



文章栏目：面向减污降碳协同增效的污水处理系统运行管理研究与实践专题

DOI 10.12030/j.cjee.202305072 中图分类号 X703 文献标识码 A

欧阳伊雯, 庞蘅洛, 叶红丽, 等. 重庆市城镇污水处理系统的碳排放特征及减污降碳措施建议[J]. 环境工程学报, 2023, 17(9): 2841-2847.
[OUYANG Yiwen, PANG Hengming, YE Hongli, et al. Carbon emission characteristics of urban sewage treatment system in Chongqing and suggestions on pollution and carbon reduction measures[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(9): 2841-2847.]

重庆市城镇污水处理系统的碳排放特征及减污降碳措施建议

欧阳伊雯¹, 庞蘅洛¹, 叶红丽¹, 庞惠月¹, 王照晴², 高小峰^{1,✉}, 陆嘉麒^{3,✉}

1. 重庆大学 环境与生态学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045; 2. 长安大学 马克思主义学院, 西安 710064; 3. 上海工程技术大学 环境与资源创新中心, 上海 201620

摘要 基于 IPCC 的碳排放核算因子法, 对重庆市 43 区县的 75 座污水处理系统的碳排放特征及其与区域、处理规模等的联系进行探究。分析了现有污水处理系统存在的问题, 对比了国内先进污水处理工艺并提出优化措施。结果表明污水处理系统的碳排放具有“规模效应”: 吨水比碳排、吨水电耗随处理规模的提高而降低, 最大碳排放源为电力消耗, 占比达到 40%~60%。碳排放量与区域的联系不大, 各区域比碳排(以 CO₂ 计)为 0.50~0.90 kg·m⁻³。在分析碳排放特征的基础上提出节能减排建议, 如通过设备调整运行参数降低电耗碳排放, 改进处理工艺减少除 TN 产生的碳排放, 动态调整以提高运行负荷率, 优化能源结构提高城市污水处理系统能源自给率, 以期为全国污水处理系统减污降碳提供参考。

关键词 污水处理系统; 碳排放强度; 碳排放特征; 碳中和; 节能减排

联合国可持续发展目标 (Sustainable Development Goals, SDGs) 6 清洁饮水和卫生设施的重要实现手段是进行污水处理并循环利用 (SDGs 6.3)^[1-2]。污水处理系统的碳排放量约占我国社会总碳排放量的 2%^[3], 是碳减排项目中不容忽视的部分。2006 年发布的《IPCC 国家温室气体清单指南》是目前为止国际上较为通用的碳核算标准^[4]。2010 年, 国家发改委正式开启省级温室气体排放量化工作, 以 IPCC 清单指南为基础, 编制了《省级温室气体排放清单编制指南(试行)》, 用于省级和地方层面的碳核算。2018 年, 国家生态环境部发布《城镇污水处理厂污染物去除协同控制温室气体核算技术指南(试行)》, 该指南是污水处理系统碳核算的重要依据。

国内外学者对污水处理系统碳排放特征进行了大量研究, 研究内容侧重于分析和改良工艺流程以达到提高能源利用率和利用污水潜能的目的。奥地利 Strass 污水处理系统是碳中和运行的国际先驱, 早在 2005 年就实现了高达 108% 的能源自给率^[5]; 荷兰在 2008 年提出了污水处理的 NEWs 新概念, 即未来污水处理系统是“营养物 (Nutrient)+能源 (Energy)+再生水 (Water)”的制造工厂 (factories)^[6]; 2020 年芬兰 Mikkeli 污水处理系统通过多种方式回收污水余热, 其产能几乎达到耗能的 10 倍, 足可见污水余热潜能巨大^[7]。我国首座新概念碳中和运行的睢县第三污水厂采用“多级 A/O+反硝化滤池+臭氧消毒”的工艺, 目前能源自给率能达到 20%~30%^[8-10]。郝晓地等对北京某市政污水厂进行模拟能量转化模型分析, 得出经热电联产产出的化学能可涵盖污水处理系统总耗能的 53%, 经水源热泵产出的污水余热热能约为化学能的 9 倍, 不仅能弥补剩余消耗, 还有富余能量可向外输送^[11]。污水中蕴含极大的化学能和热能, 对污水潜能进行开发利用是助力碳达峰碳中和目标实现的重要部分。

收稿日期: 2023-05-20; 录用日期: 2023-08-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52200208)

第一作者: 欧阳伊雯 (2002—), 女, 本科在读, Even_ouyang@outlook.com; ✉通信作者: 高小峰 (1988—), 男, 博士, 讲师, gaoxiaofeng@cqu.edu.cn; 陆嘉麒 (1993—), 男, 博士, 讲师, wilsherlu@foxmail.com

由于污水处理系统在处理工艺、能源回用方式、模型分析方法等方面存在诸多不同^[12], 对其碳排放特征的研究也有差异。本研究核算重庆市 75 个城镇污水处理系统的碳排放, 从可能影响碳排放的因素入手, 对重庆市城镇污水处理系统碳排放特征进行综合分析, 探讨各因素对总体的贡献率, 对比国内相同处理工艺, 分析现有污水处理系统存在的问题并提出协同降碳的可行方法, 以期为同类型城市的污水处理系统碳排放研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究对象

研究涵盖重庆 43 个区县共 75 个城镇污水处理系统, 按照社会经济发展水平、水资源情况、地理特征及进水水质分为中心城区、主城新区、渝东南和渝东北 4 个区域 (图 1)。75 个污水处理系统的设计规模为 $(0.5\sim 80)\times 10^4 \text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$; 主要采用 A²O 工艺、氧化沟工艺和高效沉淀池等水处理工艺, 且较多污水处理系统采用多种水处理工艺联用的设计方式; 所有污水处理系统均采用《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918-2002) 一级 A 标准^[13]。

1.2 数据来源及研究方法

1.2.1 数据来源

以重庆市 43 个区县的 75 座城镇污水处理系统 2021 年 9 月—2022 年 8 月的实际运行数据作为碳排放核算基础数据。

1.2.2 污水处理系统碳排放核算方法

向大气释放温室气体的过程称为碳排放, 分为直接碳排放和间接碳排放。污水处理系统产生的直接碳排放包括污泥处置、污水处理中去除有机物和 TN 及外加碳源氧化过程中产生的碳排放; 间接碳排放包括电力、化学药剂等消耗产生的碳排放。由于未获取到相关药剂数据, 本研究未将化学药剂消耗产生的碳排放考虑进去。

污水处理系统的碳排放核算方法以排放因子法为基础, 参照政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 制定的《IPCC 2006 年国家温室气体清单指南 2019 修订版》^[14]、《城镇污水处理厂污染物去除协同控制温室气体核算技术指南 (试行)》^[15] 和《污水处理厂低碳运行评价技术规范》^[16] 的计算公式和参数进行核算。计算公式如式 (1)~式 (12)。

1) 污泥处置产生的碳排放量参考式 (1) 进行计算。

$$E_1 = R_s \times \beta_s \times \text{DOC}_f \times \text{MCF} \times F \times E_{\text{CH}_4/\text{C}} \times \text{GWP}_{\text{CH}_4} \quad (1)$$

式中: E_1 为剩余污泥处置过程释放的 CH_4 折算为 CO_2 当量的年碳排放量, $\text{tCO}_{2\text{eq}}\cdot\text{a}^{-1}$; R_s 为污泥干物质年去除量, $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$; β_s 为污泥干物质中可降解有机碳质量分数, 以每吨污泥干物质中的有机碳质量计算, 取 $0.15 \text{ t}\cdot\text{t}^{-1}$; DOC_f 为实际分解的可降解有机碳比率, 取 50%; MCF 为 CH_4 排放修正因子, 取 0.92; F 为可降解有机碳中可产生 CH_4 的碳的比例, 取 0.5; $E_{\text{CH}_4/\text{C}}$ 为 CH_4/C 分子量比值, 取 16/12; GWP_{CH_4} 为 CH_4 全球升温潜势, 取 28。

2) 污水处理过程中去除有机物产生的碳排放参考式 (2)~(3) 进行计算。

$$E_2 = [(R_{\text{COD}} - R_s \times \rho_s) \times \text{EF}_{\text{CH}_4} - W_{\text{CH}_4}] \times \text{GWP}_{\text{CH}_4} \quad (2)$$

$$\text{EF}_{\text{CH}_4} = B_0 \times \text{MCF} \quad (3)$$

式中: E_2 为去除有机物产生的 CH_4 折算为 CO_2 当量碳排放量, $\text{tCO}_{2\text{eq}}\cdot\text{a}^{-1}$; R_{COD} 为耗氧有机物 (以 COD 计) 年去除量, $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$; ρ_s 为污泥干物质有机物含量, 由 β_s 换算为 $0.40 \text{ t}\cdot\text{t}^{-1}$; W_{CH_4} 为 CH_4 年回收量, $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$;

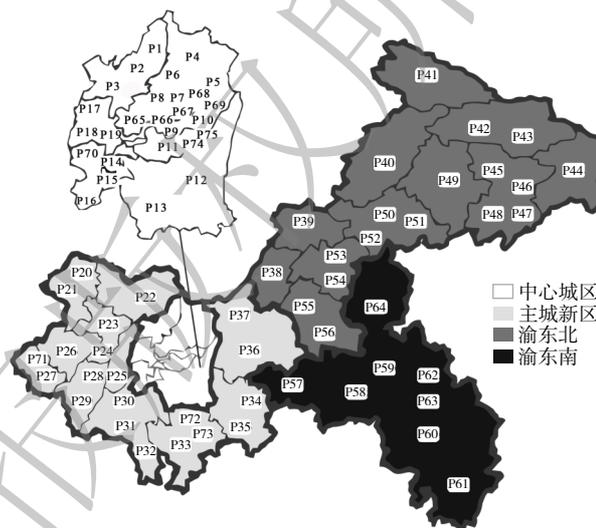


图 1 重庆市城镇污水处理系统分布

Fig. 1 Distribution of urban sewage treatment Systems in Chongqing

EF_{CH_4} —— CH_4 排放因子, $t \cdot t^{-1}$; B_0 为 CH_4 最大产生潜能, 取 $0.25 t \cdot t^{-1}$; MCF 为 CH_4 修正因子, 取 0.003 (典型 AAO 工艺污水处理系统)。

3) 污水处理过程中去除 TN 产生的碳排放参考式 (4) 进行计算。

$$E_3 = R_{TN} \times EF_{N_2O} \times C_{N_2O/N_2} \times GWP_{N_2O} \quad (4)$$

式中: E_3 为去除 TN 产生 N_2O 折算为 CO_2 当量的碳排放量, $tCO_{2eq} \cdot a^{-1}$; R_{TN} 为 TN 年去除量, $TN \cdot a^{-1}$; EF_{N_2O} 为 N_2O 排放因子, 取 $0.013 t \cdot t^{-1}$; C_{N_2O/N_2} 为 N_2O/N_2 分子量比值, 为 44/28; GWP_{N_2O} 为 N_2O 全球增温潜势值, 为 265。

4) 外加碳源完全氧化产生的碳排放参考式 (5) 进行计算。

$$E_4 = \sum_{i=1}^n (y_i \times EF_{CO_2, i}) \quad (5)$$

式中: E_4 为外加碳源氧化产生的 CO_2 当量碳排放量, $tCO_{2eq} \cdot a^{-1}$; y_i 为 i 类碳源消耗量; $EF_{CO_2, i}$ 为 i 类碳源完全氧化的 CO_2 排放因子。

5) 电力消耗产生的碳排放参考式 (6)~(7) 进行计算。

$$E_5 = E_H \times EF_{CO_2} \times K \times GWP_{CO_2} \quad (6)$$

$$K = 0.91 + 0.056 \times \ln Q_d \quad (7)$$

式中: E_5 为消耗电力产生的 CO_2 当量碳排放量, $tCO_{2eq} \cdot a^{-1}$; E_H 为年耗电量, $MWh \cdot a^{-1}$; EF_{CO_2} 为电力 CO_2 排放因子, 取 $0.8587 tCO_2 \cdot MWh^{-1}$; K 为日处理规模, $10^4 m^3 \cdot d^{-1}$ (Q_d 的值大于 30 时 K 直接取 1.10); GWP_{CO_2} 为 CO_2 全球增温潜势值, 取值为 1。

6) 碳排放总量核算参考式 (8) 进行计算。

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5 \quad (8)$$

7) 比碳排放总量核算参考式 (9)~(11) 进行计算。

$$S_{EW} = \frac{E}{Q} \quad (9)$$

$$S_{EC} = E/R_{COD} \quad (10)$$

$$S_{EN} = E/R_{TN} \quad (11)$$

式中: S_{EW} 、 S_{EC} 、 S_{EN} 为吨水比碳排放 (以 CO_2 计), $kg \cdot m^{-3}$; R_{COD} 为有机物比碳排放 (以 CO_2 计), $kg \cdot kg^{-1}$; R_{TN} 为总氮比碳排放 (以 CO_2 计), $kg \cdot kg^{-1}$ 。

1.2.3 灵敏度计算方法

灵敏度计算采用单一变量法^[17], 选择模型中一个初始组分参数 P_{i0} , 对应输出结果为 Y_{i0} , 固定其余参数, 在一定范围内按固定步长改变 P_{i0} , 得到一组与之对应的 Y_{ix} 值。灵敏度系数 R 的计算公式为式 (12)。

$$R = \frac{\Delta Y}{\Delta P} \times \frac{P}{Y} = \frac{(Y_{ix} - Y_{i0})/Y_{i0}}{(P_{ix} - P_{i0})/P_{i0}} \quad (12)$$

式中: Y_{i0} 、 Y_{ix} 分别为扰动参数前后值; P_{i0} 、 P_{ix} 分别为随扰动参数变化的输出结果前后值; R 的大小表示系统状态量对参数变化的灵敏性, R 值越大, 选定初始参数对结果的影响越大。

2 结果与讨论

2.1 重庆市污水处理系统碳排放规律分析

1) 吨水比碳排放分析。计算得到 75 个污水处理系统吨水比碳排数据 (后文均以 CO_2 计) 及各区县吨水比碳排 (图 2)。

75 座城镇污水处理系统中包括中心城区 27 座、主城新区 21 座、渝东南 8 座和渝东北 19 座。图 2 中比碳排低于 $0.60 kg \cdot m^{-3}$ 的区县多分布于中心城区; 比碳排在 $0.60 \sim 0.80 kg \cdot m^{-3}$ 的区县多分布于中心城区和主城新区; 比碳排在 $0.80 \sim 1.00 kg \cdot m^{-3}$ 的区县多分布于渝东北地区与中心城区; 比碳排高于 $1.00 kg \cdot m^{-3}$ 的区县

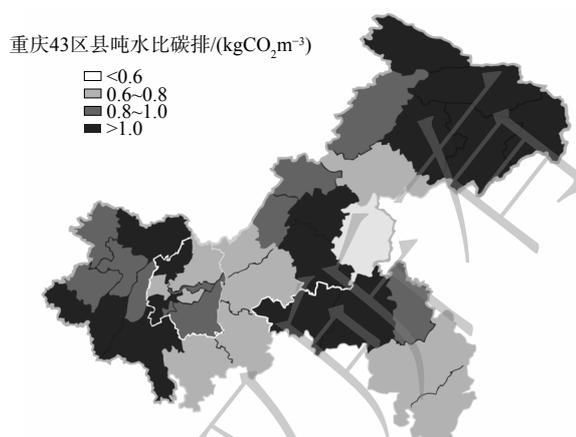
多分布于主城新区和渝东北区。

重庆比碳排整体为 $0.50\sim 0.90\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ，但奉节县徐家包污水厂比碳排为 $5.73\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ，远高于总体比碳排。该污水处理系统的设计规模为 $1\times 10^4\text{ m}^3$ ，属于小型处理规模，电耗产生的碳排放量占总碳排的 72%，外加碳源产生的碳排放量占总碳排的 24%，高于其他城镇污水处理系统。结合实地调查结果，分析认为是污水处理系统规模小，工艺过程电力消耗大，且外加碳源未能利用完全，造成总碳排过大。

计算得到中心城区污水处理系统的平均比碳排为 $0.74\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ；主城新区污水处理系统的平均比碳排为 $0.82\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ；渝东南区域污水处理系统的平均比碳排为 $0.87\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ；渝东北区域污水处理系统的平均比碳排为 $1.18\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。重庆 43 区县全域平均比碳排为 $0.89\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。中心城区、主城新区、渝东北和渝东南城镇污水处理系统的吨水比碳排和年处理水量关系如图 3。

75 个城镇污水处理系统大部分采用 A^2O 工艺及氧化沟工艺进行污水处理。综合各个污水处理系统的年处理水量与吨水比碳排数据，在 4 个城区的层面上，发现在《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918-2002) 一级 A 标准^[13] 的出水条件下，随着年处理水量的提高吨水比碳排呈现下降趋势。

2) 各环节碳排放分析。分析各个环节产生的碳排放如图 4。电力消耗产生的碳排放最大，约占总碳排放的 40%~60%。部分污水处理系统污泥处置产生的比碳排较高，分析认为是进水水质中 SS、COD 浓度较高使得处理中产生大量污泥干物质^[18-19]。



注：中国标准地图-审图号GS(2020)4619号 (<http://bzdt.ch.mnr.gov.cn>)。

图 2 重庆 43 区县污水处理系统吨水比碳排

Fig. 2 Carbon emissions per ton of water in 43 districts and counties of Chongqing

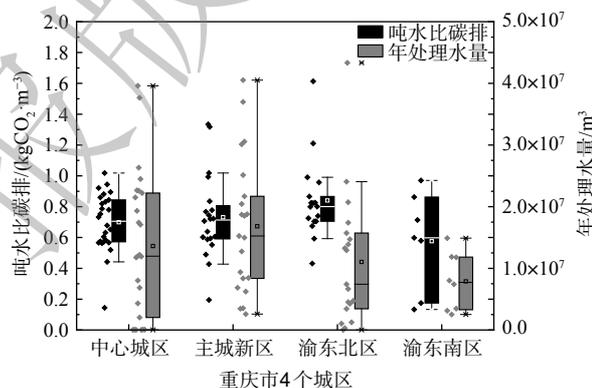


图 3 各污水处理系统年处理水量及吨水比碳排

Fig. 3 The treatment scale and carbon emissions per ton of water of each sewage treatment system

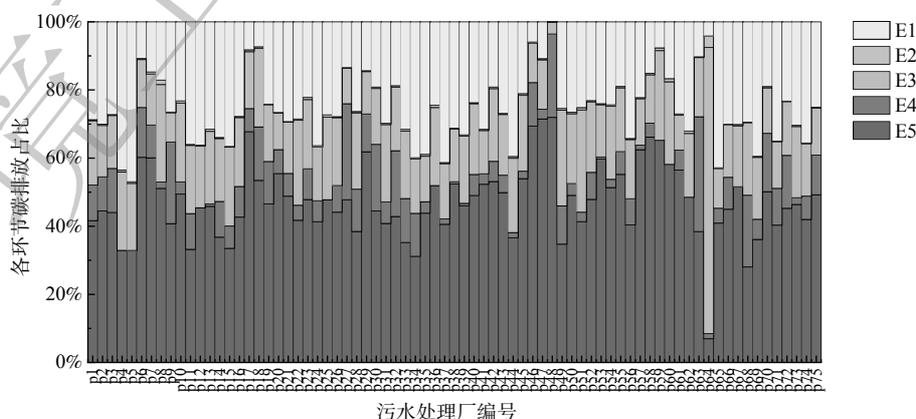


图 4 污水处理系统各环节碳排放占比

Fig. 4 Proportion of carbon emissions of each links of sewage treatment systems

3) **年处理量与电耗碳排占比关系。**单独对电力消耗环节产生的碳排放的占比和污水厂年处理量进行分析如图5,发现二者呈负相关关系,即随年处理水量的增加,电力消耗产生的碳排放占总碳排放的比例呈下降趋势。这表明处理工艺的电耗间接碳排放具有规模效应,处理量越大越有利于降低电力消耗及其产生的碳排放^[20]。

4) **运行负荷率与吨水比碳排关系。**污水处理系统设计规模与其实际处理规模的比值称为运行负荷率,分析污水处理系统运行负荷率和吨水比碳排的关系如图6。随着污水处理系统运行负荷率升高,其吨水比碳排总体呈下降趋势。部分污水处理系统实际处理量远小于设计规模,分析认为是由于工艺参数没有根据实际调整,低负荷运行使电耗、投药量升高导致该部分产生的比碳排偏大。

2.2 灵敏度分析

为探究各碳排放分量对总碳排放量的贡献,对构成总碳排放的各碳排放分量污泥(E1)、COD(E2)、TN(E3)、外加碳源(E4)、电耗(E5)进行灵敏度分析,每个参数变化幅度为-30%~30%,固定步长10%,灵敏度分析结果见图7。电耗、污泥处置和去除TN的灵敏度系数大于0.2,对总碳排放量影响较大,且呈正相关,其中电耗对碳排放影响最大;外加碳源和去除COD对总碳排放影响较小。

2.3 减污降碳建议

1) 关注“吨水比碳排显著高于平均值”的现象。以徐家包污水厂为例,参照能源结构及处理工艺相近的北京某城市污水处理厂运行效能进行潜力分析^[21],可知若通过更新变频进水泵,除砂、曝气、排泥等系统的优化运行等节能降耗措施对该污水厂进行改造,电力消耗可降低约5.47%,同时污水的处理成本每年可降低约15万元。

2) 分析“电力消耗产生的碳排放最大”的成因。在降低电耗方面,根据污水处理系统实际处理水量调整设备运行参数。当某些敏感性变量发生调整时,吨水电耗也会随之发生一定的变化,如提升水泵高液位运行;在满足生化工艺处理需求基础上,适当降低回流比;降低风机出口风压或供气量(精细调控生化DO水平);针对搅拌设备安装变频器优化运行功率等多举措联合优化决策与措施。以降低提升泵扬程为例,每降低1m扬程,可降低 $4\,950\text{ MWh}\cdot\text{a}^{-1}$ 的电耗,折合降低约 $4\,247\text{ tCO}_2\cdot\text{a}^{-1}$ 。

3) 提出“降低脱氮过程中的碳排放”的措施。在减少去除TN产生的碳排放方面,结合污水处理系统改进

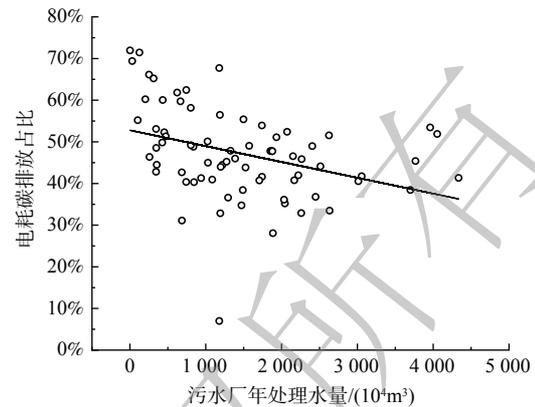


图5 污水处理系统年处理水量与电耗碳排占比关系

Fig. 5 Relationship between the treatment scale of sewage treatment systems and the proportion of carbon emissions from electricity consumption

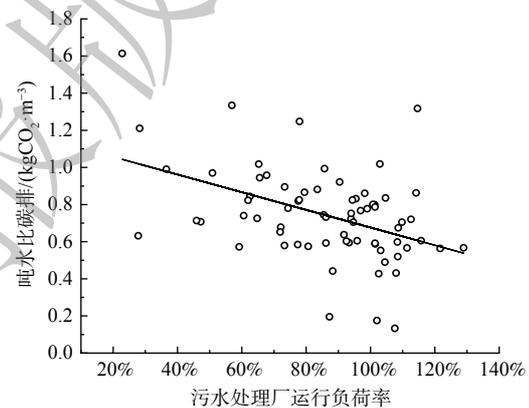


图6 污水处理系统运行负荷率和吨水比碳排关系

Fig. 6 Relationship between operating load rate and carbon emissions per ton of water ratio of sewage treatment systems

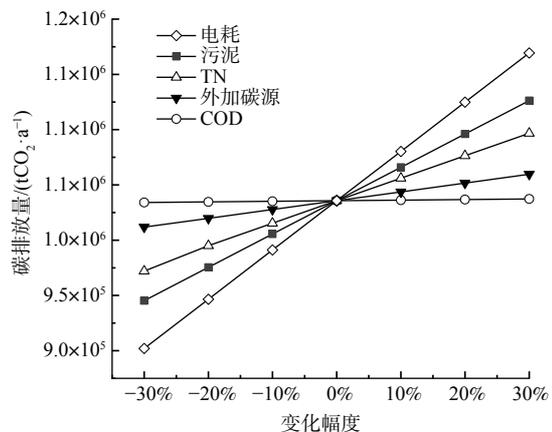


图7 各因素对总碳排放量的影响

Fig. 7 The impact of various factors on total carbon emissions

工艺设计。充分反硝化、完全硝化和深度脱碳等生化法是目前最经济可靠的脱氮方式。可采用氨氮处理效果较好的短程硝化反硝化等新型生物脱氮技术从而获得较高的脱氮率, 同时进行污泥资源回收以达到对氮、硫、磷等物质的重复利用也是有效手段之一。

4) 优化“设计规模与实际处理规模适配性”的调度。实施规划先行、动态调整的设计方法。在设计方面, 城市污水处理厂设计前期应充分实地调研, 结合地区城镇化进程和经济发展水平, 设计符合地区实际污水产生规模的污水厂, 保证污水厂进水稳定。在运行方面, 污水处理关键设备诸如水泵和风机等, 应设置变频器, 当实际处理流量较低时, 通过调节电机转速调节流量, 从而减小功率, 防止系统的设备长期处于低效区运行造成能源的浪费。在运行时, 还应根据实际进水情况调整污泥负荷。

5) 改善“城市污水处理系统能源自给不足”的现状。如大力推进城市污水处理系统污水再生循环利用, 提高污水回用规模, 还可低廉价格将富余再生水卖给用水水质要求不高的用户, 增加收益, 若借鉴上海某污水处理厂再生水利用技术^[22], 按 80% 的成功率计算, 可实现 74.98% 的降碳效益。引进厌氧消化-热电联产技术, 利用污泥厌氧消化产甲烷并通过热电联产技术回收化学能发热发电; 引进污水水源热泵技术回收污水余热; 引进光伏发电技术, 充分利用污水厂占地面积广, 各种构筑物表面积大的特点, 提高污水厂能源自给率^[23]。将上述多种技术组合应用, 经初步估算重庆市污水处理厂可实现约 80% 的电能自给和约 70% 的热能自给。

3 结论

1) 重庆市 43 区县 75 座污水处理系统总比碳排为 $0.89 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。电耗对总碳排放影响最大; 外加碳源和去除 COD 对总碳排放影响较小。2) 城镇污水处理系统处理规模越大、运行负荷率越高, 比碳排总体呈现下降趋势; 城市污水处理系统碳排放中电耗产生的碳排放占比最大达 70%, 占总碳排放的比例随处理规模的增加而降低。3) 重庆市污水处理系统的污泥处置产生的碳排放和电力消耗产生的碳排放这两项指标相比于其他地区污水处理系统偏高。降低碳排放量, 可参考其他地区实例, 优先考虑降低这两项指标对应的碳排放量。

参考文献

- [1] KHALED O, NABILA S, ENAS T S, et al. The role of wastewater treatment in achieving sustainable development goals (SDGs) and sustainability guideline[J]. *Energy Nexus*, 2022(7): 100-112.
- [2] Maji na Ufanisi (Water and Development). SDG 6: Clean Water and Sanitation – A Comprehensive Guide for Change-Makers[EB/OL][2023-05-18]. <https://majinaufanisi.org/sdg-6-clean-water-and-sanitation-a-comprehensive-guide-for-change-makers/>.
- [3] 戴晓虎, 张辰, 章林伟, 等. 碳中和背景下污泥处理处置与资源化发展方向思考[J]. *给水排水*, 2021, 47(3): 1-5.
- [4] 蔡博峰, 朱松丽, 于胜民, 等. 《IPCC 2006 年国家温室气体清单指南 2019 修订版》解读[J]. *环境工程*, 2019, 37(8): 1-11.
- [5] 郝晓地, 金铭, 胡沅胜. 荷兰未来污水处理新框架——NEWs 及其实践[J]. *中国给水排水*, 2014, 30(20): 7-15.
- [6] 郝晓地, 程慧芹, 胡沅胜. 碳中和运行的国际先驱奥地利 Strass 污水处理厂案例剖析[J]. *中国给水排水*, 2014, 30(22): 1-5.
- [7] HAO X D, LI J, VAN LOOSDRECHT M C M, et al. Energy recovery from wastewater: heat over organics[J]. *Water Research*, 2019, 161: 74-77.
- [8] 中持股份, 面向未来: 中持股份睢县第三污水处理厂初探(上)[EB/OL]. (2019-09-06)[2023-05-18]. <https://www.h2o-china.com/news/296068.html>.
- [9] 中持股份, 面向未来: 中持股份睢县第三污水处理厂初探(下)[EB/OL]. (2019-09-27)[2023-05-18]. <https://www.h2o-china.com/news/296942.html>.
- [10] 中持股份: 河南省城镇污水处理工作推进会走进中持股份睢县概念厂[EB/OL]. (2020-11-05)[2023-05-18]. <https://www.h2o-china.com/news/316646.html>, 2020-11-05.
- [11] DEBORAH B, MICHAEL D S, YOSHITAKA E, et al. 2019 Refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Volume 5: Waste. Chapter 6: Wastewater treatment and discharge [R]. IPCC, 2019.
- [12] 王钊越, 赵夏滢, 唐琳慧, 等. 城市污水收集与处理系统碳排放监测评估技术研究进展[J]. *环境工程*, 2022, (6): 77-82.
- [13] 城镇污水处理厂污染物排放标准: GB 18918-2002[S]. 国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局, 2002.
- [14] IPCC. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventory [R]. 2019.
- [15] 中国环境科学研究院编制组. 城镇污水处理厂污染物去除协同控制温室气体核算技术指南(试行)[R]. 北京: 生态环境部, 2018.
- [16] T/CAEPI 49-2022, 污水处理厂低碳运行评价技术规范[S]. 北京: 中国环保产业协会, 2022.
- [17] 陈卫平, 涂宏志, 彭驰等. 环境模型中敏感性分析方法评述[J]. *环境科学*, 2017, 38(11): 4889-4896.
- [18] 王磊. 城市污水厂污泥产率季节变化与影响因素分析[J]. *净水技术*, 2018, 37(6): 36-40.
- [19] 刘锐, 郁志杰, 林敏, 徐强, 郭松杰, 金飞. 污水厂污泥产率随季节变化研究[J]. *城市道桥与防洪*, 2022(3): 101-103.
- [20] 柴春燕. 城镇污水处理厂温室气体排放规律及热岛效应研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [21] 孙慧, 王佳伟, 吕竹明, 等. 北京某大型城市污水处理厂节能降耗途径和效果分析[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(16): 31-34.
- [22] 秦波. 上海市某污水厂再生水利用途径探究及效益分析[J]. *净水技术*, 2022, 41(S1): 144-148.
- [23] 央广网. 全国单体规模最大的污水厂光伏发电项目并网发电[EB/OL]. (2021-05-14)[2023-05-18]. https://www.cnr.cn/ah/news/20180822/t20180822_524339133.shtml.

(责任编辑: 靳炜)

Carbon emission characteristics of urban sewage treatment system in Chongqing and suggestions on pollution and carbon reduction measures

OUYANG Yiwen¹, PANG Hengming¹, YE Hongli¹, PANG Huiyue¹, WANG Zhaoqing², GAO Xiaofeng^{1,*}, LU Jiaqi^{3,*}

1. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, College of Environment and Ecology, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. School of Marxism, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 3. Innovation Centre for Environment and Resources, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China

*Corresponding author, E-mail: gaoxiaofeng@cqu.edu.cn; wilsherelu@foxmail.com

Abstract Based on the IPCC carbon emission accounting factor method, this study explored the carbon emission characteristics of 75 sewage treatment systems in 43 districts and counties of Chongqing, as well as their relationship with regions, treatment scales, and other factors. This paper analyzed the problems in existing sewage treatment systems, compared the domestic advanced sewage treatment processes, and proposed optimization measures. The results indicated that the carbon emissions of sewage treatment systems had a "scale effect": the carbon emissions per ton of water and the electricity consumption per ton of water decreased with the increase of treatment scale. The largest source of carbon emissions was electricity consumption, which accounted for 40% to 60%. The relationship between carbon emissions and regions was not significant, with specific carbon emissions (calculated as CO₂) ranging from 0.50 to 0.90 kg·m⁻³ for each region. Based on the analysis of carbon emission characteristics, energy-saving and emission reduction suggestions were proposed, such as adjusting operating parameters of equipment to reduce carbon emissions from electricity consumption, improving treatment processes to reduce carbon emissions generated by TN removal, dynamically adjusting to increase operating load rate, optimizing energy structure to increase energy self-sufficiency rate of urban sewage treatment systems, in order to provide reference for national sewage treatment system pollution reduction and carbon reduction.

Keywords sewage treatment system; carbon emission intensity; carbon emission characteristics; carbon neutrality; energy conservation and emission reduction