

控释肥条件下沿南四湖农田水稻吸氮特征

张晴雯¹, 杜春祥², 李晓伟², 李贵春¹, 王明¹

(1. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 农业部农业环境与气候变化重点开放实验室, 北京 100081; 2. 山东鱼台县农业局, 鱼台 272300)

摘要: 氮素是水稻必需营养元素中限制植物生长和形成产量的首要因素, 同时也是南四湖水体主要营养性污染物之一。通过施用树脂包膜控释尿素不同氮肥量处理大田试验, 研究了南四湖流域鱼台农田控释肥条件下水稻生育期的吸氮特征。结果表明, 树脂包膜控释尿素对水稻产量有明显的促进作用, 但并不随施氮量的增加呈线性增长, 施用中氮量 337.5 kg/hm^2 水平下吸氮速率和氮肥利用率最高, 吸氮速率为 $22.48 \text{ mg}/(\text{株} \cdot \text{d})$, 氮肥利用率为 37.17% , 均显著高于低氮和高氮的处理。控释尿素对生物学特性的影响有明显的阶段性, 水稻吸氮高峰出现在幼穗分化期。随着施肥水平的提高, 水稻体内每积累 1 kg 氮素而增加的产量呈下降趋势。以南四湖流域济宁市年施氮肥量 $16.65 \times 10^4 \text{ t}$ 为基数, 如果施用包膜控释尿素 337.5 kg/hm^2 , 济宁市年均损失氮肥 $10.46 \times 10^4 \text{ t}$, 可年均减少损失 $2.55 \times 10^4 \text{ t}$, 仅鱼台县可年均减少损失 2235.26 t 。高量的氮肥投入引起过剩的氮素流失成为潜在的面源污染源, 根据水稻生育期需肥规律确定控释肥最佳施用量, 是保持水稻稳产的前提下减少因超量施肥导致氮素流入水体的关键途径。

关键词: 南四湖流域; 水稻; 吸氮速率; 氮肥利用率; 控释氮肥

中图分类号: X52 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2011)07-1908-08

Nitrogen Uptake Rate and Use Efficiency by Rice Under Different Levels of the Controlled-Release N Fertilizers (CRF) in the Nansi Lake Basin

ZHANG Qing-wen¹, DU Chun-xiang², LI Xiao-wei², LI Gui-chun¹, WANG Ming¹

(1. Key Laboratory of Agro-Environment and Climate Change, Ministry of Agriculture, Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2. Yutai Agricultural Bureau of Shandong Province, Yutai 272300, China)

Abstract: The nitrogen (N) fertilizers overused or misused are the main contributors for water eutrophication of the Nansi Lake in eastern China. A field experiment with different application levels of controlled-release N fertilizer (CRF) was carried out at a rice field in the Nansi lake basin to provide information on the nitrogen uptake rate and use efficiency by rice with CRF application at different growth stages of rice. The fertilization levels for the controlled fertilizer in this study were 0, 300, 337.5 and 375 kg/hm^2 , respectively, and 375 kg/hm^2 for conventional urea (CU). We estimated the N uptake rate in different growing season and apparent recovery of fertilizer in root, stover and grain of rice. The result showed that grain yield increased by higher N rate. However, the N uptake rate did not increase linearly with the nitrogen application amount. The highest N uptake rate was $22.48 \text{ mg}/(\text{plant} \cdot \text{d})$ under the fertilization amount of 337.5 kg/hm^2 during the young panicle differentiation stage. Apparent N recovery efficiency for CU with traditional application amount of 375 kg/hm^2 was 21.86% . Apparent N recovery efficiency for CRF with application amount of 337.5 kg/hm^2 was highest with 37.17% . Based on the statistical data, with CU of traditional urea application amount of 375 kg/hm^2 , nitrogen loss and soil N residue at one growing season are $130.07 \times 10^3 \text{ t}$ for Jining city and $11.4 \times 10^3 \text{ t}$ for Yutai county of the Nansi Lake basin. If using CRF with the optimized application amount of 337.5 kg/hm^2 , nitrogen loss and soil residual at one growing season is $10.46 \times 10^4 \text{ t}$ for Jining city. It could reduce losses of $2.55 \times 10^4 \text{ t}$ N for Jining city and 2235.26 t N for Yutai county per year. Because of releasing patterns more closely matched to crop N uptake patterns, controlled release N fertilizer could be a good way to prevent water eutrophication due to nitrogen fertilizer overused or misused in the Nansi Lake.

Key words: Nansi Lake basin; rice; N uptake rate; N use efficiency; controlled-release fertilizer

南四湖作为南水北调东线工程的重要输水通道和调蓄湖泊, 水质的好坏直接关系到南水北调工程的成败。随着南水北调东线工程调水日期的日益临近, 实现南四湖整体水质在调水前达到《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002) 中的Ⅲ类标准目标, 对南四湖流域污染现状进行治理刻不容缓。南四湖是河迹洼地湖, 属浅水富营养型河泊, 污染源面广、

量大。南四湖 10 条河流入湖断面除了东鱼河、西支河符合《中国地表水环境治理标准》(GHZB1-99) V 类地表水标准外, 其余 8 个断面均劣于 V 类水质。从

收稿日期: 2010-08-05; 修订日期: 2010-09-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(40701099); 国家科技支撑计划项目(2007BAD87B05); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项

作者简介: 张晴雯(1975~), 女, 博士, 副研究员, 主要研究方向为非点源污染机制与控制, E-mail: ellenzhqw@163.com

污染指标看,南四湖的主要污染物为耗氧有机物质和氨氮^[1].

随着工业与城市点源污染的逐步控制,农业面源污染的影响更加凸显,成为南四湖水环境质量改善的主要制约因素. 沿湖灌区农业生产相对发达,为了增加粮食生产,农业投入较多,驱动氮肥施用量大幅度增加. 氮是作物生长的重要营养元素,沿湖农田主要以施用氮肥为主,携带养分的农田排水直接影响南四湖的水体质量. 针对农田生态系统氮肥施用存在的问题,国内外已经进行了大量的研究^[2~6],重点在稻田田面水的氮素动态变化及淋溶损失、氨挥发的定量化和降低稻田氨挥发损失方面取得了重要进展. 为了提高氮肥利用效率的同时减轻环境污染,控释肥在农田的应用日益受到重视^[7~11]. 国内围绕南四湖的研究,主要针对南四湖水体的内源污染^[1,2,12~15],而对沿南四湖农田水稻的吸氮特征以及因氮肥不合理施用导致氮素流失对水体影响的研究相对缺乏,尤其对控释肥条件下沿南四湖农田水稻的吸氮特征未见有报道.

本研究主要目标是通过分析施用树脂包膜控释尿素控释肥在不同水平条件下水稻生长期的吸氮速率的差异性,估算水稻对氮肥的吸收利用率,以期为南四湖流域农田氮肥精准适量施肥及南四湖水体外源污染防治提供理论依据和数据支撑.

1 材料与方法

1.1 试验区概况

南四湖流域是淮河流域的重要组成部分,地处山东省西南部,由南阳、独山、昭阳、微山 4 个湖泊连接而成,是我国十大淡水湖泊之一. 湖泊南北长 126 km,东西宽 5 ~ 25 km,水面积约 1 266 km²,年平均储水量 16.06 亿 m³^[16]. 南四湖承接山东、江苏、安徽、河南四省 32 个县市区来水,流域总面积 31 700 hm². 直接引提湖水的就有山东省的济宁、枣庄和江苏省的徐州 3 个市十多县市区,灌溉着周边 33.33 多万 hm² 耕地,仅农业灌溉每年约需水 20 多亿 m³. 试验点选择在南四湖流域下游西岸的山东济宁市鱼台县谷亭镇. 鱼台县地势低洼,属湖西黄泛平原区,临湖岸线达 55 km. 鱼台县内西支河是污染南四湖水体最严重的河道之一. 试验点鱼台县谷亭镇土壤为湿潮土型幼年水稻土^[17],地下水位 0.5 ~ 1 m. 土壤质地为重壤和黏土,降雨或灌溉后易发生浸涝,局部地区有季节性积水,农业利用方式主要有稻麦轮作、稻菜轮作. 据 2003 年资料统计,鱼台县的粮食作物种植面积为 40 893 hm²,其中水稻的播种面积为 21 433 hm²,占总播种面积的 52.41%^[17]. 土壤耕层厚度 15 ~ 20 cm,均值 17 cm 左右,试验点土壤物理性质见表 1.

表 1 南四湖流域鱼台试验点土壤基础养分

Table 1 Soil nutrients in study site at Yutai county of Nansi Lake basin

土壤深度 /cm	有机质 /g·kg	全氮 /g·kg	全磷 /g·kg	碱解氮 /mg·kg	速效磷 /mg·kg	速效钾 /mg·kg	土壤容重 /kg·cm ⁻³	总孔隙度 /%	毛管孔隙 /%
0 ~ 20	17.7	1.2	1.7	71	8.3	230	1.32	55%	48.2

鱼台县降水集中,干湿季节分明. 全县年降水量为 697.00 mm,夏季降水最多,达 410.30 mm,占全年降水量的 58.90%,秋季降水量占年降水总量的 20.5%,春冬降水量占年降水总量的 20.6%. 因降水集中,容易内涝. 据气象站 1967 年以来的资料表明:夏涝约 4 年一遇,几率为 23.5%,秋涝为 5 ~ 6 年一遇,几率为 18%. 鱼台县地势低洼,为上游诸地客水入湖之口,水域面积 10 819.8 hm²,占土地面积的 16.5%. 其中,沟渠占地 4 522.5 hm²,占水域面积的 41.8%. 现有大型干渠 260 条,578 km,支渠 1 087 条,1 015.7 km,斗渠、农渠 14 681 条,4 685.5 km,沟网 81 条,189 km,年均排渗水量为 4 045.2 万 m³. 农田频繁的提湖灌溉和渍涝排水过程中携带的大量养分对湖水水质安全形成很大威胁.

1.2 试验设计与样品测定

试验采用小区设计、随机排列,设计了 5 个处理:普通尿素习惯施肥量(375 kg/hm²)、控释肥习惯用量(375 kg/hm²)、控释肥减 N 10%(337.5 kg/hm²)、控释肥减 N 20%(300 kg/hm²)、对照(CK),每个处理 3 个重复,小区面积 56 m²,小区四周设 2 m 保护行. 试验用控释肥为金正大生产的热塑型树脂包膜控释尿素,含氮量为 42%. 2009 年 6 月布置大田试验,每个处理的大田管理保持一致. 大田水稻试验移栽时间为 2009 年 6 月 26 日,水稻行距 0.25 m,株距 0.18 m. 烤田时间为 2009 年 7 月 23 日开始,复水时间为 7 月 31 日.

分别于 7 月 3 日返青期、7 月 22 日分蘖期、8 月 6 日幼穗分化期、8 月 26 日出穗期、10 月 13 日

收获期采集植株样与土壤样品,测定记录各处理的水稻生长情况(生物鲜重和干重等).成熟期取有代表性的植株 8 穴考察每穗粒数、千粒重等性状,每个小区实收测产量.水稻收获前,按照不同小区取水稻植株样考种,同时取植株样分析氮素含量.植株样在 105℃ 左右的温度下杀青 30 min 后,在 80℃ 恒温下烘干 24 h,至恒重,称重粉碎.植物全 N 采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮,凯式定氮法测定全 N 含量.土壤样品采集每个小区采集 5 个点充分混合后,按四分法分样,装入密封袋.土壤容重采用重量法、土壤水分含量采用重量-烘干法,土壤有效氮采用氢氧化钠溶液碱解扩散法测定^[18].

1.3 数据分析

通常以氮的投入与产出来衡量氮素利用效率.氮肥的效率包括吸收效率和利用效率^[7].吸收效率起着较为重要的作用,不同施肥方式和肥料品种对水稻的吸氮效率具有十分重要的作用.氮素利用效率(nitrogen use efficiency, NUE)是评价农业措施耕作制度及作物生长适宜程度的综合生理生态指标,但由于研究对象、研究目的不同,表征氮肥利用率的指标很多,目前国内仍然没有统一的标准^[19].指标

氮肥表观利用率 =
$$\frac{\text{施氮区植株总吸氮量} - \text{对照植株总吸氮量}}{\text{施氮量}} \times 100\%$$

(1)

氮肥农艺利用率 =
$$\frac{\text{施氮区产量} - \text{对照区产量}}{\text{施氮量}}$$

(2)

氮素生理利用率 =
$$\frac{\text{施氮区产量} - \text{对照区产量}}{\text{施氮区植株总吸氮量} - \text{对照植株总吸收氮量}}$$

(3)

氮素籽粒利用效率 =
$$\frac{\text{籽粒产量}}{\text{植物总吸氮量}}$$

(4)

氮肥偏生产力 =
$$\frac{\text{稻谷产量}}{\text{施氮量}}$$

(5)

吸氮速率 =
$$\frac{\text{含氮量} \times \text{某生育期水稻生物量}}{\text{生育期时间}}$$

(6)

文中不同处理间的差异显著性,运用最小显著差数法(least significant difference, LSD)在显著水平 $\alpha = 0.05$ 条件下进行多重比较(SPSS 11.5 软件处理).

2 结果与分析

2.1 控释肥不同水平下水稻产量及生物学特性

水稻产量高低取决于干物质的积累、分配和运转,氮是干物质积累所需要的重要的营养元素.不同处理对水稻籽粒产量影响的差异显著性分析结果见表 2,结果表明,无论是施用普通尿素还是包膜控释尿素 3 个不同施用量对水稻的产量和生物学特性均

有的强调利用高效,有的强调吸收高效,有的强调产量高效,未能将产量和效率统一,因此在实际应用中具有很多局限^[19].为了分析氮肥利用率及流失量对水体的潜在污染,从不同方面评价施用控释肥水稻对氮素的利用效率,本研究计算了 5 个处理的氮肥表观利用率(apparent N recovery efficiency, ANRE, %)、氮肥农艺利用率(agronomic N use efficiency, ANUE, kg/kg)、氮肥生理利用率(physiological N use efficiency, PNUE, kg/kg)、氮肥籽粒利用效率(nitrogen grain utilization efficiency, NGUE, kg/kg)和氮肥偏生产力(partial factor productivity of applied N, PFP, kg/kg).氮肥表观利用率是指施氮区水稻氮素积累量与空白区氮素积累量的差占施氮量的百分数,是水稻氮肥吸收利用特性的主要指标.氮肥农艺利用率是指施用氮肥后增加的产量与施用氮肥量的比值,它表明施用的每 kg 纯氮增产稻谷的能力.氮肥生理利用率是指作物因施用氮肥而增加的产量与相应的氮素积累量的增加量的比值,反映了作物对所吸收的氮素肥料在作物体内的利用率.

不同参数计算公式如下.

有明显的促进作用.在显著水平 5% 条件下,施用包膜控释尿素 3 个水平下的水稻产量均显著高于对照水稻产量.与对照相比,施用普通尿素可以增加产量 38.79%,施用包膜控释尿素 375、337.5 和 300 kg/hm² 水稻产量分别增加 50.43%、54.25% 和 41.59%.与施用普通尿素常规量 375 kg/hm² 相比,施用包膜控释尿素 375 kg/hm²、337.5 kg/hm² 对水稻产量有显著促进作用,分别增加 8.39% 和 11.14%.说明施用氮肥对水稻产量有显著促进作用,但是随氮肥投入量的增加,水稻增产并不显著,所以掌握水稻的需肥规律,确定最佳需肥量是保持水稻稳产的前提下减少因超量施肥导致氮素流入水

体的关键. 氮肥通过影响水稻的生物学性状来影响水稻的吸氮特征. 不同处理对水稻生物学性状的影响存在差异性,不同处理对水稻生物学特性的影响进行了差异显著性结果见表 2. 施用普通尿素 375 kg/hm²、包膜控释尿素 375 kg/hm² 和 337. 5 kg/hm² 均能显著促进水稻的单株分蘖数,3 个处理下单株分蘖数显著高于对照,施用控释尿素 337. 5 kg/hm² 条件下单株分蘖数最高,且施用控释尿素 375

kg/hm² 和 337. 5 kg/hm² 处理下的单株分蘖数高于普通尿素常规施用量. 对照的每穗粒数比较高,但与其他处理间的差异并不显著. 除了施用包膜控释尿素 300 kg/hm² 水平下的水稻千粒重与对照无显著差异外,其它处理的千粒重均与对照相比有显著差异. 在置信度 95% 条件下,施用普通尿素和包膜控释尿素 3 个水平对水稻的每穴穗数和亩穗数均比对照有显著增加,但处理间差异不显著.

表 2 控释肥不同水平下水稻产量及生物学特性¹⁾

Table 2 Rice yields and biological characteristic under different application amount of CRF						
处理/kg·hm ⁻²	单株分蘖数	粒/穗/个	千粒重/g	每穴穗/个	穗数/万个·hm ⁻²	水稻产量/kg·hm ⁻²
CK	1. 48 ± 0. 15 d	100. 17 ± 4. 39 a	25. 33 ± 1. 14 a	9. 53 ± 0. 64 b	208. 11 ± 13. 94 b	5669. 40 ± 193. 24 c
CRF-N-300	1. 66 ± 0. 02 d	98. 24 ± 7. 66 a	24. 47 ± 0. 23 ab	11. 78 ± 0. 69 a	257. 28 ± 15. 03 a	8027. 18 ± 144. 28 b
CRF-N-337. 5	2. 01 ± 0. 02 a	96. 45 ± 3. 98 a	23. 60 ± 0. 20 c	12. 59 ± 0. 73 a	274. 93 ± 15. 78 a	8745. 20 ± 204. 42 a
CRF-N-375	1. 91 ± 0. 04 b	96. 06 ± 4. 25 a	23. 13 ± 1. 10 bc	12. 59 ± 0. 20 a	275. 12 ± 4. 44 a	8528. 40 ± 37. 41 a
CU-N-375	1. 73 ± 0. 03 c	93. 6 ± 3. 40 a	22. 80 ± 1. 04 c	12. 25 ± 0. 35 a	267. 65 ± 7. 59 a	7868. 40 ± 321. 05 b

1) CRF 为控释肥(controlled-release N fertilizer),CU 为普通尿素(conventional urea);表中同列不同字母表示不同处理数值间存在显著差异(α = 0. 05),下同

施用包膜控释尿素对水稻生物学特性的影响有明显的阶段性. 施用普通尿素和包膜控释尿素对水稻生长期根、茎和叶发育影响的差异显著性结果见表 3. 由分析结果看出,在水稻返青期,所有处理水稻的茎叶和根发育没有显著差异,只有施用包膜控释尿素 337. 5 kg/hm² 水稻的根与地上部分之比,与其它处理有显著差异性,但与施用普通尿素没有显著差异. 由于试验点水稻移栽时间较晚,返青期根生物量占整个生物量的比例较高,分别占整个生物量的 48%、50%、44%、52%、51%. 水稻分蘖期,施用包膜控释尿素对水稻发育有明显的促进作用,尤其是施用包膜控释尿素 337. 5 kg/hm² 和 375 kg/hm² 水稻的地上部分均显著高于对照,施用包膜控释尿素 375 kg/hm² 水稻的根的发育显著高于对

照,各处理根生物量分别占整个生物量的 40%、44%、41%、48%、44%. 幼穗分化期,施用包膜控释尿素 337. 5 kg/hm² 和 375 kg/hm²、施用普通尿素 375 kg/hm² 水稻的地上部分均显著高于对照,同时这 3 个处理显著促进了根的发育,各处理根生物量分别占整个生物量的 32%、30%、37%、34%、37%. 出穗期,施用包膜控释尿素 337. 5 kg/hm² 和 375 kg/hm² 水稻的地方部分发育显著高于对照,但施用包膜控释尿素 300 kg/hm² 和施用普通尿素水稻地上部分发育与对照没有显著差异. 施用控肥显著促进了水稻根的发育,施用包膜控释尿素 337. 5 kg/hm² 和 375 kg/hm² 水稻根的发育均显著高于对照,各处理根占整个生物量的比例分别为 24%、25%、29%、31%、28%.

表 3 控释肥不同水平下水稻生长期根冠发育特性/g·株⁻¹

Table 3 Changes of rice roots and cropshoots under different application amount of CRF at different growth stages of rice/g·plant ⁻¹								
处理	返青期		分蘖期		幼穗分化		出穗期	
	地上部分	根	地上部分	根	地上部分	根	地上部分	根
CK	2. 35 ± 0. 53a	2. 21 ± 0. 65a	5. 31 ± 0. 39 c	3. 56 ± 0. 86 b	12. 39 ± 1. 53 c	5. 93 ± 0. 27 b	28. 62 ± 1. 40 b	9. 23 ± 1. 10 c
CRF-N-300	2. 52 ± 0. 14a	2. 50 ± 0. 24a	6. 28 ± 1. 12 cb	5. 02 ± 0. 60 a	13. 93 ± 1. 39 bc	6. 04 ± 1. 21 b	34. 08 ± 2. 98ab	11. 11 ± 3. 11 c
CRF-N-337. 5	2. 82 ± 0. 29a	2. 21 ± 0. 38a	7. 73 ± 1. 50 a	5. 32 ± 0. 71a	16. 78 ± 2. 53 a	9. 89 ± 0. 97 a	41. 65 ± 5. 65 a	16. 98 ± 1. 12 a
CRF-N-375	2. 48 ± 0. 54a	2. 74 ± 0. 96a	6. 72 ± 0. 92 ab	6. 21 ± 0. 55 a	16. 71 ± 0. 75 a	8. 42 ± 1. 52 ab	37. 74 ± 4. 50 a	16. 58 ± 0. 66 a
CU-N-375	2. 25 ± 0. 34a	2. 03 ± 0. 38a	5. 47 ± 0. 47 cb	4. 33 ± 0. 75 ab	15. 25 ± 0. 44 b	8. 92 ± 1. 20 a	33. 73 ± 32. 87ab	13. 40 ± 0. 67bc

2. 2 控释肥不同施肥量条件下水稻对化肥氮的吸收

水稻对氮素的吸收有明显的阶段性. 水稻分蘖

期含氮量明显高于苗期,分蘖盛期含量达最高峰,其后随生育期推移而逐渐下降. 施用控释包膜尿素不同氮素水平和施用普通尿素常规量下,水稻茎叶的

含氮量在水稻不同生长期有所不同. 施用普通尿素、包膜控释尿素不同水平下水稻不同生长期的茎叶含

氮量以及收获期籽粒含氮量的差异显著性结果见图 1.

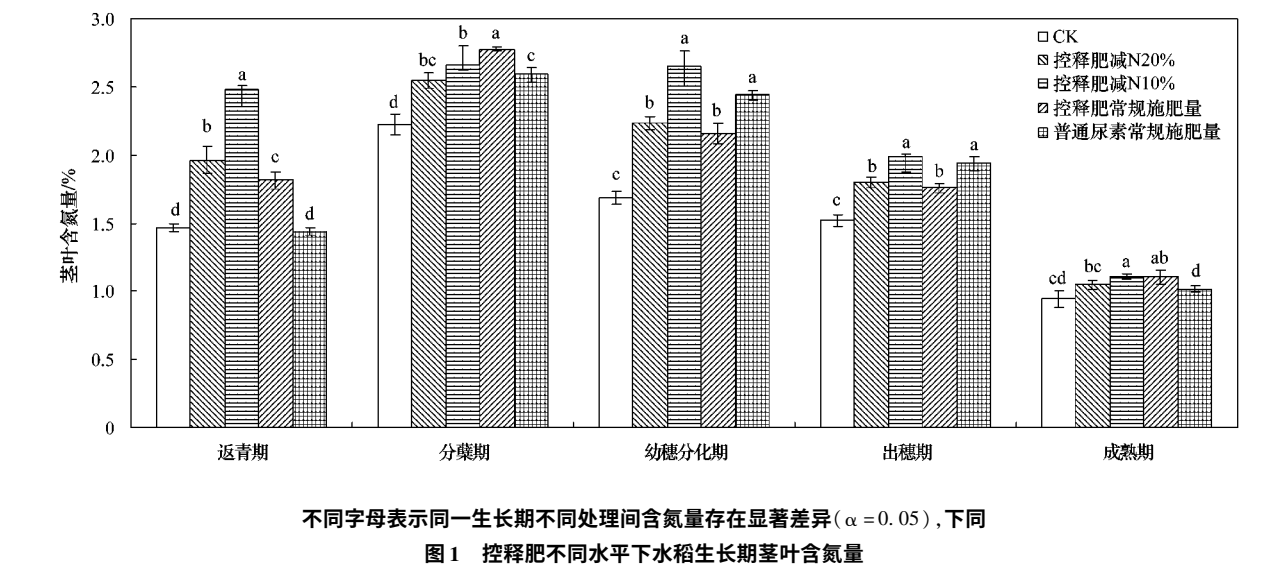


Fig. 1 Nitrogen concentration dynamics of aboveground part of rice under different application amounts of CRF at different growth stages of rice

从分析结果得出,除了返青期和成熟期施用普通尿素茎叶含氮量与对照没有差异外,在水稻分蘖期、幼穗分化期和出穗期,施用普通尿素均比对照使得水稻茎叶含氮量有了显著增加.除了成熟期施用包膜控释尿素减氮 10% 以外,与对照相比,在水稻整个生育期,控释肥 3 个施肥水平均显著增加了水稻茎叶含氮量.从水稻茎叶含量可以看出,水稻对氮素的吸收积累主要集中在分蘖期和幼穗分化期,各施肥处理水稻茎叶氮含量均表现为先升高后降低的趋势,由于控释剂的作用,在水稻成熟期控释肥料 3 个处理的水稻茎叶含氮量均高于普通尿素处理.由于水稻吸氮速度很快,不管是普通尿素还是控释肥 3 个施肥水平下,幼穗分化期施入稻田中氮素被水稻吸收 60% 左右,水稻出穗期和成熟期稻田中氮素浓度很难维持在水稻对氮素的需求水平上.因此,根据水稻对氮素的需求,采取控施肥是提高氮素效率的有效手段.水稻对不同生育期追施氮肥的吸收利用表现出较大差异,穗粒肥的氮肥利用率明显高于基肥.因此,在不提高施肥量甚至适当减少的基础上,应用控释肥缓慢释放的特点可以适当提高土壤后期氮肥供应强度,以提高氮肥利用率.

2.3 水稻生长期的吸氮速率

在水稻各生育期中体内氮素的分布在不断变化,化肥氮施入后水稻不同生长期对化肥氮的吸收效率见图 2. 水稻对氮素的吸收有明显的阶段性,植株吸氮高峰出现在水稻生育中期.地上部分对氮素

的吸收高峰期出现在幼穗分化期,并延至出穗期,根对氮素的吸收高峰期主要集中在幼穗分化期.控释氮肥对水稻体内氮素的含量、分布、吸氮速率有显著的影响.返青期,施用包膜控释尿素处理下水稻对氮素的吸收显著高于对照和施用普通尿素.幼穗分蘖期和幼穗分化期,在置信度 95% 时,施用包膜控释尿素 375 kg/hm²、337.5 kg/hm²、普通尿素 375 kg/hm² 处理下,水稻地上部分和水稻植株总吸收氮的速率均显著高于对照,证明了氮素在水稻增产中的重要作用.施用包膜控释尿素的水稻总吸氮速率随施肥量的增加呈现“低-高-低”的趋势,施用中氮量 337.5 kg/hm² 水平下吸氮速率最高,在幼穗分化期达 22.48 mg/(株·d),显著高于低氮和高氮的处理.在出穗期,除了施用控释尿素减氮 20% 的处理之外,其它几个处理茎叶和植株的吸氮速率均显著高于对照.根据水稻不同时期需氮量进行精准施肥是控制超量施氮肥造成的面源污染的关键途径.

2.4 收获期水稻对化肥氮的利用率

从表 4 中可以看出,在施用普通尿素常规施肥量条件下,氮肥表观利用率为 21.86%.施用包膜控释尿素 3 个水平下的氮肥表观利用率明显高于普通尿素,且 3 个施肥水平下存在显著差异.随施氮量的增加,水稻的氮素表观利用率呈现“低-高-低”的趋势,在中氮水平控释肥减氮 10% 的水平处为最大值,达到 37.17%,高氮水平次之,低氮水平最低.可见,控释肥有利于提高氮肥表观利用率,但应该

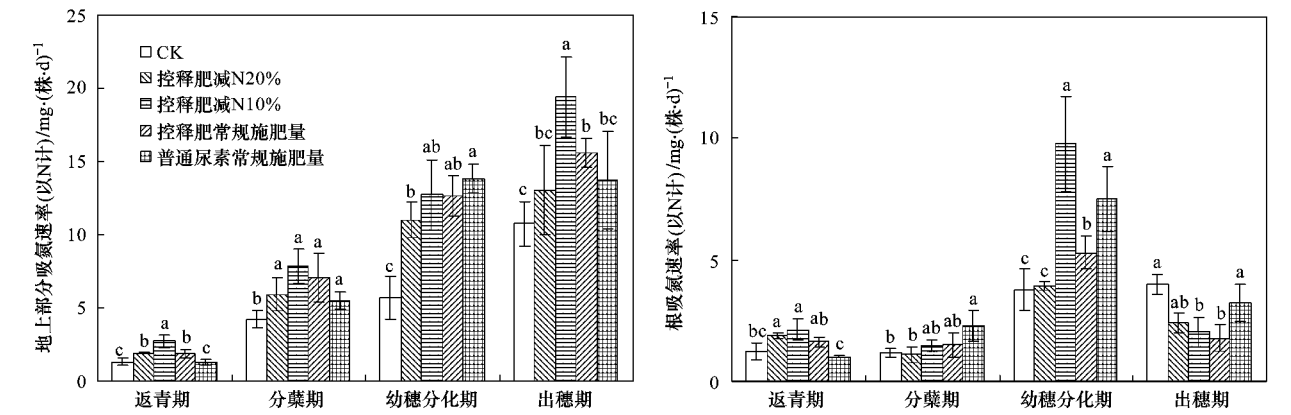


图2 控释肥不同水平下水稻不同生长期的吸氮速率

Fig.2 Nitrogen uptake rates under different application amounts of CRF at the rice different growing stages

适量,氮肥用量过多或过少均不利于提高氮肥的表观利用率.控释肥3个水平下的氮肥农艺利用率均明显高于施用高氮的普通尿素.控释肥有利于提高氮肥农艺利用率,同当量氮肥水平下,控释氮肥农艺利用率为7.62 kg/kg,比施用普通尿素高1.76 kg/kg.

从表4中可以看出,控释肥低氮水平下的氮肥生理利用率明显高于施用高氮的普通尿素,但随着控释肥氮素水平的提高,氮肥生理利用率明显下降,低氮水平下为31.67 kg/kg,中氮水平下25.04 kg/kg,高氮水平下26.12 kg/kg.表明随着施肥水平的提高,水稻体内每积累1 kg 氮素而增加的产量呈下降趋势.控释肥低氮水平下的氮肥籽粒利用率明

显高于施用高氮的普通尿素,但随着控释肥氮素水平的提高,氮肥籽粒利用率有下降趋势,当季作物不施氮条件下籽粒利用率为37.65 kg/kg,低氮水平下为35.86 kg/kg,中氮水平下为31.97 kg/kg,高氮水平下为32.94 kg/kg.施用控释肥3个施肥水平下水稻的氮肥偏生产力均高于施用普通尿素的水稻,但随着控释肥施氮量的增加,氮肥的偏生产力呈现显著下降的趋势.试验结果说明沿南四湖农田水稻田当季一半左右的氮肥发生损失.高量的氮肥投入,引起土壤中养分比例失调,使一部分肥料损失排放在环境中,并成为潜在的面源污染源,过剩的氮素存在于土壤或随田面水和渗漏水的形式流失进入湖泊水体.

表4 收获期水稻田化肥氮的利用率								
Table 4 Nitrogen use efficiency by rice under different application amounts of CRF at harvest								
处理	秸秆吸氮量	籽粒吸氮量	植株总吸氮量	ANRE	ANUE	PNUE	NGUE	PFP
/kg·hm ⁻²	/kg·hm ⁻²	/kg·hm ⁻²	/kg·hm ⁻²	/%	/kg·kg ⁻¹	/kg·kg ⁻¹	/kg·kg ⁻¹	/kg·kg ⁻¹
CK	56.06±3.60 c	69.94±3.25 c	150.58±5.69 c				37.65	
CRF-N-300	88.03±18.55 b	111.30±2.76 b	225.02±18.85 b	24.81	7.86	31.67	35.86	26.76±0.48
CRF-N-337.5	116.06±15.11 a	120.14±4.12 a	276.04±12.50 a	37.17	9.31	25.04	31.97	26.11±0.38
CRF-N-375	114.65±15.84 a	115.70±1.76 ab	263.77±15.98 a	29.19	7.62	26.12	32.94	22.74±0.10
CU-N-375	87.61±11.79 b	108.50±2.16 b	232.54±9.80 b	21.86	5.86	26.83	33.86	20.98±0.86

3 讨论

我国农田单位面积的施肥量大大高于发达国家,据2008年统计资料^[20],我国单位面积化肥施用量为419.58 kg/hm²,单季稻施氮量平均为180 kg/hm²^[4],比世界平均高25%~35%,南四湖流域单季水稻的施氮量比太湖流域的高产水稻的施氮量350 kg/hm²还高^[20],为375 kg/hm²,是国内平均水平的2倍多.沿南四湖流域农用化肥施用量从20世纪90年代开始迅猛增加,按2003年统计数据鱼台县农作物播种面积40 893 hm²计算,化肥的平均施用量为1 863.0 kg/hm²,为全国平均水平的3倍多.化肥投入量N、P₂O₅、K₂O分别是636.0、241.5和52.5 kg/hm²,N:P₂O₅:K₂O=1:0.4:0.08,氮肥占了绝对优势,所施氮肥以尿素和磷酸二铵为主,分别占总施用量的60%和23%.

灌溉稻田施用氮肥后,由于在土壤-水系统中氮的挥发,反硝化作用,表面径流以及渗漏作用等造成

氮肥的损失,因此氮肥利用率相对偏低。一般认为,施氮量增加,在氮素水平较低的种植条件下(如 150 kg/hm^2),可以显著提高水稻的氮素利用率,但在高施氮量水平下,水稻氮素积累总量增加,而氮素生产效率下降^[18,22]。本研究也得到类似结论,在高水平供氮背景下,水稻的物质生产效率和氮素稻谷生产效率,随着施氮水平的增加趋于降低。无论是施用普通尿素还是包膜控释尿素对水稻的产量和生物学特性均有明显的促进作用。与对照相比,施用普通尿素可以增加产量 38.79%,施用包膜控释尿素 300、337.5 和 375 kg/hm^2 水稻产量分别增加 41.59%、54.25% 和 50.43%。说明施用氮肥对水稻产量有显著促进作用,但是随氮肥投入量的增加,水稻增产并不显著。控释氮肥对水稻体内氮素的含量、分布、吸氮速率有显著的影响。施用包膜控释尿素的水稻总吸氮速率和氮肥表观利用率随施肥量的增加呈现“低-高-低”的趋势,施用中氮量 337.5 kg/hm^2 水平下吸氮速率最高,在幼穗分化期达 $22.48 \text{ mg}/(\text{株} \cdot \text{d})$,显著高于低氮和高氮的处理。氮肥表观利用率在中氮水平控释肥减氮 10% 的水平处达到最大值,达到 37.17%,高氮水平次之,低氮水平最低。因此,氮肥精确定量施用是水稻生长和产量形成的最重要调控途径之一,确定最佳需肥量是在保持水稻稳产的前提下减少因超量施肥导致氮素流入水体的关键。施氮不足往往造成水稻生长量小、产量不高。而施氮过量和不当地造成群体过大,恶化群体株型,引起倒伏,导致减产;同时施氮过量还会造成肥料流失,导致肥料利用率低,引起环境污染。施用新型控释肥、精确定量施氮是高产高效的重要措施,也是削减农田污染负荷的重要手段。

我国稻田的氮肥利用效率一般为 30% 左右,低于世界平均水平,比美国、日本等发达国家低 10 ~ 15 个百分点。从本试验结果得出,施用普通尿素常规施肥量条件下,氮肥表观利用率为 21.86%,施用控释氮肥 3 个施肥水平下氮肥利用率均显著高于施用普通尿素,中氮水平控释肥的氮肥利用率最高,为 37.17%。所有处理下,试验农田的氮肥农学利用率均低于 10 kg/kg 。国内各地进行的氮素标记试验结果表明,水稻氮肥的损失率多为 30% ~ 70%^[23]。南四湖流域济宁市化肥施用量 $131.93 \times 10^4 \text{ t}$ (按折纯计 $46.63 \times 10^4 \text{ t}$)^[24],其中氮肥 $47.52 \times 10^4 \text{ t}$ (按折纯计 $16.65 \times 10^4 \text{ t}$),占总施肥量的 36.02%。仅鱼台县年化肥施用量 $9.23 \times 10^4 \text{ t}$ (按折纯计 $3.11 \times 10^4 \text{ t}$),其中氮肥 $4.87 \times 10^4 \text{ t}$ (按折纯计 $1.46 \times 10^4 \text{ t}$),

占总施肥量的 52.71%。按照普通尿素习惯施氮量 375 kg/hm^2 条件下的氮肥利用率 21.86% 估算,济宁市年均土壤残留和流失的氮肥为 $13.01 \times 10^4 \text{ t}$,仅鱼台县年均土壤残留和流失的氮肥为 $1.14 \times 10^4 \text{ t}$ 。控释肥料通过表面的包膜层来调节肥料颗粒内部速效养分的释放速率,使肥料中营养元素的供应与作物对养分的需求基本同步,显著减少氮挥发、氮的淋溶和硝化-反硝化等途径的损失^[25],如果施用包膜控释尿素 337.5 kg/hm^2 ,济宁市年均损失氮肥 $10.46 \times 10^4 \text{ t}$,可年均减少损失 $2.55 \times 10^4 \text{ t}$,仅鱼台县可年均减少损失 2 235.26 t。氮肥除被作物吸收和部分以矿质氮残留在土壤中外,通过各种途径的损失,田面水排放和淋溶水损失是沿南四湖水稻田化肥氮素损失的基本途径之一。

4 结论

(1) 树脂包膜控释尿素对水稻产量有明显的促进作用,但是随氮肥投入量的增加,水稻增产并不显著。控释尿素对生物学特性的影响有明显的阶段性,水稻吸氮高峰出现在幼穗分化期。根据水稻生育期需肥规律确定控释肥最佳施用量,是保持水稻稳产的前提下减少因超量施肥导致氮素流入水体的关键节点。

(2) 施用包膜树脂控释尿素对水稻吸氮速率、氮肥表观利用率和氮肥农艺利用率有明显的促进作用,但并不随施氮量的增加呈线性增长。施用中氮量 337.5 kg/hm^2 水平下吸氮速率最高,均显著高于低氮和高氮的处理。随着施肥水平的提高,水稻体内每积累 1 kg 氮素而增加的产量呈下降趋势。高量的氮肥投入引起土壤中养分比例失调,过剩的氮素成为潜在的面源污染源。

(3) 南四湖流域施用普通尿素常规施肥量条件下,仅以济宁市年施氮肥量 $16.65 \times 10^4 \text{ t}$ 为基数,按照普通尿素习惯施氮量 375 kg/hm^2 条件下的氮肥表观利用率 21.86% 估算,济宁市年均土壤残留和流失的氮肥为 $13.01 \times 10^4 \text{ t}$,仅鱼台县年均土壤残留和流失的氮肥为 $1.14 \times 10^4 \text{ t}$ 。如果施用包膜控释尿素 337.5 kg/hm^2 ,济宁市年均损失氮肥 $10.46 \times 10^4 \text{ t}$,可年均减少损失 $2.55 \times 10^4 \text{ t}$,仅鱼台县可年均减少损失 2 235.26 t。适量施用新型控释肥是削减农田污染负荷的重要手段。

致谢:对山东鱼台县农业局杨卫华、单衍修、刘安敏、王亮、陶秀珍、孙厚荣、谢琳在完成试验过程中提供的帮助表示真诚的感谢。

参考文献:

- [1] 古小治,张雷,柏祥,等. 南四湖湿地沉积物及孔隙水基本特性研究[J]. 环境科学,2010,31(4):939-945.
- [2] Conrad Y, Fohre N. Modeling of nitrogen leaching under a complex winter wheat and red clover crop rotation in a drained agricultural field[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2009, 34(8-9):530-540.
- [3] 李方敏,樊小林,陈文东. 控释肥对水稻产量和氮肥利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2005,11(4):494-500.
- [4] Zebarth B J, Drury C F, Tremblay N, *et al.* Opportunities for improved fertilizer nitrogen management in production of arable crops in eastern Canada: A review[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2009, 89(2):113-132.
- [5] Lupwayi N Z, Grant C A, Soon Y K, *et al.* Soil microbial community response to controlled-release urea fertilizer under zero tillage and conventional tillage[J]. Applied Soil Ecology, 2010, 45(3):254-261.
- [6] 童依平,李继云,李振声. 不同小麦品种(系)吸收利用氮素效率的差异及有关机理研究 I. 吸收和利用效率对产量的影响[J]. 西北植物学报,1999,19(2):12-16.
- [7] Amkha S, Inubushi K, Takagaki M. Effects of controlled-release nitrogen fertilizer application on nitrogen uptake of a leafy vegetable (*Brassica campestris* L.), nitrate leaching and N_2O emission[J]. Japanese Journal of Tropical Agriculture, 2007, 51(4):152-159.
- [8] Emilsson T, Berndtsson J C, Mattsson J E, *et al.* Effect of using conventional and controlled release fertilizer on nutrient runoff from various vegetated roof systems [J]. Ecological Engineering, 2007, 29(3):260-271.
- [9] Shaviv A, Ranban S, Zaidel E. Modeling controlled nutrient release from polymer coated fertilizers: Diffusion release from single granules[J]. Environment Science Technology, 2003, 37(10):2251-2256.
- [10] Mao X, Sun K, Wang D, *et al.* Controlled-release fertilizer (CRF): A green fertilizer for controlling non-point contamination in agriculture [J]. Journal of Environmental Sciences, 2005, 17(2):181-184.
- [11] 于淑芳,杨力,张民,等. 控释肥对小麦玉米生物学性状和土壤硝酸盐积累的影响[J]. 农业环境科学学报,2010,29(1):128-133.
- [12] 刘恩峰,沈吉,杨丽原,等. 南四湖及主要入湖河流表层沉积物重金属形态组成及污染研究[J]. 环境科学,2007,28(6):1377-1383.
- [13] 杨丽原,沈吉,张祖陆,等. 近四十年来山东南四湖环境演化的元素地球化学记录[J]. 地球化学,2003,32(5):453-460.
- [14] 苗群. 南四湖水环境质量评价研究[D]. 青岛:青岛大学,2008.
- [15] 孟祥华,刘恩峰,杨丽原,等. 南四湖及主要入湖河流沉积物金属空间分布特征与污染评价[J]. 环境科学研究,2010,23(20):1-7.
- [16] 沈吉,张祖陆,杨丽原,等. 南四湖环境与资源研究[M]. 北京:地震出版社,2008. 1-5.
- [17] 杜春祥,李涛,王作喜. 鱼台耕地[M]. 济南:山东大学出版社,2006.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2000.
- [19] 吴文革,张四海,赵决建,等. 氮肥运筹模式对双季稻北缘水稻氮素吸收利用及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2007,13(5):757-764.
- [20] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴(2008) [M]. 北京:中国统计出版社,2009.
- [21] 崔玉亨,程序,韩纯儒,等. 苏南太湖流域水稻经济生态适宜施氮量研究[J]. 生态学报,2000,20(4):659-662.
- [22] 江立庚,曹卫星,甘秀芹,等. 不同施氮水平对南方早稻氮素吸收利用及其产量和品质的影响[J]. 中国农业科学,2004,37(4):490-496.
- [23] 朱兆良. 中国土壤氮素研究[J]. 土壤学报,2008,45(5):778-783.
- [24] 济宁市统计局. 济宁统计年鉴(2007) [Z]. 北京:中国统计出版社,2008.
- [25] 刘德林,聂军,肖剑.¹⁵N 标记水稻控释氮肥对提高氮素利用效率的研究[J]. 激光生物学报,2002,11(2):88-92.