



水稻侧深施肥技术研究进展与展望

吴朋浩¹, 戴志刚², 巩细民², 李小坤^{1, 3*}

(1. 农业农村部长江中下游耕地保育重点实验室 / 华中农业大学微量元素研究中心, 湖北 武汉 430070; 2. 湖北省耕地质量与肥料工作站, 湖北 武汉 430070; 3. 华中农业大学双水双绿研究院, 湖北 武汉 430070)

摘要: 肥料深施是科学施肥方式的一种, 是相对于表施或浅施等施肥方式而提出的, 是提高肥料利用率的重要途径。水稻是我国主要粮食作物之一, 水稻侧深施肥技术是集农业机械、专用肥料、配套农艺于一体的集成新技术, 是施肥技术的重大革新。综述了国内外水稻侧深施肥技术发展历程、水稻侧深施肥机械和专用肥料研究进展; 归纳总结了该技术对水稻产量、稻田环境、肥料利用率、经济效益的影响; 展望了该领域的研究方向和发展趋势, 为水稻侧深施肥技术可持续应用及推广提供依据。

关键词: 侧深施肥; 水稻产量; 肥料利用率; 环境友好; 经济效益

水稻 (*Oryza sativa* L.) 作为我国主要的粮食作物之一, 其产量和质量在确保我国粮食安全方面发挥着至关重要的作用^[1-2]。施肥是提高水稻产量的重要措施之一^[3], 施肥不仅对水稻生长发育具有积极影响, 还在维护农业可持续性和粮食生产稳定性方面扮演着不可替代的角色。然而, 我国水稻施肥方式常为人工撒施, 然后通过耕整地将其翻扣于土壤深层, 这种施肥方式不仅施肥量大, 而且撒施容易造成施肥不均匀, 影响水稻秧苗的生长进而影响其产量^[4], 这种做法还造成肥料利用率低, 影响经济效益。此外, 随着农村劳动力的转移, 逐渐规模化经营条件下, 生育期追肥依靠人工撒施已不适用^[5], 对施肥的机械化要求也越来越高^[6]。因此, 深入研究和采用先进的施肥技术, 以最大程度提高水稻产量, 对确保我国粮食供应的稳定性和可持续性具有重要意义。

水稻侧深施肥技术作为一项有效的栽培手段, 近年来引起了广泛的研究兴趣^[7-12]。该技术通过在插秧机上加装侧深施肥装置, 在机插秧的同时, 把

肥料均匀、定量地施入秧苗根侧 3 ~ 5 cm、深度 4 ~ 6 cm 的位置, 并覆盖于泥浆中, 避免肥料漂移, 促进秧苗根系对养分的吸收^[13]。与传统的水稻栽培施肥模式相比, 水稻机插秧同步侧深施肥技术通过在插秧的同时进行施肥, 可以更为精确、高效地为水稻提供所需养分。这一技术的引入, 旨在实现对水稻生长全过程中养分供应的科学管理, 以提升水稻的生长发育效果, 增加产量。近年来, 通过深入研究该技术在水稻生产中的应用, 已经明确该技术较传统施肥技术有提高产量^[14-15]、提高养分利用效率^[16-19]、减少环境污染^[11]、提高经济效益^[20-21]等方面的潜在益处。本文通过对已有文献的梳理, 总结出该技术近年来在国内外的的发展、核心技术要点 (机械与肥料) 及其施用效果 (水稻产量、稻田环境、肥料利用率、经济效益), 最后根据目前侧深施肥研究的现状, 探讨未来该领域的研究方向和发展趋势, 为该技术的发展和实践提供有益的参考。

1 水稻侧深施肥技术发展历程

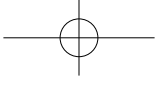
水稻机械化生产技术在当前主要有两大类型: 一类主要是以欧美为代表采用的直播机械化栽培技术, 另一类是日本等国家采用的移栽机械化栽培技术^[7]。其中日本秋田县早在 1973 年开始了侧深施肥的相关研究, 而后在 1980 年开始进行推广示范, 引入机插秧侧深施肥机械^[22], 随着技术普及范围的扩大, 推广面积也逐步提升, 1985 年推广面积

收稿日期: 2024-02-22; 录用日期: 2024-04-03

基金项目: 湖北省现代农业水稻产业技术体系项目 (2023HBSX4-01); 湖北洪山实验室重大项目 (2121hsz002); 湖北省重点研发计划项目 (2022BBA0048)。

作者简介: 吴朋浩 (2001-), 硕士研究生, 研究方向为作物养分管理, E-mail: wupenghao@webmail.hzau.edu.cn。

通讯作者: 李小坤, E-mail: lixiaokun@mail.hzau.edu.cn。



达 3559 hm²^[23], 1992 年, 日本全国机插秧同步侧深施肥水稻面积已经达到 247306 hm², 占日本全国水稻种植面积的 12%^[24]。2010 年超过 40% 的插秧机都安装了施肥装置^[25]。

我国关于水稻侧深施肥技术的研究较早, 早在 20 世纪 60 年代中期开展了大量的研究, 并研制出多种水田深施肥机具, 但是由于机械配套原因及作业效果不理想而未能大面积推广^[4, 26-28]。1994 年, 黑龙江省水田机械化研究所引入了水稻侧深施肥器, 并在省内展开示范推广, 一系列试验和示范表明, 该技术有节肥增产的优势, 因此, 在 50% 的插秧机上都配置了侧深施肥器, 截至 2000 年, 累计推广面积达 36.8 × 10⁴ hm²^[4, 28-30]。自 2012 年以来, 通过在现有的乘坐式高速插秧机上配置侧深施肥装置或整机购买等技术方案, 成功解决了施肥机械配套的难题^[31]。2014 年, 有研究者开始比较不同厂家的肥料侧深施肥效果^[32], 并在水稻基、蘖肥同时施用的基础上开展肥料梯度减量试验, 结果表明, 降低 10% 的肥料施用量仍能达到增产增收的目的^[33-34]。2018 年, 该技术被农业农村部列为 10 项重大引领性农业技术之一, 也是化肥减量增效的主推技术之一, 并且近年来在全国各地积极开展推广示范。

2 水稻侧深施肥机械

侧深施肥机械的原理是肥料在肥箱内由槽轮等排肥器将之排到输肥管中, 然后在风机的吹动下或者在螺旋装置的强制输肥作用下将肥料施入开沟器已开出的特定深度土壤施肥沟中, 肥料在水稻根系附近形成一条贮肥库, 从而实现施肥插秧同步进行。早在 20 世纪 60 年代, 我国便已成功研制出多种水田深施肥肥料机具, 然而作业效果并不理想, 因而难以广泛推广和应用^[35]。1976 年, 辽宁省营口市农业机械化科学研究所对辽河 77 (2F6-2) 型深层施肥机进行了水稻插前深施肥和追肥的试验, 结果表明, 该机械在作业中展现出了显著的增产效果^[35]。1980 年左右, 福建省农业科学院研制出了 2DS-2 型水田化肥深施肥, 该机具内部配备了螺旋搅龙, 通过螺旋搅龙的推动作用, 化肥能够顺利落入肥沟内, 从而有效改善了化肥堆积导致的架空现象, 并消除了化肥遇水潮解引起的落肥口堵塞问题。然而, 由于化肥仍然会粘在螺旋搅龙的叶片上, 影响了化肥颗粒的下落效果, 因此, 该机具并

未得到大范围的推广和应用^[36]。1997 年, 吉林省四平市农业机械化研究所研制的 2BF-630 型水田深施肥机, 具备一机多用的优点, 不仅可以用于水田深施底肥, 还可以用于旱田施肥及追肥^[37]。2001 年, 南京农业大学研制出了 1GH-6 型水稻肥料深施肥, 该机具运行稳定、施肥均匀度高, 但结构复杂、成本高^[38]。由于各种原因, 当时我国的水稻侧深施肥机械并未实现大面积推广, 相反, 日本对机械移栽和机械施肥的装置进行了大量研究, 并将系列产品实现了产业化, 其中以洋马、东风井关、久保田等企业为代表, 设计并生产了一系列水稻侧深施肥装置。近年来, 随着水稻侧深施肥技术的不断发展, 国内对水稻侧深施肥机械也有很多的研究与实践, 如苏州久富农业机械有限公司、南通富来威农业装备有限公司等企业也设计、改进并生产了系列水稻侧深施肥装置。据王晓丹等^[9]不完全统计, 截至 2020 年, 全国生产水稻侧深施肥装置的企业有 36 家 (包括国外在华企业), 机型达到 50 余个。表 1 列举了国内外生产侧深施肥机械公司的代表产品, 通过各公司官网及农机网等渠道总结了这些产品的主要技术参数与机械特点。此外, 我国关于侧深施肥机械的质量也制定了相关标准, 根据《施肥机械质量评价技术规范》(NY/T 1003—2006), 测试机械在排肥时施肥机各行排肥量的一致性、稳定性、均匀性及断条率等指标均应满足相应规定。

由于水田作业环境潮湿, 而侧深施肥过程中开沟器和深施肥管在泥水中运动, 如果单独依靠无动力侧深施肥 (槽轮等形式排肥, 依靠肥料自身重力落入施肥沟), 则会因肥料易遇水潮解、施肥管口易被泥水堵塞等问题导致下肥不准、肥料断条, 从而影响施肥作业质量^[7]。因此, 有学者开展了有关侧深施肥机械的核心部件中输肥动力装置的相关研究, 该装置按输肥动力方式可分为螺旋杆推送式和气吹风送式两种类型^[9]。但这两种输肥装置也各有其优缺点 (表 2), 由于气吹风送式侧深施肥装置对肥料性能的要求较低, 因此, 目前市面上常见的机械大部分搭载的是以风机为动力的输肥器。但是侧深施肥作业过程中仍有肥料堵塞等问题存在, 为了解决输肥管中的肥料堵塞及施肥量不稳定问题, 我国的部分学者也对侧深施肥的部件进行了研究与改进。陈长海^[39]对水稻插秧机侧深施肥技术及装置进行了研究, 设计出螺旋搅龙



强制排肥器。左兴健等^[40]研制了风送式水稻侧深精准施肥装置，通过鼓风机强制气吹输送肥料，施肥深度及肥料距秧苗之间的距离可通过排肥口与滑动板之间的距离进行调整。王金峰等^[41-42]设计了叶片调节式和气力输送式水稻侧深施肥装置。但是肥料落入施肥沟后，施肥沟无法快速弥合而导致出现肥料漂浮在水面的现象，因此，通过安装在插秧机浮板上的覆土板及时将施肥沟弥合，从而解决肥料漂浮的问题^[43]。此外，肖伟^[44]在施肥器上搭

载传感器与报警装置，对肥箱进行监控。由于在操控机械时施肥量可能会与机械手的操作熟练程度有关，有研究在高速插秧机上同时搭载 GPS 系统，计算车速从而调节施肥量，保证机插秧侧深施肥精准度^[40]。目前与侧深施肥机械相匹配的肥料主要是固体颗粒等肥料，而针对液态肥料，杨秀丽等^[45]设计了滑刀开沟-气力引射式液肥雾化侧深施肥装置，为水田液肥侧深施技术的应用提供参考。

表 1 不同型号高速插秧机（搭载侧深施肥装置）技术参数及机械特点

生产厂家	机械型号	技术参数	机械特点
洋马农机（中国）有限公司	洋马 YR60D 高速插秧机搭载 2FC-6G 侧深施肥装置	采用纵型筛盘滚筒+气吹式送肥，肥箱容量 78 L（13 L×6），可同时施肥 6 行。适用球型颗粒状肥料，粒径 2 ~ 5 mm，施肥量可调节为 60 ~ 915 kg/hm ² ；施肥位置为深（40±10）mm，侧面（50±10）mm	可无级调节施肥量，即根据实际需求更精准地调节施肥量，适应不同种植需求
东风井关农业机械有限公司	PZ60ADTLF 智能乘坐式高速插秧机搭载 2FH-1.8B 型侧深施肥装置	采用外槽轮排肥+气吹式送肥，肥箱容量 60 L，可同时施肥 6 行。适用颗粒状肥料，粒径 2 ~ 4 mm，施肥量可调节为 75 ~ 750 kg/hm ² ；施肥位置为深 50 mm，侧面 45 mm	发动机的热气被吸入鼓风机，防止肥料潮湿而堵塞，且可通过旋转手柄轻松调节排肥量
久保田农业机械（苏州）有限公司	高速插秧机 2ZGQ-6H（NSPV-6CMD）搭载 2FH-1.8C 侧深施肥装置、除草剂施药器、平地辊、GPS	采用带槽滚筒式排肥+气吹式送肥，肥箱容量 73.5 L，可同时施肥 6 行。适用颗粒状肥料，粒径 2 ~ 4 mm，施肥量可调节为 150 ~ 900 kg/hm ² ；施肥位置为深（40±10）mm，侧面 45 mm	多功能作业，配备 GPS 系统，实现作业的精确定位和导航，提高了作业效率
苏州久富农业机械有限公司	2ZG-6D（G6）乘坐式高速插秧机搭载 2FH-1.8C（6F2）侧深施肥装置	使用外槽轮装置排出配料+鼓风机气吹送肥，肥箱容量为 80 L（2×40 L），可同时施肥 6 行。适用颗粒状肥料，粒径 2 ~ 5 mm，施肥量可调节为 150 ~ 900 kg/hm ² ；施肥位置为深 50 mm，侧面 40 mm	采用分割式施肥箱，为操作者提供空间，方便加装秧苗，且配有缺肥和肥料堵塞报警装置
南通富来威农业装备有限公司	2ZG-6DMF 侧深施肥高速插秧机搭载 2FC-6F 侧深施肥装置	肥箱容量 60 kg，可同时施肥 6 行。适用颗粒状肥料，粒径 2 ~ 5 mm，施肥量可调节为 150 ~ 960 kg/hm ² ；施肥位置为深（40±10）mm，侧面（50±10）mm	施肥量调节范围宽泛，同时配有缺肥和肥料堵塞报警装置

表 2 侧深施肥装置不同输肥方式原理及特点

输肥方式	原理	特点	参考文献
螺旋杆推送式	通过螺旋形的输送器，将肥料强制从输肥管中排出	排肥能力强，不易堵塞，但对肥料的物理性状要求高，尤其是肥料硬度，否则会在输送肥料过程中将肥料挤压破碎	[46]
风送式	依靠风机的风压及肥料自身的重力将肥料从输肥管中排出	对肥料的要求低，但在输送肥料的过程中，受机械气压不足及肥料吸湿性的影响容易堵塞	[46-47]

3 水稻侧深施肥肥料

适宜的肥料是水稻侧深施肥技术的关键，一方面因为肥料的物理及力学特性是设计侧深施肥机械中排肥部件的重要参数^[35]；另一方面则是因为水田施肥作业环境潮湿等特点需要肥料有更好的吸湿性、硬度及养分配比等。首先，物理特性包括颗粒肥料的千粒重、三维尺寸、密度、休止角，而力学特性包括滑动摩擦角、静摩擦系数以及碰撞恢复系数。颗粒肥料的三轴尺寸决定了其外形尺寸，对施肥机关键部件的设计具有重要影响，并为后续的离散元仿真试验中建立颗粒肥料模型提供了参考依据。测量结果显示，史丹利三轴尺寸主要分布在2 ~ 3.5 mm 范围内，其球形度达到0.95，表明颗粒肥料具有较好的球形度^[48]。颗粒肥料的密度对施肥机的肥箱结构设计产生显著影响，由于颗粒肥料外形呈不规则球体，堆积时形成间隙，因此，密度可分为实际密度和堆积密度。实际密度是指除去颗粒肥料堆积时的间隙后，单位体积下的颗粒肥料质量；而堆积密度则包括颗粒肥料堆积时存在的间隙，单位体积内的颗粒肥料质量，为施肥机肥箱设计提供了参考依据。在施肥机排肥的过程中，颗粒肥料与排肥轮、肥箱等结构发生碰撞，因此，需要测量颗粒肥料与这些结构之间的碰撞恢复系数，为后续的离散元仿真试验提供参数，以使仿真结果更贴近真实情况，并为施肥机的研制提供参考。颗粒肥料与材料表面的接触性质可通过颗粒肥料的摩擦系数来表现，同时这一参数也可为离散元仿真试验提供设置依据，为风送式水稻侧深施肥装置的设计提供支持^[48-49]。

当前，水稻侧深施肥技术所用的肥料类型主要包括普通复合肥和缓控释肥料，然而，普通复合肥常因缺乏包膜而在机械施肥过程中容易吸湿，导致输肥管堵塞^[44]，一定程度上影响了施肥作业的效率，而缓控释肥料有较低的吸湿性，可能更适合用于侧深施肥。缓控释肥料是指通过各种方式使养分按照植物生长发育期对养分的需求而释放的肥料^[50]，目前，我国主要采用硫包衣肥料、树脂包膜肥料、合成型微溶态脲醛类缓释肥料和包裹型肥料等多种包衣类型的缓控释肥料^[51]。水稻侧深施肥技术结合缓控释肥料，不仅减少了施肥次数，还提高了肥料利用率，从而实现了产量和经济效益的双重提升^[14]。近年来，许多企业针对水稻侧深施肥技术的特定需求，研发设计了水稻侧深施肥专用缓控释肥料，如茂施农业科技有限公司研发设计了“稻坚强”水稻侧深施肥专用肥。然而，肥料的物理性质如硬度和粒径等也对施肥效果有不可忽视的影响（表3）。如硬度较低的肥料在输肥过程中容易被挤碎，且机械对肥料的粒径等指标也有要求。王晓丹等^[9]对我国15家肥料公司生产的肥料产品的性质进行了研究，具体包括缓控释肥料、掺混肥、专用肥、复合肥，研究结果表明，2 ~ 5 mm 粒径的比例占93.26% ~ 99.81%。此外，掺混肥在生产、运输、使用过程中容易导致肥料分布不均匀，很大程度上影响使用效果，而基础肥料颗粒的平均主导粒径和休止角是影响掺混肥养分分离的主要因素，原料肥平均主导粒径值在340 ~ 348 mm 较适宜掺混，休止角越小掺混后养分分布越均匀，实际生产过程中，应选用颗粒相似、休止角间差异小的原料肥进行掺混，可有效提高肥料产品施用的精准度^[52]。

表 3 肥料性质对侧深施肥的影响及适宜范围

肥料性质	影响因素	适宜范围	参考文献
粒型、粒径	影响与施肥机械的匹配度，影响排肥量的稳定性	圆粒状，2 ~ 5 mm	[9-10]
硬度	硬度不足导致肥料破碎，容易吸湿堵塞排肥管，影响排肥量	>20 N	[13]
吸湿性	肥料吸湿结块影响排肥量	24 h 吸湿率 <8% 相对稳定	[9]
休止角	影响肥料掺混的均匀度与机械排肥	越小越好	[52]
静摩擦系数	肥料颗粒在排肥器内的流动性、下落速度等均与其摩擦系数有关	—	[35]
堆积密度	与侧深施肥装置的肥箱容积设计相关	—	[48]

4 水稻侧深施肥技术效果

许多研究表明，水稻侧深施肥技术较常规撒施

有促进水稻生长发育、提高水稻产量、减少农业面源污染、提高经济效益等优点（图1）。

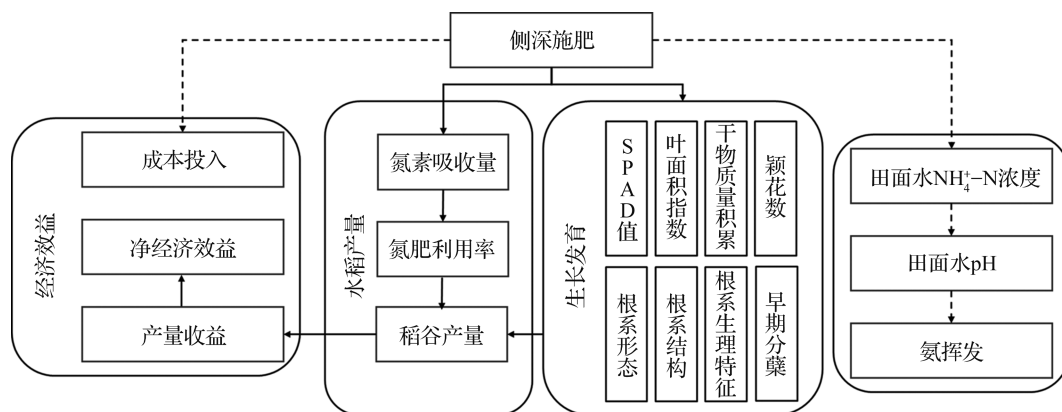


图1 水稻侧深施肥效果

注：参考改编自 Li 等^[14]；实线箭头连接代表正向效应（增加、改善），虚线箭头连接代表负向效应（降低、减少）。

4.1 产量

研究表明，缓释肥侧深施用较常规施肥可改善根系形态、结构和生理特征，增强根系吸收养分和水分能力，防止后期植株早衰，从而提高水稻产量，达到提高肥料利用效率，实现减氮增产的目的^[53]，机插秧侧深施氮下，水稻秧苗机插后未明显变黄，直接扎根生长，促进了返青进程^[33, 54]。并且在分蘖盛期能提高水稻的分蘖数^[19]，为后续的高有效穗数奠定了基础。侧深施肥处理可提高叶面积指数、叶绿素含量、养分吸收、干物质质量积累和每平方米颖花数来提高早、晚稻的产量^[21]。王贵兵^[19]通过多点、多品种的试验得出结论，侧深施肥较常规施肥主要通过增加有效穗数与每穗粒数来增加产量。此外，侧深施肥很大程度上能减少氨挥发，进而提高氮肥利用率^[14]，因此，该技术还有很好的节肥增产效应，但具体的肥料减施量尚存争议，有研究表明，减施化肥 10% ~ 20% 仍可以使单季稻增产或平产^[19]，而 Zhong 等^[21]研究表明，减氮 10% ~ 40% 处理的早、晚稻产量均高于常规施肥处理。

4.2 氨挥发及温室气体排放

常规的氮肥（如尿素、硫酸铵）施入土壤，尤其是过量施用的情况下，很容易通过挥发、硝化、反硝化或淋溶的方式以氨（ NH_3 ）、氧化亚氮（ N_2O ）、硝态氮（ NO_3^--N ）的形式损失^[55-57]。这不仅造成肥料利用率低，而且 N_2O 等温室气体排放也对环境有负面影响。侧深施肥对环境的良好效应主要表现在两方面，一是肥料深施；二是施用缓控释肥料。肥料深施较常规撒施能降低氨挥发损失量，早稻季和晚稻季氨挥发损失累积量较常规撒施处理

分别降低了 18.6% ~ 26.9% 和 20.1% ~ 21.8%，这是因为常规撒施处理的田面水中 NH_4^+-N 的含量更高^[16]，只种植一季中稻时，侧深施肥处理氨挥发损失累积量较常规撒施处理降低了 39.43% ~ 47.77%，同时氨挥发的最大峰值也会向后推移，这是因为侧深施肥处理肥料的氮素从土壤中迁移到田面水并溶解在田面水中需要经历一段时间^[19]。施用缓控释肥料是减少温室气体排放的有效途径之一^[56]，与常规撒施相比，早稻季施用控释尿素及减施 10% ~ 30% 控释尿素处理的 CH_4 排放总量减少 7.2% ~ 28.7%， N_2O 排放总量降低 2.1% ~ 28.6%；晚稻季 CH_4 排放总量减少 14.5% ~ 39.5%， N_2O 排放总量降低 13.8% ~ 25.0%^[58]，这可能是因为控释氮肥释放无机氮的速率慢，减少了淹水期闭蓄态 N_2O 的形成，因此，晒田期从稻田细缝中排放的 N_2O 量减少^[59]。

4.3 肥料利用率

水稻机插秧同步侧深施肥技术通过将肥料直接施于插秧一侧，为水稻植株提供了更为精确的氮素供应^[17]。植物对氮的吸收是生长发育的关键过程，而该技术精准地将氮素深施于植株根系附近，使得水稻能够更及时、更充分地吸收所需氮素，有助于减少氮素的流失和浪费，提高了氮素的利用效率^[18]。另外，施用缓控释氮肥是水稻机插秧同步侧深施肥技术中的关键环节之一，利用缓控释氮肥的特性，使得植株能够在整个生长季节中获得适量的氮素供应，避免了氮素在短时间内大量释放导致的浪费，通过延缓氮素的释放速度，减少前期氮投入能有效提高氮素利用率^[60-62]。关于一次性侧深施基肥与基追结合对肥料利用率的影响尚存争议，如王晓丹等^[9]



研究表明,一次性侧深施用氮肥可显著提高氮利用效率;侧深施肥后追施氮肥的增产增效作用与一次性侧深施肥相比差异不显著或小幅降低。然而,黄恒等^[63]研究表明,相对于一次性侧深施肥,侧深施肥结合后期追肥会使水稻获得更高的氮利用率。这可能是由于水稻在我国种植区域辽阔,而各地土壤肥力差异较大以及水稻类型及不同种植模式等原因导致水稻氮利用率响应特征不同^[15, 62]。

4.4 经济效益

缓控释肥料与侧深施肥技术相结合能降低施肥作业成本、提高肥料利用率、提高水稻产量、增加水稻生产效益,但是缓控释肥料的价格往往较普通复合肥和尿素等速效肥料高,这影响了农户对侧深施肥技术的认可及应用^[9, 14]。因此,在不影响水稻产量的前提下,选择适合一次性施用的肥料来减少施肥次数、减少氮肥用量是提高经济效益的关键。Zhong等^[21]研究表明,侧深施肥减氮20%~30%时,双季稻水稻籽粒的产量和净收益均高于全量肥料侧深施用处理,是一个实现水稻增产增收的选择;侧深施肥处理较常规施肥处理经济效益提高了9.9%~31.8%,不同试验点的提升幅度不同。而叶鑫等^[20]研究表明,侧深施肥在减少17%左右的施氮量下能与常规撒施肥料获得的产量相当;并且侧深施肥能节省人工成本和肥料投入3.16%~4.53%,增加经济效益581~1440元/hm²。Li等^[14]通过荟萃分析表明,肥料深施较常规撒施使水稻总产出和净经济效益分别提高了13.6%和11.5%。综上,侧深施肥具有良好的减肥增产增收效应^[64],但该良好效应会因种植区域土壤理化性质、水稻类型及种植模式有所差异^[15]。因此,需根据种植区域、水稻品种及种植模式等条件来合理确定肥料减施量,以达到减肥、增产增收的目标。

5 展望

水稻侧深施肥技术在推动水稻轻简化生产、化肥减量增效行动中发挥了积极作用,然而,目前仍然存在一些问题需要解决,并在未来进行更深层次的研究与发展。

(1) 水稻侧深施肥技术的系统化研究。当前对水稻侧深施肥技术的研究主要集中于对水稻产量及效益方面,关于该技术对“土壤-植物-环境”的整体系统研究较少,并且关于该技术的长期定位监

测效果评估也甚少。因此,今后可以加强关于该方面的研究,进一步探究明确水稻侧深施肥技术的整体效果及高产的生理机制等。

(2) 侧深施肥与节水灌溉的结合应用。侧深施肥通过优化养分管理,有节本增效增收等作用。但是除了养分管理,水分管管理也是水稻生产实践中的一个重要因素。如选用浅湿灌溉的节水灌溉模式能提高节水率并增加稻谷产量^[65]。但是目前在水稻侧深施肥实践中,水分管管理通常是常规漫灌,因此,研究节水灌溉与施肥管理等管理措施的综合效应是一个重要方向。

(3) 提高农机农艺结合程度。绝大多数农艺研究集中在如何提高作物产量,农艺研究人员对农机具的性能及作业特点了解不多,提出的农艺技术模式常常忽视农机作业的可行性,这对农机制造和推广应用造成一定困难^[5]。因此,未来的发展应当注重农艺农机的综合管理,并加强科研成果与实际生产之间的融合度,以确保技术的有效推广。

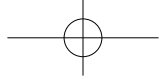
(4) 加强对适宜性质的肥料与侧深施肥机具相匹配的研究。通过田间试验、土壤测试与分析以及作物生长监测等手段,可以精确掌握不同区域土壤养分状况及作物生长特性,进而筛选出适宜的肥料性质、种类和配比;针对肥料性质及不同地区农业生产的实际情况,设计能适应不同土壤质地、稻田作业环境以及能满足所需施肥深度、效率要求的机具。此外,应在不同区域之间展开联合攻关研究,促进不同地区在肥料与机具匹配研究方面的交流与合作,这有助于汇聚不同区域优势资源,共同攻克技术难题,对提升施肥效果与农业生产效益、推动农业现代化具有重要意义。

参考文献:

- [1] 廖西元,陈庆根,庞乾林. 我国优质水稻生产现状与发展对策[J]. 农业技术经济, 2002(5): 32-34.
- [2] 赵凌,赵春芳,周丽慧,等. 中国水稻生产现状与发展趋势[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(10): 105-107.
- [3] 辛良杰,李秀彬,谈明洪. 2000—2010年我国农业化肥施用的时空演变格局[J]. 中国农业大学学报, 2013, 18(5): 21-27.
- [4] 毕春辉,陈长海,李明金,等. 浅谈水稻侧深施肥技术[J]. 农业装备技术, 2011, 37(6): 24-25.
- [5] 米国华,霍跃文,曾爱军,等. 作物养分管理的农机农艺结合技术研究进展[J]. 中国农业科学, 2022, 55(21): 4211-4224.
- [6] 白由路. 国内外施肥机械的发展概况及需求分析[J]. 中国



- 土壤与肥料, 2016 (3): 1-4.
- [7] 陈长海. 水稻侧深施肥技术的优越性及研究现状 [J]. 农机使用与维修, 2015 (10): 22-23.
- [8] 冒辛平. 水稻侧条施肥技术的应用与展望 [J]. 南方农业, 2019, 13 (24): 14-17.
- [9] 王晓丹, 向镜, 张玉屏, 等. 水稻机插同步侧深施肥技术进展及应用 [J]. 中国稻米, 2020, 26 (5): 53-57.
- [10] 丁艳锋, 李刚华, 李伟玮, 等. 水稻机插缓混一次施肥技术的研发与示范 [J]. 中国稻米, 2020, 26 (5): 11-15.
- [11] 马军, 叶迎, 赵考诚, 等. 机插水稻侧深施肥及其对水稻和环境的影响研究 [J]. 中国稻米, 2020, 26 (5): 58-61.
- [12] 张文斌. 水稻侧深施肥技术探究 [J]. 园艺与种苗, 2023, 43 (7): 96-97, 100.
- [13] 中华人民共和国农业农村部. 水稻侧深施肥技术指导意见 [EB/OL]. (2022-09-22) [2024-03-25]. http://www.moa.gov.cn/xw/zxfb/202209/t20220922_6411326.htm
- [14] Li L, Wu T, Li Y, et al. Deep fertilization improves rice productivity and reduces ammonia emissions from rice fields in China; a meta-analysis [J]. Field Crops Research, 2022, 289: 108704.
- [15] 胡洋, 肖大康, 李炫, 等. 侧深施氮对我国水稻产量和氮利用效率影响的整合分析 [J]. 中国土壤与肥料, 2024 (2): 138-145.
- [16] Zhong X, Zhou X, Fei J, et al. Reducing ammonia volatilization and increasing nitrogen use efficiency in machine-transplanted rice with side-deep fertilization in a double-cropping rice system in Southern China [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2021, 306: 107183.
- [17] 钟雪梅, 黄铁平, 彭建伟, 等. 机插同步一次性精量施肥对双季稻养分累积及利用率的影响 [J]. 中国水稻科学, 2019, 33 (5): 436-446.
- [18] 陈立才, 李艳大, 秦战强, 等. 侧深施用控释肥对机插中稻生长、产量及氮肥农学效率的影响 [J]. 安徽农业大学学报, 2020, 47 (5): 839-844.
- [19] 王贵兵. 机械侧深施肥对水稻生长、养分损失及肥料利用率的影响 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2022.
- [20] 叶鑫, 宫亮, 金丹丹, 等. 机插秧同步侧深施肥对水稻产量形成及经济效益的影响 [J]. 土壤通报, 2022, 53 (2): 429-437.
- [21] Zhong X, Peng J, Kang X, et al. Optimizing agronomic traits and increasing economic returns of machine-transplanted rice with side-deep fertilization of double-cropping rice system in southern China [J]. Field Crops Research, 2021, 270: 108191.
- [22] 柴田义彦, 郭锦生. 水稻侧条施肥技术的概要 [J]. 盐碱地利用, 1986 (6): 38-47.
- [23] 金志龙. 水稻侧条施肥技术 [J]. 上海农业科技, 1988 (2): 46-47.
- [24] 许德海. 日本水稻的低成本生产技术简介 [J]. 中国稻米, 1994 (2): 41-42.
- [25] 黄凰, 曹卫华, 杨敏丽, 等. 水稻多功能插秧机侧向深施肥试验效果分析 [J]. 中国农业大学学报, 2014, 19 (4): 150-154.
- [26] 张波屏. 我国施肥机械的发展概况 [J]. 粮油加工与食品机械, 1989 (5): 1-6.
- [27] 张波屏. 我国施肥机械的发展概况 (续) [J]. 粮油加工与食品机械, 1989 (6): 1-4.
- [28] 解保胜. 水稻侧深施肥技术 [J]. 垦殖与稻作, 2000 (1): 18-20.
- [29] 李伟东, 孙显忠, 李成江. 寒地水稻机插侧深施肥技术应用效果 [J]. 现代化农业, 2002 (4): 17.
- [30] 孙卫光. 水稻机插侧深施肥技术应用效果初探 [J]. 中国稻米, 2003 (3): 26.
- [31] 张晨晖. 侧深施肥水稻高产形成的根系形态生理特征初步研究 [D]. 扬州: 扬州大学, 2023.
- [32] 牛艳凯, 张卓, 聂强, 等. 寒地水稻不同肥料侧深施肥试验 [J]. 农民致富之友, 2018 (24): 62.
- [33] 赵红玉, 徐寿军, 杨成林, 等. 侧深施肥技术对寒地水稻生长及产量形成的影响 [J]. 内蒙古民族大学学报 (自然科学版), 2017, 32 (4): 347-352.
- [34] 杨成林, 王丽妍, 赵红玉. 侧深施肥对寒地水稻产量及肥料利用率的影响 [J]. 广东农业科学, 2017, 44 (8): 61-65.
- [35] 吴苗苗. 水稻侧深施肥机的设计 [D]. 杭州: 浙江理工大学, 2017.
- [36] 陈敏. 2DS-2 型水田化肥点深施肥机的研究 [J]. 粮油加工与食品机械, 1985 (6): 18-23.
- [37] 余淑琴, 姜富. 2BF-630 型水田深施肥机 [J]. 粮油加工与食品机械, 1998 (6): 11, 13.
- [38] 姬长英, 吕正洋, 汤拯东, 等. 1GH-6 型水田化肥深施肥机应用效果分析 [J]. 农业机械学报, 2002 (6): 34-37.
- [39] 陈长海. 水稻插秧机螺旋搅龙式侧深施肥装置的设计与试验研究 [D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2016.
- [40] 左兴健, 武广伟, 付卫强, 等. 风送式水稻侧深精准施肥装置的设计与试验 [J]. 农业工程学报, 2016 (3): 14-21.
- [41] 王金峰, 高观保, 翁武雄, 等. 水田侧深施肥装置关键部件设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2018, 49 (6): 92-104.
- [42] 王金峰, 高观保, 王金武, 等. 叶片调节式水田侧深施肥装置设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2018, 49 (3): 68-76.
- [43] 位国建, 荐世春, 李娜, 等. 水田侧深施肥装置的分析与试验 [J]. 农机化研究, 2019, 41 (4): 154-159.
- [44] 肖伟. 水稻侧深施肥机的关键技术研究 [D]. 杭州: 浙江理工大学, 2019.
- [45] 杨秀丽, 陈彬, 邢航, 等. 滑刀开沟-气力喷射式液肥雾化侧深施肥装置设计与试验 [J]. 农业工程学报, 2023, 39 (16): 13-25.
- [46] Wang J, Wang Z, Weng W, et al. Development status and trends in side-deep fertilization of rice [J]. Renewable Agriculture and Food Systems, 2022, 37 (5): 550-575.
- [47] 张雅蓉, 谢方平, 符志勇, 等. 水稻机插秧同步智能侧深施肥装置研究现状与展望 [J]. 农业装备与车辆工程, 2023, 61 (8): 51-55.



- [48] 张胤培. 风送式水稻侧深施肥装置的设计与试验 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2023.
- [49] 栗霞飞, 赵满全, 刘飞, 等. 一种基于离散元摩擦因数测定仪改进设计 [J]. 农机化研究, 2019, 41 (5): 76-80.
- [50] 程爽, 车阳, 田晋钰, 等. 水稻缓控释氮肥应用研究现状与展望 [J]. 扬州大学学报 (农业与生命科学版), 2020, 41 (2): 1-8.
- [51] 姚先荣. 缓 / 控释肥料的研究进展及发展趋势 [J]. 现代农业科技, 2019 (2): 133-135.
- [52] 曹书境, 王少杰, 王寅, 等. 掺混肥常用基础肥料的物理性状及其适配性 [J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25 (4): 647-653.
- [53] 张晨晖, 章岩, 李国辉, 等. 侧深施肥下水稻高产形成的根系形态及其生理变化特征 [J]. 作物学报, 2023, 49 (4): 1039-1051.
- [54] 马昕, 杨艳明, 刘智蕾, 等. 机械侧深施控释掺混肥提高寒地水稻的产量和效益 [J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23 (4): 1095-1103.
- [55] 位国建, 荐世春, 崔荣江, 等. 水稻机插秧同步侧深施肥技术分析 [J]. 农机化研究, 2017, 39 (9): 190-194.
- [56] Lü H, Wang X, Pan Z, et al. Assessment of the crucial factors influencing the responses of ammonia and nitrous oxide emissions to controlled release nitrogen fertilizer: a meta-analysis [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2023, 22 (11): 3549-3559.
- [57] Liu L, Lian Z, Ouyang W, et al. Potential of optimizing irrigation and fertilization management for sustainable rice production in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 432: 139738.
- [58] 田昌, 周旋, 黄思怡, 等. 控释尿素减施对稻田 CH₄ 和 N₂O 排放及经济效益的影响 [J]. 生态环境学报, 2019, 28 (11): 2223-2230.
- [59] 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.
- [60] Peng S, Buresh R J, Huang J, et al. Strategies for overcoming low agronomic nitrogen use efficiency in irrigated rice systems in China [J]. Field Crops Research, 2006, 96 (1): 37-47.
- [61] 张爱平, 刘汝亮, 杨世琦, 等. 基于缓释肥的侧条施肥技术对水稻产量和氮素流失的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2012, 31 (3): 555-562.
- [62] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径 [J]. 土壤学报, 2008 (5): 915-924.
- [63] 黄恒, 姜恒鑫, 刘光明, 等. 侧深施氮对水稻产量及氮素吸收利用的影响 [J]. 作物学报, 2021, 47 (11): 2232-2249.
- [64] 肖玉苹, 覃金华, 徐建强. 水稻机插侧深施控释肥技术的氮肥减施效应 [J]. 浙江农业科学, 2023, 64 (9): 2136-2139.
- [65] Zhuang Y, Zhang L, Li S, et al. Effects and potential of water-saving irrigation for rice production in China [J]. Agricultural Water Management, 2019, 217: 374-382.

Research progress and prospect of rice side deep fertilization technology

WU Peng-hao¹, DAI Zhi-gang², GONG Xi-min², LI Xiao-kun^{1, 3*} (1. Key Laboratory of Cultivated Land Conservation in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Trace Elements Research Center, Huazhong Agricultural University, Wuhan Hubei 430070; 2. Hubei General Station of Cultivated Land Quality and Fertilizer, Wuhan Hubei 430070; 3. Shuangshui and Shuanglv Research Institute, Huazhong Agricultural University, Wuhan Hubei 430070)

Abstract: Deep placement of fertilizers is a scientific fertilization method proposed in contrast to surface application or shallow placement. It is an important approach to improve fertilizer utilization efficiency. Rice is one of the main food crops in China, and the technology of rice side deep fertilization is a new integrated technology of agricultural machinery, rice special fertilizer and supporting agronomy, which is a major innovation of fertilization technology. In this paper, the development of rice side deep fertilization technology, the research progress of rice side deep fertilization machinery and special fertilizer were reviewed and the effects of this technology on rice yield, paddy field environment, fertilizer utilization efficiency and economic benefit were summarized. Finally, the research direction and development trend of this field were prospected, in order to provide a basis for the sustainable application and popularization of rice side deep fertilization technology.

Key words: side deep fertilization; rice yield; fertilizer utilization efficiency; environment-friendly; economic benefits