

缓控释氮肥对寒地水稻产量、氮肥利用率及氮在黑土中分布的影响

郑雨^{1,2}, 姬景红^{1*}, 刘双全^{1*}, 赵月¹, 马星竹¹, 李杰³

- (1. 黑龙江省黑土保护利用研究院, 黑龙江 哈尔滨 150086;
2. 黑龙江省农业科学院博士后工作站, 黑龙江 哈尔滨 150086;
3. 黑龙江省农业科学院大庆分院, 黑龙江 大庆 163316)

摘要: 缓控释氮肥在寒地黑土水稻上的应用效果和施用技术尚不十分明确, 采用定位试验方法进行为期3年的试验研究, 明确不施氮肥(CK)、全部普通氮肥一次性基施(BU100%B)、全部缓控释氮肥一次性基施(CRU100%B)、农民习惯施肥(FP)、60%缓控释氮肥和40%普通氮肥混合一次性基施(MBC)条件下, 水稻产量、效益、氮素吸收利用和无机氮在土壤剖面中累积与分布的差异。结果表明, 与CK比较, 各施氮处理产量、效益、氮素利用率和无机氮在土壤剖面中的累积显著提高。MBC处理在产量、效益、氮肥利用率和减少土壤无机氮积累方面效果最好。与FP处理相比, MBC处理3年水稻平均增产6.2%, 经济效益增加17.7%, 氮肥利用率增加16.9%, 氮肥农学效率增加16.4%, 差异显著($P<0.05$)。施用缓控释氮肥减少了无机氮在剖面(0~90 cm)中的累积, MBC处理较FP土壤无机氮累积量平均降低7.9%, CRU100%B较BU100%B处理平均降低10.7%, 且差异显著($P<0.05$)。无机氮在土壤剖面中的分布由上到下逐渐减少, 0~30、30~60和60~90 cm土层分别占无机氮累积总量的38.3%~54.6%、28.8%~35.7%和14.0%~26.1%。施用缓控释氮肥增加了无机氮在土壤上层剖面(0~30 cm)的累积, 减少了无机氮在土壤深层剖面(60~90 cm)的累积量。在0~30 cm剖面中, MBC较FP处理无机氮平均增加12.4%, 在60~90 cm剖面中, 无机氮平均降低19.7%。可见, 施用缓控释尿素提高了氮肥利用率、增加了水稻产量和效益、降低了土壤无机氮在深层剖面的残留, 进而降低了氮素淋失的环境风险。

关键词: 缓控释氮肥; 水稻产量; 效益; 氮肥利用率; 氮素累积与分布

氮素是植物生长最重要的养分之一, 尤其是禾本科作物对氮素的需求量更大。然而大量的氮肥投入, 不仅造成资源浪费, 而且严重影响农业生态环境^[1]。如何提高氮肥利用效率, 减少氮肥用量, 降低对环境污染的风险受到广泛关注。我国水稻种植普遍存在氮肥施用量过高、施用方式不合理、养分损失严重等问题^[2], 导致氮肥利用率仅为20%~35%, 造成严重的资源浪费和农业面源污染^[3]。缓控释肥料通常能使作物更有效地利用养分, 从而减少养分损失, 而缓控释尿素是各类

缓控释肥中应用最广泛的一种, 它在提高作物产量和氮肥利用率方面比普通尿素更有效^[4-5]。有研究表明, 缓控释尿素一次性基肥施入节省水稻追肥劳动力, 同时减少氮损失, 因为它最小化了作物生长缓慢的早期季节氮的供应; 但在生长初期, 缓控释尿素从其聚合物涂层中释放的速度太慢, 无法成为有效的氮源^[6], 这也造成了供需矛盾。加入普通尿素有助于解决生长季前期短期氮固定和氮供应的需求, 而缓控释尿素可使氮的释放推迟到生长季后期^[7]。许多学者研究了控释氮肥与传统合成氮肥混合施用对作物养分吸收和利用的影响, 缓控释尿素+普通尿素组合比二者单独施用提高水稻的干物质积累和氮素利用效率^[8-9]。近年来, 有关缓控释氮肥在水稻上的应用效果和技术报道很多, 但针对东北寒地黑土粳稻的研究报道很少^[7, 10]。我国65%以上人口以稻米为主食, 水稻常年种植面积约3020万 hm^2 ^[11]。黑龙江省是我国最重要的商品粮生产基地之一, 耕地面积1230万 hm^2 , 水稻种植面积314.8万

收稿日期: 2022-03-23; 录用日期: 2022-07-13

基金项目: 国家重点研发计划子课题(2022YFD1500905-2); 黑龙江省水稻现代农业产业技术协同创新推广体系(黑农委体系, [2023]1号)。

作者简介: 郑雨(1989-), 助理研究员, 博士, 主要从事植物营养与施肥研究。E-mail: annadian@163.com。

通讯作者: 姬景红, E-mail: jinghong_98@163.com。刘双全, E-mail: shuangquanliu@126.com。



hm²，占全省耕地面积的 25.6%，占全国水稻种植面积的 10.4%^[12]。目前，我国东北寒地黑土生态区农民种植水稻主要采用“一基二追”的传统施肥方式，存在氮肥养分释放速度快，与水稻吸收不同步，肥料利用率低，劳动强度大等问题。因此，本文开展缓控释氮肥和普通氮肥以适宜比例配合施用，探索寒地黑土水稻高产高效土壤可持续的生产施肥模式，为氮肥高效利用提供技术支撑和理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验设计

庆安县位于黑龙江省绥化市东 50 km 的小兴安岭西南麓，松嫩平原腹地，属寒温带大陆性季风气候，年平均日照时数 2599 h，年平均气温 1.69℃，无霜期 130 d 左右，年平均降水量 577 mm。试验

于 2018—2020 年进行，采用田间定位试验方法，试验设在庆安县平安乡太平村（127°36′47.0″E，46°56′53″N），供试土壤类型为黑土，土壤肥力较高。种植前土壤有机质含量为 43.7 g/kg，碱解氮、有效磷和速效钾含量分别为 181.7、29.4 和 159.2 mg/kg，pH 值为 6.3。根据土壤分析结果和当地水稻生产水平，推荐氮磷钾施肥量：氮（N）、磷（P₂O₅）和钾（K₂O）用量分别为 157.5、52.5 和 75 kg/hm²。试验设 5 个处理，小区面积为 40 m²，3 次重复，随机区组排列。普通尿素（N 46%）作为普通氮肥，重过磷酸钙（P₂O₅ 46%）作为磷肥，氯化钾（K₂O 60%）作为钾肥，采用 Agrium 公司生产的聚合物包膜尿素（N 44%）作为缓控释氮肥。试验用水稻品种为绥粳 18，插秧密度为 30 cm × 13 cm。试验处理见表 1。

表 1 试验处理及养分用量

(kg/hm²)

处理	BU-N	CRU-N	P ₂ O ₅	K ₂ O	备注
CK	0	0	52.5	75	不施氮肥
BU100%B	157.5	0	52.5	75	100% 普通氮肥基施
CRU100%B	0	157.5	52.5	75	100% 缓控释氮肥基施
FP	157.5	0	52.5	75	40% 普通氮肥基施，60% 普通氮肥追施
MBC	63	94.5	52.5	75	40% 普通氮肥 +60% 缓控释氮肥混合基施

注：BU 表示普通尿素，CRU 表示缓控释尿素。

1.2 试验方法与数据处理

试验前后分别采集 0 ~ 90 cm（0 ~ 30、30 ~ 60 和 60 ~ 90 cm）的土壤剖面样品，收获后采集水稻植株和籽粒样品。在实验室中，先将植物样本放在 105℃ 的烘箱中 30 min 杀青，然后在 75℃ 烘干至恒重，称重，磨碎样本，通过 2 mm 筛以备分析。用 H₂SO₄-H₂O₂ 消化法和微量凯氏定氮法测定植物总氮浓度^[13]。每个小区取 0 ~ 30、30 ~ 60 和 60 ~ 90 cm 深度的土壤样品，用 0.01 mol/L CaCl₂ 提取，使用自动分析仪测定土壤 NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 的浓度^[14]。数据分析采用 DPS 7.0 数据处理系统；使用 Excel 2007 进行图表处理；计算方法如下^[15]：

氮_{吸收} (kg/hm²) = 籽粒产量 × 氮素含量 (%) + 秸秆产量 × 氮素含量 (%)；

氮_{残留} (kg/hm²) = NO₃⁻-N 的积累量 + NH₄⁺-N 的积累量 = [土层厚度 (cm) × 土壤容重 (g/cm³) × 土壤 NO₃⁻-N 含量] / 10 + [土层厚度 (cm) × 土壤容重 (g/cm³) × 土壤 NH₄⁺-N 含量] / 10；

氮肥利用率 (%) = (施氮区氮素吸收量 - 非施氮区氮素吸收量) / 施氮量 × 100；

氮肥农学效率 (kg/kg) = (施氮区产量 - 非施氮区产量) / 施氮量。

2 结果与分析

2.1 不同处理水稻产量及产量构成因子

2018—2020 年，水稻平均产量在 5407 ~ 8063 kg/hm² 之间（含水量 14.0%），CK、BU100%B、CRU100%B、FP 和 MBC 处理分别为 4585、6451、6815、7378 和 7832 kg/hm²（表 2）。与 CK 相比，BU100%B、CRU100%B、FP 和 MBC 处理水稻籽粒分别增产 1866、2230、2793 和 3247 kg/hm²，增产率分别为 40.7%、48.6%、60.9% 和 70.8%，差异显著（P<0.05）。与 FP 处理相比，MBC 处理 3 年平均增产 6.2%，差异显著（P<0.05），说明缓控释氮肥和普通尿素配合作基肥一次性施入，较农民习惯施肥对水稻产量有显著的正效应。与 MBC 处理相比，BU100%B 和 CRU100%B 分别减产 21.5% 和 14.9%，差异显著（P<0.05），说明普通氮肥或缓控释氮肥单独施用产量效果不如二者按比例混合施用效果好。CRU100%B 较 BU100%B 增产 5.6%，说明缓控释氮

肥单独施用较普通尿素单独施用也有较好的增产效果。从考种结果看(表3),氮肥对水稻生长发育有显著促进作用。施氮肥处理有效穗数、株高、穗长、穗粒数、结实率和千粒重几项指标均显著好于不施氮肥(CK),CRU100%B处理好于BU100%B,MBC处理好于FP,尤其是对穗粒数和千粒重效果显著。2019年产量较低的主要原因是多雨和台风的影响,导致水稻倒伏,灌浆不足,影响成熟度。

表2 不同处理水稻产量

年份	处理	产量 (kg/hm ²)	增产 (kg/hm ²)	增产率 (%)
2018	CK	5004 ± 228d	—	—
	BU100%B	6772 ± 277c	1765 ± 499c	35.6 ± 11.6c
	CRU100%B	7161 ± 227bc	2153 ± 128bc	43.1 ± 3.6bc
	FP	7616 ± 152ab	2608 ± 378ab	52.4 ± 10.0ab
	MBC	8018 ± 215a	3010 ± 397a	60.5 ± 10.7a
2019	CK	3745 ± 391c	—	—
	BU100%B	5843 ± 309b	2099 ± 143b	56.6 ± 8.8b
	CRU100%B	6185 ± 257b	2441 ± 365b	66.1 ± 14.9b
	FP	8035 ± 141a	3291 ± 436a	89.2 ± 19.5a
	MBC	7415 ± 236a	3670 ± 245a	99.1 ± 15.3a
2020	CK	5007 ± 611d	—	—
	BU100%B	6738 ± 350c	1747 ± 508c	35.8 ± 13.5c
	CRU100%B	7098 ± 225bc	2106 ± 848bc	43.7 ± 20.8bc
	FP	7482 ± 122ab	2491 ± 531b	51.0 ± 15.7b
	MBC	8063 ± 198a	3072 ± 819a	63.2 ± 22.6a
平均	CK	4585 ± 728e	—	—
	BU100%B	6451 ± 527d	1866 ± 198d	40.7 ± 12.1b
	CRU100%B	6815 ± 546c	2230 ± 181c	48.6 ± 13.1b
	FP	7378 ± 304b	2793 ± 431b	60.9 ± 21.7a
	MBC	7832 ± 362a	3247 ± 365a	70.8 ± 21.5a

注: 每年或平均数据后字母不同表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。下同。

表3 不同处理对水稻产量构成的影响

年份	处理	有效穗 (个/m ²)	株高 (cm)	穗长 (cm)	穗粒数 (个/株)	结实率 (%)	千粒重 (g)
2018	CK	231.8 ± 13.5d	74.8 ± 2.6c	13.3 ± 0.8c	69.8 ± 5.3d	88.2 ± 2.1c	21.7 ± 1.0c
	BU100%B	310.2 ± 26.3c	89.3 ± 3.6b	14.2 ± 0.4b	91.4 ± 3.2c	90.1 ± 1.2bc	23.5 ± 1.0bc
	CRU100%B	343.1 ± 23.7b	95.7 ± 2.3b	15.7 ± 0.8ab	102.9 ± 13.8bc	92.1 ± 3.1ab	24.4 ± 0.7ab
	FP	369.3 ± 13.5ab	102.8 ± 4.4a	16.3 ± 0.7ab	112.9 ± 11.2ab	93.0 ± 1.3ab	24.9 ± 0.8ab
	MBC	385.1 ± 19.2a	105.7 ± 3.2a	16.9 ± 1.0a	124.1 ± 9.6a	94.3 ± 1.5a	25.8 ± 0.9a
2019	CK	197.3 ± 16.7d	71.0 ± 3.1c	12.7 ± 0.7d	66.3 ± 4.5c	85.2 ± 2.0c	21.6 ± 0.7d
	BU100%B	275.3 ± 17.0c	84.3 ± 4.6b	13.5 ± 0.3c	82.8 ± 4.5b	86.1 ± 2.2c	23.0 ± 0.5c
	CRU100%B	312.7 ± 22.3bc	87.9 ± 2.6b	14.5 ± 0.4bc	89.3 ± 5.3b	88.3 ± 2.7bc	23.9 ± 0.7bc
	FP	339.0 ± 30.6ab	99.1 ± 4.4a	15.1 ± 0.7ab	103.4 ± 8.7a	90.5 ± 3.5ab	24.5 ± 0.7ab
	MBC	361.3 ± 17.0a	102.6 ± 4.2a	15.7 ± 0.5a	112.8 ± 7.8a	92.6 ± 1.9a	25.4 ± 0.6a
2020	CK	229.4 ± 17.1d	78.7 ± 3.1c	13.7 ± 0.6c	70.7 ± 6.8d	90.2 ± 1.1c	22.1 ± 1.1d
	BU100%B	287.2 ± 17.7c	82.2 ± 3.7bc	14.1 ± 0.7bc	84.3 ± 8.9c	89.8 ± 2.9c	23.3 ± 1.0cd
	CRU100%B	328.9 ± 21.7b	85.4 ± 2.2ab	14.7 ± 0.5abc	97.0 ± 4.8b	92.0 ± 2.5bc	24.3 ± 0.7bc
	FP	358.9 ± 16.3ab	87.9 ± 1.5a	15.3 ± 0.8ab	106.9 ± 5.8ab	94.4 ± 1.8ab	24.8 ± 0.8ab
	MBC	371.8 ± 16.0a	91.0 ± 2.6a	15.9 ± 0.6a	115.9 ± 5.5a	95.5 ± 1.5a	25.6 ± 0.9a
平均	CK	219.5 ± 19.2e	74.8 ± 3.9d	13.2 ± 0.5e	68.9 ± 2.3d	87.9 ± 2.5e	21.8 ± 0.3e
	BU100%B	290.9 ± 17.7d	85.3 ± 3.6c	14.0 ± 0.4d	86.2 ± 4.6d	88.7 ± 2.3d	23.3 ± 0.2d
	CRU100%B	328.1 ± 15.2c	89.9 ± 5.4b	15.0 ± 0.6c	96.6 ± 4.9c	90.8 ± 2.2c	24.2 ± 0.3c
	FP	355.7 ± 15.4b	96.6 ± 7.8ab	15.6 ± 0.6b	107.7 ± 4.8b	92.6 ± 2.0b	24.7 ± 0.3b
	MBC	372.7 ± 11.9a	99.8 ± 7.8a	16.2 ± 0.6a	117.6 ± 5.8a	94.1 ± 1.4a	25.6 ± 0.2a

2.2 不同处理水稻氮肥利用效率

不同年份水稻氮素利用效率略有不同,总的趋势基本一致。3年平均结果表明(图1a),与CK处理比较,BU100%B、CRU100%B、FP和MBC处理的氮肥利用率分别为26.3%、32.9%、35.6%和41.6%。MBC处理氮肥利用率最高,较FP氮素利用率提高6.0个百分点,即16.9%,差异显著($P<0.05$);CRU100%B处理较BU100%B处理提高6.6个百分点,即25.1%,差异显著($P<0.05$)。从水稻氮肥农学效率3年平均结果来看(图1b),BU100%B、CRU100%B、FP和MBC处理的氮素农学效率分别为11.8、14.2、17.7和20.6 kg/kg。MBC处理较FP氮素农学效率提高2.9 kg/kg,即16.4%,差异显著($P<0.05$);CRU100%B处理较BU100%B提高2.4 kg/kg,即20.3%,差异显著($P<0.05$)。

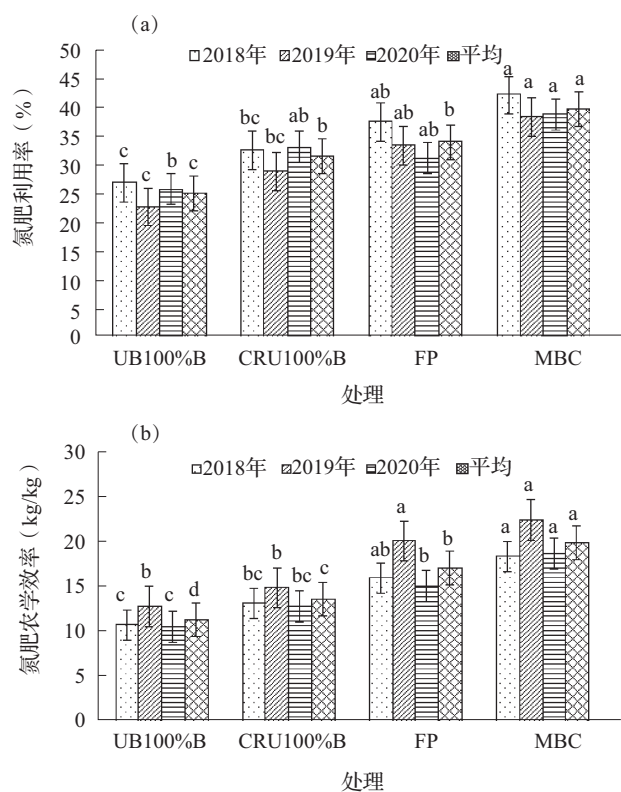


图1 不同处理水稻氮肥利用率和农学效率

注:柱上小写字母不同表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

2.3 不同处理土壤剖面无机氮积累与分布

3年定位试验结果表明(图2),土壤剖面(0~90 cm)无机氮积累值范围为63.6~95.3 kg/hm²,CK、BU100%B、CRU100%B、FP和MBC处理无机氮分别为63.6、95.3、85.1、90.1和83.1 kg/hm²。

与CK相比,施氮各处理土壤剖面(0~90 cm)无机氮积累量分别增加49.8%、33.7%、41.6%和30.7%,均达到显著水平($P<0.05$)。与FP比较,MBC处理土壤剖面(0~90 cm)无机氮积累量平均降低7.9%,CRU100%B较BU100%B降低10.7%,差异显著($P<0.05$)。从无机氮积累分布情况看(图2),无机氮在0~90 cm土壤剖面上的分布比例在水稻3年试验中基本一致,无机氮含量随土层深度的增加而降低。在0~30、30~60和60~90 cm土层中,无机氮积累量分别占无机氮积累总量的38.3%~54.6%、28.8%~35.7%和14.0%~26.1%。MBC处理土壤剖面(0~90 cm)无机氮积累量较FP处理降低7.8%,差异显著($P<0.05$);CRU100%B较BU100%B处理,无机氮积累量降低10.7%,差异显著($P<0.05$)。施用缓控释氮肥增加了无机氮在土壤上层剖面(0~30 cm)的累积,MBC较FP处理增加5.6个百分点,即增加12.4%;CRU100%B较BU100%B处理增加3.6个百分点,即增加8.0%。施用缓控释氮肥减少了无机氮在土壤深层剖面(60~90 cm)的累积,MBC较FP处理减少4.5个百分点,即降低19.7%;CRU100%B较BU100%B处理减少3.0个百分点,即降低13.5%。可见,缓控释氮肥无论是单独施用还是与普通氮肥混合施用均可以增加耕层土壤无机氮累积,降低土壤剖面下层无机氮累积,从而降低氮素流失和地下水污染的风险。

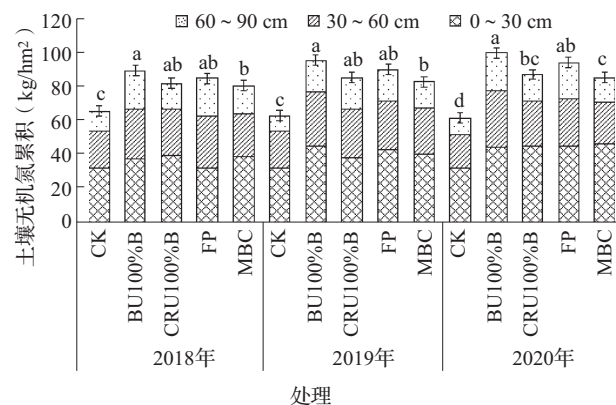


图2 不同处理土壤剖面无机氮积累与分布

2.4 不同处理水稻经济效益

经济效益分析结果显示,水稻施氮肥经济效益显著。从3年的平均结果看(表4),与不施氮肥(CK)比较,BU100%B、CRU100%B、FP和MBC处理纯收益分别增收4878、5848、7406和8716元/hm²,

无论缓控释氮肥与普通氮肥配合施用还是单独施用都有较好的经济效益，达到显著水平 ($P<0.05$)。与 FP 处理相比，MBC 处平均增收 1310 元 /hm²，增收率为 17.7%，差异显著 ($P<0.05$)；与 BU100%B 处理相

比，CRU100%B 处理平均增收 970 元 /hm²，增收率为 19.9%，差异显著 ($P<0.05$)。可见，缓控释氮肥单独施用，或与普通氮肥混合施用较普通氮肥均获得较好的经济效益，3 年试验结果呈同样的趋势。

表 4 不同氮肥处理水稻经济效益

年份	处理	肥料成本 (元 /hm ²)	追肥人工费 (元 /hm ²)	毛收益 (元 /hm ²)	纯收益 (元 /hm ²)
2018	CK	436	0	—	—
	BU100%B	782	0	4950 ± 1397	4604 ± 1397c
	CRU100%B	830	0	6038 ± 372	5644 ± 372bc
	FP	782	100	7312 ± 1057	6866 ± 1057ab
	MBC	811	0	8438 ± 1102	8063 ± 1102a
2019	CK	436	0	—	—
	BU100%B	782	0	5876 ± 399	5530 ± 400c
	CRU100%B	830	0	6834 ± 1022	6440 ± 1023c
	FP	782	100	9213 ± 1221	8767 ± 1221b
	MBC	811	0	10277 ± 685	9902 ± 686a
2020	CK	436	0	—	—
	BU100%B	782	0	4847 ± 1401	4501 ± 1401c
	CRU100%B	830	0	5854 ± 2337	5460 ± 2337bc
	FP	782	100	6931 ± 1451	6485 ± 1451b
	MBC	811	0	8558 ± 2258	8183 ± 2258a
平均	CK	436	0	—	—
	BU100%B	782	0	5224 ± 567	4878 ± 567d
	CRU100%B	830	0	6242 ± 521	5848 ± 521c
	FP	782	100	7819 ± 1223	7406 ± 1203b
	MBC	811	0	9091 ± 1029	8716 ± 1029a

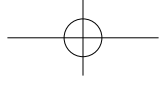
注：普通氮肥 (N) 2.2 元 /kg，缓控释氮肥 (N) 2.5 元 /kg，磷肥 (P₂O₅) 3.3 元 /kg，钾肥 (K₂O) 3.5 元 /kg，水稻价格 2.8 元 /kg，追施氮肥人工费 100 元 /hm²。

3 讨论

3.1 缓控释氮肥对水稻产量和效益的影响

普通氮肥肥效快，受挥发、径流、淋溶等因素的影响氮素损失率高，造成肥料利用率低及环境负荷增大，研发与推广应用新型肥料对农业生产有重要意义^[16]。缓控释肥料的主要优势在于能够简化施肥过程、提高肥料利用率，降低成本，提高生产效益^[2, 17-18]。寒地黑土的特点是土壤肥力较高，但春季气温低，土壤冷凉，有效养分释放慢，水稻前期生长养分供应主要以施用化肥为主。农民为了追求高产，连年大量施用氮肥，致使农田氮肥利用率低和氮素流失问题日益严重。有研究表明，缓控释

尿素与普通尿素以适当比例混合施用，水稻增产 8.0% ~ 34.2%^[19-20]。在本研究中，MBC 较 FP 增产 6.2%，差异显著 ($P<0.05$)；CRU100%B 较 BU100%B 增产 5.6%，说明缓控释氮肥单独施用较普通氮肥单独施用有一定的增产效果，但不如二者配合施用效果显著。施用缓控释氮肥对水稻经济效益也有较好的效果。蒋琪等^[21]研究表明，施缓控释肥处理在减氮 9.8% 条件下，增收 2.1%；傅丽青等^[22]研究结果，缓控释肥在氮肥用量比常规施肥分别减少近 50% 情况下，经济效益仅比常规施肥处理略有下降。本研究结果，MBC 较 FP 平均增收 1310 元 /hm²，增收率为 17.7%；CRU100%B 较 BU100%B 增收 970 元 /hm²，增收率为 19.9%，说明缓控释肥无论是单独施用，



还是与普通氮肥配合施用都能获得显著的经济效益。目前,农村青壮年劳动力短缺,缓控释肥既能实现水稻增产增收,又能降低劳动力成本,提高肥料利用率,减少过度施肥导致的污染,具有广阔的应用前景。

3.2 缓控释氮肥对水稻氮肥利用率的影响

缓控释肥具有促进水稻氮吸收,促进水稻生长发育,提高氮肥利用率的作用^[9, 23]。关于缓控释肥料对水稻氮素吸收利用和环境影响的研究报道很多^[24-25],但有关在寒地黑土生态区对水稻氮素吸收利用、对土体无机氮累积和分布研究的甚少,且大多以1年的试验结果为主^[26-27]。本研究结果是在连续3年定位试验条件下,得出缓控释氮肥和普通尿素配合作基肥一次性施入(MBC),较农民习惯施肥(FP)水稻氮肥利用率平均增加16.9%,氮肥农学效率平均增加16.4%,差异显著($P<0.05$)。说明在寒地黑土生态区,缓控释氮肥和普通尿素配合作基肥一次性施入,能够均衡供应水稻整个生育期对氮素的需求,减少氮素损失,提高氮素利用效率。CRU100%B较BU100%B处理氮肥利用率平均提高25.1%,氮肥农学效率提高20.3%,差异显著($P<0.05$),说明在氮肥施用量较大的情况下,缓控释氮肥对提高氮肥利用效率效果更好。施用缓控释氮肥可以减少氮肥用量10%~40%,在等氮量情况下缓控释尿素比传统氮肥使稻谷增产,提高氮肥利用率和农学效率^[26-29],本文与前人研究结果基本一致。

3.3 缓控释氮肥对稻田土壤氮素累积与分布的影响

水稻施用缓控释氮肥具有降低土体中矿质氮残留的效应。缓释氮肥一次性施肥较普通氮肥分次施用,降低了土壤 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 浓度,减少农田氨挥发,降低了土壤矿质氮淋溶的风险^[30-31]。有研究表明,施用棕榈硬脂酸包膜尿素较普通尿素水稻土壤 NH_4^+-N 含量降低18.9%^[20]。Ke等^[23]和段然等^[30]研究表明,水稻施用缓控释氮肥和普通氮肥在40~60 cm土层中,氮淋失量分别为5.34和6.65 kg/hm²,显著降低了土壤深层矿质氮的淋溶和累积。本研究也得出类似的结果,施用缓控释氮肥减少了无机氮在土壤深层剖面(60~90 cm)的累积量,MBC较FP处理减少7.9%,CRU100%B较BU100%B降低10.7%。李玉浩等^[32]研究报道,配施40%~100%的控释氮肥处理,0~30 cm土层土壤无机氮含量显著高于普通尿素处理。本文研究结

果,施用缓控释氮肥增加了无机氮在土体上层(0~30 cm)的累积,减少了在土体深层(60~90 cm)的分布;在0~30 cm土壤剖面中,MBC较FP处理无机氮累积量增加12.4%(0~30 cm),在深层剖面(60~90 cm)则降低19.7%,说明缓控释尿素的施用既有利于耕层土壤供氮能力的提高,也有利于减少氮素淋失到深层土体,降低环境污染的风险。

4 结论

氮肥是寒地黑土生态区水稻生产的首要营养元素,对水稻产量起重要不可替代作用。缓控释尿素60%与普通尿素40%混合(MBC)一次性施用可以均衡供应水稻整个生育期对氮素营养的需求,显著增加水稻产量、经济效益,提高氮素利用效率,减少多余的矿质氮在土壤剖面中残留,降低环境污染的风险。该项技术是实现水稻高产高效施肥和土壤可持续生产的有效途径,是该地区传统的“一基二追”施肥模式的有效替代。水稻一次性施肥,无论单独施用普通氮肥还是缓控释氮肥,均达不到高产高效的目标,同时增加了土壤剖面无机氮残留,对环境安全造成威胁,必须将二者按适宜比例混合施用才能获得预期效果。

参考文献:

- [1] 彭玉,孙永健,蒋明金,等.不同水分条件下缓控释氮肥对水稻干物质质量和氮素吸收、运转及分配的影响[J].作物学报,2014,40(5):859-870.
- [2] Gu J F, Chen Y, Zhang H, et al. Canopy light and nitrogen distributions are related to grain yield and nitrogen use efficiency in rice [J]. Field Crops Research, 2017, 206: 74-85.
- [3] 毛依琦,陈蕾,顾逸彪,等.栽培措施对超级稻产量及氮肥利用效率的影响[J].中国稻米,2019,25(4):8-15.
- [4] Azeem B, Kusaari K, Man Z B, et al. Review on materials & methods to produce controlled release coated urea fertilizer [J]. Journal of Controlled Release, 2014, 181: 11-21.
- [5] 樊小林,刘芳,廖照源,等.我国控释肥料研究的现状和展望[J].植物营养与肥料学报,2009,15(2):463-473.
- [6] Wei H Y, Chen Z F, Xing Z P, et al. Effects of slow or controlled release fertilizer types and fertilization modes on yield and quality of rice [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2018, 17(10): 2222-2234.
- [7] 周雯雯,贾浩然,张月,等.不同类型新型肥料对双季稻产量、氮肥利用率和经济效益的影响[J].植物营养与肥料学报,2020,26(4):657-668.
- [8] Sun Y, Mi W H, Su L J, et al. Controlled-release fertilizer

- enhances rice grain yield and N recovery efficiency in continuous non-flooding plastic film mulching cultivation system [J]. *Field Crops Research*, 2015, 231: 122-129.
- [9] 侯红乾, 黄永兰, 冀建华, 等. 缓控释肥对双季稻产量和氮素利用率的影响 [J]. *中国水稻科学*, 2016, 30 (4): 389-396.
- [10] 金丹丹, 宫亮, 李波, 等. 2 种缓 / 控释肥对滨海盐碱地区水稻产量及氮代谢的影响 [J]. *水土保持学报*, 2020, 34 (4): 334-339.
- [11] Zhang G B, Ma J, Yang Y, et al. Achieving low methane and nitrous oxide emissions with high economic incomes in a rice-based cropping system [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 259: 95-106.
- [12] 国家统计局. 中国统计年鉴 2016 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2016: 397-401.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2007.
- [14] Li G H, Zhao L P, Zhang S X, et al. Recovery and leaching of ^{15}N -labeled coated urea in a lysimeter system in the North China Plain [J]. *Pedosphere*, 2011, 21 (6): 763-772.
- [15] Ju X T, Liu X J, Zhang F S. Study on effect of nitrogen fertilizer and nitrogen balance in winter wheat and summer maize rotation system [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35 (11): 1361-1368.
- [16] 赵秉强. 传统化肥增效改性提升产品性能与功能 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22 (1): 1-7.
- [17] 侯红乾, 冀建华, 刘益仁, 等. 缓 / 控释肥对双季稻产量、氮素吸收和平衡的影响 [J]. *土壤*, 2018, 50 (1): 43-50.
- [18] 陈建生, 徐培智, 唐拴虎, 等. 一次基施水稻控释肥技术的养分利用率及增产效果 [J]. *应用生态学报*, 2005, 16 (10): 1868-1871.
- [19] Geng J B, Sun Y B, Zhang M, et al. Long-term effects of controlled release urea application on crop yields and soil fertility under rice-oilseed rape rotation system [J]. *Field Crops Research*, 2015, 84: 65-73.
- [20] Hasim M M A, Yusop M K, Othman R, et al. Field evaluation of newly-developed controlled release fertilizer on rice production and nitrogen uptake [J]. *Sains Malaysiana*, 2017, 46 (6): 925-932.
- [21] 蒋琪, 陈少杰, 王飞, 等. 不同缓 (控) 释肥料及运筹对双季稻生产特性及经济效益的影响 [J]. *中国稻米*, 2021, 27 (1): 85-88.
- [22] 傅丽青, 薛占奎, 房玉伟, 等. 不同缓 / 控释肥对单、双季晚稻生产特性及经济效益的影响 [J]. *福建农业学报*, 2017, 32 (6): 577-582.
- [23] Ke J, He R C, Hou P F, et al. Combined controlled-released nitrogen fertilizers and deep placement effects of N leaching, rice yield and N recovery in machine-transplanted rice [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2018, 265: 402-412.
- [24] 刘红江, 郭智, 郑建初, 等. 不同类型缓控释肥对水稻产量形成和稻田氮素流失的影响 [J]. *江苏农业学报*, 2018, 34 (4): 783-789.
- [25] 李敏, 郭熙盛, 叶舒娅, 等. 硫膜和树脂膜控释尿素对水稻产量、光合特性及氮肥利用率的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19 (4): 808-815.
- [26] 陈琨, 秦鱼生, 喻华, 等. 控释氮肥对一季中稻产量及氮肥利用率的影响 [J]. *西南农业学报*, 2018, 31 (3): 507-512.
- [27] 陈建生, 徐培智, 唐拴虎, 等. 一次基施水稻控释肥技术的养分利用率及增产效果 [J]. *应用生态学报*, 2005, 16 (10): 1868-1871.
- [28] 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.
- [29] 陈琨, 秦鱼生, 喻华, 等. 控释氮肥对一季中稻产量及氮肥利用率的影响 [J]. *西南农业学报*, 2018, 31 (3): 507-512.
- [30] 段然, 汤月丰, 王亚男, 等. 不同施肥方法对双季稻区水稻产量及氮素流失的影响 [J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25 (12): 1815-1822.
- [31] Ji Y, Liu G, Ma J, et al. Effect of urea and controlled release fertilizers on methane emission from paddy fields: a multi-year field study [J]. *Pedosphere*, 2014, 24 (5): 662-673.
- [32] 李玉浩, 何洁, 王昌全, 等. 控释氮肥配施尿素对土壤无机氮、微生物及水稻生长的影响 [J]. *土壤*, 2018, 50 (3): 469-475.

Effects of slow and controlled release nitrogen fertilizer on rice yield, nitrogen use efficiency and nitrogen distribution in black soil in cold region

ZHENG Yu^{1, 2}, JI Jing-hong^{1*}, LIU Shuang-quan^{1*}, ZHAO Yue¹, MA Xing-zhu¹, LI Jie³ (1. Heilongjiang Black Soil Conservation and Utilization Research Institute, Haerbin Heilongjiang 150086; 2. Post-doctoral of Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Haerbin Heilongjiang 150086; 3. Daqing Branch of Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Daqing Heilongjiang 163316)

Abstract: The effects and application techniques of slow and controlled release nitrogen fertilizer on rice in cold black soil are not very clear. A 3-year experimental study was conducted by using the method of location test. Five treatments were set up, including no nitrogen application (CK), all common nitrogen one-time base application (BU100%B), all slow and controlled release nitrogen one-time base application (CRU100%B), farmers' practice (FP) and 60% slow and controlled release nitrogen fertilizer and 40% common nitrogen fertilizer mixed one-time base application (MBC). The differences in rice yield, benefit, nitrogen uptake and utilization, and soil inorganic nitrogen accumulation and distribution in soil profiles

[下转第 177 页]



Effects of foliar selenium fertilizer on cadmium accumulation in lettuce under cadmium pollution condition

DUAN Xue-jiao¹, MA Qian-qian¹, WU Jun^{1, 2*}, TENG Bing-qin¹, BI Dong-mei², MA Wen-jun¹, CAI Li-qun¹
(1. College of Resources and Environmental Sciences, Gansu Agricultural University, Lanzhou Gansu 730070;
2. College of Innovation and Entrepreneurship, Gansu Agricultural University, Lanzhou Gansu 730070)

Abstract: In order to explore the effect of foliar selenium fertilizer on cadmium stress in *lettuca sativa* L., the effects of different concentrations of foliar selenium fertilizer on cadmium accumulation in lettuce were studied by potting experiments. Two cadmium pollution concentrations (1 mg/kg, Cd1; 3 mg/kg, Cd3) and three foliar selenium fertilizer concentrations (0 mg/L, Se0; 1 mg/L, Se1; 3 mg/L, Se3) were set up. The results showed that: ① The spraying of foliar selenium fertilizer significantly reduced the uptake and accumulation of cadmium by lettuce, compared with the Cd1+Se0 and Cd3+Se0 treatments, and the cadmium content of lettuce leaves in Cd1+Se1 and Cd3+Se3 treatments was significantly reduced by 26.29% and 49.05%, respectively. ② Spraying foliar selenium fertilizer at appropriate concentrations increased the activity of catalase (CAT) and superoxide dismutase (SOD) in lettuce, reduced the content of malondialdehyde (MDA), and significantly reduced the MDA content of lettuce under Cd1+Se1 and Cd3+Se3 treatments by 44.48% and 48.90%, compared with Cd1+Se0 and Cd3+Se0 treatments, respectively. CAT and SOD under Cd1+Se1 treatment were more than Cd1+Se0 treatment by 40.38% and 68.71% respectively. And CAT and SOD under Cd3+Se3 treatment were more than Cd3+Se0 treatment by 77.48% and 51.70% respectively. Therefore, it can be seen that the spraying of foliar selenium fertilizer can significantly improve the stress resistance characteristics of lettuce, and then effectively inhibit the absorption of cadmium by lettuce. When the soil cadmium content is 1 mg/kg (Cd1), the optimal foliar selenium fertilizer spray concentration is 1 mg/L, while when the soil cadmium content is 3 mg/kg (Cd3), and the optimal foliar selenium fertilizer spray concentration is 3 mg/L.

Key words: foliar selenium fertilizer; cadmium pollution; lettuce; physiological characteristics

[上接第 136 页]

were determined. The results showed that compared with CK, the yield, benefit, nitrogen use efficiency and soil inorganic nitrogen accumulation in soil profile were significantly increased by nitrogen application. MBC treatment had the best effect on yield, benefit, nitrogen use efficiency and reducing soil inorganic nitrogen accumulation. Compared with FP treatment, MBC treatment increased rice yield by 6.2%, economic benefit by 17.7%, nitrogen use efficiency by 16.9% and nitrogen agronomic efficiency by 16.4%, with significant differences ($P<0.05$). Application of slow and controlled release nitrogen reduced the accumulation of soil inorganic nitrogen in the 0-90 cm profile. Compared with FP treatment, the accumulation of soil inorganic nitrogen in MBC was reduced by 7.9%, and CRU100%B was 10.7% lower than that of BU100%B, on average ($P<0.05$). The distribution of soil inorganic nitrogen in soil profile decreased gradually from top to bottom, and the soil layers of 0-30, 30-60 and 60-90 cm accounted for 38.3%-54.6%, 28.8%-35.7% and 14.0%-26.1% of the total soil inorganic nitrogen accumulation, respectively. Application of slow and controlled release nitrogen fertilizer increased the accumulation of soil inorganic nitrogen in the upper soil profile (0-30 cm) and decreased the accumulation of soil inorganic nitrogen in the deep soil profile (60-90 cm). Compared with FP treatment, soil inorganic nitrogen of MBC treatment increased by 12.4% in 0-30 cm profile, and decreased by 19.7% in 60-90 cm profile, on average. In conclusion, application of slow and controlled release urea can improve nitrogen use efficiency, increase rice yield and benefit, reduce soil inorganic nitrogen residue in deep soil profile, and reduce the environmental risk of nitrogen leaching.

Key words: slow and controlled release nitrogen fertilizer; rice yield; benefit; nitrogen use efficiency; nitrogen accumulation and distribution