

黄国勤. 稻田耕作学理论与实践[J]. 华中农业大学学报, 2022, 41(6): 1-15.
DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2022.06.001

主持人语:耕作制度是农业生产一项战略性措施,涉及面广、影响深远,是组织农业生产活动的基础和依据,具有“牵一发而动全身”之功效。稻田耕作制度是整个农田耕作制度的重要组成部分,不仅在增加稻谷生产、维护粮食安全方面发挥着重要的、不可替代的作用,而且在节能减排、固碳增汇、改善生态和促进绿色发展方面起着不可低估的作用。如何通过稻田耕作制度的不断调整与改革,实现稻田生态系统的经济效益、社会效益和生态效益同步增长、协调发展,是值得研究和探索的紧迫问题。基于此,本期“稻田耕作制度与生态专题”汇集的11篇论文,从论述稻田耕作学理论与实践入手,对稻田施肥的产量效应、稻田复种和轮作休耕方式的生态效益、稻田固碳机制以及区域(长江中游、下游)稻田种植模式的生态服务功能等进行了深入研究和系统分析,将为未来稻田耕作制度改革和模式创新提供有益参考,为实现稻田耕作制度及整个农业生态系统的绿色发展、高质量发展、可持续发展作出积极贡献。

稻田耕作学理论与实践

黄国勤

江西农业大学生态科学研究中心,南昌330045

摘要 稻田耕作学是耕作学的一个分支学科,是一门研究建立合理稻田耕作制度理论与技术体系的综合性农业应用科学。稻田耕作学具有理论性、应用性、综合性和区域性特征。稻田耕作学的理论体系包括生态适应性理论、光能利用理论、生活因素理论、竞争互补理论、化感作用理论和生物多样性理论等。建立合理稻田耕作制度应遵循用养结合原则,经济效益、社会效益和生态效益“三效”并举原则,冬季、春季、夏季和秋季“四季”覆盖原则,节地、节水、节肥、节药和节能“五节”并重原则,以及良田、良制、良种、良法、良物和良境“六良”配套原则。新中国成立70多年来,特别是21世纪以来,稻田耕作学在稻田作物布局、稻田种植模式、稻田养地方式、区域稻田耕作制度发展,以及国外稻田耕作制度研究等方面取得积极进展,研究内容不断深入,研究范围不断拓展,研究成果不断增多,研究成效不断显现。当前,与“高质量发展”的大背景、总要求相比,稻田耕作学发展还存在着重视不够、投入不足,理论不全、技术不新,以及研究不深、影响不大等方面的突出问题,亟待采取应对策略与措施:提高认识、加大投入、加快建设、加深研究、加强交流和强化服务。

关键词 稻田耕作学;耕作制度;保护性耕作;养地制度;绿色发展;高质量发展;可持续发展

中图分类号 S344-0 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2022)06-0001-15

1 稻田耕作学概述

耕作学(agroprinology)是研究建立合理耕作制度的基本原理与技术体系的一门综合性应用科学^[1]。耕作学立足农田,以耕地(包括水田和旱地)为研究范围,重点研究种植业系统中由用地与养地相结合组成的耕作制度的结构、功能、发展演变规律及高效优化模式的理论与技术,在促进农业可持续发展中占有重要的战略地位,起着举足轻重的作用,并被认

为是农学学科中的“挂帅学科”^[2]。

稻田是耕地的重要组成部分。根据第3次全国国土调查资料^[3],2019年我国稻田(水田)面积为3 139.20万hm²,占耕地总面积的24.55%。我国南方(包括长江中下游区、华南区和西南区)稻田分布广、面积大、比重高,一般可达耕地面积的60%~80%。稻田在增加粮食生产特别是稻谷生产、维护国家粮食安全方面发挥着重要的、不可替代的作用。建立合理、高效、优化的稻田耕作制度,对于新时代确保

收稿日期: 2022-03-23

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0300208);国家自然科学基金项目(41661070);中国工程院咨询研究项目(2017-XY-28)

黄国勤, E-mail: hgqjxes@sina.com

国家粮食安全及实现整个农业生产的绿色高质量发展具有极其重要的战略意义。基于这种考虑,有必要建立“稻田耕作学”,从而为建立合理稻田耕作制度提供学科基础和技术支撑。

首先,从必要性来看:建立稻田耕作学,有利于促进耕作学学科建设与发展。耕作学是目前我国高等农业院校农学专业的三门专业课(作物栽培学、耕作学、作物遗传育种)之一,是一门综合性的农业应用学科。从20世纪50年代初正式开设耕作学课程至今,耕作学在我国已有70余年的发展历史。70多年来,耕作学由小到大、由少到多、由弱到强,已呈现强劲的发展势头和旺盛的生命力,尽管在其发展过程中出现过停滞、徘徊甚至滑坡、倒退,但都是局部的、暂时的和短暂的^[4]。这里特别值得指出的是,耕作学在其发展过程中,已经或正在产生、分化出许多新的分支学科,“稻田耕作学”就是其中一例^[5]。可以说,建立稻田耕作学,既是耕作学发展、壮大、成熟的重要标志,更是耕作学学科发展的必然趋势与结果。从这一意义上来说,建立稻田耕作学这一耕作学的分支学科,不仅充实了耕作学学科体系、丰富了耕作学学科内容,而且必将进一步促进耕作学学科建设与发展。

其次,从重要性来看:建立稻田耕作学,有利于更好地发挥稻田耕作制度的功能与作用。稻田耕作制度是由稻田用地体系与养地体系相结合而构成的综合生产技术体系,包括稻田种植制度以及与之相适应、相配套的稻田养地制度(即农田土壤管理制度)。要充分发挥稻田耕作制度的功能与作用,必须首先构建科学的、合理的、高效的稻田种植制度以及相适应、相配套的稻田养地制度,而要做到这一点,就必须要用稻田耕作学的理论加以指导、引导,否则难以实现。或者说,要用稻田耕作学理论指导稻田耕作制度建设与发展的实践,方能建立起高功能、高效益、高效率的稻田耕作制度,从而发挥稻田耕作制度应有功能和作用。显然,建立稻田耕作学,加强稻田耕作学理论研究与技术研发,是实现这一目标的重要途径。

第三,从紧迫性来看:建立稻田耕作学,有利于解决当前稻田耕作制度面临的突出问题,从而实现稻田耕作制度的绿色发展、高质量发展、可持续发展。新中国成立70多年来,我国稻田耕作制度发生了巨大变化,取得了巨大成就,这是毫无疑问值得充分肯定的。但也同时必须看到,我国稻田耕作制度也存在诸多亟待解决的突出问题。从耕作学原理来看,当前我国稻田耕作制度存在以下4个突出问题:

(1)耕地利用不充分。“充分利用耕地”实现“全面增产”“持续增产”是耕作学的基本原理与要求。而当前我国稻田耕地资源利用不充分、资源浪费的问题非常突出,具体表现在稻田耕地资源撂荒普遍存在,冬闲田增大,稻田复种指数下降等^[4]。(2)作物布局不科学。稻田作物布局应遵循耕作学中“适地适作”和“作物生态适应性”原理,稻田作物种植应与当地光、热、水、肥等必需生活因素相匹配,才能高产高效和可持续发展。而近些年来北方尤其是黑龙江省水稻的大发展,则与其水资源不足的客观条件“不相适应”,不符合“科学规律”,如长期发展下去,必然造成严重的“生态后果”^[6-8]。2022年中央一号文件《中共中央国务院关于做好2022年全面推进乡村振兴重点工作的意见》中也明确指出:“在东北地区开展粮豆轮作,在黑龙江省部分地下水超采区、寒地井灌稻区推进水改旱、稻改豆试点”。(3)种植模式不合理。稻田作物结构和复种方式相对单一,且实行长期连作或长期复种连作,导致土壤性状变劣、土壤质量下降^[9]。(4)养地方式不实际。在稻田耕作制度中的“养地”环节,没有体现耕作学中“积极养地”“用养结合”的原理,或是减少养地环节、养地次数,或是不重视生物养地,而是“过分”依赖化学养地、化学防控病虫害,导致稻田或是只用不养,或是用多养少、重用轻养,以至出现用养失调、用养失衡,最终危及稻田耕作制度可持续发展。

针对上述问题,必须建立稻田耕作学,通过加强稻田耕作学理论研究与技术研发、应用,用耕作学、稻田耕作学理论指导生产实践,并在实践中推广应用耕作学的新技术、新方法、新模式、新措施、新途径,从而有效地解决当前稻田耕作制度存在的突出问题,实现稻田耕作制度的高产、高质、高效和可持续发展。

作为一门学科,稻田耕作学有如下几个显著特征:(1)理论性。耕作学有其理论,是一门理论性很强的农业科学。稻田耕作学,作为耕作学的一门分支学科,同样有其理论,同样是一门理论性很强的农业科学。与耕作学一样,稻田耕作学的理论来源于土壤学理论、农业生态学理论、农业经济学理论、农业生态经济学理论、农业气象学理论、农业可持续发展学理论等多个学科,并形成了自己的理论体系(详见后述)。(2)应用性。稻田耕作学是一门农业应用性、实践性学科,是直接为农业生产实践建立合理稻田耕作制度,为实现稻田高产、优质、高效、低耗、可持续发展而服务的。从20世纪50年代全国大规模的稻田“三改”(单季稻改双季稻、间作稻改连作稻、

籼稻改粳稻)、60年代的大规模提高耕地复种指数和农田基本建设、70年代的杂交稻推广应用和稻田耕作制度改革、80年代的稻田种植结构调整和“吨粮田”建设、90年代的“三高”(高产、高质、高效)农业发展,以及21世纪的农业绿色“转型”和低碳发展,无不表明和显示耕作学、稻田耕作学的应用性。正是其应用性,才使得我国稻田耕作制度不断改革、建设、发展,直至转型、优化和升级。(3)综合性。稻田耕作学的综合性主要体现在3个方面:一是稻田耕作学的研究对象——稻田耕作制度具有综合性。就作物而言,稻田耕作制度涉及稻田种植的粮食作物(水稻、小麦、玉米、大豆、马铃薯、甘薯等)、经济作物(棉、油、麻等)、绿肥(紫云英等)、饲料(如黑麦草等)、蔬菜等,为使上述粮、经、肥、饲、菜高产优质高效,必须采取综合技术措施与方法;二是稻田耕作学的研究目标是建立合理稻田耕作制度,要建立合理稻田耕作制度,就必须综合运用良制(优良的种植制度)、良种(优良的作物品种)、良田(优良的农田)、良法(优良的栽培技术与方法)等,且相互协调、综合配套;三是研究稻田耕作学,实现稻田耕作学理论与技术的新突破、新发展,必须综合运用多学科的理论 and 知识,包括农学学科的基础理论学科和应用技术学科。一句话,稻田耕作学具有综合性。(4)区域性。农业具有区域性,耕作学具有区域性,稻田耕作学同样具有区域性。如同样是稻田,东北地区的稻田耕作制度与南方、与长江中下游地区的稻田耕作制度就不一样,熟制不一样,种植模式不一样、养地的方式方法也不一样。为实现稻田耕作制度的高产高效和可持续发展,必须因地制宜,分别采取不同的种植模式和农田土壤管理技术。

稻田耕作学理论包括以下几方面内容:(1)生态适应性理论。作物的生态适应性,是作物本身的一种特性,它是长期自然选择和人工选择的结果。这种特性就是作物合理布局的生态学理论基础。进行稻田作物布局,必须以作物生态适应性理论为基础。只有用作物生态适应性理论指导稻田作物布局的实践,才能实现作物与环境相适应、相协调,才能充分发挥稻田作物的生产潜力,从而实现稻田作物产量最大化、稻田生产力最大化,甚至稻田生产率最大化。(2)光能利用理论。农业生产的实质是光能的转化和利用,光合作用产物是地球上一切生物质的唯一来源,是人类社会生存和发展的物质基础。建立合理稻田耕作制度,实行稻田间、混、套作和复种多熟,其根本目的就是要延长绿色作物(植物)光合作用时间、扩大绿色作物(植物)光合作用面积、提高绿

色作物(植物)光合作用效率,最终提高光能利用率,获取最大光合产量,即稻田最大生产力。从这一意义来说,光能利用理论不仅是稻田耕作学的理论基础,也是其他农学学科的重要理论基础^[10]。(3)生活因素理论。要实现作物的高产量和稻田耕作制度的高生产力,外界环境就要不断为作物提供足够的光、热、水分、养料和空气等基本生活因素,而这些基本生活因素在生理上都是同等重要的,且是不要替代的^[1]。这一理论告诉我们,在进行稻田耕作制度设计、建设、改革和发展过程中,要充分满足稻田耕作制度中的每一种作物对光、热、气(空气)、水(水分)、肥(养分)等基本生活因素的需求,缺一不可,且不可替代。只有这样,稻田耕作制度才能实现高产量、高效率。(4)竞争互补理论。稻田耕作制度实质上就是农业生态系统^[11]。这个农业生态系统是由多种生物(植物、动物和微生物)和多个环境因子构成的。系统中的生物(作物)与生物(作物)之间存在竞争与互补的关系。为使稻田耕作制度取得高产高效之效果,必须充分发挥这一系统中生物(作物)与生物(作物)之间互利、互惠、互补的关系,同时尽量减少彼此间的竞争作用,减少“内部”消耗,从而获得系统最佳效果、最大效益。用这一原理指导稻田间、混、套作设计和复种方式构建,从而形成优化稻田耕作制度模式,必将取得良好的经济效益、生态效益和社会效益。(5)化感作用理论。自然界任何生物(植物、动物和微生物)在其生长发育过程中,都会分泌出一些物质,这些物质往往对其自身是有毒、有害的,而对其周边的生物与环境或是有害、或是有益,或是既没有害,也没有益。这种现象就是所谓的化感作用(allelopathy,亦称异株克生作用或相生相克作用)^[12]。在稻田耕作制度调整和改革的实践中,为扩大某一作物的种植面积、增加某一作物产量,往往要将这一作物实行连作。但有的作物却不能连作,如进行连作,必然出现“连作障碍”^[13]。其根本原因就在于这种作物会产生化感作用,分泌出对自身生长发育不利甚至有毒、有害的物质。显然,这类作物就不宜连作,属于“忌连作型”作物。这一现象告诉我们,在进行稻田耕作制度设计和改革时,在确定是否实行作物连作或轮作时,必须以化感作用理论为指导,将化感作用原理应用于生产实践。只有这样,才能少走或不走“弯路”,才能如愿以偿、事半功倍。否则,必然是事与愿违、事倍功半。(6)生物多样性理论。“生物多样性”(biodiversity)是生物(植物、动物、微生物)与环境形成的生态复合体以及与此相关的各种生态过程的总和,包括生态系统多样性、物种多样性和基因

多样性(遗传多样性)3个层次^[14]。生物多样性关系人类福祉,是人类赖以生存和发展的重要基础。人类必须尊重自然、顺应自然、保护自然,加大生物多样性保护力度,促进人与自然和谐共生。就农业而言、稻田耕作制度而言,生物多样性是其基础,丰富的生物多样性必然促进农业、促进稻田耕作制度的绿色发展、高质量发展和可持续发展。相反,单一的生物多样性,或生物多样性衰退、衰减、枯竭,必然导致农业、导致稻田制度的结构退化和功能减弱,并最终出现农业不可持续和稻田耕作制度的低产、低质、低效^[15]。显然,发展农业生产,改革稻田耕作制度,必然遵循生物多样性原则,要以保护、利用生物多样性,来促进农业和稻田耕作制度的高质、高效与可持续发展。

稻田耕作学的研究对象是稻田耕作制度,其根本目的是要建立合理稻田耕作制度。所谓合理稻田耕作制度,至少应做到以下几点或具备以下特征:一是用养结合,就是既能充分用地,提高稻田耕地资源利用率和光、温、气、水、肥等资源转化率,又能积极养地,不断提高稻田土壤肥力和土壤质量,做到用地与养地结合;二是高产稳产,能实现稻田农作物全面增产、稳定增产、持续增产;三是优质高效,不仅稻田作物产量高,还要品质优、效率高、效益好;四是绿色低碳,即保护稻田生态环境,保护稻田生物多样性,维护稻田生态平衡,实现稻田低耗、低碳、低排、低污,绿色发展、高质量发展和可持续发展。

而要建立合理稻田耕作制度,必须遵循以下基本原则:(1)用养结合原则。用地与养地相结合(简称“用养结合”)是建立耕作制度的基本原则,是贯穿耕作学全部内容的一条“红线”^[1]。毋庸置疑,用养结合也是建立合理稻田耕作制度的基本原则之一。按照这一原则,在稻田耕作制度建设与发展的实践中,应做到3点:一是充分用地,要将每一寸稻田耕地资源都利用起来,种植农作物,生产农产品。这是基于我国人多地少、人均占有的耕地资源十分有限,人均占有的稻田耕地资源就更少之又少的基本国情所决定的。二是积极养地,要通过合理施用化肥、增施有机肥、多种植绿肥(如紫云英)和豆类等养地作物,以及其他各种养地途径,不断恢复、培育和提高了稻田土壤肥力,提升稻田土壤质量,才能确保“地力常新壮”。三是用地养地结合。用地是目的,养地是手段,用养要结合。做到用中养、养中用,用中有养、养中有益,边用边养、边养边用,寓养于用、寓用于养^[16]。只有这样,才能建立起合理的稻田耕作制度,才能实现稻田耕作制度的可持续发展。(2)“三效”并

举原则。建立合理稻田耕作制度,既要考虑经济效益,也要考虑社会效益,还要考虑生态效益,要做到“三效”(经济效益、社会效益、生态效益)同时并举、同时兼顾、协调发展^[17]。首先,三大效益中,经济效益是基础。生产者(农民、农场主、种植大户等)从事稻田农业生产,建设稻田耕作制度,最关心的是其经济效益如何。如没有可观的、可接受的经济效益,这种生产就难以进行、难以开展、难以持续。其次,三大效益中,社会效益是前提。如果说生产者最关心的是经济效益,那么,国家最关心的社会效益。如果稻田不种植粮食作物、不种植水稻,国家粮食得不到保障,这样的稻田耕作制度,经济效益再高,国家也是不提倡的、不允许的,甚至是禁止的。只有在增加粮食生产、确保国家粮食安全这个“大”社会效益的前提下,提高稻田经济效益、促进农民增收才有可能、才有意义。因此,稻田耕作制度改革和发展必须服从社会效益这个前提,否则,行不通。第三,三大效益中,生态效益是保障。任何一种稻田耕作制度,不能只看到眼前的经济效益、社会效益,还必须充分考虑到长远的生态环境效益。如果一种稻田耕作制度,会危及生态环境,对长远的生态环境效益产生不利影响,造成环境污染、降低生物多样性等,则这种稻田耕作制度必须立即“叫停”“废弃”,不能再在生产上推广——无论其经济效益多高、社会效益多好。(3)“四季”覆盖原则。从冬季作物开始,到春季、夏季、秋季,一年四季,实行“四季”覆盖,即农田实行多熟种植,做到“一年四季,季季皆绿”“根不离土,土不离根”。这既是我国传统农业的经验与精华所在^[18],又是我国耕作制度的优势与特色之处^[19]。稻田,多为良田,是耕地之精华,更加适宜发展多熟种植,实行“四季”覆盖,尤其是南方稻田,光、温、气、水、肥等自然资源十分充足,发展稻田二熟、三熟甚至四熟(如华南区的海南、广东等地)耕作制度,具有得天独厚的条件和优势。根据这一原则,当前长江中下游区分布的大量冬闲稻田(冬闲期从头年11月至翌年4月,多因冬季阴冷、干旱缺水、早春气候不利等原因而冬闲)^[20]和华南区存在的大面积夏闲稻田(夏闲为每年5—9月,因高温、强光、多台风致雨水多湿气重而夏闲)^[21],亟待开发利用起来,以实现“四季”覆盖、季季皆绿,这既可以延长稻田绿色植物光合作用时间,又可增大稻田光合作用面积,只要采取“合适”“有效”措施,还可提高绿色植物光合作用效率,对挖掘稻田生产潜力、促进农田用养结合、实现稻田耕作制度及整个农业生态系统可持续发展十分有利。(4)“五节”并重原则。“五节”即节地、节水、节肥、节药、

节能。“五节”并重是我国建立合理稻田耕作制度的又一重要原则。转变发展方式,走资源节约型、环境友好型发展之路,是我国农业及整个经济社会发展的大方向、大趋势。耕作制度是农业生产的一项战略性措施,具有“牵一发而动全身”之功效,要实现农业的“资源节约、环境友好”,耕作制度必须做到节约资源、保护环境,走资源节约集约利用和保护生态环境之路。稻田耕作制度作为整个农田耕作制度的重要组成部分,也必然适应这一发展形势,走“五节”并重之路,并以此作为重要原则,指导、推动建立合理稻田耕作制度。一是节地。我国耕地资源十分有限,稻田耕地资源就更加紧缺,必须倍加珍惜并充分利用,做到节约利用、集约利用、高效利用,切忌破坏稻田耕地资源、浪费稻田耕地资源、占用稻田耕地资源,当前特别要防止稻田耕地资源“非农化”“非粮化”。二是节水。我国是世界上13个贫水国家之一,人均水资源占有量只有世界平均的1/4^[22]。稻田是农业生产上水资源消耗“大头”。农业节水,首先应是稻田节水,要把建立节水型稻田耕作制度作为农业节水的“重点”,可因地制宜采取以下途径和方法,如通过稻田种植节水型作物、采用保水抗旱的保护性土壤耕作技术,以及采取微灌、滴灌、管灌、喷灌等节水灌溉技术,以达到稻田节水之功效。三是节肥。稻田过量施用化肥,不仅造成资源浪费,更造成农业面源污染,威胁稻米等农产品质量安全,与当前“绿色发展”“绿色转型”的形势及要求背道而驰。要以建立节肥型稻田耕作制度为目标,通过种植稻田绿肥(紫云英等)、扩种豆类作物(大豆、蚕豆、豌豆、绿豆等)、增施有机肥,以及提高肥料利用率等措施和方法实现稻田节肥、增效。四是节药。与过量施用化肥一样,多用、滥用、过量使用农药,不仅造成资源浪费,还造成严重的环境污染;不仅不能有效控制稻田病、虫、草害,还将稻田大量害虫天敌杀灭,破坏稻田生物多样性,并可能引发病虫害的“再猖獗”,造成“恶性循环”。尤其值得注意的是,过量使用农药,还严重威胁农产品(如稻米等)安全性,对人、畜健康产生不利影响。基于此,建立合理稻田耕作制度,必须慎用、少用甚至不用农药,而应通过绿色防控措施达到防治稻田病、虫、草害的目的,如放养害虫天敌、使用性引诱剂、喷施生物农药(绿色农药),以及实行稻田生态种养和作物轮作等。五是节能。节能减排、减污降碳,是实现“双碳”(碳达峰、碳中和)目标的必然要求。建立合理稻田耕作制度,必须“适应”和符合这一形势与要求,并以此作为基本原则,指导稻田耕作制度改革与发展的生产实践。其具体途径,如

选用“低碳型”作物及品种、推行稻田复合种养模式、实行稻田保护性耕作、发展轻简化养地模式,以及推广应用绿色防控、生态减灾技术和措施等。(5)“六良”配套原则。要建立合理稻田耕作制度,还必须遵循“六良”(良田、良制、良种、良法、良物、良境)配套原则。一是良田。优良的农田、高质量的农田是建立合理稻田耕作制度的基础。2021年全国新建成高标准农田700万 hm^2 ,同步发展高效节水灌溉耕地面积188.33万 hm^2 ^[23]。截至2021年底,我国已累计建成高标准农田6000万 hm^2 ^[24],其中相当部分属于稻田。这为建立合理稻田耕作制度奠定了坚实基础。农业农村部还制定了《全国高标准农田建设规划(2021—2030年)》^[25],这对今后进一步加快建立合理稻田耕作制度非常有利。二是良制。优良的种植制度是建立合理稻田耕作制度的核心。所谓优良的种植制度,应在做到科学化、绿色化、规范化的前提下,实现作物布局合理化、种植模式高效化,以及与其相适应、相配套的养地方式轻简化——这也是今后稻田种植制度、耕作制度发展的重要方向^[26]。三是良种。优良的作物品种是建立合理稻田耕作制度的关键。当前,要特别注重选用优质、高产、低耗(低消耗)、低污(低污染)、低碳(低碳排放)和多抗(抗病虫草害、抗逆境胁迫)的作物及品种,这对建立合理、高效稻田耕作制度,实现农业高质量发展和确保国家粮食安全至关重要。四是良法。优良的作物种植技术和方法,是建立合理稻田耕作制度的重要手段。要将国内外最先进的农业科学技术和方法应用到合理稻田耕作制度的设计和建设之中,当前不仅要各种省工、节本、生态、环保的“绿色”种植技术和方法应用于稻田耕作制度的实践,还要将互联网、大数据、云计算、人工智能、区块链、5G等数字化技术和方法在稻田耕作制度改革与发展之中加以推广应用。五是良物。优良的物质装备和物质投入是建立合理稻田耕作制度的条件。随着农业机械化快速发展,稻田应重点选用高性能、低能耗的农机装备,且农机与农艺相配合、相融合,如自动驾驶耕种收机械、无人机、机器人;在稻田物质投入方面,要将生物肥料、绿色肥料、生物农药、绿色农药等各种“绿色、低碳、环保”的物质投入应用于稻田耕作制度实践,必将提升稻田耕作制度的效率和效益。六是良境。优良的生态环境,是建立合理稻田耕作制度的前提,尤其是生产无公害农产品、绿色农产品、有机农产品和地理标志产品(简称“三品一标”),必须要有优良、优美的生态环境作为前提和保障。为此,必须营造、构筑优良的稻田生态环境,这就要求不断开展农田(稻田)

生态环境治理,保护、修复稻田生态环境,还要不断强化生态环境建设,要广泛开展植树造林和建设农田防护林等。只有这样,才能实现生产“三品一标”之目标。

2 稻田耕作学的研究内容及实践

虽然“稻田耕作学”一词才刚刚提出,但稻田耕作学相关内容的研究、实践却一直在进行,且取得积极进展与显著成效。新中国成立70多年来,特别是21世纪以来,稻田耕作学研究内容不断深入,研究范围不断拓展,研究成果不断增多,研究成效不断显现。

2.1 稻田作物布局

作物布局是种植制度的重要内容,是解决耕地上种什么作物、种多少面积、种在哪里,以及作物之间相互搭配、相互协调的比例等一系列问题。作物布局合理与否,对种植制度的结构、模式、功能和效益等具有直接影响。稻田作物布局,则是稻田种植制度的重要组成部分,对建立合理的稻田种植制度、稻田耕作制度具有重要影响和决定性作用。稻田作物布局历来是稻田耕作学的重要研究内容之一。孟洪基等^[27]对陕西汉中的稻田作物布局进行了分析,认为合理的稻田作物布局应处理好3种关系:一是处理好粮与油关系;二是处理好粮油与肥料的关系;三是处理好提高单产与扩大复种的关系。汪汉林^[28]对湖南省桃源县城郊低丘陵区观山村的稻田作物结构进行了优化研究,并应用线性规划的方法建立了该村稻田作物结构优化模型,将该模型应用于生产实践,在不增加生产成本和劳动力的条件下,不仅增加了稻谷产量,还能促进林、牧、副业的同步协调发展。其他还有李达模^[29]、陈玉君^[30]等的研究。

2.2 稻田种植模式

稻田种植模式,包括稻田间混套作、复种、连作与轮作等,是稻田种植制度、耕作制度的主体和核心,是稻田耕作学研究的重要内容(文中耕作制度所用符号:“||”,间作;“×”,混作;“/”,套作;“-”,接茬(复种);“→”,年间衔接)。

1)稻田间混套作。一是稻田间作研究。向慧敏等^[31]对水稻与水芹间作的生态经济效益进行了研究,认为水稻与水芹间作栽培模式能有效控制水稻病虫害的发生,并能起到良好的增产效果,其中水稻与水芹有机间作栽培的综合效益更为明显。二是稻田混作研究。李妹娟等^[32]研究了不同水稻品种混作养鸭对土壤养分动态的影响,结果表明,水稻混作养鸭不仅可以提高稻田土壤肥力,同时还能提高稻

米的碾磨品质,并改善稻米的外观品质,以及提高稻米的直链淀粉含量,从而进一步改善稻米的食味品质。李萍等^[33]研究了双季稻田冬季紫云英与油菜混播对双季稻产量、植株干物质及氮素吸收利用的影响,得出:紫云英与油菜混播可以提高双季稻产量、植株干物质总量及有利于对氮素的吸收利用,且以1/2紫云英(播种量为常规单作紫云英的一半)×1/2油菜(播种量为常规单作油菜的一半)混播模式较好。三是稻田套作研究。稻田常见的套作方式,如晚稻/紫云英、晚稻/小麦、晚稻/油菜、晚稻/黑麦草等。在南方地区,双季稻田晚稻/紫云英模式中,紫云英的适播期一般在国庆节前后,若播种过迟,则会因冬前生长量不足而影响鲜草产量,从而影响培肥效果^[34]。稻田套播小麦的突出优点就是能够保证小麦适时早播,实现冬前壮苗,适用于腾茬迟的水稻茬口,同时也可以缓解收种期间劳动力和作业机械紧张的矛盾,有利于实现全年稻麦双高产。试验结果表明^[35],稻/麦模式要取得高产稳产,最佳共生期应控制在0~5 d为宜。晚稻/油菜模式在长江中下游双季稻区相当普遍。研究表明,在“油-稻-稻”三熟区,晚稻/油菜共生期以3~7 d为宜,5 d为最佳,共生期过长或太短均不利于南方三熟制地区套播油菜高产群体的构建^[36],且晚稻收获留茬高度以40 cm为宜,有利于套播油菜群体生长和产量优势发挥^[37]。多花黑麦草(*Lolium multiflorum* L.)是我国南方农区种植面积最大的优质牧草,常在稻田套播于水稻行间。试验表明,在长江下游(江苏南京),多花黑麦草能在水稻收获前套播,并以水稻收割前25 d左右播种为宜,这有利于其在冬前长成较大的苗,从而提高多花黑麦草苗越冬率和次年饲草产量^[38]。

2)稻田复种。一是稻田复种指数的研究。蒋敏等^[39]研究表明,1990—2015年,南方水稻复种指数从148.3%下降到129.3%,双季稻改种单季稻(“双改单”)损失的播种面积为253.16万hm²,区域上以长江中下游地区变化最为突出。二是稻田复种方式的研究。黄国勤等^[16]对新中国成立以来南方稻田耕作制度改革与发展的成就进行了全面总结和系统梳理,列举出近年来南方各地出现的稻田新型复种方式近200种;与传统复种方式相比,稻田新型复种方式的组成物种更多、结构更趋复杂、功能更强、效益更优。伍思平等^[40]研究了南方双季稻区不同复种方式对稻田综合温室效应的影响,表明冬闲-早稻-晚稻、冬季绿肥(紫云英)-早稻-晚稻、油菜-一季中稻3种稻田复种方式中,紫云英-早稻-晚稻和冬闲-早稻-晚稻有利于提高作物产量,但会增加稻田综合温室

效应和温室气体排放强度。鉴于当前“全面绿色转型”的发展形势,综合考虑环境效益和经济效益,油菜—一季中稻减排增效效果更好,可为南方双季稻区稻田耕作制度绿色低碳高效发展提供理论依据。其他类似研究还有许多。

3) 稻田连作与轮作。稻田连作(南方多属复种连作)与轮作(南方多属复种轮作)对作物产量、生态经济效益等的影响及其作用机制一直是稻田耕作学研究之重点。黄国勤等^[41]通过5 a(1998年冬至2003年秋)田间定位试验,运用生态学原理和方法,从作物产量变化、土壤理化性状、病虫害发生发展规律、能流特征及养分平衡状况等角度对稻田连作与轮作系统进行了深入分析,结果表明,轮作系统优于连作系统,并筛选出优化的复种轮作方式:紫云英-早玉米-晚稻→紫云英-早玉米-晚玉米→紫云英-早稻-晚玉米→紫云英-早玉米∥早大豆-晚稻→黑麦草-中稻。高菊生等^[42]研究了长期肥-稻-稻复种连作对水稻产量及土壤肥力的影响,得出肥(紫云英)-稻-稻是一种较好的复种连作模式。该模式长期连作,有利于增加土壤有机质和提高土壤有机质活性,从而有利于水稻稳产高产,有利于农业可持续发展。杨滨娟等^[43]对稻田复种轮作条件下周年温室气体排放及其综合效益进行了研究与评价,“混播绿肥-早稻-玉米∥大豆→混播绿肥-早稻-晚稻”这种复种轮作方式,符合“碳达峰、碳中和”之绿色低碳的要求,可在我国南方稻区大面积推广应用,从而有利于稻田冬季农业开发,实现稻田减碳(降低碳排放)、增肥(增加土壤肥力)、提质(提高产品质量)、增效(增加稻田生态经济效益)和可持续发展。

2.3 稻田养地方式

1) 施肥养地。夏文建等^[44]选择持续了37 a的长期定位试验进行对比分析,结果表明,化肥配施有机肥有利于土壤养分、微生物生物量和土壤胞外酶活性提高,是维持稻田作物高产和提升稻田土壤质量最优的施肥管理措施。张靖等^[45]选取湖南省长沙县典型双季稻稻田开展为期2 a 4个稻季的田间试验,结果表明,施用生物有机肥及化学氮肥深施均可有效降低田面水铵态氮浓度,从而减少氨挥发;生物有机肥替代化肥结合深施减氮可减少稻田氨挥发达60%,且不降低水稻产量,可有效实现稻田氮肥减量、氨挥发减排。

2) 绿肥养地。周兵等^[46]研究表明,冬季绿肥紫云英翻压还田可以替代部分化肥,在保证水稻产量的同时,不仅能提供当季作物所需养分,减少化肥的投入,还能起到培肥稻田土壤的作用。高嵩涓等^[47]

研究表明,稻田种植紫云英使土壤碳、氮库得到培育,土壤活性有机碳含量和碳转化酶活性提高,土壤速效养分、土壤物理性状明显改善;紫云英作为绿肥冬种有利于土壤微生物的生长繁殖,增强与微生物活性密切相关的土壤酶活性,并通过改变土壤微生物的群落结构影响土壤养分循环。总体而言,南方稻田紫云英作冬绿肥具有增产、节肥、培土、养地之功效。

3) 豆类养地。稻田种植大豆、蚕豆、豌豆、绿豆、豇豆等豆科作物,具有良好的生物养地作用。其养地作用主要表现为:一是进行生物固氮;二是增加土壤有机质;三是将有机态养料分解为无机态养料;四是保持稻田水土;五是起到生物松土耕作的作用;六是还可起到生物排除盐碱的作用(北方)。长江中下游的江西等地,常在早稻收割后,直接在稻板田种植大豆(俗称“禾根豆”),既争取了季节,减少了农耗,又有利于保持稻田土壤水分^[48]。这是一种典型的用地与养地相结合的稻田种植方式。当前,江西省有易旱不保收的二期晚稻田26.7万 hm^2 、秋闲田26.6万 hm^2 ,特别适宜发展这种“禾根豆”,可实行“绿肥-早稻-秋大豆(禾根豆)”“冬作(蚕豆、豌豆等)-早稻-秋大豆∥玉米”或“冬作(油菜或蚕豌豆)-早稻-秋大豆∥甘薯”等稻田一年三熟制^[49]。

4) 秸秆养地。作物秸秆还田是增加稻田土壤有机质、提高稻田土壤肥力的一条重要途径。研究表明,长期秸秆还田(并结合配施化肥),可改善土壤团聚体稳定性,提高土壤团聚体养分含量,在20~40 cm土层仍有显著效应^[50],是提高土壤肥力和促进土壤可持续发展的有效手段。广西大学2008—2018年的长期田间定位试验表明,在5~10 cm和10~20 cm土层,稻草还田处理的稻田土壤有机碳、全氮、碱解氮、有效磷和速效钾含量均优于无稻草还田处理,稻草还田处理稻谷产量比免耕和无稻草还田处理分别增产早稻17.78%和10.30%,晚稻13.88%和19.39%^[51]。冯静琪等^[52]研究表明,稻秸还田不同程度地促进了豆科绿肥对土壤速效养分的吸收,提高了豆科绿肥鲜草产量和地上部氮磷钾累积量。在肥力较高的盐渍水稻土和紫色土上,稻秸全量还田可显著增加豆科绿肥的鲜草产量,维持土壤有效养分,无需配合施用氮肥。在肥力较低的黄棕壤上,全量还田(6 000 kg/hm^2)需配施氮肥才可充分发挥稻秸还田的增产效果,缓解土壤中有效养分含量的下降。

5) 耕作养地。一是保护性耕作的养地作用研究。黄国勤等^[53]于2005—2012年在江西南昌双季稻田进行了稻田保护性耕作的田间定位试验,结果

表明,连续8 a 实行稻田保护性耕作处理的土壤容重低于传统耕作3.6%~5.6%,而总孔隙度和毛管孔隙度分别高出传统耕作1.6%~17.4%、2.4%~16.7%,土壤有机质、有效磷和速效钾分别提高了2.9%~10.0%、4.8%~31.6%和9.7%~25.7%;在本试验条件下稻田保护性耕作显著提高了水稻产量,8 a 稻田保护性耕作处理的平均产量高于传统耕作4.5%~8.8%。王兴等^[54]研究了长期保护性耕作对稻田土壤团聚体稳定性和碳氮含量的影响,结果表明,长期采取由免耕和秸秆覆盖组成的保护性耕作,显著改善土壤C、N含量,促进大团聚体的形成和稳定,对改善稻田耕层(尤其是0~20 cm土层)土壤团聚体稳定性具有显著的效果($P<0.05$)。据此认为,采取保护性耕作措施对南方双季稻田土壤质量及农业生态持续性具有积极的作用。二是轮作休耕的养地作用。2016年,农业部(现农业农村部)等十部委联合印发《探索实行耕地轮作休耕制度试点方案》,标志着我国耕地轮作休耕制度试点正式启动。2016年,全国耕地轮作休耕试点面积41.07万 hm^2 ^[55],2021年达到266.67万 hm^2 ^[56]。稻田实行轮作休耕具有积极的养地作用和显著的养地效果。湖南省土壤肥料研究所就治理式休耕对“长株潭”镉污染稻田土壤理化特性及镉含量的影响,在湖南省宁乡市、攸县、醴陵市、湘潭县、湘乡市等6个县(市)进行了试验和监测,研究表明,治理式休耕可以有效治理酸性稻田镉污染,并能显著改善土壤酸化,调节土壤肥力,达到改土培肥的效果^[57]。王志强等^[58]于2014年4月至2017年12月在江西省万年县双季稻田开展了稻田复种轮作休耕对土壤团聚体分布及稳定性影响的田间试验,结果表明,稻田复种轮作后有利于早晚稻田大团聚体的形成,相应地减少了“较小”团聚体的百分含量,早稻季相对与晚稻季更为显著,同时还显著增加了早、晚稻田土壤水稳性团聚体的稳定性,该研究对我国南方稻田可持续发展具有重要意义。三是轮耕的养地作用研究。汤文光等^[59]研究表明,在双季稻田将土壤免耕、旋耕、翻耕等有效地结合起来,形成合理的轮耕模式,对保持农田地力、消除土壤重金属污染、促进作物高产高效具有重要作用和显著效果。如将常耕(常规耕作)、深耕、浅耕、少耕、免耕等有机地结合起来,形成合理的土壤轮耕体系,其改土(改良土壤)、培土(培育土壤)、肥土(肥沃土壤)的效果,以及增产、增收、增效的作用将更加显著^[60]。

6)生态养地。将生态学原理应用于稻田耕作制度实践,构建合理的稻田生态种养模式(即稻田综合种养模式),不仅可提高稻田种植模式的功能和效

益,还可提升这种稻田养地方式的养地效果。这是因为合理的稻田生态种养模式,如稻田养虾、稻田养蟹、稻田养鱼、稻田养鸭、稻田养鸡等,改变了传统的水稻单种(单一种植)模式,对土壤稻田的各种性质有着不同程度的“正面”影响^[61]。如稻田养虾模式丰富了细菌群落多样性,并提升了土壤中微生物活跃度,使土壤更为优质,更利于作物的生长;稻田养蟹模式改良了土壤理化性质,使土壤更为肥沃,富有营养;而在稻田养虾、稻田养蟹、稻田养鱼3种共生模式下,均可提高土壤微生物多样性,从而让土壤结构更加稳固^[62-64]。总之,合理的稻田生态种养模式,不仅有利于稻田生态系统的能量流动和物质循环,还有利于土壤结构改善、土壤肥力提升和整个稻田土壤环境优化^[65],从而有利于稻田生态系统的绿色发展和可持续发展。

2.4 区域稻田耕作制度

如前所述,稻田耕作制度具有显著的区域性特征。因此,区域稻田耕作制度实践与发展是稻田耕作学的又一重要研究重点。程凯凯等^[66]研究认为,新中国成立以来,长江中下游区的湖南省稻田耕作制度经历了恢复发展阶段(1949—1957年)、徘徊发展阶段(1958—1965年)、快速发展阶段(1966—1978年)、调整发展阶段(1979—1985年)、稳定发展阶段(1986—1997年)和调整、缩减与恢复发展阶段(1998—2013年)等6个发展阶段,未来湖南省稻田耕作制度正向着建立高产稳产型、用养结合型、循环利用生态型、区域特色型、高效种养型和现代高效型稻田耕作制度等6个方向发展。王玉洁等^[67]对华南区的福建省尤溪联合梯田稻作制度进行了实地考察与文献调研,结果表明,尤溪联合梯田的发展与历史上人口迁徙密切相关;稻田耕作制度随时间推移由早期的一熟制向多熟制发展,随海拔高度增加由低海拔的三熟制向高海拔的一熟、二熟制转变;稻作模式由单季稻向丰富多样的间混套作、复种轮作以及立体种养转变;联合梯田目前保留了稻薯复种轮作、稻瓜复种轮作、稻烟复种轮作、稻菜复种轮作、稻草复种轮作、稻豆间作、再生稻种植、稻鱼共作和稻鸭共作9种典型稻作模式。在西南区,通过稻田改制试验,西南丘陵区稻田新型三熟制模式“冬小麦/甜糯玉米(鲜食)-优质稻”较传统二熟制模式“油-稻”有显著增产增收效果。新型三熟制模式中,冬小麦4 a 平均产量3 820.5 kg/hm^2 ,鲜食甜糯玉米穗产量14 800.4 kg/hm^2 ,优质杂交稻稻谷产量7 654.5 kg/hm^2 ,年产值平均达到2.97万元/ hm^2 ,比传统二熟制模式净增收1.73万元/ hm^2 ^[68]。就整个南方稻田耕

作制度而言,黄国勤^[9]在大量实地调研的基础上,指出南方稻田耕作制度可持续发展面临十大问题,即:耕地面积减少、复种指数下降、冬季农业薄弱、长期复种连作、养地强度减弱、干旱缺水、洪涝灾害、资源浪费、农田土壤环境变劣和经济效益降低。针对南方稻田耕作制度存在多种突出问题,必须采取一系列战略对策和措施,如“一保”(保护稻田耕地资源)、“二扩”(扩种冬作、扩大稻作)、“三建”(建设绿色生态、建设高标准农田、建立防灾减灾体系)、“四改”(单季稻改双季稻、籼稻改粳稻、普通品种改优质品种、连作改轮作)和“五节”(节地、节水、节肥、节药、节能)。如从稻田保护性耕作技术发展来看,自20世纪50年代以来,南方各地稻田先后推广应用的保护性耕作技术有垄作、厢作、半旱式耕作、少耕、免耕、秸秆还田、直播(撒播)、抛秧、多元覆盖、立体种养、种养结合等,起到了省时(节省季节、减少农耗)、保水、保土、培肥、增效的作用^[69]。

2.5 国外稻田耕作制度

水稻是世界最重要的三大粮食作物(水稻、小麦、玉米)之一,目前全球有一半以上的人口食用稻米。全球水稻种植面积达到1.65亿 hm^2 ,其中约90%主要分布于亚洲的中国、印度、印度尼西亚、泰国、越南、缅甸、菲律宾、巴基斯坦、日本等,约10%分布于亚洲以外的巴西、美国,以及非洲部分国家。不仅中国重视稻田耕作制度的研究与发展,国外同样如此。

从稻田复种指数来看,根据有关资料,在亚洲东南部稻田上,除了一些水源不足的地区之外,多实行二熟制或三熟制,且水稻复种指数多在120%~130%^[70]。

从稻田种植方式来看,世界各地主要存在以下4种类型^[70-71]:①“旱作-水稻”两熟制。在印度北部、巴基斯坦等地稻田常实行水稻与旱作(棉花、芝麻、花生间作木豆)复种一年两熟制。②双季稻制。在印度南部、越南的红河三角洲和湄公河三角洲,以及印度尼西亚、菲律宾等地,双季稻耕作制有着广泛分布。③稻田三熟制。一是“一水二旱”制模式,如印度有“玉米-绿豆-水稻”“黄麻-稻-麦”“麦-绿豆-稻”等,越南有“甘薯-绿豆-稻”等;二是“二水一早”制模式,越南有“玉米-稻-稻”“甘薯-稻-稻”等;三是“三季稻”制模式,如热量丰富的印度泰米尔纳杜邦三角洲就有三季稻三熟制分布,面积不大。④稻虾轮作制。美国路易斯安那州2018年水稻种植面积为17.56万 hm^2 ,2019年水稻种植面积17.20万 hm^2 (总产量达到119.78万t)^[72]。该州多数稻田实行水稻与

小龙虾(克氏原螯虾)轮作制模式,使土地得以休耕,并提高了“水稻→小龙虾”轮作制模式的经济产出。其具体做法是:小龙虾养殖仅蓄水30cm左右,放置虾笼进行养殖;收获时使用自走式行走船在泥潭中行进进行收获;次年在养殖小龙虾的田块种植水稻,将小龙虾转移至其他田块进行养殖。

从近年各国对稻田耕作制度的研究来看,主要集中在以下几方面:(1)稻田轮作效益比较及轮作模式优化研究。日本学者Rikiya等^[73]研究表明,在实行免耕和施用堆肥的条件下,稻田水旱轮作对提高土壤氮肥有效性、促进作物增产具有显著效果;越南学者Linh等^[74]经过8a田间试验,对水稻-水稻-水稻、水稻-玉米-水稻、水稻-绿豆-水稻、水稻-绿豆-玉米4种复种轮作模式进行了比较研究,结果表明,水旱复种、水旱轮作有利于稻田生态经济效益的提升和稻田生态系统的可持续发展。(2)稻田耕作制度之洁田技术与模式研究。减少污染,促进清洁生产,生产绿色农产品、有机农产品,这是全球农业发展的重要方向,也是稻田耕作制度发展的必然趋势。美国稻田一般是使用特定除草剂以达到杂草防控的目的,这一洁田技术具有操作简单和低成本、低风险的特点^[72]。(3)外界不同因素和技术措施对稻田种植制度温室气体排放的影响及减排降碳路径研究。生物炭因其具有丰富的表面官能团、发达的孔隙结构和巨大的比表面积等特性,被广泛用于土壤改良、污染物降解和土壤固碳减排等领域。研究表明^[75-76],在稻田耕作制度中施用生物炭可显著降低温室效应气体强度,对促进农业绿色发展有良好影响。

3 存在问题及应对策略

3.1 存在问题

一方面,如上所述,我国稻田耕作学发展取得积极进展和显著成效;但另一方面,也必须看到,与当前“高质量发展”的大背景、总要求相比,稻田耕作学发展还存在诸多问题和不足,突出表现在以下3个方面^[4]:

1)重视不够,投入不足。同属作物学下的分支学科,耕作学远不如作物栽培学、作物遗传育种学科得到重视。同样,稻田耕作学作为耕作学下的一门分支学科,自然也没有得到应有的重视。具体表现在耕作学、稻田耕作学的科研课题少、研发平台少、研究经费少、专业人才少、学术成果少以及学科发展慢等方面。

2)理论不全,技术不新。如前所述,稻田耕作学是研究建立合理稻田耕作制度理论与技术体系的一

门综合性农业应用科学。而目前在学科理论研究方面,存在着理论不全、不完善的问题;在学科技术体系方面,总体上存在着技术不“新”、不“硬”、不“实”的问题,在生产实际中推广应用往往成效不甚显著,有“说起来容易、做起来却难”,甚至出现“见不到成效”的问题。

3)研究不深,影响不大。从耕作学、稻田耕作学的科学研究总体状况来看,存在研究还不够深入的问题。尽管新中国成立70多年来,耕作学、稻田耕作学的科学研究取得很大进展,也取得许多重要研究成果,但与作物栽培学、作物遗传育种、土壤肥料等学科相比,还存在较大差距,突出表现在研究的深度还不够,向微观方向,向分子、向基因方向的研究还远远不够,亟待深入和加强^[77-78]。因而,从社会贡献、社会影响来看,耕作学、稻田耕作学还有很大提升空间。

3.2 应对策略

针对存在的上述问题,必须采取相应的对策与措施,以促进新时代我国稻田耕作学的高质量发展。

1)提高认识。提高对稻田耕作学重要性的认识,是加快稻田耕作学建设与发展的关键。要充分认识稻田耕作学理论与技术发展,对促进国家粮食安全、食品安全、生态安全的重要意义,对促进农民增收的重要意义,对全面推进乡村振兴的重要意义,以及对整个经济社会高质量发展的重要意义。可以说,稻田耕作学的发展以及稻田耕作制度优化模式的推广应用,是我国实现农业增产、农民增收、农村富裕以及乡村全面振兴的重要途径和有力抓手。实际上,有关稻田耕作制度改革的内容,已写入2022年的中央一号文件《中共中央国务院关于做好二〇二二年全面推进乡村振兴重点工作的意见》,这充分说明稻田耕作制度之重要。显然,应高度重视稻田耕作学的建设与发展、高度重视稻田耕作制度的改革与创新。

2)加大投入。要推进稻田耕作学的建设与发展,必须增加资金和物质的投入,否则,只能是“无米之炊”。一是要多渠道增加稻田耕作学的科研项目,如国家重点研发计划项目、国家自然科学基金项目等国家级项目,各省(自治区、直辖市)的省级项目,以及其他各类项目,包括企业设立的研发项目等;二是提高科研项目经费资助强度;三是改善科研工作条件,尤其是要增加物质投入,建立稻田耕作学重点实验室、技术研发中心等科研工作平台,从而促进稻田耕作学科研工作顺利开展。

3)加快建设。要使稻田耕作学发展得好、发展

得快,“建设”是基础和关键。一是加强学科体系建设。作为耕作学的一门分支学科,稻田耕作学有其自己独特的学科体系,包括学科理论、学科技术、学科层次、学科结构等;二是加强课程建设。要在全农业高等院校和涉农综合性大学的农学等相关专业,开设《稻田耕作学》课程或教学专题,以此推动稻田耕作学“进课堂”;三是加强教材建设。要在吸收现有《耕作学》教材部分相关内容的基础上,编写一本“全新”的《稻田耕作学》教材或专著,用于教学或科研,并以此推动稻田耕作学学科发展;四是加强实习基地建设。如上所述,稻田耕作学是一门实践性很强的农业应用学科,与农业生产实际联系非常紧密,在课程教学时必须让学生(或学员)到实习基地一边学习、一边实习,做到理论与实践相结合,从而提高教学效果。五是加强人才队伍建设。“人才”是事业成功的关键。稻田耕作学要发展好、发展快、发展“顺”,加强人才队伍建设至关重要。这里特别强调不仅要加强稻田耕作学专业人才培养,还要加强稻田耕作学乡土人才培养,加强农民技术培训,使人才真正“落地”“见效”。

4)加深研究。深化稻田耕作学的科学研究,是促进稻田耕作学发展的根本之策。一是要在促进稻田耕作学向“宏观”方向发展的基础上,更加注重稻田耕作学向“微观”方向深入,要将稻田耕作学研究深入到分子水平、基因水平,研究不同稻田耕作制度模式与技术的增产增收增效的分子学机制^[79];二是要适应绿色发展和实现“双碳”(碳达峰、碳中和)目标的要求,重点研究稻田耕作制度减污降碳、固碳减排的效果及其机理,筛选绿色、低碳、高效、优化的稻田耕作制度模式及技术^[80],并在生产实践中推广应用,为国家“全面绿色转型”作出积极贡献;三是要将现代高新技术广泛应用于稻田耕作制度研究之中,当前特别要将以大数据、云计算、物联网、人工智能、区块链、5G通信等为主要内容的现代信息技术应用于稻田耕作制度研究,以期实现稻田耕作制度的数字化、智能化、规范化、标准化,从而全面推进稻田耕作制度的现代化^[81]。

5)加强交流。首先,加强国内外交流与合作,是推进稻田耕作学发展的“加速器”。只有扩大交流与合作,才有利于稻田耕作学发展的“提速”;相反,如不进行交流、合作,闭关自守、固步自封,只能使学科发展落后甚至倒退。其次,不仅要注重国内各单位、各部门、各学科之间的交流与合作,更要加强国际间的交流与合作,尤其要重视学习、借鉴世界上发达国家或地区的先进经验、先进理念、先进技术、先进方

法以及好的做法和措施。第三,开展国内外稻田耕作学交流与合作的方式方法是多种多样的,如互通信息、交换资料、资源(仪器、设备等)共享,以及互派人员(研究生、科技人员等)进行学习和开展学术讲座、合作研究,等等。

6)强化服务。稻田耕作学作为一门综合性农业应用学科,其“价值”和“作用”不仅体现在理论研究的深度、精度,更要反映在其对社会服务的广度、程度,为经济社会发展所作的贡献大小上。从这一意义上讲,强化稻田耕作学的社会服务功能,是推进其建设与发展的主要内容、重要方面,也是“检验”其发展程度、发展质量的重要方式,从而还可“倒逼”稻田耕作学更好地向前发展。

要强化稻田耕作学的社会服务功能,可有以下途径与方法:一是在“选题”上,不仅要从学术上、理论上寻找学科发展的研究选题,还要善于从生产实际中,从现实中寻找“问题”,寻找当前农业生产实际中的“急、难、愁、盼”问题,以“问题”为导向、为主攻方向、为科研选题;二是要将研究成果、将解决“问题”的答案和方案及时在生产实践中推广应用,及时转化为现实生产力;三是在稻田耕作学的教学、科研工作中,要始终贴近“三农”(农业、农村、农民),围绕“三农”开展各项工作,包括示范推广、技术培训、科技咨询等。只有这样,才能使稻田耕作学不仅理论上得到发展、深化,技术上也能得到扩展、提升,从而实现理论与实践相结合、理论与技术同发展,并最终实现稻田耕作学的高质量发展。

参考文献 References

- [1] 浙江农业大学. 耕作学(南方本)[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1984. Zhejiang Agricultural University. Agropinology (southern edition) [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1984 (in Chinese).
- [2] 黄国勤. 中国耕作学[M]. 北京: 新华出版社, 2001. HUANG G Q. Chinese agropinology [M]. Beijing: Xinhua Publishing House, 2001 (in Chinese).
- [3] 国务院第三次全国国土调查领导小组办公室, 自然资源部, 国家统计局. 第三次全国国土调查主要数据公报[N]. 人民日报, 2021-08-27(17). Office of the Third National Land Survey Leading Group of the State Council, Ministry of Natural Resources, National Bureau of Statistics. Main data bulletin of the Third National Land Survey [N]. People's daily, 2021-08-27(17) (in Chinese).
- [4] 黄国勤. 市场经济: 耕作学科生存与发展[J]. 高等农业教育, 2000(7): 50-52. HUANG G Q. Market economy: survival and development of farming discipline [J]. Higher agricultural education, 2000 (7): 50-52 (in Chinese).
- [5] 黄国勤. 我对耕作学未来及其发展趋势的看法[J]. 江西农业大学学报, 1988, 10(1): 66-69. HUANG G Q. My thoughts on the future of agropinology and its trends [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 1988, 10(1): 66-69 (in Chinese).
- [6] 金涛. 中国粮食作物种植结构调整及其水土资源利用效应[J]. 自然资源学报, 2019, 34(1): 14-25. JIN T. The adjustment of China's grain cropping structure and its effect on the consumption of water and land resources [J]. Journal of nature resources, 2019, 34(1): 14-25 (in Chinese with English abstract).
- [7] 唐亮, 陈温福. 东北粳稻发展趋势及展望[J]. 中国稻米, 2021, 27(5): 1-4. TANG L, CHEN W F. Development trend and prospect of geng rice in northeast China [J]. China rice, 2021, 27(5): 1-4 (in Chinese with English abstract).
- [8] 罗海平, 潘柳欣, 胡学英, 等. 我国粮食主产区粮食安全保障的生态代价评估: 2000—2018年[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(1): 1-7. LUO H P, PAN L X, HU X Y, et al. Assessment of ecological cost of food security in major grain producing areas in China: 2000—2018 [J]. Journal of arid land resources and environment, 2022, 36(1): 1-7 (in Chinese with English abstract).
- [9] 黄国勤. 南方稻田耕作制度可持续发展面临的十大问题[J]. 耕作与栽培, 2009(3): 1-2, 5. HUANG G Q. Ten problems of sustainable development of paddy farming systems in South China [J]. Tillage and cultivation, 2009(3): 1-2, 5 (in Chinese).
- [10] 刘巽浩, 韩湘玲. 论提高光能利用率的途径与种植改革[J]. 植物学通报, 1984, 2(2/3): 12-17. LIU X H, HAN X L. On the ways to improve the utilization rate of light energy and the reform of planting [J]. Chinese bulletin of botany, 1984, 2(2/3): 12-17 (in Chinese).
- [11] 沈学年. 农业生态系统与耕作制度[J]. 耕作与栽培, 1983(6): 8-10. SHEN X N. Agro-ecosystems and farming systems [J]. Tillage and cultivation, 1983 (6): 8-10 (in Chinese).
- [12] 师小平, 陈银萍, 闫志强, 等. 植物化感作用研究进展[J]. 生物技术通报, 2020, 36(6): 215-222. SHI X P, CHEN Y P, YAN Z Q, et al. Research progress on plant allelopathy [J]. Biotechnology bulletin, 2020, 36(6): 215-222 (in Chinese with English abstract).
- [13] 耿贵, 杨瑞瑞, 於丽华, 等. 作物连作障碍研究进展[J]. 中国农学通报, 2019, 35(10): 36-42. GENG G, YANG R R, YU L H, et al. Crop continuous obstacles: research progress [J]. Chinese agricultural science bulletin, 2019, 35(10): 36-42 (in Chinese with English abstract).
- [14] 中华人民共和国国务院新闻办公室. 中国的生物多样性保护 [N]. 人民日报, 2021-10-09(4). The State Council Information Office of the People's Republic of China. Biodiversity conservation in China [N]. People's daily, 2021-10-09(4) (in Chinese).
- [15] 尹丽辉, 常望霓, 肖顺勇, 等. 关于南方稻田生物多样性问题的分析[J]. 农业环境与发展, 2010, 27(5): 13-14. YIN L H, CHANG W N, XIAO S Y, et al. Analysis on the biodiversity of rice fields in the south [J]. Agricultural environment and development, 2010, 27(5): 13-14 (in Chinese).
- [16] 黄国勤, 高旺盛. 中国集约型农作制可持续发展[M]. 南昌: 江西科学技术出版社, 2000. HUANG G Q, GAO W S. Sustainable

- development of intensive farming systems in China [M]. Nanchang: Jiangxi Science and Technology Press, 2000 (in Chinese).
- [17] 胡跃高, 曾昭海. 农业原理 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2018. HU Y G, ZENG Z H. Principles of agriculture [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2018 (in Chinese).
- [18] 沈学年, 刘巽浩. 多熟种植 [M]. 北京: 农业出版社, 1983. SHEN X N, LIU X H. Multiple cropping [M]. Beijing: Agricultural Press, 1983 (in Chinese).
- [19] 黄国勤. 论大力发展多熟种植技术 [J]. 耕作与栽培, 2008(6): 1-2, 24. HUANG G Q. On vigorously developing multi-cropping planting technology [J]. Tillage and cultivation, 2008 (6): 1-2, 24 (in Chinese).
- [20] 翟孟源, 徐新良, 姜小三. 我国长江中下游农业区冬闲田的遥感监测分析 [J]. 地球信息科学学报, 2012, 14(3): 389-397. ZHAI M Y, XU X L, JIANG X S. A Method on information extraction of winter fallow fields in middle and lower reaches of yangtze river by remote sensing [J]. Journal of geo-information science, 2012, 14(3): 389-397 (in Chinese with English abstract).
- [21] 钟旭华, 潘俊峰, 李康活, 等. 广东省农业科学院水稻耕作栽培研究 60 年: 成就与展望 [J]. 广东农业科学, 2020, 47(11): 9-17. ZHONG X H, PAN J F, LI K H, et al. Sixty years' research on rice tillage and cultivation by guangdong academy of agricultural sciences: achievements and prospects [J]. Guangdong agricultural sciences, 2020, 47(11): 9-17 (in Chinese with English abstract).
- [22] 黄国勤. 农业可持续发展导论 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2007. HUANG G Q. Introduction to agricultural sustainable development [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2007 (in Chinese).
- [23] 芦晓春. 为了“农田必须是良田”——我国强化耕地保护和农田建设工作综述 [N]. 农民日报, 2022-02-08(1). LU X C. Insisting on “farmland must be fertile land”: summary of strengthening cultivated land protection and farmland construction in my country [N]. Farmers' daily, 2022-02-08(1) (in Chinese).
- [24] 朱隽, 顾仲阳, 王浩, 等. 稳字当头看“三农” [N]. 人民日报, 2022-02-12(1). ZHU J, GU Z Y, WANG H, et al. Look at “Agriculture, Rural Areas and Farmers” with the word “Stability” [N]. People's daily, 2022-02-12(1) (in Chinese).
- [25] 农业农村部农田建设管理司. 全国高标准农田建设规划 (2021—2030 年) [J]. 中国农业综合开发, 2021(9): 4-22. Department of Farmland Construction Management, Ministry of Agriculture and Rural Affairs. National high-standard farmland construction plan (2021—2030) [J]. Agricultural comprehensive development in China, 2021(9): 4-22 (in Chinese).
- [26] 褚光, 陈松, 徐春梅, 等. 我国稻田种植制度的演化及展望 [J]. 中国稻米, 2021, 27(4): 63-65. CHU G, CHEN S, XU C M, et al. Development status and prospect of paddy multiple cropping systems in China [J]. China rice, 2021, 27(4): 63-65 (in Chinese with English abstract).
- [27] 孟洪基, 肖应聪. 关于汉中稻田作物布局的一些意见 [J]. 陕西农业科学, 1981 (6): 11-13. MENG H J, XIAO Y C. Some opinions on the layout of rice fields in Hanzhong [J]. Shaanxi journal of agricultural sciences, 1981 (6): 11-13 (in Chinese).
- [28] 汪汉林. 观山村稻田作物结构优化模型研究 [J]. 农业现代化研究, 1985 (6): 45-49. WANG H L. Research on crop structure optimization model of paddy field in Guanshan Village [J]. Research of agricultural modernization, 1985 (6): 45-49 (in Chinese).
- [29] 李达模. 湖南桃源丘平区稻田作物结构优化模型初探 [J]. 作物杂志, 1989 (1): 19-21. LI D M. A Preliminary study on the optimization model of rice field crop structure in Qiuping District, Taoyuan, Hunan [J]. Crops, 1989 (1): 19-21 (in Chinese).
- [30] 陈玉君. 稻田种植结构的生物多样性及对害虫和天敌种群的影响 [J]. 作物研究, 2008 (2): 103-105. CHEN Y J. Biodiversity indifferent planting structure in paddy field and its effect on the population of pest and natural enemy [J]. Crop research, 2008 (2): 103-105 (in Chinese with English abstract).
- [31] 向慧敏, 章家恩, 罗明珠, 等. 水稻与水芹间作栽培对水稻病虫害和产量的影响 [J]. 生态与农村环境学报, 2013, 29(1): 58-63. XIANG H M, ZHANG J E, LUO M Z, et al. Effects of intercropping rice with *Oenanthe javanica* on diseases, pests and weeds hazards and yield of rice [J]. Journal of ecology and rural environment, 2013, 29(1): 58-63 (in Chinese with English abstract).
- [32] 李妹娟, 周念, 章家恩, 等. 不同水稻品种混作养鸭对土壤养分动态的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(2): 211-220. LI M J, ZHOU N, ZHANG J E, et al. Effect of rice varieties mixed-cropping with duck raising on nutrient dynamics in paddy soils [J]. Chinese journal of eco-agriculture, 2017, 25(2): 211-220 (in Chinese with English abstract).
- [33] 李萍, 杨滨娟, 张鹏, 等. 紫云英与油菜混播对双季稻产量、植株干物质及氮素吸收利用的影响 [J]. 江西农业大学学报, 2020, 42(2): 219-228. LI P, YANG B J, ZHANG P, et al. Effects of the mixture of Chinese milk vetch and rape on the yield, dry matter and nitrogen uptake and utilization of double cropping rice [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2020, 42(2): 219-228 (in Chinese with English abstract).
- [34] 李忠义, 蒙炎成, 何铁光, 等. 稻底套播紫云英轻筒栽培技术要点及还田方式 [J]. 中国热带农业, 2016 (6): 82-83. LI Z Y, MENG Y C, HE T G, et al. The key points of cultivation techniques and the method of returning to the field for interplanting astragalus in rice [J]. China tropical agriculture, 2016 (6): 82-83 (in Chinese).
- [35] 陈娟, 陈建萍, 胡芳芳, 等. 稻田套播麦不同共生期试验小结 [J]. 农业装备技术, 2015, 41(6): 20-22. CHEN J, CHEN J P, HU F F, et al. Summary of different symbiotic periods of interplanting wheat in paddy field [J]. Agricultural equipment & technology, 2015, 41(6): 20-22 (in Chinese).
- [36] 郑伟, 叶川, 肖国滨, 等. 油-稻共生期对谷林套播油菜苗期性状及产量形成的影响 [J]. 中国农业科学, 2015, 48(21): 4254-4263. ZHENG W, YE C, XIAO G B, et al. Effects of symbiotic period on seedling traits and yield components of interplanting rapeseed in rice [J]. Scientia agricultura sinica, 2015, 48(21): 4254-4263 (in Chinese with English abstract).
- [37] 郑伟, 肖国滨, 肖小军, 等. 稻茬高度对谷林套播油菜生长发育及产量形成的影响 [J]. 中国农业科学, 2017, 50(4): 648-656. ZHENG W, XIAO G B, XIAO X J, et al. Effects of rice stubble

- height on growth, development, and yield components of inter-planted rapeseed in rice [J]. *Scientia agricultura sinica*, 2017, 50 (4): 648-656 (in Chinese with English abstract).
- [38] 唐海洋, 冯涛, 李政杰, 等. 长江下游农区水稻套播多花黑麦草播种时间的研究 [J]. *草地学报*, 2017, 25 (6): 1274-1279. TANG H Y, FENG T, LI Z J, et al. Study on intercropping italian ryegrass into paddy rice field in lower reaches of Yangtze River [J]. *Acta agrestia sinica*, 2017, 25 (6): 1274-1279 (in Chinese with English abstract).
- [39] 蒋敏, 李秀彬, 辛良杰, 等. 中国南方水稻复种指数变化: 对国家粮食生产能力的影 响及政策启示 [J]. *地理科学杂志*, 2019, 29 (11): 1773-1787. JIANG M, LI X B, XIN L J, et al. Paddy rice multiple cropping index changes in Southern China: impacts on national grain production capacity and policy implications [J]. *Journal of geographical sciences*, 2019, 29 (11): 1773-1787.
- [40] 伍思平, 睦锋, 肖小军, 等. 南方双季稻区不同复种方式对稻田综合温室效应的影响 [J]. *核农学报*, 2020, 34 (2): 376-382. WU S P, SUI F, XIAO X J, et al. Effects of different multiple cropping pattern on the global warming potential in southern double cropping rice fields [J]. *Journal of nuclear agricultural sciences*, 2020, 34 (2): 376-382 (in Chinese with English abstract).
- [41] 黄国勤, 熊云明, 钱海燕, 等. 稻田轮作系统的生态学分析 [J]. *土壤学报*, 2006, 43 (1): 69-78. HUANG G Q, XIONG Y M, QIAN H Y, et al. Ecological analysis of crop rotation systems in paddy field [J]. *Acta pedologica sinica*, 2006, 43 (1): 69-78 (in Chinese with English abstract).
- [42] 高菊生, 徐明岗, 董春华, 等. 长期稻-稻-绿肥轮作对水稻产量及土壤肥力的影响 [J]. *作物学报*, 2013, 39 (2): 343-349. GAO J S, XU M G, DONG C H, et al. Effects of long-term rice-rice-green manure cropping rotation on rice yield and soil fertility [J]. *Acta agronomica sinica*, 2013, 39 (2): 343-349 (in Chinese with English abstract).
- [43] 杨滨娟, 邓丽萍, 袁嘉欣, 等. 稻田复种轮作下周年温室气体排放及综合效益评价 [J]. *江苏农业科学*, 2022, 50 (2): 225-231. YANG B J, DENG L P, YUAN J X, et al. Annual greenhouse gas emission and comprehensive benefit evaluation under multiple cropping and rotation in rice fields [J]. *Jiangsu agricultural sciences*, 2022, 50 (2): 225-231 (in Chinese with English abstract).
- [44] 夏文建, 柳开楼, 张丽芳, 等. 长期施肥对红壤稻田土壤微生物生物量和酶活性的影响 [J]. *土壤学报*, 2021, 58 (3): 628 - 637. XIA W J, LIU K L, ZHANG L F, et al. Effect of long-term fertilization on oil microbial biomass and enzyme activities in reddish paddy soil [J]. *Acta pedologica sinica*, 2021, 58 (3): 628 - 637 (in Chinese with English abstract).
- [45] 张靖, 朱潇, 沈健林, 等. 生物有机肥与化肥配施对稻田氨挥发的影响 [J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2022, 30 (1): 15-25. ZHANG J, ZHU X, SHEN J L, et al. Effects of combined application of microbial organic fertilizer and chemical fertilizer on ammonia volatilization in a paddy field with double rice cropping [J]. *Chinese journal of eco-agriculture*, 2022, 30 (1): 15-25 (in Chinese with English abstract).
- [46] 周兵. 紫云英翻压对水稻产量及稻田土壤性状的影响 [J]. *现代农业科技*, 2017 (8): 5-7. ZHOU B. Effects of vetch on rice yield and soil properties in paddy fields [J]. *Modern agricultural science and technology*, 2017 (8): 5-7 (in Chinese).
- [47] 高嵩涓, 周国朋, 曹卫东. 南方稻田紫云英作冬绿肥的增产节肥效应与机制 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26 (12): 2115-2126. GAO S J, ZHOU G P, CAO W D. Effects of milk vetch (*Astragalus sinicus*) as winter green manure on rice yield and rate of fertilizer application in rice paddies in south China [J]. *Journal of plant nutrition and fertilizers*, 2020, 26 (12): 2115-2126 (in Chinese with English abstract).
- [48] 黄国勤. 江西省耕作制度理论与实践 [M]. 南昌: 江西科学技术出版社, 1996. HUANG G Q. Theory and practice of farming systems in Jiangxi Province [M]. Nanchang: Jiangxi Science and Technology Press, 1996 (in Chinese).
- [49] 赵朝森, 王瑞珍, 赵现伟, 等. 江西省“禾根豆”生产现状及发展潜力与对策 [J]. *农业科技通讯*, 2016 (4): 3-7. ZHAO C S, WANG R Z, ZHAO X W, et al. Production status, development potential and countermeasures of “Stubble Soybean” in Jiangxi Province [J]. *Bulletin of agricultural science and technology*, 2016 (4): 3-7 (in Chinese).
- [50] 李新悦, 李冰, 莫太相, 等. 长期秸秆还田对水稻土团聚体及氮磷钾分配的影响 [J]. *应用生态学报*, 2021, 32 (9): 3257-3266. LI X Y, LI B, MO T X, et al. Effects of long-term straw returning on distribution of aggregates and nitrogen, phosphorus, and potassium in paddy [J]. *Chinese journal of applied ecology*, 2021, 32 (9): 3257-3266 (in Chinese with English abstract).
- [51] 罗玉琼, 严博, 吴可, 等. 免耕和稻草还田对稻田土壤肥力和水稻产量的影响 [J]. *作物杂志*, 2020 (5): 133-139. LUO Y Q, YAN B, WU K, et al. Effects of no-tillage and straw returning on soil fertility and rice yield in farmland [J]. *Crops*, 2020 (5): 133-139 (in Chinese with English abstract).
- [52] 冯静琪, 曹卫东, 高嵩涓, 等. 稻秸还田提高我国南方典型稻田冬绿肥产量和养分积累 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28 (1): 72 - 82. FENG J Q, CAO W D, GAO S J, et al. Returning rice straw to the field increased the yield and nutrient accumulation of green manure crops in a typical paddy field in South China [J]. *Journal of plant nutrition and fertilizers*, 2022, 28 (1): 72-82 (in Chinese with English abstract).
- [53] 黄国勤, 杨滨娟, 王淑彬, 等. 稻田实行保护性耕作对水稻产量、土壤理化及生物学性状的影响 [J]. *生态学报*, 2015, 35 (4): 1225-1234. HUANG G Q, YANG B J, WANG S B, et al. Effects of 8 years of conservational tillage on rice yield and soil physical, chemical and biological properties [J]. *Acta ecologica sinica*, 2015, 35 (4): 1225-1234 (in Chinese with English abstract).
- [54] 王兴, 祁剑英, 井震寰, 等. 长期保护性耕作对稻田土壤团聚体稳定性和碳氮含量的影响 [J]. *农业工程学报*, 2019, 35 (24): 121-128. WANG X, QI J Y, JING Z H, et al. Effects of long-term conservation tillage on soil aggregate stability and carbon and nitrogen in paddy field [J]. *Transactions of CSAE*, 2019, 35 (24): 121-128 (in Chinese with English abstract).
- [55] 赵其国, 滕应. 中国耕地轮作休耕制度研究 [M]. 北京: 科学出

- 版社,2019.ZHAO Q G, TENG Y. Study on cultivated land rotation and fallow system in China[M]. Beijing: Science Press, 2019 (in Chinese).
- [56] 郁静娴,孙超,高云才. 农业绿色发展迈上新台阶[N]. 人民日报, 2021-11-19(6). YU J X, SUN C, GAO Y C. Agricultural green development has reached a new level[N]. People's daily, 2021-11-19(6) (in Chinese).
- [57] 谷雨,蒋平,李明德,等. 治理式休耕对“长株潭”镉污染稻田土壤理化特性及镉含量的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(3): 393-400. GU Y, JIANG P, LI M D, et al. Effect of managed fallow on soil physicochemical properties and cadmium content in cadmium-contaminated paddy fields in “Changzhutan”[J]. Journal of agricultural resources and environment, 2021, 38(3): 393-400 (in Chinese with English abstract).
- [58] 王志强,刘英,杨文亭,等. 稻田复种轮作休耕对土壤团聚体分布及稳定性的影响[J]. 土壤学报, 2018, 55(5): 1143-1155. WANG Z Q, LIU Y, YANG W T, et al. Effects of rotation and fallow in paddy field on distribution and stability of soil aggregates[J]. Acta pedologica sinica, 2018, 55(5): 1143-1155 (in Chinese with English abstract).
- [59] 汤文光,肖小平,张海林,等. 轮耕对双季稻田耕层土壤养分库容及Cd含量的影响[J]. 作物学报, 2018, 44(1): 105-114. TANG W G, XIAO X P, ZHANG H L, et al. Effects of rotational tillage on nutrient storage capacity and cd content in tilth soil of double-cropping rice region[J]. Acta agronomica sinica, 2018, 44(1): 105-114 (in Chinese with English abstract).
- [60] 黄国勤. 稻田保护性耕作:理论、模式与技术[M]. 北京:中国农业出版社, 2020. HUANG G Q. Conservation tillage in rice fields: theory, model and technology [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2020 (in Chinese).
- [61] 黄璜,傅志强,刘小燕,等. 论农田生态种养工程[J]. 作物研究, 2019, 33(5): 339-345. HUANG H, FU Z Q, LIU X Y, et al. On farmland ecological planting and breeding project [J]. Crop research, 2019, 33(5): 339-345 (in Chinese with English abstract).
- [62] 孟草,田威,文春根,等. 江西省稻渔综合种养产业发展特征及对策[J]. 中国稻米, 2022, 28(1): 28-31. MENG C, TIAN W, WEN C G, et al. Development characteristics and countermeasures of rice-fishing farming industry in Jiangxi [J]. China rice, 2022, 28(1): 28-31 (in Chinese with English abstract).
- [63] 郭瑶,肖求清,曹湊贵,等. 稻虾共作对稻田杂草群落组成及物种多样性的影响[J]. 华中农业大学学报, 2020, 39(2): 17-24. GUO Y, XIAO Q Q, CAO C G, et al. Effects of rice-crayfish ecosystems on weed community composition and species diversity in paddy fields [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2020, 39(2): 17-24 (in Chinese with English abstract).
- [64] 许辉,赵阳阳,孙东岳,等. 稻虾共作模式研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2022, 24(2): 160-168. XU H, ZHAO Y Y, SUN D Y, et al. Progress in integrated rice-crayfish farming system [J]. Journal of agricultural science and technology, 2022, 24(2): 160-168 (in Chinese with English abstract).
- [65] 农业农村部渔业渔政管理局,全国水产技术推广总站,中国水产学会.“十三五”中国稻渔综合种养产业发展报告[J]. 中国水产, 2022(1): 43-52. Fisheries and fishery administration of the Ministry of agriculture and rural areas, National Aquatic Technology Promotion Station, China Fisheries Society. “Thirteenth Five-Year Plan” report on the development of China’s rice-fishing comprehensive planting and breeding industry [J]. China fisheries, 2022(1): 43-52 (in Chinese).
- [66] 程凯凯,李超,汪柯,等. 湖南省稻田农作制度的问题与发展[J]. 湖南农业科学, 2016(2): 107-110. CHENG K K, LI C, WANG K, et al. Problems and development of paddy field farming system in Hunan [J]. Hunan agricultural sciences, 2016(2): 107-110 (in Chinese with English abstract).
- [67] 王玉洁,樊荣荣,吕昭君,等. 尤溪联合梯田稻作制度的演变与发展[J]. 亚热带农业研究, 2019, 15(1): 14-19. WANG Y J, FAN R R, LV Z J, et al. Evolution and development of rice cropping system in Lianhe terrace fields of Youxi County [J]. Subtropical agriculture research, 2019, 15(1): 14-19 (in Chinese with English abstract).
- [68] 何川. 西南丘陵区稻田2熟变3熟高产高效耕作模式[J]. 耕作与栽培, 2000(6): 23. HE C. High yield and high efficiency tillage model of paddy field from 2 to 3 in hilly area of Southwest China [J]. Tillage and cultivation, 2000(6): 23 (in Chinese).
- [69] 李向东,陈源泉,隋鹏,等. 中国南方集约型多熟稻田保护性耕作制度[J]. 生态学杂志, 2007, 26(10): 1653-1656. LI X D, CHEN Y Q, S P, et al. Conservation farming system on intensive multiple-cropping paddy fields in South China [J]. Chinese journal of ecology, 2007, 26(10): 1653-1656 (in Chinese with English abstract).
- [70] 刘巽浩. 农作学[M]. 北京:中国农业大学出版社, 2005. LIU X H. Science of farming systems [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2005 (in Chinese).
- [71] 高旺盛. 中国农业与世界农业概论[M]. 北京:高等教育出版社, 2009. GAO W S. Introduction to Chinese agriculture and world agriculture [M]. Beijing: Higher Education Press, 2009 (in Chinese).
- [72] 潘英华,梁天锋,梁云涛,等. 美国的水稻生产特点及对我国的启示——以路易斯安那州为例[J]. 中国稻米, 2020, 26(6): 79-81. PAN Y H, LIANG T F, LIANG Y T, et al. Characteristics of rice production in the United States and implications for China: Louisiana as an example [J]. China rice, 2020, 26(6): 79-81 (in Chinese).
- [73] RIKIYA N, HIDEO H, AKIKO I, et al. Soil nitrogen fertility and soybean growth responses to no-tillage and manure compost application on paddy-upland rotation fields [J]. Communications in soil science and plant analysis, 2020, 51(20): 2569-2580.
- [74] LINH T B, VAN K L, ELSACKER S V, et al. Effect of cropping system on physical properties of clay under intensive rice cultivation [J]. Land Degrad Develop, 2016, 27: 973-982
- [75] MUHAMMAD A, MUHAMMAD B C, ATHAR M, et al. Rice residue-based biochar mitigates N₂O emission from acid Red Soil [J]. Agronomy, 2021, 11: 1-13.
- [76] CANATOY RONLEY C, CHO S R, OK Y S, et al. Critical

- evaluation of biochar utilization effect on mitigating global warming in whole rice cropping boundary[J/OL]. *Science of the total environment*, 2022, 827: 154344 [2022-03-23]. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154344>.
- [77] 陈卓, 黄高宝, 任天志, 等. 对我国耕作学学科进一步发展的思考[J]. *高等农业教育*, 1994 (3): 42-44. CHEN F, HUANG G B, REN T Z, et al. Thoughts on the further development of farming discipline in China[J]. *Higher agricultural education*, 1994 (3): 42-44 (in Chinese).
- [78] 中国科学技术协会, 中国作物学会. 作物学学科发展报告(2014—2015年)[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2016. China Association of Science and Technology, China Crop Society. *Crop science discipline development report (2014—2015)* [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2016 (in Chinese).
- [79] 黄国勤. 长江中下游地区稻田耕作制度发展与研究[M]. 北京: 科学出版社, 2021. HUANG G Q. *Development and research on paddy farming system in the middle and lower reaches of the Yangtze River* [M]. Beijing: Science Press, 2021 (in Chinese).
- [80] 张卫建, 严圣吉, 张俊, 等. 国家粮食安全与农业双碳目标的双赢策略[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(18): 3892-3902. ZHANG W J, YAN S J, ZHANG J, et al. Win-win strategy for national food security and agricultural double-carbon goals[J]. *Scientia agricultura sinica*, 2021, 54(18): 3892-3902 (in Chinese with English abstract).
- [81] 陈卓, 姜雨林, 尹小刚. 中国耕作制度发展及区划方案调整[J]. *中国农业资源与区划*, 2021, 42(3): 1-6. CHEN F, JIANG Y L, YIN X G. Adjustment of China's farming system regionalization scheme [J]. *Journal of China agricultural resources and regional planning*, 2021, 42(3): 1-6 (in Chinese with English abstract).

Theory and practice of paddy agroprinoogy

HUANG Guoqin

Center for Ecological Sciences, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China

Abstract Paddy agroprinoogy is a branch of farming science, which is a comprehensive applied agricultural science that studies the establishment of a reasonable theoretical and technical system of paddy farming system. Paddy agroprinoogy has theoretical, practical, comprehensive and regional characteristics. The theoretical system of paddy agroprinoogy includes the theory of ecological adaptability, the theory of light energy utilization, the theory of life factor, the theory of competition and complementarity, and the theory of allelopathy and biodiversity. The establishment of a reasonable paddy farming systems should follow the principle of combination of use and cultivation, the principle of simultaneous development of economic benefits, social benefits and ecological benefits, the principle of coverage in winter, spring, summer and autumn, the principle of equal emphasis on land saving, water saving, fertilizer saving, pesticide saving and energy saving, and the principles of matching good farmland, good farming systems, good varieties, good methods of cultivation, good input of agricultural material and good environment. Since the founding of New China more than 70 years ago, especially since the new century, paddy agroprinoogy has made positive progress in the composition and distribution of crop, the patterns of paddy farming, the methods of land maintenance, the development of regional paddy farming systems, and the studies on paddy farming system abroad. The content of studies is deepening, the scope of studies is expanding, the achievements of studies are increasing, and the benefits of studies are emerging. At present, the development of paddy agroprinoogy still has some outstanding problems including insufficient attention, insufficient investment, incomplete theory, lack of new technology, less studies in depth and little impact compared with the general background and requirements of "high-quality developmen". It is urgent to take the countermeasures and measures including raising awareness, increasing investment, accelerating construction, deepening studies, strengthening exchanges and services.

Keywords paddy agroprinoogy; farming system; conservation tillage; land maintenance system; green development; high quality development; sustainable development

(责任编辑: 张志钰)