

DOI: 10.12357/cjea.20210616

胡涛, 齐晔, 孙鸿良. 中国生态农业四十年: 回顾与展望——纪念生态农业理念倡导者马世骏先生逝世 30 周年[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(12): 2107–2115

HU T, QI Y, SUN H L. Forty years of China's eco-agriculture: Looking back and looking forward—To commemorate the 30th anniversary of Professor MA Shijun's death, the founder and promoter of eco-agriculture concept[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(12): 2107–2115

中国生态农业四十年: 回顾与展望 ——纪念生态农业理念倡导者马世骏先生逝世 30 周年

胡 涛¹, 齐 晔², 孙鸿良³

(1. 湖石可持续发展研究所 深圳 518081; 2. 清华大学公共管理学院 北京 100083; 3. 中国农业科学院 北京 100081)

摘 要: 本文追溯了马世骏先生倡导的生态农业理念的提出及其产生背景, 对中国生态农业 40 年的发展进行了回顾, 认为生态农业理念被广泛接受, 并进入生态文明新阶段; 生态农业技术经济体系建立、生态经济效益不断上升; 生态农业对实现碳中和的作用逐渐凸显。同时, 本文也指出了目前生态农业发展所面临的挑战: 生态农业的工程化、体系化程度仍不够高; 生态农业与碳市场衔接度不高; 市场上的生态农产品尚需消费者的更多认可; 生态农业建设缺乏充分的政策支持; 生态农产品的国际贸易程度依然偏低。展望未来的生态农业建设, 作者认为: 生态农业建设应更加工程化、智能化、低碳化; 生态农产品的市场化价值提高; 生态农业的政策更加精准化、协调化; 我国的生态农业模式在国际市场上受到高度认可, 产品可信度将不断提高。

关键词: 生态农业; 生态文明; 低碳农业; 马世骏

中图分类号: X171.3

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



Forty years of China's eco-agriculture: Looking back and looking forward—To commemorate the 30th anniversary of Professor MA Shijun's death, the founder and promoter of eco-agriculture concept

HU Tao¹, QI Ye², SUN Hongliang³

(1. Lakestone Institute for Sustainable Development (LISD), Shenzhen 518081, China; 2. School of Public Policy and Management, Tsinghua University, Beijing 100083, China; 3. Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: This paper has reviewed the concept and background of Eco-agriculture proposed and promoted by Prof. Ma Shijun. Looking back the past 40 years' development of China's eco-agriculture, the authors think eco-agriculture has been widely accepted and has been integrated into the new era of ecological civilization; technical economic system has been established and ecological economic benefits have been increasing; the eco-agricultures' critical role for carbon neutrality has been gradually evolved. And also the key challenges of eco-agriculture have been pointed out: engineering and systematical level are not high enough; the degree of connecting to the Carbon Market is not enough; eco-agriculture foods need to be recognized more by consumers in the market; policy supports to eco-agriculture development are not sufficient; international trade volume of eco-agriculture products are pretty small. Looking forward, the authors think eco-agriculture are to be more engineering, intelligent and lower carbon; market value of eco-agriculture products are to be enlarged; supporting policies for eco-agriculture are to be more acupuncture and coordinated; China's eco-agriculture development model and credibility of eco-agriculture foods are to be more recognized internationally.

Keywords: Eco-agriculture; Ecological civilization; Low carbon agriculture; MA Shijun

胡涛, 研究方向为减污降碳、温室气体减排、环境贸易与可持续发展以及环境经济政策。E-mail: hutao@lisd.org.cn

收稿日期: 2021-09-08 接受日期: 2021-10-29

Corresponding author, HU Tao, E-mail: hutao@lisd.org.cn

Received Sep. 8, 2021; accepted Oct. 29, 2021

<http://www.ecoagri.ac.cn>

1 生态农业理念的提出及其产生背景

农业是社会发展与繁荣的基础^[1]。经历了从原始的刀耕火种、自给自足的传统农业到现代化农业,通过科学技术的进步和土地利用的集约化,人类社会在农业生产上取得了巨大的成就。但建立在工业化基础上的现代农业,消耗大量资源和能源也带来了一些严重问题,并引发了包括生物多样性丧失、水土流失、土地退化、生态资产破坏、环境污染等一系列全球性的生态与环境问题^[2-3]。据统计我国西北地区以人为因素造成生态资产破坏损失值最大的是新疆和青海,分别占其 1985 年国民经济收入的 86.3% 和 93.5%,甘肃和陕西次之,分别占 10.62% 和 8.97%^[4]。造成这些问题的原因是多样的,其中农业的发展方式或是关键之一。人们越来越认识到农业的目标不仅要提高产量,还需提高产品质量、确保食品安全;不仅要提高土地产出率、获得经济利益,更应尊重自然、保护环境,发挥生态系统的多种环境服务功能并促进农村的可持续发展^[5]。由于过度利用造成农业生态资产破坏,许多地方尝试以“生态补偿”来补救。为了纠正在经济建设模式上追求表面繁荣的失误以及在政策法规上缺乏约束力等问题,研究者和实践者纷纷探求重建农业新模式来替代^[6]。各国纷纷提出了有机农业、生物农业、自然农业、生态农业、复合农业、循环农业、可持续农业等模式与理念。尽管它们的名称和内涵不尽相同,但是都反映了适应时代变革和探索农业可持续发展的强烈愿望^[7]。

四十多年前,著名生态学家马世骏先生适时提出生态工程建设的设想。1987 年,马世骏、李松华先生撰文^[8]指出:“生态工程是应用生态系统中物种共生与物质循环再生的原理,结合系统工程的最优化方法,设计的分层多级利用物质的生产工艺系统”,并指出:“运用了生态工程原理建立起来的农业才是生态农业”。

人类对生态系统的利用往往超越了自然生态系统稳定性和恢复力的阈限,造成生态系统退化。石油农业的理论和实践不符合生态工程的原理,需要以生态农业对其进行改造甚至替代。20 世纪 80 年代末 90 年代初,我国各地纷纷发展生态村、生态县,这与马世骏先生的生态工程理念在全国传播有关。同时国家连续几年发布的一号文件强调调整农业产业结构,皆起到了重要的引导作用。早在 20 世纪 90 年代初,全国生态农业试点就达 2000 多个,通过评审的生态村、乡、县、市等达 100 多个。马世骏先生

对此颇为肯定,他在作为笔者之一 1993 年主编出版的《生态农业的理论与方法》一书的序言中写道:“生态农业在我国的兴起,有其政治、社会、经济背景,现时各地建立的生态农业试点(或称农业生态工程、废物资源化工程等)已不同程度地显示出它在缓解粮食、资源、农村能源、人口(就业)、环境污染五大世界性重大社会问题上所起的作用,同时对我国农村经济增长做出了贡献”^[9]。说明生态农业试点早在 40 年前就已取得了显著成效。

2 中国生态农业 40 年回顾

2.1 生态农业理念被广泛接受,并进入生态文明新阶段

李文华把中国生态农业的发展大致分为传统技能积累、起步发展、稳步发展和创新发展 4 个阶段^[5]。他认为中国自古崇尚“天人合一”、保护自然、用地养地相结合。在朴素的生态学思想的指引下,开发了一系列宝贵的生态农业模式与技术^[10]。例如以稻鱼共生、桑基鱼塘为代表的农业综合模式,和以都江堰、坎儿井为典型的传统农业工程等。在长期的农业实践中积累了朴素而丰富的经验,奠定了人与自然共荣共存的生态哲学理念,并蕴涵着值得今天借鉴的生态保护和可持续发展的意识。

我国生态起步发展阶段肇始于将朴素的传统经验上升到科学理论和方法^[11]。20 世纪 80 年代初,针对农业现代化的一些弊端^[12],学术界在深入调查中,对我国农业发展道路进行了广泛讨论,在一些地方开展了生态农业的试点。在这一实践背景下,1981 年,马世骏先生在农业生态工程学术讨论会上提出了“整体、协调、循环、再生”生态工程建设理念^[8]。1982 年,叶谦吉先生在银川农业生态经济学术讨论会上发表《生态农业——中国农业的一次绿色革命》^[13]一文,一部分高等农业院校和科研单位开始了生态农业的探索。

20 世纪 90 年代后,我国生态农业进入稳步发展阶段。研究者从物质与能量、结构与功能、系统设计与效益评价等角度对典型生态农业模式进行研究^[14-17],初步形成具有中国特色的生态农业的理论体系^[5,18],生态农业理论与方法研究不断深化,并受到世界广泛关注。1991 年 5 月,马世骏先生和农业部边疆先生共同定义了中国生态农业的基本概念,认为生态农业是指在经济和环境协调发展原则下,根据生态学、生态经济学的生物和物质循环再生的原理,总结吸收各种农业生产方式的成功经验,应用生态

系统工程方法和现代科学技术建立和发展起来的合理安排农业生产的优化模式, 因地制宜的农业体系^[1]。在此期间高等院校与研究所相应出版了有关专著, 有沈亨理、李文华、叶谦吉、骆世明、王兆骞等出版的教材, 王如松、石山、任继侗、韩纯儒、张壬午等出版的专著, 以及由农业部边疆、郭书田、李毓堂等主编出版的生态农业会议论文汇编等。与此同时钱学森先生提出第六次产业革命概念, 发表了“迎接第六次产业革命, 建立农业型知识密集产业”一文(1984 年), 对我国北方大面积退化草地进行修复、改良与建立人工草地有重要指导作用。全国建立了草地管理建设十大基础体系, 在 20 多个省(自治区)建立了 40 多个草地牧业综合开发试验点, 我国草产业得到蓬勃发展, 使广大退化草地在草产业发展过程中既提供大量优质饲料, 又改善生态环境^[19]。1993 年, 李文华在瑞士出版了《Integrated Farming Systems in China》^[20]一书, 提出适合中国的农业分类系统和综合评价体系。2001 年, 李文华主编的《Agro-Ecological Farming Systems in China》^[21]对中国的传统经验和研究成果进行了全面阐述。联合国教科文组织高度评价, 并将其列为生态学系列丛书出版。该书传播了中国具有先锋作用的重要工作, 并应用于不同的生态-地理地带的可持续农业中。孙鸿良教授系统总结了生态农业的理论与方法, 著有《生态农业的理论与方法》一书^[9], 得到了国内外同行的认可。同时, 以朱有勇为代表的中国学者, 在《Nature》和《PNAS》等国际知名学术期刊上发表了一系列文章, 揭示并验证了中国传统生态农业模式可持续发展的生态学机制^[21-22]。

在此阶段, 一批总结性的成果陆续面世。1994 年, 《中国农林复合经营》出版, 对国内的传统经验和农林复合领域的研究成果进行了全面阐述^[23]。2003 年, 由李文华院士主编近百位科研人员共同编撰的《生态农业——中国可持续农业的理论与实践》正式出版, 从发展、原理、模式、技术、区域、管理、展望等方面, 对中国生态农业进行了系统总结^[24], 获得了中国图书奖。在此期间, 我国生态农业进入了蓬勃发展阶段。1993 年由农业部等 7 部门组成了“全国生态农业县建设领导小组”, 启动了第一批 51 个生态农业县建设工作^[25]。2000 年, 国家启动了第二批 50 个全国生态农业县建设工作^[26], 同时提出在全国大力推广和发展生态农业。2002 年, 农业部向全国征集了 370 种生态农业模式与技术体系, 并遴选出具有代表性的 10 个生态模式类型, 包括北方“四位

一体”模式、南方“猪-沼-果(稻、菜、鱼)”模式、平原农林牧复合模式、草地生态恢复与可持续利用模式、人工草地、生态种植模式、生态畜牧业生产模式、生态渔业模式、丘陵山区小流域综合治理利用型模式、设施生态农业模式和观光生态农业模式^[27]等。

21 世纪以来, 我国生态农业得到政府大力支持并进入创新发展阶段。2003—2021 年中国连续多年发布促进“三农”综合发展的中央一号文件, 明确肯定并鼓励发展生态农业, 提高农业可持续发展能力, 促进乡村振兴。2012 年, 党的十八大将生态文明建设纳入“五位一体”中国特色社会主义总体布局, 要求“把生态文明建设放在突出地位, 融入经济建设、政治建设、文化建设、社会建设各方面和全过程”。中国的生态农业随之进入新阶段。生态农业的研究和发展更强调系统性和绿色发展, 充分发挥农业的多样性与多功能特点, 重视农业生产中积累的传统知识和农耕文化。2002 年, 联合国粮农组织发起了全球重要农业文化遗产(Globally Important Agricultural Heritage Systems, GIAHS)的保护工作^[27-28]。中国学者积极参与, 从生态、文化、农史、农业、法律等多学科角度开展了深入研究, 推动了该项工作的顺利进行^[29-30]。骆世明^[31]认为, 我国社会经济发展水平已经接近或到达实施农业生态转型的拐点, 提出了我国未来农业生态转型的方略。

2020 年 6 月底全球共有 22 个国家的 62 个传统农业系统被列入到 GIAHS 名录中, 其中 15 个在中国。2012 年 3 月, 农业部正式发文开展中国重要农业文化遗产的挖掘和保护工作。目前, 已批准 5 批共 118 个中国重要农业文化遗产^[32]。可以说, 中国生态农业经过 40 多年的实践和发展, 积累了丰富的经验和教训, 构建了与农村发展、农民致富和环境保护与修复、资源高效利用融为一体的新型综合农业体系, 进入与区域经济、产业化和农村生态环境建设紧密结合的新阶段, 融入生态文明建设体系。

随着生态农业实践的迅猛发展, 关于生态农业的科学研究日趋深入。得益于科技界的高度重视、各级政府的有力推动和农民的积极参与, 生态农业的发展在理论研究、定位研究、工程模式、技术集成、生产管理等各方面都取得了明显进步。中国生态学会建立了农业生态专业委员会, 原中国科学院石家庄农业现代化研究所创办了《中国生态农业学报》, 一批研究文章和学术专著在国内外发表。特别是在全国形成了许多不同类型的生态农业模式, 建立了不同规模的生态农业试点, 各试点单位在经

济、社会和生态环境等方面都有很大程度的改善和提高。例如在实践中农业生态工程因几大生态效应产生了更大经济效益。这些生态效应包括整体效应、边缘效应、协调效应、资源循环再生效应。说明通过系统耦合与生态工程以扩大能源、物源规模可以获得多种产业的整合效应,走向经济繁荣与可持续发展^[33]。这些成就的取得充分显示了生态农业理论的正确性、现实性与可行性,具有勃勃生机并释放巨大的发展潜力,体现了农民、科技人员和领导干部通力合作之下的创造力,使生态效益、经济效益、社会效益皆十分显著,代表了中国农业可持续发展的方向。

2.2 生态农业技术经济体系建立、生态经济效益不断上升

早在 1978 年青藏高原的青海香日德就出现春小麦 (*Triticum aestivum*) 单产 22 792.5 kg·hm⁻² 的高产纪录,使生长季光能利用率高达 5.9%,至今仍经久不衰。孙鸿良^[34]指出其关键原因在于生态技术进步,从整体上调动了系统功能优化,特别是在增长生态系统自组织能力与发挥整体效应上。

生态农业体系建设的一个重要标志是相关企业的发展迅速,产值和效益不断提高。根据 2020 年 12 月国家统计数据,中国 A 股市场的绿色生态农业概念上市公司一共有 34 家,其中 5 只股票在上海证券交易所交易,另外的 29 只股票在深圳证券交易所上市。市值排在前 10 位的公司(股票简称)依次为海大集团、北大荒、隆平高科、鲁西化工、新洋丰、中粮科技、登海种业、三聚环保、禾丰牧业、罗牛山,其中排名第一的海大集团主要从事饲料、种苗、生物制药、智慧养殖等农业经营,为近百万户种养户提供全面的技术服务解决方案,以循环生态农业理念帮助种养殖户提升管理水品实现高质量发展。2020 年,海大集团饲料销量 1466 万 t,实现营业收入 603.24 亿元,市值超过 980 亿元,而到了 2021 年 4 月,其市值更增长到 1329 亿元,市值增长率超过 35%,他们不仅有很高的经济效益,而且对环境保护也有一定的贡献。

2.3 生态农业对实现碳中和的作用逐渐凸显

我国碳达峰碳中和“1+N”政策体系将尽快发布,中国气候变化事务特使谢振华在主题为“全球绿色复苏与 ESG 投资机遇”的全球财富管理论坛 2021 北京峰会上指出,2060 年实现碳中和不只是二氧化碳,还有包括甲烷、氧化亚氮等全部非碳温室气体。农业是甲烷、氧化亚氮等非碳温室气体排放的主要来

源,生态农业对农村生活污水、垃圾、畜禽粪便、秸秆等废弃物进行综合利用的整体思维,将促使农业领域非碳温室气体大幅减排,尽早实现碳中和目标。

3 生态农业发展面临的挑战

3.1 生态农业的工程化、体系化程度仍不够高

从供给侧的角度看,生态农业的建设需要将农业生态工程的理念转化为系列工程技术才能实现其功能。当前,生态农业的温室大棚工程、畜禽粪污处理工程、农村能源工程、农村环境工程、灌溉工程等方面的技术,虽然有很大进步,但相关的工程化水平还有很大发展潜力有待挖掘。农业本身是一个庞大的生态系统,生态农业试图将诸多子系统的工程有机整合为一体,还缺乏一系列的大量的定量工程设计依据。当前仍然是设想多、工程化程度却较低,产业规模较小,这与农业生态工程研究不足、工程化参数太少有关。

3.2 生态农业与碳市场衔接度不高

农业生产过程中,垃圾露天堆放、污水外排、畜禽粪便处置过程都会产生大量甲烷;农田施肥、秸秆还田等则产生氧化亚氮。一方面甲烷、氧化亚氮目前收集、利用困难,少有最佳实践案例;另一方面,目前甲烷、氧化亚氮等非碳温室气体还无法拿到碳市场进行交易。生态农业工程化过程中因资金问题往往出现“晒太阳”现象,资本市场由于看不到非碳温室气体在碳市场中的收益迟迟不愿进入生态农业赛道,造成生态农业与碳市场严重脱钩,可持续性不强。

3.3 市场上的生态农产品尚需消费者的更多认可

从需求侧的角度看,由于近年来我国居民生态消费意识觉醒,对高品质农产品有旺盛的需求,特别是无污染的有机生态农产品。生态农业产品由于投入较多,本应在市场上的价格比普通农业产品要高一些。但这些额外成本在市场价格中并未充分体现出来,由于生态农产品价格偏高,认知和认可度不够,消费者的购买意愿难以转化为实际行动。

而生态农产品必须在保护、改善农业生态环境的前提下,才能生产出合格的无公害的、富营养的、健康的农产品。但目前市场上,在可供选择的属于真正生态农产品中,缺乏信任度高的、具严格认证的产品。有些“有机食品”“绿色食品”证书遭到消费者质疑。生态农产品市场亟需强化政府监管,打击假冒伪劣的生态农产品。只有消费者对生态农产品有足够的信心,才能将消费者对生态农产品的需要

转化为市场需求。

3.4 生态农业建设缺乏充分的政策支持

从政策法规角度来看, 生态农业具有公共产品属性, 其带来的良好的生态环境效益与积极正面的社会效益需要政策予以鼓励与支持, 包括建立有效的激励政策与保障体系, 以及对生态资产破坏需要修复而获取产品的补偿政策等。当今政策在制定与实施过程中, 往往缺乏全面系统性。例如, 对使用有机肥生产出的有机生态食品缺乏足够的鼓励配套措施, 使得农民并没有经济激励动机愿意更多地使用有机肥进行生产。20 世纪 80 年代提出的草原法, 提出类似农业土地承包制, 要求以草定畜, 以牲畜头数为统计单位, 而缺乏草场载畜量的限额指标, 无形中认可了草场超载, 造成草场大面积退化。有关政策法规缺乏相互的协调性、整体性, 例如林地养鸭应有养林政策, 也要根据林地虫害情况制定定量养鸭政策等。

3.5 生态农产品的国际贸易程度依然偏低

从国际贸易角度来看, 目前生态农产品的国际化程度很低。很大程度上, 是把生态农产品仅仅当作普通的商品看待, 而不是从改善全球环境的角度将其定义为解决气候变化与全球环境问题的环境产品与服务 (Environmental Goods and Services)^[35]。

虽然有全球生态网络 (GEN) 对生态产品标识的协调, 但在国际层面依然缺乏有共识的生态农产品标志, 使得各国的农产品往往难以互认。目前我国的生态农产品出口量很小, 只有少量经国际认证的农产品能够出口到一些发达国家。例如, 经国际有机食品协会 (IFOAM) 认证的茶叶, 在欧盟市场销售不错。生态农产品是世界贸易组织 (WTO) 定义的生态标志 (Eco-label) 产品一部分^[36]。如果 WTO 谈判形成生态标志相关的新协议, 未来我国的生态农产品国际化具有很大发展潜力。

4 生态农业建设展望

我国继农业文明、工业文明之后, 顺应世界发展大趋势, 党的十八大把生态文明建设纳入中国特色社会主义事业“五位一体”总体布局, 明确提出了推进生态文明建设。其实, 马世骏和王如松先生^[37]1984 年就提出了社会-经济-自然复合生态系统, 为生态文明理念的提出提供了科学依据。目前, 我国已进入生态文明建设的新时代。生态农业是生态文明建设的一个重要组成部分, 在脱贫攻坚战取得举世瞩目的巨大成就之后, 我国又迎来了乡村振兴的新

机遇。展望未来, 我国生态农业的发展需要在以下几方面加以强化。

4.1 生态农业建设更加工程化、智能化

生态文明建设对生态农业的发展提出了更高的要求。为提高资源利用率、生态环境保护力度、农村能源供给能力, 以及提高生态经济效率, 生态农业就必须走向完整的工程化建设。在这方面, 产业经济学已经先行一步, 也是运用生态学原理建立起了工程化体系^[38]。生态农业的工程化可以充分借鉴吸收产业经济学的研究与实践经验。目前, 已经有一些大型养殖场采取了生态工程化措施处理畜禽粪污, 生产沼气, 并有沼渣、沼液肥田, 促进了农牧结合模式。大量的农作物秸秆也被用于工厂化生产食用菌, 形成了规模经济效益, 成为高效的循环农业系统, 符合马世骏先生所说的“运用了生态工程原理建立起来的农业才是生态农业”^[8]。生态农业建设的工程化是未来的发展方向。

骆世明^[39]2021 年指出, 与国外相比较, 我国十分重视农业生态系统的调节与控制机制, 包括自然调控机制和人为调控机制。目前, 我国已经进入互联网+的数字经济时代, 人工智能、大数据、区块链、5G、物联网、遥感等技术应用到社会生产生活的方方面面, 使生产效率更高。例如笔者之一与企业合作进行籽粒苋 (*Amaranthus hybridus* L.) 饲料的智慧农业生产与加工, 已初步在 1 hm² 的土地上产出苋干草 45~75 t, 降低饲料成本 5%~10%; 在智能导航下一台播种机一天可精确播种 33.3 hm² 并与滴灌同步进行, 整个用工量节省了 80%^[40], 走出了智慧农业的第一步。智慧农业是“农业信息化发展从数字化到网络化再到智能化的高级阶段”, 其实现了农业“机器替代人力”“电脑代替人脑”“自主技术替代进口”的三大转变^[41], 生态农业更加工程化、智能化是必然发展趋势。

4.2 生态农业发展更加低碳化

我国已进入生态文明建设阶段。在脱贫攻坚战取得决定性成果之后, 进入了乡村振兴阶段。其中, 改善农村人居环境, 坚持人与自然和谐共生, 走乡村绿色发展之路是重点之一。目前, 农村的垃圾和生活污水、畜禽粪污、作物秸秆等有机污染物都面临着处理成本高、处置水平低的难题, 严重影响了地表水、地下水、土壤甚至空气的质量, 并制约了美丽乡村与乡村生态文明建设。

我国在第七十五届联合国大会一般性辩论上提出“二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值, 努力争

取 2060 年前实现碳中和”的目标后,在广大的农村地区,何时碳达峰?如何实现碳中和?与城市不同,农村不仅有二氧化碳排放,还有甲烷、氧化亚氮等非碳温室气体排放问题。而甲烷、氧化亚氮的全球增温潜力值(GWP)分别是二氧化碳的 28 倍、296 倍,都对全球气候变化的影响巨大。值得注意的是,建立在石油基础上的现代农业,大大增加了农业生产过程的碳排放。而生态农业致力于以基于自然的解决方案替代基于石油和工业品的途径,对实现我国碳达峰和碳中和目标具有重要的战略意义^[42]。此外,农业生态系统本身可以发展成为重要碳汇,吸收固定大气中的二氧化碳。我国东北“黑土地”就是通过植被光合作用最终将大气中的碳固定在土壤有机质中,而成为重要碳汇。但由于土壤呼吸对温湿度和农作方式十分敏感^[43],因此顺应自然的生态管理是促进土壤增汇的重要途径。

笔者之一根据马世骏先生的“生态工程”原理设计了一套碳中和农村环境综合整治系统解决方案的生态农业模式,既解决农村环境问题,又可帮助实现农村碳中和目标。这个生态农业模式是基于人工智能可再生能源、环境与资源综合生态系统设计(AI Ecosystem for Renewable Energy, Resources and Environment, AIERERE),将可再生能源、环境与资源有机整合为一体,综合系统解决面临的能源、资源、环境等可持续发展过程中存在的问题。由多个系统模块组成,每一个系统模块承担着明确的服务功能,系统模块之间的逻辑关系以减污降碳之间内部关联为基础进行优化设计,各个系统模块会预留其他接口,可扩展连接到其他子系统模块。

1)“综合管理与控制子系统”基于各子系统的大数据信息,对其他子系统进行有效的调控,以人工智能手段确保子系统之间分工合作、相互协调,协同工作实现农村碳中和的目标。

2)“环境污染管理子系统”对村庄内进行严格的环境污染管理。村庄内产生的垃圾需要分类处置,生活污水、生活垃圾及枯枝烂叶、畜禽粪便等有机物,不堆积、不外运,与“有机质资源综合利用子系统”衔接,用于沼气发电。

3)“有机质综合利用子系统”将村庄内的所有生物质,包括餐厨垃圾、排泄物、生活有机垃圾、高浓度生活污水等,以及可能的畜禽粪便、果蔬枝叶杂质等生物质,通过沼气发酵进行综合利用,转换为甲烷可燃气体能源与有机肥资源。甲烷可燃气体与“可再生电力微网子系统”衔接,系统进行沼气发电、存

储,为村庄提供持续的电力供应。沼液沼渣还可进一步与“果蔬种植碳汇子系统”衔接,用于果蔬种植以及碳吸收。

4)“果蔬碳汇子系统”是将经过“有机质资源综合利用子系统”发酵后产生的沼渣、沼液作为有机肥,替代化肥,用于村庄内农作物蔬菜种植、果树栽培、园林绿化、防风治沙林等,成为生态农业新模式。通过光合作用吸收大气中的二氧化碳成为碳汇,起到碳吸收的作用,可中和一部分碳排放;有机肥替代化肥减少氧化亚氮排放。以上减排的甲烷和氧化亚氮、可再生能源替代来自电网的碳排放、吸收的碳汇,及通过综合管理系统效率提高后减排的碳,经过温室气体减排核查,经认证后获得减排额度(CCER),可申请在碳市场进行交易出售。

5)“可再生电力微网子系统”由沼气发电+风力发电+光伏发电+储能组成,作为分布式独立可再生能源组成村庄的电力微网供电系统,为村庄内提供不间断可持续的能源供给,包括照明、空调、炊事、动力等。同时,该系统也预留接入大电网的接口,可将余电向电网出售。大电网可作为村庄的备用电力系统。

在国内相关竞争性产品比较中,市场上往往对某一环境要素单独进行处理,例如餐厨废弃物利用、能源电力微网综合系统等,少有项目将垃圾、污水、温室气体、粪便、秸秆废弃物等不同环境要素融合进一个系统,并将可持续能源,例如沼气、电力微网等并入系统中形成微循环。

4.3 生态农产品的市场化价值提高

未来随着我国人均收入的快速提升,以及对食品安全与营养健康的关注,消费者购买生态农产品的支付意愿增强,生态农产品的市场化价值将会越来越高。例如,生态农业发展的早期,著名的“稻田养鱼”生态农业模式一直发展的不温不火。主要原因是稻田养鱼的生产成本高于单纯的水稻种植,而消费者购买生态农产品的意愿不够强,导致无论是水稻还是鱼的市场价值都不够高。没有足够的经济激励,“稻田养鱼”就难以更大规模地发展。但今天我国对生态产品的消费能力已大幅上升,“稻田养鱼”的发展潜力已大幅度提高。在湖北潜江更是发展出了“稻田+小龙虾”的生态农业新模式。这种新模式的发展,一方面是由于对生态农产品的消费意愿与能力提高,另一方面是由于小龙虾的市场价值远高于稻田养鱼生产的青草鲢鳙等四大家鱼的市场价值。因此,“稻田+小龙虾”模式的经济效益远高于

传统的“稻田养鱼”,刺激了农民发展此模式的积极性。与此同时,与传统的“稻田养鱼”中的鱼所发挥的功能一样,作为环境清道夫的小龙虾在稻田里吃昆虫卵、寄生虫等,可不必使用农药化肥。在这样的稻田里生产出的水稻成为绿色有机农产品。随着麻辣小龙虾在新世代消费者中风靡,对小龙虾与有机水稻的需求更加旺盛,这将进一步推动“稻田+小龙虾”的生态农业模式的可持续发展,并有利于生态农业产品的市场化价值提高。

4.4 生态农业的政策更加精准化、协调化

国家各部委以及各地政府曾出台了一系列的相关政策,有力地支持了生态农业的发展。为了把生态农业的生态效益、扶贫效益、文化旅游效益等正面外部性完全内部化,建立“绿水青山”转化为“金山银山”的价值实现机制,还将会有更加细致的生态农业发展促进与支持政策,包括科学研究、人才培养、税收优惠、市场推广、标准制定、技术创新、对外贸易等扶持政策。

4.5 我国的生态农业模式在国际市场上受到高度认可,产品可信度将不断提高

随着我国生态农业的发展越来越规模化、产业化,生态农产品将会具有更大的出口潜能。需要在国际层面(或至少双边层面)实现生态产品标准的互认,释放生态农产品出口的潜能,扩大生态农产品市场,帮助农民增收并保护环境。同理,也可以促进优秀生态农产品进口。例如,可以与巴西开展“生态有机产品”互认,进口非转基因的有机种植的大豆。这既能满足我国消费者的需求,还能抑制巴西大豆的野蛮生长、促进可持续发展,保护森林和全球的生态。胡涛等^[44]2017年指出,如果生态农产品被纳入到广义绿色产品的范畴,还会随着我国对绿色“一带一路”建设中绿色产品的投资与贸易,进入“一带一路”国家的市场。

此外,随着我国国力的迅速提高,软实力也在不断增长。未来我国的生态农业发展经验可以更加广泛传播推广,为发展中国家提供技术,实现合作共赢。

5 结语

目前我国的生态农业发展已融入了生态文明建设体系的新阶段,这是我国农业发展的必然结果。生态文明建设的根本是尊重自然、顺应自然和保护自然,这与农业生态工程建设不谋而合。据此,生态农业建设是我国实现农业现代化的重要途径,是节约资源和保护环境基本国策在农业生产上的体现,

是实现碳中和的有效手段,是激发农业生产后劲与环境建设同步发展的途径,也是当代生态文明的一个重要组成部分^[45]。自党的十八大做出“大力推进生态文明建设”的战略决策以来,更是把生态农业建设推向了生态文明新高度。“尊重自然”“生态优先”“绿色发展”“生态平衡”“安全低碳”以及可持续发展是生态农业与生态文明共同的建设目标,因此生态农业融入到生态文明建设体系之中,成为国家生态文明建设的重要组成部分,互相促进,相得益彰。

参考文献 References

- [1] 李文华, 刘某承, 闵庆文. 中国生态农业的发展与展望[J]. 资源科学, 2010, 32(6): 1015-1021
LI W H, LIU M C, MIN Q W. Progress and perspectives of China's ecological agriculture[J]. Resources Science, 2010, 32(6): 1015-1021
- [2] LI W H. Agro-Ecological Farming Systems in China[M]. New York: Parthenon Publishing Group, 2001: 1-6
- [3] 骆世明. 传统农业精华与现代生态农业[J]. 地理研究, 2007, 26(3): 609-615
LUO S M. To discover the secret of traditional agriculture and serve the modern ecoagriculture[J]. Geographical Research, 2007, 26(3): 609-615
- [4] 金鉴明. 绿色的危机[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1994: 5-20
JIN J M. Green Crisis[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1994: 5-20
- [5] 李文华. 农业生态问题及其综合治理[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008: 2-6
LI W H. The Problems and Their Integrated Management of Ecological Agriculture[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2008: 2-6
- [6] 孙鸿良. 草地生态资产受损成因及重建新模式的探讨[J]. 草业学报, 2004, 13(5): 1-5
SUN H L. Cause of eco-property loss of grassland in China and discussion for renewal construction of new-model[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2004, 13(5): 1-5
- [7] 李文华. 中国生态农业面临的机遇与挑战[J]. 中国生态农业学报, 2004, 12(1): 1-3
LI W H. The opportunity and challenge to ecological agriculture in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2004, 12(1): 1-3
- [8] 马世骏, 李松华. 中国的农业生态工程[M]. 北京: 科学出版社, 1987
MA S J, LI S H. Agricultural Ecological Engineering in China[M]. Beijing: Science Press, 1987
- [9] 孙鸿良. 生态农业的理论与方法[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1993
SUN H L. The Theory and Method of Eco-Agriculture[M]. Jinan: Shandong Science & Technology Press, 1993
- [10] 程序, 曾晓光, 王尔大. 可持续农业导论[M]. 北京: 中国农业出版社, 1997: 1-10
CHENG X, ZENG X G, WANG E D. Introduction of

- Sustainable Agriculture[M]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 1997: 1–10
- [11] 熊文愈. 林-农复合生态系统的类型和效益[C]//林农复合生态系统学术讨论会论文集. 长春: 东北林业大学出版社, 1988: 1–5
- XIONG W Y. Types and Benefits of Forest-Agricultural Complex Ecosystem[C]//Proceedings of the Symposium on Forest-Agricultural Complex Ecosystem. Changchun: Northeast Forestry University Press, 1988: 1–5
- [12] 李文华, 闵庆文, 张壬午. 生态农业的技术与模式[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005
- LI W H, MIN Q W, ZHANG R W. The Technology and Mode of Eco-agriculture[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005
- [13] 叶谦吉. 生态农业: 农业的未来[M]. 重庆: 重庆出版社, 1988: 1–8
- YE Q J. Eco-Agriculture: the Future of Agriculture[M]. Chongqing: Chongqing Publishing Group, 1988: 1–8
- [14] 王兆骞. 中国生态农业与农业可持续发展[M]. 北京: 北京出版社, 2001: 2–4
- WANG Z Q. Ecological Agriculture and Agricultural Sustainable Development in China[M]. Beijing: Beijing Publishing House, 2001: 2–4
- [15] 钟功甫. 基塘系统的水陆相互作用[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 1–10
- ZHONG G F. Land-Water Interaction of the Dike-Pond System[M]. Beijing: Science Press, 1993: 1–10
- [16] 蒋建平. 泡桐栽培学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1990: 1–10
- JIANG J P. The Study of Paulownia Cultivation[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1990: 1–10
- [17] 冯宗炜. 农林系统结构和功能[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1992: 1–6
- FENG Z W. The Structure and Function of Agroforestry System[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1992: 1–6
- [18] 吴文良. 论我国生态农业的技术创新与保障体系建设[J]. 中国农业科技导报, 2001, 3(5): 13–16
- WU W L. Technology innovation and guarantee system building of China's ecological agriculture[J]. *Review of China Agricultural Science and Technology*, 2001, 3(5): 13–16
- [19] 孙鸿良, 岳绍先. 钱学森提出的第六次产业革命理论在籽粒苋草产业蓬勃发展中得到了验证——纪念钱学森第六次产业革命理论发表30周年[J]. 中国种业, 2015, (3): 9–12
- SUN H L, YUE S X. The theory of the sixth industrial revolution proposed by Qian Xuesen has been verified in the vigorous development of the grain amaranth industry — to commemorate the 30th anniversary of the publication of the sixth industrial revolution theory of Qian Xuesen[J]. *China Seed Industry*, 2015, (3): 9–12
- [20] LI W H. Integrated Farming Systems in China[M]. Zurich: University of Zurich, 1993
- [21] ZHU Y Y, CHEN H R, FAN J H, et al. Genetic diversity and disease control in rice[J]. *Nature*, 2000, 406(6797): 718–722
- [22] XIE J, HU L L, TANG J J, et al. Ecological mechanisms underlying the sustainability of the agricultural heritage rice-fish coculture system[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(50): E1381–E1387
- [23] 李文华, 赖世登. 中国农林复合经营[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 1–10
- LI W H, LAI S D. Agroforestry in China[M]. Beijing: Science Press, 1994: 1–10
- [24] 李文华. 生态农业——中国可持续农业的理论与实践[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 1–11
- LI W H. The Theory and Practice of Sustainable Agriculture in China[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003: 1–11
- [25] 石山. 发展中的中国生态农业[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2001: 1–10
- SHI S. The Development of China's Ecological Agriculture[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2001: 1–10
- [26] LI B, LI Y Y, WU H M, et al. Root exudates drive interspecific facilitation by enhancing nodulation and N_2 fixation[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(23): 6496–6501
- [27] 闵庆文. 全球重要农业文化遗产——一种新的世界遗产类型[J]. 资源科学, 2006, 28(4): 206–208
- MIN Q W. GIAHS: a new kind of world heritage[J]. *Resources Science*, 2006, 28(4): 206–208
- [28] 李文华, 刘某承, 闵庆文. 农业文化遗产保护: 生态农业发展的新契机[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(6): 663–667
- LI W H, LIU M C, MIN Q W. Agricultural heritage conservation: new opportunity for developing eco-agriculture[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(6): 663–667
- [29] 孙业红, 闵庆文, 成升魁. “稻鱼共生系统”全球重要农业文化遗产价值研究[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(4): 991–994
- SUN Y H, MIN Q W, CHENG S K. Value of the GIAHS-China traditional rice-fish system[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(4): 991–994
- [30] 刘某承, 伦飞, 张灿强, 等. 传统地区稻田生态补偿标准的确定——以云南哈尼梯田为例[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(6): 703–709
- LIU M C, LUN F, ZHANG C Q, et al. Standards of payments for paddy ecosystem services: using Hani terrace as case study[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(6): 703–709
- [31] 骆世明. 农业生态转型态势与中国生态农业建设路径[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(1): 1–7
- LUO S M. Agroecology transition and suitable pathway for eco-agricultural development in China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(1): 1–7
- [32] 闵庆文. 重要农业文化遗产及其保护研究的优先领域、问题与对策[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(9): 1285–1293
- MIN Q W. Research priorities, problems and countermeasures of important Agricultural Heritage Systems and their conservation[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(9): 1285–1293
- [33] 孙鸿良. 西北地区农牧业发展方向的探讨[J]. 草业学报, 2003, 12(4): 1–8

- SUN H L. An approach to the development direction of farming and animal husbandry in northwest area of China[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2003, 12(4): 1-8
- [34] 孙鸿良. 生态技术进步造就了作物高产不衰的典型——重访青海香日德地区春小麦高产田的启示[J]. *中国生态农业学报*, 2007, 15(2): 181-183
- SUN H L. Progress of ecological techniques being the source of sustainable high yield of crops—The inspiration from the high yield fields of wheat in Xiangride area of Qinghai Province after re-visiting[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, 15(2): 181-183
- [35] HU T. Redefining EGS to solve sever climate and other global environmental problems[M]//Ackerman F, Bernasconi N, Corbett J J, et al. *Trade in the Balance: Reconciling Trade and Climate Policy: Report of the Working Group on Trade, Investment, and Climate Policy*. Boston: Boston University Press, 2016
- [36] 胡涛. WTO环境与贸易丛书: 生态标志产品[M]. 北京: 中国环境出版社, 2006
- HU T. WTO Environment and Trade Series: Eco-labeled Products[M]. Beijing: China Environment Publishing Group, 2006
- [37] 马世骏, 王如松. 社会-经济-自然复合生态系统[J]. *生态学报*, 1984, 4(1): 1-9
- MA S J, WANG R S. The social-economic-natural complex ecosystem[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1984, 4(1): 1-9
- [38] 王如松, 杨建新. 从褐色工业到绿色文明: 产业生态学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2002
- WANG R S, YANG J X. *From Brown Industry to Green Civilization: Industrial Ecology*[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2002
- [39] 骆世明. 系统论、信息论和控制论与我国农业生态学的发展[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2021, 29(2): 340-344
- LUO S M. Influence of cybernetic theory, information theory, and system's theory on the development of agroecology in China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(2): 340-344
- [40] 孙鸿良, 岳绍先. 苋籽油中角鲨烯(Squalene)与苋干草综合开发的前景分析[J]. *中国种业*, 2021, (3): 19-21
- SUN H L, YUE S X. Prospect analysis of comprehensive development of squalene in amaranth seed oil and amaranth hay[J]. *China Seed Industry*, 2021, (3): 19-21
- [41] 赵春江. 智慧农业发展现状及战略目标研究[J]. *智慧农业*, 2019, 1(1): 1-7
- ZHAO C J. State-of-the-art and recommended developmental strategic objectives of smart agriculture[J]. *Smart Agriculture*, 2019, 1(1): 1-7
- [42] 齐晔, 李惠民, 王晓. 农业与中国的低碳发展战略[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(1): 1-6
- QI Y, LI H M, WANG X. Agriculture and low-carbon development strategy in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(1): 1-6
- [43] QI Y, XU M, WU J G. Temperature sensitivity of soil respiration and its effects on ecosystem carbon budget: nonlinearity begets surprises[J]. *Ecological Modelling*, 2002, 153(1/2): 131-142
- [44] 胡涛, 姬婧玉. 论绿色“一带一路”建设中绿色产品的投资与贸易[J]. *环境保护*, 2017, 45(16): 36-38
- HU T, JI J Y. Promoting investment and trade of green products for green Belt and Road construction[J]. *Environmental Protection*, 2017, 45(16): 36-38
- [45] 孙鸿良, 齐晔. 从生态农业到生态文明建设——纪念马世骏先生诞辰100周年暨生态工程理念发表36周年[J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25(1): 8-12
- SUN H L, QI Y. From eco-agriculture to eco-civilization construction: in memory of prof. Ma Shijun's 100 years birthday and the 36th anniversary of eco-engineering theory publication[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(1): 8-12