



主持人: 葛成军

基于生态补偿视角的热带村镇废物处理及经济成本研究

徐兆基^{1#}, 杜明泽¹, 刘瑞彬², 李 唐³, 喻朝庆^{1*}

(1. 海南大学 生态学院, 海南 海口 570228 中国; 2. 海南省保亭县三道镇三道社区居民委员会, 海南 保亭 572316 中国; 3. 光大环保能源(陵水)有限公司, 海南 陵水 572400 中国)

摘 要: 农村废物处理成本核算对农业农村发展的可持续性至关重要。但中国热带农村地区的全链条技术途径和经济成本分析的一手公开资料极少, 这限制了农村废物综合管理途径的评估。本研究以海南省保亭黎族苗族自治县三道镇为例, 基于全生命周期法开展不同技术情景下的废物处理成本核算。结果表明, 三道镇生活固体废物集中处理成本为 941.32 万元·a⁻¹, 农村家庭厨余废物处理成本为 472.74 万元·a⁻¹; 农作物秸秆处理成本为 330.28 万元·a⁻¹, 果园修剪残枝的处理成本为 51.47 万元·a⁻¹。全镇 39% 的生活废水通过规模化集中系统处理, 成本为 318.5 万元·a⁻¹; 约 60% 废水经过自然村的分布式污水处理系统后排入水环境, 成本为 827.13 万元·a⁻¹; 仅 1% 生活废水当作肥料还田利用, 成本约 3.77 万元·a⁻¹。在经济成本和环境效益综合分析基础上, 建议从人员配置、工作效率、新能源运输等方面提高生活废物处理的效益; 加强秸秆的资源回收利用和污水的有机肥还田处理技术是综合最优的方法。本研究不仅为国内外废物处理技术的经济成本研究提供了科学依据, 还为流域生态补偿政策的实施提供了量化支持, 提出了优化补偿机制的建议, 旨在促进农村的可持续发展, 推动生态环境保护与经济效益的双赢。

关键词: 热带农村废物管理; 成本核算; 污水处理技术; 农村可持续发展

中图分类号: X799

文献标志码: A

文章编号: 1674-7054(2025)04-0627-12

徐兆基, 杜明泽, 刘瑞彬, 等. 基于生态补偿视角的热带村镇废物处理及经济成本研究 [J]. 热带生物学报, 2025, 16(4): 627-638. doi: 10.15886/j.cnki.rdswwb.20250014

农村人居环境改善是实施乡村振兴战略的重要战略部分^[1], 同时也是生态环境治理中的突出短板^[2]。长期以来, 相较于城市, 农村人居环境问题受到的关注较少, 然而环境问题对农村发展的影响却不容忽视^[3]。当前, 农村人居环境建设面临诸多挑战, 包括生活垃圾处理设施缺乏统筹布局和统一标准、污水管网覆盖率低且技术支持不足, 以及各地改厕质量和进展参差不齐等问题^[4-5]。这些问题的存在, 凸显了农村废物处理成本核算的重要性和紧迫性。

在乡村振兴的背景下, 农村人居环境整治不仅是改善环境质量的关键, 更是破解社会主要矛盾、建设和美乡村的重要途径^[6]。由于农村人居环境

境具有特殊性和复杂性的内在特点^[7], 因此, 改善农村人居环境需要与农村社会的结构特点相匹配^[8], 以提升农民幸福感为目标^[9], 加强组织管理建设^[10], 并尽快构建符合国情的人居环境标准^[11]。

从经济角度来看, 农村人居环境的改善依赖于村庄的经济能力和村民的支付能力^[12]。无论是改厕、增强垃圾收运处理能力, 还是推进生活污水城乡一体化管网建设, 都需要巨大的资金投入。研究表明, 农村居民家庭收入等经济因素对农村人居环境整治具有显著影响^[13]。农村经济发展提高了财政自给能力, 从而为人居环境改善提供资金支持, 从而促进环境质量的提升^[14]。

收稿日期: 2025-01-14

修回日期: 2025-02-17

基金项目: 海南省重点研发项目(ZDYF2023XDNY181)

*第一作者: 徐兆基(1997—), 男, 海南大学生态学院 2022 级硕士研究生。E-mail: 22210713000042@hainanu.edu.cn

*通信作者: 喻朝庆(1972—), 男, 博士, 教授。研究方向: 可持续生态学。E-mail: Chaoqingyu@hainanu.edu.cn

然而,中国农村废物处理仍面临严峻挑战。随着农村经济发展和生活水平的提高,废物种类和数量显著增加,导致严重的环境问题^[15]。首先,农村地区土地辽阔且人口稀少,导致产生的废物分散不集中。其次,农村固态废物的种类和数量每年都在增加,从而增强了其破坏性影响。第三,与城市固体废物相比,农村固态废物的可回收价值相对较低,这使得在农村环境中建立闭环废物处理链变得复杂^[16-17]。此外,尽管农村污水处理技术有所进步,但由于经济发展不平衡,许多地区仍面临处理设施运维困难、出水质量不达标等问题^[18-20]。

在此背景下,农村废物处理成本核算成为合理规划资金投入、保障废物处理可持续推进的关键,同时,经济因素是决策者在选择废物处理方法时的基本考虑因素^[21]。然而,当前国内外对农村固态和液态废物处理的生命周期成本评估研究较为有限。在废水处理的研究中,大量文献往往只关注处理系统的一个环节,如废水处理环节^[22-23]、污泥处理环节^[24]和营养物质的回收环节^[25-26],比较环节中的最佳工艺解决方案并分析环境影响因素。也有针对处理场所的完整工艺研究,其中大多数集中在升级核心系统和评估大型城市污水处理场所的效

率性能^[27-28]。此外,大多数研究仅使用生命周期评价方法对废水处理系统进行了环境评估^[29-30],并没有与经济评估联系起来。尽管近年来关于中国城市固体废物管理的研究较多^[31-33],但农村地区的研究却不足^[34],尤其是在成本分析方面。

为补充热带农村地区的全链条技术途径和经济成本分析数据的匮乏,本研究选择了中国海南省保亭县三道镇作为典型案例进行研究,该镇是三亚市重要的城市饮用水水源地—赤田水库流域上游区域,具有重要的生态保护价值。2019—2021年,三亚市与保亭县积极开展生态补偿机制创新试点工作,签署《赤田水库流域上下游横向生态保护补偿协议》。然而,目前生态补偿价格的量化依据薄弱,亟需科学的数据支持。因此,本研究基于收集的一手数据,采用生命周期成本计算方法,对固态和液态废物处理的成本进行了核算。不仅为国内外废物处理技术的经济成本研究提供了科学依据,也为流域生态补偿政策的实施提供了量化支持,具有重要的现实意义和应用价值。

1 材料与方法

1.1 研究区域和背景 三道镇(18°18'N, 109°29'E)位于海南省三亚市赤田水库流域的上游,是赤田

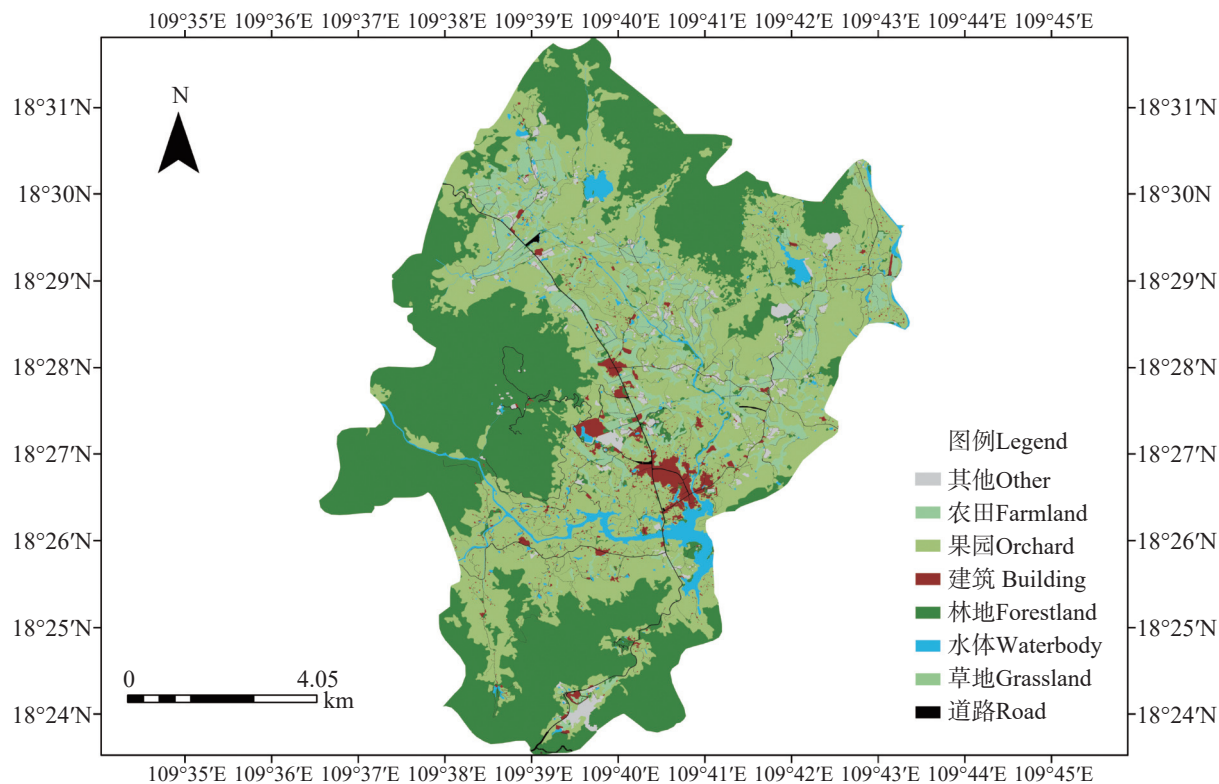


图1 三道镇区位及土地利用(海南,中国)

Fig. 1 Location and land use of Sandao town (Hainan Province, China)

水库的主要水源地之一(图1)。该镇属丘陵地貌,为热带气候区,年平均气温为24℃,年降雨量为1600 mm。总面积为100.7 km²,当地以农业为主。其耕地面积为6.95 km²,果园面积为43 km²,林地面积为42.3 km²。包括50个行政村,总人口为22169人,共计6944户,年人均可支配收入为18417元。

1.2 数据来源 本研究数据主要来源于3个方面:一是地方政府所提供的统计年鉴与技术报告;二是通过实地调研,从当地农民以及废物处置地方管理人员处收集的调查问卷;三是通过试验分析,将当地采集的废物样品通过试验分析获得所需数据。

从当地统计年鉴和地方技术报告中,获取了人口数据^[35]和种植结构数据^[36]、固废处理系统的基本信息^[37]、固废处理的数量及成本^[38]、服务人口数据^[39]和污水处理效率的相关数据^[40,41]。本研究使用的土地利用数据由海南省政府(<https://www.hainan.gov.cn/>)提供,涵盖了三道镇的土地利用情况,并使用ArcGIS根据相关数据绘制地图。

2024年通过设计问卷调查作物秸秆、果树残枝及污水处理相关信息,共收回122份有效问卷。其中包括56份作物问卷,涵盖地点信息、作物种类及秸秆还田方式;34份果树问卷,涵盖了地点信息、果树种类及残枝还田方式;32份污水处理问卷,涵盖地点信息、家庭处理设施类型、建设时

间、建设成本及出水去向。这些问卷数据为本研究提供了一手资料,用以分析当地废物处理的情况。

试验获得的总氮、总磷含量数据,依据国家环境保护标准HJ 636—2012^[42]和国家标准GB 11893—89^[43]测定。

1.3 研究范围 本研究主要核算当地固体废物和液态废物的处理成本和处理效率。其中,固体废物包括家庭日常产生的垃圾、作物秸秆和果树残枝,剩余废物和大件废物由于数量较少,不作为研究对象,作物秸秆和果树残枝来源于当地主要作物和果树;液态废物包括当地村民日常生活产生的污水。

1.4 废物处理成本的计算 本研究基于三道镇现有的废物分类方法和主要处理流程,采用生命周期成本计算方法评估农村废物处理。研究涵盖3种固体废物处理(厨余垃圾、其他家庭垃圾、农业残留物)和3种液态废物处理(规模化集中处理系统、村分布式污水处理系统和个体农户家庭养分循环处理系统),如图2所示。研究范围包括三道镇固体废物和液态废物的收集、运输、处理及最终处置的全过程。基于该研究内容建立了综合成本计算框架,涵盖与土地建设、运行成本及后处理相关的费用。利用实地调查获得的数据,计算各单位成本,最终整合出三道镇固体废物和液态废物的全流程处理成本。



a. 规模化集中处理系统; b. 村分布式污水处理系统; c. 个体农户家庭养分循环处理系统。

a. Centralized scaled sewage treatment system; b. Village distributed sewage treatment system; c. Individual household nutrient recycling treatment system.

图2 三道镇污水处理模式

Fig. 2 Three sewage treatment models in Sandao town

1.4.1 固体废物处理费用 根据当前三道镇的垃圾处理模式,固体废物处理成本计算:

$$C_{\text{solid_waste}} = C_{\text{other}} + C_{\text{kitchen_waste}} + C_{\text{agricultural_residues}}, \quad (1)$$

式中, $C_{\text{solid_waste}}$ 表示废物处理的总成本, C_{other} 表示其他家庭废物的总成本, $C_{\text{kitchen_waste}}$ 表示厨余废物处理的成本, $C_{\text{agricultural_residues}}$ 表示处理农作物秸秆和果园修剪残留物的成本。

家庭垃圾处理成本计算公式:

$$C_{\text{other}} = C_{\text{waste_transfer_station}} + C_{\text{plant}}, \quad (2)$$

式中, $C_{\text{waste_transfer_station}}$ 表示三道镇垃圾转运中心的总处理成本, C_{plant} 表示垃圾处理厂的总处理成本。

三道镇垃圾转运中心的总处理成本计算公式如下:

$$C_{\text{waste_transfer_station}} = C_{\text{Monitoring_construction}} + C_{\text{Factory_construction}} + C_{\text{operation}}, \quad (3)$$

式中, $C_{\text{transport}}$ 表示垃圾转运站的总成本, $C_{\text{Monitoring_construction}}$ 表示监控设施成本, 按 3 年计算, $C_{\text{Factory_construction}}$ 表示建厂成本, 按 20 a 计算, $C_{\text{operation}}$ 表示运行成本, 包括员工工资、车辆日常运行能耗和公司税收。

垃圾处理厂处理总费用的计算公式:

$$C_{\text{plant}} = C_{\text{construction}} + C_{\text{operation}} + C_{\text{discount}} + C_{\text{interest}} + C_{\text{other}}, \quad (4)$$

式中, C_{plant} 表示垃圾处理厂的总成本, $C_{\text{construction}}$ 表示建设成本, 包括土地的购买成本、公共厂房的建设成本和设备的购置成本, 按 28 a 计算, $C_{\text{operation}}$ 表示运行成本, 包括材料成本、维修成本、飞灰固化处置成本、人工成本、管理成本等, C_{discount} 表示折旧成本, C_{interest} 表示公司在融资过程中产生的利息成本, C_{other} 表示其他成本。

厨余垃圾处理成本计算公式:

$$C_{\text{kitchen_waste}} = C_{\text{operation}}. \quad (5)$$

式中, $C_{\text{operation}}$ 为处理厨余垃圾的运行成本。集中处理的运行成本包括烘干能耗、产生渗滤液的运输和处理成本, 运行成本中厨余垃圾产生的渗滤液按照厨余垃圾产生量的 25% 计算^[44], 建设成本和运输成本包含在家庭垃圾处理过程中, 因此不做重复计算; 厨余垃圾分散处理的运行成本包括喂养家禽所花费的时间成本。

根据调研情况, 三道镇当前作物秸秆处理方式主要为焚烧和还田, 果树残枝当地处理方式是将树枝就近还田, 依靠土地自然分解。因此, 秸秆和果树残枝的处理成本将按照每天工作时间 8 h, 薪酬 230 元的劳动力成本为基准, 根据当地村民处理作物秸秆和果树残枝所花费的时间计算处理成本。

1.4.2 液态废物处理的成本 三道镇污水处理成本计算公式如下:

$$C_{\text{liquid_waste}} = C_{\text{decentralized_processing}} + C_{\text{individual_farmers}} + C_{\text{treatment_plant}}, \quad (6)$$

式中, $C_{\text{liquid_waste}}$ 表示污水处理成本, $C_{\text{decentralized_processing}}$ 表示村分布式污水处理系统成本, $C_{\text{individual_farmers}}$ 表示个体农户家庭养分循环处理系统成本, $C_{\text{treatment_plant}}$ 表示规模化集中系统处理成本。

村分布式污水处理系统成本计算公式如下:

$$C_{\text{liquid_waste}} = C_{\text{construction}} + C_{\text{operation}}, \quad (7)$$

式中, $C_{\text{construction}}$ 表示处理设施的建设成本, 按 15 a 计算, $C_{\text{operation}}$ 表示处理技术的运行成本, 村集中处理技术运行成本根据《海南省农村生活污水处理技术指引》^[45] 计算, 成本单价为 0.45 元·t⁻¹。

个体农户家庭养分循环处理系统成本计算公式如下:

$$C_{\text{individual_farmers}} = C_{\text{construction}} + C_{\text{operation}}, \quad (8)$$

式中, $C_{\text{individual_farmers}}$ 表示个体农户自建化粪池技术的成本, $C_{\text{construction}}$ 表示建设成本, 包括材料购买和人工成本, 按 15 a 计算, $C_{\text{operation}}$ 表示运行费用, 包括定期抽取干物质, 每月使用吸粪机抽取两次。每次操作大约需要 2 h, 按人工投入时间计算, 每月 1 个工作日。

规模化集中系统处理成本计算公式如下:

$$C_{\text{treatment_plant}} = C_{\text{construction}} + C_{\text{operation}}. \quad (9)$$

式中, $C_{\text{treatment_plant}}$ 表示规模化集中系统处理成本, $C_{\text{construction}}$ 表示建设成本, 包括土地租赁费用和设备购买费用, 按 25 a 计算, $C_{\text{operation}}$ 表示运行费用, 包括各处理设备日常运行的能耗费用、药剂费用、人员工资、维护费用、污泥处置费用、管理费用, 三道镇污水处理厂处理技术的建设成本和设备购买合并计算, 折旧成本也暂不考虑。

2 结果与分析

2.1 数据获取概况

2.1.1 三道镇垃圾组分及处理方式 三道镇每年产生约 5 621.58 t 生活垃圾, 并分成两个阶段进行处理。对三道镇垃圾转运中心的走访和现场调查结果显示, 当地产生的垃圾性质为厨余(15%)、园林(8%)、纸类(10%)、橡胶和塑料类(42%)、纺织品(5%)、木材和竹类(3%)、金属(2%)、灰尘和土(5%)、砖瓦陶瓷(3%)、玻璃(3%)和其他类型(4%)。在生活垃圾处理的第 1 阶段中, 政府与环卫公司签订合同, 环卫公司负责垃圾收集和运输, 并雇佣当地村民进行日常收集。将各个村庄的垃圾统一运输到三道镇垃圾中转站; 在第 2 阶段, 三道镇垃圾中转站将压缩后的垃圾运送至垃圾处理厂进行焚烧处理。

2.1.2 农业种植及处理情况 三道镇的主要作物种植面积为 10.78 km², 构成比例分别为水稻 (*Oryza sativa*) 37.47%、辣椒 (*Capsicum annuum*) 33.11%、茄子 (*Solanum melongena*) 15.39%、豇豆

(*Vigna unguiculata*)10.2%、花生(*Arachis hypogaea*)2.69%和甘薯(*Ipomoea batatas*)1.11%。秸秆的年总产量为26 802.95 t, 构成比例分别为辣椒50.4%、茄子26.5%、豇豆13.2%、水稻9.4%、花生和甘薯0.5%。果园种植面积为14.33 km², 构成比例分别为槟榔(*Areca catechu*)45.85%、菠萝蜜(*Artocarpus heterophyllus* Lam.)17.49%、椰子(*Cocos nucifera*)13.42%、芒果(*Mangifera indica*)4.71%、龙眼(*Dimocarpus longan*)3.43%和香蕉(*Musa acuminata*)0.23%。

三道镇的作物秸秆主要采用焚烧和还田两种处理方式, 果树残枝采用就近还田处理方式。当地20%的作物秸秆为焚烧处理, 人均处理成本为62.94元·a⁻¹; 80%的作物秸秆为还田处理, 人均处理成本为170.49元·a⁻¹。果树修剪残枝通常就地还田自然分解, 人均处理成本为23.22元·a⁻¹。

2.1.3 污水处理方式 2022—2024年, 三道镇政府对集中、分散和个体农户3种污水处理模式投入资金支持以确保污水处理的有效性和可持续性。为了提高下游地区饮用水质量, 三道镇政府根据当地生活情况采取了3种污水处理方法: 规模化集中处理、村分布式污水处理和个体农户家庭养分循环处理, 并为这些技术的实施提供资金支持。根据赤田水库流域生态补偿重点工作台账数据统计, 政府投资1.7亿元用于规模化集中处理系统, 确保在人口集中的镇区有效处理和净化污水; 投资8 766万元用于建设村分布式污水处理系统, 解决分散农村地区的污水处理问题; 政府为每户提供2 000~5 000元的补贴, 推动农户自家三级化粪池的建设。

(1) 村分布式污水处理

三道镇采用多种技术建设村污水处理池(接触氧化工艺、一体化AO技术或人工湿地处理工艺)^[26], 污水池每年共处理707 306.77 t废水。生活灰水通过管道被输送至村污水处理池; 而卫生间黑水先在农户自家的三级化粪池中进行初步处理, 其中, 第1级池用于沉淀固体杂质和粪便, 第2级池借助厌氧发酵来分解有机物并减少病原体, 第3级池完成最终净化。经过初步处理后, 黑水通过管道被输送至村污水池处理。

(2) 规模化集中处理

三道镇的污水处理厂采用CASS技术, 年处

理污水451 735.5 t, 其高效的污染物去除率确保了处理后的水能够安全排放到附近河流, 有效保证了下游地区的水环境质量。其中, 化学需氧量(chemical oxygen demand, COD)去除率为92%, 生化需氧量(biochemical oxygen demand, BOD)去除率为95%, 悬浮固体(suspended solids, SS)去除率为96%, 氨氮(ammonia-nitrogen, NH₃-N)去除率为98%, 总氮(total nitrogen, TN)去除率为71%, 总磷(total phosphorus, TP)去除率为91%^[41]。

(3) 个体农户还田处理

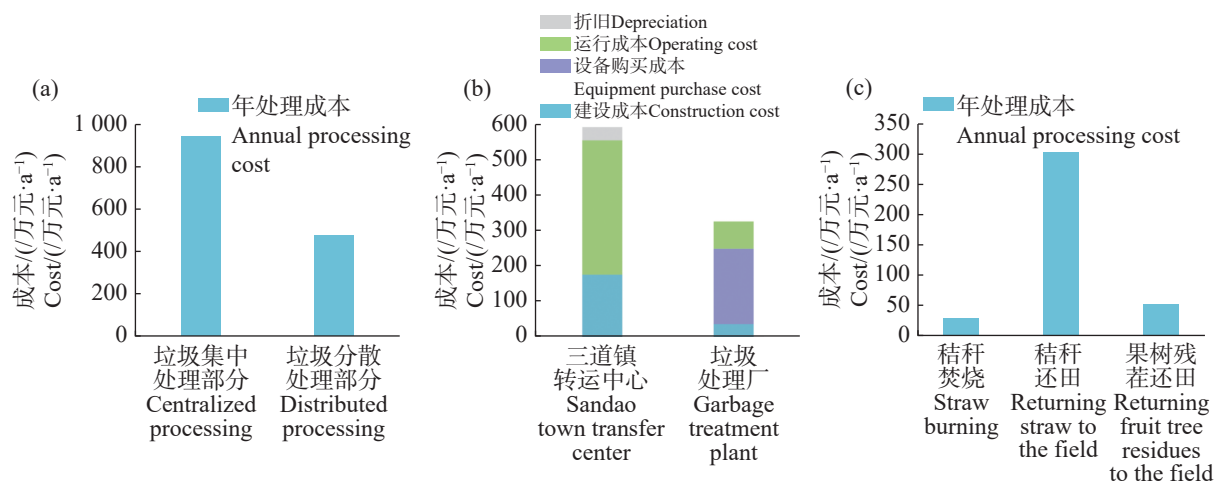
三道农场九队采用了一种基于养分循环的黑水处理方式。首先, 黑水流入自家建造的三级化粪池, 在1级池处理后的粪便经堆沤可直接还田用作肥料, 而经过第2级池和第3级池处理后的黑水排入政府修建的三级化粪池, 再次经过3级处理后, 通过管道将处理后的污水用于果地灌溉。

2.2 废物处理技术的成本分析和环境影响

2.2.1 生活垃圾处理成本 三道镇集中处理的垃圾成本为941.32万元·a⁻¹(图3-a), 其中, 建设成本占23.16%, 设备购买成本占22.63%, 运行成本占50.37%, 折旧成本占3.84%(图3-b); 分散处理的垃圾成本为472.74万元·a⁻¹(图3-a)。秸秆焚烧成本为27.91万元·a⁻¹, 秸秆还田处理成本为302.37万元·a⁻¹, 果园修剪残枝处理成本为51.47万元·a⁻¹(图3-c)。

2.2.2 生活垃圾处理的环境影响 三道镇集中收运的垃圾采用焚烧处理, 在这个过程中会产生污染物, 主要包括41.25 kg颗粒物、98.78 kg二氧化硫、1715.84 kg氮氧化物、48.56 kg氯化氢和65.81 kg一氧化碳。日均排放质量浓度为: 2.4 mg·m⁻³颗粒物, 96.89 mg·m⁻³氮氧化物, 8.53 mg·m⁻³二氧化硫, 3.76 mg·m⁻³氯化氢, 3.55 mg·m⁻³一氧化碳, 均符合海南省废物焚烧污染控制标准^[46](图4-a)。

在废物收运阶段, 空气污染物主要源于垃圾收集和运输过程中的车辆所排尾气。基于GREET软件中燃油车辆排放数据库计算, 三道镇七辆小型垃圾收集车年行驶14 075.5 km, 消耗3 057.48 L柴油, 年排放二氧化碳8 191.06 kg、氮氧化物55.03 kg、细颗粒物1.53 kg和硫氧化物0.61 kg。此外, 两辆25 t垃圾压缩运输车年行驶58 400 km, 消耗22 192 L柴油, 年排放二氧化碳59 470.56 kg、氮氧化物399.46 kg、细颗粒物11.1 kg和硫氧化

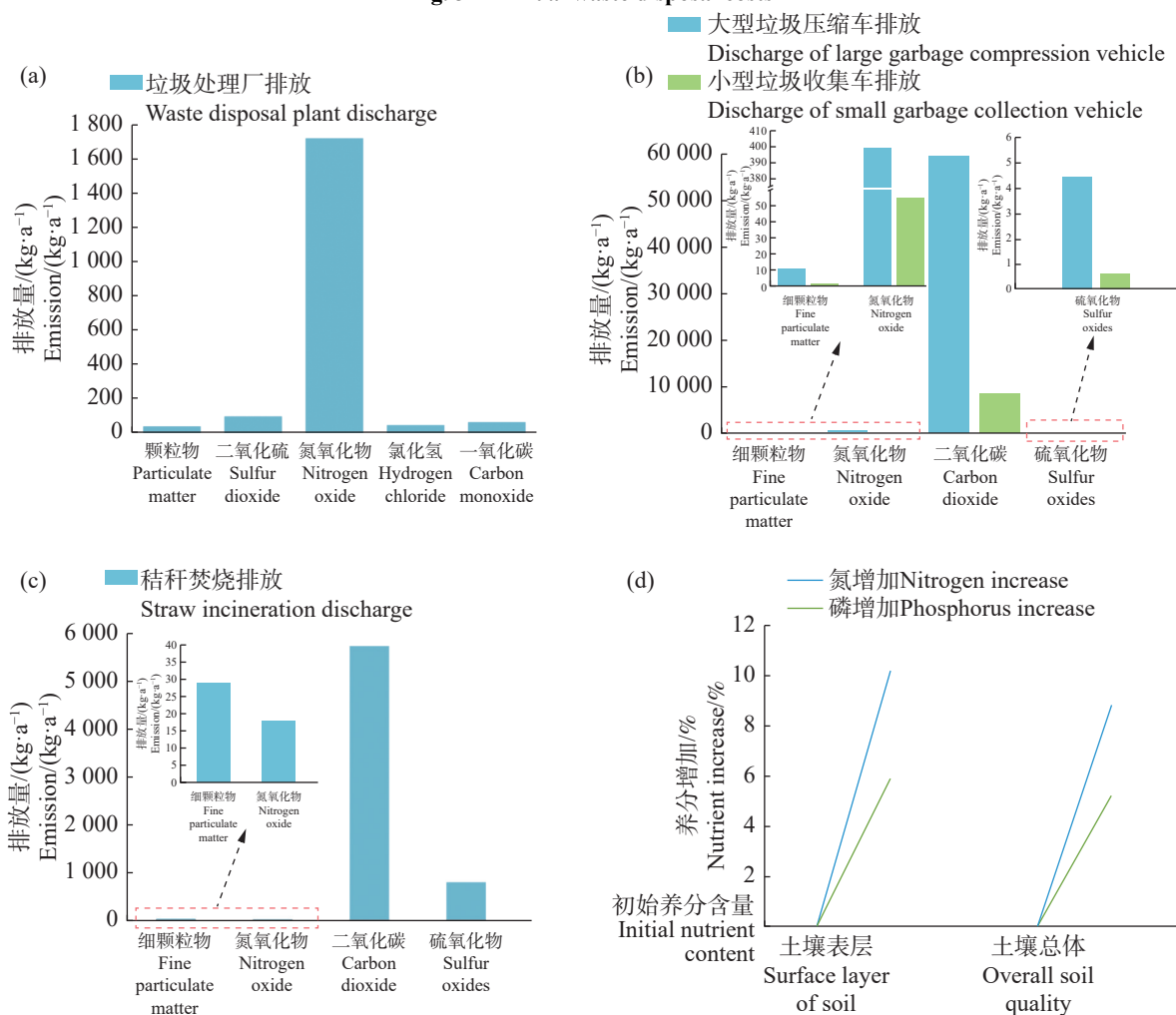


a. 垃圾集中处理和分散处理年成本; b. 转运中心和废物处理厂各环节年处理成本; c. 秸秆废物年处理成本。

a. annual costs of centralized and decentralized waste disposal; b. Annual processing costs of each link in the transfer center and waste treatment plant; c. Annual disposal cost of straw waste.

图 3 2023 年废物处理费用

Fig. 3 Annual waste disposal costs



a. 垃圾处理厂处理垃圾产生的气体排放; b. 柴油车辆运输产生的气体排放; c. 秸秆燃烧产生的气体排放; d. 秸秆还田对土壤氮磷含量的提升。

a. Gas Emissions from Garbage Treatment Plants; b. Gas emissions generated by diesel vehicle transportation; c. Gas emissions from straw burning; d. The increase of soil nitrogen and phosphorus content by returning straw to the field.

图 4 固体废物处理对环境的影响

Fig. 4 Impact of solid waste treatment on the environment

物 4.44 kg(图 4-b)。

三道镇焚烧处理的作物秸秆,会产生大量一氧化碳、二氧化碳等污染物,对环境带来一定影响。参考相关研究内容^[47-48],选用其中的秸秆焚烧污染物排放系数进行计算,结果显示,三道镇秸秆焚烧的年排放量为一氧化碳 794 t、二氧化碳 5 712 t、氮氧化物 18 t 和细颗粒物 29 t(图 4-c)。

已有关于作物秸秆还田增加土壤养分的研究^[49]指出,将作物残留物还田能够有效提升土壤中氮、磷养分的储量。秸秆还田使土壤氮储量增加 8.8%,磷储量增加 5.2%,这些养分的提升大多在表层土壤,其中,氮储量增加 10.2%,磷储量增加 5.9%,而深层土壤的养分几乎没有变化(图 4-d)。

2.2.3 液态废物处理成本 在三道镇,基于不同污水处理技术特性,三种污水处理系统呈现出差异化的处理成本,如图 5 所示。村分布式污水处理系统成本为 827.13 万元·a⁻¹,其中,建设成本占 86%,运行成本占 7%,村民自家小型三级化粪池建设成本占 6%,运行成本占 1%。三道镇规模化集中处理系统成本为 318.5 万元·a⁻¹,其中,建设成本占 69%,运行成本占 31%。三道九队个体农户还田处理系统成本为 3.77 万元·a⁻¹,其中,建设成本占 19%,运行成本占 81%。

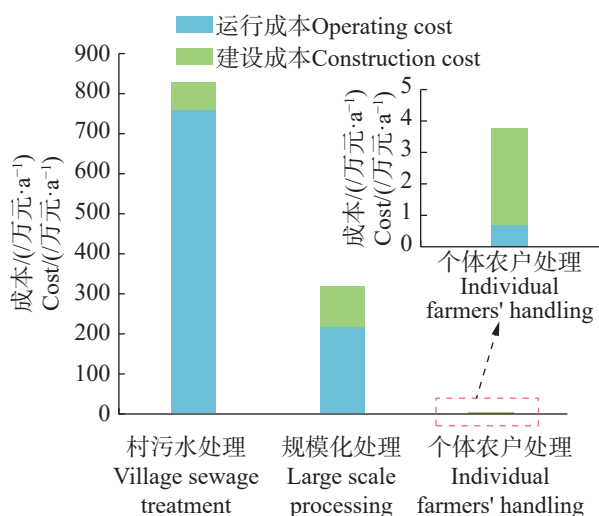


图 5 不同污水处理方式的年成本

Fig. 5 Annual costs of different sewage treatment methods

2.2.4 污水处理总氮与总磷质量浓度变化 为研究三道镇污水治理成效,本研究选取 36 户当地农户作为研究样本,针对其家庭污水排放口、三级化粪池出水口、村集中污水处理池进出水口,以

及污水处理厂进水口与出水口,展开水样采集和试验分析工作,在不同处理阶段,获取污水中总氮和总磷质量浓度数据。

家庭污水排放时,排放口的总氮和总磷质量浓度分别为 114、14 mg·L⁻¹。经过 3 级化粪池处理,总氮和总磷质量浓度分别降至 62、12 mg·L⁻¹,去除率分别为 46% 和 14%。处理后的污水进入村污水处理池,进水总氮和总磷质量浓度分别为 13、3 mg·L⁻¹,经过村污水处理池处理,总氮和总磷质量浓度分别降至 10、2 mg·L⁻¹。排入污水处理厂的污水,初始总氮和总磷质量浓度分别为 16.23、1.88 mg·L⁻¹,经过污水处理厂处理,总氮和总磷质量浓度分别降至 4.76、0.17 mg·L⁻¹。相比之下,农户自建化粪池处理的污水总氮和总磷初始质量浓度分别为 13.64、3.46 mg·L⁻¹,然而,处理后总氮质量浓度为 11.01 mg·L⁻¹,而总磷质量浓度略微增加至 3.67 mg·L⁻¹(图 6)。

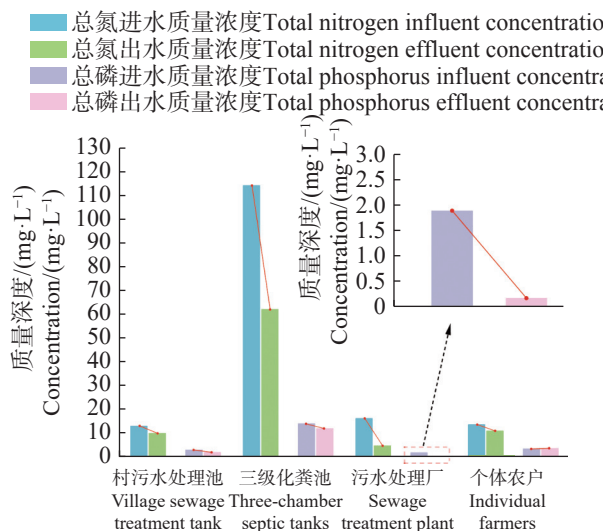


图 6 不同污水处理方式的污水处理效率

Fig. 6 Sewage treatment efficiency of different methods

3 讨论

本研究主要针对中国热带农村地区废物处理全链条技术路径和经济成本分析中数据匮乏的问题,进行了系统的研究和补充。基于提升农村废物处理可持续发展的需求,以海南省热带农村地区——三道镇作为研究切入点,系统地探究了多种废物处理技术的成本构成及其所产生的环境效应。研究结果表明,集中式与分散式处理系统采用的处理方式不同,进而导致这两种处理模式在成本构成方面呈现出显著的差异性特征。基于不

同的处理模式, 根据对应人口数量来计算人均成本。三道镇废物处理的建设成本为每人11 512.44元, 在建设成本中, 生活垃圾处理占 34%, 生活污水处理占 66%。运行成本为每人每年 605.65 元, 农业废物处理占 14%, 生活垃圾处理占 73%, 生活污水处理占 13%。

3.1 生活垃圾处理 三道镇的废物处理成本中, 建设成本占 49.63%, 运行成本占 50.37%。这一成本分布与 Fang 等^[50]研究者对中国 636 个城市废物处理系统整体性能的建模分析结果相符, 虽然在 Fang 等^[50]的研究中, 建设成本占比为 31%, 运行成本占比为 69%, 但整体趋势相近, 具体地区的差异可能导致了成本分布上的不同。与其他地区相比, 三道镇的生活垃圾处理成本偏高。例如, 与天津市西青区水高庄村 322 元·t⁻¹^[51]及同省琼海市某村庄 304.5 元·t⁻¹^[52]的垃圾处理成本相比, 三道镇的垃圾处理成本为 907.68 元·t⁻¹, 明显高于这两地。未来可以探寻更有效的方式降低处理成本并提升经济效益。当前三道镇垃圾处理成本中, 劳动力成本占较高比例, 这主要归因于农村住户分布较为分散、道路状况复杂, 因此, 环卫工人需要依赖小型垃圾收集车辆作业, 而小型垃圾收集车的收集效能与服务半径有限, 为完成垃圾收集任务, 需投入更多的人力, 导致劳动力成本在垃圾收运总成本中的占比高达 64%。为有效降低垃圾处理成本, 在人员配置方面, 可通过人员合理化调整、提高工作效率和适度采用机械化设备来减少劳动力支出; 在车辆使用方面, 可以使用更节能的车辆并定期维护, 例如, 探索使用新能源车辆替代传统燃油车辆, 通过降低能源消耗, 进一步减少能耗费用; 在垃圾收集与运输方面, 可以通过优化收集路线、科学安排收集频率、合理调度运输车辆等方式降低成本。此外, 还可以探索将垃圾转化为可利用资源的技术, 从垃圾处置中获取额外收益, 例如, 将固体废物转化为热能、电力、合成气、沼气、液态生物燃料、生物油或固态燃料等资源, 挖掘垃圾资源化的潜在经济效益^[53], 为三道镇垃圾处理成本优化和处理技术的可持续性发展提供新的思路与方向。

3.2 农业废物处理 当前, 作物秸秆和果园修剪残枝的处理主要依赖相对简易的人力方式, 若积极引入机械化模式来替代依赖人力的部分, 将会

产生许多效益。机械化作业具备高效性的特征, 能够大幅缩短处理时间, 降低时间成本, 使作物秸秆处理流程更加高效、经济。未来还可以重视先进秸秆还田技术的推广应用, 包括沟埋秸秆还田、秸秆埋施结合地膜覆盖和秸秆与施肥结合的还田方式^[54-55]。同时, 为提升资源化利用水平, 还应考虑秸秆资源回收利用技术, 例如, 利用平模压块机将秸秆进行干燥、粉碎与加压, 形成高密度固态燃料的生产, 不仅具有潜在的经济收益, 也可大幅减少温室气体排放^[56]。此外, 将秸秆加工成饲料提供给大型畜禽养殖场也是一个可行途径, 农户可通过出售秸秆获得收入, 畜禽养殖场则可利用秸秆饲料进行养殖, 而产生的粪便又可转化为沼气用于发电, 剩余的堆肥可用于农田施肥, 从而形成可持续的秸秆利用模式^[57]。

3.3 污水处理 本研究揭示了三道镇不同污水处理系统(村分布式污水处理系统、规模化集中处理系统和个体农户家庭养分循环处理系统)在成本结构上的差异。村分布式污水处理系统成本中, 建设成本占 86%, 运行成本占 7%, 村民自家小型三级化粪池建设成本占 6%, 运行成本占 1%。关睿^[58]对崇明区农村分散处理模式成本核算分析结果显示, 建设成本(81%)和运行成本(19%)与本研究成本结构相近。这说明处理池前期投入较大, 而后期对村污水处理运维资金相对不足以及不恰当的管理, 会随着时间的推移, 导致处理效率不断降低, 影响处理池的可持续性。规模化集中处理系统的建设成本占比 69%, 运行成本占比 31%。范彬等^[59]对常熟市小型管网收集与处理方式分析显示, 建设成本(67%)和运行成本(33%)与本研究规模化集中处理系统处理成本结构相近。这说明该系统在运营阶段需要持续的资金支持, 该处理技术采用较为成熟的处理模式, 处理效率稳定, 适合在人口相对集中的地区采用。个体农户还田处理系统的建设成本占 19%, 运行成本占 81%, 说明该模式对持续性的人工劳动依赖较强, 受劳动力可用性影响较大。

从成本角度来看, 3 种污水处理模式各有优劣, 单一模式难以在经济可行性和处理稳定性之间取得平衡。因此, 未来政府应根据当地的人口分布和经济发展优化污水处理的资金配置策略, 以提升农村污水治理的长期可持续性。农村污水

处理的主要挑战在于分散式系统日常维护不足和处理效率低。为提高农村污水处理设施的效率, 需要加强政策支持、监管力度和优化设计, 尤其要注重农村污水处理池运行的可持续性。在污水处理池的设计及运行阶段, 应建立综合数据库, 包括当地气候条件、水力特性、基质类别、植物种类、系统类型、使用年限和设计参数等, 以便当地根据经济情况选择更合适的污水处理技术^[60]。

3.4 生态补偿建议 关于赤田水库水质保障, 水源保护一直是区域生态环境保护的重要内容^[61]。废弃物处理过程中, 尤其是污水处理和生活垃圾处理等环节, 可能会对水质产生潜在影响。如果不能有效管理, 可能会影响水质。因此, 完善生态补偿机制, 通过引入项目补偿、政策补偿、技术补偿和智力补偿等非资金形式的补偿方式, 与资金补偿有机结合, 最大效益地发挥水生态补偿机制的作用^[62]。例如, 通过设立水质改善奖励机制, 对采用低污染、低排放技术的农户进行补偿或奖励。这不仅能促进生态环境的改善, 还能提高当地居民的环保意识。农村的生态环境保障同样需要通过有效的生态补偿机制来推动, 不仅可以改善当地的生态环境质量, 还能减少对下游赤田水库的污染。在补偿过程中, 农村居民和地方政府的积极参与至关重要^[63]。生态补偿可以作为一种激励机制, 鼓励他们在垃圾、秸秆和污水处理等方面采取更环保的措施, 通过选择 1~2 个主要农户开展补偿试点, 验证机制有效性后逐步推广。例如, 对采用有机种植、生态沟渠、沼气池等环保措施的农户, 按减排效果给予阶梯式补贴^[64]。通过建立生态产品价值实现机制和绿色金融业务, 可以吸引社会资本投入农村生态环境改善项目, 同时参与者通过碳排放权、排污权、用水权等交易机制获得经济收益^[65]。发展生态旅游和特色产业, 如林下经济和生态农业, 可以提高生态产品价值并增加农民收入, 推动居民和政府共同承担生态保护的责任。为了更客观地了解当地生态补偿效果, 可以开展水生态补偿效益评估, 结合流域和当地实际情况, 构建科学的评价指标体系, 通过生态、经济、社会效益等方面, 综合评估水生态补偿的作用效果^[66]。

3.5 本研究的局限性 本研究依据当地的标准成本进行分析, 然而, 劳动力市场的波动可能导致人

工成本的变化, 从而影响总体成本估算。在进行成本分析时未采用贴现率, 因为引入贴现率需要对未来的经济、环境变化进行预测, 这需要更为复杂的动态模型和长期数据支持。本研究主要侧重于实际现状分析和现有技术的直接经济成本评估, 采用贴现率可能会使分析变得过于复杂且难以获取准确数据, 进而影响研究的实用性和可靠性。

4 结 论

本研究深入探讨三道镇当前废物处理全链条的技术路径与经济成本, 研究发现: 1) 固体废物处理方面, 三道镇在成本分配与环境保护方面仍存在优化空间。相较于其他农村地区, 三道镇的固体废物处理在环境效益上虽不逊色, 但成本偏高, 主要归因于较高的劳动力成本投入, 尤其是秸秆处理主要依赖简单的人工还田方式。2) 污水处理方面, 三道镇采用了 3 种主要处理方式。综合考虑污水处理的可持续性以及农村地区的实际情况, 个体农户养分循环还田处理模式被证明为当前最优的处理模式。3) 基于全生命周期成本的计算方法, 对三道镇废物全链条技术途径进行综合分析。在此基础上, 核算出当前该地区不同废物处理技术的成本, 从而为流域生态补偿政策的实施提供有力的量化支撑。未来, 可结合本地环境保护资金的投入, 进一步探索更为高效、可持续的废物处理模式, 从而优化废物处理的资源配置, 促进三道镇乃至更广泛热带农村地区的可持续发展。

5 数据可用性

本研究所涉及的可公开数据已存储于 ZENODO 平台, 并分配有数字对象标识符 (DOI)。若需获取相关数据, 读者可通过以下 DOI 进行访问: 10.5281/zenodo.14880711。数据存储平台的网址: <https://zenodo.org/>。

参考文献:

- [1] 金迪. 和美乡村视阈下农村人居环境整治规划策略研究[J]. 农业经济, 2024(6): 50-53.
- [2] 唐阿楠. 宜居宜业和美乡村建设的价值旨归、困境及路径探析[J]. 农业经济, 2025(1): 80-83.
- [3] 卢青. 农村人居环境综合评价指标体系构建及实证: 以湖北省为例[J]. 统计与决策, 2022, 38(22): 71-75.

- [4] 韩振, 罗尔呷, 刘合光. 农村人居环境质量满意度及其影响因素研究: 基于 183 村 1362 份农户调查数据的分析[J]. 生态经济, 2024, 40(3): 210–214.
- [5] 韩瑞萍, 王帅. 农村人居环境治理: 现实之需、束缚所在与破解之路[J]. 农业经济, 2024(8): 66–69.
- [6] 刘洋, 周孟亮. 新时代背景下美丽乡村建设的重点领域及推进策略[J]. 生态经济, 2025, 41(2): 222–229.
- [7] 冷波. 行政引领自治: 农村人居环境治理的实践与机制[J]. 华南农业大学学报(社会科学版), 2021, 20(6): 15–22.
- [8] 于法稳, 胡梅梅, 王广梁. 面向 2035 年远景目标的农村人居环境整治提升路径及对策研究[J]. 中国软科学, 2022(7): 17–27.
- [9] 郭晓勋, 赵晨, 齐文浩. 农旅融合促进农村人居环境改善的理论分析与实证检验[J]. 求是学刊, 2024, 51(6): 56–69.
- [10] 黄云凌. 农村人居环境整治中的村民参与度研究: 基于社区能力视角[J]. 农村经济, 2020(9): 123–129.
- [11] 于法稳, 孙韩小雪, 吴青林, 等. 美丽中国建设背景下的健康乡村: 内涵特征、重点领域及推进策略[J]. 生态经济, 2025, 41(1): 35–43.
- [12] 邓茜月, 王永生, 黄晗. 四川省农村人居环境质量时空演化特征与驱动因素[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(5): 1111–1121.
- [13] PAN D, YU Y, JI K W. The impact of rural living environment improvement programs on the subjective well-being of rural residents in China[J]. *Humanities and Social Sciences Communications*, 2024, 11(1): 546.
- [14] YU C, LIU W X, KHAN S U, et al. Regional differential decomposition and convergence of rural green development efficiency: evidence from China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(18): 22364–22379.
- [15] HUANG K X, WANG J X, BAI J F, et al. Domestic solid waste discharge and its determinants in rural China[J]. *China Agricultural Economic Review*, 2013, 5(4): 512–525.
- [16] VINTI G, VACCARI M. Solid waste management in rural communities of developing countries: an overview of challenges and opportunities[J]. *Clean Technologies*, 2022, 4(4): 1138–1151.
- [17] RAHMAWATI E, MUJANTO, AMIR A, et al. Rural waste management model in creating an inclusive economy[C]//IOP conference series: earth and environmental science. IOP, 2023: 012005. doi:10.1088/1755-1315/1180/1/012005.
- [18] OBAIDEEN K, SHEHATA N, SAYED E T, et al. The role of wastewater treatment in achieving sustainable development goals (SDGs) and sustainability guideline[J]. *Energy Nexus*, 2022, 7: 100112.
- [19] WANG J, LIU P. Study on environmental pollution and governance in rural development[J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2019, 28(12): 9218–9222.
- [20] ZHANG C H, QUAN B X, TANG J W, et al. China's wastewater treatment: status quo and sustainability perspectives[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2023, 53: 103708.
- [21] NI Y Y, ZHANG Z. Comparison and selection of wet waste disposal modes for villages in agriculture-related towns taking Shanghai, China, as an example[J]. *Sustainability*, 2024, 16(12): 4936.
- [22] GALLEGOSCHMID A, TARPANI R R Z. Life cycle assessment of wastewater treatment in developing countries: a review[J]. *Water Research*, 2019, 153: 63–79.
- [23] SAIDULU D, MAJUMDER A, GUPTA A K. A systematic review of moving bed biofilm reactor, membrane bioreactor, and moving bed membrane bioreactor for wastewater treatment: comparison of research trends, removal mechanisms, and performance[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, 9(5): 106112.
- [24] FARAGÒ M, DAMGAARD A, LOGAR I, et al. Life cycle assessment and cost-benefit analysis of technologies in water resource recovery facilities: the case of sludge pyrolysis[J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56(24): 17988–17997.
- [25] KAR S, SINGH R, GURIAN P L, et al. Life cycle assessment and techno-economic analysis of nitrogen recovery by ammonia air-stripping from wastewater treatment[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 857: 159499.
- [26] MAYOR Á, VINARDELL S, GANESAN K, et al. Life-cycle assessment and techno-economic evaluation of the value chain in nutrient recovery from wastewater treatment plants for agricultural application[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 892: 164452.
- [27] FARAGÒ M, DAMGAARD A, MADSEN J A, et al. From wastewater treatment to water resource recovery: environmental and economic impacts of full-scale implementation[J]. *Water Research*, 2021, 204: 117554.
- [28] GUO X, GUO F, CHEN J L, et al. Optimal pathways for upgrading China's wastewater treatment plants for achieving water quality standards at least economic and environmental cost[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 344: 118397.
- [29] ALIZADEH S, ZAFARI-KOLOUKHI H, ROSTAMI F, et al. The eco-efficiency assessment of wastewater treatment plants in the city of Mashhad using emergy and life cycle analyses[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 249: 119327.
- [30] GUVEN H, ERIKSSON O, WANG Z, et al. Life cycle assessment of upgrading options of a preliminary wastewater treatment plant including food waste addition[J]. *Water Research*, 2018, 145: 518–530.
- [31] CHEN X D, GENG Y, FUJITA T. An overview of municipal solid waste management in China[J]. *Waste Management*, 2010, 30(4): 716–724.

- [32] ZHAO J Y, LI X, CHEN L, et al. Scenario analysis of the eco-efficiency for municipal solid waste management: a case study of 211 cities in western China[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 919: 170536.
- [33] XIAO W, LIU T, TONG X. Assessing the carbon reduction potential of municipal solid waste management transition: effects of incineration, technology and sorting in Chinese cities[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023, 188: 106713.
- [34] LIAO N L, LÜ F, ZHANG H, et al. Life cycle assessment of waste management in rural areas in the transition period from mixed collection to source-separation[J]. *Waste Management*, 2023, 158: 57–65.
- [35] 保亭县统计局. 2022年保亭县统计年鉴[R]. 保亭: 保亭黎族苗族自治县, 2023.
- [36] 三道镇农业服务中心. 农业统计年报[R]. 保亭: 保亭黎族苗族自治县, 2023.
- [37] 海南省环境科学研究院. 赤田水库流域农村生活垃圾分类实施方案[R]. 保亭: 保亭黎族苗族自治县, 2021.
- [38] 保亭黎族苗族自治县园林环卫服务中心. 保亭县三道社区环境卫生智慧化管理项目实施方案[R]. 保亭: 保亭黎族苗族自治县, 2022.
- [39] 中帆睿建工程咨询有限公司. 保亭县赤田水库上游流域农村生活污水治理工程初步设计说明[R]. 保亭: 保亭黎族苗族自治县, 2021.
- [40] 三道镇污水处理厂. 2023年三道镇污水进出水流量表[R]. 保亭: 保亭黎族苗族自治县, 2024.
- [41] 三道镇污水处理厂. 2023年三道镇水质统计表[R]. 保亭: 保亭黎族苗族自治县, 2024.
- [42] 中华人民共和国环境保护部. HJ 636—2012 水质 总氮的测定 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [43] 国家环境保护总局. GB 11893—1989 水质 总磷的测定 钼酸铵分光光度法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1990.
- [44] SHI L, CHEN H X, MENG H L, et al. How environmental policy impacts technology adoption: a case of landfill leachate[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 310: 127484.
- [45] 海南省生态环境保护厅. 海南省农村生活污水处理技术指引[R]. 海口: 海南省生态环境保护厅, 2016.
- [46] 海南省市场监督管理局. DB46/ 484—2019 生活垃圾焚烧污染控制标准[S]. 海口: 海南省市场监督管理局, 2019.
- [47] 彭立群, 张强, 贺克斌. 基于调查的中国秸秆露天焚烧污染物排放清单[J]. *环境科学研究*, 2016, 29(8): 1109–1118.
- [48] 杨夏捷, 鞠园华, 郭福涛, 等. 中国亚热带地区农作物秸秆露天燃烧污染物排放清单[C]//2017中国环境科学学会科学与技术年会论文集(第一卷). 厦门: 中国环境科学学会, 2017: 812–820.
- [49] LOU J, FANG L C, QIU T Y, et al. Crop residue return achieves environmental mitigation and enhances grain yield: a global meta-analysis[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2023, 43(6): 78.
- [50] FANG W, DING Y M, GENG J H, et al. High potential of coupling the source-separation and incineration promotion to reduce costs based on city-level cost-benefit analysis of municipal solid waste management strategies in China[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023, 197: 107099.
- [51] 李妍, 高贤彪, 梁海恬, 等. 华北都市型农村生活垃圾产生特征与处理模式构建[J]. *农业工程*, 2019, 9(8): 56–61.
- [52] 张静, 仲跻胜, 邵立明, 等. 海南省琼海市农村生活垃圾产生特征及就地处理实践[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(11): 2422–2427.
- [53] DING Y, ZHAO J, LIU J W, et al. A review of China's municipal solid waste (MSW) and comparison with international regions: management and technologies in treatment and resource utilization[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 293: 126144.
- [54] ZHANG J, HU K L, LI K J, et al. Simulating the effects of long-term discontinuous and continuous fertilization with straw return on crop yields and soil organic carbon dynamics using the DNDC model[J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 165: 302–314.
- [55] HUO L, PANG H C, ZHAO Y G, et al. Buried straw layer plus plastic mulching improves soil organic carbon fractions in an arid saline soil from Northwest China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 165: 286–293.
- [56] HU J J, LEI T Z, WANG Z W, et al. Economic, environmental and social assessment of briquette fuel from agricultural residues in China—a study on flat die briquetting using corn stalk[J]. *Energy*, 2014, 64: 557–566.
- [57] LIU Z, WANG D Y, NING T Y, et al. Sustainability assessment of straw utilization circulation modes based on the emergent ecological footprint[J]. *Ecological Indicators*, 2017, 75: 1–7.
- [58] 关睿. 农村污水处理模式的 LCA-LCC 集成分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2020. doi:10.27307/d.cnki.gsjtu.2020.002267.
- [59] 范彬, 胡明, 顾俊, 等. 不同农村污水收集处理方式的经济性比较[J]. *中国给水排水*, 2015, 31(14): 20–25.
- [60] WU H M, WANG R G, YAN P H, et al. Constructed wetlands for pollution control[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2023, 4(4): 218–234.
- [61] 边恩元, 李波, 穆芳, 等. 广元市城区居民生活饮用水水源卫生现状调查[J]. *现代预防医学*, 2016, 43(12): 2267–2270.
- [62] 王敏英, 郭庆, 林博虎, 等. 政策效益视角下我国流域生态补偿机制完善问题探析[J]. *世界林业研究*, 2023, 36(1): 130–135.
- [63] 陈诗华, 王玥, 王洪良, 等. 欧盟和美国的农业生态补偿政策及启示[J]. *中国农业资源与区划*, 2022, 43(1):

- 10–17.
- [64] 张洁, 陈美球, 谢贤鑫, 等. 农户生态耕种采纳行为影响因素实证研究: 基于江西省 1488 份农户的调查数据[J]. 生态经济, 2020, 36(5): 99–103.
- [65] 孔姝懿, 张蔚, 谢梦玲, 等. 澳大利亚国家公园生态产品价值实现: 理论框架与现实路径[J]. 世界林业研究, 2024, 37(6): 99–106.
- [66] 景晓栋, 田贵良, 张钰宁. 治水新思路下我国水生态补偿实践探索与政策建议[J]. 水利经济, 2024, 42(6): 50–57.

A study on tropical rural waste treatment and economic costs from the perspective of ecological compensation

XU Zhaoji^{1#}, DU Mingze¹, LIU Ruibin², LI Tang³, YU Chaoqing^{1*}

(1. College of Ecology, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China; 2. Sandao Community Residents' Committee, Sandao Town, Baoting County, Hainan 572316, China; 3. Everbright Environmental Energy (Lingshui) Co., Ltd., Lingshui, Hainan 572400, China)

Abstract: Cost accounting for rural waste treatment is vital for advancing the sustainability of agricultural and rural development. However, there is a severe lack of publicly accessible first-hand data on full-chain technological pathways and economic cost analyses in China's tropical rural regions, which constrains the evaluation of integrated waste management strategies. This study, conducted in Sandao Town, Baoting Li-Miao Autonomous County, Hainan Province, applies life cycle assessment to quantify waste treatment costs across multiple technological scenarios. Findings reveal centralized municipal solid waste treatment costs of 9.4132 million yuan·a⁻¹, household kitchen waste treatment costs of 4.7274 million yuan·a⁻¹, crop residue treatment costs of 3.3028 million yuan·a⁻¹, and orchard pruning waste treatment costs of 0.5147 million yuan·a⁻¹. For domestic sewage, 39% is processed via centralized systems at 3.185 million yuan·a⁻¹, 60% undergoes decentralized village-level treatment before discharge at 8.2713 million yuan·a⁻¹, and only 1% is reused as fertilizer at 37,700 yuan·a⁻¹. A holistic cost-benefit analysis recommends enhancing municipal waste management efficiency through staff optimization, workflow refinement, and new energy logistics, alongside prioritizing crop residue recycling and wastewater-to-fertilizer technologies as the most viable integrated solutions. This research not only offers a scientific foundation for global economic assessments of waste treatment technologies but also delivers quantitative insights to refine ecological compensation mechanisms, promoting rural sustainability through synergies between environmental preservation and economic growth.

Keywords: tropical rural waste management; cost accounting; sewage treatment technology; rural sustainable development

(责任编辑: 钟云芳)