

任璐璐,李双,张浩,等.施氮水平对甘蓝型油菜农艺性状的影响及氮高效基因型筛选[J].华中农业大学学报,2025,44(5):60-68.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2025.05.006

施氮水平对甘蓝型油菜农艺性状的影响 及氮高效基因型筛选

任璐璐,李双,张浩,王丹丹,王创,石磊,徐芳森,丁广大

华中农业大学资源与环境学院/微量元素研究中心/农业农村部长江中下游耕地保育重点实验室,武汉 430070

摘要 为筛选甘蓝型油菜氮高效品种以降低氮肥依赖、推动绿色生产,采用梯度氮处理(氮肥用量分别为:高氮 210 kg/hm²、低氮 70 kg/hm²、不施氮 0 kg/hm²)对 14 个甘蓝型油菜基因型进行田间试验,测定农艺性状、籽粒产量及氮效率相关指标;氮肥偏生产力(partial factor productivity of nitrogen, PFPN)、氮肥农学效率(agronomic efficiency of nitrogen, AEN),结合农艺性状相关性分析及氮效率类型进行氮效率综合评价。结果显示:低氮胁迫下,不同基因型油菜对氮素的响应差异更显著,氮效率指标表现出明显分化,PFPN与AEN均值分别达到高氮处理的2.75倍和2.30倍;筛选出双高效型基因型,即在高氮和低氮处理下,籽粒产量均显著高于所有供试基因型在对应氮水平的平均产量,PFPN与AEN稳定优异,在高低氮条件下均保持较高水平(高氮下PFPN \geq 12 kg/kg、AEN \geq 5 kg/kg;低氮下PFPN \geq 30 kg/kg、AEN \geq 10 kg/kg);低氮高效型在低氮下PFPN达50.61 kg/kg、AEN达43.92 kg/kg;高氮高效型仅在高氮表现突出;氮素调控农艺性状相关性,施氮强化地上部干质量、角果数与产量的正相关关系;双高效型占品种总数的28.57%,其生物量积累稳定;低氮高效型通过提升千粒重和每角果粒数适应氮胁迫。综上,双高效型品种和低氮高效型品种可为油菜氮高效遗传改良及减肥增效栽培提供重要种质资源。

关键词 甘蓝型油菜;氮效率;氮肥偏生产力;氮肥农学效率;农艺性状;基因型筛选;减肥增效

中图分类号 S565.4 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2025)05-0060-09

油菜是我国第一大油料作物,菜籽油是我国传统的食用植物油,是全球第二大植物油来源,每年可提供约520万t优质食用植物油^[1]。油菜主要集中于长江流域,以甘蓝型油菜为主栽类型。2023年,我国油菜的播种面积超过780万hm²,总产量逾1600万t,均居世界前列(<https://www.stats.gov.cn/sj/nds/2024/>)。近年来,我国油菜种植面积趋于稳定,且品种数量大幅增长,单产持续突破^[2]。然而,我国油菜生产长期依赖高量氮肥投入,氮肥偏生产力与国际先进水平相比还有一定差距。过量施肥不仅导致资源浪费、生产成本攀升,且造成了严重的环境污染,制约了油菜产业高质量发展^[3],因此,综合利用遗传改良手段选育高产高效品种、筛选和鉴定氮高效油菜种质资源,是提高油菜氮肥利用效率、降低农业生产成本、实现“减肥减药”农业生产目标的重要方

法之一^[4-6]。

氮效率主要由氮吸收效率(nitrogen uptake efficiency, NUpE)和氮利用效率(nitrogen use efficiency, NUtE)共同构成^[7-8]。在田间和育种实践中,氮肥偏生产力(partial factor productivity of nitrogen, PFPN)和氮肥农学效率(agronomic efficiency of nitrogen, AEN)因其易于测量且能直观反映作物产量对肥料投入的响应,被广泛用作综合评价氮肥利用效率和施肥效益的核心量化指标^[9-11]。研究表明,不同基因型油菜在不同氮素供应水平(尤其低氮胁迫)下,其PFPN和AEN存在显著的遗传变异,这为筛选氮高效基因型油菜提供了关键的表型指标^[12]。值得注意的是,低氮环境常能更大程度地放大基因型间的差异,更有利于发掘潜在的氮高效种质^[13]。同时,油菜多个农艺性状如株高、分枝数、角果数、每角果粒数、

收稿日期:2025-07-17

基金项目:农业生物育种国家科技重大专项(2023ZD04072)

任璐璐, E-mail: luluren@webmail.hzau.edu.cn

通信作者: 丁广大, E-mail: dgd@mail.hzau.edu.cn

千粒重、生物量等之间亦存在复杂的相关性,且这种相关性受氮素供应水平的显著调控^[14]。

基于多指标(如PFPN、AEN)进行综合评价,结合农艺性状相关性,在不同氮环境下鉴定基因型表现的稳定性,是筛选和鉴定具有实际应用价值的油菜氮高效基因型的有效策略^[15-16]。本研究通过设置氮素梯度处理(高氮、低氮、不施氮),系统评价14个油菜基因型在主要农艺性状、籽粒产量以及核心氮效率指标(PFPN、AEN)上的响应差异,深入分析不同氮环境下农艺性状间的相互关系及其调控模式,并依据基因型在高、低氮条件下的综合表现划分氮效率类型。最终,筛选出在不同氮环境下均表现稳定优异的双高效型、在高氮环境下表现突出的高氮高效型以及在缺氮环境下表现突出的低氮高效型基因型,旨在为油菜氮高效遗传改良提供优异的亲本材料和理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料与试验地点

试验区位于华中农业大学大田试验基地(30°29'N, 114°22'E),武汉市年平均气温约为16.8℃,年平均降水量约为1347.7 mm,气候为亚热带季风性湿润气候。以14份甘蓝型油菜种质资源为研究材料,分别为黔油331、川油20、10-1061、96021、9保22、2011-6200、2012-9354、12-P24、964、中双10号、沪油21、中油821、秦油5号与广德8104,油菜生长期为10月上旬至次年5月中旬。试验地土壤类型为黄棕壤,其基础肥力:全氮0.238 g/kg、碱解氮51.28 mg/kg、速效磷19.19 mg/kg、速效钾165.07 mg/kg、有机质12.11 g/kg、pH 6.57。

1.2 试验设计

本试验为二因素随机区组设计,因素1为3种氮处理(高氮210 kg/hm²、低氮70 kg/hm²、无氮0 kg/hm²),高、低氮用量参考文献^[17],因素2为14种基因型。采用随机区组设置,3次重复×3施氮处理共9小区,小区面积约16 m²,厢宽1.8 m,长8 m,保护行1 m,每小区每个基因型种2行。油菜采用点播,每穴3粒,行距0.2 m,株距0.15 m,约22.2万株/hm²,播后30 d定苗(8株/行)。试验所选其他肥料(基肥)包括:P₂O₅ 90 kg/hm², K₂O 120 kg/hm², B 15 kg/hm²,氮肥分2次施加,70%为基肥,30%为苗肥。

1.3 测定项目与方法

1)农艺性状的测定。每小区每种基因型选取3

株与整体水平长势一致的植株,在油菜成熟期测定其株高、分枝数、第一分枝高、籽粒产量、每角果粒数、角果长度、单株角果数、地上部干质量以及千粒重,并依此计算单株籽粒产量。

2)相关参数的计算。氮肥农学效率(AEN)定义为[(施氮区籽粒产量与不施氮区籽粒产量的差)与施氮量的比值,kg/kg],反映单位氮肥投入的增产效果^[11]。氮肥偏生产力(PFPN)定义为施氮区籽粒产量与施氮量的比值,kg/kg,表征单位氮肥投入所能获得的籽粒总产量^[9]。根据供试品种在低氮(70 kg/hm²)和高氮(210 kg/hm²)下的产量表现,以各氮水平下所有品种的平均产量为分界线,将其划分为4种类型:双高效型(该基因型油菜2种氮处理下产量均超均值)、低氮高效型(该基因型油菜仅低氮产量超均值,高氮产量低于均值)、双低高效型(该基因型油菜在2种氮条件下产量均低于均值)、高氮高效型(该基因型油菜仅在高氮条件下产量超均值,低氮条件下则低于均值)^[18]。

1.4 数据统计分析

采用Microsoft Office Excel 2016进行数据处理,采用SPSS 22统计软件进行方差分析(ANOVA),采用Duncan's法进行显著性检验,采用Pearson相关系数分析指标间的相关性,采用GraphPad Prism 8绘制图表。

2 结果与分析

2.1 不同施氮条件下油菜农艺性状的差异

分析不同氮肥条件下油菜各品种的产量及相关农艺性状,发现油菜对施氮水平的响应存在显著基因型变异。在不同氮处理下,各油菜基因型的平均株高、第一分枝高、分枝数、角果长度、千粒重均无显著差异,表明不同氮处理对油菜产量性状影响较小。地上部干质量在高氮与低氮条件下均高于不施氮处理,每株角果数在低氮条件下最多,而每角果粒数则在高氮条件下最多,显著大于低氮处理。籽粒平均产量表现为高氮处理(9.35 g) > 低氮处理(8.59 g) > 不施氮处理(6.09 g),施氮处理(高氮、低氮)产量均显著高于不施氮处理。各农艺性状在不同氮处理下的变异系数接近,且品种间均存在较大差异,其中籽粒产量变异系数最大,分别为高氮49.2%、低氮53.64%、不施氮53.69%,表明在不同氮处理下,产量存在显著的基因型差异(表1)。

表 1 不同施氮条件下油菜农艺性状的差异
Table 1 Differences of agronomic traits among 14 rapeseed genotypes at different nitrogen supplies

农艺性状 Agronomic traits	高氮(210 kg/hm ²) High nitrogen			低氮(70 kg/hm ²) Low nitrogen			不施氮 No nitrogen		
	变幅 Range	平均值 Average	变异 系数/% CV	变幅 Range	平均值 Average	变异 系数/% CV	变幅 Range	平均值 Average	变异 系数/% CV
株高/cm Plant height	80~159	125.01±18.07a	14.45	77~166	123.33±18.38a	14.91	76~156	118.98±19.28a	16.20
第一分枝高/cm First branch height	23~75	48.10±12.14a	25.23	23~67	43.48±11.26a	25.90	15~66	42.74±13.29a	31.09
分枝数 Branch number	2~9	5.48±1.50a	27.37	2~10	5.52±1.64a	29.67	3~8	4.88±1.30a	26.68
地上部干质量/ (g/plant) Shoot dry weight	20.65~77.28	46.52±13.34ab	28.68	22.30~109.05	48.79±16.10a	32.99	21.49~67.85	41.23±12.17b	29.51
每株角果数 Siliqua number	61~327	188.03±71.81ab	38.19	51~434	209.02±85.18a	40.75	33~370	158.63±71.35b	44.98
角果长度/cm Siliqua length	5.2~9.7	6.94±1.02a	14.70	4.8~9.5	6.70±1.08a	16.11	5.3~9.0	6.74±0.94a	13.90
每角果粒数 Seed number per siliqua	11~23	15.90±2.90a	18.21	6~20	13.17±3.12b	23.72	9~20	14.57±2.72ab	18.70
千粒重/g Thousand seed weight	2.48~6.68	4.31±1.03a	23.90	2.58~6.75	4.50±1.15a	25.67	2.42~6.77	4.49±1.20a	26.78
籽粒产量/(g/plant) Seed yield	2.43~20.93	9.35±4.60a	49.20	2.16~23.52	8.59±4.61a	53.64	0.66~16.50	6.09±3.27b	53.69

注:不同字母表示同一性状在不同氮处理存在显著差异($P<0.05$)。Note:Different letters represent the significant difference among different nitrogen treatments of each trait at 0.05 level.

2.2 不同施氮条件下油菜各基因型氮肥利用效率的差异

氮肥偏生产力(PFPN)和氮肥农学效率(AEN)是评估氮肥利用效率和施肥效益的2个核心指标,可以从不同角度解释农业生产中对氮肥管理的效果,供试14个基因型油菜在高氮条件下,氮肥偏生产力为4.39~17.48 kg/kg,均值为9.89 kg/kg;在低氮条件下,氮肥偏生产力为13.03~50.61 kg/kg,均值为27.28 kg/kg。低氮条件下氮肥偏生产力的均值和变幅均较大,是高氮条件下的2.75倍。在高氮条件下96021、沪油21号的氮肥偏生产力较高,分别为16.95与16.42 kg/kg,2012-9354、川油20、964、2011-6200、9保22、中油821、黔油331号等7个基因型的氮肥偏生产力居中,中双10号、10-1061、12-P24、广德8104、秦油5号5种基因型的氮肥偏生产力较低。在低氮条件下,10-1061的PFPN达到50.61 kg/kg,显著高于其余供试品种的PFPN,96021、2012-9354、964、黔油331、川油20、9保22、秦油5号、中双10号、中油821的氮肥偏生产力居中,沪油21、2011-6200、广德

8104和12-P24的氮肥偏生产力较低,均值为17.07 kg/kg(表2)。

与氮肥偏生产力类似,氮肥农学效率在不同基因型间同样存在显著差异。在高氮条件下,供试品种的氮肥农学效率的变幅为-2.91~9.50 kg/kg,均值为3.44 kg/kg;在低氮条件下,供试品种的氮肥农学效率的变幅为-13.72~43.92 kg/kg,均值为7.93 kg/kg。与氮肥偏生产力一致,低氮条件下氮肥农学效率的变幅更大,均值更高,其均值是高氮条件下的2.30倍。在高氮条件下,96021、沪油21号氮肥农学效率较高,分别达9.50与8.56 kg/kg,2011-6200、964、2012-9354、10-1061、12-P24、9保22、广德8104、中双10号、黔油331的氮肥农学效率居中,秦油5号、川油20、中油821的氮肥农学效率偏低,甚至秦油5号、川油20号的氮肥农学效率为负数。在低氮条件下10-1061的AEN最高,为43.29 kg/kg,显著高于其余供试品种的AEN,964、96021、2012-9354、12-P24、黔油331、广德8104、2011-6200、9保22、中双10号的氮肥农学效率居中,秦油5号、中油821、川油20、沪

油 21 号的氮肥农学效率较低,其中中油 821、川油 20、沪油 21 号的氮肥农学效率为负数(表 2)。综上,96021 品种在不同氮处理下具有稳定的高氮肥偏生产力与氮肥农学效率,而沪油 21 号与 10-1061 品种则分别只在高氮与低氮条件下具有较高氮效率。

2.3 不同施氮条件下油菜各农艺性状的相关性

由图 1 可见,各农艺性状间存在一定的相关性,且这种相关性受施氮水平的显著影响。在不施氮条件下,地上部干质量与籽粒产量相关性最高,相关系数达 0.88,其次是与角果数、株高的相关性,相关系数分别为 0.85 与 0.83,均为极显著正相关,地上部干质量与分枝数和第一分枝高也存在较高相关性。籽粒产量与株高、角果数的相关性最高,相关系数分别为 0.75 和 0.74,其次是与第一分枝高和分枝数呈较高正相关。角果长度与千粒重的相关系数为 0.70,第一分枝高与角果数、株高的相关系数分别为 0.73 和 0.56,株高与角果数、分枝数,分枝数与角果数也呈显著正相关。而每角果粒数与千粒重、角果长度与分枝数

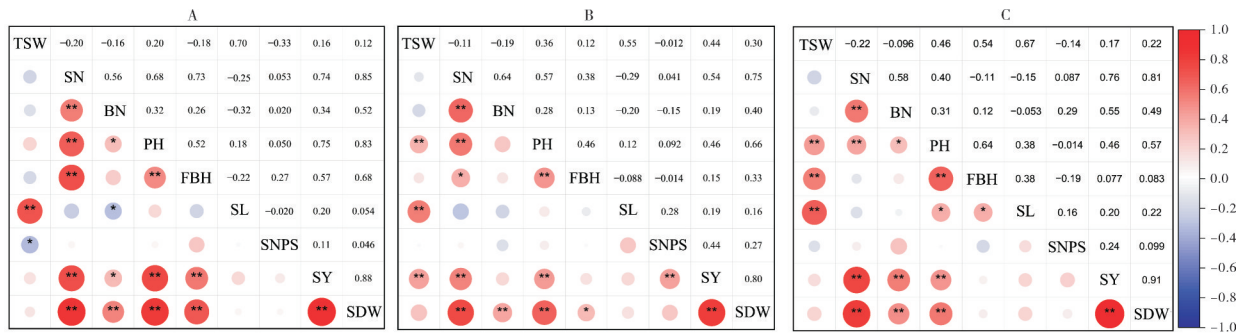
呈显著负相关,相关系数分别为-0.33 和-0.32。在低氮条件下,地上部干质量与籽粒产量相关系数最大,为 0.80,其次是地上部干质量与角果数的相关系数为 0.75,与株高、分枝数、第一分枝高也呈较显著正相关。籽粒产量与千粒重、角果数、株高、每角果粒数呈正相关,角果长度与千粒重,第一分枝高与株高、角果数,株高与千粒重、角果数,分枝数与角果数均分别呈正相关。在高氮条件下,地上部干质量和籽粒产量的相关性呈极显著正相关,相关系数达 0.91,其次是角果数与地上部干质量的相关系数为 0.81,籽粒产量与角果数的相关系数为 0.76。地上部干质量、籽粒产量分别与株高、分枝数,角果长度与千粒重、株高、第一分枝高,第一分枝高与千粒重、株高,株高与千粒重、角果数、分枝高,分枝数与角果数这些性状间均呈现不同程度的正相关。

综上,在不同施氮条件下,地上部干质量与角果数、分枝数、株高、籽粒产量,籽粒产量与角果数、株高,角果长度与千粒重,第一分枝高与株高,株高与角果数,分枝数与角果数均呈显著正相关。仅在不

表 2 不同油菜基因型的氮肥偏生产力与氮肥农学效率

Table 2 PFPN and AEN of 14 rapeseed genotypes at different nitrogen supplies				kg/kg			
高氮(210 kg/hm ²) High nitrogen				低氮(70 kg/hm ²) Low nitrogen			
氮肥偏生产力 PFPN		氮肥农学效率 AEN		氮肥偏生产力 PFPN		氮肥农学效率 AEN	
基因型 Genotypes	平均值 Average	基因型 Genotypes	平均值 Average	基因型 Genotypes	平均值 Average	基因型 Genotypes	平均值 Average
秦油 5 号 Qinyou 5	4.39c	秦油 5 号 Qinyou 5	-2.91d	沪油 21 Huyou 21	13.03b	沪油 21 Huyou 21	-13.72c
广德 8104 Guangde 8104	6.37c	川油 20 Chuanyou 20	-0.77cd	2011-6200	15.35b	川油 20 Chuanyou 20	-5.06 bc
12-P24	6.42c	中油 821 Zhongyou 821	0.44bcd	广德 8104 Guangde 8104	18.76b	中油 821 Zhongyou 821	-4.11 bc
10-1061	7.10c	黔油 331 Qianyou 331	1.25abcd	12-P24	21.15b	秦油 5 号 Qinyou 5	0.57 bc
中双 10 号 Zhongshuang 10	8.13c	中双 10 号 Zhongshuang 10	1.56 abcd	中油 821 Zhongyou 821	21.55ab	中双 10 号 Zhongshuang 10	2.33 bc
黔油 331 Qianyou 331	8.95bc	广德 8104 Guangde 8104	2.00 abcd	中双 10 号 Zhongshuang 10	22.04ab	9 保 22 9 Bao 22	2.85 bc
中油 821 Zhongyou 821	9.00bc	9 保 22 9 Bao 22	2.09 abcd	秦油 5 号 Qinyou 5	22.47ab	2011-6200	4.95 bc
9 保 22 9 Bao 22	9.70abc	12-P24	3.48 abcd	9 保 22 9 Bao 22	25.67ab	广德 8104 Guangde 8104	5.65 bc
2011-6200	10.26abc	10-1061	4.87 abcd	川油 20 Chuanyou 20	31.76ab	黔油 331 Qianyou 331	9.80 bc
964	10.44abc	2012-9354	5.06 abcd	黔油 331 Qianyou 331	32.91ab	12-P24	12.33 bc
川油 20 Chuanyou 20	11.49abc	964	6.24 abc	964	33.50ab	2012-9354	13.99b
2012-9354	12.29abc	2011-6200	6.80 abc	2012-9354	35.69ab	96021	16.67b
96021	16.42ab	沪油 21 Huyou 21	8.56ab	96021	37.42ab	964	20.91ab
沪油 21 Huyou 21	17.48a	96021	9.50a	10-1061	50.61a	10-1061	43.92a
均值 Average	9.89	均值 Average	3.44	均值 Average	27.28	均值 Average	7.93

注:同列不同小写字母表示氮肥偏生产力、氮肥农学效率在不同品种间达到显著差异($P<0.05$)。Note: The different lower letters represent significant difference among different rapeseed genotypes in PFPN or AEN($P<0.05$).



A: 不施氮处理; B: 低氮处理; C: 高氮处理; TSW: 千粒重, g; SN: 角果数; BN: 分枝数; PH: 株高, cm; FBH: 第一分枝高, cm; SL: 角果长度, cm; SNPS: 每角果粒数; SY: 籽粒产量, g; SDW: 地上部干质量, g; *, ** 分别表示 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 。下同。A: No nitrogen application; B: Low nitrogen treatment; C: High nitrogen treatment. TSW: Thousand seeds weight, g; SN: Siliques number; BN: Branch number; PH: Plant height; FBH: First branch height, cm; SL: Silique length, cm; SNPS: Seed number per silique; SY: Seed yield, g; SDW: Shoot dry weight, g; * and ** indicate $P < 0.05$ and 0.01 , respectively. The same as below.

图1 不同施氮水平下14个油菜基因型各农艺性状间的相关性

Fig. 1 The correlation among all agronomic traits of 14 rapeseed genotypes under varied nitrogen treatments

施氮条件下, 每角果粒数与千粒重, 角果长度与分枝数呈显著负相关。与不施氮相比, 供应氮肥后株高与千粒重呈现正相关, 其他指标均无相关性。表明施用氮肥调节了农艺性状间的相关性, 减少了不施氮条件下的负相关。

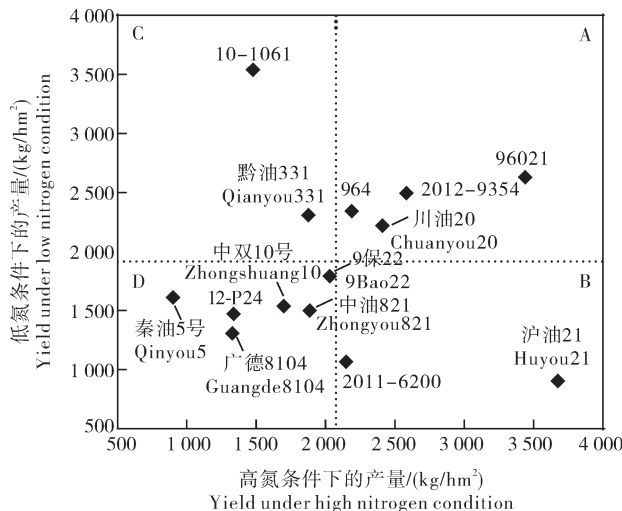
2.4 不同油菜品种氮效率类型的划分

以供试油菜品种在高氮和低氮条件下的产量均值作为分界线将其进一步划分为4种氮效率类型: 双高效型、低氮高效型、高氮高效型和双低效型(图2)。经统计, 双低效型品种占比最高, 包括9保22、12-

P24、中双10号、中油821、秦油5号、广德8104号共6个品种, 约占品种总数的42.86%。川油20、96021、2012-9354、964号品种具有双高效型特征, 约占品种总数的28.57%。低氮高效型和高氮高效型品种占比偏少, 各有2个, 黔油331和10-1061号为低氮高效型品种, 2011-6200和沪油21号为高氮高效型, 约占品种总数的14.29%。

2.5 不同氮效率类型油菜农艺性状的差异

为解析甘蓝型油菜不同氮效率类型农艺性状的差异, 对4种类型油菜在不同氮处理下的相关农艺性状进行统计分析, 结果显示, 不同类型油菜的农艺性状对氮素的响应模式各异。在高氮条件下油菜的分枝数、千粒重、角果长度、地上部干质量等在不同氮效率类型间存在显著差异, 其余性状在4种类型油菜间无显著差异。且高氮高效型品种最多的分枝数为6.89, 而低氮高效型品种的分枝数仅为4.11。高氮高效型的千粒重为5.00 g, 显著高于双低效型, 其余2种类型油菜介于中间, 无显著差异。高氮高效型品种角果长度为7.82, 显著高于双低效型。同时高氮高效型和双高效型的地上部干质量较为接近, 分别为54.79与54.24 g/plant, 均显著高于双低效型(表3)。在低氮条件下, 分枝数、千粒重、每角果粒数等在不同的氮效率类型间存在显著差异。高氮高效型的分枝数最高达到6.67, 低氮高效型的分枝数最低仅4.44, 双低效型和双高效型的分枝数较为接近, 无显著差异。低氮高效型的千粒重为5.75, 角果数达到15.71, 均显著高于高氮高效型。双低效型和高氮高



A: 双高效型 Dual highly-efficient genotypes; B: 高氮高效型 High nitrogen-efficient genotypes; C: 低氮高效型 Low nitrogen-efficient genotypes; D: 双低效型 Dual lowly-efficient genotypes.

图2 不同油菜种质资源的氮效率类型划分

Fig. 2 Classification of rapeseed genotypes with different nitrogen use efficiency

效型的千粒重、双低效型和双高效型的每角果粒数无显著差异。在不施氮条件下,仅分枝数、千粒重存在显著差异。综上,不同类型油菜对氮素供应响应不同,双高效型与双低效型在不同施氮条件下农艺性状较为稳定,且双高效型油菜多数农业性状均高于双低效品种(表 3)。

表 3 不同氮效率类型油菜在 3 个氮水平下的农艺性状差异

Table 3 Differences in agronomic traits among rapeseeds with different nitrogen efficiency under three nitrogen levels									
施氮水平/ (kg/hm ²) N level	氮效率类型 Nitrogen efficiency types	株高/cm PH	第一分枝 高/cm FBH	分枝数 BN	角果数 SN	千粒重/g TSW	每角果粒数 SNPS	角果长 度/cm SL	地上部 干质量/g SDW
210	双低效型 DLEG	120.00a	45.76a	5.43ab	175.70a	3.80b	15.94a	6.51b	39.70b
	高氮高效型 HNEG	131.89a	55.60a	6.89a	214.33a	4.83ab	17.8a	7.82a	54.24a
	低氮高效型 LNEG	124.83a	48.50a	4.11b	145.56a	5.00a	15.50a	6.93ab	42.72ab
	双高效型 DHEG	129.17a	47.64a	5.56ab	214.61a	4.50ab	15.00a	7.14ab	54.79a
70	双低效型 DLEG	118.96a	42.87a	5.46ab	203.33a	4.00b	13.22ab	6.25a	43.72a
	高氮高效型 HNEG	123.89a	39.67a	6.67a	174.50a	4.32b	10.67b	7.24a	42.8a
	低氮高效型 LNEG	135.33a	46.67a	4.44b	205.61a	5.75a	15.71a	6.96a	57.94a
	双高效型 DHEG	123.61a	44.72a	5.56ab	236.53a	4.73ab	13.33ab	6.97a	54.82a
0	双低效型 DLEG	118.19a	46.11a	4.81ab	166.96a	3.82b	15.00a	6.42a	40.59a
	高氮高效型 HNEG	122.17a	36.61a	5.78a	164.22a	4.86ab	14.17a	7.08a	41.95a
	低氮高效型 LNEG	115.06a	39.06a	4.06b	109.89a	5.64a	12.67a	6.72a	35.69a
	双高效型 DHEG	118.19a	42.58a	4.94ab	167.72a	4.75ab	15.08a	7.07a	44.60a

注 Note: DLEG: Dual lowly-efficient genotypes; HNEG: High nitrogen-efficient genotypes; LNEG: Low nitrogen-efficient genotypes ; DHEG: Dual highly-efficient genotypes; 不同字母表示同一性状在不同的氮效率类型之间有显著差异($P<0.05$)。Note: The different letters represent the significant difference ($P<0.05$) between different nitrogen efficiency types in same agronomic trait.

3 讨 论

本研究系统评价了 14 个甘蓝型油菜基因型在梯度氮素供应(高氮、低氮、不施氮)下的农艺性状、产量及产量构成因子以及氮效率核心指标(PFPN、AEN)的响应差异,并依据不同氮水平下的籽粒产量表现划分了氮效率类型,结果显示,14 个甘蓝型油菜基因型在产量及氮效率指标(PFPN、AEN)上存在显著差异,且低氮胁迫可放大差异,施氮水平显著调控农艺性状间的相关性,施氮强化了地上部生物量、角果数与产量间的正相关关系。在此基础上,筛选出具有应用潜力的双高效基因型的 96021,在高低氮环境下均能保持高产和高氮效;低氮高效型 10-1061,可以特异性地在低氮胁迫下通过提高千粒重和每角果粒数实现较高产量和极高的氮效率;高氮高效型沪油 21 号,对油菜氮高效遗传改良和绿色生产具有重要意义(图 2)。

本研究证实不同基因型油菜在 PFPN 与 AEN 上存在显著差异,尤其在低氮环境下变异幅度更大,低

氮下 PFPN 均值是高氮下的 2.75 倍,AEN 均值是高氮处理的 2.30 倍,强烈支持 Kessel 等^[12]与 Garnett 等^[13]的观点,即低氮胁迫是放大基因型差异、发掘氮高效种质的关键处理条件。与 Cormier 等^[15]的多指标综合评价策略一致,本研究结合 PFPN、AEN 及农艺性状综合分析,成功筛选出双高效型 96021 和低氮高效型 10-1061 等优异基因型。油菜基因型 96021 在高、低氮条件下均保持较高的 PFPN 和 AEN,表现出优异的氮素综合调控能力和环境适应性,是培育广谱型氮高效品种的理想亲本,基因型 10-1061 在低氮条件下表现出优异的 PFPN(50.61 kg/kg)和 AEN(43.29 kg/kg),可能具有高效的氮吸收能力^[19],对低产田或减肥增效区域具有极大的应用价值。双低效型油菜占比最高,这些品种在氮效率上存在很大不足,需加强遗传改良。

本研究结果表明,氮素供应可以重塑农艺性状间的相关性网络(图 1),验证了 Bouchet 等^[14]的结果“多个农艺性状受氮素供应的显著调控”。不同氮

环境下籽粒产量与角果数变异最强(变异系数 $>49\%$),而株高、角果长度相对稳定,这与田飞等^[20]的研究结果“在低氮下角果数变异增大”一致,但杨睿等^[21]研究认为“第一分枝高变异最大,这种差异可能源于品种遗传背景”,本研究与此结论不一致。施氮后,关键产量性状如地上部干质量、籽粒产量、角果数、分枝数、株高之间的正相关性普遍增强,而不施氮条件下出现的负相关,如每角果粒数与千粒重,在施氮后消失。这表明氮素供应协调了植株生长发育,缓解了库源竞争和养分分配冲突。值得注意的是,角果数在低氮下与产量呈正相关,而每角果粒数在高氮下对产量贡献更显著,这表明不同氮环境下产量构成因素形成了差异化调控机制,低氮可能更依赖生殖器官数量如角果数的维持,而高氮则有利于籽粒充实^[14]。双高效型品种(如96021、2012-9354、964、川油20)能在不同氮环境下协调优化这些关键性状,高氮高效型(如2011-6200、沪油21)在高氮下依赖增加分枝数和千粒重实现高产,但在低氮下这些优势无法发挥(表3)。

研究人员采用不同的方法对多数作物氮效率类型进行了划分^[22],刘强等^[23]根据不同施氮条件下产量的差异来将油菜供试品种划分为4种不同氮效率类型,常程等^[24]通过研究玉米氮高效特征发现双高效品种的生物量显著高于其他类型,张玉莹等^[19]将供试油菜品种的氮素利用效率高作为氮高效和氮低效的初选材料,张浩等^[17]以产量平均值为分界线将供试品种分为4种类型,以评判不同品种的减氮增产潜力。本研究采用张浩等^[17]的方法选择不同基因型油菜依据高低氮条件下的产量表现进行氮效率分型,结果显示,双高效型(如96021)在高低氮条件下均保持较高的地上部干质量,表明其具有强大的碳氮同化能力和稳定的生物量积累;低氮高效型油菜(如10-1061)在低氮下表现出更高的千粒重和每角果粒数(表3),说明其在氮限制下优先保证籽粒发育的强大库强或高效的养分再转运能力。从应用角度看,高氮高效型在当前环保压力下应用受限,其高氮依赖性与绿色可持续发展目标存在矛盾^[3],双高效型品种(占比 28.57%)是实现“减氮不减产”目标的理想选择,尤其适合集约化生产中推广;低氮高效型则在土壤贫瘠区、轻简栽培或减肥示范区具有更大价值。

参考文献 References

- [1] 刘成,冯中朝,肖唐华,等.我国油菜产业发展现状、潜力及对策[J].中国油料作物学报,2019,41(4):485-489. LIU C, FENG Z C, XIAO T H, et al. Development, potential and adaptation of Chinese rapeseed industry[J]. Chinese journal of oil crop sciences, 2019, 41(4): 485-489 (in Chinese with English abstract).
- [2] 胡志勇,鲜孟筑,李俊.我国油菜品种改良现状及发展趋势[J].中国农业大学学报,2024,29(3):50-62. HU Z Y, XIAN M Z, LI J. Current situation and development trends of rapeseed variety improvement in China[J]. Journal of China Agricultural University, 2024, 29(3): 50-62 (in Chinese with English abstract).
- [3] 甘国渝,邹家龙,陈曦,等.中国油菜生产格局与施肥研究现状[J].湖北农业科学,2022,61(1):5-11. GAN G Y, ZOU J L, CHEN X, et al. Research status of rape production pattern and fertilization in China[J]. Hubei agricultural sciences, 2022, 61(1): 5-11 (in Chinese with English abstract).
- [4] 崔超,高聚林,于晓芳,等.18个玉米自交系氮效率相关性状的配合力分析[J].作物学报,2014,40(5):838-849. CUI C, GAO J L, YU X F, et al. Combining ability of traits related to nitrogen use efficiency in eighteen maize inbred lines[J]. Acta agronomica sinica, 2014, 40(5): 838-849 (in Chinese with English abstract).
- [5] 张宏芝,高永红,王立红,等.不同冬小麦品种产量和氮素吸收利用效率差异[J].新疆农业科学,2022,59(8):1847-1854. ZHANG H Z, GAO Y H, WANG L H, et al. Differences of grain yield, nitrogen uptake and utilization efficiency of different wheat varieties in southern Xinjiang[J]. Xinjiang agricultural sciences, 2022, 59(8): 1847-1854 (in Chinese with English abstract).
- [6] 匡艺,雷明容.作物氮利用效率研究进展与展望[J].农业工程技术,2019,39(11):84-85. KUANG Y, LEI M R. Research progress and prospect of crop nitrogen use efficiency[J]. Agricultural engineering technology, 2019, 39(11): 84-85 (in Chinese with English abstract).
- [7] MOLL R H, KAMPRATH E J, JACKSON W A. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization[J]. Agronomy journal, 1982, 74(3): 562-564.
- [8] XU G H, FAN X R, MILLER A J. Plant nitrogen assimilation and use efficiency[J]. Annual review of plant biology, 2012, 63: 153-182.
- [9] 张智,丛日环,鲁剑巍.中国冬油菜产业氮肥减施增效潜力分析[J].植物营养与肥料学报,2017,23(6):1494-1504. ZHANG Z, CONG R H, LU J W. Potential analysis on winter oilseed rape production under reducing nitrogen input and increasing its efficiency in China[J]. Journal of plant nutrition

- and fertilizer, 2017, 23(6): 1494-1504 (in Chinese with English abstract).
- [10] 魏全全, 饶勇, 张萌, 等. 适应贵州黄壤生长的氮高效油菜品种筛选[J]. 中国油料作物学报, 2021, 43(6): 982-995. WEI Q Q, RAO Y, ZHANG M, et al. Screening of nitrogen efficient winter rapeseed varieties for growing in yellow soil in Guizhou Province[J]. Chinese journal of oil crop sciences, 2021, 43(6): 982-995 (in Chinese with English abstract).
- [11] 邹娟, 鲁剑巍, 陈防, 等. 冬油菜施氮的增产和养分吸收效应及氮肥利用率研究[J]. 中国农业科学, 2011, 44(4): 745-752. ZOU J, LU J W, CHEN F, et al. Study on yield increasing and nutrient uptake effect by nitrogen application and nitrogen use efficiency for winter rapeseed [J]. Scientia agricultura sinica, 2011, 44(4): 745-752 (in Chinese with English abstract).
- [12] KESSEL B, SCHIERHOLT A, BECKER H C. Nitrogen use efficiency in a genetically diverse set of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) [J]. Crop science, 2012, 52(6): 2546-2554.
- [13] GARNETT T, CONN V, KAISER B N. Root based approaches to improving nitrogen use efficiency in plants [J]. Plant, cell & environment, 2009, 32(9): 1272-1283.
- [14] BOUCHET A S, LAPERCHE A, BISSUEL-BELAYGUE C, et al. Nitrogen use efficiency in rapeseed: a review[J/OL]. Agronomy for sustainable development, 2016, 36(2): 38 [2025-07-17]. <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0371-0>.
- [15] CORMIER F, FOULKES J, HIREL B, et al. Breeding for increased nitrogen-use efficiency: a review for wheat (*T. aestivum* L.) [J]. Plant breeding, 2016, 135(3): 255-278.
- [16] CHEN X P, CUI Z L, VITOUSEK P M, et al. Integrated soil-crop system management for food security [J]. PNAS, 2011, 108(16): 6399-6404.
- [17] 张浩, 李双, 叶祥盛, 等. 甘蓝型油菜减氮增效潜力评价及种质资源筛选[J]. 中国油料作物学报, 2021, 43(2): 195-202. ZHANG H, LI S, YE X S, et al. Evaluation on potential of reducing nitrogen and increasing efficiency for *Brassica napus* germplasm [J]. Chinese journal of oil crop sciences, 2021, 43(2): 195-202 (in Chinese with English abstract).
- [18] 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. CAO L Q, WU X M, LI Y J, et al. Relationship between genotypic differences of rapeseed (*Brassica napus* L.) nitrogen uptake efficiency and economic characteristics[J]. Chinese journal of oil crop sciences, 2010, 32(2): 270-278 (in Chinese with English abstract).
- [19] 张玉莹, 安蓉, 曹兰芹, 等. 不同氮素利用效率基因型油菜氮素营养性状的差异[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(5): 102-110. ZHANG Y Y, AN R, CAO L Q, et al. Differences in nitrogen traits of rapeseed (*Brassica napus* L.) genotypes with different nitrogen use efficiencies using pot experiment [J]. Journal of Northwest A & F University (natural science edition), 2014, 42(5): 102-110 (in Chinese with English abstract).
- [20] 田飞, 徐芳森, 石桃雄, 等. 白菜型、芥菜型和甘蓝型油菜对低氮低磷胁迫反应的差异[J]. 华中农业大学学报, 2012, 31(6): 725-730. TIAN F, XU F S, SHI T X, et al. Different adaptability of *Brassica rapa*, *Brassica juncea* and *Brassica napus* in response to low nitrogen or low phosphorus stress [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2012, 31(6): 725-730 (in Chinese with English abstract).
- [21] 杨睿, 伍晓明, 安蓉, 等. 不同基因型油菜氮素利用效率的差异及其与农艺性状和氮营养性状的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(3): 586-596. YANG R, WU X M, AN R, et al. Differences of nitrogen use efficiency of rapeseed (*Brassica napus* L.) genotypes and their relations to agronomic and nitrogen characteristics [J]. Journal of plant nutrition and fertilizer, 2013, 19(3): 586-596 (in Chinese with English abstract).
- [22] 秦璐, 韩配配, 常海滨, 等. 甘蓝型油菜耐低氮种质筛选及绿肥应用潜力评价[J]. 作物学报, 2022, 48(6): 1488-1501. QIN L, HAN P P, CHANG H B, et al. Screening of rapeseed germplasms with low nitrogen tolerance and the evaluation of its potential application as green manure [J]. Acta agronomica sinica, 2022, 48(6): 1488-1501 (in Chinese with English abstract).
- [23] 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. LIU Q, SONG H X, RONG X M, et al. Studies on oilseed yield and nitrogen efficiency in different cultivars of oilseed rape (*Brassica napus*) [J]. Plant nutrition and fertilizer science, 2009, 15(4): 898-903 (in Chinese with English abstract).
- [24] 常程, 王金艳, 徐亮, 等. 高产氮高效春玉米品种筛选及节氮潜力与氮素利用特征分析[J]. 玉米科学, 2022, 30(4): 142-149. CHANG C, WANG J Y, XU L, et al. Screening of spring maize varieties with high yield and high nitrogen use efficiency & analysis of nitrogen saving potential and nitrogen use characteristics [J]. Journal of maize sciences, 2022, 30(4): 142-149 (in Chinese with English abstract).

Effects of nitrogen application rate on agronomic traits of *Brassica napus* L. and screening of nitrogen-efficient genotypes

REN Lulu, LI Shuang, ZHANG Hao, WANG Dandan,
WANG Chuang, SHI Lei, XU Fangsen, DING Guangda

College of Resources and Environment/ Microelement Research Center/ Key Laboratory of Arable Land Conservation (Middle and Lower Reaches of Yangtze River), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

Abstract A Field experiment was conducted on 14 genotypes of *Brassica napus* L. with gradient nitrogen treatments including nitrogen fertilizer application rates of high nitrogen 210 kg/hm², low nitrogen 70 kg/hm², and no nitrogen application 0 kg/hm² to screen nitrogen-efficient varieties of *B. napus* to reduce the dependence on nitrogen fertilizer and promote the green production. Agronomic traits, seed yield, and nitrogen efficiency related indexes including partial factor productivity of nitrogen (PFPN) and agronomic efficiency of nitrogen (AEN) were measured. The nitrogen efficiency was comprehensively evaluated based on correlation analysis of agronomic traits and classification of nitrogen efficiency types. The results showed that there were more significant differences in the response of different genotypes of *B. napus* L. to nitrogen under the low nitrogen treatment, with significant differentiation in nitrogen efficiency related indexes. The mean value of PFPN and AEN reached 2.75 times and 2.30 times higher than that under the high nitrogen treatment, respectively. The dual highly-efficient genotypes of *B. napus* L. with significantly higher seed yield than the average yield of all genotypes tested at corresponding nitrogen rate under the high and low nitrogen treatments were screened. PFPN and AEN were stable and excellent, maintaining high levels under the high and low nitrogen treatments (PFPN \geq 12 kg/kg, AEN \geq 5 kg/kg under the high nitrogen treatment; PFPN \geq 30 kg/kg, AEN \geq 10 kg/kg under the low nitrogen treatment). The low nitrogen-efficient genotypes achieved a PFPN of 50.61 kg/kg and an AEN of 43.92 kg/kg under the low nitrogen treatment. The high nitrogen-efficient genotypes performed prominently only under the high nitrogen treatment. Nitrogen application regulated correlations among agronomic traits, with enhanced the positive correlations between aboveground dry weight, number of siliques, and seed yield under nitrogen application. The proportion of dual highly-efficient genotypes was 28.57%, with stable accumulation of biomass. The low nitrogen-efficient genotypes adapted to the low nitrogen treatment by exhibiting high thousand-seed weight and seeds per silique. It is indicated that dual highly-efficient and low nitrogen-efficient varieties of *B. napus* L. can provide valuable germplasm for the genetic improvement of nitrogen use efficiency and the development of cultivation strategies to reduce fertilizer and improve efficiency in *B. napus* L..

Keywords *Brassica napus* L.; nitrogen use efficiency; partial factor productivity of nitrogen (PFPN); agronomic efficiency of nitrogen (AEN); agronomic traits; genotype screening; reduction of fertilizer and improvement of efficiency

(责任编辑:张志钰)