农业资源与环境学报 中文核心期刊 中国科技核心期刊
JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT
欢迎投稿 http://www.aed.org.cn

氮肥施用对直播冬油菜产量及氮肥利用率的影响

李敏，韩上，武际，王慧，唐杉，程文龙，石祖梁

引用本文:
李敏, 韩上, 武际, 等. 氮肥施用对直播冬油菜产量及氮肥利用率的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(1): 51-58.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0330

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

控释尿素对春玉米产量、氮效率及氮素平衡的影响
姬景红, 李玉影, 刘双全, 佟玉欣, 任桂林, 李杰, 刘颖, 张明怡
农业资源与环境学报. 2017, 34(2): 153-160 https://doi.org/10.13254/j.jare.2016.0231

稳定氮肥用量和施用方式对水稻产量和氮肥效率的影响
李敏, 叶舒娅, 刘枫, 郭熙盛, 武际, 黄义德, 郭肖颖
农业资源与环境学报. 2015(6): 559-564 https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0157

应用于水稻生产的增效减负环保型施肥技术比对--以宁夏引黄灌区为例
张爱平, 高霁, 刘汝亮, 陈哲, 杨世琦, 杨正礼, 张晴雯
农业资源与环境学报. 2015(2): 175-184 https://doi.org/10.13254/j.jare.2014.0334

控释尿素对水稻生理特性、氮肥利用率及土壤硝态氮含量的影响
杜君, 孙克刚, 张运红, 和爱玲, 孙克振
农业资源与环境学报. 2016, 33(2): 134-141 https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0233

氮肥利用率测定规范化探讨
田昌玉, 林治安, 赵秉强, 车升国, 孙文彦, 李志杰
农业资源与环境学报. 2016, 33(4): 327-333 https://doi.org/10.13254/j.jare.2016.0025

关注微信公众号，获得更多资讯信息

李 敏, 韩 上, 武 际, 等. 氮肥施用对直播冬油菜产量及氮肥利用率的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(1): 51-58.
LI Min, HAN Shang, WU Ji, et al. Effect of nitrogen application on yield and nitrogen fertilization efficiency in direct-sown winter oilseed rape (*Brassica napus* L.)[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(1): 51-58.

氮肥施用对直播冬油菜产量及氮肥利用率的影响

李 敏[1,2,3], 韩 上[1,2], 武 际[1,2*], 王 慧[1,2], 唐 杉[1,2], 程文龙[1,2], 石祖梁[4]

(1.安徽省农业科学院土壤肥料研究所, 合肥 230031; 2.养分循环与资源环境安徽省重点实验室, 合肥 230031; 3.安徽农业大学农学院, 合肥 230036; 4.农业农村部农业生态与资源保护总站, 北京 100125)

摘 要:为探明安徽省直播冬油菜种植中适宜的氮肥用量、氮肥种类和施氮方式,通过田间小区试验,研究尿素不同用量及等氮量尿素和控释尿素不同施用方式对直播冬油菜产量、氮肥累积量及氮肥利用率的影响。结果表明:施氮水平和施氮方式对直播冬油菜产量具有显著影响,成株率与产量之间呈显著正相关,施氮量180 kg N·hm^{-2}条件下,尿素分次施用处理(N180)和控释尿素一次性施用处理(CRU180)在生育中后期能有效提高直播冬油菜密度。施氮量240 kg N·hm^{-2}、尿素分次施用处理(N240)角壳和茎秆氮素累积量分配比例增加,籽粒分配比例减少,氮肥表观利用率、氮肥农学效率、氮肥生理效率和氮肥偏生产力显著降低,籽粒产量不增反降,较CRU180和N180分别降低2.87%和9.67%。各施氮处理中,N180处理产量最高,较其他施氮处理显著增产7.53%~82.15%。施氮量180 kg N·hm^{-2}条件下,相比尿素一次性施用处理(U180),CRU180和N180显著增产8.53%和16.69%,籽粒氮素累积量显著增加8.80%和16.02%,氮肥表观利用率显著增加11.68%和14.30%,氮素农学效率显著增加12.53%和24.46%,氮素生理效率增加0.74%和9.13%,氮肥偏生产力显著增加8.59%和16.76%。综合本试验直播冬油菜产量、氮素累积量和氮肥利用率结果来看,合理的氮肥用量和氮肥品种可以有效增加直播冬油菜的成株率和氮素累积量,进而增加产量、提高氮肥利用率。安徽省直播冬油菜施氮量180 kg N·hm^{-2},尿素分次施用和控释尿素一次性施用,均能达到产量和氮肥利用率的双向提升。考虑到直播冬油菜轻简化发展大趋势,建议采用控释尿素一次性基施。

关键词:冬油菜;直播种植;氮肥用量;控释尿素;产量;氮肥利用率
中图分类号:S565.4;S143.1 **文献标志码**:A **文章编号**:2095-6819(2020)01-0051-08 **doi**: 10.13254/j.jare.2018.0330

Effect of nitrogen application on yield and nitrogen fertilization efficiency in direct-sown winter oilseed rape (*Brassica napus* L.)

LI Min[1,2,3], HAN Shang[1,2], WU Ji[1,2*], WANG Hui[1,2], TANG Shan[1,2], CHENG Wen-long[1,2], SHI Zu-liang[4]

(1.Institute of Soil and Fertilizer, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230031, China; 2.Anhui Key Laboratory of Nutrient Cycling, Resources and Environment, Hefei 230031, China; 3.College of Agronomy, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 4.Rural Energy & Environment Agency, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100125, China)

Abstract: The aim of this study is to investigate the reasonable dosage of nitrogen fertilizer, nitrogen fertilizer type and application methods for direct-sown winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) in Anhui Province. A field experiment was conducted to study the yield, nitrogen accumulation and nitrogen fertilization efficiency in direct-sown winter oilseed rape with different urea application dosages, different application methods of urea and controlled-release urea at the same dosages. The results showed that there were significant effects of N application dosages and methods on yields of direct-sown winter oilseed rape. The manure plant rate had a significant positive correlation with the

收稿日期:2018-11-22 **录用日期**:2019-03-18
作者简介:李 敏(1979—),女,安徽阜阳人,博士研究生,主要从事新型肥料和作物施肥技术研究。E-mail:limin791025@126.com
***通信作者**:武 际 E-mail:wuji338@163.com
基金项目:安徽省重点研究与开发计划项目(1704e1002237);安徽省科技重大专项(17030701055);国家绿肥产业技术体系(CARS-22);安徽省农业科学院科研团队(2019YL044)
Project supported: Key Research and Development Projects of Anhui Province(1704e1002237); The Special Fund for Key Program of Science and Technology of Anhui Province, China(17030701055); China's Agricultural Research System-Green Manure(CARS-22); Research Team of Anhui Academy of Agricultural Sciences(2019YL044)

rape seed yield. Split application urea(N180) and one-off fertilization of controlled-release urea(CRU180) at the same N fertilizer amount (180 kg N·hm^{-2}) increased the density at the middle and later stages of direct-sown winter oilseed rape. The high nitrogen rate(N240) increased the distribution proportion of nitrogen accumulation in shell and stem, decreased the proportion in seed and significantly decreased the recovery efficiency of applied N(REN), the agronomic efficiency of applied N(AEN), the N physiological efficiency(PEN) and the nitrogen partial factor productivity(PFPN). Compared with the treatments of N180 and CRU180, the yields of N240 decreased by 2.87% and 9.67%, respectively. Compared with other nitrogen treatments, the highest yield was N180, which significantly increased by 7.53%~82.15%. Compared with the one-off fertilization of 180 kg N·hm^{-2} urea(U180), the yields, N accumulation of seed, REN, AEN, PEN and PFPN of CRU180 and N180 increased significantly by 8.53% and 16.69%, 8.80% and 16.02%, 11.68% and 14.30%, 12.53% and 24.46%, 0.74% and 9.13%, 8.59% and 16.76%, respectively. The rational nitrogen application dosage and application methods could increase the mature plant rate and N accumulation of direct-sown winter oilseed rape, which further increased the yield and nitrogen use efficiency. Based on the yields, nitrogen accumulation and nitrogen use efficiency, the optimum N fertilizer application dosage in Anhui Province was found to be 180 kg N·hm^{-2}, which included N180 and CRU180. Considering the labor cost of topdressing fertilizer, one-off fertilization of controlled-release urea is an alternative N management for direct-sown winter oilseed rape.

Keywords: winter oilseed rape; direct-sown planting; nitrogen fertilizer dosage; controlled-release urea; yield; nitrogen use efficiency

油菜是我国第一大油料作物，种植面积和产量均居世界首位[1]，菜籽油占我国油料作物产油量的57%[2]，对油料安全起着至关重要的作用。长江流域作为我国油菜最重要的种植区域，安徽省在其中占有举足轻重的作用，常年油菜种植面积和产量仅次于湖北、湖南和四川，居全国第四位[3]。近年来随着农村劳动力短缺现象不断加剧、劳动力用工成本不断上涨及机械化种植技术不断推广，传统的油菜育苗移栽方式受到限制，油菜生产以直播为核心的轻简化栽培技术迅速发展。2010年以来，长江流域直播油菜和移栽油菜种植比例就已经各占一半，且直播比例呈逐年增加趋势[4]。油菜直播种植操作简单、省时省工、有利于机械化收种且能有效利用冬闲田，已成为冬油菜发展的主要方向[5]。直播油菜较移栽油菜根系发达，主根粗长，吸收深层土壤养分和水分能力较强，耐贫瘠、抗旱、抗倒能力增强，能有效减轻病害[6-7]，且直播油菜生育期较短，可以有效地解决熟制和茬口问题[2]。冬油菜直播作为一种轻简化高效的油菜种植技术在我国油菜种植区迅速推广应用，精量直播、一播全苗和收获期较高的有效成株数是这项技术的前提。

氮素营养是油菜产量最重要的限制因子之一，合理的氮肥施用是油菜产量和品质的重要保证。油菜生产中氮肥施用不足或过量现象普遍存在[8]，不合理的氮肥施用直接影响了油菜产量和氮肥利用率，提高油菜产量和氮肥利用率的关键在于协调油菜氮素需求和外源氮素供应的关系[9]。合理施用氮肥可使油菜显著增产，有效提高氮肥利用率[10-12]。以往研究多集中在移栽油菜种植过程中氮肥施用效果，对直播冬油菜研究相对较少。适宜氮肥用量和氮肥品种选择是直播冬油菜种植关键技术之一，既可有效提高直播冬油菜籽粒产量，又能提高氮肥利用率，亦是油菜轻简化栽培养分管理的重要内容[13]。本研究以直播冬油菜为对象，探究不同用量的尿素及等氮量尿素和控释尿素施用方式对直播冬油菜产量、氮素累积量及氮肥利用率的影响，推荐适宜的氮肥用量、氮肥品种及施氮方式，以期为直播冬油菜合理施用氮肥提供理论基础和数据支持。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

田间试验位于安徽省油菜主产区，该地区属北亚热带季风气候，四季分明、雨量适中、光照充足、季风明显、无霜期长。当地习惯种植制度为水稻-油菜轮作，前茬水稻产量9600 kg·hm^{-2}。供试土壤为水稻土，0~20 cm土壤基本理化性质：有机质21.4 g·kg^{-1}、全氮1.17 g·kg^{-1}、速效磷45.9 mg·kg^{-1}、速效钾145.0 mg·kg^{-1}、有效硼0.26 mg·kg^{-1}、pH 6.20。

试验供试油菜品种为荣华油6号，为当地主推品种，播种量6 kg·hm^{-2}。试验于2015年10月1日整地划小区，10月2日施肥并进行油菜人工撒播，10月26日追施提苗肥，12月24日追施越冬肥，2016年3月8日追施薹肥，6月12日收获。各小区单打单收分别计产。整个试验过程中的田间试验管理与当地农民习惯保持一致。

1.2 试验设计

试验共设7个处理：①不施氮肥空白(CK)；②氮

肥用量60 kg N·hm^{-2},分次施用(N60);③氮肥用量120 kg N·hm^{-2},分次施用(N120);④氮肥用量180 kg N·hm^{-2},分次施用(N180);⑤氮肥用量240 kg N·hm^{-2},分次施用(N240);⑥氮肥用量180 kg N·hm^{-2},一次性施用(U180);⑦控释氮肥用量180 kg N·hm^{-2},一次性施用(CRU180)。氮肥为尿素(含N 46.0%),控释氮肥为控释尿素(含N 43.0%,控释期为90 d);磷肥为过磷酸钙(含P_2O_5 12%),施用量90 kg·hm^{-2};钾肥为氯化钾(含K_2O 60%),施用量120 kg·hm^{-2};硼肥为硼砂(含B 10.8%),施用量15 kg·hm^{-2}。肥料施用量均以纯养分计。处理②~⑤尿素按50%基肥+20%苗肥(播种后40 d)+15%越冬肥(播种后100 d)+15%薹肥(抽薹初期)的比例分次施用。各处理除氮肥不同(施氮量、氮肥种类或施用方法)外,磷、钾、硼肥全部作基肥一次性施用。小区面积为8 m×2.5 m=20 m^2,3次重复,随机区组排列。

1.3 样品采集与测定

土壤基本理化性质:在水稻试验开始前,以整个试验田块为采样单元,采用"S"型取样的方法在试验田块内采集0~20 cm土层5个点土样,混匀风干过筛后备用。土壤有机质采用重铬酸钾容量法测定;全氮采用浓H_2SO_4消化-半微量凯氏法测定;速效磷采用0.5 mol·L^{-1} $NaHCO_3$浸提-钼锑抗比色法测定;速效钾采用1 mol·L^{-1} NH_4Ac浸提-火焰光度法测定;有效硼采用沸水浸提-甲亚胺比色法测定;pH按照水土比2.5∶1,pH计测定[14]。

油菜生长情况调查:油菜播种后,记录固定样方(0.36 m^2)内油菜出苗情况,计算出苗率。油菜播种16、32、63、95、143、174、234 d调查固定样方内油菜株数,计算密度。油菜收获前1 d在固定样方中调查油菜株数,计算成株率。

油菜植株样品采集测定:油菜成熟期每个小区随机选择0.25 m^{2}油菜,风干后将油菜按照籽粒、角壳和茎秆分开后称质量、烘干和粉碎。采用浓H_2SO_4-H_2O_2消化,凯氏定氮法测定植株各部分氮含量。

1.4 计算方法[15-16]

出苗率(Emergence rate,ER)=样方内出苗数/样方内种子数×100%

成株率(Mature plant rate,MPR)=样方内成株数/样方内出苗数×100%

收获指数(Harvest index,HI,kg·kg^{-1})=籽粒产量/地上部生物量

氮肥表观利用率(Recovery efficiency of applied N,REN)=(施氮区植株地上部总吸氮量-不施氮区植株地上部总吸氮量)/氮肥用量×100%

氮肥农学效率(Agronomic efficiency of applied N,AEN,kg·kg^{-1})=(施氮区产量-不施氮区产量)/氮肥用量

氮肥生理效率(Physiological efficiency of applied N,PEN,kg·kg^{-1})=(施氮区产量-不施氮区产量)/(施氮区植株地上部总吸氮量-不施氮区植株地上部总吸氮量)

氮肥偏生产力(Partial factor productivity of applied N,PFPN,kg·kg^{-1})=施氮区产量/氮肥用量

1.5 数据处理

试验数据利用Excel软件进行计算处理,采用SPSS 17.0进行数据的统计分析,结果则采用LSD法在α=0.05水平上进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 不同氮肥处理对直播冬油菜产量的影响

施用氮肥显著提高直播冬油菜籽粒、角壳和茎秆产量(表1)。油菜籽粒产量随着氮肥用量的增加呈先增后减变化趋势,分次施氮肥用量180 kg N·hm^{-2}处理N180产量最高,较其他施氮处理显著增产7.53%~82.15%。角壳产量随着施氮量增加呈增加趋势,分次施氮肥用量240 kg N·hm^{-2}处理N240产量最高,显著高于其他处理。茎秆产量以控释尿素一次性施用CRU180处理为最高;氮肥用量180 kg N·hm^{-2}条件下,一次性施用控释尿素、分次施用尿素和一次性施用尿素三者茎秆产量无显著性差异。尿素分次施用氮肥用量180 kg N·hm^{-2}处理N180收获指数最高,但与分次施氮肥用量120、240 kg N·hm^{-2}处理N120、N240均无显著差异。从本试验直播冬油菜产量和收获指数来看,低氮(N60)不能发挥油菜的高产潜力,高氮(N240)可能因油菜对氮素的过量吸收导致高呼吸消耗,从而加剧油菜病虫害和倒伏,进而降低油菜生物学产量[17],一次性施用尿素也因前期氮素损失而不能达到高产目标。

2.2 不同氮肥处理对直播冬油菜生长过程中密度的影响

图1直播冬油菜密度动态变化结果表明,不同处理间存在差异。种植16 d低氮量N60处理密度最高,且随着氮肥用量的增加呈下降趋势,U180处理最低;随着生育进程推进,N180处理和CRU180处理油菜密度呈逐渐增加趋势,到95 d后超过其他处理,之后一直高于其他施氮处理,两者差异不大;至234 d,

表1 不同氮肥处理直播冬油菜的产量

Table 1 Yield of direct-sown winter oilseed rape under different nitrogen treatments

处理Treatments	籽粒Grain/kg·hm^{-2}	角壳Shell/kg·hm^{-2}	茎秆Stem/kg·hm^{-2}	收获指数Harvest index/kg·kg^{-1}
CK	686±16.02f	671±61.60f	1062±47.53d	0.28±0.02c
N60	1397±67.13e	1355±20.77e	2181±285.61c	0.28±0.01c
N120	2123±133.57d	1828±58.04d	2819±112.90b	0.31±0.01ab
N180	2545±56.92a	2143±46.14bc	3378±26.05a	0.32±0.00a
N240	2299±83.18bc	2335±53.14a	2873±157.70b	0.31±0.00a
U180	2181±112.55cd	2089±85.46c	3284±60.06a	0.29±0.01bc
CRU180	2367±64.91b	2213±42.63b	3506±86.39a	0.29±0.01bc

注:同列不同小写字母表示处理间差异达5%显著水平。下同。

Note: Different letters in a column indicate significant difference at the 5% probability level among treatments. The same below.

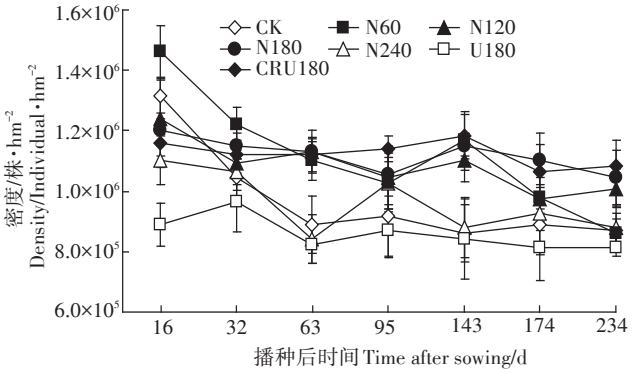

图1 直播冬油菜密度变化

Figure 1 Changes of density for direct-sown winter oilseed rape under different nitrogen treatments

CRU180处理油菜密度最高。说明N180和CRU180在直播冬油菜生育中后期能有效提高生长密度,进而提高产量。

2.3 不同氮肥处理对直播冬油菜出苗率和成株率的影响

由表2可知,施用不同氮肥处理对直播冬油菜出苗率和成株率影响不同。分次施氮情况下,出苗率随着施氮量的增加显著下降,高氮处理(N240)显著低于其他氮肥用量处理;等氮情况下,一次性施用控释尿素处理出苗率最高,分次施用尿素次之,一次性施用尿素最低。分次施氮情况下,成株率随着尿素用量的增加呈先增后减变化趋势,氮肥用量180 kg N·hm^{-2} N180处理最高;等氮情况下,一次性施用控释尿素处理成株率最高,分次施用尿素次之,一次性施用尿素最低。综合直播冬油菜出苗率和成株率的结果来看,氮肥最适用量180 kg N·hm^{-2},控释尿素一次性施用和尿素分次施用效果相当。通过相关分析计算直播冬油菜籽粒产量和成株率的相关系数为0.861,两者显著正相关,说明直播冬油菜一次性施用控释尿素可以通过提高成株率来提高籽粒产量。

表2 不同氮肥处理直播冬油菜的出苗率和成株率(%)

Table 2 Emergence rate and mature plant rate for direct-sown winter oilseed rape under different nitrogen treatments(%)

处理Treatments	出苗率Emergence rate	成株率Mature plant rate
CK	80.04±6.63ab	70.68±7.17c
N60	87.27±2.46a	71.79±3.13c
N120	75.56±9.11bc	77.69±2.40b
N180	73.85±2.70bc	84.79±2.86a
N240	63.19±4.61d	78.22±8.41b
U180	66.28±4.02cd	76.33±2.04b
CRU180	83.52±2.64ab	85.05±2.25a

2.4 不同氮肥处理对直播冬油菜氮素含量的影响

高氮施用能显著提高直播冬油菜地上各部位氮素含量,氮素含量在不同部位的变化趋势存在明显差别(表3)。整体来看,籽粒、角壳和茎秆氮素含量随着氮肥用量的增加呈上升趋势,氮肥用量180 kg N·hm^{-2}和240 kg N·hm^{-2}时,籽粒氮素含量无显著差异。角壳氮素含量在氮肥用量180 kg·hm^{-2}控释尿素一次性

表3 不同氮肥处理直播冬油菜的氮素含量(%)

Table 3 Nitrogen content for direct-sown winter oilseed rape under different nitrogen treatments(%)

处理Treatments	籽粒Grain	角壳Shell	茎秆Stem
CK	2.72±0.05bc	0.33±0.02c	0.29±0.03e
N60	2.67±0.05c	0.30±0.01c	0.30±0.03de
N120	2.89±0.10ab	0.34±0.01c	0.34±0.03cd
N180	3.01±0.18a	0.43±0.05ab	0.37±0.02bc
N240	3.02±0.05a	0.48±0.07a	0.47±0.02a
U180	3.03±0.06a	0.37±0.03bc	0.47±0.02a
CRU180	3.04±0.13a	0.49±0.07a	0.40±0.03b

施用、氮肥用量180 kg N·hm^{-2}尿素分次施用和氮肥用量240 kg N·hm^{-2}尿素分次施用三个处理间无显著差异。茎秆氮素含量在氮肥用量180 kg N·hm^{-2}尿素一次性施用和氮肥用量240 kg N·hm^{-2}尿素分次施用处理最高。说明油菜籽粒氮素含量较稳定,低氮条件下,植株吸收氮素首先满足籽粒对氮素的需求,其次分配到角壳、茎秆等部位;高氮条件下,油菜吸收的氮素分配到角壳和茎秆中的比例较低氮条件有所提高。

2.5 不同氮肥处理对直播冬油菜氮素累积量的影响

不同施氮处理直播冬油菜地上部分氮素累积量结果(表4)表明,施氮显著增加直播冬油菜地上各部位氮素的吸收累积。分次施肥4个施氮水平中,籽粒氮素累积量表现为N180处理最高,角壳和茎秆氮素累积量最高的处理分别为N240和U180处理,说明适宜的氮肥用量有利于氮素向籽粒转移,过量施用则增加了氮素向角壳和茎秆等非营养部位的累积。适宜的氮肥用量条件下,N180和CRU180较U180籽粒氮素累积量增加16.02%和8.80%,说明分次施用尿素和一次性施用控释尿素都有利于油菜籽粒氮素累积。整体上看,油菜地上不同部位的氮素累积量分配比例表现为籽粒随着施氮量的增加而降低,角壳和茎秆随着施氮量的增加而提高;180 kg N·hm^{-2}等氮条件下,N180籽粒分配比例显著高于CRU180和U180,U180茎秆分配比例显著高于其他施氮处理。表明随着氮肥施用量增加,高氮处理氮素向籽粒分配比例减少,向角壳、茎秆地上非经济部位分配比例增加,进而影响氮肥利用率。适宜氮素条件下尿素分次施用比一次性施用更有利于氮素向籽粒累积。

2.6 不同氮肥处理对直播冬油菜氮肥利用率的影响

直播冬油菜氮肥利用率受氮肥用量的影响,整体变化趋势均是随着氮肥用量的增加而下降(表5)。4个氮肥用量水平中,氮肥表观利用率在高氮处理N240显著低于其他施氮处理,氮肥农学效率和氮肥偏生产力不同处理间具有显著性差异,氮肥生理效率在低氮用量N60和N120处理显著高于其他施氮处理。等氮条件下,氮肥利用率均为N180最高,与CRU180无显著性差异,N180和CRU180较U180氮肥表观利用率、农学效率、生理效率和偏生产力分别提高14.30%和11.68%、24.46%和12.53%、9.13%和0.74%、16.76%和8.59%。本试验条件下,氮肥用量从180 kg N·hm^{-2}增加到240 kg N·hm^{-2}时,直播冬油菜产量较N180和CRU180下降9.67%和2.87%,直

表4 不同氮肥处理直播冬油菜各部位的氮素累积量及分配比例

Table 4 Nitrogen accumulation and distribution proportion for different part of direct-sown winter oilseed rape under different nitrogen treatments

处理Treatments	氮素累积量Nitrogen accumulation/kg·hm^{-2}			分配比例Distribution proportion/%		
	籽粒Grain	角壳Shell	茎秆Stem	籽粒Grain	角壳Shell	茎秆Stem
CK	18.65±0.75e	2.22±0.33f	3.09±0.35e	77.80±1.52a	9.28±1.41bc	12.92±1.56b
N60	37.32±2.10d	4.06±0.11e	6.42±0.23d	78.05±0.83a	8.51±0.46c	13.44±0.38b
N120	61.36±4.99c	6.23±0.41d	9.65±1.06c	79.38±2.03a	8.06±0.16c	12.56±1.94b
N180	76.76±6.12a	9.23±1.05bc	12.64±0.71b	77.79±1.43a	9.34±0.54bc	12.87±1.47b
N240	69.35±2.78b	11.18±1.59a	13.56±0.99b	73.69±1.69b	11.91±1.88a	14.40±0.75b
U180	66.16±4.64bc	7.74±0.72cd	15.39±0.76a	74.06±1.58b	8.69±0.87c	17.25±0.71a
CRU180	71.98±2.52ab	10.86±1.50ab	14.08±1.33ab	74.28±2.63b	11.21±1.51ab	14.51±1.20b

表5 不同氮肥处理直播冬油菜的氮肥利用率

Table 5 N use efficiency for direct-sown winter oilseed rape under different nitrogen treatments

处理Treatments	氮肥表观利用率REN/%	氮肥农学效率AEN/kg·kg^{-1}	氮肥生理效率PEN/kg·kg^{-1}	氮肥偏生产力PFPN/kg·kg^{-1}
CK	—	—	—	—
N60	39.72±3.89ab	11.85±0.98a	29.88±1.23a	23.29±1.12a
N120	44.40±3.51a	11.97±0.99a	26.96±0.36b	17.69±1.11b
N180	41.48±3.40ab	10.33±0.26b	24.98±1.62c	14.14±0.32c
N240	29.22±0.96c	6.72±0.38d	22.99±0.54c	9.58±0.35e
U180	36.29±2.71b	8.30±0.60c	22.89±0.62c	12.11±0.63d
CRU180	40.53±0.94ab	9.34±0.39bc	23.06±1.51c	13.15±0.36cd

播冬油菜氮肥表观利用率、农学效率、生理效率和偏生产力分别下降29.56%和27.91%、34.95%和28.05%、7.97%和0.30%、32.25%和27.15%。说明在一定的施氮水平下采用合适氮肥品种和施用方式可提高产量又可保证氮肥利用率不降低。

3 讨论

油菜轻简化栽培具有高产、高效、节本、优质等特点，是我国油菜种植的重要发展方向[18]。研究轻简高效直播冬油菜栽培中氮肥用量、氮肥品种和施氮方式的影响，对增加油菜种植面积、提高农民种植油菜积极性具有重要的现实意义。本研究不同氮肥用量、氮肥品种和施氮方式的直播冬油菜田间小区试验结果表明，普通尿素分次施用的施氮效应基本与等氮量控释尿素一次性施用一致，施氮显著提高了直播冬油菜籽粒产量，随着施氮量的增加籽粒产量显著增加，但当施氮量高于180 kg N·hm^{-2}，增施氮肥的增产效应不显著，反而呈下降趋势。根据试验点氮肥用量和油菜产量，求得氮肥效应方程：$y=-0.044x^2+17.856x+618.57$，决定系数$R^2=0.970\ 7$。由2015年尿素市场价2500元·t^{-1}折纯N价格5.5元·kg^{-1}、油菜籽价格4.5元·kg^{-1}，得出最佳经济氮肥施用量为188.9 kg N·hm^{-2}。本试验条件下直播冬油菜的氮肥用量180 kg N·hm^{-2}与理论计算得到最佳经济氮肥施用量结果基本持平，这与韩上等[3]、邹娟等[6,10]和武际等[19]在长江流域研究得到的冬油菜氮肥推荐用量一致。在最佳施氮量180 kg N·hm^{-2}条件下，尿素分次施用、尿素一次性施用和控释尿素一次性施用三种施肥方式中，油菜产量以尿素分次施用为最高，与控释尿素一次性施用无显著差异，均显著高于尿素一次性施用，说明尿素分次施用和控释尿素一次性施用均能有效提高油菜产量。

研究表明，采用直播油菜方式可以通过提高植株密度产生群体优势，进而提高地下部根系的密度和数量，形成一定的根群结构，以此加强对土壤养分的吸收能力，减少肥料用量，达到“以密减肥”的效果，保证籽粒产量水平与移栽油菜相当[18]。本研究相关性分析结果表明，直播冬油菜成株率与籽粒产量间存在显著正相关，控释尿素一次性基施处理成株率最高，说明控释尿素通过提高直播冬油菜成株率来提高产量。直播冬油菜生长期密度动态规律表明，控释尿素能提高直播冬油菜生育中后期密度，这也可能是控释尿素提高油菜产量的原因之一。相关研究表明相同的目标产量下，油菜增密后能够节约氮肥20%~30%，增密减氮效果明显[20]。控释尿素能够提高直播油菜中后期群体密度及成株率，结合直播油菜“以密减肥”理论，建议控释尿素适当减少一定用量。

研究表明，作物产量和氮素吸收量密切相关，施氮量对作物吸收利用氮素影响存在差异，高氮不但不能增加作物产量，而且导致氮肥利用率下降，造成资源浪费，威胁环境安全[21]。本试验条件下，氮肥用量从180 kg N·hm^{-2}增加到240 kg N·hm^{-2}，直播冬油菜氮肥表观利用率、氮肥农学效率和氮肥偏生产力较N180和CRU180分别下降29.56%和27.91%、34.95%和28.05%、32.25%和27.15%，说明油菜高产高效的前提是适宜的氮肥用量。氮肥用量180 kg N·hm^{-2}条件下，尿素分次施肥和控释尿素一次性施肥氮肥表观利用率、农学效率、生理效率和偏生产力分别为41.48%和40.53%、10.33 kg·kg^{-1}和9.34 kg·kg^{-1}、24.98 kg·kg^{-1}和23.06 kg·kg^{-1}、14.14 kg·kg^{-1}和13.15 kg·kg^{-1}，两者间无显著差异，产量水平也高于其他氮肥用量。由此可见，氮肥用量必须同时满足大幅增产和提高养分效率的目标。最佳氮肥用量条件下，分次施用尿素和一次施用控释尿素均为油菜生产有效施肥方式。

分次施肥为传统油菜种植施用方式，一般追肥次数不少于2次，且盲目施肥现象普遍存在，虽然一定程度提高了油菜籽粒产量和氮肥利用效率，但增加了生产成本，降低了种植收益，造成环境污染，随着农村劳动力短缺现象的日益加剧，严重挫伤农民种植油菜的积极性[22]。而控释尿素作为一种新型肥料，能够在油菜生长期一次性底施，省时省工，同时顺应了直播冬油菜轻简化生产的大趋势，越来越受到广大农民的青睐[23]。本试验结果表明，尿素和控释尿素两种氮肥在直播冬油菜上施用，在适宜氮肥用量180 kg N·hm^{-2}时，尿素分次施用和控释尿素一次性基施处理籽粒产量、籽粒氮素累积量、氮肥表观利用率、氮肥农学效率和偏生产力分别较尿素一次性基施处理显著提高16.69%和8.53%、16.02%和8.80%、14.30%和11.68%、24.46%和12.53%、16.76%和8.59%，生理效率分别提高9.13%和0.74%，虽然控释尿素一次性基施处理氮肥利用率略低于尿素分次施用处理，但两者间无显著差异。原因可能在于控释尿素一次性基施前期氮素营养供应不足，油菜苗期氮素营养不足，进而影响籽粒氮素吸收量[24]。虽然本试验中直播冬油菜控释尿素一次性施用处理产量低于普通尿素分次施用，但其减少施肥次数及降低人工施肥工作量的优

势仍适应我国油菜种植业的发展趋势,且两者在氮素累积量和氮肥利用率上无显著差异,建议控释尿素和普通尿素按一定比例配比基施[25]。结合直播油菜"以密减肥"作用,今后需进行控释尿素不同用量试验研究,以明确直播冬油菜最适控释氮肥用量。

4　结论

本试验条件下,综合考虑直播冬油菜产量、氮素累积量和氮素利用率,安徽省直播冬油菜最适宜氮肥用量为180 kg N·hm^{-2},普通尿素分次施用和控释尿素一次性基施均能够达到油菜产量和氮肥利用率双向提升的效果,考虑到油菜种植轻简化发展的趋势,建议采用控释尿素一次性基施方式。

参考文献:

[1] 尹朝静, 范丽霞, 李谷成, 等. 劳动力成本上升背景下油菜生产发展方式转型研究[J]. 中国农业大学学报, 2015, 20(6):297-304.
YIN Chao-jing, FAN Li-xia, LI Gu-cheng, et al. Research on the transformation of rape production mode as the growth of labor cost[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2015, 20(6):297-304.

[2] 王　寅, 鲁剑巍. 中国冬油菜栽培方式变迁与相应的养分管理策略[J]. 中国农业科学, 2015, 48(15):2952-2966.
WANG Yin, LU Jian-wei. The transitional cultivation patterns of winter oilseed rape in China and the corresponding nutrient management strategies[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(15):2952-2966.

[3] 韩　上, 武　际, 吴新民, 等. 安徽省直播冬油菜氮磷钾硼肥施用效果研究[J]. 中国土壤与肥料, 2015(1):38-43.
HAN Shang, WU Ji, WU Xin-min, et al. Effects of nitrogen, phosphorus, potassium and boron fertilizers on direct seeding winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) in Anhui Province[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2015(1):38-43.

[4] 周广生, 左青松, 廖庆喜, 等. 我国油菜机械化生产现状、存在问题及对策[J]. 湖北农业科学, 2013, 52(9):2153-2157.
ZHOU Guang-sheng, ZUO Qing-song, LIAO Qing-xi, et al. Mechanical production status, existing problems and strategy discussion of rapeseed in China[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2013, 52(9):2153-2157.

[5] 王　寅, 鲁剑巍, 李小坤, 等. 长江流域直播冬油菜氮磷钾硼肥施用效果[J]. 作物学报, 2013, 39(8):1491-1500.
WANG Yin, LU Jian-wei, LI Xiao-kun, et al. Effects of nitrogen, phosphorus, potassium, and boron fertilizers on winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) direct-sown in the Yangtze River basin[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(8):1491-1500.

[6] 邹　娟, 鲁剑巍, 李银水, 等. 直播油菜施肥效应及适宜肥料用量研究[J]. 中国油料作物学报, 2008, 30(1):90-94.
ZOU Juan, LU Jian-wei, LI Yin-shui, et al. Study on the effects of NPK fertilizers and optima fertilizer rate on direct seeding rapeseed[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2008, 30(1):90-94.

[7] 吴玉珍, 陈红艳, 顾明柯, 等. 苏州市直播油菜机械化栽培技术[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(11):3205-3206, 3227.
WU Yu-zhen, CHEN Hong-yan, GU Ming-ke, et al. Cultivation technique of rape mechanical direct seeding in Suzhou City[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2014, 42(11):3205-3206, 3227.

[8] 徐华丽, 鲁剑巍, 李小坤, 等. 湖北省油菜施肥现状调查[J]. 中国油料作物学报, 2010, 32(3):418-423.
XU Hua-li, LU Jian-wei, LI Xiao-kun, et al. Investigation of present fertilization on rapeseed in Hubei Province[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2010, 32(3):418-423.

[9] Zhang F S, Cui Z L, Chen X P, et al. Integrated nutrient management for food security and environmental quality in China[J]. *Advanced in Agronomy*, 2012, 116:1-40.

[10] 邹　娟, 鲁剑巍, 陈　防, 等. 氮磷钾硼肥施用对长江流域油菜产量及经济效益的影响[J]. 作物学报, 2009, 35(1):87-92.
ZOU Juan, LU Jian-wei, CHEN Fang, et al. Effect of nitrogen, phosphorus, potassium, and boron fertilizers on yield and profit of rapeseed (*Brassica napus* L.) in the Yangtze River basin[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2009, 35(1):87-92.

[11] 吴永成, 李　壮, 牛应泽. 高密度直播油菜高产优质和氮肥高效的适宜氮肥施用模式[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(5):1184-1189.
WU Yong-cheng, LI Zhuang, NIU Ying-ze. Suitable nitrogen fertilization mode for high yield and quality and high N use efficiency in high density direct-sown rapeseed(*Brassica napus* L.)[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(5):1184-1189.

[12] 刘宝林, 邹小云, 宋来强, 等. 氮肥用量对迟直播早熟油菜产量及氮素利用效率的影响[J]. 中国油料作物学报, 2015, 37(6):852-861.
LIU Bao-lin, ZOU Xiao-yun, SONG Lai-qiang, et al. Effects of nitrogen application rate on yield and nitrogen use efficiency of early-mature rapeseed under delayed sowing condition[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2015, 37(6):852-861.

[13] 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 Tao, LU Jian-wei. Integrated nitrogen management strategy for winter oilseed rape(*Brassica napus* L.) in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(18):3506-3521.

[14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社, 2000.
LU Ru-kun. Analytical methods for soil and agro-chemistry[M]. Beijing:China Agriculture Science and Technology Press, 2000.

[15] 胡　敏, 朱　芸, 鲁剑巍, 等. 硼肥与菜籽同播对油菜出苗、产量及硼肥表观利用率的影响[J]. 中国油料作物学报, 2017, 39(4):509-514.
HU Min, ZHU Yun, LU Jian-wei, et al. Effects of simultaneous sowing of boron fertilizer and rapeseeds on seedling emergence, yield and boron utilization efficiency[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2017, 39(4):509-514.

[16] 李　敏, 武　际, 韩　上, 等. 稻油轮作制下控释氮肥的施用效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(1):105-113.

LI Min, WU Ji, HAN Shang, et al. Application effect of controlled-release nitrogen fertilizers under rice - rapeseed rotation systems[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(1):105-113.

[17] 李银水, 鲁剑巍, 廖　星, 等. 氮肥用量对油菜产量及氮素利用效率的影响[J]. 中国油料作物学报, 2011, 33(4):379-383.
LI Yin-shui, LU Jian-wei, LIAO Xing, et al. Effect of nitrogen application rate on yield and nitrogen fertilization efficiency in rapeseed[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2011, 33(4):379-383.

[18] 王　寅, 鲁剑巍, 李小坤, 等. 移栽和直播油菜的氮肥施用效果及适宜施氮量[J]. 中国农业科学, 2011, 44(21):4406-4414.
WANG Yin, LU Jian-wei, LI Xiao-kun, et al. Study on nitrogen fertilizer effect and optimum fertilizer rate for transplanting and direct-seeding rapeseed[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(21):4406-4414.

[19] 武　际, 胡　鹏, 杨友斌, 等. 安徽省江淮地区直播油菜氮肥效应研究[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(11):16593-16594.
WU Ji, HU Peng, YANG You-bin, et al. Effects of nitrogen fertilizer on direct seeding rapeseed in Jianghuai region, Anhui[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39(11):16593-16594

[20] 朱　珊, 李银水, 余常兵, 等. 密度和氮肥用量对油菜产量及氮肥利用率的影响[J]. 中国油料作物学报, 2013, 35(2):179-184.
ZHU Shan, LI Yin-shui, YU Chang-bing, et al. Effects of planting density and nitrogen application rate on rapeseed yield and nitrogen efficiency[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2013, 35(2):179-184.

[21] 白由路. 我国肥料产业面临的挑战与发展机遇[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(1):1-8.
BAI You-lu. Challenges and opportunities of fertilizer industry in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(1):1-8.

[22] 徐新朋, 周　卫, 梁国庆, 等. 氮肥用量和密度对双季稻产量及氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(3):763-772.
XU Xin-peng, ZHOU Wei, LIANG Guo-qing, et al. Effects of nitrogen and density interactions on grain yield and nitrogen use efficiency of double rice systems[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(3):763-772.

[23] 王　宁. 我国油菜产业发展的现状及对策研究[J]. 现代经济信息, 2015(12):356.
WANG Ning. The present situation and countermeasures of the rape industry development in China[J]. *Modern Economic Information*, 2015(12):356.

[24] 左青松, 杨海燕, 冷锁虎, 等. 施氮量对油菜氮素积累和运转及氮素利用率的影响[J]. 作物学报, 2014, 40(3):511-518.
ZUO Qing-song, YANG Hai-yan, LENG Suo-hu, et al. Effects of nitrogen fertilizer on nitrogen accumulation, translocation and nitrogen use efficiency in rapeseed(*Brassica napes* L.)[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(3):511-518.

[25] 段秋宇, 刘士山, 吴永成. 普通尿素与控释尿素单施及其配施对直播油菜产量和氮肥利用率的影响[J]. 湖南农业大学学报(自科版), 2017, 43(4):433-437.
DUAN Qiu-yu, LIU Shi-shan, WU Yong-cheng. Effects of single and combined application of controlled release coated urea and conventional urea on yields and nitrogen fertilizer use efficiency of direct sowing rapeseed(*Brassica napus* L.)[J]. *Journal of Hunan Agricultural University*(*Natural Sciences*), 2017, 43(4):433-437.