

亚麻种质资源遗传多样性分析

高风云¹ 伊六喜² 周宇¹ 斯钦巴特尔¹ 何瑞超¹ 贾霄云¹

(¹内蒙古自治区农牧业科学院, 010031, 内蒙古呼和浩特; ²内蒙古农业大学农学院, 010018, 内蒙古呼和浩特)

摘要 为了解亚麻种质资源遗传背景, 选育优质亚麻新品种, 利用表型性状和分子标记 (SSR) 对 387 份亚麻种质资源的 9 个农艺性状及 6 个品质性状进行遗传多样性分析、聚类分析、主成分分析以及群体结构分析。农艺性状遗传多样性指数为 0.70~2.08, 变异系数在 5.55%~129.18%。品质性状遗传多样性指数在 1.83~2.08, 变异系数在 0.07%~1.38%。试验共扩增出 320 个 SSR 位点, 平均每对引物 11.81 个; 有效等位基因数为 1.1991~1.8230, 引物 PIC 为 0.2489~0.6257; 在遗传相似系数为 0.66 处可以将 387 份亚麻种质资源分为 5 个类群, 农艺性状以及品质聚类分析同样各分为 5 个类群。

关键词 亚麻; 遗传多样性; 农艺性状; 品质性状; SSR

亚麻 (*Linum usitatissimum* L.) 栽培历史悠久, 早在 7000 年前的新石器时代就有驯化栽培的记载^[1], 3 万年前的旧石器时期人类就开始利用亚麻^[2]。亚麻籽富含人体必需的亚麻酸和木酚素, 同时还提供人体必需的食用纤维和蛋白质, 是广受人们喜爱的功能食品^[3]。长期单一的传统育种方式使亚麻遗传基础越来越狭窄, 不利于产量和品质的提高^[4], 因此需要充分研究亚麻种质资源的遗传多样性和群体结构, 以此扩大杂交亲本的选择范围和多样性, 提高选育水平, 选育出产量高、品质好且抗性强的优良品系。

遗传多样性代表作物进化过程中适应环境改变的能力^[5], 最初鉴定亚麻遗传多样性的方法是采用形态指标^[6]和同工酶标记^[7]。基于 DNA 分子标记技术来研究亚麻多样性的方法首先由 Oh 等^[8]提出, 标记的方式主要有 RAPD、AFLP、ISSR 和 SSR 等^[9-15]。SSR 是串联重复的短序列, 具有多态性丰富、拷贝多、覆盖面广和完全显性遗传等特点, 更适合用于植物遗传变异研究^[15]。内蒙古农牧业科学院亚麻课题组“十二五”期间收集保存亚麻种质资源材料 1078 份, 其中国外 200 份, 国内 878 份 (内蒙古呼和浩特、鄂尔多斯、锡林郭勒和乌兰察布等盟市共 503 份, 黑龙江 40 份, 甘肃兰州、定西、张掖和平凉共 97 份, 青海 58 份, 山西大同 86 份, 宁夏固原 23 份, 新疆伊犁 58 份, 河北张家口 13 份)^[16]。高风云等^[17]对这 1078 份亚麻种质资源材

料进行了粗脂肪及脂肪酸组成成分的 SSR 关联分析; 伊六喜^[18]对其中 161 份进行了 SRAP 多样性分析。本研究在前期研究的基础上, 从收集保存的资源材料中, 根据引种地区、生态类型及表型特征等筛选出符合育种目标的 387 份材料, 利用表型性状和 SSR 分子标记进行种质资源遗传多样性及群体结构分析, 并对其主成分分析和聚类分析, 根据亚麻种质资源基因型及表型变异范围, 构建亚麻核心种质群体, 为亚麻育种提供优质亲本材料。

1 材料与方法

1.1 试验材料

于 2019 年 4 月下旬在内蒙古农牧业科学院试验田 (40°46'22" N, 111°39'47" E) 种植供试种质资源材料, 共计 387 份 (表 1), 每份材料种植在 2 m² 小区, 5 行区种植, 行长 1 m, 行距 20 cm, 2 次重复。

1.2 农艺性状及品质数据采集

根据《亚麻种质资源描述规范和数据标准》^[19] 调查并统计生育期, 成熟后每小区随机选取 20 株考察株高、工艺长度、主茎分枝数、单株果数、每蒴果粒数、千粒重和单株粒重等农艺性状, 并记录小区总产量。采用 DA7200 型近红外分析仪 (瑞典波通) 测定品质数据。

1.3 亚麻基因组 DNA 的提取及检测

用 CTAB 法^[17]提取 DNA。采用 1% 的琼脂糖

作者简介: 高风云, 主要从事胡麻遗传育种研究, E-mail: gaofengyunnm@163.com

贾霄云为通信作者, 主要从事胡麻遗传育种研究, E-mail: nmgnkyjiaxy@163.com

基金项目: 国家现代农业产业技术体系 (CARS-14-1-07)

收稿日期: 2024-08-27; 修回日期: 2024-12-02; 网络出版日期: 2025-02-17

表 1 387 份亚麻种质资源信息
Table 1 Information of 387 flax germplasm resources

编号 Number	材料 Material	来源 Source	编号 Number	材料 Material	来源 Source	编号 Number	材料 Material	来源 Source
1	坝亚 15 号	中国河北	56	CALAR	奥地利	111	陇亚 1 号 (J)	中国甘肃
2	宁亚 21	中国甘肃	57	张亚 1 号	中国河北	112	陇亚 13 号 (J)	中国甘肃
3	轮选 2 号	中国内蒙古	58	CHAURRAOLA	匈牙利	113	后旗普通	中国内蒙古
4	晋亚 2 号	中国山西	59	MOROCCO	摩洛哥	114	华德小胡麻	中国内蒙古
5	定西 17	中国甘肃	60	陇杂 1 号	中国甘肃	115	喀拉沁	中国内蒙古
6	天水市老胡麻	中国甘肃	61	清亚 1 号	中国甘肃	116	乌拉特中后旗 3 号	中国内蒙古
7	黄胡麻	加拿大	62	CRISTA FIBER	加拿大	117	集宁 1 号	中国内蒙古
8	CH-89	中国内蒙古	63	东乡红 2 号	中国甘肃	118	伊尖 44-53	中国新疆
9	线胡麻	中国甘肃	64	VIRING	法国	119	克山 1 号	中国内蒙古
10	同亚 9 号	中国山西	65	定亚 9 号	中国甘肃	120	May-11	加拿大
11	BGOLDXREDWING44X3	美国	66	沙县	中国甘肃	121	晋亚 5 号	中国山西
12	坝亚 7 号	中国河北	67	内蒙红	中国内蒙古	122	多伦小胡麻	中国内蒙古
13	同亚 8 号	中国山西	68	天水渭南	中国甘肃	123	2 号罗马尼亚	罗马尼亚
14	TY58	巴基斯坦	69	礼县	中国甘肃	124	多伦大胡麻	中国内蒙古
15	西礼白	中国甘肃	70	天亚 1 号	中国甘肃	125	内亚 7 号	中国内蒙古
16	TY21	巴基斯坦	71	MACBETH	加拿大	126	陇亚 11 号	中国甘肃
17	坝亚 13 号	中国河北	72	雁杂 10 号	中国山西	127	15-566 加拿大	加拿大
18	同亚 11 号	中国山西	73	定西红	中国甘肃	128	轮选 1 号	中国内蒙古
19	灵台五星	中国甘肃	74	黑亚 12 号	中国黑龙江	129	陇亚 6 号	中国甘肃
20	伊亚 3	中国新疆	75	临汾白胡麻	中国甘肃	130	15-507LILA	波兰
21	张亚 2	中国河北	76	雁农 1 号	中国山西	131	15-508SUMPERSKYZDAR	波兰
22	晋亚 8	中国山西	77	PALE	美国	132	天亚 9 号	中国甘肃
23	康乐 1	中国甘肃	78	OTTAWA	美国	133	坝亚 6 号	中国河北
24	定亚 15	中国甘肃	79	宁亚 17 号	中国甘肃	134	定亚 18 号	中国甘肃
25	BLVE	美国	80	KENYA C.1.709	波兰	135	庆阳老	中国甘肃
26	H919	中国内蒙古	81	临泽白	中国甘肃	136	15-519	匈牙利
27	H920	中国内蒙古	82	天亚 5 号	中国甘肃	137	新 18 号	中国新疆
28	NO 841	乌拉圭	83	JWS	摩洛哥	138	15-510	俄罗斯
29	H922	中国内蒙古	84	KOREAN	阿富汗	139	宁亚 11 号	中国甘肃
30	伊亚 4 号	中国新疆	85	ARTEN TINE	美国	140	宁亚 7 号	中国甘肃
31	内亚六号	中国内蒙古	86	LINAGRDSSES	法国	141	庆阳	中国甘肃
32	PI177451	土耳其	87	皋兰白	中国甘肃	142	NORTHDAK510	美国
33	BLANC	加拿大	88	民勤胡麻	中国甘肃	143	NORTHDAK517	美国
34	PI1181058	土耳其	89	宁亚 19 号	中国甘肃	144	NORTHDAK507	美国
35	山丹白	中国甘肃	90	内亚油一号	中国内蒙古	145	NORTHDAK514	美国
36	礼县底脚	中国甘肃	91	DEHISLINTLCRE PI1AN	俄罗斯	146	NORTHDAK512	美国
37	坝 810	中国河北	92	AC EMERSON	加拿大	147	NORTHDAK518	美国
38	尧甸白胡麻	中国甘肃	93	崇礼小	中国河北	148	NORTHDAK505	美国
39	天亚 6 号	中国甘肃	94	晋亚 4 号	中国山西	149	NORTHDAK509	美国
40	坝亚 11 号	中国河北	95	VIMY	加拿大	150	NORTHDAK108	美国
41	陇亚 8 号	中国甘肃	96	陇亚 10 号	中国甘肃	151	CFRESBR115	荷兰
42	15F-565	加拿大	97	轮选 3 号	中国内蒙古	152	CFRESBR106	荷兰
43	G-89-21	德国	98	晋亚 7 号	中国山西	153	CFRESBR95	荷兰
44	宁亚 14	中国甘肃	99	坝选 3 号	中国河北	154	CFRESBR91	荷兰
45	MIMI B15	美国	100	沙车早熟种红	中国新疆	155	CFRESBR105	荷兰
46	宁亚 6 号	中国甘肃	101	平罗红	中国甘肃	156	CFRESBR96	荷兰
47	尚义洋	中国河北	102	NO 547	摩洛哥	157	CFRESBR107	荷兰
48	宁亚 15 号	中国甘肃	103	定亚 5 号	中国甘肃	158	CFRESBR94	荷兰
49	宁亚 2 号	中国甘肃	104	晋亚 1 号	中国山西	159	CFRESBR111	荷兰
50	库车	中国新疆	105	晋亚 11 号	中国山西	160	CFRESBR103	荷兰
51	东乡白	中国甘肃	106	莎车亚麻	中国新疆	161	CFRESBR99	荷兰
52	Drane	法国	107	集宁 2 号	中国内蒙古	162	CFRESBR1088	荷兰
53	坝亚 1 号	中国河北	108	华德大粒高秆	中国内蒙古	163	CFRESBR1077	荷兰
54	静宁选 2 号	中国甘肃	109	坝 68-1-542	中国河北	164	CFRESBR1076	荷兰
55	天水线	中国甘肃	110	雁北 7532-4	中国山西	165	CFRESBR1067	荷兰

续表1 Table 1 (continued)

编号 Number	材料 Material	来源 Source	编号 Number	材料 Material	来源 Source	编号 Number	材料 Material	来源 Source
166	CFRESBR1091	荷兰	222	MONTANA16	美国	278	线胡麻	中国新疆
167	CFRESBR21101	荷兰	223	RUSSIA6	俄罗斯	279	武威红胡麻	中国新疆
168	CFRESBR1082	荷兰	224	RUSSIA5	俄罗斯	280	BCANC	中国新疆
169	CFRESBR1089	荷兰	225	INDIA69	印度	281	榆中红胡麻	中国新疆
170	CFRESBR1095	荷兰	226	INDIA68	印度	282	0216-16-8	中国新疆
171	Hungary 140	匈牙利	227	EGYPT66	埃及	283	8513	中国新疆
172	Hungary 138	匈牙利	228	EGYPT65	埃及	284	869	中国新疆
173	Hungary 145	匈牙利	229	EGYPT64	埃及	285	安西红胡麻	中国新疆
174	Hungary 137	匈牙利	230	EGYPT62	埃及	286	天水市老胡麻	中国新疆
175	Hungary 146	匈牙利	231	MINNESOTA8	美国	287	AC Emerson	中国新疆
176	Hungary 141	匈牙利	232	MINNESOTA9	美国	288	1989-10-2	中国新疆
177	Hungary 147	匈牙利	233	MINNESOTA61	美国	289	P.I.177451	中国新疆
178	Hungary 150	匈牙利	234	乌 19 号	中国内蒙古	290	西礼红胡麻	中国新疆
179	Hungary 249	匈牙利	235	临河 17 号	中国内蒙古	291	陇西白胡麻	中国新疆
180	Hungary 244	匈牙利	236	乌 25 号	中国内蒙古	292	庆阳胡麻	中国新疆
181	Hungary 250	匈牙利	237	乌 402 号	中国内蒙古	293	陇西红胡麻	中国新疆
182	Hungary 240	匈牙利	238	河北大粒 6 号	中国河北	294	灵台转哪	中国新疆
183	Hungary 248	匈牙利	239	乌 17 号	中国内蒙古	295	9B	中国新疆
184	Hungary 247	匈牙利	240	乌 13 号	中国内蒙古	296	灵台五星	中国新疆
185	Hungary 245	匈牙利	241	乌 44 号	中国内蒙古	297	88 (887-1-10)	中国新疆
186	Hungary 243	匈牙利	242	乌 53 号	中国内蒙古	298	庆阳老	中国新疆
187	Hungary 241	匈牙利	243	乌 33 号	中国内蒙古	299	78-28-1-34-1-2	中国新疆
188	IRAN191	伊朗	244	乌 41 号	中国内蒙古	300	民勤胡麻	中国新疆
189	IRAN184	伊朗	245	乌 19 号	中国内蒙古	301	NO.547	中国新疆
190	IRAN157	伊朗	246	安西红胡麻	中国甘肃	302	LINA GRDSSSES	中国新疆
191	IRAN185	伊朗	247	灵台转那	中国甘肃	303	2014 外引 6	中国新疆
192	IRAN187	伊朗	248	AC Lightning	加拿大	304	861	中国新疆
193	IRAN159	伊朗	249	ACEMERSON	加拿大	305	礼县低脚	中国新疆
194	A589	阿根廷	250	AC Carnduff	加拿大	306	R99	中国甘肃
195	A592	阿根廷	251	AC Linora	加拿大	307	MH619	中国甘肃
196	A597	阿根廷	252	CI637PI91037 RUSSIA	俄罗斯	308	索尼尔	中国河北
197	A594	阿根廷	253	ACMACBETH	加拿大	309	MH626	中国甘肃
198	A591	阿根廷	254	AC HANLEY	加拿大	310	0719-H	中国山西
199	A595	阿根廷	255	AC MCDUFF	加拿大	311	NM-19-7	中国内蒙古
200	A600	阿根廷	256	CI2824USSR-1	俄罗斯	312	俄 36	中国河北
201	PAKISTAN161	巴基斯坦	257	CI2786SP2271	新西兰	313	2049	中国山西
202	PAKISTAN177	巴基斯坦	258	94000	美国	314	R205	中国甘肃
203	PAKISTAN160	巴基斯坦	259	CDC ARRAS	加拿大	315	乌亚七号	中国内蒙古
204	PAKISTAN169	巴基斯坦	260	NOR MAN	加拿大	316	NM-19-5	中国内蒙古
205	PAKISTAN172	巴基斯坦	261	CDC BETHIMC	加拿大	317	2009-3J-5	中国甘肃
206	PAKISTAN166	巴基斯坦	262	静宁红胡麻	中国甘肃	318	0724-18	中国甘肃
207	PAKISTAN181	巴基斯坦	263	10446146	阿根廷	319	0914-1	中国甘肃
208	PAKISTAN170	巴基斯坦	264	晋亚 6 号	中国山西	320	0918-3	中国山西
209	PAKISTAN164	巴基斯坦	265	G7	中国新疆	321	坝亚 20 号	中国河北
210	PAKISTAN165	巴基斯坦	266	临夏白	中国甘肃	322	0805-7-6-2-3	中国甘肃
211	FRANCE313	法国	267	R43	中国内蒙古	323	1301-74	中国河北
212	FRANCE308	法国	268	坝亚 12 号	中国河北	324	CHLH-99	中国甘肃
213	FRANCE316	法国	269	FIECD NO.17	中国新疆	325	H2017	中国甘肃
214	FRANCE314	法国	270	P.I.1181058	中国新疆	326	R161	中国甘肃
215	FRANCE293	法国	271	伊亚 2 号	中国新疆	327	08006-375	中国新疆
216	FRANCE319	法国	272	陇亚 5 号	中国新疆	328	GFWK-01	中国甘肃
217	FRANCE317	法国	273	定亚 18 号	中国新疆	329	GFWK-02	中国甘肃
218	FRANCE295	法国	274	定西 17 号	中国新疆	330	2012-55-11-1-1	中国甘肃
219	FRANCE291	法国	275	定亚 21 号	中国新疆	331	2012-14-6-4-2	中国甘肃
220	MONTANA7	美国	276	88 (125-1)	中国新疆	332	2014-102-5	中国甘肃
221	MONTANA19	美国	277	BEHISCINT	中国新疆	333	10287	中国甘肃

续表 1 Table 1 (continued)

编号 Number	材料 Material	来源 Source	编号 Number	材料 Material	来源 Source	编号 Number	材料 Material	来源 Source
334	2013-10-6-1	中国甘肃	352	OTT7703×ARGCB×ARXC19	中国甘肃	370	♂14	加拿大
335	2015-44-8	中国甘肃	353	加拿大材料	中国甘肃	371	A1	美国
336	2014-103-3-1	中国甘肃	354	天水胡麻	中国内蒙古	372	A2	美国
337	10441	中国甘肃	355	塞盖地(新疆)	中国内蒙古	373	A3	美国
338	黄金一号	中国内蒙古	356	谢烈浪(苏联)	中国内蒙古	374	U-4	中国内蒙古
339	双亚 19 号	中国黑龙江	357	德国二号	中国内蒙古	375	U-5	中国内蒙古
340	双亚 20 号	中国黑龙江	358	加拿大红木 65	中国内蒙古	376	U-6	中国内蒙古
341	双油麻 2 号	中国黑龙江	359	匈牙利 6 号	中国内蒙古	377	U-7	中国内蒙古
342	双油麻 3 号	中国黑龙江	360	7511-5	中国内蒙古	378	俄罗斯 1	俄罗斯
343	太旗白胡麻	中国内蒙古	361	♂1	加拿大	379	俄罗斯 2	俄罗斯
344	美国一号	美国	362	♂2	加拿大	380	Aflax	美国
345	E.E.P.608AH588	中国甘肃	363	♂3	加拿大	381	Cbrown	加拿大
346	NO.1051PI289090	中国甘肃	364	♂4	加拿大	382	47	中国河北
347	CRYDRUS	中国甘肃	365	♂5	加拿大	383	34	中国河北
348	89-21	中国甘肃	366	♂6	加拿大	384	1110	中国河北
349	ROSSIANINTRO	中国甘肃	367	♂9	加拿大	385	CFY	加拿大
350	莎车早熟种红	中国甘肃	368	♂10	加拿大	386	NM-HM-133	中国内蒙古
351	内亚 5 号	中国内蒙古	369	♂12	加拿大	387	21ELS	中国黑龙江

凝胶电泳和紫外分光光度计法检测 DNA 的纯度和浓度。

1.4 引物设计及 PCR 扩增

本试验所使用的 248 对引物序列是根据已有亚麻 SSR 标记设计所得，最终委托金斯瑞生物科技有限公司合成。PCR 扩增产物经 6% 非变性聚丙烯酰胺凝胶电泳分离、银染、显色后运用人工读带的方式记录电泳图谱的多态性条带，同一位置出现清晰重复条带记为“1”，未出现条带记为“0”，从而生成由“1”和“0”组成的原始矩阵，据此计算多态性位点数、多态性位点百分率等遗传系数。

1.5 数据处理

采用 Excel 计算各性状最大值、最小值、平均值和变异系数。利用 R 语言对试验数据进行方差

分析、相关性分析、主成分分析和聚类分析；利用 POPGENE 1.32 软件进行基于 Nei (1973) 遗传距离的非加权组平均法 (UPGMA) 聚类分析；采用 STRUCTURE 2.2 软件进行群体结构分析。采用 Shannon-Weaver 法计算遗传多样性指数： $H' = -\sum_{i=1}^n (P_i \ln P_i)$ ，式中， n 表示材料总数， P_i 表示第 i 级别内材料份数占总份数的百分比。对数量性状进行分级处理。其中 1 级 $< X - 2\delta$ ，10 级 $\geq X + 2\delta$ ，中间每 0.5δ 间隔一级， X 为平均值， δ 为标准差。

2 结果与分析

2.1 亚麻种质资源农艺性状的变异分析

对亚麻种质资源的 9 个农艺性状进行遗传多样性分析，结果 (表 2) 表明，各农艺性状的遗传

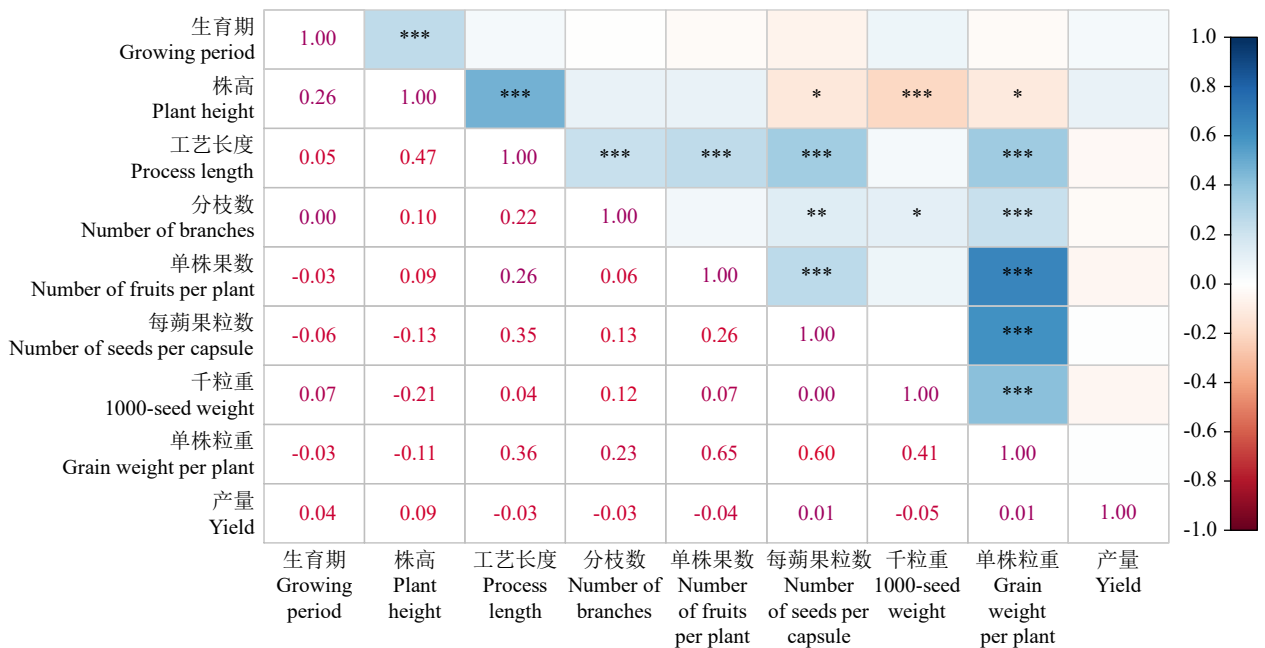
表 2 387 份亚麻种质资源农艺性状的差异统计
Table 2 Statistical analysis of agronomic trait differences among 387 flax germplasm resources

农艺性状 Agronomic trait	最大值 Max.	最小值 Min.	平均值 Mean	方差 σ^2	变异系数 CV (%)	遗传多样性指数 H'
生育期 Growing period (d)	110.00	70.00	96.10	28.46	5.55	2.08
株高 Plant height (cm)	94.65	38.55	60.89	62.06	12.94	2.08
工艺长度 Process length (cm)	59.69	13.47	30.56	38.32	20.26	1.61
分枝数 Number of branches	15.85	2.10	3.46	0.63	23.00	2.03
单株果数 Number of fruits per plant	23.10	9.31	16.40	5.32	14.06	2.08
每蒴果粒数 Number of seeds per capsule	10.69	2.83	6.07	1.50	20.17	2.03
千粒重 1000-seed weight (g)	9.60	2.60	5.76	0.97	17.10	1.94
单株粒重 Grain weight per plant (g)	1.19	0.16	0.57	0.04	33.22	2.06
产量 Yield (kg/hm ²)	2625.13	345.30	1013.35	1 713 697.27	129.18	0.70
平均 Average	327.77	53.81	137.02	190 426.06	30.61	1.84

多样性指数在 0.70~2.08，平均为 1.84，其中生育期、株高和单株果数的遗传多样性指数最高，均达到 2.08，产量最低，说明 387 份亚麻种质资源的生育期、株高和单株果数遗传丰富度较高，产量的遗传丰富度较低。产量的变异系数最大，为 129.18%，生育期变异系数最小，为 5.55%，农艺性状平均变异系数为 30.61%。由此说明，亚麻种质资源间的遗传差异明显，变异幅度大，遗传丰富度高。

2.2 亚麻种质资源农艺性状相关性分析

对亚麻种质资源的 9 个农艺性状进行相关性分析（图 1），36 对相关性状中有 13 对极显著，3 对显著，20 对不显著。其中株高与工艺长度呈极显著正相关，与千粒重呈极显著负相关。株高与每蒴果粒数及单株粒重呈负相关。工艺长度与分枝数、单株果数、每蒴果粒数以及单株粒重呈极显著正相关。分枝数与每蒴果粒数和单株粒重呈极显著正相关，与千粒重呈显著相关。综上所述，



“***”、“**”和“*”分别表示处理间在 $P < 0.001$ 、 $P < 0.01$ 和 $P < 0.05$ 水平上差异显著，下同。
 “***”, “**” and “*” indicate significant difference among the treatments at $P < 0.001$, $P < 0.01$, and $P < 0.05$ levels, respectively, the same below.

图 1 387 份亚麻种质资源农艺性状的相关性分析

Fig.1 Correlations among agronomic traits across 387 flax germplasm resources

工艺长度、分枝数、单株果数、每蒴果粒数以及千粒重是影响产量的主要因素。

2.3 亚麻种质资源品质性状变异分析

对亚麻种质资源的品质性状进行遗传多样性分析（表 3），结果表明 6 个品质性状的遗传多样性指数在 1.83~2.08，平均为 1.98，其中亚油酸的遗传多样性指数最高，亚麻酸最低，说明 387 份亚麻种质资源的亚油酸的遗传丰富度较高，亚麻酸的遗传丰富度较低。对亚麻种质资源进行变异系数分析发现，硬脂酸的变异系数最大，为 1.38%，粗脂肪变异系数最小为 0.07%，平均为 0.70%。由此说明亚麻种质资源间的遗传差异明显，变异幅度大，遗传多样性指数最高，亚麻酸最低，说明 387 份亚麻种质资源的亚油酸的遗传丰富度较高，亚麻酸的遗传丰富度较低。对亚麻种质资源进行变异系数分析发现，硬脂酸的变异系数最大，为 1.38%，粗脂肪变异系数最小为 0.07%，平均为 0.70%。由此说明亚麻种质资源间的遗传差异明显，变异幅度大，遗传多样性指数最高，亚麻酸最低，说明 387 份亚麻种质资源的亚油酸的遗传丰富度较高，亚麻酸的遗传丰富度较低。

对亚麻种质资源的品质性状进行遗传多样性分析（表 3），结果表明 6 个品质性状的遗传多样性指数在 1.83~2.08，平均为 1.98，其中亚油酸的遗传多样性指数最高，亚麻酸最低，说明 387 份亚麻种质资源的亚油酸的遗传丰富度较高，亚麻酸的遗传丰富度较低。对亚麻种质资源进行变异系数分析发现，硬脂酸的变异系数最大，为 1.38%，粗脂肪变异系数最小为 0.07%，平均为 0.70%。由此说明亚麻种质资源间的遗传差异明显，变异幅度大，遗传多样性指数最高，亚麻酸最低，说明 387 份亚麻种质资源的亚油酸的遗传丰富度较高，亚麻酸的遗传丰富度较低。

表 3 387 份亚麻种质资源品质性状的差异统计

Table 3 Statistical analysis of quality trait variation among 387 flax germplasm resources

性状 Trait	最大值 Max.	最小值 Min.	平均值 Mean	总方差 σ^2	变异系数 CV (%)	遗传多样性指数 H'
粗脂肪 Crude fat	42.59	33.65	38.02	2.65	0.07	2.06
棕榈酸 Palmitic acid	8.43	1.93	4.84	2.66	0.55	1.87
油酸 Oleic acid	42.34	5.33	26.03	35.25	1.35	2.07
硬脂酸 Stearic acid	15.56	1.49	7.76	0.63	1.38	1.95
亚油酸 Linoleic acid	22.61	10.92	15.56	3.03	0.19	2.08
亚麻酸 Linolenic acid	10.69	3.04	43.67	28.26	0.65	1.83
平均 Average	31.83	9.39	22.65	13.76	0.70	1.98

传丰富度高。

2.4 亚麻种质资源品质性状相关性分析

对亚麻种质资源的 5 种脂肪酸含量进行相关性分析（图 2），15 对相关性状中有 4 对呈极显著正相关，8 对呈极显著负相关，1 对呈显著正相关，1 对呈显著负相关以及 1 对相关不显著。其中粗脂肪与棕榈酸和油酸呈极显著正相关，与硬脂酸和亚油

酸呈极显著负相关。棕榈酸与油酸呈极显著正相关，与硬脂酸、亚油酸和亚麻酸呈极显著负相关；油酸与硬脂酸、亚麻酸和亚油酸呈极显著负相关；亚油酸和硬脂酸呈极显著正相关；由此可知，以含油率（粗脂肪含量）为育种目标时，可通过间接测量棕榈酸含量来辅助育种，同时棕榈酸与硬脂酸呈极显著负相关，这一指标也有待进一步应用到育种上。

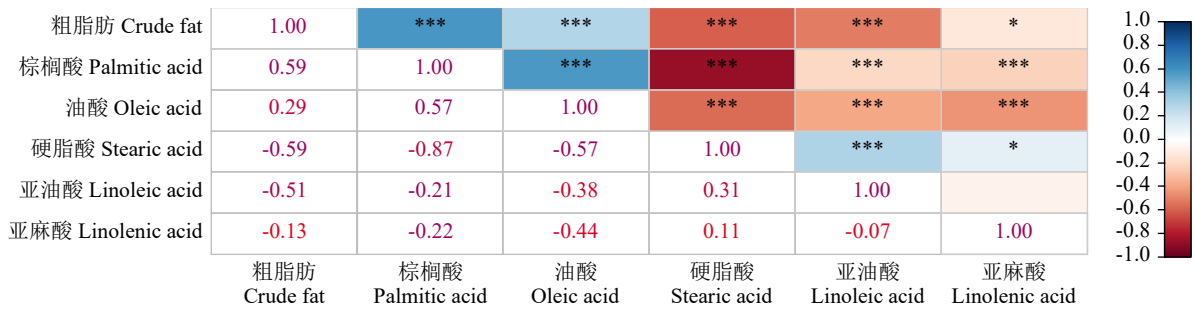


图 2 387 份亚麻种质资源品质性状的相关性分析

Fig.2 Correlations among quality traits of 387 flax germplasm resources

2.5 亚麻种质资源农艺性状及品质性状主成分分析

主成分分析通过线性变换或者舍弃一小部分数据的方式来展现作物各性状间起主导作用的综

合指标。表 4 结果显示，从 15 个性状提取出排名前 5 位的主成分。排名前 5 位的主成分贡献率分别为 31.34%、12.88%、9.05%、8.42%和 7.37%，累计贡献率为 69.05%（表 5）。

表 4 387 份亚麻种质资源农艺性状与品质性状主成分分析的特征向量

Table 4 Eigenvector of principal component analysis for agronomic and quality traits of 387 flax germplasm resources

性状 Trait	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
生育期 Growth period	0.0266	0.1553	0.5949	-0.2982	0.3745
株高 Plant height	-0.1485	0.7303	0.5132	-0.0021	0.0165
工艺长度 Process length	0.4698	0.6185	0.2425	0.0263	-0.1978
分枝数 Number of branches	0.2051	0.1452	0.2901	0.1121	-0.6776
单株果数 Number of fruits per plant	0.5974	0.2317	-0.0667	0.1058	0.0369
每蒴果粒数 Number of seeds per capsule	0.6332	0.2537	-0.3664	0.1930	-0.0145
千粒重 1000-seed weight	0.4162	-0.5823	0.4762	0.0503	-0.1754
单株粒重 Grain weight per plant	0.8490	0.0198	-0.0054	0.2188	-0.0925
产量 Yield	-0.0242	0.0604	0.1382	0.1771	0.5433
粗脂肪 Crude fat	0.7678	-0.1951	0.0084	0.2354	0.0636
棕榈酸 Palmitic acid	0.8640	0.1612	-0.1979	-0.1265	0.1285
油酸 Oleic acid	0.6406	-0.1666	0.0799	-0.5446	0.0972
硬脂酸 Stearic acid	-0.2605	0.0993	0.1252	0.7807	0.2241
亚油酸 Linoleic acid	-0.8484	-0.1757	0.0795	0.0493	-0.2141
亚麻酸 Linolenic acid	-0.4787	0.6141	-0.3801	-0.2234	-0.0644

PC1 特征值为 4.70，其中棕榈酸的载荷最高，为 0.8640，由此推断 PC1 主要反映棕榈酸载荷；PC2 特征值为 1.93，其中株高载荷最大，为 0.7303，由此推断 PC2 主要反映株高载荷；PC3 的特征值为 1.36，生育期的载荷最高，为 0.5949，由此推断 PC3 主要体现生育期载荷；PC4 的特征值为 1.26，

粗脂肪的载荷最高，为 0.2354，由此推断 PC4 主要体现粗脂肪载荷；PC5 的特征值为 1.11，产量的载荷最高，为 0.5433，由此推断 PC5 主要体现产量载荷。

以 PC1 作横坐标，PC2 为纵坐标对 387 份种质资源进行散点分布作图（图 3），结果表明，56 份

表 5 各主成分的特征值及贡献率
Table 5 Eigenvector and contribution rate of principal components

主成分 Principal component	特征值 Eigenvalue	贡献率 Contribution rate (%)	累计贡献率 Cumulative contribution rate (%)
PC1	4.70	31.34	31.34
PC2	1.93	12.88	44.22
PC3	1.36	9.05	53.27
PC4	1.26	8.42	61.68
PC5	1.11	7.37	69.05

种质资源材料 PC1 特征值较大, 在产量及相关性状方面表现良好; PC1 呈连续性分布, 但产量性状表现良好的种质资源材料的 PC1 值在 1 和-1 之间, 可见要提高产量, 在育种过程中不能选择株高过高的材料。

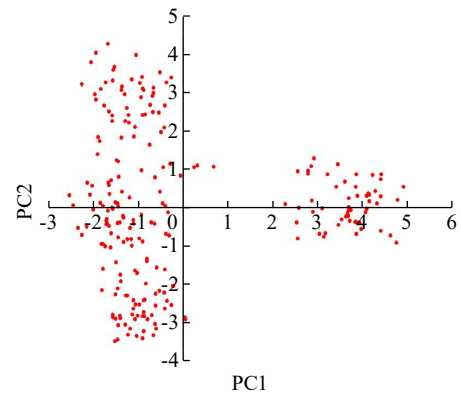


图 3 亚麻种质资源二维排序图
Fig.3 Two-dimensional sorting diagram of flax germplasm resources

2.6 亚麻种质资源农艺性状的聚类分析
对供试材料的农艺性状进行聚类分析 (图 4),

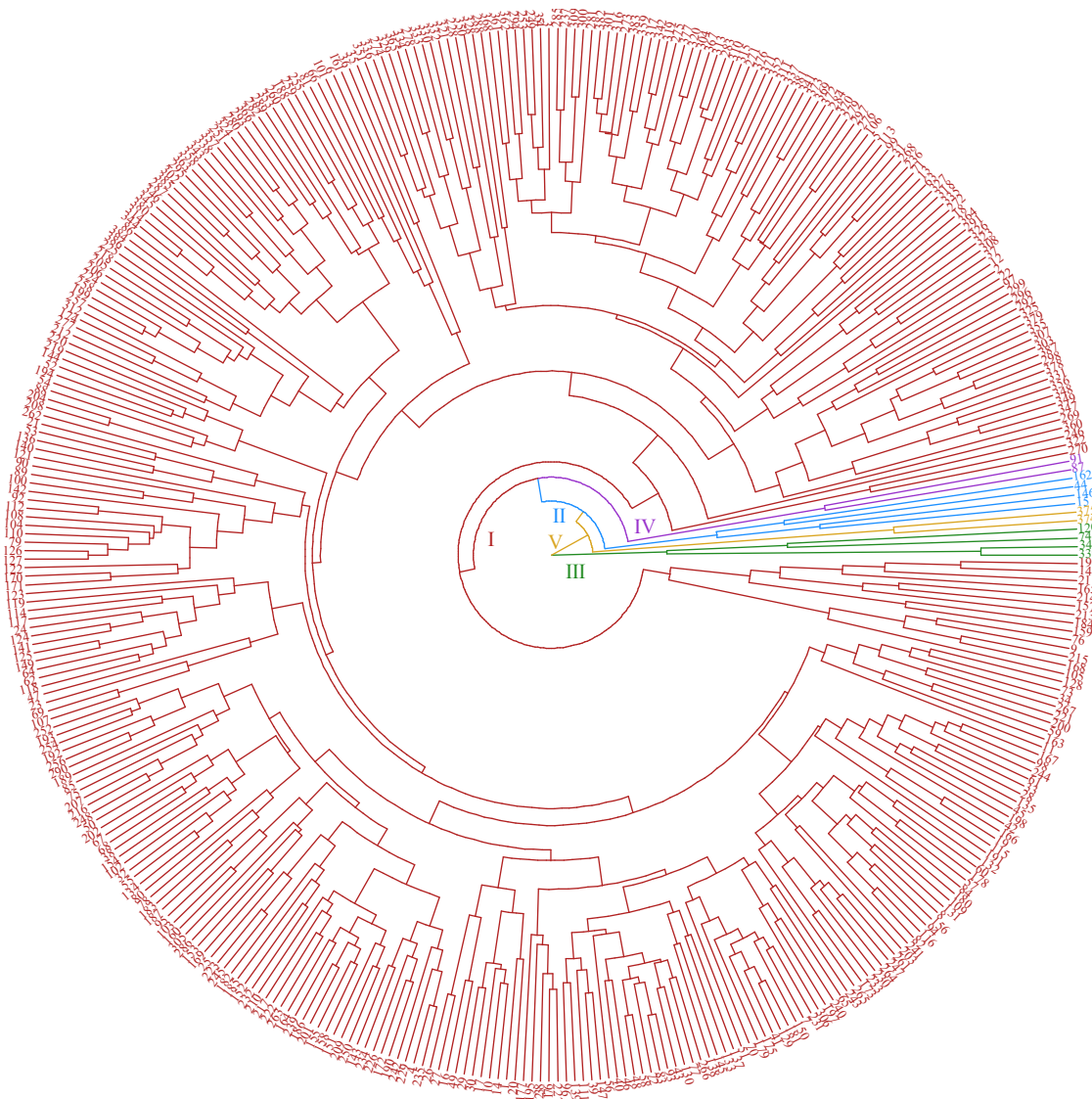


图 4 387 份亚麻种质资源农艺性状的聚类分析
Fig.4 Cluster analysis of 387 flax germplasm resources based on agronomic traits

387 份亚麻种质资源被分为 5 个类群。类群 I 包含 375 份材料，该群体的平均生育期最长 (96.37 d)，株高最矮 (60.46 cm)，综合表现适宜作为矮秆宜机械化育种的亲本材料；类群 II 包含 4 份材料，该群体的平均生育期最短 (80.25 d)，且其主茎分枝数、单株果数及单株粒重均表现优良，更适宜在无霜期短的地区用于改良产量构成性状类群；类群 III 包含 4 份材料，该类群的平均株高 (86.00 cm) 和工艺长度 (51.81 cm) 在所有类群中均为最大，但单株粒重 (0.39 g) 最小，该群体可作为纤维亚麻的骨干亲本材料；类群 IV 包含 2 份材料，该群体的平均单株粒重 (0.77 g) 最大，其他性状居中，该群体可作为常规材料进行亚麻的遗传改良；类群 V 包含 2 份材料，该群体的平均每蒴果粒数 (7.34

个) 与千粒重 (6.30 g) 最重，同时单株果数、千粒重以及单株粒重都是影响产量的重要性状，因此该群体结合类群 IV 可作为育种骨干亲本，通过轮回选择法选育高产新品种。

2.7 亚麻种质资源品质性状的聚类分析

对亚麻种质资源的品质性状进行聚类分析 (图 5)，387 份材料被分为 5 个类群。类群 I 包含 371 份材料，该群体的平均油酸含量 (26.33%) 高于其他类群材料，硬脂酸含量 (7.82%) 处于中等偏上水平，其他性状表现居中。油酸为单不饱和脂肪酸，因此选择该类群作为育种材料，可改善亚麻油的贮藏时间；类群 II 有 2 份材料，该群体平均含油率 (36.55%) 处于中等偏下水平，但棕榈酸 (7.28%) 和亚油酸 (22.38%) 高于其他类群。同

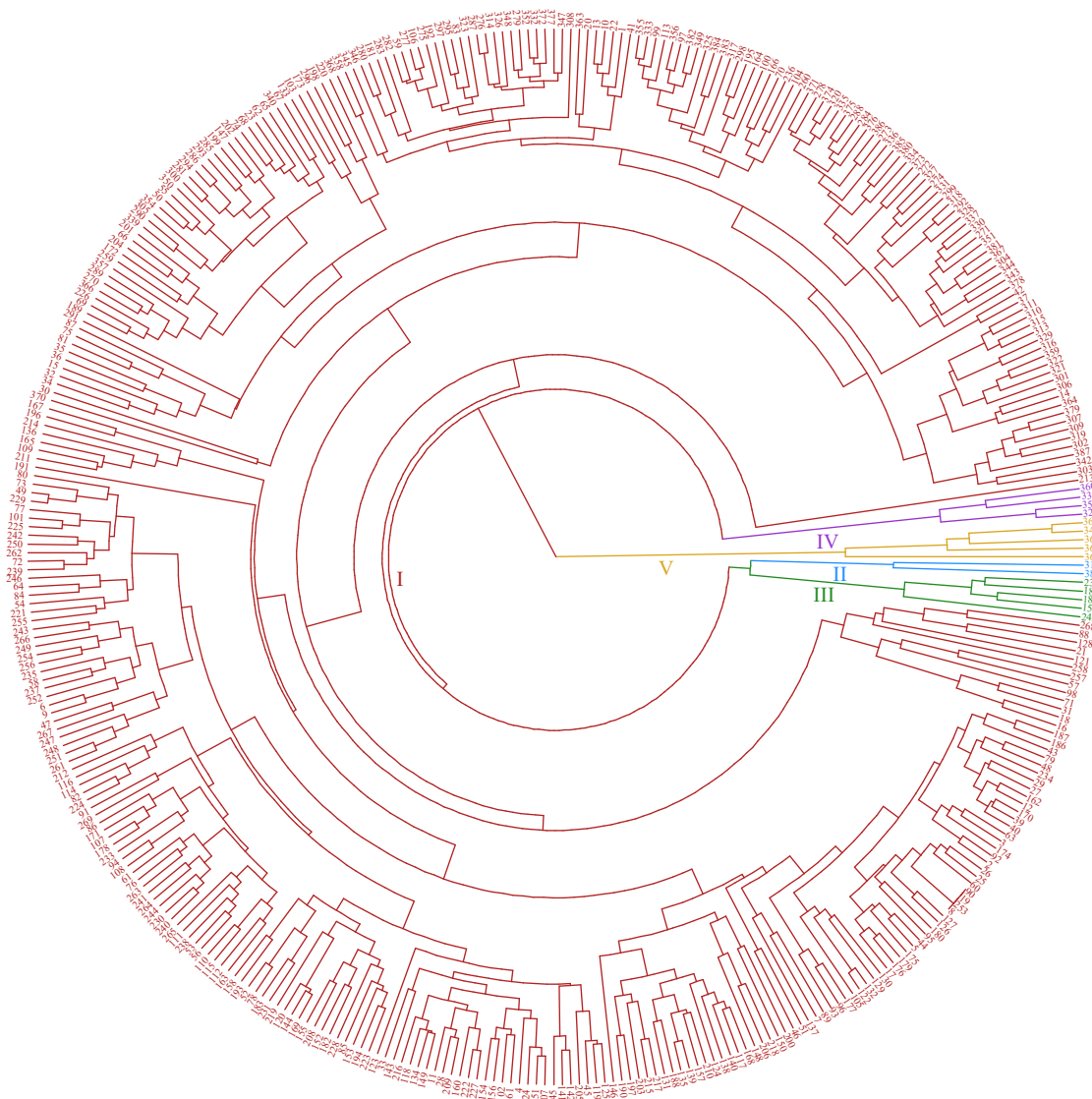


图 5 387 份亚麻种质资源品质性状的聚类分析
Fig.5 Cluster analysis dendrogram of quality traits for 387 flax germplasm resources

时油酸（23.43%）、硬脂酸（7.72%）和亚麻酸（45.27%）含量处于中等偏上水平，该类群可作为轮回亲本；类群III共有 5 份材料，该类群的平均硬脂酸含量（11.88%）较其他类群高，亚麻酸含量（48.06%）处于中等偏上水平，粗脂肪含量（34.41%）最低，因此该类群的材料适合作为非轮回亲本，或粗脂肪的精确定位试验低混池亲本；类群IV有 4 份材料，该类群的粗脂肪含量（41.17%）以及亚麻酸含量（55.85%）均为最高，同时该类群的油酸含量（11.89%）最低，该类群可作为品质改良骨干亲本；类群V有 5 份材料，该群体的粗脂肪（40.81%）、棕榈酸（7.87%）、油酸（24.55%）以及亚油酸（19.10%）含量中等偏上，亚麻酸含量（13.52%）最低，该类群可作为亚麻酸精确定位中低混池目标亲本。

2.8 亚麻种质资源 SSR 多态性分析

2.8.1 SSR 位点多态性分析 随机挑选 8 份（表 6）地域、形态和遗传背景差异较大的亚麻种质资

源为试验材料，对 248 对 SSR 引物进行初筛，最终筛选出 27 对条带清晰且多态性好的核心引物用于 387 份亚麻材料的遗传多样性分析。试验共扩增出 320 个位点，平均每对引物扩增出 11.81 个位点，平均扩增多态位点百分率为 99.74%；有效等位基因数为 1.1991~1.8230，引物 PIC 为 0.2489~0.6257（表 7）。由此说明，此次筛选的引物多态性丰富、

表 6 不同区域、形态、遗传背景的亚麻种质资源
Table 6 Flax germplasm resources of different regions, morphologies and genetic backgrounds

编号 Number	品种 Variety	来源 Origin
217	FRANCE317	法国
35	山丹白	中国甘肃
148	NORTHDAK505	美国
223	RUSSIA6	俄罗斯
12	坝亚 7 号	中国河北
128	轮选 1 号	中国内蒙古
4	晋亚 2 号	中国山西
176	Hungary 141	匈牙利

表 7 27 对 SSR 引物在 387 份亚麻材料中的扩增结果
Table 7 Amplification of 27 pairs of SSR primers in 387 flax materials

引物 Primer	扩增位点数 Number of amplified loci	多态性位点数 Number of polymorphic loci	多态性位点百分率 Percentage of polymorphic loci (%)	有效等位基因数 Number of effective alleles	PIC
Lub4	7	7	100.00	1.4053	0.4253
Lub17	11	11	100.00	1.4162	0.4085
Lua37	11	11	100.00	1.8230	0.6257
Lu69	8	8	100.00	1.1991	0.2489
Lu833F	13	13	100.00	1.6200	0.5440
Lual25	12	12	100.00	1.2168	0.2760
Lul4	15	15	100.00	1.4850	0.4765
Lul7	9	9	100.00	1.3284	0.3788
Li203	13	13	100.00	1.5400	0.5050
Lu263	10	10	100.00	1.3633	0.3840
Lu266	6	6	100.00	1.4834	0.4810
Lu273	12	12	100.00	1.2812	0.3548
Lu29	18	18	100.00	1.3264	0.3638
Lu316	17	17	100.00	1.3804	0.3878
Lu330	10	10	100.00	1.5515	0.4904
Lu400	13	13	100.00	1.3216	0.3423
Lu42	9	9	100.00	1.7526	0.6117
Lu462	19	19	100.00	1.4617	0.4422
Lu46	14	13	92.86	1.5082	0.4540
Lu51	10	10	100.00	1.3910	0.3920
L154	5	5	100.00	1.5741	0.4998
Lu598	15	15	100.00	1.4779	0.4105
Lu66	11	11	100.00	1.2276	0.2896
Lu747	14	14	100.00	1.4020	0.4183
Lu765	14	14	100.00	1.4558	0.4320
Lu771	10	10	100.00	1.3083	0.3340
Lu785	14	14	100.00	1.3927	0.3997

鉴别差异性强。其中 PIC 高于 0.5 的引物有 Lua37、Lu833F、Li203 和 Lu42，引物 Lua37 有效等位基因数以及 PIC 值均最高，在今后的遗传多样性分析中可作为核心引物。

2.8.2 UPGMA 聚类分析 387 份亚麻种质资源 (图 6) 的相似系数为 0.655~0.912，在遗传相似系数为 0.66 处可以将 387 份亚麻材料分为 5 个类群。类群 I 包含 84 份亚麻种质资源，类群 II 包括 43 份材

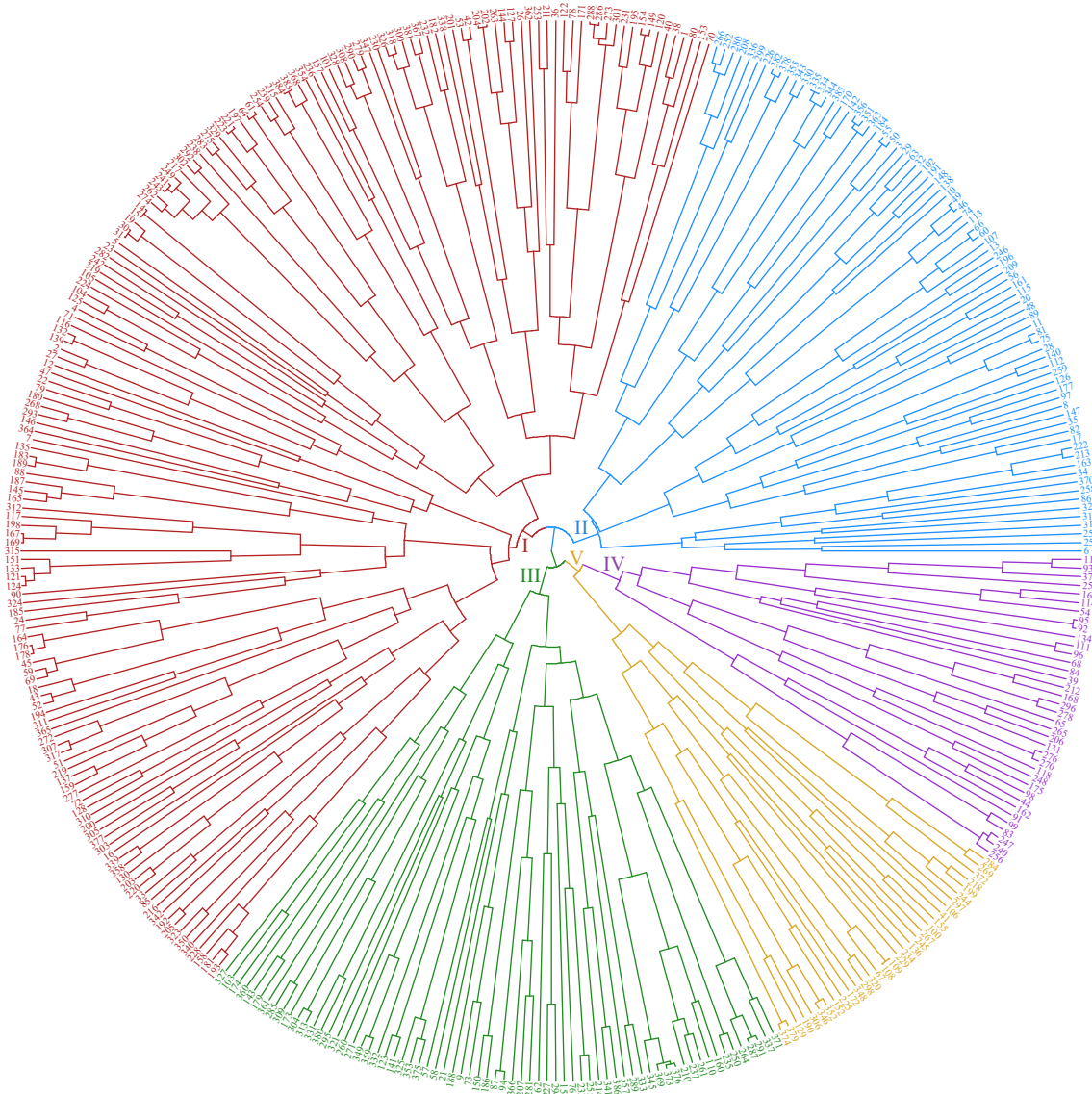


图 6 387 份亚麻材料 UPGMA 聚类分析
Fig.6 UPGMA cluster analysis of 387 flax resources

料，类群 III 包含 68 份材料，类群 IV 包含 107 份材料，类群 V 包含 85 份材料。

2.8.3 群体结构分析 当 $K=4$ 时出现拐点，以此为依据可将 387 份亚麻种质资源分为 4 个类群 (图 7)，类群 I 和类群 III 都是 97 份种质资源，类群 II 为 90 份种质资源，类群 IV 为 103 份种质资源。从图 8 可看出，种质资源材料群体间基因混杂程度不高，说明亚麻遗传背景丰富，群体构建合理，有利于不同育种目标亲本材料的选择。

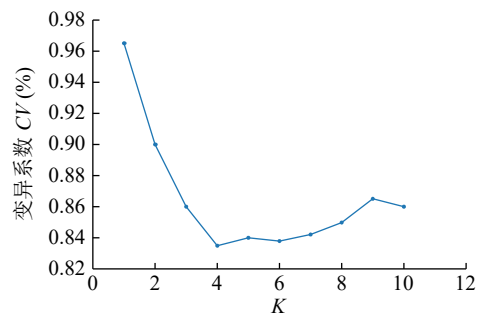


图 7 群体结构 K 值
Fig.7 K value of population structure

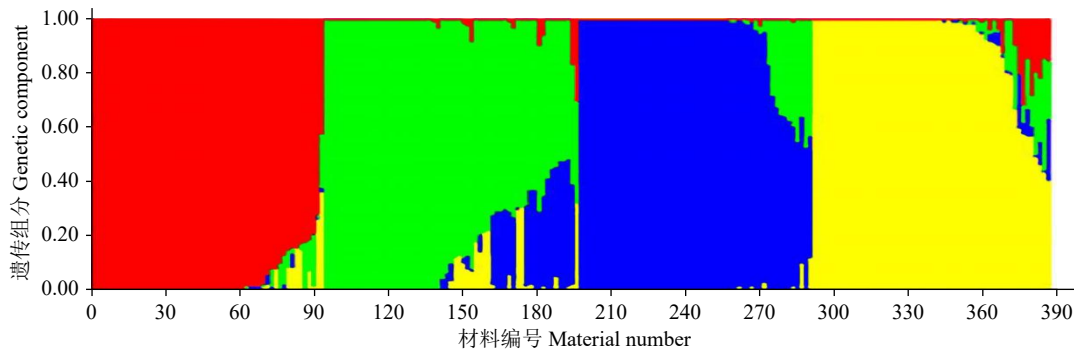


图 8 群体结构分析

Fig.8 Analysis of population structure

3 讨论

3.1 基于形态学标记的遗传多样性分析

形态学标记是了解作物遗传背景最直接有效的方式，一般通过对花色等质量性状以及株高、主茎分枝数和单株粒数等数量性状指标，就可对植物进行分类。该方法操作简单，但受外界因素（天气、人为）影响较大。在遗传多样性分析时，常因标记性状少或数量性状和质量性状界定不清，造成试验数据不精确^[20]，因此该方法一般只用于初步的遗传多样性分析。本试验共标记了 9 个农艺性状，基本涵盖了亚麻育种的目标性状。此次标记的性状与关虎等^[21]和李恭泽等^[22]标记的基本吻合，但少于前人^[23]标记的数目。因此在后续试验中可继续增加花色、叶色以及茎秆等易标记性状，使试验结果更加准确。

3.2 基于 SSR 分子标记的遗传多样性分析

SSR 因其操作简单、经济实惠、等位基因呈现共显性的特点，一直被应用于作物遗传多样性分析中^[20]。引物扩增的多态性位点、有效等位基因数以及 PIC 的高低，可直接反映引物的好坏。本试验对 248 对引物进行初筛，最终筛选出 27 对核心引物。其中 Lua37、Lu833F、Li203 和 Lu42 的 PIC 高于 0.5，说明引物多态性程度高，这与李恭泽等^[22]的研究结果基本吻合。

3.3 亚麻种质资源群体结构分析

基于 SSR 标记位点的 UPGMA 聚类分析将 387 份亚麻种质资源大致分为 5 个类群，前 4 个类群中绝大部分为国内种质资源，少量为国外种质资源，类群 V 全部为国外种质资源，各个群体组成相差不大。农艺性状聚类分析也将其分为 5 个类群，但各群体间在组成上存在较大差异，其中类群 I 包含 375

份种质资源，类群 II、III、IV 和 V 分别只有 4、4、2 和 2 份种质资源，可见环境条件对亚麻农艺性状的影响巨大。群体结构分析表明，尽管存在部分遗传混杂，但材料仍能有效聚成不同群体。这为从各群体中筛选优株提供了依据。

4 结论

利用形态标记和分子标记的方法对 387 份亚麻种质资源进行多样性和群体结构分析。形态学结果显示农艺性状间的遗传多样性指数在 0.70~2.08，平均 1.84，变异系数在 5.55%~129.18%；品质性状遗传多样性指数在 1.83~2.08，变异系数在 0.07%~1.38%。分子标记结果显示有效等位基因数为 1.1991~1.8230，引物 PIC 为 0.2489~0.6257。由此说明 387 份种质资源间的遗传差异明显，变异幅度大，遗传丰富度高。同时筛选出了 4 对（Lua37、Lu833F、Li203 和 Lu42）高多态性引物，可作为核心引物用于之后的遗传多样性研究。基于 SSR 标记的 UPGMA 聚类，将 387 份亚麻种质资源被分为 5 个类群，前 4 个类群主要为国内资源，第 5 个类群为国外资源。

参考文献

- [1] Harris R B D R. Domestication of plants in the old world: the origin and spread of cultivated plants in West Asia, Europe and the Nile Valley. *The Agricultural History Review*, 2001, 49(2): 226-227.
- [2] Kvavadze E, Bar-Yosef O, Belfer-Cohen A, et al. 30,000-year-old wild flax fibers. *Science*, 2009, 325(5946): 1359-1359.
- [3] Bassett C M C, Rodriguez-Leyva D, Pierce G N. Experimental and clinical research findings on the cardiovascular benefits of consuming flaxseed. *Physiologie Appliquée Nutrition Et Métabolisme*, 2009, 34(5): 965.
- [4] Ragupathy R, Rathinavelu R, Cloutier S. Physical mapping and BAC-end sequence analysis provide initial insights into the flax (*Linum usitatissimum* L.) genome. *BMC Genomics*, 2011, 12(1): 217.

- [5] Rands M R W, Adams W M, Bennun L, et al. Biodiversity conservation: challenges beyond 2010. *Science*, 2010, 329(5997): 1298-1303.
- [6] Diederichsen A. Comparison of genetic diversity of flax (*Linum usitatissimum* L.) between Canadian cultivars and a world collection. *Plant Breeding*, 2001, 120(4): 360-362.
- [7] Månsby E, Díaz O, Bothmer R V. Preliminary study of genetic diversity in Swedish flax (*Linum usitatissimum*). *Genetic Resources & Crop Evolution*, 2000, 47(4): 417-424.
- [8] Oh T J, Gorman M, Cullis C A. RFLP and RAPD mapping in flax (*Linum usitatissimum*). *Theoretical and Applied Genetics*, 2000, 101(4): 590-593.
- [9] Fu Y B, Diederichsen A, Richards K W, et al. Genetic diversity within a range of cultivars and landraces of flax (*Linum usitatissimum* L.) as revealed by RAPDs. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 49(2): 167-174.
- [10] Fu Y B, Rowland G G, Duguid S D, et al. RAPD analysis of 54 North American flax cultivars. *Crop Science*, 2003, 43(4): 1510.
- [11] Diederichsen A, Fu Y B. Phenotypic and molecular (RAPD) differentiation of four infraspecific groups of cultivated flax (*Linum usitatissimum* L. subsp. *usitatissimum*). *Genetic Resources and Crop Evolution*, 2006, 53(1): 77-90.
- [12] Spielmeier W, Green A G, Bittisnich D, et al. Identification of quantitative trait loci contributing to Fusarium wilt resistance on an AFLP linkage map of flax (*Linum usitatissimum*). *Theoretical and Applied Genetics*, 1998, 97(4): 633-641.
- [13] Riek J D, Loose M D, Waes J V, et al. Most similar variety grouping for distinctness evaluation of flax and linseed (*Linum usitatissimum* L.) varieties by means of AFLP and morphological data. *Plant Varieties and Seeds*, 2001, 14(2): 69-87.
- [14] Hüseyin U, Fu Y B, Kurt O, et al. Genetic diversity of cultivated flax (*Linum usitatissimum* L.) and its wild progenitor pale flax (*Linum bienne* Mill.) as revealed by ISSR markers. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 2010, 57(7): 1109-1119.
- [15] Powell W, Machray G C, Provan J. Polymorphism revealed by simple sequence repeats. *Trends in Plant Science*, 1996, 1(7): 215-222.
- [16] 张辉, 贾霄云, 高凤云, 等. 胡麻. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2021.
- [17] 高凤云, 斯钦巴特尔, 周宇, 等. 基于 SSR 标记的胡麻粗脂肪及脂肪酸组分的关联分析. *作物杂志*, 2022(1): 44-49.
- [18] 伊六喜. 胡麻产量和品质相关性状的全基因组关联分析. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018.
- [19] 王玉富, 粟建光. 亚麻种质资源描述规范和数据标准. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- [20] 何瑞超. 绿豆遗传多样性研究及种子萌发期耐盐性评价. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021.
- [21] 关虎, 王振华, 曹禹, 等. 亚麻品种主要农艺性状遗传多样性分析. *新疆农业科学*, 2011, 48(11): 2035-2040.
- [22] 李恭泽, 郭栋良, 江海霞, 等. 379 份亚麻种质白粉病抗性遗传多样性分析. *分子植物育种*. (2023-03-23)[2024-08-27]. <https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20230322.1820.019>.
- [23] 郭栋良, 江海霞, 张喻, 等. 国外引进亚麻种质资源遗传多样性分析. *新疆农业科学*, 2019, 56(11): 2112-2122.

Analysis of Genetic Diversity of Flax Germplasm Resources

Gao Fengyun¹, Yi Liuxi², Zhou Yu¹, Siqinbateer¹, He Ruichao¹, Jia Xiaoyun¹

⁽¹⁾Inner Mongolia Academy of Agriculture and Animal Husbandry Sciences, Hohhot 010031, Inner Mongolia, China;

⁽²⁾Institute of Agronomy, Inner Mongolia Agriculture University, Huhhot 010018, Inner Mongolia, China)

Abstract In order to understand the genetic background of flax germplasm resources and breed high-quality flax varieties, genetic diversity analysis, cluster analysis, principal component analysis and population structure were conducted on nine agronomic traits and six quality traits of 387 flax germplasm resources by phenotypic traits and molecular markers (SSR). The genetic diversity index of agronomic traits was between 0.70 and 2.08, and the coefficient of variation was between 5.55% and 129.18%. The genetic diversity index of quality traits ranged from 1.83 to 2.08, and the coefficient of variation ranged between 0.07% and 1.38%. A total of 320 SSR loci were amplified with an average of 11.81 loci per primer pair; the effective allele number was 1.1991-1.8230, PIC of primers varied from 0.2489 to 0.6257; at the genetic similarity coefficient of 0.66, the 387 flax germplasm resources could be divided into five groups, and cluster analysis based on agronomic traits and quality cluster analysis could also be divided the germplasm resources into five groups.

Key words Flax; Genetic diversity; Agronomic trait; Quality trait; SSR