

网络出版时间:2025-10-13

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1359.s.20251011.1026.002

179 份燕麦种质在成都平原的农艺性状遗传多样性分析及综合评价

张靓,梁小玉,胡远彬,田浩琦,刘亚男,季杨

(四川省畜牧科学研究院,四川成都 610066)

摘要:为给成都平原饲用燕麦育种提供参考,对 179 份燕麦种质 14 个主要农艺性状进行遗传多样性分析,并对其中 10 个数量性状进行聚类分析及主成分分析。结果表明,供试燕麦种质的遗传多样性指数较高,旗叶长遗传多样性指数最大(2.10);分蘖数变异系数最高(33.41%)。通过对 10 个数量性状的聚类分析,将 179 份燕麦种质分成 5 大类群。类群 I 可作为选育籽实目标为主的优秀亲本材料;类群 II 适合用作选育强分蘖的亲本材料;类群 III 优良性状不显著;类群 IV 各性状表现一般;类群 V 适合用作选育多目标性状的优秀亲本材料。经主成分分析,10 个数量性状中 5 个主成分累计贡献率为 84.57%,第 1 主成分反映饲草营养成分组成,第 2、第 3 主成分反映叶片形态特征,第 4 主成分反映分蘖,第 5 主成分反映株高。综合来看,燕麦种质 CF002393、CF003690、CF014719 和 CF003691 可作为成都燕麦品种选育的改良亲本,有利于加快成都平原地区的燕麦育种进程。

关键词: 燕麦;种质资源;遗传多样性;聚类分析;主成分分析

中图分类号:S512.6;S330

文献标识码:A

文章编号:1009-1041(2025)11-1493-10

Genetic Diversity Analysis and Comprehensive Evaluation of Agronomic Traits of 179 Oat Germplasms in Chengdu Plain

ZHANG Jing, LIANG Xiaoyu, HU Yuanbin, TIAN Haoqi, LIU Yanan, JI Yang

(Sichuan Animal Science Academy, Chengdu, Sichuan 610066, China)

Abstract: To provide key data for feeding oat breeding in Chengdu plain, the genetic diversity of agronomic traits of 179 oat germplasm accessions were objectively evaluated in this research. 14 agronomic traits were evaluated, a morphological diversity index was calculated for each of them. The cluster and principal component analyses were performed for 10 selected quantitative traits among them. It was found that the trait with the highest genetic diversity index was length of flag leaf ($H' = 2.04$), and the highest coefficient of variation (33.41%) was for vegetative tiller number. Cluster analysis divided the 179 oat germplasm accessions into five major groups. Group I would provide excellent parent material for breeding seed varieties. Group II was with potential for breeding high for tillering ability. Group III was without obvious beneficial traits. The characters of group IV were general. Group V was considered to provide excellent parent material for breeding projects involving multiple target traits. The principal component analysis reduced the 10 analyzed traits to 5 principal components which cumulatively explained 84.57% of the data variation. The first principal component was closely related to nutrient composition of forage grass. The second and the third principal component mainly reflected the leaf morphological characteristics. The fourth principal component mainly reflected

收稿日期:2024-12-26

修回日期:2025-03-31

基金项目:四川省肉羊创新团队项目(sccxt-d-2024-14);四川省科技计划项目(2021YFYZ0013-4);四川省财政运行专项(SASA2025CZYX003)

第一作者 E-mail:975413412@qq.com(张靓)

通讯作者 E-mail:23271042@qq.com(季杨)

ted tiller. The fifth principal component mainly reflected height. In summary, the 179 evaluated oat germplasm accessions introduced to Chengdu plain, have wide genetic diversity. Multivariate evaluation of measured traits indicated that accessions CF002393, CF003690, CF014719 and CF003691 can be used as parents to improve local oat varieties.

Keywords: Oat; Germplasm; Genetic diversity; Cluster analysis; Principal component analysis

燕麦(*Avena sativa*)是禾本科(Poaceae)燕麦属(*Avena* L.)植物,在中国内蒙古、青海、甘肃、黑龙江、吉林、辽宁、河北、四川、西藏等省份广泛分布^[1-3]。有关燕麦种植、育种和应用的研究在西北、华北较多^[4-6]。通过开展燕麦在南方地区种质资源适应性的研究,可推动其在南方的普及和运用,为南方畜牧业提供优质饲草料^[7]。值得注意的是,虽然地方育种单位培育的燕麦品种对该地的适应能力优良,但较弱的广适性和较低的品种利用效率致使燕麦种质资源遗传物质基础狭小,制约中国燕麦育种技术的整体发展^[7-10]。所以,开展基于成都平原地区的燕麦种质筛选培育,有利于成都平原及类似区域燕麦产业的发展。燕麦具有产量高、营养丰富、抗寒、耐旱、抗盐碱的特点,适应能力强,是粮饲兼用作物^[11-14]。中国燕麦育种重点聚焦于裸燕麦(*Avena nuda*),更多重视籽粒产量与品质,而饲用燕麦育种较滞后^[15]。尽管中国拥有丰富的燕麦种质资源,但在培育新品种的效率以及提高生产能力方面较落后^[16]。燕麦种质资源的收集与评价是新品种培育的物质基础,有利于新基因的挖掘及品种选育与改良,而种质资源的丰富程度基本上决定于其遗传多样性^[17]。植物的遗传多样性与表型性状有极高的关联性^[18]。因此,立足四川平原地区,研究饲用燕麦种质资源农艺性状的遗传多样性具有重要意义。

本研究分析了 179 份国内外燕麦种质资源农艺性状、籽粒性状的遗传多样性及遗传亲缘关系,旨在为燕麦新基因挖掘、种质创新应用及成都平原地区燕麦种质筛选及育种提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于四川省畜牧科学研究院牧草课题组崇州市白头镇试验基地内。崇州位于岷江中上游川西平原西部,海拔 560 m,处北纬 30.63°、东经 103.60°,属四川盆地亚热带湿润季风气候。雨量充沛,年均降雨 1 012.4 mm。日照偏少,年均日照 1 161.5 h。年均温 16.5 °C,最热月 8 月

平均气温为 26 °C,最冷月 1 月平均气温为 5.5 °C,极端最高气温 36 °C,极端最低气温 -4.0 °C;无霜期为 284 d,≥10 °C 年积温为 5 548.0 °C。试验地土壤为水稻土,pH 值 6.21,全氮含量 3.52 g·kg⁻¹,全磷含量 1.10 g·kg⁻¹,全钾含量 12.07 g·kg⁻¹。

1.2 材料

179 份燕麦种质来源于全国畜牧总站国家草种质资源库(表 1)。

1.3 试验设计

试验采用随机区组设计,燕麦于 2020 年 10 月 22 日人工开沟条播,行距 30 cm,小区面积 15 m²(5 m×3 m),播种量为 120 kg·hm⁻²。播种前撒施复合肥 134 kg·hm⁻²,分蘖期和拔节期人工除草各 1 次,其余按照常规田间管理水平实施。

1.4 性状调查统计

依照《燕麦种质资源描述规范和数据标准》^[19]调查记录,分为质量性状和数量性状。完熟期测定 4 个质量性状:芒色、籽粒形状、籽粒颜色和种子皮裸性。灌浆期每个小区内随机选取 10 株用于测定株高、茎粗、旗叶长、旗叶宽、倒二叶长、倒二叶宽、叶片数、绿叶数和分蘖数 9 个数量性状;蜡熟期每小区随机选取 10 株测定千粒重。

1.5 数据分析

应用 Excel 2010 和 SAS 9.2 软件统计和分析数据。质量性状赋值后计算各性状的多样性指数和频率^[8]。数量性状计算最大值、最小值、平均值、标准差、变异系数和多样性指数。依据平均数 \bar{x} 、标准差 s 把数量性状分为 10 个等级 X_1 至 X_{10} ,第 1 级 $X_1 < (\bar{x} - 2s)$,第 10 级 $X_{10} \geq (\bar{x} + 2s)$,每 $0.5s$ 是 1 个等级,利用每组的相对频率来计算多样性指数^[20]。遗传多样性指数计算公式为: $H' = -\sum P_i \times \ln P_i$,式中, H' 是遗传多样性指数, P_i 是某性状第 i 个等级的出现频率^[21]。使用 R 3.4.1 语言及利用 Circlize 包对燕麦种质实施聚类并绘制圆形聚类分析图。利用 SAS 9.2 软件对主要农艺性状开展主成分分析。

表 1 燕麦种质编号与来源
Table 1 Origins and names of the oat germplasms in this study

序号 Code	种质编号 Name of germplasm	种质来源 Origin	序号 Code	种质编号 Name of germplasm	种质来源 Origin	序号 Code	种质编号 Name of germplasm	种质来源 Origin	序号 Code	种质编号 Name of germplasm	种质来源 Origin
1	CF002901	甘肃天祝 Tianzhu	46	CF039267	甘肃天祝 Tianzhu	91	CF007392	青海湟中 Huangzhong	136	CF035325	甘肃岷县 Minxian
2	CF002900	甘肃天祝 Tianzhu	47	CF039268	甘肃天祝 Tianzhu	92	CF014721	青海湟中 Huangzhong	137	CF035324	甘肃天祝 Tianzhu
3	CF002898	甘肃天祝 Tianzhu	48	CF039269	甘肃天祝 Tianzhu	93	CF014719	青海湟中 Huangzhong	138	CF035323	甘肃天祝 Tianzhu
4	CF002892	甘肃天祝 Tianzhu	49	CF039270	甘肃天祝 Tianzhu	94	CF007391	青海湟中 Huangzhong	139	CF035322	甘肃岷县 Minxian
5	CF002886	甘肃天祝 Tianzhu	50	CF039271	甘肃天祝 Tianzhu	95	CF014718	青海湟中 Huangzhong	140	CF035321	甘肃岷县 Minxian
6	CF002884	甘肃天祝 Tianzhu	51	CF039272	甘肃天祝 Tianzhu	96	CF014717	青海湟中 Huangzhong	141	CF014579	美国 America
7	CF002883	甘肃天祝 Tianzhu	52	CF039273	甘肃天祝 Tianzhu	97	CF007389	青海湟中 Huangzhong	142	CF014686	甘肃天祝 Tianzhu
8	CF002882	甘肃天祝 Tianzhu	53	CF039274	甘肃天祝 Tianzhu	98	CF007388	青海湟中 Huangzhong	143	CF014664	甘肃天祝 Tianzhu
9	CF002880	甘肃武威 Wuwei	54	CF039275	甘肃天祝 Tianzhu	99	CF002398	内蒙古呼和浩特 Huhhot	144	CF014602	甘肃肃南 Sunan
10	CF002879	甘肃武威 Wuwei	55	CF039276	甘肃天祝 Tianzhu	100	CF002395	内蒙古呼和浩特 Huhhot	145	CF014599	甘肃肃南 Sunan
11	CF002876	甘肃武威 Wuwei	56	CF035473	青海互助 Huzhu	101	CF002393	内蒙古呼和浩特 Huhhot	146	CF014598	云南昆明 Kunming
12	CF002874	甘肃武威 Wuwei	57	CF035529	青海互助 Huzhu	102	CF003679	四川红原 Hongyuan	147	CF014582	四川洪雅 Hongya
13	CF002871	甘肃武威 Wuwei	58	CF035530	青海互助 Huzhu	103	CF014966	青海湟中 Huangzhong	148	CF039280	西藏林周 Linzhou
14	CF002870	甘肃武威 Wuwei	59	CF035531	青海互助 Huzhu	104	CF014964	青海湟中 Huangzhong	149	CF039281	西藏林周 Linzhou
15	CF002869	甘肃武威 Wuwei	60	CF035593	青海湟中 Huangzhong	105	CF014963	青海湟中 Huangzhong	150	CF008576	内蒙古呼和浩特 Huhhot
16	CF002868	甘肃武威 Wuwei	61	CF015012	青海湟中 Huangzhong	106	CF007468	青海湟中 Huangzhong	151	CF015072	贵州贵阳 Guiyang
17	CF002867	甘肃武威 Wuwei	62	CF015013	青海湟中 Huangzhong	107	CF007467	青海湟中 Huangzhong	152	CF035599	四川西昌 Xichang
18	CF002866	甘肃武威 Wuwei	63	CF015023	青海湟中 Huangzhong	108	CF007423	青海湟中 Huangzhong	153	CF035598	四川茂县 Maoxian
19	CF002864	甘肃武威 Wuwei	64	CF014756	青海湟中 Huangzhong	109	CF014727	青海湟中 Huangzhong	154	CF035343	湖北神农架 Shennongjia
20	CF002860	甘肃武威 Wuwei	65	CF015024	青海湟中 Huangzhong	110	CF014726	青海湟中 Huangzhong	155	CF039244	陕西旬邑 Xunyi
21	CF002858	甘肃武威 Wuwei	66	CF015025	青海湟中 Huangzhong	111	CF003698	甘肃景泰 Jingtai	156	CF002672	陕西眉县 Meixian
22	CF002857	甘肃武威 Wuwei	67	CF007383	青海湟中 Huangzhong	112	CF003696	甘肃景泰 Jingtai	157	CF003099	湖北红安 Hongan
23	CF002897	甘肃天祝 Tianzhu	68	CF014755	青海湟中 Huangzhong	113	CF003692	甘肃景泰 Jingtai	158	CF003102	湖北麻城 Macheng
24	CF002896	甘肃天祝 Tianzhu	69	CF007384	青海湟中 Huangzhong	114	CF003691	甘肃景泰 Jingtai	159	CF003113	湖北麻城 Macheng
25	CF002895	甘肃天祝 Tianzhu	70	CF014699	青海湟中 Huangzhong	115	CF003690	甘肃景泰 Jingtai	160	CF003115	湖北麻城 Macheng
26	CF002890	甘肃天祝 Tianzhu	71	CF014700	青海湟中 Huangzhong	116	CF014531	甘肃景泰 Jingtai	161	CF003121	湖北孝感 Xiaogan
27	CF002887	甘肃天祝 Tianzhu	72	CF007461	青海湟中 Huangzhong	117	CF014536	甘肃景泰 Jingtai	162	CF003152	湖北南漳 Nanzhang

(续表 1 Continued table 1)

序号 Code	种质编号 Name of germplasm	种质来源 Origin	序号 Code	种质编号 Name of germplasm	种质来源 Origin	序号 Code	种质编号 Name of germplasm	种质来源 Origin	序号 Code	种质编号 Name of germplasm	种质来源 Origin
28	CF002885	甘肃天祝 Tianzhu	73	CF014703	青海湟中 Huangzhong	118	CF003683	甘肃景泰 Jingtai	163	CF035328	甘肃天祝 Tianzhu
29	CF002881	甘肃武威 Wuwei	74	CF014704	青海湟中 Huangzhong	119	CF003695	甘肃景泰 Jingtai	164	CF019400	江西九江 Jiujiang
30	CF002877	甘肃武威 Wuwei	75	CF014706	青海湟中 Huangzhong	120	CF014537	甘肃兰州 Lanzhou	165	CF016702	甘肃古浪 Gulang
31	CF002873	甘肃武威 Wuwei	76	CF014707	青海湟中 Huangzhong	121	CF003681	甘肃兰州 Lanzhou	166	CF015075	贵州丹寨 Danzhai
32	CF002872	甘肃武威 Wuwei	77	CF014708	青海湟中 Huangzhong	122	CF040010	青海湟中 Huangzhong	167	CF015074	四川松潘 Songpan
33	CF002865	甘肃武威 Wuwei	78	CF014910	青海湟中 Huangzhong	123	CF001378	甘肃天祝 Tianzhu	168	CF015073	贵州独山 Dushan
34	CF002863	甘肃武威 Wuwei	79	CF014709	青海湟中 Huangzhong	124	CF014549	甘肃天祝 Tianzhu	169	CF000472	江苏扬州 Yangzhou
35	CF002862	甘肃武威 Wuwei	80	CF014911	青海湟中 Huangzhong	125	CF014548	甘肃天祝 Tianzhu	170	CF000471	江苏兴化 Xinghua
36	CF002861	甘肃武威 Wuwei	81	CF007385	青海湟中 Huangzhong	126	CF014547	甘肃天祝 Tianzhu	171	CF000452	江苏徐州 Xuzhou
37	CF002859	甘肃武威 Wuwei	82	CF014713	青海湟中 Huangzhong	127	CF014546	青海同德 Tongde	172	CF000451	江苏仪征 Yizheng
38	CF039259	甘肃天祝 Tianzhu	83	CF014714	青海湟中 Huangzhong	128	CF014545	青海同德 Tongde	173	CF000395	江苏射阳 Sheyang
39	CF039260	甘肃天祝 Tianzhu	84	CF014715	青海湟中 Huangzhong	129	CF014544	青海同德 Tongde	174	CF000392	江苏扬州 Yangzhou
40	CF039261	甘肃天祝 Tianzhu	85	CF014725	青海湟中 Huangzhong	130	CF003698	甘肃景泰 Jingtai	175	CF000390	江苏海安 Haian
41	CF039262	甘肃天祝 Tianzhu	86	CF007403	青海湟中 Huangzhong	131	CF014757	甘肃景泰 Jingtai	176	CF035318	陕西杨凌 Yanglin
42	CF039263	甘肃天祝 Tianzhu	87	CF007395	青海湟中 Huangzhong	132	CF002204	甘肃景泰 Jingtai	177	CF039279	湖北神农架 Shennongjia
43	CF039264	甘肃天祝 Tianzhu	88	CF007394	青海湟中 Huangzhong	133	CF014532	甘肃景泰 Jingtai	178	CF006930	甘肃碌曲 Luqu
44	CF039265	甘肃天祝 Tianzhu	89	CF014724	青海湟中 Huangzhong	134	CF035327	甘肃天祝 Tianzhu	179	CF012878	四川广元 Guangyuan
45	CF039266	甘肃天祝 Tianzhu	90	CF014723	青海湟中 Huangzhong	135	CF035326	甘肃岷县 Minxian			

2 结果与分析

2.1 燕麦种质资源质量性状遗传多样性分析

对 179 份燕麦种质资源 4 个质量性状的遗传多样性分析结果(表 2)显示,籽粒颜色的遗传多样性指数最高,为 1.32,其中多数材料的籽粒是黄色和浅黄色,两者分布总频率为 0.77,表明该性状遗传差异大;芒色以无芒为主,频率为 0.45;粒形主要为纺锤形,频率为 0.68;皮裸性主要为皮燕麦,频率为 0.85。由表 2 可知,4 个质量性状的遗传多样性指数由大到小依次为粒色>芒色>粒形>皮裸性。

2.2 燕麦种质资源数量性状遗传变异分析

从 179 份燕麦种质资源 10 个数量性状的遗传多样性统计分析结果(表 3)可以看出,株高、分蘖数、茎粗、旗叶长和宽、倒二叶长和宽、叶片数、绿叶数及千粒重的变化范围分别为 118.90~

212.80 cm、5.00~25.00、0.33~0.76 cm、13.00~38.10 cm、1.00~3.70 cm、25.20~59.40 cm、1.30~3.80 cm、4.00~7.00 片、1.00~5.00 片和 11.03~52.78 g。其中,旗叶长的遗传多样性指数最高,为 2.10;叶片数的遗传多样性指数最低,为 1.91;10 个数量性状的多样性指数平均值 2.02,说明各性状拥有丰富的多样性,遗传基础广、差异大。

分蘖数变异系数最大,为 33.41%,说明供试的燕麦种质资源分蘖数存在较大的差异,变异类型多样,选择机会较大,用于品种改良的潜力大。株高的变异系数最小,仅 10.04%,表明此性状在供试的燕麦品种间差异较小,比较稳定。对燕麦饲草生产起关键作用的分蘖数、旗叶宽、绿叶片数以及千粒重,变异系数差异较大,表明供试品种间变异类型多样,亲本挑选范围大。

表 2 燕麦种质资源 4 个质量性状的遗传多样性分析

Table 2 Genetic diversity analysis of four quality traits in oat germplasm resources

性状 Characteristic	遗传多样性指数 Genetic diversity index	频率分布 Frequency distribution				
		1	2	3	4	5
皮/裸 Hulled/naked	0.42	0.85	0.15	—	—	—
粒色 Grain color	1.32	0.38	0.39	0.09	0.08	0.06
粒形 Grain type	0.82	0.09	0.68	0.23	—	—
芒色 Awn color	1.07	0.45	0.28	0.27	—	—

皮/裸:1=皮燕麦,2=裸燕麦;粒色:1=浅黄色,2=黄色,3=褐色,4=深褐色,5=黑色;粒形:1=卵圆形,2=纺锤形,3=披针形;芒色:1=无芒,2=黄色,3=黑色。

Hulled/Naked: 1=hulled, 2=naked; Grain color: 1=pale yellow, 2=yellow, 3=brown, 4=puce, 5=black; Grain type: 1=ellipse type, 2=spindle type, 3=lanceolate type; Awn color: 1=smooth, 2=yellow awn, 3=black awn.

表 3 燕麦种质资源 10 个数量性状的遗传多样性分析

Table 3 Genetic diversity analysis of 10 quantitative traits in oat germplasm resources

性状 Characteristic	平均值 Mean	标准差 SD	最大值 Minimum	最小值 Maximum	极差 Range	变异系数 CV/%	遗传多样性指数 Genetic diversity index
株高 Plant height/cm	168.33	16.91	212.80	118.90	93.90	10.04	2.04
每株分蘖数 Number of tillers per plant	11.02	3.68	25.00	5.00	20.00	33.41	1.92
茎粗 Stem thickness/cm	0.55	0.09	0.76	0.33	0.43	16.02	2.06
旗叶长 Length of flag leaf/cm	23.85	4.69	38.10	13.00	25.10	19.68	2.10
旗叶宽 Width of flag leaf/cm	2.23	0.46	3.70	1.00	2.70	20.76	2.02
倒二叶长 Length of second leaf/cm	38.63	5.84	59.40	25.20	34.20	15.13	2.04
倒二叶宽 Width of second leaf/cm	2.25	0.39	3.80	1.30	2.50	17.45	2.05
叶片数 Leaves per plant	5.54	0.57	7.00	4.00	3.00	10.36	1.91
绿叶片数 Green leaves per plant	3.37	0.74	5.00	1.00	4.00	21.99	1.97
千粒重 Thousand-grain weight/g	32.55	8.23	52.78	11.03	41.75	25.30	2.09

2.3 燕麦农艺性状聚类分析

聚类分析结果显示,179 份种质资源被分成 5 个类群(图 1),各类群的形态特征如表 4 所示。

类群 I 含有 31 份材料,编号为 1、4、6、7、9 等。这一类群以皮燕麦为主,粒色主要为浅黄或黄色,粒形主要是纺锤形,芒色多为黄色或无芒。株高、分蘖数、旗叶长和倒二叶长是 5 大类群中最低的,其值分别为 147.35 cm、9.80 个、20.16 cm 和 33.25 cm;千粒重是 5 大类群中最高的,为 38.38 g。株高、旗叶长的变异系数在 5 大类群中最大,分别是 8.50%、22.07%。

类群 II 含有 24 份材料,编号为 26、27、35、70、90 等。这一类群全部为皮燕麦,粒色主要为深褐色,粒形主要是披针形,芒色以黑色为主。茎粗、旗叶宽、倒二叶宽、叶片数和绿叶片数在 5 大类群中最低,其值分别为 4.79 cm、1.77 cm、1.96 cm、5.15 片和 2.86 片。分蘖数是 5 大类群中最

高的,为 13.41 个。分蘖数、茎粗、旗叶宽、倒二叶宽、叶片数和千粒重的变异系数在 5 大类群中最大,分别是 38.42%、20.74%、33.81%、21.38%、11.95%和 26.67%。

类群 III 包括 83 份材料,编号为 2、3、5、14、16 等。这一类群以皮燕麦为主,粒色以黄色或浅黄色为主,粒形主要是纺锤形,多为无芒。10 个性状值及其变异系数在 5 大类群中均处于中等水平。

类群 IV 含有 83 份材料,编号为 8、12、13、17、22 等。这一类群以皮燕麦为主,粒色大多是黄色,粒形主要是纺锤形,芒色多为无芒。10 个性状在 5 大类群中均处于中等水平。倒二叶长和绿叶片数的变异系数在 5 大类群中最大,分别是 15.12%和 22.10%。

类群 V 只有 1 份材料,编号为 101。该材料为皮燕麦,粒色深褐色,粒形纺锤形,无芒。株高、



图 1 燕麦种质资源聚类图
Fig. 1 Dendrography of the oat germplasm resources

表 4 燕麦资源各种质群性状特征

Table 4 Characteristics of various traits of the oat germplasm resources

性状 Character	指标 Index	种质群 Germplasm group				
		I	II	III	IV	V
株高 Plant height	平均值 Mean/cm	147.35	148.14	179.98	171.41	212.80
	变异系数 CV/%	8.50	5.86	4.81	3.31	0.00
单株分蘖数 Number of tillers per plant	平均值 Mean	9.80	13.41	10.67	10.97	11.40
	变异系数 CV/%	34.14	38.42	29.09	31.81	0.00
茎粗 Stem thickness	平均值 Mean/cm	6.27	4.79	5.55	5.28	7.59
	变异系数 CV/%	10.02	20.74	13.84	13.40	0.00
旗叶长 Length of flag leaf	平均值 Mean/cm	20.16	22.06	25.66	23.77	33.40
	变异系数 CV/%	22.07	16.89	15.76	19.16	0.00
旗叶宽 Width of flag leaf	平均值 Mean/cm	2.16	1.77	2.39	2.18	2.66
	变异系数 CV/%	18.72	33.81	15.60	17.54	0.00
倒二叶长 Length of second leaf	平均值 Mean/cm	33.25	36.48	41.28	38.16	54.35
	变异系数 CV/%	14.67	12.67	11.08	15.12	0.00
倒二叶宽 Width of second leaf	平均值 Mean/cm	2.26	1.96	2.35	2.17	2.45
	变异系数 CV/%	12.52	21.38	16.37	17.65	0.00
叶片数 Leaves per plant	平均值 Mean	5.56	5.15	5.54	5.43	6.30
	变异系数 CV/%	7.23	11.95	8.71	8.89	0.00
绿叶片数 Green leaves per plant	平均值 Mean	3.99	2.86	3.28	3.05	4.80
	变异系数 CV/%	13.71	15.41	15.89	22.10	0.00
千粒重 Thousand-grain weight	平均值 Mean/g	38.38	23.89	36.05	26.28	19.38
	变异系数 CV/%	15.40	26.67	17.40	21.49	0.00

茎粗、旗叶长、旗叶宽、倒二叶长、倒二叶宽、叶片数和绿叶片数在 5 大类群中最高,分别为 212.80 cm、7.59 cm、33.40 cm、2.66 cm、54.35 cm、2.45 cm、6.30 片和 4.80 片。千粒重在 5 大类群中最低,为 19.38 g。此类品种只有 1 种,10 个性状的变异系数均为 0,在 5 大类群中均最低。

2.4 燕麦农艺性状主成分分析

对燕麦种质 10 个数量性状的主成分分析结果(表 5)显示,84.57%的累计贡献率由前 5 个主成分提供,基本反映了 179 份种质资源的大部分遗传信息。

第 1 主成分特征值是 3.26,贡献率为 32.61%。特征向量多为正值,载荷较大的性状有旗叶宽、倒二叶宽、茎粗和千粒重,其向量值分别是 0.50、0.47、0.38 和 0.36,此类性状与饲草营养价值有关,可作为营养构成因子;仅有分蘖数载荷为 -0.17。这说明在高质育种工作中,旗叶宽、倒二叶宽、茎粗和千粒重可进行单独选择,倒二叶长、旗叶长和株高需适中,单株分蘖数应尽量少一些。第 2 主成分特征值是 2.23,贡献率为 22.35%。特征向量正负值皆有,旗叶长和倒二叶长向量值分别是 0.50 和 0.50。通过载荷数值可发现,旗叶长和倒二叶长影响饲草品质构成因子旗叶宽,同时制约了倒二叶宽、茎粗、千粒重等因子,因此育种

时对这些性状要合理选择。第 3 主成分特征值是 1.24,贡献率为 12.45%。通过载荷数值大小分析,该主成分重点是叶片数,其向量值为 0.71。叶片数的增加会抑制分蘖数、茎粗、旗叶宽、倒二叶宽和千粒重,从而降低饲草品质。第 4 主成分特征值是 0.95,贡献率为 9.47%。根据载荷数值大小分析,该主成分重点是分蘖数,其向量值为 0.84。分蘖数的增加会抑制旗叶宽、倒二叶宽和千粒重,从而降低饲草品质。第 5 主成分特征值是 0.77,贡献率是 7.68%。根据载荷数值大小分析,该主成分重点为株高,其向量值是 0.42。株高的增加会抑制茎粗、旗叶长、倒二叶长和绿叶片数,从而降低饲草品质。

2.5 燕麦种质资源综合评价

为综合评价 179 份燕麦种质资源在成都平原适应性,参考雷雄等^[16]、南铭等^[22]的方法,利用 SAS 9.2 软件,依据各种质资源的主成分分数综合评价。CF002393、CF003690、CF014719、CF003691 的综合得分最高,分别为 9.620、7.741、5.864 和 5.490,表明这些种质资源在成都平原适应性更好,可用作改良当地燕麦品种的亲本。而 CF002879、CF035599、CF000472 和 CF000451 综合分数较低,不适合该区域栽培种植(表 6)。

表 5 燕麦主要农艺性状的主成分分析

Table 5 Principal component analysis of the main agronomic traits of oat

性状 Character	主成分 Principal component				
	1	2	3	4	5
株高 Plant height	0.22	0.29	0.49	0.07	0.42
单株分蘖数 Number of tillers per plant	-0.17	0.11	-0.26	0.84	0.39
茎粗 Stem thickness	0.38	-0.26	-0.30	0.21	-0.23
旗叶长 Length of flag leaf	0.24	0.50	0.00	0.10	-0.43
旗叶宽 Width of flag leaf	0.50	0.07	-0.13	-0.14	0.16
倒二叶长 Length of second leaf	0.27	0.50	0.03	0.20	-0.28
倒二叶宽 Width of second leaf	0.47	-0.07	-0.20	-0.07	0.31
叶片数 Leaves per plant	0.14	-0.19	0.71	0.18	0.01
绿叶片数 Green leaves per plant	0.15	-0.46	0.20	0.38	-0.43
千粒重 Thousand-grain weight	0.36	-0.29	-0.03	-0.01	0.20
特征值 Eigenvalue	3.26	2.23	1.24	0.95	0.77
贡献率 Rate of contribution/%	32.61	22.35	12.45	9.47	7.68
累积贡献率 Cumulative rate/%	32.61	54.96	67.41	76.88	84.57

表 6 燕麦 179 份种质的综合得分
Table 6 Comprehensive scores of the 179 oat germplasm resources

序号 Code	综合得分 Score	排名 Ranking	序号 Code	综合得分 Score	排名 Ranking	序号 Code	综合得分 Score	排名 Ranking	序号 Code	综合得分 Score	排名 Ranking
1	-2.678	149	46	-1.693	131	91	-1.765	133	136	3.228	20
2	-0.837	110	47	-3.285	156	92	3.322	16	137	0.633	76
3	-0.877	116	48	-4.173	168	93	5.864	3	138	-0.769	108
4	-1.220	122	49	-4.243	169	94	-4.429	170	139	-0.849	114
5	1.705	54	50	-3.675	164	95	1.851	50	140	4.464	8
6	-3.931	165	51	1.968	49	96	2.911	24	141	-2.547	146
7	-4.437	171	52	-1.337	123	97	-0.381	91	142	-0.626	106
8	1.256	62	53	1.295	59	98	1.287	60	143	2.978	22
9	-1.953	137	54	1.166	65	99	3.317	17	144	-2.793	153
10	-5.583	176	55	-0.169	88	100	0.680	75	145	-3.381	157
11	-3.269	155	56	2.491	32	101	9.620	1	146	0.582	77
12	0.364	79	57	2.024	48	102	2.532	31	147	-1.417	127
13	-0.092	87	58	-4.055	167	103	2.589	30	148	-0.548	104
14	1.169	64	59	0.033	82	104	-3.441	158	149	-0.422	92
15	-2.403	144	60	1.135	66	105	2.486	33	150	-2.291	140
16	0.903	71	61	2.420	37	106	2.485	34	151	1.056	68
17	0.007	83	62	2.114	44	107	2.090	46	152	-6.434	177
18	1.337	57	63	2.686	28	108	2.647	29	153	1.120	67
19	2.460	36	64	3.857	13	109	1.515	55	154	4.333	9
20	4.135	10	65	5.091	5	110	3.821	14	155	0.148	80
21	0.081	81	66	-1.104	119	111	3.234	19	156	-0.085	85
22	-1.020	118	67	2.477	35	112	0.720	73	157	-3.509	162
23	-3.247	154	68	2.860	26	113	3.031	21	158	-4.582	173
24	-3.457	159	69	1.278	61	114	5.490	4	159	-0.470	101
25	-1.824	135	70	-1.441	128	115	7.741	2	160	-0.429	94
26	-1.620	130	71	-0.586	105	116	3.287	18	161	-2.278	139
27	-3.956	166	72	0.837	72	117	1.717	53	162	-0.437	95
28	2.104	45	73	-0.527	103	118	-0.088	86	163	-2.640	148
29	-2.606	147	74	-0.230	89	119	2.298	41	164	-1.160	121
30	-2.756	152	75	0.685	74	120	-0.372	90	165	1.724	52
31	1.050	70	76	1.176	63	121	-0.842	112	166	-1.815	134
32	-0.849	113	77	-0.422	93	122	3.981	11	167	-0.841	111
33	-2.711	151	78	-1.390	126	123	2.417	38	168	-1.108	120
34	-0.457	96	79	-0.458	97	124	1.756	51	169	-6.494	178
35	-2.360	143	80	-0.465	99	125	-2.704	150	170	-5.287	175
36	-1.359	124	81	-2.308	142	126	2.328	40	171	-1.744	132
37	-3.504	161	82	2.722	27	127	2.907	25	172	-7.099	179
38	-2.239	138	83	2.067	47	128	-0.464	98	173	-3.562	163
39	-1.846	136	84	2.147	43	129	1.411	56	174	-4.546	172
40	-3.489	160	85	1.053	69	130	3.962	12	175	-2.510	145
41	-2.308	141	86	-1.382	125	131	-1.597	129	176	-0.022	84
42	1.314	58	87	3.488	15	132	-0.497	102	177	2.168	42
43	0.556	78	88	4.930	6	133	-0.466	100	178	-0.859	115
44	-1.017	117	89	4.787	7	134	2.343	39	179	-0.829	109
45	-0.672	107	90	-4.634	174	135	2.962	23			

3 讨论

中国燕麦主要分布在内蒙古、河北、甘肃、青海等地^[5]。截至 2021 年,经全国草品种审定委员会审定登记已培育出的 15 个饲用燕麦品种主要在青藏高原、内蒙古、新疆和甘肃等地区种植^[23]。四川、贵州、江苏、湖北等地区的燕麦遗传基础薄弱,其稳定发展受限。本试验利用的 179 份燕麦材料中,4 份来源于内蒙古(华北地区),146 份来源于甘肃(88 份)、青海(55 份)和陕西(3 份)等西北地区,10 份来源于四川(6 份)、云南(1 份)、西藏(2 份)和贵州(3 份)等西南地区,8 份来源于华东地区的江西(1 份)和江苏(7 份),8 份来源于华中地区的湖北,1 份来自美国。对这些材料进行遗传多样性分析,从中筛选适宜成都平原种植的燕麦种质资源,对西南地区燕麦新品种选育具有重要意义。

燕麦种质资源农艺性状的遗传多样性是燕麦新品种选育的前提条件^[1,24]。遗传多样性指数反映了种质资源间性状的多样性,而变异系数的大小与某个性状的变幅呈正相关^[25]。本试验表明,燕麦旗叶长的遗传基础宽、变异多样,因而可通过亲本选配等方法,对此性状加以选择,进而改善成都地区饲用燕麦的产量性状^[26]。质量性状的遗传多样性指数相对不高,而质量性状多是一对或少数几对基因决定,每对基因均在表型上具有显著的可见效应,是植物固有性状,因而此类性状受外界环境的影响较小^[16]。10 个数量性状的变异系数都大于 10%,表明这些性状在种质个体间具有较大差异^[27],其中变异系数最大的是分蘖数,说明不同种质间的遗传变异程度不同,能够提供丰富、优良的亲本材料用于燕麦品种改良,并且可拓展燕麦新品种选育空间和方向。

本试验聚类分析发现,来源于同一地区的材料并没有聚为一类,可能是由于不同地区燕麦种质资源的交叉利用,表明种质资源间的遗传差异不一定和地理来源相关,同齐冰洁等^[28]、王鸣刚等^[29]的研究结果相似。品种杂交选育中,根据育种目标选择相对互补的亲本,可增加选择燕麦育种亲本材料的科学性。本研究的 5 个类群里,类群 I 可作为选育籽实目标为主的优秀亲本材料;类群 II 适合用作选育强分蘖的亲本材料;类群 III 优良性状不显著;类群 IV 各性状表现一般;类群 V 适合用作选育多目标性状的优秀亲本材料。

主成分分析已用于在小麦(*Triticum aestivum*)^[30-31]、大豆(*Glycine max*)^[32]和燕麦^[33]等作物的多性状综合评价。本试验中前 5 个主成分对变异的累计贡献率为 84.57%。在育种工作中,能够反映饲草营养组成的旗叶宽、倒二叶宽、茎粗和千粒重能独立选择;旗叶长和倒二叶长,应合理把控。

4 结论

本试验选择的 179 份燕麦种质资源在成都平原可正常生长发育,且具备丰富的遗传多样性。其中,CF002393、CF003690、CF014719、CF003691 的综合得分最高,用作育种亲本改善当地燕麦品种,有助于推进成都平原地区的燕麦育种工作。

参考文献:

- [1]李颖,毛培胜.燕麦种质资源研究进展[J].安徽农业科学,2013,41(1):72.
LI Y, MAO P S. Research progress of *Avena sativa* L. germplasm resource [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2013, 41(1): 72.
- [2]任长忠,杨才.中国燕麦品种志[M].北京:中国农业出版社,2018:2.
REN C Z, YANG C. *Notes on oat varieties in China* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2018: 2.
- [3]LI C D, ROSSNAGEL B G, SCOLES G J. The development of oat microsatellite markers and their use in identifying relationships among *Avena* species and oat cultivars [J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2000, 101(8): 1259.
- [4]ZHU S, KAEPLER H F. Identification of quantitative trait loci for resistance to crown rust in oat line MAM17-5 [J]. *Crop Science*, 2003, 43(1): 358.
- [5]冯文豪,佟越强,杨亚东,等.全球燕麦生产时空演变规律及对中国的启示[J].麦类作物学报,2022,42(7):902.
FENG W H, TONG Y Q, YANG Y D, et al. Spatial-temporal evolution characteristics of global oat production and its enlightenment to China [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2022, 42(7): 902.
- [6]赵桂琴,据泽亮,柴继宽.海拔和品种对燕麦营养品质及表面附着微生物的影响[J].草业学报,2022,31(11):147.
ZHAO G Q, JU Z L, CHAI J K. Effects of altitude and variety on nutrient levels and epiphytes of oats [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(11): 147.
- [7]吴海艳,曲尼,曲珍,等.6个燕麦品种在昂仁县的生产性能及饲草品质比较[J].草业学报,2022,31(4):72.
WU H Y, QU N, QU ZHEN, et al. Comparison of crop yield and forage quality of six oat varieties in Angren County, Shigatse [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(4): 72.
- [8]张琦,魏臻武,闫天芳,等.燕麦种质资源农艺性状遗传多样性的鉴定评价[J].草地学报,2021,29(2):309.
ZHANG Q, WEI Z W, YAN T F, et al. Identification and evaluation of genetic diversity of agronomic traits in oat germplasm resources [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(2): 309.
- [9]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.
- [10] 郑殿升. 中国燕麦的多样性[J]. 植物遗传资源学报, 2010, 11(3): 249.
ZHENG D S. Diversity of oat in China [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2010, 11(3): 249.
- [11] 徐微, 张宗文, 吴斌, 等. 裸燕麦种质资源 AFLP 标记遗传多样性分析[J]. 作物学报, 2009, 35(12): 2205.
XU W, ZHANG Z W, WU B, *et al.* Genetic diversity in naked oat (*Avena nuda*) germplasm revealed by AFLP markers [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2009, 35(12): 2205.
- [12] 邵志远, 蒋静, 张毅, 等. 不同灌水和施氮处理对燕麦产量、耗水特性和土壤盐分的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(5): 84.
SHAO Z Y, JIANG J, ZHANG Y, *et al.* The combined effect of irrigation and nitrogen application on yield, water consumption of oat and soil salinity [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2022, 41(5): 84.
- [13] 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 Pratacultural Sinica*, 2019, 28(2): 133.
- [14] 刘桃桃, 杨燕燕, 李秋凤, 等. 青贮处理对3种燕麦草养分和奶牛瘤胃降解性能的影响[J]. 饲料工业, 2022, 43(8): 41.
LIU T T, YANG Y Y, LI Q F, *et al.* Effects of silage treatment on three kinds of oat grass nutrients and rumen degradation performance of dairy cows [J]. *Feed Industry*, 2022, 43(8): 41.
- [15] 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.
- [16] 雷雄, 游明鸿, 白史且, 等. 川西北高原50份燕麦种质农艺性状遗传多样性分析及综合评价[J]. 草业学报, 2020, 29(7): 131.
LEI X, YOU M H, BAI S Q, *et al.* Genetic diversity analysis and multivariate evaluation of agronomic traits of 50 oat germplasm lines in northwest Sichuan [J]. *Acta Pratacultural Sinica*, 2020, 29(7): 131.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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: 33.
ZHENG D S, WANG X M, ZHANG J. Descriptors and data standard for oats (*Avena* spp.) [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2006: 33.
- [20] SHANNON C E, WEAVER W. The mathematical theory of communication [M]. Urbana: University of Illinois Press, 1949.
- [21] 孔繁玲. 植物数量遗传学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2006: 28.
KONG F L. Quantitative genetics in plants [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2006: 28.
- [22] 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.
- [23] 叶雪玲, 甘圳, 万燕, 等. 饲用燕麦育种研究进展与展望[J]. 草业学报, 2023, 32(2): 160.
YE X L, GAN Z, WAN Y, *et al.* Advances and perspectives in forage oat breeding [J]. *Acta Pratacultural Sinica*, 2023, 32(2): 160.
- [24] 周青平, 胡晓炜, 汪辉, 等. 燕麦在维护国家粮食安全中的重要作用[J]. 草业学报, 2024, 33(10): 171.
ZHOU Q P, HU X W, WANG H, *et al.* The important role of oat in reinforcing the foundation of food security [J]. *Acta Pratacultural Sinica*, 2024, 33(10): 171.
- [25] 吕伟, 韩俊梅, 任果香, 等. 山西芝麻种质资源遗传多样性分析[J]. 作物杂志, 2019(5): 57.
LÜ W, HAN J M, REN G X, *et al.* Genetic diversity analysis of sesame germplasm resources in Shanxi [J]. *Crops*, 2019(5): 57.
- [26] 任欣欣, 姚占军, 岳艳丽, 等. 黄淮海麦区四省份小麦品种的农艺性状及遗传多样性分析[J]. 华北农学报, 2010, 25(1): 94.
REN X X, YAO Z J, YUE Y L, *et al.* Genetic diversity analysis of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars in four provinces of Huang-Huai-Hai area based on agronomic traits [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2010, 25(1): 94.
- [27] 吕伟, 韩俊梅, 文飞, 等. 不同来源芝麻种质资源的表型多样性分析[J]. 植物遗传资源学报, 2020, 21(1): 234.
LÜ W, HAN J M, WEN F, *et al.* Phenotypic diversity analysis of sesame germplasm resources [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2020, 21(1): 234.
- [28] 齐冰洁, 刘景辉, 张智勇, 等. 燕麦种质资源生物学性状的遗传多样性[J]. 麦类作物学报, 2008, 28(4): 594.
QI B J, LIU J H, ZHANG Z Y, *et al.* Genetic diversity of biological characters in oat germplasm [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2008, 28(4): 594.
- [29] 王鸣刚, 葛运生, 陈亮, 等. 甘草亲缘关系的 RAPD 鉴定[J]. 武汉植物学研究, 2004, 22(4): 289.
WANG M G, GE Y S, CHEN L, *et al.* Relationship analysis of *Glycyrrhiza* by RAPD [J]. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2004, 22(4): 289.
- [30] 南瑞, 杨玉存, 石芳慧, 等. 小麦源库优异种质的鉴定与源库类型的划分[J]. 中国农业科学, 2023, 56(6): 1019.
NAN R, YANG Y C, SHI F H, *et al.* Identification of excellent wheat germplasm and classification of source-sink types [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(6): 1019.
- [31] 丁明磊, 王京宏, 王伟伟, 等. 粮饲兼用型小麦种质资源筛选与评价[J]. 草地学报, 2022, 30(8): 2027.
DING M L, WANG J H, WANG W W, *et al.* Screening and evaluation of dual-purpose wheat germplasm resources [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(8): 2027.
- [32] 赵晶云, 任小俊, 任海红, 等. 黄淮海大豆新品系主要农艺性状的遗传多样性分析[J]. 大豆科学, 2022, 41(3): 266.
ZHAO J Y, REN X J, REN H H, *et al.* Genetic diversity analysis of main agronomic characters of new soybean lines in Huang-Huai-Hai area [J]. *Soybean Science*, 2022, 41(3): 266.
- [33] 张静, 高文博, 晏林, 等. 燕麦种质资源耐盐碱性鉴定评价及耐盐碱种质筛选[J]. 作物学报, 2023, 49(6): 1551.
ZHANG J, GAO W B, YAN L, *et al.* Identification and evaluation of salt-alkali tolerance and screening of salt-alkali tolerant germplasm of oat (*Avena sativa* L.) [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2023, 49(6): 1551.