

项目公示信息

一、项目名称：低碳源农村污水稳态处理关键技术与应用

二、提名者及提名意见

提名单位：陕西省土建学会

农村生活污水的收集管网系统规模小，导致污水水量、水质具有波动排放的特征，照搬城市污水处理模式的常规工艺系统很难依靠水中自有基质维持稳态运行。以实现农村生活污水高效稳定处理、降低出水的环境污染风险为目标，针对污水碳源不足、存在间歇断流的问题，依托国家及省部级科研项目，历时10余年，研发了高频微氧工艺、碳源内循环生物强化处理方法及微动力生态滴滤池处理技术，攻克了生物处理系统内有限碳源高效配置难题，项目成果成功应用于陕西、山西、甘肃等地的农村污水处理站近100座，克服了因污水低碳源、间歇断流导致的污泥流失和系统失稳等问题。有效削减了农村生活污水面源污染、改善了项目区域的人居环境质量，社会经济效益显著。

项目材料齐全、规范，无知识产权纠纷，人员排序无争议，符合陕西省科技进步奖提名条件。特提名为陕西省科技进步奖二等奖。

三、项目简介

该项目属于水污染防治工程领域。

农村污水以不足 30%的污水排放量贡献了全国 42%的化学需氧量（COD）、65%的总氮（TN）和 60%的总磷（TP）排放，深入开展农村污水治理不仅对控制我国污染物排放总量意义重大，同样是对美丽乡村建设目标的重要推进。

农村污水治理面临以下三大难题：(1) 长期以来受农村生产与生活习惯的影响，其污水普遍呈现低碳源、高营养盐的水质特征。污水中有机质含量不足，导致生物脱氮除磷效率低下，功能微生物代谢受阻、群落结构朝着不利方向演化，系统运行稳定性不足。(2) 加之农村污水排放具有显著的间断性与周期性，这种水力波动导致活性污泥系统反复经历基质匮乏与水力冲击负荷，断流时微生物处于内源呼吸状态，胞外聚合物过量消耗、群落结构失衡；恢复进水时水力与污染物负荷冲击极易引发活性污泥流失，

加剧了低碳源条件工艺调控的复杂性与稳态运行难度。(3) 鉴于广大农村地区面临地形复杂、存在农户分散区域污水难以纳管收集的实际情况，现有处理技术与装备无法适应单户污水排放瞬态输入下的快速吸附与代谢转化要求，导致大量分散农户污水未经有效处理、直排环境，形成面源污染。上述问题凸显了农村污水治理领域“重建轻管”、传统技术与实际情况不匹配的深层矛盾。

对此，该项目历时 10 余年，从微生物生态调控、过程动力学解析和反应器设计三个层面入手，研发了适应低碳氮比、间歇流和瞬态负荷特征的农村污水低成本处理技术，实现了处理系统在真实运行环境下的长效稳定。取得了如下成果：

1. 针对低碳氮比农村污水，研发了低碳源污水高频微氧强化处理技术，通过构建短程硝化-反硝化耦合厌氧氨氧化的协同脱氮路径，并集成磷高效吸附与沉淀单元，研制出一体化生物处理装置。该系统在无外加碳源条件下可实现总氮去除率 $>85\%$ 、总磷去除率 $>80\%$ ，运行成本降低 20%以上，突破了低碳源污水依赖外部碳源投加方能稳定脱氮除磷的技术瓶颈。

2. 针对非连续流农村污水的周期性冲击负荷，开发了基于内源碳循环利用的生物强化处理技术，通过剩余污泥厌氧发酵产酸并与尾水混合，作为断流引发的基质匮乏期碳源补充，有效维持反硝化碳源供给；结合分区供氧与溶氧精准调控，缓解了因饥饿胁迫导致的污泥胞外聚合物过度消耗及絮体稳定性恶化问题，处理系统成功应对了累积断流时长超过 12 h/d 的水力、基质冲击负荷，污泥流失率降低 95%以上，该工艺利用曝气节能实现电费盈余并驱动发酵单元，在运行成本零增加的前提下保障了系统稳定达标运行。

3. 针对难以纳管集中处理的分散农户，发明了微动力生态滴滤处理技术，研发了重力虹吸自动配水-拔风自然复氧一体化滴滤池装置，通过多层功能性生物滤料协同吸附、降解与硝化/反硝化作用，在无外动力条件下实现 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 及 TP 平均去除率分别达到 90%、92%和 95%以上；该系统维护周期长达 6 个月，日均运行成本不超过 0.5 元，显著提升了瞬变水质条件下污染物的去除稳定性与适应性。

4. 集成上述关键技术开发成果，构建了农村污水因地制宜处理模式，

提出了以服务人口数为关键判定参数的多场景适配的模块化工艺组合与快速选型指南，系统解决传统分散处理设施抗冲击负荷能力低、碳源依赖性强、能耗高及运维复杂等问题，推动农村污水治理向精细化、标准化与低碳化方向转型。

该项目授权发明专利 20 项，发表论文 50 余篇、出版专著 1 部。由王双明院士担任主任的技术评价委员会认为“低碳源污水高频微氧强化处理技术达到国际领先水平”。项目技术成果已在陕西、山西、甘肃等地的近 100 座农村污水处理站中成功应用，近 3 年经济效益 2.37 亿元。相关工程案例有效削减了农村污水面源污染，为提升农村人居环境卫生、实现美丽乡村发展目标提供关键技术支撑。

四、客观评价

4.1 技术先进性

项目研发的低碳源农村污水稳态处理关键技术较国内外技术对比如下表所示。

4.2 项目成果验收、查新与鉴定意见

(1) 项目组承担的国家重点研发课题“西北黄土塬区农村供排水一体化与环境改善技术研究与示范”（课题编号：2016YFC0400701）通过专家组结题验收，验收意见为：“开发了农村污水新型一体化处理技术及装备，依托该技术形成的陕西省一省一策农村供排水一体化技术方案，可有效解决西北黄土塬区农村污水治理问题，改善农村人居环境”。

(2) 项目组承担的陕西省重点研发计划重点产业链项目“农村污水处理及生态景观营造关键技术研究及示范”（项目编号；2020ZDLNY06-07）通过专家组验收，验收意见为：“调查了陕西省不同区域农村污水水量和水质；构建了厌氧滤床-微曝气一体化处理装置和生态渗井污水处理装置；研发了粪尿源分离收集与资源化处理技术；提出了因地制宜的农村生态化改造与健康水代谢模式”。

(3) 2025 年 8 月 19 日，教育部科技查新工作站对项目组完成的“低碳源农村污水稳态处理关键技术与应用”进行了科技查新，查新结论表明：“在国内外公开发表的中外文文献中，除本查新项目组的研究成果外，与本项目

查新点完全相同的未见报道。”

内容		国内外以往研究	本项目研究
低碳源农村污水处理	工程措施	外加碳源：包括乙酸/乙酸钠速效碳源、废弃物衍生碳源、天然纤维素等缓释碳源	无需外加碳源
	工艺手段	利用硫作为电子供体驱动自养反硝化，调控复杂、需含有一定量的硫酸盐；微弱电流刺激微生物代谢，铁阳极释放 Fe^{2+} 促进自养反硝化与化学除磷；人工湿地组合工艺直接处理	高频微氧短程硝化-厌氧氨氧化工艺，厌氧脉冲淘洗富集功能菌，在 20 天系统快速启动，污泥絮体结构强度和沉降性能良好，总氮去除超过 85%，运行费用降低 20%
周期性断流污水处理	工程措施	断流过程补充商品碳源；通过 PLC 自控系统根据水位智能启停，断流时延时关闭曝气，缓解微生物自消解	分区供氧与溶氧调控，实时响应进水变化，抑制异养菌耗碳、促进功能菌富集，缓解断流下的碳源竞争矛盾
	工艺手段	利用潮汐涨落原理，使湿地填料交替处于浸水吸附污染物和暴露接触空气降解污染物状态；单回流 AO+侧循环澄清池，取消混合液内回流，强化脱氮除磷效果	剩余污泥发酵碳源回收与精准投加，通过内源性 VFA 的按需回用弥补源碳缺乏，避免微生物活性遭受不可逆损伤，全面提升系统抗逆性与处理稳定性
分散农户污水处理	工程措施	污水收集、转运/清运	就地处理
	工艺手段	双瓮化粪池，优化瓮体结构、延长水力停留时间和分级厌氧发酵；无动力净化槽，依赖厌氧处理和重力过滤，应对间歇水流	自然通风和重力虹吸间歇进水的生态滴滤池处理，利用通气层的拔风效应无电耗充氧，实现低维护强度下的污染物高效去除

(4) 2025 年 8 月，陕西省土木与建筑工程学会组织并主持对西安科技大学、西安交通大学等单位共同完成的“低碳源农村污水稳态处理关键技术与应用”项目科技成果鉴定会。由王双明院士担任主任的技术评价委员会认为：“项目成果经济、社会和生态环境效益显著，低碳源污水高频微氧强化处理技术成果达到国际领先水平”。

4.3 项目成果应用检测报告

经第三方机构对项目组处理的多地农村污水水样进行检测，结果均符合《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》DB61/1227-2018 中规定的一级标准限值。

五、代表性论文专著目录（限 5 条）

序号	论文专著名称	刊名	作者	第一完成单位	年卷页码	发表时间	通讯作者	第一作者	国内作者	SCI 他引次数	他引总次数	知识产权是否归国内所有
1	Insight into microbial adaptability in continuous flow anaerobic ammonium oxidation process for low-strength sewage treatment	Bioresource Technology	Yulei Chi, Wuang Ren, Pengkang Jin, Jianxi Ren, Bo Ren, Zhiting Chen	Xi'an University of Science and Technology	2024, 396: 130431	2024	Pengkang Jin	Yulei Chi	Yulei Chi, Wuang Ren, Pengkang Jin, Jianxi Ren, Bo Ren, Zhiting Chen	3	4	是
2	Characteristics of fungi formation in urban sewer at different flow conditions: Distribution, metabolism, and pathogenicity	Chemosphere	Xuan Shi, Jianshuang Han, Yilian Hui, Yulei Chi, Yuxuan Hou, Xin Jin, Pengkang Jin	Xi'an Jiaotong University	2024, 351, 141159	2024	Pengkang Jin	Xuan Shi	Xuan Shi, Jianshuang Han, Yilian Hui, Yulei Chi, Yuxuan Hou, Xin Jin, Pengkang Jin	2	3	是

3	Diversified metabolism makes novel <i>Thauera</i> strain highly competitive in low carbon wastewater treatment	Water Research	Tong Ren, Yulei Chi, Yu Wang, Xuan Shi, Xin Jin, Pengkang Jin	Xi'an University of Architecture and Technology	2021, 206: 117742	2021	Pengkang Jin	Tong Ren	Tong Ren, Yulei Chi, Yu Wang, Xuan Shi, Xin Jin, Pengkang Jin	200	231	是
4	Novel adaptive activated sludge process leverages flow fluctuations for simultaneous nitrification and denitrification in rural sewage treatment	Water Research	Yadong Xie, Qionghua Zhang, Qi Wu, Jiyu Zhang, Mawuli Dzakpasu, Xiaochang C. Wang	Xi'an University of Architecture and Technology	2024,25 5121535	2024	Xiaochang C. Wang	Yadong Xie	Yadong Xie, Qionghua Zhang, Qi Wu, Jiyu Zhang, Mawuli Dzakpasu, Xiaochang C. Wang	9	10	是
5	Enhanced removal of organics and ammonia by a composite anode in the electrochemically assisted ozonation (EAO) processes with reduced sludge and alleviated passivation	Separation and Purification Technology	Chao Yang; Xin Jin; Shiyi Hu; Yuge Guo; Zhen Qian; Pengkang Jin	Xi'an University of Architecture and Technology	2022, 297: 121536	2022	Pengkang Jin	Chao Yang	Chao Yang; Xin Jin; Shiyi Hu; Yuge Guo; Zhen Qian; Pengkang Jin	5	5	是

六、代表性知识产权和标准规范等目录（限 10 条）

序号	知识产权类别	知识产权具体名称	国家(地区)	授权号	授权公告日	证书编号	权利人(标准起草单位)	发明人(标准起草人)
1	发明专利	一种餐厨垃圾与生活污水协同处理系统与方法	中国	ZL201910551243.7	20210727	4575485	西安科技大学	任武昂,张新艳,金鹏康
2	发明专利	污水生化处理系统的运行控制方法	中国	ZL 202110317172.1	20230414	5884557	西安科技大学	任武昂,金鹏康,鞠恺,李亚娇
3	发明专利	一种自适应水量的分散式污水处理装置及利用该装置的厕所冲水系统	中国	ZL 201910550172.9	20220429	5115261	西安科技大学	任武昂,鞠恺,金鹏康
4	发明专利	交替饥饿培养诱导短程硝化反硝化的装置及其控制方法	中国	ZL201910500484.9	20221101	6576821	西安建筑科技大学	金鹏康,荣懿,金鑫,石烜
5	发明专利	一种源分离粪便资源化处置设备的优化装置	中国	ZL201810161995.8	20210608	4472659	西安科技大学	任武昂,李亚娇,鞠恺,金鹏康
6	发明专利	一种改进的粪便源分离装置与方法	中国	ZL201810142520.4	20210202	4234119	西安科技大学	任武昂,柴蓓蓓,马保成,金鹏康
7	发明专利	一种餐厨垃圾联合农村生活污水处理的装置和方法	中国	ZL201910158902.0	20231020	7015308	西安建筑科技大学	金鹏康,荣懿,金鑫,石烜
8	发明专利	一种多模式改良 A2O 高效节能污水处理装置	中国	ZL202210293873.0	20240906	7350392	西安建筑科技大学	张琼华,解雅东,李怡,熊家晴
9	发明专利	一种内部调节污水流量的小型污水处理装置	中国	ZL202210293881.5	20241115	7525514	西安建筑科技大学	张琼华,解雅东,李怡,熊家晴
10	其他	农村污水生物强化处理技术与原理	中国	ISBN978-7-5693-3815-7	202410		西安交通大学	金鹏康,石烜,池玉蕾,荣懿

七、主要完成人情况

姓名	排名	行政职务	技术职称	完成单位	对本项目贡献
任武昂	1	系主任	副教授	西安科技大学	项目研究总负责人，负责制定低碳源农村污水稳态处理技术工作路线及研究目标，对成果 2、3 和 4 做出了突出贡献。
石 烜	2	无	副教授	西安交通大学	项目核心参与人之一，负责“低碳源污水高频微氧强化处理技术”的攻关，揭示了高频微氧系统的污染物强化去除机制，对成果 1 做出了重大贡献
张琼华	3	无	教授	西安建筑科技大学	项目核心参与人之一，负责“非连续流污水的稳态处理技术”的研发，提出了相关处理设备的核心设计理念，对成果 2 做出了重大贡献。
张亚强	4	副总经理	高级工程师	中科核润(陕西)生态环境有限公司	项目主要参与人员之一，主要负责工程试验现场组织协调及数据整理工作，参与项目立项、实施、结题和鉴定，对成果 4 做出了重大贡献。
池玉蕾	5	无	副教授	西安科技大学	项目主要参与人之一，负责“低碳源污水高频微氧强化处理技术”研发，建立了多场景适配的技术路线选择体系，对创新点 1 做出重要贡献。
杨 超	6	无	副教授	西安建筑科技大学	项目核心参与人之一，负责“灰水微动力生态滴滤处理技术”的研发，以及研究方案制定、现场测试、室内试验和研究报告编写，对成果 3 做出重要贡献。
解雅东	7	无	讲师	西安建筑科技大学	项目主要参与人之一，参与了“非连续流污水的稳态处理技术与装备”的工艺研发、实验研究、数据整理，对成果 2 做出重要贡献。
任 童	8	无	副教授	西安建筑科技大学	项目主要参与人之一，参与了高频微氧处理装置研发、现场测试、数据处理、报告编写、成果验证与推广，对成果 1 做出了一定贡献。
荣 懿	9	无	讲师	西安建筑科技大学	项目主要参与人员之一，参与了“非连续流污水的稳态处理技术”的研发，对成果 2 做出一定贡献。
张志鹏	10	部长	工程师	中科核润(陕西)生态环境有限公司	项目主要参与人之一，主导完成了成果 2、3 中成套设备与一体化装置的产品化研制、模块化设计与标准化生产，对成果 4 做出了一定贡献。

八、主要完成单位情况

1. 西安科技大学

作为本项目的主体承担与牵头单位，全面负责项目的总体规划、组织协调与过程管理。主导了从技术调研、理论研究、室内试验到现场中试的全过程研发工作。是第一和第四项核心成果的完成主体：首创了“低碳源污水高频微氧强化处理技术”，并牵头研制了核心的“一体化处理装置”；在此基础上，集成项目全部创新成果，构建了“分散式生活污水因地制宜型处理模式”，建立了多场景适配的技术路线选择体系，为项目的技术创新与集成应用做出了决定性贡献。

2. 西安交通大学

作为项目的主要技术研发单位，是第二项创新成果的完成主体。专注于“非连续流污水碳源内循环生物强化处理技术”的攻关，揭示了断流-冲击复合条件下系统稳定维持的机理，突破了该技术的核心科学问题，并完成了“剩余污泥发酵产酸与尾水混合供给生化单元碳源的成套设备”的工艺原理与核心技术设计，为保障系统低碳稳态运行提供了关键理论和技术支撑。

3. 西安建筑科技大学

作为项目的主要技术研发单位，是第三项创新成果的完成主体。主导发明了“零星排放灰水微动力生态滴滤处理方法”，原创性地提出了“重力虹吸配水-拔风供氧”这一核心设计理念，并完成了其工艺原理和一体化装置的理论设计。同时，利用其在污水处理领域的深厚积淀，为项目其他技术环节（如厌氧氨氧化装置研发、处理模式构建）提供了重要的理论支持与研发辅助。

4. 中科核润(陕西)生态环境有限公司

作为项目的成果转化与产业化应用单位，负责将核心技术转化为可推广的产品与工程实践。主导完成了第二、三项成果中成套设备与一体化装置的产品化研制、模块化设计与标准化生产，并全面负责技术的工程示范、效果测试与产业化推广工作，是项目成果从实验室走向工程应用的关键实施者，为实现项目的经济社会效益提供了坚实基础。

九、完成人合作关系说明

项目实施期间，项目完成人任武昂、石烜、张琼华、张亚强、杨超、解雅东、任童、荣懿和张志鹏合作参与项目的研究工作，主要取得成果如下：

1. 任武昂/1、池玉蕾/5、合作完成论文1；
2. 任武昂/1、石烜/2、荣懿/9合作完成“农村污水处理与生态景观营造关键技术研究及示范”项目研发；
3. 任武昂/1、石烜/2、张琼华/3、张亚强/4、池玉蕾/5、杨超/6、解雅东7、任童/8、荣懿/9、张志鹏10共同完成了“低碳源农村污水稳态处理关键技术与应用”成果鉴定；
4. 石烜/2、池玉蕾/5、荣懿/9合作完成专著10；
5. 石烜/2、池玉蕾/5合作完成论文1；
6. 石烜/2、池玉蕾/5、任童/8合作完成论文3；
7. 张琼华/3、解雅东/7合作完成专利8、9。