International Journal of Ecology 世界生态学, 2026, 15(4), 612-626
Published Online November 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/ije
https://doi.org/10.12677/ije.2026.154067

Hans汉斯

川中丘陵畜禽养殖面源污染协同治理与种养循环模式集成研究

——以资阳市为例

吴菊珍[1*]，孟友萍[1]，张珈硕[1]，王　璐[2]，何梦霖[2]，高进长[1#]，邱　诚[1]

[1]成都工业学院材料与环境工程学院，四川 成都
[2]成都工业学院图书馆，四川 成都

收稿日期：2026年9月8日；录用日期：2026年10月23日；发布日期：2026年11月10日

摘　要

畜禽养殖面源污染是制约丘陵农业区绿色发展的突出问题。本文以四川省资阳市为研究对象，针对该市丘陵地形特征与“生猪养殖 + 特色种植”产业格局，构建了“UASB－芬顿－阶梯式人工湿地”协同治理技术体系，并基于安岳柠檬与乐至粮食两大主导产业，设计了差异化“养殖－废弃物－种植”种养循环模式。中试表明：组合工艺对COD、NH_3-N、TP、SS的累积去除率均达92%以上，出水达《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB 18596-2001)[①]一级标准，30批次样品达标率为100%；按300 m^3/d测算吨水净运行成本为2.00~2.50元，较同口径“UASB－SBR－人工湿地”工艺低15%~20%。养分平衡核算显示，化肥替代率14.0%~22.7%、粪污资源化利用率93.2%，与模式设定的化肥减量15%、资源化利用率93%以上的目标相符。本研究可为川中丘陵农业区畜禽养殖面源污染治理提供技术参考。

关键词

畜禽养殖，面源污染，资阳市，种养循环，养分平衡

Integrated Study on Collaborative Control of Livestock and Poultry Breeding Non-Point Source Pollution and Planting-Breeding Circular Model in Hilly Areas of Central Sichuan

—A Case of Ziyang City

*第一作者。
#通讯作者。

文章引用: 吴菊珍, 孟友萍, 张珈硕, 王璐, 何梦霖, 高进长, 邱诚. 川中丘陵畜禽养殖面源污染协同治理与种养循环模式集成研究[J]. 世界生态学, 2026, 15(4): 612-626. DOI: 10.12677/ije.2026.154067

Juzhen Wu[1*], Youping Meng[1], Jiashuo Zhang[1], Lu Wang[2], Menglin He[2], Jinzhang Gao[1#], Cheng Qiu[1]

[1]School of Materials and Environmental Engineering, Chengdu Technological University, Chengdu Sichuan
[2]Library of Chengdu Technological University, Chengdu Sichuan

Received: September 8, 2026; accepted: October 23, 2026; published: November 10, 2026

Abstract

Non-point source pollution from livestock and poultry breeding is a prominent constraint on the green development of hilly agricultural areas. Taking Ziyang City, Sichuan Province as the research object, this study developed a collaborative treatment technology system of "UASB-Fenton-stepped constructed wetland" targeting the city's hilly terrain and its industrial pattern of "pig breeding + characteristic planting", and designed differentiated "breeding-waste-cultivation" planting-breeding circular models based on the two leading industries of Anyue lemon and Lezhi grain. Pilot-scale results showed that the cumulative removal rates of COD, NH_3-N, TP, and SS by the combined process all exceeded 92%; the effluent met the Class I standard of the "Discharge Standard of Pollutants for Livestock and Poultry Breeding" (GB 18596-2001), with a 100% compliance rate over 30 batches. At a scale of 300 m^3/d, the net operating cost was 2.00~2.50 RMB per ton of wastewater, which was 15%~20% lower than that of a "UASB-SBR-constructed wetland" process estimated on the same basis. Nutrient balance calculation showed that the chemical fertilizer substitution rate was 14.0%~22.7% and the manure resource utilization rate was 93.2%, consistent with the model targets of 15% fertilizer reduction and >93% resource utilization. This study can provide a technical reference for the control of non-point source pollution from livestock and poultry breeding in hilly agricultural areas of central Sichuan.

Keywords

Livestock and Poultry Breeding, Non-Point Source Pollution, Ziyang City, Planting-Breeding Circular, Nutrient Balance

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

畜禽养殖面源污染是我国农业生态环境保护面临的重大挑战，养殖废弃物是农业面源污染的主要来源之一。四川省作为畜禽养殖业大省，种植业与养殖业布局协调不足，种养主体分离、规模不匹配、联系不紧密等问题突出[1]。

资阳市位于四川盆地中部，属典型丘陵地貌，是四川省重要的生猪养殖与特色农产品产区。2023 年全市生猪出栏 290.8 万头、粮食产量 167.8 万吨[2]；安岳县柠檬保存面积 48 万亩，年产量超 60 万 t，均占全国 70%以上[3]。2020 年全市畜禽粪污综合利用率 92.87% [4]，但种养衔接与养分匹配精度仍不足[5]。

国内外围绕厌氧发酵、人工湿地、高级氧化等技术已积累较多成果[6]，厌氧–好氧与物化–生物组合工艺运行成本分别为 1.45~8.00 元/m^3 和 1.30~5.30 元/m^3 [7]。现有研究多聚焦平原或单一环节，针对丘陵“小规模、分散化”养殖与特色种植养分需求的系统性研究不足。为此，本文开展协同治理与种养循

环模式集成研究。

2. 区域概况与研究方法

2.1. 区域概况

资阳市辖雁江区、安岳县、乐至县，地形以丘陵为主，海拔 300~500 m。《资阳市雁江区畜禽养殖污染防治“十四五”规划》提出到 2025 年粪污综合利用率达 93%以上，建成 10 万亩绿色种养循环示范区[8]；雁江区 2020 年出栏生猪 75.3 万头、山羊 34.5 万只、家禽 878 万只[8]。

种植业方面，安岳柠檬种植面积 48 万亩、全产业链产值 163.1 亿元，带动 33 万果农增收[3]；2023 年全市粮食总产 167.8 万 t [2]。“生猪养殖 + 特色种植”格局为种养循环提供了产业基础。

2.2. 研究方法

本研究采用“调研摸底–技术研发–模式构建–试点验证–成果凝练”技术路线。通过走访雁江、乐至、安岳等养殖与种植基地，调研污染负荷、废弃物产生量与种植养分需求；依托小试与现场中试验证工艺参数，监测去除效果，核算成本与养分平衡。

2.2.1. 中试装置与工艺流程

中试装置建于雁江区某生猪规模化养殖场，设计规模 5.0 m^3/d，连续流运行。流程依次为格栅与固液分离、调节池、UASB、芬顿氧化、阶梯式人工湿地与清水池，装置构成与流程见图 1，主要构筑物尺寸、填料及设计参数见表 1。

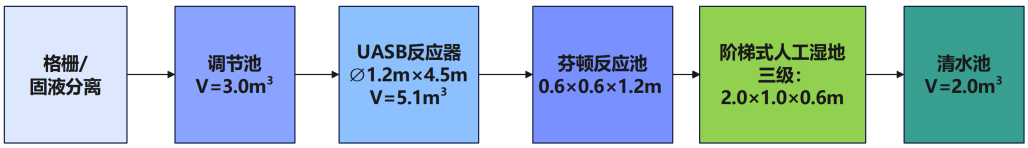


Figure 1. Composition and process flow diagram of the pilot plant
图 1. 中试装置构成与流程示意图

填料/介质：UASB-颗粒污泥；芬顿-Fe^{2+}/H_2O_2；湿地 I 级砾石；II 级沸石；III 级陶粒。

UASB 为圆柱形钢结构，内径 1.2 m、总高 4.5 m，有效容积 5.1 m^3；接种颗粒污泥取自该场厌氧消化池，接种量占 30%，MLVSS 为 18~22 g/L。芬顿单元由酸化、反应与中和絮凝池串联组成，转速 120 r/min。阶梯式人工湿地沿坡地分三级，单级 2.0 m × 1.0 m × 0.6 m，级间落差 0.30 m，依靠地势自流；I/II/III 级分别填充砾石、沸石、陶粒，种植芦苇、香蒲、菖蒲，密度 16 株/m^2。

Table 1. Dimensions and filler parameters of main structures of the pilot plant
表 1. 中试装置主要构筑物尺寸与填料参数

构筑物	尺寸/规格	有效容积	填料/介质	主要设计参数
格栅井	0.5 m × 0.5 m × 0.8 m	0.20 m^3	机械格栅，栅距 3 mm	过栅流速 0.6 m/s
固液分离机	处理量 3 m^3/h	—	斜筛 + 螺旋挤压，筛孔 0.5 m m	SS 去除率 ≥ 60%
调节池	1.5 m × 1.5 m × 1.8 m	3.0 m^3	—	HRT12 h，穿孔管搅拌
UASB 反应器	φ1.2 m × 4.5 m	5.1 m^3	厌氧颗粒污泥(18~22 g/L)	HRT 24~36 h；有机负荷 3~5 kg COD/(m^3·d)

续表

酸化调节池	0.6 m × 0.6 m × 1.0 m	0.30 m^3	—	pH 调至 3.0~4.0，HRT 20 min
芬顿反应池	0.6 m × 0.6 m × 1.2 m	0.36 m^3	$FeSO_4·7H_2O + H_2O_2$ (30%)	H_2O_2/Fe^{2+}摩尔比 10:1~20:1；反应 1.5~3.0 h
中和絮凝池	0.6 m × 0.6 m × 1.0 m	0.30 m^3	NaOH + PAM	pH 回调至 7.0~7.5，HRT30 min
阶梯式人工湿地	三级，单级 2.0 m × 1.0 m × 0.6 m	3.0 m^3 (合计)	I级砾石 10~30 mm；II级沸石 5~10 mm；III级陶粒 3~5 mm	HRT 3~5 d；坡度 2%~5%；水力负荷 0.10~0.15 $m^3/(m^2·d)$
清水池	1.5 m × 1.5 m × 1.2 m	2.0 m^3	—	消毒后回用

2.2.2. 试验废水来源与水质

试验用水取该场干清粪工艺粪尿与冲洗水混合液，经格栅与固液分离后进入调节池。稳定运行期共取 30 批次，每批 5.0 m^3。原水 COD、NH_3-N、TP、SS 分别为(4000 ± 320)、(600 ± 48)、(80 ± 6.4)、(1500 ± 120) mg/L，BOD_5/COD 为 0.42 ± 0.05，可生化性较好；C:N:P 约 100:15:2，磷相对不足(表 2)。

Table 2. Characteristics of the raw experimental wastewater (n = 30)
表 2. 试验废水(原水)水质特征(n = 30)

指标	单位	均值 ± 标准差	实测范围	指标	单位	均值 ± 标准差	实测范围
pH	—	7.4 ± 0.3	6.9~7.9	TP (以 P 计)	mg/L	80 ± 6.4	50~120
COD	mg/L	4000 ± 320	3000~5000	SS	mg/L	1500 ± 120	800~2000
BOD_5	mg/L	1680 ± 180	1320~2100	水温	℃	21.5 ± 3.2	15.8~27.4
NH_3-N	mg/L	600 ± 48	400~800	TN	mg/L	720 ± 58	610~840

2.2.3. 运行工况与监测方案

中试于 2024 年 3~7 月连续运行 120 d，第 1~30 d 为启动驯化期，第 31~120 d 为稳定统计期。启动期 UASB 容积负荷由 1.0 逐步升至 4.0 kg COD/(m^3·d)，出水 VFA < 300 mg/L 时视为启动完成；稳定期各单元参数按表 5 控制。

稳定期在原水、UASB 出水、芬顿出水、湿地出水 4 点同步采样，每 3 d 一次、每点 3 平行，共 30 批次(各指标 n = 30，平行 n = 90)。pH、水温、DO 现场测定，其余 4℃冷藏 24 h 内测定。运行水温 15.8℃~27.4℃(均 21.5℃)，UASB 设保温层维持 25℃~30℃。芬顿按 $H_2O_2/\Delta COD$ = 0.8:1 投加，Fe^{2+}/H_2O_2 = 1:15 (摩尔)；中和段 NaOH 回调 pH 7.0~7.5，投加 PAM 2 mg/L。

2.2.4. 分析方法和仪器

各指标分析方法与仪器见表 3。每批设全程空白与 10%平行样(相对偏差 ±5%内)，每 10 批用有证标准样品加标回收核查，回收率 94.6%~106.3%。

Table 3. Analytical methods and instruments for water quality indices
表 3. 水质指标分析方法与仪器

指标	分析方法	方法依据	主要仪器	检出限
COD	重铬酸盐法(回流 2 h)	HJ 828-2017	HACH DRB200 消解器 + DR3900 分光光度计	4 mg/L
NH_3-N	纳氏试剂分光光度法	HJ 535-2009	岛津 UV-2600 紫外可见分光光度计	0.025 mg/L

续表

TP	过硫酸钾消解–钼酸铵分光光度法	GB 11893-89	HACH DRB200 消解器 + 岛津 UV-2600	0.01 mg/L
SS	重量法(103℃~105℃烘干)	GB 11901-89	梅特勒 ME204E 电子天平 + DHG-9140A 干燥箱	4 mg/L
BOD_5	稀释与接种法	HJ 505-2009	SPX-250B 生化培养箱 + HACH HQ40d 溶解氧仪	0.5 mg/L
TN	碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法	HJ 636-2012	HACH DRB200 消解器 + 岛津 UV-2600	0.05 mg/L
pH/水温/DO	电极法	—	HACH HQ40d 便携式多参数分析仪	0.01/0.1℃/0.01 mg/L

2.2.5. 数据统计方法

为区分各处理单元自身的净化能力与其在整套工艺中的累积贡献，分别计算单元去除率与累积去除率：

$$\eta_{u,i} = (C_{i-1} - C_i)/C_{i-1} \times 100\%$$
$$\eta_{c,i} = (C_0 - C_i)/C_0 \times 100\%$$

式中：$\eta_{u,i}$ 为第 i 个处理单元的单元去除率(%)，$\eta_{c,i}$ 为第 i 个单元出水相对于进水的累积去除率(%)，C_0、C_{i-1}、C_i 分别为进水、第 i−1 个单元出水与第 i 个单元出水的污染物质量浓度(mg/L)。去除率的标准差按误差传递公式(delta 法)由进出水浓度的标准差导出。

数据以“均值 ± 标准差”表示，用 Excel 2019 与 SPSS 26.0 统计；阶段差异采用单因素方差分析(α = 0.05)；以变异系数(CV)评价稳定性，CV < 10%为良好[9]。

2.2.6. 经济成本核算方法

吨水成本按运行成本扣除沼气收益后的净成本计。核算边界为全年连续运行、规模 300 m^3/d、年运行 330 d、年处理 9.9 万 m^3；药剂与电价采用 2024 年资阳市场价。条目含电耗、药剂、人工与维护，并扣除 UASB 沼气收益(表 4)。同口径测算常规“UASB–SBR–人工湿地”作为对照。

Table 4. Composition and calculation basis of treatment cost per ton of wastewater
表 4. 吨水处理成本构成与计算依据

成本条目	消耗定额与计算依据	单价	吨水成本(元/m^3)
电耗	提升泵、搅拌机、加药泵与自控合计 0.92 kW·h/m^3	0.60 元/(kW·h)	0.50~0.60
H_2O_2 (30%)	投加量 1.6 kg/m^3 (H_2O_2/ΔCOD 质量比 0.8:1)	0.85 元/kg	1.30~1.42
$FeSO_4·7H_2O$	投加量 0.26 kg/m^3 (H_2O_2/Fe^{2+}摩尔比 15:1)	0.60 元/kg	0.14~0.18
H_2SO_4 (98%)	投加量 0.25 kg/m^3 (pH 由 7.4 调至 3.5)	0.80 元/kg	0.18~0.22
NaOH (片碱)	投加量 0.35 kg/m^3 (中和至 pH 7.0~7.5)	2.50 元/kg	0.82~0.94
PAM (阴离子)	投加量 0.015 kg/m^3	18.0 元/kg	0.24~0.30
人工费	定员 2 人，5.0 万元/(人·a)，年处理水量 9.9 万 m^3	—	0.90~1.10
设备维护检修	按固定资产投资的 2.0%计，投资 150 万元	—	0.20~0.30
运行成本小计	—	—	4.30~5.00
沼气回收抵扣	UASB 段去除 COD 2.8 kg/m^3，产沼气 1.63 m^3/m^3 (CH_4 体积分数 60%)	1.35 元/m^3 沼气	−2.30~−2.50
净运行成本	—	—	2.00~2.50

注：对照工艺“UASB–SBR–人工湿地”同口径吨水运行成本 3.50 元/m^3，扣沼气收益 0.70 元/m^3 后净成本 2.50~3.00 元/m^3；本工艺降低 15%~20%。

3. 协同治理技术体系构建

3.1. 技术路线与工艺设计

针对丘陵地形致传统技术效率低、输送能耗高的问题，构建“源头减量－过程拦截－末端治理－资源循环”全链条协同治理体系，核心为“UASB－芬顿－阶梯式人工湿地”组合工艺。

(1) UASB 厌氧预处理：废水进入 UASB，厌氧微生物降解高浓度有机物，对养殖废水 COD 去除率可达 85%~90% [10] [11]，具有能耗低、污泥少等优点[12]。

(2) 芬顿高级氧化：UASB 出水进入芬顿单元，Fe^{2+}/H_2O_2 产生 •OH 深度氧化难降解有机物，有效降低 COD 与氨氮[13]，为湿地创造有利条件。

(3) 阶梯式人工湿地：利用坡地落差实现废水自流、降低能耗，多级生态沟渠通过植物吸收、基质吸附与微生物降解协同除氮磷[14] [15]。

3.2. 组合工艺流程

组合工艺流程见图 2。

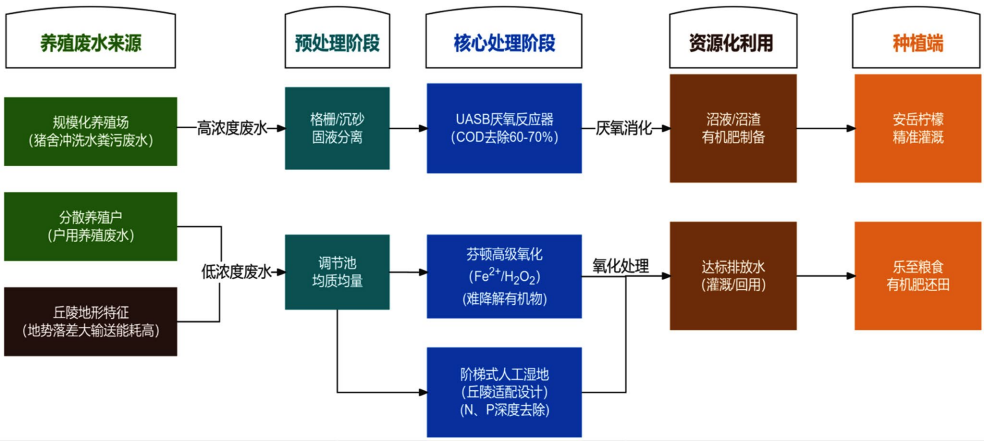


Figure 2. Process flow chart of breeding wastewater treatment in Hilly Areas of Ziyang
图 2. 资阳丘陵养殖废水处理工艺流程图

3.3. “UASB－芬顿－阶梯式人工湿地”组合工艺参数优化与处理效果

3.3.1. 组合工艺参数优化

经实验室小试与中试确定核心工艺最佳参数(表 5)。

Table 5. Main operating parameters of combined process of “UASB-Fenton-stepwise constructed wetland”
表 5. “UASB－芬顿－阶梯式人工湿地”组合工艺主要运行参数

工艺单元	关键参数	优化值
UASB	水力停留时间(HRT)	24~36 h
UASB	有机负荷	3~5 kg COD/(m^3·d)
芬顿氧化	pH	3.0~4.0
芬顿氧化	H_2O_2/Fe^{2+}摩尔比	10:1~20:1
芬顿氧化	反应时间	1.5~3.0 h
阶梯式人工湿地	水力停留时间	3~5d
阶梯式人工湿地	湿地坡度	2%~5%

3.3.2. 组合工艺处理效果

在上述参数下组合工艺对养殖废水的处理效果见表 6。

Table 6. Removal effect of main pollutants in breeding wastewater by combined process
表 6. 组合工艺对养殖废水主要污染物的去除效果

污染物指标	进水浓度(mg/L)	出水浓度(mg/L)	标准限值	去除率(%)
COD	3000~5000	≤240	≤400	≥92
氨氮(NH_3-N)	400~800	≤32	≤80	≥96
总磷(TP，以 P 计)	50~120	≤7.0	≤8.0	≥91
SS	800~2000	≤70	≤200	≥95

注：出水水质达《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB 18596-2001)一级标准。

由表 8 可知，中试组合工艺对 COD、NH_3-N、TP、SS 累积去除率分别为 96.0%、96.0%、92.5%、96.0%，出水平均浓度均低于一级标准限值(表 7)。阶梯式人工湿地对 NH_3-N、TP 单元去除率为 90.0% ± 1.1%、81.2% ± 2.2% (表 8)，是脱氮除磷主要承担单元[16]。上述结果为 5.0 m^3/d 中试稳定期(n = 30)监测值，工程化效果需更大规模验证。

3.3.3. 组合工艺各阶段污染物浓度变化

各阶段污染物浓度变化见表 7 和图 3。

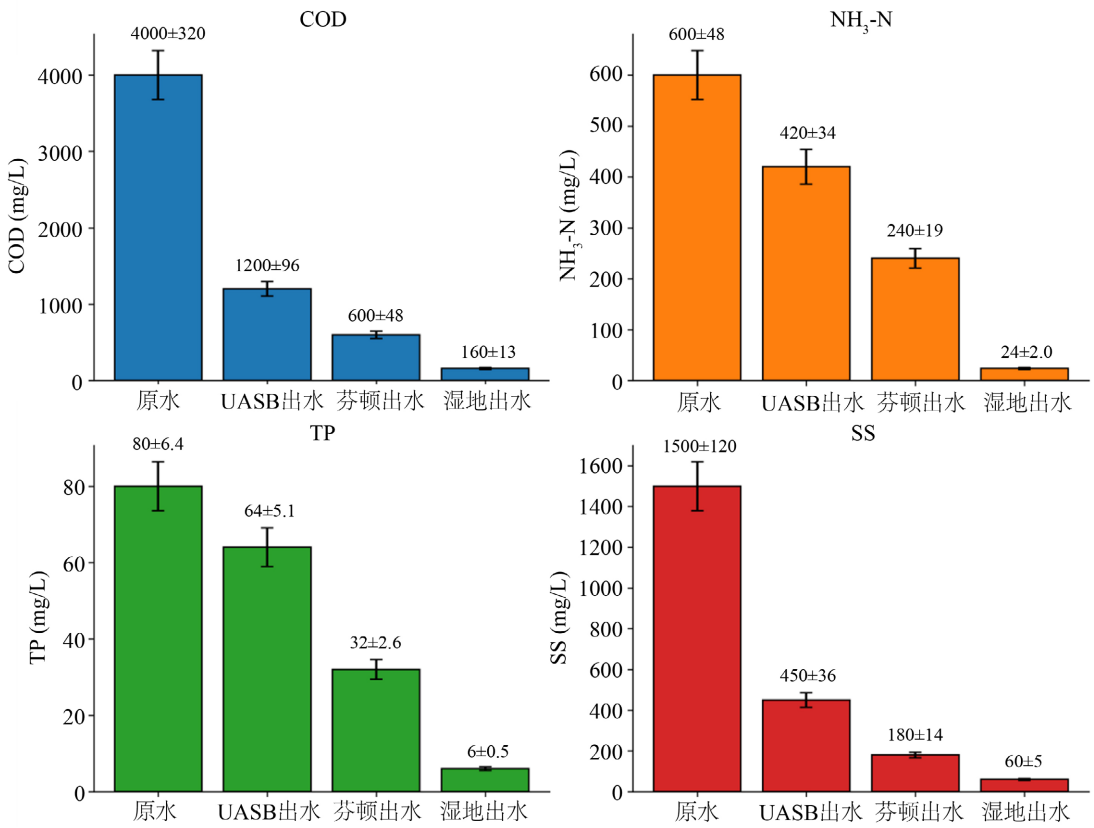


Figure 3. Variations of pollutant concentrations at each stage of the combined process (mean ± SD, n = 30)
图 3. 组合工艺各阶段污染物浓度变化(均值 ± 标准差，n = 30)

Table 7. Changes in pollutant concentrations at each stage of the combined process (n = 30)
表 7. 组合工艺各阶段污染物浓度变化(n = 30)

处理工艺阶段	COD (mg/L)	NH_3-N (mg/L)	TP (mg/L)	SS (mg/L)
原水	4000 ± 320	600 ± 48	80 ± 6.4	1500 ± 120
UASB 厌氧出水	1200 ± 96	420 ± 34	64 ± 5.1	450 ± 36
芬顿氧化出水	600 ± 48	240 ± 19	32 ± 2.6	180 ± 14
阶梯式人工湿地出水	160 ± 13	24 ± 2.0	6.0 ± 0.5	60 ± 5
GB 18596-2001 一级标准限值	400	80	8.0	200
出水达标率(%, n = 30)	100	100	100	100

3.3.4. 组合工艺各阶段污染物去除率

各处理单元的单元去除率与累积去除率见表 8 和图 4。

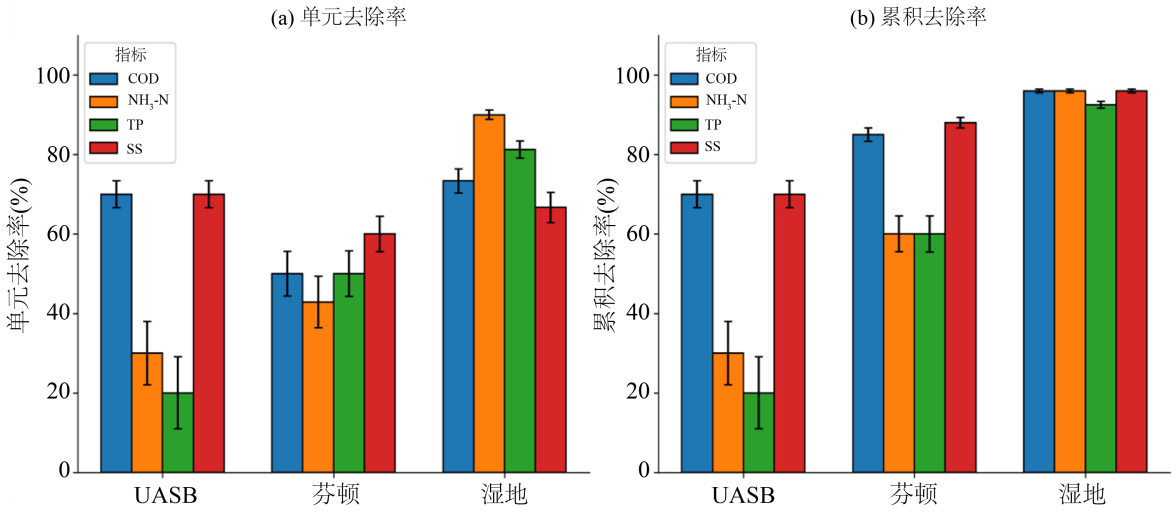


Figure 4. Removal rates of each treatment unit in the combined process ((a) Unit removal rate; (b) Cumulative removal rate; mean ± SD, n = 30)
图 4. 组合工艺各处理单元去除率((a) 单元去除率；(b) 累积去除率；均值 ± 标准差，n = 30)

Table 8. Removal rates of each treatment unit in the combined process (mean ± SD, n = 30)
表 8. 组合工艺各处理单元去除率(均值 ± 标准差，n = 30)

处理单元	指标	单元去除率 η_u (%)	累积去除率 η_c (%)	CV (%)
UASB 厌氧	COD	70.0 ± 3.4	70.0 ± 3.4	4.8
	NH_3-N	30.0 ± 8.0	30.0 ± 8.0	26.6
	TP	20.0 ± 9.0	20.0 ± 9.0	45.2
	SS	70.0 ± 3.4	70.0 ± 3.4	4.8
芬顿氧化	COD	50.0 ± 5.7	85.0 ± 1.7	11.3
	NH_3-N	42.9 ± 6.5	60.0 ± 4.5	15.1
	TP	50.0 ± 5.7	60.0 ± 4.6	11.4
	SS	60.0 ± 4.5	88.0 ± 1.3	7.4

续表

阶梯式人工湿地	COD	73.3 ± 3.0	96.0 ± 0.5	4.1
	NH_3-N	90.0 ± 1.1	96.0 ± 0.5	1.3
	TP	81.2 ± 2.2	92.5 ± 0.9	2.7
	SS	66.7 ± 3.8	96.0 ± 0.5	5.7

由表 8 可知，单元去除率与累积去除率差异明显，易高估末端贡献。以 COD 计，芬顿单元去除率 50.0% ± 5.7%，累积 85.0% ± 1.7%；湿地对 NH_3-N 单元去除率 90.0% ± 1.1%，是脱氮主要单元。TP 在 UASB 段单元去除率仅 20.0% ± 9.0% (CV = 45.2%)，主要依靠芬顿(50.0% ± 5.7%)与湿地(81.2% ± 2.2%)去除，与磷以化学沉淀和基质吸附为主一致；该单元 CV 偏高与进水磷波动及污泥沉降季节性变化有关。

稳定性方面，各单元累积去除率标准差随流程递减：COD ±3.4%→±0.5%，NH_3-N ±8.0%→±0.5%，TP ±9.0%→±0.9%，SS ±3.4%→±0.5%；湿地出水 4 项 CV 均<1.0%，出水浓度(160 ± 13)、(24 ± 2.0)、(6.0 ± 0.5)、(60 ± 5) mg/L，30 批次达标率 100%。ANOVA 显示相邻阶段差异显著($P < 0.05$)，表明组合工艺抗冲击负荷与运行稳定性较强[9]。

3.4. 经济性分析

按表 4，本工艺吨水运行成本 4.30~5.00 元，扣沼气收益 2.30~2.50 元/m^3 后净成本 2.00~2.50 元/m^3；常规“UASB－SBR－人工湿地”净成本 2.50~3.00 元/m^3，本工艺低 15%~20% [7]。施胜利等统计厌氧－好氧与物化－生物模式成本为 1.45~8.00、1.30~5.30 元/m^3 [7]，本工艺处于中下限。成本优势来自：湿地自流省电耗；芬顿以药剂替代曝气电耗；UASB 承担 70% COD 负荷、沼气收益高[10] [11]。

4. “养殖－废弃物－种植”循环模式构建[17]

4.1. 模式设计思路

针对种养脱节、模式标准化低的痛点，摒弃“一刀切”通用方式，立足主导产业设计两套差异化循环模式，遵循养分精准匹配、就地就近消纳、多方利益共享三原则[18]。

4.2. 循环链条的养分特征

两条链路载体为厌氧发酵沼液(含达标尾水)与好氧堆肥产品。2024 年 5~10 月分 12 批次采试点场沼液与堆肥样，按 NY/T 525-2021 与 GB 5084-2021 测定，结果见表 9。

Table 9. Nutrient and pollutant contents of biogas slurry and composted organic fertilizer (n = 12, mean ± SD)
表 9. 沼液与堆肥有机肥养分及污染物含量(n = 12，均值 ± 标准差)

指标	沼液(厌氧发酵原液)	调配灌溉液 (沼液:尾水 = 1:3)	堆肥有机肥	参考限值
全氮 N	2.82 ± 0.23 g/L	0.71 ± 0.06 g/L	1.81 ± 0.14%	—
铵态氮 NH_4^+-N	1.86 ± 0.17 g/L (占全氮 66%)	0.47 ± 0.05 g/L	—	—
硝态氮 NO_3^--N	0.07 ± 0.01 g/L	0.05 ± 0.01 g/L	—	—
全磷 P_2O_5	0.49 ± 0.05 g/L	0.12 ± 0.01 g/L	1.05 ± 0.09%	—
全钾 K_2O	2.82 ± 0.24 g/L	0.71 ± 0.06 g/L	1.25 ± 0.10%	—
总养分 ($N + P_2O_5 + K_2O$)	6.13 g/L	1.54 g/L	4.11%	≥4.0% (NY/T 525-2021)

续表

有机质	5.24 ± 0.45 g/L	1.31 ± 0.12 g/L	46.3 ± 3.2%	≥30% (NY/T 525-2021)
pH	7.3 ± 0.2	7.4 ± 0.2	8.1 ± 0.3	5.5~8.5 (NY/T 525-2021)
含水率	—	—	28.5 ± 2.0%	≤30% (NY/T 525-2021)
砷 As	<0.05 mg/L	<0.05 mg/L	2.4 ± 0.5 mg/kg	≤15 mg/kg (NY/T 525-2021)
镉 Cd	<0.01 mg/L	<0.01 mg/L	0.31 ± 0.06 mg/kg	≤3 mg/kg (NY/T 525-2021)
铅 Pb	<0.05 mg/L	<0.05 mg/L	9.2 ± 1.4 mg/kg	≤50 mg/kg (NY/T 525-2021)
铜 Cu	1.6 ± 0.3 mg/L	0.4 ± 0.1 mg/L	38 ± 6 mg/kg	—
锌 Zn	3.2 ± 0.5 mg/L	0.8 ± 0.1 mg/L	156 ± 22 mg/kg	—
蛔虫卵死亡率	≥98%	≥98%	≥98%	≥95% (NY/T 525-2021)
粪大肠菌群数	≤100 MPN/L	≤100 MPN/L	≤100 个/g	≤100 个/g (NY/T 525-2021)

由表 9 可知，沼液氮以铵态氮为主(占全氮 66%)，速效性强；堆肥总养分 4.11%、有机质 46.3%，符合 NY/T 525-2021，重金属达标，作基肥施果园与大田。沼液按 1:3 (体积)调配制灌溉液，N、P、K 为 0.71、0.12、0.71 g/L，满足 GB 5084-2021，可水肥一体化滴灌。

4.3. 安岳柠檬产区循环模式

针对安岳柠檬水肥需求，设计“养殖废水处理–沼液精准灌溉”链路：粪污固液分离后，液体进“UASB–芬顿–阶梯式人工湿地”处理，达标尾水与沼液按 1:3 调配，经水肥一体化滴灌柠檬园；固体好氧堆肥制有机肥用于土壤改良。该模式资源化利用率 93%以上[19]，以沼液与有机肥替代部分化肥，减少柠檬种植化肥用量 15%~20% [20]，提升柠檬品质与市场竞争力。

养分需求量化是“精准匹配”前提。安岳柠檬与乐至粮食养分需求见表 10，柠檬推荐施肥量采用刘小曼等[21]中产果园推荐值，果实养分携出按武松伟等[22]“以果定肥”参数(每 t 柑橘耗 N 4.73、P_2O_5 1.00、K_2O 4.60 kg)结合单产 18.8 t/h m^2 换算；玉米、水稻分别采用王寅等[23]与郜紫依等[24]参数。

Table 10. Nutrient requirements of main crops
表 10. 主要作物养分需求量

作物	产量水平	N	P_2O_5	K_2O	来源
柠檬(推荐施肥量)	中产水平	133.4 kg/h m^2 (104.4~162.4)	81.3 kg/h m^2 (61.0~101.6)	117.0 kg/h m^2 (86.9~147.1)	[21]
柠檬(果实养分携出量)	18.8 t/h m^2	88.7 kg/h m^2	18.8 kg/h m^2	86.3 kg/h m^2	[22]
柠檬 N:P_2O_5:K_2O 比例	—	1	0.56~0.63	0.79~0.91	[21]
玉米(百公斤籽粒)	—	1.98 kg	0.90 kg	2.24 kg	[23]
水稻(百公斤籽粒)	—	1.85 ± 0.39 kg	1.00 ± 0.45 kg	2.66 ± 0.73 kg	[24]
粮食作物(本文取值)	—	1.92 kg	0.95 kg	2.45 kg	由[23] [24]加权

4.4. 乐至粮食产区循环模式

针对乐至粮食产区，设计“养殖粪污制肥－有机肥还田种粮”链路[25]：固体粪污与秸秆混合好氧堆肥制商品有机肥；液体厌氧发酵产沼气供能，沼液就近还田。

乐至及周边粮食种植面积广，2023 年全市粮食总产 167.8 万 t。有机肥还田改善丘陵土壤结构、提升耕地质量，该模式化肥亩均减量 15%以上，产量与品质同步提升。

4.5. 种养循环养分平衡核算

为检验“精准匹配”可行性，按物质守恒对全市种养系统养分供需平衡核算。猪当量折算与氮磷排泄系数采用《畜禽粪污土地承载力测算技术指南》[26]，参数见表 11。

Table 11. Parameters and their value basis for nutrient balance calculation
表 11. 养分平衡核算参数与取值依据

参数	取值	依据
生猪常年存栏当量	145.4 万猪当量	2023 年出栏 290.8 万头[2]，按年出栏 2.0 批次折算
畜禽折算猪当量合计	235.3 万猪当量	生猪占 61.8%，家禽、羊、牛等占 38.2%；结构比例参照雁江区 2020 年畜禽出栏结构[8]
粪污(含冲洗水)产生量	447.8 万 t/a (1.90 t/(猪当量·a))	与文献[4]报道的 2020 年 448 万 t 基本一致(相对偏差 0.4%)
氮排泄系数	11 kg/(猪当量·a)	[26]
磷排泄系数	1.65 kg P/(猪当量·a)，折 P_2O_5 3.78 kg	[26]
钾排泄系数	8.0 kg K_2O/(猪当量·a)	按猪当量粪尿钾排泄量取值
养分收集率	90%	干清粪 + 固液分离工艺
液/固相养分分配	N 40%/60%; P_2O_5 20%/80%; K_2O 55%/45%	生猪固体粪便中磷素占排泄总量 80% [26]；氮素经固液分离后部分转入固相
厌氧发酵氮素损失率	5%	密闭式厌氧反应器
好氧堆肥氮素损失率	25%	槽式/条垛堆肥 NH_3 挥发
磷、钾处理损失率	5%	沉渣与渗滤液带走
沼液养分当季利用率	N 60%; P_2O_5 70%; K_2O 85%	沼液铵态氮占比高，速效性强
堆肥养分当季释放率	N 25%; P_2O_5 30%; K_2O 60%	[26]及有机肥矿化试验参数
柠檬单产与面积	18.8 t/h m^2；3.2 万 h m^2	常年产量 60 万 t，保存面积 48 万亩[3]
粮食总产量	167.8 万 t	2023 年全市粮食总产量[2]

核算结果见表 12。全市粪肥当季有效供给 N 7932、P_2O_5 2890、K_2O 11,870 t；作物需求 N 36,487、P_2O_5 18,543、K_2O 44,855 t。氮、磷、钾化肥替代率 21.7%、15.6%、26.5%，综合 22.7%；仅计生猪粪污(占 61.8%)综合 14.0%。替代率区间 14.0%~22.7%，故化肥减量 15%目标具养分平衡依据、可实现。

粪污流向与资源化核算见表 13。全市粪污 447.8 万 t 中，固相 134.3 万 t (30.0%)堆肥制有机肥，液相 313.5 万 t (70.0%)厌氧发酵后沼液还田，35.0 万 t 深度处理尾水回灌果园。资源化 417.5 万 t、利用率 93.2%；未利用 30.3 万 t (6.8%)为达标排放、发酵与贮存损失。结果与目标 93%一致[19]。

Table 12. Nutrient supply-demand balance and chemical fertilizer substitution rate calculation
表 12. 养分供需平衡与化肥替代率核算

项目	N (t/a)	P_2O_5 (t/a)	K_2O (t/a)	合计(t/a)
① 排泄量(235.3 万猪当量)	25,883	8893	18,824	53,600
② 收集量(① × 90%)	23,295	8004	16,942	48,241
③ 处理后留存量	19,335	7604	16,095	43,034
④ 当季有效养分量	7932	2890	11,870	22,692
⑤ 柠檬园需求(3.2 万 h m^2)	4269	2602	3744	10,615
⑥ 粮食作物需求(167.8 万 t)	32,218	15,941	41,111	89,270
⑦ 作物养分需求合计(⑤ + ⑥)	36,487	18,543	44,855	99,885
⑧ 化肥替代率(④/⑦，%)	21.7	15.6	26.5	22.7
⑨ 仅计生猪粪污的替代率(%)	13.4	9.6	16.4	14.0

Table 13. Material flow and resource utilization rate calculation of livestock and poultry manure
表 13. 畜禽粪污物质流向与资源化利用率核算

流向	数量(万 t/a)	占比(%)	是否计入资源化
固相部分(干清粪 + 固液分离固相)	134.3	30.0	—
堆肥制有机肥	131.0	29.3	是
堆肥过程损失	3.3	0.7	否
液相部分(粪尿 + 冲洗水)	313.5	70.0	—
厌氧发酵沼液就近还田	251.5	56.2	是
深度处理尾水回用灌溉	35.0	7.8	是
厌氧发酵与贮存损失	10.5	2.3	否
达标排放	16.5	3.7	否
合计	447.8	100	—
资源化利用量/资源化利用率	417.5	93.2	—

4.6. 两种模式的对比分析

两套模式各有侧重(表 14)：安岳侧重液态废弃物灌溉，适配经济作物水肥需求；乐至侧重固态肥料化，适配大田规模需求。二者均遵循“就地消纳、就近还田”，对应区域主导产业养分特征。

Table 14. Comparative analysis of the Anyue model (lemon-producing area) vs. the Lezhi model (grain-producing area)
表 14. 安岳模式(柠檬产区)/乐至模式(粮食产区)对比分析

对比维度	安岳模式(柠檬产区)	乐至模式(粮食产区)
主攻方向	液态废弃物精准灌溉	固态废弃物肥料化利用
核心链条	养殖废水→协同治理→达标尾水 + 沼液→水肥一体化滴灌柠檬果园	养殖粪污→干湿分离→固体堆肥 + 秸秆→商品有机肥还田种粮
适配产业	安岳柠檬(经济作物，高附加值)	乐至粮食(大田作物，规模化)

续表

核心优势	提升柠檬品质与品牌溢价；解决丘陵果园灌溉水源不足问题	改良丘陵贫瘠土壤结构；解决大田作物区有机肥缺口
关键配套	沼液暂存池 + 水肥一体化滴灌系统 + 养分精准监测	好氧堆肥设施 + 有机肥撒施机械 + 秸秆收储体系
资源利用率	≥93%	≥93%
化肥减量	15%~20%	≥15%

5. 利益联结机制与长效运行保障

针对“政府单打、市场不足、农户消极”痛点，构建“政府补贴 + 企业运营 + 农户参与”三维保障机制[27]。

(1) 政府引导：资阳市已出台政策推动绿色种养循环。雁江区 2025 年试点示范 ≥10 万亩、粪污利用率 ≥93% [19]；全市规模场设施配套率 99.7%、综合利用率 91.8% [28]；2022~2024 年国省考核断面水质优良率连续 100% [19] [28]。

(2) 企业运营：培育专业化服务主体，负责粪污收集、处理与施用；以“养殖场 + 种植户 + 合作社”联结体系明确权责与收益，形成互利共赢运行模式。

(3) 农户参与：种植户用沼液与有机肥替代部分化肥，降低投入并通过利益联结获得粪肥服务。安岳柠檬带动 33 万果农人均增收超 1.7 万元[3]；农户收益变化未作定量调查，有待后续跟踪。

6. 效益分析与推广前景

6.1. 生态效益

中试表明，组合工艺出水均达 GB 18596-2001 一级标准，可支撑削减养殖源入河污染。区域上，2022~2024 年资阳国省考核断面水质优良率连续 100%，规模场设施配套率 99.7%、综合利用率 91.8% [28]；上述区域成效为部门统计，本文贡献份额尚无法剥离，需长期监测评估。

6.2. 经济效益

经济上，本工艺吨水净成本 2.00~2.50 元，低于常规工艺[7]；按表 12 粪肥化肥替代率 14.0%~22.7%，可减少种植端化肥投入。安岳柠檬全产业链产值 163.1 亿元[3]，但品质与品牌溢价受多因素影响，本文未作定量归因；养殖端资源化利用可降低环保合规风险。

6.3. 推广前景

本文技术体系与模式针对川中丘陵地形与产业特征提出，内江、遂宁等同类丘陵区具相似条件，适用性有待验证。已在乐至、安岳建成 2 个示范基地，后续需多规模、多作物长期监测评估。

7. 结论

(1) 构建“UASB－芬顿－阶梯式人工湿地”体系，5.0 m^3/d 中试、连续 120 d 下对 COD、NH_3-N、TP、SS 的累积去除率为 96.0% ± 0.5%、96.0% ± 0.5%、92.5% ± 0.9%、96.0% ± 0.5%，出水达一级标准；300 m^3/d 测算净成本为 2.00~2.50 元，较常规低 15%~20% [7]。

(2) 立足安岳柠檬与乐至粮食两大产业设计差异化“养殖－废弃物－种植”模式，可按供需匹配。养分核算化肥替代率 14.0%~22.7%、资源化率 93.2%，与减量 15%、利用率 93%以上目标相符。

(3) “政府补贴 + 企业运营 + 农户参与”机制与“养殖场 + 种植户 + 合作社”联结体系，破解

“重建设、轻运营”通病，保障长效运行。

(4) 形成的技术体系与模式可为川中丘陵畜禽养殖面源污染治理提供技术参考；受中试规模与时段限制，长期效果与区域适用性需进一步验证。

基金项目

获得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支持，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，项目名称：《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：202611116029)；校级创新创业训练计划项目名称：《成都市重点流域毗河水体微塑料－氮磷复合污染原位生态修复技术研究及应用》(项目编号：QM2026040)；校级创新创业训练计划项目名称：《成都市城市污水处理厂尾水微塑料与内分泌干扰物电化学协同降解关键技术研究及应用》(项目编号：QM2026041)。

注　释

①来源：https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/shjbh/swrwpfbz/200301/t20030101_66550.shtml

参考文献

[1] 四川省生态环境厅 四川省农业农村厅关于印发《四川省畜禽养殖污染防治规划》的通知[EB/OL]. 2022-12-30. https://sthjt.sc.gov.cn/sthjt/c23101802/2023/1/16/6e74298a18704af095142a66279d5394.shtml, 2026-07-08.

[2] 资阳市 2023 年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. 2024-03-27. https://ziyang.gov.cn/zysrmzf/tjgb/pc/content/content_1819378406345490432.html, 2026-07-08.

[3] 曹川川. 活力中国调研行|柠檬之乡安岳: “黄金果”酿出振兴甜[EB/OL]. 2025-09-08. http://guoqing.china.com.cn/2025-09/08/content_118066764.shtml, 2026-07-08.

[4] 陈远扬. 城乡生活垃圾收运转设施覆盖率 100% 四川资阳固体污染防治工作整体推进[EB/OL]. 2021-10-27. https://www.peopleapp.com/rmharticle/30024955477, 2026-07-08.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 资阳市雁江区人民政府 关于印发《资阳市雁江区“十四五”生态建设和环境保护规划》的通知[EB/OL]. 2023-02-03. https://www.yanjiang.gov.cn/yjqrmzf/qzfwj/pc/content/content_1824378929472925696.html, 2026-07-08.

[9] 蔡涛泽, 赵明杰, 任志炜, 等. UASB + SBR 组合工艺在养猪场废水处理中的应用[J]. 环境科学导刊, 2022, 41(6): 53-56.

[10] 王刚, 闻韵, 海热提, 等. UASB 处理高浓度畜禽养殖废水启动及产气性能研究[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(1): 95-99.

[11] 颜智勇, 吴根义, 刘宇赜, 等. UASB/SBR/化学混凝工艺处理养猪废水[J]. 中国给水排水, 2007, 23(14): 66-68.

[12] 谢勇丽, 邓仕槐, 段莎丽, 等. UASB 的启动及其对畜禽废水处理的试验研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(S2): 456-459.

[13] 孔娟. 论 UASB + A/O + Fenton 组合工艺——以畜禽养殖废水处理工程为例[J]. 资源节约与环保, 2016, 31(5): 37-38.

[14] 宋斌, 陈洁, 汪浩, 等. 菌草湿地对畜禽养殖废水中氮磷污染物去除效应研究[J]. 安徽农学通报, 2025, 31(6): 51-54.

[15] 裴亮, 孙莉英, 梁晶, 等. 不同填料对阶梯式人工湿地降解农业废水的影响[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(1): 232-235, 241.

[16] 刘长娥, 周胜, 孙会峰, 等. 复合人工湿地处理低浓度畜禽养殖废水的净化效果[J]. 农业环境科学学报, 2017,

36(7): 1416-1424.

[17] 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.

[18] 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.

[19] 资阳市雁江区农业农村局关于印发《2025 年雁江区绿色种养循环农业试点项目实施方案》的通知[EB/OL]. 2026-01-15. https://www.yanjiang.gov.cn/yjqrmzf/xczx100/pc/content/content_2031285156657688576.html, 2026-07-08.

[20] 裴玉松. 特色农险多层保护, 安岳柠檬品牌价值冲刺 200 亿元[N/OL]. 四川农村日报. 2025-04-16. https://cbgc.scol.com.cn/news/6195792, 2026-07-09.

[21] 刘小曼, 刘晓东, 刘伟栋, 等. 我国不同种类柑橘养分状况及氮磷钾推荐用量研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(4): 565-574.

[22] 武松伟, 梁珊珊, 谭启玲, 等. 柑橘营养特性与“以果定肥” [J]. 华中农业大学学报, 2021, 40(1): 12-21.

[23] 王寅, 高强, 冯国忠, 等. 吉林春玉米氮磷钾养分需求与利用效率研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(2): 306-315.

[24] 郜紫依, 鲁剑巍, 任涛, 等. 水稻百公斤籽粒养分吸收量及其影响因素整合分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(9): 1587-1596.

[25] 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.

[26] 农业部办公厅关于印发《畜禽粪污土地承载力测算技术指南》的通知[EB/OL]. 2018-01-29. https://nynct.guizhou.gov.cn/xwzx/wjzz/201801/t20180129_25118477.html, 2026-07-09.

[27] 吴菊珍, 胥宏, 张珈硕, 等. 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]. 环境保护前沿, 2026, 14(2): 102-112.

[28] 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]. 2025-08-22. https://nynct.sc.gov.cn/nynct/c100632/2025/8/22/eea10f71f75c424799b6b70917c0e4e6.shtml, 2026-07-08.