许 劲,郑志宏,郑星宇,等.长江经济带城镇污水处理厂生态效率评估及其影响因素 [J]. 中国环境科学, 2025,45(8):4699-4705.
Xu J, Zheng Z H, Zheng X Y, et al. Evaluation of Eco-efficiency and Analysis of Its Determinants for WWTPs within the Yangtze River Economic Belt [J]. China Environmental Science, 2025,45(8):4699-4705.

长江经济带城镇污水处理厂生态效率评估及其影响因素

许 劲[1*],郑志宏[1],郑星宇[2],彭喜林[2],姚 杰[2],冉 潇[1],杨煜隆[1],王虹钰[1] (1.重庆大学,三峡库区生态环境教育部重点实验室,重庆 400044；2.重庆市三峡水务责任有限公司,重庆 401123)

摘要: 采用基于归一化的碳排放当量和基于数据包络分析的生态效率指标,对长江经济带的633座城镇污水处理厂进行评估,结果表明,其生态效率指数均值为0.492.长江经济带污水处理厂的生态效率受规模效应影响显著,其处理规模≤1万m^3/d、1万m^3/d<处理规模≤10万m^3/d和10万m^3/d<处理规模的生态效率指数均值分别为0.440、0.507和0.729;各地区、各工艺污水处理厂生态效率存在较大差异,其中间歇流反应器或全混合反应器生态效率指数较高,其均值为0.569(推流式工艺为0.473);随着污水处理厂进水BOD_5浓度的升高,其生态效率呈现先升高后降低的变化趋势;深度处理将加剧污水处理系统对生态环境的影响,执行一级A标的污水厂的生态效率指数均值为0.483,其余执行一级B标的污水厂为0.535.

关键词： 城镇污水处理厂；长江经济带；生态效率；数据包络分析
中图分类号： X52 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000-6923(2025)08-4699-07

Evaluation of eco-efficiency and analysis of its determinants for WWTPs within the Yangtze River Economic Belt. XU Jin[1*], ZHENG Zhi-hong[1], ZHENG Xing-yu[2], PENG Xi-lin[2], YAO Jie[2], RAN Xiao[1], YANG Yu-long[1], WANG Hong-yu[1] (1.Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing400044, China；2.Chongqing Three Gorges Water Co., Ltd, Chongqing 401123, China). *China Environmental Science*, 2025,45(8)：4699~4705

Abstract：This study employs a dual approach, utilizing both normalized carbon emission equivalents and eco-efficiency indicators based on data envelopment analysis (DEA), to evaluate633WWTPs within the Yangtze River Economic Belt. The mean eco-efficiency index was found to be0.492. The eco-efficiency of WWTPs in the Yangtze River Economic Belt is significantly influenced by scale effects: mean index are0.440 for plants with treatment scale ⩽10,000m^3/d, 0.507 for 10,000~100,000m^3/d, and0.729 for >100,000m^3/d; notable differences in eco-efficiency exist across various regions and treatment processes: with sequencing batch reactors and continuously stirred tank reactors exhibit higher mean eco-efficiency index (0.569) than plug-flow processes (0.473). Additionally, as the BOD_5 concentration of influent in WWTPs increases, their eco-efficiency index rises but then declines. Moreover, advanced treatment processes exacerbate the environmental impact of wastewater treatment systems, WWTPs meeting Grade A discharge standards have a mean eco-efficiency index of 0.483, compared to 0.535 for Grade B-compliant plants.

Key words：wastewater treatment plants；Yangtze River Economic Belt；eco-efficiency；data envelopment analysis

污水处理厂是典型的高能耗行业和温室气体排放源[1-4],其污水处理厂CH_4排放量约占全球CH_4总排放量的4%,N_2O排放量约占N_2O总排放量的5%[5].由于水资源短缺和日益严格的污水排放标准,污水处理厂出现以高能耗换取高水质的现象.现有研究多以简单的单位能耗或温室气体排放指标评价污水处理厂性能[6-7],难以对污水处理厂进行综合分析.生态效率是指在保证污水处理厂污染物去除能力的同时能够最大限度地减少温室气体排放和能源消耗[7-8],是附加值与环境影响之间的比率[9].在污水处理系统中,生态效率评估需要考虑污水处理厂的生产情况、能源消耗和温室气体排放[10-12].

因此,评估污水处理厂的生态效率需要应用多标准方法来考虑这些不同的因素.目前为止,只有少数研究评估了污水处理厂的生态效率[12-14],通过分析生态效率的影响因素和改进潜力,为污水处理厂的节能减碳提供潜在路径.然而,这些研究多以污染物削减量作为污水厂的期望产出指标,难以量化污水厂通过削减的污染物而避免自然水体富营养化这一服务价值.另外,这些研究都利用了数据包络分析(DEA)技术,DEA 是一种基于非参数的线性规划方法[15-17],通过决策单元的输入和输出评估构建高效的生产前沿[18-19],生态效率指数代表污水处理厂

收稿日期： 2024-12-28
基金项目： 重庆水务集团统筹创新项目(20242030000080001)
* 责任作者, 教授, xujincq@cqu.edu.cn

相对于生产前沿的位置[20-21],其数值越大表明污水处理厂生态效率水平越高,决策单元位于生产前沿时 DEA 的运算结果等于 1,即为标杆污水处理厂[22].

综上,本文尝试使用污水处理厂避免的碳排放量作为生态效率评估中的期望产出指标,采用基于松弛测度的数据包络分析(SBM-DEA),将污水处理厂的生态效率分为 3 个维度进行分析,即资源消耗、服务价值和环境影响分别作为投入、期望产出和非期望产出,对长江经济带污水处理厂生态效率进行评估;同时分析了相关因素对生态效率的影响,为城镇污水处理行业“双碳”目标的实现提供参考.

1 材料与方法

1.1 数据包络分析模型

考虑到污水处理厂的生态效率体系是多投入多产出系统,综合了投入、期望产出和非期望产出,SBM-DEA 作为生态效率评价的方法具有较好的适用性,其模型表达见式(1).

$$\begin{aligned}\min_{\lambda,s^-,s^+}\rho=&\frac{1-\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\frac{s_i^-}{x_{i0}}}{1-\frac{1}{s}\sum_{l=1}^{s}\frac{s_r^+}{y_{r0}}}\\ s.t.&x_0=X\lambda+s^-\\ &y_0=Y\lambda-s^+\\ &\lambda,s^-,s^+\geqslant 0,i=1,\cdots,m;r=1,\cdots,s\end{aligned}\tag{1}$$

式中:ρ为效率值;s_i^-和s_r^+分别为投入和产出的松弛变量;λ为权重变量;x_{i0}和y_{i0}分别为决策单元的第i种投入和第r种产出.对每个决策单元$k=1,\cdots,n$.该模型同时从投入和产出两个方面考察无效率的表现,故称为非径向模型.由于该模型为非线性模型,将该模型转化为线性模型,同时向模型中加入非期望产出得:

$$\tau^*=\min\left(t+\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\frac{s_i^-}{x_{i0}}\right)$$

$$s.t.\begin{cases}t+\dfrac{1}{s_1+s_2}\left(\sum\limits_{r=1}^{s_1}\dfrac{s_r^g}{y_{kr}^g}+\sum\limits_{r=1}^{s_2}\dfrac{s_r^b}{y_{kr}^g}\right)=1\\ x_kt=X\Lambda+s^-\\ y_{kr}^gt=X\Lambda-s^g\\ y_k^bt=X\Lambda+s^b\\ \Lambda,s^-,s^g,s^b\geqslant 0\\ t>0\end{cases}\tag{2}$$

式(2)中,对每个决策单元$k=1,\cdots,n$,该模型中包括投入矩阵$X_{m\times n}$的转置,期望产出矩阵$Y_{n\times s_2}^b$的转置,模型参数主要包括投影变量Λ,松弛变量s^-,s^g,s^b和t.

1.2 DEA 模型指标与碳排放核算方法

为了客观公正评价长江流域城镇污水处理厂的生态效率,选取的各项因素应全面反映污水处理厂效率情况,同时兼顾可比性、数据易得性.因此,本研究从污水处理厂运行维护过程的角度,将电耗量作为投入指标.现有研究多以污染物削减量作为产出指标,包括 COD 削减量、NH_3-N 削减量、TN 削减量和 TP 削减量等,为了全面评价污水处理厂运维过程对自然水体保护的积极作用,本研究除了选取耗氧污染物削减量(COD 和 NH_3-N 削减量)作为产出指标,另外还选取污水处理厂去除污染物所避免的碳排放当量作为产出指标,该指标的含义是假设污水未经污水处理厂直接排放至自然水体,导致水体富营养化而引起的 CH_4 和 N_2O 间接排放,该指标从碳排放的角度评估污水处理厂的服务价值,其核算方法见式(3)~(4).

$$\mathrm{CES_{N_2O\text{-}re}}=\mathrm{TN''_{in}}\times\mathrm{EF_{N_2O\text{-}re}}\times 22/14\times 265\times 10^{-3}\tag{3}$$

$$\mathrm{CES_{CH_4\text{-}re}}=\mathrm{B''_{in}}\times\mathrm{EF_{CH_4\text{-}re}}\times 28\times 10^{-3}\tag{4}$$

式中:$\mathrm{CES_{N_2O\text{-}re}}$和$\mathrm{CES_{CH_4\text{-}re}}$分别为直排至受纳水体 N_2O 和 CH_4 排放强度($kgCO_2$-eq/m^3);$\mathrm{TN''_{in}}$和$\mathrm{B''_{in}}$分别为进入受纳水体的总氮和 BOD_5 浓度(mg/L);$\mathrm{EF_{N_2O\text{-}re}}$和$\mathrm{EF_{CH_4\text{-}re}}$分别为受纳水体的 N_2O 和 CH_4 排放因子,本文参考《城镇水务系统核算与减排路径技术指南》取值,分别为 0.019kgN_2O/kgTN 和 0.104kgCH_4/kgBOD_5.

此外,将污水处理厂运行维护过程中直接碳排放和间接碳排放作为非期望产出评价其对生态环境的影响.污水处理过程中的直接碳排放主要分为 CO_2、CH_4、N_2O_3 类[23];由于污水处理过程中 CO_2 的排放主要来源于污水处理微生物的内源呼吸,不纳入温室气体排放核算,核算方法见式(5)~(6).

$$\begin{aligned}E_{\mathrm{N_2O}}=&\left(\mathrm{TN_0}-\mathrm{TN_e}\right)\times f_{\mathrm{N_2O}}\\ &\times\mathrm{EF_{N_2O}}\times C_{\mathrm{N_2O/N_2}}\times 10^{-3}\end{aligned}\tag{5}$$

$$E_{\mathrm{CH_4}}=\left(\mathrm{BOD_0}-\mathrm{BOD_e}\right)\times f_{\mathrm{CH_4}}\times EF_{\mathrm{CH_4}}\times 10^{-3}\tag{6}$$

式中,$E_{\mathrm{N_2O}}$和$E_{\mathrm{CH_4}}$分别为 N_2O 和 CH_4 排放强度($kgCO_2$-eq/m^3);$\mathrm{TN_0}$ 和 $\mathrm{TN_e}$ 分别为日均进水和出水总氮浓度(mg/L);$\mathrm{BOD_0}$ 和 $\mathrm{BOD_e}$ 分别为日均进水和出水 BOD_5 浓度(mg/L);$f_{\mathrm{N_2O}}$和$f_{\mathrm{CH_4}}$分别为 N_2O 和 CH_4 温室效应指数,参考《城镇水务系统核算与减排

路径技术指南》分别取值为 265kgCO_2/kgN_2、28kgCO_2/kgCH_4; C_{N_2O/N_2} 为 N_2O/N_2 相对分子质量之比(44/28); EF_{N_2O} 和 EF_{CH_4} 分别为 N_2O 和 CH_4 排放因子,本研究参考《城镇水务系统碳核算与减排路径技术指南》[24]取值,详见表 1.

表 1　不同工艺温室气体排放因子取值表

Table 1　Greenhouse gas emission factors for various processes

工艺	EF_{M_2O}(kgN_2O/kgTN)	EF_{CM_4}(kgCH_4/kgBOD_5)
MBR	0.0106	0.0036
AO	0.0068	0.0083
A^2/O	0.00446	0.0142
活性污泥法	0.0106	0.0036
CASS	0.0202	0.01
OD	0.00641	0.0096
CAST	0.0202	0.01
SBR	0.0202	0.01

注:表 1 中各工艺分别为:膜生物反应器(MBR)、缺氧好氧反应器(AO)、厌氧缺氧好氧反应器(A^2/O)、循环活性污泥系统(CASS)、氧化沟工艺(OD)、循环活性污泥技术(CAST)和序批式活性污泥法(SBR)

污水处理厂间接碳排放中的能耗种类主要有电耗、机械能耗、化学能消耗、人力消耗等多种形式[25],其中电耗占据了 60%~90%[26],因此本研究选取电耗代表能耗进行核算,核算方法见式(7).

$$E_e = \frac{W_e \times f_e}{Q_a} \tag{7}$$

式中:E_e 为能耗碳排放强度(kgCO_2-eq/m^3);W_e 为年总耗电量(kW·h);Q_a 为年污水处理量(万 m^3);f_e 为电力排放因子(kgCO_2-eq/kW·h),本研究取值参考生态环境部发布的《2017 年度碳减排项目中国区域电网基准线排放因子》[27],华东区域电网、华中区域电网和南方区域电网 f_e 取值分别为 0.8046、0.9014 和 0.8367.

本文数据主要来源于《2018 年城镇排水统计年鉴》[28]以及《全国投运城镇污水处理设施清单》[29].研究区域涉及长江流域 11 个省级行政区.经过数据清洗,最终选取我国长江经济带 633 座城镇污水处理厂进行生态效率评估,累计年污水处理量 66.21 亿 m^3.

综上所述,基于 SBM-DEA 模型,本研究对污水处理厂生态效率指标体系评价的投入、期望产出和非期望产出见表 2.

表 2　污水处理厂生态效率投入、期望产出和非期望产出表

Table 2　Eco-efficiency inputs, expected outputs, and undesirable outputs in WWTPs

项目	投入	期望产出			非期望产出
	电耗(万 MWh/a)	污水处理厂避免的碳排放量(万 t CO_2-eq/a)	COD 削减量(万 t/a)	氨氮削减量(万 t/a)	碳排放强度(t CO_2-eq/a)
均值	0.30	0.38	18.18	1.94	0.41
最大值	3.63	3.26	168.38	18.02	1.66
最小值	0.01	0.001	0.09	0.01	0.16
标准差	0.40	0.46	22.96	2.53	0.18

2　结果与讨论

2.1　生态效率评估结果基本情况

长江经济带 633 座污水处理厂中有 36 个样品被判定为标杆污水处理厂,占总体 6.58%,生态效率指数最大值、最小值、均值和标准差分别为 0.002、1.000、0.492 和 0.233,其余 597 座污水处理厂的生态效率存在较大差异且仍具有改进潜力,由生态效率评估分布情况可知(图 1),生态效率多集中于 0.2~0.6 之间.鉴于此,本研究后续将从规模、设计要素、外部条件和运行维护进行影响因素分析.

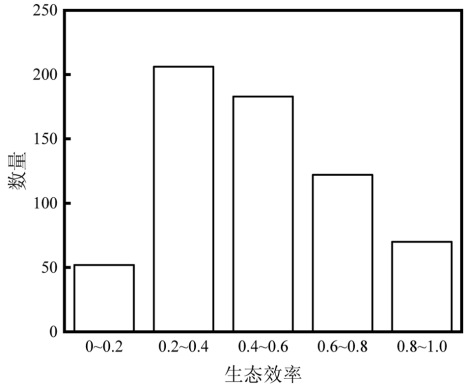


图 1　长江经济带污水处理厂生态效率频数分布情况

Fig.1　Frequency distribution of eco-efficiency for WWTPs in the Yangtze River Economic Belt

如图 2,上海、江苏、浙江、安徽、湖北、江西、湖南、重庆、四川、云南和贵州的污水处理厂数量分别为 8 座、182 座、65 座、70 座、82 座、14 座、3 座、31 座、52 座、49 座和 77 座.目前城镇污水处理厂的主流工艺中应用最广的仍为 A^2/O、OD 和 A/O 工艺,另外,一些新工艺有占地小、脱氮性能高等特点,使其在特定需求场景下具备优势,如 MBR

工艺仅占 0.3%.此外,长江经济带各地区城镇污水厂更倾向于使用连续流和推流式反应器而非间歇流或全混合式反应器,即使间歇流或全混合工艺具有操作灵活、可根据水质水量灵活调节处理流程等优点,但各单元独立的进水和滗水系统及曝气系统繁琐的启停操作阻碍了其广泛应用.

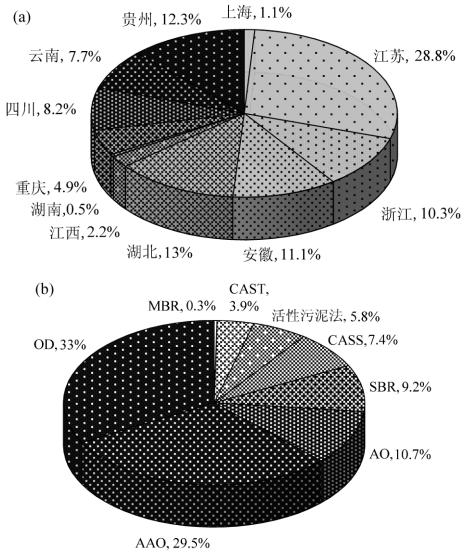


图 2 不同地区和工艺的污水处理厂数量

Fig.2 The number of WWTPs across various regions and treatment processes

2.2 污水处理厂设计要素对其生态效率的影响

如图 3,在长江经济带的 633 座城镇污水处理厂中,221 座处理规模≤1 万 m^3/d,其中标杆污水厂共 12 座,占该规模污水处理厂 5.4%,生态效率均值为 0.440;389 座 1 万 m^3/d<处理规模≤10 万 m^3/d,其中标杆污水厂共 15 座,占该规模污水处理厂 3.9%,生态效率均值为 0.507;23 座处理规模>10 万 m^3/d,其中标杆污水厂共 8 座,占该规模污水处理厂 34.8%,生态效率均值为 0.729(图 3(a)、3(b)).城镇污水处理厂的生态效率与处理规模呈正相关.由图 3(c)可得,污水处理厂的碳排放当量与处理规模呈负相关,此结论与王洪涛等[30]研究结果一致,该研究利用数据包络分析和二分类逻辑分析统计方法研究了长江经济带 970 座污水处理厂的能源效率指标,发现污水处理厂的相对能源效率值与处理规模呈正相关.因此,建设大规模污水处理厂具有规模效应,对降低单位能耗有积极作用,同时可以减少污水处理厂的碳排放当量,且污水处理厂能耗和碳排放当量是生态效率的重要影响因素.

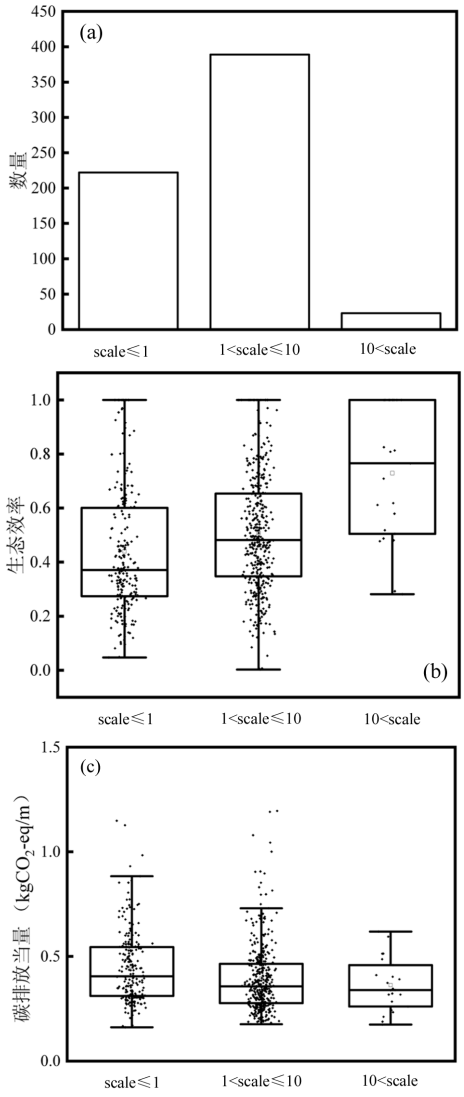


图 3 设计规模(万 m^3/d)对污水处理厂生态效率和碳排放当量的影响

Fig.3 The impact of design scale (10^4 m^3/d) on the eco-efficiency and carbon emission equivalents of WWTPs

2.3 污水处理厂外部条件对其生态效率的影响

如图 4 显示,MBR 具有占地小、负荷高、脱氮性能好等优势,但在生态效率和碳排放效率评估中均不占优势,主要原因可能是 MBR 膜组件过滤和反冲洗过程产生较高能耗,尽管如此,MBR 仍在占地受限(如机场、高速公路服务区等)、含高比例工业废水的城镇污水处理厂等特殊场景得以广泛应用.另外,SBR、CAST 和 CASS 等全混合或间歇流活性污泥法工艺的碳排放当量均较高,生态效率却优于其他工艺,这类工艺的标杆污水厂共 9 座,占 25%,其中 SBR 工艺 5 座,CAST 工艺 1 座,CASS 工艺 3 座.这与图 3 所示结

果一致,即一类工艺单一的能耗或碳排放指标无法综合评估污水处理厂对环境的影响.如图 4(a)、4(b)所示,传统推流式活性污泥法工艺,如 A^2/O、OD、A/O 和活性污泥法工艺,生态效率仅次于间歇流和全混合式工艺.另外,OD 工艺,即使是 A^2/O 型氧化沟,其好氧区均存在部分缺氧区,从而提高脱氮性能同时避免了过度曝气,这可能是 OD 工艺生态效率远高于其他传统推流式活性污泥法工艺的原因;A^2/O 的生态效率略优于 A/O 工艺,并且 A^2/O 工艺具备生物除磷功能,整体性能优于 A/O 工艺.此外,长江经济带不同地区污水处理厂生态效率和碳排放当量差异较大,见图 4(c)、4(d),长江上游地区的生态效率>中游地区>下游地区,而长江中游地区污水处理厂的碳排放当量远低于上游和下游地区,即使碳排放当量是污水处理厂生态效率评估过程的非期望产出,但生态效率还与工艺类型、进出水质、运行情况和能耗等众多因素相关.在对比各地区所选工艺时发现,不同地区对工艺选择具有偏好,如云南省共有 37 座污水处理厂采用 SBR、CAST 或 CASS 工艺,占采用间歇流工艺污水厂总数的 28.5%;下游地区更倾向于 A/O 工艺,共 43 座,占采用 A/O 工艺污水厂总数的 63.2%.因此,单一的能耗或碳排放指标难以全面评价污水处理厂对生态环境的影响.

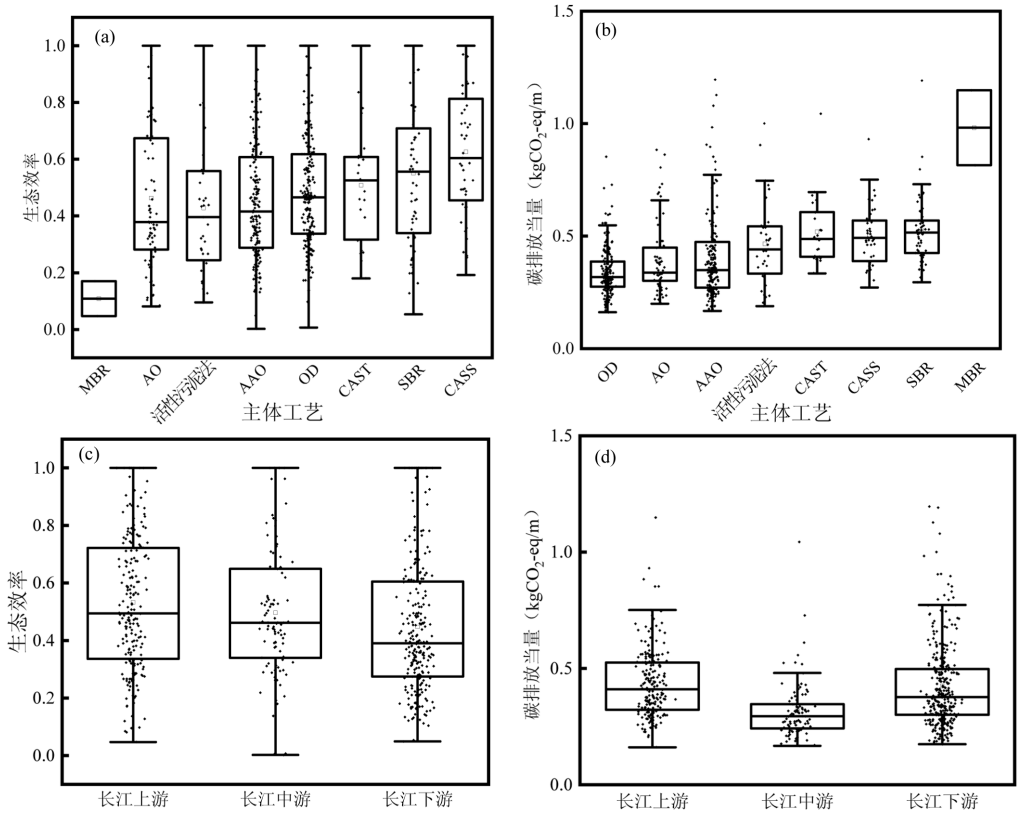


图 4　工艺和地区对污水处理厂生态效率及碳排放当量的影响

Fig.4　The impact of treatment processes and regions on the eco−efficiency and carbon emission equivalents of WWTPs

2.4　污水处理厂运行维护对其生态效率的影响

如图 5,污水处理厂进水 $BOD_5 \leqslant 50mg/L$ 共 127 座 (20.1%),$50mg/L < BOD_5 \leqslant 100mg/L$ 共 336 座 (53.1%),$100mg/L < BOD_5 \leqslant 150mg/L$ 共 136 座 (21.5%),$150mg/L < BOD_5 \leqslant 200mg/L$ 共 18 座(2.8%),$200mg/L < BOD_5$ 共 16 座(2.5%).可以看,出长江经济带污水处理厂的进水 BOD_5 浓度较低,考验着污水处理厂的运维调控脱氮性能,结合生态效率评估结果,当污水处理厂进水 BOD_5 浓度$\leqslant$150mg/L 时,生态效率与进水 BOD_5 浓度呈正相关,其标杆污水处理厂共 31 座(72.1%),当 BOD_5 浓度$\geqslant$150mg/L 时呈负相关.因此,需要在污水厂建设之初考虑污水处理厂进水的实际情况,从污水处理厂工艺的功能分区上平衡进水碳源、硝化性能与反硝化性能之间的关系,提前考虑污水处理厂运维过程中设备运行工况与设备型号的匹配程度,最大程度地减小污水处理厂对生态环境的影响.另外,不同的排放标准直接影响着污水处理厂的处理深度,在长江经济带

的 633 座污水处理厂中,有 530 座污水处理厂出水 BOD_5 浓度 <10mg/L(83.7%), 出水 BOD_5 浓度 >10mg/L 为 103 座(16.3%),结合生态效率评估结果,在自然水体环境容量的限值范围内,如果执行更严格的排放标准,则可能进一步加剧污水处理系统对生态环境的影响.

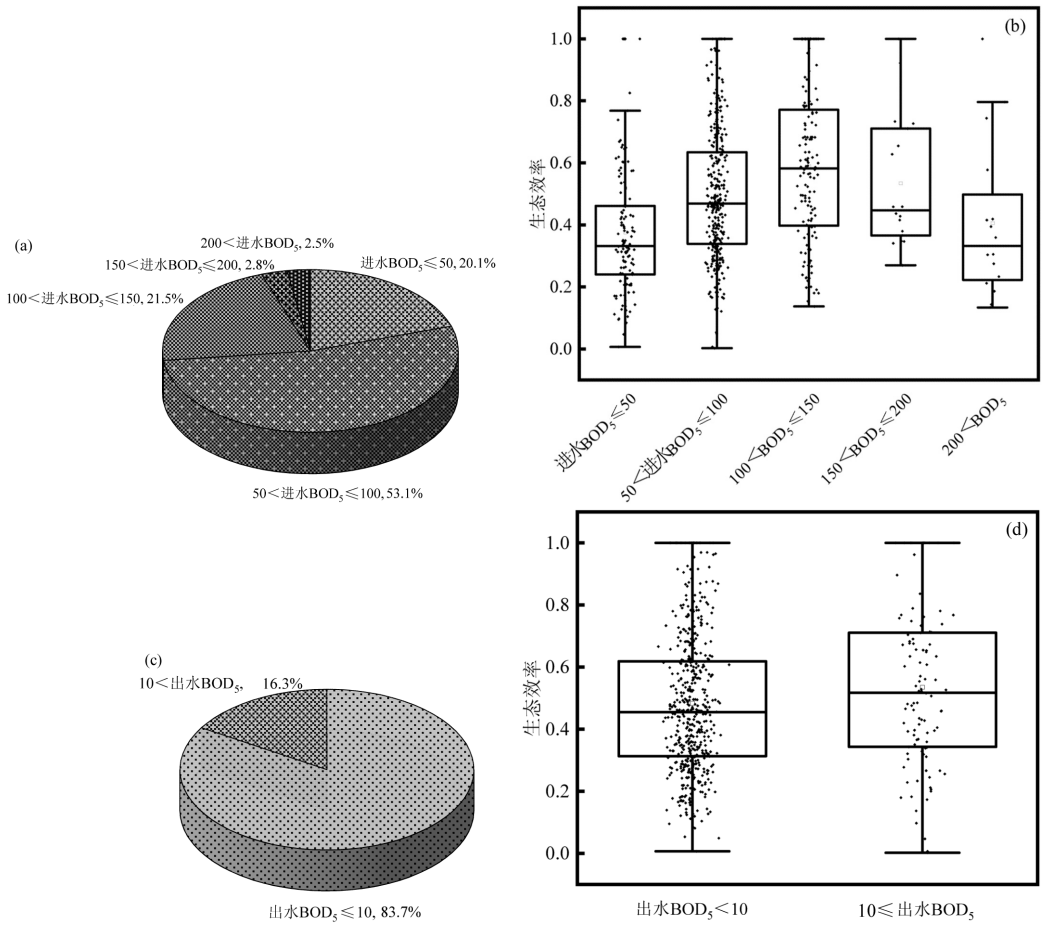


图 5 BOD_5 进水和排放标准浓度(mg/L)对污水处理厂生态效率的影响

Fig.5 The impact of BOD_5 concentration of influent and emission standard concentrations (mg/L) on the eco-efficiency of wastewater treatment plants

3 结论

3.1 利用数据包络分析评价长江经济带 633 座污水处理厂的生态效率,其总体均值为 0.492,其中 36 个样品被判定为标杆污水处理厂,占总体 5.69%.

3.2 长江经济带污水处理厂的生态效率受规模效应影响显著,221 座污水处理厂规模≤1 万 m^3/d(标杆污水厂 12 个,占 5.4%,均值为 0.440);389 座 1 万 m^3/d< 处理规模≤10 万 m^3/d(标杆污水厂 15 个,占 3.9%,均值为 0.507);23 座 10 万 m^3/d<处理规模(标杆污水厂 8 个,占 34.8%,均值为 0.729).

3.3 污水处理厂的生态效率随着进水 BOD_5 浓度升高呈现先升高后降低的变化趋势,在进水 100mg/L<进水 BOD_5≤150mg/L 时对生态环境影响最小.执行更严格的排放标准可能降低污水处理系统的生态效率.

参考文献:

[1] Zhu W, Chen B, Duan C. Energy efficiency assessment of wastewater treatment plants in china based on multiregional input–output analysis and data envelopment analysis [J]. Applied energy, 2024,(2.15):356.

[2] Molinos-Senante M, Maziotis A. Evaluation of energy efficiency of wastewater treatment plants: The influence of the technology and aging factors [J]. Applied energy, 2022,310:118535.

[3] Hwangbo S, Al R, Chen X. Integrated model for understanding N2O emissions from wastewater treatment plants: A deep learning approach [J]. Environmental science technology, 2021,55:2143-2151.

[4] Yin Y, Qi X, Gao L, et al. Quantifying methane influx from sewer into wastewater treatment processes [J]. Environmental science technology, 2024,58:9582-9590.

[5] 周 政,李怀波,王 燕,等.低碳氮比进水 AAO 污水处理厂低碳运行 [J]. 中国环境科学, 2022,42(11):5088-5099.
Zhou Z, Li H B, Wang Y, et al. Research on low-carbon operation

mode in AAO-based wastewater treatment plants with low C/N influent [J]. China Environmental Science, 2022,42(11):5088-5099.

[6] Longo S, Stefano M, D'antoni B M, et al. Monitoring and diagnosis of energy consumption in wastewater treatment plants. A state of the art and proposals for improvement [J]. Applied Energy Barking Then Oxford, 2016,179:1251-1268.

[7] Longo S, Hospido A, Lema J M, et al. A systematic methodology for the robust quantification of energy efficiency at wastewater treatment plants featuring data envelopment analysis [J]. Water Research, 2018, 141(9.15):317-328.

[8] Sala-Garrido R, Molinos-Senante M, Hernández-Sancho F, et al. Comparing the efficiency of wastewater treatment technologies through a dea metafrontier model [J]. Chemical Engineering Journal, 2011,173(3):766-772.

[9] Maziotis A, Molinos-Senante M, et al. A comprenhesive eco-efficiency analysis of wastewater treatment plants: Estimation of optimal operational costs and greenhouse gas emissions [J]. Water Research, 2023,243(9.1):120354.

[10] Dong X, Zhang X, Zeng S. Measuring and explaining eco-efficiencies of wastewater treatment plants in China: An uncertainty analysis perspective [J]. Water Research, 2017,112(4.1):195-207.

[11] Gémar G, Gómez T, Molinos-Senante M , et al. Assessing changes in eco-productivity of wastewater treatment plants: The role of costs, pollutant removal efficiency, and greenhouse gas emissions [J]. Environmental Impact Assessment Review, 2018,69:24-31.

[12] Xi J, Gong H, Dai C X. Characteristics of greenhouse gases emission from wastewater treatment plants operation in china (2009~2016): A case study using operational data integrated method (odim) [J]. Journal of cleaner production, 2023,402(5 20):136829.

[13] Mocholiarce M, Molinossenante M, Salagarrido R, et al. Evaluating the eco-efficiency of wastewater treatment plants: Comparison of optimistic and pessimistic approaches [J]. Sustainability, 2020,12(24):1-13.

[14] Fallahiarezoudar E, Ahmadipourroudposht M, Yakideh K, et al. An eco-environmental efficiency analysis of malaysia sewage treatment plants: An incorporated window-based data envelopment analysis and ordinary least square regression [J]. Environmental Science, 2022,(25): 38285-38302.

[15] Milanovic T, Savic G, Martic M, et al. Development of the waste management composite index using dea method as circular economy indicator: The case of european union countries [J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2022,(1Pt.2):771-784.

[16] Fuentes-Pascual R, Molinos-Senante M, Hernández-Sancho F, et al. Analysing the efficiency of wastewater treatment plants: The problem of the definition of desirable outputs and its solution [J]. Journal of cleaner production, 2020,267:121989.

[17] Jiang H, Hua M, Zhang J, et al. Sustainability efficiency assessment of wastewater treatment plants in china: A data envelopment analysis based on cluster benchmarking [J]. Journal of cleaner production, 2019,244:118729.

[18] Natasa P B, Gordana S, Dusan A, et al. Evaluating eco-efficiency of beverage packaging materials: A data envelopment analysis approach [J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2016,25(8):2958-2963.

[19] 刘蔚玲,肖黎姗,林剑艺,等.基于 DEA-Malmquist 的我国城市生活垃圾管理效率评价 [J]. 中国环境科学, 2020,40(7):3196-3203.
Liu W L, Xiao L S, Lin J Y, et al. Evaluation on the efficiency of municipal solid waste management in cities of China based on DEA-Malmquist [J]. China Environmental Science, 2020,40(7):3196-3203.

[20] Ramírez-Melgarejo M, Güereca L P, Gassó-Domingo S, et al. Eco-efficiency evaluation in wastewater treatment plants considering greenhouse gas emissions through the data envelopment analysis-tolerance model [J]. Environmental Monitoring, 2021,193:301.

[21] 周靖承,陈海滨.基于 DEA 模型的我国城市生活垃圾管理效率评价 [J]. 中国环境科学, 2012,32(7):1332-1338.
Zhou J C, Chen H B. Assessment on the efficiency of municipal solid waste management in cities of China based on DEA model [J]. China Environmental Science, 2012,32(7):1332-1338.

[22] 徐丽萍,王　立,李金林.基于隐含能的行业完全能源效率评价模型研究 [J]. 中国环境科学, 2012,32(11):2095-2102.
Xu L P, Wang L, Li J L. Evaluation model of sectors' energy efficiency based on embodied energy [J]. China Environmental Science, 2012, 32(11):2095-2102.

[23] 杨世琪.城镇污水处理系统碳核算方法与模型研究 [D]. 重庆:重庆大学, 2013.
Yang S Q. The method and model research of GHG accounting of urban sewage treatment system [D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.

[24] 中国城镇供水排水协会.城镇水务系统碳核算与减排路径技术指南 [M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2022:1-202.
China Urban Water Association. Guidelines for carbon accounting and emission reduction in the urban water sector [M]. Beijing: China Arehiteeture and Building Press. 2022:1-202.

[25] Sharawat I, R. Dahiya, R. P, Dahiya R P. Analysis of a wastewater treatment plant for energy consumption and greenhouse gas emissions [J]. International Journal of Environmental Science Technology, 2021,18(4):871-884.

[26] 张安龙,谢　飞,罗　清,等.中国城镇污水处理厂节能降耗研究进展 [J]. 环境科学与技术, 2018,(S1):116-119.
Zhang A L, Xie F, Luo Q, et al. Research progress on energy saving and consumption reduction of urban sewage treatment plant in china [J]. Environmental Science & Technology, 2018,(S1):116-119.

[27] 中华人民共和国生态环境部.2017 年度减排项目中国区域电网基准线排放因子 [EB/OL]. 生态环境部.https://wwwmeegovcn/ywgz/ydqhbh/wsqtkz/201812/P020181220579925103092pdf, 2017.
Ministry of Ecology and Environment of the Perple's Republic of China. 2017 annual baseline emission factor for China's regional power grids in emission reduction projects [EB/OL]. Ministry of Ecology and Environment. https://wwwmeegovcn/ywgz/ydqhbh/wsqtkz/2018 12/P020181220579925103092pdf.

[28] 国家统计局.2018 年城镇排水统计年鉴 [M]. 北京:中国统计出版社, 2018.
National Bureau of Statistics of China. 2018 annual statistical yearbook on urban drainage [M]. Beijing: China Statistics Press, 2018.

[29] 中华人民共和国生态环境部.全国投运城镇污水处理设施清单 [EB/OL]. 生态环境部 https://wwwmeegovcn/gkml/hbb/bgg/201506/W020150609575919731164pdf.
Ministry of Ecology and Environment of the Perple's Republic of China. National inventory of operational urban wastewater treatment facilities [EB/OL]. Ministry of Ecology and Environment. https://wwwmeegovcn/gkml/hbb/bgg/201506/W020150609575919731164pdf.

[30] 王洪涛,黄润垚,谢　丽,等.长江经济带污水处理厂能源效率及其影响因素 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2022,50(2):178-186.
Wang H T, Huang R Y, Xie L, et al. Energy efficiency and influencing factors of wastewater treatment plants in yangtze river economic belt [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2022,50(2):178-186.

作者简介：许　劲(1968-),女,湖北武汉人,教授,博士,主要从事可持续废水废物处理研究.发表论文 90 余篇.xujincq@cqu.edu.cn.