

洪瑜, 李旭, 张慈娟, 等. 控失尿素对宁夏引黄灌区水稻产量和氮素淋失的影响 [J]. 福建农业学报, 2020, 35 (3): 323–330.
HONG Y, LI X, ZHANG C J, et al. Utilization of Loss Control Urea in Yellow River Irrigation Region to Mitigate Rice Yield Reduction and Nitrogen Leaching [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2020, 35 (3): 323–330.

控失尿素对宁夏引黄灌区水稻产量和氮素淋失的影响

洪瑜¹, 李旭², 张慈娟², 王英³, 闫媛³, 王芳^{1*}, 刘汝亮¹

(1. 宁夏农林科学院农业资源与环境研究所, 宁夏 银川 750002; 2. 宁夏灵武市农业综合开发办公室, 宁夏 灵武 751400; 3. 宁夏大学农学院, 宁夏 银川 750021)

摘要:【目的】利用控失尿素开展宁夏引黄灌区水稻化肥减量研究, 为提高宁夏引黄灌区水稻产量, 减少氮素损失, 促进氮素环保高效施用提供数据参考。【方法】通过田间试验, 以不施氮肥 (CK) 和常规尿素为对照, 设控失常量、控失减量 10%、控失减量 20%、控失: 常规为 7: 3、控失: 常规为 5: 5、控失: 常规为 3: 7、控失尿素 (基) 等 7 个处理, 研究不同控失尿素减量配比处理对水稻产量、氮素吸收利用和淋失的影响。【结果】(1) 施用控失尿素能够促进水稻增产, 控失: 常规为 5: 5 处理的水稻增产效果最好, 比常规尿素增产 8.92%, 其次为控失: 常规为 7: 3。控失尿素主要增加水稻的穗粒数进而增加产量。(2) 施用控失尿素能够促进水稻氮肥利用率, 控失减量 10% 处理的氮肥利用率最高, 比常规尿素增加了 9.79 个百分点, 其次为控失: 常规为 5: 5 处理。(3) 施用控失尿素能够降低稻田面水总氮浓度和总氮淋失量。与常规尿素相比, 控失尿素各处理整个水稻生育期全氮淋失量降低了 28.40%~66.32%, 其中, 控失减量 20% 处理氮素淋失降低幅度最大, 其次为控失减量 10%、控失常量处理。【结论】控失尿素可以显著提高水稻的产量与氮肥利用率, 降低氮素淋失量。综合考虑, 施用控失尿素 243~270 kg N·hm⁻²、控失尿素与常规尿素配比 5: 5 是宁夏引黄灌区较合理的氮素运筹模式。

关键词: 控失尿素; 水稻产量; 氮素淋失; 引黄灌区

中图分类号: S 511

文献标志码: A

文章编号: 1008-0384 (2020) 03-0323-08

Utilization of Loss Control Urea in Yellow River Irrigation Region to Mitigate Rice Yield Reduction and Nitrogen Leaching

HONG Yu¹, LI Xu², ZHANG Ci-juan², WANG Ying³, YAN Yuan³, WANG Fang^{1*}, LIU Ru-liang¹

(1. *Institute of Agricultural Resources and Environment, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan, Ningxia 750002, China*; 2. *Lingwu Agricultural Comprehensive Development Office, Lingwu, Ningxia 751400, China*; 3. *School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China*)

Abstract: 【Objective】The loss control urea (LCU) that, when dissolved in water, couples in a network structure to mitigate ammonia volatilization and N leaching in rice field fertilization was studied for its practical applications. 【Method】A plot experiment in the field was conducted with varied applications of LCU to determine the resulting rice yield and N utilization efficiency (NUE) as well as the N loss through leaching. In addition to control without N fertilization (CK), the treatments included applications of the conventional urea (CU), recommended LCU usage, 10% reduced LCU usage, 20% reduced LCU usage, LCU/CU at 7: 3 ratio, LCU/CU at 5: 5 ratio, LCU/CU at 3: 7 ratio, and LCU by basal application. 【Result】(1) All LCU applications improved the rice yield over CK. The largest increase of 8.92% over CU was resulted from the mixture of LCU/CU at 5: 5 ratio. LCU/CU at 7: 3 mixing ratio produced the second highest yield gain. The gains on rice yield was mainly attributed by the increase of the grain count per panicle. (2) LCU significantly improved NUE of the rice plants. By reducing 10% on the LCU usage, the highest NUE with an increase of 9.79 over CU was observed among all applications. That

收稿日期: 2019-10-31 初稿; 2020-02-01 修改稿

作者简介: 洪瑜 (1980-), 女, 硕士, 副研究员, 主要从事农业环境研究 (E-mail: ouxuer333@163.com)

* 通信作者: 王芳 (1968-), 女, 硕士, 研究员, 主要从事土壤肥料研究 (E-mail: berrywang@vip.sina.com)

基金项目: 宁夏重点研发计划项目 (2017BY085、2019BBF02026); 国家自然科学基金项目 (31660597); 宁夏自然科学基金项目 (2018AAC03281); 宁夏农林科学院科技成果转化项目 (NNKZZCGZH-2019-10); 宁夏农林科学院全产业链创新示范项目 (QCYL-2018-09); 宁夏农林科学院对外科技合作专项 (DW-X-2018008)

was followed by the second highest delivered by LCU/CU at 5 : 5 ratio. (3) LCU significantly reduced the total N concentration in surface water and N loss from leaching. In comparison to CU, depending upon the application rate, LCU reduced 28.40%–66.32% of the N loss from leaching in an entire rice growth period. By reducing 20% on the LCU usage, the highest N loss from leaching reduction was observed, followed by 10% reduced LCU usage, and then the CU treatment. 【Conclusion】 LCU significantly improved the yield and NUE of rice plants and reduced the N loss from leaching in soil. The application of LCU at 243–270 kg·hm⁻² N with a 5 : 5 mixing ratio with CU was recommended for the rice farming in the Yellow River irrigation region.

Key words: loss control urea; rice yield; nitrogen leaching loss; Yellow River irrigation region

0 引言

【研究意义】宁夏引黄灌区是我国西北大型引黄自流灌区,素有“塞上江南”的美誉,是全国优质大米的主产区之一。水稻是引黄灌区种植面积最大的作物,2017年引黄灌区水稻播种面积达到 8.1 万 hm²,占粮食播种面积的 29.75%。而水稻生产过程中,长期过量施用氮肥导致肥料利用率低,土壤中氮素出现盈余,大量未被吸收的氮素主要通过淋洗和气态等途径损失,退水中硝酸盐浓度升高,造成土壤和浅层地下水体污染。据统计,宁夏引黄灌区的氮肥损失率达到 20%~65%^[1-3],以淋洗损失为主^[4]。因此,如何开展化肥减量研究,提高水稻氮素利用效率,对减少农业面源污染源头排放,促进农业清洁生产可持续发展具有重要意义。【前人研究进展】新型控失尿素是近几年新研发出的高效、环境友好的新代尿素,通过特种设备将生物有机复合型材料加入到尿液,充分混合后反应形成控失剂-尿素复合体,采用的控失材料完全是天然的矿物质和纯生物材料,对土壤和作物无危害,施入土壤后,遇水能够由外而内逐层吸水膨胀,吸水层迅速组装成海绵状的网络结构,具有很强的耦合性,能够将溶解的养分耦合在网络内,达到了控制养分挥发和流失、提高肥料利用率的目的^[5]。有研究报道,施用控失尿素能够提高土壤养分含量^[6],有效降低稻田土壤氨挥发损失^[7],有利于水稻对氮、磷、钾养分的吸收与积累^[8-9],增加水稻产量,提高肥利用效率^[10-11]。在小麦^[12-14]、玉米^[15-18]、棉花^[19]、番茄^[20-21]等作物上,施用新型控失尿素均能有效提高作物产量,提高氮肥利用率,具有节肥增产效果。【本研究切入点】现有研究大部分都是控失尿素对作物产量与氮肥利用率的影响,稻田土壤研究仅限于养分含量与氨挥发,关于控失尿素对水稻氮素淋失影响的研究鲜有报道。【拟解决的关键问题】本文针对稻田氮素利用率低与退水污染日益严重的问题,探讨新型控失尿素减量配比对水稻产量、氮素吸收利用以及淋失的影响,为宁夏引黄灌区水稻生产中氮肥环保高效施用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验区位于宁夏永宁县望洪镇(106°22'14" E, 38°47'62" N),地处中温带干旱气候区,年均蒸发量 1 470.1 mm,年均降水量 201.4 mm,年均气温 8.7℃,≥10℃的积温平均为 3 245.6℃,年均日照时数 2 866.7 h,无霜期平均 167 d。土壤类型为灌淤土,基本理化性质为:pH 8.21,有机质含量 13.18 g·kg⁻¹,全氮含量 0.61 g·kg⁻¹,碱解氮含量 25.15 mg·kg⁻¹,速效磷含量 8.64 mg·kg⁻¹,速效钾 102.18 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

不同种类尿素肥料由心连心化肥有限公司生产提供,控失尿素(N, 43.2%),普通尿素(N, 46.4%),施肥量与基追比见表 1,磷钾肥作为基肥 1 次施入,磷肥用重过磷酸钙(P₂O₅, 46%),钾肥用氯化钾(K₂O, 60%)。试验小区面积 78 m²,随机区组排列,重复 3 次。供试水稻品种为宁粳 50 号,2018 年 5 月 13 日施基肥整地,5 月 25 日插秧,6 月 15 日追肥,7 月 5 日追穗肥,9 月 26 日收获。

1.3 样品采集与分析

在水稻插秧后开始采集水样,分别在插秧和追肥后第 3、7、10 d 用注射器随机抽取小区内 3 处中上层稻田田面水。在常规处理每次追肥后的第 1、3、5、7、9 d 采集渗漏水,控失尿素各处理的水样采集频率与常规处理一致,其余时间按照间隔 10 d 采集渗漏水,使用渗漏水取样装置采集^[22]。

水稻成熟期采集植株样品,每小区采集 1 m² 的水稻植株样品,70℃杀青 20 min,105℃烘干,测定植株和籽粒全氮含量,计算水稻的秸秆生物量、籽粒产量和氮素养分利用率。在水稻收获时,每个小区实打实收计算水稻产量,采集植株样品考种,测定株高、穗长、穗粒数及千粒重等指标。

水稻收获后,按照 S 形多点混合采集耕作层 0~20 cm 土样,风干、研磨过筛。土壤 pH 值、有机质、全氮、碱解氮、速效磷、速效钾含量按照普通土壤农化分析方法测定^[23-24]。

表 1 试验设计
Table 1 Experimental design

处理 Treatments	说明 Description	每666.7 m ² 施肥量 Every 666.7m ² amounts/kg			N基肥：蘖肥：穗肥 N base：tillering：jointing
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
CK	CK	0	0	0	—
CU	常规尿素 Conventional urea	18	6	4	2：1：1
LCU	控失常量 Loss-controlled urea	18	6	4	2：1：1
LCU-10%	控失减量10% Loss-controlled urea loss 10%	16.2	6	4	2：1：1
LCU-20%	控失减量20% Loss-controlled urea loss 20%	14.4	6	4	2：1：1
L/C-7：3	控失：常规=7：3 Loss-controlled/conventional 7：3	18	6	4	2：1：1
L/C-5：5	控失：常规=5：5 Loss-controlled/conventional 5：5	18	6	4	2：1：1
L/C-3：7	控失：常规=3：7 Loss-controlled/conventional 3：7	18	6	4	2：1：1
LA	控失尿素（基） Loss-controlled urea by basal application	18	6	4	全部基施

1.4 数据处理与统计分析

氮肥利用率（NUE，%）=（施氮处理吸氮量-不施氮处理吸氮量）/施氮量×100

氮肥农学效率（AEN，kg·kg⁻¹）=（施氮区作物产量-不施氮区作物产量）/施氮量

氮肥偏生产力（PFPN，kg·kg⁻¹）=单位面积作物产量/单位面积施氮量

氮素淋失量=淋溶水中氮的浓度×淋溶水的体积

氮素淋失量占施肥量的比例=（施肥处理氮素淋失量-不施肥对照氮素淋失量）/施氮量×100%

采用 Excel 和 SPSS 软件进行数据处理和统计分析，并采用 Duncan 新复极差法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同控失尿素处理对水稻产量以及构成因素的影响

从表 2 可以看出，各施肥处理与 CK 处理的产量之间存在显著性差异（*P*<0.05）。控失：常规为 5：5 处理的水稻产量最高，其次为控失：常规为 7：3 的处理，分别比常规尿素产量提高了 8.92%、7.78%。与控失常量处理比较，随着控失尿素减量比例增大，水稻产量逐渐降低；控失尿素全部基施处理因为后期养分不足从而影响产量。

从表 2 可以看出，各施肥处理与 CK 处理的穗粒

表 2 不同控失尿素处理对水稻产量及产量构成因素的影响
Table 2 Effects of LCU treatments on quantity of and factors affecting rice yield

处理 Treatment	产量 Yield/ (kg·hm ⁻²)	与CU比增产率 Increasing ratio compared with CU/%	株高 Plant height/cm	穗长 Panicle length/cm	每666.7 m ² 有效 穗数 Every 666.7 m ² effective panicles/万穗	每穗粒数 Filled grains per panicle/个	结实率 Seed setting rate/%	千粒重 1 000-grain weight/g
CK	5 121.55±359.91 b	—	84.2±1.66 a	19.3±0.46 a	13.07±0.38 b	132.4±7.31 c	89.79±4.10 b	27.05±1.41 a
CU	8 725.73±265.59 a	—	96.4±2.20 a	20.1±1.65 a	20.53±0.96 a	159.2±10.28 b	81.55±4.72 a	25.13±1.03 a
LCU	9 330.98±563.20 a	6.94	95.1±1.82 a	20.9±0.76 a	20.40±1.22 a	174.8±7.52 ab	82.74±3.61 a	25.64±1.09 a
LCU-10%	9 175.10±648.44 a	5.15	98.2±1.92 a	19.8±0.87 a	19.40±0.64 a	168.2±7.30 ab	88.90±3.25 ab	25.43±1.07 a
LCU-20%	8 475.33±468.74 a	-2.87	97.8±1.25 a	18.9±0.74 a	17.60±0.59 a	159.7±8.50 b	88.45±3.02 ab	25.06±0.56 a
L/C-7：3	9 404.27±457.96 a	7.78	99.6±1.36 a	21.7±1.24 a	19.80±0.71 a	188.4±8.77 a	85.17±3.45 ab	26.38±0.20 a
L/C-5：5	9 504.22±628.06 a	8.92	98.7±1.68 a	20.9±0.78 a	20.27±0.89 a	184.6±8.20 a	86.12±1.20 ab	27.12±0.57 a
L/C-3：7	8 869.76±190.56 a	1.65	96.8±2.37 a	21.1±0.62 a	18.13±0.63 a	185.1±9.13 a	87.38±3.76 ab	25.20±1.69 a
LA	8 593.46±520.20 a	-1.52	99.1±1.68 a	20.3±0.40 a	18.40±0.74 a	161.2±9.44 b	85.71±4.53 ab	25.55±0.44 a

注：同列数据后不同小写字母表示各指标在不同处理之间差异显著（*P*<0.05）。表3、4同。
Note: Data with different letters within same column mean significant difference（*P*<0.05). Same for Tables 3 and 4.

数之间存在显著性差异 ($P<0.05$)。穗粒数较高的是控失:常规为 7:3 和控失:常规为 3:7, 分别比常规施肥处理提高了 29.2 个和 25.9 个。除 CK 处理外, 千粒重较高的为控失:常规为 5:5 的处理和控失:常规为 7:3 的处理。综合考虑水稻产量和产量构成因素, 控失:常规为 5:5 和控失:常规为 7:3 的处理为合理的氮肥减量和运筹模式, 水稻产量没有显著降低。

2.2 不同控失尿素处理对水稻氮肥利用率的影响

由表 3 可见, 各施肥处理与 CK 处理的吸氮量之间存在显著性差异 ($P<0.05$)。控失:常规为 5:5 处理

的总吸氮量最高, 为 $183.31\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 其次是控失尿素处理的 $181.79\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。控失减量 10%、控失:常规为 5:5 处理与常规尿素、控失尿素全部基施、控失减量 20% 处理的氮肥利用率之间存在显著性差异 ($P<0.05$)。控失减量 10% 处理的氮肥利用率最高, 达到 39.19%, 比常规尿素处理增加了 9.79 个百分点; 其次为控失:常规为 5:5 处理 36.08%, 比常规尿素处理增加了 6.68 个百分点。控失减量 10% 处理的氮肥农学效率最高, 其次为控失:常规为 5:5 处理; 控失减量 20% 处理的氮肥偏生产力最高, 其次为控失减量 10% 处理, 但是差异均不显著。

表 3 不同控失尿素处理对水稻氮肥利用率的影响
Table 3 Effects of LCU treatments on NUE of rice plants

处理 Treatment	秸秆吸氮量 Straw N uptake/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	籽粒吸氮量 Grain N uptake/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	总吸氮量 Total N uptake/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	氮肥利用率 NUE/%	氮肥农学效率 AEN/ ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	氮肥偏生产力 PPFN/ ($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
CK	$36.28\pm5.69\text{ b}$	$49.61\pm4.95\text{ b}$	85.89 b	—	—	—
CU	$62.68\pm7.52\text{ a}$	$102.59\pm6.27\text{ a}$	165.27 a	29.40 b	13.35 a	32.32 a
LCU	$72.48\pm4.77\text{ a}$	$109.31\pm5.05\text{ a}$	181.79 a	35.52 ab	15.59 a	34.56 a
LCU-10%	$75.86\pm8.73\text{ a}$	$105.26\pm3.31\text{ a}$	181.12 a	39.19 a	16.68 a	37.76 a
LCU-20%	$53.07\pm3.09\text{ a}$	$93.39\pm3.37\text{ a}$	146.46 a	28.04 b	15.53 a	39.24 a
L/C-7:3	$76.88\pm8.06\text{ a}$	$102.56\pm3.83\text{ a}$	179.44 a	34.65 ab	15.86 a	34.83 a
L/C-5:5	$70.98\pm3.74\text{ a}$	$112.33\pm6.22\text{ a}$	183.31 a	36.08 a	16.23 a	35.20 a
L/C-3:7	$71.42\pm6.58\text{ a}$	$96.55\pm5.37\text{ a}$	167.97 a	30.40 ab	13.88 a	32.85 a
LA	$68.45\pm6.70\text{ a}$	$96.71\pm6.23\text{ a}$	165.16 a	29.36 b	12.86 a	31.83 a

控失尿素可以满足水稻生育期对氮素的需求, 在氮素投入降低 10% 的基础上, 对氮素的吸收没有明显降低且氮肥利用率明显优于常规尿素处理, 降低了氮素淋失的风险。在宁夏引黄灌区根据实际情况采用控失:常规=5:5、控失减量 10%、控失:常规=7:3 处理这 3 种比较合理的氮肥运筹模式, 均能够保证产量与提高氮素利用率, 其中以控失:常规=5:5 处理较好。

2.3 不同控失尿素处理对稻田田面水全氮质量浓度动态变化的影响

稻田田面水由于灌排水及降水通过排水沟流入黄河水体与地表水体, 极易造成水体富营养化, 而追肥撒施也加重了水体面源污染风险。由图 1 可见, 常规尿素与控失尿素基施灌水以及追施蘖肥、穗肥后, 稻田田面水全氮质量浓度均迅速升高到峰值, 随后由于作物吸收而逐渐降低, 施肥 10 d 之后下降到相对最低值。

由于控失尿素的网状结构, 延缓了尿素氨化、

水解等过程^[5], 与常规尿素处理相比, 控失尿素各处理稻田田面水全氮质量浓度均相对较低。其中, 控失尿素减量处理由于施肥量减少, 控失/常规尿素配比各处理由于控失尿素配比加大, 稻田田面水全氮质量浓度也相应较低。由于基施氮肥比例较高, 5 月 28 日常规尿素稻田田面水全氮质量浓度达到峰值 $34.34\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 而控失减量 20% 处理减少幅度最大, 与常规尿素相比减少了 32.32%, 控失减量 10%、控失常量处理其次, 分别减少了 26.76%、23.12%。控失尿素全部基施处理仅在基施灌水后, 稻田田面水全氮质量浓度达到最高值 $32.82\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 随后逐渐降低, 在 6 月 4 日之后一致保持在较低水平。

2.4 不同控失尿素处理对稻田氮素淋失的影响

由表 4 可以看出, 在水稻返青期间, 常规尿素、控失尿素(基)处理与其他各处理的总氮淋失量之间存在显著性差异 ($P<0.05$); 分蘖期间, 常规尿素处理与其他各处理的总氮淋失量之间存在显著性差异 ($P<0.05$)。常规尿素处理的总氮渗漏淋

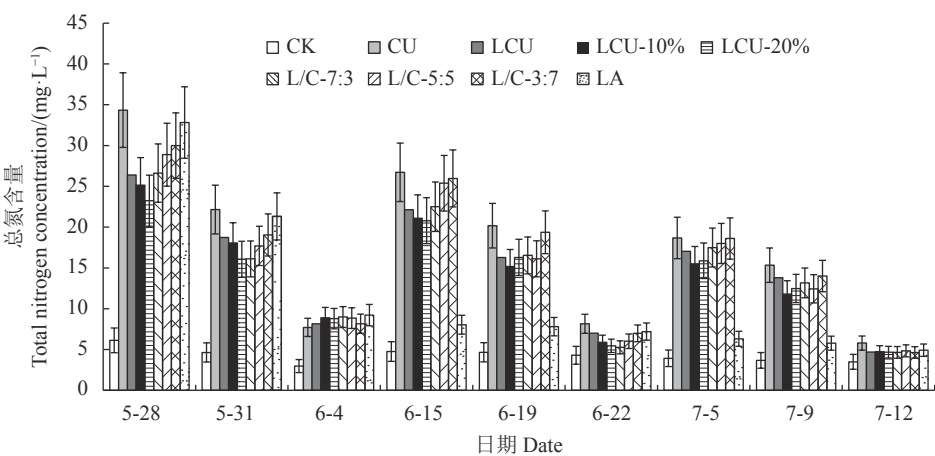


图 1 不同控失尿素处理对田面水中总氮含量的影响

Fig. 1 Effect of LCU treatments on total N in surface water at paddy field

表 4 水稻各生育期总氮淋失量

Table 4 Total loss on N leaching in stages of rice growth

处理 Treatment	各生育期总氮淋失量 Total N accumulative leakage in different growth stages/ (kg·hm ⁻²)							占施肥量的比例 Proportion/%
	返青期 Greening stage	分蘖期 Tillering stage	孕穗期 Jointing stage	开花期 Flowering stage	灌浆期 Heading stage	成熟期 Harvesting stage	总量 Sum	
CK	1.83±0.50 b	4.77±1.41 b	1.99±0.27 a	1.50±0.45 a	0.74±0.19 a	0.24±0.14 a	11.07 d	-
CU	8.83±1.38 a	18.65±0.38 a	6.94±1.46 a	2.72±0.28 a	1.72±0.43 a	1.04±0.33 a	39.89 a	10.30 a
LCU	1.29±0.08 b	4.92±0.63 b	4.49±0.13 a	4.23±0.37 a	2.30±0.19 a	1.10±0.04 a	18.33 cd	2.32 b
LCU-10%	1.28±0.11 b	5.39±1.06 b	4.08±0.39 a	3.14±0.67 a	1.58±0.34 a	0.76±0.26 a	16.23 cd	1.71 b
LCU-20%	1.13±0.11 b	5.13±1.01 b	3.60±0.73 a	1.77±0.28 a	1.23±0.18 a	0.57±0.05 a	13.44 d	0.63 b
L/C-7 : 3	1.98±0.18 b	7.05±1.22 b	7.11±1.50 a	3.47±0.24 a	2.04±0.27 a	1.03±0.06 a	22.67 bc	3.93 b
L/C-5 : 5	2.89±0.19 b	8.92±0.39 b	6.89±0.75 a	3.00±0.17 a	1.54±0.24 a	0.91±0.10 a	24.14 bc	4.47 b
L/C-3 : 7	3.04±0.85 b	8.61±0.83 b	7.24±1.15 a	2.91±0.25 a	1.46±0.31 a	0.60±0.14 a	23.87 bc	4.37 b
LA	10.67±0.57 a	7.77±0.28 b	4.45±0.12 a	3.09±0.58 a	1.56±0.15 a	1.02±0.07 a	28.56 b	6.11 b

失主要发生在分蘖期，而控失尿素各处理总氮渗漏淋失有所延迟，在孕穗期发生淋失的比例明显增大。

在水稻生育期间，各处理中总氮淋失量大小顺序表现为：常规尿素>控失尿素（基）>控失：常规=5：5>控失：常规=3：7>控失：常规=7：3>控失常量>控失减量 10%>控失减量 20%>CK，其中，CK、控失减量 20%、控失减量 10%、控失常量处理与控失尿素（基）、常规尿素处理的总氮淋失量之间存在显著性差异（ $P<0.05$ ）。控失减量 20%、控失减量 10%、控失常量处理的总氮淋失量分别为 13.44、16.23、18.33 kg·hm⁻²，比常规尿素处理分别减少 66.32%、59.31%、54.04%。

常规尿素处理与各控失尿素处理的氮素淋失量占施肥量的比例之间存在显著差异（ $P<0.05$ ），其中，控失减量 20%、控失减量 10%、控失常量处理

的氮素淋失量占施肥量的比例分别为 0.63%、1.71%、2.32%，比常规尿素处理分别减少 93.86%、83.37%、77.47%。可见，控失尿素可以显著降低氮素渗漏淋失量。

3 讨论与结论

3.1 不同控失尿素处理对水稻产量与氮肥利用率的影响

本研究结果表明，不同控失尿素处理，除控失减量 20%、控失尿素（基）外，均能提高产量，达到 8 869.76~9 504.22 kg·hm⁻²，其中控失：常规=5：5 处理的增产效果最为明显，比常规尿素增产 8.92%，其次为控失：常规=7：3、>控失常量、控失减量 10% 和控失：常规=3：7 处理，分别比常规尿素增产 7.78%、6.94%、5.15% 和 1.65%；控失减量

20%、控失尿素（基）处理虽然分别比常规尿素减产 2.87%、1.52%，但是差异不显著。不同控失尿素处理，除控失减量 20%、控失尿素（基）外，均能提高氮肥利用率，达到 30.40%~39.19%，其中控失减量 10% 处理的氮肥利用率最高，比常规尿素增加 9.79 个百分点，其次为控失：常规=5：5、控失常量、控失：常规=7：3 和控失：常规=3：7 处理，分别比常规尿素增加 6.68、6.12、5.25、1.00 个百分点。

控失尿素通过天然高分子纳米分子网材料与化肥复配，通过胶体作用形成巨大的网状交链，吸附网捕化肥中的营养元素，在作物根系周围形成营养库，从而增加了作物产量与肥料利用率^[25-26]。薛欣欣等^[11]研究结果表明，与普通尿素处理相比，控失尿素分次施用处理的水稻籽粒和茎叶氮含量、稻谷产量均有不同程度提高，氮肥利用率显著提高了 7.6%，而控失尿素 1 次施用处理的水稻籽粒和茎叶氮含量、氮素积累量以及氮肥利用率均显著降低。文祥朋等^[27]研究结果表明，控失尿素常量或与常规尿素配施均可显著增加水稻产量，且控失尿素与常规尿素以 1：3 质量比配合施用效果最好，可增加有效穗数，增产幅度为 3.86%。在海南省水稻上，30% 常规尿素+70% 控失尿素能够获得较高的稻谷产量、氮肥利用效率及经济效益^[7]。以上研究均与本研究结果一致。而李志国等^[28]研究结果表明，控失尿素增产效果低于普通尿素，控失尿素和普通尿素混施比单施控失尿素增产，控失：常规=7：3 处理产量最高。与本研究结果不一致，这可能与试验区域生态气候条件、土壤肥力有关。

3.2 不同控失尿素处理对水稻氮素淋失的影响

本研究中，控失尿素各处理整个水稻生育期全氮淋失量达到了 13.44~28.56 kg·hm⁻²，比常规尿素处理减少了 28.40%~66.32%；各控失尿素处理的总氮淋失量占施肥量的比例 0.63%~6.11%，比常规尿素处理减少了 40.70%~93.86%，其中，控失减量 20% 处理的总氮淋失减少幅度最大，其次为控失减量 10%、控失常量处理，而控失尿素（基）减少幅度最小。控失尿素中添加的网状材料，可以减缓尿素在土壤中的转化过程，进而使养分更多的供给作物吸收利用，在延缓尿素氨化、水解等过程的同时，减少氮素淋失^[5]。薛欣欣等^[7]研究结果表明，控失尿素分次施用处理的氮素损失率最低，而控失尿素 1 次施用处理的氮素损失率最高，与本文研究结果保持一致。

综上所述，控失尿素能够促进水稻的穗粒数增加从而获得更多产量，促进氮素吸收并提高氮肥利用率，降低稻田面水总氮浓度和总氮淋失量；考

虑水稻产量、氮肥利用率和氮素淋失量等因素，控失减量 10%、控失：常规为 5：5 与控失常量处理是宁夏引黄灌区较合理的氮素运筹模式；由于氮素淋失途径和淋失形态较多，为更深入进行氮平衡计算，关于控失尿素对稻田气态损失和有机态氮素淋失量的影响还有待于深入研究。

参考文献：

- [1] 陈伟伟, 李强坤, 胡亚伟, 等. 青铜峡灌区水稻田三氮变化特征试验研究 [J]. 农业环境科学学报, 2010, 29 (4): 790-794.
CHEN W W, LI Q K, HU Y W, et al. Experimental research on variation feature of three kinds of nitrogen from paddy field in Qingtongxia irrigation area [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29 (4): 790-794. (in Chinese)
- [2] 张爱平, 刘汝亮, 杨世琦, 等. 基于缓释肥的侧条施肥技术对水稻产量和氮素流失的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2012, 31 (3): 555-562.
ZHANG A P, LIU R L, YANG S Q, et al. Effect of side bar fertilization technology based on slow-release fertilizer on rice yield and nitrogen losses [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31 (3): 555-562. (in Chinese)
- [3] 刘汝亮, 张爱平, 李友宏, 等. 长期配施有机肥对宁夏引黄灌区水稻产量和稻田氮素淋失及平衡特征的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2015, 34 (5): 947-954.
LIU R L, ZHANG A P, LI Y H, et al. Rice yield, nitrogen use efficiency(NUE) and nitrogen leaching losses as affected by long-term combined applications of manure and chemical fertilizers in Yellow River irrigated region of ningxia, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34 (5): 947-954. (in Chinese)
- [4] 张惠, 杨正礼, 罗良国, 等. 黄河上游灌区稻田 N₂O 排放特征 [J]. 生态学报, 2011, 31 (21): 6606-6615.
ZHANG H, YANG Z L, LUO L G, et al. The feature of N₂O emission from a paddy field in irrigation area of the Yellow River [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31 (21): 6606-6615. (in Chinese)
- [5] 周丽平, 杨俐苹, 自由路, 等. 不同氮肥缓释化处理对夏玉米田间氮挥发和氮素利用的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22 (6): 1449-1457.
ZHOU L P, YANG L P, BAI Y L, et al. Comparison of several slow-released nitrogen fertilizers in Ammonia volatilization and nitrogen utilization in summer maize field [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22 (6): 1449-1457. (in Chinese)
- [6] 王国文, 郭景丽, 姜瑛, 等. 施用控失尿素对土壤养分含量及水稻产量的影响 [J]. 河南农业科学, 2015, 44 (10): 73-75.
WANG G W, GUO J L, JIANG Y, et al. Effects of loss-control urea application on soil nutrient content and rice yield [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2015, 44 (10): 73-75. (in Chinese)
- [7] 薛欣欣, 吴小平, 张永发, 等. 控失尿素对稻田氮挥发、氮素转运及利用效率的影响 [J]. 应用生态学报, 2018, 29 (1): 133-140.
XUE X X, WU X P, ZHANG Y F, et al. Effects of loss-controlled urea

- on Ammonia volatilization, N translocation and utilization efficiency in paddy rice [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29 (1): 133–140. (in Chinese)
- [8] 姚单君, 张爱华, 杨爽, 等. 新型氮肥对水稻产量养分积累及吸收利用的影响 [J]. 西南农业学报, 2018, 31 (10): 2121–2126.
- YAO D J, ZHANG A H, YANG S, et al. Effects of new-type fertilizer application on yield, nutrient accumulation and fertilizer utilization of rice [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2018, 31 (10): 2121–2126. (in Chinese)
- [9] 吴萍萍, 李录久, 耿言安, 等. 不同新型肥料对江淮地区水稻生长及氮素吸收利用的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2019 (3): 149–153.
- WU P P, LI L J, GENG Y A, et al. Effects of new-type fertilizers on rice growth, nitrogen uptake and utilization in Jianghuai region [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2019 (3): 149–153. (in Chinese)
- [10] 郭晓彦, 潘兹亮, 张丽霞, 等. 施用新型尿素对豫南地区水稻产量及氮肥利用率的影响 [J]. 湖北农业科学, 2019, 58 (15): 19–21, 131.
- GUO X Y, PAN Z L, ZHANG L X, et al. Effects of new urea application on rice yield and nitrogen use efficiency in southern Henan [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2019, 58 (15): 19–21, 131. (in Chinese)
- [11] 薛欣欣, 吴小平, 王文斌, 等. 控失尿素与普通尿素配施对水稻产量及氮肥利用效率的影响 [J]. 热带作物学报, 2018, 39 (11): 2132–2139.
- XUE X X, WU X P, WANG W B, et al. Effects of combined application of common urea and controlled-loss urea on grain yield and nitrogen use efficiency in paddy rice [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2018, 39 (11): 2132–2139. (in Chinese)
- [12] 马洪波, 孙若晨, 吴建燕, 等. 控失尿素和含锌锰尿素对小麦产量和肥料利用率的影响 [J]. 中国农学通报, 2018, 34 (13): 8–13.
- MA H B, SUN R C, WU J Y, et al. Effect of controlled release urea and Zn/Mn urea on wheat yield and fertilizer utilization rate [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34 (13): 8–13. (in Chinese)
- [13] LIU R H, KANG Y H, PEI L, et al. Use of a new controlled-loss-fertilizer to reduce nitrogen losses during winter wheat cultivation in the Danjiangkou reservoir area of China [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2016, 47 (9): 1137–1147.
- [14] 张伟纳, 刘宇娟, 董成, 等. 氮肥运筹对潮土冬小麦/夏玉米产量及氮肥利用率的影响 [J]. 土壤学报, 2019, 56 (1): 165–175.
- ZHANG W N, LIU Y J, DONG C, et al. Effect of nitrogen application on yield and nitrogen use efficiency of winter wheat and summer maize in fluvo-aquic soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56 (1): 165–175. (in Chinese)
- [15] 岳克, 马雪, 宋晓, 等. 新型氮肥及施氮量对玉米产量和氮素吸收利用的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2018 (4): 75–81.
- YUE K, MA X, SONG X, et al. Effects of new-type and application rate of N-fertilizer on yield, nitrogen uptake and nitrogen use efficiency of summer maize [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2018 (4): 75–81. (in Chinese)
- [16] 吴兴洪, 张爱华, 张钦, 等. 不同控失剂用量的控失尿素对玉米产量及氮肥利用的影响 [J]. 河南农业科学, 2019, 48 (1): 24–30.
- WU X H, ZHANG A H, ZHANG Q, et al. Effects of controlled-release urea with different dosages of controlled-release agent on utilization of nitrogen fertilizer and yield of maize [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2019, 48 (1): 24–30. (in Chinese)
- [17] 周丽平, 杨俐苹, 白由路, 等. 夏玉米施用不同缓释化处理氮肥的效果及氮肥去向 [J]. 中国农业科学, 2018, 51 (8): 1527–1536.
- ZHOU L P, YANG L P, BAI Y L, et al. Effects of different slow-released nitrogen fertilizers on summer maize and nitrogen fate in the field [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51 (8): 1527–1536. (in Chinese)
- [18] 张爱华, 张钦, 杨爽, 等. 新型尿素对玉米产量及养分积累、利用的影响 [J]. 玉米科学, 2018, 26 (5): 137–142.
- ZHANG A H, ZHANG Q, YANG S, et al. Effect of new-type urea on yield, nutrient accumulation and utilization of corn [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2018, 26 (5): 137–142. (in Chinese)
- [19] 李源, 张炎, 哈丽哈什·依巴提, 等. 新型尿素对膜下滴灌棉花产量及氮肥利用率的影响 [J]. 江苏农业学报, 2019, 35 (1): 85–90.
- LI Y, ZHANG Y, HALIHASHI-YIBAT, et al. Effects of new-type urea on yield and nitrogen use efficiency of drip irrigated cotton under plastic film mulching [J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2019, 35 (1): 85–90. (in Chinese)
- [20] 马腾飞, 李青军, 张炎, 等. 控失尿素施用量及不同配比对新疆加工番茄产量、品质、氮肥利用率的影响 [J]. 新疆农业科学, 2017, 54 (12): 2239–2247.
- MA T F, LI Q J, ZHANG Y, et al. Effects of loss-control urea application amount and different ratio on yield, quality and nitrogen use efficiency of processing tomato [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2017, 54 (12): 2239–2247. (in Chinese)
- [21] 哈丽哈什·依巴提, 张炎, 李青军. 新型尿素对加工番茄的产量和氮素利用率的影响 [J]. 新疆农业科学, 2019, 56 (2): 278–286.
- HALIHASHI-YIBAT, ZHANG Y, LI Q J, et al. The effect of new-type urea on yield and nitrogen utilization of processing tomato [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2019, 56 (2): 278–286. (in Chinese)
- [22] 刘汝亮, 李友宏, 张爱平, 等. 育秧箱全量施肥对水稻产量和氮素流失的影响 [J]. 应用生态学报, 2012, 23 (7): 1853–1860.
- LIU R L, LI Y H, ZHANG A P, et al. Effects of seeding-box total fertilization on rice yield and nitrogen loss [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23 (7): 1853–1860. (in Chinese)
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第三版. 北京: 中国农业出版社, 2007.
- [24] 洪瑜, 王芳, 刘汝亮, 等. 长期配施有机肥对灌淤土春玉米产量及氮素利用的影响 [J]. 水土保持学报, 2017, 31 (2): 248–252, 261.
- HONG Y, WANG F, LIU R L, et al. Effects of long-term fertilization on yield and nitrogen utilization of spring maize in irrigation silting soils [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31 (2): 248–252, 261. (in Chinese)
- [25] 姚单君, 张爱华, 杨爽, 等. 控失尿素对水稻养分吸收利用及产量的影响 [J]. 西南农业学报, 2019, 32 (11): 2600–2606.
- YAO D J, ZHANG A H, YANG S, et al. Effects of loss-control urea on rice yield, nutrients uptake and utilization [J]. *Southwest China*

- Journal of Agricultural Sciences*, 2019, 32 (11) : 2600–2606. (in Chinese)
- [26] 张艳菲, 王晨阳, 李世莹, 等. 控失尿素养分释放特性研究 [J]. *磷肥与复肥*, 2017, 32 (3) : 11–12.
- ZHANG Y F, WANG C Y, LI S Y, et al. Study on nutrient release mechanism of loss-control urea [J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2017, 32 (3) : 11–12. (in Chinese)
- [27] 文祥朋, 孙克刚, 张琨, 等. 控失尿素不同施用方式对水稻产量、品质及氮肥利用率的影响 [J]. *河南科学*, 2017, 35 (4) : 601–605.
- WEN X P, SUN K G, ZHANG K, et al. Effects of different application methods of lost control urea on yield, quality and nitrogen use efficiency in rice [J]. *Henan Science*, 2017, 35 (4) : 601–605. (in Chinese)
- [28] 李志国, 张润花, 陈防, 等. 控失尿素对水旱轮作下水稻产量和氮素利用效率的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2018 (1) : 23–27.
- LI Z G, ZHANG R H, CHEN F, et al. Effect of controlled release urea combined application with common urea on yield and nitrogen utilization efficiency of rice in paddy-upland rotation [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2018 (1) : 23–27. (in Chinese)
- (责任编辑: 张梅)