础^[25]。结合隶属函数法和主成分分析对种质资源进行综合评价可以消除性状间的相关性, 避免直接利用单一或某些性状造成评价过于片面的问题, 目前已在水稻^[18]、高粱^[26]和裸大麦^[27]等作物中得到应用。本研究利用隶属函数法对主成分得分值进行归一化处理, 计算得到综合得分 D 值。资源的 D 值越大, 其综合性状表现越优异。Jet、Tet、22DJ2、藏青 3000 和 12-10-556 的 D 值较高, 综合性状最佳, 其中 Jet、Tet 和 22DJ2 均来自类群IV, 藏青 3000 和 12-10-556 来自类群V, 除 12-10-556 的 β -葡聚糖含量为 4.34%外, 这 5 份资源的千粒重和 β -葡聚糖含量均较高, 且能较好适应江苏地区的生长环境, 可作为优异亲本与当地主栽品种杂交, 以提高江苏地区裸大麦的千粒重和 β -葡聚糖含量。结合 D 值和 15 个性状进行逐步回归分析, 构建回归方程, 筛选评价裸大麦参试资源的最优指标^[28]。15 个性状中千粒重、穗色、籽粒周长、 β -葡聚糖含量、稃型、籽粒面积和籽粒宽度对 D 值影响显著, 可作为综合评价裸大麦资源的关键指标。

3.4 裸大麦种质资源的聚类分析

聚类分析是研究作物种质资源的亲缘关系及起源的常用手段, 可以直观体现种质个体间相关性的分类^[19]。系统聚类法将参试裸大麦资源分为 5 类, 类群I主要特征为株高矮、每穗实粒数少、 β -葡聚糖含量低、籽粒周长和籽粒长度长; 类群II主要特征为株高高、籽粒宽度小和籽粒长宽比大; 类群III主要特征为穗长短、千粒重低、籽粒周长、籽粒长度短、 D 值低且籽粒面积大; 类群IV的主要特征为 β -葡聚糖含量高、籽粒面积小、长宽比低且 D 值最高; 类群V主要表现为穗长长、千粒重重、每穗实粒数多且籽粒宽度最宽, D 值仅次于类群IV。不同类群的主要特征各不相同, 应优先选择类群IV和类群V的资源作为专用型裸大麦育种的亲本材料。聚类分析主要聚集性状相似的材料, 而相

同地理来源的种质并没有聚为一类, 在糜子中也发现相同的现象^[29]。这可能是同一地理来源的种质由于气候环境和人工选择出现了遗传分化。然而, D 值较高的类群IV和类群V中, 江苏资源仅有 3 份, 综合性状较西藏和青海等其他来源的裸大麦资源存在较大差距。

本研究中参试裸大麦资源的遗传多样性丰富, 结合隶属函数法和主成分分析计算综合得分 D 值, 筛选了一批优异资源, 为裸大麦资源高效利用提供了种质基础。聚类分析将资源分为 5 类, 其中类群IV和类群V的资源综合性状表现优异, 可作为杂交育种的亲本。下一步将结合重测序技术进一步分析参试资源的遗传多样性和群体结构, 科学全面地评价裸大麦资源, 为种质资源创新和新品种培育提供理论依据。

4 结论

158 份裸大麦材料 15 个性状的 H' 在 0.51~2.09, 平均值为 1.62; 变异系数在 7.84%~69.65%, 平均为 26.69%, 表明供试材料的遗传多样性较为丰富。筛选出 Jet、Tet、22DJ2、藏青 3000 和 12-10-556 等综合性状较好的材料, 可作为优质高产多抗裸大麦品种选育的优良亲本。

参考文献

- [1] 刘雅洁, 李茂, 李超, 等. 75 份青稞种质的品质性状综合评价. 麦类作物学报, 2024, 44(7): 855-864.
- [2] 刘建. 关于加速推进江苏省沿江地区裸大麦生产发展的思考. 江苏农业科学, 2015, 43(3): 1-4.
- [3] Yang P, Liu X J, Liu X C, et al. Diversity analysis of the developed qingke (hulless barley) cultivars representing different growing regions of the qinghai-tibet plateau in China using sequence related amplified polymorphism (SRAP) markers. African Journal of Biotechnology, 2010, 9(50): 8530-8538.
- [4] Russell J, Mascher M, Dawson I K, et al. Exome sequencing of geographically diverse barley landraces and wild relatives gives insights into environmental adaptation. Nature Genetics, 2016, 48(9): 1024-1030.
- [5] Quzhen N, Namgyal L, Dondrup D, et al. Abundant genetic diversity harbored by traditional naked barley varieties on tibetan plateau: implications in their effective conservation and utilization. Biology, 2024, 13(12): 1018.
- [6] Bozbulut R, Sanlier N. Promising effects of β -glucans on glyceamic control in diabetes. Trends in Food Science & Technology, 2019, 83(1): 159-166.
- [7] Guo H, Lin S, Lu M, et al. Characterization, *in vitro* binding properties, and inhibitory activity on pancreatic lipase of β -glucans from different Qingke (Tibetan hulless barley) cultivars. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 120: 2517-2522.
- [8] Shen Y B, Zhang H, Cheng L L, et al. In vitro and in vivo

- antioxidant activity of polyphenols extracted from black highland barley. *Food Chemistry*, 2016, 194: 1003-1012.
- [9] 牛小霞, 陈娟, 柳小宁, 等. 40 份青稞种质资源农艺和品质性状的综合评价及评价指标筛选. *江苏农业科学*, 2023, 51(3): 88-93.
- [10] 陈林, 姚晓华, 姚有华, 等. 青藏高原青稞品种籽粒外观和品质性状的多样性分析. *作物杂志*, 2024(2): 213-220.
- [11] 金彦龙, 吴文雪, 叶正荣, 等. 青稞品种的专用化鉴定与综合评价. *植物遗传资源学报*, 2023, 24(2): 483-492.
- [12] 翟会生, 李俏, 张玉红, 等. 72 份青稞氨基酸组成与营养价值评价. *植物遗传资源学报*, 2021, 22(1): 121-129.
- [13] 蔡羽, 杨平, 冯宗云. 大麦表型多样性分析及优异饲草种质资源筛选. *植物遗传资源学报*, 2019, 20(4): 920-931.
- [14] 向思琪, 羊海珍, 旺姆. 青稞种质资源对大麦黄矮病毒的抗性鉴定和生理分析. *植物遗传资源学报*, 2023, 24(4): 1007-1015.
- [15] 侯璐, 龙有, 张调喜. 青稞种质资源对条纹病的抗性鉴定与评价. *四川农业大学学报*, 2024, 42(6): 1272-1279.
- [16] 李赢, 刘海翠, 石晓旭, 等. 江苏裸大麦品种农艺及营养品质性状分析. *分子植物育种*, 2022, 20(9): 3044-3052.
- [17] 张京, 刘旭. 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.
- [18] 李欢, 鄢小青, 杨占烈, 等. 贵州香禾糯地方稻种资源表型遗传多样性分析与综合评价. *中国农业科学*, 2023, 56(11): 2035-2046.
- [19] 魏晓羽, 刘红, 瞿辉, 等. 158 份春兰种质资源的表型多样性分析. *植物遗传资源学报*, 2022, 23(2): 398-411.
- [20] 杨涛, 黄雅婕, 李生梅, 等. 海岛棉种质资源表型性状的遗传多样性分析及综合评价. *中国农业科学*, 2021, 54(12): 2499-2509.
- [21] 唐桂梅, 李卫东, 周宇霞, 等. 基于表型性状分析蕙兰种质资源遗传多样性. *中国农业科学*, 2025, 58(2): 339-354.
- [22] 徐肖, 栾海业, 张英虎, 等. 青藏高原裸大麦种质资源形态多样性分析. *浙江农业学报*, 2019, 31(7): 1037-1044.
- [23] 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. *西北农业学报*, 2018, 27(2): 182-193.
- [24] 牛小霞, 赵锋, 柳小宁, 等. 青稞品种资源粒型性状与品质性状的分析与评价. *中国粮油学报*, 2024, 39(12): 58-63.
- [25] 卢晶, 余波, 江谧, 等. 58 份青稞种质资源遗传多样性评价. *作物杂志*, 2025(2): 20-28.
- [26] 张一中, 张晓娟, 梁笃, 等. 基于表型性状的高粱育种材料遗传多样性分析及综合评价. *中国农业科学*, 2023, 56(15): 2837-2857.
- [27] 李赢, 刘海翠, 石晓旭, 等. 398 份裸大麦种质资源表型性状遗传多样性分析. *植物遗传资源学报*, 2023, 24(5): 1311-1320.
- [28] 孙东雷, 卞能飞, 陈志德, 等. 花生种质资源表型性状的综合评价及指标筛选. *植物遗传资源学报*, 2018, 19(5): 865-874.
- [29] 张杰, 贾冰, 程瑞宝, 等. 东北平原生态区糜子种质资源表型多样性分析. *作物杂志*, 2025(1): 76-82.

Diversity Analysis and Comprehensive Evaluation of Main Traits in 158 Naked Barley Germplasm Resources

Li Ying¹, Liu Haicui¹, Shi Xiaoxu¹, Liang Zhihao², Xu Xiao², Liu Jian¹, Shen Huiquan², Wei Yafeng¹

(¹Jiangsu Yanjiang Area Institute of Agricultural Sciences / Key Laboratory of Recycling Agriculture of Nantong City, Nantong 226001, Jiangsu, China; ²Jiangsu Coastal Areas Institute of Agricultural Sciences, Yancheng 224002, Jiangsu, China)

Abstract To efficiently utilize naked barley germplasm resources, 15 traits of 158 naked barley germplasm resources from different sources were analyzed using coefficients of variation, Shannon-Wiener genetic diversity indexes, correlation analysis, principal component analysis, and cluster analysis, and comprehensive evaluation was conducted to screen for excellent germplasm. The results showed that there was abundant variation in the 15 traits among different naked barley resources, with the coefficient of variation ranging from 7.84% to 69.65% and an average of 26.69%. Among them, the degree of dispersion of spike color was the highest, and the coefficient of variation of grain perimeter was the lowest. The diversity index ranged from 0.51 to 2.09, with an average of 1.62, among which grain width had the highest diversity index and awn type had the lowest. A regression equation was established through stepwise regression, indicating that 1000-grain weight, spike color, grain perimeter, β -glucan content, row type, grain area, and grain width can be used as comprehensive evaluation indicators for screening excellent naked barley germplasm. Principal component analysis transformed the 15 individual indicators into six independent comprehensive indicators with a cumulative contribution rate of 82.111%. Cluster analysis classified the tested materials into five groups, among which Group IV (21 materials) had the highest average *D*-value. The top five varieties based on *D*-value were Jet, Tet, 22DJ2, Zangqing 3000, and 12-10-556, which can serve as excellent parents for naked barley breeding.

Key words Naked barley; Germplasm resource; Trait; Diversity; Comprehensive evaluation