



评述

畜禽粪污资源化处理与种养循环一体化研究与思考

陈铭哲¹, 印遇龙^{2*}, 何流琴^{1,2*}

1. 湖南师范大学生命科学学院, 动物肠道功能调控湖南省重点实验室, 湖南省动物肠道生态与健康国际联合实验室, 长沙 410081;

2. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 亚热带农业生态过程重点实验室, 动物营养生理与代谢过程湖南省重点实验室, 长沙 410125

* 联系人, E-mail: yinyulong@isa.ac.cn; heliuqin@hunnu.edu.cn

收稿日期: 2024-03-27; 接受日期: 2024-05-16; 网络版发表日期: 2024-05-27

国家重点研发计划(2023YFD1301403)资助

摘要 随着中国养殖业的高速发展, 规模化养殖导致的畜禽粪污资源化利用水平低、污染负荷大、种养脱节等问题日趋严重, 阻碍了中国养殖业的健康可持续发展. 为有效解决这一问题, 我们应大力推动畜禽粪污资源化处理及构建种养循环一体化农业体系. 与传统农业相比, 种养循环一体化是一种具有高产量、可持续和高效益特性的新型循环农业模式, 将种植业和养殖业紧密结合, 而畜禽粪污资源化处理是种养循环一体化模式实现的关键节点. 因此, 本文综述了畜禽粪污资源化利用方式(饲料化、能源化、基料化、肥料化)的优缺点及研究现状, 解析了种养循环研究过程中所涉及的评估方法, 并通过畜禽粪污资源化处理与种养循环一体化典型案例分析, 提出中国畜禽粪污资源化与种养循环一体化所面临挑战及未来发展方向, 以期促进畜禽粪污资源化与种养循环一体化新型农业模式的应用, 为实现中国“双碳”目标和农业生态绿色升级提供理论参考和新思路.

关键词 畜禽粪污, 资源化, 种养循环一体化, 功能农业

随着畜禽养殖业高速发展, 养殖业从个体户分散养殖逐渐转变为规模化、自动化养殖^[1], 尽管养殖规模的扩大可为人们提供充足的肉蛋奶, 但也不可避免会产生大量畜禽粪污, 畜禽污染体量呈现逐年增加的趋势^[2,3]. 据《第二次全国污染普查公报》数据^[4], 2020年中国畜禽粪污排放量达30.5亿吨, 养殖业废水排放中总氮量达37.00万吨, 总磷量达8.04万吨, 畜禽粪污污染稳居农业源污染之首^[5]. 近年来, 国家已出台多项有关畜禽粪污资源化与种养循环一体化相关政策, 2021年农业农村部在《关于开展绿色种养循环农

业试点工作的通知》中提到加快畜禽粪污资源化利用, 打通种养循环堵点, 促进粪污还田. 2024年中央一号文件提出推广种养循环一体化农业模式, 加大畜禽粪污资源化、无害化利用监管力度. 由此可见, 畜禽粪污资源化处理是养殖业发展到一定阶段的重要产物, 也是中国实现种养循环一体化农业模式的关键节点^[6]. 畜禽粪污资源化处理主要方法是将畜禽粪污进行饲料化、能源化、基料化、肥料化循环利用, 实现可持续绿色发展. 而据农业部统计, 2020年中国畜禽粪污综合利用率不足60%, 距离政策中“到2025年, 畜

引用格式: 陈铭哲, 印遇龙, 何流琴. 畜禽粪污资源化处理与种养循环一体化研究与思考. 中国科学: 生命科学, 2024, 54: 1211–1225
Chen M Z, Ying Y L, He L Q. Research and reflection on the integration of manure resource treatment and integrated farming system in animal husbandry (in Chinese). Sci Sin Vitae, 2024, 54: 1211–1225, doi: 10.1360/SSV-2024-0080

禽粪污综合利用率超过80%”的行动目标仍有差距。种养循环一体化可将种植业与养殖业进行有机结合, 能量和物质内部循环, 能有效改善生态环境和提高农户经济效益, 构建种养循环一体化是解决中国畜禽粪污污染的有效方法。因此, 本文简述了畜禽粪污资源化和种养循环一体化概念的同时, 重点探讨了当前国内外最新的畜禽粪污资源化处理和种养循环评价方法以及最新研究进展, 并通过畜禽粪污资源化处理和种养循环一体化典型案例分析与思考, 提出中国畜禽粪污资源化与种养循环一体化所面临的挑战及未来发展方向, 以期促进畜禽粪污资源化与种养循环一体化新型农业模式的应用, 为实现中国“双碳”目标和农业生态绿色升级提供理论参考和新思路。

1 畜禽粪污资源化

1.1 畜禽粪污资源化定义

畜禽粪污是指养殖过程中畜禽排放的所有固液废弃物, 包括畜禽粪便和养殖废水(如冲洗水、动物排尿、生活污水等)。畜禽粪污中含有大量营养元素^[7], 具有巨大的潜在利用价值。为了实现其潜在的利用价值, 通过饲料化、能源化、基质化、肥料化等处理方法将这些废弃物重新循环利用, 减少体系中能量损耗, 增加养殖户经济效益, 这一过程称为畜禽粪污资源化处理(图1)。

1.2 畜禽粪污资源化利用方式

1.2.1 清粪工艺

清粪工艺是畜禽粪污资源化前端工艺^[8], 可以有效地分离畜禽养殖舍产生的粪污, 改善养殖舍中的卫生条件, 降低粪污清理过程中的劳动力成本, 提高畜禽养殖管理的自动化水平, 是粪污资源化利用的第一步^[9]。目前常用的畜禽粪污清粪工艺有水冲粪工艺、水泡粪工艺、干清粪工艺3种。

水冲粪工艺是将粪污混合通过地漏经排粪沟排入贮粪池, 每天多次用水冲洗排粪沟, 粪污水顺粪沟进入贮粪池。可简单、快速、有效分离粪污且需要劳动力成本较低, 不受气候影响, 能够极显著降低畜禽养殖舍的NH₃浓度^[10], 改善空气质量。但是初始投入及能源费用消耗较高, 养殖废水中营养元素难以提取, 导致畜禽粪污肥料化水平低, 且有过程中耗水量大的问题。



图1 种养循环模式和畜禽资源化处理方法

Figure 1 Integrated Farming System and the resource treatment methods of livestock and poultry manure

水泡粪工艺是在水冲粪工艺基础上进行改良。水泡粪工艺指在养殖舍排粪沟中注水, 将所有畜禽粪污通过地漏排入贮粪池。在进行水泡式贮存1~2月, 贮粪池满后, 打开出粪口, 将沟中水泡的畜禽粪污全部排出, 再进行固液分离的清粪工艺。相较于水冲粪工艺, 该工艺耗水量显著减少, 同时保留了劳动力成本低、工艺稳定的优点。但是水泡粪在贮存过程易导致微生物厌氧发酵产生大量有害气体, 影响畜禽养殖舍卫生条件, 危害畜禽健康, 且水泡粪工艺中养殖废水营养元素残留率更高, 以致后续资源化处理更加困难。

干清粪工艺是目前畜禽规模养殖场主要清粪方式, 占养殖舍总数的89.4%^[11], 是将固体废弃物通过机械或人工直接收集, 液体废弃物从排水口直接排出, 再分别进行资源化处理的清粪工艺。干清粪工艺根据清粪收集单位不同可以分为人工清粪和机械清粪。人工清粪可很好实现固液分离, 但所需劳动力成本较高; 机械清粪劳动力成本较低, 但是初始投入及维护费用较高, 国内清粪工艺相关人工智能尚不成熟, 存在固液无法完全分离、固体废弃物黏连等问题。干清粪工艺可很好避免后续资源化处理困难、产生有害物质的问题, 采用干清粪工艺可将氮素损失降低57.6%^[12], 提高了畜禽粪污中营养元素循环利用率, 提高畜禽粪污

肥料化价值。

根据目前中国畜禽养殖业发展水平,我国清粪工艺应该从传统水冲粪、水泡粪工艺逐渐转型为干清粪工艺^[13],从人工收集逐渐转变为机械收集,同时需增强清粪工艺人工智能化研发,减少劳动力成本,提高清粪效力,实现畜禽养殖业专业化、智能化。

1.2.2 饲料化利用

畜禽粪污中含有丰富营养元素,在经过处理后可作为饲料进行畜禽养殖,可解决“人畜争粮”的问题,饲料化产品现主要用于鱼类及反刍动物。张淑芬等人^[14,15]测定鸡、猪、牛干粪中粗蛋白和粗脂肪含量分别为27.75%、16.99%、12.21%和2.35%、8.24%、0.87%。畜禽粪污中粗蛋白含量远高于普通畜禽饲料,且营养成分丰富^[16],处理后的粪污作为饲料可满足动物对于蛋白质、脂质等营养成分的需求^[17]。畜禽粪污饲料化利用推广度较低,主要是因为畜禽粪污中病菌寄生虫、重金属和抗生素等存在有残留的问题暂未解决,有一定安全隐患,容易造成二次环境污染和畜禽疫病传播,利用粪便作为饲料在主观上也尚未完全被大众接受。如果能解决这些难题,畜禽粪污饲料化利用有着广阔的发展前景。畜禽粪污饲料化利用可以归结为生物发酵、生物分解、物理干燥和化学处理四种方法。

生物发酵使用最多的有好氧发酵、青贮发酵、Effective Microorganisms发酵(EM发酵)三种。好氧发酵是利用畜禽粪污中的好氧微生物,在适宜条件下,提供充足的氧气,使粪便发酵、可增加氨基酸含量和酸度,通过搅拌散出粪便臭气后,干燥粉碎成粉状饲料。该方法会产生硫化氢等有害气体,对环境造成一定影响,但发酵饲料中有效氨基酸含量较高,适口性较好,好氧发酵饲料适用于反刍动物喂养。青贮发酵是一种特殊的厌氧发酵,粪便干燥和去除杂物后,将粪便与禾本科青饲料、麸糠按一定比例在容器中压实,加入少量食盐和水后用塑料膜进行封闭,使其厌氧发酵,一段时间后可直接作为饲料饲喂家畜。青贮发酵饲料可充分提高家畜蛋白消化率和代谢能,改善饲料适口性,主要用于反刍动物喂养^[18]。EM菌可以减少粪便中毒素和臭气,抑制粪便中病菌繁殖,提高粪便营养成分含量^[19],EM发酵是将EM菌液与粪便厌氧发酵成为无害饲料,并具有醇香味。

生物分解指在畜禽养殖同时养殖蝇蛆和蚯蚓等动物养殖中对畜禽粪便有较强降解能力的动物,用发酵处理的粪污饲喂,使发酵粪污在其体内分解转化为自身优质蛋白。将养殖的蝇蛆和蚯蚓粉碎作为饲料,或直接作为饲料饲喂畜禽。成钢等人^[20]比较太平3号蚯蚓在不同粪便配比饲喂后发现:猪粪:羊粪=3:2,鸡粪:羊粪=1:4时,蚯蚓生长性能最佳。蝇蛆和蚯蚓养殖除了提供畜禽养殖业优质蛋白质饲料外,蝇蛆和蚯蚓粪污又可进行肥料化,多层次构建种养循环一体化农业结构。

物理干燥指利用日光将粪便干燥后去除杂质,与一定比例麸糠混合即可作为饲料用于饲喂畜禽,该方法操作最简单且对粪便营养价值损耗率低。但需要时间长、无法清除粪便中有害物质和病菌寄生虫,在夏季气温过高时,易产生有害物质。对于物理干燥时间太长的缺点,可以通过利用烘干机等机械设备进行改善。

化学处理法成本较高,使用范围较小,主要利用丙酸、醋酸、尿素、磷酸和甲醇等化学物质相互作用对粪便进行处理后干燥作为饲料,有时可以达到较好的养殖效果。

1.2.3 能源化利用

畜禽粪污进行能源化利用是目前最主要的粪污资源化利用手段,可有效地将粪污中大量营养元素进行循环利用,减少种养循环系统能量损失^[21]。目前主要的能源化方法有燃烧法、沼气法和发电法,其中沼气工程近年发展迅速,技术较为成熟且在国内应用范围较广。

燃烧法指将粪污进行固液分离后干燥,与煤进行混合,作为小规模工用、民用燃料^[22]。该方法方便,但粪污能量利用率较低,容易造成环境二次污染,增加大气一氧化碳和二氧化碳浓度,不符合中国“双碳”目标,近年全球都在减量使用。

沼气法指利用厌氧微生物对粪污进行发酵,产生甲烷等可燃性气体物质及可再生资源,农业统称为沼气。残余沼渣及沼液中富含大量微量元素可提供种植业所需微量元素需求,代替化肥使用,促进植物生长^[23]。有研究表明,施用沼液可提升表层土壤有机质^[24],当畜禽粪污完全还田,氮替代化肥潜力为9.8%,磷为46.6%,钾为117.8%^[25]。发酵产生沼气可以用于工

厂及周边农户供暖,也可以用于工厂发电,是一种可再生绿色资源。在沼气发酵过程中,微生物作用下,能有效杀死粪污中病原微生物和寄生虫,避免了畜禽疫病的传播^[26]。沼气发酵还可以改善畜禽养殖舍卫生条件,将粪污中营养元素高效利用,显著提高工厂农户经济效益,更符合当前绿色循环农业概念。但沼气工程初始投入及维护费用较高,受温度影响较大,所以提高厌氧发酵沼气产量与沼气产率、实现低温发酵是该领域一直以来的研究热点。根据发酵物固体含量不同,沼气法分为湿法发酵和干法发酵。总固体比在20%以下为湿式发酵,总固体比在20%~40%为干式发酵。湿式发酵的优点是底物能源转化率高、产气稳定和自动化程度高,突出缺点则是沼液量大,后续排放处理要求高^[27]。干式发酵过程耗能低,运行及人力成本低,不存在二次污染问题。但是干式发酵过程固体量高,搅拌困难,造成微生物分布不均匀,影响微生物传质传热,极易出现局部酸积累的现象,甚至使发酵失败^[28]。

发电法指通过生物质发电理论,将畜禽粪便中的生物能通过微生物燃料电池转化为化学能再进一步转化电能,发电法转化率较高、操作简单,但初始投入及维护费用较高且电能输出功率较低。

1.2.4 基料化利用

经过干燥、去杂、除臭等处理后,粪污可与秸秆和其他农业废弃物一起作为可食用真菌或腐生生物基料。可食用真菌味道鲜美,具丰富营养,如木耳有素食之王的美称,香菇含多种有效氨基酸可提高人体免疫,具有极高营养价值^[29]。中国多地均有食用真菌种植,如蘑菇、木耳等,粪污垫料发展市场较大。粪污中含有丰富营养元素,部分高营养野生真菌可在野生动物的粪污中生长,农用粪污相比野生粪污更为安全,营养含量更丰富,将养殖业粪污作为真菌养殖基料进行循环利用符合当下绿色发展理念。食用真菌也适合在植物残渣和畜禽粪污中生长,其不仅可以为粪污转化为经济效益,还可以建立高度循环种养结合的功能农业体系。其作为主要环节,既可以循环种植业养殖业废弃物,净化环境,还可以促进种养一体化循环农业作为产业链,可持续性较强。种植业产生废弃物、畜禽养殖业粪污可作为食用真菌基料,产生的可食用真菌废弃物又可以与畜禽粪便混合,在沼气系统中进行发酵,同时进行肥料化利用^[30]。Fréchette等人^[31]对比可

回收粪污固体垫料(RMS)和正常砂垫层细菌生长情况,结果表明RMS垫料环境不具备支持大肠杆菌的生长能力,具有一定抑菌作用。Annie等人^[32]研究发现,与使用稻草床的奶牛相比,使用RMS垫料床的奶牛身体洁净度更高。

1.2.5 肥料化利用

畜禽粪污中有机元素主要是氮元素,占比51.43%;其次是钾,占比24.49%;磷最低,占比19.07%^[33]。如何将粪污中丰富的有机元素进行回收是当前粪污资源化的重点问题。堆肥技术是目前应用最多、最广泛的畜禽粪污资源化处理方法,能在较短的时间内干燥粪便,将粪污中有机元素转化为植物体可吸收化合物^[34],保留畜禽粪污营养,满足植物生长需要微量元素和营养物质。目前主要发酵方法是好氧堆肥技术,应用较广的主要有条垛式堆肥、静态堆垛堆肥、槽式堆肥、发酵罐堆肥四种堆肥工艺^[35]。条垛式堆肥是通过人工或机械周期性翻倒粪污堆提供微生物充足氧气进行发酵堆肥,但堆肥过程易出现臭气和有害气体泄漏问题,对环境进行二次污染也会影响农户身体健康;静态堆垛堆肥过程不需要翻倒粪污堆,通过风机提供微生物氧气,所以该技术的关键是其供氧系统的构建;槽式堆肥是将畜禽粪污放入非密闭结构中进行好氧发酵,进行长时间、连续、定量堆肥的过程。可配备粪污翻倒、供氧装置,便于后续实现养殖舍规模化和自动化,但初始投入及维护费用较高;发酵罐堆肥是在密闭容器中进行发酵,控制温度、氧气浓度等因素,以实现好氧堆肥,机械化和自动化程度高,受环境因素影响较小^[36]。目前应用较广的主要是槽式堆肥工艺,国家正在研究新型多层槽式堆肥技术减少其土地占用率^[37],但发酵罐堆肥工艺仍是工业化、规模化农业最理想堆肥方式,因为其初始投入及维护费用较高,而中国小农户较多,难以推广。

1.3 畜禽粪污资源化国内外最新进展

1.3.1 畜禽粪污资源化国内研究进展

畜禽粪污污染是中国农业源第一大污染,为了解决这一污染问题,近年来中国发布了系列畜禽粪污资源化相关政策,主要针对畜禽粪污污染进行源头减量、过程循环、末端控制^[38]。畜禽养殖场(户)作为减少畜禽粪污污染政策的主要对象,政策的展开短期内

无疑会增加养殖户的经营成本. 但面对当前养殖业规模化程度高、粪污排放量大的现状, 自然发酵已远不能解决问题, 构建畜禽粪污资源化处理系统已是迫在眉睫. 长期看, 畜禽粪污资源化可增强农业生态系统可持续性同时农户也可获得较高经济收益, 达成双赢^[39]. 针对畜禽粪污资源化问题, 国内学者主要就其新型处理方法、存在问题等开展了系列研究. 杨明军等将粪污处理分为9种主要模式, 提出国家应大力宣传畜禽粪污资源化理念, 增强养殖户对畜禽粪污资源化的意识^[40]. 成爱华等人^[41]通过单因素实验发现, 粪污肥料化可提供大量有机肥料, 显著增加西红柿产量, 提高养殖户经济效益. 朱燕燕等人^[42]统计公司实行沼气工程相关资源化利用收益, 年产出12万吨可再生沼气资源, 实现粪污零排放. He等人^[43]研究了一种新的生物炭吸附材料(C@Mg-P), C@Mg-P在具有高氮消除效率情况下, 对猪舍沼液有良好的脱色效果, 同时成本较低, 为畜禽资源化沼气发酵推进提供了一大助力. 冯秋莲等人^[44]提出畜禽粪污资源化过程受环境的影响较大, 利用过程中存在技术不成熟、政策支持较少、市场难以打开等问题, 需要因地制宜制定解决方法. 于家高等人^[45]提出政府应引导养殖户的绿色生态观念, 传授粪污资源化利用技术, 为农户提供粪污资源化设施购买途径及提供社会化服务体系. 李艳军等人^[46]提出政府及养殖户应发挥协同作用, 将畜禽粪污污染治理问题落实, 发展新型畜禽粪污资源化技术, 助力中国养殖业的绿色、高速、稳定发展.

总体看, 中国畜禽粪污排放体量巨大, 畜禽粪污资源化处理方法不完善, 实行全国范围畜禽粪污资源化存在巨大的挑战, 因此畜禽粪污资源化处理方法进行创新和优化升级将是未来中国循环农业发展的热点. 同时, 国家需要继续推进相关政策支持, 大力宣传种养循环一体化农业概念, 增加农户生态价值认知, 促进农户畜禽养殖粪污资源化行为^[47].

1.3.2 畜禽粪污资源化国外研究进展

随着种养循环系统的推广, 氮和磷的流动对可持续发展至关重要, 但很少受到关注^[48]. Rufino等人^[49]对种养循环系统进行评估发现, 畜禽粪污处理子系统氮循环效率(NCE)范围为6%~99%. 种养循环系统中畜禽粪污处理对系统氮循环影响较大, 其资源化利用也是近年热点, 各国针对畜禽粪污资源化进行了大

量研究. 在美国, Akyürek等人^[50]使用热重分析仪(TGA), 研究了循环羊粪塑料共热解行为, 结果表明共热解是生产绿色能源的可行技术. Reddy等人^[51]研究发现, 粪污资源化可以显著提高土壤生物活性和养分循环, 提高了利润, 并加强了农业系统的可持续性. 在日本, Tung等人^[52]确定粪污堆肥施用量有利于增加水稻产量、土壤钾肥力和部分钾平衡, 在种养循环系统中用粪污堆肥产出有机肥代替化肥, 对实现农业系统可持续性具有至关重要的作用^[53]. 在印度, 学者提出Kunapajala技术, 一种动物粪便的原位分解技术, 将畜禽粪污回收转化成必需的植物营养元素. Mukherjee等人^[54]将Kunapajala视为最有前途的低成本微生物技术, 可以发挥动物粪便回收和植物养分回收的双重功能, 以促进农业生态系统的可持续及集约化. 在埃塞俄比亚, Tadesse等人^[55]对粪便资源化进行研究, 提出两种粪肥分配策略: 平衡施磷和平衡施氮, 能够显著减少化肥使用, 增加土壤肥力, 减少畜禽粪污污染. 非洲地区, 受半干旱气候影响和小农经济的制约, 粪肥在可预见的未来仍将是土壤肥力管理战略的重要组成部分^[56]. 针对农户现状, 制定合适粪污资源化管理战略被认为是农业发展的最佳途径. 非洲政府采取适当的干预措施, 用于改善有机肥管理, 以确保农户辛苦准备和运输的物质尽可能达到最佳品质. 欧洲地区, Huttunen等人^[57]通过养分负荷建模, 发现磷负荷对粪污循环策略和气候变化速度最为敏感. Lipiec等人^[58]提出, 应用循环粪污可提高土壤保水能力和降低酸度来封存土壤有机质和提高作物生产力.

据统计, 在畜禽粪污资源化方面, 美国是最有影响力和最具积极贡献的国家, 而中国是与国际联系最紧密的国家, 其研究主要集中在环境科学研究领域展开^[59], 但目前研究重点需针对畜禽粪污中回收磷的技术开发, 以及通过生命周期评估和物质流动分析来合理评估回收过程的经济效益和环境影响^[60].

2 种养循环

2.1 种养循环定义

种养循环一体化, 是指将种植业与养殖业进行有机结合, 能量资源和营养元素内部循环, 具有高效益^[61]、可持续^[62]、生态环保^[63]等特性的新型循环农业模式. 作为一种新型农业发展模式, 种养循环一体化

将畜禽养殖过程中的粪污以及农作物耕种中的废弃物充分利用, 提高农业资源利用率. 对于种植业, 有机肥料可以减少农药化肥的使用, 减少土壤氮、磷等矿物质损失提高土壤肥力^[64,65]; 对于养殖业, 可以增加畜禽饲料来源, 减少畜禽粪污堆积污染环境, 粪污也可用于提供可再生沼气能源; 对于农民, 可以产生多元化收入和多样化的食物, 以维持其生计.

2.2 种养循环的评价方法

自种养循环农业概念提出, 对农户和科学家最大的挑战就是难以评估种养循环农业所能提供的价值. 国内外研究者为此提出多种种养循环农业评价方法, 可将其分为3类即整体宏观评价、模块化评价和量化评价. 整体宏观评价是对整个种养循环一体化系统进行整体分析, 如数据包分析法(DEA)、随机前沿分析(SFA)等; 模块化评价是对种养循环一体化各子系统进行分析再综合分析, 如能值分析法(EME)、层次分析方法(AHP)等; 量化评价是利用客观数据定量环境对种养循环一体化系统影响, 如生命周期评价法(LCA)、综合指数评价方法等.

2.2.1 系统宏观评价

系统宏观评价中现在应用最广的是数据包络分析法(DEA). DEA在1957年由Farrell^[66]提出, 指将种养循环系统生产效率分为技术效率和规模效率, 通过对比评估样本间的相对效率来判断优劣, 主要是利用数学规划来评价收集到的有效数据, 研究其有效性^[67]. 在任何关于组织效率的研究中, 有必要对被评估的“过程”有一个清晰的认识^[68]. 在研究某一系统时, 可以把某类的样本横向或纵向的生产作为研究对象, 通过这类研究对象具有相同的输入和输出指标, 通过计算得出技术效率、规模效率、综合效率的数值以及规模收益增减, 从而得到样本的数据包络效果. 比如在种养循环系统中, 输入指标包括种子、化肥、机械动力、人工等, 产出包括粮食产量、有机肥料、沼气等. 计算得出的效率可以用来衡量这些样本的投入产出相对效率, 从而得出那些样本之间的相对优劣并可查找处于相对劣势样本效率较低处^[69]. 系统宏观评价中最经典的是随机前沿分析(SFA), SFA在1995年由Battese和Coelli^[70]共同提出, 指将需要研究的因素放到整个种养循环系统的生产函数中进行观察, 比较观察到的生

产值与理论系统最大生产值进行比较来评价研究对象的影响.

2.2.2 模块化评价

模块化评价现在应用最广的是能值分析法(EME), EME指将系统中所有能量流动跟太阳能进行换算, 再转化为能值, 标准化数据后再进行比较, 评价种养循环系统中各子系统影响. EME通过分析对比系统中各子系统能值, 从而定性定量分析各子系统的结构特征与经济效益. 再制定对应的能值指标, 与种养循环系统各子系统的能值进行比较, 来评价其影响大小, 为后续对种养循环系统的改进提供科学依据, 以便优化种养循环系统, 提高种养循环经济及环境效益. 模块化评价最经典的是层次分析法(AHP), AHP在1964年由Saaty^[71]提出, 指将种养循环系统视为相互影响, 相互关联的许多模块, 利用经验判断各模块相对重要程度, 给出相应方案和影响占权, 根据影响占权对各方方案进行分层.

2.2.3 量化评价

量化评价现在应用最广的是生命周期评价法(LCA). 国际标准化组织(ISO)将LCA定义为“对一个产品系列的生命周期中输入、输出及其潜在环境影响的汇编和评价”, 并将其分为四步, 即(1) 目标定义和范围界定, (2) 清单分析, (3) 影响评价, (4) 结果解释^[72]. 对生命周期评价法的理论与方法研究将是21世纪生物学的前沿重点领域, 也是实现全球可持续发展的具体行动指南^[73].

2.3 种养循环国内外最新进展

2.3.1 种养循环国内研究进展

2015年起, 中国陆续出台推进种养循环一体化相关政策, 提出要按照“以种带养, 以养促种”的种养结合循环发展理念^[74]. 以源头减排、过程循环、末端利用为主线, 构建规模化、智能化相结合的种养循环一体化发展模式, 促进农业可持续发展, 实现功能农业现代化建设, 在许多地方已经颇见成效^[75]. 一是在种养循环一体化优势方面, 陈晓炜等人^[76]利用生命周期评价法对“鲜食玉米-奶牛-粪便还田”种养循环模式进行评价, 得出种养循环模式相比分离模式全生命周期碳足迹降低了34.44%, 可更好地减少温室效应和增加

土壤固碳^[77]。段培姿等人^[78]对张家桥村“秸秆青贮—养牛—牛粪肥田—种植冬桃”的种养循环一体化模式进行分析, 结果表明该模式不但可以增加土壤肥力, 减少环境土地退化, 而且可使产品多元化, 产品营养成分更高, 市场竞争力更强。孙远等人^[79]对荆州合作社“生态种植+生态养殖”的生态种养循环模式进行分析, 结果表明其可以改善周边土壤及大气环境, 提高农副产品的产量和质量, 推动了功能农业以及乡村振兴战略的实施。刘红南等人^[12]提出推进种养结合模式是控制养殖氮减排的关键。王宇等人^[80]研究发现, 养殖业粪污循环产品可明显提高鸡腿菇和草菇的成熟速度。二是在种养循环评估方法方面, 种养循环模式是循环农业发展的热点, 而国内目前缺少合理的种养循环评估体系, 微观尺度的评价方面研究较少。种养循环评估体系可以对农产品环境影响进行定量, 才能进行后续的实验分析, 是循环农业发展的理论基础。中国科学家期望将生命周期评估方法运用于农业, 来构建种养循环评估体系。生命周期评估方法原是工业评价产物, 对工业产品环境影响进行定量化评估。但近年来农业领域也面临着大量的资源浪费和环境污染压力, 因此生命周期评估方法在农业领域的应用逐渐受到广泛关注。但国内农业生命周期评价方法尚不成熟, 存在系统边界和功能单位界定不明晰、缺少数据库、模型不准确、解释有误等方面的问题^[81]。

2.3.2 种养循环国外研究进展

大量调查研究表明, 世界各国对种养循环一体化模式均采取积极推进的态度, 但由于种养循环农业需要占用大量耕种土地及初始投入较高, 一些半干旱地区即使对转变为新型的农业模式存在积极态度, 却难以展开且效果并不如意^[82]。

21世纪初, 美国农业体系正处于变革的十字路口, Heller和Keoleian^[83]提出增加种植业和养殖业之间的联系是提高农业可持续性的有效办法。Hilimire^[84]首次提出种养循环农业概念, 强调小规模、多样化和生态友好的种养体系生产, 可提高生产效率, 减少化肥和农药的使用, 改善土地利用, 防止土壤侵蚀, 以及促进农业多样性和生态系统健康。Lovell^[85]提出开展种养循环农业的可持续发展方案, 认为种养循环农业可有效改善粮食生产、运输及能源循环和粪污管理等方面。Russelle等人^[86]研究发现, 种养循环一体化农业

可提高自然资源的利用效率, 减少农业对环境的负面影响, 同时还能提高环境和社会效益。面对澳大利亚气候突变, Bell和Morre^[87]发现种养循环一体化农业模式对气候和价格波动的抵御能力将更具吸引力。但澳大利亚政策对养殖业甲烷排放有严格限制, 一些种养循环农业模式会增加养殖业甲烷排放, 这可能会抑制澳大利亚种养循环农业发展。瑞典科学家Cederberg等人^[88]研究发现, 欧洲的种养循环农业相比传统农业, 可减少土壤酸化、氮损失、农药使用和系统能量需求, 但增高甲烷排放量。总体上看, 种养循环农业具有明显的环境效益。Gillis等人^[89]在弗拉布尔进行种养循环农业模拟, 畜禽粪污直接进行还田, 有效增加了土壤肥力。在非洲等半干旱地区, Rufino等人^[49]认为在资源匮乏的农业系统中, 农业生产可持续性取决于养分保存和循环利用的效率, 将种植业废弃物直接施入土壤, 可更有效地循环氮, 相比直接将种植业废弃物饲喂给畜禽, 氮损失更少。Gachimbi等人^[90]表明正确的肥料使用对于提高作物产量和农民收入至关重要。Martin等人^[91]表明种养循环一体化模式与农村研讨会制度的推广应协同进行, 发挥农户主观能动性, 让农户进行参与式学习和行动, 对农田肥料使用与畜禽粪污资源化管理规范化。在喀麦隆地区, 小规模粮食生产系统中主要粮食作物的每公顷产量普遍较低, 但个体农户之间的产量差异很大, 适当提高农业基础技术相关投资可有效提高粮食作物产量^[92]。在西非地区, 大多数农场面临养分供给不足的问题, 特别是缺乏氮和磷。这种养分缺乏导致生产力下降, 可通过构建西非地区的种养循环一体化农业系统, 发挥种养体系之间的协同作用^[93], 从而改善农业系统的养分循环和环境供给^[94]。Iiyamamiyuki^[95]研究发现, 在肯尼亚同时进行牛的饲养和水果种植的家庭收入更高, 且饲养牛的家庭农田化肥施用更少。埃塞俄比亚土壤流失严重, 废弃物对种养循环一体化系统来说循环营养价值低, 而种养循环成本较高, 农户热情普遍偏低, 难以推进^[56]。

目前, 欧美国家的种养循环模式及评估体系较中国相对成熟, 研究可发现种养循环一体化模式相较于传统农业模式, 有更好的经济、环境等多重效益。但是对于半干旱地区, 资源匮乏、土壤流失等问题暂不能做到完美解决, 同时关于农民如何从战略上集体克服种养循环起始过程挑战的研究很少^[96]。

3 畜禽粪污资源化处理与种养循环一体化典型案例

3.1 种养循环一体化模式

种养循环一体化农业模式的构建应符合所在地域种养产业特点、气候及经济状况, 将种植业和养殖业结合在一起调整并优化升级其内部构造及产业结构, 使产业链闭环。通过畜禽粪污资源化处理将生产中所有物质尽可能循环利用, 实现种养循环系统物质和能量资源化利用的多层次、多级化, 达到经济效益最大化、成本最低化、可再生资源高产出、病原微生物和有害物质可控化的产业目标^[97,98]。种养循环农业系统中最主要的是以下四个环节: 畜禽、粪肥处理、粪肥储存及土壤和作物转化, 畜禽粪污资源化利用是其中关键节点, 种养循环一体化农业模式就是将多个环节进行有机结合, 在实现高利润和可持续的同时最大限度地减少集约化农业的负面影响并保护环境^[99]。

当前国内种养循环一体化农业模式根据是否跨区域循环, 归结成单位一体化循环系统以及区域一体化循环系统两类。单位一体化循环系统发展较成熟, 指将单个农舍作为一个单位, 一个种养循环系统, 在单位内进行协同作用, 构建种养结合体系, 农舍内直接进行种植业养殖业能量循环。常见的有生猪养殖业与种植业结合形成的“猪-沼/肥-种植系统”循环模式、稻田种养结合生态循环农业模式^[98]、果园种养结合生态循环农业模式。“猪-沼-水果(茶、草)种植”生态循环农业模式指以沼气工程为重点, 农户进行生猪养殖, 将生猪粪污富集、运输, 进行畜禽粪污资源化处理, 开展沼气工程。沼气可作为供暖供电可再生资源, 沼渣沼液可进行还田, 促进农作物生长。农作物收割后将种植业废弃物再进行循环堆肥利用, 发酵产生有机化肥还田可有效增加土壤肥力; 稻田种养结合生态循环农业模式主要在南方推广, 主要以稻鱼共作形式进行, 将鱼和水稻放在同一环境下, 水产养殖产生粪污资源化利用, 将水稻收割后秸秆进行还田。区域一体化循环系统是指多个单位进行合作, 像流水线一样, 每个单位负责一部分工作, 区域整体作为一个种养循环系统, 单位与单位间进行协同作用, 构建种养循环体系。在区域一体化循环系统中, 单位间协同作用的好处尚未明确确定。常见的有“企业+农户+基地”模式、“合作社+基地+农户”模式^[100]。主要由农户、合作社提供

种养废弃物, 在企业、基地进行资源化处理后再用于农户、合作社。

3.2 畜禽粪污资源化处理与种养循环一体化案例分析

3.2.1 长江以南地区

中国长江以南地区主要是亚热带季风气候, 夏季高温多雨, 冬季低温少雨, 最低月平均气温一般高于 0°C ^[101]。气候湿润, 适宜各类农作物种植, 物产丰富, 种植面积大。并且南方主要以生猪养殖和水稻种植为主, 种养体量较大, 资源化处理方式多样, 转型种养循环一体化农业阻碍最小。因此, 南方地区可因地制宜先行构建生猪养殖和稻田养殖相关循环农业, 将生猪粪污进行沼气发酵好氧堆肥, 能源化肥料化, 沼气作物可循环绿色资源, 产生肥料沼液沼渣用于农作物, 农业废弃物也可以用作生猪养殖饲料或进行还田。南方稻田养殖相关循环农业是将水稻与水产养殖进行结合, 在水稻种植水层进行水产养殖。稻田种养结合生态循环农业模式很好地解决了水稻经济效益较低的问题, 可提高农户种植积极性。以水稻种植为主, 辅助养殖水产动物(鱼类、虾蟹), 不仅能增加经济收入来源, 还能提高水稻产量^[102]。长江中下游地区和珠三角地区是中国有名的“鱼米之乡”, 对于种养循环一体化系统各个环节有较好基础。政府积极推进种养体系信息化, 建立种养循环一体化绿色农业追溯平台, 持续推进绿色循环农业发展进程, 提高畜禽粪污利用率, 开展多元化营利模式, 稳固种养循环一体化农业胜利果实^[103]。调查显示, 长江以南地区绿色种养循环农业试点畜禽粪污资源化利用率均达到90%以上, 多地开展绿色种养循环农业试点, 种养循环农业一体化农业模式构建已经初见成效, 例如, 衡阳县农作物平均增产4.43%^[104]。

3.2.2 长江以北地区

中国长江以北地区主要是温带季风气候, 夏季高温多雨, 冬季寒冷干燥, 最低月平均气温一般低于 0°C , 气候更适合进行耐冻作物和果树种植。长江以北地区主要种植玉米、梨等耐寒作物, 主要养殖鸡、鸭、鹅等家禽。北方地区土壤肥沃, 耕地资源稀缺, 进行种养循环一体化农业建设可以有效减少土壤流失、有效利用耕地面积、提高产物质量及产量, 增加农户经济来

源^[105]. 北方畜禽粪污资源化和种养循环一体化发展处在初始阶段, 理论方面研究较少^[106], 但近年多项政策落地, 实践方面北方畜禽粪污资源化和种养循环一体化逐渐形成体系, 例如, 山东省已有60.3%农户选择种养结合模式^[107], 辛集市畜禽粪污综合利用率高达93.1%^[108]. 研究表明, 北方开展果园种养结合生态循环农业模式可有效改善土壤肥力, 增加土壤酶活性、有机质含量, 提高果实品质, 且有良好经济效益^[109]. 因此, 北方应该合理发展果园种养结合生态循环农业模式, 在果园养殖鸡、鹅等禽类, 可以一定程度上解决果园杂草问题和虫害问题^[110], 同时果园放养的鸡、鹅可以作为绿色食品进行出售, 增加农户经济来源, 鸡、鹅粪污直接还田, 可以提高果实产量和质量.

3.2.3 高原地区

中国高原地区主要是高原山地气候, 全年温度较低, 日温差较大^[111], 气候更适合进行反刍动物养殖以及大棚作物. 高原地区主要种植青稞等耐寒植物以及葡萄、哈密瓜、桑葚等水果, 主要进行牛羊的放牧. 由于个体养殖较分散, 气候不适宜许多农作物生长, 国内对于高原地区畜禽粪污资源化处理 and 种养循环一体化研究较为落后, 只在浅层进行种植业和养殖业结合, 聚焦在棚圈内进行种养结合, 而更深入研究较少. “棚圈种养”生态循环农业模式以棚圈养殖为基础, 将种植业、养殖业、粪污资源化处理在棚圈中统一^[112], 稳定性强, 受气候影响较小, 同时能增加农户收益、提高畜禽存活率. 高原地区“牛(羊)-沼-牧草种植”生态循环农业模式, 则是进行牛羊粪污回收, 进行肥料化能源

化处理, 既可以作为牧草肥料, 沼气又可以为农舍供暖提供能源. 牧草施加有机肥生长更加旺盛, 可以保证畜禽饲料充足, 提高存活率^[113].

4 总结与展望

循环农业的终极目标是减少种养体系废弃物、增加资源利用率同时保护环境^[114]. 近年来, 大量研究表明, 畜禽粪污资源化处理和种养循环一体化农业体系的构建可有效提高耕地品质, 解决畜禽粪污污染和种养脱节的问题, 从而提高农业经济和农业系统的可持续性. 但目前, 畜禽粪污资源化处理技术及种养循环评估方法都存在许多问题亟待解决, 例如粪污基料化饲料化染菌, 粪污堆肥过程产生气污染, 农业生命周期评价方法模型误差大等. 国家在推广畜禽粪污资源化及种养循环一体化过程中也存在许多阻力, 例如, 种养循环模式成本高回报慢, 缺少畜禽粪污资源化利用体系且监管难度大, 农户不具备低碳认知等. 这些阻力严重阻碍了中国畜禽粪污资源化及种养循环一体化的发展, 但畜禽粪污资源化以及种养循环一体化的研究仍具广阔前景与价值, 畜禽粪污资源化和种养循环一体化对于国家加速农业碳达峰碳中和进程有极大潜力^[115]. 在碳中和背景下, 我们应做好养殖行业全过程监控, 研究清洁堆肥技术^[116]、粪污无菌饲料化技术、适合中国的农业评价方法等. 国家应大力推进循环农业核心技术攻关, 加强对循环农业扶持, 构建循环农业社会服务体系, 发展智慧农业及自动化技术, 打通农业发展堵点^[117].

参考文献

- Li L G. Discussion on livestock and poultry manure treatment and resource utilization (in Chinese). *Livestock and Poultry Industry*, 2021, 32: 26–27 [李莲贵. 畜禽粪污处理和资源化利用问题探讨. *畜禽业*, 2021, 32: 26–27]
- Niu T J, Wang Z, Hu J H. Progress of research on resource utilization of livestock and poultry wastewater (in Chinese). *J Anim Husband Vet Med*, 2021, 40: 19–22+25 [牛统娟, 王智, 胡建宏. 畜禽粪污资源化利用方式研究进展. *畜牧兽医杂志*, 2021, 40: 19–22+25]
- Yao S, Wang G Y. Estimation of farmland loading of livestock and poultry manure and early warning analysis based on zoning perspective (in Chinese). *J Huazhong Agricult Univ (Soc Sci Ed)*, 2016, (1): 72–84+130 [姚升, 王光宇. 基于分区视角的畜禽养殖粪便农田负荷量估算及预警分析. *华中农业大学学报(社会科学版)*, 2016, (1): 72–84+130]
- Second National Pollution Source Census Bulletin released (in Chinese). *Green Packaging*, 2020. 21–22 [第二次全国污染源普查公报发布. *绿色包装*, 2020. 21–22]
- Xuan M, Xu Z C, Wu G Y, et al. Analysis of resource utilization of manure from large-scale livestock and poultry farming in China (in Chinese). *J Agricult Resour Environ*, 2018, 35: 126–132 [宣梦, 许振成, 吴根义, 等. 中国规模化畜禽养殖粪污资源化利用分析. *农业资源与环境学报*,

- 2018, 35: 126–132]
- 6 Dong G, Huang J, Sheng Q K, et al. Application and prospect of the key technology of seed combination in the development of agricultural circular economy (in Chinese). *Modern Agricult Sci Technol*, 2024, (1): 209–212 [董刚, 黄洁, 盛清凯, 等. 种养结合关键技术在农业循环经济中的应用与展望. *现代农业科技*, 2024, (1): 209–212]
 - 7 Wang C B, Zhu C G, Yan K, et al. Current situation and thoughts on resource utilization of livestock and poultry waste (in Chinese). *China Livestock Poultry Breed Indust*, 2021, 17: 3–5 [王存波, 朱慈根, 严康, 等. 畜禽粪污资源化利用现状与思考. *中国畜禽种业*, 2021, 17: 3–5]
 - 8 Zhang B, Liu C. Current situation of livestock and poultry waste treatment and resource utilization in large-scale farms (in Chinese). *Livestock Vet Sci Technol Inform*, 2023, (7): 49–51 [张博, 刘辰. 规模场畜禽粪污处理和资源化利用现状. *畜牧兽医科技信息*, 2023, (7): 49–51]
 - 9 Alves B J R, Madari B E, Boddey R M. Integrated crop–livestock–forestry systems: Prospects for a sustainable agricultural intensification. *Nutr Cycl Agroecosyst*, 2017, 108: 1–4
 - 10 Zhao Y H, Zhang S Y, Tang X F, et al. Effects of different manure cleaning methods on air quality in farrowing pig barns (in Chinese). *Heilongjiang Animal Husband Vet Med*, 2019, (20): 54–56 [赵云焕, 张世阳, 唐雪峰, 等. 不同清粪方式对分娩猪舍空气质量的影响. *黑龙江畜牧兽医*, 2019, (20): 54–56]
 - 11 Zhou H B, Ding J T, Meng H B, et al. Research and development analysis on the application of livestock and poultry wastewater resource utilization technology in China (in Chinese). *J Agricult Engineering*, 2022, 38: 237–246 [周海滨, 丁京涛, 孟海波, 等. 中国畜禽粪污资源化利用技术应用调研与发展分析. *农业工程学报*, 2022, 38: 237–246]
 - 12 Liu H N, Yin Y L. Promoting the management of ammonia abatement in aquaculture by combining the model of planting and raising (in Chinese). *Proc Chin Acad Sci*, 2021, 36: 93–96 [刘红南, 印遇龙. 以种养结合模式推进养殖氨减排的治理. *中国科学院院刊*, 2021, 36: 93–96]
 - 13 Meng H. Measures for livestock and poultry manure treatment and resource utilization in large-scale farms (in Chinese). *Animal Husband Vet Sci*, 2021, (14): 174–175 [孟花. 规模养殖场畜禽粪污处理和资源化利用措施. *畜牧兽医科学*, 2021, (14): 174–175]
 - 14 Zhang S F. Livestock and poultry manure feed production and utilization technology (in Chinese). *Feed Res*, 2016, (17): 48–50 [张淑芬. 畜禽粪便饲料化生产利用技术. *饲料研究*, 2016, (17): 48–50]
 - 15 Methods of converting chicken manure into feed (in Chinese). *Feed Res*, 1991, (06): 29 [鸡粪变饲料的方法. *饲料研究*, 1991, (06): 29]
 - 16 Li R T, Song G H, Li J, et al. The current situation and problems of livestock and poultry manure resource utilization (in Chinese). *J Livestock Ecol*, 2022, 43: 83–87 [李瑞婷, 宋国华, 李静, 等. 畜禽粪污资源化利用的现状与问题探讨. *家畜生态学报*, 2022, 43: 83–87]
 - 17 Lan H F. Livestock and poultry manure treatment and resource utilization in large-scale farms (in Chinese). *Farmers' Counselor*, 2022, (08): 78–80 [兰厚芬. 规模养殖场畜禽粪污处理和资源化利用. *农家参谋*, 2022, (08): 78–80]
 - 18 Xu Q M. Overview of feed utilization of livestock and poultry manure (in Chinese). *Anhui Agricult Bull*, 2014, 20: 136+143 [徐启明. 畜禽粪便的饲料化利用概述. *安徽农学通报*, 2014, 20: 136+143]
 - 19 Xie X H, Chen G R, Yang B T. Effects of *Lactobacillus plantarum* and EM bacterial agents on the nutrient composition and fermentation characteristics of silage barley (in Chinese). *China Feed*, 2021, (06): 37–40 [谢晓华, 陈广仁, 杨保田. 植物乳杆菌和EM菌剂对青贮大麦营养成分和发酵特性的影响. *中国饲料*, 2021, (06): 37–40]
 - 20 Cheng G, Wang Z B, Wu X, et al. Effects of different livestock and poultry manure substrate ratios on the culture of earthworms in Taiping 3 (in Chinese). *Heilongjiang Animal Husband Vet Med*, 2015, (20): 140–142 [成钢, 王宗宝, 吴侠, 等. 不同畜禽粪便基料配比对太平3号蚯蚓养殖的影响. *黑龙江畜牧兽医*, 2015, (20): 140–142]
 - 21 Martens W, Böhm R. Overview of the ability of different treatment methods for liquid and solid manure to inactivate pathogens. *Bioresource Tech*, 2009, 100: 5374–5378
 - 22 Deng L W, Wu Y L, Ding N S, et al. Research progress on energy utilization of livestock and poultry manure (in Chinese). *China Biogas*, 2019, 37: 3–14 [邓良伟, 吴有林, 丁能水, 等. 畜禽粪污能源化利用研究进展. *中国沼气*, 2019, 37: 3–14]
 - 23 Guo S, Pan J, Zhai L, et al. The reactive nitrogen loss and GHG emissions from a maize system after a long-term livestock manure incorporation in the North China Plain. *Sci Total Environ*, 2020, 720: 137558
 - 24 Zhang C, Li Y T, Li Q, et al. Analysis of the current situation and benefits of livestock and poultry manure resource-based farming cycle in China (in Chinese). *Chem Manag*, 2022, (16): 99–103 [张晨, 李永涛, 李强, 等. 中国畜禽粪污资源化种养循环现状与效益分析. *化工管理*, 2022, (16): 99–103]
 - 25 Chen Y X, Dong H M, Tao X P, et al. Effects of piggery methane irrigation on soil quality of winter wheat (in Chinese). *China Agronomy*

- Bulletin, 2011, 27: 154–158 [陈永杏, 董红敏, 陶秀萍, 等. 猪场沼液灌溉冬小麦对土壤质量的影响. 中国农学通报, 2011, 27: 154–158]
- 26 MacLellan J, Chen R, Kraemer R, et al. Anaerobic treatment of lignocellulosic material to co-produce methane and digested fiber for ethanol biorefining. *Bioresource Tech*, 2013, 130: 418–423
 - 27 Liu C Q, Zhang M M, Dang L W. Problems, constraints and development ideas of energy utilization of livestock and poultry manure (in Chinese). *Rural Economy*, 2020, (12): 113–119 [刘长全, 张鸣鸣, 邓良伟. 畜禽粪便资源化利用的问题、制约及发展思路. 农村经济, 2020, (12): 113–119]
 - 28 Li B F, Zhang D L. Current status of dry anaerobic fermentation technology and domestic application projects (in Chinese). *Renewable Energy*, 2021, 39: 294–299 [李冰峰, 张大雷. 干式厌氧发酵技术现状与国内应用项目简介. 可再生能源, 2021, 39: 294–299]
 - 29 Gao H J, Liu Z D, Sun R, et al. Current situation and measures of livestock and poultry manure treatment and resource utilization (in Chinese). *Feed Expo*, 2022, (3): 37–40 [高海娟, 刘泽东, 孙蕊, 等. 畜禽粪污处理及资源化利用现状和措施. 饲料博览, 2022, (3): 37–40]
 - 30 Li X, Wang W X. Livestock and poultry manure treatment and resource utilization (in Chinese). *Sichuan Animal Husband Vet Med*, 2023, 50: 41–42 [李翔, 王万霞. 畜禽粪污处理及资源化利用. 四川畜牧兽医, 2023, 50: 41–42]
 - 31 Fréchette A, Gagnéux M, Fecteau G, et al. Ability of unsterilized recycled manure solids bedding to support growth of *Klebsiella pneumoniae* and *Escherichia coli*. *Can J Vet Res*, 2024, 88: 12–18
 - 32 Annie F, Gilles F, Simon D. Impact of recycled manure solids bedding on hygiene and odds of hock lesions in dairy cows. *Front Vet Sci*, 2022, 9: 1061632
 - 33 Zhu A K, Zhang Y. Exploring the combination of resource utilization of livestock and poultry wastewater and farming in rural areas (in Chinese). *China Animal Husband*, 2021, (7): 72–74 [朱爱孔, 张雨. 农村畜禽粪污资源化利用与种养结合路径探索. 中国畜牧业, 2021, (7): 72–74]
 - 34 Qin C L, Wang L Y, Liu F, et al. Status quo and prospect of livestock and poultry manure biomass resource utilization (in Chinese). *Agricultural Mechanization Research*, 2015, 37: 234–238 [秦翠兰, 王磊元, 刘飞, 等. 畜禽粪便生物质资源利用的现状与展望. 农机化研究, 2015, 37: 234–238]
 - 35 Li Y J. Harmless treatment and resource utilization of livestock and poultry manure (in Chinese). *China Animal Husbandry*, 2022, (22): 68–69 [李艳军. 畜禽粪污无害化处理和资源化利用. 中国畜牧业, 2022, (22): 68–69]
 - 36 Cao Z T, Leng Z T, Yang Y W, et al. Research progress of aerobic composting technology in the resource utilization of livestock and poultry wastewater (in Chinese). *China Dairy Ind*, 2021, (11): 65–72 [曹哲统, 冷治涛, 杨远文, 等. 好氧堆肥技术在畜禽粪污资源化利用中的研究进展. 中国乳业, 2021, (11): 65–72]
 - 37 Guo R N, Yin J C, Liu J H, et al. Progress of Research on Harmless and Resourceful Utilization of Livestock and Poultry Manure (in Chinese). *Spec Res*, 2023, Doi: 10.16720/j.cnki.tcyj.2023.211 [郭若楠, 殷建成, 刘佳慧, 等. 畜禽粪污无害化及资源化利用研究进展. 特产研究, 2023, Doi: 10.16720/j.cnki.tcyj.2023.211]
 - 38 Wang S N, Xu J, Chen T, et al. Recycling of livestock and poultry waste under the model of plantation combination (in Chinese). *Farmers' Counselor*, 2021, (10): 107–108 [王胜楠, 许娟, 陈婷, 等. 种养结合模式下循环利用畜禽养殖废弃物. 农家参谋, 2021, (10): 107–108]
 - 39 Yu J Y. Analysis on the application and promotion value of typical model of planting and feeding cycle (in Chinese). *Southern Agricult*, 2022, 16: 131–135 [余佳洋. 种养循环典型模式应用及推广价值分析. 南方农业, 2022, 16: 131–135]
 - 40 Yang M J. Common patterns of livestock and poultry manure treatment and resource utilization (in Chinese). *Guizhou Animal Husband Vet Med*, 2021, 45: 67–68 [杨明军. 畜禽粪污处理及资源化利用常见模式. 贵州畜牧兽医, 2021, 45: 67–68]
 - 41 Cheng A H. Current situation and practical difficulties of livestock and poultry manure treatment and resource utilization (in Chinese). *China Poultry Industry J*, 2023, 40: 35–37 [成爱华. 畜禽粪污处理及资源化利用现状与现实困难. 中国禽业导刊, 2023, 40: 35–37]
 - 42 Zhu Y Y, Huang G S, Jiang Y J. Pathways and suggestions for resource utilization of livestock and poultry wastewater (in Chinese). *Zhejiang Agricult Sci*, 2023, 64: 2083–2088 [朱燕燕, 黄国生, 蒋永健. 畜禽粪污还田资源化利用的途径及建议. 浙江农业科学, 2023, 64: 2083–2088]
 - 43 He L, Wang D, Zhu T, et al. Pyrolysis recycling of pig manure biochar adsorption material for decreasing ammonia nitrogen in biogas slurry. *Sci Total Environ*, 2023, 881: 163315
 - 44 Feng Q L. Resource utilization of livestock and poultry manure, problems and solutions (in Chinese). *Today's Animal Husband Vet Med*, 2023, 39: 68–69+72 [冯秋莲. 畜禽粪便资源化利用方式、存在问题和解决方法. 今日畜牧兽医, 2023, 39: 68–69+72]
 - 45 Yu J G, Cheng Z B, Zhang X G, et al. Ruminations on the problems and countermeasures of livestock and poultry manure in the breeding cycle (in Chinese). *China Animal Health*, 2023, 25: 112–113 [于加高, 成祖斌, 张新国, 等. 刍议畜禽粪污在种养循环中存在的问题与对策. 中国

- 动物保健, 2023, 25: 112–113]
- 46 Zhang S H, Long D H, Zhang Y, et al. Discussion on new technology of harmless treatment and resource utilization of livestock and poultry waste (in Chinese). *Agricult Technol*, 2021, 41: 135–137 [张书豪, 龙东海, 张英, 等. 畜禽粪污无害化处理和资源化利用新技术探讨. 农业与技术, 2021, 41: 135–137]
- 47 Zhang H L, Han P X, Teng H Q. Can value perception improve farmers' behavior of livestock and poultry manure resource utilization? —An analysis based on the moderating role of livelihood strategies (in Chinese). *Arid Zone Resources and Environment*, 2022, 36: 40–45 [张红丽, 韩平新, 滕慧奇. 价值认知能够改善农户畜禽粪污资源化行为吗?——基于生计策略调节作用的分析. 干旱区资源与环境, 2022, 36: 40–45]
- 48 Wu L, Liu D, Chen X, et al. Nutrient flows in the crop-livestock system in an emerging county in China. *Nutr Cycl Agroecosyst*, 2021, 120: 243–255
- 49 Rufino M C, Rowe E C, Delve R J, et al. Nitrogen cycling efficiencies through resource-poor African crop–livestock systems. *Agr EcoSyst Environ*, 2005, 112: 261–282
- 50 Akyürek Z. Synergetic effects during co-pyrolysis of sheep manure and recycled polyethylene terephthalate. *Polymers*, 2021, 13: 2363
- 51 Reddy P P. Integrated Crop–Livestock Farming Systems. Sustainable Intensification of Crop Production. Singapore: Springer Singapore, 2016. 357–370
- 52 Tung N T, Yuka S, Hisashi N, et al. Recycling potassium from cow manure compost can replace potassium fertilizers in paddy rice production systems. *Sci Total Environ*, 2023, 912: 168823
- 53 Vance C P. Symbiotic nitrogen fixation and phosphorus acquisition. Plant nutrition in a world of declining renewable resources. *Plant Physiol*, 2001, 127: 390–397
- 54 Mukherjee S, Basak A, Chakraborty A, et al. Revisiting the oldest manure of India, Kunapajala: Assessment of its animal waste recycling potential as a source of plant biostimulant. *Front Sustain Food Syst*, 2023, 6: 1073010
- 55 Tadesse S T, Oenema O, van Beek C, et al. Manure recycling from urban livestock farms for closing the urban–rural nutrient loops. *Nutr Cycl Agroecosyst*, 2021, 119: 51–67
- 56 Tesfa A, Mekuriaw S. The effect of land degradation on farm size dynamics and crop-livestock farming system in ethiopia: a review. *OJSS*, 2014, 04: 1–5
- 57 Huttunen I, Hyytiäinen K, Huttunen M, et al. Agricultural nutrient loading under alternative climate, societal and manure recycling scenarios. *Sci Total Environ*, 2021, 783: 146871
- 58 Lipiec J, Usovich B, Kłopotek J, et al. Effects of application of recycled chicken manure and spent mushroom substrate on organic matter, acidity, and hydraulic properties of sandy soils. *Materials (Basel, Switzerland)*, 2021, 14: 4036
- 59 Ran X, Deng Y, Uppuluri N S T, et al. Hotspots and future trends of phosphorus recycling from livestock manure: A bibliometric review. *Sci Total Environ*, 2023, 892: 164346
- 60 Nijdam D, Rood T, Westhoek H. The price of protein: review of land use and carbon footprints from life cycle assessments of animal food products and their substitutes. *Food Policy*, 2012, 37: 760–770
- 61 Udayakumar S, Liming L, A.N. U D, et al. Role of integrated crop-livestock systems in improving agriculture production and addressing food security – A review. *Journal of Agriculture and Food Research*, 2021, 5: 100190
- 62 Asai M, Moraine M, Ryschawy J, et al. Critical factors for crop-livestock integration beyond the farm level: A cross-analysis of worldwide case studies. *Land Use Policy*, 2018, 73: 184–194
- 63 Yang G, Li J, Liu Z, et al. Research trends in crop–livestock systems: a bibliometric review. *Int J Environ Res Public Health*, 2022, 19: 8563
- 64 Panta S, Parajulee D. Integrated Nutrient Management (INM) in soil and sustainable agriculture. *Int J Appl Sci Biotechnol*, 2021, 9: 160–165
- 65 Ran Q, Ago Y D, Wang D G, et al. Livestock manure seeding cycle and resource utilization (in Chinese). *Contemporary Animal Husbandry*, 2023, (9): 45–47 [冉强, 阿果约达, 王德贵, 等. 畜禽粪污种养循环与资源化利用. 当代畜牧, 2023, (9): 45–47]
- 66 Farrell M J. The Measurement of Productive Efficiency. *Royal Statist Soc J Ser A General*, 2018, 120: 253–281
- 67 Ye X M, Wang L, Zhang M Q. Evaluation methods and analysis of advantages and disadvantages of planting and feeding cycle models (in Chinese). *Jiangsu Agricult Sci*, 2022, 50: 1–5 [叶小梅, 王莉, 张曼秋. 种养循环模式的评价方法及优缺点分析. 江苏农业科学, 2022, 50: 1–5]
- 68 Cook W D, Tone K, Zhu J. Data envelopment analysis: Prior to choosing a model. *Omega*, 2014, 44: 1–4
- 69 Zhang L C. Evaluation Study on the Development of Circular Agriculture in China (in Chinese). Dissertation for Doctor Drgree, Shenyang:

- Shenyang Agricultural University, 2011 [张立超. 中国循环农业发展评价研究. 博士学位论文. 沈阳: 沈阳农业大学, 2011]
- 70 Battese G E, Coelli T J. A model for technical inefficiency effects in a stochastic frontier production function for panel data. *Empir Econ*, 1995, 20: 325–332
 - 71 Saaty R W. The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. *Math Model*, 1987, 9: 161–176
 - 72 ISO. Environmental management—life cycle assessment—principles and framework. En Iso, 1997
 - 73 Yang J X, Wang R S. Review and prospect of life cycle assessment (in Chinese). *Adv Environ Sci*, 1998, (2): 22–29 [杨建新, 王如松. 生命周期评价的回顾与展望. 环境科学进展, 1998, (2): 22–29]
 - 74 Zhao W T, Cai C J, Zhang J, et al. Current situation and suggestions for the development of plantation recycling agriculture (in Chinese). *J Animal Husband Vet Med*, 2023, 42: 30–34 [赵婉婷, 蔡传江, 张俊, 等. 种养循环农业发展现状与建议. 畜牧兽医杂志, 2023, 42: 30–34]
 - 75 Jiang J X. Exploration on resource utilization of livestock and poultry waste and pollution prevention (in Chinese). *Farmers, Counselor*, 2022, (1): 99–101 [蒋菊香. 畜禽粪污资源化利用及养殖污染防治探究. 农家参谋, 2022, (1): 99–101]
 - 76 Chen X W, Wang X L. Carbon footprint assessment of farming systems in the planting cycle—a case study of fresh corn-dairy cow-manure return cycle model (in Chinese). *Chin Agricult Sci*, 2023, 56: 314–332 [陈晓炜, 王小龙. 种养循环农作制度碳足迹评估——以鲜食玉米-奶牛-粪便还田循环模式为例. 中国农业科学, 2023, 56: 314–332]
 - 77 Snyder C S, Bruulsema T W, Jensen T L, et al. Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects. *Agr EcoSyst Environ*, 2009, 133: 247–266
 - 78 Duan P Z. Exploration of ecological recycling agriculture model combining planting and raising—Taking Zhangjiaqiao Village in Fucheng County, Hebei Province as an example (in Chinese). *Sci Technol Wind*, 2021, (29): 138–140 [段培姿. 种养结合生态循环农业模式探究——以河北省阜城县张家桥村为例. 科技风, 2021, (29): 138–140]
 - 79 Sun Y, Zhang D M, He D K. Analysis of Ecological Cyclic Agricultural Model Combining Planting and Feeding—Taking Jingzhou Cooperative as an Example (in Chinese). *Agricult Outlook*, 2022, 18: 74–78 [孙远, 张董敏, 贺登科. 种养结合生态循环农业模式分析——以荆州合作社为例. 农业展望, 2022, 18: 74–78]
 - 80 Wang Y. Efficient Composting Technology and Resource Utilization of Livestock and Poultry Manure (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2008 [王宇. 畜禽粪便高效堆肥技术及资源化利用. 硕士学位论文. 武汉: 华中农业大学, 2008]
 - 81 Xu X B, Sun M X, Zhang L X. Progress in agricultural life cycle assessment (in Chinese). *J Ecol*, 2021, 41: 422–433 [徐湘博, 孙明星, 张林秀. 农业生命周期评价研究进展. 生态学报, 2021, 41: 422–433]
 - 82 Harris F. Management of manure in farming systems in semi-arid west Africa. *Ex Agric*, 2002, 38: 131–148
 - 83 Heller M C, Keoleian G A. Assessing the sustainability of the US food system: a life cycle perspective. *Agric Syst*, 2003, 76: 1007–1041
 - 84 Hilimire K. Integrated crop/livestock agriculture in the united states: a review. *J Sustain Agr*, 2011, 35: 376–393
 - 85 Lovell S T. Multifunctional urban agriculture for sustainable land use planning in the United States. *Sustainability*, 2010, 2: 2499–2522
 - 86 Russelle M P, Entz M H, Franzluebbbers A J. Reconsidering integrated crop–livestock systems in north America. *Agronomy J*, 2007, 99: 325–334
 - 87 Bell L W, Moore A D. Integrated crop–livestock systems in Australian agriculture: trends, drivers and implications. *Agric Syst*, 2012, 111: 1–12
 - 88 Cederberg C, Mattsson B. Life cycle assessment of milk production — a comparison of conventional and organic farming. *J Cleaner Production*, 2000, 8: 49–60
 - 89 Gillis R E, Eckelmann R, Filipović D, et al. Stable isotopic insights into crop cultivation, animal husbandry, and land use at the Linearbandkeramik site of Vráble-Velké Lehembý (Slovakia). *Archaeol Anthropol Sci*, 2020, 12: 256
 - 90 Gachimbi L N, Keulen H, Thurairar E G, et al. Nutrient balances at farm level in Machakos (Kenya), using a participatory nutrient monitoring (NUTMON) approach. *Land Use Policy*, 2003, 22: 13–22
 - 91 Martin G, Moraine M, Ryschawy J, et al. Crop–livestock integration beyond the farm level: A review. *Agron Sustain Dev*, 2016, 36: 53
 - 92 Yengoh G T. Determinants of yield differences in small-scale food crop farming systems in Cameroon. *Agricult Food Sec*, 2012, 1: 19
 - 93 Powell J M, Pearson R A, Hiernaux P H. Crop–livestock interactions in the west African drylands. *Agronomy J*, 2004, 96: 469–483
 - 94 Moraine M, Duru M, Therond O. A social-ecological framework for analyzing and designing integrated crop–livestock systems from farm to territory levels. *Renew Agric Food Syst*, 2017, 32: 43–56
 - 95 Iiyamamiyuki. Crop-livestock diversification patterns in relation to income and manure use: A case study from a Rift Valley Community, Kenya.

- African J Agricult Res, 2007, 2: 58–66
- 96 Moraine M, Duru M, Nicholas P, et al. Farming system design for innovative crop-livestock integration in Europe. *Animal*, 2014, 8: 1204–1217
- 97 Li M D. Wu. Practical technology of circular agriculture (in Chinese). Changsha: Hunan Science and Technology Press, 2013 [李明德 吴. 循环农业实用技术. 长沙: 湖南科学技术出版社, 2013]
- 98 Liu Q F, Zhou J Y, Wu H Y, et al. Current status of the application of the domestic seed-feeding composite recycling agricultural model (in Chinese). *J Agronomy*, 2022, 12: 81–88 [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. 农学学报, 2022, 12: 81–88]
- 99 Gupta V K, Rai P K. Integrated crop-livestock farming systems: a strategy for resource conservation and environmental sustainability. 2012. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:55658681>
- 100 Wang J X, Nie S N, Tang Y Y. Research and practice of ecological recycling agriculture combining planting and raising (in Chinese). *Modern Agricult Res*, 2022, 28: 113–115 [王军玺, 聂申奥, 唐奕妍. 种养结合生态循环农业的模式研究与实践. 现代农业研究, 2022, 28: 113–115]
- 101 Similarities and Differences in Tropical Monsoon Climate, Subtropical Monsoonal Humid Climate, and Temperate Monsoon Climate? (in Chinese). *Secondary School Geography Teaching Reference*, 1984, (3): 32 [热带季风气候、亚热带季风性湿润气候、温带季风气候的相似点和相异点? 中学地理教学参考, 1984, (3): 32]
- 102 Wang Q, Zeng H Z, Chen L, et al. Characterization of suitable agronomic characteristics of rice in the rice-fishery co-cropping model in the South China Proceedings of the 19th Annual Academic Conference of the Crop Society of China, Wuhan, Hubei, China, 2020 [王强, 曾华忠, 陈雷, 等. 南方稻渔共作模式中水稻适宜农艺特征分析. 第十九届中国作物学会学术年会, 中国湖北武汉, 2020]
- 103 Li Y. Construction and development of livestock and poultry manure resource utilization system. *World Trop Agricult Inform*, 2022, (12): 49–50 [李玉. 畜禽粪污资源化利用体系的构建与发展. 世界热带农业信息, 2022, (12): 49–50]
- 104 Hu P P, Wang Q. Comprehensive benefits of green rearing cycle agriculture in hengyang city are obvious (in Chinese). 2023, https://www.hunan.gov.cn/hnszf/hnyw/szdt/202309/t20230923_29499481.html [胡盼盼, 王勤. 衡阳市绿色种养循环农业综合效益明显. 2023, https://www.hunan.gov.cn/hnszf/hnyw/szdt/202309/t20230923_29499481.html]
- 105 Xu X, Sharma P, Shu S, et al. Global greenhouse gas emissions from animal-based foods are twice those of plant-based foods. *Nat Food*, 2021, 2: 724–732
- 106 Zhang W X. Research on the development of ecological cyclic agriculture combined with planting and feeding in Shandong Province (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Harbin: Northeast Agricultural University, 2023 [张文晓. 山东省种养结合生态循环农业发展问题研究. 硕士学位论文. 哈尔滨: 东北农业大学, 2023]
- 107 Zhao H W. Research on the behavior and influencing factors of pig farmers choosing the combined farming model in Shandong Province (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Changchun: Jilin Agricultural University, 2023 [赵恒玮. 山东省生猪养殖户选择种养结合模式的行为及影响因素研究. 硕士学位论文. 长春: 吉林农业大学, 2023]
- 108 Ren L S, Liu P, Jing R Z, et al. Technological model of green agriculture and animal husbandry development by combining seed raising and recycling (in Chinese). *Modern Rural Sci Technol*, 2021, (8): 45 [任灵肖, 刘佩, 井润梓, 等. 种养结合循环绿色农牧业发展技术模式. 现代农村科技, 2021, (8): 45]
- 109 Tian W L. Research on fruit quality and soil physicochemical properties of pear orchards combined with plantation (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011 [田伟龙. 种养结合梨园果实品质和土壤理化性质研究. 硕士学位论文. 南京: 南京农业大学, 2011]
- 110 Sun Z Y, Liu D, He X M, et al. Comprehensive supporting technology for goose breeding in cold land cornfield (in Chinese). *Contemporary Animal Husbandry*, 2019, (14): 13–14 [孙中义, 刘娣, 何鑫淼, 等. 寒地玉米田养鹅种养结合综合配套技术. 当代畜牧, 2019, (14): 13–14]
- 111 Yang C Y, Shen W S, Lin N F. Climate change and its variability on the Tibetan Plateau (in Chinese). *Arid Zone Geography*, 2014, 37: 290–298 [杨春艳, 沈渭寿, 林乃峰. 西藏高原气候变化及其差异性. 干旱区地理, 2014, 37: 290–298]
- 112 Liu H X. Construction and Evaluation of a Technological Model of Planting and Recycling Sheds in Eastern Xizang (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Chongqing: Southwest University, 2020 [刘晗晓. 藏东地区种养循环一体棚技术模式构建与评价. 硕士学位论文. 重庆: 西南大学, 2020]
- 113 Xie W D, Zhu Y B, Pasang W D, et al. Research on “winter circle and summer grass” planting and recycling technology in alpine pastoral areas of Nagchu, Xizang (in Chinese). *Tibetan Agricultural Science and Technology*, 2023, 45: 57–59 [谢文栋, 朱彦宾, 巴桑旺堆, 等. 西藏那曲高寒牧区“冬圈夏草”种养循环利用技术研究. 西藏农业科技, 2023, 45: 57–59]
- 114 Tian L. Problems and countermeasures on the utilization of pig manure in the development of plantation recycling agriculture (in Chinese).

- Swine Sci, 2023, 40: 86–88 [田蕾. 种养循环农业发展中生猪粪污利用存在的问题与对策. 猪业科学, 2023, 40: 86–88]
- 115 Pan Y P. Research on the development path of animal husbandry in the context of carbon neutrality (in Chinese). Livestock Vet Sci Technol Inform, 2023, (5): 33–36 [潘有萍. 碳中和背景下畜牧业种养结合发展路径研究. 畜牧兽医科技信息, 2023, (5): 33–36]
- 116 Jiao M N, Ren X N, He Y F, et al. Clean composting of livestock and poultry wastes-opportunities and challenges (in Chinese). J Agricult Environ Sci, 2021, 40: 2361–2371+2589 [焦敏娜, 任秀娜, 何熠峰, 等. 畜禽粪污清洁堆肥——机遇与挑战. 农业环境科学学报, 2021, 40: 2361–2371+2589]
- 117 Yin Y L. Vigorously promoting low-carbon animal husbandry key core technology research and development (in Chinese). Hunan Daily, 2024-01-11 [印遇龙. 大力推进低碳畜牧业关键核心技术攻关. 湖南日报, 2024-01-11]

Research and reflection on the integration of manure resource treatment and integrated farming system in animal husbandry

CHEN MingZhe¹, YING YuLong^{2*} & HE LiuQin^{1,2*}

¹ Hunan Provincial Key Laboratory of Animal Intestinal Function and Regulation, Hunan International Joint Laboratory of Animal Intestinal Ecology and Health, College of Life Sciences, Hunan Normal University, Changsha 410081, China;

² Hunan Provincial Key Laboratory of Animal Nutrition Physiology and Metabolism Process, Key Laboratory of Agricultural Ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China

With the rapid development of China's aquaculture industry, the issue of low-level resource utilization of livestock manure and poultry manure, great pollution load, and disconnection between planting and breeding caused by large-scale farming is becoming more and more serious, which hinders the healthy and sustainable development of China's aquaculture industry. In order to solve those problems effectively, we should vigorously promote resource-based treatment of livestock and poultry manure and build the Integrated Farming System with planting and breeding cycles. Compared with traditional agriculture, the Integrated Farming System is a new type of recycling agricultural model with high yield, sustainable and high efficiency, which closely integrates cultivation and animal husbandry, and the resource treatment of livestock and poultry manure is the key node for the realization of the Integrated Farming System. Therefore, this paper begins with an overview of the advantages, disadvantages and current research status on livestock and poultry manure resource utilization (including feed conversion, energy conversion, padding conversion, and fertilizer conversion), in addition to analyzing the evaluation methods involved in the research process of Integrated Farming System. Through the typical case analysis of livestock and poultry manure resource utilization and the Integrated Farming System, this paper proposes the challenges and future development direction of livestock and poultry manure resource treatment and the Integrated Farming System in China, with a view to promoting livestock and poultry manure resource treatment and the application of the new agricultural model of Integrated Farming System, so as to achieve China's dual-carbon goals and the green development of agricultural sector.

animal manure, sourcing, integrated farming system, functional agriculture

doi: [10.1360/SSV-2024-0080](https://doi.org/10.1360/SSV-2024-0080)