

蒋伟勤, 马中涛, 胡 群, 等. 缓控释氮肥对水稻生长发育及氮素利用的影响[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(3): 777-784.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2020.03.033

缓控释氮肥对水稻生长发育及氮素利用的影响

蒋伟勤, 马中涛, 胡 群, 马会珍, 任高磊, 朱 盈, 刘国栋, 张洪程, 魏海燕
(扬州大学/江苏省作物栽培生理重点实验室/江苏省粮食作物现代产业技术协同创新中心/扬州大学水稻产业工程技术研究院/扬州大学农业部长江流域稻作技术创新中心, 江苏 扬州 225009)

摘要: 速效氮肥对农业生产具有重要作用,但也存在用量大、损失途径多、损失量高等特点,造成了一系列环境问题。相较而言缓控释氮肥养分释放缓慢,可减少氮素损失,提高氮肥利用效率,应用于水稻也能够一定程度地增加产量。施用缓控释氮肥对水稻的影响是全方面的,从稻田氮素损失、氮素吸收利用到产量形成均产生不同的影响。本文概述了缓控释氮肥对稻田氮素损失、水稻氮素利用、器官生长、群体变化及产量形成的影响,探讨了水稻上施用缓控释氮肥产生不同效应的原因,阐述了缓控释氮肥在水稻上应用存在的问题及改进措施。

关键词: 水稻; 缓控释氮肥; 氮素损失; 氮素利用; 产量

中图分类号: S511.062 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2020)03-0777-08

Effects of slow and controlled release nitrogen fertilizer on rice growth and nitrogen utilization

JIANG Wei-qin, MA Zhong-tao, HU Qun, MA Hui-zhen, REN Gao-lei, ZHU Ying, LIU Guo-dong, ZHANG Hong-cheng, WEI Hai-yan

(Yangzhou University/Jiangsu Key Laboratory of Crop Cultivation and Physiology/Jiangsu Co-Innovation Center for Modern Production Technology of Grain Crops/Research Institute of Rice Industrial Engineering Technology, Yangzhou University/Innovation Center of Rice Cultivation Technology in Yangtze Valley, Ministry of Agriculture, Yangzhou 225009, China)

Abstract: Quick-acting nitrogen fertilizer plays an important role in agricultural production, but it also has the characteristics of large amount of use, many ways of loss and high amount of loss, which has caused a series of environmental problems. Compared with quick-acting nitrogen fertilizer, the slow release of slow and controlled release nitrogen fertilizer can reduce nitrogen loss, improve nitrogen fertilizer utilization efficiency and increase rice yield to a certain extent. The effects of slow and controlled release nitrogen fertilizer on rice were all-round, including nitrogen loss, nitrogen uptake and utilization, yield formation in paddy fields. The effects of slow and controlled release nitrogen fertilizers on nitrogen loss in paddy field, nitrogen use in rice, organ growth, population change and yield formation were summarized in this article. The reasons for different effects of slow-release nitrogen fertilizer on rice were discussed, and the existing problems and improvement measures in the application of slow and controlled release nitrogen fertilizer on rice were expounded.

different effects of slow-release nitrogen fertilizer on rice were discussed, and the existing problems and improvement measures in the application of slow and controlled release nitrogen fertilizer on rice were expounded.

Key words: rice; slow and controlled release nitrogen fertilizer; nitrogen loss; nitrogen utilization; yield

收稿日期: 2020-04-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0300503); 国家自然科学基金项目(31971841、31801293); 江苏省重点研发计划项目(BE2018355); 国家水稻产业体系项目(CARS-01-27); 江苏省农业产业技术体系专项资金项目[JATS(2019)444]; 江苏高校优势学科建设工程资助项目

作者简介: 蒋伟勤(1994-), 男, 江苏徐州人, 硕士, 研究方向为作物栽培与生理。(E-mail) jwqdyx123@163.com

通讯作者: 魏海燕, (E-mail) wei_haiyan@163.com

化学肥料自诞生后便被广泛用于农业生产, 它为作物增产, 解决人类粮食短缺的问题起到了重要作

用^[1-3]。速效氮肥是化学肥料中最常用的一类,但由于其在施用过程中存在用量大、活性高、养分释放快、损失途径多等特点^[1],使得目前中国氮肥当季利用率仅为 35% 左右^[4]。未能被植物利用的氮素,会被土壤固定或进入水体、大气中,造成一系列环境污染等问题^[4-5]。缓控释氮肥是缓慢释放氮肥的统称,包括缓释氮肥和控释氮肥两类。缓释氮肥是指用物理、化学、生物化学方法制得的使养分缓慢释放的肥料,而控释氮肥是指采用聚合物包膜,可定量控制肥料中养分释放数量和释放期的肥料^[5]。作物高产、高效施肥方式的实质在于养分供应和作物养分吸收保持时空的相对一致性,即作物在大量需要养分时养分供应充足而其他时间养分供应相应减少^[6-7]。缓控释氮肥正因其缓慢释放养分的特性从而能基本满足作物不同生长阶段的养分需求,且与速效氮肥相比,可减少氮素损失、提高氮肥利用效率。中国自上世纪 60 年代起就开始缓控释氮肥的研究^[8],近 15 年内发展迅速,部分产品已达国外同类产品的质量与标准,在水稻、小麦等大田作物上的应用研究也同步开展。本文基于前人的研究成果,概述缓控释氮肥对水稻氮素吸收利用、生长发育等方面的影响,探讨水稻上应用缓控释氮肥产生不同效应的原因,阐述其在实际生产中的问题及改进措施。

1 缓控释氮肥的种类

在中国水稻栽培研究中,常见的缓控释氮肥包括脲醛缓释氮肥、包膜氮肥、生化抑制剂型氮肥。脲醛缓释氮肥是一类化学合成微溶型缓释氮肥,由尿素和甲醛缩合而成,其分子链越长,释放速率越慢,缓释期越长^[9-10]。包膜氮肥包括无机包膜氮肥和有机聚合物包膜氮肥^[8],前者为缓释肥,其中最常见的发展时间最长的是硫包衣尿素^[11-12],而后者为控释肥,其中最常见的是热固性、热塑性树脂包膜尿素^[8]。两者因其包膜材料不同而各具特点:硫包衣尿素因其易受气候、机械外力及土壤状况的影响,田间往往表现出不稳定的释放特征;聚合物包膜尿素价格昂贵、包膜材料难以降解,除温度和水分外,不易受其他环境因素影响^[5,7,11,13]。生化抑制剂型氮肥指添加抑制剂减缓尿素的水解或抑制铵态氮的硝化作用,这类肥料又被称为稳定性氮肥^[14],其中包括稳定性尿素和稳定性铵态氮肥。稳定性氮肥主要分为脲酶抑制剂型氮肥(I型)、硝化抑制剂型氮肥

(II型)和脲酶抑制剂与硝化抑制剂复合型氮肥(III型)。

在现有的缓控释氮肥类型中,聚合物包膜氮肥因其养分稳定释放的特性而备受关注。但此类包膜材料一般难以降解,疏水性较强,因此研发新型可降解保水包膜材料成为研究热点之一。Li 等^[15]把液化甘蔗渣和双酚 A 缩水甘油醚以一定比例配合制作成生物环氧胶包膜尿素,其中以 1:4(质量比)生物环氧胶控释效果最好,且对环境友好。Yang 等^[16]把利用液化玉米秸秆和其他化合物合成的生物基聚氨酯作为内涂层,把从鸡毛粉提取的亲水性蛋白材料作为外涂层,由此制成的控释尿素不仅具有良好的亲水性,还能改善土壤保水能力。淀粉、木质素、纤维素等是一类价格便宜、易降解、保水能力强的材料,经过改良也可作为包膜材料^[13]。Li 等^[17]利用从小麦秸秆提取的纤维素制造了纤维素水凝胶,由此制得的控释肥在 pH6~9 的环境中具有更好的保水能力。Han 等^[18]制作了生物可降解的淀粉-聚乙烯醇混合物包膜尿素,其透水性、保水性、 NH_4^+ 透过性均有显著提高。尽管目前很多可用且符合要求的膜材料及制作方法已被研究出来,但很多仅限于实验室的基础研究,大田试验效果还有待后续试验进行验证。

2 缓控释氮肥对水稻氮素吸收利用的影响

常规氮肥施用后养分迅速释放,部分氮素在短时间内以各种形式流失到环境中,制约着水稻氮肥利用率的提升,而施用缓控释氮肥可减少氮素损失、提高水稻对氮素的吸收利用能力。

2.1 缓控释氮肥对稻田氮素损失的影响

稻田氮肥的损失途径主要包括: NH_3 挥发、淋失渗漏、地表径流、 N_2O 排放等途径,损失氮肥占所施氮肥用量的 20%~70%^[13]。施用缓控释氮肥能够减少稻田氮素损失量。与常规氮肥相比,缓控释氮肥能降低养分释放速率,使得施肥后 7~10 d 内稻田水层 NH_4^+ 浓度显著降低,并持续稳定在较低的水平,从而可使稻田 NH_3 挥发损失降低 27.8%~91.0%^[19-24]。同时,田间水层氮素浓度的下降还有利于减少氮素淋失渗漏和地表径流的损失。与常规氮肥相比,稻田施用缓控释氮肥能够增加 0~40 cm 土层 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 含量,同时降低 40~100 cm 土层

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量^[25], 可使水稻全生育期氮素的淋失渗漏量降低26.1%~39.5%^[25-28], 地表径流损失量下降20.8%~32.8%^[27,29-33]。除此之外, 施用缓控释氮肥后, 土壤中相对较低的铵态氮、硝态氮浓度, 还可抑制 N_2O 的形成, 从而使水稻搁田期和中后期干湿交替时 N_2O 的排放量下降7.2%~85.3%^[34-38]。上述施用缓控释氮肥降低稻田氮素损失的效果, 还会因肥料种类、水稻类型的不同而有所差异。Ke 等^[19] 将 10%磷酸铵+90%树脂包膜氮肥配制的掺混肥、硫包膜和树脂包膜 3 种控释氮肥以控释氮肥基施+尿素作分蘖肥(基肥:分蘖肥5:1)和控释肥全部基施 2 种施肥方式施用, 试验结果表明, 和常规施肥方式相比, 掺混肥 2 种施肥方式下稻田氨挥发量均显著下降, 硫包膜尿素“一基一蘖”处理和树脂包膜尿素基施处理氨挥发量均有所下降, 而硫包膜尿素基施处理氨挥发量增加, 树脂包膜尿素“一基一蘖”处理未能减少氨挥发量。在双季籼稻上, 田昌等^[21] 研究发现施用缓控释氮肥可减少稻田氨挥发量, 其中晚稻的氨挥发量高于早稻。而王斌等^[35] 研究发现, 在晚稻上应用缓控释氮肥的 N_2O 减排效果要优于早稻。造成上述差异的原因可能是晚稻生育期间温度要高于早稻, 缓控释氮肥养分释放加快, 施用前期稻田表层水的 NH_4^+ 浓度升高, NH_3 挥发量遂增加, 同时土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度受到限制, N_2O 排放减弱。

2.2 缓控释氮肥对水稻氮素吸收利用的影响

缓控释氮肥的氮素缓慢释放特性, 不仅可以有效地减少氮素损失, 还能保证水稻生长各时期对氮素的需求, 提高水稻对氮素的吸收利用效率^[21,39-46]。Ye 等^[39] 在粳稻的研究中发现, 与常规尿素分次施用相比, 树脂包膜尿素一次性基施处理的氮肥农学利用率、氮肥吸收利用率、氮肥偏生产力分别显著增加 29.9%、7.7%、11.5%, 较高的氮素吸收量可能是其利用率增加的主要原因。田昌等^[21] 在双季籼稻的研究中发现, 在早、晚稻上采用树脂包膜尿素一次性基施, 其氮肥吸收利用率均有所提高, 分别达 48.7%~75.6% 和 68.8%~96.0%。李玥等^[44] 在一季中籼稻的研究中也发现, 与常规施肥处理相比, 树脂包膜缓控释氮肥基施处理氮肥农学利用率比常规尿素处理提高 18.71%, 氮肥吸收利用率提高 57.97%, 氮肥偏生产力提高 5.54%。然而, 也有研究者认为, 缓控释氮肥对水稻氮素吸收利用的促进

作用会因肥料类型和运筹方式不同而有所差异。魏海燕等^[46] 在研究不同缓控释肥类型(脲甲醛、树脂包膜和硫包衣尿素)与运筹方式(缓控释肥与尿素按一定比例掺混后全部基施或缓控释肥基施加分蘖期施尿素)对南粳 9108 和甬优 2640 水稻产量的影响时发现, 在所有缓控释肥处理中仅南粳 9108 中脲甲醛基施后分蘖期施用尿素处理的水稻氮肥吸收利用率高于常规施肥处理, 而其他缓控释肥处理无明显优势。这可能是由于不同缓控释肥料在不同运筹下, 肥料养分释放与水稻养分吸收难以协调所致。

3 缓控释氮肥对水稻生长及产量形成的影响

3.1 缓控释氮肥对水稻根、茎、叶生长的影响

根系是水稻吸收养分、水分的重要器官^[47], 根系的数量、活性与同化产物生产、分配和水稻衰老等关系密切^[48-49]。缓控释肥中缓慢释放的养分有利于增加水稻深层土壤中的根系数量, 扩大根系养分摄取范围, 提高根系活力^[50-52]。同时, 应用缓控释氮肥可使水稻生育后期根系中丙二醛含量下降, 超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)等酶的活性提高, 从而减少了对根系具有强烈伤害的活性氧累积速率与数量, 延缓根系衰老^[53], 使水稻开花结实后的根系活力维持在相对较高的水平, 促进根系对氮、磷、钾等养分的吸收, 为提高光合生产量奠定基础^[52]。

在一定范围内水稻植株增高有利于提高生物产量^[54], 但株高增加后倒伏风险也随之增加, 在水稻株高增加的同时缩短基部节间、增加茎秆节间厚度可有效增强水稻抗倒伏能力^[55-56]。缓控释氮肥的养分可持续缓慢供应水稻, 使得其节间伸长时期的养分状况优于常规分施处理, 水稻株高有所增加^[41,57-58]。同时也有研究者发现, 一次性施用控释氮肥的水稻茎基部粗度显著增加 5.43%~12.79%, 水稻抗倒伏能力增强^[50,59]。

叶片是水稻最重要的光合器官, 抽穗后适宜的叶面积指数、较长的光合持续时间及较高的光合作用强度有利于光合产物的积累^[60]。相关研究结果表明, 与常规施肥相比, 施用缓控释氮肥能够提高水稻各生育期的叶面积指数, 尤其是抽穗期的高效和有效叶面积指数, 拔节后较多且持续的养分供应能够保证主要功能叶生长发育的养分需求^[46,51,61-62]。

但不同缓控释氮肥和运筹方式对水稻各生育期叶面积指数的影响各异。缓控释氮肥尤其是树脂包膜尿素单一基施处理,因其前期养分释放较慢,对增加拔节期叶面积指数的作用小于缓控释氮肥和尿素配合施用处理^[61-62]。而缓控释氮肥和尿素配合施用,又因缓控释氮肥种类、配施比例、运筹方式及环境等因素有所差异,部分肥料(如硫包膜氮肥和尿素配施)处理拔节后的养分释放相对较少,抽穗期叶面积指数的增幅相对较小^[46,49,62]。除增加叶面积外,缓控释氮肥还可提高水稻生育中后期叶片内硝酸还原酶(NR)、谷氨酰胺合成酶(GS)、谷氨酸合成酶(GOGAT)等氮同化酶的活性^[42,63],促进植株体内氮素的代谢,增加叶片叶绿素含量^[64]。同时,施用缓控释氮肥在提高灌浆后叶片中超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)等酶的活性以及植物生长素(IAA)含量的同时还可降低丙二醛(MDA)和脱落酸(ABA)含量^[65]。在上述酶和激素的共同作用下能够抑制水稻中后期叶片叶绿素的降解,延缓叶片衰老,使叶片保持较高的光合速率和维持较长的生理功能期,有利于光合物质的生产和积累^[27,63,65-67]。

3.2 缓控释氮肥对水稻群体构建及产量的影响

水稻生长发育过程中,合理的茎蘖动态与较高的茎蘖成穗率有利于高产群体的形成^[68]。因氮素释放特征的差异,不同种类缓控释氮肥对于水稻茎蘖变化的影响也各异。树脂包膜尿素养分释放仅受温度调节^[11,13],当水稻分蘖期气温较低时,其养分释放量少,水稻茎蘖数增加较慢^[62,69],反之则茎蘖数快速增加^[41]。与树脂包膜尿素相比,硫包衣尿素易受土壤环境影响,在分蘖前期养分释放较快,水稻分蘖数多^[62,70]。多数研究者认为,与常规速效氮肥相比,缓控释氮肥处理下水稻分蘖盛期的高峰苗数及最终有效穗数、成穗率均较高^[22,41,69-70],且高峰苗出现时间滞后于尿素分施处理^[70]。而这种滞后效应因水稻类型不同会有差异。周亮^[22]发现晚稻树脂包膜氮肥处理的高峰苗出现时间较尿素分施处理推迟14 d,而在早稻上与尿素分施处理一致,这可能是由于晚稻生长季温度高,分蘖前期分蘖发生快且多,水稻群体对氮素的吸收随之增多,尿素分施处理分蘖后期土壤中可利用氮素相对减少,不利于分蘖的持续发生,高峰苗出现提前,而缓控释氮肥处理养分则持续供应,保证了分蘖的持续稳定发生。

水稻抽穗后干物质积累量对籽粒产量的贡献率达60%~80%。前人研究结果表明,与常规施肥相比,施用缓控释氮肥能够增加水稻各生育阶段的干物质积累量,尤其是抽穗至成熟阶段的干物质积累量,进而增加产量^[22,39,51,62-63,70]。这主要是因为能持续缓慢释放养分的缓控释氮肥有利于保证水稻中后期生长对养分的需求,进而生产较多的生物量。缓控释氮肥在水稻生产中的应用方式多样,包括单一施用缓控释氮肥和缓控释氮肥和尿素搭配施用。其中单一施用的缓控释氮肥还可根据其施用时期分为缓控释氮肥一次性基施,缓控释氮肥按照一定比例作基肥、分蘖肥(穗肥)分次施用。而缓控释氮肥和尿素搭配施用,常可以分为将缓控释氮肥与尿素混合后一次性作基肥施用和缓控释氮肥基施后分蘖期或穗期施用尿素等方式。一般认为对于提高水稻拔节前干物质积累,单一基施缓控释氮肥的作用相对较小^[39,62,70],尤其是有机高分子包膜氮肥,因其包膜材料性质稳定,施用前期氮素释放量较少^[71],而释放期较长且持续稳定释放的缓控释氮肥能够稳定提高拔节后的干物质积累^[40,44,67,71],同时也可实现产量平稳甚至增加的效果,产量增幅可高达22.9%^[20-22,25,43-44,52,63,66-67,69-76]。单一缓控释氮肥一基一蘖分次施用也是常用的运筹方式,前人认为此类运筹下,相对于常规施肥,也能在一定程度上提高成熟期干物质积累及产量^[41,73,77]。

缓控释氮肥价格昂贵,单一施用易增加生产成本,农民往往不愿采用^[78],而缓控释氮肥与尿素搭配施用(一般选用释放稳定的有机高分子包膜氮肥)则能够在降低成本的同时,增加水稻生物量和产量^[24,46,61-62,66]。但缓控释氮肥与尿素的搭配施用常因两者配施比例及运筹方式不同,对水稻干物质积累和产量产生显著的影响^[51,58,61,70]。在缓控释氮肥和尿素搭配一次性基施试验中,前人设置了缓控释氮肥和尿素以10:0、9:1、8:2、7:3、6:4、5:5、4:6、3:7、2:8、1:9、0:10等处理,研究发现缓控释氮肥占比在20%以上便能增加籼稻抽穗期到成熟期的干物质积累和产量,而在粳稻上获得最高产量的缓控释氮肥占比为40%~80%^[51,58,61]。与缓控释氮肥和尿素掺混后一次性基施相比,缓控释氮肥基施后在适宜的时期补施一定量的尿素对增加水稻物质生产及产量效果更佳。前人研究指出缓控释氮肥基施后分蘖期施用尿素,水稻拔节前后的干

物质积累均高于缓控释氮肥与尿素掺混后一次性基施,增产表现也更为稳定^[46,62]。而程金秋^[49]对比缓控释氮肥基施后分蘖期或穗期施用尿素处理(一基一蘖和一基一穗)的效果时发现,一基一穗处理水稻无论是拔节后的干物质积累还是最终产量均要高于一基一蘖处理。与常规分次施肥相比,缓控释氮肥配施尿素最优处理可在粳稻上实现5.2%~12.2%的增产幅度,在籼稻上增产幅度更是高达31.7%,且与单一缓控释氮肥全部基施相比,不仅能增加产量,还能够降低种植成本,提高净收入^[46,51,58,61-62,66,79]。鉴于缓控释氮肥良好的增产效果,相关减氮研究逐步展开,结果表明籼稻在常规施肥水平(早稻150 kg/hm²、晚稻180 kg/hm²)上减氮10%~20%,也可实现平产甚至增产的效果,晚稻增幅高于早稻,增幅可达20.9%^[21-22,61,69,71]。

4 水稻上应用缓控释氮肥产生不同效果的讨论

现今,缓控释氮肥应用十分广泛,从园艺作物到粮食作物均有使用^[5]。每种作物具体生境差异巨大,如水稻,从东北地区到海南岛均有种植,环境的变化对水稻生长及缓控释氮肥养分释放均有显著影响,肥料应用效果随之不同。综观前人研究结果,水稻上应用缓控释氮肥的效果受3类因素影响。其一,缓控释氮肥自身的养分释放特征。依据不同机理、方法和包膜材料制造的缓控释氮肥养分释放特征存在明显差异。缓释肥,如硫包衣尿素、脲甲醛等,一般养分释放呈L型,稻田施用后1周内养分释放10%~30%^[9,78],而后养分以较慢速率释放,释放期20~30 d。硫包衣尿素包膜易破裂,养分释放难以预测^[11,78],经过改良后,如树脂-硫包衣尿素,稳定性增强、释放期延长^[78];对于脲甲醛,可通过增加链长延长释放期,如长链化合物聚甲基脲释放周期在60 d以上^[9]。控释氮肥,如树脂包膜尿素、聚氨酯包膜尿素等,一般养分释放呈S型(延长释放型),前期抑制释放,中期加速释放,后期稳定持续释放,与水稻养分吸收规律基本相匹配,释放期在30~200 d^[80],释放期内养分释放量在85%以上。其二,水稻田间生态环境因素。缓控释氮肥田间养分释放速率受诸多环境因子限制,如温度、水分、土壤微生物等^[2,9,11,78]。一般情况下高温会增强分子活性,温度升高,缓控释氮肥养分加速释放,同时水稻季温度年

际间存在较大的变化,不同年份同一生育阶段的养分累积释放量会出现波动^[81],影响水稻对养分的吸收利用。缓控释氮肥的养分释放需要水分作为媒介,当田间水分不足时释放通道受阻,养分释放速率下降^[11,82],因此施用缓控释氮肥需搭配合适的灌溉方式。彭玉等^[83]发现与控灌、常规淹水灌溉相比,缓控释氮肥在干湿交替灌溉条件下增加水稻干物质积累、产量的效应更优,原因是该处理下缓控释氮肥的养分释放可与水分协调互动,在提高根系活力的基础上促进了水稻植株氮素的积累与合理分配。传统栽培中,稻田长期保持水层,而硫包衣尿素等无机包膜氮肥的包膜材料脆弱,易出现裂纹,较长时间浸泡或外力作用下易爆裂,养分易提早大量释放^[11-13,78],水稻生育中后期养分释放量相对不足^[62,66]。土壤微生物种类繁多,脲甲醛等缓释肥易受土壤微生物影响。稻田长期保持水层,相关土壤微生物不活跃,因此脲甲醛施用前期养分释放速率会明显降低^[78,71]。其三,水稻自身因素的差异。水稻生育期一般在90 d至180 d之间,生育期短的品种养分吸收时间相对集中。只有根据水稻生育期选择释放期适宜的缓控释氮肥,才能使肥料养分释放最大程度地符合水稻养分吸收^[67-78],以提高产量。张木等^[67]研究发现,在早稻上施用60 d型缓释尿素处理的产量显著高于90 d型缓释尿素处理,90 d型缓释尿素处理还造成了水稻的贪青迟熟。因品种类型不同,水稻各生育阶段对养分的需求量、利用特征不尽相同。魏海燕等^[46]研究缓控释氮肥对不同穗型水稻的影响时发现,缓控释氮肥和尿素配施对于多穗型品种南粳9108能够实现平产至增产5.2%~5.9%的效应,而对于大穗型品种甬优2640无增产效应,原因是缓控释氮肥配施尿素虽然能够满足大穗型品种前期大群体构建的养分需求,以形成较大的群体颖花量,但中后期释放的氮素难以满足大群体库容充实的需求,而对于多穗型品种,生育前中期在获得了足够穗数的同时颖花量适中,中后期释放的氮素能满足其中等群体库容充实的需求,进而能实现高产。

5 水稻上应用缓控释氮肥的问题及改进措施

5.1 水稻应用缓控释氮肥存在的问题

目前缓控释氮肥在中国水稻上的应用逐渐增

多,而这主要得益于国内企业缓控释氮肥制作工艺的进步,产品质量得到了保证。同时针对不同地区专门调配的掺混 BB 肥又使得其价格进一步降低,在农业劳动力不断减少这一大形势及政府的大力推动下,农民开始接受并认可缓控释氮肥。但其大面积推广仍存在问题,如树脂类包膜材料难以降解,长期滞留土壤会带给环境一定的副作用。相对于常规速效肥料,缓控释氮肥价格仍偏高,在种稻效益难以提升的大背景下,其大范围应用还难以被广大农民所接受。同时,中国水稻种植区域非常广阔,而每个地区的生态条件复杂多样,而且水稻种类繁多,不同类型的水稻具有各异生理特征及养分吸收特征,缺少针对不同类型水稻生理特征及养分吸收特征的专用缓控释肥料,因此需要针对某一区域、某一类水稻开发专用缓控释氮肥。

5.2 水稻应用缓控释氮肥的发展方向

在当前的水稻生产形势下,水稻应用缓控释氮肥的发展方向为:要着力研发控释效果好的高分子材料,开发降解周期短、肥效释放长短可控、养分释放受制约因素相对少的缓控释氮肥产品。以缓控释氮肥为氮源的水稻专用掺混 BB 肥有可能会是未来缓控释氮肥在大田使用的主要产品形式,因为控释氮肥和普通尿素配施能够实现肥料的 2 个养分释放峰,而这更符合水稻养分吸收规律。因此在新型缓控释氮肥开发中要考虑和普通尿素掺混后的养分释放特征。

缓控释氮肥施用时的施肥深度、施肥位置、施肥时间对水稻生长会产生不同的影响^[84-85],需要针对水稻生长的不同生态环境、生产条件探索包括插秧机械侧深施肥和直播稻种肥同播施肥等在内的机械化高效施肥理论与技术,注重农机农艺的配套融合,形成一套促进水稻优质高产的缓控释氮肥高效施肥技术体系。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] SHUQIN J, FANG Z. Zero growth of chemical fertilizer and pesticide use: China's objectives, progress and challenges[J]. Journal of Resources and Ecology, 2018, 9(1):50-58.
- [3] 樊小林,廖宗文. 控释肥料与平衡施肥和提高肥料利用率[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(3):219-223.
- [4] 于飞,施卫明. 近 10 年中国大陆主要粮食作物氮肥利用率分析[J]. 土壤学报, 2015, 52(6):1311-1324.
- [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] 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.
- [7] 喻建刚,刘芳,樊小林,等. 水溶性树脂包膜控释肥料养分释放特征及影响因素[J]. 农业工程学报, 2009, 25(9):84-89.
- [8] 谷佳林,曹兵,李亚星,等. 缓控释氮素肥料的研究现状与展望[J]. 土壤通报, 2008, 39(2):431-434.
- [9] 倪露. 脲甲醛缓释肥的制备及其肥料效应研究[D]. 北京:中国农业科学院, 2016.
- [10] 张景振. 脲甲醛肥料研制及效果研究[D]. 北京:中国农业科学院, 2013.
- [11] AZEEM B, KUSHAARI K, MAN Z B, et al. Review on materials & methods to produce controlled release coated urea fertilizer[J]. J Control Release, 2014, 181:11-21.
- [12] 刘媛媛. 新型包膜缓释肥的研制及其性能研究[D]. 南京:南京理工大学, 2012.
- [13] NAZ M Y, SULAIMAN S A. Slow release coating remedy for nitrogen loss from conventional urea: a review[J]. Journal of Control Release, 2016, 225:109-120.
- [14] 武志杰,石元亮,李东坡,等. 稳定性肥料发展与展望[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(6):1614-1621.
- [15] LI Y, JIA C, ZHANG X, et al. Synthesis and performance of bio-based epoxy coated urea as controlled release fertilizer[J]. Progress in Organic Coatings, 2018, 119:50-56.
- [16] YANG Y, TONG Z, GENG Y, et al. Biobased polymer composites derived from corn stover and feather meals as double-coating materials for controlled-release and water-retention urea fertilizers[J]. Agric Food Chem, 2013, 61(34):8166-8174.
- [17] LI X, LI Q, XU X, et al. Characterization, swelling and slow-release properties of a new controlled release fertilizer based on wheat straw cellulose hydrogel[J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2016, 60:564-572.
- [18] HAN X, CHEN S, HU X. Controlled-release fertilizer encapsulated by starch/polyvinyl alcohol coating[J]. Desalination, 2009, 240(1-3):21-26.
- [19] KE J, XING X, LI G, et al. Effects of different controlled-release nitrogen fertilizers on ammonia volatilization, nitrogen use efficiency and yield of blanket-seedling machine-transplanted rice[J]. Field Crops Research, 2017, 205:147-156.
- [20] WANG H, HEGAZY A M, JIANG X, et al. Suppression of ammonia volatilization from rice-wheat rotation fields amended with controlled-release urea and urea[J]. Agronomy Journal, 2016, 108(3):1214-1224.
- [21] 田昌,周旋,彭建伟,等. 控释尿素减施对双季稻田氨挥发损失和氮肥利用率的影响[J]. 中国水稻科学, 2018, 32(4):387-397.
- [22] 周亮. 控释氮肥减量施用对双季稻生长、氮素养分吸收利用

- 及稻田氮挥发的影响[D].长沙:湖南农业大学,2014.
- [23] XU M, LI D, LI J, et al. Polyolefin-coated urea decreases ammonia volatilization in a double rice system of Southern China[J]. *Agronomy Journal*, 2013, 105(1): 277-284.
- [24] XUE L, YU Y, YANG L. Maintaining yields and reducing nitrogen loss in rice-wheat rotation system in Taihu Lake region with proper fertilizer management[J]. *Environmental Research Letters*, 2014, 9(11): 1-11.
- [25] GENG J, SUN Y, 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, 184: 65-73.
- [26] 杨春蕾. 新型控释肥对水稻产量和稻田氮素流失的影响[D].杭州:浙江大学, 2012.
- [27] 李旭, 谢桂先, 刘强, 等. 控释尿素减量施用对稻田氮素径流和渗漏损失的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(5): 70-74.
- [28] 叶玉适, 梁新强, 周柯锦, 等. 节水灌溉与控释肥施用对太湖地区稻田土壤氮素渗漏流失的影响[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(1): 270-279.
- [29] PENG S Z, YANG S H, XU J Z, et al. Nitrogen and phosphorus leaching losses from paddy fields with different water and nitrogen managements[J]. *Paddy & Water Environment*, 2011, 9(3): 333-342.
- [30] 鲁艳红, 纪雄辉, 郑圣先, 等. 施用控释氮肥对减少稻田氮素径流损失和提高水稻氮素利用率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(3): 490-495.
- [31] 纪雄辉. 施用尿素和控释氮肥的双季稻田表层水氮素动态及其径流损失规律[J]. *中国农业科学*, 2006, 39(12): 2521-2530.
- [32] 田发祥, 纪雄辉, 石丽红, 等. 不同缓控释肥料减氮对洞庭湖区双季稻田氮流失与作物吸收的影响[J]. *农业现代化研究*, 2010, 31(2): 220-223.
- [33] 叶玉适, 梁新强, 金熠, 等. 节水灌溉与控释肥施用对稻田田面水氮素变化及径流流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(5): 105-112, 118.
- [34] JI Y, LIU G, MA J, et al. Effect of controlled-release fertilizer on mitigation of N₂O emission from paddy field in South China: a multi-year field observation[J]. *Plant and Soil*, 2013, 371(1/2): 473-486.
- [35] 王斌, 李玉娥, 万运帆, 等. 控释肥和添加剂对双季稻温室气体排放影响和减排评价[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(2): 314-323.
- [36] 纪洋, 于海洋, 徐华. 控释肥与尿素配合施用对稻季土壤CH₄和N₂O排放的影响[J]. *生态环境学报*, 2017, 26(9): 1494-1500.
- [37] 张怡, 吕世华, 马静, 等. 控释肥料对覆膜栽培稻田N₂O排放的影响[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(3): 769-775.
- [38] WANG B, LI YE, WAN Y, et al. Modifying nitrogen fertilizer practices can reduce greenhouse gas emissions from a Chinese double rice cropping system[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 215: 100-109.
- [39] YE Y, LIANG X, CHEN Y, et al. Alternate wetting and drying irrigation and controlled-release nitrogen fertilizer in late-season rice. Effects on dry matter accumulation, yield, water and nitrogen use[J]. *Field Crops Research*, 2013, 144: 212-224.
- [40] 王海月, 郭长春, 孙永健, 等. 缓释氮肥减量配施和株距对机插杂交水稻氮素利用的影响[J]. *中国水稻科学*, 2018, 32(4): 374-386.
- [41] 王斌, 万运帆, 郭晨, 等. 控释尿素、稳定性尿素和配施菌剂尿素提高双季稻产量和氮素利用率的效应比较[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(5): 1104-1112.
- [42] YANG Y, ZHANG M, LI Y C, et al. Controlled release urea improved nitrogen use efficiency, activities of leaf enzymes, and rice yield[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, 76(6): 2307-2317.
- [43] MI W, ZHENG S, YANG X, et al. Comparison of yield and nitrogen use efficiency of different types of nitrogen fertilizers for different rice cropping systems under subtropical monsoon climate in China[J]. *European Journal of Agronomy*, 2017, 90: 78-86.
- [44] 李玥, 李应洪, 赵建红, 等. 缓控释氮肥对机插稻氮素利用特征及产量的影响[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2015, 41(6): 673-684.
- [45] TAO Y, QU H, LI Q, et al. Potential to improve N uptake and grain yield in water saving Ground Cover Rice Production System[J]. *Field Crops Research*, 2014, 168: 101-108.
- [46] 魏海燕, 李宏亮, 程金秋, 等. 缓释肥类型与运筹对不同穗型水稻产量的影响[J]. *作物学报*, 2017, 43(5): 730-740.
- [47] 杨建昌. 水稻根系形态生理与产量、品质形成及养分吸收利用的关系[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(1): 36-46.
- [48] 刘宝玉, 徐家宽, 王余龙, 等. 不同生育时期氮素供应水平对杂交水稻根系生长及其活力的影响[J]. *作物学报*, 1997, 23(6): 699-706.
- [49] 程金秋. 缓控释肥类型及运筹对早熟晚粳水稻产量及稻米品质的影响[D].扬州:扬州大学, 2018.
- [50] 唐桂虎, 徐培智, 张发宝, 等. 一次性全层施用控释肥对水稻根系形态发育及抗倒伏能力的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(1): 63-69.
- [51] 罗刚. S型控释氮肥对水稻产量形成、养分吸收利用的影响[D].扬州:扬州大学, 2016.
- [52] 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]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(5): 1048-1057.
- [53] 郑圣先, 聂军, 戴平安, 等. 控释氮肥对杂交水稻生育后期根系形态生理特征和衰老的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(2): 188-194.
- [54] 张洪程, 马群, 杨雄, 等. 水稻品种氮肥群体最高生产力及其增长规律[J]. *作物学报*, 2012, 38(1): 86-98.
- [55] 邓接楼, 欧阳佰玲, 张高阳, 等. 不同栽培条件对杂交晚稻茎秆抗倒伏性状的影响[J]. *浙江农业学报*, 2016, 28(12): 1970-1978.

- [56] 魏中伟. 高生物产量型杂交稻抗倒伏茎秆形态及生理差异的研究[D].长沙:中南大学, 2013.
- [57] 陈宝成, 张民, 马丽, 等. 稻田控释掺混专用肥对水稻生长的影响[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2009, 40(2): 173-178.
- [58] 张敬昇, 李冰, 王昌全, 等. 控释氮肥与尿素掺混比例对作物中后期土壤供氮能力和稻麦产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(1): 110-118.
- [59] 唐拴虎. 水稻一次性施用控释肥料增产机理[J]. 中国农业科学, 2006, 39(12): 2511-2520.
- [60] 凌启鸿. 作物群体质量[M]. 上海: 科学技术出版社, 2000.
- [61] 王海月, 李玥, 孙永健, 等. 不同施氮水平下缓释氮肥施对机插稻氮素利用特征及产量的影响[J]. 中国水稻科学, 2017, 31(1): 50-64.
- [62] 邢晓鸣, 李小春, 丁艳锋, 等. 缓释控肥组配对机插常规粳稻群体物质生产和产量的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(24): 4892-4902.
- [63] WANG L, XUE C, PAN X, et al. Application of controlled-release urea enhances grain yield and nitrogen use efficiency in irrigated rice in the Yangtze river basin, China[J]. Front Plant Science, 2018(9): 1-13.
- [64] 潘瑞炽. 植物生理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012.
- [65] 聂军, 郑圣先, 戴平安, 等. 控释氮肥调控水稻光合功能和叶片衰老的生理基础[J]. 中国水稻科学, 2005, 19(3): 255-261.
- [66] 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.
- [67] 张木, 唐拴虎, 张发宝, 等. 60 d 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.
- [68] 苏祖芳, 张娟, 王辉斌, 等. 水稻群体茎蘖动态与成穗率和产量形成关系的研究[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 1997, 18(1): 37-41.
- [69] 陈琨, 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.
- [70] 张小翠, 戴其根, 胡星星, 等. 不同质地土壤下缓释尿素与常规尿素配施对水稻产量及其生长发育的影响[J]. 作物学报, 2012, 38(8): 1494-1503.
- [71] MI W, GAO Q, GUO X, et al. Evaluation of agronomic and economic performance of controlled and slow-release nitrogen fertilizers in two rice cropping systems[J]. Agronomy Journal, 2019, 111(1): 210-216.
- [72] WANG S, ZHAO X, XING G, et al. Improving grain yield and reducing N loss using polymer-coated urea in southeast China[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2015, 35(3): 1103-1115.
- [73] HOU P, XUE L, ZHOU Y, et al. Yield and N utilization of transplanted and direct-seeded rice with controlled or slow-release fertilizer[J]. Agronomy Journal, 2019, 111(3): 1208-1217.
- [74] LI P, LU J, WANG Y, et al. Nitrogen losses, use efficiency, and productivity of early rice under controlled-release urea. Agriculture [J]. Ecosystems & Environment, 2018, 251: 78-87.
- [75] 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.
- [76] GUO C, REN T, LI P, et al. Producing more grain yield of rice with less ammonia volatilization and greenhouse gases emission using slow/controlled-release urea[J]. Environ Sci Pollut Res Int, 2019, 26(3): 2569-2579.
- [77] 蔡威威, 艾天成, 李然, 等. 控释肥及尿素添加剂对双季稻光合特性及产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2018(3): 54-60.
- [78] CHIEN S H, PROCHNOW L I, CANTARELLA H. Recent developments of fertilizer production and use to improve nutrient efficiency and minimize environmental impacts[J]. Advances in Agronomy, 2009(102): 267-322.
- [79] 许仙菊, 马洪波, 宁运旺, 等. 缓释氮肥运筹对稻麦轮作周年作物产量和氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(2): 307-316.
- [80] 刘宝存, 徐秋明, 曹兵. 聚烯烃包衣控释肥料研究开发及应用[C]//中国土壤学会. 中国土壤学会第十一届全国会员代表大会暨第七届海峡两岸土壤肥料学术交流研讨会论文集(上). 北京: 中国土壤学会, 2008: 417-423.
- [81] ZHENG W, ZHANG M, LIU Z, et al. Combining controlled-release urea and normal urea to improve the nitrogen use efficiency and yield under wheat-maize double cropping system[J]. Field Crops Research, 2016, 197: 52-62.
- [82] 林海涛, 李彦, 刘兆辉, 等. 水性树脂包膜尿素氮素释放与冬小麦氮素吸收匹配特征[J]. 中国农业科学, 2018, 51(20): 35-45.
- [83] 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.
- [84] 刘红江, 郭智, 郑建初, 等. 不同类型缓释控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.
- [85] 石敦杰, 杨兰, 荣湘民, 等. 控释氮肥和氮磷减量对水稻产量及田面水氮磷流失的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(11): 44-47.

(责任编辑: 张震林)