

# 红壤区规模化养猪粪污资源化利用主要卡点及发展对策<sup>①</sup>

万里平<sup>1</sup>, 王兴祥<sup>2,3</sup>, 丁昌峰<sup>2,3</sup>, 周志高<sup>2,3</sup>, 王玉荣<sup>2,3\*</sup>

(1 江西正合生态农业有限公司, 南昌 338000; 2 土壤与农业可持续发展全国重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 211135; 3 中国科学院红壤生态实验站, 江西鹰潭 335211)

**摘要:** 生猪养殖产生的粪污是农业面源污染的主要污染源之一。在红壤区, 由于土壤酸度强、磷素固定能力强, 粪污不当还田易导致养分利用效率低与二次污染风险加剧。当前畜禽粪污资源化利用过程中存在种养脱节、安全利用技术体系不完善、经济性驱动机制缺失、可持续运营机制保障薄弱等关键瓶颈, 构建“粪污集中处置+分散资源化利用”的红壤区适配型协同治理模式, 通过系统优化畜禽养殖空间布局、强化粪污处理技术创新、完善粪肥安全利用体系、加强监管执法效能、构建政策激励与市场运作协同机制, 明确界定政府部门、养殖主体和第三方企业的权责关系, 形成“政策引导-市场驱动-主体参与”的良性循环机制, 再通过科学布局、健全标准、多元激励、市场运作, 形成系统化、区域化的畜禽粪污资源化利用体系, 为红壤区养殖粪污高效循环利用与面源污染防治提供系统化路径, 对实现养殖废弃物高效循环和面源污染防治具有重要意义。

**关键词:** 种养脱节; 粪污资源化; 集中处置; 分散利用

**中图分类号:** S87; X71 **文献标志码:** A

## Key Bottlenecks and Countermeasures of Resource Utilization of Swine Feces Produced by Scale Pig Farming

WAN Liping<sup>1</sup>, WANG Xingxiang<sup>2,3</sup>, DING Changfeng<sup>2,3</sup>, ZHOU Zhigao<sup>2,3</sup>, WANG Yurong<sup>2,3\*</sup>

(1 Jiangxi Zhenghe Eco-Agriculture Company Limited, Nanchang 338000, China; 2 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China; 3 Ecological Experimental Station of Red Soil, Chinese Academy of Sciences, Yingtan, Jiangxi 335211, China)

**Abstract:** Swine feces produced by pig farming is one of the main sources of agricultural non-point source pollution. In the red soil region, due to the strong acidity of the soil and its strong phosphorus fixation capacity, improper return of swine feces to the fields can easily lead to low nutrient utilization efficiency and an increased risk of secondary pollution. There are numerous bottlenecks in the process of resource utilization of swine feces, including disconnection between crop growing and livestock breeding, inadequate safe use technologies, a lack of economic drivers, and poor sustainable run mechanism support. Establishing a red soil zone adapted synergistic treatment model of ‘concentrated animal feces disposal + scattered resource utilization’, through systematic optimization of livestock farming spatial distribution, enhanced innovation in manure treatment technologies, establishment of comprehensive manure utilization standards, rigorous enforcement of environmental regulations, and development of synergistic policy-market coordination mechanisms, the livestock and poultry industry can transition toward environmentally sustainable development. This integrated approach facilitates the transformation of agricultural waste into valuable resources while mitigating environmental pollution risks, ultimately fostering a circular economy paradigm within the animal husbandry sector. Clear definition of rights and liabilities of governmental agency, farming entity and third-part company, forming a sound cycle mechanism of ‘policy guiding-market driving-key players participating’, and formulating of systematic and regional livestock feces resource utilization systems through scientific layout, sound and complete criteria and standards, multiple incentives and market operation, they are the important ways to solve effectively the problem of livestock farming pollution in red soil region.

**Key words:** Disconnection of crop growing and livestock breeding; Feces resource; Concentrated disposal; Scattered utilization

①基金项目: 江西省重大研发专项(20182ABC28006)和国家现代农业产业技术体系项目(CARS-13)资助。

\* 通信作者(wangyurong@issas.ac.cn)

作者简介: 万里平(1982—), 男, 江西新余人, 学士, 高级工程师, 主要研究方向为畜禽粪污资源化利用研究。E-mail: wanlp0413@126.com

中国是生猪生产和猪肉消费第一大国,养猪业在国民经济中具有重要地位<sup>[1]</sup>。在传统散养模式下,“猪-沼-果”等家庭种养结合生态小循环表现出了良好的经济效益和环境效应<sup>[2]</sup>。近年来,规模化养殖已成为生猪生产的主要方式,环保设施覆盖率及粪污资源化利用水平也显著提升<sup>[3]</sup>,然而,在我国南方红壤区,由于土壤本身呈酸性、磷固定能力强,粪污中还田的养分效率低,加之种养空间分离、粪污转化技术不成熟等系统性问题,使得规模化养殖粪污仍是该区域农业面源污染的重要来源之一<sup>[4]</sup>,制约了农业的可持续发展<sup>[5]</sup>。欧美国家如美国和法国,已形成涵盖养殖、粪污处理与还田利用的完整种养结合产业链<sup>[6]</sup>,显著提升了粪肥利用率,减少了化肥施用量,在改善土壤质量的同时降低了环境污染风险<sup>[7]</sup>。因此,构建适应我国红壤区土壤特性与种养结构的规模化循环利用模式,对推动区域养殖业绿色转型与面源污染治理具有重要意义<sup>[8]</sup>。

## 1 养猪场粪污的主要处置方式

规模化猪场(存栏 $\geq 500$ 头)年粪污产生量大,需要配套专门的环保处理设施和相应的土地消纳承载<sup>[9]</sup>,尤其在红壤区,土壤对磷的吸附能力强、有机质降解速度慢,粪污处理方式的选择需综合考虑养分循环效率与土壤环境容量。目前主要的处置方式归纳起来有以下5种。

### 1.1 固态粪便生产有机肥模式

该模式要求在特定区域内,由养殖场自行处理养殖废水,同时将固体粪污及固液分离产生的固渣统一回收,并与其他农业有机废弃物协同处理,通过好氧堆肥工艺转化为有机肥还田,废水则由养殖场自行处理<sup>[10]</sup>。当前常用的工艺主要包括静态膜覆盖法、条垛式堆肥、槽式堆肥及反应器堆肥4种。静态膜覆盖法通过将混合原料摊铺后覆盖分子膜,依托太阳能与自然通风对原料进行好氧发酵<sup>[11]</sup>;条垛式堆肥将物料堆置为条垛状,通过人工或机械定期翻堆以促进物料发酵<sup>[12]</sup>;槽式堆肥则在封闭槽体内进行堆肥,通常配备导轨式翻抛机和强制曝气系统以优化发酵条件<sup>[13]</sup>;反应器堆肥则采用容器(木质、钢质或混凝土结构)进行可控发酵<sup>[14]</sup>。典型案例如江西红壤区的礼涑模式,即由礼涑农业集团提供整套技术方案、设备、发酵剂、发酵液和营养包,将秸秆和动物粪便进行智能堆肥发酵,制成有机肥后统筹回收销售,就近就地循环利用<sup>[15]</sup>。该模式有效解决了养殖场固体粪污的资源化利用问题,建立了市场化运营机制,所产

有机肥品质稳定,对红壤区土壤结构改良与有机质提升具有积极作用,然而,其未能彻底解决养殖场面临的核心污染问题——废水处理。

### 1.2 “全量化”第三方集中处置模式

作为一种新型畜禽粪污集中处置模式,“全量化”第三方集中处置模式是指在特定区域内建立专业化的粪污处置中心,通过与养殖企业签订合作协议,实现畜禽粪污的全量化收集、密闭罐车转运及处置中心集中无害化处理<sup>[16]</sup>。粪污经集中处理后生产沼气、沼液和有机肥,其中沼气进行能源综合利用,沼液由专业合作社施用到农田或果园,沼渣等生产有机肥作为商品出售。该模式具有多种优势,如实现了专业化分工,使养殖企业专心养猪,粪污无害化处理由第三方环保企业负责并生产有机肥料,区域内的种植户则负责肥料产品农用消纳<sup>[17]</sup>;集中处置中心作为种植业与养殖业联通的桥梁和枢纽,是粪肥循环利用的关键环节,通过形成区域物质循环,提升了资源转化效率<sup>[18-19]</sup>。在政府的监督监管下,形成市场可持续运行机制,才能使种养循环更合理、更科学,实现养殖废弃物社会大循环。然而该模式在实践过程中仍然存在以下亟待解决的问题:在收集环节,养殖场高用水量导致粪污含水量过高,增加运输成本,并降低厌氧发酵效率;在运营环节,处置中心投资及运行成本高,如大型发酵设备等,且市场化运营依赖政策补贴,经济可持续性不足;在衔接环节,种养供需不匹配、有机肥和沼液肥市场接受度低等问题制约其规模化推广<sup>[20]</sup>。

### 1.3 区域内农牧结合的处理模式

农牧结合模式是指养殖场建设配套粪污资源化利用设施,比如沼气工程、沼液施肥设施等,同时根据粪污产生量,流转或合作利用相应面积的种植用地(如农田、果园、苗木等),以实现种养结合的生态循环,达到养殖废弃物内部循环利用的目的<sup>[21-22]</sup>。按粪污消纳匹配量原则,每5头猪需不少于1亩(1亩=667 m<sup>2</sup>)土地消纳粪污<sup>[23]</sup>,在自有种植用地不足时,可与周边种植业主签订粪污资源化利用协议。如宝应县华盛生态生猪养殖场应用的“猪-沼-稻”模式,将堆肥发酵后的猪粪和沼液施用于稻田,节约化肥投入232元/亩,同时提高了水稻产量和品质<sup>[24]</sup>。养殖场自行进行粪污无害化处理和资源化利用,有利于构建企业内部循环农业,最大程度降低养分损失和运输成本,形成协同效应,实现养殖主体和区域尺度的养殖废弃物循环<sup>[25]</sup>。农牧结合模式作为当前我国畜禽粪污处理的主流模式,在实际应用中仍然

存在以下主要问题:由于养殖经营主体普遍存在专业技术储备不足、环保意识薄弱等问题,往往过度追求经济效益而忽视环境效益,同时养殖规模和配套的土地面积不匹配,导致粪污无害化处理与资源化利用环节脱节,造成了严重的资源浪费,在养殖密度较高的区域表现得尤为突出<sup>[26-28]</sup>;而红壤区土壤酸性强,作物对粪肥响应差异大,养殖主体普遍缺乏与红壤适配的粪肥安全施用技术,导致粪污资源化效率低、环境风险更高。此外,分散化的处理模式增加了环境监管难度,导致违规排放等问题难以有效控制。

#### 1.4 深度处理与达标排放模式

该模式是指养殖场通过建设专业环保处理设施,对粪污进行系统化无害化处理的模式,一般将畜禽粪污进行干湿分离后,粪渣和污泥进行制肥,污水深度处理达到国家排放标准后向自然水体排放<sup>[29]</sup>。目前可采用的污水处理技术包括膜分离、厌氧消化、好氧发酵处理等<sup>[30]</sup>,适用于周边缺乏消纳土地的养殖场。该模式由于现有污水处理技术和装备成熟度高,已经形成完整体系,可有效降低养殖场对周边环境的污染风险,使环境风险可控,同时还简化了养殖场的粪污管理流程,使管理简单便捷<sup>[29]</sup>。但该模式也存在一些弊端:一是养分流失严重,如 Wei 等<sup>[31]</sup>对比了不同粪肥管理模式的氮损失量,结果表明,该模式下氮损失率达 73.9%~78.4%,显著高于全量化处理模式(50.0%~62.5%);二是养殖废水排放量大且成分复杂,处理成本较高,深度处理难度大,这类处理模式初期建设投入和长期运行成本均较高,往往超出企业承受能力<sup>[32]</sup>;三是存在废水排放标准提高的政策风险等,如随着水环境保护要求的持续升级,畜禽粪污废水的排放限值(如 COD、NH<sub>3</sub>-N、TP 等指标)可能进一步收紧。在长三角等环境敏感区已试点执行高于国标的地方标准,如浙江省地方环境保护标准《畜禽养殖业污染物排放标准》<sup>[33]</sup>,其限值较国家标准更严苛。同时,新污染物(如抗生素及其抗性基因等)的监管也逐步纳入标准体系,使得现有处理工艺难以满足深度净化的需求。此外,红壤区水资源季节性分布不均,养殖废水中抗生素、重金属等污染物可能随排水进入酸性土壤环境,使其生物有效性更高,进一步提高深度处理的难度与成本。总之,该模式虽然解决了土地约束的问题,但从资源循环和经济效益角度考量,其养分损失率高、运行成本高等问题限制了其推广应用价值,更适合作为土地资源极度匮乏情况下的补充性解决方案。

#### 1.5 微生物发酵床模式

该模式是一种基于微生物降解技术的粪污处理方式,主要包括内置式发酵床养殖和外置式发酵床粪污降解两种技术。内置式发酵床养殖技术主要用于发酵床养猪。选择碎秸秆、木屑、谷壳等通透性和吸水性较好的原料做垫料,拌入酵母菌、乳酸菌、光合菌等微生物菌种,通过微生物代谢作用将畜禽粪便分解转化为菌体蛋白,同时形成稳定的微生态系统,实现养殖过程无臭味、零排放、免冲栏,且显著减少水资源消耗<sup>[34]</sup>。外置式发酵床粪污降解技术通过在畜禽舍外建造发酵床,对畜禽粪污进行发酵,适用于消纳土地不足的中小规模养殖场<sup>[24]</sup>。如宝应县兴达园生猪养殖场应用的粪污异位发酵床生产有机肥模式,可将多个猪舍的粪污运输到异位发酵床统一进行发酵处理,年产有机肥 1 200 t,有机肥年产值 60 万元<sup>[24]</sup>。总之,该模式可提升废物转化率,从源头上减少粪污产生量,实现清洁生产。但是该模式仍存在一些局限性,如建设成本较高、工艺复杂,运行过程中容易因为垫料不足、菌粉不合理使用、温度和湿度控制不当等原因导致“死床”<sup>[35]</sup>,且由于红壤区高温高湿的环境,发酵床更易因垫料管理不当、温湿度失控而导致“死床”现象,导致运维成本更高,限制了其大面积推广。

### 2 规模养猪粪污资源化利用技术瓶颈

国家高度重视养殖场粪污资源化利用工作。在政策层面,自 2016 年以来,习近平总书记就畜禽粪污资源化利用作出重要指示,国务院及各级地方政府相继出台《国务院办公厅关于加快推进畜禽养殖废弃物资源化利用的意见》<sup>[36]</sup>等系列政策文件;在财政投入方面,中央财政通过规模化养殖场大中型沼气工程、畜禽粪污整县推进项目、种养一体生态循环示范等专项,年度预算投入达数十亿元;在技术支撑方面,标准体系已日趋完善,实现资源化利用装备国产化全覆盖,形成多元化的技术解决方案。尽管具备政策、资金和技术等多方面优势,当前资源化利用效果仍与政策预期存在显著差距。根据农业农村部监测数据,2023 年全国畜禽粪污综合利用率为 78%,种养结合农牧循环发展新格局已初步形成,但是距离“十四五”规划目标(≥80%)仍有提升空间<sup>[37]</sup>。主要制约因素如下:

#### 2.1 安全利用技术体系仍需完善

畜禽粪污资源化利用的核心在于安全利用体系的建立,在红壤区,这一问题尤为复杂:一方面是粪污无害化后产出物的安全性问题。由于早年养殖过程

中饲料添加剂和抗生素的滥用,粪污及其资源化产物(沼液、沼渣)中普遍存在重金属、抗生素及病原微生物等污染物,这些污染物在红壤酸性环境下活性较高,易通过作物吸收或淋溶进入水体,造成二次污染<sup>[38]</sup>。近年来,饲料标准对重金属进行了控制,抗生素减量饲料乃至无抗饲料的生产对粪污中抗生素的含量进行了削减<sup>[39]</sup>,这些措施在一定程度上为畜禽粪污资源化利用提供了安全保障。但遗憾的是,部分饲料生产企业和养殖企业并未严格执行。且针对重金属和抗生素的高效去除技术(如抗生素高效降解菌剂的选育与应用、沥浸联合电动-可渗透反应墙(EKR-PRB)去除重金属等)还需要更深入的研究<sup>[40-44]</sup>,进而让无害化处理后的末端产品更清洁。但是针对畜禽粪污中抗生素和重金属去除技术,由于处理成本较高等经济因素限制,目前主要停留在实验室研究或小试阶段。

另一方面是粪污及其资源化产物安全施用技术体系尚不完善。红壤区土壤类型多样,作物系统复杂,粪污安全消纳量研究严重不足。如张迪等<sup>[45]</sup>研究了红黏土红壤种植花生、玉米和紫薯时猪粪的最大安全消纳量,发现不同土壤-作物系统对粪污的响应机制存在显著差异。但红壤区还存在赤红壤、砖红壤等亚类,以及水稻、柑橘等主导作物,其养分需求与污染物耐受性差异显著。因此,需要综合考虑土壤理化性质、作物吸收特性、污染物迁移规律等多重因素,在环境风险防控与农业生产效益之间寻求最优平衡点。二是沼液标准化施用技术缺失,包括施用时间、施用量、施用方式,以及针对不同养分特征的动态配方调控等均存在缺失<sup>[46]</sup>。三是沼液中养分存在时空变异性。不同养殖场、不同季节的沼液养分组成存在显著差异<sup>[47]</sup>,这种时空异质性要求建立动态化的施用调控体系。四是沼液施用技术推广存在困难。由于大部分农业劳动者年龄偏大、文化程度较低,接受新技术能力弱,导致面向分散农户的技术推广效率低下;同时由于部分群众盲目大量施用沼液导致减产,在一定程度上影响了沼液农用户技术的推广。粪污及其资源化产物的施用需要专业的技术服务体系、完善的风险防控机制<sup>[48]</sup>。受阻于多重主客观因素,其安全利用技术体系在落地应用环节仍然存在不足,这已成为制约粪污资源化利用成效的技术瓶颈。

## 2.2 经济性驱动机制的缺失

作为市场经济的重要组成部分,生猪养殖产业的环境行为决策主要受经济因素驱动。粪污资源化利用的实施效果在很大程度上取决于其经济可行性。粪污资源化利用成本高昂,环保设施建设占养殖总投入的

10%~20%,而在运营阶段,每头生猪还需要投入30~50元的运营成本,而红壤区养殖场多分布在山丘地带,粪污转运成本高,进一步削弱了市场竞争力。粪污中的养分具有资源利用价值,但水分却是处理难题,因此降低粪污含水量是减少运输成本、提升资源化利用的重要途径<sup>[49]</sup>。目前国内主流的养殖清粪工艺包括干清粪工艺和水泡粪工艺<sup>[47]</sup>。干清粪工艺中鲜粪可直接对外销售,冲洗废水中的养分含量可以忽略,但是人工劳动需求量大;而水泡粪工艺虽减轻了劳动强度,被规模化养殖场大量采用,但废水中保留较多的养分,如氮磷钾、有机质等,折算为化肥价值仅为5~10元/t<sup>[47]</sup>,资源化利用成本显著高于产出价值。能源化利用同样缺乏经济可行性。一方面,畜禽粪污的能源化利用是全面解决养殖场环境问题的优先选择,然而在厌氧发酵过程中产生的大量沼气却难以实现高效利用。沼气产量通常远超自用需求,商品化又面临生物燃气产业链不健全、质量认证体系和市场准入制度缺失等问题<sup>[50]</sup>;沼气发电存在并网困难的实际障碍;通过吸附、膜分离、低温分离等技术脱除沼气中的CO<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>S,将沼气提纯为生物天然气<sup>[51]</sup>,又面临销售渠道不畅和市场消纳能力不足等挑战<sup>[50]</sup>。另一方面,沼肥生产的连续性与农田用肥的季节性矛盾突出。在空间维度上,肥料的集中生产和分散应用导致储存和运输成本增加,进一步降低其经济可行性<sup>[52]</sup>。因此,改进养殖工艺、创新利用模式、完善市场机制、畅通养殖场粪污资源化利用路径是提高其经济可行性的策略。

## 2.3 可持续运营机制保障薄弱

当前养殖场环保工作普遍存在“重建设、轻运营”的问题。尽管环保设施配套率较高,但实际无害化处理与资源化利用效率仍然偏低。主要原因包括:①前期规划不足。多数养殖场在规划阶段未充分考虑粪污资源化利用的实际条件,往往因环保需要、获取补贴等因素建设环保设施。环保设施建设后,运营成本过高、运行效果不稳定、配套措施如运输系统成本过高,导致难以持续运营,部分养殖场甚至通过编造虚假协议等方式规避监管要求<sup>[53]</sup>。②政府监管难度大。受稳产保供等因素制约,养殖场台账核查困难,政府执法力度不足<sup>[54]</sup>。③各级政府出台了大量激励政策,但因申报流程繁琐、补贴场景针对性过强且缺乏延续性等,落实效果差<sup>[55]</sup>。④市场化机制缺失。集中处置中心作为第三方企业对养殖场没有约束力,市场化运营模式盈利能力不足,政企协同机制不完善<sup>[56]</sup>。因此,转变“重建设、轻运营”的理念、完善政府监

管体系、简化补贴申报流程、创新合作模式等是完善可持续运营管理机制、提高畜禽粪污资源化利用可持续性的策略。

### 3 “集中+分散”的处置方式破解养猪环保难题

区域性的实施路径是在种养平衡一体化基础上,建立养殖环保公平性保障机制、考量生猪养殖周期性波动特点等<sup>[57]</sup>,并就社会价值、监管效能、技术成熟度、经济可行性等关键因素进行多维评估<sup>[58]</sup>。在此基础上,建立布局合理、运行机制完备的“集中+分散”式粪污处置模式,有利于畜禽粪污资源化利用的可持续性。模式中的“集中”是指在养殖集中区域建立粪污集中处置中心,全量化收储运、无害化和资源化利用区域内养殖粪污,而“分散”则指在距离较远或者具备企业生态自循环的养殖场,采用分散式粪污资源化利用方式,并纳入统一的粪污资源化利用监控平台。如江西正合生态农业有限公司应用该模式已在江西红壤区成功实践,其在新余、崇仁、南昌等 6 个县区建设了区域粪污集中处置中心,并与光大环境科技(中国)有限公司在广东南雄建立了粪污集中处置中心(韶关光水正合环保科技有限公司),显著提升了粪污资源化利用率,验证了其在实际应用中的可行性和有效性,为畜禽养殖废弃物治理提供了可推广的解决方案。具体实施方案概括如下:

#### 3.1 规划先行、科学布局

根据县域农业产业发展需要,制定养殖业发展规划,按照布局合理化、生产规模化、养殖绿色化的要求,优化畜禽养殖空间布局。根据社会发展和资源环境承受容量,优化农业全产业链布局,落实养殖总量控制与管理,强化新建/扩建养殖场环保审批与监管,保障畜牧业生产健康稳定可持续发展。重点考虑红壤区土地承载力和环境敏感性,严格控制新建养殖场规模与选址,保障养殖与土地消纳能力相匹配。

#### 3.2 科技创新、驱动发展

一是,建立数字化收储运管理系统。全链条数字化收储运体系是构建“集中+分散”的粪污处置前提,这不仅能够帮助养殖企业节能减排、节约用水,还能提高区域粪污集中处置中心处理的粪污浓度与稳定性。二是,集成优化高浓度厌氧发酵技术。高浓度的粪污处理需要更专业的装备、更创新的技术如更灵敏的失稳预警系统<sup>[59]</sup>、高效菌种筛选与应用技术<sup>[60]</sup>等来保障工艺的稳定性、安全性,以达到更具经济价值的新能源——沼气的高效产出。创新沼气高效提纯天然气

技术,通过优化工艺提升甲烷纯度与提纯效率,降低能耗成本,推动沼气向高附加值清洁能源转化;强化资源循环利用,实现提纯后的生物天然气达标,并入城市天然气管网,为居民生活与公共事业提供绿色能源补给;同时定向供应工业园区,替代传统化石能源,助力园区降碳减排<sup>[60]</sup>,构建“沼气生产-提纯利用-能源供应”的闭环生态链。三是,创新畜禽粪污安全处理技术。基于抗生素高效降解微生物的筛选与应用、重金属高效去除技术开发等科技创新,进一步削减粪污中的重金属、抗生素、病毒虫卵等有毒有害物质,以保证后端沼肥和有机肥的安全开发利用<sup>[40-44]</sup>,同时针对红壤区特点,创新沼液配方调控与酸性土壤适配调理技术,提升粪肥在红壤中的利用效率;明确不同土壤类型及种植模式的有机肥和沼液的合理用量,形成区域适配的精准施用技术方案,为粪污资源化产物的安全高效利用提供科学依据和技术支撑。

#### 3.3 健全标准、加强执法

建立健全养殖绿色标准体系,明确粪污处理设施建设、验收、施用及第三方运维及现场检查等规范,严格实行环评制度,建设后落实管理措施,保证畜禽粪污处理设施持续运营<sup>[61]</sup>;提高养殖场(户)市场化运行机制以及执法检查的规范性和科学性。

完善监管机制,落实责任主体。建立畜禽养殖废弃物处理和资源化考核制度,全面落实属地管理责任制度、养殖场环境治理主体责任制和部门监管责任制度<sup>[62]</sup>。同时将全区规模化养殖场纳入日常环境执法监管,利用信息化技术进行现代化管理,以促进养殖场规范养殖。建立互通的线上信息平台,即智慧监管平台,完善部门联动机制<sup>[63]</sup>,不定期抽取部分规模化养殖场进行检查<sup>[61]</sup>,对畜禽粪便收集、贮存、处置情况各项台账资料进行检查,重点查处偷排、漏排情况,严厉打击违法行为,确保畜禽粪污不外排,防止污染环境。

#### 3.4 四位一体、共创共享

构建以区域粪污集中处置中心为枢纽的种养结合循环系统,实现畜禽粪污“全收集-全转运-全利用”的闭环式管理,以及以种养结合为基础的全量资源化<sup>[30-31]</sup>。

“全收集”机制中技术配置包括养殖场配置自动刮粪板、粪污储存池和应急备用池(建设成本 600 ~ 800 元/m<sup>3</sup>),实现粪尿全收集。“全转运”机制则是指集中处理中心与各养殖户签订畜禽粪污全量收集协议,由集中处理中心负责上门转运,其实实施“四联单”制度,即由养殖户、集中处理中心、农业农村部门、生态环境部门

各执一单,同时转运过程中使用密闭运输车并实时GPS定位,以实现粪污产生、储存与转运量的精准匹配,防止畜禽粪污偷排乱放污染环境。“全利用”机制是指处置中心将畜禽粪污通过能源化利用(沼气)和肥料化利用(肥料和沼液肥)全量化利用,即将畜禽粪污发酵产生的沼气作为能源利用,沼渣则生成固态商品肥,沼液肥则直接还田。在此过程中,还能协同处理其他各类农业有机废弃物如秸秆、加工类废弃物以及生活粪污,并建立市场收运机制,将这些废弃物分别制成沼气和肥料,进行综合资源化全量化利用。

该模式以区域粪污集中处置中心为核心,构建“政府部门+龙头企业+合作社+农户”四位一体的协同治理模式,采取政府部门监督监管、龙头企业带动、合作社服务实施和农户参与的形式,针对农废中心的收储运体系和“三沼”综合利用体系,建立运输服务、沼液肥安全农用、职业农民技术培训、种植和有机肥服务等五类合作社,构建覆盖收储运体系和“三沼”利用的全产业链服务网络,促进农业绿色高质量发展和带动更多农户增收致富。

### 3.5 多元激励、市场运作

针对农业废弃物资源化三大转化路径“沼气能源化利用、沼液肥料化应用和商品有机肥生产”,制定基于市场化机制的多元激励政策体系,构建“前端补贴-末端激励-受益付费”的复合框架,促进畜禽粪污资源化利用的市场化运营。在县域农废中心项目建设阶段,通过整合中央财政专项资金(如畜禽粪污资源化利用整县推进项目)和地方配套资金,弥补社会资本前期投入的不足;在产品应用端,推广有机肥施用,实施差异化的有机肥补贴政策,对末端利用的种植户给予沼液肥补贴和有机肥补贴,结合化肥减量增效行动,提升种植户使用意愿,促进种植业的生态化发展。同时,引入受益者付费机制,按照“谁污染谁付费、谁受益谁补偿”原则,建立第三方处理服务收费制度(如粪污30~50元/t),既可以让养殖企业节省设施投入和运营费用,又可以保障第三方运营主体的合理收益。形成“政策引导-市场驱动-主体参与”的良性循环机制,为农业绿色发展提供可持续的经济动力。

## 4 结论

规模化养猪场是农业面源污染的主要来源,种养脱节严重制约了农业可持续发展。目前畜禽粪污资源化利用仍面临多重瓶颈,包括种养脱节、安全利用技术体系不完善、经济性驱动不足以及可持续运营机制保障薄弱等。“集中+分散”协同治理模式通过明确政

府、养殖主体和第三方企业权责,形成“政策引导-市场驱动-主体参与”的良性机制,构建系统化、区域化的资源利用体系,可有效解决养殖污染治理难题。该模式的核心价值包括:作为种养结合枢纽,促进了养殖废弃物高效转化为农业资源;其次,整合技术服务和市场对接等功能,构建了助农增收的综合服务体系;最后,作为农村环境基础设施的重要组成部分,该模式在红壤区的推广,不仅促进了养殖废弃物高效转化,还通过粪肥统筹施用改善了土壤物化性质,实现了农业绿色转型与面源污染防治的协同发展,为农业绿色发展提供了重要支撑。

### 参考文献:

- [1] 刘迎春,刘宗正,王述柏,等.生猪养殖绿色低碳关键技术示范与推广[J].中国科技成果,2024,25(16):57-58.
- [2] 郑哲钲.“猪—沼—果”循环农业投资项目的经济效益和环境效应研究[D].福州:福建农林大学,2019.
- [3] Bai Z H, Ma W Q, Ma L, et al. China's livestock transition: Driving forces, impacts, and consequences[J]. Science Advances, 2018, 4(7): eaar8534.
- [4] 周志高,李忠佩,何园球,等.红壤丘陵区生猪规模化养殖及其对土壤与水环境的影响——以江西省余江县为例[J].土壤学报,2013,50(4):703-711.
- [5] Zhang C Z, Liu S, Wu S X, et al. Rebuilding the linkage between livestock and cropland to mitigate agricultural pollution in China[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2019, 144: 65-73.
- [6] Loyon L. Overview of manure treatment in France[J]. Waste Management, 2017, 61: 516-520.
- [7] 唐奇志,汪帆,时金泽,等.有机肥部分替代氮肥的盐碱土壤改良与水稻增产效应研究[J].土壤,2024,56(1):97-102.
- [8] 张耘堂.东北地区发展种养一体绿色农业的思考[J].农业与技术,2021,41(18):149-151.
- [9] 陈广银,吴佩,董金竹,等.不同初始pH对猪粪水酸化贮存过程及氮素损失的影响[J].土壤,2023,55(3):587-595.
- [10] 赵馨馨,杨春,韩振.我国畜禽粪污资源化利用模式研究进展[J].黑龙江畜牧兽医,2019(4):4-7,13.
- [11] 李永双,孙波,陈菊红,等.纳米膜覆盖对畜禽粪便好氧堆肥进程及恶臭气体排放的影响[J].环境科学,2021,42(11):5554-5562.
- [12] 张英慧,刘旭杰,李季,等.我国畜禽养殖粪污资源化利用装备现状与展望[J].中国农业大学学报,2024,29(12):196-208.
- [13] 巴士迪,张克强,杨增军,等.奶牛粪便翻堆式与槽式堆肥过程气体排放规律及养分损失原位监测[J].生态环境学报,2021,30(2):420-429.
- [14] 李骅,朱振明,王居飞,等.滚筒式堆肥反应器通风搅拌系统设计与试验[J].农业机械学报,2024,55(5):395-404.

- [15] 陈小丽, 桂孝树. “礼涑模式”: 循环农业树标杆[J]. 江西农业, 2021(13): 30–31.
- [16] 陈春飞, 徐树明, 万里平. 生猪养殖粪污减量化和集中全量化处理模式的探索与实践[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(21): 211–212.
- [17] 薛颖昊, 魏莉丽, 徐志宇, 等. 区域畜禽废弃物全量化处理利用的模式探索[J]. 中国沼气, 2018, 36(5): 77–81.
- [18] Jin S Q, Zhang B, Wu B, et al. Decoupling livestock and crop production at the household level in China[J]. Nature Sustainability, 2021, 4(1): 48–55.
- [19] Akram U, Quttineh N H, Wennergren U, et al. Enhancing nutrient recycling from excreta to meet crop nutrient needs in Sweden—a spatial analysis[J]. Scientific Reports, 2019, 9: 10264.
- [20] 蔡美芳, 刘晓伟, 吴孝情, 等. 基于土壤养分平衡的畜禽养殖承载力研究[J]. 土壤学报, 2018, 55(6): 1431–1440.
- [21] Izmaylov A, Briukhanov A, Shalavina E, et al. Pig manure management: A methodology for environmentally friendly decision-making[J]. Animals, 2022, 12(6): 747.
- [22] 谢新辉. 兵团农牧区环境综合整治技术模式研究[J]. 中国资源综合利用, 2017, 35(7): 100–101, 112.
- [23] 中华人民共和国农业农村部办公厅. 畜禽粪污土地承载力测算技术指南[S]. 2018, 农办牧[2018]1 号
- [24] 衡德茂, 史桃玉, 梁永晔. 规模猪场农牧结合关键技术的应用[J]. 中国畜牧业, 2018(10): 55–57.
- [25] Shi B Y, Wang S, Jiao J, et al. Recognition on characteristics and applicability of typical modes for manure & sewage management in pig farming: A case study in Hebei, China[J]. Waste Management, 2022, 148: 83–97.
- [26] Deng Y F, Xu J P, Liu Y, et al. Biogas as a sustainable energy source in China: Regional development strategy application and decision making[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 35: 294–303.
- [27] Cui Z L, Zhang H Y, Chen X P, et al. Pursuing sustainable productivity with millions of smallholder farmers[J]. Nature, 2018, 555(7696): 363–366.
- [28] Luo Y M, Stichnothe H, Schuchardt F, et al. Life cycle assessment of manure management and nutrient recycling from a Chinese pig farm[J]. Waste Management & Research, 2014, 32(1): 4–12.
- [29] 朱娟, 叶渊. 畜禽养殖粪污的处理利用模式探究[J]. 中国畜禽种业, 2022, 18(1): 58–59.
- [30] Zhou L L, Liang M, Zhang D Q, et al. Recent advances in swine wastewater treatment technologies for resource recovery: A comprehensive review[J]. Science of the Total Environment, 2024, 924: 171557.
- [31] Wei S, Chadwick D R, Amon B, et al. Comparison of nitrogen losses from different manure treatment and application management systems in China[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 306: 114430.
- [32] 施胜利, 侯勇, 王新锋. 我国畜禽养殖废水处理模式的研究进展[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2021(21): 29–35.
- [33] 中华人民共和国生态环境部. 畜禽养殖业污染物排放标准: GB 18596–2001[S]. 北京: 中国标准出版社, 2001.
- [34] 赵春燕. 微生物发酵零排放养殖模式介绍[J]. 中国畜牧业, 2017(6): 44–45.
- [35] 黄淑宽. 乡村振兴零排放零污染养牛新模式——发酵床养牛初探[J]. 现代畜牧科技, 2023(9): 103–106.
- [36] 中华人民共和国国务院办公厅. 国务院办公厅关于加快推进畜禽养殖废弃物资源化利用的意见[S]. 2017, 国办发〔2017〕48 号.
- [37] 中华人民共和国农业农村部. 对十四届全国人大一次会议第 6904 号建议的答复[Z]. 2023, 农办议〔2023〕354 号.
- [38] Duan Y M, Yang J F, Guo Y R, et al. Pollution control in biochar-driven clean composting: Emphasize on heavy metal passivation and gaseous emissions mitigation[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 420: 126635.
- [39] Li C N, Li H Y, Yao T, et al. Effects of swine manure composting by microbial inoculation: Heavy metal fractions, humic substances, and bacterial community metabolism[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 415: 125559.
- [40] Bello T S, Adebola M O, Asemoloye M D. Modified filters with *Penicillium chrysogenum* culture enhance removal of copper and iron contaminants in water[J]. Environmental Technology, 2022, 43(23): 3591–3599.
- [41] Chen L M, Chen S S, Zhang Y, et al. Co-occurrence network of microbial communities affected by application of anaerobic fermentation residues during phytoremediation of ionic rare earth tailings area[J]. Science of the Total Environment, 2023, 856: 159223.
- [42] Yang A Q, Zhang G M, Yang G, et al. Denitrification of aging biogas slurry from livestock farm by photosynthetic bacteria[J]. Bioresource Technology, 2017, 232: 408–411.
- [43] 张静, 岳政府, 周志高, 等. 一株环丙沙星降解菌及其在堆肥中的安全利用[J]. 中国土壤与肥料, 2023(2): 226–233.
- [44] Wang X X, Yue Z F, Zhang J, et al. Method for removing heavy metals in livestock manure/biogas residues and EKR-PRB coupling device. 2029895[P]. 2022-02-04.
- [45] 张迪, 周志高, 杨奕如, 等. 三种利用方式下红黏土红壤对猪粪安全消纳量[J]. 土壤通报, 2015, 46(5): 1245–1252.
- [46] Chen B Y, Azman S, Dewil R, et al. Alkaline anaerobic digestion of livestock manure: Unveiling mechanisms, applications, and perspective[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 477: 146852.
- [47] 杨智青, 丁海荣, 陈应江, 等. 水泡粪猪场粪污养分及风险因子季节性变化分析[J]. 江西农业学报, 2019, 31(2): 109–114.
- [48] 李寅秋, 郭冰, 张萌. 我国农机科技社会化服务体系发展现状研究[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(3): 242–248.
- [49] 张玉兰, 孙彩霞, 强者, 等. 辽宁省畜禽养殖粪污处理的种养关系现状及影响因素[J]. 生态学杂志, 2023, 42(5): 1234–1242.
- [50] 郭铁成. 中国生物燃气现状分析[J]. 现代物业(上旬刊), 2011, 10(4): 106–107.
- [51] 郑戈, 张全国. 沼气提纯生物天然气技术研究进展[J]. 农业工程学报, 2013, 29(17): 1–8.
- [52] Reganold J P, Wachter J M. Organic agriculture in the twenty-first century[J]. Nature Plants, 2016, 2: 15221.
- [53] 舒畅. 基于经济与生态耦合的畜禽养殖废弃物治理行为及机制研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.



- [54] 姚治榛. 畜禽粪污资源化利用模式的区域适宜性评价研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020.
- [55] 赵新峰, 李春. 政府购买环境治理服务的实践模式与创新路径[J]. 南京师大学报(社会科学版), 2016(5): 30–37.
- [56] 王建华, 钭露露, 王缘. 环境规制政策情境下农业市场化对畜禽养殖废弃物资源化处理行为的影响分析[J]. 中国农村经济, 2022(1): 93–111.
- [57] Zheng L, Zhang Q W, Zhang A P, et al. Spatiotemporal characteristics of the bearing capacity of cropland based on manure nitrogen and phosphorus load in mainland China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 233: 601–610.
- [58] 高玉鹏. 深度透析我国家禽健康养殖的问题[J]. 畜牧兽医杂志, 2013, 32(B04): 5–10.
- [59] Ao T J, Chen L, Chen Y C, et al. The screening of early warning indicators and microbial community of chicken manure thermophilic digestion at high organic loading rate[J]. *Energy*, 2021, 224: 120201.
- [60] Zhao Z X, Liu H Z, Zhao S X, et al. Screening and combination selection of multifunctional actinomycetes for aerobic composting[J]. *Microbiology Spectrum*, 2023, 11(6): e02053–23.
- [61] 蒋维政. 畜禽规模化养殖场环境污染防治措施[J]. 广东畜牧兽医科技, 2014, 39(3): 5–8.
- [62] 叶建涛. 推进畜禽粪污资源化利用的工作路径[J]. 畜牧业环境, 2023(18): 40–41.
- [63] 陈正荣. 大力推进畜禽粪污资源化利用促进畜牧业绿色发展[J]. 畜禽业, 2022, 33(2): 25–26.