

李小坤,任涛,鲁剑巍.长江流域水稻-油菜轮作体系氮肥增产增效综合调控[J].华中农业大学学报,2021,40(3):13-20.

DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2021.03.003

长江流域水稻-油菜轮作体系氮肥增产增效综合调控

李小坤,任涛,鲁剑巍

华中农业大学资源与环境学院/农业农村部长江中下游耕地保育重点实验室/

国家环境保护土壤健康诊断与绿色修复重点实验室/华中农业大学微量元素研究中心,武汉 430070

摘要 长江流域是我国水稻、油菜主要产区,水稻-油菜轮作是主要种植模式。施肥是维持和提升轮作系统生产力的物质基础,肥料尤其是氮肥的施用对提高产量起着至关重要的作用,但过量或不合理施用不仅造成作物抗逆能力弱、氮肥利用率低、品质和经济效益差,而且导致养分在环境中累积,影响大气、水体质量和人畜健康。本文针对长江流域水稻-油菜轮作体系耕层土壤碳氮含量低,氮肥用量高、损失严重、氮肥利用率低的问题,通过水稻-油菜轮作体系周年养分运筹、土壤碳氮协同调控、缓/控释肥料施用对氮损失的阻控、施肥方法的改进、高产高效栽培等技术协同优化建立综合调控模式,以期为长江流域水稻-油菜轮作体系氮肥增产增效提供理论与技术支撑。

关键词 长江经济带;水稻-油菜轮作;农业绿色发展;碳氮协同调控;秸秆还田增碳;缓/控释肥料;增产增效

中图分类号 S 506.2;S 511 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2021)03-0013-08

水稻是我国主要粮食作物之一,约占粮食总产量的40%。稻米是人们赖以生存的主食。水稻生产的可持续发展不仅担负着确保国家粮食安全的重任,而且肩负着实现种粮增产增效、农民增收和全面推进新农村建设的重大使命^[1]。我国水稻种植分布在长江流域、东北平原和东南沿海等区域,其中长江流域是最大的水稻生产区^[2]。中国农村统计年鉴数据显示,长江流域水稻播种面积约2 000万hm²,总产量1.38亿t,均占全国总量的2/3左右^[3]。促进长江流域水稻产业的可持续发展,对提升水稻产业技术进步,保障国家粮食安全具有重要作用^[2]。增加稻田复种指数和科学施肥是提高稻田生产力的重要措施^[4]。

水旱轮作是增加稻田复种指数的基本方法^[5]。根据旱地作物的不同,水旱轮作的主要种植方式包括油菜-水稻、小麦-水稻、绿肥-水稻等^[6]。水旱轮作体系的典型特点是作物系统的水旱交替导致了土壤系统在不同作物间的干湿变化,直接影响着土壤养分的迁移、形态转化和积累,进而决定着养分资源的

吸收利用,构成独特的土壤肥力和生态环境^[7-8]。由于集约化程度高,在功能上无论是物质循环还是能量转化强度都高于旱地和湿地^[9]。施肥是维持和提升稻田系统生产力的物质基础^[10]。近几十年来,我国水稻产量的不断增加得益于化肥,尤其是氮肥的施用。调查分析结果显示,我国水稻氮肥的平均施用量为180 kg/hm²,比世界平均用量高75%左右^[11]。氮肥的施用显著提高了稻田生产力,但是过量和不合理的施用不仅造成氮肥利用率低、作物品质和经济效益差,而且导致养分在环境中不断累积,影响大气、水体质量和人畜健康^[5]。减少农业生产中氮肥等养分资源的过量投入并持续提高作物的产量,保障国家粮食安全是未来实现农业绿色发展面临的重大挑战^[12]。

长江流域也是我国油菜主产区,该区油菜种植面积600多万hm²,占全国油菜面积的80%左右。油菜与水稻实行复种轮作便于利用土地,合理安排作物布局,发展粮食和油料生产^[13]。由于氮素管理方面过度依赖于对化肥氮本身的调控,水稻-油菜轮

收稿日期:2021-04-10

基金项目:国家重点研发计划(2017YFD0200108)

李小坤,E-mail:lixiaokun@mail.hzau.edu.cn

通信作者:鲁剑巍,E-mail:lunm@mail.hzau.edu.cn

作体系仍然存在氮素投入高、利用率低、损失严重等问题。本文以笔者所在团队多年的研究结果为主并结合相关文献资料,对土壤无机氮库调控、土壤有机碳库调控、高产高效栽培技术等协同优化建立综合调控模式进行总结,以期对水稻-油菜轮作体系氮肥增产增效提供理论与技术支撑。

1 水稻-油菜轮作体系氮肥增产增效主要限制因子

1.1 耕层土壤有机碳/氮含量低

土壤有机质和土壤全氮是反映土壤肥力的重要指标^[14]。有机质除了改善土壤物理性质、化学性质和生物性质,如土壤缓冲性能,吸附、离子交换性能和络合能力等作用外,还含有作物生长发育所需要的多种养分,是包含氮素在内的许多营养元素的主要场地。土壤表层中约有80%~97%的氮存在于土壤有机质中。土壤全氮由有机氮和无机氮组成,在一定程度上可以代表土壤的供氮水平。土壤全氮含量相对稳定,但也处于动态变化之中。20世纪60年代,长江流域土壤有机质和全氮平均含量分别为18.3、1.2 g/kg;21世纪初,有机质和全氮平均含量分别为26.1、1.5 g/kg,均有增加的趋势^[15];2018年,430个土壤样本分析结果显示,有机质和全氮平均含量分别为25.9、1.47 g/kg,近20年来无显著变化^[16]。长江流域水旱轮作区耕层土壤有机质和全氮含量低,在长期水稻-油菜轮作种植下不能连续提供足量的养分^[17]。

1.2 秸秆还田增碳与温室气体增排的矛盾突出

水稻-油菜轮作体系油菜季土壤氮残留较多^[18],干湿交替导致累积氮的大量损失^[19]。秸秆还田可显著降低油菜收获后的土壤硝态氮残留,提高作物产量和含氮量,增强土壤微生物氮素固持能力,有效降低土壤氮素流失风险^[20]。秸秆还田是水稻生产中普遍采用的一项措施,具有固碳和促进养分元素循环、减少生产中的化肥施用等生态环境功能,但亦存在温室气体排放问题。逯非等^[21]研究发现由于秸秆还田增加排放的 CH_4 所导致的全球增温潜势平均为土壤固碳减排潜势的2.18倍,而在湖南和江西等亚热带双季稻区的结果显示这个比值达3.50~5.24。可见,秸秆还田增碳与温室气体排放加剧的矛盾突出。如何做到既增碳又减少 CH_4 和 NO_2 的排放呢?或者如何实现提高稻田土壤有机质含量进而达到土壤固碳减排增汇和增产的作用?有

待进一步研究^[22]。

1.3 氮肥施用不合理

调查分析发现,长江流域油菜生产中的氮肥用量 $<150 \text{ kg/hm}^2$ 和 $>270 \text{ kg/hm}^2$ 的农户比例分别为47.4%和15.8%,施用过量和不足的现象均非常普遍;而且氮肥品种(养分形态)、施肥方式、施用时期等也存在一些问题,如施用最普遍的氮肥品种是尿素和复合肥,硼肥的施用比例较低;施肥方式多采用撒施;氮与磷、钾养分比例不协调;普遍追肥1次,氮肥的基施比例不合理等,限制了产业的发展^[23]。密度是影响作物产量的重要因素,欧洲、加拿大和澳大利亚适宜的油菜种植密度为50~80株/ m^2 ,而长江流域密度则仅为30~59株/ m^2 ^[24]。水稻种植逐渐向机械化和规模化方向发展,而机械化种植和耕作技术的结合不够紧密,稻田机械平地质量较差,而造成机插效果不佳^[25]。水稻的氮肥利用率相对较低,其主要原因可能与氮肥施用量较高(与生产水平相当的国家相比高30%~50%)而产量相对较低,过量的氮肥投入导致大量的氮素通过氨挥发、反硝化、径流和淋溶等途径损失。另外,氮肥运筹不合理(前重后轻)、中期晒田(氮素损失加剧)、高产水稻品种的推广应用(耐肥性强)等也是导致水稻氮肥利用率低的重要原因^[26]。可见,改进水稻-油菜轮作体系氮肥施用技术和优化栽培管理措施对实现作物的高产和高效同样重要。

2 水稻-油菜轮作体系氮肥增产增效调控途径

2.1 周年养分运筹

1) 水稻季氮素总量控制、分期调控。根据目标产量和不同产量水平下单位产量水稻吸氮量确定全生育期施氮量,即总量控制。根据关键生育期水稻长势调整追肥用量,进行分期调控。研究表明,与习惯施肥处理相比,水稻季氮素总量控制、分期调控处理增产142.2~415.1 kg/hm^2 ;氮肥利用率、肥料偏生产力均有一定程度的提高^[27]。利用氮肥总量控制、分期调控技术和有机肥适量替代化肥的优化管理措施可以在减少氮肥用量的基础上,实现养分供应与氮素需求的同步,促进水稻对氮素的吸收、积累和转运,有利于干物质的积累,最终协同提高水稻产量和氮肥利用率^[28]。

2) 油菜季根层氮素养分管理。不同生长发育阶段,氮素的推荐用量由氮素目标供应值扣除施氮前

根区土壤无机氮(N_{\min})供应值后确定。准确的氮素供应目标值就显得非常重要,这是基于土壤 N_{\min} 测试进行氮肥推荐的前提条件。研究表明^[29],油菜越冬期、蕾薹期、花期和成熟期前的土壤 N_{\min} 分别为 63~71、47~51、72~75 和 54~56 kg/hm²。与习惯施肥(编号 FN)处理相比,2011—2012 年,在产量无显著差异的条件下,目标氮素(编号 SN)处理氮肥投入量减少了 42.2%;2012—2013 年,SN 处理的氮肥用量增加了 53 kg/hm²,但产量增加了 11.9% ($P<0.05$)。两季平均结果显示,SN 处理可以在稳产的条件下(与 FN 处理相比无显著差异)减少氮肥用量 6.1%。与 SN 处理相比,提高氮素供应目标值(SN_{1.25})增加了氮肥投入量,但并无显著增产效果;而如果降低氮素供应目标值(SN_{0.75}),虽然减少了氮肥投入量但也显著降低了油菜籽产量。2011—2012 年,SN 处理的氮肥利用率显著高于 FN 处理,为 63.5%;2012—2013 年,SN 处理氮肥利用率与 FN 处理相比差异不显著,为 40.2%。如果提高氮素供应目标值,会降低氮肥利用率。整体来看,两季 SN 处理氮肥利用率显著高于 FN 处理,为 51.9%。

2.2 增加土壤碳库,碳氮协同调控

秸秆还田通过活性碳的输入,增加土壤微生物量碳库,调控微生物量碳氮比,增加土壤微生物碳氮流通量,提高土壤碳氮的储存及氮素供应能力。笔者所在课题组 2015—2019 年期间多点田间试验结果表明,与常规施肥(NPK)处理相比,湖北武穴、武汉和沙洋试验点秸秆还田处理(NPK+S_i)油菜氮吸收量分别增加 7.7%、17.3%和 1.6%;水稻氮吸收量分别增加 9.6%、9.2%和 4.0%。氮肥的投入与作物吸收是影响氮平衡的主要因素,不施氮(PK)处理均出现氮亏缺,NPK 和 NPK+S_i 处理均出现氮盈余,秸秆还田分别增加作物对氮的吸收和土壤氮盈余量。氮肥的施用对土壤可溶性有机碳(DOC)含量无明显影响,武汉和沙洋试验点秸秆还田明显增加油菜及水稻季土壤 DOC 含量,武穴点秸秆还田仅在水稻季增加土壤 DOC 含量。施肥和秸秆还田均明显增加土壤可溶性有机氮(DON)含量。与 NPK 处理相比,NPK+S_i 处理微生物 C 含量分别增加 4.9%、20.1%和 15.2%,秸秆还田为微生物提供直接碳源,增加了微生物对碳的同化量。土壤微生物量 N 对环境条件非常敏感,施肥及秸秆还田措施都会影响土壤微生物氮的含量。与 NPK 处理相比,NPK+S_i 处理平均微生物量氮分别增加 14.7%、

12.8%和 11.7%。可见,施氮可一定程度地提高微生物氮含量,秸秆还田与氮肥配施对微生物量氮的提升幅度更加显著。土壤微生物碳氮比(MBC/MBN)反映了土壤微生物对氮素有效性的调节作用潜力。MBC/MBN 小说明微生物在矿化土壤有机质中释放氮的潜力较大,土壤 MBN 对土壤有效 N 库有补充作用;MBC/MBN 大则说明土壤微生物对土壤氮素有同化趋势,易出现微生物与作物竞争性吸收土壤活性氮的现象,具有较强固氮潜力。NPK 处理土壤平均 MBC/MBN 为 11.7,而 NPK+S_i 处理平均 10.8,说明秸秆还田有利于增加土壤供 N 潜力。MBC/MBN 范围为 7.8~8.6 时属于微生物活动的合适范围,MBC/MBN 小于此范围时,施肥或秸秆还田提高其比值,MBC/MBN 大于此范围时,施肥或秸秆还田降低其比值。

秸秆还田具有固碳和增加氮素供应的能力,但水稻季秸秆直接还田与温室气体排放矛盾加剧。水稻季采用生物炭还田、油菜季采用秸秆覆盖还田,可以在减少氮肥用量的条件下维持作物产量,同时减少氨挥发和 N₂O 排放造成的氮损失,减少了农田温室气体排放造成的环境污染。研究结果表明^[30],与单施化肥(N)处理相比,氮肥减施 15%+水稻季生物炭还田/油菜季稻草覆盖处理(85%N+B/S)作物产量与 N 处理相比无显著差异,说明综合调控模式可以适当减少氮肥用量。与 N 处理相比,85%N+B/S 处理水稻和油菜的平均氮肥利用率和氮肥农学利用率显著提高,平均氮肥利用率与 N 处理相比增加 10.8%和 5.5%;平均氮肥农学利用率与 N 处理相比增加 6.6、2.3 kg/kg。说明碳氮协同调控能够在适当减施氮肥条件下既增加作物产量,又提高氮肥利用率。水稻季施氮后氨挥发损失较高,基肥和追肥都会产生大量的氨挥发损失。秸秆粉碎还田处理加剧水稻季施肥后的氨挥发损失,氨挥发累积量为 21.86 kg/hm²,与 N 处理相比增加 12.8%;85%N+B/S 处理对氨挥发损失无显著影响;油菜季追施薹肥的结果与越冬肥后结果大致相同,秸秆覆盖还田处理氨挥发累积量为 0.99~1.30 kg/hm²,与 N 处理相比增加 21.8%~58.9%,生物炭还田后氨挥发累积量为 0.53 kg/hm²,与 N 处理相比降低 34.7%;不同的是 85%N+B/S 处理氨挥发累积量为 0.68 kg/hm² 与 N 处理相比降低 16.6%。全生育期,秸秆覆盖还田加剧了油菜季氨挥发损失,增幅 70.1%~87.6%;生物炭还田降低了氨

挥发损失,降幅 28.9%。N 处理水稻季 N_2O 排放累积量最高,为 3.53 kg/hm²,显著高于其他处理。秸秆还田能够降低水稻季施氮后 N_2O 排放,排放累积量为 1.91 kg/hm²,与 N 处理相比降低 45.8%; 85% N + B/S 处理 N_2O 排放累积量为 2.04 kg/hm²,与 N 处理相比增加 7.5%。

2.3 缓控释肥料施用对氮损失的阻控

广义上讲,缓控释肥料是指养分释放缓慢、释放期较长、在整个生育期均可满足作物养分需求的肥料。缓控释尿素可以减缓或控制肥料中氮素的释放速率或其在土壤中的转化速率,以实现氮素供应与作物需求同步,从而实现提高氮肥利用率和减少环境污染的目的。水稻和油菜分别采用聚氨酯包膜控释尿素和抑制剂型缓释肥料实现轮作体系作物稳产高产,并显著降低氮挥发和温室气体排放。与习惯施肥(FFP)处理相比,不同施氮处理在减少氮肥投入 21.4% 的条件下,氮挥发累积损失量和损失率均显著降低,其中控释尿素(CRU)处理的降幅最大,在水稻季和油菜季降幅分别为 71.8%~84.5% 和 75.8%~80.6%。与普通尿素一次施用处理相比,普通尿素分次施用处理水稻季氮挥发减幅为 18.6%~32.8%;而油菜季则增加了排放,增幅为 25.7%~46.6%。与普通尿素处理相比,控释尿素可以减少周年氮挥发累积损失率 58.5%~78.6%^[31]。缓控释尿素可以显著降低 N_2O 累积排放量,与 FFP 处理相比,早稻季 CRU 处理 N_2O 累积排放量减少 0.12~0.52 kg/hm²,减幅为 7.7%~28.9%;晚稻季减少 0.86~1.01 kg/hm²,减幅为 35.5%~61.2%。

2.4 施肥方法

氮肥集中施用是减少氮素损失、提高化肥利用率、节省成本、增加效益的重要技术途径。水稻机插秧同步侧深施肥可以显著提高产量、养分吸收和肥料利用率。2020 年度笔者团队多点田间试验结果显示:与不施肥处理相比,不同试验点机插秧同步侧深施肥处理平均增产 3 581.8 kg/hm²,增产率为 52.7%;与常规施肥处理相比,平均增产 831.8 kg/hm²,增产率为 8.7%。养分吸收结果显示,与常规施肥处理相比,不同试验点机插秧同步侧深施肥处理地上部氮、磷和钾养分积累量平均分别增加 9.8%、7.3% 和 8.8%。不同试验点机插秧同步侧深施肥处理的肥料生理利用率、农学利用率、肥料贡献率和肥料偏生产力平均分别为 19.9 kg/kg、11.2

kg/kg、32.1% 和 31.9 kg/kg,与常规施肥处理相比,平均分别增加 9.5%、32.2%、26.6% 和 10.5%。不同施肥方法在油菜季的研究结果显示,与表施处理相比,移栽和直播 2 种栽培方式下氮肥集中施用处理的产量平均增幅分别为 18.2% 和 23.8%^[29]。氮肥的集中施用可显著增加油菜干物质积累量,特别是增加了开花后油菜地下部和地上部干物质的同步累积,从而提高产量。所以,实际生产中移栽油菜应采取穴施、直播油菜可采用条施的氮肥集中施用技术。特别在土壤氮素供应能力较低条件下,氮肥集中施用可以减少氮肥损失、保证土壤氮素供应,获得高产。

2.5 高产高效栽培技术

1) 水分管理与氮肥。水分和养分对水稻的影响是相互的。水分一方面可以促进氮素的转化,另一方面也促进作物根系对氮素的吸收;同时氮素通过影响根系形态、结构和功能等调控水稻的吸水性能。与常规灌溉(W2)处理相比,浸润式灌溉(W1)处理水稻产量平均增加 18.5%,淹水灌溉(W3)处理则无显著差异。与 N0 处理相比,各施氮处理的水稻产量均显著增加,平均增幅为 88.0%。灌溉模式与施氮量对根系形态、根系活力、氮素吸收以及氮素干物质生产效率具有明显的促进作用,对总根长、根体积、根尖数、根系伤流速度以及根、茎、叶、穗各器官生物量、群体生长速率等影响存在显著交互作用。试验条件下,浸润式灌溉模式下施用 165 kg/hm² 氮肥可在获得较高产量的同时提高水分和氮肥利用效率并改善稻米品质^[32]。水分管理在油菜生产上同样重要。苗期渍水,油菜的生长发育受抑制,与正常水分处理相比,叶片数、叶面积和叶绿素含量均有不同程度减少,进而降低干物质积累量,影响氮素的吸收和利用,对油菜生长造成不可恢复的影响^[29]。试验结果显示,与正常水分管理处理相比,苗期渍水处理油菜籽产量显著降低 23.6%,主要原因是成苗密度和单株角果数下降,与正常水分处理相比,分别降低了 7.6% 和 20.4%。施氮则明显促进了油菜生长发育,改善了群体质量,可以缓解苗期渍水引起的产量损失。合理施用氮肥对苗期渍水油菜生长的恢复具有良好的补偿效应,说明二者存在互作效应。研究结果还显示,与渍水处理相比,在保证产量不降低的情况下,正常水分管理处理可节省氮肥 59.2 kg/hm²。

2) 密度与氮肥用量。作物产量是群体产量,群

体结构合理与否与最终产量关系密切。栽培密度和施氮量均是影响群体结构的重要因素。优化油菜栽培密度是获得高产的前提,高密栽培时,植株个体的干物质积累量和单株角果数均显著减少;合适施用氮肥则可以增加单株角果数进而提高油菜籽产量^[25]。栽培密度较低时,油菜籽产量随着氮肥用量的增加而显著增加;密度较高时,随着氮肥用量的增加并不能持续提高产量。当栽培密度较高时,油菜籽粒、茎秆和角壳氮素累积量随产量增加呈指数增长;高量的氮肥投入虽能提高该种植密度下植株的氮素吸收,但对籽粒产量无显著影响。当目标产量为 3 000 kg/hm²时,适宜密度为 9.0×10⁴株/hm²,施氮量为 163.7 kg/hm²。密度不同,氮肥管理策略也不同。低密条件下(7.0×10⁴~8.0×10⁴株/hm²),增加氮肥用量(增幅 13.9%~34.8%)可以增加单株角果数,从而提高产量;高密条件下(10.0×10⁴~12.0×10⁴株/hm²)可以减少氮肥投入(减幅 10.3%~23.7%)从而优化群体结构。水稻氮密互作试验结果表明^[33],作为个体,水稻的有效穗数随着氮肥用量的增加而显著提高,而随着插秧密度的增加而降低。作为群体,单位面积的有效穗数均随着氮肥用量和插秧密度的增加而显著提高。与不施氮处理相比,2014年和2015年施氮处理单位面积的平均有效穗数每公顷分别增加了 39.0×10⁴和 31.9×10⁴,增幅分别为 22.9%和 29.6%。插秧密度越大,单位面积的有效穗数越多。然而,过高的插秧密度不利于成穗。栽培密度 27×10⁴穴/hm²处理

下的有效穗数要显著高于栽培密度 33×10⁴穴/hm²处理。同样,穗粒数也随着氮肥用量的增加而增加,随着插秧密度的增加而降低。氮肥用量和插秧密度对结实率和千粒重的影响相似,都随着氮肥用量和插秧密度的增加而降低。交互作用分析结果表明氮肥用量显著影响着 4 个产量构成因子,而插秧密度只显著影响了穗粒数和结实率。当氮肥用量为 165 kg/hm²,栽培密度为 24×10⁴~27×10⁴穴/hm²时,可以获得较高产量和氮肥利用率。

3 水稻-油菜轮作体系氮肥增产增效综合调控与展望

集成单项调控途径建立长江流域水稻-油菜轮作体系氮肥增产增效综合调控模式,其核心内容为“两扩两调一减”(图 1)。即:秸秆还田有机扩库、深耕扩容;周年养分运筹和作物专用缓/控释肥料调控、高产高效栽培技术调控;减少水稻-油菜轮作体系氮素盈余。水稻-油菜轮作体系氮肥增产增效综合调控模式已在湖北、湖南、安徽、江西、江苏等区域应用。与习惯用量施肥处理相比,水稻可平均增产 7.8%,减少 1~2 次施肥,省工 0.3 个/667 m²,氮肥的农学效率提高 8.8%,氮肥利用率增加 7.5 个百分点;油菜平均增产 3.9%,每 667 m²减少追肥用工量 0.5 个,增收节支 67.5 元/667 m²,氮肥利用率提高到 48%。长江流域水稻-油菜轮作体系氮肥增产增效综合调控模式在水稻、油菜生产中的增产、增效,减少氮素损失等方面发挥了重要作用。

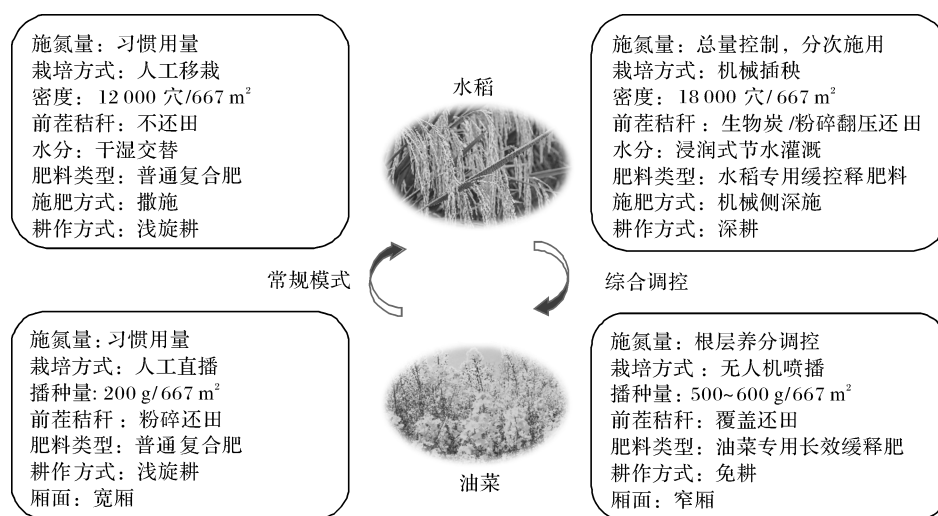


图 1 长江流域水稻-油菜轮作体系氮肥增产增效综合调控模式核心技术

Fig.1 Core techniques of the comprehensive regulation model of N fertilizer for increasing yield and efficiency of rice-oilseed rape rotation system in the Yangtze River Basin

随着经济的发展和社会的不断进步,包括长江在内的主要河流和湖泊面临着严峻的氮污染形势,引起水体富营养化、低氧和有毒藻类等水生态系统问题,且有进一步恶化的可能。为了应对这些挑战,绿色发展的概念应运而生。我国在 2015 年提出农业要优先实现绿色发展。氮素作为维持农业生产的基础,在农业绿色发展中发挥着不可替代的作用。张建杰等^[34]构建的农业绿色发展指标体系中,与氮相关的指标占到 1/3 以上。可见,农业和食物系统氮素行为特征已经成为农业发展的重要衡量指标。集成建立的长江流域水稻-油菜轮作体系氮肥增产增效综合调控模式实现了作物的高产、氮肥的高效,但对于氮去向的研究仅涉及到 NH_3 挥发、 N_2O 排放和氮素径流损失,而未能量化硝酸盐的淋洗量、土壤 NO 和 N_2 的排放损失量等。以后的研究中需要借助¹⁵N 标记技术、Robot 自动培养系统等手段更加全面地评价水稻-油菜轮作体系中的氮去向。同时,需要进一步优化、完善氮肥增产增效单项技术,并开展大面积试验示范和推广应用,从而实现长江流域水稻-油菜轮作体系氮肥绿色增产增效。

参考文献 References

- [1] 程式华,胡培松.中国水稻科技发展战略[J].中国水稻科学,2008,22(3):223-226.CHENG S H, HU P S. Development strategy of rice science and technology in China[J]. Chinese journal of rice science, 2008, 22(3): 223-226 (in Chinese with English abstract).
- [2] 潘孝武,何强,张武汉,等.新形势下长江流域稻作发展的思考[J].杂交水稻,2015,30(6):1-5.PAN X W, HE Q, ZHANG W H, et al. Reflection of rice development in Yangtze River Basin under the new situation[J]. Hybrid rice, 2015, 30(6): 1-5 (in Chinese with English abstract).
- [3] 国家统计局.中国农村统计年鉴 2019 [M].北京:中国统计出版社,2019. National Bureau of Statistics. China rural statistical yearbook of 2019 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2019 (in Chinese).
- [4] 陈洪俊.稻田水旱轮作系统生产力、生态环境效应及可持续性评价[D].南昌:江西农业大学,2015.CHEN H J. Research on productivity, ecological environmental effect and sustainability evaluation under paddy-upland rotation systems [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2015 (in Chinese with English abstract).
- [5] 石孝均.水旱轮作体系中的养分循环特征[D].北京:中国农业大学,2003.SHI X J. Characteristics of nutrient cycling in the rice-wheat rotation system [D]. Beijing: China Agricultural University, 2003 (in Chinese with English abstract).
- [6] 周超亚.南方耕作制度 [M].北京:中国农业出版社,1996. ZHOU C Y. Southern farming system [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1996 (in Chinese).
- [7] TIMSINA J, CONNOR D J. Productivity and management of rice-wheat cropping systems: issues and challenges [J]. Field crops research, 2001, 69(2): 93-132.
- [8] 范明生,江荣风,张福锁,等.水旱轮作系统作物养分管理策略[J].应用生态学报,2008,19(2):424-432.FAN M S, JIANG R F, ZHANG F S, et al. Nutrient management strategy of paddy-upland crop rotation system [J]. Chinese journal of applied ecology, 2008, 19(2): 424-432 (in Chinese with English abstract).
- [9] 徐宁,黄国勤.稻田复种轮作系统能流物流特征研究[J].中国生态农业学报,2014,22(12):1491-1497.XU N, HUANG G Q. Characteristics of energy-nutrient flow of multiple cropping rotation systems in paddy field [J]. Chinese journal of eco-agriculture, 2014, 22(12): 1491-1497 (in Chinese with English abstract).
- [10] 陈春兰,陈安磊,魏文学,等.稻田系统生产力及其稳定性对施肥制度的响应[J].中国生态农业学报,2012,20(10):1263-1267.CHEN C L, CHEN A L, WEI W X, et al. Response of rice-rice ecosystem productivity and yield stability to long-term fertilization [J]. Chinese journal of eco-agriculture, 2012, 20(10): 1263-1267 (in Chinese with English abstract).
- [11] 彭少兵,黄见良,钟旭华,等.提高中国稻田氮肥利用率的研究策略[J].中国农业科学,2002,35(9):1095-1103.PENG S B, HUANG J L, ZHONG X H, et al. Research strategy in improving fertilizer-nitrogen use efficiency of irrigated rice in China [J]. Scientia agricultura sinica, 2002, 35(9): 1095-1103 (in Chinese with English abstract).
- [12] 魏文良.华北平原小麦-玉米体系氮肥绿色增产增效综合调控途径效应研究[D].北京:中国农业大学,2018.WEI W L. Effects of integrated management strategy on green yield and nitrogen use efficiency increase of wheat-maize cropping system in the North China plain [D]. Beijing: China Agricultural University, 2018 (in Chinese with English abstract).
- [13] 王汉中.以新需求为导向的油菜产业发展战略[J].中国油料作物学报,2018,40(5):613-617.WANG H Z. New-demand oriented oilseed rape industry developing strategy [J]. Chinese journal of oil crop sciences, 2018, 40(5): 613-617 (in Chinese with English abstract).
- [14] 李菊梅,王朝辉,李生秀.有机质、全氮和可矿化氮在反映土壤供氮能力方面的意义[J].土壤学报,2003,40(2):232-238.LI J M, WANG Z H, LI S X. Significance of soil organic matter, total n and mineralizable nitrogen in reflecting soil N supplying capacity [J]. Acta pedologica sinica, 2003, 40(2): 232-238 (in Chinese with English abstract).
- [15] 邹娟,鲁剑巍,陈防,等.我国冬油菜区土壤肥力变化及施肥效果演变[J].中国油料作物学报,2011,33(3):275-279.ZOU J, LU J W, CHEN F, et al. Variation of soil fertility and evolution of fertilizer efficiency in winter rapeseed region of China [J]. Chinese journal of oil crop sciences, 2011, 33(3): 275-279 (in Chinese with English abstract).

- [16] 任涛,郭丽璇,张丽梅,等.我国冬油菜典型种植区域土壤养分现状分析[J].中国农业科学,2020,53(8):1606-1616.REN T, GUO L X, ZHANG L M, et al. Soil nutrient status of oilseed rape cultivated soil in typical winter oilseed rape production regions in China [J]. *Scientia agricultura sinica*, 2020, 53 (8): 1606-1616 (in Chinese with English abstract).
- [17] YADAV R L, DWIVEDI B S, PRASAD K, et al. Yield trends, and changes in soil organic-C and available NPK in a long-term rice-wheat system under integrated use of manures and fertilisers[J]. *Field crops research*, 2000, 68(3): 219-246.
- [18] 卜容燕.稻油和棉油轮作模式下油菜季土壤氮素供应差异及其机制研究[D].武汉:华中农业大学,2017.BU R Y. Differences and mechanism of soil nitrogen supply in oilseed rape planting season under rice-rape seed and cotton rapeseed [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017 (in Chinese with English abstract).
- [19] FAN M S, LU S H, JIANG R F, et al. Nitrogen input, ^{15}N balance and mineral N dynamics in a rice-wheat rotation in south-west China [J]. *Nutrient cycling in agroecosystems*, 2007, 79 (3): 255-265.
- [20] 张丹,付斌,胡万里,等.秸秆还田提高水稻-油菜轮作土壤固氮能力及作物产量[J].农业工程学报,2017,33(9):133-140. ZHANG D, FU B, HU W L, et al. Increasing soil nitrogen fixation capacity and crop yield of rice-rape rotation by straw returning [J]. *Transactions of the Chinese society of agricultural engineering*, 2017, 33(9): 133-140 (in Chinese with English abstract).
- [21] 逯非,王效科,韩冰,等.稻田秸秆还田:土壤固碳与甲烷增排[J].应用生态学报,2010,21(1):99-108. LU F, WANG X K, HAN B, et al. Straw return to rice paddy: soil carbon sequestration and increased methane emission [J]. *Chinese journal of applied ecology*, 2010, 21(1): 99-108 (in Chinese with English abstract).
- [22] 史然,陈晓娟,沈建林,等.稻田秸秆还田的土壤增碳及温室气体排放效应和机理研究进展[J].土壤,2013,45(2):1193-1198. SHI R, CHEN X J, SHEN J L, et al. A review on application of rice straw in soil carbon sequestration and greenhouse gases emission in paddy ecosystems [J]. *Soils*, 2013, 45(2): 1193-1198 (in Chinese with English abstract).
- [23] 徐华丽.长江流域油菜施肥状况调查及配方施肥效果研究[D].武汉:华中农业大学,2012.XU H L. Investigation on fertilization and effect of formulated fertilization of winter rapeseed in Yangtze River basin [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2012 (in Chinese with English abstract).
- [24] 任涛,鲁剑巍.中国冬油菜氮素养分管理策略[J].中国农业科学,2016,49(18):3506-3521.REN T, LU J W. Integrated nitrogen management strategy for winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) in China [J]. *Scientia agricultura sinica*, 2016, 49(18): 3506-3521 (in Chinese with English abstract).
- [25] 朱德峰,张玉屏,陈惠哲,等.中国水稻高产栽培技术创新与实践[J].中国农业科学,2015,48(17):3404-3414. ZHU D F, ZHANG Y P, CHEN H Z, et al. Innovation and practice of high-yield rice cultivation technology in China [J]. *Scientia agricultura sinica*, 2015, 48(17): 3404-3414 (in Chinese with English abstract).
- [26] 李鹏飞.控释尿素对双季稻产量、氮素损失及氮肥利用率的影响[D].武汉:华中农业大学,2018.LI P F. Effects of controlled release urea on yield, nitrogen loss and nitrogen use efficiency for double-cropping rice system [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2018 (in Chinese with English abstract).
- [27] 李凯旭,鲁剑巍,鲁明星,等.不同专用配方肥对水稻产量、养分吸收及经济效益的影响[J].中国农业科技导报,2017,19(1):100-107. LI K X, LU J W, LU M X, et al. Effects of different special formula fertilizer on rice yield, nutrient uptake and economic benefit [J]. *Journal of agricultural science and technology*, 2017, 19(1): 100-107 (in Chinese with English abstract).
- [28] 王玉雯,郭九信,孔亚丽,等.氮肥优化管理协同实现水稻高产和氮肥高效[J].植物营养与肥料学报,2016,22(5):1157-1166. WANG Y W, GUO J X, KONG Y L, et al. Nitrogen optimize management achieves high grain yield and enhances nitrogen use efficiency of rice [J]. *Journal of plant nutrition and fertilizer*, 2016, 22(5): 1157-1166 (in Chinese with English abstract).
- [29] 刘波.冬油菜氮素营养调控技术及相关机制研究[D].武汉:华中农业大学,2016.LIU B. The technology and mechanism of nitrogen nutrient regulation in winter oilseed rape [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2016 (in Chinese with English abstract).
- [30] 杨旭坤.秸秆/生物炭还田对稻-油轮作氮素利用及损失的影响[D].武汉:华中农业大学,2020.YANG X K. Effects of straw/biochar returning to the field on nitrogen utilization and loss in rice-oil seed rotation [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020 (in Chinese with English abstract).
- [31] 郭晨.缓/控释尿素施用对作物产量、氮肥利用率及温室气体排放的影响[D].武汉:华中农业大学,2018.GUO C. Effects of slow/controlled release urea on crop yield, nitrogen use efficiency and greenhouse gas emissions [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2018 (in Chinese with English abstract).
- [32] 杨丞,汪洋,张万洋,等.灌溉模式与施氮量互作对水稻茎蘖产量形成的影响[J].中国水稻科学,2021,35(2):155-165. YANG C, WANG Y, ZHANG W Y, et al. Effects of interaction between irrigation mode and nitrogen application rate on the yield formation of main stem and tillers of rice [J]. *Chinese journal of rice science*, 2021, 35(2): 155-165 (in Chinese with English abstract).
- [33] HOU W F, KHAN M R, ZHANG J L, et al. Nitrogen rate and plant density interaction enhances radiation interception, yield and nitrogen use efficiency of mechanically transplanted rice [J]. *Agriculture, ecosystems & environment*, 2019, 269: 183-192.
- [34] 张建杰,崔石磊,马林,等.中国农业绿色发展指标体系的构建与例证[J].中国生态农业学报,2020,28(8):1113-1126.

ZHANG J J, CUI S L, MA L, et al. Construction of a green development index system for agriculture in China and examples

[J]. Chinese journal of eco-agriculture, 2020, 28(8): 1113-1126 (in Chinese with English abstract).

Integrated regulation of nitrogen fertilizer for increasing yield and efficiency of rice-oilseed rape rotation system in the Yangtze River Basin

LI Xiaokun, REN Tao, LU Jianwei

College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University/Ministry of Agriculture and Rural Affairs Key Laboratory of Arable Land Conservation (Middle and Lower Reaches of Yangtze River/National Key Laboratory of Soil Health Diagnosis and Green Restoration for Environmental Protection/Microelement Research Center, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

Abstract The Yangtze River Basin is the main production area of rice and oilseed rape in China, and rice-oilseed rape rotation is the main planting pattern. Fertilization is the material basis for maintaining and improving the productivity of the crop rotation system. Application of fertilizers, especially nitrogen (N) fertilizers, plays a vital role in increasing yield. However, the excessive or unreasonable application not only leads to weak crop resistance, low N fertilizer utilization, poor quality and economic benefits, but also causes accumulation of nutrients in the environment, which affects the quality of the atmosphere, water bodies, and the health of human and livestock. Focusing on the problems of low carbon and nitrogen content in the cultivated soil, high nitrogen fertilizer usage, serious losses, and low nitrogen fertilizer utilization of the rice-oilseed rape rotation system in the Yangtze River Basin, a comprehensive regulation model was established through coordinating and optimizing the annual nutrient management, soil carbon and N coordinated regulation, slow/controlled release fertilizer application on N loss control, improvement of fertilization method, cultivation technologies with high-yield and high-efficiency in order to provide theoretical and technical support for increasing yield and efficiency of N fertilizer in rice-oilseed rape rotation system in the Yangtze River Basin.

Keywords Yangtze River Basin; rice-oilseed rape rotation system; agricultural green development; carbon and nitrogen synergistic regulation; carbonation of straw returning; slow/controlled release fertilizer; high yield and high efficiency

(责任编辑:赵琳琳)