

缓释尿素(SCU)对超级杂交中稻产量及 土水中氮素的影响研究

尹春梅^{1,2,3}, 谢小立^{1,2,3}

(1.中国科学院亚热带农业生态研究所, 长沙 410125; 2.中国科学院亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125; 3.中国科学院湖南桃源农田生态系统国家科学观测研究站, 湖南 桃源 415700)

摘 要:为探讨超级杂交中稻超高产栽培的缓释尿素(硫包衣尿素, SCU)最佳施用量及其环境效应, 在大田试验条件下, 研究了 SCU 不同用量对超级杂交中稻 Y 两优 1 号产量以及对土水中氮素含量的影响。结果表明, 与普通尿素相比, 施用 SCU 有显著的增产效果, 同等施氮量($180 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$)的 SCU 和普通尿素相比, 增产幅度为 13.2%; 施用 $135 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的 SCU 与 $180 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 普通尿素相比(氮素用量减少 25%)仍可增产 12.9%。稻田施氮量可显著影响土壤中铵态氮的累积和分布, 但对硝态氮的影响较小。折合等量纯氮的 SCU 与普通尿素处理相比, 可以显著减少肥料施用初期土壤水中氮素含量, 施肥后 10 d, SCU 处理农田面水、0~20 cm 层和 20~40 cm 层土壤水全氮含量分别为施用普通尿素处理的 26.3%、64.4%和 64.0%。

关键词:超级杂交稻; Y 两优 1 号; 硫包衣尿素(SCU); 土壤水氮动态; 环境影响

中图分类号: S145.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2010)10-2011-06

Effect of Sulfur-coated Urea(SCU) on Yield of Super Hybrid Rice(Y Liangyou1) and Water N Content in Soil Water

YIN Chun-mei^{1,2,3}, XIE Xiao-li^{1,2,3}

(1. Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 2. Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 3. National Observation Station of Taoyuan Agro-ecology System, Taoyuan 415700, China)

Abstract: The field experiment was conducted at Taoyuan Experimental Station of Agriculture Ecosystem-Chinese Ecosystem Research Network to find out an appropriate dosage of SCU for obtaining high yield of super hybrid rice(Y Liangyou1) as well as decreasing the environmental risk. The results showed that: Compared with the same amount of conventional nitrogen, SCU could bring 13.2% of rice yield increase. And compared to $180 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ conventional nitrogen, application of SCU $135 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N consumption decreased by 25%) could still increase rice yield by 12.9%. In view of the rice yield and its components, the SCU dosage of $135 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ was the most applicable amount for super-hybrid rice Y Liangyou 1. In paddy field, the quantity of N fertilizer application could significantly affect the amount of ammonium nitrogen accumulation and distribution in soil water, but nitrate was less affected. Compared with urea in equivalent net nitrogen, SCU could significantly reduce the nitrogen content in soil water shortly after the application of N fertilizer. 10 days after fertilization, the percentage of total N content in the treatment of SCU against urea was 26.3%, 64.4% and 64.0%, respectively, in surface water, 0~20 cm and 20~40 cm layer of soil water. SCU fertilizer can effectively reduce the risk of water pollution shortly after the usage of N fertilization.

Keywords: super hybrid rice; Y Liangyou 1; sulfur coated urea(SCU); nitrogen dynamics in soil water; environmental effects

中国是世界氮肥使用大国, 每年仅尿素用量就达

$2 \times 10^7 \text{ t}^{[1]}$, 并仍在逐年增加; 但氮素利用率较低(30%~35%), 在稻田中其损失可达 50%, 甚至更多。不仅造成了经济损失, 而且给环境造成了不良后果, 如河湖的富营养化、温室效应等^[2-3]。节氮栽培的核心是通过提高尿素利用率实现减少尿素总用量。在充分挖掘高产或超高产潜力的前提下减少尿素用量, 是超级杂交

收稿日期: 2010-04-21

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-423); 国家重点基础研究发展计划(2005CB121106); 湖南省自然科学基金(09JJ3049)

作者简介: 尹春梅(1982—), 女, 四川什邡人, 助研, 主要从事生态系统过程与管理研究。E-mail: cmyin@isa.ac.cn

稻节氮栽培的关键技术。缓释肥料比普通肥料养分释放缓慢的肥料,其养分释放速率、方式和持续时间能较好地控制,甚至不受土壤类型等复杂因素的影响,被称为“21 世纪的肥料”^[4]。尤其是以尿素为氮源的缓释肥料和复合肥料是当前和未来我国肥料工业发展的主要方向^[5]。硫包衣尿素(Sulfur Coated Urea, SCU)是在尿素外面包裹硫磺、聚合蜡密封而成的一种缓释氮素肥料,也是规模化生产最早、技术成熟、质量稳定的缓释尿素^[6]。国内外有关缓释肥研制和评价的报道较多^[7-8],但对其在超级杂交稻大田生产上的应用效果报道较少,尤其缺少其对土水中氮素含量影响的系统研究。本研究旨在探讨超级杂交中稻超高产栽培的 SCU 最佳施用量及其环境影响效应,为其在超级稻节氮高效栽培上应用提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2007 年在中国科学院湖南桃源农业生态站生态系统综合观测试验场(东经 111°33',北纬 28°55')进行,试验场海拔高度 89 m,年均气温 16.5℃,降水量 1 447.9 mm,日照 1 531.4 h,太阳辐射 322.6 kJ·cm⁻²。供试土壤为第四纪红色粘土发育的水稻土,土壤类型为青隔黄泥,种植制度为一季稻,供试水稻品种为超级杂交中稻 Y 两优 1 号。试验田基础肥力性状为:有机碳 18.2 g·kg⁻¹,全 N 2.035 g·kg⁻¹,全 P 1.18 g·kg⁻¹,全 K 26.46 g·kg⁻¹,pH4.79。试验采用随机区组设计,共 5 个处理组合,小区面积 30 m²,重复 3 次,共 15 个小区。小区间设高 20 cm、宽 30 cm 的埂隔离,埂上覆膜,单独排灌。

供试肥料为缓释 SCU 和普通尿素。SCU 共设 3 个不同水平:即 364.5、486.0、607.5 kg·hm⁻²(折合纯氮 135、180、225 kg·hm⁻²,分别以 S1、S2、S3 表示),以施普通尿素(U)324 kg·hm⁻²(折合纯氮 180 kg·hm⁻²)为对照(CK),各处理配施普通过磷酸钙和氯化钾作为磷、钾肥(施用量分别折合 P₂O₅、K₂O 用量 90、180 kg·hm⁻²)。各处理 SCU 肥料和磷肥均作基肥一次性全部施用。钾肥分次施用,其中基肥施 40%、移栽后 5~7 d 施 30%,晒田复水后施 30%。其他管理措施同当地超级杂交稻高产田。

1.2 主要测定项目和方法

1.2.1 分蘖动态调查

移栽后 5 d 调查各小区基本苗数,10 d 后每小区定点 5 蔸进行观察记载水稻分蘖动态,每 4 d 进行一

次茎蘖数调查,直到剑叶露尖。

1.2.2 经济性状调查

收获前 1 d 调查各处理的平均有效穗数,每处理选有代表性的稻株 5 蔸,进行室内考种,分析株高、穗长、平均穗数、总粒数、实粒数、结实率、千粒重。

1.2.3 收获计产

小区单收单晒,单独计产,3 次重复总计后平均为不同处理实际产量。

1.2.4 稻田水氮动态

施肥后取基础水样一次,以后每隔 20 d 取一次水样(分 3 个层次取:田面水、0~20 cm 土壤水和 20~40 cm 土壤水),采用 FIAstar™ 5000 流动注射分析仪分别测定其中 NO₃-N、NH₄⁺-N 及全 N 含量。

1.3 数据处理方法

采用 SPSS11.5 软件进行统计分析,Duncan 法进行显著性检验。

2 结果与分析

2.1 SCU 尿素对超级稻的产量效应

2.1.1 超级稻产量及其构成因素

有效穗、总粒数和实粒数是超级稻取得高产的主要因素^[9]。通过对 2007 年超级杂交稻 Y 两优 1 号成熟期产量构成因素调查分析可知(表 1),施用 135 kg N·hm⁻² 和 180 kg N·hm⁻² SCU 处理,即 S1、S2、S3 处理的穗实粒数和结实率均显著高于施用 180 kg N·hm⁻² 普通尿素 CK 处理,而高量 S3 处理(225 kg N·hm⁻²)与施用 180 kg N·hm⁻² 普通尿素 CK 处理相比穗实粒数和结实率则无显著差异。同等尿素施用量的 S2 处理与 CK 相比,穗总粒数增加 12.6%,穗实粒数增加 22.2%。除施氮量最高的 S3 处理外,其他 3 个处理间千粒重无显著差异。

产量分析结果表明,各处理比较其总体变化趋势为:S2>S1>S3>CK。施用缓释尿素与普通尿素之间,产量差异显著,而缓释尿素的 3 个施用量水平之间,产量则无显著差异。S1、S2、S3 与 CK 比较,产量增幅分别为:12.9%、13.2%和 11.8%。另外值得注意的是,缓释尿素施肥量最高的 S3 处理,产量反而较 S1、S2 低,从表 1 可以看出与 S1 相比,S2、S3 的实粒数和结实率均有较大程度的降低。由此看出,180 kg N·hm⁻² 是本试验超级稻高产的最大氮素用量。

2.1.2 氮肥利用率

肥料利用率^[10]是反映作物、土壤、肥料之间关系的动态参数,也是用来检验施肥量与施肥方法是否科学

表 1 缓释尿素及其施用水平与超级杂交稻的产量及产量构成因素

Table 1 Grain yield and its components of super hybrid rice at different source of nitrogen and level of SCU application

处理	产量构成					籽粒产量/kg·hm ⁻²
	有效穗/穗·m ⁻²	穗粒数/粒·穗 ⁻¹	穗实粒数/粒·穗 ⁻¹	结实率/%	千粒重/g	
CK	218.40 a	164.40 b	136.14 c	82.81 b	26.67 b	7 469.70 b
S1	203.23 a	169.76 b	150.32 b	88.55 a	26.76 b	8 431.82 a
S2	191.10 a	185.07 a	166.31 a	89.86 a	26.70 b	8 454.55 a
S3	218.40 a	168.63 b	144.54 bc	85.72 ab	27.12 a	8 348.48 a

注：表、图中标有不同字母者为差异显著(P<0.05)。

合理的指标。本研究以氮肥偏生产力,即每千克纯氮投入产出的籽粒产量为指标讨论氮肥的利用效率。

如图 1 所示,S1,S2,S3,CK 4 个处理氮肥偏生产力的差异均达到了统计显著水平。等氮施用量的普通尿素与缓释尿素相比,后者的氮肥偏生产力更高。而值得注意的是,减氮 25%的 S1 处理在产量与 S2 持平的情况下,氮肥偏生产力较 S2 高 33.0%,显然,S1 从经济投入及产出方面看,均为最佳选择。在本试验条件下,225 kg·hm⁻² 的氮肥施用量过高,不仅没有明显的增产作用,而且从氮肥投产比上来讲,也不经济合理。

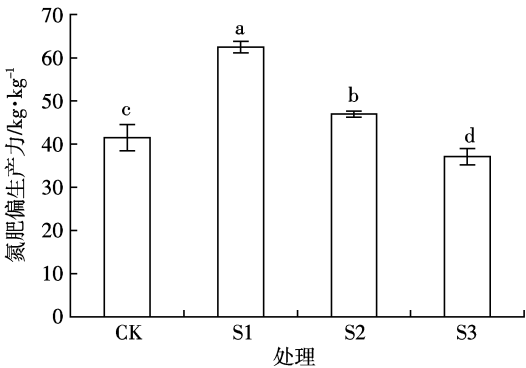


图 1 氮肥偏生产力分析

Figure 1 The utilization of fertilizer N

2.2 SCU 尿素的土水中氮素含量影响评价

无论是普通尿素与缓释尿素相比,还是缓释尿素的 不同施用水平相比,其影响稻田田面水和耕层土壤水氮素含量产生差异的主要时间段都集中在肥料使用后的前 10 d,而对稻田 20~40 cm 土壤水所产生的影响相对较长。相对于普通尿素肥料而言,缓释尿素能够减缓氮素的释放速率,从而显著减少田面水中氨氮及全氮含量。虽然研究证实,在稻田系统中氮素淋失基本形态主要为 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N^[10],但本试验结果表明,红壤稻田施肥后各土层溶液中 NO₃⁻-N 含量比较低,最高不超过 0.5 mg·L⁻¹,并且各处理之间差异不显著,同时根据《地面水环境质量标准—2002》集中

式生活饮用水地表水源地对硝态氮的限定值为 10 mg·L⁻¹,可以认为,红壤稻田系统中,NO₃⁻-N 淋失造成水环境污染的风险不大。

与普通尿素相比,缓释尿素显著降低了稻田田面及 0~40 cm 土壤水氮素含量。由图 2- I、2- II 可以看出,各处理田面水氮素含量差异主要表现在尿素施入后的前 10 d,此后趋于一致。根据 6 月 20 日(尿素作为基肥施入后第 10 d)的测定结果,田面水中氨氮和全氮均以 CK 处理最高,且 CK 处理与等量氮素的缓释尿素处理 S2 之间差异显著。施用高量缓释尿素的 S3 处理田面水中氨氮含量为 CK 的 45.6%,S1、S2 则分别为 CK 的 19.6%和 18.7%。施用缓释尿素的处理水中氮素含量则与施肥量相关。

0~20 cm 土壤水与田面水氮素含量差异也在施肥 10 d 后表现最为明显,与田面水相比,CK 处理 0~20 cm 土壤水氨氮和全氮含量分别减少 57.6%和 54.8%,说明普通尿素快速的释放速度导致了氨态氮素在田面水中快速、大量富集(图 2- III、图 2- IV)。

超级稻生育期间,施用 180 kgN·hm⁻² 的普通尿素,20~40 cm 土壤水中氨氮含量平均为 0.74 mg·L⁻¹,而施用等量氮素的缓释尿素处理,其氨氮含量平均为 0.55 mg·L⁻¹,氨氮含量为施用普通尿素的 74.7%。施用高量氮素的 S3 处理与 S2 持平,减施 25%氮素的 S1 处理氨氮平均含量仅为 0.32 mg·L⁻¹,为施用普通尿素的 43.3%(图 2- V、图 2- VI)。有研究表明,田面水NH₄⁺-N 浓度与氨挥发速率间存在显著正相关^[12],由此可见缓释尿素的使用,能够降低氮肥施用前期,田面水中的 NH₄⁺-N 含量,起到减少稻田 NH₃ 挥发,降低大气污染风险的作用。

总体来看,水稻生育期田面水、土壤水中硝态氮占全氮的比例较低(0.4%~10%),各处理之间无显著差异,且变化无明显规律;氨氮占全氮的比例相对较高(25%~95%),且随着施肥后时间的增加,氨氮占全氮的比例呈下降趋势。由于水稻生长期间稻田处于长

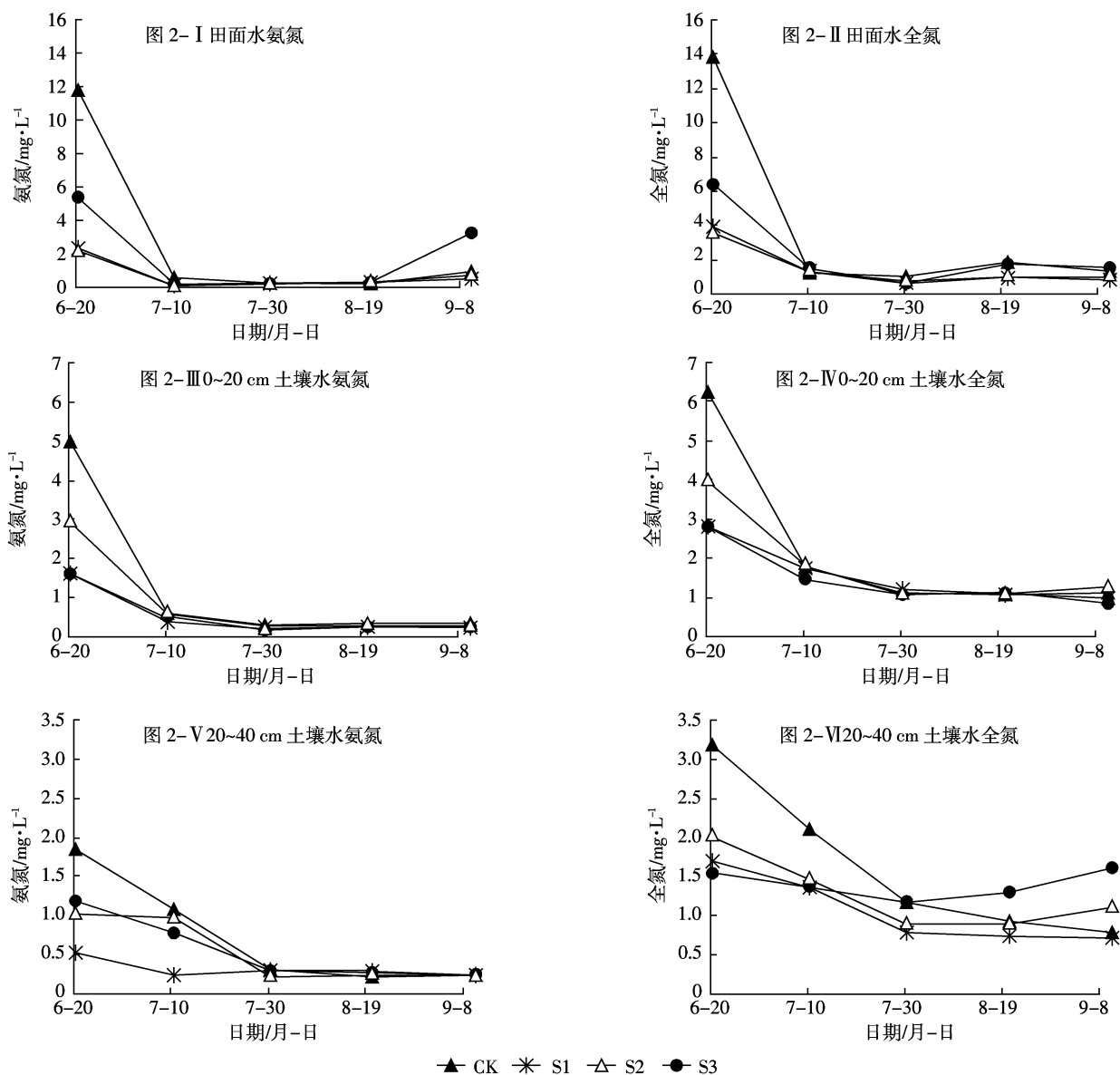


图 2 稻田田面及土壤中氮素动态分析

Figure 2 N content dynamic in the field surface water and soil water

期淹水状态,无机态氮在土壤水中主要以氨态氮的形式存在,分析表明,稻田不同层次土壤水中的氨氮均与全氮含量呈极显著相关,其变化对各处理间全氮的差异有着决定性的影响。氨氮含量变化可解释 93.6% 的田面水中全氮变化和 74.6% 的 20~40 cm 层土壤水全氮变化(图 3~图 4)。由此可见,在田面水中氨氮对全氮的影响更大。

3 讨论

水环境可分为地下水和地表水环境两部分。在我国南方广大农村地区,村民饮水多源于自行开挖的水井,一些水井与农田相邻,井水与农田地下水系互相

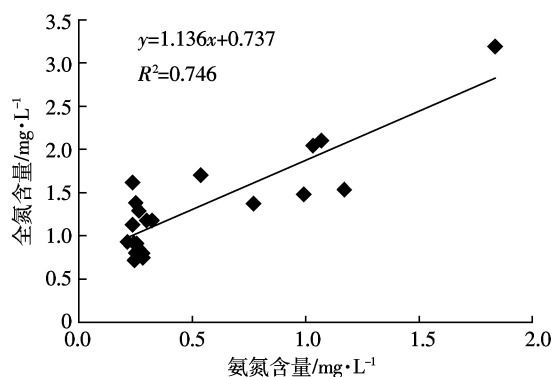


图 3 稻田 20~40 cm 土壤水氨氮与全氮含量相关分析
Figure 3 The correlation analysis between $N-NH_4^+$ and TN of soil water(layer 20~40 cm)

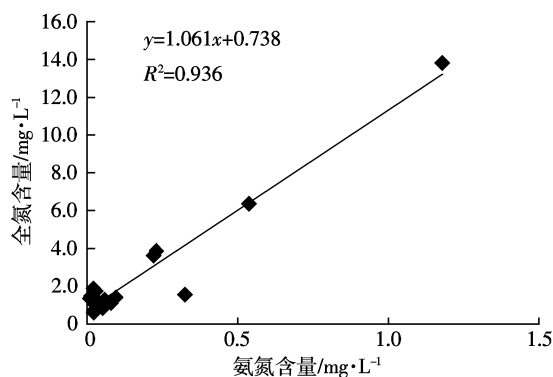


图 4 稻田田面水氨氮与全氮含量相关分析

Figure 4 The correlation analysis between N-NH₄⁺ and TN of paddy field surface water

连通,很容易受到农田施肥的污染影响。我国南方降水丰沛,农田地下水位较浅。研究表明,南方红壤稻田 40 cm 土层溶液基本上已属于浅层地下水的范围^[13],稻田 N 素养分极易通过地下水迁移到水井,使井水受到污染。根据我国地表水环境质量标准,主要适用于集中式生活饮用水地表水源地二级保护区的Ⅲ类水体,其氨氮和全氮的标准限值均为 1.0 mg·L⁻¹。本试验中,水稻生长期地下 20~40 cm 层土壤水氨氮含量范围为 0.2~1.8 mg·L⁻¹,全氮含量范围为 0.8~3.2 mg·L⁻¹,从时间上来看,施肥后 10 d,普通尿素处理(CK)氨氮含量超标 83.5%,全氮含量超标高达 219.3%;中量(S2)和高量缓释尿素处理(S3)分别为氨氮含量超标 0.3%和 1.7%,全氮含量超标 104.2%和 53.6%,低量缓释尿素处理(S1)氨氮含量在标准限值以内。普通尿素处理约在施肥后一个月氨氮含量降到标准限值以内,全氮含量则需约两个月才能降到限值以内,施用等量氮的 SCU 处理,氨氮和全氮含量降到标准限值以内的时间为普通尿素的一半。可见,如果过量施用缓释尿素将会造成更长时间的稻田浅层土壤水氮含量超标,对地表水源造成更大的威胁。

在南方稻作区,由于春夏两季多有集中降雨的过程,稻田施肥后短期内向外大量溢水或集中排水情况时常发生,对农田下位的地表水体,包括塘堰、水库直至河流水系都可能造成很大的污染风险,是农区水环境污染的最敏感时期。移栽后的相当一段时期,水稻植株生长缓慢,吸肥能力弱,常导致田面水和土壤溶液中的养分浓度在长时间内保持很高的水平。根据本试验的研究结果,各处理田面水中氨氮和全氮含量均只在施肥后 10 d 检测时有超标现象(根据我国地表水环境质量标准,按主要适用于农业用水区及一般景

观要求水域的氨氮、全氮含量标准限值 2 mg·L⁻¹ 的标准),氨氮超标量排序为 CK(489.1%)>S3(168.9%)>S1(15.3%)>S2(10.4%),全氮含量超标情况排序相同。结果表明,相同施氮量的 SCU 与普通尿素相比,可以显著降低田面水中氨氮以及总氮含量,有效降低由氮素养分流失引发的地表水环境污染。

4 结论

(1)研究分析表明,随着 SCU 各处理的施肥量越高,穗实粒数和实粒重呈降低趋势,产量表现也有相同趋势。各 SCU 处理产量均显著高于常规尿素处理,综合投产比以及超级稻高产要求,施用 135 kg N·hm⁻² SCU(即 S1 处理)为最佳选择。

(2)南方红壤稻田氮素淋失的风险主要来自 NH₄⁺-N,尤其是氮肥施入的 1 个月内,稻田田面水中高 NH₄⁺-N 含量增加了 NH₃ 挥发对大气污染的风险;40 cm 及以下地下水中 NH₄⁺-N 的高含量则增加了地下水源污染的风险。

(3)与普通尿素相比,SCU 可显著降低田面水和土壤水的氮素含量,降低稻田排、溢水过程向农田下位的地表水体的氮素流入量,同时,降低当地浅层地下水的氮素污染风险。根据本研究的结果,只有施用 S1 处理将地表、地下水体氨氮和全氮含量控制在污染限值以下标准。因此,从水环境安全的角度考虑,稻田施用 SCU 代替普通尿素,施用量以 135 kg N·hm⁻² 左右为宜。而对于长期使用 SCU 对土壤以及稻田水环境的氮素影响,还有待于进一步验证。

参考文献:

- [1] 焦晓光,罗盛国,闻大中. 控释尿素施用对水稻吸氮量及产量的影响[J]. 土壤通报, 2003, 34(6): 525-528.
JIAO Xiao-guang, LUO Sheng-guo, WEN Da-zhong. Effect of controlled-release urea application on N uptake and rice yield[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2003, 34(6): 525-528.
- [2] 朱兆良. 我国氮肥的使用现状、存在问题和对策[C]//摩庆远,朱兆良,于天仁. 中国农业持续发展中的肥料问题. 南昌:江西科学技术出版社, 1997: 38-51.
- [3] 李虎,唐启源. 我国水稻氮肥利用率及研究进展[J]. 作物研究, 2006, 5(3): 401-408.
- [4] 韩季璋,龚渝明. 世界肥料的发展方向缓释肥料[J]. 化肥设计, 2004, 43(5): 60-61.
- [5] 李东坡,武志杰,梁成华,等. 缓释尿素氮肥在玉米苗期的养分释放特点[J]. 中国土壤与肥料, 2007, 1(3): 34-37.
LI Dong-po, WU Zhi-jie, LIANG Cheng-hua, et al. Characteristics of releasing nutrition for slow urea nitrogen fertilizers at maize seedling

- stage[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2007, 1(3): 34-37.
- [6] Trenkel M E. 石元亮, 孙 毅, 等译. 农业生产中的控释与稳定肥料[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2002: 18-22.
- [7] 纪雄辉, 郑圣先, 聂 军, 等. 稻田土壤上控释氮肥的氮素利用率与硝态氮的淋溶损失[J]. 土壤通报, 2007, 38(3): 467-471.
- Ji Xiong-hui, ZHENG Sheng-xian, NIE Jun, et al. Nitrogen recovery and nitrate leaching from a controlled release nitrogen fertilizer in an irrigated paddy soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(3): 467-471.
- [8] Fernández R, Benlloch M, Herrera E, et al. Effect of traditional and slow-release N fertilizers on growth of olive nursery plants and N losses by leaching[J]. *Scientia Horticulturae*, 2004, 101: 39-49.
- [9] 马国辉, 周 静, 龙继锐. 缓释氮肥对超级杂交早稻生长发育和产量的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2008, 34(1): 95-99.
- MA Guo-hui, ZHOU Jing, LONG Ji-rui, et al. Effect of slow-released nitrogen fertilizer on growth and yield of super hybrid early rice[J]. *Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences)*, 2008, 34(1): 95-99.
- [10] 谢培才, 马冬梅, 张兴德, 等. 包膜缓释肥的养分释放及其增产效应[J]. 土壤肥料, 2005(1): 23-28.
- XIE Pei-cai, MA Dong-mei, ZHANG Xing-de, et al. The nutrient release rate and increase production of film-coated and release fertilizer[J]. *Soils and Fertilizers*, 2005(1): 23-28.
- [11] 尹 娟, 王南江, 勉韶平. 稻田土壤中氮素运移转化规律的试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2005, 24(3): 5-12.
- YIN Juan, WANG Nan-jiang, MIAN Shao-ping. Experiment study of the nitrogen transportation and transformation regularity in the rice field of Yinnan irrigation district[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2005, 24(3): 5-12.
- [12] 吴萍萍, 刘金剑, 杨秀霞, 等. 不同施肥制度对红壤地区双季稻田氮挥发的影响[J]. 中国水稻科学, 2009, 23(1): 85-93.
- WU Ping-ping, LIU Jin-jian, YANG Xiu-xia, et al. Effects of different fertilization systems on ammonia volatilization from double-rice crop-ping field in red soil region[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2009, 23(1): 85-93.
- [13] 李 峰, 王凯荣. 红壤丘陵区稻田不同施肥模式对水环境影响的监测评价[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(1): 67-71.
- LI Feng, WANG Kai-rong. Assessment of risk of different fertilization models in rice field on water environment pollution in a sloped red soil[J]. *Journal of Agro-environmental Science*, 2004, 23(1): 67-71.