

甘蓝型油菜种质苗期氮素营养效率的鉴定与评价

邹小云^{1,2}, 刘宝林², 宋来强¹, 官春云^{2*}

(1. 江西省农业科学院作物研究所/江西省农业科学院油料作物重点实验室, 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)

摘要: 为建立快速简便高效的油菜氮素营养效率的鉴定与评价方法, 温室盆栽条件下设置土壤低氮(0.05 g/kg)、中氮(0.2 g/kg)和高氮(0.3 g/kg) 3个水平, 测定了75份不同生态类型甘蓝型油菜种质的苗期形态性状及氮素吸收效率(NAE)和氮素利用效率(NUE)。结果表明: 苗期各性状在不同氮素水平下对氮的敏感性不同, 3个不同氮处理水平下单株根表面积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间存在明显的基因型差异, 表现为高效和低效的较少, 表现中效类型的种质最多; NAE和NUE间的相关性未达显著水平。以NAE作为氮素营养效率指标来鉴定与评价种质间苗期氮素营养效率差异应选择在高氮处理下, 以单株地上干重和根冠比为间接指标进行选择效果明显。以NUE作为氮素营养效率指标来鉴定与评价种质间苗期氮素营养效率差异应选择在高氮处理下, 以单株地上干重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; 氮素吸收效率; 氮素利用效率; 鉴定与评价

中图分类号: S565.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9084(2017)01-0069-09

Identification and evaluation of nitrogen nutrition efficiency in rapeseed germplasm at seedling stage

ZOU Xiao-yun^{1,2}, LIU Bao-lin², SONG Lai-qiang¹, GUAN Chun-yun^{2*}

(1. Institute of Crops / Key Laboratory of Oil Crops, Jiangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanchang 330200, China;
2. Oilseed Crops Institute / National Oil Crops Improvement Center, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: To establish an efficient identification and evaluation method of rapeseed nitrogen nutrition efficiency, greenhouse pot experiment was conducted using 75 germplasm accessions under 3 nitrogen levels in soil (0.05, 0.2, 0.3 g/kg). 15 seedling traits were measured to assess variations of nitrogen nutrition efficiencies including nitrogen absorption efficiency (NAE) and nitrogen utilization efficiency (NUE). Results showed that the sensitivity of different traits to different nitrogen levels was different. Genetic variations of root surface area under different nitrogen treatments were the greatest. Under low nitrogen stress, the differences increased among the accessions. Nitrogen nutrition efficiency of rapeseed genotypes at seedling stage showed significant difference. Distribution patterns showed that both high and low efficiency materials were rare. Low nitrogen treatment (0.05 g/kg) was the best nitrogen application for identification and evaluation on NAE at seedling stage. The indirect indexes were aboveground plant dry weight and root-shoot rate. High nitrogen treatment (0.3 g/kg) was the best nitrogen application for identification and evaluation on NUE at rapeseed seedling stage. The indirect index was aboveground plant dry weight.

Key words: rapeseed (*Brassica napus* L.); germplasm; nitrogen nutrition efficiency; nitrogen absorption efficiency; nitrogen utilization efficiency; identification and evaluation

氮肥在作物生产中发挥着极其重要的作用, 施用量最大。一定范围内, 随着施氮量的提高作物产

收稿日期: 2016-08-23
基金项目: 国家油菜产业技术体系(CARS-13); 江西省科技创新团队(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, 从事作物遗传育种与栽培营养研究, E-mail: jxauzxy@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, 从事作物育种与栽培技术研究, E-mail: guancy2011@aliyun.com

量呈增加的趋势,但当氮肥施用量过高时作物产量增加并不明显,甚至出现下降的趋势,造成氮肥利用率降低和水土污染等问题^[1~3]。利用作物基因型本身的遗传潜力,培育氮高效基因型是目前提高养分利用率最佳的途径。前人研究认为通过利用高产、高效的品种可提高氮素利用效率 20%~30%,甚至超过 30%^[4~6]。国内外针对粮食作物,特别是水稻氮素吸收利用的遗传潜力和生理机制研究较多,也较为系统^[7~11]。关于油菜氮营养效率及其机理方面也有一些研究^[12~15],取得了一些较好的结果,但研究还不够深入。氮肥利用率是国内外学者普遍用来表征作物对氮肥的吸收和利用效果的指标。Moll 等^[16]较早提出氮素利用效率并进一步将其细分为吸收效率(NAE)和利用效率(NUE),为作物氮素营养研究建立可行的指标。尽管这些指标反映了作物对氮肥吸收利用的不同方面,但由于不同学科领域和研究目的不同,目前为止,氮肥利用率的定义在国内外尚未统一。油菜氮素利用效率的基因型差异鉴定评价基本上选择在较低的施氮量甚至不施氮的条件下进行^[17,18],这是因为有人认为在低氮下油菜氮素利用效率的潜能可充分发挥出来;但也有研究认为无论施氮水平如何,不同品种的籽粒产量、氮素利用效率和氮素响应度均有显著差异^[19~21]。在油菜氮素营养效率鉴定与评价性状方面还鲜见报道。可见,在鉴定与评价压力、评价性状等研究上还没有形成统一的标准,尚未建立起一套快速、高效的鉴定与评价体系。

为此,本试验采用了来自于国内外不同年份、不同生态类型的 75 份油菜种质,在掺砂土培盆栽试验中评价油菜苗期氮素营养效率的差异,研究苗期相关农艺性状与氮素营养效率的关系,筛选鉴定评价指标,筛选氮营养高效油菜基因型,以期对油菜氮素营养高效利用及生理生态基础和遗传改良研究提供依据。

1 材料和方法

1.1 材料

选用来自于国内外不同年份、不同生态类型的 75 份油菜种质为参试材料(表 1),所有材料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

试验于 2012 年 10 月~2012 年 11 月在江西省农业科学院科研区玻璃温室中进行。采用直径和高分别为 25cm 和 30cm 的塑料盆进行室内土培盆

栽试验,每盆装砂壤土 4kg,土壤 pH5.85,碱解氮为 76.4mg/kg,有效磷 35.2mg/kg,速效钾 47.5mg/kg。每盆 4 穴,每穴直播 3 粒饱满一致的种子,出苗后每穴定苗 1 株。试验设置 3 个施氮水平,即低氮(LN, 0.05g/kg)、中氮(MN, 0.2g/kg)、高氮(HN, 0.3g/kg),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,3 次重复,所施肥料为 NH_4NO_3 溶液,整个苗期施相应浓度的 NH_4NO_3 溶液,分 4 次施用,播种前一天施第一次,以后每 7 天 1 次。磷钾肥全部底施,用量均为 0.1g/kg;选用 NH_4NO_3 溶液作氮肥能保持土壤介质 pH 值相对稳定,同时避免了施用尿素降低出苗率甚至死苗,可保证正常出苗。

生长 45d 时,将油菜苗及其生长的土壤小心倒入尼龙网袋,用自来水冲洗出完整的植株及根系,考查性状包括叶片 SPAD、苗高、绿叶数、最大叶长×宽、茎基粗、主根长、单株地上鲜重、单株根鲜重、单株地上干重、单株根干重、根冠比、单株根体积、单株根表面积和含氮量。叶片 SPAD 值采用日本柯尼卡美能达公司研制生产的 SPAD-502 叶绿素计测定,苗高和主根长采用直尺量取法,绿叶数采用计数法,单株根干重、地上部干重、总干重和冠根比采用烘干法,单株根体积和单株根表面积采用万深 LA-S 根系分析仪分析,植株含氮量采用凯氏定氮法测定^[22]。土壤 pH 值采用电位法测定,土壤氮、磷、钾含量用浓硫酸混合催化剂消化,凯氏定氮法测定含氮量,钒钼黄比色法测定含磷量,火焰光度法测定含钾量。测定均参照文献^[22]的方法。

油菜苗期氮素营养效率指标依据 Moll 等^[16]方法按以下公式计算:

氮素吸收效率(NAE,%) = 植株氮积累量 / (土壤供氮量 + 施氮量) × 100%; 氮素利用效率(NUE, $\text{g}_{\text{DW}}/\text{g}_{\text{N}}$) = 生物量 / 植株氮积累量; 植株性状对加氮的反应敏感度(%) = (高氮或中氮下性状值 - 低氮下性状值) / 低氮下性状值 × 100%。

1.3 数据处理

利用 Excel 2003 进行数据整理和 IBM SPSS Statistics 22 对试验数据进行变异系数分析、种质聚类、多重比较和判别分析。

2 结果与分析

2.1 油菜苗期 NAE 和 NUE 的基因型差异

由表 2 可知,油菜种质间存在显著的基因型差异,均有随着施氮量的增加 NAE 呈降低趋势。同一氮水平下,油菜苗期 NAE 的极差以低氮水平下相差最大,中氮水平其次,高氮水平最小。低氮水平

NAE 变幅为 15. 78% ~ 40. 91%, 平均 NAE 为 31. 11%, 变异系数为 21. 12%; 中氮水平 NAE 变幅为 15. 36% ~ 38. 27%, 平均 NAE 为 28. 07%, 变异系数为 16. 95%; 高氮水平的 NAE 变幅为 15. 10% ~ 33. 46%, 平均 NAE 为 24. 92%, 变异系数为 15. 41%。不同氮素水平下变异系数表明, 低氮水平下的变异系数最大, 能加大油菜种质间苗期 NAE 的差异, 选择效应较为明显。

表 1 油菜种质材料和类型
Table 1 Types of rapeseed germplasm in this experiment

编号 No.	种质 Germplasm	类型 Type	来源 Source	编号 No.	种质 Germplasm	类型 Type	来源 Source
1	胜利青梗 Shengliqinggeng	冬油菜 Winter	上海 Shanghai	39	华油 14 选 Huayou 14 xuan	冬油菜 Winter	江西 Jiangxi
2	中双 9 号 Zhongshuang 9	冬油菜 Winter	湖北 Hubei	40	Marnoo	春油菜 Spring	澳大利亚 Australia
3	中双 4 号 Zhongshuang 4	冬油菜 Winter	湖北 Hubei	41	Rioklas	春油菜 Spring	欧洲 European
4	青油 14 号 Qingyou 14	春油菜 Spring	青海 Qinghai	42	Ning RS-1	冬油菜 Winter	江苏 Jiangsu
5	甘油 5 号 Ganyou 5	冬油菜 Winter	湖北 Hubei	43	浙油 7 号 Zheyou 7	冬油菜 Winter	浙江 Zhejiang
6	中双 7 号 Zhongshuang 7	冬油菜 Winter	湖北 Hubei	44	湘农油 2 号 Xiangnongyou 2	冬油菜 Winter	湖南 Hunan
7	中双 6 号 Zhongshuang 6	冬油菜 Winter	湖北 Hubei	45	Elan	冬油菜 Winter	德国 German
8	宁油 10 号 Ningyou 10	冬油菜 Winter	江苏 Jiangsu	46	Talent	冬油菜 Winter	德国 German
9	Bullet	春油菜 Spring	加拿大 Canada	47	Bakow	冬油菜 Winter	波兰 Poland
10	浙油 28 Zheyou 28	冬油菜 Winter	浙江 Zhejiang	48	Bienvenu	冬油菜 Winter	法国 France
11	阳光 2009 Yangguang 2009	冬油菜 Winter	湖北 Hubei	49	Bolko	冬油菜 Winter	波兰 Poland
12	赣油 17 Ganyou 17	冬油菜 Winter	江西 Jiangxi	50	Jet-Neuf	冬油菜 Winter	德国 German
13	互丰 010 Hufeng 010	春油菜 Spring	青海 Qinghai	51	Jupiter	冬油菜 Winter	瑞典 Sweden
14	Comet	春油菜 Spring	丹麦 Denmark	52	Majar	冬油菜 Winter	法国 France
15	金油 15 Jinyou 15	冬油菜 Winter	四川 Sichuan	53	Matador	冬油菜 Winter	瑞典 Sweden
16	Surpass 440	春油菜 Spring	澳大利亚 Australia	54	Panter	冬油菜 Winter	瑞典 Sweden
17	湘油 11 号 Xiangyou 11	冬油菜 Winter	湖南 Hunan	55	Quinta	冬油菜 Winter	德国 German
18	浔油 2 号 Xunyou 2	冬油菜 Winter	江西 Jiangxi	56	Bin270	冬油菜 Winter	湖南 Hunan
19	秀油 1 号 Xiyou 1	冬油菜 Winter	江西 Jiangxi	57	R210	冬油菜 Winter	江西 Jiangxi
20	Westar	冬油菜 Winter	加拿大 Canada	58	沪油 21 Huyou 21	冬油菜 Winter	上海 Shanghai
21	黔 9 Qian 9	冬油菜 Winter	贵州 Guizhou	59	721	冬油菜 Winter	江西 Jiangxi
22	陕 8 选 Shaan 8 xuan	冬油菜 Winter	江西 Jiangxi	60	汇油 50 Huiyou 50	冬油菜 Winter	上海 Shanghai
23	黄 023 Huang 023	冬油菜 Winter	江西 Jiangxi	61	华双 5 号 Huashuang 5	冬油菜 Winter	湖北 Hubei
24	赣油 12 号 Ganyou 12	冬油菜 Winter	江西 Jiangxi	62	湘杂油 6 号 Xiangzayou 6	冬油菜 Winter	湖南 Hunan
25	中油 821 Zhongyou 821	冬油菜 Winter	湖北 Hubei	63	丰油 730 Fengyou 730	冬油菜 Winter	湖南 Hunan
26	华双 4 号 Huashuang 4	冬油菜 Winter	湖北 Hubei	64	赣油杂 5 号 Ganyouza 5	冬油菜 Winter	江西 Jiangxi
27	豫油 2 号 Yuyou 2	冬油菜 Winter	河南 Henan	65	油研 9 号 Youyan 9	冬油菜 Winter	贵州 Guizhou
28	沪油 18 号 Huyou 18	冬油菜 Winter	上海 Shanghai	66	华油杂 62 Huayouza 62	冬油菜 Winter	湖北 Hubei
29	湘油 15 号 Xiangyou 15	冬油菜 Winter	湖南 Hunan	67	秦优 7 号 Qinyou 7	冬油菜 Winter	陕西 Shaanxi
30	宁油 16 号 Ningyou 16	冬油菜 Winter	江苏 Jiangsu	68	青杂 2 号 Qingza 2	春油菜 Spring	青海 Qinghai
31	浙双 6 号 Zheshuang 6	冬油菜 Winter	浙江 Zhejiang	69	青杂 4 号 Qingza 4	春油菜 Spring	青海 Qinghai
32	Monty	春油菜 Spring	澳大利亚 Australia	70	青杂 5 号 Qingza 5	春油菜 Spring	青海 Qinghai
33	秦油 1 号 Qinyou 1	冬油菜 Winter	陕西 Shaanxi	71	青杂 7 号 Qingza 7	春油菜 Spring	青海 Qinghai
34	秦油 3 号 Qinyou 3	冬油菜 Winter	陕西 Shaanxi	72	Granit	春油菜 Spring	欧洲 European
35	中双 11 号 Zhongshuang 11	冬油菜 Winter	湖北 Hubei	73	中油杂 2 号 Zhongyouza 2	冬油菜 Winter	湖北 Hubei
36	Altex	春油菜 Spring	加拿大 Canada	74	青杂 10 号 Qingza 10	春油菜 Spring	青海 Qinghai
37	Bronowski	春油菜 Spring	波兰 Poland	75	SY116	冬油菜 Winter	湖北 Hubei
38	Erra	春油菜 Spring	德国 German				

3 个氮素水平下油菜苗期 NUE 的基因型变异相差不大。同一氮水平下, 油菜苗期 NUE 的极差以低氮水平下相差最大, 中氮水平其次, 高氮水平最小。低氮水平 NUE 变幅为 16. 13 ~ 26. 48g_{DW}/g_N, 平均 NUE 为 20. 55g_{DW}/g_N, 变异系数为 11. 57%; 中氮水平 NUE 变幅为 15. 04 ~ 24. 29g_{DW}/g_N, 平均 NUE 为 19. 01g_{DW}/g_N, 变异系数为 11. 26%; 高氮水平 NUE 变幅为 13. 05 ~ 22. 15g_{DW}/g_N, 平均 NUE 为 17. 10g_{DW}/g_N, 变异系数为 12. 01%。不同氮素水平下变异系数表明, 高氮水平下的变异系数最大, 能加大油菜种质间苗期 NUE 的差异, 选择效应相对较为明显。

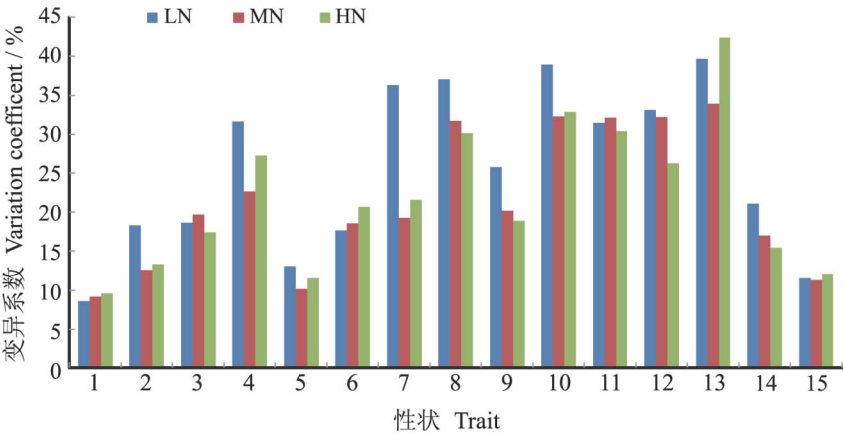
表 2 不同氮水平下油菜苗期氮素吸收效率 (NAE) 和氮素利用效率 (NUE) 的基因型变异
Table 2 Genotypic variations of nitrogen absorption efficiency (NAE)
and nitrogen utilization efficiency (NUE) at seedling stage

氮效率 NNE	施氮水平 N application level/(g/kg)	最大值 Max	最小值 Min	极差 Range	平均值 Mean	标准差 SD	变异系数 CV/%
NAE/%	0.05	40.91	15.78	25.13	31.11aA	6.57	21.12
	0.2	38.27	15.36	22.91	28.07bAB	4.76	16.95
	0.3	33.46	15.1	18.36	24.92cC	3.84	15.41
NUE /(g _{DW} /g _N)	0.05	26.48	16.13	10.35	20.55aA	2.38	11.57
	0.2	24.29	15.04	9.25	19.01aA	2.14	11.26
	0.3	22.15	13.05	9.1	17.10bAB	2.05	12.01

2.2 油菜苗期性状的变异

对 75 份油菜种质不同氮素水平下的 13 个植株性状及油菜苗期 NAE 和 NUE 的变异数进行比较分析(图 1),油菜苗期植株性状的种质间变异程度因氮素水平而异,低氮下变异系数从小到大的顺序为 1 < 15 < 5 < 6 < 2 < 3 < 14 < 9 < 11 < 4 < 12 < 7 < 8 < 10 < 13,中氮下变异系数从小到大的顺序为 1 < 5 < 15 < 2 < 14 < 6 < 7 < 3 < 9 < 4 < 8 < 11 < 12 < 10 < 13,高氮下变异系数从小到大的顺序为 1 < 5 < 15 < 2 <

14 < 3 < 9 < 6 < 7 < 12 < 4 < 8 < 11 < 10 < 13。3 个不同氮处理水平下单株根表面积(13)的变异程度均表现最大,叶片 SPAD(1)的变异程度均表现最小;低氮处理下苗高(2)、最大叶长 × 宽(4)、茎基粗(5)、单株地上鲜重(7)、单株根鲜重(8)、单株地上干重(9)、单株根干重(10)、单株根体积(12)和油菜苗期 NAE(14) 9 个性状种质间的变异均大于中氮和高氮处理,说明低氮胁迫加大了种质间的差异,不同种质的耐低氮能力存在差异。



注:1:叶片 SPAD;2:苗高;3:叶片数;4:最大叶长 × 宽;5:茎基粗;6:主根长;7:单株地上鲜重;8:单株根鲜重;9:单株地上干重;10:单株根干重;11:根冠比;12:单株根体积;13:单株根表面积;14:NAE;15: NUE. LN:低氮 0.02g/kg;MN:中氮 0.2g/kg;HN:高氮 0.3g/kg。下同
Note:1:Leaf SPAD; 2:Plant height; 3:Number of green leaves; 4:Leaf length × leaf width; 5:Basal stem diameter; 6:Root length; 7:Shoot fresh weight; 8:Root fresh weight; 9:Shoot dry weight; 10:Root dry weight; 11:Root – shoot rate; 12:Root volume; 13:Root surface area; 14:NAE; 15: NUE; LN:0.02g/kg; MN:0.2g/kg; HN:0.3g/kg. Same as below

图 1 油菜种质苗期性状变异状况
Fig.1 Variation of traits among rapeseed gerplasm at seedling stage

2.3 油菜种质苗期性状对加氮的反应

对 75 份油菜种质的 13 个植株性状在中氮 (MN) 和高氮 (HN) 压力下的加氮反应表现进行了分析(图 2),各个性状对加氮反应的敏感性具有明显的差异,在中氮 (MN) 和高氮 (HN) 压力下,单株地上鲜重(7)、最大叶长 × 宽(4)、单株地上干重(9)、苗高(2)、叶片数(3)、叶片 SPAD(1)、茎基粗(5)、单株根体积(12)和主根长(6)均表现正向敏感性,根冠比(11)、单株根干重(10)、单株根鲜重(8)和单株根表面积(13)均表现负向敏感性;从敏感性

的绝对值大小来看,单株地上鲜重、最大叶长 × 宽、单株地上干重和根冠比 4 个性状在中氮 (MN) 和高氮 (HN) 压力的敏感性绝对值均在 50% 以上,为加氮反应高度敏感的特性;苗高、叶片数、叶片 SPAD (1)、单株根干重、茎基粗、单株根体积和主根长 7 个性状在中氮 (MN) 或高氮 (HN) 压力的敏感性绝对值均介于 10% ~ 50% 之间,为加氮反应中度敏感的特性;单株根表面积和单株根鲜重 2 个性状在中氮 (MN) 和高氮 (HN) 压力的敏感性绝对值均低于 10%,为加氮反应低度敏感的特性。

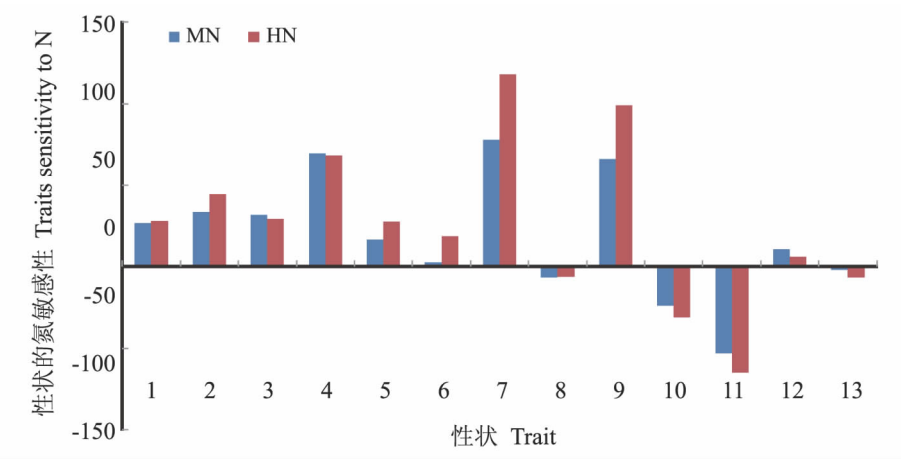


图2 油菜种质苗期各性状对加氮反应的敏感性
Fig.2 Sensitivity of seedling traits to additional nitrogen in rapeseed germplasms

2.4 油菜种质苗期氮素营养效率的分类与鉴定

分别在不同氮素处理下以 NAE 或 NUE 将 75 份种质分属中、高和低 3 类(表 3)。结果表明,无论采用 NAE 还是 NUE 指标来分类,均表现为低效和高效种质较少,中效种质众多的分布;NAE 在低氮、中氮和高氮处理下均表现为低效的种质编号为 57、

56、61 和 35,均表现为高效的种质编号为 32;NUE 在低氮、中氮和高氮处理下均表现为低效的种质编号为 59、72、49 和 40,均表现为高效的种质编号为 16、23、15 和 19。从表 3 的种质分类结果还可知,同一种质 NAE 与 NUE 表现并不完全同步,NAE 和 NUE 同时低效或高效的种质几乎不存在。

表 3 油菜种质苗期氮素营养效率的分类标准及各类品种数
Table 3 Classification standards and number of each type for NNE in rapeseed at seedling stage

氮效率 NNE	处理 Treatment	类型及标准 Type and standard	种质数 No.	类型代号 * Code of type	种质编号 Serial number
NAE	低氮 LN	L ($x < X - U_{0.2} * S$)	13	L - L	57,56,61,70,51,35,54,68,38,64,8,47,67
		M ($X - U_{0.2} * S \leq x \leq X + U_{0.2} * S$)	57	L - M	未标出的均是 The rest ones
		H ($x > X + U_{0.2} * S$)	5	L - H	2,22,4,34,29,32
		L ($x < X - U_{0.2} * S$)	6	M - L	57,61,56,70,35,59
	中氮 MN	M ($X - U_{0.2} * S \leq x \leq X + U_{0.2} * S$)	59	M - M	未标出的均是 The rest ones
		H ($x > X + U_{0.2} * S$)	10	M - H	33,72,6,4,22,26,29,75,32,7
		L ($x < X - U_{0.2} * S$)	4	H - L	57,56,35,61
		M ($X - U_{0.2} * S \leq x \leq X + U_{0.2} * S$)	62	H - M	未标出的均是 The rest ones
	高氮 HN	H ($x > X + U_{0.2} * S$)	9	H - H	12,6,72,75,30,9,33,25,32
		L ($x < X - U_{0.2} * S$)	7	L - L	40,59,49,72,58,70,41
		M ($X - U_{0.2} * S \leq x \leq X + U_{0.2} * S$)	60	L - M	未标出的均是 The rest ones
		H ($x > X + U_{0.2} * S$)	8	L - H	19,1,35,5,15,23,3,16
NUE	低氮 LN	L ($x < X - U_{0.2} * S$)	6	M - L	59,49,72,41,60,40
		M ($X - U_{0.2} * S \leq x \leq X + U_{0.2} * S$)	61	M - M	未标出的均是 The rest ones
		H ($x > X + U_{0.2} * S$)	8	M - H	29,20,19,9,15,23,35,16
		L ($x < X - U_{0.2} * S$)	6	H - L	59,72,49,60,40,75
	中氮 MN	M ($X - U_{0.2} * S \leq x \leq X + U_{0.2} * S$)	62	H - M	未标出的均是 The rest ones
		H ($x > X + U_{0.2} * S$)	7	H - H	11,19,29,3,15,23,16
	高氮 HN	L ($x < X - U_{0.2} * S$)	6	M - L	59,49,72,41,60,40
		M ($X - U_{0.2} * S \leq x \leq X + U_{0.2} * S$)	61	M - M	未标出的均是 The rest ones

注:x 为实际值,X 为所有品种平均值,S 为标准差,U_{0.2}为 α= 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
Note:x for actual value, X for mean value of all varieties, S for standard deviation,U_{0.2} for U value when α=0.2, L, M and H in front of the type code were in low nitrogen, medium nitrogen and high nitrogen treatment respectively, L, M and H at the back of the type code were low nitrogen nutrition efficiency, medium nitrogen nutrition efficiency, and high nitrogen nutrition efficiency respectively

2.5 油菜种质苗期氮素营养效率的鉴定与评价

2.5.1 氮素营养效率鉴定与评价指标的确定 在不同氮素水平下分别对 75 份油菜种质的 13 个植株苗期形态性状与氮素营养效率进行偏相关分析(表 4),结果表明,苗期各性状与氮素营养效率的相关

性大小不一,无论在何氮素水平下,苗高、茎基粗、单株地上鲜重和单株地上干重与 NAE 和 NUE 均达到显著或极显著正相关;最大叶长×宽、主根长、单株根鲜重、单株根干重和单株根体积与 NAE 均达到显著或极显著正相关。随着氮素水平的增加,苗高、单

株地上鲜重和单株地上干重与 NAE 之间的相关性呈降低的趋势,茎基粗与 NUE 之间的相关性呈降低的趋势。表明苗高、茎基粗、单株地上鲜重和单株地

上干重可能是氮素营养效率的表征性状;低氮下选择的空

表 4 油菜苗期植株性状与氮素营养效率的相关系数

Table 4 Correlation coefficients of plant traits to nitrogen nutrition efficiency in rapeseed

性状 Trait	LN 0.05g/kg		MN 0.2g/kg		HN 0.3g/kg	
	NAE	NUE	NAE	NUE	NAE	NUE
叶片 SPAD Leaf SPAD	0.19	0.002	0.285 *	-0.016	0.207	0.034
苗高 Plant height	0.557 **	0.510 **	0.453 **	0.307 **	0.339 **	0.369 **
叶片数 Number of green leaves	0.194	0.336 **	-0.015	0.073	0.296 **	0.092
最大叶长×宽 Leaf length×leaf width	0.570 **	0.448 **	0.266 *	0.202	0.317 **	0.100
茎基粗 Basal stem diameter	0.673 **	0.444 **	0.322 **	0.380 *	0.326 **	0.371 **
主根长 Root length	0.261 *	0.230 *	0.255 *	0.015	0.284 *	-0.117
单株地上鲜重 Shoot fresh weight	0.653 **	0.548 **	0.614 **	0.276 *	0.463 **	0.378 **
单株根鲜重 Root fresh weight	0.531 **	0.517 **	0.243 *	0.151	0.278 *	0.146
单株地上干重 Shoot dry weight	0.886 **	0.581 **	0.828 **	0.535 **	0.763 **	0.561 **
单株根干重 Root dry weight	0.563 **	0.536 **	0.347 **	0.13	0.383 **	0.236 *
根冠比 Root-Shoot rate	-0.066	0.242 *	-0.192	-0.204	-0.087	-0.071
单株根体积 Root volume	0.483 **	0.433 **	0.369 **	0.246 *	0.299 **	0.199
单株根表面积 Root surface area	0.222	0.202	0.049	0.13	0.027	-0.055

注: * 在 5% 水平下显著, ** 在 1% 水平下显著
Note: * significant at 5% level, ** significant at 1% level

进一步对不同氮素水平下 75 份油菜种质的 13 个植株苗期形态性状采用逐步回归来确定对氮素营养效率的影响程度,油菜苗期植株性状与 NAE 的逐步回归结果发现,在低氮和中氮下单株地上干重对油菜苗期 NAE 的影响最大,在高氮下单株地上干重和主根长对油菜苗期 NAE 的影响最大(表 5);油菜苗期植株性状与 NUE 的逐步回归结果发现,在低氮下单株地上干重和根冠比对油菜苗期 NUE 的影响最大,在中氮下单株地上干重对油菜苗期 NUE 的影响最大,在高氮下单株地上干重和主根长对油菜苗期 NUE 的影响最大(表 6)。这与不同氮素水平的显著相关性状相吻合。

2.5.2 氮素营养效率鉴定与评价压力的确定 根据 NAE 和 NUE 分类结果,对 13 个植株苗期形态性状采用一起输入自变量和步进式方法进行判别分析,判别不同氮素选择压力下鉴定与评价的可靠指

标(表 7),结果表明:以单株地上干重和根冠比为指标间接鉴定与评价 NAE 应在低氮下进行,原始数据正确百分率和交叉验证正确百分率分别是实测 NAE 聚类的 92.0% 和 88.0%;以单株地上干重为指标间接鉴定与评价 NUE 应在高氮下进行,原始数据正确百分率和交叉验证正确百分率分别是实测 NUE 聚类的 82.7% 和 81.3%。

3 结论与讨论

Harvey^[23] 在 20 世纪初就发现植物在氮素吸收利用方面存在遗传变异。迄今已有大量研究证明水稻^[24,25]、小麦^[26,27]、玉米^[28]、油菜^[29] 等作物不同品种(或品系)之间均存在氮营养效率差异。本研究表明,不同油菜苗期 NAE 和 NUE 基因型差异明显,不同氮素水平下的 NAE 和 NUE 变幅分别为15.10%

表 5 油菜苗期植株性状与氮素吸收效率的逐步回归

Table 5 Stepwise regression between plant traits and NAE of rapeseed at seedling stage

处理 Treatment	模型 Model	入选变量 Selected dependent	回归方程 Regression equation	标准化偏回归系数 Standardized coefficients	决定系数 R ²
LN	1	单株地上干重(X ₉)	Y = 8.518 + 12.463X ₉	B(X ₉) = 0.886	0.785
		Shoot dry weight per plant			
MN	1	单株地上干重(X ₉)	Y = 8.497 + 6.492X ₉	B(X ₉) = 0.828	0.769
		Shoot dry weight per plant			
	1	单株地上干重(X ₉)	Y = 9.413 + 4.301X ₉	B(X ₉) = 0.763	0.580
HN		Shoot dry weight per plant			
	2	单株地上干重(X ₉)	Y = 6.730 + 4.154X ₉ + 0.195X ₆	B(X ₉) = 0.737 B(X ₆) = 0.173	0.612
		Shoot dry weight per plant 主根长(X ₆) Root length			

表 6 油菜苗期植株性状与氮素利用效率的逐步回归
Table 6 Stepwise regress between plant traits and NUE of rapeseed at seedling stage

处理 Treatment	模型 Model	入选变量 Selected dependent	回归方程 Regression equation	标准化偏回归系数 Standardized coefficients	决定系数 R ²
LN	1	单株地上干重(X ₉) Shoot dry weight per plant	Y = 15.180 + 2.960X ₉	B (X ₉) = 0.581	0.338
	2	单株地上干重(X ₉) Shoot dry weight per plant 根冠比(X ₁₁) Root shoot ratio	Y = 13.598 + 2.915X ₉ + 0.195X ₁₁	B (X ₉) = 0.573 B (X ₁₁) = 0.219	0.386
MN	1	单株地上干重(X ₉) Shoot dry weight per plant	Y = 13.316 + 1.889X ₉	B (X ₉) = 0.535	0.287
	1	单株地上干重(X ₉) Shoot dry weight per plant	Y = 11.005 + 1.690X ₉	B (X ₉) = 0.561	0.314
HN	1	单株地上干重(X ₉) Shoot dry weight per plant			
	2	单株地上干重(X ₉) Shoot dry weight per plant 主根长(X ₆) Root length	Y = 12.712 + 1.784X ₉ - 0.124X ₆	B (X ₉) = 0.592 B (X ₆) = -0.206	0.356

表 7 对以表征 NAE 和 NUE 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 discriminant on cluster analysis on plant traits of expressing NAE and NUE

处理 Treatment	NAE			NUE		
	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 Correct percentage/%	入选性状 Included traits	正确百分率 Correct percentage/%	正确百分率 Correct percentage/%	入选性状 Included traits	正确百分率 Correct percentage/%
低氮 LN	93.3 (81.3)	9, 11	92.0 (88.0)	86.7 (77.3)	9, 6	82.7 (80.0)
中氮 MN	88.0 (76.0)	9	82.7 (82.7)	86.0 (72.0)	9	80.0 (76.0)
高氮 HN	90.7 (81.3)	9	85.3 (85.3)	88.0 (76.0)	9	82.7 (81.3)

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 original grouped cases correctly classified; (2) The number in bracket is cross - validated grouped cases correctly classified

~40.91% 和 13.05 ~ 26.48g_{DW}/g_N。表明不同油菜种质苗期存在氮素营养效率的基因型差异,且 NAE 的基因型差异大于 NUE,这与程建峰等^[30]在稻种资源苗期氮素营养效率鉴定的结果基本一致。本研究还表明,油菜种质苗期 NAE 和 NUE 与氮素水平存在一定的关系,总体上同一基因型 NAE 和 NUE 有随氮素水平的升高呈下降的趋势。

油菜需氮量较多,在苗期对氮的需求比较敏感,已表现出氮吸收利用差异。叶祥盛等^[31]对 100 份不同氮效率基因型油菜进行了苗期氮高效种质筛选;王改丽等^[32,33]对以小孢子培养获得的 46 份纯合的新型甘蓝型油菜 DH 系进行了苗期氮高效种质筛选,均得到了氮高效种质和氮低效种质,并验证了苗期筛选的可行性。本研究根据生物统计学原理和氮素营养效率指标,对来自于国内外不同生态类型的 75 份油菜种质进行的鉴定结果表明,NAE 和 NUE 的基因型均存在明显的差异,以 NAE 为氮素营养效率指标鉴定评价油菜种质间苗期氮素营养效率的差异在低氮处理下选择效应比较明显,以 NUE 为氮素营养效率指标鉴定评价油菜种质间苗期氮素营养效率的差异在高氮处理下选择效应比较明显。因此,在油菜苗期筛选和评价氮素营养效率时,应依

据研究目的采取最佳的氮素营养效率指标。

对于养分高效筛选指标的确定,前人主要采用植株苗期地上部和地下部干物质量、生理生化指标等作为不同的筛选指标,这些指标在少量的种质鉴定中可以取得较好的效果,但对于大量的种质筛选则加大了工作量,增加了难度。因此,作物种质苗期氮素营养效率的间接鉴定与评价指标的确定非常关键。采用植株形态性状作为鉴定与评价指标是最简单而直观的方法,前人在水稻中开展了大量的养分高效间接鉴定与评价指标的筛选研究^[34~36]。在油菜中开展养分高效间接鉴定与评价指标的筛选研究不多,为此,本研究利用 SPSS 统计软件采用偏相关和逐步回归,再以 NAE 和 NUE 分类结果为参照进行判别分析来确定最佳的氮素选择压力。结果表明,在油菜苗期鉴定与评价氮素营养效率的种质资源时,以 NAE 为氮素营养效率指标可在低氮下用单株地上干重和根冠比进行间接鉴定与评价;以 NUE 为氮素营养效率指标可在高氮下用单株地上干重间接鉴定与评价。

参考文献:
[1] Di H J, Cameron K C. Nitrate leaching in temperate agro

- ecosystems: sources, factors and mitigating strategies [J]. Nutrient Cycling in Agro – ecosystems, 2002, 64: 237 – 256.
- [2] Rahimzadeh M, Kashani A, Zare – Feizabadi A, et al. Nitrogen use efficiency of wheat as affected by preceding crop, application rate of nitrogen and crop residues [J]. Australian Journal of Crop Science, 2010, 4: 363 – 368.
- [3] 徐新朋, 周卫, 梁国庆, 等. 氮肥用量和密度对双季稻产量及氮肥利用率的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(3): 763 – 772.
- [4] 严小龙, 张福锁. 植物营养遗传学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1997. 55 – 56.
- [5] 沈善敏. 中国土壤肥力 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1998. 199 – 250.
- [6] Janssen B H. Efficient use of nutrients: an art of balancing [J]. Field Crops Research, 1998, 56: 197 – 201.
- [7] Inthapanya P. Genotype differences in nutrient uptake and utilization for grain yield production of rainfed lowland rice under fertilized and non – fertilized conditions [J]. Field Crops Research, 2000, 65: 57 – 68.
- [8] Dong W, Cui K H, Pan J F, et al. Genetic dissection of grain nitrogen use efficiency and grain yield and their relationship in rice [J]. Field Crops Research, 2011, 124(3): 340 – 346.
- [9] 张亚丽, 樊剑波, 段英华, 等. 不同基因型水稻氮利用效率的差异及评价 [J]. 土壤学报, 2008, 45(2): 267 – 273.
- [10] 戢林, 李廷轩, 张锡洲, 等. 氮高效利用基因型水稻生育后期氮素分配与转运特性 [J]. 应用生态学报, 2014, 25(4): 1 036 – 1 042.
- [11] 董桂春, 陈琛, 袁秋梅, 等. 氮肥处理对氮素高效吸收水稻根系性状及氮肥利用率的影响 [J]. 生态学报, 2016, 36(3): 1 – 10.
- [12] Wiesler F, Behrens T, Horst W J. Nitrogen efficiency of contrasting rape ideotypes [A]. Horst W J, Sattelmacher B, Schmidhalter U, et al. Plant nutrition – food security and sustainability of agro – ecosystems [M]. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2001. 60 – 61.
- [13] 宋海星, 彭建伟, 刘强, 等. 不同氮素生理效率油菜生育后期氮素再分配特性研究 [J]. 中国农业科学, 2008, 41(6): 1 858 – 1 864.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Moll R H, Kamprath E J, Jackson W A. Development of nitrogen – efficient prolific hybrids of maize [J]. Crop Science, 1987, 27: 181 – 186.
- [17] Kessel B, Heiko C, Becker H C. Genetic variation of nitrogen efficiency in field experiments with oilseed rape (*Brassica napus* L.) [A]. “New Horizons for an old crop” – Proceedings of the 10th international rapeseed congress [C]. Canberra, Australia: 1999.
- [18] 余佳玲, 舒佳宾, 廖琼, 等. 不同氮效率油菜品种在常氮和缺氮条件下碳累积量、产量及品质比较 [J]. 亚热带植物科学, 2014, 43(4): 271 – 275.
- [19] 刘强, 宋海星, 荣湘民, 等. 不同品种油菜氮效率差异及其生理基础研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(1): 113 – 119.
- [20] 杨明, 宋海星, 徐浩然, 等. 不同品种油菜生长后期体内氮素转运及再分配差异研究 [J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(10): 1 289 – 1 294.
- [21] 左青松, 杨海燕, 冷锁虎, 等. 施氮量对油菜氮素积累和运转及氮素利用率的影响 [J]. 作物学报, 2014, 40(3): 511 – 518.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [23] Harvey P H. Heredity variation in plant nutrition [J]. Genetics, 1939, 24: 437 – 461.
- [24] 冯洋, 陈海飞, 胡孝明, 等. 我国南方主推水稻品种氮效率筛选及评价 [J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(5): 1 051 – 1 062.
- [25] 赵建红, 马均, 孙永健, 等. 不同氮效率水稻苗期对氮素水平及水分胁迫的响应 [J]. 西南农业学报, 2015, 28(2): 612 – 619.
- [26] 董召娣, 张明伟, 易媛, 等. 部分春性和半冬性小麦品种氮效率差异分析 [J]. 麦类作物学报, 2014, 34(9): 1 267 – 1 273.
- [27] 王小纯, 王晓航, 熊淑萍, 等. 不同供氮水平下小麦品种的氮效率差异及其氮代谢特征 [J]. 中国农业科学, 2015, 48(13): 2 569 – 2 579.
- [28] 崔文芳, 高聚林, 王志刚, 等. 玉米自交系氮效率基因型差异分析 [J]. 玉米科学, 2013, 21(3): 6 – 12.
- [29] 刘强, 宋海星, 荣湘民, 等. 不同品种油菜子粒产量及氮效率差异研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(4): 898 – 903.
- [30] 程建峰, 戴廷波, 曹卫星, 等. 稻种资源苗期氮素营养效率的分类、鉴定与评价 [J]. 作物学报, 2005, 31(12): 1 640 – 1 647.
- [31] 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.
- [32] Wang G, Ding G, Cai H, et al. Genotype differences in photosynthetic characteristics and nitrogen efficiency of

- new - type oilseed rape responding to low nitrogen stress [J]. Journal of Agricultural Science, 2015, 153 (6): 1 030 - 1 043.
- [33] Wang G, Ding G, 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.
- [34] 邢宏燕, 王二明, 李 滨, 等. 有效利用土壤磷的小麦种质筛选方法研究 [J]. 作物学报, 2000, 26 (6): 839 - 844.
- [35] 钟代兵, 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.
- [36] 郭再华, 贺立源, 徐才国, 等. 水稻耐低磷种质资源的筛选、鉴定指标 [J]. 作物学报, 2005, 31 (1): 65 - 69.
- (责任编辑: 郭学兰)

(上接第 59 页)

- [5] 林雪梅, 刘迎湖, 谢 利, 等. 基于计算机图像处理技术的叶面特征参数无损测量研究进展 [J]. 安徽农业科学, 2014, 42 (23): 8 029 - 8 031.
- [6] Femat - Diaz A, Vargas - Vazquez D, Huerta - Manzanilla E, et al. Scanner image methodology (SIM) to measure dimensions of leaves for agronomical applications [J]. African Journal of Biotechnology, 2011, 10 (10): 1 840 - 1 847.
- [7] Trooien T P, Heermann D F. Measurement and simulation of potato leaf area using image processing, PART III: Measurement [J]. Transactions of the ASAE, 1992, 35 (5): 1 791 - 1 721.
- [8] 石剑飞, 殷璀璨, 冷锁虎, 等. 采用数码图像处理法测定油菜叶面积的方法探讨 [J]. 中国油料作物学报, 2010, 32 (3): 379 - 382.
- [9] 徐义鑫, 李凤菊, 王建春, 等. 基于 OpenCV 的 Android 手机植物叶片几何参数测量系统 [J]. 中国农学通报, 2015, 31 (35): 236 - 244.
- [10] 何雪军, 王 进, 陆国栋, 等. 基于约束 Delaunay 三角网的茶鲜叶几何参数识别 [J]. 农业机械学报, 2014, 45 (9): 66 - 71.
- [11] Yamamoto S, Hayashi S, Saito S, et al. Measurement of growth information of a strawberry plant using a natural interaction device [C]. Dallas, Texas: An ASABE Meeting Presentation, 2012. 1 - 10.
- [12] Chen Y, Zhang W, Yan K, et al. Extracting corn geometric structural parameters using Kinect [J]. Nrnnaonal Jornal of Rmo Nng, 2012. 6 673 - 6 676.
- [13] Cao X P, Chen Y M. Kinect depth image hole filling based on contour [J]. Computer Applications and Software, 2016, 33 (5): 189 - 238.
- [14] Asundi A, Wensen Z. Fast phase - unwrapping algorithm based on a gray - scale mask and flood fill [J]. Applied Optics, 1998, 37 (23): 5 416 - 5 420.
- (责任编辑: 郭学兰)