

控释氮肥对洋葱-棉花套作体系产量及土壤氮含量的影响

田晓飞¹, 李成亮^{1*}, 张 民^{1*}, 谢志华², 路艳艳¹, 郑文魁¹, 耿计彪¹

(1. 土肥资源高效利用国家工程实验室, 国家缓控释肥工程技术研究中心, 山东农业大学资源与环境学院, 山东 泰安 271018;
2. 山东省济宁市农业科学院, 山东 济宁 272000)

摘 要: 2012—2013 年在济宁市鱼台县, 通过大田试验研究了速效氮肥和控释氮肥在 0、100、200、300 kg·hm⁻² 4 个氮素水平下对洋葱-棉花套作体系产量及土壤氮素含量变化的影响。结果表明: 氮素用量 200、300 kg·hm⁻² 时, 速效氮肥和控释氮肥处理棉花产量显著高于氮素用量 100 kg·hm⁻² 处理; 氮素用量 100、200 kg·hm⁻² 时, 控释氮肥棉花产量较速效氮肥处理分别显著增加 17.3 % 和 7.7%; 施氮 200 kg·hm⁻² 的控释氮肥处理较氮素用量 100 kg·hm⁻² 的控释氮肥处理的籽棉显著增产 14.5%, 但与施氮 300 kg·hm⁻² 的控释氮肥处理相比差异不显著。控释氮肥较速效氮肥更能提高 0~20 cm 土层 NO₃⁻-N 的含量, 但对土壤中 NH₄⁺-N 含量无显著影响。施用控释氮肥能够提高洋葱和棉花产量, 施氮量为 200 kg·hm⁻² 的控释氮肥处理为本试验条件下的最优施肥处理。

关键词: 氮肥类型; 氮肥用量; 洋葱产量; 棉花产量; 土壤氮含量

中图分类号: S143.1 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2015)04-0745-08 doi:10.11654/jaes.2015.04.020

Effects of Controlled-release Nitrogen Fertilizer on Yields and Soil Nitrogen in Onion-Cotton Intercropping System

TIAN Xiao-fei¹, LI Cheng-liang^{1*}, ZHANG Min^{1*}, XIE Zhi-hua², LU Yan-yan¹, ZHENG Wen-kui¹, GENG Ji-biao¹

(1. National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, National Engineering and Technology Research Center for Slow and Controlled Release Fertilizers, College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China; 2. Jining Academy of Agricultural Sciences, Institute of Cotton Research, Jining 272000, China)

Abstract: Controlled-release nitrogen fertilizer (CRN) could meet plants' demands for nitrogen while reducing nitrogen losses and thus water pollution. A field experiment was conducted in Jining city, Shandong Province, from September 2012 to October 2013, to study the crop growth and soil nitrogen levels in onion and cotton intercropping system under common fertilizer (CN) and CRN at four nitrogen (N) rates of 0, 100, 200, and 300 kg·hm⁻². Results showed that the cotton yield increased with N applications. At 200 and 300 kg·hm⁻², the cotton yields were respectively 17.3% and 7.7% higher in CRN than in CN. In CRN treatments, the cotton yield at 200 kg·hm⁻² was 7.7% and 14.5% higher than that at CN (200 kg·hm⁻²) and CRN (100 kg·hm⁻²), respectively. However, no difference was found in the cotton yield between 200 kg·hm⁻² and 300 kg·hm⁻² CRN treatments. At 100, 200, and 300 kg·hm⁻², onion yields were respectively 19.6%, 2.6% and 6.7% higher in CRN than in CN. Soil NO₃⁻-N concentrations in 0~20 cm in CRN treatment were significantly lower than in CN treatment. Soil NH₄⁺-N contents were not affected by N treatments. These results suggest that 200 kg·hm⁻² of CRN would be an optimum fertilizer rate under the experimental condition.

Keywords: nitrogen fertilizer type; nitrogen rate; onion yield; cotton production; soil inorganic nitrogen

棉花是我国重要的经济作物和战略物资, 但近年来随着粮食和蔬菜种植面积的扩大, 棉花种植面积有

了较大幅度的减少, 棉花与粮食、蔬菜作物的争地矛盾日益严重^[1]。黄淮海地区典型的洋葱(或大蒜、小麦)-棉花套种模式土壤复种指数较高, 养分需求量大, 农民通常采用增加肥料尤其是氮肥用量来获得更高的产量, 常常出现因施肥不当而浪费肥料、降低氮肥利用效率的现象^[2], 甚至诱发病害造成作物减产^[3]。同时农田中过量氮素会通过氨挥发、淋溶和径流等方式从土壤-作物系统中损失, 造成水体环境的富营养化, 引起污染程度加剧^[4]。因此, 通过研究合理的氮肥施用措

收稿日期: 2014-11-20

基金项目: 山东省现代农业产业技术体系棉花创新团队项目(鲁农科技字[2012]26号)、“十二五”国家科技支撑计划(2011BAD11B01; 2011BAD11B02); 国家“948”重点项目(2011-G30)

作者简介: 田晓飞(1990—), 男, 山东临沂人, 博士研究生, 从事土壤肥料学及环境效应研究。E-mail: tianxiaofei624@163.com

* 通信作者: 李成亮 E-mail: chengliang_li11@163.com;
张 民 E-mail: minzhang-2002@163.com

施来提高洋葱-棉花套种模式下作物产量,对于环境保护具有重要的意义。

控释氮肥是一种能够根据作物生长需要释放养分、一次施用即能满足作物整个生育期养分需求的新型高效肥料^[5]。齐建建等^[6]的研究表明,与普通肥相比,等量的控释氮肥能使苍山蒜和金乡蒜鳞茎产量分别提高 5.0%~12.5%和 15.0%~15.8%,增产效果达到显著水平;董亮等^[7]发现施用控释氮肥能使大葱产量提高 2.6%~58.9%,并促进大葱对磷和钾的吸收;赵斌等^[8]对玉米的研究则发现,在相同施肥量情况下,施用树脂包膜控释氮肥和硫包膜控释氮肥均能够显著增加玉米产量,在减少 25%施肥量情况下,仍能够显著增加玉米产量;孙永红等^[9]研究发现,控释氮肥减缓了氮素的释放,一次性施肥就能够满足水稻整个生育期的营养需求,可在低施氮水平下获得较高的经济效益。控释氮肥在多种农作物上进行过大量的田间试验,但在鲁西南地区洋葱-棉花套种模式下的应用研究较少。为此,本研究选用速效氮肥和控释氮肥两种氮肥,每种氮肥分别设置 0、100、200、300 kg·hm⁻² 4 个氮素水平处理,通过田间试验探讨控释氮肥在洋葱-棉花套作中对作物的增产效应及对土壤氮素含量的影响,以期为黄淮海地区洋葱-棉花套种模式下控释氮肥的合理施用和推广提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验设在山东省济宁市鱼台县鱼城镇马棚村,该地区的洋葱 (*Allium cepa*) (或大蒜 *Allium sativum* L, 辣椒 *Capsicum annuum* Linn) - 棉花 (*Anemone vitifolia* Buch) 套种模式是鲁西南地区一种典型的种植模式。该地区属暖温带季风型大陆性气候,年降雨量 700 mm 左右,土壤类型为潮土,0~20 cm 土层砂粒含量 9.53%,粉粒含量 79.05%,粘粒含量 11.41%,土壤

质地为粉壤土。0~20 cm 土层全氮含量 0.41 g·kg⁻¹, NO₃⁻-N 含量 23.14 mg·kg⁻¹, NH₄⁺-N 含量 9.75 mg·kg⁻¹, 有效磷含量 49.65 mg·kg⁻¹, 速效钾含量 138.05 mg·kg⁻¹, pH 值(水土比为 2.5:1) 7.03。

洋葱品种为中甲高黄(早熟、黄皮),棉花品种为济 5102,均为当地常用品种。洋葱种植行距和株距均为 20 cm,棉花种植行距 110 cm、株距 30 cm。控释氮肥包括树脂包膜尿素(PCU,含 N 42%)和硫加树脂包膜控释尿素(PSCU,含 N 36%),在 25 ℃静水中的释放期均为 3 个月,洋葱和棉花两季所用肥料为同一批次产品。速效肥料包括大颗粒尿素(N 46%)、磷酸二铵(N 18%, P₂O₅ 46%)和硫酸钾(K₂O 50%)。所有肥料均由金正大生态工程集团股份有限公司提供。

试验设速效氮肥(CN)、控释氮肥(CRN)两种类型,每种氮肥设 4 个施肥水平,按照当地常规施氮量(N 200 kg·hm⁻²)的基础上减量 50%(N 100 kg·hm⁻²)和增量 50%(N 300 kg·hm⁻²),以不施肥处理(N 0 kg·hm⁻²)为对照,共 7 个处理。各施肥处理磷、钾用量(P₂O₅-K₂O 为 90~220 kg·hm⁻²)一致,其中磷肥为磷酸二铵,钾肥为硫酸钾。速效氮肥处理中氮肥由尿素和磷酸二铵提供,控释氮肥处理中控释氮肥和速效氮肥各占氮肥总量的 50%,其中树脂包膜氮肥和硫加树脂包膜控释氮肥各占 25%,尿素和磷酸二铵中速效氮占氮肥总量的 50%。各试验处理的具体施肥量列于表 1,洋葱和棉花均按照上述方案施肥。每个处理重复 3 次,各小区随机排列。

试验小区长、宽均为 5 m,小区与小区之间有 30 cm 的土埂相隔,灌溉时各小区用小型喷灌带单独浇水,并保证浇水量一致,以减少因灌、排水造成养分移动所引起的差异。每列小区之间均有 1 m 的水沟用来在降雨过多时排水。2012 年 11 月 3 日将洋葱季所有肥料以基肥的形式一次深翻施入土壤中,覆膜并移栽洋葱,各小区洋葱种植密度保持一

表 1 试验设计及肥料施用量

Table 1 Experimental design and fertilizer application rates

处理 Treatment	处理代号 Code	施肥量 N-P ₂ O ₅ -K ₂ O Fertilizer rate/kg·hm ⁻²	肥料组成及用量 Composition and rates of fertilizers/g·25m ⁻²
对照 Control	CK	0-0-0	—
速效氮肥 Common nitrogen fertilizer	CN100	100-90-220	尿素 353,磷酸二铵 489,硫酸钾 1100
	CN200	200-90-220	尿素 897,磷酸二铵 489,硫酸钾 1100
	CN300	300-90-220	尿素 1440,磷酸二铵 489,硫酸钾 1100
控释氮肥 Controlled-release nitrogen fertilizer	CRN100	100-90-220	尿素 82,PCU 149,PSCU 174,磷酸二铵 489,硫酸钾 1100
	CRN200	200-90-220	尿素 353,PCU 298,PSCU 347,磷酸二铵 489,硫酸钾 1100
	CRN300	300-90-220	尿素 625,PCU 466,PSCU 521,磷酸二铵 489,硫酸钾 1100

致;2013 年 4 月初进行棉花土钵育苗,育苗时不施用任何肥料,4 月 20 日将棉花苗移栽进洋葱田中预先留置好的行间;洋葱生长过程中不进行任何追肥,2013 年 5 月 10 日洋葱收获;2013 年 5 月 25 日对棉花进行施肥,施肥时将棉花季肥料一次全部施入距棉花根系 5~15 cm 的施肥沟中,施肥深度为 10~15 cm。在洋葱和棉花生育期内,按常规高产栽培技术进行田间管理。

1.2 样品采集与分析

在 2013 年 5 月 10 日(洋葱收获期)、8 月 19 日(棉花铃期)、10 月 10 日(棉花拔秆收获期)分别采集 0~20 cm 和 20~40 cm 两层土壤样品,各小区按照 5 点采样法,每个小区相同层次的土壤混合为 1 个样品。棉花生育期内调查棉花功能叶(主茎倒四叶)的叶绿素 SPAD-502 读数、铃数、果枝数、茎粗。

各小区洋葱全部收获,从鳞茎膨大处向上 2 cm 位置剪断,去除根系后称量。于 2013 年 10 月 10 日棉花拔秆收获前统计小区内全部棉花结铃数,每小区采集 30 朵棉絮,称重后计算单铃重,用皮辊机轧花后测定棉花衣分。根据小区株数,单株平均结铃数和平均单铃重,计算各处理的籽棉和皮棉产量。

两种包膜控释氮肥的养分释放率按照国标 GB/T 23348—2009《缓释肥料》的规定,用 25 °C 静水浸提法测定。土壤 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 含量采用 0.01 mol·L⁻¹ 的 CaCl_2 溶液浸提,连续流动化学分析仪(AA3)测定;土壤全氮含量用浓硫酸消煮,Smartchem200 全自动间断化学分析仪测定^[10],具体测定方法依据《土壤农业化学分析方法》^[11]。

1.3 数据统计与分析

试验数据均采用 Microsoft Excel 2003 和 SAS 9.2 (SAS Institute, Cary) 软件进行计算和方差分析,应用 Duncan 检验法对不同处理间差异显著性($P<0.05$)进行多重比较分析。

2 结果与分析

2.1 控释氮肥 25 °C 下静水养分释放曲线

两种控释氮肥累积释放率曲线如图 1 所示。释放速率分为 3 个阶段:缓慢释放阶段、快速释放阶段、释放速率逐渐减小阶段。PCU 在 20 d 左右养分释放明显加快;PSCU 在静水中前期释放较 PCU 缓慢,但在 40 d 左右也明显加快。两种控释氮肥在 30~110 d 期间的养分释放速率均较快,这一时期正是棉花生长旺盛、需氮较多的初花期至始絮期,因而能较好地满足棉花需肥

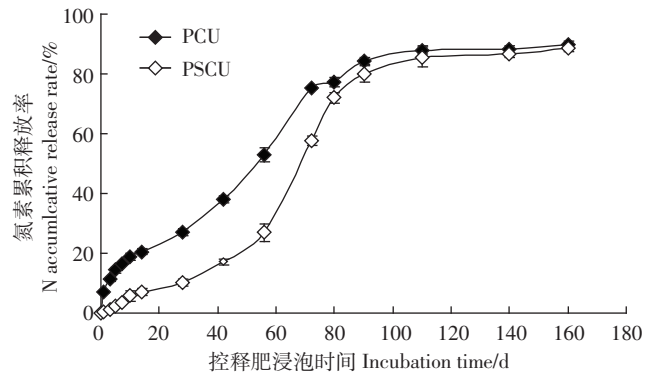


图 1 控释氮肥在 25 °C 静水中的养分释放曲线

Figure 1 Cumulative release curves of nitrogen in CRN in water at 25 °C

高峰期的需求,有利于棉花产量提升。

2.2 控释氮肥在洋葱-棉花套作中的增产效应

2.2.1 对洋葱产量的影响

速效氮肥和控释氮肥在氮用量 300 kg·hm⁻² 处理时洋葱单球重均显著高于氮用量 100 kg·hm⁻² 处理,其余处理间差异不显著。

不同处理之间洋葱产量表现出明显的差异性(表 2)。速效氮肥施氮 200、300 kg·hm⁻² 处理洋葱产量分别较施氮 100 kg·hm⁻² 处理显著增加 15.3% 和 17.5%;控释氮肥处理洋葱产量以施氮 300 kg·hm⁻² 处理为最高,显著高于施氮 100、200 kg·hm⁻² 处理,增产效果分别为 15.7% 和 7.9%;控释氮肥施氮 200 kg·hm⁻² 处理洋葱产量显著高于施氮 100 kg·hm⁻² 处理,增产率为 7.1%。等施氮量下,施氮 100 kg·hm⁻² 控释氮肥处理洋葱产量较速效氮肥处理显著增产 19.6%;施氮 300 kg·hm⁻² 控释氮肥处理洋葱产量较速效氮肥处理显著增产 6.7%。其余处理间差异不显著。

表 2 速效氮肥和控释氮肥处理洋葱产量

Table 2 Onion yield in treatments with common nitrogen fertilizer and controlled-release nitrogen fertilizer

处理 Treatment	单球鲜重 Fresh weight of single ball/ g·ball ⁻¹	产量 Onion yield/t·hm ⁻²	较速效氮肥等氮增产/% Over CN with same N rate
CK	247.5±5.2d	44.9±1.0e	—
CN100	348.3±4.3c	58.5±1.0d	—
CN200	371.2±5.5bc	73.8±0.9b	—
CN300	381.3±5.7ab	76.0±1.5b	—
CRN100	355.4±3.6bc	70.1±0.9c	19.6
CRN200	373.9±1.1ab	75.7±1.2b	2.6
CRN300	388.3±2.2a	81.1±1.4a	6.7

注:在同一列中的数据用邓肯多重比较分析,凡尾部标有不同字母的数值表示其间差异显著($P<0.05$);“—”表示无此值。下同。

2.2.2 对棉花产量的影响

施肥显著提高了棉花成铃数、单铃重和籽棉产量。速效氮肥处理棉花产量均随施氮量的增加而增加,但控释氮肥施氮 200、300 kg·hm⁻² 处理的棉花产量相同(表 3)。速效氮肥施氮 300 kg·hm⁻² 处理籽棉较施氮 100、200 kg·hm⁻² 处理显著增产 7.7% 和 34.28%,速效氮肥施氮 200 kg·hm⁻² 处理籽棉较施氮 100 kg·hm⁻² 处理增产 24.7%, 同样达到显著水平;控释氮肥施氮 300、200 kg·hm⁻² 处理籽棉分别较施氮 100 kg·hm⁻² 处理显著增产 15.4% 和 14.5%,皮棉分别显著增产 14.5% 和 14.3%。施氮量 100、200 kg·hm⁻² 时,控释氮肥处理籽棉产量较速效氮肥处理分别显著增加 17.3% 和 7.7%, 皮棉产量分别增加 14.5% 和 6.8%。其余处理间差异不显著。

速效氮肥施氮 200、300 kg·hm⁻² 处理棉花成铃数均显著高于施氮 100 kg·hm⁻² 处理。等施氮量下,施氮 100 kg·hm⁻² 控释氮肥处理成铃数显著高于速效氮肥处理。其余处理间差异不显著。不同氮肥种类和用量处理棉花单铃重差异显著,氮用量 300 kg·hm⁻² 的速效氮肥和控释氮肥处理棉花单铃重显著高于同种氮肥类型下氮用量 100 kg·hm⁻² 处理。等施氮量下,控释氮肥处理单铃重与速效氮肥处理差异不显著。施氮

300 kg·hm⁻² 控释氮肥处理衣分含量显著高于施氮 100 kg·hm⁻² 控释氮肥和速效氮肥处理。等施氮量的控释氮肥和速效氮肥处理间衣分含量差异不显著。

2.2.3 对棉花铃期农艺性状的影响

不同氮肥种类和用量下,棉花铃期植株茎粗、果枝数、铃数和功能叶片 SPAD 值有显著差异(表 4)。速效氮肥和控释氮肥处理功能叶片 SPAD 值均显著高于对照处理。同种氮肥类型下,棉花功能叶片 SPAD 值均以氮用量 300 kg·hm⁻² 处理为最高,显著高于氮用量 100、200 kg·hm⁻² 处理。氮用量 100、200 kg·hm⁻² 的控释氮肥处理 SPAD 值均显著高于等施氮量的速效氮肥处理。其余处理间差异不显著。

施氮量 300 kg·hm⁻² 控释氮肥处理铃期棉花茎粗显著高于其余处理;施氮量 200 kg·hm⁻² 控释氮肥处理和施氮量 300 kg·hm⁻² 速效氮肥处理铃期棉花茎粗显著高于对照处理。其余处理间无显著差异。同种氮肥类型下,氮用量 300 kg·hm⁻² 处理棉花果枝数均显著高于氮用量 100 kg·hm⁻² 处理;氮用量 300、200 kg·hm⁻² 速效氮肥和控释氮肥处理果枝数显著高于对照处理。其余处理间差异不显著。氮用量 300 kg·hm⁻² 的速效氮肥和控释氮肥处理结铃数均显著高于同种氮肥种类下的氮用量 100 kg·hm⁻² 处理。其余处理间差

表 3 速效氮肥和控释氮肥处理棉花产量及产量构成因素

Table 3 Cotton yield and its component factors in treatments with common fertilizer and controlled-release nitrogen fertilizer

处理 Treatment	成铃数 Number of bolls/ 个·hm ⁻²	单铃重 Weight of single boll/g·boll ⁻¹	籽棉产量 Seed yield/ kg·hm ⁻²	衣分 Lint percentage/%	皮棉产量 Lint yield/ kg·hm ⁻²	较速效氮肥等氮增产 Over CN with same N rate/%
CK	661 290d	5.18±0.04d	3427±64e	38.85±0.12c	1374±13e	—
CN100	763 320c	5.45±0.10c	4162±67d	38.62±0.14bc	1660±36d	—
CN200	942 495ab	5.51±0.04bc	5189±45b	39.23±0.39abc	2035±24b	—
CN300	982 110a	5.69±0.07ab	5589±80a	39.05±0.15ab	2182±21a	—
CRN100	892 050a	5.47±0.03bc	4882±87c	38.94±0.15bc	1901±37c	17.3
CRN200	965 100a	5.79±0.06ab	5591±66a	38.89±0.27abc	2174±38a	7.7
CRN300	988 380a	5.70±0.05a	5639±99a	39.89±0.26a	2177±30a	0.9

表 4 铃期速效氮肥和控释氮肥处理棉花长势情况

Table 4 Growth characteristics of cotton in treatments with common fertilizer and controlled-release nitrogen fertilizer at boll stage

处理 Treatment	叶绿素读数 SPAD Value	茎粗 Stem diameter/cm	果枝数 Number of branch/ 个·株 ⁻¹	结铃数 Number of bolls/ 个·株 ⁻¹
CK	44.26±0.83f	1.51±0.04c	13.89±0.48c	21.56±0.48f
CN100	46.96±0.27e	1.69±0.05bc	15.00±0.51bc	24.00±1.20ef
CN200	49.37±0.50cde	1.72±0.05bc	15.78±0.29ab	26.67±0.84cde
CN300	51.42±1.00ab	1.80±0.03b	16.89±0.11a	27.67±0.51cd
CRN100	48.21±0.66cd	1.73±0.11bc	15.11±0.62bc	25.22±1.44de
CRN200	50.39±0.25bc	1.79±0.07b	16.00±0.38ab	30.67±1.53ab
CRN300	51.90±0.15a	2.05±0.10a	17.11±0.29a	33.22±0.78a

异不显著。

2.3 控释氮肥对土壤无机态氮含量的影响

2.3.1 对棉花套种模式土壤 NO_3^- -N 含量的影响

不同施肥处理对各时期土壤 NO_3^- -N 含量有显著影响(表 5)。在棉花苗期,各处理 0~20 cm 土层 NO_3^- -N 含量均显著高于 20~40 cm 土层。控释氮肥处理 0~20 cm 土层的 NO_3^- -N 含量随施氮量的增加而升高,速效氮肥施氮 200、300 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 处理 0~20 cm 土层 NO_3^- -N 含量均显著高于施氮 100 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 处理,但速效氮肥施氮 200、300 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 处理 0~20 cm 土层的 NO_3^- -N 含量相同。等施氮量下,施氮 100、300 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 控释氮肥处理 0~20 cm 土层 NO_3^- -N 含量显著高于速效氮肥处理。速效氮肥施氮 300 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 处理 20~40 cm 土层 NO_3^- -N 含量显著高于施氮 100 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 处理。其余处理间差异不显著。

在棉花铃期,施氮 300 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 控释氮肥处理 NO_3^- -N 含量显著高于施氮 100 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 速效氮肥处理和对照处理,其余处理间 0~20 cm 土层中 NO_3^- -N 含量差异不显著。

不同氮肥类型和用量对棉花拔秆收获时 0~20、20~40 cm 土层 NO_3^- -N 含量的影响更为显著。各处理

0~20 cm 土层 NO_3^- -N 含量均显著高于 20~40 cm 土层。速效氮肥施氮 300 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 处理 0~20 cm 土层 NO_3^- -N 含量显著高于施氮 100 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 处理。控释氮肥施氮 200、300 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 处理 0~20 cm 土层 NO_3^- -N 含量均显著高于施氮 100 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 处理。氮用量 100、200 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,控释氮肥处理 0~20 cm 土层 NO_3^- -N 含量显著高于等施氮量的速效氮肥处理。在氮用量 300 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,控释氮肥与速效氮肥 0~20 cm 土层 NO_3^- -N 含量相等,但 20~40 cm 土层速效氮肥处理 NO_3^- -N 含量显著增加,说明大量的速效氮肥供应增加了土壤 NO_3^- -N 的淋溶损失,而控释氮肥处理主要集中在 0~20 cm 土层中。其余处理间土壤 NO_3^- -N 含量无显著差异。

2.3.2 对棉花套种模式土壤 NH_4^+ -N 含量的影响

在棉花苗期,施氮量 300 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 速效氮肥处理 20~40 cm 土层 NH_4^+ -N 含量显著高于除施氮 300 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 控释氮肥处理外的其余处理。相等施氮量的速效氮肥与控释氮肥处理 0~20 cm 和 20~40 cm 土层 NH_4^+ -N 含量无显著差异。

施肥显著提高了铃期土壤 NH_4^+ -N 含量(表 6),速效氮肥施氮 300 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 处理土壤 NH_4^+ -N 含量显著高

表 5 不同生育期各处理不同土层 NO_3^- -N 含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 5 Dynamics of soil NO_3^- -N concentrations in treatments with common fertilizer and controlled-release nitrogen fertilizer at different stages of cotton($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

处理 Treatment	苗期 Seedling stage		铃期 Cotton boll stage	棉花收获期 Cotton harvest stage	
	0~20 cm	20~40 cm	0~20 cm	0~20 cm	20~40 cm
CK	14.97±0.52d	7.05±0.42d	16.23±2.21b	16.88±2.01c	11.58±2.06c
CN100	19.71±0.78c	11.89±0.21b	16.71±0.34b	17.29±1.07c	8.92±1.01c
CN200	22.94±0.33b	12.22±0.71ab	19.63±1.71ab	20.41±1.90bc	16.51±1.78bc
CN300	24.02±0.44b	13.06±0.29a	22.25±2.05ab	35.89±2.08a	30.03±1.27a
CRN100	20.95±0.48c	9.85±0.50c	21.66±3.84ab	24.19±1.26b	12.97±4.52bc
CRN200	23.59±1.02b	10.96±0.85bc	23.06±0.75ab	35.81±3.72a	17.69±2.71b
CRN300	25.73±0.65a	11.58±0.69bc	26.27±2.82a	36.63±2.02a	14.31±2.11bc

表 6 不同生育期各处理不同土层 NH_4^+ -N 含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 6 Dynamics of soil NH_4^+ -N concentrations in treatments with common fertilizer and controlled-release nitrogen fertilizer at different stages of cotton($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

处理 Treatment	苗期 Seedling stage		铃期 Cotton boll stage	棉花收获期 Cotton harvest stage	
	0~20 cm	20~40 cm	0~20 cm	0~20 cm	20~40 cm
CK	23.3±0.93a	17.84±0.92b	18.56±1.38c	17.81±1.34b	15.28±1.65c
CN100	19.69±3.04a	18.6±0.52b	23.08±2.11bc	20.46±0.53ab	17.05±2.11bc
CN200	20.67±0.90a	19.08±1.12b	24.66±4.16ab	24.16±0.73a	17.58±0.74abc
CN300	23.92±2.53a	22.52±1.20a	27.55±1.52a	23.61±0.67ab	20.72±1.25ab
CRN100	21.61±1.76a	18.54±1.20b	25.37±2.18ab	22.08±0.48ab	16.44±1.38bc
CRN200	22.82±1.34a	19.12±0.41b	26.14±1.03ab	23.26±1.86ab	18.59±0.89ab
CRN300	25.54±1.13a	20.62±0.43ab	25.06±1.61ab	23.53±2.15ab	20.73±0.45ab

于施氮 $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 处理。其余处理间差异不显著。

棉花收获时,不同施氮量的速效氮肥和控释氮肥处理 $0\sim 20 \text{ cm}$ 土层 NH_4^+-N 含量无显著差异。等施氮量下,控释氮肥处理 $20\sim 40 \text{ cm}$ 土层 NH_4^+-N 含量与速效氮肥处理差异不显著(表 6)。

2.3.3 对棉花拔秆收获时土壤全氮含量的影响

棉花拔秆收获时,控释氮肥和施氮 $200, 300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 速效氮肥处理与对照处理相比,显著增加了 $0\sim 20, 20\sim 40 \text{ cm}$ 土层全氮含量(图 2)。控释氮肥和速效氮肥处理在施氮 $200, 300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, $0\sim 20 \text{ cm}$ 土层全氮含量显著高于施氮 $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 处理。速效氮肥施氮 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 处理 $20\sim 40 \text{ cm}$ 土层全氮含量显著高于施氮 $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 处理。其余处理间差异不显著。等施氮量的控释氮肥处理 $0\sim 20 \text{ cm}$ 土层全氮含量显著高于速效氮肥处理,而 $20\sim 40 \text{ cm}$ 土层全氮含量差异不显著。这可能与控释氮肥降低了氮挥发和土壤 NO_3^--N 的淋溶损失有关。

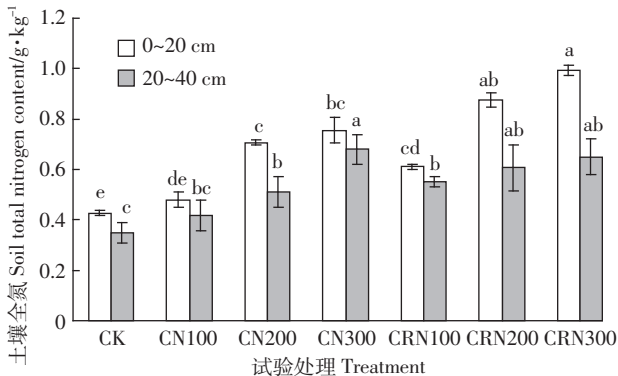


图2 速效氮肥和控释氮肥处理棉花收获后土壤全氮含量
Figure 2 Soil total nitrogen in $0\sim 40 \text{ cm}$ soil profile at harvest stage of cotton in treatments with common fertilizer and controlled-release nitrogen fertilizer

3 讨论

单位面积内棉花产量的高低取决于株数、单株成铃数、单铃重和衣分含量。因此,在种植密度一定的条件下,单株成铃数、单铃重和衣分是影响棉花产量构成的最主要因素。在本试验中,施氮 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的控释氮肥处理籽棉产量与氮用量 $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 处理差异不显著,但均显著高于施氮 $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 处理,说明在施用控释氮肥 $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的基础上继续增加氮肥用量不能继续提高棉花产量。当氮肥用量达到一定程度,棉花产量可达最高值,继续供应氮肥时,会降低氮素向生殖器官(棉铃)中转移的分配系数^[12-14],营养过旺,反而造成生殖器官大量脱落^[15],降低棉花产量。在

施氮 $100, 200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,控释氮肥处理较普通氮肥处理籽棉产量分别显著增产 $17.3\%, 7.7\%$ 。等施氮量下,控释氮肥能够通过提高棉花单株结铃数和单铃重(表2)而显著提高棉花产量。控释氮肥提高籽棉和皮棉产量主要是通过延缓棉花叶片中叶绿素的分解,改善棉花叶片的光合特性实现的^[16]。在棉花苗期(洋葱收获后) $0\sim 20 \text{ cm}$ 土层中控释氮肥残留有较高含量的 NO_3^--N (表5),能够更好地满足苗期棉花生长的需求,提高铃期棉花功能叶片 SPAD 值和结铃数(表4)。控释氮肥使氮素释放时间和强度与棉花养分吸收规律相吻合,满足其对养分的需求,从而提高了棉花产量^[17]。控释氮肥施氮 $300, 200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时棉花产量相等,一方面可能与过高的施氮量有关,充足的氮素供应下速效氮肥所占比例已经能够满足棉花生长的需求,控释氮肥的优势无法充分体现,另一方面还可能与控释氮肥处理中控释氮与速效氮的比例有关。在山东棉区施氮 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,控释氮肥和速效肥掺混比例为 $7:3$ 、一次性基施能够取得最好棉花产量^[18],而有研究表明,在施氮 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时 50% 速效与 50% 控释氮肥基施能够较好地促进苗期棉花功能叶片的叶面积,从而利于促进棉花产量的形成^[19]。也有研究表明 100% 控释氮肥能够提高叶绿素荧光动力学参数,改善叶肉细胞的光合特性,维持较高的净光合速率,提高棉花产量^[16]。

由于洋葱跨越冬季生产,而控释氮肥养分释放主要受土壤温度的影响^[20],在洋葱进入越冬期后养分吸收较少,此时地温持续在 0°C 以下,控释氮肥养分释放速度减慢。越冬期后土壤温度升高,控释氮肥氮素释放速率也相应增加,仍能够较好地满足作物对养分的需求^[21]。棉花苗期(洋葱收获后)土壤中 NH_4^+-N 的含量变化能够较好地体现这一规律。在本试验中,等施氮量条件下,棉花苗期控释氮肥处理的表层土壤 NO_3^--N 含量均高于速效氮肥处理,但 $20\sim 40 \text{ cm}$ 土层控释氮肥处理 NO_3^--N 含量低于速效氮肥处理(表5),这说明在棉花苗期施肥前,上一季洋葱所施用的控释氮肥仍然能够使 $0\sim 20 \text{ cm}$ 土层保持较高的无机氮含量,满足下一季棉花苗期生长的需求。在棉花苗期(洋葱收获)和棉花拔秆收获时,同种氮肥类型下施氮量越高,土壤硝态氮含量越高。当施氮量大于 $270 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,土壤表层硝态氮含量显著增加,施氮 $360 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时 $0\sim 20 \text{ cm}$ 硝态氮含量为施氮 $270 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时的 2.2 倍,施氮 $450 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 为施氮 $270 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时的 4.7 倍^[22]。等施氮量下控释氮肥处理 $20\sim 40 \text{ cm}$ 土层

中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量均低于速效氮肥处理,表明施用控释氮肥能够在一定程度上降低土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 向下层土壤中的淋溶,减少对地下水产生污染的风险^[23]。云鹏等^[24]认为氮肥施用量对于土壤 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量并没有显著影响,与本试验棉花收获期氮肥施用量对土壤中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量影响未达到显著水平的研究结果相同。但马兴华等^[25]则认为相同的底施、追施比例下施氮量越高,土壤 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量越高,为硝化作用提供底物越多,从而保证了后期有效氮供应,避免了短时间内 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的大量累积。

4 结论

氮肥种类和用量对棉花产量有显著影响。施氮 $200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的控释氮肥处理籽棉较等施氮量的速效氮肥处理和 $100\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 控释氮肥处理分别显著增产 7.7% 和 14.5%, 但与 $300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的控释氮肥和速效氮肥处理差异不显著,说明在施用控释氮肥 $200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的基础上继续增加氮肥用量无法继续提高棉花产量。基于以上试验结果,认为施肥量 $200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的控释氮肥处理为本试验中最优处理。由于区域气候特点、作物品种、种植模式以及产量水平的影响,加之不同地区洋葱和棉花养分需求也存在一定差异,在其他地区施用控释氮肥时还需要进一步研究,综合考虑产量、经济效益和环境效应来确定最佳施肥类型和施肥量。

参考文献:

- [1] 李秋芝, 杨中旭, 刘玉华, 等. 聊城市棉花生产存在的问题与对策[J]. 农业科技通讯, 2009, 10: 69-70.
LI Qiu-zhi, YANG Zhong-xu, LIU Yu-hua, et al. The cotton production problems and counter measures of in Liaocheng[J]. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, 2009, 10: 69-70.
- [2] 朱兆良, 文启孝. 中国土壤氮素[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1992: 213-249.
ZHU Zhao-liang, WEN Qi-xiao. Nitrogen in China's soil[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1992: 213-249.
- [3] 张国梁, 章 申. 农田氮素淋失研究进展[J]. 土壤, 1998(6): 291-297.
ZHANG Guo-liang, ZHANG Shen. Farmland research progress of nitrogen leaching[J]. *Soils*, 1998(6): 291-297.
- [4] 徐玉宏. 氮肥污染与防治[J]. 环境污染与防治, 2002, 24(3): 174-175.
XU Yu-hong. Nitrogen pollution and prevention[J]. *Environmental Pollution and Control*, 2002, 24(3): 174-175.
- [5] 张 民, 杨越超, 宋付朋, 等. 包膜控释氮肥料研究与产业化开发[J]. 化肥工业, 2005, 32(2): 7-13.
ZHANG Min, YANG Yue-chao, SONG Fu-peng, et al. Coated controlled release fertilizer research and industrialization development[J]. *Chemical Fertilizer Industry*, 2005, 32(2): 7-13.
- [6] 齐建建, 刘世琦, 张自坤, 等. 控释掺混肥对大蒜鳞茎产量、品质和氮素利用率的影响[J]. 中国蔬菜, 2009(8): 42-47.
QI Jian-jian, LIU Shi-qi, ZHANG Zi-kun, et al. Effects of controlled-releasing bulk blending fertilizer application on garlic yield, quality and nitrogen utilization efficiency[J]. *China Vegetables*, 2009(8): 42-47.
- [7] 董 亮, 张玉凤, 李 彦, 等. 包膜控释 BB 肥对大葱产量、品质及养分含量的影响[J]. 西北农业学报, 2011, 20(3): 155-160.
DONG Liang, ZHANG Yu-feng, LI Yan, et al. Effects of coated controlled-release blend bulk fertilizers on yield, quality and nutrient content of scallion[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2011, 20(3): 155-160.
- [8] 赵 斌, 董树亭, 王空军, 等. 控释氮肥对夏玉米产量及田间氨挥发和氮素利用率的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(11): 2678-2684.
ZHAO Bin, DONG Shu-ting, WANG Kong-jun, et al. Effects of controlled-release fertilizers on summer maize grain yield, field ammonia volatilization, and fertilizer nitrogen use efficiency[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(11): 2678-2684.
- [9] 孙永红, 范晓晖, 高豫汝, 等. 包膜尿素对水稻的增产效应及提高氮素利用率的研究[J]. 土壤, 2007, 39(4): 594-598.
SUN Yong-hong, FAN Xiao-hui, GAO Yu-ru, et al. Effects of controlled-release urea on rice yield and fertilizer nitrogen use efficiency[J]. *Soils*, 2007, 39(4): 594-598.
- [10] 潘延安, 雷 沛, 张 洪, 等. 重庆园博园龙景湖新建初期内源氮磷分布特征及扩散通量估算[J]. 环境科学, 2014, 35(5): 1727-1734.
PAN Yan-an, LEI Pei, ZHANG Hong, et al. Distribution of nitrogen and phosphorus in the sediments and estimation of the nutrients fluxes in Longjing Lake, Chongqing City, during the initial impoundment period[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2014, 35(5): 1727-1734.
- [11] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 三版. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 16-195.
LU Ru-kun. Soil agricultural chemical analysis method[M]. 3rd edition. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000: 16-195.
- [12] 李伶俐, 马宗斌, 林同保, 等. 控释氮肥对棉花的增产效应研究[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(3): 45-47.
LI Ling-li, MA Zong-bin, Lin Tong-bao, et al. Effects of controlled release of N fertilizer on cotton yield[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, 15(3): 45-47.
- [13] 张 伟, 吕 新, 曹连莆. 不同氮肥用量对棉花冠层结构光合作用和产量形成的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(2): 80-87.
ZHANG Wei, LÜ Xin, CAO Lian-pu. Effects of nitrogen application amounts on cotton canopy structure photosynthesis and yield formation[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2005, 23(2): 80-87.
- [14] 马宗斌, 严根土, 刘桂珍, 等. 施氮量对黄河滩区棉花叶片生理特性、干物质积累及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(4): 849-857.
MA Zong-bin, YAN Gen-tu, LIU Gui-zhen, et al. Effects of nitrogen application rates on main physiological characteristics of leaves, dry matter accumulation and yield of cotton cultivated in the Yellow River bottomlands[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013, 19(4): 849-857.

- 849-857.
- [15] 李学刚, 宋宪亮, 孙学振, 等. 控释氮肥对棉花纤维品质、产量及氮肥利用效率的影响[J]. 作物学报, 2011, 37(10): 1910-1915.
LI Xue-gang, SONG Xian-liang, SUN Xue-zhen, et al. Effects of controlled release nitrogen fertilizer on fiber quality, yield, and nitrogen use efficiency[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(10): 1910-1915.
- [16] 李学刚, 宋宪亮, 孙学振, 等. 控释氮肥对棉花叶片光合特性及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(3): 656-662.
LI Xue-gang, SONG Xian-liang, SUN Xue-zhen, et al. Effects of controlled release N fertilizer on photosynthetic characteristics and yield of cotton[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(3): 656-662.
- [17] 杨俊刚, 曹 兵, 徐秋明, 等. 包膜控释氮肥肥料在旱地农田的应用研究进展与展望[J]. 土壤通报, 2010, 41(2): 494-500.
YANG Jun-gang, CAO Bing, XU Qiu-ming, et al. Coated controlled release fertilizer in the upland fields research progress and prospect of application[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(2): 494-500.
- [18] 陈宏坤, 李 博. 掺混型控释氮肥对棉花产量及氮肥利用率的影响[J]. 中国农学通报, 2012, 28(3): 213-217.
CHEN Hong-kun, LI Bo. Effect of slow/controlled-release fertilizer on cotton yield and apparent N recovery rates[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(3): 213-217.
- [19] 李学刚, 孙学振, 宋宪亮, 等. 控释氮肥对棉花生长发育及产量的影响[J]. 山东农业科学, 2009(6): 79-81, 98.
LI Xue-gang, SUN Xue-zhen, SONG Xian-liang, et al. Effects of controlled release N fertilizer on growth and yield of cotton[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2009(6): 79-81, 98.
- [20] 颜 晓, 张 民, 魏宗强, 等. 控释尿素养分速测及在田间土壤中氮素释放率研究[J]. 水土保持学报, 2009, 24(1): 167-171.
YAN Xiao, ZHANG Min, WEI Zong-qiang, et al. Fast measurement for nutrition release rate of controlled release urea and study of its nitrogen release rate in the field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 24(1): 167-171.
- [21] 颜 晓. 缓控释氮肥养分释放率快速测定及在田间土壤中释放率相关性的研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2010: 47-49
YAN Xiao. Fast measurement for nutrient release rate of slow/controlled release fertilizer and correlation with nutrient release rate in field soils[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2010: 47-49
- [22] 毕晓庆, 山 楠, 杜连凤, 等. 氮肥用量对设施滴灌栽培番茄产量品质及土壤硝态氮累积的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(11): 2246-2250.
BI Xiao-qing, SHAN Nan, DU Lian-feng, et al. Effects of nitrogen rates on tomato yield and quality and soil nitrate accumulation under drip irrigation in solar greenhouse[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(11): 2246-2250.
- [23] 董元杰, 万勇善, 张 民, 等. 控释掺混肥对花生生育期间剖面土壤铵态氮和硝态氮含量变化的影响[J]. 华北农学报, 2008, 23(6): 203-207.
DONG Yuan-jie, WAN Yong-shan, ZHANG Min, et al. Effect of controlled release blend bulk fertilizers on the soil ammonium and nitrate nitrogen content during the growing season of peanut[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2008, 23(6): 203-207.
- [24] 云 鹏, 高 翔, 陈 磊, 等. 冬小麦-夏玉米轮作体系中不同施氮水平对玉米生长及其根际土壤氮的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(3): 567-574.
YUN Peng, GAO Xiang, CHEN Lei, et al. Plant nitrogen utilization and soil nitrogen status in rhizosphere of maize as affected by various nitrogen rates in wheat maize rotation system[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(3): 567-574.
- [25] 马兴华, 于振文, 梁晓芳, 等. 施氮量和底施追施比例对土壤硝态氮和铵态氮含量时空变化的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(4): 4630-4634.
MA Xing-hua, YU Zhen-wen, LIANG Xiao-fang, et al. Effects of nitrogen application rate and its basal/top-dressing ratio on spatio-temporal variations of soil NO_3^- -N and NH_4^+ -N contents[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(4): 4630-4634.
- [26] 汪 军, 王德建, 张 刚. 太湖地区稻麦轮作体系下秸秆还田配施氮肥对水稻产量及经济效益的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(2): 265-270.
WANG Jun, WANG De-jian, ZHANG Gang. Effects of different N-fertilizer rates with straw incorporation on rice yield and economic benefit of rice-wheat rotation system in Taihu Lake region[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(2): 265-270.