



杨国星,张敏,杨国涛,等. 氮磷调控对高芥酸油菜产量和品质的影响[J]. 南京农业大学学报,2024,47(4):635-642.

YANG Guoxing,ZHANG Min,YANG Guotao, et al. Effects of nitrogen and phosphorus regulation on yield and quality of high erucic acid rape (*Brassica napus* L.) [J]. Journal of Nanjing Agricultural University,2024,47(4):635-642.

氮磷调控对高芥酸油菜产量和品质的影响

杨国星¹,张敏²,杨国涛¹,陈虹¹,张国豪¹,刘倩¹,
王汝丹¹,王学春^{1*},胡运高¹

(1.西南科技大学生命科学与工程学院水稻研究所,四川 绵阳 621010;2.四川国豪种业股份有限公司,四川 绵阳 621023)

摘要:[目的]本试验通过研究不同氮磷肥互作处理下高芥酸油菜的产量和品质,以期探明适应高芥酸油菜品种稳产提质的氮磷肥施用处理。[方法]以高芥酸型油菜‘绵油 309’为试验材料,分别设置 0 kg·hm⁻²(N0)、60 kg·hm⁻²(N1)、120 kg·hm⁻²(N2)、180 kg·hm⁻²(N3)4 个氮肥水平和 0 kg·hm⁻²(P0)、45 kg·hm⁻²(P1)、90 kg·hm⁻²(P2)、120 kg·hm⁻²(P3)4 个磷肥水平,共 16 个处理,比较不同氮磷水平对高芥酸油菜产量及品质的影响。[结果]氮磷肥通过影响单株角果数、每角果粒数和千粒重进而影响油菜产量,2020 年和 2021 年均均在 N3P2 处理下产量达到最大值,2020 年最大值为 2 848.7 kg·hm⁻²,比最小值(929.4 kg·hm⁻²)增产 206.5%,2021 年最大值为 2 908.3 kg·hm⁻²,比最小值(927.4 kg·hm⁻²)增产 213.6%。2020 和 2021 年在 N3P2 处理下菜籽油产量最高达 1 144.0、1 353.1 kg·hm⁻²,芥酸产量最高分别为 582.5、685.8 kg·hm⁻²。氮肥对高芥酸油菜的含油量具有极显著影响,2 年均均在 N2 条件下含油量最高(41%~42%);氮磷肥对菜籽油中芥酸含量均具有极显著影响,2 年均均在 N2P2 处理下达到最大值 55.0%。[结论]合理的施用氮肥和磷肥能够显著提高油菜的产量和品质,从而达到增产增收的目的。在生产过程中‘绵油 309’作为芥酸加工型油菜,当施氮量为 180 kg·hm⁻²和施磷量为 90 kg·hm⁻²时可以实现较高的产量和较好的品质。**关键词:**油菜;氮肥;磷肥;产量构成;芥酸;脂肪酸

中图分类号:S143.1;S143.2;S565.4

文献标志码:A

文章编号:1000-2030(2024)04-0635-08

Effects of nitrogen and phosphorus regulation on yield and quality of high erucic acid rape (*Brassica napus* L.)

YANG Guoxing¹,ZHANG Min²,YANG Guotao¹,CHEN Hong¹,ZHANG Guohao¹,
LIU Qian¹,WANG Rudan¹,WANG Xuechun^{1*},HU Yungao¹

(1.Rice Research Institute,School of Life Sciences and Engineering,Southwest University of Science and Technology,
Mianyang 621010,China;2.Sichuan Guohao Seed Industry Co.,Ltd.,Mianyang 621023,China)

Abstract:[Objectives]This experiment aimed to investigate the yield and quality of high erucic acid rape under different nitrogen and phosphorus fertilizer interactions,in order to identify nitrogen and phosphorus fertilizer application treatments that were suitable for stable yield and quality improvement of high erucic acid rape varieties. [Methods]This experiment using high erucic acid rape ‘Mianyou 309’ as the material,set up 4 nitrogen fertilizer levels(N0:0 kg·hm⁻²,N1:60 kg·hm⁻²,N2:120 kg·hm⁻²,N3:180 kg·hm⁻²) and 4 phosphorus fertilizer levels(P0:0 kg·hm⁻²,P1:45 kg·hm⁻²,P2:90 kg·hm⁻²,P3:120 kg·hm⁻²),totaling 16 treatments. This experiment was conducted to compare the effects of different nitrogen and phosphorus interactions on the yield and quality of high erucic acid rape. [Results]The application amount of nitrogen and phosphorus fertilizer affected the number of pods,seeds per pod and thousand seed weight per plant,thereby affecting the yield of rape. The yield reached its maximum value under N3P2 treatment in 2020 and 2021,with a maximum value of 2 848.7 kg·hm⁻² in 2020,an increase of 206.5% compared with the minimum value of 929.4 kg·hm⁻². The maximum value in 2021 was 2 908.3 kg·hm⁻²,which was 213.6% higher than the minimum value of 927.4 kg·hm⁻². Under N3P2 treatment,the measured yield of rape oil in 2020 and 2021 reached the maximum of 1 144.0 and 1 353.1 kg·hm⁻²,and the maximum erucic acid yield was 582.5 and 685.8 kg·hm⁻²,respectively. Nitrogen fertilizer significantly affected the oil content of high erucic acid rape,with the highest oil content(41%–42%) under N2 conditions for two years. Nitrogen and phosphorus fertilizers significantly affected the content of erucic acid,reaching the maximum value under N2P2 treatment for two years,with a maximum value of 55.0%. [Conclusions]Reasonable application of nitrogen and phosphorus fertilizers could significantly improve the yield and quality of rape,achieving the goal of increasing yield and income. ‘Mianyou 309’,as a rape processed with erucic acid,could achieve higher yield and better quality by applying nitrogen 180 kg·hm⁻² and phosphorus 90 kg·hm⁻².

Keywords:rape;nitrogen fertilizer;phosphate fertilizer;yield composition;erucic acid;aliphatic acid

收稿日期:2023-09-12

基金项目:四川省科技计划项目(2021YFYZ0016,2022YFH0030,2021YFN0053)

*通信作者:王学春,教授,主要从事农业资源高效利用和高效农作制度研究,E-mail:xuechunwang@swust.edu.cn.

高芥酸油菜也称为工业油菜,是指芥酸含量达到50%以上的油菜品种,主要用来生产工业原料芥酸^[1-2]。芥酸在目前工业生产中扮演着十分重要的角色,尤其是其衍生产品芥酸酰胺更是被誉为21世纪的“化工原料之王”。用高芥酸油菜籽提炼出的芥酸及其衍生物除作为溶剂和润滑剂外,还是香料、化妆品、油漆等的原料,可以用于机械制造、铸造、化工多个领域甚至是航空航天等高科技领域,因其附加值高、需求量大、可再生等特点在工业领域广受欢迎^[3]。四川作为长江上游主要的油稻两熟区域,境内的西普化工等企业主要以生产芥酸为主,适宜的生长环境和深加工优势使得该地区的高芥酸类油菜品种推广面积巨大^[2]。高芥酸油菜的产量和品质不仅取决于种质资源,还受自然环境和栽培技术的影响。例如气候条件和土壤环境都会影响油菜的生长发育^[4],肥料施用种类、施用量均会对油菜的产量和品质产生较大影响^[5],肥料、播期等栽培管理方式对产量和品质的影响也较大^[6-7]。因此本试验开展不同氮磷肥水平对高芥酸油菜产量和品质影响的研究,探索高芥酸油菜产量及品质对氮磷肥的响应机制,为高芥酸型油菜的高产优质生产提供理论依据。

氮磷肥作为油菜生长发育的必要元素,对油菜产量和品质的提高具有重要影响^[8-9]。氮素作为油菜所需最多的元素,氮肥施用量直接关系着油菜的产量和品质^[10-11],过量的施用氮肥会降低油菜含油量从而导致产油量降低,降低其经济效益。油菜对磷素较为敏感,缺磷会导致油菜籽减产,过量施磷也会对油菜产量产生一定影响^[12-13]。同时,氮、磷、钾施用1种或任意2种都会造成油菜减产^[14-15]。前人关于氮磷及其互作对油菜品质和产量的影响研究较多,但是,研究多是以加工食用油用的双低型油菜为试验材料,研究氮磷施用对含油量、人体有益脂肪酸含量的影响,而有关氮磷施用水平对高芥酸型油菜产量和品质的影响未见报道。因此,本试验通过设计不同的氮磷肥水平处理,探究高芥酸型油菜产量和品质对氮磷肥的响应,旨在为工业加工型油菜的生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料为甘蓝型高芥酸油菜品种‘绵油309’(芥酸含量55.15%,硫苷含量 $112.64 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$,含油率42.41%)。试验于2019—2021年在西南科技大学青义试验基地长期氮磷互作定位田进行,该定位田从2014年开始进行相同的氮磷互作处理。

1.2 试验设计

试验田耕作层土壤全氮含量 $1.98 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、速效氮 $80.30 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、速效磷 $43.30 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、速效钾 $76.20 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[16]。设置氮、磷肥各4个施肥水平,氮肥为 $0 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (N0)、 $60 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (N1)、 $120 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (N2)、 $180 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (N3);磷肥为 $0 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (P0)、 $45 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (P1)、 $90 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (P2)、 $120 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (P3),共16个处理,其他施肥及管理方式同当地农户一致。供试材料于8月底育苗,10月上旬移栽,种植密度为 $70\ 500 \text{ 株}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。试验各处理3次重复,小区面积为 20 m^2 ,随机区组排列。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 产量及产量构成 油菜成熟期收获前对各小区取样,各小区选取代表性植株10株进行考种,考察单株角果数、每角果粒数、千粒重等产量构成指标;成熟期收获籽粒并称量,晾晒后测定实际含水量并根据实际含水量换算成容许含水量(10%)的产量。

1.3.2 品质指标测定 通过FOSS-NIRsystems 5000近红外光谱仪测定其含油量以及硫甙、芥酸、蛋白质、油酸、亚油酸、亚麻酸、花生烯酸含量。菜籽油产量=含油量×大田实际产量;芥酸产量=菜籽油产量×芥酸含量。

1.4 数据处理与分析

采用Excel 2019软件对品质数据和产量及其产量构成因子数据进行整理,通过IBM SPSS Statistics 26进行数据分析,并用Origin 2022软件制图。处理间采用最小显著差异法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 高芥酸油菜产量及产量构成对氮磷肥的响应

氮磷肥及其互作对高芥酸油菜产量和其产量构成因素具有显著或极显著影响(表1)。试验年度对产量及其产量构成因素的影响不显著;试验年度对氮磷肥及其互作因素在产量方面的效应无显著影响,但对

氮磷肥及其互作在部分产量构成因素方面存在显著或极显著效应。

表1 高芥酸油菜产量性状显著性分析(F 值,2020年和2021年)

Table 1 Significance analysis of yield traits of high erucic acid rape(F -value,2020 and 2021)

因素 Factor	单株果荚数 Effective pods per plant	千粒重 1 000-seed weight	每角果粒数 Seeds per pod	产量 Yield
N	319.51 **	20.57 **	1 376.44 **	560.91 **
P	220.53 **	62.57 **	124.86 **	110.28 **
Year (Y)	2.38	0.38	2.06	0.42
N×P	2.31 *	8.98 **	158.51 **	46.07 **
N×Y	2.41	1.87	12.72 **	0.84
P×Y	1.90	3.56 *	2.26	0.66
N×P×Y	0.67	2.74 **	4.27 **	0.29

注:N:施氮量;P:施磷量;Year(Y)表示2020和2021年度间;N×P:施氮量和施磷量间的互作效应;N×Y:施氮量和年度间的互作效应;P×Y:施磷量和年度间的互作效应;N×P×Y:施氮量、施磷量和年度间的互作效应。* $P<0.05$,** $P<0.01$ 。下同。

Note:N: Nitrogen application amount; P: Amount of phosphorus applied; Year (Y) means between the year of 2020 and 2021; N×P: Interaction effect between nitrogen application and phosphorus application; N×Y: Interaction effect between nitrogen application and year; P×Y: Interaction effect between phosphorus application amount and year; N×P×Y: The interaction effect among nitrogen application, phosphorus application and year. * $P<0.05$, ** $P<0.01$. The same below.

由表2、表3可知:连续氮磷调控处理后高芥酸油菜的产量均随氮肥施用量的增加而显著增加;磷肥对产量的影响相对较小,过量施磷对产量存在一定的抑制效应。

表2 高芥酸油菜产量构成及显著性分析(2020)

Table 2 Production composition of high erucic acid rape and significance analysis(2020)

处理 Treatment	每角果粒数 Seeds per pod	千粒重/g 1 000-seed weight	单株果荚数 Effective pods per plant	产量/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) Yield	
P0	N0	10.84±0.20 ^d	2.93±0.07 ^b	421.65±4.40 ^c	942.35±17.50 ^b
	N1	11.71±0.12 ^c	3.14±0.13 ^a	358.41±10.54 ^d	929.43±18.72 ^b
	N2	12.63±0.39 ^b	2.92±0.03 ^b	545.41±8.49 ^a	1 419.17±26.50 ^a
	N3	13.77±0.31 ^a	2.83±0.07 ^b	528.57±10.14 ^b	1 453.24±44.70 ^a
P1	N0	11.73±0.54 ^d	2.98±0.09 ^b	404.61±13.91 ^d	998.14±40.57 ^c
	N1	12.07±0.31 ^c	3.14±0.04 ^a	540.28±12.91 ^b	1 443.65±32.70 ^b
	N2	12.97±0.23 ^b	3.07±0.01 ^{ab}	513.44±5.22 ^c	1 442.43±24.74 ^b
	N3	14.69±0.15 ^a	3.15±0.03 ^a	567.15±6.48 ^a	1 849.33±32.81 ^a
P2	N0	12.61±0.22 ^c	2.89±0.04 ^c	372.05±9.00 ^d	955.98±19.74 ^d
	N1	13.26±0.59 ^c	3.40±0.06 ^b	415.98±22.02 ^c	1 321.41±24.63 ^c
	N2	14.02±0.45 ^b	3.40±0.07 ^b	535.12±21.96 ^b	1 798.22±19.11 ^b
	N3	15.00±0.22 ^a	3.79±0.23 ^a	712.30±14.17 ^a	2 848.67±28.53 ^a
P3	N0	12.81±0.05 ^c	3.14±0.11 ^a	347.16±9.96 ^d	985.12±56.51 ^d
	N1	14.08±0.54 ^b	2.97±0.10 ^a	455.91±29.81 ^c	1 341.15±58.48 ^c
	N2	14.63±0.65 ^b	2.75±0.05 ^b	675.49±28.75 ^b	1 909.38±34.51 ^b
	N3	15.70±0.08 ^a	3.03±0.14 ^a	736.06±3.18 ^a	2 465.86±22.66 ^a
F 值 F -value	N	128.24 **	13.49 **	654.97 **	2 758.43 **
	P	75.45 **	48.30 **	68.35 **	655.58 **
	N×P	1.22	15.75 **	73.94 **	221.02 **

注:1)P0、P1、P2和P3分别表示施磷量为0、45、90和120 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,N0、N1、N2和N3分别表示施氮量为0、60、120和180 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;2)不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note:1)P0,P1,P2 and P3 indicate that the phosphorus application amounts are 0,45,90 and 120 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, respectively. N0,N1,N2 and N3 indicate that the nitrogen application amounts are 0,60,120 and 180 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, respectively. 2) Different small letters indicate significant difference among treatments at 0.05 level. The same below.

N0处理高芥酸油菜的产量为942.35~998.14 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,N1、N2和N3处理高芥酸油菜产量分别达到929.43~1 443.65 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、1 419.17~1 909.38 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和1 453.24~2 848.67 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,平均值分别较N0处理增加29.73%、69.24%和122.00%(2020年)。经连续氮肥施用后不同氮水平下产量趋势相同,2021年N1、N2、N3处理高芥酸油菜产量的平均值分别较N0处理增加39.56%、78.68%和141.32%。施用磷肥会在一定程度提高高芥酸油菜产量,P0处理其产量为929.43~1 453.24 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,P1、P2和P3处理高芥酸油菜产量分别达到998.14~1 849.33 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、955.98~2 848.67 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和985.12~2 465.86 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,平均值分别较P0处理提高20.85%、45.95%、41.26%(2020年)和16.82%、40.59%、32.93%(2021年),可见过量增施磷肥(P3)会导致高芥酸油菜产量降低。高芥酸油菜产量也受氮磷互作效应的影响,在N0条件下施

用磷肥会提高高芥酸油菜产量,而在施氮(N1、N2、N3)条件下施用磷肥多会抑制高芥酸油菜产量的提高。

氮肥和磷肥对油菜单株角果数、每角果粒数和千粒重均有极显著影响(表2,表3)。N0处理高芥酸油菜的单株角果数为347.16~421.65个,N1、N2和N3处理每株角果数分别达到358.41~540.28个、513.44~675.49个和528.57~736.06个,各处理平均值分别较N0处理增加14.57%、46.85%和64.61%(2020年)。经连续氮肥施用后不同氮水平下单株角果数变化趋势相同。施用磷肥后显著提高高芥酸油菜单株角果数,P1、P2和P3处理单株角果数平均值分别较P0处理(358.41~545.41个)增加9.25%、9.78%和19.45%(2020年);高芥酸油菜单株角果数受氮磷互作效应的影响,在同等施氮条件下增施磷肥会提高高芥酸油菜单株角果数,2021年与2020年的规律基本一致。增施氮肥和磷肥能显著增加高芥酸油菜每角果粒数。N0处理高芥酸油菜的每角果粒数为10.84~12.81粒,N1、N2和N3处理每株角果数分别达到11.71~14.08粒、12.63~14.63粒和13.77~15.70粒,并在相同氮肥施用量下随施磷量的增加而增加;P0处理每角果粒数为10.84~13.77粒,P1、P2、P3处理每角果粒数分别达到11.73~14.69粒、12.61~15.00粒和12.81~15.70粒,并随施氮量的增加而增加,2021年与2020年规律一致。2020年P0处理千粒重为2.92~3.14g,P1、P2、P3处理千粒重分别为2.98~3.15g、2.98~3.79g、2.75~3.14g,千粒重平均值分别较P0处理提高4.43%、14.08%、0.52%。N0处理千粒重为2.89~3.14g,N1、N2、N3处理千粒重分别为2.97~3.14g、2.75~3.40g、2.89~3.79g,千粒重平均值分别较N0处理提高2.99%、2.99%、6.31%。2年规律基本一致,千粒重均随施氮量的增加而增加,随施磷量的增加呈先增加后降低的趋势,过量的施用磷肥会使千粒重降低。

表3 高芥酸油菜产量构成显著性分析(2021)

Table 3 Production composition of high erucic acid rape and significance analysis(2021)

处理 Treatment	每角果粒数 Seeds per pod	千粒重/g 1 000-seed weight	单株角果数 Effective pods per plant	产量/(kg·hm ⁻²) Yield	
P0	N0	10.87±0.05 ^d	2.91±0.03 ^b	428.72±4.45 ^b	954.85±22.70 ^b
	N1	11.45±0.27 ^c	3.17±0.14 ^a	363.63±5.24 ^c	927.36±90.66 ^b
	N2	12.59±0.40 ^b	3.04±0.01 ^{ab}	540.83±16.90 ^a	1 460.58±99.86 ^a
	N3	13.49±0.05 ^a	2.99±0.05 ^b	537.90±29.77 ^a	1 525.90±54.43 ^a
P1	N0	11.66±0.28 ^d	2.97±0.10 ^b	406.22±5.78 ^d	990.03±93.60 ^c
	N1	12.68±0.17 ^c	3.19±0.07 ^a	515.61±14.35 ^b	1 468.80±56.89 ^b
	N2	13.49±0.30 ^b	3.18±0.09 ^a	449.70±6.41 ^c	1 357.69±26.44 ^b
	N3	14.38±0.27 ^a	3.19±0.15 ^a	581.32±17.04 ^a	1 870.86±164.97 ^a
P2	N0	12.76±0.28 ^d	3.04±0.03 ^c	313.19±23.05 ^d	855.69±54.45 ^d
	N1	13.64±0.21 ^c	3.35±0.07 ^b	431.78±18.06 ^c	1 307.68±203.54 ^c
	N2	14.49±0.30 ^b	3.38±0.10 ^{ab}	514.02±12.16 ^b	1 773.21±47.55 ^b
	N3	15.11±0.39 ^a	3.53±0.13 ^a	772.07±25.88 ^a	2 908.34±10.35 ^a
P3	N0	12.67±0.23 ^c	2.67±0.26 ^a	346.85±7.02 ^d	818.93±39.48 ^d
	N1	14.40±0.24 ^b	2.94±0.23 ^a	461.21±10.75 ^c	1 347.68±305.22 ^c
	N2	14.80±0.25 ^b	2.82±0.27 ^a	644.44±11.09 ^b	1 875.90±119.11 ^b
	N3	15.68±0.28 ^a	2.95±0.08 ^a	748.73±16.72 ^a	2 429.36±383.17 ^a
F 值 F-value	N	222.64 **	10.11 **	57.57 **	156.65 **
	P	178.63 **	25.60 **	11.17 **	25.38 **
	N×P	1.99	1.02	4.32 **	13.26 **

2.2 高芥酸油菜品质对氮磷肥调控的响应

2.2.1 高芥酸油菜含油量对氮磷肥调控的响应 氮肥对高芥酸油菜含油量具有极显著影响(2020年, $F=49.86^{**}$;2021年, $F=52.38^{**}$),磷肥以及氮磷互作对高芥酸油菜的含油量影响不显著。高芥酸油菜的含油量随氮肥施用量的增加呈先增加后降低的趋势(图1),过量施氮对含油量存在一定的抑制效应。N0处理高芥酸油菜的平均含油量为38.39%,N1、N2和N3处理平均含油量分别达到39.91%、41.35%和39.67%,分别较N0处理增加2.52%、6.20%和1.89%(2020年)。经连续氮肥施用后不同氮水平下含油量趋势相同,2021年N1、N2、N3处理含油量分别较N0处理的平均值(39.47%)增加1.53%、4.31%和1.53%。因此在一定范围内施用氮肥能够起到提高高芥酸油菜含油量的作用,而过量的施用氮肥会抑制油菜脂肪酸的合成。

2.2.2 高芥酸油菜脂肪酸含量对氮磷肥调控的响应 氮肥对高芥酸油菜芥酸、亚油酸、硬脂酸含量具有显著或极显著影响,磷肥对高芥酸油菜芥酸、油酸、硬脂酸含量具有极显著影响,氮磷互作对芥酸、硬脂酸和花生烯酸含量产生显著或极显著影响(表4)。

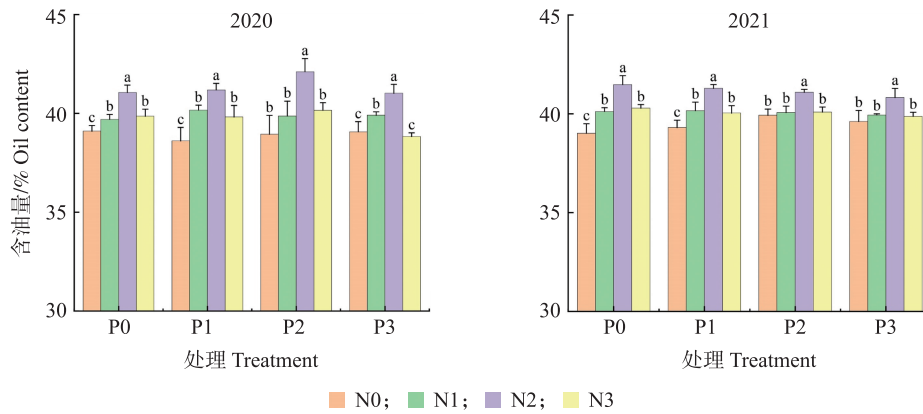


图 1 氮磷肥调控对高芥酸油菜含油量的影响

Fig. 1 Effect of nitrogen and phosphorus fertilizer regulation on oil content of high erucic acid rape

表 4 氮磷肥调控对高芥酸油菜品质影响的显著性分析 (F 值, 2020 年和 2021 年)

Table 4 Significant analysis of nitrogen and phosphorus fertilizer regulation on quality of high erucic acid rape (F-value, 2020 and 2021)

年份 Year	因素 Factor	芥酸 Erucic acid	油酸 Oleic acid	亚油酸 Linoleic acid	棕榈酸 Palmitic acid	硬脂酸 Stearic acid	亚麻酸 Linolenic acid	花生烯酸 Arachidonic acid
2020	N	38.69 **	0.51	2.43	1.78	164.99 **	3.02 *	1.81
	P	129.72 **	24.86 **	0.44	1.28	24.96 **	5.65 **	12.31 **
	N×P	15.38 **	1.16	1.99	1.75	10.38 **	1.52	9.89 **
2021	N	25.19 **	2.51	1.88	0.36	69.18 **	3.80 *	4.38 *
	P	73.44 **	10.16 **	1.04	2.32	3.73 *	9.17 **	14.71 **
	N×P	10.67 **	0.40	1.25	1.32	2.56 *	1.46	2.58 *

在相同施氮处理下,芥酸含量随施磷量的增加呈先增加后降低趋势,并在 P2 条件下芥酸含量最高(图 2)。在 P0 处理下,随施氮量的增加油菜中的芥酸含量增加;在 N3 处理下芥酸含量最高,较 N0 处理增加 10%。在 P1、P2、P3 处理下,芥酸含量随施氮量的增加呈先增加后降低趋势,3 个磷肥处理均在 N2 处理下芥酸含量最高。在相同施磷量条件下,油酸含量在氮肥处理间未达到显著水平;在相同施氮条件下,油酸含量随施磷量的增加而降低,且均在 P0 处理下含量最高。氮肥和磷肥对亚麻酸含量的影响显著。花生烯酸含量 2 年的表现不一致,但磷肥的施用对花生烯酸含量影响极显著;氮磷互作对花生烯酸含量的影响也达到显著或极显著水平。亚油酸和棕榈酸含量受氮磷及其互作因素的影响不显著。表明氮肥和磷肥对油菜各类脂肪酸的影响各不相同,而芥酸含量 2 年均均在 N2P2 处理下最高。

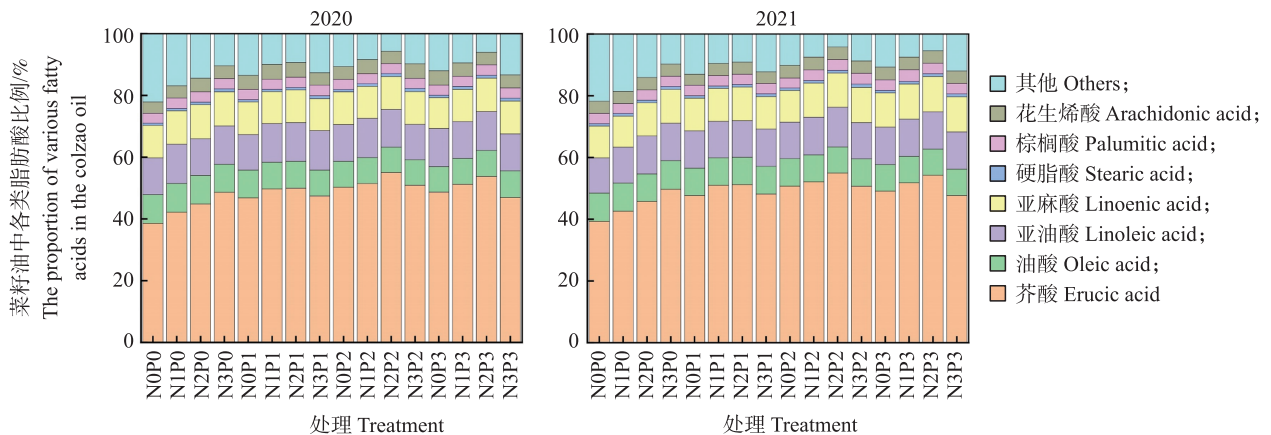


图 2 高芥酸油菜脂肪酸含量堆积图

Fig. 2 Accumulation diagram of fatty acid in high erucic acid rape

2.2.3 菜籽油及芥酸产量对氮磷肥的响应 由表 5 可见:菜籽油和芥酸产量均随氮肥施用量的增加而显著增加,2020 年 N0 处理高芥酸油菜的菜籽油产量为 368.41~385.56 kg·hm⁻², N1、N2 和 N3 处理菜籽油产量分别为 368.92~579.88 kg·hm⁻²、582.74~783.31 kg·hm⁻²和 579.18~1 144.00 kg·hm⁻², 平均菜籽油产量

分别较 N0 处理增加 33.10%、79.86% 和 126.17%；N0 处理芥酸产量为 154.14~191.38 kg·hm⁻²，N1、N2 和 N3 处理芥酸产量分别为 164.99~299.04 kg·hm⁻²、263.41~336.83 kg·hm⁻² 和 283.07~531.40 kg·hm⁻²，分别比 N0 处理增加 34.28%、79.86% 和 130.08%。经连续氮肥施用后不同氮水平下产量趋势相同，2021 年 N1、N2、N3 处理高芥酸油菜菜籽油产量分别较 N0 处理(357.04 kg·hm⁻²) 增加 41.72%、86.29% 和 145.00%，芥酸产量分别较 N0 处理(171.20 kg·hm⁻²) 增加 47.29%、101.78% 和 150.94%。施用磷肥会在一定程度上提高高芥酸油菜菜籽油和芥酸产量，2020 年 P1、P2 和 P3 处理菜籽油产量分别较 P0 处理(474.81 kg·hm⁻²) 提高 20.90%、47.45%、40.11%，2021 年比 P0 处理(491.21 kg·hm⁻²) 提高 16.49%、40.48%、32.20%；2020 年芥酸产量分别较 P0 处理(216.41 kg·hm⁻²) 提高 28.53%、43.23%、36.88%，2021 年较 P0 处理(226.66 kg·hm⁻²) 提高 25.20%、58.69%、44.84%。高芥酸油菜菜籽油和芥酸产量受氮磷互作效应的影响，在 N0 条件下施用磷肥会提高菜籽油和芥酸产量，而在施氮(N1、N2、N3) 条件下施用磷肥多会抑制菜籽油和芥酸产量的提高。

表 5 氮磷肥调控的高芥酸油菜菜籽油及芥酸产量的影响

Table 5 Effect of nitrogen and phosphorus fertilizer regulation on rapeseed oil and erucic acid yield of high erucic acid rape

处理 Treatment	2020		2021		
	菜籽油产量/(kg·hm ⁻²) Rapeseed oil yield	芥酸产量/(kg·hm ⁻²) Erucic acid yield	菜籽油产量/(kg·hm ⁻²) Rapeseed oil yield	芥酸产量/(kg·hm ⁻²) Erucic acid yield	
N0	P0	368.41±5.81 ^a	154.14±4.73 ^a	372.51±9.10 ^a	165.82±12.98 ^a
	P1	385.56±22.55 ^a	191.38±40.25 ^a	389.44±5.11 ^a	186.22±24.31 ^a
	P2	372.21±3.51 ^a	158.58±22.75 ^a	341.71±3.54 ^a	173.30±10.24 ^a
	P3	384.74±17.40 ^a	179.35±19.52 ^a	324.50±3.26 ^a	159.46±14.57 ^a
N1	P0	368.92±5.11 ^c	164.99±34.84 ^c	371.92±21.11 ^c	157.29±20.64 ^b
	P1	579.88±10.91 ^a	299.04±17.08 ^a	589.67±23.03 ^a	300.69±10.26 ^a
	P2	526.95±19.21 ^b	221.95±81.81 ^b	523.98±13.37 ^b	273.36±46.42 ^a
	P3	535.31±24.06 ^b	231.75±122.34 ^b	538.37±18.82 ^b	277.29±52.83 ^a
N2	P0	582.74±10.69 ^b	263.41±38.43 ^b	605.65±18.28 ^b	277.98±35.70 ^b
	P1	594.22±13.68 ^b	301.12±12.75 ^b	560.61±26.37 ^b	287.21±4.45 ^b
	P2	757.25±15.97 ^a	327.88±21.16 ^a	728.58±4.96 ^a	401.12±20.36 ^a
	P3	783.31±21.99 ^a	336.83±43.59 ^a	765.62±13.05 ^a	415.47±23.60 ^a
N3	P0	579.18±17.21 ^d	283.09±20.89 ^d	614.76±15.97 ^d	305.54±11.73 ^c
	P1	736.51±19.66 ^c	321.02±69.66 ^c	749.21±11.40 ^c	360.98±32.18 ^c
	P2	1 144.00±12.88 ^a	531.40±10.66 ^a	1 165.96±20.29 ^a	590.96±15.84 ^a
	P3	957.58±11.20 ^b	436.95±157.65 ^b	969.00±12.11 ^b	460.94±71.56 ^b
F 值 F-value	N	2 095.16 ^{**}	469.06 ^{**}	43.59 ^{**}	41.67 ^{**}
	P	493.52 ^{**}	85.94 ^{**}	12.63 ^{**}	12.46 ^{**}
	N×P	162.86 ^{**}	24.72 ^{**}	157.55 ^{**}	157.21 ^{**}

3 讨论

在一定范围内合理施用氮肥可以显著提高油菜地上部、地下部各器官的生物量^[17-18]。邹小云等^[8]研究表明,氮、磷、钾肥缺少任何一种都会导致油菜明显减产,其中缺少氮肥的减产效果最为严重;氮肥的合理施用能够促进油菜对氮、磷和钾的吸收积累,进而提高油菜产量;另外,氮肥是油菜生产中的养分限制因子,氮素的缺乏也会导致磷肥的效果发挥不到最佳。黄正等^[13]研究表明,油菜季不施磷肥相比于油菜季施磷肥干物质积累量显著降低。本试验中,施用氮磷肥显著提高油菜的产量,当施磷量不超过 90 kg·hm⁻² 时能够促进油菜产量的形成;当施磷量超过 90 kg·hm⁻² 时会抑制油菜的产量,并在 N3P2 处理下产量最高,2020 年和 2021 年产量最高为 2 848.7 和 2 908.3 kg·hm⁻²。合理施用氮磷肥有利于油菜干物质积累,能够显著增加油菜的单株角果数、每角果粒数和千粒重,从而使产量显著增加。

针对低芥酸型油菜品种,邹娟等^[19]、李小勇等^[20]和 Zapletalová 等^[21]研究表明,在一定范围内适当增加氮肥的施用量能够提高油菜的含油量,过多施氮反而会降低含油量和芥酸含量降低,可能是过量施氮限制了碳代谢,从而导致含油量降低,蛋白质含量增加^[22-23]。适量施用磷肥也可以增加含油量,但过量的磷肥能够降低芥酸的含量^[12]。在本研究条件下,氮磷肥的施用对含油量和芥酸含量的影响不同,氮肥对含油量的影响显著,磷肥对其影响相对较小,在一定范围内增施氮肥会显著提高含油量,而当施氮量超过

120 kg·hm⁻²时含油量开始降低,可能是土壤中氮含量的增加有利于蛋白质的合成,抑制了碳代谢的过程,从而导致含油量的降低。磷肥对芥酸含量的影响大于氮肥,在本试验中,当磷肥超过 90 kg·hm⁻²时芥酸的含量下降。油菜籽脂肪酸中主要由芥酸、花生烯酸、油酸、亚油酸、硬脂酸、棕榈酸组成,油酸和棕榈酸通过碳链延长分别形成花生烯酸和硬脂酸,花生烯酸进一步延长形成芥酸,硬脂酸可以通过减饱和作用形成油酸,油酸通过减饱和作用形成亚油酸,亚油酸通过减饱和作用形成亚麻酸^[1,24]。

工业型高芥酸油菜的经济效益主要取决于芥酸的产量。因此,增加油菜脂肪酸形成过程中碳链的延长,减少油菜的去饱和作用更有利于芥酸的形成。本研究中,在一定范围内施用氮磷肥显著提高了花生烯酸和芥酸的含量。因此,不同的氮磷肥施用量并没有影响脂肪酸的去饱和途径,芥酸含量增加的原因可能是合理施用氮肥和磷肥有利于碳链的延长从而有助于芥酸的形成。目前选育的双低型油菜的菜籽主要用来榨取食用油,由于芥酸是一种不利于人体健康的脂肪酸,其含量越低越好。通过本研究可以看出,为保证双低油菜的品质,适当减少氮磷肥的施用有利于降低菜籽油中的芥酸含量。而工业型油菜的主要价值在于芥酸的提炼和再加工,因此通过合理的施肥增加其菜籽油产量和芥酸含量能够提高其经济效益。因‘绵油 309’为芥酸加工型油菜,为保证其经济效益的最大化必须在保证产量的前提下尽量使其含油量和芥酸含量达到最大。本研究中,当施氮量为 180 kg·hm⁻²、施磷量为 90 kg·hm⁻²时,芥酸的产量最高。综上所述,合理施用氮磷肥能够有效改善菜籽的品质,增加其含油量和芥酸含量,显著提高高芥酸油菜的芥酸产量,从而增加经济效益。因此,在‘绵油 309’生产过程中,当施氮量为 180 kg·hm⁻²以及施磷量为 90 kg·hm⁻²时,可以实现较高的产量和较好的品质。

参考文献 References:

- [1] Wang P D, Xiong X J, Zhang X B, et al. A review of erucic acid production in Brassicaceae oilseeds: progress and prospects for the genetic engineering of high and low-erucic acid rapeseeds (*Brassica napus*) [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 899076.
- [2] 陈涛. 绵阳市工业高芥酸油菜产业基地发展思考[J]. *农业科技通讯*, 2015(10): 41-42.
Chen T. Thoughts on the development of high erucic acid rapeseed industrial base in Mianyang city [J]. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, 2015(10): 41-42 (in Chinese).
- [3] 汤天泽, 蒙大庆, 李芝凡, 等. 工业专用特高芥酸杂交油菜新品种绵油 309 的选育[J]. *中国种业*, 2011(6): 70.
Tang T Z, Meng D Q, Li Z F, et al. Breeding of a new hybrid rapeseed variety Mianyou 309 with extra-high erucic acid for industrial use [J]. *China Seed Industry*, 2011(6): 70 (in Chinese).
- [4] Omid H, Tahmasebi Z, Badi H A N, et al. Fatty acid composition of canola (*Brassica napus* L.), as affected by agronomical, genotypic and environmental parameters [J]. *Comptes Rendus Biologies*, 2010, 333(3): 248-254.
- [5] 王伟妮, 鲁剑巍, 李银水, 等. 当前生产条件下不同作物施肥效果和肥料贡献率研究[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(19): 3997-4007.
Wang W N, Lu J W, Li Y S, et al. Study on fertilization effect and fertilizer contribution rate of different crops at present production conditions [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(19): 3997-4007 (in Chinese with English abstract).
- [6] 李慧, 马常宝, 鲁剑巍, 等. 中国不同区域油菜氮磷钾肥增产效果[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(9): 1837-1847.
Li H, Ma C B, Lu J W, et al. Increasing effect of N, P and K fertilizer on rapeseed in different regions of China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(9): 1837-1847 (in Chinese with English abstract).
- [7] 鲁剑巍, 任涛, 丛日环, 等. 我国油菜施肥状况及施肥技术研究展望[J]. *中国油料作物学报*, 2018, 40(5): 712-720.
Lu J W, Ren T, Cong R H, et al. Prospects of research on fertilization status and technology of rapeseed in China [J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2018, 40(5): 712-720 (in Chinese with English abstract).
- [8] 邹小云, 陈伦林, 李书宇, 等. 氮、磷、钾、硼肥施用对甘蓝型杂交油菜产量及经济效益的影响[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(5): 917-924.
Zou X Y, Chen L L, Li S Y, et al. Effect of nitrogen, phosphorus, potassium, and boron fertilizers on yield and profit of hybrid rapeseed (*Brassica napus* L.) [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(5): 917-924 (in Chinese with English abstract).
- [9] 曾宇, 雷雅丽, 李京, 等. 氮、磷、钾用量与种植密度对油菜产量和品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(1): 146-153.
Zeng Y, Lei Y L, Li J, et al. Effects of application amounts of nitrogen, phosphate and potassium and planting density on yield and quality of rapeseed [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(1): 146-153 (in Chinese with English abstract).
- [10] 韩自行, 张长生, 王积军, 等. 氮肥运筹对稻茬免耕油菜农艺性状及产量的影响[J]. *作物学报*, 2011, 37(12): 2261-2268.
Han Z H, Zhang C S, Wang J J, et al. Effects of nitrogen application on agronomic traits and yield of rapeseed in no-tillage rice stubble field [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(12): 2261-2268 (in Chinese with English abstract).
- [11] 李小勇, 黄威, 刘红菊, 等. 不同轮作模式下氮肥施用对油菜产量形成及养分利用的影响[J]. *中国农业科学*, 2023, 56(6): 1074-1085.
Li X Y, Huang W, Liu H J, et al. Effect of nitrogen rates on yield formation and nitrogen use efficiency in oilseed under different cropping systems [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(6): 1074-1085 (in Chinese with English abstract).
- [12] 刘红恩, 胡承孝, 袁兆君, 等. 钼磷配合施用对甘蓝型油菜产量和籽粒品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(3): 678-688.

- Liu H E, Hu C X, Nie Z J, et al. Interactive effects of molybdenum and phosphorus fertilizers on grain yield and quality of *Brassica napus* [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(3): 678–688 (in Chinese with English abstract).
- [13] 黄正, 张琪, 周宁宁, 等. 油菜季施磷结合秸秆还田提高油菜-水稻轮作体系的产量和磷肥利用率[J]. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(8): 1409–1420.
- Huang Z, Zhang Q, Zhou N N, et al. Phosphorus application and straw incorporation increase yield and phosphorus utilization in a rape-rice rotation system [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(8): 1409–1420 (in Chinese with English abstract).
- [14] 张文学, 李殿荣. 高产田氮磷钾肥对油菜产量性状的效应[J]. *中国农学通报*, 2021, 37(6): 37–43.
- Zhang W X, Li D R. NPK fertilizer in high yield field: effect on rapeseed yield characters [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2021, 37(6): 37–43 (in Chinese with English abstract).
- [15] 张辉, 朱德进, 黄卉, 等. 不同施肥处理对油菜产量及品质的影响[J]. *土壤*, 2012, 44(6): 966–971.
- Zhang H, Zhu D J, Huang H, et al. Effects of different fertilizer treatments on yield and quality of rapeseed (*Brassica napus* L.) [J]. *Soils*, 2012, 44(6): 966–971 (in Chinese with English abstract).
- [16] 李冲, 王学春, 杨国涛, 等. 杂交水稻产量及稻米品质对弱光胁迫的响应[J]. *应用与环境生物学报*, 2022, 28(6): 1415–1421.
- Li C, Wang X C, Yang G T, et al. Response of the grain yield and quality of hybrid rice to weak light stress [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2022, 28(6): 1415–1421 (in Chinese with English abstract).
- [17] 刘波, 鲁剑巍, 李小坤, 等. 不同栽培模式及施氮方式对油菜产量和氮肥利用率的影响[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(18): 3551–3560.
- Liu B, Lu J W, Li X K, et al. Effects of different cultivations and nitrogen application methods on seed yield and nitrogen use efficiency of oilseed rape (*Brassica napus* L.) [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(18): 3551–3560 (in Chinese with English abstract).
- [18] Wang Y, Liu B, Ren T, et al. Establishment method affects oilseed rape yield and the response to nitrogen fertilizer [J]. *Agronomy Journal*, 2014, 106: 131–142.
- [19] 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).
- [20] 李小勇, 顾焜明, 刘康, 等. 施氮量对迟播油菜氮素利用和产量品质的影响[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(17): 3726–3736.
- Li X Y, Gu C M, Liu K, et al. Effects of nitrogen application rate on nitrogen use efficiency, yield and quality of late sowing rapeseed [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(17): 3726–3736 (in Chinese with English abstract).
- [21] Zapletalová A, Ducsay L, Varga L, et al. Influence of nitrogen nutrition on fatty acids in oilseed rape (*Brassica napus* L.) [J]. *Plants*, 2021, 11(1): 44.
- [22] Brennan R F, Mason M G, Walton G H. Effect of nitrogen fertilizer on the concentrations of oil and protein in canola (*Brassica napus* L.) seed [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2000, 23(3): 339–348.
- [23] 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 [J]. *Field Crops Research*, 2005, 94(2/3): 103–113.
- [24] 武玉花, 卢长明, 吴刚, 等. 植物芥酸合成代谢与遗传调控研究进展[J]. *中国油料作物学报*, 2005, 27(2): 82–86.
- Wu Y H, Lu C M, Wu G, et al. Research progress on anabolism and genetic regulation of erucic acid in plants [J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2005, 27(2): 82–86 (in Chinese).

责任编辑: 范雪梅