

程金秋,朱 盈,魏海燕,等. 缓控释肥料在水稻上的应用效果综述[J]. 江苏农业科学,2017,45(17):11-15.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.17.003

# 缓控释肥料在水稻上的应用效果综述

程金秋,朱 盈,魏海燕,李宏亮,李晓峰,陈 雯,张洪程,戴其根,胡雅杰,崔培媛

(扬州大学农业部长江流域稻作技术创新中心/扬州大学江苏省作物遗传生理重点实验室/粮食作物

现代产业技术协同创新中心,江苏扬州 225009)

**摘要:** 缓控释肥是一种根据作物养分需求缓慢释放养分的新型肥料,它在水稻上的应用对于水稻生产的增产增效具有重要的意义。在介绍了缓控释肥定义、分类的基础上,重点研究综述了缓控释肥施用对水稻生长、氮素吸收利用、产量、品质和稻田生态环境等的影响,探讨了现有的缓控释肥施肥技术,并针对目前缓控释肥在水稻应用中存在的问题提出了进一步研究的展望。

**关键词:** 缓控释肥; 水稻; 应用效果; 展望; 生长发育; 氮素吸收; 生态环境

**中图分类号:** S511.06 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2017)17-0011-05

肥料对水稻的持续增产有着重要的作用,我国稻谷年产量从 1980 年的 13 990 万 t 上升到 2014 年的 20 650 万 t,除良种培育和栽培措施改进之外,其中一个重要的因素就是肥料投入。据联合国粮农组织估计,发展中国家粮食的增产 55% 依赖于化肥的作用,至 2020 年预估达到 70%。肥料的大量施用,尽管增加了作物的产量,但也易通过挥发、淋洗和径流而造成损失,既增加了环境压力,又降低了肥料利用率。据樊小林等估计,中国目前主要粮食作物的氮磷钾肥的当季利用率分别约为 30%~35%、10%~20% 和 35%~50%,显著低于发达国家水平<sup>[1]</sup>。因此,合理施用肥料、提高肥料利用效率是当前水稻生产提质增效,实现化肥、农药施用零增长的重要措施之一。

与此同时,随着经济的发展、农村劳动力的大量转移,省工节本、人工投入少、科技含量高的机械化轻简化水稻栽培管理也成为现代稻作发展的重要特征之一。传统的水稻速效肥料,由于肥效期短,在全生育期中需要分次施用,才能满足水稻生长各个生育阶段对肥料的需求,不仅费工,也难以提效。近年来,利用多种调控机制使养分按照设定的释放速率和周期缓慢或控制释放,以满足作物在一定生长季内对养分需求的缓控释肥得到了快速发展和应用,为现代作物生产简化施肥、降低施肥劳动强度、提高肥料利用率提供了可能。且已有的研究表明,不同的缓控释肥,在水稻、玉米<sup>[2]</sup>、小麦<sup>[3]</sup>等粮食作物以及白菜<sup>[4]</sup>、棉花<sup>[5]</sup>等经济作物上均有不同程度的增产增效作用。为此,本试验在前人研究的基础上,系统综述了缓控释肥对水稻生长发育特性、产量、品质及其生态环境的影

响等,探讨了现有缓控释肥在水稻生产中应用所存在的问题及其今后发展的方向,以期为新时期优质高效水稻生产合理施肥提供一定的参考。

## 1 缓控释肥概念及类型

缓释肥料(slow release fertilizers,简称 SRFs)指的是采用物理、化学和生物化学方法制造的能使肥料中养分(主要为氮和钾)在土壤中缓慢释放,使其作物有效性明显延长的肥料;控释肥料(controlled release fertilizers,简称 CRFs)指的是以颗粒肥料(单质或复合肥)为核心,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,使养分供应与作物各生育期需肥规律相吻合的包膜复合肥和包膜尿素。国内外学者大多数同时使用这两个概念,或直接称为缓控释肥料。但从某种意义上说控释肥料是缓释肥料的高级形式。

缓控释肥种类多,分类也有所差异。罗斌等将缓控释肥分为稳定性肥料、合成有机氮类缓释肥料、包膜(包裹)型缓控释肥和载体类缓控释肥 4 种类型<sup>[6]</sup>。楚召认为缓控释肥主要分为微溶于水的合成有机氮化合物和包膜(包裹)缓控释肥两大类<sup>[7]</sup>。谷夺魁等根据大部分已开发和评价出的能控制氮有效性的材料和工艺将缓控释肥主要分为五大类:低溶性需分解的物质、微溶矿物、能逐渐分解的可溶物质、抗溶解处理普通水溶性产品和抑制微生物活性物质<sup>[8]</sup>。目前运用较为普遍的是将缓控释肥分为包膜缓控释肥、包裹材料缓控释肥和具有有限水溶性的合成型微溶态缓控释肥 3 种类型<sup>[9]</sup>。

## 2 缓控释肥对水稻生长的影响

### 2.1 对根系的影响

水稻根系是水分和养分吸收的重要器官,也是多种激素、氨基酸和有机酸合成的重要场所,其形态特征和生理特性与地上部生长发育、产量及品质均有密切的关系<sup>[10]</sup>。施用缓控释肥能促进水稻中后期根系发育,与对照常规施肥相比,显著增加了根系质量、体积、总吸收面积、根长和根系密度,降低根半径,同时还提高了水稻生育后期的根系活力,延缓根系衰老,增加根系对养分吸收<sup>[11-13]</sup>。彭玉等研究还发现,缓控释

收稿日期:2017-02-28

基金项目:国家重点研发计划(编号:2016YFD0300503);江苏省重点研发计划(编号:BE2016344);江苏省农业科技自主创新资金(编号: CX 12 1003-9);国家公益性行业(农业)科研专项(编号:201303102);扬州大学科技创新培育基金(编号:2016CXJ056)。

作者简介:程金秋(1992—),女,江苏南京人,硕士研究生,主要从事缓控释肥在水稻上的应用研究。E-mail:624652580@qq.com。

通信作者:魏海燕,博士,副教授,主要从事水稻高产栽培和氮素营养研究。E-mail:wei\_haiyan@163.com。

肥的施用,在保证根系活力的同时可提高 10 cm 以下的深层根系分布比例、增加根尖数、延长总根长,增大植株养分摄取范围,吸收足够的土壤养分,有利于实现高产<sup>[4]</sup>。与常规速效肥料分次施用相比,一次性施用缓控释肥还有利于提高水稻根深指数,提高植株抗根倒伏能力<sup>[2,13]</sup>。

水稻生育过程中,根系伤流强度、 $\alpha$ -萘胺氧化力、关键酶活性是水稻根系活力特征的重要指标。相同施氮量下,一次性施肥缓控释肥处理在齐穗后根系伤流强度均高于常规肥料一次性基施<sup>[14]</sup>。同时,水稻生育后期根系 $\alpha$ -萘胺氧化量也能维持在较高水平,较普通尿素分次施肥下降幅度小,尤其是能在抽穗后期维持根系较高的活力,保证植株吸收大量的水分与养分,促进籽粒充分灌浆与结实<sup>[12,14]</sup>。郑圣先等还指出,施用缓控释肥处理,水稻生育后期根系中 SOD、POD 和 CAT 活性得以提高,抽穗期、乳熟期、蜡熟期和成熟期根系中 MDA 含量分别比常规尿素施肥低 23.3%、15.1%、8.8% 和 6.1%,差异均极显著<sup>[13]</sup>。

## 2.2 对茎秆的影响

肥料施用对植株株高和茎秆节间形态有重要影响,目前已有的缓控释肥对水稻株高的影响不尽相同,王斌等进行四季水稻的连续试验发现缓控释肥能明显且稳定地促进株高的增加<sup>[15]</sup>;而赵胜利等研究认为缓控释肥全量施用下并不能降低水稻株高,但减量 40% 的情况下施用可以达到降低株高的效果<sup>[18-23]</sup>。造成以上结果的差异可能与所施缓控释肥用量与肥料复配类型等有重要关系。

在茎秆抗倒伏能力方面,一次性施用缓控释肥的水稻生长前、中、后期的茎根比显著高于水稻专用肥分次施肥处理,而茎基部粗度相似,说明一次性施用缓控释肥能够增加单位茎秆容量,提高水稻抗倒伏能力<sup>[13]</sup>。唐控虎等采用盆栽和网箱试验,探究 3 种缓控释肥对水稻生长发育及抗倒伏能力的影响,结果表明,施用高钾含量缓控释肥的水稻茎基部粗度显著大于低钾含量的缓控释肥,等养分下施用不同缓控释肥处理水稻茎基部粗度均明显高于常规分次施肥处理,且水稻茎根比降低<sup>[23]</sup>。由此可见,水稻生产中合理施用缓控释肥可增加茎秆强度,降低倒伏风险。

## 2.3 对叶片的影响

缓控释肥施用对水稻叶片生长具有一定的促进作用。在秧苗期,缓控释肥处理对水稻总叶片数和叶面积作用不明显,与常规施肥基本相同<sup>[24]</sup>。邢晓鸣等研究 3 种缓控释肥类型(掺混肥、4 个月树脂尿素、硫包衣尿素)以及 2 种不同施肥方式(一次性基施、分别与常规尿素按 5:1 进行一基一施)对水稻生长的影响发现,与等氮量下常规施肥相比,在提高拔节和抽穗期水稻叶面积指数和光合势上掺混肥优于硫包衣尿素和 4 个月树脂尿素,均为一基一施>一次性基施,主要和该肥料肥力释放均匀,在保证适宜茎蘖数的基础上提高茎蘖成穗率有关<sup>[25]</sup>。

叶绿素是植物代谢过程中进行光合作用和同化物质的基础,是光合作用的重要色素。聂军等和吕玉虎等研究发现,施用缓控释肥较常规施肥能有效提高水稻生育后期功能叶中叶绿素含量与光合速率,延长水稻生育后期光合功能,延缓叶片衰老,从而提高水稻产量<sup>[26-27]</sup>;谢春生等在早稻和晚稻中也发现了相似规律<sup>[24]</sup>。水稻功能叶碳代谢关键酶活性是影响

水稻生育后期光合功能的另一重要因素。聂军等通过一次性基施缓控释肥(含 N 42%)试验发现,自孕穗至抽穗后第 32 天,水稻功能叶中 SOD 和 POD 活性显著高于常规施肥处理;叶片中 MDA 含量较施用尿素出现极显著下降,表明施用缓控释肥增强了清除超氧自由基的能力,降低了水稻叶片中细胞原生质膜系统的受损程度,从而有利于水稻功能叶维持正常的生理生化功能,延缓水稻生育后期的衰老进程,增加后期物质积累<sup>[24]</sup>。从地上部生物量来看,缓控释肥处理下水稻在分蘖初期生物量低于常规施肥,而分蘖盛期至成熟期干物质显著高于常规施肥<sup>[28]</sup>。同时不同缓控释肥类型间也有所差异,其中树脂控释尿素较其他缓控释肥效果更明显<sup>[24]</sup>。综上所述,缓控释肥在水稻生育前期控制养分释放速率,降低肥料损失,生育后期保证叶片较高的光合能力,延长光合时间,使光合产物不断充实籽粒,提高结实率和千粒质量<sup>[17,30]</sup>,充分发挥水稻增产潜力。

## 3 缓控释肥对水稻氮素吸收利用的影响

### 3.1 对氮素吸收的影响

合理地施用缓控释肥对提高肥料利用率具有一定的促进作用。陈建生等通过盆栽试验发现,水稻控释肥“新农科”一次性施用相对常规施肥氮肥表观利用率提高了 12.2%~22.7%<sup>[31]</sup>。李玥等研究发现一次性基施树脂包膜缓控释肥,穗部氮积累量、氮肥农学利用率、氮肥表观利用率和氮肥偏生产力较常规施肥分别提高 51.83%、18.71%、57.97% 和 5.54%<sup>[32]</sup>。诸海燕等研究发现水稻专用缓释复混肥(N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O=24:8:10)在减少 20% 的氮肥用量下仍能提高水稻产量和 8.16% 的氮肥表观利用率,并且环境效益显著<sup>[33]</sup>。更有研究发现,氮素利用率较常规施肥最多可提高 69.76%<sup>[33]</sup>。从水稻各生育时期对氮肥的吸收特性来看,常规施肥处理水稻在生育前期(移栽至幼穗分化期)、生育中期(幼穗分化期至齐穗期)和生育后期(齐穗期至成熟期)氮素吸收量占总吸氮量的 57.7%~63.5%、34.7%~41.1% 和 1.2%~1.8%,而缓控释肥处理下分别为 51.2%~62.7%、33.3%~38.1% 和 4.7%~10.1%,生育后期氮素吸收明显增加<sup>[34-35]</sup>。表明缓控释肥“前足、中控、后促”肥效释放特性更为契合水稻生长规律,从而促进了水稻关键生育时期尤其是生育后期对氮素的吸收。

### 3.2 对氮代谢相关酶活性的影响

水稻施用缓控释肥下氮素的吸收与利用率的提高和氮代谢相关酶活性密不可分,其中硝酸还原酶、谷氨酰胺合成和转化酶和蛋白水解酶起关键性作用。杜君等研究表明,缓控释肥处理下,水稻生育后期功能叶中(尤其是抽穗期至乳熟期)硝酸还原酶活性显著高于常规施肥,而谷氨酰胺合成和转化酶活性的增强作用可从抽穗期维持到蜡熟期,在抽穗期和乳熟期最明显,籽粒蜡熟期谷氨酰胺合成和转化酶活性也分别提高了 31.6% 和 27.1%<sup>[34]</sup>。由此说明缓控释肥施用可以增强植株体内氮代谢相关酶的活性,促进水稻生育后期氮素吸收与同化,增加吸氮量的同时提高利用率。此外,施用缓控释肥,使得乳熟期和蜡熟期叶片中的蛋白水解酶活性也得到提高,有利于生育后期叶片中蛋白质水解,并向籽粒进行再运转<sup>[3]</sup>。

## 4 缓控释肥对水稻产量及品质的影响

### 4.1 对水稻产量的影响

水稻生产中,在一定的施氮范围内,增施氮肥可以显著增加水稻的产量,超过一定范围或氮肥不足均会导致产量及部分产量构成因子呈下降趋势<sup>[3]</sup>。因此,研究缓控释肥施氮量对水稻产量的影响也具有重要意义。等氮量施用下,唐控虎等将包膜尿素复混肥、“农科控释肥”和“乐喜施”控释肥 3 种不同类型缓控释肥一次性基施后发现,在移栽后的前 30 d 内氮素释放量较高,中后期氮素供应充足,成穗率高,较常规施肥增产 5.51%~21.56%<sup>[23]</sup>。陈贤友等探究硫磺加树脂双层包膜尿素和普通尿素按 1:0.7:3 和 5:5 比例配比一次性基施对水稻产量的影响<sup>[34]</sup>,结果表明 3 种处理产量分别为 7 664.0、7 172.5、7 008.2 kg/hm<sup>2</sup>,较常规施肥增产 17.75%、10.49% 和 7.96%。李敏等研究发现,控释期为 90 d 的树脂膜和硫膜控释尿素与普通尿素以 7:3 比例一次性基施均能显著提高水稻籽粒产量,增幅为 7.9%~31.7%<sup>[35]</sup>。诸海燕等采用测土配方和平衡施肥原理制成 N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O=24:8:10 的水稻专用缓释复混肥,与常规施肥相比,等氮处理下水稻增产 7.06%,而等价处理仅增产 0.66%,表明缓控释肥等氮量下增产效果显著,而由于缓控释肥生产工艺和流程更加复杂,提高了肥料成本,从而等氮量下经济效益不明显<sup>[3]</sup>。为了降低生产成本,许多学者在缓控释肥减量情况下对产量的影响进行了相关研究,发现减肥增产是可行的。俞卫星等指出,缓控释肥减量 20%~30% 情况下,缓控释肥处理产量与常规施肥相比不减产甚至增产,在中肥力土壤和低肥力土壤上表现相同规律<sup>[32,34]</sup>。Geng 等进行连续 7 年的大田试验,结果表明缓控释肥减量 30% 下水稻产量与常规施肥一致,维持土壤肥力并降低劳动力成本,在减量 50% 下产量略有降低,与常规施肥相比仍未表现出显著差异<sup>[4]</sup>。也有研究发现,缓控释肥在一次性施用下易造成水稻前期氮素供应不足、后期养分偏多的现象,不利于水稻高产甚至减产,为了弥补这一不足,有学者采用等氮量下缓控释肥与普通尿素掺混施、测土配方与平衡施肥等方法,增产 7.06%~10.49%<sup>[32,39,43]</sup>。综合前人的研究表明,缓控释肥的合理施用对水稻具有增产作用,增产效果因缓控释肥肥料种类、施肥方式和栽培条件等有所差异。

### 4.2 对稻米品质的影响

随着人们生活水平的提高,对稻米品质提出了更高的要求,研究缓控释肥对稻米品质的影响具有十分重要的意义。莫钊文等研究表明,在 0~1 500 kg/hm<sup>2</sup> 范围内,施用缓控释肥一定程度上可以提高精米率、整精米率、直链淀粉、蛋白质含量,降低垩白粒率,水稻 N、P、K 总积累量和每 100 kg 稻谷需 N、P、K 量与碾磨品质、直链淀粉含量、蛋白质含量呈显著正相关,与垩白粒率呈负相关,施用缓控释肥 1 200 kg/hm<sup>2</sup> 为获得较优品质和较高养分吸收和利用的肥料水平<sup>[3]</sup>。居静等利用 S 型和直线型释放曲线的两种缓控释肥与常规氮肥对比发现,施用缓控释肥不能明显提高稻米加工品质,在一定程度上增加了稻米垩白率和垩白度,其中 S 型缓控释肥效果更显著<sup>[44]</sup>。造成以上差异的原因可能与施肥方式、肥料类型及施肥量有关。等氮量下一次性施用缓控释肥与常规施肥相比

可明显提高籽粒蛋白质含量,从营养价值来看,籽粒蛋白质含量越高,其营养价值越高<sup>[21]</sup>。罗兰芳等认为一次性全量施用缓控释肥与常规施肥相比能极显著提高水稻糙米蛋白质和总氨基酸含量,以及除苏氨酸以外的所有必需氨基酸组分含量<sup>[34]</sup>。由此可见,施用缓控释肥在提高水稻产量的基础上提高稻米品质是可行的。

## 5 缓控释肥对生态环境的影响

施用常规速效氮素,常因氮挥发、氮素的径流和淋洗等原因,对大气和水体造成污染。郑圣先等研究发现,尿素处理下 17 d 氮挥发量为 547.7 mg/m<sup>2</sup>,占施入氮量的 4.7%,而缓控释肥处理可显著降低氮的挥发量,仅为 2.2%<sup>[34]</sup>。其作用机制主要通过减缓养分释放速率降低土壤溶液中氨态氮浓度,从而降低氮挥发损失<sup>[45]</sup>。Xu 等在直播稻中也发现相似规律,还发现缓控释肥配合 5 cm 深施更能减少氮挥发<sup>[47]</sup>。除此之外,缓控释肥还具有减少氮素的渗透与淋失的作用。等氮量施肥下,硫包膜控释尿素较普通尿素稻田全氮淋失量降低 44.6%<sup>[48]</sup>;控释 BB 肥和树脂包膜尿素处理分别降低 26.1% 和 39.5%<sup>[49]</sup>。并且在减量 30% 条件下,氮素径流损失量与常规施肥相比仍降低 27.2%,甚至略高于控释氮肥等氮量施用<sup>[50-51]</sup>。Zheng 等发现淋失<sup>15</sup>N 总量的 97.2% 主要是 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 淋失量,而缓控释肥的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 淋失量仅占常规施肥的 72.9%,差异达显著水平<sup>[53]</sup>。研究还发现,缓控释肥对减少硝化-反硝化损失量也有一定促进作用。用氮素平衡账中的亏缺量扣除氮的损失量后计为硝化-反硝化损失量的结果表明,水稻控释氮肥氮的硝化-反硝化损失量占施入氮量的 3.46%,而尿素处理却高达 37.75%<sup>[53]</sup>。从 N<sub>2</sub>O 排放量来看,缓控释肥处理在常规施肥基础上可降低 11%~50%<sup>[54-55]</sup>。此外,还可以降低甲烷的排放、提高土壤中有机质含量等<sup>[19,53]</sup>。由此可见,缓控释肥是生态友好型肥料,适宜在水稻种植地区大范围推广,在保护农田生态环境、促进我国农业可持续发展方面具有重要意义。

## 6 缓控释肥施肥技术

缓控释肥具备缓慢释放的特点,减少施肥次数的同时能够满足水稻生长对养分的需求,但缓控释肥施用量、施用时间、施肥方式和施肥深度的不同会引起缓控释肥肥效表现出差异。生产中在选用合适缓控释肥基础上配套相应施肥技术至关重要。

日本从 20 世纪 90 年代开始推广水稻侧条施肥技术,将缓控释肥一次性施于秧苗一侧 5~8 cm 深处,该方法可将缓控释肥呈条状集中不分散,逐渐释放养分供给水稻的同时减少养分的固定和流失,从而提高肥料利用效率<sup>[56]</sup>;在 1995 年研发了“控释氮肥工厂化箱式育苗”<sup>[57]</sup>和“免耕种肥接触直播”<sup>[58]</sup>技术,由于成本较高、技术要求高很难在中国推广。山东农业大学在此基础上研制出育苗秧盘全量施肥法,将全生育期间水稻所需要的专用种衣尿素肥料一次性施于育苗秧盘底部的方法。采用延迟释放型控释肥,该肥料在抑制期的养分溶出速率及累计溶出量均极低,既满足水稻在 30~40 d 及灌浆至成熟期对少量养分的需求,不会造成种子和幼苗高浓度盐分积累,又满足分蘖至灌浆期大量的氮素供应,且肥料

施于水稻近根处可明显提高氮素的利用效率。该方法在移栽作业的同时完成施肥作业,具备省工节本的优点<sup>[24]</sup>。

由于部分缓控释肥养分释放速率和模式与水稻养分吸收速率和模式有所差异,赵胜利等与邢晓鸣等将缓控释肥与其他肥料按一基一穗与一基一穗方式进行配施,发现水稻产量、群体干物质、叶面积指数、叶绿素含量和光合势等方面表现出不同程度增加<sup>[18,23]</sup>。诸海燕等采用测土配方与平衡施肥原理制成水稻专用缓释肥<sup>[23]</sup>,提高产量的同时提高了肥料利用效率,环境效益显著。

在直播稻中,罗锡文等研究出机械同步深施肥的方法,同步进行开沟、起垄和播种,垄面上播种小沟增加了水稻根系入土深度,同时将肥料施入沟内<sup>[23]</sup>,有利于缓控释肥与水稻根系接触,促进水稻根系的生长及对养分的吸收,降低肥料损耗,还可降低氮挥发比率以及延缓氮挥发进程<sup>[24]</sup>。

总而言之,能够对水稻起到增产增效、减轻环境压力的缓控释肥施用方法均需要在水稻根际进行深施,同时,针对不同生长类型水稻品种,还可以与普通尿素进行适当配施来满足水稻全生育期对养分的需求。

## 7 缓控释肥在水稻上应用存在的问题及展望

### 7.1 提高生产技术,降低生产成本,促进缓控释肥应用

目前限制缓控释肥在大田作物生产中的应用的主要因素仍是价格偏高,是常规肥料的 3~8 倍(部分控释的掺混肥大约为 2~5 倍),缓控释肥是化肥的再生产过程,必定增加生产成本,生产中运用最多的是花卉类经济作物,在水稻生产中应用大多处于研究和试验阶段,因此,改进生产工艺和流程,节能降耗,降低生产成本,减少与传统肥料之间的价格差距,是目前亟待解决的关键问题。

### 7.2 研发针对不同类型水稻品种的专用缓控释肥

从目前缓控释肥类型来看,市场上已有多种适合水稻生长的专用缓控释肥。我国水稻品种类型较多,主要有早稻和晚稻、籼稻和粳稻、杂交稻等,具有一定的生态区域性,不同水稻类型的养分吸收量、吸收速率和模式间也有所差异。同种缓控释肥的肥效释放速率和模式不能同时满足各种品种水稻生长需求。因此,要结合目前推行的测土配方施肥技术,根据不同地区土壤、温度和栽培水稻品种等因素形成不同缓控释肥的工艺技术,生产出区域适应性强、水稻吸收效果好的不同类型水稻专用缓控释肥。

### 7.3 科学合理的施肥技术

由于缓控释肥发展起步较晚,缓控释肥施肥技术目前尚未成熟。施肥深度、施肥位置和施肥时间等对水稻产量、品质和肥料利用率均有不同程度影响。为了提高肥料的利用效率、促进水稻吸收,要根据不同生态区气候条件、土壤条件、水分管理和水稻品种确定适宜的缓控释肥类型及用量,并配套相应的施肥技术,为充分发挥缓控释肥肥效、保证水稻稳产提供保障。

### 7.4 残膜导致生态问题

当前对于缓控释肥包膜材料残留问题研究较少,由于包膜材料选材不同,连年施用是否造成生态环境污染、如何评价残膜问题,需要进一步改进和完善,也需要生产和推广施肥性能好且环保无残留的包膜缓控释肥。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 卢艳丽,白由路,王磊,等. 华北小麦—玉米轮作区缓控释肥应用效果分析 [J]. 植物营养与肥料学报,2011,17(1):209-215.
- [3] 汪强,李双凌,韩燕来,等. 缓/控释肥对小麦增产与提高氮肥利用率的效果研究 [J]. 土壤通报,2007,38(4):693-696.
- [4] 杨俊刚,徐凯,佟二健,等. 控释肥料与普通氮肥混施对春白菜产量、品质和氮素损失的影响 [J]. 应用生态学报,2010,21(12):3147-3153.
- [5] 陈宏坤,李博. 掺混型控释肥对棉花产量及氮肥利用率的影响 [J]. 中国农学通报,2012,28(3):213-217.
- [6] 罗斌,束维正. 我国缓控释肥料的研究现状与展望 [J]. 化肥设计,2010,48(6):58-60.
- [7] 楚召. 缓释/控释化肥的研究现状及进展 [J]. 磷肥与复肥,2007,22(2):14-16.
- [8] 谷夺魁,刘树庆,宁国辉. 缓控释肥料研究进展及其环境安全研究 [J]. 河北农业科学,2004,8(4):100-104.
- [9] 闫湘,金继运,何萍,等. 提高肥料利用率技术研究进展 [J]. 中国农业科学,2008,41(2):450-459.
- [10] Inukai Y, Ashikari M, Kitano H. Function of the root system and molecular mechanism of crown root formation in rice [J]. Plant & Cell Physiology,2004,45(Suppl):17.
- [11] 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(6):212-224.
- [12] 唐控虎,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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Tang S H, Yang S H, Chen J S, et al. Studies on the mechanism of single basal application of controlled-release fertilizers for increasing yield of rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Journal of Integrative Agriculture,2007,6(5):586-596.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 赵胜利,周凯,黄卫群,等. 缓释肥对机插稻生长发育及产量的影响 [J]. 中国稻米,2015,21(6):91-93.
- [19] Anitha K, Bindu G. Effect of controlled-release nitrogen fertilizer on methane emission from paddy field soil [J]. Procedia Technology,2016,24:196-202.
- [20] 谢春生,唐控虎,徐培智,等. 一次性施用控释肥对水稻植株生长及产量的影响 [J]. 植物营养与肥料学报,2006,12(2):177-182.
- [21] 郑磊,陈宝成,范玲超,等. 控释掺混专用肥对水稻生长的影

- 响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(30): 23-28.
- [22] 俞卫星, 胡新春, 王新溪, 等. 缓控释肥对籼粳杂交稻产量、品质和经济效益的影响[J]. 中国农学通报, 2016, 32(21): 1-5.
- [23] 唐拴虎, 杨少海, 陈建生, 等. 水稻一次性施用控释肥料增产机理探讨[J]. 中国农业科学, 2006, 39(12): 2511-2520.
- [24] 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.
- [25] 邢晓鸣, 李小春, 丁艳锋, 等. 缓控释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.
- [26] 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.
- [27] 吕玉虎. 豫南稻区水稻缓/控释肥应用效果研究[J]. 中国农学通报, 2012, 28(9): 97-101.
- [28] Sato T, Shibuya K, Saigusa M, et al. Single basal application of total nitrogen fertilizer with controlled-release coated urea on non-tilled rice culture[J]. Japanese Journal of Crop Science, 1993, 62(3): 408-413.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 陈建生, 徐培智, 唐拴虎, 等. 一次基施水稻控释肥技术的养分利用率及增产效果[J]. 应用生态学报, 2005, 16(10): 1868-1871.
- [32] 诸海燕, 朱恩, 余廷园, 等. 水稻专用缓释复合配方肥增产效果研究[J]. 中国农学通报, 2014, 30(3): 56-60.
- [33] 唐拴虎, 谢春生, 孙小文, 等. 水稻施用控释肥料生长效应研究[J]. 中国农学通报, 2004, 20(1): 149-151.
- [34] 罗兰芳, 郑圣先, 廖育林, 等. 控释氮肥对杂交水稻糙米蛋白质品质和氮代谢关键酶活性的影响[J]. 中国水稻科学, 2007, 21(4): 403-410.
- [35] 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.
- [36] 杜君, 孙克刚, 雷利君, 等. 控释尿素与普通尿素配施对水稻氮代谢关键酶活性及产质量的影响[J]. 河南农业科学, 2016, 45(3): 67-72.
- [37] 聂军, 肖剑, 戴平安, 等. 控释氮肥对水稻氮代谢关键酶活性及糙米蛋白质含量的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2003, 29(4): 318-321.
- [38] Huang J, He F, Cui K, et al. Determination of optimal nitrogen rate for rice varieties using a chlorophyll meter[J]. Field Crops Research, 2008, 105(1/2): 70-80.
- [39] 陈贤友, 吴良欢, 韩科峰, 等. 包膜尿素和普通尿素不同掺混比例对水稻产量与氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(4): 918-923.
- [40] 王玉军, 邹应斌, 张夫道. 掺混型缓/控释肥对杂交晚稻产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2009(5): 28-33.
- [41] 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.
- [42] Shoji S, Kanno H. Use of polyolefin-coated fertilizers for increasing fertilizer efficiency and reducing nitrate leaching and nitrous oxide emissions[J]. Fertilizer Research, 1994, 39(2): 147-152.
- [43] 莫钊文, 潘圣刚, 王在满, 等. 机械同步深施肥对水稻品质和养分吸收利用的影响[J]. 华中农业大学学报(自然科学版), 2013, 32(5): 34-39.
- [44] 居静, 吴海波, 陈永林, 等. 日本产包膜控释氮肥对稻米品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(2): 67-70.
- [45] 郑圣先, 刘德林, 聂军, 等. 控释氮肥在淹水稻田土壤上的去向及利用率[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(2): 137-142.
- [46] 孙克君, 毛小云, 卢其明, 等. 几种控释氮肥减少氨挥发的效果及影响因素研究[J]. 应用生态学报, 2004, 15(12): 2347-2350.
- [47] Xu J, Peng S, Yang S, et al. Ammonia volatilization losses from a rice paddy with different irrigation and nitrogen managements[J]. Agricultural Water Management, 2012, 104(2): 184-192.
- [48] 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 and Water Environment, 2011, 9(3): 333-342.
- [49] 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.
- [50] 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.
- [51] Ji X H, Zheng S X, Lu Y H, et al. Study of dynamics of floodwater nitrogen and regulation of its runoff loss in paddy field-based two-cropping rice with urea and controlled release nitrogen fertilizer application[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2007, 6(2): 189-199.
- [52] Zheng S X, Nie J, Dai P N, et al. Nitrogen recovery and nitrate leaching of controlled release nitrogen fertilizer in irrigated paddy soil[J]. Agricultural Science & Technology, 2004, 5(3): 2-10.
- [53] 刘德林, 聂军, 肖剑.  $^{15}\text{N}$  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): 87-92.
- [54] Akiyama H, Yan X, Yagi K. Evaluation of effectiveness of enhanced-efficiency fertilizers as mitigation options for  $\text{N}_2\text{O}$  and  $\text{NO}$  emissions from agricultural soils: meta-analysis[J]. Global Change Biology, 2010, 16(6): 1837-1846.
- [55] Ji Y, Liu G, Ma J, et al. Effects of urea and controlled release urea fertilizers on methane emission from paddy fields: a multi-year field study[J]. Pedosphere, 2014, 24(5): 662-673.
- [56] 王春艳. 水稻侧条施肥技术研究[J]. 耕作与栽培, 1998(2): 43-46.
- [57] Sato T, Shibuya K. One time application of total nitrogen fertilizer at nursery stage in rice (*Oryza sativa*) culture[J]. Tohoku Journal of Crop Science, 1991(34): 15-16.
- [58] Kaneta Y, Awasaki H, Murai Y. The non-tillage rice culture by single application of fertilizer in a nursery box with controlled-release fertilizer[J]. Journal of the Science of Soil & Manure Japan, 1994, 65: 385-391.
- [59] Xu J, Liao L, Tan J, et al. Ammonia volatilization in gemmiparous and early seedling stages from direct seeding rice fields with different nitrogen management strategies: A pots experiment[J]. Soil & Tillage Research, 2013, 126(1): 169-176.