

# 甘蓝型油菜越冬期与成熟期氮效率的评价与鉴定

朱佳荣, 代文君, 李浩, 钱方, 管文杰, 薛羽君, 许鲲, 李利霞,  
周想春, 周芳林, 耿入丹, 蔡光勤, 陈碧云, 伍晓明, 闫贵欣

(中国农业科学院油料作物研究所/农业农村部油料作物生物学与遗传育种重点实验室, 武汉 430062)

**摘要:** 氮对植物的生长发育至关重要, 对油菜增施氮肥, 能够促进生物量的积累, 提高油菜籽产量和蛋白质含量, 但却降低种子含油量。油脂是油菜的目标产品, 发掘低氮肥投入且高产油量的氮高效品种对油菜生产意义重大。本研究以生物量和产油量为指标, 分别评价了甘蓝型油菜越冬期和成熟期的氮效率, 并分析不同时期性状之间的关系。对越冬期不同氮肥下各生物量指标进行变异分析、主成分分析以及隶属函数分析, 建立越冬期氮效率综合评价模型, 明确了单株干重和单株鲜重作为越冬期氮效率综合评价指标, 鉴定出高氮高效材料3份, 双低效材料7份、低氮高效材料2份、双高效材料6份。成熟期以产油量为氮效率指标鉴定出高氮高效材料4份, 双低效材料6份, 低氮高效材料3份, 双高效材料4份。结合两个时期鉴定结果, 筛选得到两个时期均高氮高效的材料芥65和中双11, 均双高效材料6024-1, 均低氮高效材料苏联油菜, 均双低效材料兴选二号、Reaina II和Gisora。相关性分析表明, 不同氮处理下油菜越冬期性状与成熟期各性状之间相关关系不显著。以上结果为理解油菜氮素利用效率及未来解析重要的调控基因提供了参考。

**关键词:** 油菜; 氮肥; 氮效率; 生物量; 产油量

## Evaluation and Identification of Nitrogen Efficiency of *Brassica napus* L. at Overwintering and Maturity Stages

ZHU Jiarong, DAI Wenjun, LI Hao, QIAN Fang, GUAN Wenjie, XUE Yujun, XU Kun, LI Lixia,  
ZHOU Xiangchun, ZHOU Fanglin, GENG Rudan, CAI Guangqin, CHEN Biyun, WU Xiaoming, YAN Guixin  
(Oil Crops Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Biology and Genetic Improvement  
of Oil Crops, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430062)

**Abstract:** Nitrogen is essential for the growth and development of plants. In rapeseed, higher nitrogen input increases the accumulation of biomass at vegetative growth stage, and results in elevation on seed yield and protein content, but decrease on oil content at maturity stage. Oil is the target product of rapeseed. Thus, it is of great significance to explore nitrogen-efficient varieties with higher oil production when reducing nitrogen application. In this study, biomass and oil yield were used as indicators to evaluate the nitrogen efficiency of overwintering and mature stages, followed by analyzing the relationship between traits in different periods. The comprehensive evaluation model of nitrogen efficiency at overwintering stage was established through the variation analysis, principal component analysis and membership function analysis of each biomass index under different nitrogen level at overwintering stage. The plant biomass and the fresh biomass were extracted as the comprehensive evaluation indices of nitrogen efficiency at overwintering stage. Three high-efficiency

收稿日期: 2024-01-31 网络出版日期: 2024-10-17

URL: <https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20240131004>

第一作者研究方向为作物种质资源, E-mail: 82101215128@caas.cn

通信作者: 闫贵欣, 研究方向为油料作物种质资源, E-mail: ygx\_928@126.com

**基金项目:** 国家自然科学基金(32072106); 国家科技资源共享服务平台项目-国家作物种质资源库(NCGRC-2023-016); 中国农业科学院科技创新工程(CAAS-ZDRW202105, CAAS-OCRI-ZDRW-202201, CAAS-ASTIP); 国家油菜产业技术体系(CARS-12)

**Foundation projects:** National Natural Science Foundation of China (32072106); National Science and Technology Resource Sharing Service Platform-National Crop Germplasm Resources Center (NCGRC-2023-016); Agricultural Science and Technology Innovation Project of the Chinese Academy of Agricultural Sciences (CAAS-ZDRW202105, CAAS-OCRI-ZDRW-202201, CAAS-ASTIP); China Agriculture Research System (CARS-12)

germplasms under high nitrogen condition, seven low-efficiency germplasms under both nitrogen conditions, two high-efficiency germplasms under low nitrogen condition and six high-efficiency germplasms under both nitrogen conditions were identified. At the mature stage, four high-efficiency germplasms under high nitrogen condition, six low-efficiency germplasms under both nitrogen conditions, three high-efficiency germplasms under low nitrogen condition and four high-efficiency germplasms under both nitrogen conditions were identified by oil yield as nitrogen efficiency index. Gained from the results of the two periods, two high-efficiency germplasms (Jie 65 and Zhongshuang 11) under high nitrogen condition in the two periods, one high-efficiency germplasm (6024-1) under both nitrogen conditions, one high-efficiency germplasm (Soviet rapeseed) under low nitrogen condition, three low-efficiency germplasms (Xingxuan 2, Reaina II and Gisora) under both nitrogen conditions were identified. No correlation was detected for the traits between overwintering and maturity stage under different nitrogen treatments. These results provide insights to understand nitrogen use efficiency and further identify the key regulatory genes in rapeseed.

**Key words:** rapeseed; nitrogen fertilizer; nitrogen efficiency; biomass; oil production

我国食用植物油自给率不足40%,产量连续多年低于消费量,进口量逐年增加<sup>[1-2]</sup>。甘蓝型油菜(*Brassica napus* L.)作为我国种植面积最大的大宗油料作物,占我国油料作物产量的50%以上<sup>[3-4]</sup>。因此,提高油菜产油量是保障我国食用油安全供给的重要措施。产油量是考察油菜生产的重要指标,种子含油量和单位面积油菜籽的产量是决定油菜产油量高低两个因子。氮是植物生长发育所必需的元素之一,我国油菜氮肥利用率偏低,而氮肥的施用量逐年增加<sup>[5-6]</sup>。增施氮肥能显著提高油菜的产量,但施用氮肥会导致含油量积累下降<sup>[7-8]</sup>。研究表明,施氮量在0~270 kg/hm<sup>2</sup>时,油菜产油量能够保持较大的增长,氮肥施用量超过270 kg/hm<sup>2</sup>后,氮肥用量每增加100 kg/hm<sup>2</sup>,含油量下降1.6个百分点,相当于产量减少4个百分点<sup>[4,5,9]</sup>。

在营养期,油菜根系吸收氮肥后通过光合作用进行氮碳同化用于生物量的积累,氮效率体现在生物量的积累。越冬期是甘蓝型油菜生长的必经阶段,施氮能够提高油菜抗性相关的酶活性,增加可溶性蛋白、可溶性糖含量,促进油菜的生长,提高油菜的越冬能力,延长油菜营养生长的持续时间,为后续生殖生长奠定物质基础<sup>[10-11]</sup>。在营养生长阶段,油菜对氮素吸收利用的关键时期为越冬期,因此,研究油菜越冬期氮效率意义重大<sup>[12]</sup>。进入成熟期后,源叶中积累的营养物质被输送到种子中进行油脂的代谢和储存<sup>[13-14]</sup>。我国对玉米(*Zea mays* L.)、水稻(*Oryza sativa* L.)等粮食作物品种的要求是既能提高单位面积产量又能降低氮肥投入(即“高产氮高效”品种)<sup>[15-16]</sup>。在玉米中,以产量为指标根据不同氮水平下的氮效率将玉米品种划分为4种类型:双高效型(在高氮和低氮下氮效率均为高

效)、低氮高效型(在低氮下氮效率高,在高氮下相反)、高氮高效型(在高氮下氮效率高,在低氮下相反)、双低效型(在高氮和低氮下氮效率均为低效)<sup>[17]</sup>。由于油菜的目标产品是油脂,因此,油菜最终的氮效率体现在油脂产量上,发掘既能提高油菜产油量同时又能降低氮肥投入的“高产油量氮高效”品种对油菜生产意义重大。

目前,国内开展了一系列甘蓝型油菜氮效率的评价鉴定工作。邹小云等<sup>[18]</sup>对75份甘蓝型油菜苗期氮效率进行鉴定评价,以单株地上干重作为指标鉴定苗期氮素吸收和利用效率。顾焯明等<sup>[19]</sup>建立了以生物量为评价指标的油菜苗期氮效率评价体系,通过全株干鲜重等指标分析鉴定出双高效型材料23份。秦璐等<sup>[20]</sup>在油菜盛花期设置不同氮水平,对73份种质资源的单株鲜重、干重、氮积累量和氮吸收效率指标进行综合分析筛选出25份耐低氮型油菜种质。张浩等<sup>[6]</sup>根据成熟期油菜产量将甘蓝型油菜划分为4种类型:低氮高效型、双高效型、双低效型和高氮高效型,筛选出2份低氮高效型种质,4份双高效型种质,5份双低效型种质和1份高氮高效型种质。当前对甘蓝型油菜氮效率的评价鉴定都是在苗期、盛花期或成熟期进行,同时进行不同时期氮效率的鉴定并不多见。另外,前人的研究均表明营养期可通过生物量为指标鉴定氮效率,但是不同的文献所选用的具体生物量指标(干重、鲜重)和植株部位(全株、地上或地下)均不同。对油菜成熟期的氮效率鉴定多是参考玉米、水稻等禾本科作物选取产量作为指标,以产油量为指标的鉴定尚未见报道。因此,本研究开展了油菜越冬期和成熟期氮效率

评价鉴定工作,并通过综合分析选出越冬期氮效率指标,成熟期以产油量为氮效率指标,共同筛选高产油量氮高效油菜品种,以期为研究油菜氮素高效的机制并明确其重要调控基因提供材料和理论基础。

表1 供试油菜种质及编号

Table 1 Germplasm and number of tested rapeseed

编号 Number	名称 Name	种质来源 Germplasm sources	种质类型 Germplasm types	编号 Number	名称 Name	种质来源 Germplasm sources	种质类型 Germplasm types
1	G142	中国浙江	推广品种	10	川油92-005	中国四川	种质资源
2	Bridger	德国	种质资源	11	Reaina II	瑞典	种质资源
3	6024-1	中国湖南	种质资源	12	24729-1	中国湖北	种质资源
4	73N22-1	澳大利亚	种质资源	13	Gisora	德国	种质资源
5	Aao	法国	种质资源	14	漕油2号	中国上海	推广品种
6	芥65	中国浙江	推广品种	15	苏联油菜	苏联	种质资源
7	兴选二号	中国安徽	种质资源	16	中双9号	中国湖北	推广品种
8	D19-5	中国安徽	种质资源	17	中双11	中国湖北	推广品种
9	88-2	中国四川	种质资源	18	华双3号	中国湖北	推广品种

## 1.2 盆栽试验

于2022年10月在湖北省武汉市中国农业科学院油料作物研究所武昌区试验基地开展供试材料的盆栽试验。盆栽所用土壤为黄棕壤与河沙(黄棕壤:河沙=2:1)的混合土,土壤碱解氮含量为32.38 mg/kg,有机质含量为9.23 g/kg,全氮含量0.39 g/kg,速效磷含量8.58 mg/kg,速效钾含量为77.80 mg/kg,土壤pH为8.0。

盆栽试验设置低氮(施氮0.1 g/kg)和高氮(施氮0.3 g/kg)两个氮水平<sup>[21]</sup>,每盆装沙土8 kg,氮肥与沙土混匀后一次性施入。为防止养分与水分流失,将盆底铺塑料薄膜。18份甘蓝型油菜种质资源编号1~18,每份材料设置2个氮处理,每个氮处理设置3个重复,每个重复种1盆,每盆播种15粒油菜籽,共108盆。越冬期每盆取1株油菜并间苗,最终每盆定植2株。2022年10月10日将材料均匀的点播于盆中,盆栽试验在干旱棚中进行,试验采用完全随机区组排列。氮肥的种类为尿素(化学式:CH<sub>4</sub>N<sub>2</sub>O);其他肥料用量:KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 0.38 g/kg, KCl 0.26 g/kg, H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> 5.75 mg/kg。Zn肥、Fe肥通过施入缺氮型霍格兰溶液进行补充。氮肥盆栽试验采用重量法灌水,保持60%~75%的土壤含水量<sup>[21]</sup>。

## 1 材料与方

### 1.1 供试材料

供试材料为油料作物种质资源中期库(武汉)提供的18份甘蓝型油菜多样性种质资源,其中6份为国外资源(表1)。

### 1.3 指标测定

待植株生长至越冬期时,从每份材料的每个重复各取1株,分别测定地上鲜重和地下鲜重。将鲜重测量完成以后的地上、地下等植物组织迅速用105℃杀青30分钟,65℃干燥3天后测定地上干重和地下干重。

于成熟期将收获的种子自然晾干,测量每个处理、每个重复的2株材料的产量和含油量,计算出产油量。油菜籽的含油量通过Foss NIR Systems 5000近红外分析仪分析测定。

单株鲜重=单株地上鲜重+单株地下鲜重;单株干重=单株地上干重+单株地下干重;根冠比=单株地下干重/单株地上干重;产油量=油菜籽产量×籽粒含油量<sup>[21]</sup>。

### 1.4 数据分析

试验数据采用Excel 2019、SPSS 20进行整理和统计分析,用R 4.1.1进行作图。

本研究用于分析的生物学指标包括单株干重、单株鲜重、地上干重、地上鲜重、地下干重、地下鲜重和根冠比这7个性状。越冬期氮效率鉴定方法参考秦璐等<sup>[20]</sup>对油菜盛花期氮效率的评价方法。

生物学指标的隶属函数值:  $Y_{ij} = (X_{ij} - X_{ij, \min}) / (X_{ij, \max} - X_{ij, \min})$  (1)

$$\text{权重系数: } W_i = P_i / \sum P_i \quad (2)$$

$$\text{氮效率综合评价: } D_i = D_i \sum (Y_{ij} \times W_j) \quad (3)$$

式(1)中:  $X_{ij}$  表示第  $j$  个种质经主成分分析所得到的第  $i$  个生物量指标在氮处理中的测定值;  $X_{ij, \max}$  和  $X_{ij, \min}$  分别表示所有参试种质各生物量指标测定值的最大值和最小值;  $Y_{ij}$  代表第  $j$  个品种第  $i$  个生物量指标的氮效率隶属函数值。式(2)中:  $W_i$  表示第  $i$  个指标在所有生物量指标中的权重;  $P_i$  为油菜种质第  $i$  个生物量指标的贡献率。式(3)中:  $D_i$  值为第  $i$  个油菜品种在不同氮水平下的综合评价值,  $D_i$  值越大代表氮效率越高。

油菜越冬期以生物量作为指标评价油菜氮效率<sup>[18-20, 22-23]</sup>。根据供试油菜在低氮和高氮下各生物量指标的  $D_i$  值将越冬期的氮效率划分为4种类型:(1)双高效型:在低氮和高氮水平下的  $D_i$  值均高于相应条件下的平均值;(2)低氮高效型:低氮水平下的  $D_i$  值高于平均值,而高氮水平下相反;(3)双低效型:  $D_i$  值无论在低氮或高氮水平下均低于平均值;(4)高氮高效型:  $D_i$  值在高氮水平下高于平均值,而在低氮水平下相反<sup>[24]</sup>。

成熟期分别以产量或产油量作为指标评价油菜氮效率,划分为4种类型:(1)双高效型:在低氮和高氮水平下的产量或产油量均高于相应条件下的平均值;(2)低氮高效型:低氮水平下的产量或产油量高于平均值,而高氮水平下低于平均值;(3)双低效型:产油或产油量在低氮和高氮水平下均低于平均值;(4)高氮高效型:产量或产油量在高氮水平下高于平均值,而在低氮水平下相反<sup>[6]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 甘蓝型油菜越冬期氮效率的鉴定与评价

不同油菜种质不同氮处理后,越冬期各个生物量指标出现不同程度的变化(表2)。高氮下油菜越冬期地上鲜重、地上干重、单株鲜重和单株干重均显著高于低氮处理,而根冠比显著低于低氮处理。在低氮下,油菜越冬期不同生物量指标的变异系数相差较大,表现出了明显的遗传变异,其中单株鲜重、单株干重、地下鲜重和地下干重的变异系数相对较高,分别是37%、39%、54%和58%。在高氮下不同生物量指标的变异范围在23%~39%之间,单株鲜重、单株干重、地上鲜重和地上干重的变异系数相对较高,分别是37%、39%、37%和39%。低氮和高氮下变异系数较高的越冬期生物量指标中均有单株干重和单株鲜重,表明单株干重和单株鲜重

这两个指标对氮肥的响应更明显。其中,G142(编号1)和芥65(编号6)两个材料在不同氮水平下单株鲜重和单株干重的差异达到显著水平,Aao(编号5)在高氮下地上鲜重、单株鲜重和单株干重的增长率较大,G142在高氮下所有指标均降低。不同供氮水平下7个测定指标的相关性分析发现(表3),在低氮下,单株鲜重与地上鲜重的相关性较高,根冠比与地上鲜重的相关性最低;在高氮下,单株鲜重与地上鲜重、单株干重与地上干重的相关性最高,相关系数均为1,而根冠比与地下生物量相关关系显著,与地上生物量和单株生物量之间的相关关系不显著。两个供氮水平下油菜越冬期各生物量指标间的相关性基本保持一致。因此,不能直接利用这些生物量指标准确的评价各油菜越冬期的氮效率,需要进一步分析来综合评价油菜越冬期的氮效率。

对不同氮处理下油菜越冬期的生物量指标进行主成分分析(表4)。在低氮处理下前2个主成分的贡献率分别是80.09%和15.92%,累计贡献率为96.01%;第1主成分的贡献率>80%,可以代替7个生物量指标的绝大部分信息,综合表征油菜越冬期氮效率的特性。低氮下第1主成分中单株干重、地下鲜重、地上干重和单株鲜重这4个生物量指标的荷载系数的绝对值较高,对第1主成分产生负向影响。在高氮处理下前2个主成分的贡献率分别是80.21%和16.41%,累计贡献率为96.61%。高氮处理下第1主成分中的地下鲜重、单株干重、单株鲜重和地上干重这4个生物量指标的荷载系数较高。结合低氮与高氮下各生物量指标的主成分的贡献率情况,发现单株干重、单株鲜重、地上干重和地下鲜重对评价油菜越冬期氮效率的影响较大。根据油菜越冬期各生物量指标的变异特征及主成分分析结果,认为单株干重和单株鲜重可作为油菜越冬期氮效率的综合评价指标。通过对单株干重和单株鲜重进行隶属函数分析,得到不同油菜种质越冬期氮效率综合值  $D$  值(表5)。结果显示,在低氮下油菜越冬期氮效率综合值平均为0.44,而高氮下平均值为0.38。以不同氮水平下的氮效率综合值对越冬期油菜氮效率进行划分(图1),发现越冬期高氮高效材料有3份,分别是Aao、芥65和中双11;双高效材料有6份,分别是6024-1、D19-5、88-2、川油92-005、中双9号和华双3号;双低效材料有7份,分别是Bridger、73N22-1、兴选2号、Reaina II、24729-1、Gisora和漕油2号;低氮高效材料有2份,分别是G142和苏联油菜。

表2 参试油菜种质资源不同氮处理下越冬期各项指标差异

Table 2 Differences of indices at overwintering stage of the rapeseed varieties under different nitrogen levels

编号 Number	地上鲜重(g) Shoot fresh biomass				地下鲜重(g) Root fresh biomass				单株鲜重(g) Fresh biomass				地上干重(g) Shoot biomass				地下干重(g) Root biomass				单株干重(g) Plant biomass				根冠比 Root-shoot ratio			
	高氮 HN		低氮 LN		高氮 HN		低氮 LN		高氮 HN		低氮 LN		高氮 HN		低氮 LN		高氮 HN		低氮 LN		高氮 HN		低氮 LN		高氮 HN		低氮 LN	
	LN	HN	P-value		LN	HN	P-value		LN	HN	P-value		LN	HN	P-value		LN	HN	P-value		LN	HN	P-value		LN	HN	P-value	
1	19.62	11.41	0.05	3.61	0.85	0.11	23.22	12.26	0.05	2.78	1.29	0.02	0.83	0.16	0.08	3.61	1.45	0.03	0.29	0.13	0.10							
2	11.60	29.64	0.18	1.29	1.55	0.80	12.88	31.18	0.21	1.81	1.73	0.94	0.32	0.33	0.96	2.13	2.06	0.96	0.17	0.20	0.67							
3	17.18	28.03	0.22	0.89	1.62	0.09	18.06	29.65	0.21	1.90	3.13	0.25	0.15	0.28	0.09	2.04	3.41	0.24	0.11	0.09	0.64							
4	7.54	17.29	0.30	0.48	1.02	0.46	8.02	18.31	0.31	0.90	2.28	0.35	0.09	0.23	0.43	0.99	2.51	0.35	0.12	0.09	0.41							
5	5.21	19.65	0.20	0.45	1.61	0.37	5.66	21.26	0.22	0.74	3.31	0.15	0.11	0.40	0.42	0.85	3.72	0.18	0.17	0.09	0.40							
6	12.67	44.60	0.00	1.10	2.87	0.00	13.77	47.47	0.00	1.34	5.28	0.00	0.20	0.56	0.00	1.54	5.84	0.00	0.15	0.11	0.07							
7	10.28	22.35	0.27	1.56	1.46	0.87	11.84	23.81	0.30	1.05	2.31	0.27	0.33	0.26	0.49	1.39	2.57	0.34	0.35	0.12	0.04							
8	17.53	44.31	0.04	2.40	3.06	0.63	19.92	47.37	0.05	2.14	5.15	0.10	0.62	0.56	0.90	2.76	5.72	0.16	0.24	0.11	0.24							
9	23.49	28.07	0.59	2.11	1.90	0.82	25.60	29.97	0.64	2.61	2.85	0.82	0.42	0.30	0.51	3.03	3.15	0.92	0.15	0.10	0.04							
10	19.73	29.96	0.40	1.76	2.00	0.73	21.48	31.96	0.41	2.02	3.04	0.37	0.42	0.44	0.88	2.44	3.48	0.42	0.22	0.14	0.19							
11	12.18	20.01	0.08	1.22	1.08	0.78	13.40	21.09	0.11	0.92	1.96	0.18	0.25	0.21	0.76	1.17	2.17	0.25	0.28	0.10	0.00							
12	13.74	13.08	0.82	1.11	1.04	0.78	14.85	14.11	0.81	1.45	1.36	0.71	0.21	0.17	0.43	1.66	1.53	0.64	0.15	0.13	0.57							
13	8.33	19.06	0.30	0.68	1.68	0.20	9.00	20.74	0.29	1.00	2.53	0.26	0.12	0.33	0.10	1.12	2.87	0.24	0.13	0.15	0.65							
14	12.47	13.62	0.86	1.12	1.07	0.95	13.60	14.69	0.88	1.34	1.52	0.85	0.22	0.22	0.97	1.56	1.75	0.87	0.15	0.11	0.51							
15	20.05	19.61	0.92	2.16	1.55	0.03	22.21	21.15	0.80	2.13	2.40	0.52	0.40	0.26	0.03	2.52	2.65	0.76	0.19	0.11	0.03							
16	26.09	29.43	0.40	3.30	2.14	0.02	29.40	31.57	0.60	2.61	2.88	0.50	0.66	0.41	0.01	3.27	3.30	0.94	0.25	0.15	0.01							
17	14.47	26.40	0.10	1.52	1.99	0.49	15.99	28.39	0.11	1.74	2.79	0.25	0.35	0.40	0.79	2.09	3.18	0.31	0.18	0.15	0.26							
18	14.57	24.18	0.03	2.20	1.85	0.65	16.77	26.02	0.05	1.89	2.94	0.01	0.53	0.36	0.40	2.42	3.30	0.10	0.27	0.12	0.10							
均值 Mean	14.82aA	24.48bB		1.61aA	1.69aA		16.43aA	26.17bB		1.69aA	2.71bB		0.35aA	0.33aA		2.03aA	3.04bB		0.20aA	0.12bB								
变异系数(%) CV	36	37		54	35		37	37		36	39		58	35		39	39		33	23								

小写字母表示油菜越冬期不同氮水平在0.05水平差异显著,大写字母表示不同氮水平在0.01水平差异显著;分别对各种质在低氮和高氮下的数据进行T检验,  $P \leq 0.05$  表示不同处理间差异达到显著水平  
The lowercase letter indicates that significant difference between different nitrogen treatments at 0.05 level, and the uppercase letter indicates that significant difference between different nitrogen treatments at 0.01 level; T test was performed on the data of each quality under LN (low nitrogen) and HN (high nitrogen), and the  $P \leq 0.05$  indicated that the difference between different treatments reached a significant level; LN: Low nitrogen; HN: High nitrogen; The same as below

表3 不同氮处理下甘蓝型油菜越冬期各项生物量指标相关性分析

Table 3 Correlation analysis of biomass indices at overwintering stage of rapeseed under different nitrogen levels

氮处理水平 Nitrogen levels	指标 Indices	地上鲜重 Shoot fresh biomass	地下鲜重 Root fresh biomass	单株鲜重 Fresh biomass	地上干重 Shoot biomass	地下干重 Root biomass	单株干重 Plant biomass	根冠比 Root-shoot ratio
低氮 LN	地上鲜重	1						
	地下鲜重	0.72***	1					
	单株鲜重	0.99***	0.79***	1				
	地上干重	0.90***	0.79***	0.92***	1			
	地下干重	0.63***	0.96***	0.70***	0.76***	1		
	单株干重	0.88***	0.87***	0.91***	0.99***	0.86***	1	
	根冠比	0.087	0.59***	0.16	0.14	0.65***	0.28*	1
高氮 HN	地上鲜重	1						
	地下鲜重	0.90***	1					
	单株鲜重	1***	0.92***	1				
	地上干重	0.90***	0.89***	0.90***	1			
	地下干重	0.84***	0.96***	0.85***	0.85***	1		
	单株干重	0.91***	0.92***	0.91***	1***	0.88***	1	
	根冠比	0.16	0.33*	0.17	-0.02	0.43**	0.035	1

\*、\*\*、\*\*\*分别表示油菜各生物量指标间在5%、1%、0.1%水平相关性显著;下同

\*, \*\*, \*\*\*indicate significant correlation between the biomass of rapeseed in the overwintering period at the 5%, 1%, 0.1% level, respectively; The same as below

表4 油菜越冬期各指标载荷系数及累计贡献率

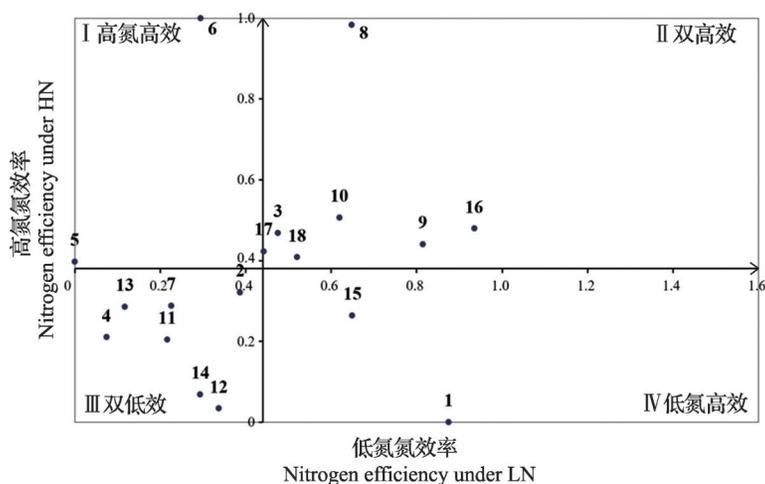
Table 4 Coefficient and cumulative contribution rate of indices at overwintering stage of rapeseed

指标 Indices	低氮 LN		高氮 HN	
	主成分1 Principal component 1	主成分2 Principal component 2	主成分1 Principal component 1	主成分2 Principal component 2
	地上鲜重 Shoot fresh biomass	-0.919	0.297	0.963
地下鲜重 Root fresh biomass	-0.964	-0.211	0.980	-0.093
单株鲜重 Fresh biomass	-0.947	0.233	0.967	-0.125
地上干重 Shoot biomass	-0.950	0.264	0.965	0.237
地下干重 Root biomass	-0.932	-0.290	0.956	-0.132
单株干重 Plant biomass	-0.978	0.128	0.972	0.203
根冠比 Root-shoot ratio	-0.455	-0.870	-0.035	-0.996
特征值 Numerical value	5.607	1.114	5.615	1.148
贡献率(%) Contribution rate	80.09	15.92	80.21	16.41
累计贡献率(%) Cumulative contribution rate	80.09	96.01	80.21	96.61

表5 不同氮肥水平下甘蓝型油菜越冬期氮效率综合评价

Table 5 Comprehensive evaluation of nitrogen efficiency at overwintering stage of rapeseed under different nitrogen levels

编号 Number	低氮LN		高氮HN	
	D值 D-value	排名 Rank	D值 D-value	排名 Rank
1	0.88	2	0	18
2	0.39	10	0.32	10
3	0.48	8	0.47	5
4	0.07	17	0.21	14
5	0	18	0.40	9
6	0.29	13	1	1
7	0.23	14	0.29	11
8	0.65	5	0.98	2
9	0.81	3	0.44	6
10	0.62	6	0.51	3
11	0.22	15	0.20	15
12	0.34	11	0.03	17
13	0.12	16	0.29	12
14	0.29	12	0.07	16
15	0.65	4	0.26	13
16	0.93	1	0.48	4
17	0.44	9	0.42	7
18	0.52	7	0.41	8
氮效率平均值 Average of nitrogen efficiency	0.44		0.38	



数字表示落在各象限内的材料编号,同表1;以低氮和高氮水平下氮效率的平均值进行分割,分为4个区域,对应4种氮效率类型;下同  
Numbers represent germplasm numbers corresponding to each respective quadrant as shown in table 1; The outcomes were partitioned into four regions, corresponding to four types of nitrogen efficiency; The same as below

图1 油菜越冬期不同氮效率类型划分

Fig. 1 Classification of different nitrogen efficiency types at overwintering stage of rapeseed

## 2.2 甘蓝型油菜成熟期氮效率的鉴定与评价

油菜前期生物量的积累是籽粒高产的基础,但不同时期的氮效率表现可能有差异,因此,对供试材料进一步进行成熟期氮效率鉴定。油菜成熟后,测定不同材料的每盆产量和含油量,计算产油量,18份材料成熟期实际测得17份数据,Bridger(编号2)未收到种子。在高氮下参试油菜种质产量、产油量大部分明显提高,但含油量大部分表现为下降趋势

(表6)。低氮下,参试种质的平均产量为5.10 g,变异系数30%;平均含油量35.72%,变异系数10%;平均产油量为1.84 g,变异系数32%。高氮下,参试油菜种质的平均产量9.52 g,变异系数35%;平均含油量34.05%,变异系数6%;平均产油量为3.32 g,变异系数为39%。高氮下的参试种质的平均产量和产油量分别是低氮下的1.9和1.8倍。

表6 不同氮肥水平下甘蓝型油菜种质成熟期产量、含油量及产油量差异

Table 6 Differences in yield, oil content and oil yield of rapeseed at maturity stage under different nitrogen levels

编号 Number	产量(g)Yield				含油量(g/100g)Oil content				产油量(g)Oil yield			
	低氮 LN	高氮 HN	增长率(%) Growth rate	排名 Rank	低氮 LN	高氮 HN	增长率(%) Growth rate	排名 Rank	低氮 LN	高氮 HN	增长率(%) Growth rate	排名 Rank
1	3.53	13.77	290.08	2	42.41	38.30	-9.69	14	1.54	5.29	243.51	2
3	6.32	15.02	137.66	5	39.84	36.86	-7.48	13	2.52	5.58	121.43	6
4	7.38	10.89	47.56	11	34.44	33.95	-1.42	4	2.56	3.69	44.14	11
5	6.79	10.25	50.96	10	35.12	33.42	-4.84	7	2.39	3.51	46.86	10
6	4.48	10.12	125.89	6	37.12	36.49	-1.70	5	1.67	3.75	124.55	5
7	4.18	7.15	71.05	8	33.91	31.84	-6.10	9	1.45	2.30	58.62	9
8	5.69	8.33	46.40	12	36.59	34.20	-6.53	11	2.08	2.90	39.42	13
9	5.22	4.19	-19.73	16	30.11	29.49	-2.06	6	1.60	1.22	-23.75	17
10	3.35	5.66	68.96	9	38.53	35.94	-6.72	12	1.29	2.05	58.91	8
11	4.15	4.04	-2.65	17	33.66	31.96	-5.05	8	1.40	1.29	-7.86	16
12	5.67	7.97	40.56	14	38.65	34.82	-9.91	15	2.19	2.76	26.03	14
13	2.95	7.89	167.46	4	29.03	31.58	8.78	2	0.86	2.47	187.21	3
14	7.73	11.09	43.47	13	36.82	34.51	-6.27	10	2.85	3.99	40.00	12
15	7.55	9.23	22.25	15	36.31	32.49	-10.52	16	2.76	2.99	8.33	15
16	4.57	8.87	94.09	7	32.62	32.73	0.34	3	1.51	2.91	92.72	7
17	4.14	11.41	175.60	3	40.75	35.78	-12.20	17	1.71	4.11	140.35	4
18	3.08	16.05	421.10	1	31.30	34.48	10.16	1	0.98	5.55	466.33	1
平均值 Average	5.10	9.52	104.75		35.72	34.05	-4.19		1.84	3.32	98.05	
标准差SD	1.55	3.3	108.12		3.62	2.17	6.00		0.59	1.28	114.41	
变异系数(%) CV	30	35	103		10	6	-143		32	39	117	

18份材料成熟期实际测得17份数据,Bridger(编号2)成熟期未收到种子

During the mature phase of 18 germplasms, 17 data were actually measured, Bridger (No. 2) no seeds were obtained at maturity

成熟期分别以产量和产油量指标划分17份材料的氮效率,发现本研究材料以产量和产油量划分的氮效率基本一致(表7)。由于增施氮肥后油菜产量提高,而含油量呈下降趋势,因此,不同氮肥水平下各材料产量、含油量和产油量排名有明显差异(表6)。虽然文献报道以产量指标评价油菜成熟期氮效率<sup>[6]</sup>,但油菜生产的目标是获得油脂,产油量是产量和含油量的综合体现,因此,本研究认为以产油量作为指标评价成熟期氮效率更准确。以产油量为成熟期氮效率

指标鉴定出高氮高效材料4份,分别是中双11、华双3号、G142和芥65;双低效材料6份,分别是川油92-005、Reaina II、Gisora、兴选二号、中双9号和88-2;低氮高效材料3份,分别是24729-1、苏联油菜和D19-5;双高效材料4份,分别是漕油2号、6024-1、Aao和73N22-1(图2)。对不同氮效率材料的成熟期性状分析发现,高氮高效材料的产量、产油量增长率均高于低氮高效材料,高氮高效、双低效及低氮高效材料均表现为产量的增长率高于产油量的增长率(表6)。

表7 甘蓝型油菜越冬期与成熟期氮效率划分

Table 7 Classification of nitrogen efficiency at overwintering and mature stage of rapeseed

编号 Number	越冬期氮效率 Nitrogen efficiency in overwintering period		成熟期产量氮效率 Yield nitrogen efficiency in maturity period		成熟期产油量氮效率 Oil yield nitrogen efficiency in maturity period	
	低氮 LN	高氮 HN	低氮 LN	高氮 HN	低氮 LN	高氮 HN
	高效	低效	低效	高效	低效	高效
1	高效	低效	低效	高效	低效	高效
2	低效	低效	/	/	/	/
3	高效	高效	高效	高效	高效	高效
4	低效	低效	高效	高效	高效	高效
5	低效	高效	高效	高效	高效	高效
6	低效	高效	低效	高效	低效	高效
7	低效	低效	低效	低效	低效	低效
8	高效	高效	高效	低效	高效	低效
9	高效	高效	高效	低效	低效	低效
10	高效	高效	低效	低效	低效	低效
11	低效	低效	低效	低效	低效	低效
12	低效	低效	高效	低效	高效	低效
13	低效	低效	低效	低效	低效	低效
14	低效	低效	高效	高效	高效	高效
15	高效	低效	高效	低效	高效	低效
16	高效	高效	低效	低效	低效	低效
17	低效	高效	低效	高效	低效	高效
18	高效	高效	低效	高效	低效	高效

/表明未测得数值

/ indicates that no values were recorded

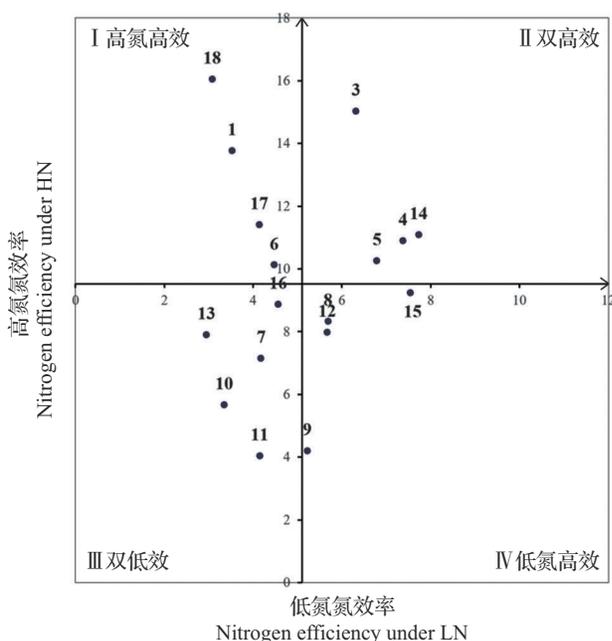


图2 油菜成熟期不同氮效率类型划分

Fig.2 Classification of different nitrogen efficiency types at rapeseed maturity stage

### 2.3 甘蓝型油菜越冬期与成熟期氮效率联合分析

多数材料越冬期和成熟期的氮效率不同,结合越冬期和成熟期氮效率鉴定结果,筛选出两个时期均表现高氮高效的材料2份:芥65和中双11;双高效材料1份:6024-1;双低效材料3份:兴选二号、Reaina II和Gisora;低氮高效材料1份:苏联油菜(表7)。除了高氮高效的两份材料是推广品种外,所筛选的其他材料均为传统种质资源,说明可以进一步从传统种质中挖掘低氮高效优异种质资源。

增施氮肥增加油菜的生物量,提高油菜籽的产油量,但是不同时期的性状之间未必有联系。从相关性分析(图3)中可以看出,油菜越冬期与成熟期测定的各性状之间的相关关系基本一致,低氮下油菜越冬期生物量(地上鲜重、地下鲜重、单株鲜重、地上干重、地下干重、单株干重和根冠比)与成熟期性状(含油量、产量和产油量)之间的相关关系不显著,高氮下油菜越冬期地下干重与成熟期产量、含油量、产油量均显著正相关。另外,在低氮下含油量与产量相关关系未达到显著水平,而在高氮下达到了极显著水平。

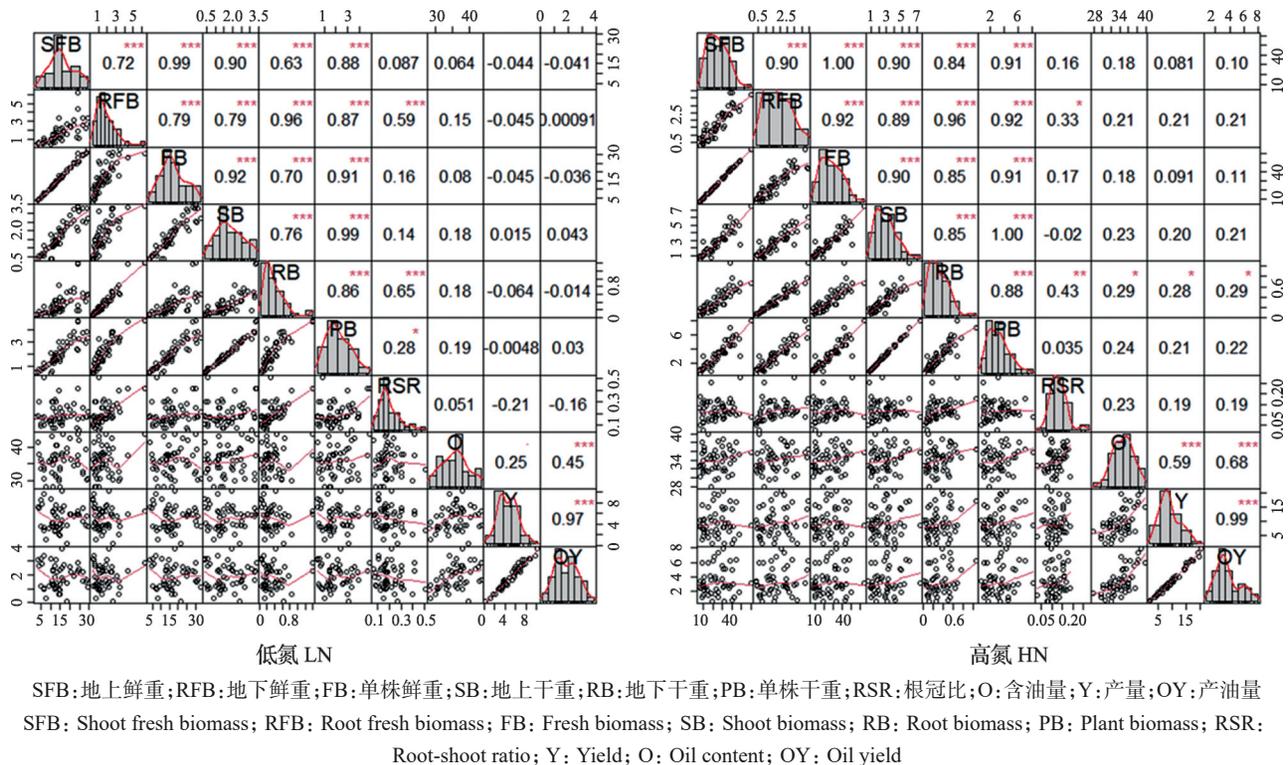


图3 甘蓝型油菜越冬期与成熟期氮效率指标相关性分析

Fig.3 Correlation analysis of nitrogen efficiency indices between overwintering period and mature period of rapeseed

### 3 讨论

氮肥影响油菜生长发育和形态建成。在高氮下,油菜的叶面积指数、可溶性糖含量、叶绿素含量、光合性能均提高,进而干物质积累量增加;在低氮下,植株体内的有机物质会选择优先分配给根系,刺激侧根的生长,增加地下生物量<sup>[25-26]</sup>。本研究结果表明,越冬期大部分油菜地下生物量在低氮下更高,但地上生物量则相反。Remans等<sup>[27]</sup>将萌发期的拟南芥种子从高浓度硝酸盐溶液中转移到低浓度硝酸盐溶液中,发现转移到低浓度中的拟南芥侧根明显增多,根梢生物量之比增加,这与本研究结果一致。前人对油菜苗期氮效率筛选鉴定后发现以生物量作为指标评价油菜氮效率结果较为可靠<sup>[18-20]</sup>,但不同的文献所选用的生物量指标不同。本研究通过对油菜越冬期单株干重、单株鲜重、地上干重、地上鲜重、地下干重、地下鲜重及根冠比这7个生物量指标进行主成分分析,并结合这7个生物量指标的变异特征分析,选取了单株干重和单株鲜重两个影响最大的性状,代表生物量作为越冬期供试油菜氮效率的综合指标,初筛共划分出越冬期高氮高效材料3份,双低效材料7份,低氮高效材料2份,双高效材料6份。

油菜进入生殖生长后,供氮可以使角果发育过

程中营养物质供应充足,氮对油菜生物量的影响最终会转化为氮对油菜油脂产量的影响。宋毅等<sup>[31]</sup>认为油脂产量随施氮量增加而增加,含油量随施氮量增加而降低,但施氮降低的油菜籽含油量,能够通过提高的产量部分弥补,使最终的产油量提高。赵继献等<sup>[28]</sup>、吴永成等<sup>[29]</sup>研究表明,在一定范围内增施氮肥可增加油菜籽产量和产油量。本研究发现不同氮水平下成熟期产量与产油量均高度正相关,且产量与产油量划分的氮效率类型基本一致,但是各种质的氮效率排名有所差别。油菜的目标产物是油脂,相比产量,用产油量代表油菜成熟期的氮效率更科学。根据产油量鉴定出高氮高效材料4份,双低效材料6份,低氮高效材料3份,双高效材料4份。结合越冬期和成熟期氮效率鉴定结果,筛选出两个时期均表现高氮高效的材料2份,双高效材料1份,双低效材料3份,低氮高效材料1份。其中,高氮高效材料中双11和芥65均为推广品种,表明这些推广品种对氮肥的依赖性较高,增施氮肥后产量和产油量均大幅提升。低氮高效材料苏联油菜是来自国外的传统种质资源,耐低氮能力较强,对增施氮肥反应不敏感,在高氮水平下产油量不高,但在低肥力地区可以取得较高的经济效益。而双高效材料6024-1,是来自湖南的传统资源,无论在低氮环境还是高氮环境均能获得较高的产油量。

本研究表明部分传统种质资源有不同类型的氮高效基因,将这些传统种质的优良基因导入推广品种中,育成低氮高产油量的优良品种是保障我国油料供给安全的重要举措。

油菜营养期干物质积累是其高产的基础,能够反应植物光合产物的积累性能。王改丽<sup>[30]</sup>发现不同氮处理下甘蓝型油菜苗期地上干重与成熟期籽粒产量呈高度线性正相关,苗期生物量越大,成熟期油菜籽的产量越高。本研究对越冬期生物量指标和成熟期各项指标的相关性分析发现,不同氮处理下油菜越冬期各性状与成熟期性状相关关系趋于一致,但相关性不显著。前人研究发现不同品种在不同氮肥环境下,从营养生长期到成熟期对氮肥的吸收、转化效率不同,从植株生物量积累转化到籽粒对氮肥营养的利用效率也不同<sup>[21, 24, 31]</sup>。本研究中,不同材料在不同时期对氮肥的吸收、转化效率不同,可能导致部分材料在不同时期的氮效率不一致,越冬期处于低效率的材料在成熟期处于高效,而越冬期高效材料则相反。秦璐等<sup>[20]</sup>对盛花期油菜氮效率综合评价发现漕油2号属于双高效材料,本研究中发现漕油2号在越冬期属于双低效,而成熟期则变成双高效材料。此外,氮与水分、土壤及温度等因素之间的相互作用及不同的种植条件很可能会导致筛选结果有差别。张浩等<sup>[6]</sup>以产量为成熟期氮效率指标,发现中双11、华双3号均为双高效材料,而在本研究中,中双11和华双3号在成熟期均为高氮高效材料。曹兰芹等<sup>[21]</sup>发现不同氮素水平下Bridger的氮肥吸收效率最高,认为Bridger属于双高效材料,而本研究以生物量为氮效率的量化指标,发现其在越冬期属于双低效材料。因此,单从某一时期鉴定可能并不完全代表该品种整个生长过程的氮效率。从实际生产应用的角度,直接鉴定成熟期的氮效率更精准;从挖掘氮高效基因改良作物的角度,则需要同时鉴定营养期与成熟期氮高效优异基因资源,进行全生育期的氮高效优异基因的进一步聚合。

## 4 结论

本研究通过对18份甘蓝油菜核心种质越冬期和成熟期筛选鉴定,发掘出两个时期均高氮高效材料2份,双高效材料1份,双低效材料3份,低氮高效材料1份。通过对越冬期与成熟期氮效率指标进行相关性分析,发现油菜越冬期测定的各性状(地上鲜重、地下鲜重、单株鲜重、地上干重、地下干重、单

株干重和根冠比)与成熟期测定的各性状(含油量、产量和产油量)的相关关系不显著。以上结果为后续研究油菜不同时期氮素高效关键调控基因和分子机制提供材料和理论基础。

## 参考文献

- [1] 张洋,严茂林,葛玮玮,陈畅,张志丹,田恬,吴成亮.我国食用植物油供给现状分析及未来发展战略研究.中国油脂, 2022, 47(4): 1003-7969  
Zhang Y, Yan M L, Ge W W, Chen C, Zhang Z D, Tian T, Wu C L. Present situation of edible vegetable oil supply in China and its future development strategy. China Oils and Fats, 2022, 47(4): 1003-7969
- [2] Zhu J R, Dai W J, Chen B Y, Cai G Q, Wu X M, Yan G X. Research progress on the effect of nitrogen on rapeseed between seed yield and oil content and its regulation mechanism. International Journal of Molecular Sciences, 2023, 24(19): 14504
- [3] 宋毅,李静,谷贺贺,陆志峰,廖世鹏,李小坤,丛日环,任涛,鲁剑巍.氮肥用量对冬油菜籽粒产量和品质的影响.作物学报, 2023, 49(7): 2002-2011  
Song Y, Li J, Gu H H, Lu Z F, Liao S P, Li X K, Cong R H, Ren T, Lu J W. Effects of application of nitrogen on seed yield and quality of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.). Acta Agronomica Sinica, 2023, 49(7): 2002-2011
- [4] 王汉中,殷艳.我国油料产业形势分析与对策建议.中国油料作物学报, 2014, 36(3): 414-421  
Wang H Z, Yin Y. Analysis and strategy for oil crop industry in China. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2014, 36(3): 414-421
- [5] Hao P F, Ren Y, Lin B G, Yi K G, Huan L, Li X, Jiang L X, Hua S J. Transcriptomic analysis of the reduction in seed oil content through increased nitrogen application rate in rapeseed (*Brassica napus* L.). International Journal of Molecular Sciences, 2023, 24(22): 16220
- [6] 张浩,李双,叶祥盛,张丽梅,徐芳森,石磊,丁广大.甘蓝型油菜减氮增效潜力评价及种质资源筛选.中国油料作物学报, 2021, 43(2): 195-202  
Zhang H, Li S, Ye X S, Zhang L M, Xu F S, Shi L, Ding G D. Evaluation on potential of reducing nitrogen and increasing efficiency for *Brassica napus* germplasm. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2021, 43(2): 195-202
- [7] Rathke G W, Christen O, Diepenbrock W. Effects of nitrogen source and rate on productivity and quality of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) grown in different crop rotations. Field Crops Research, 2005, 94(2): 103-113
- [8] Stahl A, Vollrath P, Samans B, Frisch M, Wittkop B, Snowdon R J. Effect of breeding on nitrogen use efficiency-associated traits in oilseed rape. Journal of Experimental Botany, 2019, 70: 1969-1986
- [9] 闫贵欣,陈碧云,许鲲,高桂珍,吕培军,伍晓明,李锋,李俊.

- 不同施氮水平下甘蓝型油菜发育种子中基因表达谱差异分析. 作物学报, 2012, 38(11): 2052-2060
- Yan G X, Chen B Y, Xu K, Gao G Z, Lv P J, Wu X M, Li F, Li J. Differential gene expression profiles in developing seeds of *Brassica napus* L. under different nitrogen application levels. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(11): 2052-2060
- [10] 曾军, 孙万仓, 张亚宏, 叶剑, 刘雅丽, 杨杰, 魏文惠, 郭秀娟, 康艳丽. 不同施氮方式对冬油菜生理生化指标及生长发育和产量的影响. 西北农业学报, 2008(3): 176-181
- Zeng J, Sun W C, Zhang Y H, Ye J, Liu Y L, Yang J, Wei W H, Guo X J, Kang Y L. Effects of different nitrogen fertilization patterns on physiological index, growth and yield of winter rapeseed in northwest cold and drought region. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2008(3): 176-181
- [11] 余宝. 油菜冻害卫星遥感监测与评估方法研究. 杭州: 浙江大学, 2017
- She B. Study on remote sensing monitoring and assessing oilseed rape freezing injury. Hangzhou: Zhejiang University, 2017
- [12] 金浩天. 早熟甘蓝型油菜越冬期氮素亏缺及其高效补偿的转录组和代谢组分析. 南昌: 江西农业大学, 2023
- Jin H T. Compensation effect of nitrogen deficiency in early maturity rape (*Brassica napus* L.) during overwintering and their analyses of transcriptome and metabolome. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2023
- [13] Plaxton W C. Annual plant reviews volume 22 control of primary metabolism in plants. Hoboken: Blackwell Publishing Ltd., 2006
- [14] Yu S M, Lo S F, Ho T D. Source-sink communication: Regulated by hormone, nutrient, and stress cross-signaling. *Trends in Plant Science*, 2015, 20(12): 844-857
- [15] 陈范骏, 房增国, 高强, 叶优良, 贾良良, 袁力行, 米国华, 张福锁. 中国东华北部分地区玉米主推品种高产氮高效潜力分析. 中国科学: 生命科学, 2013, 43(4): 342-350
- Chen F J, Fang Z G, Gao Q, Ye Y L, Jia L L, Yuan L X, Mi G H, Zhang F S. Evaluation of the yield and nitrogen use efficiency of the dominant maize hybrids grown in north and northeast China. *Science China: Life Sciences*, 2013, 43(4): 342-350
- [16] 黄永兰, 黎毛毛, 芦明, 万建林, 龙起樟, 王会民, 唐秀英, 范志洁. 氮高效水稻种质资源筛选及相关特性分析. 植物遗传资源学报, 2015, 16(1): 87-93
- Huang Y L, Li M M, Lu M, Wan J L, Long Q Z, Wang H M, Tang X Y, Fan Z J. Selection of rice germplasm with high nitrogen utilization efficiency and its analysis of the related characters. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2015, 16(1): 87-93
- [17] 刘建安, 米国华, 张福锁. 不同基因型玉米氮效率差异的比较研究. 农业生物技术学报, 1999(3): 246-252
- Liu J A, Mi G H, Zhang F S. Difference in nitrogen efficiency among maize genotypes. *Journal of Agricultural Biotechnology*, 1999(3): 246-252
- [18] 邹小云, 刘宝林, 宋来强, 官春云. 甘蓝型油菜种质苗期氮素营养效率的鉴定与评价. 中国油料作物学报, 2017, 39(1): 69-77
- Zou X Y, Liu B L, Song L Q, Guan C Y. Identification and evaluation of nitrogen nutrition efficiency in rapeseed germplasm at seedling stage. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2017, 39(1): 69-77
- [19] 顾焯明, 韩配配, 胡琼, 李银水, 廖祥生, 张志华, 谢立华, 胡小加, 秦璐, 廖星. 甘蓝型油菜苗期氮效率评价. 中国油料作物学报, 2018, 40(6): 851-860
- Gu Z M, Han P P, Hu Q, Li Y S, Liao X S, Zhang Z H, Xie L H, Hu X J, Qin L, Liao X. Nitrogen efficiency evaluation in rapeseed (*Brassica napus* L.) at seedling stage. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2018, 40(6): 851-860
- [20] 秦璐, 韩配配, 常海滨, 顾焯明, 黄威, 李银水, 廖祥生, 谢立华, 廖星. 甘蓝型油菜耐低氮种质筛选及绿肥应用潜力评价. 作物学报, 2022, 48(6): 1488-1501
- Qin L, Han P P, Chang H B, Gu Z M, Huang W, Li Y S, Liao X S, Xie L H, Liao X. Screening of rapeseed germplasms with low nitrogen tolerance and the evaluation of its potential application as green manure. *Acta Agronomica Sinica*, 2022, 48(6): 1488-1501
- [21] 曹兰芹, 伍晓明, 杨睿, 田阳阳, 陈鲜妮, 陈碧云, 李亚军, 高亚军. 不同氮吸收效率品种油菜氮素营养特性的差异. 作物学报, 2012, 38(5): 887-895
- Cao L Q, Wu X M, Yang R, Tian Y Y, Chen X N, Chen B Y, Li Y J, Gao Y J. Differences of nitrogen status between different N-uptake efficiency rapeseed (*Brassica napus* L.) cultivars. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 38(5): 887-895
- [22] 洪娟. 油菜氮高效种质的筛选及其生理机制的初步研究. 武汉: 华中农业大学, 2007
- Hong J. Screening of nitrogen efficient germplasm and preliminary study on its physiological mechanism in rapeseed. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2007
- [23] 徐子先. 甘蓝型油菜氮效率评价及其差异的生理机制探究. 武汉: 中国农业科学院, 2017
- Xu Z X. Researches on nitrogen efficiency evaluation in rapeseed (*Brassica napus* L.) germplasm and its physiological mechanism. Wuhan: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2017
- [24] 张玉莹, 安蓉, 曹兰芹, 伍晓明, 陈碧云, 高亚军. 不同氮素利用效率基因型油菜氮素营养性状的差异. 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, Wu X M, Chen B Y, Gao Y J. Differences in nitrogen traits of rapeseed (*Brassica napus* L.) genotypes with different nitrogen use efficiencies using pot experiment. *Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition*, 2014, 42(5): 102-110
- [25] 周年年. 氮素对油菜产量和品质的影响及相关分析研究. 武汉: 华中农业大学, 2005
- Zhou N N. The research on the nitrogen's effect on rapeseed yield and quality and relevant analysis. Wuhan: Huazhong

- Agricultural University, 2005
- [26] Zhang H, Forde B G. An Arabidopsis MADS box gene that controls nutrient-induced changes in root architecture. *Science*, 1998, 279(5349): 407-409
- [27] Remans T, Nacry P, Pervent M, Girin T, Tillard P, Lepetit M, Gojon A. A central role for the nitrate transporter NRT2.1 in the integrated morphological and physiological responses of the root system to nitrogen limitation in Arabidopsis. *Plant Physiology*, 2006, 140(3): 909-921
- [28] 赵继献,任廷波,程国平. 氮肥不同时期施用量对优质杂交油菜产油量和蛋白质产量的影响. *山地农业生物学报*, 2011, 30(6): 471-477  
Zhao J X, Ren T B, Cheng G P. Effects of application time and quantity of nitrogen fertilizer on oil and protein yield of high quality hybrid rape cultivars. *Journal of Mountain Agriculture and Biology*, 2011, 30(6): 471-477
- [29] 吴永成,马霓,黄晓明,彭海浪,李壮,牛应泽,张春雷. 施氮量对中双11号油菜农艺性状、产量品质及氮肥利用率的影响. *四川农业大学学报*, 2014, 32(3): 260-264, 282
- Wu Y C, Ma N, Huang X M, Peng H L, Li Z, Niu Y Z, Zhang C L. Effect of nitrogen fertilizer on agronomic traits, yield, quality and nitrogen use efficiency in *Brassica napus* of "ZhongShuang 11" under different densities. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2014, 32(3): 260-264, 282
- [30] 王改丽. 新型甘蓝型油菜氮高效种质的筛选及其氮高效机制的研究. 武汉: 华中农业大学, 2014  
Wang G L. Screening of high nitrogen efficient germplasm and its mechanism in new type *Brassica napus*. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2014
- [31] 曹兰芹,伍晓明,李亚军,陈碧云,陈鲜妮,田阳阳,高亚军. 油菜氮素吸收效率的基因型差异及其与农艺性状的关系. *中国油料作物学报*, 2010, 32(2): 270-278  
Cao L Q, Wu X M, Li Y J, Chen B Y, Chen X N, Tian Y Y, Gao Y J. Relationship between genotypic differences of rapeseed (*Brassica napus* L.) nitrogen uptake efficiency and economic characteristics. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2010, 32(2): 270-278