

# 集中居住形式下不同地理环境区域的农村生活污水资源化利用技术的研究与实践综述

祝厚然

(安徽省地球物理地球化学勘查技术院,安徽合肥 230022)

**摘要:**本文聚焦集中居住模式下不同地理环境区域的农村生活污水资源化利用技术,基于南方湿润区、北方半湿润与寒区及西北干旱区的地理环境与污水排放特征差异,系统分析生态湿地技术、厌氧-好氧联合处理技术等区域适配性。研究表明,南方通过复合湿地与厌氧-好氧耦合工艺实现高效净化与资源回收;北方依托低温耐受技术与智能曝气系统突破冬季处理瓶颈;西北则以抗污染膜技术与水-肥-能协同模式提升资源循环效率。研究为农村生活污水的区域化可持续治理提供技术路径与实践参考。

**关键词:**农村生活污水;地理环境;资源化利用;集中居住

**中图分类号:**X799.3

**文献标志码:**A

**文章编号:**1672-2736(2025)08-0037-6

## 0 引言

随着农村经济的快速发展和居民生活水平的提高,农村生活污水的排放量逐年增加,其处理问题日益凸显。传统的分散式污水处理模式难以满足集中居住区的高效处理需求,且资源化利用率较低。在此背景下,探索适合农村地理环境的生活污水资源化利用技术具有重要意义。本文以集中居住形式为例,结合农村地理环境的特点,分析生活污水的排放特征及处理技术的约束与机遇,重点探讨生态湿地技术、厌氧-好氧联合处理技术的应用及其资源化利用效果,旨在为农村生活污水的可持续治理提供理论依据和实践参考。

## 1 农村地理环境特征与污水处理区域差异

### 1.1 地理环境与生态特征的区域分异

根据全国生态区划数据<sup>[1]</sup>,我国农村地理环境呈现三级梯度分异。南方湿润区(占国土面积38.2%):地下水位埋深1.2-3.5m,土壤以红壤、黄壤为主,渗透系数 $1 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ ,

年均气温 $15 \sim 25^\circ\text{C}$ ,具有丰富的植物群落多样性。北方半湿润与寒区(占32.5%):地下水位3.0-8.0m,土壤多为棕壤、褐土,渗透系数 $1 \times 10^{-4} \sim 3 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ ,冬季低温持续3-5个月,年均气温 $-5 \sim 15^\circ\text{C}$ 。西北干旱区(占29.3%):地下水位普遍超过10m,沙漠化土地占比45.7%,土壤以风沙土为主,年均降水量 $<200\text{mm}$ ,蒸发量达2500-3000mm。

### 1.2 生活污水排放特征的区域差异

不同地理区域的污水水质与排放规律呈现显著分化。南方地区污水COD浓度200-400mg/L,氮磷含量较高(氨氮25-50mg/L,总磷3-8mg/L),排放受雨季影响显著,雨季污染物浓度稀释达30%-50%<sup>[2]</sup>。北方地区污水COD浓度300-500mg/L,冬季因用水减少导致污染物浓度升高15%-25%,且存在水质昼夜波动幅度大(早晚峰值占日均量60%)的特点<sup>[3]</sup>。西北地区污水具有“高SS、低氮磷”特征(SS200-400mg/L,氨氮15-30mg/L),日均排放量仅20-35L/人,且80%以上污水来自生活洗涤<sup>[4]</sup>。

### 1.3 污水处理需求与技术约束的区域分化

地理环境对技术选择形成刚性约束。南方

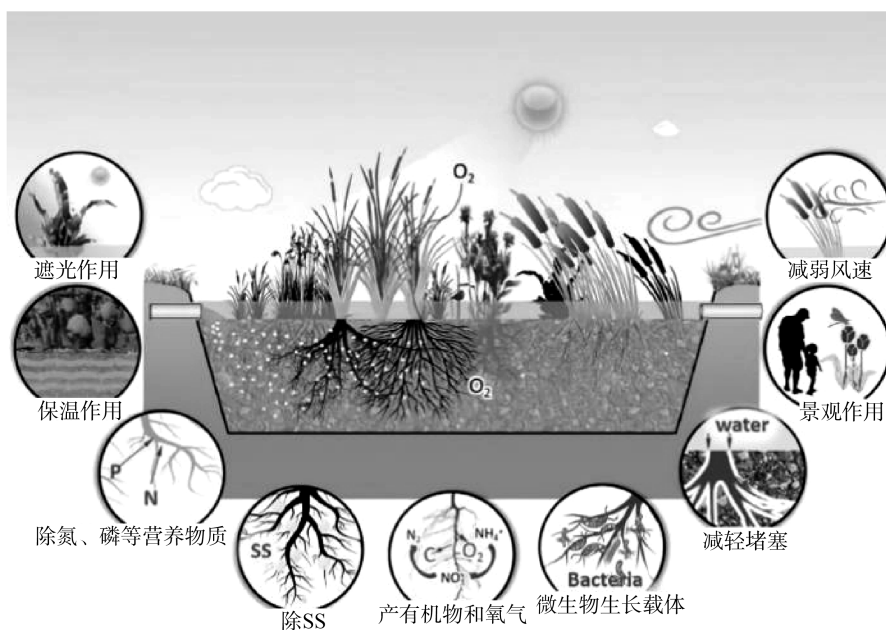


图 1 生态湿地技术原理

丰水地区面临“土地资源紧张-生态敏感区多”的双重约束,要求技术占地 $\leq 0.15\text{m}^2/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ,且生态兼容性强<sup>[5]</sup>。北方寒区冬季低温导致传统生化工艺效率下降 10%–30%,需维持反应器温度 $\geq 15^\circ\text{C}$ ,能耗成本增加 20%–40%<sup>[6]</sup>。西北干旱区水资源循环利用率需 $\geq 80\%$ ,但膜处理面临高盐污堵(TDS $\geq 1500\text{mg/L}$ 时膜寿命缩短 50%)<sup>[7]</sup>。

## 2 不同地理环境下的生活污水资源化技术

### 2.1 南方丰水地区技术体系

#### 2.1.1 生态湿地技术组合与优化

南方丰水地区依托年均 1600mm 以上降水量与亚热带湿润气候,构建以复合湿地为核心的生态处理体系。表面流-潜流组合湿地通过芦苇-茭白群落与沸石-火山岩复合基质的协同作用,形成“植物吸收-微生物降解-基质吸附”三级净化机制,年均 COD 去除率达 75%–85%,单位投资成本较传统工艺降低 30%–40%。改性沸石填料的引入使表面积增加 20%,总磷去除率提升至 80%以上,在珠江流域示范工程中实现出水 TP $\leq 0.5\text{mg/L}$ <sup>[8]</sup>。生态湿地技术原理如图 1 所示。

垂直流湿地通过“垂直流+生态塘”组合工艺进一步强化处理效能,借助太阳能曝气系统降低 30%能耗,结合潮汐流运行模式模拟自然水文节律,氮磷去除率可达 85%,土地占用面积减少 30%<sup>[9]</sup>。长江中下游地区应用案例显示,该工艺在 COD 浓度 200–400mg/L 条件下,出水 COD 稳定在 50mg/L 以下,满足 GB/T37066–2018 一级 A 标准。

该技术体系面临雨季水力负荷冲击的显著制约,当实际负荷超过设计值 50%时,氮磷去除率下降 10%–15%。研究表明,配套调蓄池或应急曝气单元可有效缓解冲击效应,但会使建设成本增加 15%–20%<sup>[10]</sup>。此外,冬季低温( $< 10^\circ\text{C}$ )导致微生物活性衰减,需通过耐寒植物筛选(如西伯利亚鸢尾)与保温层设置提升系统稳定性。

#### 2.1.2 厌氧-好氧联合工艺的气候适应性改良

针对南方高有机物浓度(COD 200–400mg/L)及高温多雨气候特征,开发 A<sub>2</sub>O–MBR 耦合系统实现高效处理与资源回收,其技术原理如图 2 所示。该工艺通过优化厌氧池水力停留时间(HRT 8–12h)和好氧池溶解氧控制(DO<sub>2</sub>–4mg/L),形成“水解酸化-硝化反硝化-膜分离”协同机制,COD 去除率可达 90%以上,出水 COD $\leq$

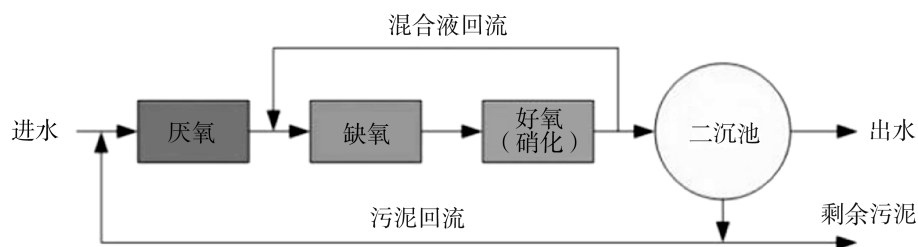


图2 厌氧-好氧联合工艺原理

30mg/L,同时实现 $0.25\text{m}^3/\text{kgCOD}$ 的沼气产率,在广东珠三角地区示范工程中满足农田灌溉水质要求<sup>[11]</sup>。

短程硝化反硝化技术依托南方 $25\text{--}30\text{℃}$ 的温度优势,通过pH精准调控( $7.5\text{--}8.0$ )和污泥龄控制( $10\text{--}15\text{d}$ ),将传统全程硝化反硝化路径缩短,氮去除率提升至90%,曝气量减少25%,能耗显著降低<sup>[12]</sup>。经济性分析表明,该工艺单位投资成本为 $1000\text{--}1500$ 元/ $\text{m}^3$ ,较传统活性污泥法降低20%–30%;运行成本 $0.3\text{--}0.5$ 元/ $\text{m}^3$ ,其中曝气系统电耗占比达60%,通过变频风机调控可进一步降低能耗<sup>[13]</sup>。但该技术对C/N比要求较高(需 $\geq 8$ ),当污水氮磷浓度波动时需补充碳源,吨水成本增加 $0.08\text{--}0.12$ 元。

## 2.2 北方半湿润与寒区技术创新

### 2.2.1 低温耐受型厌氧处理技术

针对北方冬季低温( $-5\text{--}15\text{℃}$ )导致微生物活性衰减的难题,开发温度调控与菌群强化协同技术体系。改良型厌氧反应器通过地源热泵维持反应温度 $15\text{--}20\text{℃}$ ,并投加嗜冷产甲烷菌等低温菌群,使冬季COD去除率稳定在80%以上,沼气产率提升20%,较传统厌氧工艺能耗降低15%–20%<sup>[14]</sup>。Internal Circulation Reactor(内循环反应器)通过优化三相分离器结构与上升流速,将容积负荷提升至 $15\text{--}20\text{kgCOD}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ ,抗负荷波动能力增强3倍,可有效应对北方农村污水昼夜浓度波动大(早晚峰值占日均量60%)的特点<sup>[15]</sup>。

### 2.2.2 强化脱氮除磷的生态-生化耦合工艺

针对北方寒区低温导致脱氮效率下降的问题,构建潜流湿地-生物滤池复合系统。该系

统冬季覆盖 $0.5\text{m}$ 厚保温层,并配置耐寒植物(如西伯利亚鸢尾),通过延长水力停留时间(HRT $24\text{--}36\text{h}$ )与填料优化(火山岩-沸石复合填料),将氨氮去除率从传统工艺的50%提升至70%,同时减缓填料堵塞,使维护周期从1年延长至3–5年<sup>[16]</sup>。

A/O-MBR智能曝气系统通过物联网技术实现精准调控,溶解氧传感器实时反馈数据并联动变频风机,将曝气量动态控制在 $2\text{--}4\text{mg/L}$ ,电耗从 $0.28\text{kWh}/\text{m}^3$ 降至 $0.23\text{kWh}/\text{m}^3$ ,同时维持氮磷去除率85%以上<sup>[17]</sup>。该技术突破了北方冬季硝化反应效率低的瓶颈,在河北雄安新区应用中,出水氨氮稳定在 $5\text{mg/L}$ 以下,满足GB/T37066-2018一级A标准。

然而,北方冬季保温措施导致建设成本增加15%–20%,且保温材料需每5–8年更换一次,运维成本较南方地区高30%–40%<sup>[18]</sup>。此外,低温环境下生物膜生长缓慢,需定期投加高效脱氮菌剂,进一步推高运行成本。

## 2.3 西北干旱区节水与资源回收技术

### 2.3.1 膜生物反应器的抗污染技术

针对西北干旱区高盐( $\text{TDS} \geq 1500\text{mg/L}$ )低氮磷污水特性,开发AnMBR-臭氧催化氧化耦合工艺。该技术首先利用臭氧预处理(投加量 $10\text{--}15\text{mg/L}$ )有效降解水中有机胶体,将膜污染指数(SDI)控制在3以下,保障后续膜处理单元稳定运行;采用耐污染性优异的惰性氧化锆陶瓷膜生物反应器,其耐污染性能较传统PVDF膜提升50%,在 $\text{TDS} \leq 2000\text{mg/L}$ 条件下可连续运行6–8个月无需化学清洗,使膜通量维持在 $15\text{--}20\text{L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ;最终实现出水 $\text{COD} \leq 50\text{mg/L}$ 且

回用率 $\geq 80\%$ <sup>[19]</sup>。

### 2.3.2 水-肥-能协同回收模式

针对西北干旱区水资源与肥料资源双重匮乏的特点,构建的鸟粪石结晶-沼气联合回收系统通过 pH 精准调控(9.0-9.5)和镁离子投加( $n(\text{Mg}) : n(\text{P}) = 1.2 : 1$ ),可将污水中 80% 以上的磷转化为鸟粪石晶体,同步通过厌氧消化实现  $0.2-0.3\text{m}^3/\text{m}^3$  的沼气产率,形成“磷肥回收-能源生产”协同效益;同时,依托西北丰富光照资源(年均日照 2800-3200h)的太阳能驱动膜蒸馏技术,通过光伏-膜耦合系统将吨水电耗降至  $1.5\text{kWh}$ ,水回收率达 90%,适用于无电网偏远村庄,形成“水资源循环-肥料替代-能源自给”的可持续模式<sup>[20]</sup>。

## 3 技术挑战与未来研究方向

### 3.1 多技术协同机制的区域适配性瓶颈

当前农村污水资源化技术体系存在显著的区域适配性矛盾:南方丰水地区生态湿地技术虽具备生态兼容性,但千吨级处理规模需占地 15-20 亩,与耕地保护政策形成刚性矛盾,尤其在珠三角、长三角等土地集约化区域,传统湿地的平面布局模式难以满足用地需求。北方寒区厌氧-好氧工艺面临低温能耗与低碳目标的双重制约,曝气系统电耗占比达 60%,若采用地源热泵保温,能耗成本较南方高 20%-40%,与“双碳”目标存在技术路径冲突。西北干旱区膜处理技术单位投资成本超  $2000\text{元}/\text{m}^3$ ,超出农村经济承载力,尽管再生水收益可抵消部分成本,但高盐污堵导致膜组件更换频繁,全生命周期成本仍居高不下<sup>[21]</sup>。

突破上述瓶颈需构建“环境-技术-经济”协同优化模型:开发立体式复合湿地,通过多层填料垂直结构减少占地面积,同时提升氮磷去除负荷;研发光伏驱动厌氧系统,利用西北地区丰富光照资源,提升可再生能源占比,降低传统工艺电耗;探索低成本膜材料创新,如聚偏氟乙烯(PVDF)改性技术,将膜组件成本降低。这些创新路径需结合地形梯度利用与气候响应型菌群

培育,形成跨区域技术协同体系。

### 3.2 智能化运维与全生命周期管理体系构建

现有农村污水资源化技术缺乏环境响应型调控能力,成为制约区域适配性的关键瓶颈。北方寒区厌氧反应器温度人工调节滞后性达 2-4 小时,导致冬季处理效能波动;西北干旱区膜系统污染预警准确率不足 70%,常因高盐污堵引发突发故障。这种运维滞后性使北方工艺能耗增加 15%-20%,西北膜组件更换频率提高 30%,显著推高全生命周期成本<sup>[22]</sup>。

未来需构建“传感器网络-边缘计算-云端优化”的智能运维体系:①在湿地系统部署水位传感器与植物生长监测模块,通过 AI 算法实现水位-植物蒸腾的联动调控,提升南方雨季抗冲击能力;②在厌氧反应器集成温度传感器与菌群活性监测芯片,利用边缘计算实时匹配温度-菌群代谢速率,将北方低温区工艺响应时间缩短;③在膜系统植入污染预警传感器,结合云端大数据分析建立膜污染预测模型,提升西北膜系统清洗周期预测准确率。

### 3.3 低碳化与资源化的协同优化路径

当前农村污水资源化技术面临“单项高效-综合低效”的突出矛盾,如厌氧消化仅能回收 30%-40% 的有机物能量转化为沼气,鸟粪石结晶技术未能同步实现氮素回收,导致资源浪费与碳排放叠加。对此,需构建低碳化与资源化协同优化路径:发展“水-能-肥”联产技术体系,通过厌氧消化-电化学氧化联合工艺,利用电化学氧化强化有机物分解效率,同步提升沼气产率 20% 以上,结合 pH 调控与镁离子投加实现氮磷回收率 $\geq 85\%$ ,形成“能源生产-磷肥回收”协同效益;研发湿地-人工光合系统耦合技术,借助藻类物质规模化培养,在湿地系统中构建“植物-藻类”共生体系,通过藻类光合作用实现碳固定(年固碳量达  $1.2-1.5\text{t}/\text{亩}$ ),同步去除污水中 90% 以上的氮磷营养物,收获的藻类生物质可用于生物燃料生产,构建“水质净化-碳汇提升-能源转化”的闭环链条。该路径通过技术耦合

突破单项技术局限,实现污水治理从“达标排放”向“低碳资源循环”的范式转变<sup>[23]</sup>。

#### 4 结论

本文系统研究了集中居住模式下不同地理环境区域的农村生活污水资源化利用技术,得出以下结论:地理环境特征显著影响技术适配性,南方丰水地区生态湿地与厌氧-好氧工艺通过基质-植物协同及气候响应型菌群培育,实现COD去除率75%-90%,但冬季低温致效能下降;北方寒区改良型厌氧-好氧工艺结合保温与智能曝气,低温下氮磷去除率超85%,沼气产率提升20%;西北干旱区膜生物反应器与水-肥-能协同技术实现80%以上水资源循环利用与磷回收。研究表明,通过地形梯度利用、低碳技术耦合及智能化运维,可提升再生水灌溉、生物质能回收等效益。未来需构建多技术协同体系,完善全生命周期管理,推动农村污水治理向低碳资源循环转型。

#### 参考文献(References):

- [1] 张鸿涛,李东玲,张金辉,等.组合人工湿地在河流考核断面水质达标保障工程中的应用[J].给水排水,2021,57(01):49-53.
- [2] 陈铁柱,周日修,田航飞,等.北方大型湿地氮和磷去除的季节性规律[J].生态学杂志,2025,44(07):2157-2163.
- [3] 黄天寅,王烽圣,许晓毅,等.城镇污水处理厂改良厌氧/缺氧/好氧工艺的两种碳源补充途径脱氮效能比较[J].环境污染与防治,2022,44(06):777-781.
- [4] de Oliveira Souza A, Bernardelli J K B, de Carvalho Silva L, et al. Plasterboard sheet applied in vertical-flow constructed wetlands: Nutrients removal, microbial diversity, and mechanisms [J]. Journal of Water Process Engineering, 2023, 53: 103811.
- [5] Kumbier K, Hughes M G, Carvalho R C, et al. Intertidal wetland geomorphology influences main channel hydrodynamics in a mature barrier estuary [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2022, 267: 107783.
- [6] Aslam A, Khan S J, Shahzad H M A. Anaerobic membrane bioreactors (AnMBRs) for municipal wastewater treatment—potential benefits, constraints, and future perspectives: An updated review [J]. Science of the total Environment, 2022, 802: 149612.
- [7] Uhlřiová L. Analysis of a Tank Used for the Purposes of Ecological Purification of Water [J]. International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM, 2018, 18(6.4): 613-619.
- [8] 周超群,吴磊,李先宁,等.不同填料短程好氧生物滤池用于农村污水的资源化研究[J].水处理技术,2017,43(12):118-122.
- [9] 贾洪柏,许超,杨云成,等.填料-厌氧-好氧消化+复合酶工艺对城市污水处理及污泥减量的效能[J].净水技术,2024,43(10):99-105+133.
- [10] 张铁坚,周彪,马岚,等.农村生活污水处理全过程低耗管理探讨[J].水处理技术,2025,51(02):1-7+21.
- [11] 党博文.农村生活污水治理现状及对策分析[J].皮革制作与环保科技,2024,5(23):103-104+107.
- [12] 张文强,张婷,刘璐,等.长江中游四省农村生活污水排放特征及处理设施现状分析[J/OL].环境工程,1-11[2025-03-07].
- [13] 杨龙斌.新型生物膜-微絮凝滤池协同脱氮除磷生产性试验及相关机理研究[D].福州:福建工程学院,2021.
- [14] 廖振奇,韦科陆.两级垂直流人工湿地处理农村生活污水的应用[J].轻工科技,2024,40(02):133-136.
- [15] 谭映临,钟晓亮,王涛,等.沸石分子筛吸附去除VOCs的研究进展[J].环境科学与技术,2023,46(02):178-189.
- [16] 黄凌军,严小芳,李小伟,等.不同组合方式对厌氧-好氧消化联合处理市政污泥性能的影响[J].给水排水,2018,54(01):31-35.
- [17] 林俊敏,明玲玲,徐骥.某食品废水厌氧处理技术节能效果与经济效益评估[J].当代化工研究,2023,23(01):94-97.
- [18] 李克勋,张振家,张扬,等.厌氧-好氧处理变性淀粉生产废水工程实例[J].工业水处理,2003,23(06):53-55.

- [19] 周璇,张均龙,马彦涛. 浅谈农村污水处理现状及展望[J]. 农业与技术, 2020, 40(18): 56-58.
- [20] 孟剑鸣,任秀峰. 农村生活污水治理问题及对策研究[J]. 江西农业, 2021, 15(12): 50-51.
- [21] 胡汉琴. 城市生活污水资源化利用与环保技术研究[J]. 新农民, 2024, 35(22): 78-80.
- [22] 王国田,郭芳,温禾,等. 基于源分离的农村污水资源化技术现状与展望[J]. 资源节约与环保, 2024, 42(02): 41-46.
- [33] 李瑜. 农村生活污水资源化利用技术模式及工程示范[J]. 净水技术, 2024, 43(02): 83-89+96.

---

**作者简介:**

第一作者/通讯作者: 祝厚然, 1986 年生, 男, 安徽砀山人, 安徽省地球物理地球化学勘查技术院, 工程师, 主要研究方向为土木工程。Email: 285124806@ qq. com

---

## **A Review of Research and Practice on Resource Utilization Technology of Rural Domestic Sewage in Different Geographical Environment Areas under Concentrated Residence**

ZHU Houran

(Anhui Institute of Geophysical and Geochemical Exploration Technology, Anhui 230022, China)

**Abstract:** This paper focuses on the resource utilization technologies of rural domestic sewage in different geographical environment areas under the concentrated residential model. Based on the differences among geographical environment and sewage discharge characteristics in the southern humid region, the northern semi-humid cold region and the northwest arid region, it systematically analyzes the regional adaptability of ecological wetland technology, anaerobic-aerobic combined treatment technology, etc. Studies show that in the south, efficient purification and resource recovery are achieved through complex wetlands and anaerobic-aerobic coupling processes. The north has broken through the bottleneck of winter treatment by relying on low-temperature tolerance technology and intelligent aeration systems. In the northwest, anti-pollution membrane technology and the water-fertilixy-energy synergy model are adopted to enhance the efficiency of resource recycling. The research provides technical paths and practical references for the regional and sustainable governance of rural domestic sewage.

**Key words:** rural domestic sewage; geographical environment; resource utilization; centralized residence