

按效付费驱动下污水处理运行绩效的特征与优化

蔡献泉

(广东理工学院建设学院)

DOI: 10.65285/QYSTYFZ.V11i1.002

摘要: 按效付费将经济回报与环境绩效直接挂钩,但统一标准与差异化禀赋之间的适配性构成制度设计的关键难题。研究以中国南方某市两座典型污水厂为例,基于 2022–2024 年月度运营数据,采用超效率 SBM 模型测算综合技术效率,揭示按效付费驱动下运行绩效的特征。结果表明样本厂综合去除率由 84.86% 提升至 88.12%,全要素生产率指数从 0.971 跃升至 1.053,机制产生显著正向激励。最后提出优化策略可为同类城市污水处理绩效管理改革提供参考。

关键词: 按效付费; 绩效分异; 城镇污水厂; 激励匹配

Characteristics and Optimization of Wastewater Treatment Operation Performance Driven by Performance-based Payment

Xianquan Cai

School of Construction, Guangdong Technology College

Abstract: Performance-based payment directly links economic returns to environmental performance. The adaptability between unified standards and differentiated endowments is a key dilemma in institutional design. Based on the monthly operation data of two typical urban sewage treatment plants in southern China from 2022 to 2024, this paper adopts the super-efficiency SBM model to calculate the comprehensive technical efficiency and analyze the operational performance characteristics under the driving mechanism of performance-based payment. The results show that the comprehensive pollutant removal rate of the sample plants increased from 84.86% to 88.12%, and the total factor productivity index increased from 0.971 to 1.053, indicating that the mechanism has produced a significant positive incentive effect. The proposed optimization strategies can provide references for the performance management reform of urban wastewater treatment in similar cities.

Keywords: performance-based payment; performance differentiation; urban wastewater treatment plant; incentive matching

前言:

传统按水量付费模式存在根本性激励错位,运营方具有扩大处理规模的经济动机,却缺乏提升削减效率的有效激励,造成财政资金配置效率损失的同时,与污染物减排目标形成内在冲突^[1]。按效付费将经济回报与环境绩效直接挂钩,在政府与运营企业之间嵌入激励相容的约束机制,研究表明其对低效处理具有显著的经济惩罚效应^[2-3]。然而,统一考核标准能否适配差异化禀赋条件构成制度设计的关键难题,处理规模、管网完善度、水质特征、工艺路线等异质性条件深刻影响削减的边际成本与提升潜力^[4]。若采用统一阈值与奖惩梯度,禀赋优越者激励强度不足,禀赋薄弱者则可能因达标压力过大而产生激励扭曲,由此引致的公平与效率权衡构成制度的内在张力^[5]。

本研究以南方某市两座典型污水厂为案例,构建按效付费驱动下的运行绩效对比诊断框架,揭示不同禀赋条件下的绩效分异规律,识别低效厂关键短板并提出付费机制优化策略。

一、研究设计

(一) 样本选择与数据来源

本研究选取中国南方某市两座典型城镇污水处理厂(第

一、第二污水厂)为案例,设计规模分别为 5 万 t/d 与 11 万 t/d,工艺为氧化沟和微曝氧化沟+多段 AO,投运及提标改造时间不同,可代表不同规模与工艺下按效付费的实施效应。研究时段为 2022–2024 年,覆盖政策落地前后完整过渡期,采用月度面板数据。

两厂出水均稳定达标,但运行特征分异明显(见表 1)。第二厂设计规模为第一厂 2.2 倍,实际处理水量仅 1.38 倍,负荷率 56.2%,远低于第一厂的 89.2%;进水 COD 均值(116 mg/L)较第一厂(94 mg/L)高 23.4%,但均远低于设计值(250/300 mg/L),反映管网收集效能不足的共性问题。绝对削减量上,第二厂 COD 和氨氮分别高出 75.4% 和 47.5%,规模效应初显;但其单位污染物削减成本显著高于第一厂,新工艺投产初期运行磨合与能耗偏高是主因。第一厂虽规模小、工艺传统,但长期稳定运行积累的管理经验使其单位电耗与药剂消耗控制更优,负荷饱和、设备利用率高。

(二) 绩效对比与优化调控方法

采用静态测算与动态分解相结合的技术路径^[6]。静态效率运用超效率 SBM 模型,纳入松弛变量,对有效决策单元进一步排序,测算年度综合技术效率、纯技术效率与规

表 1 两座污水厂 2022–2024 年核心运行参数

污水厂	设计规模 / 万 t/d	日均水量 / 万 t	进 / 出水 COD 浓度 /mg/L	COD 削减量 /t	进 / 出水氨氮 浓度 /mg/L	氨氮年均削减量 /t	出水达标状态
第一污水厂	5	4.46	94/11	1352.7	15.32/0.57	240.6	稳定达标
第二污水厂	11	6.18	116/11	2372.5	16.50/0.83	354.8	稳定达标

模效率，并依效率值与规模水平进行四象限分类（高效规模、高效低规模、低效规模、低效低规模）^[8]。动态分析采用 Malmquist 指数，将全要素生产率变化分解为技术进步与技术效率变化，刻画时间维度绩效演化，识别政策冲击下生产率提升的核心驱动路径^[8]。劣因诊断引入耦合协调度模型，计算激励强度与绩效产出的耦合度及协调度，识别高付费低绩效的错配厂区。优化调控基于面板回归识别关键影响因子，并通过调整考核权重与奖惩阈值设置多情景仿真，推演不同政策参数下的绩效提升空间，为按效付费机制的精细化优化提供量化支撑。

二、结果与对比分析

（一）按效付费实施前后对比

以 2024 年为政策节点，2022–2023 年为基准期，选取六项核心污染物综合去除率为绩效指标。表 2 显示全样本综合去除率均值由基准期 84.86% 升至实施期 88.12%，提升 3.85%（t 检验， $p<0.05$ ），表明按效付费机制产生了可识别的正向激励效应^[5]。两厂提升幅度存在差异：第二厂提升 4.49%，高于第一厂的 3.14%。第二厂于 2021 年 6 月完成提标扩建，2022–2023 年为运行磨合期，2024 年进入稳定高效运行阶段，工艺升级与付费改革形成正向叠加，绩效释放更为充分；第一厂虽无大规模改造，但依托长期运营经验，在既有条件下仍实现 3.14% 的提升，表明管理优化同样能响应激励机制。Malmquist 指数分解显示，2022–2024 年全样本 TFP 指数分别为 0.942、0.971、1.053，呈先降后升走势。2022 年下挫反映提标改造后磨合期的生产率暂时性回调；2024 年跃升至 1.053，出现翘尾效应，其中技术进步贡献占比超 60%，表明按效付费在实施初期有效驱动了工艺优化与管理提效。

表 2 政策实施前后污水厂综合去除率统计对比

样本厂	基准期综合 去除率 (%)	实施期综 合去除率	进 / 出水 COD 浓度 /mg/L
第一污水厂	83.05±0.87	85.66	+3.14
第二污水厂	86.68±0.92	90.58	+4.49
全样本均值	84.86±1.84	88.12	+3.85

（二）横截面分异特征

从规模维度看（表 3），第二厂（11 万 t/d）综合技术效率 0.906，纯技术效率 0.982，规模效率 0.922；第一厂（5 万 t/d）分别为 0.857、0.895、0.957。中型厂规模效率优于

大型厂，因其负荷率达 89.2%，接近满负荷，资源配置匹配度高；大型厂纯技术效率高出 9.7%，多段 AO 工艺的先进性部分抵消了负荷不足的规模不经济。这表明规模与效率非线性相关，负荷率和工艺适配性是关键中介变量。

表 3 2024 年两座污水厂效率分解对比

样本	规模	工艺 类型	综合技 术效率	纯技术 效率	规模 效率	综合去 除率 %
第一污水厂	中型	氧化沟	0.857	0.895	0.957	85.66
第二污水厂	大型	多段 AO	0.906	0.982	0.922	90.58

工艺维度上，多段 AO 工艺对总磷、总氮的去除优势显著，体现深度处理单元的靶向效应；氧化沟工艺在有机物和氨氮去除上稳定且能耗较低，两类工艺各有适用场景。运营模式方面，两厂均为国有准事业体制，绩效差异主要源于规模、工艺和设备新度，未见主体属性带来的显著溢价。聚类分析将两厂分别归入高效规模型与高效低规模型，第二厂规模效率偏低但综合效率处于较优水平。

（三）按效付费激励与绩效的匹配度

采用耦合协调度模型测算激励强度与绩效的匹配水平（表 4）。样本内呈现两类典型形态。第一类为低激励高绩效（第一厂，耦合协调度 0.62），考核权重偏低，维度以出水达标为主，未纳入节能降耗、成本控制等延伸效益，制度红利未能充分释放，进一步提效缺乏经济驱动力。第二类为高激励高绩效（第二厂，耦合协调度 0.87），提标后出水执行地表水准 IV 类标准，考核已覆盖全部出水指标，激励与绩效高度耦合，制度效能发挥较为充分。

表 4 按效付费激励与绩效耦合匹配结果

样本	激励 强度	绩效 水平	耦合协 调度	匹配 类型	核心成因
第一污水厂	低	中高	0.62	低激励 高绩效	考核维度单一，未覆盖成本与能效
第二污水厂	高	高	0.87	高激励 高绩效	提标后考核体系完善，激励传导顺畅

上述梯度差异表明按效付费机制需针对不同规模、工艺制定差异化考核细则。对低激励高绩效厂，应拓展考核维度，纳入运维成本和能效管理，使激励与实际贡献匹配；对高激励高绩效厂，可维持现有框架并探索碳减排附加激

励，推动持续升级。耦合协调度的分化还提示，机制单向推进不足以实现全域均衡提升，需与工艺改造、管网完善等设施补短板措施协同发力。

三、优化调控策略设计

（一）按效付费合约改良

现行按效付费体系普遍采用统一基准单价与固定达标阈值，难以适配不同规模、工艺的运行特征，易引发“一刀切”与激励钝化问题^[9]。结合两厂绩效分异特征，可从三方面优化合约条款。第一，构建差异化基准付费调整机制。以单位全成本为基础，引入规模系数与工艺系数修正基准单价：规模系数随处理规模阶梯递减，体现规模经济；工艺系数随处理难度递增，反映深度处理的高边际成本^[3]。第二，推行滚动历史最优值挑战机制。将付费核算由达标率

单维度考核调整为达标率与同比提升率双维度加权（权重0.6：0.4），引导水厂持续挖掘潜力，规避达标后激励钝化^[5]。第三，增设长期绩效保证金制度。每月扣留5%服务费作为质保金，按年度分级返还，约束短期行为，抑制达标后管理松懈^[10]。

表5显示差异化调整效果，调整前两厂基准单价均为0.80元/m³；调整后第一厂维持0.80元/m³，第二厂因规模系数0.97与工艺系数1.08的综合作用，单价上浮至0.84元/m³。调整后两厂付费单价与实际成本的匹配度提升约11%，综合去除率标准差由2.16%收窄至1.65%，厂际绩效波动得到合理对冲。第二厂获得更高单价，反映了深度处理工艺对总氮总磷强化去除的高边际成本，与既有研究关于按效付费应兼顾操作性与导向性的观点一致^[5]。

表5 差异化付费基准调整测算结果

水厂名称	规模类型	工艺类型	规模系数	工艺系数	基准单价元每立方米	调整后单价元每立方米
第一污水厂	中型	氧化沟	1.04	0.96	0.80	0.80
第二污水厂	大型	多段AO	0.97	1.08	0.80	0.84
全样本平均					0.80	0.82

（二）针对低效短板厂的靶向改进方案

基于效率分解与松弛变量分析，两厂低效成因各异。第一厂属产出不足型，总氮、总磷去除存在产出松弛（松弛量分别为1.12 mg/L、0.13 mg/L），主因进水碳源偏低、生物池脱氮除磷负荷受限；第二厂属投入冗余型，曝气与加药环节存在浪费（能耗、药耗松弛占比7.8%、9.2%），主因工艺参数匹配度不足、自动化管控偏低。针对产出不

足型，优化方向为碳源精准投加与冬季硝化菌富集培养，通过多点投加与在线硝酸盐氮反馈控制，预计削减碳源投加量12%—15%，同步降低外购碳源间接碳排放。研究表明低碳氮比污水中碳源调控直接影响N₂O排放，精准投加兼具减排效益^[7]。针对投入冗余型，推进精准曝气改造与智能加药升级，好氧池溶解氧从4.0 mg/L优化至3.0 mg/L，可在达标前提下实现能耗与碳排放双重节约。

表6 靶向改造方案经济效益测算结果

名称	低效类型	改造内容	初始投资万元	年节约成本万元	静态回收期年	预期效率提升幅度%
第一污水厂	产出不足	碳源精准投加系统	78	24.5	3.18	3.2
第二污水厂	投入冗余	精准曝气与智能加药	126	30.2	4.17	2.5
全样本平均			102	27.4	3.68	2.9

工程经济测算（表6）显示第一厂碳源精准投加系统初始投资78万元，年节约24.5万元，静态回收期3.18年，预期效率提升3.2%；第二厂精准曝气与智能加药改造初始投资126万元，年节约30.2万元，回收期4.17年，预期效率提升2.5%。两方案回收期均处于行业可接受范围，经济可行性良好。

（三）建立付费监管帮扶三位一体体系

单一付费机制难以覆盖污水厂运行的复杂场景，需构建付费引导、监管约束与技术帮扶协同发力的治理体系^[4]。

主管部门可建立分级响应的驻厂帮扶机制：连续两季度综合效率低于0.85的水厂列为帮扶对象，由行业专家与经济核算人员组成联合工作组，开展为期三个月的现场诊断，重点排查工艺瓶颈与成本管控漏洞。帮扶期满复评，达标者退出，持续无改善者启动特许经营权临时接管条款。

案例层面，第一厂2024年综合技术效率0.857，处于帮扶阈值边缘，需纳入重点监测名录并提前开展工艺指导；第二厂效率0.906，可作为区域示范基地输出运行经验。同时，应同步完善成本监审制度，将污水收集环节成本纳入

全成本核算,使付费定价从末端处理向系统服务延伸,形成与厂网一体化改革相匹配的定价逻辑。对未实施特许经营的水厂,可参照PPP新机制下补贴政策普适性要求,由地方主管部门制定覆盖行业统一标准的运营补贴办法,避免个案化操作引发的公平性质疑^[8]。

结语:

本研究以中国南方某市两座典型城镇污水厂为案例,基于2022-2024年月度面板数据,运用超效率SBM模型、Malmquist指数与耦合协调度模型,分析了按效付费驱动下运行绩效的分异特征与优化路径。研究发现按效付费具有显著正向激励效应,实施后综合去除率由84.86%升至88.12%,全要素生产率指数从0.971跃升至1.053,技术进步贡献超60%,未现政策疲劳。绩效响应呈横截面分异,负荷率为关键变量;多段AO工艺除磷优势突出,氧化沟则能耗更低。建议优化差异化付费基准调整、靶向技术改造及三位一体体系,以打通激励传导链条,推动全域绩效均衡提升。

参考文献:

[1] 黄可含,邓群钊,杜海娇.减污降碳目标下城镇污水处理绿色效率及影响因素[J].南昌大学学报(理科版),2024,48(2):183-193.

[2] 杨庆华,颜莹莹,程杰,等.基于按效付费的污水管网可持续投资模式研究与实践[J].中国给水排水,2025,41(18):1-7.

[3] 孙永利,吴凡松,李文秋,等.城市生活污水集

中收集率和污水处理厂进水浓度问题的思考[J].给水排水,2023,59(1):41-46.

[4] 陶相婉,蔡道孝,莫耀,等.污水处理协同降碳的思考与绿色低碳发展展望[J].给水排水,2025,51(9):27-34.

[5] 朱敏,白国梁,施浩川,等.武汉市污水处理厂按效付费理论方法研究[J].中国给水排水,2024,40(17):111-117.

[6] 刘康,李涛,马中.中国污水处理费政策分析与改革研究——基于污染者付费原则视角[J].价格月刊,2021(12):1-9.

[7] 苏闽建,陈志华,潘振东,等.AAO工艺处理农村污水的减污降碳协同增效路径[J].中国给水排水,2025,41(22):21-26.

[8] 殷璞.城市污水减污降碳协同治理模式构建研究[J].资源与环境,2026(2):41-44.

[9] 蒋富海,唐艳冬,陈亚松,等.某污水处理厂减污——节能——降碳的长效运行效能评估研究[J].中国市政工程,2024(1):65-71.

[10] 方俊,董磊,汪琼芳,等.城镇污水处理厂工艺优化与减污降碳协同研究[J].给水排水,2026,52(4):27-33.

基金项目:2026年肇庆市哲学社会科学规划项目(项目编号:26GJ-121);广东理工学院2025年度校级课堂教学改革项目(KTJXGG202528)。

作者简介:蔡献泉(1993-),男、广西藤县人、研究生、硕士、中级审计师、主要研究方向:环境经济管理。