

# 中国循环农业发展实践与推进路径探究

王健<sup>1,2</sup>, 张辉<sup>1,2\*</sup>, 沈玉君<sup>1,2</sup>, 丁京涛<sup>1,2</sup>, 周海宾<sup>1,2</sup>, 丛宏斌<sup>1,3</sup>,  
沈秀丽<sup>1,3</sup>, 马双双<sup>1,2</sup>, 叶炳南<sup>1,3</sup>, 宋立秋<sup>1,2</sup>

(1. 农业农村部规划设计研究院, 北京 100125; 2. 农业农村部资源循环利用技术与模式重点实验室, 北京 100121;  
3. 农业农村部废弃物资源化利用重点实验室, 北京 100121)

**摘要:** 发展循环农业是践行生态文明思想的实际行动, 是农业绿色高质量发展的重要内容, 也是发展农业新质生产力的有力抓手。该研究明确了源头减量、过程循环、产出高值和全程低碳是循环农业的重要内涵特征, 总结了党的十八大以来中国在投入品减量增效、废弃物资源化水平提升、减污降碳作用增强和产业增值增效等方面取得的成效, 分析了发达国家在发展循环农业过程中在法律体系、集成模式、管理机制、技术装备和宣传教育等方面的先进经验做法, 结合实际提出了中国发展循环农业应重点构建种植业内部循环、种养间循环、产加销循环和生产生活循环4个循环系统, 并建议从推进结构调整、加强科技支撑、强化法规政策、促进协同发力等四条路径推进循环农业发展。该研究可为新时期加快推进中国循环农业的发展提供理论依据和实践参考, 助力农业强国建设。

**关键词:** 循环农业; 废弃物资源化利用; 绿色低碳

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202407041

中图分类号: X7

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-22-0012-10

王健, 张辉, 沈玉君, 等. 中国循环农业发展实践与推进路径探究[J]. 农业工程学报, 2024, 40(22): 12-21. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202407041 <http://www.tcsae.org>

WANG Jian, ZHANG Hui, SHEN Yujun, et al. Development practice and promotion route of circular agriculture in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(22): 12-21. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202407041 <http://www.tcsae.org>

## 0 引言

中国循环农业的发展历史悠久, 其理论基础和实践探索可以追溯到古代农业文明。在5500多年前的新石器时代, 中国先民已通过粟黍种植和家猪饲养相结合的方式开展了“循环农业”的实践<sup>[1]</sup>。在传统农业中, 中国农民还采用了稻田养鱼<sup>[2]</sup>、桑基鱼塘<sup>[3]</sup>、轮作互补<sup>[4]</sup>和庭院经济<sup>[5]</sup>等多种生态循环模式, 这都体现了中国对生态平衡和资源循环利用的深刻理解。改革开放以来, 中国农业取得了举世瞩目的成就, 但在很大程度上依赖于化肥、农药、农膜等农业投入品的大量使用, 造成的环境污染和生态破坏问题越来越突出。这种高投入、高消耗、高污染的农业经济增长模式, 付出了惨痛代价, 已经难以维继<sup>[6]</sup>。因此, 必须提升农业资源利用和循环水平, 大力发展循环农业, 实现农业的可持续发展。

发展循环农业是对中国传统农耕文化的传承和弘扬, 具有重要的现实意义和深远的战略意义。首先, 发展循

环农业是践行习近平生态文明思想的实际行动。习近平总书记强调, 要站在人与自然和谐共生的高度谋划发展, 通过高水平保护, 不断塑造发展的新动能、新优势, 着力构建绿色低碳循环经济体系, 有效降低发展的资源环境代价, 持续增强发展的潜力和后劲。农业是生态文明建设的重要载体, 发展循环农业是实现农业清洁生产、农业资源可持续利用的有效手段, 协同推进降碳、减污、扩绿、增长, 是推进农村生态文明建设的具体举措。其次, 发展循环农业也是农业绿色高质量发展的重要内容。循环农业通过物质和能量的多级循环利用, 减少对外部有害物质的投入和农业废弃物的产生, 实现产出高效、产品安全、资源节约、环境友好, 最终实现农业质量效益和竞争力的提升。再次, 循环农业也是发展农业新质生产力的有力抓手。农业新质生产力是在农业生产过程中引入先进的科技手段和创新的管理理念, 实现生产效率的提升、产品质量的优化以及生产过程的可持续性的新型生产力。循环农业具有科技含量高、资源利用率高、污染排放低、产品质量高等特点, 符合发展农业新质生产力的要求。

目前, 国内学者对中国循环农业内涵及发展路径做了大量有益的研究探索, 包括循环农业概念内涵<sup>[7-11]</sup>、技术模式<sup>[12-16]</sup>、评价方法<sup>[17-22]</sup>等。本文基于前期研究成果, 明确了中国发展循环农业的内涵特征, 对中国循环农业的发展实践、存在问题进行了分析, 并系统分析了发达国家循环农业发展先进经验, 基于科学总结分析提

收稿日期: 2024-07-04 修订日期: 2024-10-04

基金项目: 农业农村部规划设计研究院科技创新团队(CXTD-2021-11); 农业农村部规划设计研究院自主研发计划课题(SC202403); 现代农业产业技术体系北京市创新团队(BAIC08-2022-FQ03)

作者简介: 王健, 博士, 高级工程师, 研究方向为农业农村废弃物资源化。

Email: wangjian@aape.org.cn

\*通信作者: 张辉, 研究员, 研究方向为农业农村废弃物资源化。

Email: zhanghui@aape.org.cn

出了未来中国发展循环农业的重点任务和推进路径，以期为中国循环农业发展提供参考，助力农业强国建设。

## 1 循环农业的内涵特征

中国循环农业研究领域的开拓者骆世明教授对循环农业的概念进行了阐释，提出循环农业是“在农业生态系统中建立废弃物再利用体系，形成物质流动的闭环结构，使农业生产和农村生活中产生的秸秆、粪便、废水、废渣、农膜、垃圾、加工废弃物等得到重新利用，从而减少资源消耗，提高资源利用效率，降低环境污染，促进农业可持续发展。”<sup>[10]</sup>。中国农业大学高旺盛教授认为，循环农业是按照循环经济和低碳经济理念，通过农业系统的优化设计和管理，实现农业系统的“光热自然资源利用效率最大、购买性资源投入最低、可再生废弃物资源利用最多、有害污染物排放最少”目标的农业模式，点明了循环农业的目标<sup>[11]</sup>。结合观点，笔者认为，循环农业的内涵，是以绿色发展理念为引领，通过技术创新和组织方式变革，构建物质能量多级循环农业系统，实现物质投入低、资源利用效率高、环境污染排放少的闭环生产模式，主要有 4 个方面的特征。

**1) 源头减量。**这是循环农业的应有之义。一方面，通过控制化肥农药、化石能源等农业生产投入品消耗量，并推行有机肥、可再生能源替代等方式，实现资源高效利用；另一方面是通过优化农业生产方式，如畜禽养殖业推广低蛋白日粮饲料<sup>[23]</sup>、水产养殖业推行循环水立体养殖<sup>[24]</sup>等，减少后端废弃物产生量。

**2) 过程循环。**这是循环农业的本质属性。农业生产、农村生活和农产品加工过程中产生的各类废弃资源，采用肥料化、能源化、饲料化、基料化、原料化等利用路径，转化为有机肥料、可再生能源、功能饲料、栽培基质等产品，构建种养结合、产加销一体、生产生活协调等循环产业链条，形成物质或能量多级多层次利用闭环<sup>[25-26]</sup>，达到废弃资源应用尽用、减少污染排放的目的。

**3) 产出高值。**这是循环农业的重要目标。通过系统设计，合理组装配套循环农业技术与装备，辅以现代化农业经营管理，构建绿色生产模式，产出优质优价的绿色、有机农产品，同时开发循环农业系统多种功能，推进农文旅融合，将绿色生产生态价值转化为经济价值，延伸产业链，提升价值链。

**4) 全程低碳。**这是循环农业的时代特征。化学投入品源头减量和生物质能替代可减少化石能源消耗和碳排放，废弃资源生产的有机肥料还田可实现土壤固碳扩容，探索低碳农产品认证可实现低碳价值转化。可以说，发展循环农业是降低农业碳排放的有效举措。

## 2 中国循环农业发展实践

### 2.1 发展成效

党的十八大以来，在生态文明思想的指引下，中国农业发展方式加快转变，循环农业取得明显进展。

**1) 投入品减量增效成效显著。**实施了化肥减量增效

示范、有机肥替代化肥、统防统治与绿色防控、果菜茶全程绿色防控等试点，集成推广节肥节药技术模式。2023 年化肥利用总量从 2015 年的 6 022.6 万 t 下降至 5 021.7 万 t，下降 16.6%<sup>[27]</sup>；主要农作物病虫害绿色防控面积覆盖率达 54.1%，全国农药使用量从 2015 年的 29.95 万 t 下降至 24.5 万 t，下降 18.2%<sup>[28]</sup>，主要农作物化肥农药利用率均显著提高<sup>[29]</sup>。推广加厚地膜和可降解地膜，农膜回收利用率稳定在 80% 以上<sup>[30]</sup>。

**2) 废弃物资源化水平不断提高。**深入推进秸秆综合利用试点县建设，秸秆“农用为主、五化并举”的格局初步形成，秸秆综合利用率达到 88.1%<sup>[31]</sup>。实施了畜禽粪污资源化利用整县推进项目、绿色种养循环试点项目，畜禽粪污综合利用率达 78.3%<sup>[29]</sup>。农村人居环境整治有序推进，2023 年全国农村卫生厕所普及率超过 73%，农村生活污水治理（管控）率达到 40% 以上，生活垃圾得到收运处理的行政村比例保持在 90% 以上<sup>[32]</sup>。

**3) 减污降碳作用不断提升。**2017 年第二次污染源普查结果显示，农业面源污染排放强度大幅降低，与第一次污染源普查相比，规模养殖化学需氧量、总氮、总磷排放量分别下降 21%、42% 和 25%，种植业总氮和总磷排放量分别下降 54.9% 和 29.9%<sup>[33]</sup>。生物质能替代减排加快推进，建成大型和特大型沼气工程 7 212 处、年产气 17 亿 m<sup>3</sup>，秸秆能源化年利用量达到 6 000 多万 t，生物质发电（垃圾焚烧、农林生物质及沼气发电）累计装机达 4 132 万 kW，发电量 1 824 亿 kW·h，可替代标准煤约 5 470 万 t<sup>[34]</sup>。粪肥年施用面积超过 2 666 万 hm<sup>2</sup> 次，为耕地提供有机质 5 500 万 t，有机肥施用固碳增汇效果明显<sup>[35]</sup>。

**4) 产业增值增效能力逐步增强。**建立了一批循环农业基地和生态农场，实施了一批农业绿色发展标准规范，2023 年，全国绿色、有机、名特优新、地理标志农产品认证登记总数达到 7.5 万个<sup>[36]</sup>，优质农产品供应能力大幅提升，质量品牌影响力不断提高。加强农产品质量安全监管，全国农产品质量安全监测总体合格率达到 97.8%<sup>[37]</sup>。循环农业系统生态功能不断挖掘，为休闲农业、文旅融合发展提供了支撑，生态价值实现路径不断丰富。

### 2.2 典型模式

中国循环农业发展模式类型多样、各具特色。归结起来，可从**实施主体、产业组成、核心纽带**等 3 个维度划分类型。

**1) 按实施主体划分，可分为主体小循环、产业中循环和社会大循环。**小循环，主要是指农户、企业、合作社等单一主体内部的循环模式，如秸秆直接还田<sup>[38]</sup>、稻鱼共生<sup>[2]</sup>，以及庭院废弃物处理后用于小菜园小果园种植<sup>[5]</sup>等。中循环，主要是指多个产业之间，通过物质高效流动、资源梯级利用、风险共担利益共享，构建产业闭环循环链条，例如，种养结合循环系统就是典型的中循环<sup>[39-40]</sup>。大循环，主要是指在实现主体小循环、产业中循环的基础上，在社会层面，通过空间布局优化、资源合理配置、产业衔接互促，实现“三产”融合、“三生”

共赢<sup>[41-42]</sup>。以浙江安吉为例,在早期发展“猪沼茶”、竹林养鸡等种养循环农业的基础上,大力发展生态竹产品制造、绿色白茶生产等,延伸拓展循环产业链条,同时突出产村融合,把美丽乡村建设和生态民宿、休闲观光等新业态培育结合起来,实现了美丽生态、美丽村庄和美丽经济的有机融合<sup>[43]</sup>。

**2) 按产业组成划分,可分为种植业内部循环、种养业间循环、种养加循环和生产生活循环等4类。**种植业内部循环主要是通过种植废弃物循环利用和复合种植中作物间物质流动实现循环,例如秸秆直接还田等。种养业间循环、种养加循环都是把一个产业产生的废弃物经过资源转化,变成另一个产业的生产原料,进行循环利用,构建循环链条<sup>[44]</sup>。生产生活循环是指将农业生产与农民生活过程中产生的废弃物、生活垃圾等转化成清洁能源、有机肥料等,为养殖场、农产品加工、家庭生活提供能源,为农田提供有机肥料,实现生产生活联动发展、生态价值有效转化<sup>[26]</sup>。

**3) 从核心纽带划分,可分为以肥料化、能源化、饲料化、基料化、原料化等为纽带的循环农业模式。**这类划分方式比较常见,也易于理解。例如,以安庆市杨桥镇“猪-沼-果”模式为例,以能源化利用为纽带,通过种植柑桔、桃、杏-养猪-沼气能源利用-沼渣沼液做果园有机肥,生产有机绿色水果,取得了很好的效益<sup>[45]</sup>;近年来,农业农村部创建了297个绿色种养循环试点县,主要推行以畜禽粪污肥料化利用为纽带的循环农业模式<sup>[46]</sup>;饲料化、基料化、原料化等为纽带的循环农业模式在中国也有一定范围的推广应用<sup>[47-48]</sup>。

### 2.3 存在问题

虽然中国探索实践了一些循环农业模式,取得了很大成效,但是仍然存在一些瓶颈问题没有破解。

**1) 顶层设计仍不全面。**现在关于循环农业的讨论很多,这些年提出来的相关概念很多,包括生态低碳农业、生态农业、生态循环农业等,没有明确的概念界限,社会各界对循环农业的理解还没有形成统一的认识,思想理念难以形成共识。虽然“十三五”以来,中国在循环农业发展上采取了一些措施,但整体上看,系统设计还不足,区域布局、产业结构还不符合循环发展的要求,循环发展还是局部的、断断续续的,没有完全畅通。推进循环农业的主要工作,分别由不同部门牵头实施,围绕各自领域实施了一些项目,但种和养、种养加不同环节上的举措,尚未紧密协同,这些关键的“环”还难以组成“链”,无法形成合力。

**2) 技术装备还需提升。**中国自主研发的循环农业技术装备,整体上仍然存在能耗高、稳定性差、效能低等问题。投入品减量方面,化肥农药减量单项技术多,技术集成明显不足,精准施肥施药机械化、智能化水平还不高,可降解农膜成本高,废旧农膜回收利用技术还不成熟。废弃物处理利用方面,技术装备与国外差距较大。如在废弃物处理方面,国内反应器堆肥设备处理能力小,运行成本比国外高25%,厌氧发酵产气率低,每天单位

容积产气率平均不足 $1.0\text{ m}^3$ <sup>[49]</sup>。国内液体粪肥施用过程中氮素损失严重,利用率仅为20%,与丹麦等国家45%的利用率相比,存在较大差距,粪肥还田设备缺乏<sup>[50]</sup>。农产品加工减损方面,技术装备存在精准性差、智能化程度低,损失率高、副产物产生量大。

**3) 法律法规仍不健全。**目前,针对循环农业的要求都分散在各个法律中,没有专门针对循环农业发展的法律法规,多以污染防治为主。部分法律条文比较原则。如在《循环经济促进法》中提到,“鼓励和支持农业生产者和相关企业采用先进或者适用技术,对农作物秸秆、畜禽粪便、农产品加工业副产品、废农用薄膜等进行综合利用”。可操作的细则条款尚未出台,惩罚性措施不明。

**4) 政策体系仍不完善。**农业农村废弃物量大、面广、价值低,收集转运处理利用各环节都需要大量投入,生产的有机肥、沼气等终端产品成本高。在现有技术还没突破性进展的情况下,需要建立健全补贴政策,扶持产业发展。以有机肥利用为例,有机粪肥的购买、施用全过程成本是化肥的3倍左右,导致农民使用意愿不高,虽然部分省份建立了有机肥利用补贴制度,但国家层面尚缺乏系统的补贴政策。

## 3 发达国家循环农业先进经验

### 3.1 法律体系完善有效

**1) 法律法规政策系统完善。**发达国家十分注重通过法律法规体系的构建,推动循环农业的发展。以日本为例,已构建了一套基于“基本法+综合法+专项法”的完善法律体系。《循环型社会形成推进基本法》明确了国家、地方政府、企业和公众在建立循环型社会中的职责;综合法详细规定了各类废弃资源的处理执行细则和管理规范;专项法分别从种植业、养殖业和加工业的角度规定了循环农业中废弃物资源利用的具体要求<sup>[51]</sup>。

**2) 限制性规范明确严格。**发达国家在法律法规中对不利于循环农业发展的行为进行了明确的限制和约束,如欧盟《硝酸盐法案》规定,在硝酸盐敏感区,每公顷土地每年粪肥最大施用量为 $170\text{ kg}$ (以氮计)。丹麦作为欧盟成员国,制定了“和谐原则”,要求每个农场养殖量不能超过500个动物单位(相当于1头奶牛),若超过限额,政府会处以罚款,并考虑吊销养殖许可证;此外,要求粪肥的施用时间必须在每年春耕前施用(四月份),农田中不种作物时不能施肥,以减少环境和地下水污染<sup>[50]</sup>。

**3) 指导性法律细化可行。**发达国家还制定了一系列具体可行的指导性政策法规。美国《综合养分管理计划》,要求规模化养殖场利用和排放畜禽废弃物必须申请并取得许可,必须制定养分管理计划,并定期对土壤进行监测,确保粪肥施用不造成污染<sup>[52]</sup>。

### 3.2 集成模式因地制宜

经过多年的发展,发达国家已经形成了各具特色的循环农业发展模式。例如,美国形成了以数字化为引领的“精准智慧型”循环农业,以生物技术、信息技术和

工程技术为基础，实施了“低投入持续农业计划”，大力发展精准农业技术，实现化肥、农药等精确施用和投入减量<sup>[53]</sup>。丹麦形成了基于土地承载力的“种养平衡型”循环农业，按照种养平衡、按需施肥的思路，严格限制农场养殖规模、施肥量和粪肥还田季节，建立了粪肥养分利用数学模型，构建了粪肥高效还田利用技术体系，粪肥氮素利用率达到 70% 以上<sup>[50]</sup>。德国形成了以废弃物能源化为纽带的“清洁能源型”循环农业，凭借国际领先的沼气技术，以青贮秸秆、畜禽粪便等原料为主，年产沼气量约 200 亿 m<sup>3</sup>，以可再生能源为主导的“能源转型”战略提高了低碳减排水平<sup>[54]</sup>。日本形成了“环境保全型”循环农业。以丰冈市推行的“鹤鸟培育农法”为例，为了保护鹤鸟栖息地，丰冈市采用标准化、精细化栽培措施，减少化肥农药投入，打造了“鹤鸟的舞”有机大米品牌，单价是常规大米的 1.6 倍，并基于精致的景观设计，有效带动观光农业的发展，实现“品质+品牌+生态价值”效应叠加，构建了区域环境共生的增值产业链<sup>[55]</sup>。

### 3.3 管理机制成熟健全

1) 建立了优质优价机制。发达国家把生态有机产品认证作为提升产业附加值的重要手段。德国黑森州维尔海姆市的一家生态农场，通过种植豆类等作物用作养猪的优质饲料，并将猪粪转化为有机肥料还田，所生产的肉制品申请并获得了德国有机认证，通过自家开设的三家生态食品超市销售有机猪肉，价格可达到每公斤 15~20 欧元，远超普通猪肉价格，实现价值提升<sup>[56]</sup>。

2) 建立了完善的收付费机制。通过合理的收付费机制，平衡循环农业中不同主体的利益。据笔者所在研究团队实地考察情况，荷兰建立了粪肥处理利用收费机制，养殖场负责粪污收集处理，专业化公司负责粪肥运输还田，养殖场需要向专业化公司支付 5 至 20 欧元/t 的运输费，专业化公司需要向种植户支付 3 至 10 欧元/t 的消纳费，打通了粪肥还田利用“最后一公里”。

3) 建立了终端产品补贴机制。发达国家通过对终端产品进行补贴或提供优惠政策，提高终端产品的市场竞争力。日本政府对有机肥替代化肥 50% 以上每亩补贴 3 000 日元左右，对沼气发电也给予补贴<sup>[57]</sup>。意大利政府明确规定沼气发电可以并入国家电网，保证以每度电 0.28 欧元的价格连续收购 15 年，高于国家购电成本（0.21 欧元）和居民用电价格（0.05 欧元）<sup>[58]</sup>。

### 3.4 技术装备先进实用

发达国家经长期攻关，循环农业技术装备水平领先。日本研制的反应器堆肥设备，使种养废弃物发酵 7 天左右即达到无害化要求，高于世界 20~30 d 的平均水平<sup>[59]</sup>。欧盟国家研发的湿法沼气成套智能设备，单位容积产气率最高可达 3.0 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·d)，平均可达 1.2 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·d) 以上，比国内同类装备高 20% 以上<sup>[60]</sup>。日本研发的厨余垃圾高温卧式干法沼气技术，单位容积产气率达到 5 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·d)，是中国同类技术的 2 倍左右<sup>[61]</sup>。

### 3.5 宣传教育深入人心

发达国家普遍重视循环农业理念的普及，通过举办

研讨会、培训班、展览等形式，向农民、农业从业者以及公众普及循环农业的知识和理念。日本从小学生就开始抓循环农业相关的教育，学生们可以通过学习相关课程或者参与农业劳作，了解循环农业的基本知识和原理。在一些废弃物处理中心，专门建设高标准密闭环形参观通道，开发了面向不同年龄层次、不同语言版本的科普视频，方便公众参观了解废弃物处理全过程。通过这些宣传教育，使得循环农业理念深入人心。

## 4 发展循环农业的重点与路径

### 4.1 突出发展重点

循环农业内涵丰富，涉及不同主体、不同规模、不同产业，模式类型和发展路径多样，既要借鉴国际经验，也要立足国情，深入挖掘中国传统农业中的精华，走出一条具有中国特色的循环农业道路。从未来的发展重点看，应着力抓好 4 个循环系统的构建。

#### 4.1.1 优化提升种植业内部循环系统

秸秆还田是典型的种植业内部循环模式，在培肥地力、稳产保供等方面发挥了重要作用。中国每年约产生秸秆 8 亿多吨，其中还田利用约占 62.8%<sup>[31]</sup>，主要采用直接还田和离田还田两种方式，其中直接还田约占总还田量的 90%，是目前最主要的方式，但在一些寒冷地区秸秆还田后腐熟慢、影响下一茬种植、还田利用效能低；离田还田是将秸秆收集后，进行堆腐、炭化等处理后，以有机肥、炭基肥等形式再还田利用，约占总还田量的 10%，这种方式的主要问题是收集转运处理成本高、农民投入意愿不强、很少应用于大田，主要在一些高效经济作物中应用。

下一步，应按照“因地制宜、提升效能、降低成本”的要求，重点抓好 4 个方面的内容。1) 因地制宜选好模式。分区域、分作物推广条带覆盖、翻埋、碎混等秸秆直接还田模式，以及秸秆炭化还田、堆腐还田等离田还田模式。如在东北耕层较薄易春旱的地区，可推广条带覆盖还田模式；耕层较厚的地方适宜推广秸秆翻埋还田。2) 优化收储运体系。合理布局秸秆收储站点，优化运输路径，培育壮大专业收储队伍，推广高效收储设施设备。3) 抓好秸秆腐解关键环节。秸秆腐解直接影响秸秆还田效果，关键是研发推广一批腐熟转化快、环境适应性强的微生物菌剂，开发一批高效低成本的粉碎机械、深耕等机械装备。4) 开发高附加值功能产品。例如，炭基肥料、土壤调理剂、农用助剂等。

#### 4.1.2 加速重构种养循环系统

粪肥利用是种养循环系统构建的关键一环。随着中国畜牧业规模化集约化快速发展，传统的种养结合系统被打破，种植养殖开始逐步分离。全国畜禽粪污年产生量约为 30.5 亿 t<sup>[62]</sup>，近年来，农业农村部实施了畜禽粪污整县推进、绿色种养循环试点等项目，大力推动粪肥还田利用，新型种养关系正在重新构建。根据“十三五”全国畜禽粪污第三方评估数据估算，全国仍有 6 亿多吨的畜禽粪污尚未合理利用，已经利用的部分中，从养殖

场产生粪污到粪肥还田,有70%以上的养分流失,还有15%左右的粪便堆沤肥设施不达标,近一半的粪水贮存发酵设施不达标,70%以上的粪肥仍以人工撒施或大田漫灌施用。种植业内部循环系统优化方案,见图1。

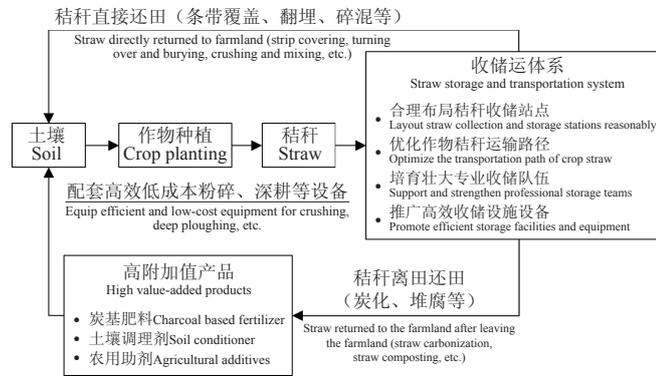


图1 种植业内部循环系统优化方案

Fig.1 Optimization strategy of planting internal circular system

下一步,应按照“养分管理、技术提升、机制创新”的要求,重点抓好3个方面的内容。1)探索推行养分管理,借鉴美国综合养分管理计划和中国一些龙头企业的做法,由养殖场与周边农户签订粪肥利用协议,按照作物土壤养分需求,确定粪肥供应量,并进行全程养分跟踪管理,促进养分平衡、循环利用。2)突破养分损失控制技术装备。目前,解决养分损失的有效办法是覆膜堆肥、添加吸附调理剂、粪水酸化调控等技术措施,但多停留在研究阶段,大面积应用还较少,应加强技术熟化转化。同时,配套研发好有效保留养分的粪肥还田机械装备,如粉状粪肥深施机械、液体粪肥拖管式、深施机械,探索应用养分快速检测传感器和精准施肥技术。3)构建种养循环长效机制。建立粪肥利用利益联结机制,由龙头企业、国资牵头负责前期的基础设施建设及后续的项目运营,中间的种植养殖管理环节则交由农户,彼此间发挥各自所长、互惠互利;建立基于粪肥流向全程可追溯的补贴发放与管理机制,通过信息化手段,采集养殖场、粪肥加工厂、粪肥施用服务主体和服务对象等信息,并在云端进行统一存储、管理和应用,实现粪肥流向信息化管理,做到粪肥来源清楚、去向有据可查、监管不留死角。建立分级定价付费机制,以河北省安平县为例,采用了粪污分级定价收集模式,粪污浓度大于8%,由第三方处理中心按50~80元/t支付养殖场粪便购买费;粪污浓度小于3%,养殖场支付20元/t的处理费;粪污浓度3%~8%,由第三方免费收集处理<sup>[63]</sup>。这种市场主体间合理收付费方式值得探索,是构建长效机制的有效措施。

#### 4.1.3 延伸拓展农产品产加销循环系统

近年来,中国积极推进三产融合发展,农业已从单一种植、养殖等生产环节,逐步拓展延伸至产加销全产业链的新阶段(见图2),相应的加工副产物产量也在逐年增长。据测算,中国农产品加工副产物年产量约为6.87亿t,其中粮食加工副产物2.40亿t,油料加工副产

物1.02亿t,果蔬加工副产物2.77亿t,畜禽水产加工副产物6821万t。加工副产物利用投入产出比不高,多数企业作为燃料、饲料低值利用或直接丢弃,综合利用率还不到40%,急需加快补齐这一短板,进一步完善产加销系统的循环链条。

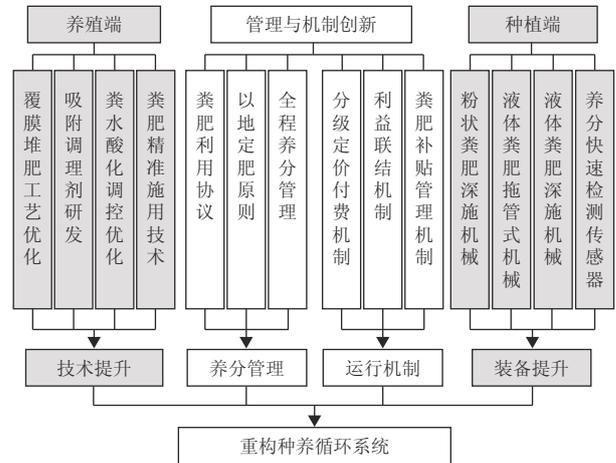


图2 种养循环系统系统重构方案

Fig.2 Reconstruction strategy of planting-breeding circular system

下一步,应按照“源头减损、分级加工、吃干榨尽”的要求,重点抓好3个方面的内容。1)强化原料减损。现在中国已经形成了南菜北运、西菜东输、北粮南运的格局,要鼓励和支持产地发展保鲜、烘干、储藏等初加工,降低源头损耗。2)强化加工环节减损。大力发展精深加工,引导农产品加工企业合理确定加工精度,减少过度加工造成的资源浪费和营养流失。例如,可发展全麦粉制全麦面包,增加面包的营养成分,减少麦麸产生。3)强化加工副产物综合利用,开发饲料、肥料、基料、食品添加剂、保健品等高值产品,实现变废为宝、减损增效。例如可综合利用畜禽皮毛、骨血、内脏等副产物,开发血浆蛋白、胶原蛋白肠衣等产品,提升加工层次,实现化害为利。这三个环节都存在技术装备问题,需要加强研发。

#### 4.1.4 积极构建生产生活循环系统

长期以来,循环农业发展的重点在农业生产系统,对农村生活废弃物考虑的还不多。据测算,中国每年产生农村生活有机废弃物约为24亿t,其中农村生活垃圾2亿t,厕所粪污22亿t,氮磷钾养分含量相当于637万t的化肥折纯量,而且单位重量废弃物中养分和有机质含量比畜禽粪污要高,以人粪为例,全氮含量在4.76%左右,远高于牛粪(1.71%)和猪粪(2.7%),具有很高的循环利用价值(见图3),是农业农村生态循环系统中的重要一环。目前,农村生活垃圾处理主要依靠填埋和焚烧<sup>[64]</sup>,厕所粪污相当一部分采用深度处理、达标排放,这些处理方式不仅成本高,更造成了资源浪费。另一方面,不少已建成的沼气工程和有机肥厂,还存在未充分利用或闲置等现象<sup>[65-66]</sup>,农村生活废弃物完全可以纳入其中,协同起来(见图4)。

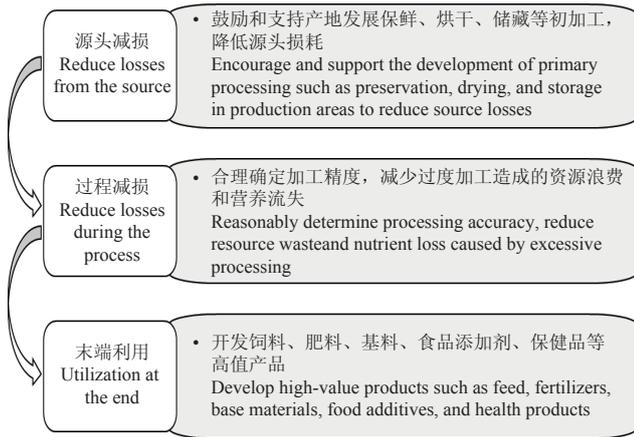


图 3 农产品产销循环系统延伸方案

Fig.3 Extension strategy of agricultural products "production-processing-sales" circular system

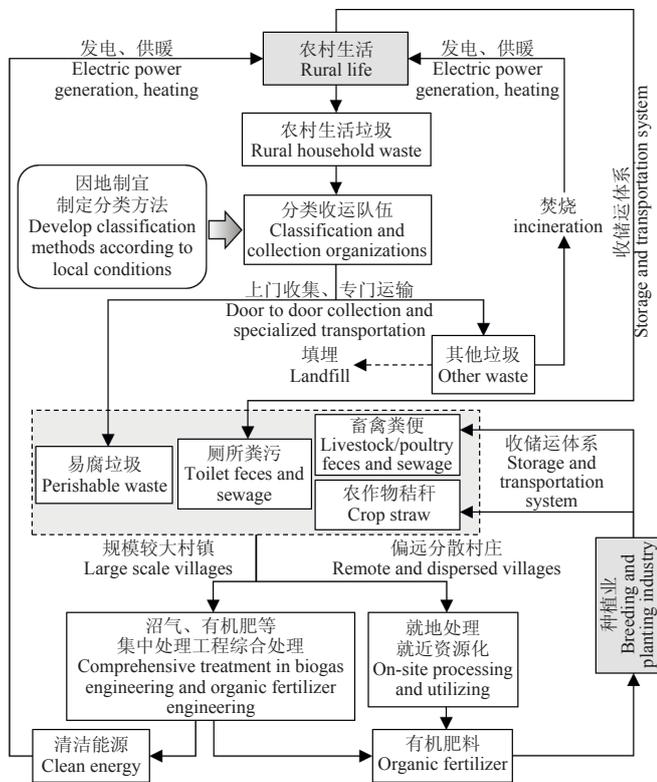


图 4 农村生产生活循环系统构建方案

Fig.4 Construction strategy of production and life circular system

下一步，应按照“分类收集、协同处理”的要求，重点抓好 2 个方面的内容。1) 提高易腐垃圾分类收集水平。因地制宜制定生活垃圾分类方法，提高易腐垃圾分类收集比例，设立生活垃圾分类收运队伍，上门收集、专门运输，避免垃圾重新混合。2) 深入推进生产生活废弃物协同处理。在规模较大的村镇，结合已建的沼气、有机肥工程处理设施，开展农村易腐垃圾、厕所粪污、畜禽粪污和秸秆等多种原料协同处理；在偏远分散的村庄，推行废弃物就地处理；其他垃圾可集中收集焚烧处理后填埋。处理后产生的清洁能源和有机肥料可就地就近用于农业农村生产生活。实现协同处理，要转变现有科研方向，由生产废弃物处理利用为重点转向生产生活

多种废弃物一体化处理，加大科研力度，形成成熟的技术和处理设施，推广应用。

## 4.2 发展循环农业的推进路径

笔者研究认为，应重点从 4 个方面着手，推进中国循环农业的发展。

### 4.2.1 推进结构调整

1) **优化品种结构**。针对鲜食、加工、饲用等不同需求，大力推进品种专用化，从源头上减少废弃物的产生。以玉米为例，草畜集中区可以发展粮饲兼用玉米品种，有精深加工需求的，可以推广粉质玉米、高油玉米等加工专用品种。2) **优化生产结构**。中国每年生产的籽粒玉米近 1 000 万 t 用于草食畜牧业饲料，在合适的地区可以适度调整，推广种植全株青贮玉米，可以探索将青贮玉米折算成粮食产量。3) **优化产业结构**。大力发展农产品加工业、冷链物流业，延伸产业链条，推动农产品源头减损、精细利用、资源循环，为全产业链低碳化循环化奠定基础。

### 4.2.2 加强科技支撑

1) **加强循环农业基础理论研究**。完善循环农业发展理论体系，进一步厘清循环农业的概念、内涵和边界，加强循环农业宏观政策研究和顶层设计。2) **加强共性关键技术研发**。研发推广一批轻量化、实用性、低成本的技术装备。例如，针对粪肥氮素损失严重、利用率低的问题，重点开展氮素固持技术、精准智能施肥机具研发。3) **加强原创性前沿技术研发**。探索利用农业农村废弃物开发化工原料前体、高值能源、高附加值农业助剂等产品，不断拓宽资源循环利用路径。例如，利用沼气、热解气进一步制备燃料甲醇、氢气等高值能源，提升产业价值。4) **深化科技体制改革**。现有研究方向交叉，低水平重复现象严重，无法形成科研合力。受支持项目数量限制，研究重点和方向不能持续，研究不专不深，难以产出标志性重大成果。必须深化科技体制改革，明确国家级、省级科研单位的科研分工和重点任务，建立长期稳定的经费支持机制。

### 4.2.3 强化法规政策

1) 适时出台细化可操作的循环农业条例，加快补齐在循环农业方面的法律法规短板。开展循环农业法律法规宣传教育，增强社会法治观念。2) 进一步加强循环农业发展关键环节的监测评估，强化农产品质量、人身安全、环境保护等相关执法力度，确保循环农业产业稳步有序发展。3) 进一步研究完善产业政策支持体系，创新投资方式，发挥财政资金“四两拨千斤”的作用，引导金融资本、社会资本等参与建设。4) 研究制定鼓励引导农民施用有机肥的补助政策，探索建立耕地地力补贴与循环农业挂钩机制，按照养分平衡要求推进有机粪肥、秸秆科学还田的进行补贴，参照绿色有机等认证体系，探索建立循环农业品牌认证机制，推动实现农产品优质优价，促进产业链条增值增效。

### 4.2.4 促进协同发力

1) **加强部门沟通**。推进与发改、财政、生态环境等

部门资源共享,明确任务分工,细化实化目标任务,调动各方面资源要素,凝聚全社会力量,形成强大工作合力,结合乡村振兴示范县、农业现代化示范区、农业绿色发展先行区等建设,推进先行先试,推广循环农业发展模式,构建循环农业齐抓共管、全面铺开的新局面。

**2) 建立一批示范工程。**依托国家农业绿色发展先行区、现代农业产业园、产业集群、产业强镇等,建立一批不同类型的示范工程。可以明确要求现有产业融合项目安排部分资金用于示范工程建设,发挥示范引领作用。

**3) 加强宣传培训。**依托部属事业单位、科研院所、农业高校优势团队,积极开展服务指导。及时总结凝练好经验好做法,通过培训班、论坛等方式,定期组织开展交流培训活动,综合利用传统媒体和新媒体,开展模式发布、范例交流、现场观摩等活动,示范带动更大范围循环农业发展。

## 5 结 论

当前中国发展循环农业的重要性和紧迫性不言而喻,应借鉴国际经验、立足国情,深入挖掘中国传统农业中的精华,走出一条具有中国特色的循环农业道路。

在循环农业发展重点方面,建议优化种植业内部循环系统、重构种养循环系统、拓展产加销循环系统和构建生产生活循环系统,有效提升资源利用效率,降低环境污染,促进农业可持续发展。

在循环农业推进路径方面,建议优化品种结构、生产结构和产业结构,为全产业链低碳化循环化奠定基础;加强基础理论研究、共性关键技术和原创性前沿技术研发,深化科技体制改革;完善循环农业相关法规政策,降低农业生产成本;形成部门协同推进工作合力,构建循环农业齐抓共管、全面铺开的新局面,强化示范引领和宣传培训,推动中国农业向更加绿色、高效和可持续发展的方向发展。

### [参 考 文 献]

- [1] YANG J, ZHANG D, YANG X, et al. Sustainable intensification of millet-pig agriculture in Neolithic North China[J]. *Nature Sustainability*, 2022, 5(9): 780-786.
- [2] 李荣福, 杜雪地, 徐忠香, 等. 中国稻田渔业起源与历史分析[J]. *中国渔业经济*, 2023, 41(3): 113-126.  
LI Rongfu, DU Xuedi, XU Zhongxiang, et al. The origin and historical analysis of rice field fisheries in China[J]. *Chinese Fisheries Economics*, 2023, 41(3): 113-126. (in Chinese with English abstract)
- [3] 钟功甫. 珠江三角洲的“桑基鱼塘”: 一个水陆相互作用的人工生态系统[J]. *地理学报*, 1980, 3: 200-209, 277, 278.  
ZHONG Gongfu. Mulberry-dyke-fish-pond on the Zhujiang Delta: A complete artificial ecosystem of land-water interaction[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1980, 3: 200-209, 277, 278. (in Chinese with English abstract)
- [4] 中国大百科全书出版社. 《中国大百科全书》第三版网络版-轮作制 [EB/OL]. [2023-06-03] <https://www.zgbk.com/ecph/words?SiteID=1&ID=183122&Type=bkzyb&SubID=169829>.
- [5] 于万里, 热甫克提·阿布来提, 库拉尔·苏莱曼. 新疆庭院生态经济发展模式探讨[J]. *新疆农业科技*, 2017, 3: 11-12.
- [6] 于法稳. 实现我国农业绿色转型发展的思考[J]. *生态经济*, 2016, 32(4): 42-44, 88.  
YU Fawen. Thinking on agricultural green transformation development of China[J]. *Ecological Economy*, 2016, 32(4): 42-44, 88. (in Chinese with English abstract)
- [7] 吕学栋. 循环农业经济体系的内涵及其构建[J]. *河北农机*, 2023, 19: 142-144.
- [8] 刘世龙. 循环农业经济体系的内涵及其构建[J]. *农业开发与装备*, 2022, 2: 55-57.
- [9] 胡世霞, 罗红梅, 潘峰, 等. 关于循环农业发展的理论逻辑、技术路径及对策研究[J]. *农村经济与科技*, 2023, 34(21): 1-4.
- [10] 中国大百科全书出版社. 《中国大百科全书》第三版网络版-循环农业 [EB/OL]. [2023-06-03]. <https://www.zgbk.com/ecph/words?SiteID=1&ID=149438&Type=bkzyb&SubID=114228>.
- [11] 高旺盛, 陈源泉, 梁龙. 论发展循环农业的基本原理与技术体系[J]. *农业现代化研究*, 2007, 28(6): 731-734.  
GAO Wangsheng, CHEN Yuanquan, LIANG Long. Basic principles and technology supporting for circular agriculture development[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2007, 28(6): 731-734. (in Chinese with English abstract)
- [12] 张旭, 胡宝贵. 中国农业节水灌溉技术应用研究进展[J]. *中国农学通报*, 2021, 37(26): 153-158.  
ZHANG Xu, HU Baogui. Application of agricultural water-saving irrigation technology in china: Research progress[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2021, 37(26): 153-158. (in Chinese with English abstract)
- [13] 刘城宇, 杨洪明. 废弃物到能源的闭环供应链: 循环供能、协同运作与可持续性[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(10): 182-191.  
LIU Chengyu, YANG Hongming. Waste to energy closed-loop supply chain: Recycling energysupply, collaborative operation and sustainability [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(10): 182-191. (in Chinese with English abstract)
- [14] 丁文成, 何萍, 周卫. 我国新型肥料产业发展战略研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29(2): 201-221.  
DING Wencheng, HE Ping, ZHOU Wei. Development strategies of the new-type fertilizer industry in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(2): 201-221. (in Chinese with English abstract)
- [15] 唐汉, 王金武, 徐常塑, 等. 化肥减施增效关键技术研究进展分析[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(4): 1-19.  
TANG Han, WANG Jinwu, XU Changsu, et al. Research progress analysis on key technology of chemical fertilizer reduction and efficiency increase[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(4): 1-19. (in Chinese with English abstract)
- [16] 宋刘洋, 丁舒心, 张琪, 等. 农业废弃物资源化利用研究进展[J]. *青海农林科技*, 2024, 1: 42-46.  
SONG Liuyang, DING Shuxin, ZHANG Qi, et al. Research progress on the resource utilization of agricultural waste[J]. *Science and Technology of Qinghai Agriculture and Forestry*,

- 2024, 1: 42-46. (in Chinese with English abstract)
- [17] 沈园, 王海候, 陶玥玥, 等. 基于生命周期评价的现代“草-羊-田”农牧循环系统调控[J]. 农业工程学报, 2021, 37(24): 266-274.  
SHEN Yuan, WANG Haihou, TAO Yueyue, et al. Regulation of modern “straw-sheep-cropland” agro-pastoral system using life cycle assessment [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(24): 266-274. (in Chinese with English abstract)
- [18] 姚青, 张亦弛, 李祥, 等. 中国农村绿色发展水平时空特征及其空间扩散与收敛效应[J]. 农业工程学报, 2023, 39(7): 256-265.  
YAO Qing, ZHANG Yichi, LI Xiang, et al. Spatiotemporal characteristics, spatial diffusion and convergence of green development levels in rural China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(7): 256-265. (in Chinese with English abstract)
- [19] 姚萍, 张晓辛. 江苏现代循环农业评价指标体系构建与运用[J]. 安徽农学通报, 2015, 21(18): 1-3, 33.  
YAO Ping, ZHANG Xiaoxin. Construction and application of evaluation indicator system for jiangsu modern circulation agricultural[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2015, 21(18): 1-3,33. (in Chinese with English abstract)
- [20] 陈春琳, 王明明, 贾吉秀, 等. 第三方运营下规模化畜禽沼气工程运行与管理[J]. 农业工程学报, 2023, 39(5): 256-264.  
CHEN Chunlin, WANG Mingming, JIA Jixiu, et al. Operation and management analysis of large-scale biogas projects under third-party mode [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(5): 256-264. (in Chinese with English abstract)
- [21] 梅旭荣, 朱昌雄, 白小军, 等. 宁夏现代循环农业评价体系构建与运用[J]. 中阿科技论坛(中英文), 2022, 6: 1-8.  
MEI Xurong, ZHU Changxiong, BAI Xiaojun, et al. Research on the construction and application of modern circular agriculture evaluation system in Ningxia[J]. China-Arab States Science and Technology Forum, 2022, 6: 1-8. (in Chinese with English abstract)
- [22] 苏凯, 孟海波, 张辉. 中国农业绿色发展指标体系构建及其“十四五”趋势预判[J]. 农业工程学报, 2021, 37(20): 287-294.  
SU Kai, MENG Haibo, ZHANG Hui. Construction of the green development indicators for agriculture and its prediction in the 14th Five-Year Plan in China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(20): 287-294. (in Chinese with English abstract)
- [23] 胡奇乐, 杨元森, 肖诺, 等. 基于饲料调控实现生猪养殖豆粕减量和环境减排的研究进展[J]. 中国饲料, 2023, 22: 96-102.  
HU Qile, YANG Yuansen, XIAO Nuo, et al. Research progress on feed regulation to reduce soybean meal utilization and environmental emission in pigs farming[J]. China Feed, 2023, 22: 96-102. (in Chinese with English abstract)
- [24] 刘国虎, 刘晨雨. 陆基循环水立体养殖工艺设计及设备分析[J]. 中国水产, 2017, 7: 93-95.
- [25] 梁吉义. 生态农业系统物质能量循环利用与案例分析[J]. 科学种养, 2020, 10: 60-62.
- [26] 周海宾, 沈玉君, 孟海波, 等. 自然村生产生活废弃物循环利用模式及其评价研究[J]. 农业工程学报, 2018, 34(23): 206-212.  
ZHOU Haibin, SHEN Yujun, MENG Haibo, et al. Research on rural waste recycling mode and its evaluation in village[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(23): 206-212. (in Chinese with English abstract)
- [27] 国家统计局. 年度数据-农用化肥施用折纯量(万吨) [EB/OL]. (2024-09-18). <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01&zb=A0D06&sj=2023>.
- [28] 农药资讯网. 全国农技中心发布: 2024 年重大病虫害发生趋势及农药使用需求 [EB/OL]. (2023-11-22). <http://www.jsppa.com.cn/news/zhibao/10621.html>.
- [29] 农业农村部. 农业绿色发展取得积极进展 [EB/OL]. [2023-12-22]. [http://www.moa.gov.cn/xw/zwdt/202312/t20231222\\_6443326.htm](http://www.moa.gov.cn/xw/zwdt/202312/t20231222_6443326.htm).
- [30] 人民网. 农田“白色污染”防治成效明显 全国农膜回收率稳定在 80% 以上 [EB/OL]. (2021-06-18). <http://finance.people.com.cn/n1/2021/0618/c1004-32134201.html>.
- [31] 农业农村部. 《全国农作物秸秆综合利用情况报告》发布 2021 年我国农作物秸秆综合利用率达 88.1% [EB/OL]. (2022-10-10). [http://www.moa.gov.cn/xw/zwdt/202210/t20221010\\_6412962.htm](http://www.moa.gov.cn/xw/zwdt/202210/t20221010_6412962.htm).
- [32] 新华社. 我国农村人居环境整治提升取得新成效 [EB/OL]. [2024-02-28]. [https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202402/content\\_6934790.htm](https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202402/content_6934790.htm).
- [33] 生态环境部, 国家统计局, 农业农村部. 第二次全国污染源普查公报 [EB/OL]. [2020-06-10]. [https://www.gov.cn/xinwen/2020-06/10/content\\_5518391.htm](https://www.gov.cn/xinwen/2020-06/10/content_5518391.htm).
- [34] 汽车商业评论杂志. 可控核聚变要等上 50 年, 生物质能却近在眼前 [EB/OL]. (2024-05-24). <https://www.163.com/dy/article/15G27NJI05278GV4.html>.
- [35] 农业农村部, 国家发展改革委. 关于印发《“十四五”全国畜禽粪肥利用种养结合建设规划》《“十四五”重点流域农业面源污染综合治理建设规划》的通知: 农计财发(2021)33 号 [R]. 北京: 农业农村部、国家发展改革委, 2021.
- [36] 人民网. 大国粮仓根基稳固(奋进强国路 阔步新征程) [EB/OL]. (2024-09-18). [http://paper.people.com.cn/rmrb/html/2024-09/18/nw.D110000renmrb\\_20240918\\_4-06.htm](http://paper.people.com.cn/rmrb/html/2024-09/18/nw.D110000renmrb_20240918_4-06.htm).
- [37] 农业农村部. 全国农产品监测总体合格率 97.8% [EB/OL]. (2024-05-24). [https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202312/content\\_6923162.htm](https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202312/content_6923162.htm).
- [38] 农业部. 农业部办公厅关于推介发布秸秆农用十大模式的通知 [EB/OL]. (2017-05-20). [http://www.moa.gov.cn/nybgb/2017/dwq/201712/t20171230\\_6133475.htm](http://www.moa.gov.cn/nybgb/2017/dwq/201712/t20171230_6133475.htm).
- [39] 赵立欣, 孟海波, 沈玉君, 等. 中国北方平原地区种养循环农业现状调研与发展分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(18): 1-10.  
ZHAO Lixin, MENG Haibo, SHEN Yujun, et al. Investigation and development analysis of planting-breeding circulating agriculture ecosystem in northern plains in China[J].

- Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(18): 1-10. (in Chinese with English abstract)
- [40] 龚国义. 南方“畜禽-冬种马铃薯”种养结合模式养分循环研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2017.  
GONG Guoyi. Study on the Nutrient Cycling of “Livestock and Poultry - Winter Potato” Planting and Breeding Mode in South China [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2017. (in Chinese with English abstract)
- [41] 孙晨曦, 李梅芳. 以龙头企业为纽带构建果品循环经济产业链及运行机制[J]. 农业工程, 2024, 14(2): 143-150.  
SUN Chenxi, LI Meifang. Construction of fruit circular economy industrial chain and its operation mechanism with leading enterprises as link[J]. Agricultural Engineering, 2024, 14(2): 143-150. (in Chinese with English abstract)
- [42] 曾梦玲. 关于湖北省农垦循环农业发展的一些思考[J]. 湖北经济学院学报(人文社会科学版), 2022, 19(10): 21-24.
- [43] 王文月. 浙江安吉推动质量兴农绿色兴农的借鉴启示[J]. 中国农村科技, 2019, 7: 42-44.
- [44] 刘琼峰, 周峻宇, 吴海勇, 等. 国内种养复合循环农业模式应用现状[J]. 农学学报, 2022, 12(7): 81-88.  
LIU Qiongfeng, ZHOU Junyu, WU Haiyong, et al. Application status of integrated planting-breeding circular agriculture mode in China[J]. Journal of Agriculture, 2022, 12(7): 81-88. (in Chinese with English abstract)
- [45] 叶庆. “猪—沼—果”模式示范效益分析及其综合利用技术[J]. 现代农业科技, 2016, 5: 284-285.
- [46] 农民日报. 三年来中央财政安排 74 亿元开展绿色种养循环农业试点工作 [EB/OL]. (2023-12-8). [http://www.mof.gov.cn/zhengwuxinxi/caijingshidian/cjzylm/202312/t20231208\\_3920858.htm](http://www.mof.gov.cn/zhengwuxinxi/caijingshidian/cjzylm/202312/t20231208_3920858.htm).
- [47] 农视网. 确山县新安店镇: 探索循环农业模式 让秸秆变废为宝 [EB/OL]. (2024-09-29). <https://www.ntv.cn/zxhArticle.shtml?id=321418>.
- [48] 杭州市富阳区人民政府. 秸秆别急着烧!富阳这 7 种模式“变废为宝” [EB/OL]. (2024-07-29). [https://www.fuyang.gov.cn/art/2024/7/29/art\\_1228925291\\_59367522.html](https://www.fuyang.gov.cn/art/2024/7/29/art_1228925291_59367522.html).
- [49] 王彦博. 农村沼气工程时空特征与效率评价及发展路径研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2023.  
WANG Yanbo. Study on Temporal and Spatial Characteristics, Energy Efficiency Evaluation and Sustainable Development Path of Rural Biogas Projects [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2023. (in Chinese with English abstract)
- [50] 隋斌, 孟海波, 沈玉君, 等. 丹麦畜禽粪肥利用对中国种养结合循环农业发展的启示[J]. 农业工程学报, 2018, 34(12): 1-7.  
SUI Bin, MENG Haibo, SHEN Yujun, et al. Utilization of livestock manure in denmark and its inspiration for planting-breeding combined circular agricultural development in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(12): 1-7. (in Chinese with English abstract)
- [51] 胡澎. 日本建设循环型社会的经验与启示[J]. 今日国土, 2020, 12: 25-27.
- [52] 莫际仙, 高春雨, 毕于运, 等. 国外养分管理计划政策与启示[J]. 世界农业, 2018, 6: 86-93, 216.  
MO Jixian, GAO Chunyu, BI Yuyun, et al. Policies of livestock and poultry industry sewage manure nutrientmanagement plan of foreign countries and its experience and inspiration for China[J]. World Agriculture, 2018, 6: 86-93,216. (in Chinese with English abstract)
- [53] 李江南. 美国、德国和日本循环农业模式的实践、经验及其比较[J]. 世界农业, 2017, 38(6): 17-22, 236.  
LI Jiangnan. The practice, experience and comparison of foreign circulation agriculture model[J]. World Agriculture, 2017, 38(6): 17-22,236. (in Chinese with English abstract)
- [54] 王雅菲, 赵博渊. 德国生物天然气发展现状及对我国的经验借鉴[J]. 再生资源与循环经济, 2020, 13(4): 42-44.  
WANG Yafei, ZHAO Boyuan. The development of biogas in Germany and its reference to China[J]. Recyclable Resources and Circular Economy, 2020, 13(4): 42-44. (in Chinese with English abstract)
- [55] 马健, 虞昊, 周佳. 日本农业绿色发展的路径、成效与政策启示[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(1): 149-162.  
MA Jian, YU Hao, ZHOU Jia. Sustainable agricultural development from a green perspective in Japan: Paths, results, and policy inspirations[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023, 31(1): 149-162. (in Chinese with English abstract)
- [56] 中国农村网. 种植养殖加超市 德国农场的“纯生态”循环 [EB/OL]. (2024-05-24). [http://journal.crnews.net/nmwz/2016n/dwq/912959\\_20160428012444.html](http://journal.crnews.net/nmwz/2016n/dwq/912959_20160428012444.html).
- [57] 日本农林水产省. 环保型农业直接支付拨款 [EB/OL]. (2023-05-01). [https://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyokakyou\\_chokubarai/mainp.html](https://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyokakyou_chokubarai/mainp.html).
- [58] 郭凯军, 杨振海. 意大利畜禽粪污处理情况及启示[J]. 世界农业, 2017, 3: 29-32.
- [59] 中部 Ecotec 株式会社. Compo 设备 [EB/OL]. (2024-05-24). <https://www.ecotec-compo.com/cn/product/index.html>.
- [60] 程序, 梁近光, 郑恒受, 等. 中国“产业沼气”的开发及其应用前景 [J]. 农业工程学报, 2010, 26 (5): 1-6.  
CHENG Xu, LIANG Jinguang, ZHENG Hengshou, et al. Tapping of China's biogas industry and its perspective. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(5): 1-6. (in Chinese with English abstract)
- [61] 马双双, 张辉, 沈玉君, 等. 日本废弃物处理利用经验对中国的启示[J]. 农业工程学报, 2024, 40(16): 196-201.  
MA Shuangshuang, ZHANG Hui, SHEN Yujun, et al. Practice of Japan's waste treatment and utilization and inspiration for China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(16): 196-201. (in Chinese with English abstract)
- [62] 农业农村部. 关于贯彻实施《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》的意见 [EB/OL]. [http://www.moa.gov.cn/govpublic/KJJYS/202108/t20210830\\_6375173.htm](http://www.moa.gov.cn/govpublic/KJJYS/202108/t20210830_6375173.htm).
- [63] 李金祥. 畜禽粪污处理利用的思考与建议[J]. 中国畜牧兽医文摘, 2017, 33(7): 5-6, 63.
- [64] 张敏, 韩智勇, 姜磊, 等. 我国部分地区农村生活垃圾处理现状及模式[J]. 中国沼气, 2016, 34(2): 89-95.  
ZHANG Ming, HAN Zhiyong, JIANG Lei, et al. Status quo

- and modes of domestic waste treatment in rural areas of China[J]. *China Biogas*, 2016, 34(2): 89-95. (in Chinese with English abstract)
- [65] 朱荣. 农村户用沼气工程闲置的原因及对策[J]. *现代农业科技*, 2020, 17: 152-153.
- ZHU Rong. Reasons and countermeasures of idling rural household biogas project[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2020, 17: 152-153. (in Chinese with English abstract)
- [66] 新华网. 中看不中用、建成即荒废……农村基础设施闲置何解? [N]. (2024-05-15). <http://www.ah.xinhuanet.com/20240515/2dc4e798a3794f029e96766953e86f6b/c.html>.

## Development practice and promotion route of circular agriculture in China

WANG Jian<sup>1,2</sup>, ZHANG Hui<sup>1,2\*</sup>, SHEN Yujun<sup>1,2</sup>, DING Jingtao<sup>1,2</sup>, ZHOU Haibin<sup>1,2</sup>, CONG Hongbin<sup>1,3</sup>, SHEN Xiuli<sup>1,3</sup>, MA Shuangshuang<sup>1,2</sup>, YE Bingnan<sup>1,3</sup>, SONG Liqiu<sup>1,2</sup>

(1. *Academy of Agricultural Planning and Engineering, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100125, China*; 2. *Key Laboratory of Technologies and Models for Cyclic Utilization from Agricultural Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100121, China*; 3. *Key Laboratory of Energy Resource Utilization from Agriculture Residue, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100121, China*)

**Abstract:** The long history of circular agriculture is characterized by theoretical and practical exploration tracing back to ancient agricultural civilizations in China. Circular agriculture has already been engaged to combine millet cultivation and pig farming at the Dadiwan site in Qin'an, China, during the Neolithic period more than 5,500 years ago. Various modes of ecological cycle have been applied over the course of several thousand years in conventional Chinese agriculture, such as rice-fish farming, mulberry-based fish ponds, crop rotation complementarity, and courtyard economy. Since the reform and opening-up, remarkable achievements have been realized to clarify the ecological balance and resource recycling. But the agriculture still relies heavily on the extensive use of agricultural inputs, like fertilizers, pesticides, and agricultural films, leading to the increasingly prominent issues of environmental pollution and ecological damage. The agricultural growth mode is required to reduce the input, consumption, and pollution. Therefore, it is very necessary to enhance the utilization and recycling levels of agricultural resources in circular and sustainable agriculture. Circular agriculture is significantly practical and has far-reaching strategic importance. New productive forces can also be developed in green and high-quality agriculture. This article aims to clarify the essential connotation of circular agriculture. The concept of green development was dominated by constructing circular agriculture. A multi-level material and energy recycling system was then realized via technological innovation and management. A closed-loop production model was obtained with low material input, high efficiency of resource utilization, and low environmental pollution. Four key characteristics of circular agriculture were proposed: source reduction, process recycling, high-value output, and low-carbon process. Four achievements were also highlighted, including the reduction of input quantity with high efficiency, the high level of waste resource utilization, the pollution and carbon reduction, as well as industrial value-added and efficiency enhancement. The development mode of circular agriculture was summarized from three perspectives: Firstly, the implementation subject was divided into small-scale circulation among individuals, medium-scale circulation among industries, and large-scale social circulation; Secondly, industrial composition was divided into the internal circulation within the planting industry, circulation between planting and breeding, circulation among planting, breeding, and processing, as well as the production-lifestyle circulation; Thirdly, core linkage was divided into the circular agriculture mode that linked by fertilization, energization, feed production, substrate production, and raw material production. A summary was also given on circular agriculture: Firstly, the top-level design was still limited to coordinating some measures in different planting and breeding segments. It was difficult for the key "links" to form a "chain" and then create a joint force; Secondly, technological equipment was required to upgrade technological equipment, such as high energy consumption, low stability, and efficiency; Thirdly, some regulations were still required for the circular agriculture. Previously, much effort was focused mostly on pollution prevention and control. It was still lacking specific regulations tailored to circular agriculture; Fourthly, it was still lacking decision-making on the subsidy policies at the national level. The advanced experiences of developed countries were also summarized in circular agriculture, including comprehensive legal systems, integrated models tailored to local conditions, mature and sound management, advanced and practical technological equipment, as well as publicity and education. Finally, the practices of circular agriculture were drawn from the developed countries, according to the national conditions. Key points and paths were proposed to develop circular agriculture: Firstly, the internal circulation system of the planting industry was optimized, and suitable models upgraded, according to the local conditions. The waste collection, storage, and transportation were optimized to focus on the critical step of straw decomposition, and high-value-added functional products; Secondly, the planting and breeding circulation were also reconstructed to explore and implement the nutrient management. Technological equipment was developed for nutrient loss control. A long-term mechanism was obtained for planting and breeding circulation; Thirdly, the production, processing, and sales circulation were extended to strengthen the raw material loss reduction, processing loss reduction, and comprehensive utilization of processing by-products; Fourthly, the production and lifestyle circulation were improved for the classification and collection of perishable wastes in the collaborative treatment of production and lifestyle waste. Meanwhile, specific paths were obtained to promote structural adjustment, and scientific and technological support. A number of demonstration projects were conducted to develop circular agriculture and agricultural power.

**Keywords:** circular agriculture; resource utilization of rural and agricultural waste; green and low-carbon