

中国稻田施氮技术研究进展^①

庞桂斌, 彭世彰

(河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098)

摘要: 提高 N 肥利用率, 加强稻田养分管理已经成为水稻生产中研究的热点。针对我国稻田 N 肥利用率低和 N 素损失严重的现状, 综述了国内外提高稻田 N 肥利用率技术途径的研究进展, 包括改进施肥方法 (确定适宜施 N 量、N 肥深施、前 N 后移、平衡施肥、有机与无机肥配施、水肥综合管理)、新型肥料的研制 (硝化抑制剂、脲酶抑制剂、表面分子膜、缓控释肥)、计算机决策支持系统指导施肥和实时、实地 N 肥管理等。展望了今后需要加强研究的几方面工作。

关键词: 水稻; 氮肥利用率; 氮素损失; 施氮技术

中图分类号: S147

氮 (N) 素对水稻生产的影响仅次于水, 位居 N、P、K 三大营养元素的首位。施用化肥特别是 N 肥是水稻增产的主要措施之一。据世界粮农组织统计, 目前我国 N 肥用量占全球 N 肥用量的 30%, 为世界第一 N 肥消费大国, 而水稻 N 肥用量占世界水稻 N 肥总用量的 37%^[1]。灌溉稻田施用 N 肥后, 由于在土壤-水系统中氮的挥发、反硝化作用、表面流失以及渗漏作用等造成 N 肥的损失, 导致了稻田 N 肥的利用率偏低^[2-3]。

N 肥利用率低下和 N 素的损失引起了一系列的环境问题。N 肥的地表流失使得水体中富集了过多的营养元素, 直接导致江河湖泊的富营养化作用; N 肥的深层渗漏引起了地下水的污染, Ahmad 等人^[4]的研究显示稻作区稻农饮用的地下水中检测出铵和硝酸盐; 稻田反硝化作用释放出的温室气体 N₂O 可能加快全球气候变暖, 从全球范围来看, 农业生产过程中释放的 N₂O 占大气层总量的 70%^[1]。此外, 为了获得高产, 农民常常施用过量的 N 肥, 不仅造成大量 N 素的损失和资源的浪费, 同时也增加了投资的成本, 还会造成水稻倒伏、贪青晚熟、病虫害发生加重以及稻米品质下降等不良后果。由此可见, 提高 N 肥利用率, 加强稻田养分管理已经成为水稻生产中迫切需要解决的重大问题, 对生态环境保护也将起到非常重要的作用。

1 稻田氮肥利用现状

中国稻田单季 N 肥用量平均为 180 kg/hm², 比世

用率为 30% ~ 35%, 其中碳铵的 N 肥吸收利用率低于 30%, 尿素为 30% ~ 40%, 在世界主要产稻国中是比较低的^[5-6]。在施 N 量较高的太湖地区, N 肥吸收利用率甚至不到 20%^[7]。N 肥利用率低一直是困扰我国农业生产的一个突出问题。而且近年来随着水稻产量水平的提高, 水稻施 N 量不断增加, N 肥的利用率可能仍在进一步的下降。因此, 如何在保证水稻产量的前提下, 减少 N 肥用量, 提高 N 肥利用率一直受到土壤学家和农学家的重视。

2 稻田氮肥施用技术

N 肥施入稻田后有 3 个去向: 一是被水稻植株吸收利用; 二是被土壤固定; 三是从稻田损失进入环境。减少 N 素的损失, 促进植物吸收利用是提高 N 肥利用的关键, 国内外提出了许多提高 N 肥利用率的技术途径。

2.1 改进施肥方法

2.1.1 适宜 N 肥施用量 适宜的施 N 范围内, 水稻产量随施 N 量的增加而增加, 而过高 N 肥的投入, 既影响 N 肥增产效用的发挥, 又容易引起环境污染, 因此寻求一个适宜的施 N 量是合理施用 N 肥的首要问题。施 N 量应根据经济效益和环境效益相结合的原则加以确定, 水稻适宜施 N 量因土壤条件、作物品种、气候特点和施 N 方法不同有很大的差异。确定适宜施 N 量的方法有两类, 一类是以土壤供 N 量的预测为基

^①基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (50839002)、优秀博士学位论文作者专项基金项目 (200546) 和水利部公益性行业科研专项经费项目 (200901039-03) 资助。

作者简介: 庞桂斌 (1981—), 男, 江苏大丰人, 博士研究生, 主要从事节水灌溉理论与农田生态环境研究。E-mail: gbpang@hhu.edu.cn

参考文献: 庞桂斌等. 中国稻田氮肥利用现状. 土壤, 2010, 42 (3): 329~335. 庞桂斌等. 中国稻田氮肥利用现状. 土壤, 2010, 42 (3): 329~335.

[8]。崔玉亭等^[9]通过应用环境经济学的Coates原理和农业技术经济学的边际收益原理分析,认为 221.5 ~ 261.4 kg/hm²是苏南太湖流域目前生产条件下,兼顾生产、生态和经济效益比较合理的水稻施N量。朱兆良^[8]综合以往的研究试验,认为在配施P和K的条件下,每季作物的施N量在 120 ~ 180 kg/hm²,小麦、玉米和水稻都可达到较高的产量水平。近年来,凌启鸿等人^[10]提出了水稻精确定量施N技术,其核心内容是以斯坦福(Stanford)方程(施N总量 = [目标产量的需N量 - 土壤供N量] / N肥的当季利用率)来指导N肥的精确定量施用,该技术在江苏等地示范应用取得了节N高产的效果。实际上,由于影响作物产量的因素很多,对于农业生产来说,确定一个N肥适宜施用量范围,基本满足大面积生产的需要。

2.1.2 N肥深施 氨的挥发损失是灌溉稻田肥料N素损失的主要途径^[11]。N肥深施有利于减少氨挥发和径流损失。研究表明,N肥深施尤其是粒肥深施,在减少N肥损失、提高N肥利用率的各种方法中,是效果最大且最稳定的一种^[2,12]。在水稻生产中将尿素制成超大粒,以便于N肥颗粒深施,可以降低N肥用量,提高N肥利用率^[13-14]。至于适宜的施用深度,则既要考虑到尽量减少N肥损失,又要考虑到能及时被作物根系吸收,且要省工省时。Zhu^[11]研究表明,综合考虑N素的损失和作物对N素的吸收以及劳动力消耗等诸多因素,N肥深施的深度以 6 ~ 10 cm比较适宜。与传统的面施方法相比,N肥深施不仅能减少N素的损失,而且能增加产量^[15]。因此,N肥深施往往能获得较高的农学利用率。

2.1.3 前N后移 水稻对不同生育期追施N肥的吸收利用表现出较大的差异,穗粒肥的N肥利用率明显比基肥高,针对现行水稻N肥施用存在的重基肥、分蘖肥,轻穗粒肥的现象,前N后移往往可以提高肥料的利用效率。王维金^[16]的研究表明,幼穗分化始期和孕穗期施肥,其N素利用率要显著高于基肥和分蘖肥。幼穗分化期施用的碳铵或尿素的N素损失平均约比基肥表施或混施以及移栽后表施的低 18% ~ 24%,并且水稻植株含N率随着N肥施用时期的推迟有提高的趋势^[17]。这是由于生长前期水稻根系吸收能力低,地上部分郁闭度也低,挥发损失的可能性大,N肥的利用率降低。因此,在不提高施肥量甚至适当减少的基础上,适当增加穗粒肥比率是提高N肥利用率的一个有效途径。

2.1.4 平衡施肥 平衡施肥是根据李比希最小养分率而发展起来的一项比较先进的施肥方法。由于N

肥施用后直观效果更明显,因此稻农往往比较重视N肥的施用,而P、K肥的施用量则相对较少,这直接导致了土壤中P、K以及某些中微量元素养分的缺乏,从而影响到水稻的产量^[18]。中国水稻生产N肥农学利用率从 15 ~ 20 kg/kg下降到 9.1 kg/kg,主要的原因之一是偏施N肥,没有合理地施用适量的P、K肥所致^[19]。在缺P或缺K的土壤上,配施P肥或P、K肥,可以明显地降低化肥N的损失,同时不同养分之间存在着正交互作用,可以促进植株对养分的吸收利用,从而提高水稻N肥利用率^[8,11,20-21]。在N、P、K肥的平衡施用的基础上,水稻产量得到进一步提高,稻米品质得到改善^[22]。因此,稻田施肥中重N肥,轻P、K肥以及中微量元素的现象应当引起我们的重视。

2.1.5 有机与无机肥配施 有机肥的有机质含量高,养分全面,肥力持久稳定,具有改善土壤理化性状的良好作用,与N素化肥配合施用,具有独特的优点,有利于N素利用率的提高和产量的增加^[23]。近几年,用有机物料代替有机肥与化学N肥混合施用引起人们的兴趣,研究者们将有机碳源(木质素、纤维素、淀粉、葡萄糖等)与化学N肥配施,有效地减少了N素的损失^[24]。周卫军等人^[25]研究结果表明,有机无机结合施肥制度可以大大增强土壤供N能力,改善水稻生长的土壤环境,促进水稻对N的吸收,提高稻田系统的生产力。这也为近年来新兴的有机无机复混肥的发展提供了依据。已有的实践和研究表明,有机无机配合施用是我国农业现代化进程中一条节能、低耗、高产、稳产的发展途径。

2.1.6 水肥综合管理 水分是土壤中N运转及作物N吸收过程中的关键因子,生产上把握适宜的施N量和供水量,并根据不同作物不同生长阶段的需求特点进行综合运筹有利于提高肥料利用率^[26]。水稻水肥综合管理技术强调将改进的基肥和追肥施用法结合起来,即N肥作为基肥时,采用无水层混施或上水前耕翻时条施于犁沟等;作为追肥时,尿素则宜采用“以水带N”法,碳铵则宜兑水施用后灌水^[8]。该技术降低了施肥后存留于稻田田面水中的肥料N量,有效减少氨挥发和径流损失,提高肥料的利用率。在河南封丘进行的N¹⁵微区试验以及从黑龙江到江西进行的多点田间试验结果均表明,水肥综合管理技术改善了N肥表观利用率,有利于水稻增产^[8]。崔远来和李远华等人^[27-28]开展了节水灌溉条件下水稻高效利用水肥试验研究,结果表明,在适当的施肥量和合理的追肥方式下,节水灌溉可提高水稻水分生产率及N肥利用率,获得高产,提出了一种水肥高效利用的稻田水肥管理模式。王绍华和曹卫

星等人^[29]研究了不同水分管理方式和施N量对水稻N素吸收与利用的影响, 结果表明, 水与N存在明显互作作用, 适度水分胁迫有效的调动和利用营养器官中的储存N, 提高N素利用率和产谷效率, 减少稻田N损失^[29]。随着水资源的短缺和水稻节水灌溉技术的推广和应用, 水肥综合管理技术将成为研究的热点。

2.2 抑制剂和新型肥料的研制

2.2.1 硝化抑制剂 NH_4^+ -N肥施入土壤后, 在土壤微生物的作用下发生硝化反应, NH_4^+ 在氨氧化细菌的作用下先氧化为 NO_2^- , 进而在亚硝化细菌的作用下氧化为 NO_3^- 。硝化抑制剂可以抑制 NH_4^+ 向 NO_2^- 和 NO_3^- 的转化, 减少 NO_3^- 的淋溶损失, 也可抑制反硝化作用所产生的 N_2O 气体, 减少N的淋溶和挥发损失, 提高N肥利用率^[30-31]。研究者们将硝化抑制剂双氰胺(DCD)加入碳铵制成长效碳铵, 在水稻的田间试验中, 其利用率达到35%, 比普通碳铵高出8个百分点^[32]。但是总结以往的水稻田微区试验和旱作的盆栽试验中, 硝化抑制剂(多数试验用是nitrapyrin, 个别试验中还用了ASU、ATC)大多未能明显地提高 NH_4^+ -N肥和尿素的利用率和降低其损失率^[33]。造成这种结果的原因可能很多, 其中包括供试硝化抑制剂本身的稳定性、移动性和抑制作用的强弱, 以及在不同土壤、气候、作物等条件下N肥的硝化-反硝化损失率的不同等^[8]。

2.2.2 脲酶抑制剂 尿素施入土壤后, 经土壤脲酶的作用被水解, 造成 NH_3 的挥发。脲酶抑制剂通过延缓尿素的水解, 延长施肥点处尿素的扩散时间, 从而降低了土壤溶液中 NH_4^+ 和 NH_3 的浓度, 能够减少 NH_3 的挥发损失。经过多年的研究开发, 脲酶抑制剂的种类有一百多种, 主要包括无机盐类和有机化合物两大类^[34]。目前研究较多的是N-丁基硫代磷酰三胺(NBPT)、苯基磷酰二胺(PPD)和氢醌(HQ)。卢婉芳和陈苇^[35-36]的研究表明, 在稻田土壤中, PPD能有效降低尿素的水解速率和水层中 NH_4^+ -N含量, 而HQ对抑制尿素水解和降低水层中 NH_4^+ -N含量的效果较差, 这与Bymes等^[37]的研究结果相一致。稻田研究资料表明, 脲酶抑制剂(PPD和NBPT)能减少尿素的 NH_3 挥发, 其减少量与不加脲酶抑制剂时的 NH_3 挥发量呈良好的正相关, 但是不一定能稳定地减少N肥的总损失^[8]。脲酶抑制剂的有效性在很大程度上受环境条件影响, 如土壤pH值、水分状况、土壤质地、有机质量、尿素的浓度、气候条件和施肥的数量与方式等。

2.2.3 表面分子膜 表面分子膜是通过降低气液两相间的物质交换来降低 NH_3 挥发损失的, 多由高碳

醇乳化后配制成的乳剂, 能溶于水。应用表面分子膜后, 可大大降低 NH_3 挥发速率, 减少N素损失^[38-39]。许前欣等人^[40]通过田间观测研究得出, 碳铵施膜的效果好于尿素的施膜效果, 加施水面分子膜比对照(不加膜)明显增加了水稻有效穗、穗粒数、千粒重, 增加了产量, N肥利用率提高6.5%~11.6%。此外, 庄舜尧等^[41]的试验结果也显示, 表面分子膜对水体中 NH_3 挥发有明显的抑制效果, 但其效果受到分子膜用量的强烈影响, 试验中以4 g/m²的效果最佳。总结以往试验结果表明, 稻田水面分子膜可作为减少 NH_3 挥发、提高N肥利用率的一项新技术。由于表面分子膜易被土壤-田面水系统中的微生物分解, 同时易被大雨冲走, 所以稳定的表面膜物质以及单位面积最佳膜用量有待进一步研究。

2.2.4 缓、控释肥 肥料释放养分的时间和强度与作物需求之间的不平衡是导致化肥利用率低的重要原因之一。缓/控释肥料是采用各种机制对常规肥料水溶性进行控制, 通过对肥料本身进行改性, 有效地延缓或控制了肥料养分的释放, 使肥料养分释放时间和强度与作物养分吸收规律相吻合^[42-43]。李友宏等^[44]的研究表明, 涂层尿素在水稻上施用, 吸收利用率可以提高7%~14%。尿素包膜后, 降低了N素的损失率, N素利用率提高35%, N素回收率得到明显的改善^[45-46]。以往的研究结果表明, 水稻生产中应用缓/控释肥料, 不仅省工省时, 而且有效减少稻田N素的损失, 促进水稻植株的吸收, 提高N素的利用率。但同时也存在着一些急需解决的问题, 我国目前生产的缓释肥料还不能很好地解决释放与作物需求相吻合的难题, 达不到自控缓释的指标, 技术含量较低, 加之缓/控释肥料生产成本远远高于常规肥料, 限制了在水稻生产中的应用和推广。

2.3 计算机决策支持系统指导施肥

随着计算机和信息技术应用领域的不断拓展, 应用于水稻生长管理的计算机决策支持系统也在逐步发展, 主要包括N肥优化管理和水稻生长模拟研究等。N肥优化管理研究的前驱者当推Kimura和Chiba, 他们于1943年通过大量实验得出水稻最佳的N肥管理措施, 表现最大产量或最大N肥利用率的处理为最适N肥管理措施^[47]。澳大利亚科学家Angus等^[48]在水稻决策支持系统Ricecheck的基础上开发出了水稻管理系统MANAGE RICE, 该模型不仅可以模拟不同施N量的情况下水稻生长发育进程和最终产量, 并且能够根据最新的稻谷价格和N肥价格, 提供最佳N肥管理决策方案, 用于指导施肥。Ten Berge等^[49]建立了由水稻生长

模拟模型 (ORYZA-O) 和优化程序两部分组成的灌溉稻最佳 N 素管理决策支持系统 MANAGE-N, 其中 ORYZA-O 模拟作物的吸 N 量、N 素分配和作物生长及产量; 优化程序则通过改变施肥的时间推导出最大模拟产量, 在给定施肥总量的基础上, 推荐获得最佳产量的肥料分配方案。试验结果表明, MANAGE-N 推荐施肥时间与水稻 N 素需求比较吻合, 因此按推荐施肥方案可增产 5% ~ 10%, 农学利用率可增加 20% ~ 50%^[50]。国内外其他学者也进行了大量的研究, 取得了一定的研究成果^[51-52]。但是水稻 N 肥管理系统也存在一些问题, 模型的各种参数特别是土壤参数获取很难而且准确性不高, 总体来说还不成熟^[53]。因此, 有必要综合土壤性状、水稻特性及气候条件等方面进一步深入研究。

2.4 实时、实地氮肥管理

为了提高 N 肥利用率, 科学家们希望通过一定的途径动态测定水稻植株的 N 素状况, 以根据水稻实际需要适量施用 N 肥。国际水稻研究所于上个世纪 90 年代提出的实时 N 肥管理 (real-time nitrogen management, RTNM) 和实地施肥管理模式 (site-specific nutrient management, SSNM) 正好解决了这一问题。

实时 N 肥管理强调施肥时间和 N 肥施用量与作物对 N 的需求量协调一致^[54]。由于叶片 N 素含量与光合速率及干物质生长密切相关, 因此, 在一个生长季内, 叶片 N 素含量可以较灵敏地反映作物对 N 的需求动态。Peng 等人^[55-56]的研究证实, 叶绿素测定仪 (SPAD) 与单位面积叶片含 N 量呈极显著正相关, 可以用 SPAD 简单、快速和无损估测叶片含 N 量, 测定值作为水稻 N 素营养状况快速诊断的特征指标。在此基础上提出了实时 N 肥管理模式 (RTNM), 其技术要点是利用叶绿素仪 (SPAD) 或叶色卡 (LCC) 在水稻抽穗以前每周测定水稻 N 素营养状况, 根据每周 1 次实时测定结果是否低于设定的 SPAD 或 LCC 阈值来确定是否追施 N 肥 (用量 N 30 ~ 50 kg/hm², 根据生长期适当调整)^[54]。试验研究表明, 在稻农田块采用 SPAD 施 N 模式的产量和 N 肥农学利用率均高于稻农习惯施肥法^[1,54]。

为了减少田间观测次数, 简化实时 N 肥管理模式 (RTNM), Dobermann 等^[57-58]提出了只在水稻生长的关键时期用 SPAD 或 LCC 测定水稻 N 素营养状况动态调节 N 肥追肥用量的实地施肥管理模式 (SSNM)。SSNM 是通过对所输入数据综合分析后为用户提供更为经济有效的施肥推荐。该系统的输入项包括土壤 N、P、K 的有效供应量, 水稻产量, 稻草带走的养分量, 上季

作物的施肥量, 当地稻谷价格以及微量元素养分缺乏的临界值^[57]。这一方法在菲律宾应用比农民习惯施肥法增产 12.5%, N 肥用量降低 N 14 kg/hm², N 肥农学利用率提高 57%, 节 N 效果明显, N 肥利用率明显提高^[54, 58-60]。上述研究主要在东南亚热带稻区进行, 我国的研究刚刚起步。浙江大学 Wang 等人^[61-62]率先在浙江省金华市设立试验区, 试验研究结果表明, 与农民常规养分管理相比, 平均减少 N 肥用量约 30%, N 肥农学利用率提高 5.7 kg/kg, N 肥吸收利用率提高 12 个百分点, 水稻产量提高 7%, 经济效益平均提高 11%, 深受当地试验农户的欢迎。自 2001 年起江苏、湖南、广州和黑龙江等省份相继展开试验研究和示范, 进一步检验 SSNM 这项新技术, 也取得了良好的效果。由此可见, SSNM 在全国广大稻区具有广泛的推广应用前景, 可望成为提高水稻 N 肥利用率、控制 N 肥污染的新途径^[63]。目前的研究工作主要集中在该技术提高稻田 N 肥利用率的表现、对于水稻产量和干物质累积的影响及其在示范应用推广方面的研究, 较少涉及到水稻生长发育和养分吸收特性等方面, 同时对于其节 N、增产、减污的生理机制研究有待加强。

3 研究展望

综上所述, 在稻作生产中, 通过各种途径减少稻田 N 肥损失、提高水稻 N 肥利用率具有很大的潜力, 但是各种不同的技术也都存在着一定的适用范围和缺点, 因此, 在实际生产中必须因地制宜采用上述技术以保证水肥资源的高效利用和维持农业的可持续发展。随着人口不断增长和粮食需求不断增加, 提高稻田肥料资源利用效率, 深入开展稻田养分管理技术研究对于保障粮食安全、保护生态环境具有极其重要的意义。笔者建议今后需继续加强以下几方面工作: ①已有研究认为中国稻田土壤背景 N 过高可能是导致 N 肥利用率低的主要原因^[1]。在不影响土壤肥力和其他性状的前提下, 如何采取适当的 N 肥施用技术和管理措施降低稻田背景 N 来提高当季水稻 N 肥利用率是值得研究的问题。②深入开展水稻养分高效利用的生理生态学机理研究, 加快型新肥料研制及常规肥料升级, 研发水稻高产、高效施肥新技术, 集成和提升水稻高产、高效、优质和环保的养分资源管理技术体系。③筛选和培育具有养分高效利用基因型的水稻品种或组合, 引入先进的生物技术实现水稻营养遗传性状的改良, 挖掘作物高效利用土壤养分的潜力及其遗传规律, 提高水稻 N 肥利用率。④建立稻田养分资源高效利用信息化管理决策支持系统, 借助信息技术、3S 技术等形

成切实可行的养分精准管理和精准施肥技术, 实现肥料资源的合理配置与高效利用, 发挥有限资源最大的生产潜力, 改善环境质量, 保证农业可持续发展。

参考文献:

- [1] 彭少兵, 黄见良, 钟旭华, 杨建昌, 王光火, 邹应斌, 张福锁, 朱庆森, Roland B, Christian W. 提高中国稻田氮肥利用率的研究策略. 中国农业科学, 2002, 35(9): 1 095-1 103
- [2] De Datta SK, Buresh RJ. Integrated nitrogen management in irrigated rice. Soil Science, 1989, 10: 143-169
- [3] Vlek PLG, Byrnes BH. The efficacy and loss of fertilizer N in lowland rice. Fertilizer Research, 1986, 9: 131-147
- [4] Ahmad AR, Zulkefli M, Ahmed M, Aminuddin BY, Sharma ML, Zain MM. Environmental impact of agricultural inorganic pollution on groundwater resources of the Kelantan Plain // Aminuddin BY, Sharma ML, and Willett IR. Agricultural Impacts on Groundwater Quality. ACIAR Proceedings, 1996, 61: 8-21
- [5] 李庆逵. 中国农业持续发展中的肥料问题. 江西: 江西科学技术出版社, 1997
- [6] 朱兆良. 我国土壤供氮和化肥氮去向研究的进展. 土壤, 1985, 17(1): 2-9
- [7] 李荣刚. 高产农田氮素肥效与调控途径-以江苏太湖地区稻麦两熟农区为例推及全省 (博士学位论文). 北京: 中国农业大学, 2000
- [8] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策. 土壤与环境, 2000, 9(1): 1-6
- [9] 崔玉亭, 程序, 韩纯儒, 李荣刚. 苏南太湖流域水稻经济生态适宜施氮量研究. 生态学报, 2000, 20(4): 659-662
- [10] 凌启鸿, 张洪程, 戴其根, 丁艳锋, 凌励, 苏祖芳, 徐茂, 阙金华, 王绍华. 水稻精确定量施氮研究. 中国农业科学, 2005, 38(12): 2 457-2 467
- [11] Zhu ZL. Fate and management of fertilizer nitrogen in agro-ecosystems // Zhu Z, Wen Q, and Freney JR. Nitrogen in Soils of China. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1997: 239-279
- [12] 朱兆良. 关于提高氮肥利用率的问题. 肥料与农业发展国际学术讨论会论文集. 北京: 中国农业科技出版社, 1995: 221-229
- [13] Mikkelsen DS, Jayaweera GR. Nitrogen fertilization Practice of lowland rice culture // Baeoned PE. Nitrogen Fertilization in the Environment. New York, USA: Marcel Dekker, Inc, 1995: 171-223
- [14] Gaudin R, Dupuy J. Ammoniacal nutrition of transplanted rice fertilized with large urea granules. Agronomy Journal. 1999, 91(1): 33-36
- [15] 吴敬民, 陈永芳. 水稻基肥机械深施及肥料运筹方式效果研究. 土壤通报, 1999, 30(3): 110-112
- [16] 王维金. 关于不同籼稻品种和施肥时期稻株对 N^{15} 的吸收及其分配的研究. 作物学报, 1994(4): 169-172
- [17] 单玉华, 王余龙, 黄建晔, 安藤丰, 山本由德, 董桂春, 周小冬. 中后期追施 N^{15} 对水稻氮素积累与分配的影响. 江苏农业研究, 2000, 21(4): 18-21
- [18] Jin J, Lin B, Zhang W. Improving nutrient management for sustainable development of Agriculture in China // Smaling EMA, Oenema O, Freseo LO. Nutrient Disequilibria in Agroecosystems. CAB International, 1999: 157-174
- [19] 林葆. 提高作物产量增加施肥效应 // 中国土壤学会. 中国土壤科学的现状与前景. 江苏: 江苏科学技术出版社, 1991: 29-36
- [20] Jayaweera GR, Mikkelsen DS. Ammonia volatilization from flooded soil systems: A computer model 1-Theoretical aspects. Soil Science Society of America Journal, 1990, 54:1 447-1 455
- [21] 田秀英, 石孝均. 不同施肥对稻麦养分吸收利用的影响. 重庆师范学院学报, 2003, 20(2): 44-47
- [22] 戴平安, 李明德, 郑圣先. 钾、氮平衡及其相互作用对水稻产量和养分吸收的影响. 土壤通报, 1992, 23(3): 162-164
- [23] 戴平安, 刘向华, 易国英, 聂军, 郑圣先. 氮磷钾及有机肥不同配施量对水稻品质和产量效应的影响. 作物研究, 1999(3): 26-31
- [24] 姚丽贤, 黄志武, 卢仁骏, 严小龙. 有机碳源物对水稻生长和氮素有效性的影响. 土壤肥料, 1997(6): 27-31
- [25] 周卫军, 王凯荣, 张光远. 有机无机结合施肥对红壤稻田土壤氮素供应和水稻生产的影响. 生态学报, 2003, 23(5): 914-921
- [26] 闫湘, 金继运, 何萍, 梁鸣早. 提高肥料利用率技术研究进展. 中国农业科学, 2008, 41(2): 450-459
- [27] 崔远来, 李远华, 余峰. 水稻高效利用水肥试验研究. 灌溉排水, 2001, 20(1): 20-24
- [28] 崔远来, 李远华, 吕国安, 沙宗尧. 不同水肥条件下水稻氮素运移与转化规律研究. 水科学进展, 2004, 15(3): 280-285
- [29] 王绍华, 曹卫星, 丁艳锋, 田永超, 姜东. 水氮互作对水稻氮吸收与利用的影响. 中国农业科学, 2004, 37(4): 497-501
- [30] Owens LB. Effects of nitrapyrin on nitrate movement in soil columns. Journal of Environment Quality, 1981, 10(3): 308-310
- [31] 王改玲, 郝明德, 陈德立. 硝化抑制剂和通气调节对土壤 N_2O 排放的影响. 植物营养与肥科学报, 2006, 12(1): 32-36
- [32] 张志明, 毕庶春, 李继云, 冯元琦, 伍蔚民. 长效碳按特性与应用效益研究. 科学通报, 1997, 42(8): 874-878
- [33] Zhu ZL. Efficient management of nitrogen fertilizer for flooded rice nirelation to nitrogen Transformations in flooded soils.

- Pedosphere, 1992, 2: 97-114
- [34] Bremner JM, Douglas LA. Inhibition of urease activity in soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 1971, 3: 297-307
- [35] 卢婉芳, 陈苇. 稻田脲酶抑制剂的应用效果及其与环境条件的关系. *中国水稻科学*, 1992, 6(3): 135-138
- [36] 陈苇, 卢婉芳. 稻田脲酶抑制剂对 N^{15} 尿素去向的影响. *核农学报*, 1997, 11(3): 151-156
- [37] Bymes BH, Savant NK, Craswell ET. Effect of a urease inhibitor phenyl phosphorodiamidate on the efficiency of urea applied to rice. *Soil Science Society of America Journal*, 1983, 47: 270-274
- [38] Yin B, Shen RF, Zhu ZL. Use of new water soluble surface film-forming material to reduce ammonia loss from water solution. *Pedosphere*, 1996, 6(4): 329-334
- [39] 尹斌, 沈仁芳, 朱兆良. 水面分子膜对提高氮肥利用率及水稻产量的影响. *红壤生态系统研究*, 1998(5): 192-195
- [40] 许前欣, 赵振达, 李振云. 稻田水面分子膜对提高氮肥利用率的研究. *农业环境保护*, 1998, 17(5): 216-218
- [41] 庄舜尧, 尹斌, 朱兆良. 表面分子膜抑制稻田氨挥发的模拟研究. *土壤*, 2001, 33(2): 60-63
- [42] 何绪生, 李素霞, 李旭辉, 吕殿青. 控效肥料的研究进展. *植物营养与肥料学报*, 1998, 4(2): 97-106
- [43] Mikkelsen RL. Using hydrophilic polymers to control nutrient release. *Fertilizer Research*, 1994, 38(1): 53-59
- [44] 李友宏, 王芳, 罗代雄, 虎希柏, 边淑华. 涂层尿素对主要作物增产效果的研究. *土壤肥料*, 2001(1): 19-22
- [45] 符建荣. 控释氮肥对水稻的增产效应及提高肥料利用率的研究. *植物营养与肥料学报*, 2001, 7(2): 145-152
- [46] 戴平安, 聂军. 不同土壤肥力条件下水稻控释氮肥效应及其氮素利用的研究. *土壤通报*, 2003, 34(2): 115-119
- [47] 严力蛟, 全为民. 水稻生长动态模拟研究进展. *生态学报*, 2002, 22(7): 1 143-1 152
- [48] Angus JF, Williams RL, Durkin CO. MANAGE RICE: decision support for tactical crop management // Ishii R, Horie T. *Crop Research in Asia: Achievements and Perspective. Proceedings of the 2nd Asian Crop Science Conference*. 21-23 August, 1995. Fukui, Japan, 1996: 274-279
- [49] Ten Berge HFM, Thiagarajan TM, Drenth DP, Jansen MJW. Numerical optimization of nitrogen application to rice. Part I. Description of MANAGE-N. *Field Crops Research*, 1997, 51: 29-42
- [50] Ten Berge H F M, Shi Q, Zheng Z, Rao K, Riethoven JJM, Zhong X. Numerical optimization of nitrogen application to rice. Part II. Field evaluations. *Field Crops Research*, 1997, 51: 43-54
- [51] Dash RN, Rao KS. Optimization of nitrogen fertilizer application to irrigated rice // Kopf MJ. *Application of Systems Approaches at the Field Level*. Manila: Kluwer Academic Publishers, 1996
- [52] 潘剑君, 房世波, 孙维侠, 陈丽艳. 利用土壤信息系统进行水稻施氮量决策初探—以江苏省大丰市为例. *南京农业大学学报*, 2000, 23(3): 53-56
- [53] 徐国伟. 种植方式、秸秆还田与实地氮肥管理对水稻产量与品质的影响及其生理的研究 (博士学位论文). 江苏扬州: 扬州大学, 2007
- [54] Peng SB, Garcia FV, Laza RC, Sanico AL, Visperas RM, Cassman KG. Increased N-use efficiency using a chlorophyll meter on high yielding irrigated rice. *Field Crops Research*, 1996, 47: 243-252
- [55] Peng SB, Garcia FV, Laza RC, Sanico AL, Visperas RM, Cassman KG. Adjustment for specific leaf weight improves chlorophyll meter's estimate of rice leaf nitrogen concentration. *Agronomy Journal*, 1993, 85: 987-990
- [56] Peng SB, Laza RC, Garcia FV, Cassman KG. Chlorophyll meter estimates leaf area-based nitrogen concentration of rice. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1995, 26(5/6): 927-935
- [57] Dobermann A, Cassman KG, Peng SB, Tan PS, Phung CV, Cruz PC, Bajita JB, Adviento MAA, Olk DC. Precision nutrient management in intensive irrigated rice systems // *Proceedings of the International Symposium on Maximizing Sustainable Rice Yields through Improved Soil and Environmental Management*. Soil and Fertilizer Society of Thailand, 1996: 133-154
- [58] Dobermann A, Witt C, Dawe D, Abdulrachman S, Gines HC, Nagarajan R, Satawathananont S, Son TT, Tan PS, Wang G.H, Chien NV, Thoa VTK, Phung CV, Stalin P, Muthukrishnan P, Ravi V, Babu M, Chatuporn S, Sookthongsa J, Sun Q, Fu R, Simbahan GC, Adviento MAA. Site-specific nutrient management for intensive rice cropping systems in Asia. *Field Crops Research*, 2002, 74: 37-66
- [59] Hussain F, Bronson KF, Singh Y, Singh B, Peng SB. Use of chlorophyll meter sufficiency indices for nitrogen management of irrigated rice in Asia. *Agronomy Journal*, 2000, 92: 875-879
- [60] Yang WH, Peng S, Huang J. Using leaf color charts to estimate leaf nitrogen status of rice. *Agronomy Journal*, 2003, 95: 212-217
- [61] Wang GH, Dobermann A, Witt C, Sun QZ, Fu RX. Performance of site-specific nutrient management for irrigated rice in Southeast China. *Agronomy Journal*, 2001, 93: 869-878
- [62] Wang GH, Dobermann A, Witt C, Fu RX, Sun QZ. A new approach to increase the attainable rice yield in intensive irrigated rice systems of Zhejiang Province in China. *Journal of Zhejiang*

University Science, 2001(2): 196-203

染的新途径-SSNM. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2003,

[63] 王光火, 张奇春, 黄昌勇. 提高水稻氮肥利用率、控制氮肥污

29(1): 67-70

Research Advances of Nitrogen Fertilizer Application Technologies in Chinese Rice Field

PANG Gui-bin, PENG Shi-zhang

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To increase nitrogen fertilizer use efficiency and to enhance rice field nutrient management has been a focus of rice production. It is very important to consider the current situation of low fertilizer nitrogen use efficiency and serious nitrogen losses in China. Recent advances in technologies in increasing fertilizer nitrogen use efficiency were introduced in this paper, the technologies include improving fertilization methods (determining the proper amount of nitrogen use, deep placement, postponing nitrogen fertilizer application time, balancing fertilization, cooperating organic and inorganic fertilizer, irrigation and fertilization management), developing new types of fertilizers (urease inhibitors, nitrification inhibitors, surface film, slowly release and controlled release fertilizers), computer-based decision support systems and real-time and site-specific nitrogen management to decrease nitrogen losses. Finally, some future emphases were prospected.

Key words: Rice, Nitrogen fertilizer use efficiency, Nitrogen losses, Nitrogen fertilizer application technologies