

资阳市畜禽养殖面源污染协同治理与 “养殖 - 废弃物 - 种植”循环模式集成研究

吴菊珍^{1*}, 胥宏¹, 张珈硕¹, 邱诚^{1#}, 吴勇², 高进长¹

¹成都工业学院材料与工程工程学院, 四川 成都

²成都工业学院图书馆, 四川 成都

收稿日期: 2026年1月22日; 录用日期: 2026年2月28日; 发布日期: 2026年4月30日

摘要

为破解资阳市丘陵地区畜禽养殖面源污染治理适配性差、种养脱节、长效机制缺失等难题, 结合资阳市产业格局与山地丘陵地形特征, 构建“技术 - 模式 - 机制”三位一体的综合解决方案。在技术层面, 构建“UASB - 芬顿 - 阶梯式人工湿地”全链条技术体系, 创新阶梯式湿地适配坡地, 出水达《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB 18596-2001)一级标准。氮磷去除率超90%, 吨水处理成本2.0~2.5元, 较传统技术降低15%~20%。在模式层面, 紧扣安岳柠檬、乐至粮食主导产业, 设计差异化“养殖 - 废弃物 - 种植”循环模式, 实现废弃物资源化与产业需求精准匹配, 养殖场处理成本降25%, 种植户亩均增收800~1500元。在机制层面, 建立“政府 - 企业 - 农户”三维机制, 通过政策补贴、市场化运营、组织化参与平衡利益, 形成共赢格局。为川中丘陵及同类区域农业面源污染治理和循环农业发展提供技术支撑与示范。

关键词

资阳市, 畜禽养殖, 面源污染, 养殖 - 废弃物 - 种植, 循环模式

Synergistic Governance of Livestock and Poultry Breeding Non-Point Source Pollution and Integration Research on the “Breeding-Waste-Cultivation” Circular Model in Ziyang City

Juzhen Wu^{1*}, Hong Xu¹, Jiashuo Zhang¹, Cheng Qiu^{1#}, Yong Wu², Jinzhang Gao¹

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 吴菊珍, 胥宏, 张珈硕, 邱诚, 吴勇, 高进长. 资阳市畜禽养殖面源污染协同治理与“养殖-废弃物-种植”循环模式集成研究[J]. 土壤科学, 2026, 14(2): 102-112. DOI: 10.12677/hjss.2026.142011

¹School of Materials and Environmental Engineering, Chengdu Technological University, Chengdu Sichuan

²Library of Chengdu Technological University, Chengdu Sichuan

Received: January 22, 2026; accepted: February 28, 2026; published: April 30, 2026

Abstract

To address the challenges of poor adaptability, disconnection between breeding and cultivation, and lack of long-term mechanisms in the control of livestock and poultry breeding non-point source pollution in the hilly areas of Ziyang City, this study constructs a comprehensive “technology-model-mechanism” trinity solution by integrating the industrial structure and mountainous-hilly topographical characteristics of Ziyang City. At the technical level, a full-chain technical system of “UASB-Fenton-Stepwise Constructed Wetland” is established, with the innovative stepwise constructed wetland adapted to sloping land. The effluent meets the first-class standards specified in the *Discharge Standards for Pollutants from Livestock and Poultry Breeding* (GB 18596-2001), with the removal rates of nitrogen and phosphorus exceeding 90%, and the cost of water treatment per ton ranging from 2.0 to 2.5 yuan, which is 15%~20% lower than that of traditional technologies. At the model level, closely focusing on the leading industries of Anyue lemon and Lezhi grain, a differentiated “breeding-waste-cultivation” circular model is designed to achieve precise matching between waste resource utilization and industrial demand. This model reduces the waste treatment cost of farms by 25% and increases the average per mu income of farmers by 800 to 1500 yuan. At the mechanism level, a three-dimensional “government-enterprise-farmer” mechanism is established to balance interests through policy subsidies, market-oriented operation, and organized participation, forming a win-win pattern. This research provides technical support and a demonstration paradigm for the control of agricultural non-point source pollution and the development of circular agriculture in the central Sichuan hilly region and similar areas.

Keywords

Ziyang City, Livestock and Poultry Breeding, Non-Point Source Pollution, Breeding-Waste-Cultivation, Circular Model

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

畜禽养殖业作为我国农业经济的核心支柱，在保障农产品稳定供给、促进农民增收致富中发挥着不可替代的作用，但规模化、集约化养殖带来的粪污与废水集中排放，已成为制约农业绿色转型、阻碍生态文明建设的突出瓶颈[1]。据《中国环境统计年鉴 2024》数据显示，农业面源污染贡献了全国总氮排放量的 57%、总磷排放量的 67%，其中畜禽养殖面源污染占比超 50%，对水体、土壤、大气环境造成多维度叠加影响，严重威胁农产品质量安全与区域生态平衡[2]。资阳市作为四川省畜禽养殖重点市及国家优质商品猪战略保障基地，2024 年畜禽出栏量超 1500 万头，养殖废水年排放量达 800 万吨，超 60% 农田受氮磷污染影响，部分地表水水质降至 IV 类以下，生态环境承载压力持续攀升。该市地处川中丘陵核心区，山地丘陵占比 95% 以上，坡度多介于 5°~25° 之间，特殊地形导致传统平原型污染治理技术适配性不足、净化效率低于 60%，而区域内“乐至生猪、安岳柠檬”为主导的种养格局，虽为循环利

用提供了天然基础，却因种养脱节导致废弃物资源化利用率仅 45%，远低于全省平均水平，加之国家与地方明确了畜禽养殖污染防治及循环农业发展的刚性目标[3][4]，构建适配本地特征的系统性治理方案已迫在眉睫。

从国内外研究现状来看，国外虽形成了德国生态农场全闭环利用、荷兰精准调控与生物处理结合等成熟技术模式，但多适配平原规模化种养场景，难以直接适用于我国丘陵地区分散化产业特征[5]；国内研发了厌氧发酵、人工湿地等单项技术，推广了“猪-沼-果”等循环模式，却存在技术链条断裂、模式与主导产业匹配度低、长效运行机制缺失等短板，资阳市本地研究也多局限于现状调查与单项技术试点，缺乏系统性的技术-模式-机制一体化解决方案。

2. 资阳市畜禽养殖面源污染协同治理技术集成

2.1. 污染治理技术瓶颈分析

2.1.1. 地形适配性差

资阳市畜禽养殖废水治理受多重因素制约，技术瓶颈突出[6]。地形适配性差是核心问题，该市属典型川中丘陵地貌，坡度 5°~25°，传统平面人工湿地水力停留时间不足，氮磷去除率仅 60%~70%，较平原地区低 20 个百分点，且占地面积大、坡地运维困难；丘陵地形还导致废水排放路径复杂，坡地养殖场废水易随地表径流扩散，难以集中处理。

2.1.2. 处理效果不稳定

处理效果不稳定问题显著，养殖废水浓度波动大，COD 3000~8000 mg/L、氨氮 200~500 mg/L、总磷 30~80 mg/L，单一技术难以适配。单一 UASB 反应器 COD 去除率超 70%，但氨氮、总磷去除率仅 30%~40%；单一人工湿地擅于去除氮磷，却对高浓度 COD 处理能力有限，易出现堵塞、异味问题[7]。

2.1.3. 运行成本偏高

运行成本偏高制约推广，该市规模化养殖场以中小型为主，现有技术吨水处理成本 3.5~4.5 元，部分高级氧化技术超 6 元/吨，远超企业承受能力。且技术碎片化导致“治理-循环”脱节，废弃物资源化利用率低，无法通过资源回收弥补治理成本[8]。

2.2. 协同治理技术体系构建

技术体系设计思路：针对资阳市丘陵地形特征与养殖废水“高 COD、高氨氮、高氮磷”的污染特性，采用“源头减量-过程强化-末端净化”全链条协同设计理念。源头通过 UASB 反应器实现有机物高效降解与能源回收；过程通过芬顿氧化技术破解难降解有机物，提升废水可生化性；末端创新设计阶梯式人工湿地，适配坡地地形，实现氮磷深度净化与水资源回用。三者有机结合，形成功能互补、高效协同的治理技术体系。

2.2.1. UASB 预处理技术(源头减量)

UASB 反应器承担 COD 去除与沼气回收功能。针对资阳市养殖废水温度波动大(冬季平均气温 6~8℃)的问题，通过投加耐低温厌氧菌剂与优化保温层设计，提升系统低温适应性。实验结果表明，在进水 COD 浓度 8000~12,000 mg/L、水温 6~30℃ 条件下，UASB 反应器 COD 去除率稳定在 80%以上，沼气产率达 0.35 m³/kgCOD，回收沼气可满足养殖场 30%的能源需求[9]。

2.2.2. 芬顿高级氧化技术(过程强化)

UASB 出水仍含部分难降解有机物与高浓度氨氮，需通过芬顿氧化技术过程强化。实验优化确定最

优参数: pH 值 3~4, $n(\text{H}_2\text{O}_2)/n(\text{Fe}^{2+}) = 2:1$, 反应时间 60 min, 此条件下可去除残余 COD 的 45%以上, 废水 BOD_5/COD 比值从 0.28 提升至 0.45, 为后续湿地处理创造良好条件。

2.2.3. 阶梯式人工湿地技术(末端净化) [10]

针对丘陵地形坡度大、平面空间有限的问题, 创新设计阶梯式人工湿地结构。将传统单一坡面湿地改造为 3~5 级台阶式串联结构, 每级台阶高度差 0.3~0.5 米, 坡面坡度控制在 $5^\circ\sim 8^\circ$ 。湿地基质采用“砾石-沸石-生物炭”复合填料, 种植芦苇、菖蒲等本地耐污植物, 形成“基质吸附-植物吸收-微生物降解”协同净化系统。实验数据显示, 阶梯式人工湿地对 TN、TP 的去除率分别达 92%、95%, 较传统平面湿地提升 25%以上; 水力停留时间缩短至 48~72 h, 占地面积减少 30%, 适配丘陵地区地形约束。

2.2.4. 实验装置与工艺流程图

“UASB-芬顿-阶梯式人工湿地”协同治理实验装置图见图 1 所示。

装置包含 5 m^3 UASB 反应器 1 台、 2 m^3 芬顿氧化反应器 1 台、 10 m^3 阶梯式人工湿地 1 组, 配套进水计量泵、曝气设备、温控系统及水质在线监测仪。

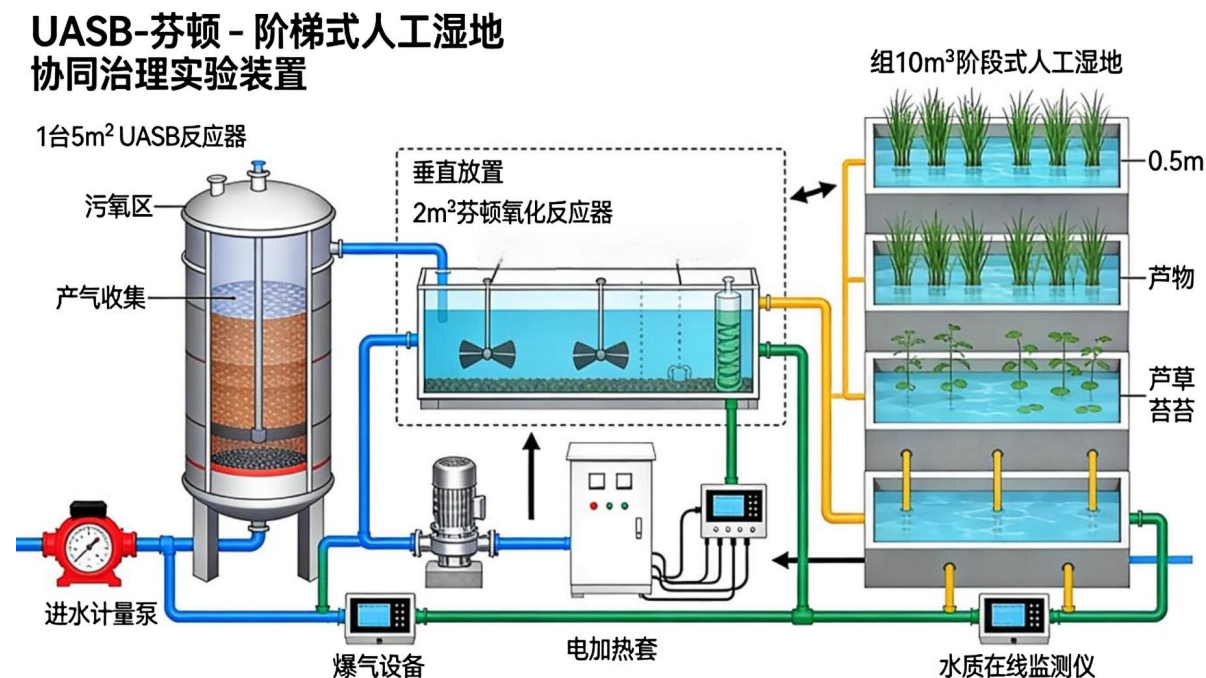


Figure 1. Schematic diagram of the experimental setup for the synergistic treatment using the “UASB-Fenton oxidation-stepped constructed wetland” system

图 1. “UASB - 芬顿 - 阶梯式人工湿地” 协同治理实验装置图

协同治理工艺流程图(含阶梯式人工湿地剖面设计)见图 2 所示。

核心流程: 养殖废水→格栅预处理→UASB 反应器(温度控制 $6^\circ\text{C}\sim 30^\circ\text{C}$, $\text{HRT} = 12\text{ h}$)→芬顿氧化反应器($\text{pH} = 3\sim 4$, $n(\text{H}_2\text{O}_2)/n(\text{Fe}^{2+}) = 2:1$)→中间水池→阶梯式人工湿地(3 级串联, 单级尺寸长 $5\text{ m}\times$ 宽 $2\text{ m}\times$ 高 1.2 m , 基质层厚度 0.8 m , 植物种植密度 $30\text{ 株}/\text{m}^2$)→出水池/农田灌溉系统
阶梯式人工湿地剖面设计: 自上而下依次为表层土壤层(10 cm)、植物层(芦苇/菖蒲)、复合基质层(砾石 $20\text{ cm} +$ 沸石 $30\text{ cm} +$ 生物炭 30 cm)、防渗层(HDPE 膜)、排水层(穿孔排水管)。

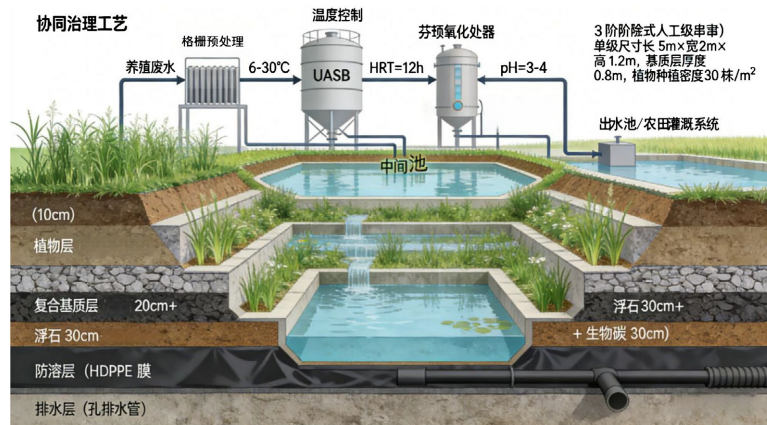


Figure 2. Flow chart of the synergistic treatment process
图 2. 协同治理工艺流程图

2.3. 技术效果验证

现场结果验证，该体系兼具高效性与经济性。“UASB - 芬顿 - 阶梯式人工湿地”三级技术体系集成联动后，在进水 COD 8000 mg/L、NH₃-N 500 mg/L、TN 600 mg/L、TP 50 mg/L 的条件下，系统出水 COD ≤ 100 mg/L、NH₃-N ≤ 15 mg/L、TN ≤ 20 mg/L、TP ≤ 0.5 mg/L，各项指标均达到《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB 18596-2001)一级标准。

吨水处理成本 2.0~2.5 元，较传统技术降低 15%~20%；有机肥成本 800~1000 元/吨，低于商品化肥 30%~40%，处理后废水可全部用于农田灌溉[11]，废水与固体粪便资源化利用率分别达 90%、100%，实现“废水变灌溉水、粪便变有机肥”的闭环利用，适配川中丘陵中小型养殖场，契合地方污染防治要求，推广前景良好。

主要污染物随时间变化曲线

实验条件：进水负荷为 0.8~1.2 m³/(m²·d)，系统连续运行 60 天，温度控制在 15°C~28°C (冬季通过保温层维持最低 6°C)，每 3 天监测 1 次 COD、NH₃-N、TP 浓度，每个数据点设置 3 组平行实验，结果以“均值 ± 标准差”表示(误差棒代表标准差)。

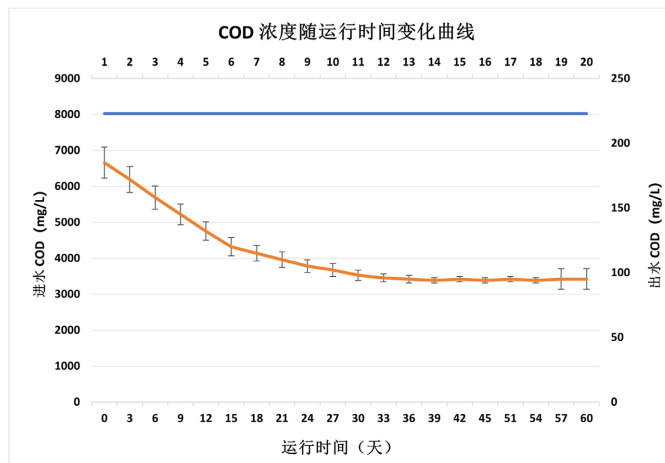


Figure 3. Variation curve of COD concentration with operational time
图 3. COD 浓度随运行时间变化曲线

COD 浓度随运行时间变化曲线见图 3 (注: 进水 COD 均值 8025 ± 350 mg/L, 出水 COD 从初始 185 ± 12 mg/L 逐步降至 95 ± 8 mg/L, 稳定期去除率 $90.1\% \pm 1.2\%$)。

$\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度随运行时间变化曲线见图 4 (注: 进水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 均值 495 ± 25 mg/L, 出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 从初始 32 ± 3 mg/L 步降至 12 ± 2 mg/L, 稳定期去除率 $97.6\% \pm 0.8\%$)。

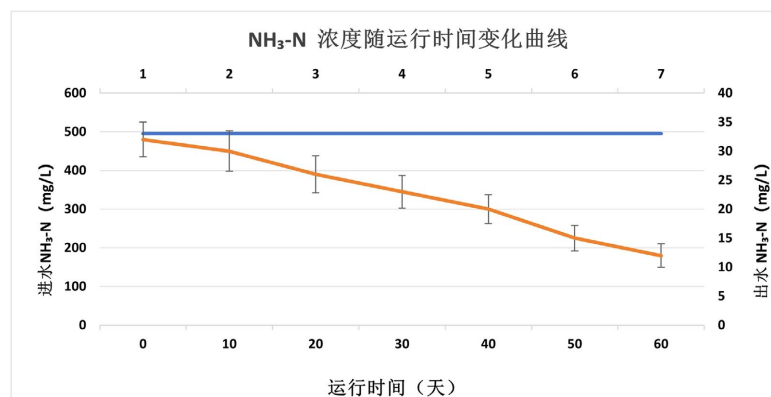


Figure 4. Variation curve of $\text{NH}_3\text{-N}$ concentration with operational time

图 4. $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度随运行时间变化曲线

TP 浓度随运行时间变化曲线见图 5 (注: 进水 TP 均值 48 ± 4 mg/L, 出水 TP 从初始 1.2 ± 0.2 mg/L 逐步降至 0.4 ± 0.1 mg/L, 稳定期去除率 $99.2\% \pm 0.3\%$)。

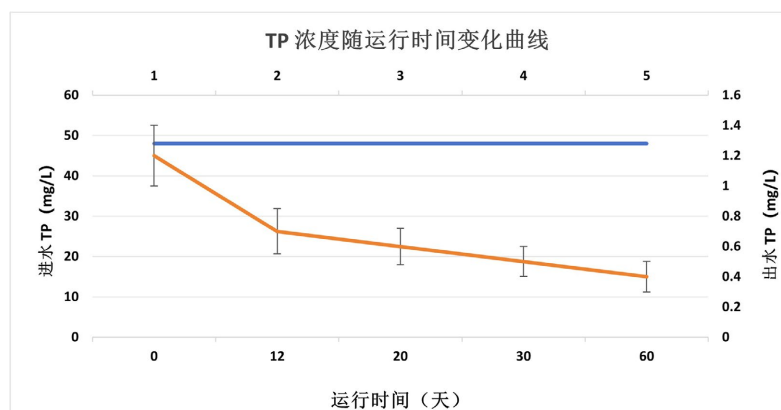


Figure 5. Variation curve of TP concentration with operational time

图 5. TP 浓度随运行时间变化曲线

3. “养殖 - 废弃物 - 种植” 循环模式构建[12]

3.1. 模式构建原则

3.1.1. 产业适配原则

紧扣资阳市“生猪养殖 + 粮食”“生猪养殖 + 柠檬”两大主导产业格局, 根据不同产业的养分需求、种植模式、生产周期, 设计差异化的循环链路。例如, 柠檬种植对氮磷需求较高, 且需精准灌溉, 设计“废水处理 - 沼液精准灌溉”链路; 粮食种植对有机肥需求较大, 设计“粪便制肥 - 还田种粮”链路, 确保废弃物资源得到高效利用。

3.1.2. 区域适配原则

充分考虑资阳市丘陵地形“小规模、分散化”的种养特征，兼顾规模化养殖场与中小养殖户需求。对于规模化养殖场，构建“集中处理-集中利用”模式，建设大型协同治理设施与有机肥生产基地；对于中小养殖户，推广“分散处理-分散利用”模式，采用“微型生态沟渠+户用沼液处理单元”等小型化、低成本治理设施，实现废弃物就地利用[13]。

3.1.3. 可持续原则

兼顾环境效益、经济效益与社会效益，建立长效运行机制。环境效益方面，确保污染治理达标，改善生态环境质量；经济效益方面，降低养殖与种植成本，提升农产品附加值；社会效益方面，促进产业融合发展，带动就业创业。同时，注重模式的可复制性与可推广性，确保技术成熟、操作简便、成本可控。

3.2. 差异化循环模式设计

紧密结合资阳市“乐至生猪、安岳柠檬”产业格局，针对不同作物生长周期、水肥需求规律，设计差异化循环路径，确保废弃物利用与产业发展精准匹配[14]。

3.2.1. 模式一：生猪养殖+柠檬种植循环模式(安岳县适用)[15]

核心链路：

规模化养猪场→UASB 反应器(产沼气)→芬顿氧化→阶梯式人工湿地→沼液储存池→水肥一体化管网→柠檬园精准滴灌→优质柠檬生产→品牌销售。

关键技术措施：

(1) 沼液精准施用：制定《柠檬园沼液施用技术规范》，根据柠檬萌芽期、花期、果期、采后期的不同需求，确定差异化沼液稀释倍数(萌芽期 1:5、花期 1:4、果期 1:3、采后期 1:6)与灌溉频次(萌芽期每 15 天 1 次、花期每 10 天 1 次、果期每 7 天 1 次)。

(2) 品质提升与品牌打造：通过沼液精准灌溉提升柠檬 Vc 含量与糖酸比，打造“沼肥柠檬”绿色品牌，由合作社统一包装销售，售价较普通柠檬提升 30%以上。

(3) 沼气综合利用：回收沼气用于供暖、照明及生产加工，年节约能源成本 8~10 万元，沼气燃烧后的废渣作为补充肥料。

模式效益：

该模式实现养殖废弃物全量资源化利用[16]，养殖场废弃物处理成本降低 25%，柠檬园化肥施用减少 30%，水资源利用率提升 40%。试点区域柠檬优质果率从 75%提升至 90%，种植户亩均增收 1500 元以上，氮磷入河量减少 60%。

(4) 养分供需平衡与沼液最大消纳量计算：根据安岳县土壤本底值(有机质 15.2 g/kg、全氮 1.05 g/kg、速效磷 28.6 mg/kg、速效钾 125 mg/kg)及柠檬需肥规律(每亩年产 2000 kg 柠檬需氮 30 kg、磷 8 kg、钾 25 kg)，结合沼液养分含量(COD 800~1000 mg/L、总氮 150~200 mg/L、总磷 20~30 mg/L)，计算单位面积沼液最大消纳量：沼液最大施用量(m³/亩) = 作物某养分年需求量(kg/亩) ÷ 沼液中该养分浓度(kg/m³) × 安全系数(0.8)以氮素为限制因子：沼液最大消纳量 = 30 kg/亩 ÷ 0.175 kg/m³ × 0.8 ≈ 137 m³/亩·年实际施用强度控制在 80~100 m³/亩·年，低于最大消纳量，避免土壤养分累积。

(5) 极端天气风险控制预案：沼液储存池容量设计依据：按养殖场最大日排放量 × 120 天计算(覆盖雨季、极端低温等无法施用时段)。安岳县规模化养猪场(年出栏 5000 头)日产生沼液 80 m³，储存池设计容量 ≥ 9600 m³，配套防雨棚、防渗层及应急导流沟；雨季采用“错峰施用 + 应急储存”结合，降雨量超 100 mm/日时暂停灌溉，启用备用储存池；极端低温(低于 0℃)时，通过加热装置(利用沼气余热)维持沼液温度 5℃以上，防止冻结。

3.2.2. 模式二：生猪养殖 + 粮食种植循环模式(乐至县适用)

核心链路:

规模化养猪场→干清粪收集→槽式发酵→有机肥生产→粮食产区(水稻、玉米)→基施/追施→绿色粮食生产→订单销售。

关键技术措施:

(1) 有机肥标准化生产[17]: 引入移动式发酵罐或建设区域性有机肥生产中心, 采用“好氧堆肥 + 生物除臭”技术, 将猪粪与秸秆按 3:1 比例混合发酵, 添加微生物菌剂加速腐熟, 发酵周期缩短至 21 天, 生产的有机肥符合《有机肥料》(NY525-2021)标准。

(2) 精准施肥与地力培育[18]: 根据水稻、玉米种植需求制定有机肥施用方案, 水稻田每亩基施有机肥 200 kg、追肥 100 kg, 玉米地每亩基施有机肥 150 kg、追肥 80 kg, 长期施用可提升土壤有机质含量。

(3) 订单农业联动: 合作社与粮食加工企业签订订单收购协议, 按高于市场价 10% 的价格收购绿色粮食, 形成“养殖场 - 有机肥厂 - 种植户 - 加工企业”产业链闭环。

模式效益:

该模式解决了粮食产区土壤地力下降与养殖粪污污染的双重问题, 养殖场粪污资源化利用率达 98%, 有机肥生产成本较传统化肥降低 20%。种植户化肥施用减少 35%, 粮食产量提升 10%, 亩均增收 800 元以上。

(4) 养分供需平衡与有机肥最大施用量计算: 根据乐至县土壤本底值(有机质 12.8 g/kg、全氮 0.92 g/kg、速效磷 22.3 mg/kg、速效钾 110 mg/kg)及水稻 - 玉米轮作需肥规律(每亩年产水稻 600 kg + 玉米 500 kg 需氮 25 kg、磷 7 kg、钾 22 kg), 结合有机肥养分含量(全氮 2.8%、全磷 1.5%、全钾 2.2%), 计算单位面积有机肥最大施用量: $\text{有机肥最大施用量(kg/亩)} = \text{作物某养分年需求量(kg/亩)} \div \text{有机肥中该养分含量}(\%) \times \text{安全系数}(0.75)$ 以磷素为限制因子: $\text{有机肥最大施用量} = 7 \text{ kg/亩} \div 1.5\% \times 0.75 \approx 350 \text{ kg/亩}$ ·年实际施用强度为 300~320 kg/亩·年, 符合土壤承载力要求。

(5) 极端天气风险控制预案: 有机肥储存采用防雨防潮仓库, 容量按年生产量的 30% 设计, 配套通风除湿设备, 防止霉变; 雨季农田积水时暂停追施, 采用“叶面喷施 + 延后基施”替代; 干旱年份通过“有机肥配施保水剂”提升水肥利用率, 保水剂添加量为有机肥施用量的 0.5%。

4. “政府 - 企业 - 农户”三维保障机制长效运行[19]

4.1. 机制设计逻辑

基于利益相关者理论, 识别政府、环保企业、养殖场、种植户与合作社为核心利益主体。政府追求生态环境改善与公共利益最大化; 环保企业追求经济效益与市场份额; 养殖场希望降低处理成本、合规生产; 种植户期望减少种植投入、提升收益; 合作社需发挥桥梁纽带作用。机制设计核心在于平衡各方利益诉求, 构建“风险共担、利益共享”的协同治理格局。

4.2. “政府 - 企业 - 农户”三维保障机制[20]

4.2.1. 政府引导维度

(1) 政策支持: 设立专项补贴, 对采纳本研究技术与模式的养殖场给予设备购置补贴(比例 30%), 对建设有机肥厂、沼液储存池的主体给予每亩 500 元建设补贴; 推行“生态补偿”制度, 对消纳养殖废弃物的种植户按每亩 100 元给予奖励, 对超额完成减排目标的企业给予税收减免。

(2) 监管执法: 建立“双随机、一公开”环境监管机制, 加强对养殖场排污行为的监测与执法, 对偷排漏排行为处以 5~10 万元罚款; 将畜禽粪污资源化利用率纳入地方政府绩效考核指标。

(3) 公共服务: 搭建技术推广平台, 每年培训养殖场负责人、种植户不少于 1000 人次; 建立污染治

理信息服务平台，完善区域性沼液输送管网、有机肥配送中心等公共设施。

4.2.2. 企业运营维度

(1) **市场化服务**：引入专业环保企业作为运营主体，采用“合同环境服务”模式，为养殖场提供废水处理、粪污资源化等一体化服务，收取合理处理费用(每吨废水 20 元，每吨粪污 15 元)。

(2) **产品增值**：环保企业通过生产销售沼气、有机肥等产品获得额外收益，沼气可接入农村能源管网或出售给工业企业，有机肥通过品牌化运营提升附加值。

(3) **技术保障**：环保企业组建专业技术团队，负责治理设施日常运维、技术更新与故障排查，与科研院所合作开展技术研发，持续优化处理工艺。

4.2.3. 农户参与维度

(1) **组织化参与**：鼓励成立种养结合专业合作社，吸纳养殖场、种植户加入，合作社负责统一对接环保企业，协调废弃物运输、分配与施用，组织农产品收购与销售。

(2) **利益联结**：建立“养殖场 + 合作社 + 种植户”利益分配机制，养殖场按低于市场价 20% 的价格提供沼液、有机肥；种植户绿色农产品由合作社统一销售，溢价部分按 3:3:4 比例分配。

(3) **激励约束**：合作社制定章程，对积极参与循环模式、遵守环保规定的成员给予奖励；对违规排污、浪费资源的成员进行处罚，情节严重的予以除名。

4.2.4. 机制运行流程

- (1) 政府制定补贴政策与监管标准，环保企业通过招投标获得区域治理运营权；
- (2) 养殖场与环保企业签订服务合同，环保企业提供废弃物处理服务；
- (3) 合作社组织种植户与环保企业对接，明确废弃物需求数量与时间；
- (4) 环保企业将处理后的沼液、有机肥输送至种植基地，种植户按规范施用；
- (5) 合作社收集绿色农产品统一销售；
- (6) 政府对各方履约情况监督考核，发放补贴与奖励；
- (7) 定期召开多方协商会议，动态优化机制参数。

5. 讨论

技术体系横向对比分析

将本研究“UASB - 芬顿 - 阶梯式人工湿地”技术体系与川中丘陵地区同类养殖废水处理模式(纯生物处理、土地渗滤)进行横向对比，结果如表 1 所示：

Table 1. Performance comparison of different treatment modes

表 1. 不同处理模式性能对比

处理模式 Treatment Mode	主要工艺 Main Processes	COD 去除率 (%) COD Removal Rate (%)	NH ₃ -N 去除率 (%) NH ₃ -N Removal Rate (%)	TP 去除率 (%) TP Removal Rate (%)	吨水处理成本 (元) Treatment Cost per Cubic Meter of Wastewater (yuan)	占地面积 (m ² /m ³ .d) Floor Area (m ² /m ³ .d)	适用场景 Applicable Scenarios
本研究技术	UASB - 芬顿 - 阶梯式人工湿地	98.8 ± 0.5	97.6 ± 0.8	99.2 ± 0.3	2.0~2.5	0.8~1.0	中小规模养殖场 (年出栏 ≥ 1000 头生猪)，丘陵坡地(5°~25°)

续表

纯生物处理	厌氧发酵 - 好氧曝气	85 ± 2.0	82 ± 1.5	75 ± 2.2	3.5~4.0	1.5~2.0	平原地区规模化养殖场, 进水浓度波动小
土地渗滤	土壤渗滤 - 植物净化	78 ± 2.5	88 ± 1.2	90 ± 1.8	1.2~1.8	3.0~5.0	低坡度(<5°)、土地资源充足的小型养殖场

6. 结语

立足资阳市丘陵地形与“生猪养殖 + 特色种植”产业实际, 系统开展了畜禽养殖面源污染协同治理技术与“养殖 - 废弃物 - 种植”循环模式集成研究, 取得了显著成果。

(1) 构建了适配丘陵地形的全链条协同治理技术体系。创新集成的“UASB - 芬顿 - 阶梯式人工湿地”协同治理技术, 实现养殖废水氮磷去除率超 90%, 吨水处理成本仅 2.0~2.5 元, 有效解决了传统技术地形适配性差、处理效果不稳定、运行成本偏等“水土不服”的难题。

(2) 设计了主导产业导向的定制化循环模式。构建的安岳“生猪 - 沼液 - 柠檬”与乐至“生猪 - 粪污 - 有机肥 - 粮食”差异化循环模式, 实现废弃物资源化与主导产业精准匹配, 养殖场废弃物处理成本降低 25%, 种植户综合收益提升 15%~20%。

(3) 建立了多方共赢的长效保障机制。建立的“政府补贴 - 企业运营 - 农户参与”三维保障机制, 平衡了各方利益诉求, 确保了技术与模式的长效运行, 破解了传统模式“重建轻管”的顽疾, 确保了循环模式的长效运行。

(4) 研究成果兼具显著效益与推广价值。试点应用表明, 本研究形成的技术、模式与机制体系, 在环境效益上可大幅削减污染物排放、改善区域生态质量; 在经济效益上降低种养成本、提升农产品附加值; 在社会效益上带动农户参与、助力乡村产业振兴, 可在川中丘陵地区及同类“小规模、分散化”种养区域广泛推广。

基金项目

资阳市哲学社会科学重点研究基地/生态文明与可持续发展研究中心研究课题, 课题名称: 《资阳市畜禽养殖面源污染协同治理与“养殖 - 废弃物 - 种植”循环模式集成研究》(项目编号: SY2025Y09); 获得成都工业学院(国家/省/校)级大学生创新创业训练计划项目基金支持, 省级项目名称: 《多阶段组合工艺处理电镀重金属废水与资源化回用的研究与实践》(项目编号: 202511116060); 省级项目名称: 《白酒酿造废水低碳处理与资源化: 厌氧产氢微藻固碳耦合工艺》(项目编号: 202501016077); 校级创新创业训练计划, 项目名称: 《电镀重金属废水处理中的资源化利用: 重金属回收与水质回用》(项目编号: QM2025012)。

参考文献

- [1] 四川省生态环境厅, 四川省农业农村厅. 四川省畜禽养殖污染防治规划(2021-2025 年) [EB/OL]. 2022-12-30. <https://sthjt.sc.gov.cn/sthjt/c23101802/2023/1/16/6e74298a18704af095142a66279d5394/files/%E3%80%8A%E5%9B%9B%E5%B7%9D%E7%9C%81%E7%95%9C%E7%A6%BD%E5%85%BB%E6%AE%96%E6%B1%A1%E6%9F%93%E9%98%B2%E6%B2%BB%E8%A7%84%E5%88%92%E3%80%8B.pdf>, 2023-01-16.
- [2] 谢晓琳, 钱锋, 赵健, 等. 流域农业面源污染防治科学问题与技术研发需求[J]. 环境科学学报, 2023, 43(12): 152-157.
- [3] 资阳市生态环境局. 2024 年资阳市生态环境状况公报[EB/OL]. 2025-07-18. http://www.ziyang.gov.cn/zysrmzf/xxgksggg/pc/content/content_1947090868780736512.html, 2026-04-24.

- [4] 资阳市生态环境局. 资阳市水环境质量状况(2025年3月) [EB/OL]. 2025-04-15. https://www.ziyang.gov.cn/zysrmzf/xxgkgsdg/pc/content/content_1910632829826187264.html, 2025-10-31.
- [5] 王盼, 杨晓娇, 何志斌, 等. 发达国家畜禽养殖污染防治经验借鉴及对我国美丽乡村建设的启示[J/OL]. 现代畜牧科技: 1-5. <https://doi.org/10.19369/j.cnki.2095-9737.2025.11.048>, 2025-12-02.
- [6] 吴光文. 雁江区畜禽养殖污染防治思考[J]. 中国畜禽种业, 2018, 14(12): 19.
- [7] 赵雷, 王芳. 农业面源污染监测技术进展[J]. 中国环境科学, 2023, 43(12): 152-157.
- [8] 孙良媛, 刘涛, 张乐. 中国规模化畜禽养殖的现状及其对生态环境的影响[J]. 华南农业大学学报(社会科学版), 2016, 15(2): 23-30.
- [9] 刘洋. 农村面源污染的社会治理路径[J]. 社会学研究, 2024(3): 78-85.
- [10] 何英. 资阳市畜禽规模养殖污染治理现状分析及对策研究[J]. 当代畜牧, 2017(9): 49-52.
- [11] 郭华. 资阳市畜禽养殖废弃物资源化利用研究[J]. 农业工程学报, 2024, 40(8): 200-210.
- [12] 毛远桃. 探索基于种养结合的畜禽粪污高效资源化利用模式[J]. 中国动物保健, 2025, 27(3): 183-184.
- [13] 四川省农业农村厅. 资阳市“三聚焦”农业面源污染治理 助力水环境质量提升[EB/OL]. 2025-06-20. <https://nynct.sc.gov.cn/nynct/c100632/2025/8/22/eea10f71f75c424799b6b70917c0e4e6.shtml>, 2025-10-31.
- [14] 谭伟, 古维刚. 资阳市生态循环农业发展现状及改进措施[J]. 四川畜牧兽医, 2017, 44(5): 17-18+20.
- [15] 陈柱康. 规模养殖户生猪粪便能源化技术采纳行为及影响因素研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中农业大学, 2019.
- [16] 任诗蒂. 畜禽养殖废弃物资源化利用与生态养殖模式探讨[J]. 畜牧业环境, 2025(5): 47-48.
- [17] Sfez, S., De Meester, S. and Dewulf, J. (2017) Co-Digestion of Rice Straw and Cow Dung to Supply Cooking Fuel and Fertilizers in Rural India: Impact on Human Health, Resource Flows and Climate Change. *Science of The Total Environment*, **609**, 1600-1615. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.150>
- [18] 姜茜, 王瑞波, 孙炜琳. 我国畜禽粪便资源化利用潜力分析及对策研究——基于商品有机肥利用角度[J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2018(4): 30-37+166-167.
- [19] 张扬, 王璐瑶. 中国种养结合发展模式研究进展[J]. 农业科学, 2021, 11(10): 951-956.
- [20] 四川省农业农村厅. 资阳市聚焦“三问”探索农田径流污染防控新模式[EB/OL]. 2025-02-06. <https://nynct.sc.gov.cn/nynct/c100632/2025/2/6/e5f395883ccc4282bd338a038a2cd55d.shtml>, 2025-10-31.