

102 份燕麦种质资源遗传多样性及农艺性状综合评价

张知¹, 邹璨阳^{1,2}, 梁秀芝¹, 康佳惠¹, 郑敏娜¹, 杨富¹

(1. 山西农业大学高寒区作物研究所, 山西大同 037008; 2. 山西农业大学农学院, 山西太谷 030801)

摘要: 为了解燕麦种质资源的遗传多样性并筛选优异燕麦品种, 分析了 102 份燕麦种质的 21 个农艺性状的变异程度及遗传多样性, 并基于主成分分析和聚类分析对其进行综合评价。结果表明, 供试燕麦种质资源遗传多样性较高; 质量性状中, 小穗形的遗传多样性最高(1.100); 数量性状中, 千粒重的遗传多样性指数最高(2.053), 其次为主穗小穗数(2.046)。不育穗数变异系数达到 56.00%, 所有表型性状变异丰富。利用主成分分析筛选出 340、坝苽 14 号、饲草 1 号、草苽 1 号、坝苽 3 号、白燕 19 号、晋燕 8 号、定苽 9 号、坝苽 13 号、坝苽 12 号、469、固燕 2 号、118 号和 114 号共 14 个综合性状表现优异的种质材料。通过聚类分析将 102 份燕麦种质资源分为 3 个类群, 类群 I 可用作选育矮秆品种的亲本, 类群 II 可作为选育高籽粒产量品种的亲本, 类群 III 可用作选育高秆品种和高产饲用品种的亲本。

关键词: 燕麦; 农艺性状; 遗传多样性; 种质资源; 聚类分析

中图分类号: S512.1; S311

文献标识码: A

文章编号: 1009-1041(2025)06-0847-10

Genetic Diversity Analysis and Comprehensive Evaluation of 102 Oat Germplasm Resources Based on Main Agronomic Traits

ZHANG Zhi¹, ZOU Canyang^{1,2}, LIANG Xiuzhi¹, KANG Jiahui¹, ZHENG Minna¹, YANG Fu¹

(1. High Latitude Crops Institute, Shanxi Agricultural University, Datong, Shanxi 037008, China;

2. College of Agriculture, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801, China)

Abstract: In order to understand the genetic diversity of oat resources and screen excellent oat germplasm materials, 21 agronomic traits of 102 oat germplasm were compared and analyzed for genetic variation, and their agronomic traits were comprehensively evaluated based on principal component analysis and cluster analysis. The results showed that spikelet shape showed the highest diversity(1.100) among the quality traits, while the 1 000-grain weight had the highest diversity index(2.053) among the quantitative traits, followed by the number of main spikelet(2.046). The coefficient of variation of infertile spikelet number reached 56.00%, and all phenotypic traits showed abundant variation. Using principal component analysis, 14 germplasm materials with excellent comprehensive traits were selected, including 340, Bayou 14, Jiaocao 1, Caoyou 1, Bayou 3, Baiyan 19, Jinyan 8, Dingyou 9, Bayou 13, Bayou 12, 469, Guyan 2, 118 and 114. The 102 oat germplasm resources were divided into 3 groups by cluster analysis. Group I can be used as the parents of dwarf varieties; Group II can be used as the parents of high-yield varieties for grains, and group III can be used as the parents of high-yield varieties for forage. This study provided theoretical basis for the improvement of oat varieties and the efficient utilization of excellent germplasm.

收稿日期: 2024-04-24

修回日期: 2024-12-26

基金项目: 大同市农业科研合作项目; 国家现代农业产业技术体系项目(CARS-07-A-2); 山西农业大学科技创新提升工程项目(CXGC2023076); 大同市应用基础研究计划项目(2024062); 山西农业大学生物育种工程项目(YZGC085); 山西省牧草产业技术体系项目(2024CYJSTX11-08)

第一作者 E-mail: 178171982@qq.com(张知); zouzoucy@163.com(邹璨阳)

通讯作者 E-mail: liangxiuzhi@126.com(梁秀芝)

Keywords: Oat; Agronomic traits; Genetic diversity; Germplasm resources; Cluster analysis

燕麦(*Avena sativa* L.)是禾本科一年生作物,分为带稃型和裸粒型两大类,主要分布于北纬40°以北的亚洲、欧洲、北美洲等地区,其种植面积和产量仅次于水稻、小麦、玉米、高粱和大麦^[1-2]。燕麦是中国部分地区的重要作物,主要分布于华北、西南、东北地区的高海拔和高纬度地区^[3]。燕麦籽粒的营养价值较高,可用于食品加工,其茎秆可作为家畜饲料^[4],因而燕麦在部分地区农业产业化结构调整及农民增收方面发挥着重要作用。然而,目前燕麦的新品种选育仍面临种质资源利用效率低、改良技术相对滞后等问题,导致品种更新换代较慢,限制了燕麦产业化发展。因此,合理评价并高效利用燕麦种质资源,对推动燕麦育种至关重要。

种质资源是新品种选育的物质基础。重要农艺性状(表型)特点及其遗传多样性是燕麦种质资源评价的两个重要方面^[5-8]。研究发现,燕麦种质资源具有丰富的遗传多样性,在品种改良上拥有较大潜力^[9]。王凤宇等^[10]研究认为,燕麦质量性状中茎节绒毛的遗传多样性指数最高,苗期株型最低,而数量性状中第三茎节粗的遗传多样性指数最高,旗叶面积的遗传多样性指数最低。而史京京等^[11]对33份饲用燕麦种质材料的18个农艺性状的分析结果显示,各性状均存在较大变异,其中鲜草产量的变异系数最大,其次为茎干重和叶干重,而叶可溶性糖含量的变异系数最小;各性状均表现出较好的遗传多样性,其中籽粒淀粉含量最高,千粒重最低。耿小丽等^[12]研究得出,燕麦株高的遗传多样性指数最高,其次为根长;有效分蘖数的变异系数最大,其次是分蘖数。而孙艳楠等^[13]报道,燕麦株高和穗长的多样性指数最大,而分蘖数和主穗粒重的变异系数最大。王建丽等^[14]则提出,燕麦主穗长的遗传多样性指数最高,其次为株高和主穗粒重;主穗小穗数的性状变异系数最大,其次为主穗粒重和单株分蘖数。这些研究结果为燕麦种质资源的评价与利用提供了重要参考,但由于试验材料不同,研究结论存在差异,因此对于燕麦种质资源的遗传多样性需要进一步的探讨。

近年来,分子标记技术被广泛应用于燕麦种质资源的遗传多样性鉴定和评价^[15-20],但基于形态学的测定与结果分析仍是种质资源评价和利用

的重要依据^[21]。本研究选取102份燕麦种质资源,测定分析了21个重要农艺性状的变异程度及遗传多样性,并基于主成分分析和聚类分析对其农艺性状进行综合评价,进而筛选优异种质,以期促进燕麦种质资源的高效利用及新品种选育。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验在山西省朔州市毛家皂镇山西农业大学高寒区作物研究所毛家皂基地(39°55′49″N,113°16′17″E)进行。试验地属温带季风气候区,海拔1 043 m,年平均气温7.9℃,年降水量350~500 mm,主要集中在6—8月份,无霜期140 d左右,全年日照时数2 782 h。前茬作物为黍子。试验地地势平坦,肥力中等,具备灌溉条件,土质为沙壤土,土壤有机质含量16.23 g·kg⁻¹,有效磷含量5.39 mg·kg⁻¹,全氮含量0.74 g·kg⁻¹,pH 8.26。

1.2 供试材料信息

供试材料为102份燕麦种质资源,由山西农业大学高寒区作物研究所提供,其中皮燕麦占34%,裸燕麦占66%。燕麦种质资源编号及名称见表1。

1.3 试验设计

试验采用随机区组设计,于2023年4月10日人工开沟播种,小区面积4 m²(2 m×2 m),每小区均种植8行,行长2 m,行距25 cm,播种深度3~5 cm,3次重复。播前基施复合肥(N-P-K=15-15-15)90 kg·hm⁻²,拔节期追施尿素(N≥46%)100 kg·hm⁻²。试验期间各小区管理措施一致,人工除草2次,水分管理依据生育期内实际情况进行。

1.4 测定指标及方法

于燕麦成熟期在各小区中间行随机选取10株完整植株,依据《燕麦种质资源描述规范和数据标准》^[8]调查102份燕麦材料的21个性状,其中数量性状13个(茎粗、株高、旗叶长、旗叶宽、穗下茎节长、穗长、茎节数、主穗小穗数、不育穗数、有效分蘖、小穗粒数、穗轮层数和千粒重),质量性状8个(皮裸性、穗型、穗色、小穗形、芒性、芒色、芒型和茎秆颜色),并按照标准要求进行分级赋值。

表 1 供试燕麦材料信息

Table 1 Information of the oat materials

编号 Code	资源名称 Name	编号 Code	资源名称 Name	编号 Code	资源名称 Name	编号 Code	资源名称 Name	编号 Code	资源名称 Name
1	国试 3 Guoshi 3	18	晋燕 8 号 Jinyan 8	35	23	52	51	69	白引燕 1 号 Baiyinyan 1
2	冀张筱 12 号 Jizhangyou 12	19	白燕 11 号 Baiyan 11	36	晋燕 14 号 Jinyan 14	53	17	70	Hayhair
3	远杂 2 号 Yuanza 2	20	坝筱 1 号 Bayou 1	37	固燕 3 Guyan 3	54	25	71	白燕 19 号 Baiyan 19
4	饲草 1 号 Sicao 1	21	燕科 2 号 Yanke 2	38	草筱 1 号 Caoyou 1	55	68	72	白燕 17 号 Baiyan 17
5	坝筱 13 号 Bayou 13	22	远杂 1 号 Yuanza 1	39	晋燕 21 号 Jinyan 16	56	405	73	蒙燕 1 号 Mengyan 1
6	坝筱 14 号 Bayou 14	23	固燕 2 号 Guyan 2	40	GL381	57	336	74	蒙燕 3 号 Mengyan 3
7	宁筱 1 号 Ningyou 1	24	晋燕 16 号 Jinyan 16	41	420	58	448	75	定燕 3 号 Dingyan 3
8	冀张筱 4 号 Jizhangyou 4	25	品燕 4 号 Pinyan 4	42	469	59	647	76	乌燕 3 号 Wuyan 3
9	坝筱 12 号 Bayou 12	26	白燕 20 号 Baiyan 20	43	175	60	168	77	青引 2 号 Qingyin 2
10	白燕 16 号 Baiyan 16	27	晋 19 Jin 19	44	724	61	466	78	532
11	坝筱 3 号 Bayou 3	28	固燕 1 号 Guyan 1	45	894	62	599	79	495
12	晋燕 18 号 Jinyan 18	29	蒙燕 2 号 Mengyan 2	46	654	63	114	80	444
13	白燕 18 号 Baiyan 18	30	定筱 1 号 Dingyou 1	47	坝筱 18 号 Bayou 18	64	453	81	饲草 18 号 Sicao 18
14	坝燕 1 号 Bayan 1	31	张筱 9 号 Zhangyou 9	48	717	65	434	82	陇燕 3 号 Longyan 3
15	白燕 2 号 Baiyan 2	32	张筱 15 Zhangyou 15	49	603	66	21	83	魁北克 Quebec
16	定筱 9 号 Dingyou 9	33	464	50	109	67	461	84	白燕 7 号 Baiyan 7
17	饲草 10 Sicao 10	34	716	51	118	68	YB-16-108	85	YB-16-105
								86	青引 1 号 Qingyin 1
								87	加燕 2 号 Jiayan 2
								88	定燕 2 号 Dingyan 2
								89	甜燕麦 Sweet oats
								90	饲草 14 Sicao 14
								91	饲草 7 Sicao 7
								92	坝燕 6 号 Bayan 6
								93	饲草 9 Sicao 9
								94	340
								95	369
								96	589
								97	定燕 1 号 Dingyan 1
								98	坝燕 4 号 Bayan 4
								99	500
								100	锋利 Keeness
								101	伽利略 Galileo
								102	551

1.5 数据处理

采用 Excel 2019 和 SPSS 20 软件对农艺性状进行主成分分析、相关性分析及聚类分析,计算各性状的最小值、最大值、平均值、标准差、极差及变异系数^[22]。按照标准要求对性状指标进行分级赋值,计算其频数和遗传多样性指数,其中遗传多样性指数采用香浓-威尔指数(H')^[23]计算: $H' = -\sum P_i \ln P_i$, P_i 为此物种个体数占总个体数比例。

采用隶属函数分析法^[24]计算 13 个数量性状的隶属函数值 $\mu(X_i)$ 。正向指标: $\mu(X_i) = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$; 负向指标: $\mu(X_i) = 1 - (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$, 式中 $\mu(X_i)$ 为第 i 个指标的隶属函数值, X_i 为第 i 个指标的数值, X_{\min} 为第 i 个指标的最小值, X_{\max} 为第 i 个指标

的最大值。利用隶属函数值进行主成分分析,并计算综合得分(D)。综合得分分值越高,其综合农艺性状表现越好^[9,25]。最后利用 D 值进行聚类分析。

2 结果与分析

2.1 燕麦种质资源的遗传多样性

2.1.1 燕麦种质的质量性状遗传多样性

在 102 份种质资源中,穗型以周散型为主(占比 83.3%),侧散型次之(占比 7.8%),而侧紧型和周紧型占比最少;穗的颜色中以黄色和白色占比多,分别为 48.0% 和 42.2%,而褐色穗仅占比 9.8%;小穗形上,纺锤形、串铃形和鞭炮形分布相对均匀,占比分别为 33.4%、33.3% 和 33.3%;麦芒主要表现为弱芒性,占比达到 93.1%;麦芒颜

色中白色占比最多(72.5%),而黑色麦芒占比仅为 27.5%;芒型主要分为挺直和弯曲,占比分别为 63.7%和 36.3%(表 2)。在这 8 个质量性状中,

小穗形的遗传多样性指数最高(1.10),其次是穗色(0.94)。这说明参试的 102 份燕麦种质资源小穗形状类型和颜色丰富。

表 2 102 份燕麦种质资源 8 个质量性状的遗传多样性分析

Table 2 Genetic diversity analysis of the eight quality traits in 102 oat germplasm resources

性状 Characteristic	性状分布 Trait distribution/%				遗传多样性指数 Genetic diversity index
	1	2	3	4	
皮/裸性 Hulled/Naked	34.0	66.0	—	—	0.64
穗型 Spike type	3.0	7.8	5.9	83.3	0.62
穗色 Spike color	42.2	48.0	9.8	—	0.94
小穗形 Spikelet shape	33.4	33.3	33.3	—	1.10
芒性 Awn character	93.1	6.9	—	—	0.25
芒色 Awn color	72.5	27.5	—	—	0.59
茎秆颜色 Stem color	100.0	—	—	—	0.00
芒型 Awn type	63.7	36.3	—	—	0.69

皮/裸性:1 和 2 分别代表皮燕麦和裸燕麦;穗型:1~4 分别代表侧紧型、侧散型、周紧型和周散型;穗色:1~3 分别代表白色、黄色和褐色;小穗形:1~3 分别代表纺锤形、串铃形和鞭炮形;芒性:1 和 2 分别代表弱和强;芒色:1 和 2 分别代表白色和黑色;茎秆颜色中 1 代表黄色;芒型:1 和 2 分别代表挺直和弯曲。

Hulled/naked: 1 and 2 represent hulled and naked, respectively; Spike type: 1-4 represent lateral tight, lateral loose, circumferential tight, and circumferential loose, respectively; Spike color: 1-3 represent white, yellow, and brown, respectively; Spikelet shape: 1-3 represent spindle-shaped, bell-shaped, and firecracker-shaped, respectively; Awn character: 1 and 2 represent weak and strong, respectively; Awn color: 1 and 2 represent white and black, respectively; Stem color: 1 represents yellow; Awn type: 1 and 2 represent straight and curved, respectively.

2.1.2 燕麦种质数量性状的遗传多样性

102 份燕麦种质资源数量性状的变异系数为 9.73%~56.00%,其中 12 个数量性状的变异系数大于 10%(表 3)。不育穗数、主穗小穗数、千粒重、穗粒数、有效分蘖的变异系数较高,分别达到 56.00%、24.55%、23.88%、21.94%和 21.81%,说明供试燕麦种质的这些性状差异较大,变异丰富。穗下茎节长(19.45%)、株高(17.72%)、主穗长(17.51%)、旗叶长(15.41%)、旗叶宽(15.39%)的变异系数次之;而茎粗(12.00%)、茎节数(11.20%)、穗轮层数(9.73%)的变异系数较小,说明供试燕麦这 3 个性状材料间差异较小,相对稳定。

13 个数量性状的遗传多样性指数变化范围为 1.885 9~2.052 6,平均指数为 1.983 9,其中千粒重的遗传多样性指数最高(2.052 6),其次是主穗小穗数(2.045 7),而有效分蘖的遗传多样性指数最低(1.885 9),进一步表明 102 份燕麦种质数量性状的遗传变异丰富,遗传基础较广。

2.2 燕麦数量性状间的相关性

对燕麦 13 个数量性状进行相关性分析,结果(图 1)表明,株高与茎粗、旗叶宽、穗下茎长、穗

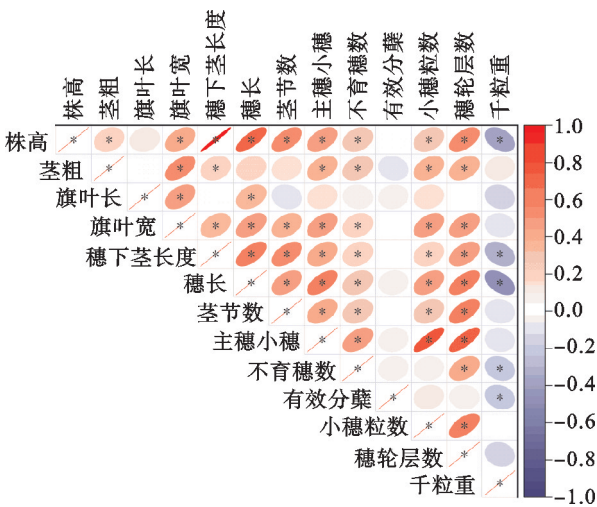
长、茎节数、主穗小穗数、不育穗数、小穗粒数、穗轮层数均呈显著正相关,与千粒重呈显著负相关。茎粗与旗叶宽、穗下茎节长、主穗小穗数、不育穗数、小穗粒数、穗轮层数均呈显著正相关。旗叶长与旗叶宽、穗长均呈显著正相关。旗叶宽与穗下茎节长、穗长、茎节数、主穗小穗数、小穗粒数、穗轮层数均呈显著正相关。穗下茎节长与穗长、茎节数、主穗小穗数、不育穗数、小穗粒数、穗轮层数均呈显著正相关,与千粒重呈显著负相关。穗长与茎节数、主穗小穗数、不育穗数、小穗粒数、穗轮层数均呈显著正相关,而与千粒重呈显著负相关。茎节数与主穗小穗数、不育穗数、小穗粒数、穗轮层数均呈显著正相关。主穗小穗数与不育穗数、小穗粒数、穗轮层数均呈显著正相关。不育穗数与穗轮层数呈显著正相关,与千粒重呈显著负相关。有效分蘖与千粒重呈显著负相关。小穗粒数与穗轮层数显著呈正相关。这表明燕麦不同数量性状间关系密切,在资源评价上存在信息重叠,因而有必要通过主成分分析来进行综合评价。

2.3 主成分分析

通过对燕麦种质 13 个数量性状的主成分分析(表 4),前 4 个主成分的累积方差贡献率为

表 3 102 份燕麦种质资源数量性状变异情况
Table 3 Quantitative traits variation of the 102 oat germplasm resources

性状 Trait	最小值 Min.	最大值 Max.	平均值 Average	极差 Range	标准差 SD	变异系数 CV/%	遗传多样性指数 Genetic diversity index
株高 Plant height/cm	54.11	135.20	81.84	81.09	14.50	17.72	1.948 3
茎粗 Stem thickness/mm	2.95	6.14	4.73	3.20	0.57	12.00	2.004 8
旗叶长 Flag leaf length/cm	9.29	22.29	15.83	13.00	2.44	15.41	2.033 6
旗叶宽 Flag leaf width/mm	5.20	16.35	12.21	11.15	1.88	15.39	1.995 9
穗下茎节长 Peduncle length/cm	40.98	108.33	62.41	67.36	12.14	19.45	1.984 9
主穗长 Main spike length/cm	11.49	27.89	19.43	16.40	3.40	17.51	2.041 6
茎节数 Number of stem nodes	4.11	7.00	5.59	2.89	0.63	11.20	1.959 1
主穗小穗数 Number of spikelets per main spike	15.67	76.89	40.90	61.22	10.04	24.55	2.045 7
不育穗数 Number of sterile panicles	0.56	8.44	2.78	7.88	1.55	56.00	1.906 2
有效分蘖数 Number of effective tillers	1.00	2.56	1.89	1.56	0.41	21.81	1.885 9
小穗粒数 Number of grains per spikelet	19.78	126.78	72.18	107.00	15.84	21.94	1.960 6
穗轮层数 Number of spike layers	4.89	8.33	7.25	3.44	0.71	9.73	1.971 6
千粒重 1 000-grain weight/g	13.20	42.80	28.58	29.60	6.82	23.88	2.052 6



* $P < 0.05$.

图 1 102 份燕麦种质资源数量性状相关性

Fig. 1 Correlation between quantitative traits of the 102 oat germplasm resources

84.788%。其中,第 1 主成分特征值 4.854,贡献率 49.149%,主穗长的特征向量值最大(0.842),为主要影响因子,其次为株高(0.835)和主穗小穗数(0.829);第 2 主成分的特征值 1.815,贡献率

14.228%,千粒重特征向量值为正值最大(0.718),茎粗(0.641)和小穗粒数(0.543)次之;第 3 主成分的特征值 1.532,贡献率 11.847%,旗叶长特征向量值为正值最大(0.825),其次是旗叶宽(0.376)和有效分蘖(0.362);第 4 主成分的特征值 1.253,贡献率 9.564%,有效分蘖特征向量值最大(0.815),其次是不育穗数(0.387)、主穗小穗数(0.341)和小穗粒数(0.239)。根据 4 个主成分的权重及各性状的特征值计算不同燕麦种质的综合评价(D 值),结果(表 5)表明,94、6、4、38、11、71、18、16、5、9、42、23、51、63 号共 14 份材料的综合得分较高,综合表现较优,而 53 号材料的综合得分最低。

2.4 燕麦农艺性状聚类分析

为了进一步分析 102 份燕麦种质材料的综合表现,对这些种质数量性状的综合评价(D 值)进行聚类分析,结果(图 2)表明,在遗传距离为 8 处可将供试燕麦材料划分为 3 个类群。其中,在主成分分析中 D 值较高的 14 份材料均归到类群 III 中(图 2)。

表4 102份燕麦种质资源数量性状主成分分析

Table 4 Principal component analysis of agronomic quantitative traits in the 102 oat germplasm resources

性状 Characteristic	主成分1 PC 1	主成分2 PC 2	主成分3 PC 3	主成分4 PC 4
株高 Plant height/mm	0.835	-0.355	-0.162	-0.333
茎粗 Stem thickness/mm	0.423	0.641	-0.005	-0.179
旗叶长 Flag leaf length/cm	0.323	-0.107	0.825	-0.244
旗叶宽 Flag leaf width/mm	0.598	0.319	0.376	-0.258
穗下茎节长 Peduncle length/cm	0.724	-0.407	-0.247	-0.312
主穗长 Main spike length/cm	0.842	-0.315	0.117	-0.212
茎节数 Number of stem nodes	0.636	-0.048	-0.386	-0.047
主穗小穗数 Number of spikelets per main spike	0.829	0.282	0.047	0.341
不育穗数 Number of sterile panicles	0.469	0.056	-0.125	0.387
有效分蘖数 Number of effective tillers	0.105	-0.327	0.362	0.815
小穗粒数 Number of grains per spikelet	0.753	0.543	0.214	0.239
穗轮层数 Number of spike layers	0.814	0.221	-0.205	0.095
千粒重 1 000-grain weight/g	-0.314	0.718	-0.159	-0.138
特征值 Eigenvalues	4.854	1.815	1.532	1.253
贡献率 Contribution rate/%	49.149	14.228	11.847	9.564
累计贡献率 Cumulative contribution rate/%	49.149	63.377	75.224	84.788

表5 102份燕麦种质资源综合评价(D值)

Table 5 Comprehensive evaluation of the 102 oat germplasm resources(D value)

编号 Code	D	排名 Rank	编号 Code	D	排名 Rank	编号 Code	D	排名 Rank
1	0.575	54	35	0.572	56	69	0.517	72
2	0.509	74	36	0.408	93	70	0.507	76
3	0.582	50	37	0.667	18	71	0.807	6
4	0.822	3	38	0.819	4	72	0.436	90
5	0.736	9	39	0.546	65	73	0.332	100
6	0.857	2	40	0.546	66	74	0.561	60
7	0.674	17	41	0.658	22	75	0.612	38
8	0.684	15	42	0.720	11	76	0.435	91
9	0.736	10	43	0.588	49	77	0.507	77
10	0.646	25	44	0.604	44	78	0.569	57
11	0.808	5	45	0.483	82	79	0.611	40
12	0.617	35	46	0.537	67	80	0.350	99
13	0.401	96	47	0.644	27	81	0.444	86
14	0.610	41	48	0.397	97	82	0.519	71
15	0.524	70	49	0.658	21	83	0.404	95
16	0.754	8	50	0.555	63	84	0.601	47
17	0.657	23	51	0.708	13	85	0.493	80
18	0.777	7	52	0.438	89	86	0.567	59
19	0.634	31	53	0.125	102	87	0.568	58
20	0.604	42	54	0.407	94	88	0.490	81
21	0.659	20	55	0.476	84	89	0.465	85
22	0.616	36	56	0.632	32	90	0.507	78
23	0.713	12	57	0.559	61	91	0.314	101
24	0.416	92	58	0.558	62	92	0.526	68
25	0.642	28	59	0.443	87	93	0.573	55
26	0.509	75	60	0.481	83	94	0.905	1
27	0.618	34	61	0.591	48	95	0.638	30
28	0.577	52	62	0.525	69	96	0.604	43
29	0.647	24	63	0.698	14	97	0.439	88
30	0.602	46	64	0.580	51	98	0.552	64
31	0.611	39	65	0.664	19	99	0.577	53
32	0.645	26	66	0.613	37	100	0.495	79
33	0.640	29	67	0.631	33	101	0.376	98
34	0.679	16	68	0.515	73	102	0.603	45

类群 I 包含 17 份燕麦种质,占供试资源总数的 16.67%。该类群种质大多为裸燕麦,穗型以周散型为主,穗色为黄色,小穗形分为串铃形和鞭炮形,少数为纺锤形,弱芒性,芒色主要为白色和黑色,茎秆颜色均为黄色,芒型主要为挺直和弯曲。该类群种质的株高(平均 69.19 cm)、主穗长(平均 15.98 cm)、茎节数(平均 4.93 节)、穗轮层数(平均 6.22 层)均最低,分蘖能力较弱,可用作选育矮秆品种的亲本。

类群 II 包含 30 份燕麦种质,占供试资源总数的 29.41%。该类群种质多数为皮燕麦,穗型以周散型为主,穗色丰富,有白色、黄色和褐色,以纺锤形为主要小穗型,多数弱芒性,少数强芒性,芒色主要为白色和黑色,茎秆颜色均为黄色,芒型主要为挺直和弯曲。该类群种质的平均千粒重(平均 34.24 g)最大,变异系数(16.43%)最低;茎粗(平均 4.51 mm)、主穗长(平均 17.72 cm)、主穗

小穗数(平均 38.57 个)、小穗粒数(平均 70.27 个)较大,变异系数均最低(分别为 10.63%、15.67%、17.57%)。该类群籽粒相关性状表现较突出,在选育高籽粒产量品种上有较大应用潜力。

类群 III 包含 55 份燕麦种质,占供试资源总数的 53.92%。该类群种质多数为裸燕麦,穗型多数是周散型,少数为侧紧型、侧散型、周紧型,穗色较丰富,有白色和黄色,小穗形主要为鞭炮形和串铃形,少数纺锤形,弱芒性,芒色主要是白色,茎秆颜色均为黄色,芒型大部分是挺直,少部分是弯曲。该类群种质的平均株高(90.36 cm)、茎粗(4.97 mm)、旗叶长(16.11 cm)、旗叶宽(13.11 mm),较大,分蘖能力较好且变异系数较小(19.09%),主穗小穗数(46.17 个)、小穗粒数(77.56 个)变异系数均最大(分别为 18.75%和 19.84%)。该类群种质在选育高秆品种和高产饲用品种上有较大应用潜力。

表 6 燕麦各类群 13 个农艺性状变异情况

Table 6 Variation of the 13 agronomic traits in oat populations

性状 Characteristic	指标 Index	种质群 Germplasm group		
		I	II	III
株高 Plant height/cm	平均值 Mean	69.19	73.37	90.36
	变异系数 CV/%	11.47	10.91	14.68
茎粗 Stem thickness/mm	平均值 Mean	4.34	4.51	4.97
	变异系数 CV/%	12.17	7.96	11.35
旗叶长 Flag leaf length/cm	平均值 Mean	15.36	15.58	16.11
	变异系数 CV/%	15.35	16.61	14.82
旗叶宽 flag leaf width/mm	平均值 Mean	10.62	11.45	13.11
	变异系数 CV/%	21.10	13.17	10.63
穗下茎节长 Peduncle length/cm	平均值 Mean	53.20	55.66	68.93
	变异系数 CV/%	13.16	12.78	17.07
主穗长 Main spike length/cm	平均值 Mean	15.98	17.72	21.43
	变异系数 CV/%	15.54	10.63	13.57
茎节数 Number of stem nodes	平均值 Mean	4.93	5.53	5.82
	变异系数 CV/%	10.39	10.61	9.08
主穗小穗数 Number of spikelets per main spike	平均值 Mean	27.96	38.57	46.17
	变异系数 CV/%	20.81	15.67	18.75
不育穗数 Number of sterile panicles	平均值 Mean	1.76	1.81	3.62
	变异系数 CV/%	55.48	50.19	41.24
有效分蘖 Number of effective tillers	平均值 Mean	1.80	1.83	1.94
	变异系数 CV/%	28.58	22.75	19.09
小穗粒数 Number of grain per spikelet	平均值 Mean	58.17	70.27	77.56
	变异系数 CV/%	23.88	17.57	19.84
穗轮层数 Number of spike layers	平均值 Mean	6.22	7.11	7.64
	变异系数 CV/%	9.63	7.88	5.20
千粒重 1 000-grain weight/g	平均值 Mean	26.34	34.24	26.18
	变异系数 CV/%	25.96	16.43	21.28

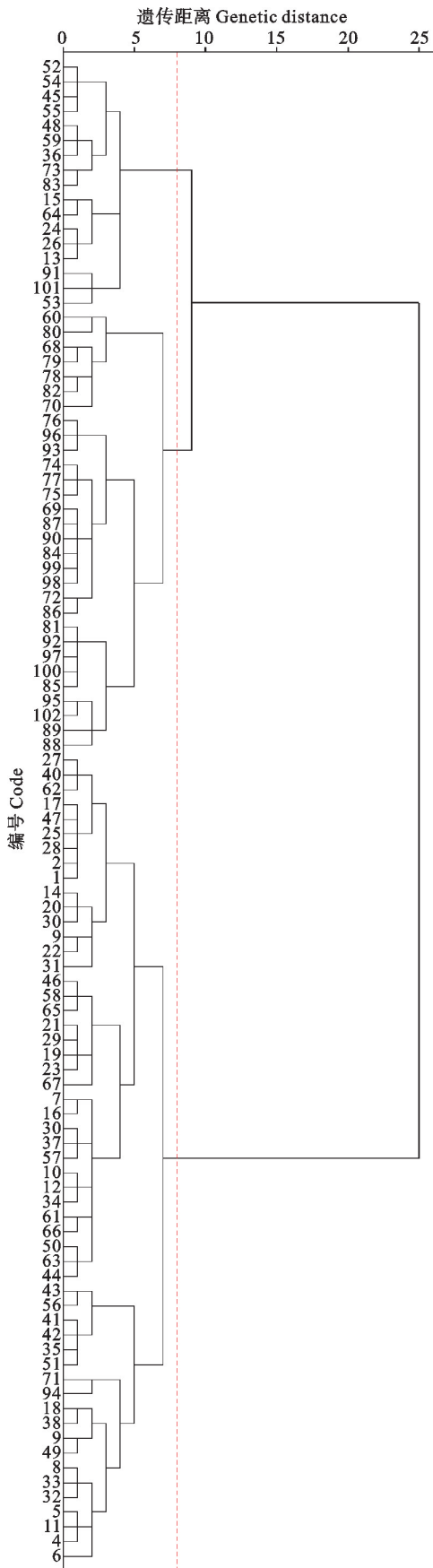


图 2 102 份燕麦种质资源聚类分析

Fig. 2 Cluster analysis of the 102 oat germplasm resources

3 讨论

3.1 102 份燕麦种质资源遗传多样性分析

种质资源的遗传多样性是燕麦育种的基石。然而,在实际的新品种选育过程中,亲本选择往往带有一定的盲目性和随机性,这不仅影响育种效率,也限制了杂种优势的发挥。重要的农艺性状数据对准确鉴定质资源尤为重要。本研究选取了山西省北部地区种植的 102 份燕麦种质资源,通过综合考虑变异系数和多样性指数,对种质资源的质量性状和数量性状进行了科学的分类,从而准确地揭示了种质间的差异,避免了传统仅凭经验直观分类的局限性。8 个质量性状指标中,小穗形的遗传多样性指数最高,而 13 个数量性状指标中则以千粒重的遗传多样性指数最高,且其中 12 个性状的变异系数均大于 10%,特别是主穗小穗数、小穗粒数、千粒重这 3 个产量相关指标的变异系数分别达到了 24.55%、21.94%、23.88%,处于偏高水平,这与陈新托等^[26]和武永祯等^[27]的研究结果一致。这说明不同燕麦种质资源在同一地理环境下农艺性状上差异较大^[13],为优质亲本选育及种质创新的应用创造了更多可能性。

3.2 102 份燕麦种质资源的相关性分析和综合评价

作物种质资源性状的评价体系直接影响遗传育种。已有研究证实,各种质资源农艺性状间存在着相互促进和抑制的关联性,即使某些性状的关联度较低,也可能具有潜在的遗传联系^[28-30]。因此,在种质资源的评价过程中,不应仅依据单一农艺性状判定种质资源优异性,而应通多性状综合评价进行有效分类和筛选,以避免育种材料的浪费。本研究对 102 份燕麦种质资源的 21 个重要农艺性状指标进行了相关性分析可以较直观地区分出各指标间关联程度的高低,如,株高与穗下茎节长之间相关系数较大,而千粒重则与主穗小穗数之间相关系数较大,通过了解性状间的紧密程度可以优化育种选择,减少盲目性,明确育种目标。

本研究通过主成分分析从燕麦 13 个农艺性状中提取出 4 个主成分,其累计方差贡献率达 84.788%。其中,第 1 主成分可作为种质资源的形态因子,育种时可关注主穗长、株高和主穗小穗数表现较好的品种,这与梁国玲等^[6]研究基本一致;第 2 主成分可作为燕麦籽粒特性因子,千粒重、茎粗和小穗粒数对其影响较大;第 3 主成分作

为燕麦草产量因子,其中,旗叶长和宽影响光合效率,可间接影响产量,而株高则是燕麦产量的关键指标之一,株高较大往往意味着更强的光合能力和更高的生物量积累,从而直接促进产量提升^[9],育种时可通过增加旗叶长和宽、有效分蘖和株高来提高燕麦草产量;第 4 主成分与有效分蘖、穗粒数、小穗数有关,可作为籽粒产量因子,千粒重特征向量值为负,表示千粒重过大反而影响了籽粒产量,育种需综合考量。因此,可以通过对燕麦种质单个或多个农艺性状进行选择以提高优异种质的筛选效率。此外,本研究仅对 102 份燕麦种质资源的重要表型农艺性状的遗传多样性做了初步探讨和评价,具有一定的局限性,未来将在多点多地继续进一步的试验。

4 结 论

102 份供试燕麦种质资源遗传多样性较高,质量性状中,小穗形的遗传多样性最高(1.10);数量性状中,千粒重的遗传多样性指数最高(2.0526)、其次为主穗小穗数(2.0457)、主穗长(2.0416);变异系数较大的性状是不育穗数(56.00%)、主穗小穗数(24.55%)、千粒重(23.88%)、小穗粒数(21.94%);基于主成分分析,筛选出 340、坝苽 14 号、饲草 1 号、草苽 1 号、坝苽 3 号、白燕 19 号、晋燕 8 号、定苽 9 号、坝苽 13 号、坝苽 12 号、469、固燕 2 号、118、114 共 14 个综合性状表现优异种质材料。此外,通过聚类分析可将 102 份燕麦种质资源分为 3 类,类群 I 可用作选育矮秆品种的亲本,类群 II 可用作选育高籽粒产量品种的亲本,类群 III 可用作选育高秆品种和高产饲用品种的亲本。

参 考 文 献:

[1] BUTT M S, TAHIR N M, KHAN M K I, *et al.* Oat: Unique among the cereals [J]. *European Journal of Nutrition*, 2008, 47(2): 68.

[2] 杨崇庆, 常耀军, 杨 娇, 等. 燕麦生产及品种选育技术研究进展[J]. 麦类作物学报, 2022, 42(5): 578.

YANG C Q, CHANG Y J, YANG J, *et al.* Research progress of oats production and breeding selection technology [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2022, 42(5): 578.

[3] 郑殿升, 杨庆文. 中国作物野生近缘植物资源[J]. 植物遗传资源学报, 2014, 15(1): 1.

ZHENG D S, YANG Q W. Genetic resources of wild relatives of crops in China [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2014, 15(1): 1.

[4] 纪明雪, 张智勇, 齐冰洁, 等. 燕麦种质资源抗倒伏及生物学性状的差异评价[J]. 麦类作物学报, 2023, 43(4): 453.

JI M X, ZHANG Z Y, QI B J, *et al.* Evaluation of lodging resistance and difference of biological characters of oat germplasm resources [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2023, 43(4): 453.

[5] 王宇欣. 40 份燕麦种质资源农艺性状和品质性状评价[D]. 太谷: 山西农业大学, 2020: 1.

WANG Y X. Evaluation of agronomic and quality traits of 40 oat germplasm resources [D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2020: 1.

[6] 梁国玲, 刘文辉, 马 祥. 590 份皮燕麦种质资源穗部性状遗传多样性分析[J]. 草地学报, 2021, 29(3): 495.

LIANG G L, LIU W H, MA X. Phenotypic diversity of the panicle among 590 covered oats germplasm resources in apline of Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(3): 495.

[7] 赵秀芳, 戎郁萍, 赵来喜. 我国燕麦种质资源的收集和评价[J]. 草业科学, 2007, 24(3): 36.

ZHAO X F, RONG Y P, ZHAO L X. The collection and evaluation of oat (*Avena sativa*) in China [J]. *Pratacultural Science*, 2007, 24(3): 36.

[8] 郑殿升, 王晓鸣, 张 京. 燕麦种质资源描述规范和数据标准[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006: 1.

ZHENG D S, WANG X M, ZHANG J. Specification and data standards for describing oat germplasm resources [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2006: 1.

[9] 南 铭, 赵桂琴, 柴继宽. 黄土高原半干旱区饲用燕麦种质表型性状遗传多样性分析及综合评价[J]. 草地学报, 2017, 25(6): 1197.

NAN M, ZHAO G Q, CHAI J K. Phenotypic diversity and comprehensive evaluations of *Avena sativa* L. germplasm in semi-arid area of the Loess Plateau [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2017, 25(6): 1197.

[10] 王凤宇, 梁国玲, 刘文辉. 590 份燕麦种质资源营养器官表型性状遗传多样性分析[J]. 草地学报, 2024, 32(1): 158.

WANG F Y, LIANG G L, LIU W H. Genetic diversity analysis of nutritional organs phenotype in 590 oat germplasms [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(1): 158.

[11] 史京京, 薛盈文, 郭 伟, 等. 黑龙江西部地区引进的饲用燕麦种质资源遗传多样性分析及综合评价[J]. 南方农业学报, 2019, 50(3): 515.

SHI J J, XUE Y W, GUO W, *et al.* Genetic diversity analysis and comprehensive evaluation of introduced *Avena sativa* L. germplasm resources in the western area of Heilongjiang [J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2019, 50(3): 515.

[12] 耿小丽, 张 榕, 张少平, 等. 130 份燕麦种质表型性状多样性分析及评价[J]. 草业科学, 2020, 37(10): 2022.

GENG X L, ZHANG R, ZHANG S P, *et al.* Comprehensive evaluation of the phenotypic diversity of 130 oat germplasms [J]. *Pratacultural Science*, 2020, 37(10): 2022.

[13] 孙艳楠, 路耿新, 唐 超, 等. 134 份皮燕麦种质资源生物学性状遗传多样性分析[J]. 草地学报, 2023, 31(9): 2684.

SUN Y N, LU G X, TANG C, *et al.* Genetic diversity of bio-

- logical characters in 134 covered oats germplasm resources [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(9): 2684.
- [14] 张向前, 刘景辉, 齐冰洁, 等. 燕麦种质资源主要农艺性状的遗传多样性分析[J]. 植物遗传资源学报, 2010, 11(2): 168.
ZHANG X Q, LIU J H, QI B J, *et al.* Cluster diversity analysis of the main agronomic traits in oat germplasm [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2010, 11(2): 168.
- [15] JELLEN E N, LADIZINSKY G. Giemsa C-banding in *Avena insularis* ladizinsky [J]. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 2000, 47(3): 227.
- [16] HANIF Z, SWATI Z A, KHAN I, *et al.* RAPD and SSR analysis of wild oats (*Avena* species) from North West frontier Province of Pakistan [J]. *African Journal of Plant Science*, 2008, 2(11): 133.
- [17] 刘欢, 赵桂琴, 耿小丽, 等. 燕麦 AFLP 反应体系的建立与优化[J]. 草业科学, 2008, 25(2): 84.
LIU H, ZHAO G Q, GENG X L, *et al.* Establishment and optimization of an AFLP reaction system for oats [J]. *Pratacultural Science*, 2008, 25(2): 84.
- [18] SUPRIYA A, SENTHILVEL S, NEPOLEAN T, *et al.* Development of a molecular linkage map of pearl millet integrating DArT and SSR markers [J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2011, 123(2): 239.
- [19] 张恩来, 张宗文, 王天宇, 等. 构建我国燕麦核心种质的取样策略研究[J]. 植物遗传资源学报, 2008, 9(2): 151.
ZHANG E L, ZHANG Z W, WANG T Y, *et al.* Studies on sampling strategies to develop core collection of Chinese oat germplasm [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2008, 9(2): 151.
- [20] HE X, BJØRNSTAD Å. Diversity of North European oat analyzed by SSR, AFLP and DArT markers [J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2012, 125(1): 57.
- [21] 李润枝, 陈晨, 张培培, 等. 我国燕麦种质资源与遗传育种研究进展[J]. 现代农业科技, 2009(17): 44.
LI R Z, CHEN C, ZHANG P P, *et al.* Advances in research on genetic resources and breeding and genetics of oat (*Avena sativa* L.) [J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2009(17): 44.
- [22] 董春英, 陈明皋, 黄守成, 等. 闽楠大田播种育苗及富根壮苗培育技术研究[J]. 中国农学通报, 2014, 30(16): 48.
DONG C Y, CHEN M G, HUANG S C, *et al.* Studies on field sowing practice and the cultivation technology of strong root and seedling of *Phoebe bournei* [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(16): 48.
- [23] 李洪成, 张茂军, 马广斌. SPSS 数据分析实用教程[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2017: 338.
LI H C, ZHANG M J, MA G B. SPSS data analysis [M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2017: 338.
- [24] 索荣臻, 王明玖, 赵天启, 等. 不同饲用大豆品种(系)生产性能的综合评价[J]. 大豆科学, 2020, 39(6): 848.
SUO R Z, WANG M J, ZHAO T Q, *et al.* Comprehensive evaluation of the production performance of different forage soybean varieties (lines) [J]. *Soybean Science*, 2020, 39(6): 848.
- [25] 刘温, 陈雅坤, 赵连生, 等. 基于主成分和隶属度函数分析评价不同混播比例的燕麦和豌豆混合青贮的发酵品质[J]. 中国饲料, 2023(17): 111.
LIU W, CHEN Y K, ZHAO L S, *et al.* Evaluation of the fermentation quality of oat and pea mixed silage with different mixing proportion based on principal component analysis and membership function analysis [J]. *China Feed*, 2023(17): 111.
- [26] 陈新, 吴斌, 张宗文. 燕麦种质资源重要农艺性状适应性和稳定性评价[J]. 植物遗传资源学报, 2016, 17(4): 577.
CHEN X, WU B, ZHANG Z W. Evaluation of adaptability and stability for important agronomic traits of oat (*Avena* spp.) germplasm resources [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2016, 17(4): 577.
- [27] 武永祯, 张斌, 王霞, 等. 华北燕麦主栽品种生产性能评价与遗传多样性分析[J]. 西南农业学报, 2018, 31(3): 448.
WU Y Z, ZHANG B, WANG X, *et al.* Evaluation on productivity performance and genetic diversity of 20 major oat cultivars in North China [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2018, 31(3): 448.
- [28] 孔德伟, 陈德全, 周良强, 等. 杂交水稻几个重要农艺及产量性状的主成分分析[J]. 中国农学通报, 2005, 21(8): 117.
KONG D W, CHEN D Q, ZHOU L Q, *et al.* The principle components analysis of several agronomic and yield traits of rice [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 21(8): 117.
- [29] 柴华, 杨翌, 申忠宝, 等. 9个燕麦品种在齐齐哈尔地区的农艺性状及饲草品质评价[J]. 麦类作物学报, 2023, 43(11): 1426.
CHAI H, YANG Z, SHEN Z B, *et al.* Evaluation of agronomic characteristics and forage quality of nine oat varieties in Qiqihar [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2023, 43(11): 1426.
- [30] 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.
BAI Z Y, LI C D, SUN H C, *et al.* Principal component analysis and comprehensive evaluation on physiological indices of drought resistance in wheat substitution [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(12): 4264.
- [31] 王建丽, 马利超, 申忠宝, 等. 基于遗传多样性评估燕麦品种的农艺性状[J]. 草业学报, 2019, 28(2): 133.
WANG J L, MA L C, SHEN Z B, *et al.* An evaluation of agronomic traits and genetic diversity among 51 oat germplasm accessions [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2019, 28(2): 133.
- [32] 史京京, 薛盈文, 郭伟, 等. 引进燕麦种质资源饲草产量与饲用营养价值评价[J]. 麦类作物学报, 2019, 39(9): 1063.
SHI J J, XUE Y W, GUO W, *et al.* Evaluation of forage yield and nutritional value of introduced oat germplasm resources [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2019, 39(9): 1063.