

基于水稻养分专家系统的控释尿素适宜释放期研究

乔 艳, 胡 诚, 李双来, 刘东海, 张 智*

(湖北省农业科学院植保土肥研究所, 农业农村部废弃物肥料化利用重点实验室, 湖北 武汉 430064)

摘 要: 探索不同养分释放期的控释尿素在水稻上的施用效果, 为区域作物高产高效专用肥的研制提供理论依据。2017 ~ 2018 年在长江中游单季稻主产区, 开展控释尿素释放期田间试验, 共设置 7 个处理, 分别为: 不施氮 (CK)、农民习惯施肥 (FP)、普通尿素一次性施用 (U) 和 4 个释放期 (30、60、90、120 d) 的控释尿素一次性施用处理, 基于养分专家系统对 5 个田块进行推荐施肥, 研究水稻产量和氮肥农学效率对控释尿素不同释放期的响应。结果表明: 与不施氮相比, 农民习惯施肥两年的增产率平均分别为 53.2% 和 41.8%, 比普通尿素一次性施用处理高 37.9% 和 31.4%。与普通尿素一次性施用相比, 不同释放期控释尿素增产率普遍可以达到 10% 以上。经济效益分析结果显示, 释放期超过 60 d 时, 产投比低于农民习惯施肥处理。随着控释尿素释放期的延长, 两年水稻产量均以 60 ~ 90 d 释放期产量水平更高, 其主要原因是有效穗数和穗粒数的差异, 对应的 60 ~ 90 d 释放期氮肥农学效率同样处于相对较高的水平。根据肥效模型推算得出, 控制尿素释放期为 70 d 时, 水稻产量可达到理论最高水平, 两年分别为 7.11 和 9.43 t/hm²。因此, 在长江中游地区, 实现一季中稻高产和氮肥高效的控释尿素适宜释放期为 70 d。

关键词: 控释尿素; 释放期; 水稻; 产量; 氮肥利用率

2017 年, 我国农用化肥用量首次实现负增长, 截至 2020 年底, 化肥减施增效的预期目标已顺利实现, 化肥利用率明显提升^[1]; 根据全国污染源普查公报, 种植业总氮流失量得到明显控制^[2], 这些成绩的获得离不开科学施肥技术的发展和绿色投入品的研制。在科学施肥技术的研究方面, 养分专家系统 (Nutrient Expert) 是一种基于产量反应和农学效率的推荐施肥方法, 不仅适用于小农户经营模式, 还能避免传统土壤测试条件不具备的问题^[3]。在绿色投入品的研制方面, 缓 / 控释肥料因其养分释放与作物养分需求时空匹配的优势, 成为一种优质高效的绿色投入品。尽管缓 / 控释肥料的价格普遍较高, 但普通肥料存在损失大、利用率低、劳动力投入高等问题, 驱动着越来越多的缓 / 控释肥料应用到大田作物, 如水稻、玉米、小麦、油菜等, 均表现出较好的稳产或增产效果^[4]。基于节本增效和保护环境的目

的, 控释尿素在大田作物中的应用常结合减施氮肥、混施普通尿素、控制养分释放期等技术^[5]。研究发现, 控释氮肥减施比例一般在 30% 以内, 主要受土壤基础养分供应能力的影响^[6]; 控释尿素与普通尿素掺混比例为 6:4 ~ 8:2 时, 水稻的增产效果较好, 主要受地力水平和目标产量等因素的影响^[7]; 不同大田作物施用控释尿素的最佳释放期普遍在 60 ~ 90 d 之间, 主要与不同气候区作物生长规律有关^[8]。施用不同释放期控释尿素的研究结果发现, 沙壤土施用释放期为 60 d 的控释尿素小麦产量和氮肥利用率均显著高于当地习惯施肥, 而释放期为 90 d 时土壤硝态氮残留较高^[9]; 对于冬作马铃薯而言, 低钾配方配施释放期为 60 d 的控释尿素马铃薯增产率和增效率为最高, 高钾配方则更适宜于配合释放期为 90 d 的控释尿素^[8]; 夏玉米一次性施肥时, 释放期为 60 d 的控释尿素可显著提高氮肥利用率和经济效益^[10]; 对于南方双季稻而言, 60 d 型缓释尿素水稻产量和养分吸收量的表现优于 90 d 型, 且 90 d 型缓释尿素水稻贪青较为严重^[11]。在大田作物上研究控释肥料的最佳释放期, 对于特定区域内作物专用型肥料的研制具有重要意义。

长江流域普遍实行水旱轮作, 中游地区广泛种植一季中稻, 亟须发展轻简化栽培技术以推动农业

收稿日期: 2021-03-23; 录用日期: 2021-05-26

基金项目: 肥料养分推荐方法与限量标准 (2016YFD0200100)。

作者简介: 乔艳 (1967-), 副研究员, 学士, 从事新型肥料研制与应用研究。E-mail: 297463471@qq.com。

通讯作者: 张智, E-mail: z497211609@163.com。

绿色发展。中稻生育期相对较长,生育期内积温高、雨水充足,传统的施肥方法可能会引起氨挥发、养分径流等风险,加上该地区劳动力短缺,以控释尿素为载体推广一次性施肥的前景广阔^[12]。本研究在长江中游不同田块开展连续2年的田间试验,在养分专家系统推荐施肥的基础上,对比分析不同释放期(30、60、90和120 d)控释尿素对水稻生长、产量和肥料利用率的影响,并探讨控释尿素最佳释放期,为该区域水稻专用肥的研制提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概括

本研究于2017~2018连续两年在湖北省赤壁市车埠镇马坡村(29°44′11″N,113°48′8″E)进行,该区域属亚热带季风气候。水稻种植期间(4~9月)平均气温为24.1℃,累积降水量为1140 mm。

1.2 试验设计

试验共设置7个处理,分别为:(1)不施氮处理(CK);(2)农民习惯施肥处理(FP);(3)普通尿素一次性施用处理(U);(4)释放期为30 d的控释尿素一次性施用处理(CRU30);(5)释放期为60 d的控释尿素处理(CRU60);(6)释放

期为90 d的控释尿素处理(CRU90);(7)释放期为120 d的控释尿素处理(CRU120)。由于第一年CRU30处理水稻生长和产量表现明显弱于FP处理,农户积极性普遍较低,故第二年未设置CRU30处理。不同释放期控释尿素均为本课题组自行研制的产品,包膜材料主要有聚氨酯和热熔胶,包膜量为4.5%~8.0%,其释放期采用25℃下的浸提测定^[13]。

试验分布在村庄的5个不同田块,对应的农户分别为石银泉、宋水珍、马景志、颜清明和石纯启,记为田块1、田块2、田块3、田块4和田块5,不同田块土壤基础养分状况如表1所示。农民习惯施肥处理是由当地农技推广部门统一推荐的施肥量和施肥方法,即氮、磷、钾肥用量分别为165、90和90 kg/hm²,氮肥按基肥:分蘖肥:穗肥为4:3:3施用,磷、钾肥均作为基肥一次性施用。处理(3)~(7)的氮、磷、钾肥用量根据往年水稻产量水平和目标产量,采用水稻养分专家系统(NE)对各田块进行推荐施肥,具体用量如表1所示。同一田块内,所有处理磷、钾肥用量均相同,除不施氮处理外,其他处理氮肥用量也相同。除施肥措施外,其他田间管理措施均与当地农民习惯保持一致。

表1 土壤基础养分状况和基于养分专家系统的氮、磷、钾肥用量

田块	土壤基础养分					基于养分专家系统的施肥量		
	pH	有机质 (g/kg)	碱解氮 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)	氮肥 (kg/hm ²)	磷肥 (kg/hm ²)	钾肥 (kg/hm ²)
1	6.2	26.8	124.5	15.2	133.6	160	62	52
2	6.0	22.2	98.2	15.7	137.3	165	54	51
3	6.4	25.1	136.8	13.5	160.5	160	62	53
4	5.8	32.5	185.4	17.2	186.2	143	112	112
5	6.1	28.3	108.7	12.8	157.4	165	62	52

两年水稻品种分别为晶两优534和Ⅱ优7954,于4月育苗,5月移栽,9月收获,移栽密度为22.5万株/hm²。成熟期对水稻产量构成因素进行田间调查,调查内容包括有效穗数、穗粒数、实粒数、秕粒数和千粒重。收获时对每个小区进行单打单收并测定稻谷含水率,以晒干后重量表示水稻稻谷产量。

1.3 数据处理

施肥投入(元/hm²)=养分投入+包膜投入+

劳动投入

其中,N、P₂O₅和K₂O价格分别为5.65、8.33和6.67元/kg;释放期为30、60、90和120 d的控释尿素包膜成本(含包膜材料费用和人工费用)分别计为600、700、850和1000元/hm²;农民习惯处理劳动投入次数为3次,其他处理为1次。

施肥收益(元/hm²)=稻谷产量×稻谷价格-施肥投入

其中,稻谷价格为2.6元/kg。

产投比 = 施肥收益 / 施肥投入

氮肥农学效率 = (施氮区产量 - 不施氮区产量) / 施氮量

数据采用 Excel 2013 进行处理, SPSS 20.0 进行统计分析, LSD 法进行差异显著性检验, Origin 2017 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同释放期控释尿素对水稻产量的影响

不同年份各处理水稻产量结果如图 1 所示, 其中以不施氮 (CK) 处理产量最低, 两年平均分别为 4.64 和 4.47 t/hm², 其次为普通尿素一次性施用

处理 (U), 两年平均分别为 6.38 和 8.43 t/hm², 农民习惯施肥 (FP) 和控释尿素处理 (CRU30 ~ CRU120) 产量相对较高, 且差异未达到显著水平。对于不同控释尿素处理而言, 随着释放期天数的增加, 水稻产量总体呈先增加后减少或平稳的趋势, 以释放期 60 ~ 90 d 时产量水平较高。控释尿素释放期为 30 d 时, 2017 年水稻产量平均为 6.67 t/hm², 明显低于其他控释尿素处理; 当释放期为 60 d 时, 两年的水稻产量均可达到较高的水平, 分别为 7.03 和 9.44 t/hm²; 随着释放期进一步延长至 120 d 时, 两年的水稻产量分别为 7.02 和 8.98 t/hm²。

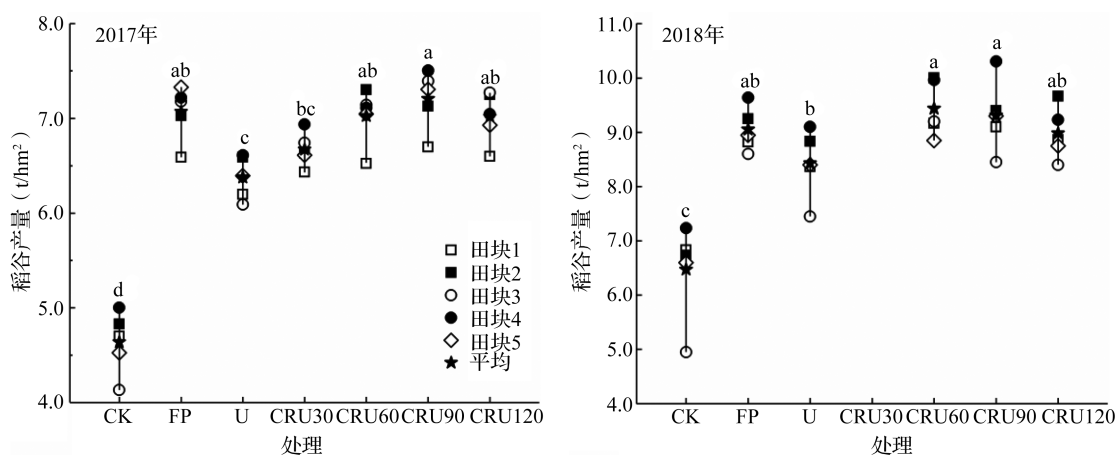


图 1 不同处理水稻产量

注: 不同小写字母表示处理间差异达到显著水平 ($P < 0.05$)。下同。

水稻产量对不同类型氮肥的响应有所差异, 与 CK 处理相比, FP 处理两年的增产率分别为 53.2% 和 41.8%, 明显高于 U 处理的 37.9% 和 31.4% (表 2); 2017 年 CRU30 处理的增产率为 44.5%, 明显低于释放期为 60 ~ 120 d 时的控释尿素处理, 最高为 CRU90 处理 (56.1%); 2018 年不同释放期控释尿素处理增产率以 CRU60 最高 (48.1%), CRU120 最低 (40.6%)。与 FP 处理相比, U 处理会引起水稻减产, 两年降幅分别为 9.7% 和 7.0%; 同样的, 控释尿素释放期为 30 d 时, 水稻减产 5.6%; 当控释尿素释放期为 60 ~ 120 d 时, 水稻产量与 FP 处理相当。与 U 处理相比, 2017 年 CRU30 增产率为 4.7%, 而释放期为 60 ~ 120 d 时两年增产率均达到 10% 以上, 说明水稻高产所需要的控释尿素释放期应达到 30 d 以上。

表 2 不同释放期控释尿素对水稻增产率的影响 (%)

处理	2017 年			2018 年		
	较 CK	较 FP	较 U	较 CK	较 FP	较 U
FP	53.2	—	—	41.8	—	—
U	37.9	-9.7	—	31.4	-7.0	—
CRU30	44.5	-5.6	4.7	—	—	—
CRU60	52.2	-0.6	10.2	48.1	4.3	12.2
CRU90	56.1	1.9	13.1	45.4	2.8	10.5
CRU120	52.1	-0.7	10.2	40.6	-0.7	6.8

注: “—” 表示无数据。下同。

2.2 控释尿素施用的经济效益分析

由表 3 可以看出, U 处理的施肥投入最低, 为 2208 元/hm², 随着控释尿素释放期的延长, 施肥投入逐渐增加; 其中, FP 处理的施肥投入为 2882 元/hm², 介于 CRU30 和 CRU60 之间。从两年的施

肥收益来看, 2018 年明显高于 2017 年; 从不同处理的施肥收益来看, FP、CRU30 和 CRU60 处理相对较高。两年 FP 处理的产投比分别为 5.4 和 7.2, 均低于 U 处理, 但与 CRU30 和 CRU60 处理较为接近; 另外, 当控释尿素释放期超过 60 d 时, 产投比出现下降的趋势, 且低于 FP 处理。

表 3 经济效益分析

处理	施肥投入 (元 /hm ²)	施肥收益 (元 /hm ²)		产投比	
		2017 年	2018 年	2017 年	2018 年
FP	2882	15500	20653	5.4	7.2
U	2208	14372	19710	6.5	8.9
CRU30	2808	14539	—	5.2	—
CRU60	2908	15360	21627	5.3	7.4
CRU90	3058	15680	21148	5.1	6.9
CRU120	3208	15043	20149	4.7	6.3

2.3 不同释放期控释尿素对水稻产量构成因素的影响

水稻成熟期产量构成因素的调查结果 (表 4) 显示, 两年不施氮处理有效穗数分别为 146 和 128 个 /m², 穗粒数分别为 180 和 174 个, 氮肥施用明显提高了有效穗数和穗粒数, 但对结实率和千粒重无明显影响。与 FP 处理相比, U 处理明显降低了有效穗数和穗粒数, 随着控释尿素释放期的延长, 2017 年有效穗数从 CRU30 处理的 186 个 /m² 增加到 CRU90 处理的 204 个 /m², 穗粒数则从 228 个增加到 234 个, 当释放期达到 120 d 时, 有效穗数和穗粒数均有所下降, 2018 年的结果同样表现出相似的规律。

表 4 不同处理水稻产量构成因素

处理	2017 年				2018 年			
	有效穗数 (个 /m ²)	穗粒数 (个)	结实率 (%)	千粒重 (g)	有效穗数 (个 /m ²)	穗粒数 (个)	结实率 (%)	千粒重 (g)
CK	146d	180c	74.9b	21.7a	128c	174c	81.7a	27.2a
FP	192b	227ab	82.5a	22.0a	207a	200b	79.3a	26.5a
U	181c	205b	81.3a	22.1a	181b	183bc	83.2a	26.9a
CRU30	186bc	228ab	82.3a	22.6a	—	—	—	—
CRU60	199ab	224ab	83.8a	22.1a	212a	197b	81.4a	27.0a
CRU90	204a	234a	84.0a	22.2a	217a	218a	80.1a	26.8a
CRU120	188bc	226ab	81.8a	22.1a	204a	219a	78.5a	26.9a

注: 同列不同小写字母表示处理间差异达到显著水平 ($P<0.05$)。

2.4 不同释放期控释尿素对氮肥利用率的影响

氮肥农学效率是表征氮肥利用率的一种有效形式, 其结果如图 2 所示, 农民习惯施肥处理氮肥农学效率两年平均分别为 13.7 和 13.4 kg/kg, 略高于普通尿素一次性施用处理的 11.0 和 12.4 kg/kg, 普遍低于不同控释尿素处理。2017 年氮肥农学效率从 CRU30 处理的 12.9 kg/kg 上升到 CRU90 处理的 16.2 kg/kg, 当释放期达到 120 d 时则降低到 15.0 kg/kg; 2018 年 CRU60 和 CRU90 处理氮肥农学效率平均变幅为 18.0 ~ 18.7 kg/kg, 明显高于 CRU120 处理 (15.8 kg/kg)。氮肥农学效率随着控释尿素释放期天数的增加, 表现出先增加后降低的趋势, 但 CRU60、CRU90、CRU120 处理间差异不显著。

2.5 控释尿素的适宜释放期

利用一元二次和线性加平台模型对水稻产量与控释尿素释放期进行拟合, 以 U 处理为对照, 得到两者的关系如图 3 所示。2017 年以线性加平台模型的相关系数较高, 为 0.96, 达到极显著水平, 推算出控释尿素适宜的释放期为 69 d, 对应的理论产

量为 7.11 t/hm^2 ; 2018 年以一元二次模型相关系数较高 (0.98), 同样达到极显著水平, 推算出控释尿素适宜的释放期为 71 d, 对应的理论产量为 9.43 t/hm^2 。

由此可见, 尽管两年产量水平有所差异, 但是控释尿素最佳释放期均在 69 ~ 71 d 之内, 平均为 70 d, 其对应的水稻产量可达到最佳水平。

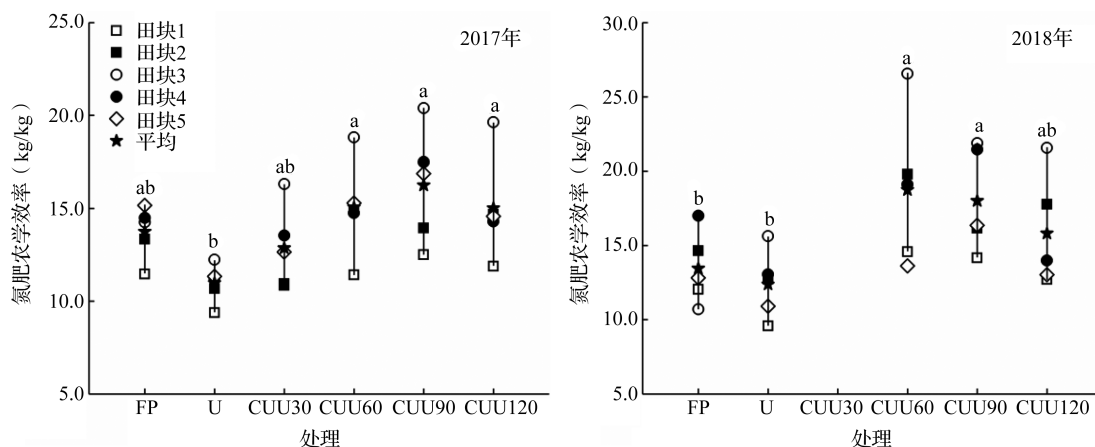


图2 不同处理氮肥农学效率

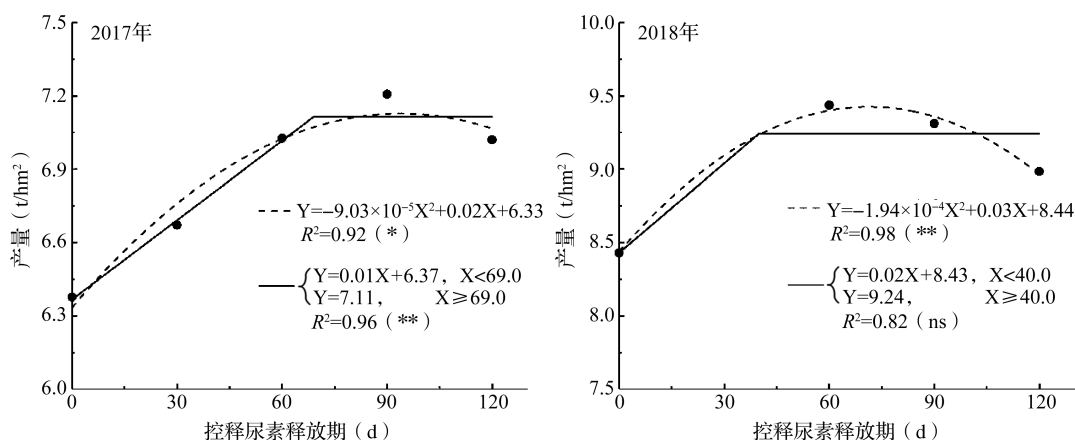


图3 水稻产量与控释尿素释放期的关系

注: * 表示 0.05 水平显著, ** 表示 0.01 水平显著, ns 表示不显著。

3 讨论

3.1 控释尿素释放期与水稻生长之间的关系

从水稻产量构成因素的结果可以看出, 引起不同处理产量差异的主要原因是有效穗数和穗粒数的变化, 决定其数量的关键时期为分蘖期、幼穗分化期和灌浆期^[14]。对于普通尿素一次性施用而言, 养分供应不足是产量较低的直接原因^[15]。对于不同释放期控释尿素而言, 尽管释放期 30 d 也许满足水稻分蘖期的养分需求, 但其灌浆过程可能受到抑制导致无法形成有效穗^[16]; 释放期 60 ~ 90 d 养分释放速度相对平稳, 可降低无效分蘖、增加成穗率、促进灌浆^[17]; 释放期为 120 d 时, 水稻成熟期地上部养分含量仍处于相对较高的水平, 营养生

长旺盛, 造成养分物质无法向籽粒转移^[18]。

从氮肥利用率的结果可以看出, 普通尿素一次性施用的氮肥农学效率为 11 ~ 12 kg/kg, 低于全国优化施肥的平均水平 (13 kg/kg)^[19], 施用释放期超过 60 d 的控释尿素, 氮肥农学效率平均可达到 15 kg/kg 以上, 有效提高了氮肥利用率。控释肥料能够提高氮肥利用率的结论早已明确, 主要是通过控制氮素的平稳释放促进根部对养分的吸收, 降低氨挥发损失, 进而提高氮肥利用率^[20]。本研究的研究区域位于长江中游地区, 中稻生育期一般在 110 ~ 120 d 左右, 研究结果显示, 释放期为 60 ~ 90 d 的控释尿素氮肥利用率明显高于 30 和 120 d, 说明释放期 60 ~ 90 d 可满足水稻各关键生育期的养分需求, 这与华南地区双季稻的研究结果一致^[11]。

释放期过短 (30 d) 时, 尽管苗期分蘖多, 但无法形成有效穗, 造成氮肥利用率低^[21]。释放期过长 (120 d) 时, 由于根系在生育后期吸收养分能力较弱, 生殖生长主要依靠叶片向籽粒的养分转移, 相比于释放期 60 ~ 90 d, 释放期 120 d 水稻前期的养分储存可能相对较低, 进而导致氮肥利用率低^[22]。

3.2 水稻施用控释尿素的最佳释放期

本研究基于养分专家系统对不同田块进行推荐施肥, 较不施氮相比增产率为 31.9% ~ 47.7%, 明显高于湖北省平均水平 (27.5%)^[23], 该系统在我国东北、长江中下游等地区已得到广泛应用^[3, 24-25]。在此推荐施肥量的基础上, 应用控释尿素一次性施用, 较普通尿素还可以再增产 10% 左右, 产量潜力得到了充分挖掘。本课题组通过合理控制包膜材料用量, 研制了不同释放期的控释尿素, 本试验选取了 30、60、90 和 120 d 型控释尿素, 研究其在水稻产量形成和肥料利用率上的效果。结果表明, 水稻高产、氮肥高效所对应的控释尿素释放期在 60 ~ 90 d 内。释放期过短可能引起前期养分过多而造成损失、后期养分供应不足而抑制灌浆, 释放期过长则导致后期营养过剩, 且增加了包膜成本^[26]。根据肥效模型推算出控释尿素最佳释放期为 70 d, 较张木等^[27]研究结果长 10 d, 分析原因可能有两点: 一是由于后者所在研究区域位于我国南方地区, 水稻生育期内积温较高; 二是由于后者研究对象为早稻和晚稻, 养分吸收规律有所差异^[28]。因此, 为实现长江中游高产单季稻一次性施肥, 控释尿素推荐释放期为 70 d。

4 结论

与普通尿素一次性施用相比, 控释尿素平均可增加水稻产量 10% 以上; 60 ~ 90 d 释放期水稻有效穗数和穗粒数相对较高, 对应的产量和氮肥农学效率同样处于较高的水平; 利用肥效模型推算得到长江中游一季稻高产、氮肥高效的控释尿素最佳释放期为 70 d。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国农业农村部. 我国三大粮食作物化肥农药利用率双双超 40% [EB/OL]. (2021-01-19). <http://www.moa.gov.cn>.
- [2] 中华人民共和国中央人民政府. 关于发布《第二次全国污染源普查公报》的公告 [EB/OL]. (2020-06-10). <http://www.gov.cn>.
- [3] 徐新朋, 王寅, 刘双全, 等. 基于产量反应的东北一季稻推荐施肥方法的可行性 [J]. 植物营养与肥科学报, 2020, 26 (10): 1818-1826.
- [4] 刘兆辉, 吴小宾, 谭德水, 等. 一次性施肥在我国主要粮食作物中的应用与环境效应 [J]. 中国农业科学, 2018, 51 (20): 3827-3839.
- [5] Chen J, Lü S Y, Zhang Z, et al. Environmentally friendly fertilizers: a review of materials used and their effects on the environment [J]. Science of the Total Environment, 2018, 613-614: 829-839.
- [6] 张智, 乔艳, 刘东海, 等. 氮肥减施对油菜产量、氮素吸收与利用的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2020 (2): 140-145, 183.
- [7] Ding W C, Xu X P, He P, et al. Improving yield and nitrogen use efficiency through alternative fertilization options for rice in China: a meta-analysis [J]. Field Crops Research, 2018, 227: 11-18.
- [8] 罗其峰, 张新明, 陈琳, 等. 不同释放期缓控释复合肥和氮磷钾比例施用下冬作马铃薯产量及经济效益 [J]. 热带作物学报, 2020, 41 (8): 1589-1595.
- [9] 刘永哲, 陈长青, 尚健, 等. 沙壤土包膜尿素释放期与小麦适宜施用方式研究 [J]. 植物营养与肥科学报, 2016, 22 (4): 905-912.
- [10] 衣文平, 史桂芳, 武良, 等. 不同释放期包膜控释尿素与普通尿素配施在夏玉米上的应用效果研究 [J]. 植物营养与肥科学报, 2010, 16 (4): 931-937.
- [11] 张木, 唐拴虎, 黄巧义, 等. 缓释尿素在双季稻上的养分供应特征 [J]. 土壤, 2018, 50 (4): 656-663.
- [12] 谭德水, 刘兆辉. 一次性施肥技术实现三大粮食作物轻简化绿色生产 [J]. 中国农业科学, 2018, 51 (20): 3823-3826.
- [13] HG/T 4215-2011, 控释肥料 [S].
- [14] 汪洋. 氮素营养对水稻分蘖的产量异质性影响及调控 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2017.
- [15] 彭少兵, 黄见良, 钟旭华, 等. 提高中国稻田氮肥利用率的研究策略 [J]. 中国农业科学, 2002, 35 (9): 1095-1103.
- [16] 朱从桦, 张玉屏, 向镜, 等. 侧深施氮对机插水稻产量形成及氮素利用的影响 [J]. 中国农业科学, 2019, 52 (23): 4228-4239.
- [17] 彭玉, 马均, 蒋明金, 等. 缓/控释肥对杂交水稻根系形态、生理特性和产量的影响 [J]. 植物营养与肥科学报, 2013, 19 (5): 1048-1057.
- [18] 李鹏飞. 控释尿素对双季稻产量、氮素损失及氮肥利用率的影响 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2018.
- [19] Xu X P, He P, Zhao S C, et al. Quantification of yield gap and nutrient use efficiency of irrigated rice in China [J]. Field Crops Research, 2016, 186: 58-65.
- [20] Li P F, Lu J W, Wang Y, et al. Nitrogen losses, use efficiency, and productivity of early rice under controlled-release urea [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2018, 251: 78-87.

- [21] Wang Y, Lu J W, Ren T, et al. Effect of nitrogen and tiller type on grain yield and physiological responses in rice [J]. AoB Plants, 2017, 9: plx012.
- [22] 杨越超, 张民, 陈剑秋, 等. 控释氮肥对水稻秧苗形态特征和生理特性的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16 (5): 1126–1135.
- [23] 王伟妮, 鲁剑巍, 鲁明星, 等. 湖北省早中晚稻施氮增产效应及氮肥利用率研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17 (3), 545–553.
- [24] 刘东海, 陈云峰, 李双来, 等. 养分专家系统推荐施肥对湖北中稻产量和养分利用率的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2019 (4): 84–88.
- [25] 宋蝶, 陈新兵, 董洋阳, 等. 养分专家系统推荐施肥对苏北地区水稻产量和肥料利用率的影响 [J]. 中国生态农业学报 (中英文), 2020, 28 (1): 68–75.
- [26] 张夫道, 王玉军. 我国缓/控释肥料的现状和发展方向 [J]. 中国土壤与肥料, 2008 (4): 1–4.
- [27] 张木, 唐拴虎, 张发宝, 等. 60 天释放期缓释尿素可实现早稻和晚稻的一次性基施 [J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23 (1): 119–127.
- [28] 叶廷红, 李鹏飞, 侯文峰, 等. 早稻、晚稻和中稻干物质积累及氮素吸收利用的差异 [J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26 (2): 212–222.

Study on the optimum release period of controlled-release urea for rice based on Nutrient Expert

QIAO Yan, HU Cheng, LI Shuang-lai, LIU Dong-hai, ZHANG Zhi* (Institute of Plant Protection and Soil Fertilizer, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Fertilization from Agricultural Wastes, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan Hubei 430064)

Abstract: In order to provide theoretical basis for the development of high yield and high efficiency special fertilizer for regional crops, the effects of controlled-release urea, which have different nutrient release periods, on rice were explored. In 2017 ~ 2018, the field experiments were conducted in the main single season rice production area of the middle Yangtze River Basin, field trials were carried out during the release period of controlled-release urea, including seven treatments: no nitrogen fertilizer (CK); farmers' practices fertilization treatment (FP); conventional urea (U); and four different periods of controlled-release urea treatments (30, 60, 90, 120 d). Based on the nutrient expert system, five fields were recommended for fertilization, the effects of release periods of controlled-release urea on rice yield and agronomic efficiency of nitrogen were studied. The results showed that compared with CK, the average yield increased by 53.2% and 41.8%, respectively, for farmers' practices in two years, which were higher than that of conventional urea (37.9% and 31.4%, respectively). Compared with conventional urea, the yield increased more than 10% for the controlled-release urea with different release periods. The analysis of economic benefit showed that the ratio of output to input was lower than farmers' practices when the release period of controlled-release urea was over 60 d. With the extension of release period of controlled-release urea, the rice yield of 60 ~ 90 d treatment was higher, which was mainly due to the difference in effective panicles and grains number per panicle. Correspondingly, the nitrogen agronomic efficiency of 60 ~ 90 d was also at a relatively high level. According to the fertilizer model, the rice yield could reach the theoretical highest level, which was 7.11 and 9.43 t/hm² respectively in two years, when the release period was 70 d. Therefore, to achieve high yield and high nitrogen use efficiency for single season rice in the middle Yangtze River Basin, the optimal release period of controlled-release urea is 70 d.

Key words: controlled-release urea; release period; rice; yield; nitrogen use efficiency