

DOI: 10.13376/j.cblls/2018136

文章编号: 1004-0374(2018)10-1129-08



彭少兵, 华中农业大学教授, 国家“千人计划”特聘专家, 教育部“长江学者奖励计划”讲座教授, 国务院学位委员会第七届学科评议组成员, 农业部现代农业产业技术体系岗位科学家。现任 *Field Crops Research* 等杂志编委。长期从事作物高产生理与栽培管理、作物营养生理与养分管理、水稻光合作用与水分生理、全球气候变化与逆境生理等领域的研究工作。近十年研究成果获得省级科技进步奖一等奖两项。发表论文 213 篇, 其中 SCI 收录论文 182 篇。所发表的论文被 SCI 期刊共引用 7 390 次, 单篇引用最高次数达 822 次, SCI 论文 h-指数为 44。2002 年在《中国农业科学》发表的一篇文章被国内学术期刊多次引用, 引用次数高达 1 290 次, 在中国知网引文数据库农业科技领域被引频次排名为第 8 位。入选爱思唯尔 (Elsevier) 中国高被引学者榜单, 在农业和生物科学领域 2014 年排名第 4、2015 年排名第 6、2016 年排名第 6, 至 2017 年已连续 4 年入选。2017 年入选科睿唯安 (Clarivate Analytics) 全球“高被引科学家”名单。

水稻绿色高产栽培技术研究进展

王 飞¹, 彭少兵^{1,2*}

(1 华中农业大学植物科学技术学院, 武汉 430070; 2 作物遗传改良国家重点实验室, 武汉 430070)

摘 要: 当前中国水稻生产面临作物高产优质、资源高效、环境安全等多方面的挑战, 生产方式逐步转变为规模化、机械化和轻简化, 生产目标由单一的高产转型为“高产、优质、高效、生态、安全”。现简要总结中国水稻栽培技术的变革历程, 由最初高产栽培经验的理论总结到现在的高产高效栽培技术体系; 阐述绿色高产栽培的内涵, 未来水稻栽培需因地制宜地开展模式创新; 并介绍三种绿色高效栽培模式(再生稻、双季稻双直播和双水双绿模式)的研究进展。

关键词: 水稻; 绿色; 高产栽培; 再生稻; 双季稻双直播; 双水双绿

中图分类号: S31; S511 **文献标志码:** A

Research progress in rice green and high-yield management practices

WANG Fei¹, PENG Shao-Bing^{1,2*}

(1 College of Plant Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2 National Key Laboratory of Crop Improvement, Wuhan 430070, China)

Abstract: Rice production in China faces several challenges, including simultaneous improvement in grain yield and quality, efficient utilization of resources, and environmental protection. Large-scale, mechanized and simplified management practices are replacing the traditional one. In addition to high yield, the objectives of future rice production also include high quality, high efficiency, environment-friendly, and food safety. In this review paper, we briefly summarized the development course of rice cultivation from the previous high yield cultivation experiences

收稿日期: 2018-09-10

基金项目: 国家高技术研究发展计划(“863”计划)(2014AA10A605)

*通信作者: E-mail: speng@mail.hzau.edu.cn

to the current high yield and high efficiency management theory. The concept of green and high-yield cultivation was proposed, and in the future, site-specific farming system should be developed and innovated. In the end, research progress in three green and high efficiency production systems, namely the ratoon rice, the direct-seeded double-season rice, and the rice-crayfish system was introduced.

Key words: rice; green; high yield cultivation; ratooning rice; direct-seeded double-season rice; rice-crayfish

水稻是世界上最重要的粮食作物之一，为保障世界粮食安全做出了重大贡献。据联合国经济和社会事务部估计，到2050年世界人口将超过100亿，因此，人类未来仍将面临严峻的粮食安全问题^[1]。20世纪60年代以来，水稻单产和总产大幅增加，这主要得益于品种改良和栽培技术的发展^[2]。然而，长期通过大肥、大水、大量农药投入来提高水稻产量对环境造成了严重影响，如土壤酸化^[3]、水体富营养化^[4]、生物多样性降低^[5]等。这些新问题和新的挑战的出现意味着中国水稻生产正面临着重大转型，需要在品种培育策略和栽培措施创新等方面做出根本性改变^[6]。

直到21世纪初，提高并充分实现水稻品种的产量潜力一直是水稻育种和栽培的主要目标^[7-8]。国际水稻研究所的水稻育种先后经历了半矮秆化、提高病虫害抗性、改良稻米品质以及通过杂种优势和理想株型的利用进一步提高产量潜力四个阶段^[9]。而中国的水稻育种进程则先后通过半矮秆化、杂种优势的利用、亚种间杂种优势和理想株型结合（超级稻计划）不断提高水稻品种的产量潜力^[10]。在后基因组时代，科学家开始倡导通过分子设计育种聚合多种优良性状，以应对未来水稻生产面临的各种挑战^[7,11-12]。水稻生产面临以下问题：(1)病虫害发生逐年加重，大量施用农药；(2)过量施用化肥，土壤理化性质破坏；(3)淡水资源短缺，稻田季节性干旱时有发生；(4)人口持续增长，粮食安全问题严峻。针对上述问题，Zhang^[7]提出了培育绿色超级稻的构想，旨在培育“少打农药、少施化肥、节水抗旱、优质高产”的水稻品种，其绿色性状主要包括抗病、抗虫、抗逆、营养高效、高产、优质等。经过10年的努力，水稻绿色性状的分子机制和基因克隆等基础研究领域取得了重要进展^[12]。例如，科学家在稻米品质形成与调控机制方面开展了系统研究，并明晰了蒸煮和食味品质调控的分子机制^[11,13]，还克隆了控制氮素利用效率的基因*NRT1.1B*^[14]、*DEPI-1*^[15]和*NRT2.3b*^[16]。在国家高技术研究发展计划（“863”计划）“绿色超级稻新品种选育”项目的支持下，本团队评价了大量候选绿色超级稻品

种的氮素利用效率，并鉴定了一批氮高效水稻品种，包括早、中、晚季籼稻品种和一季粳稻品种^[17-18]。

“良种配良法”，即具有优良性状的水稻品种必须通过科学的栽培措施才能充分发挥其潜力，中国水稻育种技术的每一次变革均会引起栽培技术的重大变革^[8,19]。2017年，农业部颁布的品种审定办法将水稻品种分为三类，分别是高产稳产品种、绿色优质品种和特殊类型品种，其中绿色优质品种包括抗病品种、抗虫品种、优质品种和轻简化栽培品种四类。品种审定办法的改变既是中国水稻育种科学家长期努力的结果，更是对21世纪以来中国水稻栽培技术发生重大转型的适应^[7-8,12,20]。

1 中国水稻栽培技术变革历程

作物栽培学与耕作学研究作物生长发育规律及其与外界环境的关系，探讨作物高产、优质、高效、可持续生产的调控措施，以及构建合理种植制度与养地制度的理论、方法和技术途径，是农业科学中重要的骨干学科之一^[21-22]。1958年，由北京农业大学李竞雄先生牵头出版了中国第一本《作物栽培学》，至今作物栽培学经历了60年的发展^[22-23]。在此期间，中国作物栽培学与耕作学在理论建设、关键技术创新和技术体系构建上不断进步，支撑了农业发展由粗放生产到集约化水平不断提高^[22]。

中国水稻生产有以下问题：(1)稻区分布区域广、生态和生产条件差别大；(2)中国水稻生产复种指数高、季节矛盾大；(3)品种布局和栽培制度复杂，不可能形成大范围的、单一的水稻品种带；(4)由于人地矛盾突出，只能在主攻单产的同时兼顾提高劳动生产率和投入产出率^[8]。尽管如此，中国稻作在如此复杂多样的自然、生产和栽培制度条件下，创造了极为丰富多样的水稻稳产高产栽培技术成果（表1）。凌启鸿^[8]总结中国水稻栽培理论和技术体系的发展大体经过三个发展过程：(1)20世纪50~60年代，通过对陈永康高产栽培经验的理论进行总结研究，初步形成了“水稻—环境—调控”三位一体的高产栽培理论体系框架；(2)20世纪70~80年代水稻叶龄模式的建立和80~90年代水稻

表1 2005—2018年农业农村部水稻主推技术

序号	主推技术名称	推介年份
1	超级稻栽培技术	2005
2	水稻旱育稀植技术	2005—2006
3	水稻轻简栽培技术	2005, 2008—2010
4	水稻超高产栽培技术	2006, 2008
5	水稻机械化育插秧技术	2006, 2008, 2011—2016
6	稻鸭共育生产技术	2008—2009
7	再生稻高产栽培技术	2009—2010
8	寒地水稻旱育稀植技术	2009
9	超级稻超高产栽培技术	2010
10	水稻机械化生产技术	2010
11	粳型超级稻综合配套栽培技术	2010
12	寒地水稻叶龄诊断栽培技术	2010
13	水稻钵苗机插技术(钵形毯状秧苗机插技术)	2011
14	水稻旱育栽培技术	2011—2016
15	水稻抛秧、摆栽与直播栽培技术	2011
16	水稻精确定量栽培技术	2011—2017
17	超级稻“三定”栽培技术	2011—2016
18	水稻主要病虫害防控技术	2011—2016
19	水稻钵苗机插及摆栽技术	2012—2014
20	水稻抛秧栽培技术	2012—2016
21	水稻“三控”技术	2012
22	超级稻“稳穗增粒”高产栽培技术	2012
23	水稻灾害防控与补救栽培技术	2012—2016
24	水稻集中育秧技术	2013
25	超级稻区域化高产栽培集成技术	2013
26	超级稻高产栽培技术	2014—2016
27	双季稻机械化生产技术	2014—2016
28	再生稻综合栽培技术	2015—2016
29	稻田综合种养技术	2016—2018
30	机收再生稻丰产高效技术	2017—2018
31	水稻高低温灾害防控技术	2017—2018
32	水稻钵苗机插优质增产技术	2018

群体质量理论和技术体系的建立,使高产群体形成规律的诊断研究由定性向定量并向模式化、指标化发展,栽培技术向规范化发展;(3)20世纪末21世纪初形成水稻精确定量栽培理论与技术体系,不断创造新的高产记录。邹应斌^[19]认为长江流域双季稻栽培技术的研究和发展具有3个特点:(1)随着双季稻品种的改良,根据品种的形态特征和产量形成特点,开展高产栽培技术研究;(2)针对双季稻高产栽培的限制因子,开展抗逆境栽培技术的研究;(3)满足社会发展需要,开展省工、轻简栽培技术和机械化栽培技术的研究。

20世纪末到21世纪初,随着水稻生产中有机肥施用减少而化肥施用大量增加,农村劳动力大量

转移和农业机械制造技术不断发展,水稻轻简化、机械化和高产高效栽培技术快速发展^[19,24-25]。直播栽培是将种子或浸种催芽的种子采用人力或机械、飞机等工具直接播于已平整的水田或旱地,并进行相应科学管理的种植方式。直播稻按播种动力可分为人工直播、机械直播及飞机直播三种,按稻田水分状况又可分为水直播、湿直播和旱直播^[26]。美国、澳大利亚和欧洲等国家的水稻生产于20世纪70年代以后几乎全部实行机械化直播。作为水稻主产区的亚洲,21世纪初直播稻面积已达到2900万hm²,约占亚洲水稻总面积的21%,其中日本、韩国把机械化直播稻作为省力低成本及集约化稻作的主要发展方向之一^[27]。2000年以后我国直播稻面积迅速

增加,安徽和浙江等省份直播稻面积占总播种面积的30%左右^[28-29],湖南直播稻面积比例达到70%^[30],宁夏直播稻面积比例达到95%。然而,由于直播稻种植技术在生产中存在一定的风险,2005—2018年农业农村部水稻主推技术没有一项与直播技术有关(表1)。水稻机插秧也是一种省工种植技术,毯苗和钵苗机插高产栽培技术的不断优化促进了水稻机插秧的快速推广^[25]。据中国统计年鉴数据统计,2016年中国水稻机插秧比例为31.9%,其中黑龙江省和江苏省的机插秧比例均远超其他省份。早在2002年,本团队已经指出中国水稻生产氮肥用量偏高和氮肥利用效率低的问题^[31],并于2006年率先提出通过实时氮肥管理策略(real-time nitrogen management, RTNM)提高水稻氮素利用效率的方法^[32]。此后许多学者提出了水稻高产高效管理模式,如三定栽培技术^[33]、三控栽培技术^[34]、水稻高产高效栽培技术^[24]和土壤-作物综合管理体系(integrated soil-crop system management, ISSM)^[35]等。此外,安徽农业科学院在杂交早稻丰产节水栽培关键技术研究与集成应用方面取得了重要进展^[36]。

2 绿色高产栽培的内涵

农民、作物栽培学家和政府针对中国水稻生产不能再不计投入地追求单季超高产已经达成共识^[6]。农民在生产实践中通过降低化肥和农药的投入、采用轻简化和机械化栽培措施减少劳动力投入、选用稳产优质的水稻品种以提高产品价格,最终实现利润最大化。作物栽培学家则在现有品种的基础上,积极探索绿色高产栽培技术。早在2014年,彭少兵^[6]针对转型时期中国水稻生产是否有必要追求单季超高产、种植模式如何创新、栽培技术的轻简化和机械化如何配合种植模式的创新以及品种改良如何适应栽培技术的轻简化和机械化等4个方面进行了战略思考。此后,多位学者针对中国水稻生产转型的必要性、方向和策略进行了论述^[8,22-23]。2013年,中国政府在中央农村工作会议上首次提到

农业生产要“控肥、控药、控添加剂,严格管制乱用、滥用农业投入品”。2014年,中央一号文件首次提及“绿色”一词,旨在“开展病虫害绿色防控和病死畜禽无害化处理”;2015年,中央一号文件提出加快转变农业发展方式,深入推进粮食高产创建和绿色增产模式攻关(表2)。2015年2月,农业农村部印发《到2020年化肥、农药使用量零增长行动方案》。该方案旨在解决中国农业生产中农药和化肥盲目施用、施用过量,从而造成生产成本增加和环境污染的问题。2016年,中央一号文件首次提及“推进农业供给侧结构性改革”,并多次提到“绿色发展、绿色农业、绿色高产高效创建”等。2017年,中央一号文件继续深入推进农业供给侧结构性改革和农业绿色发展,并于2017年9月,由中共中央办公厅和国务院办公厅印发了《关于创新体制机制推进农业绿色发展的意见》。该意见针对当前我国农业生产资源消耗的粗放经营方式没有根本改变、农业面源污染和生态退化的趋势尚未有效遏制的问题,提出创新体制机制,推进农业绿色发展。2018年,中央一号文件提出深入推进农业绿色化、优质化、特色化、品牌化,以绿色发展引领乡村振兴。这一系列政策文件的出台将促进水稻育种和栽培研究向绿色转型。未来中国水稻生产面临的严峻挑战是在减少资源投入和保障环境安全的前提下持续增加产量,而且这一目标需要在全全球气候不断变化的背景下实现。在作物栽培学科建立60周年之际,其发展方向由以前单一的高产目标转变为高产、优质、高效、生态、安全^[8,22-23]。中国人多地少,随着经济建设的发展,人地矛盾日益尖锐,因此高产是我国水稻生产永恒的主题。随着人们生活水平不断提高,需求也由吃饱转变为吃好,这对稻米品质提出了新的要求^[11]。而高产优质的实现需要同时兼顾绿色发展,即高效、生态和安全^[8]。这一目标实现的前提是机械化和轻简化(尤其是作物建成环节),在总产不降低甚至增加的前提下,降低劳动力投入和减轻劳动强度,不增加农资投入,稳定地保障水

表2 2013—2018年中央1号文件有关关键词出现时间和频次

关键词	2013	2014	2015	2016	2017	2018
绿色	0	1	1	8	10	11
转方式/调结构	0	0	3	2	2	0
供给侧结构性改革	0	0	0	1	21	2
化肥农药零增长	0	0	0	1	1	0
乡村振兴	0	0	0	0	0	78

稻生产利润, 通过提高复种指数或收获频次来降低甚至消除单季作物追求超高产的压力和风险^[6]。因此, 未来水稻栽培需要因地制宜地通过模式创新和管理措施优化, 解决高产与高效、高产与优质、用地与养地之间的矛盾, 协调环境因素与高产、优质、安全之间的相互关系, 从而实现“少打农药、少施化肥、节水抗旱、优质高产”的绿色目标。

3 绿色高产栽培模式

3.1 再生稻

再生稻是指头季收获后, 利用稻茬上存活的休眠芽, 采取一定的栽培管理措施使之萌发为再生蘖, 进而抽穗、开花、结实, 再收获一季水稻的种植模式^[37]。这种模式是温光资源种植一季水稻有余而两季不足地区的理想种植模式。再生稻一次播种、两次收获, 头季产量与一季中稻相当, 再生季产量可以达到头季 50% 以上, 有利于增加总产和促进农民增收^[6]。2017 年, 本团队在湖北省武穴市花桥镇开展大田试验, 比较了 3 种中稻系统(中稻-小麦、中稻-油菜和中稻-休耕)与 3 种再生稻系统(移栽再生稻-油菜、移栽再生稻-休耕和直播再生稻-饲料油菜)的产量; 其中, 中稻品种为隆两优华占, 再生稻品种为两优 6326 (移栽再生稻)和黄华占(直播再生稻), 两种模式均采用当地高产管理方式。研究表明, 再生稻头季产量平均为 8.80 t/hm², 而再生季产量平均为 4.74 t/hm², 再生季产量为头季产量的 53.8% (图 1, 未发表数据)。此外, 种植再生稻还是灾年减灾的有效措施, 再生稻头季抽穗开花期可以逃避长江中下游地区频发的高温危害, 从而保证第一季高产稳产。2017 年的大田试验表明,

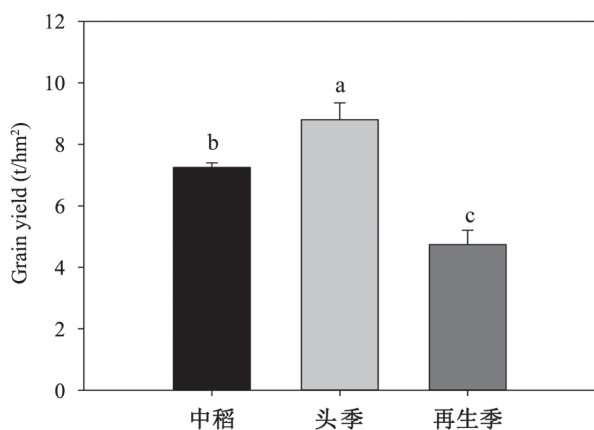


图1 2017年湖北武穴中稻与再生稻头季和再生季的产量

一季中稻隆两优华占的平均产量仅有 7.25 t/hm², 比再生稻头季的平均产量降低了 17.6%, 这主要是因为该年份中稻抽穗开花期遭遇高温, 而再生稻头季的生育期较中稻提前, 可以避开高温 (图 1, 未发表数据)。

再生稻栽培技术先后于 2009—2010 年和 2015—2018 年被农业农村部列为主推栽培技术, 其技术特征也随着时间的推移不断发生变化。2009—2010 年为“再生稻高产栽培技术”, 2015—2016 年为“再生稻综合栽培技术”, 而 2017—2018 年为“机收再生稻丰产增效栽培技术” (表 1)。再生稻在福建高产地区再生季产量可以达到 8.81 t/hm², 两季合计可达 19.31 t/hm²^[38]。头季人工收割条件下, 湖北省再生季产量也可以大面积达到 6.62 t/hm², 两季总产量超过 15.0 t/hm²^[6]。然而, 头季人工收割劳动力投入大, 农民种植再生稻的积极性并不高; 而头季稻机械收割对稻桩碾压破坏面积过大, 降低了再生季的产量。本团队针对这一问题开展了大量研究, 并集成了“机收再生稻丰产增效栽培技术”, 2018 年在湖北省推广面积有望达到 1 86 667 hm²。

再生稻的另一大优势是其再生季灌浆期间温度适宜、施肥量少和基本不打农药, 因此, 再生季稻米蒸煮与食味品质优, 安全品质高。然而, 关于再生季稻米和晚稻稻米蒸煮与食味品质的比较还未有人报道。此外, 再生季稻米与头季稻米相比, 某些功能性代谢物质的含量是否发生变化也值得深入研究。目前, 本团队与湖南农业大学针对这一问题开展合作研究, 初步研究结果表明, 与头季相比, 再生季稻米中某些酚酸类物质和脂类物质含量显著增加。

3.2 双季稻双直播

传统的双季稻生产劳动强度大主要是因为每年两次育秧和两次移栽, 这导致中国双季稻种植面积大幅降低^[6]。双季机械插秧可以解决劳动力投入的问题, 但是仍然需要两次育秧, 而且早稻机械插秧存在插秧过深、栽插密度较低的问题, 双季晚稻存在秧苗秧龄难以控制的问题。因此, 发展双季稻重在筛选和培育短生育期的双季稻品种, 完善和创新以抛栽、免耕、直播为主导的轻简化双季稻生产技术体系, 建立基于双季稻生产的作物多熟种植模式和中低产稻田培肥技术^[19]。本团队针对双季稻双直播种植模式存在的主要问题, 如短生育期品种选育与搭配、一播全苗和肥水管理等配套技术开展研究, 并取得如下进展^[39-41]:

(1) 筛选国内外 81 份种质材料, 获得湘早籼 6 号、早珍珠、特早 2961、早籼 615 等生育期和产量性状适合双季直播的水稻品种。通过合理的品种和播期搭配, 在同一块田实现了水稻双季直播种植, 但存在早、晚季间茬口间隔较短的问题。根据生育期和周年产量等性状, 适合的品种搭配为: 早季选择湘早籼 6 号或早珍珠于 4 月 10 日左右播种, 晚季选择湘早籼 6 号、早珍珠或早籼 615 于早稻收割后尽快播种 (7 月 20 日左右)。

(2) 比较双季稻双直播系统和双季稻双移栽系统的产量发现, 通过合理的氮肥管理, 双季稻双直播系统的周年产量达到 14.5~14.7 t/hm², 较生产上的对照移栽双季稻系统 (鄂早 18 + 两优 287) 产量仅低 6.4%~7.8% (图 2)。

(3) 探究了双季直播稻的氮肥运筹规律, 适合双季稻双直播系统的短生育期品种的产量在 90~120 kg/hm² 施氮量下达到最大值, 相对常规移栽双季稻氮肥用量显著降低。此外, 由于双季稻双直播系统早晚季生育期均较短, 所需施肥次数也较少。

(4) 围绕水稻种子的引发方式、引发时间、引发剂浓度、回干处理程度等进行了一系列的筛选和优化, 最终得到了一套系统的引发操作流程, 并分别针对低温、渍水、干旱胁迫研制出了 2~3 种引发剂配方。大田试验结果表明, 低温胁迫下, 引发处理能使直播水稻的出苗率稳定提高 20% 左右, 从而保证一播全苗。

双季稻双直播模式可以显著减少双季稻劳动力投入及劳动强度, 有利于实现全程机械化种植; 其

周年产量可以达到 15.0 t/hm², 相对一季中稻生产风险降低, 有利于实现高产稳产; 早、晚两季的生育期均较短, 施肥次数减少和施肥量降低, 有利于实现资源高效利用。因此, 该模式是一种绿色高产栽培模式。然而, 目前针对该系统开展的研究还较少, 尤其是高产优质抗倒伏超短生育期品种培育的力度不足。

3.3 “双水双绿”模式

稻田种养结合是我国传统生态农业模式, 始于 2 000 年前农民将剩余的鱼苗放在稻田暂养, 而在东南亚一些国家, 稻-鱼共生模式可以追溯到 6 000 年前^[42]。新中国成立以后, 稻田种养面积迅速增加, 并由原来传统、规模小、养殖单一的模式逐渐发展为规模化、专业化、机械化和养殖多样化的模式^[43]。“稻鸭共育生产技术”在 2008 和 2009 年被列为农业部主推技术, 而“稻田综合种养技术”自 2016 年连续 3 年被列为主推技术 (表 1)。张启发院士在稻田综合种养技术的基础上提出了“双水双绿”理念, 旨在要充分利用平原湖区稻田和水资源的优势实行稻田种养, 使“绿色水稻”和“绿色水产”协同发展。近年来, 湖北省率先开展了稻田养殖, 出现了“稻-虾”、“稻-鱼”、“稻-鳖”、“稻-蟹”、“稻-鳅”等多种稻田种养模式, 2016 年全国稻田综合种养面积为 60 万 hm², 湖北省稻田综合种养面积达到 33.3 万 hm², 尤其是稻-虾共作模式^[44]。研究表明, 在稻田综合种养系统中水产动物占据 10% 左右的稻田空间 (如沟、坑), 但这些空间会使边行稻株产生边行效应, 从而弥补产量损失, 因而水稻产量并未显著降低^[45]。Ren 等^[46]对国际上近 20 年来发表的稻-鱼系统与水稻产量相关论文进行了荟萃分析 (meta-analysis), 发现与水稻单作系统比较, 在不同情况下 (如不同水产生物类型) 稻-鱼系统对水稻产量产生显著的正效应。对稻-虾共作模式的研究表明, 水稻产量比传统水稻种植模式增加 4.6%~14.0%^[47]。

稻田种养不仅提高了农业的经济效益, 也为农业的绿色可持续发展提供了巨大的机遇和潜力。例如在“虾-稻”互利共生体系中, 稻秆腐烂促进水体浮游生物生长, 既为虾提供食物, 同时也有效地解决了秸秆还田矛盾; 既有利于对稻秆的消化利用, 还有助于杀灭残存害虫, 减少次年虫源, 降低虫害; 虾的排泄物为稻提供有机肥料, 从而制约了稻田农药化肥的大量施用^[44]。对浙江南部稻-鱼共作模式的长期研究也表明, 与水稻单作系统比较, 稻-鱼

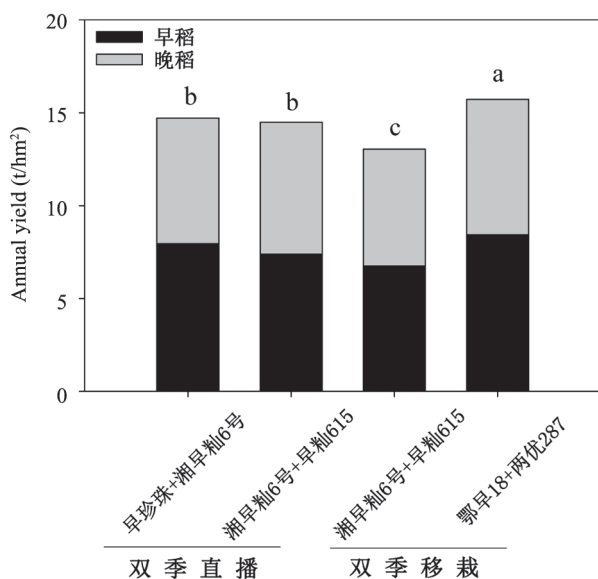


图2 2017年湖北武穴双季稻双直播和双移栽的产量

系统在产量不降低的情况下, 农药和化肥使用量分别降低 68% 和 24%^[48]。稻田综合种养系统还可以提高水稻对养分的利用效率, 如在稻-鱼共作模式中, 鱼排泄物中的氮有 75%~85% 以铵离子的形态存在, 即鱼能够将环境中原本不易被水稻吸收利用的氮形式转变成易于被水稻吸收利用的有效氮形式^[49]。因此, “双水双绿”模式是一种绿色高产栽培模式, 能够有效地实现资源节约、环境友好、生态平衡。

然而, 该模式的推广还存在一些亟待解决的问题, 如稳粮增效与重虾轻稻、改良土壤和次生潜育化、涵养水源与水资源消耗、水质净化与水体富营养化、病虫草害有“抑”有“促”、生物多样性有“升”有“降”等矛盾^[47]。针对上述问题, 必须做好顶层设计, 积极示范推广“双水双绿”稻田种养模式, 以稻-虾为主, 在有基础的地方鼓励稻田养殖其他水产品种(鱼、蟹、鳖、蛙等)。全面优化稻田种养体系和模式, 尤其注重培育适合“双水双绿”种养体系的专用优质和特色水稻品种与小龙虾新品种, 建立适宜的病虫害绿色防控技术体系, 加强市场和社会经济效益分析及相关政策研究, 并建立若干个“双水双绿”产业基地, 开展新品种、新技术、新模式的研究、示范与推广^[44]。

4 结论与展望

“高投入、高产出、高污染、低效益”的农业生产模式为保障中国粮食的供给做出巨大贡献的同时, 也导致了严重的资源环境问题。由于生产资料和劳动力成本逐年上升, 种植效益逐年降低, 水稻可持续生产面临重大挑战。规模化、机械化和轻简化是未来水稻生产的重要发展方向, “高产、优质、高效、生态、安全”是未来水稻生产的目标。2005—2018年农业农村部的主推技术变化趋势表明, 21世纪以来我国农业生产开始向机械化、轻简化以及丰产增效转型。未来水稻栽培需要因地制宜地通过模式创新和管理措施优化, 解决高产与高效、高产与优质、用地与养地之间的矛盾, 协调环境因素与高产、优质、安全之间的相互关系, 从而实现“少打农药、少施化肥、节水抗旱、优质高产”的绿色目标。

[参 考 文 献]

- [1] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. World population prospects: the 2017 revision, key findings and advance tables [EB/OL]. [2017]. https://esa.un.org/unpd/wpp/publications/Files/WPP2017_KeyFindings.pdf
- [2] Khush G. Green revolution: the way forward. *Nat Rev Genet*, 2001, 2: 815-22
- [3] Guo HJ, Liu XJ, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands. *Science*, 2010, 5968: 1008-10
- [4] Yan WJ, Zhang S, Sun P. How do nitrogen inputs to the Changjiang basin impact the Changjiang River nitrate: a temporal analysis for 1968-1997. *Global Biogeochem Cy*, 2003, 17: 1091-9
- [5] Benton TG, Vickery JA, Wilson JD. Farmland biodiversity: is habitat heterogeneity the key? *Trends Ecol Evol*, 2003, 18: 182-8
- [6] 彭少兵. 对转型时期水稻生产的战略思考. *中国科学: 生命科学*, 2014, 44: 845-50
- [7] Zhang Q. Strategies for developing green super rice. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2007, 104: 16402-9
- [8] 凌启鸿. 中国特色水稻栽培理论和技术体系的形成与发展——纪念陈永康诞辰一百周年. *江苏农业学报*, 2008, 24: 101-13
- [9] Peng S, Khush G. Four decades of breeding for varietal improvement of irrigated lowland rice in the International Rice Research Institute. *Plant Prod Sci*, 2003, 6: 157-64
- [10] Qian Q, Guo L, Smith S, et al. Breeding high-yield superior quality hybrid super rice by national design. *Natl Sci Rev*, 2016, 3: 283-94
- [11] Zeng D, Tian Z, Rao Y, et al. Rational design of high-yield and superior-quality rice. *Nat Plants*, 2017, 3: 1-5
- [12] Wing RA, Purugganan MD, Zhang Q. The rice genome revolution: from an ancient grain to green super rice. *Nat Rev Genet*, 2018, 19: 505-17
- [13] Zhou PH, Tan YF, He YQ, et al. Simultaneous improvement for four quality traits of Zhenshan 97, an elite parent of hybrid rice, by molecular marker-assisted selection. *Theoret Appl Genet*, 2003, 106: 326-31
- [14] Hu B, Wang W, Ou S, et al. Variation in NRT1.1B contributes to nitrate-use divergence between rice subspecies. *Nat Genet*, 2015, 47: 834-8
- [15] Sun H, Qian Q, Wu K, et al. Heterotrimeric G proteins regulate nitrogen-use efficiency in rice. *Nat Genet*, 2014, 46: 652-7
- [16] Fan X, Tang Z, Tan Y, et al. Overexpression of a pH-sensitive nitrate transporter in rice increases crop yields. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2016, 113: 7118-23
- [17] Wu L, Yuan S, Huang L, et al. Physiological mechanisms underlying the high-grain yield and high-nitrogen use efficiency of elite rice varieties under a low rate of nitrogen application in China. *Front Plant Sci*, 2016, 7: 1024
- [18] Wang F, Peng S. Yield potential and nitrogen use efficiency of China's super rice. *J Integr Agr*, 2017, 16: 1000-8
- [19] 邹应斌. 长江流域双季稻栽培技术发展. *中国农业科学*, 2011, 44: 254-62
- [20] 彭少兵. 转型时期杂交水稻的困境与出路. *作物学报*, 2016, 42: 313-9

- [21] 凌启鸿, 张洪程. 作物栽培学的创新与发展. 扬州大学学报, 2002, 23: 66-9
- [22] 陈阜, 赵明. 作物栽培与耕作学科发展. 农学学报, 2018, 8: 50-4
- [23] 李少昆, 赵久然, 董树亭, 等. 中国玉米栽培研究进展与展望. 中国农业科学, 2017, 50: 1941-59
- [24] 张耗, 薛亚光, 杨建昌. 水稻高产与养分高效利用的限制因素与栽培技术. 中国稻米, 2013, 19: 5-7
- [25] 张洪程, 龚金龙. 中国水稻种植机械化高产农艺研究现状及发展探讨. 中国农业科学, 2014, 47: 1273-89
- [26] 章秀福, 朱德峰. 中国直播稻生产现状与前景展望. 中国稻米, 1996, 5: 1-4
- [27] 金千瑜, 欧阳由男, 陆永良, 等. 我国南方直播稻若干问题及其技术对策研究. 中国农学通报, 2001, 17: 44-8
- [28] 王丹英, 章秀福, 陆玉其, 等. 浙江省直播稻的产量差异分析和发展趋势探讨. 中国稻米, 2010, 16: 23-6
- [29] 吴文革, 孔令娟, 杨慧成, 等. 安徽省直播稻生产调研报告[C]. 全国第十届水稻优质高产理论与技术研讨会论文集, 2017
- [30] 敖和军, 肖安民, 黄敏, 等. 湖南省直播稻生产现状及发展策略. 中国稻米, 2011, 17: 28-31
- [31] 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. 中国农业科学, 2002, 35: 1095-103
- [32] Peng S, Buresh R, Huang J, et al. Strategies for overcoming low agronomic nitrogen use efficiency in irrigated rice systems in China. *Field Crops Res*, 2006, 96: 37-47
- [33] 邹应斌. 超级稻“三定”栽培法研究. I 概念与理论依据. 中国农学通报, 2006, 22: 158-62
- [34] 钟旭华, 黄农荣, 郑海波. 水稻“三控”施肥技术的生物学基础. 广东农业科学, 2007, (5): 19-22
- [35] Cui Z, Zhang H, Chen X, et al. Pursuing sustainable productivity with millions of smallholder farmers. *Nature*, 2018, 555: 363-8
- [36] 许有尊, 吴文革, 陈刚, 等. 杂交旱稻丰产节水栽培关键技术研究与集成应用. 中国稻米, 2017, 23: 39-43
- [37] 朱永川, 熊洪, 徐富贤, 等. 再生稻栽培技术的研究进展. 中国农学通报, 2013, 29: 1-8
- [38] 张上守, 卓传营, 姜照伟, 等. 超高产再生稻产量形成和栽培技术分析. 福建农业学报, 2003, 18: 1-6
- [39] Wang W, Chen Q, Hussain S, et al. Pre-sowing seed treatments in direct-seeded early rice: consequences for emergence, seedling growth and associated metabolic events under chilling stress. *Sci Rep*, 2015, 6: 19637
- [40] Zheng M, Tao Y, Hussain S, et al. Seed priming in dry direct-seeded rice: consequences for emergence, seedling growth and associated metabolic events under drought stress. *Plant Growth Regul*, 2016, 78: 167-78
- [41] Hussain S, Yin H, Peng S, et al. Comparative transcriptional profiling of primed and non-primed rice seedlings under submergence stress. *Front Plant Sci*, 2016, 7: 1125
- [42] 游修龄. 稻田养鱼——传统农业可持续发展的典型之一. 农业考古, 2006, 4: 222-4
- [43] 胡亮亮, 唐建军, 张剑, 等. 稻-鱼系统的发展与未来思考. 中国生态农业学报, 2015, 23: 268-75
- [44] 张启发. 以“双水双绿”重塑“鱼米之乡”[N]. 湖北日报, 2018-06-13
- [45] 吴雪, 谢坚, 陈欣, 等. 稻鱼系统中不同沟型边际弥补效果及经济效益分析. 中国生态农业学报, 2010, 18: 995-9
- [46] Ren W, Hu L, Zhang J, et al. Can positive interactions between cultivated species help to sustain modern agriculture? *Front Ecol Environ*, 2014, 12: 507-14
- [47] 曹凑贵, 江洋, 汪金平, 等. 稻虾共作模式的“双刃性”及可持续发展策略. 中国生态农业学报, 2017, 25: 1245-53
- [48] Xie J, Hu L, Tang J, et al. Ecological mechanisms underlying the sustainability of the agricultural heritage rice-fish coculture system. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2011, 108: 1381-7
- [49] Terjesen B, Chadwick T, Verreth J, et al. Pathways for urea production during early life of an air-breathing teleost, the African catfish *Clarias gariepinus* Burchell. *J Exp Biol*, 2001, 204: 2155-65