

甘蓝型油菜种质氮素营养效率的鉴定及评价指标筛选

邹小云^{1,2}, 刘宝林², 李俊^{2,3}, 宋来强¹, 官春云^{2*}

(1. 江西省农业科学院作物研究所/江西省油料作物生物学重点实验室, 江西 南昌, 330200;

2. 湖南农业大学油料作物研究所/国家油料作物改良中心湖南分中心, 湖南, 长沙, 410128;

3. 中国农业科学院油料作物研究所, 湖北 武汉, 430062)

摘要:为建立甘蓝型油菜种质氮素营养效率的鉴定及评价方法, 筛选合理的次级评价指标和氮素营养高效基因型, 在田间小区试验条件下设置低氮(45kg/hm²)、中氮(180kg/hm²)和高氮(270kg/hm²) 3个施氮水平, 测定了416份不同生态类型甘蓝型油菜种质植株性状及氮素吸收效率(NAE)、氮素利用效率(NUE)和氮收获指数(NHI)。各性状在不同氮素水平下对氮的敏感性不同, 低氮下第一次有效分枝数的变异程度最大, 单株籽粒重次之; 中氮和高氮处理水平下单株籽粒重的变异程度均表现为最大, 低氮胁迫加大了种质间的差异。油菜种质氮素营养效率基因型间差异明显, 表现中效类型的种质最多, 高效和低效的较少。油菜种质间成熟期NAE的鉴定与评价应选择选择在低氮处理下, 以单株籽粒重、单株地上干重和株高为间接指标进行选择效果明显; 油菜种质间成熟期NUE的鉴定与评价应选择选择在高氮处理下, 以单株地上干重、第一次有效分枝数、单株籽粒重和每角粒数为间接指标进行选择效果明显; 油菜种质间成熟期NHI的鉴定与评价应选择选择在低氮处理下, 以单株籽粒重、单株地上干重和茎基粗为间接指标进行选择效果明显。

关键词:甘蓝型油菜; 种质; 氮素营养效率; 单株籽粒重; 单株地上干重; 茎基粗**中图分类号:**S565.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-9084(2018)02-0247-011**Identification and evaluation of nitrogen nutrition efficiency in rapeseed germplasms**ZOU Xiao-yun^{1,2}, LIU Bao-lin², LI Jun^{2,3}, SONG Lai-qiang¹, GUAN Chun-yun^{2*}(1. *Institute of Crops/Oil Crops Key Laboratory of Jiangxi Province, Nanchang 330200, China;*2. *Oilseed Crops Institute/National Oil Crops Improvement Center, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China;*3. *Oil Crops Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430062, China*)

Abstract: To establish an efficient identification and evaluation method of rapeseed nitrogen nutrition efficiency. A field experiment was conducted using 416 germplasm accessions under 3 nitrogen levels (45, 180, 270kg/hm²). 15 traits were measured to assess variations of nitrogen nutrition efficiencies including nitrogen absorption efficiency (NAE), nitrogen utilization efficiency (NUE) and nitrogen harvest index (NHI). The sensitivity of different traits to different nitrogen levels was different. Genetic variations of effective branch number under low nitrogen treatments (45kg/hm²) were the greatest, genetic variations of seed weight per plant under low nitrogen treatments (45kg/hm²) were the second greatest. Genetic variations of seed weight per plant under medium nitrogen (180kg/hm²) and high nitrogen (270kg/hm²) treatments were the greatest. Under low nitrogen stress, the differences increased among the accessions. Nitrogen nutrition efficiency of rapeseed genotypes at maturity stage existed significant difference. Distribution patterns showed that both high and low efficiency materials were few. Low nitrogen treatment (45kg/hm²) was the best nitrogen application of identification and evaluation on NAE at maturity stage.

收稿日期:2017-08-23

基金项目:国家自然科学基金(31760393, 31771735); 江西省杰出青年人才资助计划(20171BCB23082); 江西省科技创新团队建设计划(20152BCB24013); 江西省农业科学院博士启动项目(20162CBS009)

作者简介:邹小云(1978-), 男, 江西新余人, 研究员, 博士, 主要从事作物遗传育种与栽培营养研究, E-mail: jxauzy@163.com

*通讯作者:官春云(1938-), 男, 蒙古族, 湖北荆州人, 教授, 中国工程院院士, 主要从事作物育种与栽培技术研究, E-mail: guancy2011@aliyun.com

The indirect indexes were seed weight per plant, aboveground plant dry weight and plant height. High nitrogen treatment ($270\text{kg}/\text{hm}^2$) was the best nitrogen application for identification and evaluation on NUE at rapeseed maturity stage. The indirect indexes was aboveground plant dry weight, effective branch number, seed weight per plant and seed number per pod. Low nitrogen treatment ($45\text{kg}/\text{hm}^2$) was the best nitrogen application for identification and evaluation on NHI at maturity stage. The indirect indexes were seed weight per plant, aboveground plant dry weight and basal stem diameter.

Key words: Rapeseed (*Brassica napus* L.); germplasm; nitrogen nutrition efficiency; plant seed weight, aboveground dry weight; basal stem diameter

油菜是我国重要的油料作物之一^[1]。氮肥在油菜生产中起关键作用,生产上投入氮肥使用量已高达 $200 \sim 330\text{kg}/\text{hm}^2$ ^[2],但氮肥的利用率低于 40% ^[3]。因此,必须降低油菜氮肥施用量,提高氮肥利用率。而当前增加油菜籽粒产量和提高氮肥利用率的一条有效途径是培育和种植氮营养高效油菜品种。氮肥利用率作为表征作物对氮肥的吸收和利用效果的指标,其内涵并没有得到统一,多数采用 Moll 等^[4]的方法来评价氮效率^[5~7]。前人多物种的氮高效种质评价与筛选提供了很好的理论依据,但在选择压力、筛选时期和指标的选择及确定方面还存有分歧。曹敏建等^[8]在低氮选择压力下以不同生长阶段的干物重、产量和耐低氮胁迫指数为筛选指标开展了玉米氮效率鉴定与评价研究。钟代斌等^[9]以不同生长时期的苗高、分蘖数和干物重为筛选指标对水稻品种的氮效率进行筛选,认为分蘖数是水稻氮高效种质筛选的可靠指标之一。张亚丽等^[10]认为根部干物重和氮素累积量是水稻氮效率的主要筛选指标。韩璐等^[11]以整株干物重为主要筛选指标在苗期对棉花进行了氮效率筛选。马庆等^[12]以籽粒产量的氮敏感指数和耐低氮系数为评价指标并结合株高和吐丝期等二级性状,对我国玉米育种与生产上重要的 189 份玉米自交系进行氮效率评价。

作为以获得籽粒产量为目的的油菜,基于氮营养效率指标鉴定了一些不同氮效率的品种^[13~15],但缺乏评价指标的可行性研究,也尚未建立起一套快速、高效的鉴定与评价体系。因此,亟待于建立一套科学合理的氮高效油菜基因型鉴定与筛选方法,以挖掘油菜种质资源的氮高效基因型,为甘蓝型油菜氮高效的相关研究提供基因型信息。为此,本试验采用有代表性的 416 份油菜种质来评价油菜成熟期氮素营养效率的差异,研究油菜成熟期植株性状与氮素营养效率的关系,筛选相关评价指标,以期对油菜氮素营养高效利用提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 材料

代表性的 416 份油菜种质(表 1)由江西省农业科学院作物研究所、湖南农业大学油料研究所和青海省农林科学院提供。

1.2 试验设计和方法

试验在江西省农业厅种子管理局良种繁育中心试验基地(南昌县 $28^{\circ}32'55.29''\text{N}$, $115^{\circ}56'21.11''\text{E}$),选择地力均匀,种植一季中稻后的田块进行,2012 年 10 月 14 日播种。土壤基本理化性状为 $\text{pH}5.97$,有机质 $23.7\text{g}/\text{kg}$,碱解氮 $89\text{mg}/\text{kg}$,有效磷 $26.5\text{mg}/\text{kg}$,速效钾 $37\text{mg}/\text{kg}$ 。试验设置 3 个氮水平,即低氮(LN, $45\text{kg}/\text{hm}^2$)、中氮(MN, $180\text{kg}/\text{hm}^2$)、高氮(HN, $270\text{kg}/\text{hm}^2$),另外设置不施氮处理用于作为土壤供氮量来计算氮素效率;机械开沟,固定箱面为 1.8m ,每个品种种植两行,行株距为 $30\text{cm} \times 20\text{cm}$,播种前基施氮肥 60% ,苗期和薹期分别追施氮肥 20% 。 P_2O_5 全部底施,用量为 $90\text{kg}/\text{hm}^2$; K_2O 70% 底施, 30% 薹期施用,用量为 $90\text{kg}/\text{hm}^2$; 硼肥作种肥施 $15\text{kg}/\text{hm}^2$,现蕾期叶面喷施 $1.5\text{kg}/\text{hm}^2$ 。

成熟期每小区取有代表性植株 6 株风干,考察主要农艺和产量性状;另外每小区取有代表性植株 6 株装入尼龙网袋待风干后分别称茎枝、角壳和籽粒重,后采用凯氏定氮法分别测定氮素含量^[16]。植株氮积累量/(土壤供氮量 + 施氮量) $\times 100\%$ = 氮素吸收效率(NAE,%)^[4],生物量/植株氮积累量 = 氮素利用效率(NUE, $\text{g DW}/\text{gN}$)^[4],籽粒氮积累量/植株氮积累量 $\times 100\%$ = 氮收获指数(NHI,%)^[17], (高氮或中氮下性状值 - 低氮下性状值)/低氮下性状值 $\times 100\%$ = 植株性状对加氮的反应敏感度(%)^[18]。

1.3 数据处理

利用 Excel 2003 进行常规数据整理,利用 IBM SPSS Statistics 22 对试验数据进行变异数分析、种质聚类、多重比较和回归判别分析。

表 1 供试油菜种质
Table 1 Rapeseed germplasm in this experiment

编号 Code	名称 Germplasm	编号 Code	名称 Germplasm	编号 Code	名称 Germplasm
1	7633	56	秀油 1 号 Xiyou 1	111	绵油 12 号 Mianyou 12
2	油 87HO You 87HO	57	03 杂 716 03 Za 716	112	EZY218
3	Sh0601	58	扬 6614 Yang 6614	113	绵油 15 号 Mianyou 15
4	翔优 113 Xiangyou 113	59	K565	114	07 - C - 30
5	9818	60	贵 023 Gui 023	115	皖油 22 号 Wanyou 22
6	跃新油 1 号 Yuexinyou 1	61	杂 839 Za 839	116	03 - 20F3
7	surpass 440	62	Bolko	117	皖油 23 号 Wanyou 23
8	翔优 112 Xiangyou 112	63	宜春赣 1 Yichungan 1	118	26711
9	黄 023 Huang 023	64	H161	119	沪油 1 号 Huyou 1
10	晶华 378 Jinghua 378	65	B351	120	036 - 38
11	R513	66	米兰白尔 Milanbaier	121	沪油 15 号 Huyou 15
12	浙油 21 Zheyou 21	67	H04 - 4 - 7	122	希望 528 Xiwang 528
13	06NH05	68	Westar	123	501
14	Hy6648	69	DH0815	124	沪油 18 号 Huyou 18
15	721	70	黔 23 Qian 23	125	86002
16	德油 7814 Deyou 7814	71	105	126	贵油 7 号 Guiyou 7
17	2105	72	GRANIT	127	8223
18	隆杂油 999 Longzayou 999	73	油坊 1 号 Youfang 1	128	黔油 12 号 Qianyou 12
19	R210	74	胜利青梗 Shengliqinggen	129	GS520
20	JG518	75	正杂 01 Zhenga 01	130	黔油 14 号 Qianyou 14
21	龙油 99 Longyou 99	76	甘油 5 号 Ganyou 5	131	5103
22	2006 - 6159	77	H9948	132	黔油 17 号 Qianyou 17
23	鑫田油 1 号 Xintianyou 1	78	川油 1 号 Chuanyou 1	133	98D18
24	H9951	79	秦杂油 3 号 Qinzayou 3	134	史力丰 Shilifeng
25	希望 106 Xiwang 106	80	二西塔 Erxida	135	0811
26	H9958	81	9818	136	高油 605 Gaoyou 605
27	扬鉴 8 Yangjian 8	82	浙 8 Zhe 8	137	宁油 10 号 Ningyou 10
28	EZY9 - 4	83	2000 - 5	138	宁油 12 号 Ningyou 12
29	H0202	84	赣两优 2 号 Ganliangyou 2	139	杂油 59 Zayou 59
30	5698	85	贵籽 638 Guizi 638	140	宁油 14 号 Ningyou 14
31	杂 695 Za 695	86	H0302	141	61527
32	7108	87	川油 11 号 Chuanyou 11	142	宁油 16 号 Ningyou 16
33	06 杂 996 06 Za 996	88	油研 288 Youyan 288	143	陕 2B Shaan 2B
34	repce5R - 1	89	赣油 12 号 Ganyou 12	144	希望 98 Xiwang 98
35	油研 1707 Youyan 1707	90	三北 98 Sanbei 98	145	DCD - 1
36	H52	91	天油杂 3 号 Tianyouza 3	146	杨油 6 号 Yangyou 6
37	0112	92	98D - 9	147	两优 668 Liangyou 668
38	中双 2 号 Zhongshuang 2	93	棠山油菜 Tangshanyoucai	148	苏油 3 号 Suyou 3
39	033 - 118	94	99 杂 06 99 Za 06	149	华杂 8 号 Huaza
40	湘油 11 号 Xiangyou 11	95	Erglu	150	浙双 6 号 Zheshuang 6
41	EYZ06 - 14	96	杂 2015 Za 2015	151	华杂 11 号 Huaza 11
42	贵 416 Gui 416	97	吉安长角 Jiānchángjiào	152	浙双 72 Zheshuang 72
43	H9953	98	希望 568 Xiwang 568	153	华杂 14 号 Huaza 14
44	H165	99	沪油 16 Huyou 16	154	中双 6303 Zhongshuang 6303
45	K426	100	2011	155	069 - 1
46	Oro	101	中油 821 Zhongyou 821	156	中双 4 号 Zhongshuang 4
47	H0433	102	H9945	157	174R
48	贵 352 Gui 352	103	华双 4 号 Huashuang 4	158	09118
49	6788	104	H02 - 21	159	中双 6 号 Zhongshuang 6
50	Ceres	105	华双 5 号 Huashuang 5	160	中双 7 号 Zhongshuang 7
51	5730	105	宜杂 02 - 13 Yiza 02 - 13	161	油研 7 号 Youyan 7
52	浔油 2 号 Xunyou 2	107	豫油 2 号 Yuyou 2	162	中双 8 号 Zhongshuang 8
53	沪油杂 4 号 Huyouza 4	108	HY4	163	油研 8 号 Youyan 8
54	赣油 3 号 Ganyou 3	109	豫油 5 号 Yuyou 5	164	C926
55	T1839	110	DH1302	165	中双 10 号 Zhongshuang 10

续表 1

编号 Code	名称 Germplasm	编号 Code	名称 Germplasm	编号 Code	名称 Germplasm
166	华协 1 号 Huaxie 1	221	贵杂 4 号 Guiza 4	276	Bakow
167	K805	222	Conzuul	277	Ning RS - 1
168	青油 14 号 Qingyou 14	223	绿油 X 号 Lyou X	278	Bienvenu
169	贵杂 2 号 Guiza 2	224	D. ARoll	279	浙油 7 号 Zheyou 7
170	陇油 2 Longyou 2	225	ZhenYou - 1	280	鉴 7 Jian 7
171	6 - 22	226	Dac - chosen	281	华油 3 号 Huayou 3
172	秦油 8 号 Qinyou 8	227	引 1 Yin 1	282	Brutor
173	大地 16 Dadi 16	228	向农 03 Xiangnong 03	283	华油 5 号 Huayou 5
174	秦油 1 号 Qinyou 1	229	Bin270	284	Casino
175	和盛油 868 Heshengyou 868	230	驰丰 1 号 Chifeng 1	285	华油 6 号 Huayou 6
176	陕油 8 号选 Shaanyou 8 xuan	231	赣油 2 号 Ganyou 2	286	辐油 1 号 Fuyou 1
177	丰油 9 号 Fengyou 9	232	赣油 5 号 Ganyou 5	287	Coma
178	川农油 3 号 Chuannongyou 3	233	0022	288	湘农油 2 号 Xiangnongyou 2
179	湘油 13 号 Xiangyou 3	234	赣油 14 号 Ganyou 14	289	D - 083
180	德 68 - 12 De 68 - 12	235	浙优油 3 号 Zheyouyou 3	290	华油 16 Huayou 16
181	天禾油 1 号 Tianheyu 1	236	Globa	291	Doral
182	09 - 崇 26 09 - chong 26	237	兴油 588 Xingyou 588	292	Jet - Neuf
183	华油 2790 Huayou 2790	238	黔 9 Qian 9	293	Jupiter
184	H1717	239	H001	294	Siertra
185	Bullet	240	GULLR	295	Liradouna
186	050149	241	CYZ0910	296	Lisritta
187	N1 邹 3 NIZou 3	242	华油 11 Huayou 11	297	Literavo
188	050288	243	K585	298	Majar
189	油王 5 号 Youwang 5	244	华油 13 Huayou 13	299	Matadar
190	K586	245	宁杂 11 号 Ningza 11	300	NESTOR
191	金油 15 Jinyou 15	246	华油 14 Huayou 14	301	Punter
192	中油杂 8 号 Zhongyouz 8	247	82	302	Piadem
193	乐油 5 号 Leyou 5	248	华油 2 Huayou 2	303	Quinta
194	06 - L - 2Q	249	05 - PB3	304	湘油 15 号 Xiangyou 15
195	川油 18 Chuanyou 18	250	华油 4 Huayou 4	305	C827
196	0590	251	华油 10 Huayou 10	306	龙杂 2 号 Longza 2
197	蜀龙油 3 号 Shulongyou 3	252	93 - 216	307	杂油 79 Zayou 79
198	德油杂 10 号 Deyouza 10	253	Jiayou 1	308	圣光 76 Shengguang 76
199	绵油 9 号 Mianyou 9	254	RC06 - 434	309	08D04
200	杂 529 Za 529	255	Jiayou 3	310	08C18 - 2
201	宜油 13 号 Yiyou 3	256	希望 508 Xiwang 508	311	圣光 99 Shengguang 99
202	圣光 86 Shengguang 86	257	Lirabon	312	C919
203	核优 488 Heyou 488	258	36P47	313	湘农油 999 Xiangnongyou 999
204	川油 16 Chuanyou 16	259	Marnoo	314	德齐 998 Deqi 998
205	川杂 NH352 Chuanza NH352	260	P7089	315	Dunkel
206	川油 33 Chuanyou 33	261	Nikas	316	杂 526 Za 526
207	T1588	262	86P48	317	Karoo
208	华双 1 号 Huashuang 1	263	Nilla	318	两优 669 Liangyou 669
209	H - 9908	264	中双 5 号 Zhongshuang 5	319	Grouse
210	Altex	265	Rioklas	320	GS99
211	杂 59 Za 59	266	秦油 3 号 Qinyou 3	321	CENN
212	Alto	267	Rucabo	322	德齐油 4 号 Deqiyu 4
213	和盛油 55 Heshengyou 55	268	早丰 998 Zaofeng 998	323	Defender
214	Apomix	269	湘农油 3 号 Xiangnongyou 3	324	o8 - 6
215	Bronowski	270	alen	325	Sponsor
216	油 YL050 You YL050	271	telent	326	09 崇 24 09 chong 24
217	湘杂油 780 Xiangzayou 780	272	ECNN	327	Estrode
218	Cibrabra	273	华双 2 号 Huashuang 2	328	Agriculture
219	蜀杂 10 号 Shuza 10	274	Apache	329	SY116
220	Comet	275	华双 3 号 Huashuang 3	330	NSW Agriculture

续表 1

编号 Code	名称 Germplasm	编号 Code	名称 Germplasm	编号 Code	名称 Germplasm
331	2005GZ-01	360	R210015	389	德油 5 号 Deyou 5
332	浙双 8 号 Zheshuang 8	361	R210016	390	油研 9 号 Youyan 9
333	中双 11 号 Zhongshuang 11	362	R210017	391	中油杂 12 号 Zhongyouza 12
334	56602	363	R210018	392	华湘油 12 号 Huaxiangyou 12
335	富油 2 号 Fuyou 2	364	R210019	393	华油杂 9 号 Huayouza 9
336	浙油 6001 Zheyou 6001	365	R210020	394	华赣油 1 号 Huaganyou 1
337	P6036-1	366	Erra	395	华油杂 13 号 Huayouza 13
338	圣光 77 Shenguang 77	367	汇油 50 Huiyou 50	396	华油杂 62 Huayouza 62
339	699	368	742	397	华油杂 14 号 Huayouza 14
340	浙油 28 Zheyou 28	369	杂 158 Za 158	398	油研 50 Youyan 50
341	阳光 2008 Yangguang 2008	370	中双 9 号 Zhongshuang 9	399	秦优 7 号 Qinyou 7
342	589	371	沪油 21 Huyou 21	400	创杂油 5 号 Chuangzayou 5
343	7X089	372	1358	401	湘杂油 2 号 Xiangzayou 2
344	KT0601	373	赣油杂 3 号 Ganyouza 3	402	蓉油 10 号 Rongyou 10
345	华航 901 Huahang 901	374	德油早 1 号 Deyouza 1	403	南油杂 1 号 Nanyouza 1
346	282081	375	湘杂油 6 号 Xiangzayou 6	404	南油 68 Nanyou 68
347	阳光 2009 Yangguang 2009	376	湘杂油 743 Xiangzayou 743	405	青杂 2 号 Qingza 2
348	浙油 50 Zheyou 50	377	湘杂油 631 Xiangzayou 631	406	青杂 3 号 Qingza 3
349	HQZ-09	378	丰油 520 Fengyou 520	407	青杂 4 号 Qingza 4
350	赣油 17 Ganyou 17	379	浔油 8 号 Xunyou 8	408	青杂 5 号 Qingza
351	沪油 17 Huyou 17	380	湘杂油 1613 Xiangzayou 1613	409	青杂 7 号 Qingza 7
352	99B01	381	黔油 18 号 Qianyou 18	410	互丰 010 Hufeng 010
353	史力佳 Shilijia	382	川油 21 Chuanyou 21	411	中油杂 2 号 Zhongyouza 2
354	283B	383	丰油 730 Fengyou 730	412	27103
355	R210010	384	赣油杂 2 号 Ganyouza 2	413	cd
356	R210011	385	赣油杂 5 号 Ganyouza 5	414	67119
357	R210012	386	赣油杂 1 号 Ganyouza 1	415	N0 邹 2 N0 Zou 2
358	R210013	387	丰油 5103 Fengyou 5103	416	Monty
359	R210014	388	核优 56 Heyou 56		

2 结果与分析

2.1 油菜成熟期 NAE、NUE 和 NHI 的基因型差异

由表 2 可知,油菜种质氮素吸收效率(NAE)总体上有随施氮量增加而降低的趋势。NAE 的极差在低氮水平下最大,达到 38.75%。3 个氮水平下,NAE 最小值变幅为 9.50%~11.05%,最大值变幅为 46.87%~49.80%,变异系数变幅为 30.95%~31.39%。油菜氮素利用效率(NUE)的极差以低氮水平下最大,达到 56.39 g/g。3 个氮水平下,NUE 最小值变幅为 31.76~33.56 g/g,最大值变幅为 75.76~88.15 g/g,变异系数变幅为 14.97%~15.47%。油菜氮收获指数(NHI)的极差以高氮水平下相差最大,达到 52.84%。3 个氮水平下,NHI 最小值变幅为 17.00%~20.59%,最大值变幅为 69.85%~72.12%,变异系数变幅为 17.63%~18.

62%,由此可见不同油菜种质在氮素吸收效率、氮素利用效率和氮素收获指数上存在明显的基因型差异。

2.2 油菜 NAE、NUE 和 NHI 及植株性状的变异

油菜 NAE、NUE 和 NHI 及植株性状的变异表明(图 1),不同氮素水平下油菜植株性状变异程度差异较大,低氮下变异系数从小到大的顺序为 14 < 7 < 10 < 1 < 15 < 2 < 8 < 9 < 4 < 13 < 5 < 12 < 6 < 11 < 3,中氮下变异系数从小到大的顺序为 1 < 10 < 14 < 15 < 2 < 8 < 9 < 4 < 5 < 13 < 7 < 3 < 12 < 6 < 11,高氮下变异系数从小到大的顺序为 1 < 7 < 14 < 10 < 15 < 8 < 9 < 2 < 4 < 5 < 13 < 3 < 12 < 6 < 11。低氮处理水平下第一次有效分枝数的变异程度表现最大,单株籽粒重的变异程度次之,NUE 的变异程度表现最小;中氮和高氮处理水平下单株籽粒重的变异程度均表现最大,株高的变异程度均表现最小;低氮处理下株高、第一次有效分枝数、主花序长度、主花序角

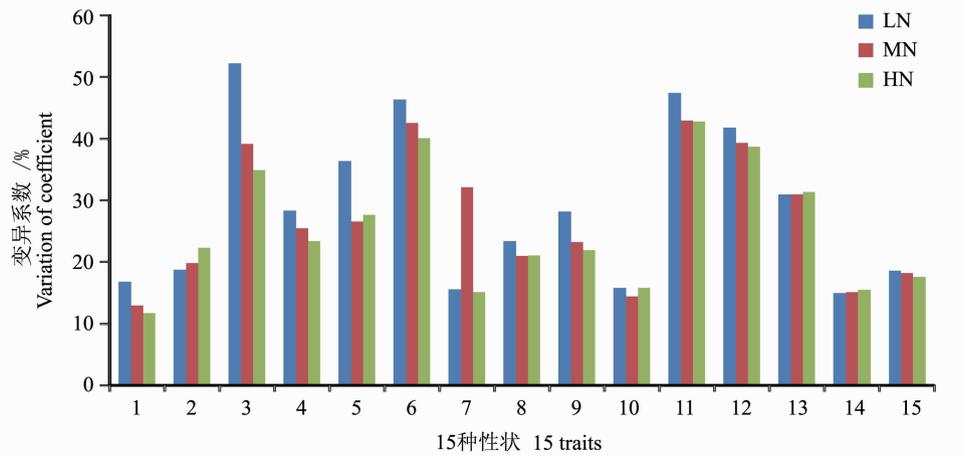
果数、单株角果数、每角粒数、茎基粗、千粒重、单株 质间的变异均大于中氮和高氮处理。
籽粒重和单株地上干重及油菜 NHI 等 11 个性状种

表 2 不同氮水平下油菜 NAE、NUE 和 NHI 的基因型变异

Table 2 Genotypic variations of NAE (%), NUE (gDW/gN) and NHI (%) of rapeseed

氮效率 NNE	氮素水平 N level/(kg/hm ²)	最大值 Max	最小值 Min	极差 Range	平均值 Mean	标准差 S. D.	变异系数 CV/%
NAE	45	49.80	11.05	38.75	31.96	9.89	30.95
	180	48.89	10.50	38.39	29.51	9.15	30.99
	270	46.87	9.50	37.37	22.98	7.21	31.39
NUE	45	88.15	31.76	56.39	66.59	9.97	14.97
	180	84.18	33.18	51.00	58.25	8.81	15.13
	270	75.76	33.56	42.20	54.05	8.36	15.47
NHI	45	72.12	19.72	52.40	52.68	9.81	18.62
	180	70.26	20.59	49.67	51.42	9.38	18.24
	270	69.85	17.00	52.84	49.92	8.80	17.63

Note: NNE; nitrogen nutrition efficiency; NAE; nitrogen absorption efficiency; NUE; nitrogen utilization efficiency; NHI; nitrogen harvest index. Same as below



注: LN、MN、HN 分别指低氮、中氮、高氮处理; 1: 株高; 2: 分枝部位; 3: 第一次有效分枝数; 4: 主花序长度; 5: 主花序角果数; 6: 单株角果数; 7: 角果长度; 8: 每角粒数; 9: 茎基粗; 10: 千粒重; 11: 单株籽粒重; 12: 单株地上干重; 13: NAE; 14: NUE; 15: NHI

Note: LN, MN, HN are low, medium and high nitrogen treatments respectively; 1: plant height; 2: branch height; 3: effective branch number; 4: length of the main inflorescence; 5: pod number of the main inflorescence; 6: effective pod number per plant; 7: pod length; 8: seed number per pod; 9: basal stem diameter; 10: 1 000 - seed weight; 11: seed weight per plant; 12: aboveground dry weight per plant; 13: NAE; 14: NUE; 15: NHI

图 1 油菜种质各性状变异状况

Fig. 1 Variation of trait among rapeseed germplasm

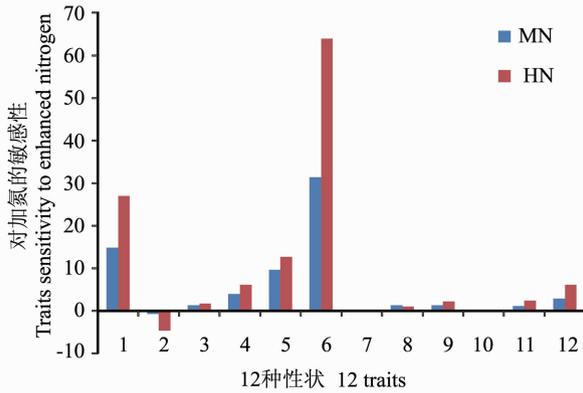
2.3 油菜种质植株性状对加氮的反应

对 416 份油菜种质植株性状在加氮压力下的反应表现进行了分析(图 2), 结果表明, 各性状对加氮反应的敏感性差异明显, 在两个加氮压力下, 除分枝部位表现为负向敏感性外, 其他 11 个性状均表现正向敏感性; 从敏感性的绝对值大小来看, 单株角果数在两个加氮压力的敏感性绝对值均在 30% 以上, 表现为加氮反应高度敏感; 千粒重和角果长度 2 个性状在两个加氮压力的敏感性绝对值均低于 1%, 表现为加氮反应低度敏感。

2.4 油菜氮素营养效率的种质分类与鉴定

将 416 份种质分别在 3 个氮素处理下以 NAE 或 NUE 或 NHI 分高、中和低 3 类(表 3、4、5)。结果显示, NAE、NUE 和 NHI 分类结果均呈现相同的规

律, 均表现为中效种质多, 低效和高效种质少的分布。NAE 在 3 个氮处理下均表现为低效的种质为 19、229、107、109、8、130、172、21、238、87、32、261、30、134、321、44、317、358、323 和 85, 均表现为高效的种质为 304、416、383、403、153、194、345、412、385、5 和 369; NUE 在 3 个氮处理下均表现为低效的种质为 15、72、10、224、93、222、19、8、62、74、109、82、121、103、238、265、242、64、2、4、58、187、220、91、101 和 107, 均表现为高效的种质为 395、394、310 和 43; NHI 在 3 个氮处理下均表现为低效的种质为 103、355、15、293、229、238、242、212、19、93、50、82、85、240、227、274、321、74、10 和 17, 均表现为高效的种质为 40、401、34、179、412、38、402、36 和 379。



注:1:株高;2:分枝部位;3:第一次有效分枝数;4:主花序长度;5:主花序角果数;6:单株角果数;7:角果长度;8:每角粒数;9:茎基粗;10:千粒重;11:单株籽粒重;12:单株地上干重

Note: 1: plant height; 2: branch height; 3: effective branch number; 4: length of the main inflorescence; 5: pod number of the main inflorescence; 6: effective pod number per plant; 7: pod length; 8: seed number per pod; 9: basal stem diameter; 10: 1 000 - seed weight; 11: seed weight per plant; 12: aboveground dry weight per plant

图2 油菜种质各性状对加氮的敏感性

Fig. 2 The sensitivity of maturity traits to enhanced nitrogen in rapeseed germplasms

2.5 油菜种质氮素营养效率的鉴定与评价方法

2.5.1 鉴定与评价指标 12个植株性状与氮素营养效率在不同氮素水平下的偏相关分析表明(表6),各性状与氮素营养效率(NAE和NUE)和氮收获指数(NHI)的相关性大小不一,无论在何氮素水平下,株高、第一次有效分枝数、主花序长度、单株角果数、角果长度、每角粒数、茎基粗、单株籽粒重和单株地上干重均达到显著或极显著正相关。与NAE和NHI达到显著相关的性状中,第一次有效分枝数、单株角果数和单株地上干重有随着氮素水平的增加其相关系数呈降低的趋势;而与NUE达到显著相关的性状中,株高、第一次有效分枝数和单株角果数有随着氮素水平的增加其相关系数呈增加的趋势。表明株高、第一次有效分枝数、单株角果数和单株地上干重可能是氮素营养效率的表征性状;利用NAE和NHI在低氮下选择效率高,利用NUE在高氮下选择效率高。

表3 油菜种质氮素吸收效率(NAE)的分类标准及各类品种数

Table 3 Classification standards and number of each type for NAE in rapeseed

处理 Treatment	类型及标准 Type and standard	种质数 Amount	类型代号* Type	种质编号 Serial number
低氮 LN	L ($x < X - U_{0.2} \times S$)	55	L - L	19, 229, 355, 359, 358, 323, 172, 140, 32, 30, 21, 238, 353, 231, 282, 23, 222, 292, 294, 87, 148, 126, 239, 246, 107, 284, 134, 226, 317, 85, 62, 119, 240, 242, 54, 321, 128, 220, 152, 109, 58, 274, 260, 362, 60, 76, 34, 121, 15, 286, 8, 44, 130, 261, 256
	M ($X - U_{0.2} \times S \leq x \leq X + U_{0.2} \times S$)	305	L - M	未标出的均是 Others
	H ($x > X + U_{0.2} \times S$)	56	L - H	175, 348, 304, 416, 369, 383, 193, 403, 217, 127, 139, 385, 290, 86, 402, 340, 135, 20, 94, 22, 414, 413, 283, 1, 11, 65, 77, 63, 273, 81, 176, 333, 310, 410, 386, 338, 342, 155, 354, 347, 153, 168, 275, 57, 5, 412, 7, 406, 411, 398, 387, 405, 194, 345, 157, 329
中氮 MN	L ($x < X - U_{0.2} \times S$)	52	M - L	226, 355, 19, 229, 107, 109, 8, 130, 172, 21, 148, 238, 87, 32, 60, 261, 74, 36, 30, 134, 321, 44, 242, 317, 358, 68, 10, 222, 323, 357, 34, 105, 356, 115, 17, 296, 82, 95, 23, 80, 140, 85, 66, 119, 72, 220, 136, 76, 255, 128, 218, 58
	M ($X - U_{0.2} \times S \leq x \leq X + U_{0.2} \times S$)	319	M - M	未标出的均是 Others
	H ($x > X + U_{0.2} \times S$)	45	M - H	304, 416, 383, 403, 153, 194, 401, 345, 94, 333, 135, 125, 167, 149, 283, 200, 340, 100, 389, 412, 415, 385, 5, 391, 203, 413, 11, 195, 343, 326, 402, 174, 369, 227, 191, 378, 272, 384, 404, 275, 266, 86, 208, 373, 338
高氮 HN	L ($x < X - U_{0.2} \times S$)	38	H - L	358, 317, 130, 107, 10, 229, 19, 105, 80, 32, 124, 363, 356, 85, 109, 82, 30, 8, 321, 279, 238, 113, 121, 359, 115, 89, 240, 360, 21, 315, 236, 97, 87, 172, 323, 134, 261, 44
	M ($X - U_{0.2} \times S \leq x \leq X + U_{0.2} \times S$)	339	H - M	未标出的均是 Others
	H ($x > X + U_{0.2} \times S$)	39	H - H	416, 385, 389, 304, 125, 381, 386, 348, 83, 57, 199, 194, 411, 403, 414, 29, 22, 349, 383, 378, 392, 326, 5, 16, 345, 48, 178, 208, 398, 405, 412, 131, 88, 38, 153, 369, 149, 77, 400

注: x 为实际值, X 为所有品种平均值, S 为标准差, $U_{0.2}$ 为 $\alpha = 0.2$ 时的 U 值(正态离差值)。* 类型代号前面的 L, M 和 H 分别表示低氮、中氮和高氮处理, 后面的 L, M 和 H 分别表示氮低效、氮中效和氮高效。下同

Note: x for actual value, X for mean value of all varieties, S for standard deviation, $U_{0.2}$ for U value when $\alpha = 0.2$, L, M, and H in front of the type code was in low nitrogen, medium nitrogen and high nitrogen treatment respectively, L, M, and H at the back of the type code was low nitrogen nutrition efficiency, medium nitrogen nutrition efficiency, and high nitrogen nutrition efficiency respectively. Same as below

表4 油菜种质氮素利用效率(NUE)的分类标准及各类品种数
Table 4 The classification standards and number of each type for NUE in rapeseed

处理 Treatment	类型及标准 Type and standard	种质数 Amount	类型代号* Type	种质编号 Serial number
低氮 LN	$L (x < X - U_{0.2} \times S)$	49	L-L	19, 15, 72, 62, 4, 242, 8, 121, 60, 109, 2, 10, 82, 248, 6, 93, 238, 17, 74, 115, 64, 27, 187, 222, 321, 54, 58, 212, 267, 263, 85, 325, 125, 103, 331, 226, 224, 50, 315, 265, 250, 220, 91, 101, 255, 25, 107, 240, 271
	$M (X - U_{0.2} \times S \leq x \leq X + U_{0.2} \times S)$	331	L-M	未标出的均是 Others
	$H (x > X + U_{0.2} \times S)$	36	L-H	9, 7, 51, 394, 241, 196, 152, 393, 41, 268, 216, 260, 395, 404, 1, 20, 339, 402, 401, 75, 310, 245, 43, 281, 397, 45, 206, 184, 254, 77, 396, 398, 256, 42, 13, 308
中氮 MN	$L (x < X - U_{0.2} \times S)$	52	M-L	224, 15, 72, 8, 93, 10, 119, 222, 236, 62, 248, 325, 82, 109, 103, 132, 121, 238, 74, 113, 229, 12, 265, 19, 263, 2, 273, 128, 64, 187, 60, 277, 315, 214, 4, 365, 220, 240, 283, 321, 101, 58, 250, 95, 107, 242, 255, 366, 27, 91, 271, 368
	$M (X - U_{0.2} \times S \leq x \leq X + U_{0.2} \times S)$	323	M-M	未标出的均是 Others
	$H (x > X + U_{0.2} \times S)$	41	M-H	7, 75, 241, 216, 395, 18, 260, 225, 1, 30, 337, 152, 41, 23, 43, 20, 207, 233, 190, 344, 371, 34, 51, 122, 264, 206, 268, 262, 394, 165, 14, 228, 247, 65, 36, 204, 414, 205, 16, 310, 88
高氮 HN	$L (x < X - U_{0.2} \times S)$	54	H-L	10, 222, 93, 224, 74, 15, 109, 72, 62, 17, 19, 70, 121, 82, 212, 8, 103, 58, 132, 54, 265, 242, 76, 176, 273, 220, 64, 218, 214, 238, 283, 50, 187, 91, 4, 12, 21, 56, 229, 85, 79, 119, 226, 107, 128, 95, 80, 101, 115, 136, 353, 331, 2
	$M (X - U_{0.2} \times S \leq x \leq X + U_{0.2} \times S)$	325	H-M	未标出的均是 Others
	$H (x > X + U_{0.2} \times S)$	37	H-H	190, 341, 167, 395, 287, 397, 320, 9, 245, 65, 391, 219, 254, 318, 145, 335, 184, 393, 311, 217, 307, 404, 394, 309, 296, 237, 310, 413, 396, 400, 329, 43, 407, 235, 39, 297, 401

表5 油菜种质氮素收获指数(NHI)的分类标准及各类品种数
Table 5 Classification standards and number of each type for NHI in rapeseed

处理 Treatment	类型及标准 Type and standard	种质数 Amount	类型代号* Type	种质编号 Serial number
低氮 LN	$L (x < X - U_{0.2} \times S)$	48	L-L	15, 103, 293, 238, 3, 236, 261, 355, 229, 353, 226, 240, 212, 277, 50, 19, 74, 152, 265, 87, 82, 321, 289, 242, 8, 91, 302, 2, 85, 10, 248, 25, 6, 109, 202, 107, 54, 292, 93, 227, 187, 17, 294, 64, 62, 304, 274, 133
	$M (X - U_{0.2} \times S \leq x \leq X + U_{0.2} \times S)$	342	L-M	未标出的均是 Others
	$H (x > X + U_{0.2} \times S)$	26	L-H	411, 40, 76, 394, 398, 379, 34, 340, 376, 397, 179, 206, 342, 89, 412, 373, 199, 387, 207, 38, 402, 401, 36, 378, 177, 166
中氮 LN	$L (x < X - U_{0.2} \times S)$	50	M-L	103, 293, 229, 355, 226, 242, 238, 270, 321, 263, 12, 2, 275, 93, 19, 289, 300, 85, 271, 15, 353, 227, 8, 267, 224, 187, 82, 113, 117, 240, 274, 50, 331, 10, 107, 74, 163, 313, 202, 330, 45, 17, 212, 299, 328, 273, 158, 236, 265, 58
	$M (X - U_{0.2} \times S \leq x \leq X + U_{0.2} \times S)$	327	M-M	未标出的均是 Others
	$H (x > X + U_{0.2} \times S)$	39	M-H	181, 40, 374, 36, 406, 349, 401, 191, 415, 413, 210, 179, 325, 34, 400, 343, 410, 195, 412, 402, 38, 170, 335, 350, 347, 404, 281, 416, 176, 387, 379, 256, 375, 7, 159, 305, 207, 405, 409
高氮 LN	$L (x < X - U_{0.2} \times S)$	45	H-L	355, 103, 15, 10, 271, 227, 331, 12, 270, 60, 302, 172, 99, 274, 17, 212, 28, 3, 282, 323, 82, 229, 93, 87, 242, 85, 19, 6, 294, 50, 293, 321, 58, 109, 277, 298, 121, 238, 31, 74, 72, 240, 300, 163, 304
	$M (X - U_{0.2} \times S \leq x \leq X + U_{0.2} \times S)$	328	H-M	未标出的均是 Others
	$H (x > X + U_{0.2} \times S)$	43	H-H	349, 395, 195, 415, 401, 38, 394, 396, 402, 42, 179, 399, 404, 32, 391, 189, 374, 411, 165, 40, 412, 398, 416, 135, 393, 193, 34, 381, 397, 378, 36, 370, 379, 177, 281, 312, 406, 385, 48, 197, 320, 371, 375

表6 油菜植株性状与氮素营养效率的相关系数
Table 6 Correlation coefficients of plant traits to nitrogen nutrition efficiency in rapeseed

性状 Traits	LN			MN			HN		
	NAE	NUE	NHI	NAE	NUE	NHI	NAE	NUE	NHI
株高 PH (X ₁)	0.500 **	0.269 **	0.336 **	0.633 **	0.341 **	0.328 **	0.603 **	0.435 **	0.246 **
分枝部位 BH(X ₂)	0.108 *	0.079	0.049	-0.018	0.038	0.02	-0.077	-0.078	0.038
第一次有效分枝数 EB(X ₃)	0.573 **	0.262 **	0.280 **	0.533 **	0.373 **	0.262 **	0.520 **	0.312 **	0.238 **
主花序长度 LMI(X ₄)	0.345 **	0.122 *	0.248 **	0.369 **	0.112 *	0.319 **	0.312 **	0.209 **	0.271 **
主花序角果数 PMI(X ₅)	0.316 **	0.07	0.271 **	0.367 **	0.169 **	0.270 **	0.351 **	0.200 **	0.189 **
单株角果数 EPP(X ₆)	0.749 **	0.420 **	0.276 **	0.701 **	0.430 **	0.243 **	0.696 **	0.448 **	0.267 **
角果长度 PL(X ₇)	0.310 **	0.254 **	0.205 **	0.258 **	0.261 **	0.205 **	0.249 **	0.206 **	0.121 *
每角粒数 SPP(X ₈)	0.359 **	0.274 **	0.282 **	0.311 **	0.334 **	0.324 **	0.248 **	0.311 **	0.299 **
茎基粗 BSD(X ₉)	0.511 **	0.252 **	0.352 **	0.532 **	0.213 **	0.435 **	0.450 **	0.205 **	0.400 **
千粒重 KSW(X ₁₀)	0.087	0.076	0.190 **	0.183 **	0.077	0.208 **	0.098 *	0.041	0.158 **
单株籽粒重 SWPP(X ₁₁)	0.892 **	0.541 **	0.591 **	0.895 **	0.472 **	0.583 **	0.891 **	0.502 **	0.594 **
单株地上干重 ADWP(X ₁₂)	0.901 **	0.612 **	0.377 **	0.888 **	0.582 **	0.323 **	0.878 **	0.595 **	0.357 **

注: * 在5%水平下显著, ** 在1%水平下显著

Note: * significant at 5% level, ** significant at 1% level. PH: plant height; BH: branch height; EB: effective branch number; LMI: length of the main inflorescence; PMI: pod number of the main inflorescence; EPP: effective pod number per plant; PL: pod length; SPP: seed number per pod; BSD: basal stem diameter; KSW: 1 000 - seed weight; SWPP: seed weight per plant; ADWP: aboveground dry weight per plant

油菜植株性状与 NAE、NUE 和 NHI 的逐步回归结果发现,高氮下单株地上干重、单株籽粒重和每角粒数对油菜 NAE 的影响最大,低氮和中氮下单株地上干重、单株籽粒重、每角粒数和茎基粗对油菜 NAE 的影响最大。在低氮下单株地上干重、单株角果数和茎基粗对油菜 NUE 的影响最大,在中氮下单株地上干重、单株籽粒重、每角粒数和茎基粗对油菜 NUE 的影响最大,在高氮下单株地上干重、单株籽粒重和每角粒数对油菜 NUE 的影响最大。在低氮下单株籽粒重、单株地上干重、千粒重、单株角果数和主花序长度对油菜 NHI 的影响最大,在中氮下单株籽粒重、单株地上干重、茎基粗、单株角果数、每角粒数和主花序长度对油菜 NHI 的影响最大,在高氮下单株籽粒重、单株地上干重、茎基粗、千粒重和每角粒数对油菜 NHI 的影响最大。

2.5.2 鉴定与评价压力 根据 NAE、NUE 和 NHI 的分类结果,对 12 个植株性状进行判别分析(表 7),结果表明:低氮下鉴定与评价 NAE,间接指标为单株籽粒重、单株地上干重和株高的原始数据正确百分率和交叉验证正确百分率与实测 NAE 聚类结果吻合度最高,分别为 85.6% 和 83.9%;高氮下鉴定与评价 NUE,间接指标为单株地上干重、第一次有效分枝数、单株籽粒重和每角粒数的原始数据正确百分率和交叉验证正确百分率与实测 NUE 聚类结果吻合度最高,分别为 82.9% 和 82.5%;低氮下鉴定与评价 NHI,间接指标为单株籽粒重、单株地上干重和茎基粗下的原始数据正确百分率和交叉验证正确百分率与实测 NHI 聚类结果吻合度最高,分别为 84.9% 和 83.4%。

表7 对以表征 NAE、NUE 和 NHI 的植株性状进行聚类分析结果的判别正确百分率

Table 7 Correct percentage of identification on cluster analysis on plant traits of expressing NAE, NUE and NHI

氮素水平 Nitrogen levels	氮素吸收效率 (NAE) Nitrogen absorption efficiency			氮素利用效率 (NUE) Nitrogen use efficiency			氮收获指数 (NHI) Nitrogen harvest index		
	所有性状分析 Independent together	步进式方法分析 Stepwise method		所有性状分析 Independent together	步进式方法分析 Stepwise method		所有性状分析 Independent together	步进式方法分析 Stepwise method	
	正确百分率 The correct percentage/%	入选性状 Included character	正确百分率 The correct percentage/%	正确百分率 The correct percentage/%	入选性状 Included character	正确百分率 The correct percentage/%	正确百分率 The correct percentage/%	入选性状 Included character	正确百分率 The correct percentage/%
低氮 LN	85.6(83.9)	X ₁₁ , X ₁₂ , X ₁	85.6(83.9)	82.5(80.8)	X ₁₂ , X ₇	80.8(80.8)	84.4(82.2)	X ₁₁ , X ₁₂ , X ₉	84.9(83.4)
中氮 MN	86.1(82.2)	X ₁₂ , X ₁₁ , X ₈ , X ₁	84.9(84.6)	79.8(76.9)	X ₁₂ , X ₈ , X ₁₁ , X ₁ , X ₁₀	79.8(79.1)	81.7(79.1)	X ₁₁ , X ₁₂ , X ₉	82.0(80.8)
高氮 HN	82.0(78.6)	X ₁₁ , X ₁₂ , X ₅ , X ₈	81.3(81.0)	83.4(80.5)	X ₁₂ , X ₃ , X ₁₁ , X ₈	82.9(82.5)	82.4(81.5)	X ₆ , X ₉ , X ₁₁ , X ₁₂	82.7(82.7)

注: (1) 括号外数字是原始数据正确百分率; (2) 括号内数字是交叉验证正确百分率

Notes: (1) The number outside bracket is the correctly classified % of original; (2) The number inside bracket is the correctly classified % of cross-validated grouped cases

3 讨论

氮素水平、筛选时期、筛选指标和筛选效率等是作物氮素营养高效基因型筛选、鉴定与评价需解决的首要问题。前人在这些方面做了大量的工作, Zlatko 等^[19,20]对4个春油菜品种营养生长期和成熟期的生物量及氮素分配差异做了分析。Tatjana 等^[21]认为苗期进行筛选存在缺陷,以成熟期筛选效果较好。Wiesler 等^[22]发现低氮水平下无法用氮利用效率来解释。曹兰芹等^[23]研究认为氮胁迫条件下籽粒产量是最重要的选择指标。但由于籽粒产量是油菜生长的最终产物,容易受栽培环境等条件影响,作为选择指标会产生偏差。因此,合理的鉴定方法和选择次级指标是快速准确获得油菜高效氮素营养基因型的关键^[18]。本研究通过田间试验对416份基因型油菜在不同氮水平下开展了氮素营养效率的筛选鉴定。结果表明,油菜 NAE, NUE 和 NHI 基因型差异显著,表明油菜存在氮素营养效率的遗传潜力,可以从现有油菜种质中筛选或通过杂交等方式培育出高效氮素营养油菜基因型。这与 Grami 等^[24]研究结果一致。Ye 等^[13]利用100份不同氮效率基因型油菜和 Wang 等^[14,15]利用以小孢子培养获得的46份纯合的新型甘蓝型油菜 DH 系开展的氮高效种质筛选鉴定研究也均证实了这一结论。作物种质氮素营养效率的鉴定与评价指标的确定非常关键。Moll 等^[4]将氮效率细分为吸收效率和利用效率,在玉米^[25,26]、水稻^[27,28]、小麦^[29]等作物氮素营养效率的鉴定与评价研究中得到了广泛应用。油菜最终收获器官为籽粒,氮收获指数(NHI)是反映单位氮素形成籽粒产量的能力。本研究以 NAE、NUE 和 NHI 为指标开展了油菜氮素营养效率的筛选鉴定研究,结果表明油菜种质间 NAE 和 NHI 的差异在低氮处理下选择效应比较明显,油菜种质间 NUE 的差异在高氮处理下选择效应比较明显。

采用植株性状作为鉴定与评价指标是最简单而直观的方法, Jackson 等^[30]指出根系的伸展及其吸收能力对氮素吸收效率起关键作用。刘德明等^[31]发现无论供氮水平高低,氮高效基因型油菜一级侧根数显著高于氮低效基因型油菜。曹兰芹等^[23]研究表明氮高效基因型的籽粒产量和不同器官生物量均显著高于氮低效基因型。本研究结果表明,油菜氮素营养效率的种质鉴定与评价时,鉴定与评价 NAE 应在低氮下进行,间接评价指标为单株籽粒重、单株地上干重和株高;鉴定与评价 NUE 应在高氮下进行,间接评价指标为单株地上干重、第一次有

效分枝数、单株籽粒重和每角粒数;鉴定与评价 NHI 应在低氮下进行,间接评价指标为单株籽粒重、单株地上干重和茎基粗。

通过从现有种质资源或生产上大面积应用的品种中筛选鉴定氮高效种质资源直接应用于生产,或挖掘氮高效有利基因,采用适当的方法将其转移到理想的油菜基因型中是氮高效种质资源利用的最终目标。本研究选用416份来自国内外不同生态型的油菜种质在江西南昌进行氮营养效率的筛选鉴定,结果筛选到了氮营养效率(NAE、NUE 和 NHI)高效和低效的种质,这些种质中有目前本区域内正在生产上应用的品种,也有携带优良性状基因的种质。因此,在生产上可以大面积推广这些品种,或将带有优良性状基因的种质进行基因交流,同时通过构建群体,进行油菜氮素营养效率及其相关性状的基因定位、克隆和表达等,从而更深入和全面地了解其遗传基础,培育高氮营养效率等综合性状优良的油菜基因型。

4 结论

油菜氮素营养效率的选择压力、鉴定与评价性状因氮素营养指标不同存有差异。油菜种质间成熟期 NAE 的鉴定与评价应选择在低氮处理下,以单株籽粒重、单株地上干重和株高为间接指标进行选择效果明显。油菜种质间成熟期 NUE 的鉴定与评价应选择在低氮处理下,以单株地上干重、第一次有效分枝数、单株籽粒重和每角粒数为间接指标进行选择效果明显。油菜种质间成熟期 NHI 的鉴定与评价应选择在低氮处理下,以单株籽粒重、单株地上干重和茎基粗为间接指标进行选择效果明显。

参考文献:

- [1] 邹小云,熊洁,宋来强,等.不同甘蓝型油菜基因型氮营养效率差异的研究[J].江西农业学报,2015,27(12):7-10.
- [2] Wiesler F, Behrens T, Horst W J. The role of nitrogen - efficient cultivars in sustainable agriculture [J]. Science World Journal, 2001, 1(2): 61-69.
- [3] Gammelvind L, Bock J G H, Mogensen V O, et al. Nitrogen incorporation and remobilization in different shoot components of field - grown winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) as affected by rate of nitrogen application and irrigation [J]. Plant and Soil, 1995, 177: 255-264.
- [4] Moll R H, Kamprath E J, Jackson W A. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency to nitrogen utilization [J]. Agronomy Journal, 1982, 74: 562

- 564.

- [5] Rengel Z, Svecnjak Z. Canola cultivars differ in nitrogen utilization efficiency at vegetative stage [J]. *Field Crops Research*, 2006, 97(2): 221 - 226.
- [6] 赵春波, 宋述尧, 赵靖, 等. 北方地区不同黄瓜品种氮素吸收与利用效率的差异 [J]. *中国农业科学*, 2015, 48(8): 1 569 - 1 578.
- [7] Andreas S, Wolfgang F, Benjamin W, et al. Complementary diversity for nitrogen uptake and utilisation efficiency reveals broad potential for increased sustainability of oilseed rape production [J]. *Plant and Soil*, 2016, 400(1/2): 245 - 262.
- [8] 曹敏建, 衣莹, 佟占昌, 等. 耐低氮胁迫玉米的筛选与评价 [J]. *玉米科学*, 2000, 8(4): 64 - 69.
- [9] 钟代斌, 陆雅海, 郭龙彪, 等. 氮高效水稻种质资源筛选的初步研究 [J]. *植物遗传资源科学*, 2001, 2(4): 16 - 20.
- [10] 张亚丽, 董圆圆, 沈其荣, 等. 水稻对硝态氮响应的生理指标筛选 [J]. *土壤学报*, 2004, 41(4): 571 - 576.
- [11] 韩璐, 张薇. 棉花苗期氮营养品种筛选 [J]. *中国农学通报*, 2011, 27(1): 84 - 88.
- [12] 马庆, 李猛, 王慧, 等. 我国玉米育种与生产中 189 份自交系氮利用效率评价 [J]. *玉米科学*, 2015, 23(5): 6 - 11.
- [13] Ye X S, Hong J, Shi L, et al. Adaptability mechanism of N - efficient germplasm of natural variation to low nitrogen stress in *Brassica napus* [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2010, 33(13): 2 028 - 2 040.
- [14] Wang G L, Ding G D, Xu F S, et al. Genotype differences in photosynthetic characteristics and nitrogen efficiency of new - type oilseed rape responding to low nitrogen stress [J]. *The Journal of Agricultural Science*, 2015, 153(6): 1 030 - 1 043.
- [15] Wang G L, Ding G D, Li L, et al. Identification and characterization of improved nitrogen efficiency in interspecific hybridized new - type *Brassica napus* [J]. *Annals of Botany*, 2014, 114: 549 - 559.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [17] 邹小云, 刘宝林, 宋来强, 等. 花期渍水逆境下氮素对油菜产量及氮肥利用效率的影响 [J]. *应用生态学报*, 2016, 27(4): 1 169 - 1 176.
- [18] 邹小云, 刘宝林, 宋来强, 等. 甘蓝型油菜种质苗期氮素营养效率的鉴定与评价 [J]. *中国油料作物学报*, 2017, 39(1): 69 - 77.
- [19] Zlatko S, Zdenko R. Canola cultivars differ in nitrogen utilization efficiency at vegetative stage [J]. *Field Crops Research*, 2006, 97: 221 - 226.
- [20] Zlatko S, Zdenko R. Nitrogen utilization efficiency in canola cultivars at grain harvest [J]. *Plant and Soil*, 2006, 283: 299 - 307.
- [21] Tatjana B, Zdenko R. Nitrogen efficiency of canola genotypes varies between vegetative stage and grain maturity [J]. *Euphytica*, 2008, 164: 421 - 432.
- [22] Wiesler F, Behrens T, Horst W J. Nitrogen efficiency of contrasting rape ideotypes [A]. *Plant nutrition - food security and sustainability of agro - ecosystems* [M]. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2001. 60 - 61.
- [23] 曹兰芹, 伍晓明, 李亚军, 等. 油菜氮素吸收效率的基因型差异及其与农艺性状的关系 [J]. *中国油料作物学报*, 2010, 32(2): 270 - 278.
- [24] Rami B, La Croix L J. Cultivar variation in total nitrogen uptake in rape [J]. *Canadian Journal of Plant Science*, 1977, 57: 619 - 624.
- [25] 卢艳丽, 陆卫平, 刘小兵, 等. 糯玉米氮肥利用效率的基因型差异 [J]. *作物学报*, 2006, 32(7): 1 031 - 1 037.
- [26] 王敬锋, 刘鹏, 赵秉强, 等. 不同基因型玉米根系特性与氮素吸收利用的差异 [J]. *中国农业科学*, 2011, 44(4): 699 - 707.
- [27] 单玉华, 王余龙, 山本由德, 等. 不同类型水稻在氮素吸收及利用上的差异 [J]. *扬州大学学报(自然科学版)*, 2001, 4(3): 42 - 46.
- [28] 张传胜, 龙银成, 周娟, 等. 不同产量类型籼稻品种氮素吸收利用特征的研究 [J]. *扬州大学学报(农业与生命科学版)*, 2004, 25(2): 17 - 21.
- [29] 张锡洲, 阳显斌, 李廷轩, 等. 小麦氮素利用效率的基因型差异 [J]. *应用生态学报*, 2011, 22(2): 369 - 375.
- [30] Jackson W A, Pan W L, Moll R H. Uptake, translocation, and reduction of nitrate [A]. Neyra C A. *Biochemical basis of plant breeding: nitrogen metabolism* [M]. Boca Raton: Chemical Rubber Company Press, 1986. 95 - 98.
- [31] 刘德明, 刘强, 荣湘民, 等. 油菜根系特性与氮效率系数的关系研究 [J]. *湖南农业科学*, 2008(2): 64 - 66, 70.

(责任编辑:郭学兰)