钱银飞,邱才飞,彭春瑞,等."油-稻-稻"三熟制早熟冬油菜氮高效基因型及鉴定指标筛选[J].江西农业大学学报,2024,46(4):830-840.
QIAN Y F,QIU C F,PENG C R,et al.Selection of high nitrogen utilizing rate winter rapeseed genotypes and evaluation indexes in "Rapeseed-Rice-Rice" triple-cropping system[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2024,46(4):830-840.

"油-稻-稻"三熟制早熟冬油菜氮高效基因型及鉴定指标筛选

钱银飞[1],邱才飞[1],彭春瑞[1*],邹小云[2],姚易根[3],裴润根[3],刘根如[3],杨文孙[3]

(1.江西省农业科学院 土壤肥料与资源环境研究所/农业部长江中下游作物生理生态与耕作重点实验室/国家红壤改良工程技术研究中心,江西 南昌 330200;2.江西省农业科学院 作物研究所,江西 南昌 330200;3.江西省吉安市新干县农业技术推广中心,江西 吉安 331300)

摘要:【目的】旨在筛选适宜"油-稻-稻"三熟制的氮高效早熟冬油菜基因型及其简易筛选指标。【方法】利用田间小区试验,选用了生育期185 d以下的的适宜"油-稻-稻"三熟制种植的14种早熟冬油菜基因型,进行正常施氮(N_1)和不施氮(N_0)处理。根据不同冬油菜基因型氮肥利用率(NUE)的差异,利用树状聚类分析进行分类,形成高、中、低3种氮效率基因型。同时通过逆向溯源的方法,观察分析3种氮效率基因型在不同氮水平条件下的产量构成、主要农艺性状、干物质积累及氮素吸收等方面的表现特征。总结分析出氮高效冬油菜基因型的一些简易判断的指标。【结果】不同氮效率基因型冬油菜在产量形成、主要农艺性状等方面存在显著差异。N_1处理下成熟期早熟冬油菜的主要农艺性状的表型值和变异系数基本表现大于N_0处理。因此,以N_1处理下不同基因型的农艺性状表现作为不同氮效率基因型的鉴别标准。N_1处理下,氮高效基因型比氮中效和氮低效基因型产量高、单株角果数多、每角粒数多、株高高、主花序长、一级分枝数多、角果密度高、各部位干物质积累量高、籽粒中氮含量高、氮肥偏生产力、氮肥农学效率、氮肥生理利用率和氮收获指数均较高。【结论】沣油737是适合南方"油-稻-稻"三熟制的氮高效早熟冬油菜;正常施氮条件下,成熟期较多的单株角果数与每角粒数,以及较高株高是判断早熟冬油菜氮高效基因型的简易指标。

关键词:油-稻-稻;三熟制;冬油菜;氮高效;树状聚类;筛选指标
中图分类号:S565.4　　**文献标志码:**A　　**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**
文章编号:1000-2286(2024)04-0830-11

Selection of high nitrogen utilizing rate winter rapeseed genotypes and evaluation indexes in "Rapeseed-Rice-Rice" triple-cropping system

QIAN Yinfei[1],QIU Caifei[1],PENG Chunrui[1*],ZOU Xiaoyun[2],YAO Yigen[3],PEI Rungen[3],LIU Genru[3],YANG Wensun[3]

收稿日期:2024-02-28　　**修回日期:**2024-05-03
基金项目:国家自然科学基金(32360530)、国家重点研发计划项目(2018YFD0800503)和江西省双千计划(S2021DQKJ0001)
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(32360530),National Key Research and Development Plan(2018YFD0800503)and Double Thousand Plan of Jiangxi Province(S2021DQKJ0001)

作者简介:钱银飞,副研究员,博士,orcid.org/0000-0002-0929-4063,qyftfs@163.com;*通信作者:彭春瑞,研究员,博士,主要从事作物高产栽培与作物生理研究,orcid.org/0000-0002-7911-5091,pcrtfs@163.com。

©《江西农业大学学报》编辑部,开放获取CC BY-NC-ND协议

(1.Institute of Soil and Fertilizer & Resources Environment, Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System for the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, P.R.China, National Engineering and Technology Center for Red Soil Improvement, Jiangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanchang 330200, China; 2. Institute of Crops, Jiangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanchang 330200, China; 3. Agricultural Technology Promotion Center, Xingan County, Ji'an City, Jiangxi Province, Ji'an, Jiangxi 331300, China)

Abstract: [**Objective**] This study aims to select the genotype of high nitrogen use efficient in early winter rapeseed and its simple selecting indexes, which is suitable for "rapeseed-rice-rice" triple cropping system. [**Method**] 14 early winter rapeseed genotypes (the growth period is less than 185 days) suitable for "rapeseed-rice-rice" triple cropping system were selected and treated with normal nitrogen (N_1) and no nitrogen (N_0) in field conditions. According to the difference of nitrogen use efficiency (NUE) of different winter rapeseed genotypes, 3 type of NUE genotypes, high, medium and low, were classified by tree cluster analysis. the yield and its composition, main agronomic traits, dry matter accumulation and nitrogen uptake and usage of 3 NUE types under different nitrogen levels were observed and analyzed by reverse tracing. Indexes for judging the genotype of high NUE winter rapeseed genotype were summarized and analyzed. [**Result**] There were significant differences in yield formation and main agronomic traits of winter rapeseed genotypes with different NUE. The phenotypic values and coefficient of variation of main agronomic traits of early winter rapeseed genotypes at maturity stage were higher under N_1 treatment than those under N_0 treatment. Therefore, the agronomic traits of different genotypes treated with N_1 were used as the criteria for the identification of different NUE genotypes. Under N_1 treatment, the yield, siliqua number per plant, seed number per siliqua, plant height, main inflorescence length, primary branch number, pod density, dry matter accumulation in different parts, nitrogen content in grain, partial factor productivity of nitrogen fertilizer, agronomic efficiency of nitrogen fertilizer, physiological utilization efficiency of nitrogen fertilizer and nitrogen harvest index of N efficient genotype were higher than those of N medium and N inefficient genotypes. [**Conclusion**] Fengyou 737 is a high NUE early winter rapeseed genotype suitable for triple cropping system of "rapeseed-rice-rice" in South China. Under normal nitrogen application conditions, the number of siliquas per plant, the number of seeds per siliqua and the high plant height were indexes to judge the high NUE genotype of early winter rapeseed.

Keywords: rapeseed-rice-rice; triple-cropping system; winter rapeseed; high nitrogen utilizing rate; cluster tree; selecting index

【研究意义】油菜是我国的第一大油料作物,是我国食用植物油的最主要来源。油菜生产对保障我国食用植物油脂和饲用蛋白质的有效供给等均有重要影响[1]。江西是我国冬油菜主产区之一[2],“油-稻-稻”三熟制是其中一种典型的油菜种植制度,在中南部吉泰盆地等地区应用较多。该制度复种指数高,更大程度了利用了温、光、水、土等资源,提高了土地生产效率,是缓解我国粮食安全压力的重要途径之一[3],但同时也带来了氮肥等化学投入品的增加。施用氮肥一方面对“油-稻-稻”三熟作物产量的提高具有积极作用[4-5],但另一方面过量施用不仅会导致氮肥利用率下降,还会造成资源浪费,甚至环境污染[6-7]。尤其在江西中南部地区以低丘平原为主,地势中间高,四处低,加之农田到河流的输移距离短,降雨丰沛,农田氮磷极易流失进入河流,造成面源污染。因此,如何充分发挥氮肥肥效,提高三熟制作物的氮效率,减少氮损失及氮用量,是发展“油-稻-稻”三熟制一个亟待解决的关键问题。【前人研究进展】作物对氮素的吸收和利用存在基因型差异[8-10]。充分挖掘和利用作物自身的潜力,筛选氮高效基因型品种,是提高氮肥利用率、降低环境氮污染的理想途径[11-12]。大量研究表明,油菜对氮素的吸收利用存在明显的基因型差异[13-16],一些相关的农艺性状具有较高的遗传力[17-19]。

【本研究切入点】利用“油-稻-稻”三熟制不同基因型早熟冬油菜的氮素吸收利用差异,筛选出氮高效早熟冬油菜基因型及鉴定指标进行推广应用,对于控制氮肥施用量、稳定油菜产量和提高氮肥利用效

率具有重要意义，而这方面的研究仍较为匮乏。【拟解决的关键问题】开展“油-稻-稻”三熟制早熟冬油菜氮效率基因型的分类，明确不同氮效率基因型的差异，筛选出适合本区域内的氮高效早熟冬油菜基因型及鉴定指标，保证三熟作物周年高产高效，减少农业面源污染，具有十分重要的意义。

1 材料与方法

1.1 试验地基础地力

试验于2018年10月—2019年4月在江西省吉安市新干县沂江乡东湖村（27°43′N、115°23′E）进行。该区属于亚热带湿润气候，海拔高度54 m，平均气温17.5 ℃，无霜期长达260~300 d，年均降水量1 604 mm。供试土壤为第四纪红粘土发育的潮砂泥田，土壤质地为壤土。试验实施前0~20 cm土壤pH 5.87，有机质14.38 g/kg，全氮1.48 mg/kg，全磷0.72 mg/kg，全钾16.3 mg/kg，碱解氮121.6 mg/kg，有效磷13.4 mg/kg，速效钾68.8 mg/kg。

1.2 试验材料及设计

试验为裂区设计，以施氮量处理为主区，基因型为副区，选用14个适合“稻-稻-油”三熟制（生育期均在185 d以下）的早熟冬油菜主栽基因型，其编号及选育单位见表1。施氮量处理设置施氮（N_1）和不施氮（N_0）2个处理，施氮处理施N 150 kg/hm^2（当地早熟冬油菜正常施氮水平）、P_2O_5 60 kg/hm^2、K_2O 72 kg/hm^2、B 1.8 kg/hm^2，分别以尿素（含N 46%），过磷酸钙（含P_2O_5 12%），加拿大产氯化钾（含K_2O 60%）和硼砂（含B 12%）作为肥源。肥料分2次施用，基施70%氮肥和全部磷肥、钾肥、硼肥。冬前追施30%氮肥（尿素）。其他管理同大田油菜。不施氮处理不施氮肥，其余肥料与施氮处理施肥一致。每个处理设3个重复，每小区3 m×4 m，主区四周做埂并用薄膜覆盖。试验于2018年10月20日直播，播种量8 kg/hm^2，幼苗3叶期补苗间苗，统一密度为45万株/hm^2。其余栽培措施同当地高产栽培措施。

表1 供试早熟冬油菜基因型及编号

Tab.1 Genotype and number of early winter rapeseed

编号 Number	基因型 Genotype	生育期/d Days of growth period	选育单位 Breeding unit
V_1	阳光131	180±2	中国农业科学院油料作物研究所
V_2	沣油737	180±2	湖南省农科院作物研究所
V_3	赣油105	177±1	江西省农科院作物研究所
V_4	湘油420	180±2	湖南农业大学
V_5	170013	177±2	中国农业科学院油料作物研究所
V_6	湘油130	180±1	湖南农业大学
V_7	德矮油558	174±2	四川省双流县发兴农作物研究所
V_8	中油828	177±2	中国农业科学院油料作物研究所
V_9	三月黄	172±3	浙江湖州市吴兴区当地种
V_{10}	新都油800	182±2	四川省农科院作物研究所
V_{11}	丰油730	182±1	湖南省农科院作物研究所
V_{12}	晶华油903	183±2	湖北省荆州市晶华种业科技有限公司
V_{13}	徽豪油12	185±1	安徽国豪农业科技有限公司
V_{14}	湘杂油499	184±2	湖南农业大学

1.3 测定内容与方法

1.3.1 主要生育期

参照胡立勇等[20]的方法考察油菜关键生育期（播种期、出苗期、移栽期、抽苔期、初花期、终花期、成熟期、收获期）。

1.3.2 干物重

在普查的基础上，根据茎蘖苗的平均结果于成熟期取样调查，每小区取5穴代表性植株分成茎杆、果壳、籽粒3部分，装入牛皮纸质样品袋，105 ℃杀青30 min后80 ℃烘至恒重，分别测量其干物重。

1.3.3　植株氮测定

将1.3.2烘干至恒重的样品,经粉碎、过筛与再烘干,采用H_2SO_4-H_2O_2联合消煮—蒸馏法测定氮含量。

1.3.4　产量及构成

成熟期每小区有效穗按普查结果,每小区取5穴未受取样影响单株,考察株高、分枝高度、一次有效分枝数、全株有效角果数、每角粒数、千粒质量、单株生产力(单株产量)。成熟期各小区实打实收,测定实际产量。

1.3.5　有关计算依据

(1)氮素利用率(nitrogen use efficiency,NUE),反映作物对施入土壤中的肥料氮的回收效率,即NUE=(U-U_0)/F,其中U为施氮后作物收获时地上部的吸氮总量,U_0为未施氮时作物收获期地上部的吸氮总量,F代表施氮量。

(2)氮肥偏生产力(partial factor productivity from applied N,PFPN,kg/kg N),指投入的单位肥料氮所能生产的作物籽粒产量,即PFPN=Y/F,Y为施氮后所获得的作物产量,F代表施氮量。

(3)氮肥农学效率(agronomic efficiency of applied N,AEN,kg/kg N),指单位施氮量所增加的作物籽粒产量,即AEN=(Y-Y_0)/F,Y为施氮后所获得的作物产量,Y_0为不施氮条件下作物的产量,F代表施氮量。

(4)氮肥生理利用率(physiological efficiency of applied N,PEN,kg/kg N),是作物地上部每吸收单位肥料中的氮所获得的籽粒产量的增加量:PEN=(Y-Y_0)/(U-U_0)

(5)氮素收获指数(nitrogen harvest index,NHI,kg/kg N),是指籽粒氮积累总量占单位植株氮素积累总量的量。即NHI=NA籽粒/NA植株,NA代表氮素积累量。

1.4　数据分析方法

数据处理和统计分析采用Excel 2013和DPS 7.05完成。

2　结果与分析

2.1　不同基因型早熟冬油菜氮肥利用率分类

以不同基因型的早熟冬油菜的氮肥利用率(NUE)进行系统聚类,按照欧式距离长短将其划分为三类(图1):第一类高氮肥利用率基因型V_2沣油737(NUE=45.13%,下面简称HNUE)。第二类中氮肥利用率基因型包括:V_1阳光131、V_3赣油105、V_4湘油420、V_8中油828、V_{10}新都油800、V_{11}丰油730、V_{12}晶华油903、V_{13}徽豪油12和V_{14}湘杂油499(NUE在24.62%~40.13%,平均NUE 32.44%,下面简称MNUE)。第三类低氮肥利用率基因型包括:V_5 170013、V_6湘油130、V_7德矮油558、V_9三月黄(NUE在13.5%~16.76%,平均NUE15.36%,下面简称LNUE)。

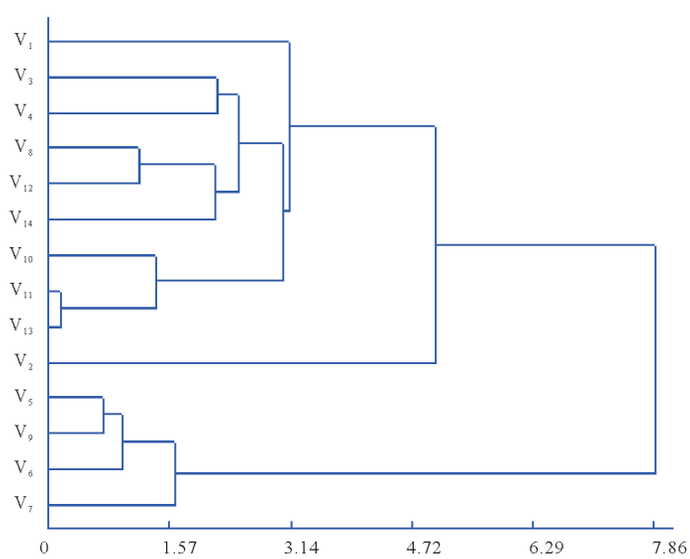


图1　不同基因型早熟冬油菜的氮肥利用率(NUE)聚类分析

Fig.1　Cluster tree of nitrogen use efficiency(NUE)of early winter rapeseed with different genotypes

2.2 不同施氮水平下不同基因型早熟冬油菜成熟期主要农艺性状的表型差异

分析不同氮水平下不同基因型早熟冬油菜成熟期主要农艺性状的表型差异(表2)可见,正常施氮(N_1)处理下主要农艺性状的表型值和变异系数基本表现为大于未施氮(N_0)处理。不同基因型油菜成熟期主要农艺性状的变异系数在N_0水平下变化范围为2.42%~21.94%,在N_1水平下为2.79%~27.06%,这表明主要农艺性状在施氮处理下不同基因型间的变异程度要大于未施氮处理,说明成熟期正常施氮处理下更容易鉴别不同油菜基因型间差异。不同氮水平不同农艺性状的变异程度由大到小依次均为:单株角果数、每角粒数、株高、主花序长度、千粒质量、每果长度、角果内籽粒着生密度、角果密度、单株籽粒重、单株茎重、单株荚重HI、生育期和一级分枝数。不同基因型的成熟期单株角果数与每角粒数等变化幅度较大,而生育期和一级分枝数则变化幅度较小。

表2 不同氮水平条件下不同基因型早熟冬油菜成熟期主要农艺性状的表型差异

Tab.2 Phenotypic differences of main agronomic traits in early winter rapeseed with different genotypes under different nitrogen levels

农艺性状 Agronomic traits	N_0				N_1			
	最小值 Min	最大值 Max	平均值 Avg	变异系数/% CV	最小值 Min	最大值 Max	平均值 Avg	变异系数/% CV
生育期/d Growth period	169	185	175.42	2.94	172	190	180.86	3.22
株高/cm Plant height	48.7	109.2	82.48	16.2	80.54	136.72	106.94	18.1
主花序长度/cm Main inflorescence length	16.20	57.54	38.06	15.43	43.2	79.4	60.2	17.88
一级分枝数 Number of first branches	2.45	2.86	2.57	2.42	2.77	3.05	2.86	2.79
单株角果数 Number of siliquas per plant	6.6	35.4	18.36	21.94	50.4	110.2	66.4	27.06
每果长度/cm Length of siliqua	3.98	5.99	5.04	10.78	4.16	6.34	5.3	11.52
角果密度 Siliqua density	0.86	1.12	0.98	9.67	0.92	1.39	1.09	10.89
角果内籽粒着生密度 Grain density in siliqua	1.84	2.48	2.12	9.85	1.91	2.69	2.29	10.22
每角粒数 Grains per siliqua	5.23	7.88	6.37	19.84	8.01	17.42	12.25	21.52
千粒质量 1 000 grains weight	3.27	4.76	3.7	11.25	3.42	4.98	3.86	12.78
单株茎重 Stem weight per plant	0.38	0.46	0.4	4.94	0.39	0.47	0.42	5.39
单株荚重 Pod weight per plant	0.28	0.32	0.31	4.76	0.3	0.36	0.32	5.47
单株籽粒重 Grain weight per plant	0.24	0.29	0.27	5.24	0.22	0.29	0.27	7.54
收获指数 Harvest index	0.23	0.27	0.25	4.32	0.24	0.29	0.27	5.24

2.3 不同基因型早熟冬油菜产量及其构成

不同基因型的早熟冬油菜的产量及其构成均表现出一定差异(表3)。其中以V_1阳光131的产量最高,为1 932.2 kg/hm^2,日均产量为10.44 kg/hm^2;V_7德矮油558产量最低,为611.5 kg/hm^2,日均产量3.42 kg/hm^2。不同氮肥利用率类型中,HNUE类型基因型的单株角果数、产量和平均日产量(109.2个/株、1 622.6 kg/hm^2、8.77 kg/hm^2)均显著高于MNUE类型基因型(67.22个/株、1 281.93 kg/hm^2、6.86 kg/hm^2)显著高于LNUE类型

基因型(53.85 个/株、838.6 7 kg/hm^2、4.72 kg/hm^2)。每角粒数由多到少依次为 MNUE 类型基因型、HNUE 类型和 LNUE 类型;不同表观利用率类型的千粒质量差异不显著。分析产量构成因子与产量和日均产量的关系,由大到小均为单株角果数、每角粒数、千粒质量。相关系数分别为 0.78**、0.56*、0.03 和 0.81**、0.53*、0.01(**表示在 0.01 水平上的极显著差异水平,*表示在 0.05 水平上的显著差异水平)。

表 3　不同基因型早熟冬油菜在正常施氮条件下产量及其构成

Tab.3　Yield and composition of early winter rapeseed with different genotypes under normal nitrogen application conditions

类型 Type	基因型 Genotype	单株角果数/(个·株$^{-1}$) Number of siliquas per plant	每角粒数/(个·角$^{-1}$) Grains per siliqua	千粒质量/g 1 000 grains weight	产量/(kg·hm^{-2}) Yield	日均产量/(kg·hm^{-2}) Daily yield
氮高效 HNUE	V_2	109.2**	10.82*	3.83^{ns}	1622.60**	8.77**
氮中效 MNUE	V_1	89.6	16.40	3.42	1932.20	10.44
	V_3	62.4	11.46	3.53	954.95	5.25
	V_4	60.0	11.68	3.37	889.31	4.81
	V_8	91.2	11.82	3.67	1591.69	8.71
	V_{10}	67.2	10.31	4.47	1171.16	6.70
	V_{11}	69.2	17.01	3.51	1548.75	8.15
	V_{12}	47.2	15.65	3.43	921.44	4.73
	V_{13}	55.6	14.03	4.97	1490.96	7.65
	V_{14}	62.6	9.19	4.63	1036.88	5.32
	平均 Average	67.22**	13.06**	3.89^{ns}	1281.93**	6.86**
氮低效 LNUE	V_5	55.4	12.14	3.63	997.38	5.43
	V_6	56.4	11.13	4.00	929.92	5.03
	V_7	52.4	8.01	3.83	611.50	3.42
	V_9	51.2	11.84	3.77	815.88	5.00
	平均 Average	53.85**	10.78*	3.81^{ns}	838.67**	4.72**

**和*分别表示在 0.01 和 0.05 水平上的差异显著性,ns 表示差异不显著。

** and * represent $P<0.01$ and $P<0.05$, respectively, ns: not significant($P>0.05$).

2.4　不同基因型早熟冬油菜成熟期主要农艺性状差异

不同基因型冬油菜成熟期主要农艺性状差异较大(表 4)。不同氮肥利用率类型中,株高、主花序长、一级分枝数及角果密度均随氮肥利用率的提高而增加,表现由大到小依次为 HNUE、MNUE 和 LNUE。而每果长度、角果内籽粒着生密度则由大到小依次为 MNUE、LNUE 和 HNUE。

2.5　不同基因型早熟冬油菜干物质积累差异

由表 5 可知,不同基因型早熟冬油菜的干物质积累量存在较大差异。不同氮肥利用率类型中,氮肥利用率越高的冬油菜基因型,它的茎杆、果壳和籽粒的干物质积累量及总干物质积累量越大,由大到小均依次为 HNUE、MNUE 和 LNUE,且差异均达到了显著水平。这表明氮肥利用率越高的油菜基因型干物质积累量越多。

2.6　不同基因型早熟冬油菜氮素含量及积累差异

由表 6 可知,不同氮肥利用率中,HNUE 基因型的籽粒中的氮含量显著高于 MNUE 基因型和 LNUE 基因型,后两者差异不显著。LNUE 基因型的茎杆中的氮含量显著高于 MNUE 基因型和 HNUE 基因型,后两者差异不显著。MNUE 基因型的果壳中的氮含量显著高于 LNUE 基因型显著高于 HNUE 基因型。

由表 7 可知,氮肥利用率越高的早熟冬油菜基因型,它的茎杆、果壳、籽粒和总的氮素积累量越大,由大到小依次为 HNUE、MNUE 和 LNUE,均达显著水平。HNUE 基因型的籽粒中的氮比例显著高于 MNUE 基因型显著高于 NUE 基因型。LNUE 基因型的茎杆中的氮含量显著高于 MNUE 基因型和 HNUE 基因型,后两者差异不显著。MNUE 基因型的茎杆中的氮含量显著高于 LNUE 基因型显著高于 HNUE 基因型。

表 4 不同基因型早熟冬油菜在正常施氮条件下成熟期主要农艺性状

Tab.4 Main agronomic traits of early winter rapeseed with different genotypes at maturity stage under normal nitrogen application conditions

类型 Type	基因型 Genotype	株高/cm Plant height	主花序长度/cm Main inflorescence length	一级分枝数/(个·株$^{-1}$) Number of first branchs	每果长度/cm Length of siliqua	角果密度/(个·cm^{-1}) Siliqua density	角果内籽粒着生密度/(个·cm^{-1}) Grain density in siliqua
氮高效 HNUE	V_2	136.06**	78.90**	2.98**	4.83**	1.38**	2.24*
氮中效 MNUE	V_1	130.14	72.10	2.88	6.15	1.24	2.67
	V_3	102.32	59.94	2.83	5.32	1.04	2.15
	V_4	96.86	57.40	2.85	5.38	1.05	2.17
	V_8	138.42	76.20	3.01	5.37	1.20	2.20
	V_{10}	102.74	62.90	2.83	4.70	1.07	2.19
	V_{11}	125.82	65.88	2.84	6.33	1.05	2.69
	V_{12}	80.88	45.80	2.79	5.90	1.03	2.65
	V_{13}	106.30	57.66	2.88	5.73	0.96	2.45
	V_{14}	113.36	62.20	2.85	4.29	1.01	2.14
	平均 Average	110.76**	62.23**	2.86*	5.46**	1.07*	2.37**
氮低效 LNUE	V_5	92.66	50.90	3.03	5.46	1.09	2.23
	V_6	103.76	60.76	2.77	5.24	0.93	2.12
	V_7	83.18	47.70	2.88	4.18	1.10	1.92
	V_9	84.70	44.40	2.77	5.37	1.15	2.21
	平均 Average	96.95**	53.96**	2.85*	5.20**	1.04*	2.26*

**和*分别表示在0.01和0.05水平上的差异显著性。

** and * represent $P<0.01$ and $P<0.05$, respectively.

表 5 不同基因型早熟冬油菜在正常施氮条件下干物质积累量

Tab.5 Dry matter accumulation of early winter rapeseed with different genotypes under normal nitrogen application conditions

类型 Type	基因型 Genotype	茎杆/(kg·hm^{-2}) Stem	果壳/(kg·hm^{-2}) Husk	籽粒/(kg·hm^{-2}) Grain	总积累量/(kg·hm^{-2}) Total
氮高效 HNUE	V_2	3 916.71**	2 728.53**	1 893.78**	8 539.02**
氮中效 MNUE	V_1	3 544.38	2 085.30	2 296.98	7 926.66
	V_3	1 775.34	1 358.91	1 284.57	4 418.82
	V_4	1 685.88	1 305.99	1 207.08	4 198.95
	V_8	2 712.15	2 216.97	1 919.61	6 848.73
	V_{10}	2 266.74	1 695.33	1 389.78	5 351.85
	V_{11}	2 729.16	2 106.72	1 923.39	6 759.27
	V_{12}	1 951.11	1 513.89	1 195.74	4 660.74
	V_{13}	2 469.60	2 019.78	1 881.81	6 371.19
	V_{14}	2 056.32	1 574.37	1 260.63	4 891.32
	平均 Average	2 354.52**	1 764.14**	1 595.51**	5 714.17**
氮低效 LNUE	V_5	1 389.78	1 139.67	1 032.57	3 562.02
	V_6	1 493.73	973.98	941.22	3 408.93
	V_7	1 295.28	900.27	778.68	2 974.23
	V_9	1 639.26	1 135.26	958.23	3 732.75
	平均 Average	1 454.51**	1 037.30**	927.68**	3 419.48**

**和*分别表示在0.01和0.05水平上的差异显著性。

** and * represent $P<0.01$ and $P<0.05$, respectively.

表 6　不同基因型早熟冬油菜在正常施氮条件下的氮含量

Tab.6　Nitrogen content of early winter rapeseed with different genotypes under normal nitrogen application conditions

类型 Type	基因型 Genotype	氮含量/(g·kg^{-1}) Nitrogen content		
		茎杆 Stem	果壳 Husk	籽粒 Grain
氮高效 HNUE	V_2	3.72*	5.30**	41.66**
氮中效 MNUE	V_1	4.07	8.82	35.59
	V_3	2.74	4.27	31.51
	V_4	2.81	4.25	32.86
	V_8	4.97	5.26	31.56
	V_{10}	4.55	4.78	42.53
	V_{11}	4.93	7.57	30.28
	V_{12}	4.33	7.79	32.12
	V_{13}	3.44	7.42	30.48
	V_{14}	3.80	6.98	35.14
	平均 Average	3.96**	6.35**	33.56*
氮低效 LNUE	V_5	4.51	6.52	33.16
	V_6	5.26	6.83	36.67
	V_7	4.69	5.79	31.19
	V_9	4.64	5.21	29.15
	平均 Average	4.78**	6.09**	32.54*

**和*分别表示在 0.01 和 0.05 水平上的差异显著性。

** and * represent $P<0.01$ and $P<0.05$, respectively.

表 7　不同基因型早熟冬油菜在正常施氮条件下的氮积累量及分配比例

Tab.7　Nitrogen accumulation and distribution ratio of early winter rapeseed with different genotypes under normal nitrogen application conditions

类型 Type	基因型 Gentype	氮积累量/(kg·hm^{-2}) Nitrogen accumulation				分配比例/% Distribution ratio		
		茎杆 Stem	果壳 Husk	籽粒 grain	总 Total	茎杆 Stem	果壳 Husk	籽粒 Grain
氮高效 HNUE	V_2	14.58**	14.45**	78.89**	107.92**	13.51*	13.39*	73.10**
氮中效 MNUE	V_1	14.43	18.39	81.75	114.57	12.59	16.05	71.35
	V_3	4.86	5.80	40.48	51.14	9.51	11.33	79.15
	V_4	4.74	5.55	39.67	49.96	9.49	11.10	79.41
	V_8	13.48	11.66	60.58	85.72	15.72	13.60	70.67
	V_{10}	10.31	8.11	59.11	77.53	13.30	10.46	76.25
	V_{11}	13.44	15.94	58.24	87.62	15.34	18.19	66.47
	V_{12}	8.45	11.79	38.41	58.64	14.40	20.10	65.49
	V_{13}	8.50	14.98	57.36	80.84	10.52	18.53	70.95
	V_{14}	7.81	11.00	44.30	63.11	12.38	17.42	70.20
	平均 Average	9.56**	11.47**	53.32**	74.35**	12.58*	15.20**	72.22**
氮低效 LNUE	V_5	6.27	7.44	34.24	47.95	13.08	15.51	71.41
	V_6	7.86	6.65	34.51	49.03	16.03	13.57	70.40
	V_7	6.07	5.21	24.29	35.57	17.07	14.65	68.28
	V_9	7.60	5.91	27.93	41.44	18.34	14.27	67.40
	平均 Average	6.95**	6.30*	30.24**	43.50**	16.13**	14.50*	69.37**

**和*分别表示在 0.01 和 0.05 水平上的差异显著性。

** and * represent $P<0.01$ and $P<0.05$, respectively.

2.7 不同基因型早熟冬油菜氮素利用差异

由表8可知，氮肥利用率越高的早熟冬油菜基因型，它的氮肥偏生产力（PFPN）、氮肥农学效率（AEN）、氮肥生理利用率（PEN）和氮收获指数（NHI）越大，均表现为HNUE>MNUE>LNUE，均达显著水平。

表8 不同基因型早熟冬油菜在正常施氮条件下氮素利用

Tab.8 Nitrogen utilization of early winter rapeseed with different genotypes under normal nitrogen application conditions

类型 Type	基因型 Genotype	氮肥偏生产力 PFPN	氮肥农学效率 AEN	氮肥生理利用率 PEN	氮收获指数 NHI
氮高效 HNUE	V_2	10.82**	6.05**	18.41**	0.73*
氮中效 MNUE	V_1	12.88	6.91	17.22	0.71
	V_3	6.37	4.43	16.54	0.79
	V_4	5.93	3.79	15.41	0.79
	V_8	10.56	6.32	20.78	0.71
	V_{10}	8.27	5.20	14.05	0.76
	V_{11}	10.33	6.13	17.19	0.66
	V_{12}	6.14	3.85	13.16	0.65
	V_{13}	9.94	6.65	18.71	0.71
	V_{14}	6.91	4.80	14.74	0.70
	平均 Average	8.59**	5.34**	16.42**	0.72*
氮低效 LNUE	V_5	6.59	3.28	12.39	0.71
	V_6	6.20	2.93	14.39	0.70
	V_7	4.08	1.87	13.84	0.68
	V_9	5.90	3.55	15.20	0.67
	平均 Average	5.69**	2.91**	13.96**	0.69

**和*分别表示在0.01和0.05水平上的差异显著性。

** and * represent $P<0.01$ and $P<0.05$, respectively.

3 讨论与结论

不同基因型油菜间的氮素利用效率存在差异，这一点已达普遍共识[21]。因此可以通过选择和利用氮高效油菜基因型来增加产量，减少氮肥施用，从而减少对环境的污染[14,22]。本研究供试的14个早熟冬油菜基因型的氮素表观吸收效率存在着显著差异。说明从现有的油菜资源中选择氮素利用效率较高的早熟冬油菜基因型完全有可能。本研究中沣油737（V_2）的氮肥表观利用率最高，属于氮高效基因型，它既表现出高的氮肥表观利用率，同时也具有高产和耐贫瘠的能力，显著高于氮中效和氮低效基因型，是适合南方“油-稻-稻”三熟制应用的氮素高效基因型早熟冬油菜品种。本研究中氮效率越高的基因型具有更强的干物质生产能力，更高的氮素积累量、吸氮量和氮收获指数，显示出更好的氮素吸收和向籽粒转运的能力。这也和大多数的研究[23-25]结论相同。Kessel[8]研究了36个不同基因型（包括杂交油菜、现代油菜、老油菜和人工合成油菜）对氮吸收利用的遗传变异，认为不施肥和最佳施肥条件下，杂交品种氮效率最高，旧小种和重组系氮效率最低。本研究也有类似的发现，本研究中V_7和V_9等为上世纪70年代旧基因型，氮效率明显不及现当代基因型。杂交品种的氮效率一般高于常规品种。

如何进行氮高效基因型的筛选，一直存在争议。有人认为在高氮水平下高氮素响应的高产基因型为氮高效基因型[15,19,26]，曹兰芹等[19]对50份油菜种质进行了不同氮水平下进行筛选，发现在高氮条件下遗传变异差距更为明显，且油菜的有效角果数、株高和第一个有效分枝高度在各基因型间表现出显著差异，可作为筛选氮高效基因型的标准；也有人认为在氮胁迫条件下进行，耐贫瘠能力强的基因型为氮高效基因型[27-29]。秦璐等[29]以73份油菜作为供试材料，通过设置低氮和正常施氮2个处理，以盛花期生物量、植株氮累积量、耐性指数等为指标对不同基因型的应用潜力进行综合评价。低氮胁迫下，供试油菜生长受到抑制的程度更大。单株鲜重、单株干重、单株氮累积量和氮吸收效率可作为各油菜基因型盛花

期氮效率的综合评价指标。但笔者认为比较好的做法是兼顾高氮和低氮条件下不同基因型的表现,通过氮肥表观利用率高低筛选出氮高效基因型后逆向反推何种条件下更适合基因型差异的鉴别,这样更能与生产实践结果相符。本研究中不同基因型油菜成熟期主要农艺性状的变异系数在未施氮水平下小于施氮水平,表明成熟期正常施氮处理下更容易鉴别不同早熟冬油菜基因型间差异。本研究中冬油菜在成熟期单株角果数与每角粒数受氮环境的影响变化幅度较大,氮素高效利用基因型的早熟冬油菜成熟期的单株角果数与每角粒数,以及株高要显著高于氮中效和氮低效基因型。因此成熟期的单株角果数与每角粒数,以及株高可作为筛选氮高效基因型早熟冬油菜的简易指标。但是,以上结果仅限于本试验所研究的基因型范围之内,要获得更准确的结论,还需用更多的基因型进行深入研究。

沣油 737 是适合“油–稻–稻”三熟制的氮高效早熟冬油菜基因型;成熟期较多的单株角果数与每角粒数,以及较高株高是判断早熟冬油菜氮高效基因型的简易指标。

致谢:江西省农业科学院基础研究与人才培养专项(JXSNKYJCRC202214)同时对本研究给予了资助,谨致谢意!

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 science,2019,41(4):485-489.

[2] 孙明珠,刘凯丽,焦敏,等.江西省优质高产油菜品种对比研究[J].江西农业大学学报,2022,44(3):529-539.
SUN M Z,LIU K L,JIAO M,et al.A comparative study of high yield and quality rape varieties in Jiangxi Province[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2022,44(3):529-539.

[3] 王长松,付江凡,余艳锋.江西省油菜产业发展现状及提升策略[J].农村经济与科技,2019,30(9):178-180.
WANG C S,FU J F,YU Y F,et al.Current situation and promotion strategy of rape industry in Jiangxi province[J].Rural economy and science-technology,2019,30(9):178-180.

[4] 郑伟,陈明,吕伟生,等.油稻稻三熟制早熟高产油菜品种筛选[J].土壤与作物,2019,8(2):205-211.
ZHENG W,CHENG M,LYU W S,et al.Screening of early-maturing and high-yielding rapeseed varieties under rapeseed-rice- rice cropping system[J].Soils and crops,2019,8(2):205-211.

[5] 陈明,叶川,吕伟生,等.稻稻油三熟制下油菜早熟高产品种的筛选[J].江苏农业科学,2018,46(17):61-64.
CHEN M,YE C,LYU W S,et al.Screening of early-maturing and high-yielding rapeseed varieties under rice- rice-rapeseed cropping system[J].Jiangsu agricultural sciences,2018,46(17):61-64.

[6] 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.

[7] MUHAMMAD Y,LI X K,ZHANG Z,et al.Nitrogen fertilizer management for enhancing crop productivity and nitrogen use efficiency in a rice-oilseed rape rotation system in China[J].Frontiers in plant science,2016,7,1496

[8] KESSEL B,BECKER H C .Genetic variation of nitrogen-efficiency in field experiments with oilseed rape(*Brassica napus L.*)[C].“New horizons for an old crop”,Proceedings of the 10th international rapeseed congress,1999.

[9] 巢成生,王玉乾,沈欣杰,等.甘蓝型油菜苗期氮高效吸收转运特征研究[J].中国农业科学,2022,55(6):1172-1188.
CHAO C S,WANG Y Q,SHEN X J,et al.Characteristics of efficient nitrogen uptake and transport of rapeseed at seedling stage[J].Scientia agricultura Sinica,2022,55(6):1172-1188.

[10] 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.
ZHANG Y L,FAN J B,DUAN Y H,et al.Development,potential and adaptation of Chinese rapeseed industry variation of nitrogen use efficiency of rice different in genotype and its evaluation[J].Acta pedologica Sinica,2008,45(2):267-273.

[11] 江立庚,曹卫星.水稻高效利用氮素的生理机制及有效途径[J].中国水稻科学,2002,16(3):64-67.
JIANG L G,CAO W X.Physiological mechanism and approaches for efficient nitrogen utilization in rice[J].Chinese journal of rice science,2002,16(3):64-67.

[12] KANT S,BI Y M,ROTHSTEIN S J.Understanding plant response to nitrogen limitation for the improvement of crop nitrogen use efficiency[J].Journal of experimental botany,2011,62(4):1499-1509.

[13] HUANG Q ,LU L Z,XU Y ,et al.Genotypic variation of tocopherol content in a representative genetic population and genome-wide association study on tocopherol in rapeseed(*Brassica napus*)[J].Molecular breeding,2023,43(6):50-50.

[14] FABIAN K F ,WALTER J H .Contribution of nitrogen uptake and retranslocation during reproductive growth to the nitrogen efficiency of winter oilseed-rape cultivars(*Brassica napus* L.)differing in leaf senescence[J].Agronomy,2016,6(1):1.

[15] HE H Y,YANG R,LI Y J,et al.,Genotypic variation in nitrogen utilization efficiency of oilseed rape(*Brassica napus*)under contrasting N supply in pot and field experiments[J].Frontiers in plant science,2017(8),1825.

[16] BOUCHET A,LAPERCHE A,BISSUELBELAYGUE C,et al.Nitrogen use efficiency in rapeseed:a review[J].Agronomy for sustainable development,2016,36(2):1-20.

[17] 左青松,石剑飞,袁权,等.油菜氮素吸收利用的遗传效应分析[J].中国油料作物学报,2008,30(2):143-147.
ZUO Q S ,SHI J F,YUAN Q,et al.Genetic analysis of N absorption and N utilization of rape seed(*B. napus* L)[J].Chinese journal of oil crop science,2008,30(2):143-147.

[18] 丁广大,王改丽,叶祥盛,等.甘蓝型油菜氮高效的生理与分子遗传基础研究进展[J].华中农业大学学报,2017,36(2):130-139.
DING G D,WANG G L,YE X S,et al.Physiological and genetic basis in nitrogen efficiency of *Brassica napus*:a review[J].Journal of Huazhong agricultural university,2017,36(2):130-139.

[19] 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 science,2010,32(2):270-278.

[20] 胡立勇,丁艳锋,作物栽培学[M].北京:高等教育出版社,2008:380-381.
HU L Y,DING Y F.Crop cultivation[M].Beijing:Higher Education Press,2008:380-381.

[21] SIELING K,KAGE H,Efficient N management using winter oilseed rape:a review[J].Agronomy for sustainable development,2010,30(2):271-279.

[22] 任涛,鲁剑巍.中国冬油菜氮素养分管理策略[J].中国农业科学,2016,49(18):3506-3521.
REN T,LU J W.Integrated nitrogen management strategy for winter oilseed rape(*Brassica napus* L.)in China[J].Scientia agricultura Sinica,2016.49(18):3506-3521.

[23] ERLEY G S,WIJAYA K,ULAS A,et al.Leaf senescence and N uptake parameters as selection traits for nitrogen efficiency of oilseed rape cultivars[J].Physiologia plantarum,2007,130(4):519-531.

[24] CHARBONNIER E,SCARBEL A F,LEMARIE S.Rapeseed:how to value varieties with higher nitrogen use efficiency in France[J].Oilseeds and fats,crops and lipids,2019,26(1):1-8.

[25] KESSEL B,SCHIERHOLT A,BECKER H.Nitrogen use efficiency in a genetically diverse set of winter oilseed rape(*Brassica napus* L.)[J].Crop science,2012,52(6):2546-2554.

[26] 陈敬东,戢强强,余忆,等.提高氮效率的途径及油菜氮高效评价指标的研究进展[J].江汉大学学报(自然科学版),2021,49(6):48-57.
CHEN J D,JI Q Q,YU Y,et al.Research progress on approaches to improve nitrogen efficiency and evaluation index of nitrogen efficiency in rapeseed[J].Journal of Jianghan university(natural science edition),2021,49(6):48-57.

[27] FINDEKLEE F K,RIZI V S,BECKER M A,et al.Transcriptomic analysis of nitrogen starvation- and cultivar-specific leaf senescence in winter oilseed rape(*Brassica napus* L.)[J].Plant science,2015,233(4),174-185.

[28] ZENG C L,WAN H P,WU X M,et al.Genome-wide association study of low nitrogen tolerance traits at the seedling stage of rapeseed[J].Biologia plantarum,2021,65:10-18

[29] 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,CHAN 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.