

油菜不同生长期稻田土壤无机氮形态及 氮肥利用率对控释氮肥施用的响应

廖佳元, 宋海星, 赵东生, 王涛, 官春云, 张振华

(湖南农业大学资源环境学院, 南方粮油作物协同创新中心, 土壤肥料资源高效利用国家工程实验室, 农田污染控制与农业资源利用湖南省重点实验室, 植物营养湖南省普通高等学校重点实验室, 长沙 410128)

摘要: 通过盆栽土培试验研究了尿素、控释氮肥对南方稻田冬油菜生长、产量、土壤肥效和氮肥利用效率的影响, 为控释氮肥在油菜生产上的推广应用提供参考。试验选用油菜品种“湘油15”, 参考油菜大田种植施氮量, 共设4个处理, 以不施氮肥(CK)为对照, 在施氮量均为200 kg/hm²的水平下, 设置了3种氮肥处理: 尿素(Urea)、控释氮肥1(CRNF1)和控释氮肥2(CRNF2)。对油菜生物量和产量、不同生育期下土壤无机氮、油菜氮素吸收、油菜生理特性、土壤微生物氮以及土壤酶活性等相关指标进行测定及分析。结果表明: 较常规 Urea 处理相比, 控释氮肥处理显著提高了油菜花期、收获期生物量, 增产 11.2%~20.1%; CRNF1 处理显著提高了油菜花期、收获期土壤 NO₃⁻-N 含量, 相比尿素处理分别提高 43.2% 和 61.8%, CRNF2 处理显著提高了油菜花期、收获期土壤 NH₄⁺-N 含量, 相比尿素处理分别提高 18.7% 和 64.1%, 保证了油菜生育后期土壤氮素供应; 与 Urea 处理相比, 控释氮肥显著提高了油菜薹期及生殖生长期油菜总氮吸收, 最终氮肥利用率(NUE)提高 23.1%~60.2%, 氮肥农学利用率(NAE)提高 19.1%~30.5%; CRNF1 处理显著提高了油菜生长后期 SPDA 值和总叶绿素含量, 相比尿素处理分别提高 6.5%, 10.1%; CRNF1 处理极显著提高了油菜生长后期土壤微生物氮, 较尿素处理提高 142.5%; 此外, 控释氮肥显著提高了油菜生长后期土壤脲酶、FDA 水解酶活性, 相比尿素处理分别提高 8.4%~12.9%, 24.5%~32.4%。在总氮施用量不变的前提下, 施用控释氮肥可提高油菜生殖生长期土壤有效氮含量, 改善光合作用, 增强土壤微生物量和微生物活性, 促进氮素的吸收, 提高氮肥的利用效率, 进而增加油菜干物质累积, 最终提高产量。

关键词: 油菜; 控释氮肥; 氮素形态; 产量; 氮肥利用率

中图分类号: S143.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)01-0158-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.01.026

Effects of Controlled Release Nitrogen Fertilizers on Soil Inorganic Nitrogen Forms Nitrogen Fertilization Efficiency at Different Growth Stages of Rape

LIAO Jiayuan, SONG Haixing, ZHAO Dongsheng, WANG Tao, GUAN Chunyun, ZHANG Zhenhua

(College of Resources and Environmental Sciences, Hunan Agricultural University, Southern

Cooperative Innovation Center for Grain and Oil Crops, National Engineering Laboratory of

Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, Hunan Key Laboratory of Farmland Pollution Control

and Agricultural Resources Use, Hunan Key Laboratory of Plant Nutrition in Common University, Changsha 410128)

Abstract: Pot experiments were carried out to study the effects of urea and controlled-release nitrogen fertilizer (CRNF) application on soil fertility and nitrogen fertilizer use efficiency (NUE) and growth of rape in Southern China, and it could provide reference for the application and dissemination of CRNF in rape production. An experiment with a randomized complete block design was conducted to investigate the effects of urea and CRNF on rape biomass and yield, soil inorganic nitrogen at different growth stages, nitrogen uptake of rape, physiological characteristics of rape, soil microbial nitrogen and enzyme activity using high yielding variety “Xiangyou15”. According to the standard amount of nitrogen application in rape field, four treatments were set up in this study, conventional urea (Urea), controlled-release nitrogen fertilizer 1 (CRNF1), controlled-release nitrogen fertilizer 2 (CRNF2) and no nitrogen fertilizer (CK). The result showed that compared with the conventional urea treatment, CRNF significantly increased the biomass of rape by 11.2%~20.1% at flower-

收稿日期: 2018-06-25

资助项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0200901, 2018YFD0200906); 国家油菜产业体系项目

第一作者: 廖佳元(1994-), 男, 硕士研究生, 主要从事植物营养土壤肥力研究。E-mail: 18786749717@163.com

通信作者: 张振华(1982-), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事植物营养生理研究。E-mail: zhzh1468@163.com

ing and harvest stage, the $\text{NO}_3\text{-N}$ concentration of rape at flowering and harvest stage in the CRNF1 treatment was significantly increased by 43.2% and 61.8%, respectively, and the $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration in soil in CRNF2 treatment was obviously increased by 18.7% and 64.1%, respectively, at flowering and harvest stage, which ensured the supply of soil nitrogen at the late growth stage of rape. Compared with the Urea treatment, total nitrogen uptake in rape was significantly increased by CRNF at the bolting and flowering stage. In eventually, the nitrogen use efficiency (NUE) was increased by 23.1%~60.2% and the agronomic nitrogen use efficiency (NAE) raised by 19.1%~30.5%. CRNF1 treatment significantly increased the SPDA value and total chlorophyll content by 6.5% and 10.1%, respectively, at the late growth stage of rape. Compared with the Urea treatment, CRNF1 treatment significantly increased the soil microbial nitrogen by 142.5% at the late growth stage of rape. In addition, the activity of soil urease, FDA hydrolase in the CRNF application treatment were significantly increased by 8.4%~12.9% and 24.5%~32.4%, respectively, at the late growth stage of rape. These results demonstrate that under the condition of total nitrogen application rate unchanged, application of CRNF mainly increased soil available nitrogen content at later growth stages, improved photosynthesis, enhanced soil microbial biomass and enzyme activity, thereby increased nitrogen uptake of rape, increased NUE and dry matter accumulation of rape, and increased grain yield.

Keywords: rape (*Brassica napus* L.); controlled release nitrogen fertilizer; nitrogen form; yield; nitrogen use efficiency

油菜作为中国重要的油料作物,提供了约 60% 的国产食用植物油,近年来我国油菜种植面积保持在 740 万 hm^2 左右,南方长江流域油菜种植面积和总产量占全国 80% 左右^[1]。氮素是油菜产量最重要的限制因子之一,合理施用氮肥能促进植株对氮素的吸收,提高氮肥利用率,保证油菜的产量和品质^[2]。但长期以来南方长江流域多采用一年两熟或三熟的种植制度,不仅对土地利用强度大,而且土壤养分带走量大,加上土壤自身有机质含量低、供肥能力及保肥能力差,导致在同等产量水平时要求比世界其他油菜主产区要施用更多的氮肥,造成氮肥利用率低,增加环境污染风险^[3]。因此,科学合理地施用氮肥是保证油菜高产、氮肥高效、提高土壤肥力、降低环境生态风险及促进农业可持续发展的重要措施。

控释氮肥主要通过改变内核尿素粒子与交界环境中的扩散通量,控制氮素释放速率,一次性施肥可满足作物整个生长期的氮素需求^[4]。已有研究^[5]表明,施用缓控释氮肥不仅提高了作物产量,而且提高了氮肥利用效率;魏建英^[6]在油菜上的研究表明,施用缓控释肥与农民常规施肥相比,增产 440 kg/hm^2 ;施用缓控释肥可增加油菜分枝数和单株角果数,提高籽粒产量和肥料利用率^[7];Lu 等^[8]发现控释氮肥施用不仅可以增加油菜产量,还能提升土壤氮素肥力。

目前不同控释氮肥对不同土壤、不同作物背景下对氮素的影响功效不一。而关于控释氮肥对南方稻田油菜种植下土壤有效氮及油菜氮关键转换酶作为一个研究整体的报道较少,其相互联系和作用机理的研究更为缺乏。基于此,本研究以南方典型油菜种植

区稻田土为研究基质,采用盆栽土培试验,研究不同氮肥处理对油菜不同生长期土壤有效氮、油菜氮素生理利用效率和氮肥利用效率的影响,以期对控释氮肥在油菜生产上的推广应用提供理论依据。

1 材料与amp;方法

1.1 土培试验

试验于 2017 年 5—10 月在湖南农业大学农业资源与环境专业试验基地玻璃顶网室进行,供试土壤为稻田土,取至湖南省郴州安仁县(26°79' N, 113°19' E),该地区属亚热带季风性湿润气候,降水集中在 6—9 月,降水量为 1 552.3 mm,年平均气温 17.3 $^{\circ}\text{C}$ 。土壤质地为紫泥土,土壤黏粒含量为 21%~27%,砂粒含量为 33%~44%。部分理化性质为:pH 为 5.55,有机质含量 25.79 g/kg ,全氮含量 1.52 g/kg ,全磷含量 0.51 g/kg ,碱解氮含量 118.3 mg/kg ,速效钾含量 81.42 mg/kg ,速效磷含量 18.87 mg/kg 。

1.2 供试材料

1.2.1 供试作物 供试油菜品种为“湘油 15”。

1.2.2 供试肥料 控释氮肥 1(N:43.4%),包膜材料为植物油和固化剂,华南农业大学提供;控释氮肥 2(N:36%),包膜材料为硫磺,金正大生态工程集团股份有限公司提供。普通尿素(N:46.7%),陕西陕化煤化工集团有限公司生产;钙镁磷肥(P_2O_5 :12%),湖南泸溪县富农磷化有限公司生产;氧化钾(K_2O :60%),加拿大钾肥公司生产。

1.3 试验设计

盆栽土培试验采用育苗移栽方法,每个白瓷钵(25 $\text{cm}\times 20\text{ cm}$)装土 6.25 kg ,栽植 1 株,完全随机区

组排列。试验设计 4 个处理,CK 对照(不施氮肥),设 3 个不同氮肥处理(同一氮水平 0.628 g N/钵):普通尿素处理(Urea, 1.34 g/钵),控释氮肥 1 处理(CRNF1, 1.43 g/钵),控释氮肥 2 处理(CRNF2, 1.72 g/钵);每个处理布置 24 钵,共 96 钵。其他肥料皆参照油菜大田种植施用量, P_2O_5 1.57 g/钵, K_2O 0.39 g/钵,CK 处理除不施氮肥外,其他肥料用量与处理一致,所有肥料均作底肥一次施入。油菜生长期,每 3 天浇 1 次水,采用称量法灌水,保持土壤含水量在最大田间持水量的 50%~60%。

1.4 取样及测定方法

在油菜的苗期、抽薹期、花期和收获期取样(同时收集落叶)测定其生物量、全氮含量;在油菜的苗期、盛花期取样(苗期是从下往上第 4 片叶,盛花期是从下往上第 14 片叶),测定其硝酸还原酶(NR)活性、谷氨酰胺合成酶(GS)活性、SPAD 值和叶绿素含量;在油菜的收获期取样测定籽粒产量。在油菜的苗期、抽薹期、花期和收获期取土样测定硝态氮、铵态氮含量;在油菜的苗期和收获期取土样,破坏性取样,整个盆栽土样倒出,混合取样。部分土样于 4 °C 下冷藏保存,短期内完成土壤微生物氮和土壤酶活的测定;部分土样风干研磨过筛,用于土壤全氮含量测定。油菜生物量采用烘干法测定,105 °C 杀青 30 min,75 °C 烘至恒重;植株全氮采用浓 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消煮,流动注射分析仪测定;SPAD 值用 SPAD-502 叶绿素仪测定;NR、GS 活性测定方法参考 Han 等^[9]的方法进行;叶绿素含量采用丙酮、无水乙醇混合液浸提法^[10]测定;土壤全氮采用凯氏定氮法^[11]测定;土壤硝态氮、铵态氮采用 2 mol/L KCl 浸提—连续流动分析

仪测定;土壤脲酶活性采用试剂盒测定(Solarbio, Soil Urea Assay Kit);FDA 水解酶采用荧光素比色法^[12]测定;微生物量氮(SMBN)采用熏蒸提取—全氮测定法^[13]。

有关参数的计算方法方法^[14]为:

氮肥利用率 $NUE(\%) = (\text{施氮植株总氮量}(\text{kg}/\text{株}) - \text{不施氮植株总氮量}(\text{kg}/\text{株})) / \text{氮用量}(\text{kg}/\text{株}) \times 100$;

氮肥农学利用率 $NAE(\text{kg}/\text{kg N}) = (\text{施氮产量}(\text{kg}/\text{株}) - \text{不施氮产量}(\text{kg}/\text{株})) / \text{氮用量}(\text{kg}/\text{株})$;

氮素生理利用效率 $NPUE(\text{kg}/\text{kg N}) = \text{总生物量}(\text{kg}/\text{株}) / \text{植株总氮量}(\text{kg}/\text{株})$

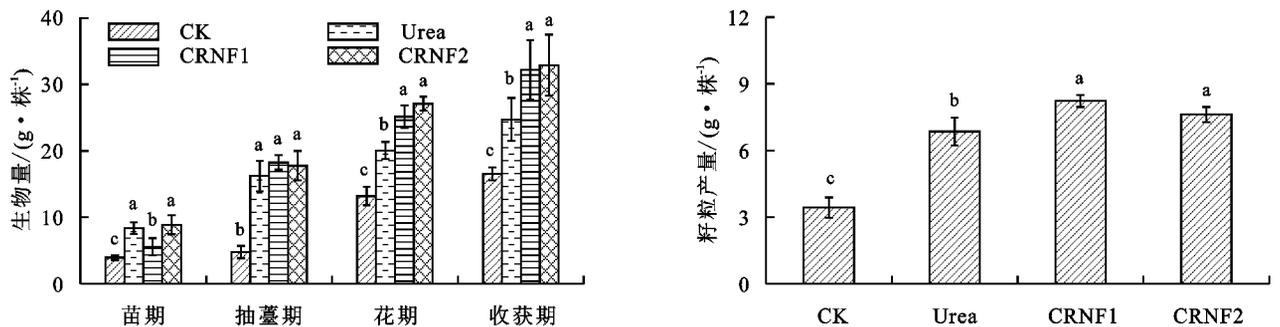
1.5 数据处理

试验结果采用 SPSS 19.0 统计分析软件进行方差分析和相关分析,不同处理间采用最小显著差数法(LSD 法)进行差异显著性检验($P < 0.05$),采用 Excel 软件进行数据整理和 Origin 9.0 软件制图。

2 结果与分析

2.1 控释氮肥对油菜生物量和产量的影响

由图 1 可知,各氮肥处理显著提高了不同生育期油菜的生物量。在油菜生长的苗期,Urea 处理与 CRNF2 处理不存在显著差异,两者均显著高于 CRNF1 处理;抽薹期各氮肥处理不存在显著差异;在油菜生长的后期,控释氮肥处理下油菜花期和收获期生物量均显著高于 Urea 处理,CRNF1 和 CRNF2 处理不存在显著差异。各氮肥处理具有显著增产的作用,与尿素 Urea 处理相比,缓释氮肥处理增产效果更显著。CRNF1 处理的增产效果最显著,相对 Urea 处理增产 1.38 g/株,提高了 20.1%;CRNF2 处理增产效果相对次之,与 Urea 处理相比增产 0.77 g/株,提高了 11.24%。



注:图柱上不同字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。下同。

图 1 不同氮肥处理的油菜生物量和籽粒产量

2.2 控释氮肥对土壤有效氮的影响

由图 2 可知,各氮肥处理显著提高了不同生育期土壤硝态氮含量。在苗期 Urea 处理下土壤硝态氮含量显著高于控释氮肥处理,CRNF1 与 CRNF2 处理不存在显著差异;抽薹期不同氮肥处理下,土壤硝态氮含量高低表现为 $Urea > CRNF2 > CRNF1$, Urea 处理显著高于控释氮肥处理,CRNF2 处理显著高于

CRNF1 处理;在花期和收获期 CRNF1 处理下土壤硝态氮含量均显著高于 Urea 处理和 CRNF2 处理, Urea 处理和 CRNF2 处理不存在显著差异。不同氮肥处理对同时期土壤铵态氮含量影响不一致。苗期 Urea 处理下土壤铵态氮含量显著高于控释氮肥处理,CK、CRNF1 与 CRNF2 处理下不存在显著性差异;抽薹期土壤铵态氮含量不同氮肥处理下不存

在显著差异;花期 CRNF2 处理下土壤铵态氮含量显著高于其他处理,CK、Urea 和 CRNF1 处理不存在显著差异;收获期氮肥处理显著提高了土壤铵态氮

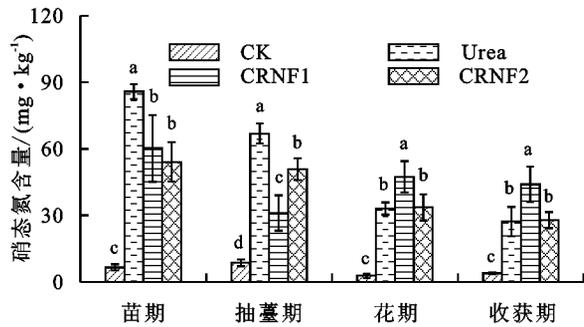


图 2 不同氮肥处理的土壤硝态氮和铵态氮含量

2.3 控释氮肥对油菜氮吸收及氮肥利用效率的影响

由图 3 可知,氮肥处理显著提高了不同生育期油菜总氮吸收量,苗期各氮肥处理不存在显著差异;抽薹期、花期 CRNF1 和 CRNF2 处理油菜总氮显著高于 Urea 处理,CRNF1 和 CRNF2 处理不存在显著差异;收获期各氮肥处理油菜总氮大小表现为 CRNF1 > CRNF2 > Urea,CRNF1 处理显著大于 CRNF2 处理,CRNF2 处理显著大于 Urea 处理。氮肥对不同时期油菜 NPUE 影响不一致,苗期尿素处理显著提高了油菜 NPUE,其他处

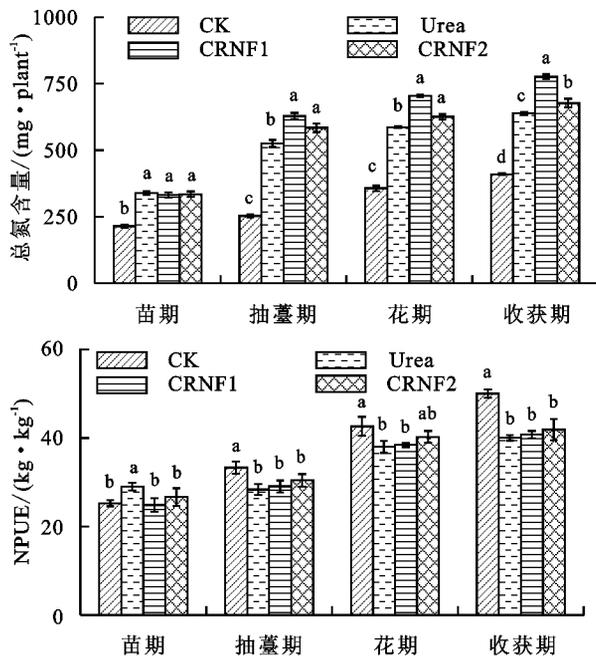
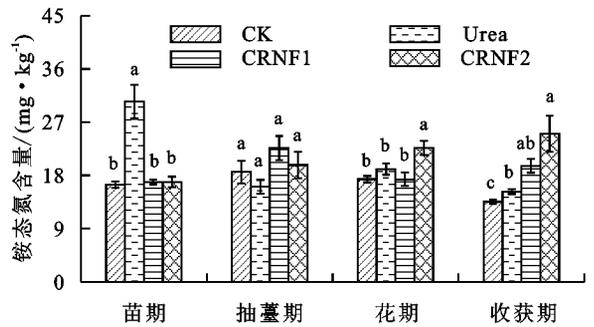


图 3 不同氮肥处理下油菜吸收的总氮量、NUE、NPUE 和 NAE

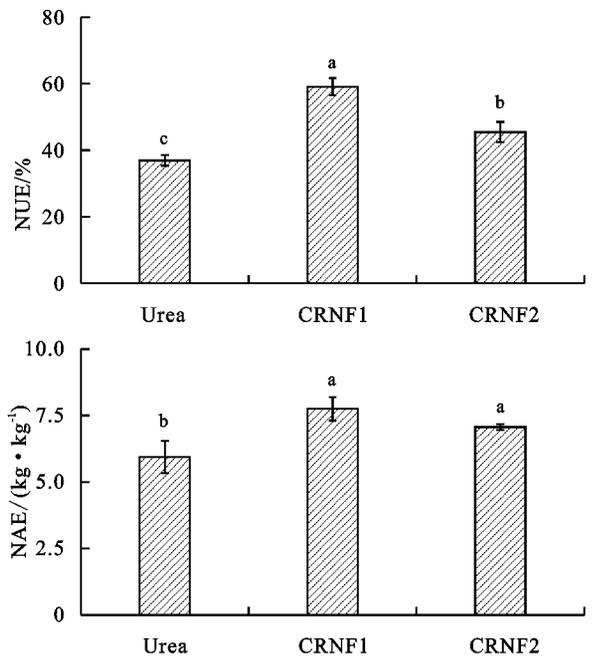
2.4 控释氮肥对氮代谢相关酶和油菜光合特征的影响

由图 4 可知,2 种控释氮肥对不同时期油菜 SPAD 值影响不一。苗期控释氮肥处理油菜 SPAD 值显著高于 Urea 处理,CRNF1 和 CRNF2 处理不存在显著差异;花期 CRNF1 处理显著高于 Urea 处理,CRNF1 处理和 CRNF2 处理不存在显著差异,CRNF2 处理和 Urea 处理不存在显著差异。苗期各处理油菜总叶绿素不存在显

含量,CRNF2 处理显著高于 Urea 处理、与 CRNF1 处理不存在显著差异,Urea 和 CRNF1 处理不存在显著差异。



理不存在显著性差异;抽薹期、花期、收获期各氮肥处理 NPUE 不存在显著性差异。控释氮肥处理显著提高了 NUE,CRNF1 处理效果最显著,相对 Urea 处理 NUE 提高了 60.2%;CRNF2 处理效果相对次之,与 Urea 处理相比 NUE 提高了 23.1%。控释氮肥处理显著提高了 NAE,CRNF1 和 CRNF2 处理 NAE 不存在显著性差异,两者均显著高于 Urea 处理,CRNF1 处理相对 Urea 处理 NAE 提高了 30.5%;CRNF2 处理与 Urea 处理相比 NAE 提高了 19.1%。



著差异;花期 CRNF1 处理显著高于其他处理,CRNF2 处理和 Urea 处理不存在显著差异,两者均显著高于 CK 处理。苗期各处理油菜 NR 活性不存在显著性差异;收获期 CK 处理和 Urea 处理不存在显著差异,两者均显著高于控释氮肥处理,CRNF1 处理和 CRNF2 处理不存在显著差异。GS 活性不同时期不同处理下不存在显著性差异。

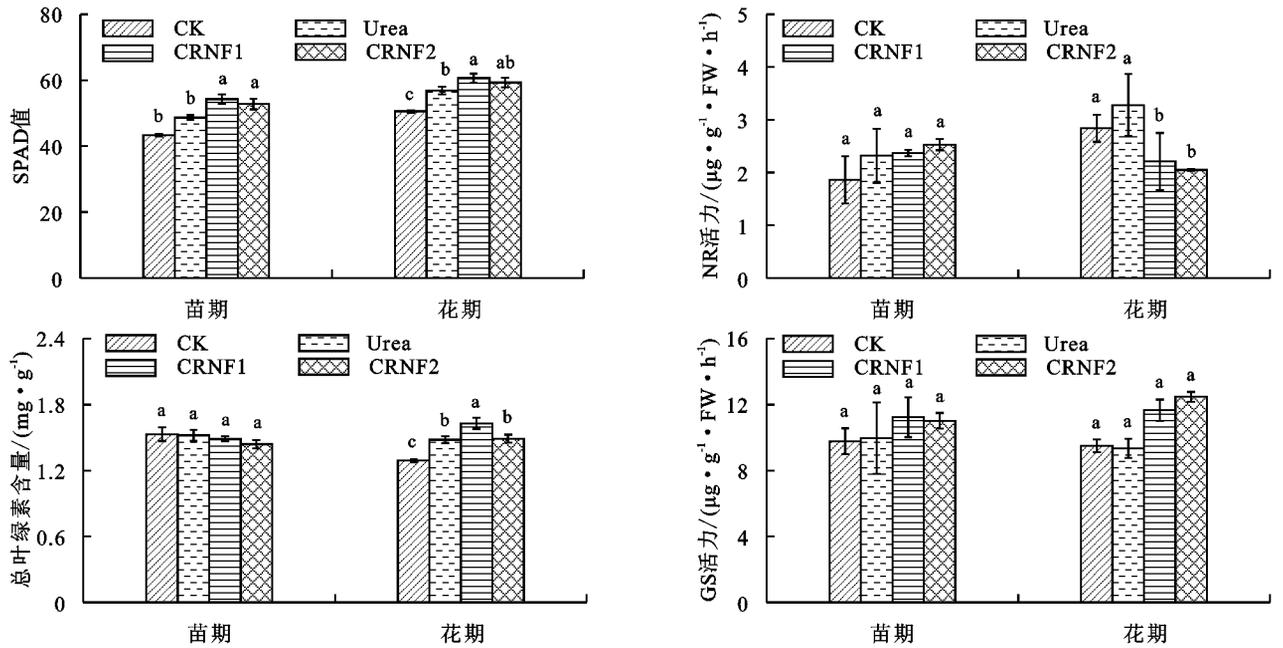


图 4 不同氮肥处理下油菜的 SPAD 值、总叶绿素含量、NR 和 GS 活性

2.5 控释氮肥对土壤全氮和土壤微生物量氮影响

由图 5 可知,尿素处理显著提高了土壤全氮含量。苗期 Urea 处理土壤全氮显著高于 CRNF1 和 CRNF2 处理,CRNF1 和 CRNF2 处理不存在显著差异;收获期 Urea 处理土壤全氮显著高于其他处理,CK、CRNF1 和 CRNF2 处理不存在显著差异。各氮肥处理对不同时期土壤微生物量氮的影响不一致。

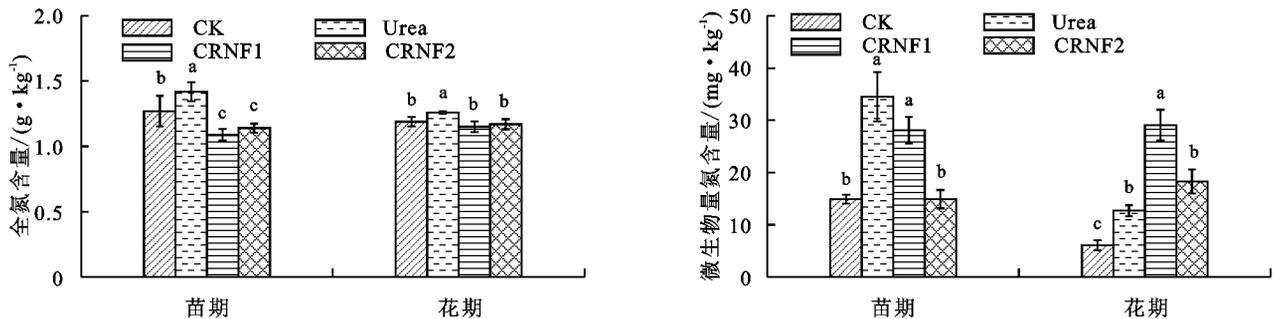


图 5 不同氮肥处理下土壤全氮和微生物量氮含量

2.6 控释氮肥对土壤酶活性的影响

由图 6 可知,氮肥处理提高了不同时期土壤脲酶活性和 FDA 水解酶活性。苗期 Urea 处理下土壤脲酶活性显著高于 CRNF1 和 CRNF2 处理,CRNF1 和 CRNF2 处理间不存在显著差异;收获期 CRNF1

苗期 Urea 处理和 CRNF1 处理土壤微生物量氮含量不存在显著性差异,相对 CRNF2 和 CK 处理两者均显著提高了土壤微生物量氮含量,CRNF2 和 CK 处理不存在显著性差异;收获期 CRNF1 处理土壤微生物量氮含量显著高于其他处理,Urea 处理和 CRNF2 处理不存在显著差异,两者均显著高于 CK 处理。

和 CRNF2 处理下土壤脲酶活性显著高于 Urea 处理,CRNF1 和 CRNF2 处理间不存在显著差异。苗期不同氮肥处理下 FDA 水解酶活性不存在显著差异,收获期不同氮肥处理下 FDA 水解酶活性与脲酶活性一致。

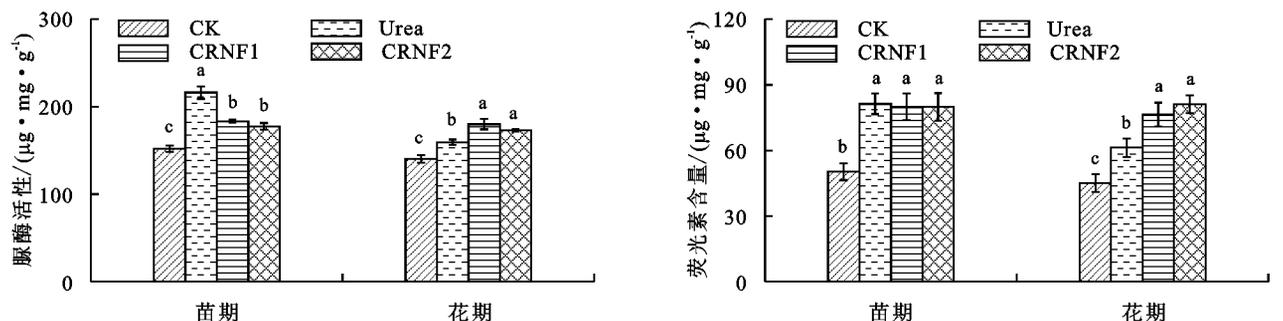


图 6 不同氮肥处理下土壤脲酶活性和 FDA 水解酶活性

3 讨论

3.1 控释氮肥增强了油菜生长后期土壤有效氮供给

中国油菜生产高度依赖肥料施用,氮素在油菜的生长过程中起着重要的作用,合理施用氮肥可以显著促进油菜的生长、增加干物质积累量和提高籽粒产量。本研究表明,控释氮肥处理下油菜生长中后期较尿素处理具有更高的生物量,且以 CRNF1 处理效果更佳,不同控释氮肥处理油菜籽粒产量比普通尿素处理提高 11.24%~20.10%,其中 CRNF1 处理油菜增产最为显著(图 1)。氮通常是限制大部分陆生植物生长的营养物质,氮素有效性成为陆地生态系统初级生产力的关键决定因素。已有研究^[5]表明,控释氮肥能通过延缓氮素的释放周期,在作物生长后期持续供应氮素,从而显著提高作物产量。本研究中,较 Urea 处理相比,控释氮肥处理可不同程度地增加油菜生长后期土壤氮素有效性,协调全生育期氮素供应。由于其对氮素的缓释效果,相比 Urea 处理,CRNF1 处理提高了花期和收获期土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量,CRNF2 处理提高了花期和收获期土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量(图 2)。类似研究^[15]也报道了控释氮肥减少了养分的损失,提高了养分有效性,保证了油菜生育中后期氮素的持续供应,实现了增产增收和提高氮肥利用率的效果。另一方面,持续供应氮素养分还可能引发作物提高光合酶活性,有效协调植株各器官中氮素动态过程,间接促进了作物产量的增加^[16]。本研究结果也表明,控释氮肥处理下油菜生殖生长期具有更高的叶绿素含量(图 4)。这表明控释氮肥可提高作物地上部叶绿素含量,改善光合作用,改善作物生理机能,从而促进产量。因此本研究体系下控释氮肥对油菜生长不同时期氮素的供应特征,对油菜增产增效的潜力更大。

3.2 控释氮肥通过促进氮素吸收提高了油菜氮肥利用率

氮肥利用率可体现作物对氮素的运用趋势,表征氮肥对产量的贡献程度,可持续农业生产中,保证作物生产力的同时降低环境风险最有效的手段之一就是提高氮素利用率。本研究结果表明,控释氮肥处理显著提高了油菜 NUE 和 NAE,其中 CRNF1 处理效果更佳,相比尿素处理 NUE 提高了 60.2%,NAE 提高了 30.5%(图 3)。但是氮素生理利用效率在尿素和控释氮肥处理下不存在显著差异(图 3),油菜氮代谢相关酶、GS 酶活性在油菜早期营养期和后期生殖生长期在尿素和控释氮肥处理下也不存在显著差异(图 4)。这表明本研究中,油菜的氮代谢在各氮肥处理下差异不大。本试验中,控释氮肥处理显著提高了

油菜总氮吸收,其中 CRNF1 处理效果更加显著(图 5)。有研究^[17-18]表明,油菜生育中后期充足的养分积累可延缓各营养器官的衰老,加速氮素在各器官的转运,使得各营养器官中约 55%~73%的氮素可分配到油菜籽中,进而提高籽粒产量。这表明,在本研究中控释氮肥主要是通过提高了油菜生长后期土壤氮素有效性,促进了氮素吸收,从而提高了氮肥利用率。

3.3 控释氮肥提高了土壤微生物量和微生物活力

土壤微生物氮是土壤氮的关键储备库之一,具有调节氮周转的重要作用。本研究中,施加氮肥可以显著提高土壤微生物氮含量,苗期尿素处理土壤微生物氮含量更高,而在油菜生长的后期 CRNF1 处理下土壤微生物氮含量更高,且 CRNF1 处理土壤微生物氮在油菜生长的前期和后期波动较小(图 5)。这可能是由于控释氮肥能更有效地延长氮素释放周期,控释氮肥处理可提高土壤微生物生物量氮的库容,减少了氮损失,提高氮肥利用率。土壤脲酶活性是表征土壤氮素供应强度的重要指标之一,脲酶可催化尿素水解为 NH_3 ,进一步转换成 NH_4^+ ^[19]。本研究中,氮肥处理显著提高了土壤脲酶活力,在苗期尿素处理下土壤脲酶活力显著高于控释氮肥处理,尿素处理较早出现铵态氮峰期,容易造成氨挥发损失,导致油菜后期生殖期土壤有效氮含量低,而控释氮肥处理显著提高了油菜生长后期土壤脲酶活性(图 6),这能为激发油菜生长后期土壤硝化作用提供 NH_4^+ 底物,这也与本文中控释氮肥处理下油菜生长前期和后期土壤硝态氮、铵态氮动态规律基本匹配。这主要是因为控释氮肥以包膜材料阻滞内核尿素与土壤脲酶直接接触,从而减缓了尿素的水解与氨化进程,因此可以在较长一段时间内确保土壤中具有较高的铵态氮含量,达到降低氮损失的目的。FDA 水解酶,由于其与微生物活性间的相关性比其他酶活性更显著,有学者^[12]将其作为检测不同土壤总的微生物活性的方法,能快速而有效地反映土壤微生物活性。本研究中,氮肥处理显著提高了土壤 FDA 水解酶活性,控释氮肥处理使得油菜生长后期土壤还具有更高的微生物活性(图 6)。这可能是由于控释氮肥提高养分吸收利用,促进了作物根系生长,根系分泌物提高了土壤中碳源的累积,可为土壤微生物的生长提供更多的碳源,从而促进了微生物的活力。前人^[20]研究表明,当土壤 FDA 水解酶表现出高活性时,在一定程度上表明土壤微生物代谢活力增强,土壤酶处于激活状态,能够充分发挥土壤肥力,从而保证土壤养分的持续供应,满足植物生长发育的需求,进而有利于作物的生长及产量的形成。

4 结论

相对尿素处理,控释氮肥既可为油菜生育前期提供适量氮素供应,促进氮素吸收,又可在生育中后期生殖发育阶段,保证土壤氮素的供应强度,促进了油菜生长,显著提高油菜产量。CRNF1 增产增效更加显著,较常规尿素处理显著增产 20.1%,氮肥利用率提高了 60.2%,氮肥农学利用率提高了 30.5%。本文中 CRNF1 处理对提升土壤肥力和作物产量的效果更加佳,是较为理想的施肥方式。本研究的结论基于盆栽试验得出,未来有待在大田试验下进一步研究。

CRNF1 处理可提高后期土壤微生物生物量氮含量,为作物生殖发育提供充沛的氮素养分;可刺激油菜后期土壤脲酶与 FDA 水解酶活性,在油菜生长后期有利于促进尿素向无机氮转换,增强土壤供氮能力。控释氮肥对土壤微生物活性的影响本研究有了初步的结论,但其对土壤微生物群落结构多样性仍需要继续开展试验进行系统、深入的研究。

参考文献:

- [1] 王汉中,殷艳. 我国油料产业形势分析与对策建议[J]. 中国油料作物学报, 2014, 36(3): 414-421.
- [2] 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.
- [3] 鲁剑巍. 中国油菜生产的高产高效氮素管理[J]. 中国农业科学, 2016, 49(18): 3504-3505.
- [4] Trinh T H, Kussaari K, Shuib A S, et al. Modelling the release of nitrogen from controlled release fertiliser: Constant and decay release [J]. Biosystems Engineering, 2015, 130: 34-42.
- [5] Gao X, Li C L, Zhang M, et al. Controlled release urea improved the nitrogen use efficiency, yield and quality of potato (*Solanum tuberosum* L.) on silt loamy soil [J]. Field Crops Research, 2015, 181: 60-68.
- [6] 魏建英. 缓控释肥料在油菜上的应用效果研究[J]. 现代农业科技, 2014(16): 12, 14.
- [7] 李敏,叶舒娅,刘枫,等. 包膜控释尿素对油菜产量和氮肥利用率的影响[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(35): 20055-20056.

- [8] Lu Y, Sun Y, Liao Y. Effects of the application of controlled release nitrogen fertilizer on rapeseed yield, agronomic characters and soil fertility [J]. Agricultural Science and Technology, 2015, 16(6): 1216-1221.
- [9] Han Y L, Song H X, Liao Q, et al. Nitrogen Use Efficiency is mediated by vacuolar nitrate sequestration capacity in roots of brassica napus [J]. Plant Physiology, 2016, 170(3): 1684.
- [10] 李得孝,郭月霞,员海燕,等. 玉米叶绿素含量测定方法研究[J]. 中国农学通报, 2005, 21(6): 153-155.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [12] 王校常,陆琴,李腊梅,等. 太湖地区典型水稻 FDA 水解酶活性的剖面分布特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(6): 834-839.
- [13] 吴金水,林启美. 土壤微生物生物量测定方法及其影响 [M]. 北京: 气象出版社, 2006.
- [14] 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.
- [15] 张敬昇,李冰,王昌全,等. 控释掺混尿素对土壤无机氮和油菜产量及氮素利用率的影响[J]. 土壤, 2017, 49(3): 505-511.
- [16] 王晓巍,蒯佳林,郁继华,等. 不同缓/控释氮肥对基质栽培甜瓜生理特性与品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(3): 847-854.
- [17] 刘涛,鲁剑巍,任涛,等. 适宜氮水平下冬油菜苗期不同叶位叶片光合氮分配特征[J]. 中国农业科学, 2016, 49(18): 3532-3541.
- [18] Gombert J, Le D F, Lothier J, et al. Effect of nitrogen fertilization on nitrogen dynamics in oilseed rape using ¹⁵N-labeling field experiment [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2010, 173: 875-884.
- [19] 张敬昇,王昌全,李冰,等. 控释掺混尿素对稻、麦土壤氮与酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(6): 1899-1908.
- [20] 李猛,聂洪光,张淑红,等. 有机肥配施氮肥设施菜田 FDA 水解酶活性与肥力相关性研究[J]. 园艺学报, 2016, 43(5): 907-917.

(上接第 157 页)

- [21] Springob G, Kirchmann H. Bulk soil C to N ratio as a simple measure of net N mineralization from stabilized soil organic matter in sandy arable soils [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2003, 35(4): 629-632.
- [22] 赵俊勇,孙向阳,李素艳,等. 辽宁省老秃顶子不同林分类型土壤有机碳储量和碳氮垂直分布特征[J]. 东北林

业大学学报, 2016, 44(10): 65-78.

- [23] 梁启鹏,余新晓,庞卓,等. 不同林分土壤有机碳密度研究[J]. 生态环境学报, 2010, 19(4): 889-893.
- [24] 赵伟红,康峰峰,韩海荣,等. 辽河源自然保护区不同林龄山杨天然次生林的土壤有机碳特征[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(10): 57-63, 76.