

目次

基于机器学习的珠三角秋季臭氧浓度预测	陈镇, 刘润, 罗征, 薛鑫, 汪瑶, 赵志军 (1)
粤港澳大湾区大气PM _{2.5} 浓度的遥感估算模型	代园园, 龚绍琦, 张存杰, 闵爱莲, 王海君 (8)
典型输送通道城市冬季PM _{2.5} 污染与传输变化特征	代武俊, 周颖, 王晓琦, 齐鹏 (23)
郑州市夏季PM _{2.5} 中二次无机组分污染特征及其影响因素	和兵, 杨洁茹, 徐艺斐, 袁明浩, 翟诗婷, 赵长民, 王申博, 张瑞芹 (36)
重庆典型城区冬季碳质气溶胶的污染特征及来源解析	彭超, 李振亮, 向英, 王晓宸, 汪凌韬, 张晟, 翟崇治, 陈阳, 杨复沐, 翟天宇 (48)
2022年8月成渝两地臭氧污染差异影响因素分析	陈木兰, 李振亮, 彭超, 邓也, 宋丹林, 谭钦文 (61)
2020年“三连击”台风对我国东部地区O ₃ 污染的影响分析	花丛, 尤媛, 王峰, 张碧辉 (71)
北京城区夏季VOCs初始体积分数特征及来源解析	张博韬, 景宽, 王琴, 安欣欣, 鹿海峰, 王陈婧, 王友峰, 刘保献 (81)
机动车减排降碳综合评价体系综述	范朝阳, 佟惠, 梁晓宇, 彭剑飞 (93)
基于LEAP模型的长三角某市碳达峰情景	杨峰, 张贵驰, 孙佑, 谢放尖, 揣小伟, 孙瑞玲 (104)
广东省船舶二氧化碳排放驱动因素与减排潜力	翁淑娟, 刘颖颖, 唐凤, 沙青娥, 彭勃, 王辉嘉, 陈诚, 张雪驰, 李京洁, 陈豪琪, 郑君瑜, 宋献中 (115)
给水厂典型工艺碳排放特征与影响因素	张翔宇, 胡建坤, 马凯, 高欣慰, 魏月华, 韩宏大, 李克勋 (123)
中国饮用水中砷的分布特征及基于伤残调整寿命年的健康风险评价	窦殿程, 齐媛, 肖淑敏, 苏高新, 郭宇新 (131)
太湖水体和沉积物中有机磷酸酯的时空分布和风险评价	张成诺, 钟琴, 栾博文, 周涛, 顾帆, 李伟飞, 邹华 (140)
水产养殖环境中农兽药物的污染暴露水平及其风险影响评价	张楷文, 张海燕, 孔聪, 顾润润, 田良良, 杨光昕, 王媛, 陈凤, 沈晓盛 (151)
长江朱沱断面磷浓度与通量变化及来源解析	姜保峰, 谢卫民, 黄波, 刘旻璇 (159)
珠江河口地表水锰氧化物对磷的“载-卸”作用	李睿, 梁作兵, 伍祺瑞, 杨晨晨, 田帝, 高磊, 陈建耀 (173)
富春江水库浮游植物功能群变化的成因	张萍, 王炜, 朱梦圆, 国超旋, 邹伟, 许海, 朱广伟 (181)
合浦盆地西部地区地下水水化学特征及形成机制	陈雯, 吴亚, 张宏鑫, 刘怀庆 (194)
新疆车尔臣河流域绿洲带地下水咸化与污染主控因素	李军, 欧阳宏涛, 周金龙 (207)
京津冀地区生态系统健康时空演变及其影响因素	李魁明, 王婉燕, 姚罗兰 (218)
近30年辽河三角洲生态系统服务价值时空演变及影响因素分析	王耕, 张芙蓉 (228)
光伏电站建设对陆地生态环境的影响:研究进展与展望	田政卿, 张勇, 刘向, 陈生云, 柳本立, 吴纪华 (239)
大兴安岭林草交错带植被NDVI时空演变及定量归因	石淞, 李文, 曲琛, 杨子仪 (248)
西南地区不同类型植被NPP时空演变及影响因素探究	徐勇, 郑志威, 孟禹弛, 盘钰春, 郭振东, 张炎 (262)
不同海拔梯度下极端气候事件对松花江流域植被NPP的影响	崔嵩, 贾朝阳, 郭亮, 付强, 刘东 (275)
基于InVEST与CA-Markov模型的昆明市碳储量时空演变与预测	帕茹克·吾斯曼江, 艾东, 方一舒, 张益宾, 李牧, 郝晋琨 (287)
基于PLUS-InVEST模型的酒泉市生态系统碳储量时空演变与预测	石晶, 石培基, 王梓洋, 程番苑 (300)
长江下游沿江平原土壤发育过程中碳库分配动态	胡丹阳, 张欢, 宿宝巍, 张娅璐, 王永宏, 纪佳辰, 杨洁, 高超 (314)
漓江流域喀斯特森林土壤有机碳空间分布格局及其驱动因子	申楷慧, 魏识广, 李林, 储小雪, 钟建军, 周景钢, 赵毅 (323)
不同土地利用方式对岩溶区土壤有机碳组分稳定性的影响	陈坚淇, 贾亚男, 贺秋芳, 江可, 陈畅, 叶凯 (335)
紫色土丘陵区坡地柑橘园土壤碳氮的空间分布特征	李子阳, 陈露, 赵鹏, 周明华, 郑静, 朱波 (343)
氮添加与凋落物处理对橡胶林砖红壤有机碳组分及酶活性的影响	薛欣欣, 任常琦, 罗雪华, 王文斌, 赵春梅, 张永发 (354)
重庆化肥投入驱动因素、减量潜力及环境效应分析	梁涛, 赵敬坤, 李红梅, 王妍, 曹中华, 张务帅, 王孝忠, 郭超仪, 石孝均, 陈新平 (364)
中国土壤中全氟和多氟烷基物质的分布、迁移及管控研究进展	刘浩然, 邢静怡, 任文杰 (376)
基于多源辅助变量和随机森林模型的耕地土壤重金属含量空间分布预测	解雪峰, 郭炜炜, 濮励杰, 缪源卿, 蒋国俊, 张建珍, 徐飞, 吴涛 (386)
基于源导向的农用地土壤重金属健康风险评估及优先控制因子分析	马杰, 葛森, 王胜蓝, 邓力, 孙静, 蒋月, 周林 (396)
铜陵某废弃硫铁矿矿区土壤重金属污染特征及来源解析	李如忠, 刘宇昊, 黄言欢, 吴鸿飞 (407)
天水市主城区公交站地表灰尘重金属来源解析及污染评价	李春艳, 王新民, 王海, 吕晓斌 (417)
基于大田试验的土壤-水稻镉对不同调理剂的响应	唐乐斌, 刘新彩, 宋波, 马丽钧, 黄凤艳 (429)
腐殖质活性组分对土壤镉有效性的调控效应与水稻安全临界阈值	胡秀芝, 宋毅, 王天雨, 蒋珍芬, 魏世强 (439)
生物炭与铁钙材料对镉砷复合污染农田土壤的修复	吴秋产, 吴骥子, 赵科理, 连斌, 袁峰, 孙洪, 田欣 (450)
人体微塑料污染特征及健康风险研究进展	马敏东, 赵洋尘, 朱龙, 王伟平, 康玉麟, 安立会 (459)
聚苯乙烯微塑料联合镉污染对土壤理化性质和生菜(<i>Lactuca sativa</i>)生理生态的影响	牛佳瑞, 邹勇军, 简敏菲, 黄楚红, 李金燕, 穆霞, 刘淑丽 (470)
转录组分析植物促生细菌缓解高粱微塑料和重金属复合污染胁迫机制	刘泳岐, 赵超禹, 任学敏, 李玉英, 张英君, 张浩, 韩辉, 陈兆进 (480)
微塑料对土壤中养分和镉淋失的影响	赵群芳, 褚龙威, 丁原红, 王发园 (489)
微塑料和非对土壤化学性质、酶活性及微生物群落的影响	刘沙沙, 秦建桥, 吴贤格 (496)
民勤荒漠绿洲过渡带人工梭梭林土壤细菌群落结构及功能预测	王安林, 马瑞, 马彦军, 吕彦勋 (508)
不同灌溉水盐度下土壤真菌群落对生物炭施用的响应	郑志玉, 郭晓雯, 闵伟 (520)
厨余垃圾有机肥对土壤微生物活性及功能的影响	刘美灵, 汪益民, 金文豪, 王永冉, 王嘉和, 柴一博, 彭丽媛, 秦华 (530)
土壤真菌群落结构对辣椒长期连作的响应特征	陈芬, 余高, 王谢丰, 李廷亮, 孙约兵 (543)
叶面喷施硅肥对再生水灌溉水稻叶际细菌群落结构及功能基因的影响	梁胜贤, 刘春成, 胡超, 崔二苹, 李中阳, 樊向阳, 崔丙健 (555)
昌黎县海域细菌群落和抗生素抗性基因分析	王秋水, 程波, 刘悦, 邓婕, 徐岩, 孙朝徽, 袁立艳, 左嘉, 司飞, 高丽娟 (567)
基于高通量定量PCR与高通量测序技术研究城市湿地公园抗生素抗性基因污染特征	黄福义, 周曙屹, 潘婷, 周昕原, 苏建强, 张炯 (576)
城区第四系沉积柱中抗生素的垂向分布特征及环境影响因素	刘可, 童蕾, 甘翠, 王逸文, 张嘉越, 何军 (584)
氢氧化钾改性玉米秸秆生物炭对水中土霉素的吸附特性及机制	刘总堂, 孙玉凤, 费正皓, 沙新龙, 温小菊, 钱彬彬, 陈建, 谷成刚 (594)
CO ₂ 气氛热解与硝酸改性的生物炭Pb ²⁺ 吸附性能对比	江豪, 陈瑞芝, 朱自洋, 王琳, 段文斌, 陈芳媛 (606)

给水厂典型工艺碳排放特征与影响因素

张翔宇^{1,2,3}, 胡建坤¹, 马凯¹, 高欣慰¹, 魏月华⁴, 韩宏大¹, 李克勋²

(1. 天津水务集团有限公司, 天津 300042; 2. 南开大学环境科学与工程学院, 天津 300350; 3. 天津市自来水集团有限公司, 天津 300040; 4. 天津市自来水集团有限公司凌庄水厂, 天津 300381)

摘要: 基于实际运行工况和数据监测基础,对天津市给水厂典型工艺的碳排放特征进行研究。给水厂总碳排放强度(以 $\text{CO}_2\text{-eq}$ 计)为 $0.254\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,其中电耗和药耗碳排放占比分别为81.76%和9.15%。给水厂的关键电耗碳排放环节为送水泵房、超滤膜工艺和进水泵房,分别占总电耗碳排放的50.99%~73.51%、17.64%~20.70%和17.97%~22.40%。次氯酸钠对药耗碳排放的贡献率为89.12%~90.30%,其余依次为三氯化铁、聚合氯化铝和硫酸铵。传统净水工艺单元的电耗碳排放强度依次为:进水泵房>快滤池>沉淀池,在深度处理工艺线中依次为:进水泵房>超滤膜>机械混凝>澄清池。快滤池工艺线和超滤膜工艺线的碳排放强度分别为 $0.0709\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $0.1090\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。超滤膜工艺能节约23%的药剂用量,而电耗碳排放是传统处理工艺的2倍。对关键环节的碳排放影响因素分析结果表明,浊度、pH、氨氮和温度等原水水质参数与次氯酸钠碳排放强度显著相关;出厂水压力、日送水量与送水泵房碳排放强度呈显著的线性回归关系,相关水质和水压调控措施可以有效减少给水厂碳排放。

关键词: 碳排放; 给水厂; 超滤膜; 快滤池; 电耗; 药耗

中图分类号: X24 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)01-0123-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202302078

Carbon Emission Characteristics and Influencing Factors of Typical Processes in Drinking Water Treatment Plant

ZHANG Xiang-yu^{1,2,3}, HU Jian-kun¹, MA Kai¹, GAO Xin-wei¹, WEI Yue-hua⁴, HAN Hong-da¹, LI Ke-xun²

(1. Tianjin Water Group Co., Ltd., Tianjin 300042, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China; 3. Tianjin Waterworks Group Co., Ltd., Tianjin 300040, China; 4. Lingzhuang Waterworks, Tianjin Waterworks Group Co., Ltd., Tianjin 300381, China)

Abstract: Based on the actual operating conditions and data monitoring, the carbon emission characteristics of typical processes of a drinking water treatment plant (DWTP) in Tianjin were studied. The total carbon emission intensity measured by $\text{CO}_2\text{-eq}$ was $0.254\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, and the proportion of carbon emissions from electricity consumption and reagent consumption was 81.76% and 9.15%, respectively. The key carbon emission sectors of electricity consumption were the water supply pump house, ultrafiltration membrane process, and inlet pump house, which accounted for 50.99%-73.51%, 17.64%-20.70%, and 17.97%-22.40% of the total carbon emission from electricity consumption in the DWTP, respectively. The contribution of sodium hypochlorite to the carbon emission of reagent consumption was 89.12%-90.30%, followed by ferric chloride, PAC, and ammonium sulfate. In the traditional water purification process, the carbon emission intensity of the process unit was in the order of inlet pump house > rapid filter > sedimentation tank. The order in the ultrafiltration membrane advanced treatment process was inlet pump house > ultrafiltration membrane > mechanical coagulation > clarification tank. The carbon emission intensity of the rapid filter process and the ultrafiltration membrane process were $0.0709\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ and $0.1090\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, respectively. The ultrafiltration membrane process could save 23% of the reagent consumption, and its carbon emission of electricity consumption was twice that of the traditional treatment process. The analysis of factors affecting carbon emission in key sectors showed that the raw water quality parameters such as turbidity, pH, ammonia nitrogen, temperature, etc., were significantly correlated with the carbon emission intensity of sodium hypochlorite. There was a significant linear regression relationship between ex-factory water pressure, daily water supply, and carbon emission intensity of the water supply pump house. The control measures of water quality and water pressure can effectively reduce the carbon emissions of the DWTP.

Key words: carbon emissions; drinking water treatment plant; ultrafiltration membrane; rapid filter; electricity consumption; reagent consumption

气候变化是全球热议问题,减少碳排放已成为国际共识^[1]。然而城市供水系统在应对水质提标、用水量需求增加和水处理系统的环境适应性调控等一系列严峻挑战时,往往以更多的能源消耗和碳排放为代价^[2-5]。对于城市供水相关能源使用和碳排放无论是在科学研究还是在政策制定上都存在不足^[6,7]。供水企业亟需审查现行的运作方式,将优化能源使用和限制碳排放纳入总体发展目标与评价体系^[8,9]。因此,供水行业迫切希望了解碳排放现状以及减少碳足迹的可能性,定位水务部门在碳排放中的作用和机会,从而减少供水系统碳排放,促进行业绿色低碳发展。

给水厂发挥着保障城镇供水水质、水量和水压需求的重要作用,是供水系统及其碳排放的重要组成部分^[10]。给水厂的碳排放主要来源于水处理和输水加压过程的设备运行能耗,以及混凝剂、消毒剂等水处理药剂的药耗^[11]。国内关于给水厂碳排放的相关研究主要围绕着对核算边界的界定和研究,定性分析碳排放源及其影响因素,并提出碳减排对策建议^[2,11,12]。仅有少量的碳排放量化研究初步揭示了给水厂碳排放的总体构成^[13,14]。Racoviceanu等^[15]对多伦

收稿日期: 2023-02-10; 修订日期: 2023-03-14

基金项目: 天津水务集团有限公司科技项目(2022KY-02)

作者简介: 张翔宇(1992~),女,博士(后),主要研究方向为供水系统碳排放核算分析与节能减碳,E-mail: a1181629748@163.com

多市典型给水厂的碳排放分析发现,运行电耗碳排放占比为90%,净水药剂生产碳排放占7%,而药剂运输碳排放贡献很小。有研究人员核算日处理量为20万t、原水浊度为10 NTU的给水厂运行碳排放,电耗、药剂的生产和运输碳排放(以 $\text{CO}_2\text{-eq}$ 计)合计为 $38\,197 \sim 69\,596 \text{ kg}\cdot\text{d}^{-1}$ ^[16]。然而电力消耗作为给水厂碳排放的主体,只说明电耗碳排放总量而不做进一步分解,很难确定其特征以及后续分析和关注的重点。为解决这一问题,研究人员采用给水处理工艺的能耗理论计算公式和水厂设计运行条件估算各工艺环节的碳排放量,解析给水厂碳排放特征和关键碳排放节点^[17-19]。Kyung等^[16]以给水厂典型运行条件和参数为输入,发现深度处理给水厂工艺单元的理论电耗碳排放强度依次为:微滤>臭氧消毒>快速混合>絮凝>加药过程。目前的给水厂碳排放特征研究以假设估算为主,基于实际调研数据的较少,评估结果较为粗糙。尽管相关结论具有一定的借鉴意义,但是忽略了给水厂实际运行过程中的工况条件波动,无法揭示水厂碳排放的动态变化规律及其现实影响因素,从而导致对碳排放的分析和调控仍停留在理论指导层面。因此,有必要在充分了解给水厂实际运行调度方式和数据监测基础的前提下,综合考虑碳排放核算数据需求的复杂性和可获得性,建立统一标准化的碳排放评估方法,解析给水厂碳排放特征,从而弥补相关研究领域的知识缺口。

本研究基于给水厂实际运行工况和数据监测基础,确定给水厂碳排放核算边界和标准化碳排放评估方法,解析给水厂碳排放源与总量特征,通过不同

精度数据分析给水厂生产碳排放的总体发展趋势、关键环节以及具体变化规律,对比传统净水工艺和以超滤膜为代表的深度处理工艺的碳排放特征,并进一步分析关键碳排放环节的主要影响因素。本研究首次揭示了给水厂碳排放的动态变化特征,对供水企业摸清碳排放家底、锚定关键环节和针对性开展节能减碳举措具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 给水厂概况与数据来源

天津市某给水厂(L水厂)具备两条不同工艺的生产线,其一为“反应沉淀+普通快滤池”生产线(快滤池工艺线);另一条生产线采用“预臭氧+上向流炭吸附脉冲澄清池+压力式超滤膜”组合工艺(超滤膜工艺线),超滤膜工艺线于2020年8月正式投入运行。水厂工艺流程与主要碳排放节点如图1所示。水厂总产水能力为 $60 \text{ 万 t}\cdot\text{d}^{-1}$,目前实际产水量约为 $40 \text{ 万 t}\cdot\text{d}^{-1}$ 。水源为南水北调中线工程引调的长江水,引江原水浊度为 $0.13 \sim 3 \text{ NTU}$,耗氧量为 $1.4 \sim 3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,高发期的藻类计数值低于 $2\times 10^7 \text{ cells}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[20,21]。采用三氯化铁和聚合氯化铝(PAC)联合投加的混凝方式。采用次氯酸钠多点消毒的方式保障水质安全,出厂前加入硫酸铵,形成持续性的氯胺消毒。传统的快滤池工艺线出水浊度在 0.2 NTU 以下,超滤膜深度处理工艺线的出水浊度在 0.05 NTU 以下。L水厂自用水率为 7.03% ,排泥和反洗水进入污泥处理车间,浓缩后的上清液回流至预沉池,污泥在离心脱水阶段添加聚丙烯酰胺(PAM),形成的泥饼含水率约为 80% ,进一步外运处置。

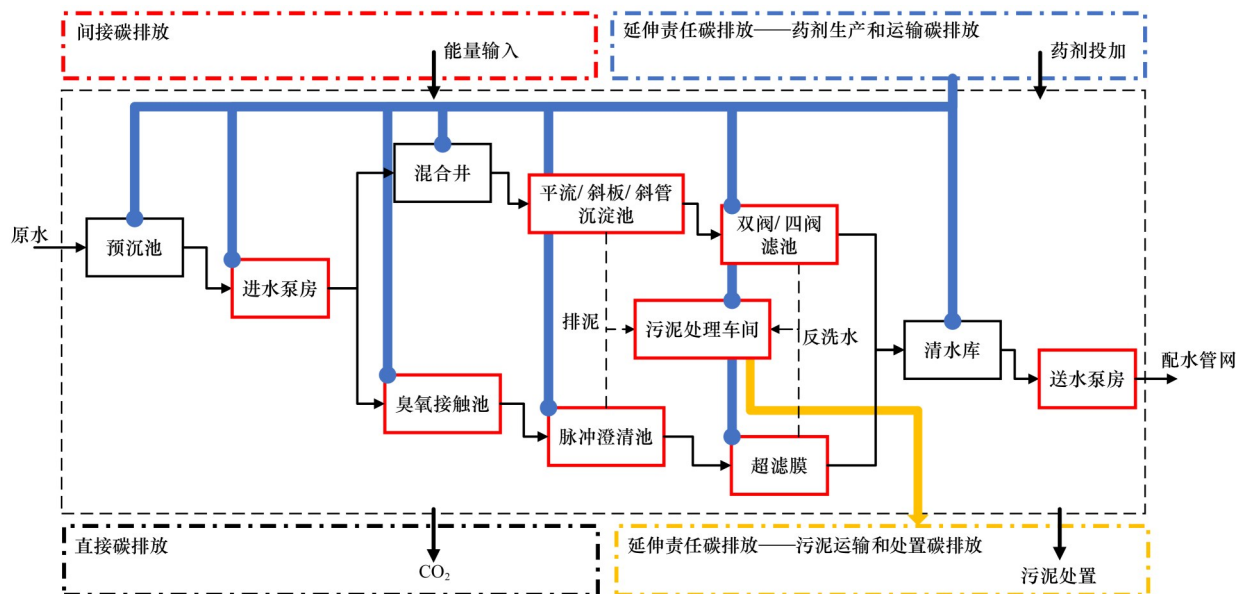


图1 L水厂工艺流程与主要碳排放节点示意

Fig. 1 Schematic diagram of process flow and main carbon emission nodes of the L DWTP

基于L水厂能源计量和生产数据记录现状,收集碳排放核算基础数据.为核算L水厂总碳排放量,收集2021年度化石燃料使用量、年度用电量、年度供热费用、年度净水药剂使用量和年度外运污泥量等数据.超滤膜清洗过程使用的柠檬酸和氢氧化钠等药剂无用量记录,因此未纳入本次核算.为进一步解析典型净水工艺碳排放特征,收集L水厂两条工艺线近5年(2017~2021年)的逐月送水量、净水药剂使用量和次级用能单位用电量.配备有用电量计量装置的次级用能单位包括进水泵房、送水泵房、污泥处理车间和超滤膜工艺单元.为明确水厂关键碳排放节点的碳排放影响因素,收集2019年的日检原水水质参数(包括浊度、pH、氨氮、温度、总碱度、氯化物、蛋白性氮、亚硝酸盐氮、耗氧量和总硬度)、日进水量以及次氯酸钠日消耗量,分析原水水质变化与次氯酸钠碳排放强度的关联效果;收集2021年的日均出厂水压力、日送水量和送水泵房日耗电量,解析送水泵房碳排放强度与水压、水量的定量关系.皮尔逊相关性分析和线性回归分析采用SPSS 26.0软件进行.

1.2 碳排放核算方法

1.2.1 碳排放核算边界

基于碳排放的来源与属性,参考《温室气体核算体系》^[22]和《温室气体——第一部:企业层面上温室气体排放和去除量化报告指南》(ISO 14064-1:2018)^[23],本研究的碳排放核算边界包括:①直接碳排放——水厂设施设备燃气、燃油燃烧碳排放;②间接碳排放——水厂电力和热力消耗碳排放;③延伸责任碳排放——水厂运行消耗净水药剂的生产和运输碳排放,以及产生废弃物的运输和处置碳排放^[24-26].本研究中的碳排放核算结果均以CO₂-eq计.

1.2.2 碳排放计算方法

1.2.2.1 直接碳排放计算方法

化石燃料燃烧直接碳排放计算公式如下:

$$E_{\text{dl}} = \sum_{i=1}^n (M_{\text{dl},i} \times \text{EF}_{\text{dl},i}) \quad (1)$$

式中, E_{dl} 表示化石燃料燃烧直接碳排放量,t; i 表示不同化石燃料类型; $M_{\text{dl},i}$ 表示第*i*种化石燃料的消耗量,t或m³(标准气体条件下); $\text{EF}_{\text{dl},i}$ 表示第*i*种化石燃料燃烧的碳排放因子,t·t⁻¹或t·m⁻³.化石燃料燃烧碳排放因子计算公式如下:

$$\text{EF}_{\text{dl},i} = \text{NCV}_i \times \text{CC}_i \times \text{OF}_i \times \frac{44}{12} \quad (2)$$

式中,NCV_{*i*}表示第*i*种化石燃料的平均低位发热量,GJ·t⁻¹或GJ·m⁻³;CC_{*i*}表示第*i*种化石燃料的单位热值含碳量,t·GJ⁻¹;OF_{*i*}表示第*i*种化石燃料的碳氧化

率,%。根据《中国温室气体清单研究》^[27]和《省级温室气体清单指南(试行)》^[28]参考值,可得汽油和天然气的碳排放因子EF_{*dl*}分别为3.04 t·t⁻¹和2.16 kg·m⁻³.

1.2.2.2 间接碳排放计算方法

电力消耗间接碳排放计算公式如下:

$$E_{\text{d}} = P_{\text{d}} \times \text{EF}_{\text{d}} \quad (3)$$

式中, E_{d} 表示电耗碳排放量,t; P_{d} 表示耗电量,MW·h; EF_{d} 表示电力碳排放因子,华北区域电网的电力碳排放因子(以CO₂-eq计)为0.941 9 t·(MW·h)⁻¹.

热力消耗间接碳排放(E_{r})的计算见公式(4),式中: Q_{r} 表示外购热力的热量,GJ; EF_{r} 表示热力碳排放因子,t·GJ⁻¹,缺省值为0.11 t·GJ⁻¹.通过供热费用和天津市非居民70元·GJ⁻¹的收费标准估算外购热力热量及其碳排放.

$$E_{\text{r}} = Q_{\text{r}} \times \text{EF}_{\text{r}} \quad (4)$$

1.2.2.3 延伸责任碳排放计算方法

药剂生产碳排放计算公式如下:

$$E_{\text{yj}} = \sum_{i=1}^n (M_{\text{yj},i} \times \text{EF}_{\text{yj},i}) \quad (5)$$

式中, E_{yj} 表示药剂生产碳排放量,t; i 表示不同药剂类型; $M_{\text{yj},i}$ 表示第*i*种药剂的消耗量,t; $\text{EF}_{\text{yj},i}$ 表示第*i*种药剂的生产碳排放因子,t·t⁻¹.L水厂净水药剂及其生产碳排放因子见表1.

表1 水厂净水药剂生产碳排放因子汇总表
Table 1 Summary of carbon emission factors of water purification reagent in DWTPs

药剂	碳排放因子/t·t ⁻¹	文献
三氯化铁	0.395	[29]
PAC	0.537	[29]
次氯酸钠(15%水溶液)	0.920	[30]
硫酸铵	0.580	[31]
PAM	1.480	[32]

药剂和污泥运输碳排放计算公式如下:

$$E_{\text{ys}} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^l (M_{\text{ys},i,j} \times L_{\text{ys},i,j} \times \text{EF}_{\text{ys},j}) \quad (6)$$

式中, E_{ys} 表示运输碳排放量,t; i 表示不同类型药剂或污泥; j 表示运输方式; $M_{\text{ys},i,j}$ 表示运输的药剂或污泥量,t; $L_{\text{ys},i,j}$ 表示运输距离,km; $\text{EF}_{\text{ys},j}$ 表示第*j*种运输方式的碳排放因子,t·(t·km)⁻¹.L水厂的药剂和污泥运输均使用载重18 t的重型柴油货车,碳排放因子为0.129 kg·(t·km)⁻¹^[32];药剂和污泥的运输距离分别为75 km和50 km.

外运污泥的有机物含量为31.2%,处置方式是作为掺混材料制备烧结砖.因其有机质含量较低和处置过程未形成厌氧发酵条件,污泥处置碳排放可忽略不计^[33].

2 结果与讨论

2.1 给水厂碳排放源解析与总量特征

2021年L水厂碳排放总量为37 707.96 t,碳排放强度为 $0.254 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. 间接碳排放和药剂生产碳排放分别为34 015.23 t和3 449.54 t,占比分别为90.21%和9.15%,而运输碳排放(208.67 t)和直接碳排放(34.52 t)合计占比仅为0.64%(图2). 电耗和冬季供暖热耗碳排放量分别为 $30\,831.83 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $3\,183.40 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$,分别占总碳排放量的81.76%和8.44%. 在药剂生产碳排放中,次氯酸钠碳排放量为 $3\,077.62 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$,占总碳排放量的8.16%;其它药剂的碳排放量为 $11.36 \sim 226.40 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$,总量占比均小于1%.

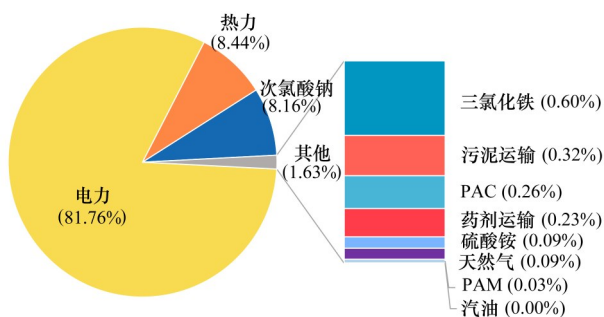


图2 2021年L水厂碳排放构成及其占比

Fig. 2 Carbon emission composition and proportion of the L DWTP in 2021

2.2 给水厂生产碳排放特征与变化趋势

L水厂的能耗间接碳排放和药剂生产碳排放合计占比达99.36%,其中的电耗和药剂生产碳排放分别与设备运行、药剂投加密切相关,而热力消耗碳排放主要与生活相关,在水厂未进行大规模工程新建或改造时,热力消耗碳排放变化不大. 因此,结合精细化生产运行数据,对给水厂生产碳排放即电耗和药耗碳排放进行深入分析.

2017~2021年间L水厂年度电耗、药耗碳排放如图3所示. 2017~2020年间,L水厂电耗碳排放量和碳排放强度分别为 $19\,482.55 \sim 22\,383.86 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $0.162 \sim 0.180 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,总体呈波动趋势. 由于超滤膜工艺线的投产使用,2021年L水厂的电耗碳排放量和碳排放强度达到 $30\,831.83 \text{ t}$ 和 $0.208 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,增幅分别为41.00%和24.82%. 2017~2021年间,L水厂的药耗碳排放强度为 $0.023 \sim 0.027 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,总体波动较小. 在药耗碳排放中,次氯酸钠、三氯化铁、PAC和硫酸铵这4种净水药剂的碳排放贡献率依次为89.12%~90.30%、5.61%~7.79%、1.61%~3.11%和0.98%~1.47%. 2017~2020年间,年度电耗和药耗碳排放分别占生产碳排放的86.3%~87.8%和

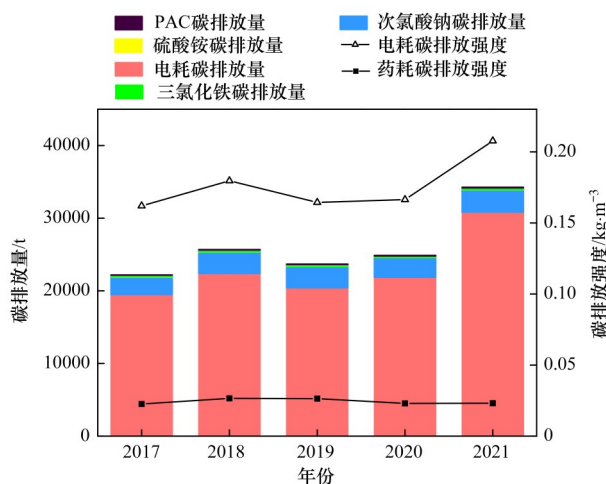


图3 2017~2021年间L水厂年度电耗和药耗碳排放

Fig. 3 Annual carbon emissions of electricity consumption and reagent consumption of the L DWTP from 2017 to 2021

12.2%~13.7%;而2021年的药耗碳排放占比降至9.96%.

主要用电单元的月度电耗碳排放强度如图4所示. 由于超滤膜工艺线的投产与调试运行,L水厂在2020-07~2020-12的电耗碳排放出现明显波动,属于过渡阶段的非稳定运行与碳排放. 2017-01~2020-06期间L水厂的总电耗碳排放强度为 $0.1525 \sim 0.1691 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,其中进水泵房、送水泵房和污泥处理的电耗碳排放强度分别为 $0.0310 \sim 0.0342$ 、 $0.1056 \sim 0.1128$ 和 $0.0029 \sim 0.0061 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,对应总量占比分别为19.09%~22.40%、64.92%~73.51%和1.78%~3.80%. 由图4可以看出,送水泵房每年的电耗碳排放强度呈现先增后减的单峰变化趋势,峰值出现在5~8月,谷值出现在1~2月,峰谷差率为3.29%~4.16%;而进水泵房与污泥处理环节的电耗碳排放无明显的月度变化趋势. 快滤池工艺线和超滤膜工艺线在2021年全年稳定运行产水,此时的总电耗碳排放强度较水厂升级改造前增加了30.42%,达到 $0.1989 \sim 0.2198 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. 超滤膜工艺单元包括提升泵、自清洗过滤器、超滤膜组和相关附属设施设备^[21],电耗碳排放强度为 $0.0352 \sim 0.0436 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. 2021年L水厂的关键碳排放环节依次为送水泵房、超滤膜工艺和进水泵房,分别占总电耗碳排放的50.99%~58.06%、17.64%~20.70%和17.97%~19.59%. 当前的水厂运营主要关注总电耗、送水泵房电耗和配水电耗等能耗指标,指标数值较电耗碳排放强度更具可比较性. 2017~2019年间L水厂采用反应沉淀-快滤池工艺产水时,水厂总电耗、送水泵房电耗和配水电耗分别为 $179.12 \text{ W} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $117.38 \text{ W} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $436.17 \text{ W} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{MPa}^{-1}$;产水任务由快滤池系统和超滤膜系统共同完成时,

总电耗增长为 $220.54 \text{ W}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$, 送水泵房电耗 ($121.95 \text{ W}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$) 和配水电耗 ($426.67 \text{ W}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{MPa}^{-1}$) 变化不大. 加拿大多伦多典型水厂的总电耗为 $217 \sim 280 \text{ W}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$ [15]. 郑州市制水和配水能源强度均值分别为 $543 \text{ W}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $320 \text{ W}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$ [34]. 目前L水厂会依照运行台时定期对泵组进行大修维护, 并对送水泵房中两台水泵机组进行了变频调速改造, 以提高泵组运行能效达到节能减碳的目的. 在此基础上, 未来减碳工作的重点可以放在高效节能型水泵和电机的升级, 以及泵组运行调度的优化等方面.

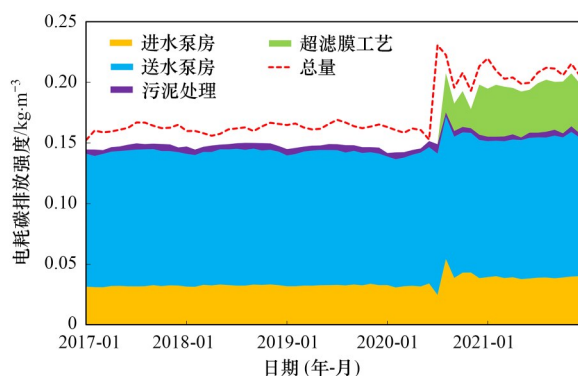


图4 2017~2021年间L水厂主要用电单元月度电耗碳排放强度
Fig. 4 Monthly carbon emission intensity of electricity consumption of the main sectors in the L DWTP from 2017 to 2021

L水厂月度药耗碳排放强度如图5所示, 次氯酸钠碳排放呈显著的季节性变化趋势, 与水质和投药量的季节性变化密切相关. 反应沉淀-快滤池工艺单独运行时, 次氯酸钠碳排放强度呈现先增后减的单峰变化趋势, 峰值出现在6~9月, 峰值为 $0.0274 \sim 0.0388 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$; 谷值出现在11月至次年1月, 谷值为 $0.0108 \sim 0.0167 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. 2020年8月超滤膜工艺合并运行后, 次氯酸钠碳排放强度总体下降了12.84%, 全年碳排放曲线趋向平缓. 2017~2021年间的三氯化铁和PAC碳排放强度总体波动, 且变化趋势一致. 三氯化铁和PAC联合使用以去除原水浊度, 因此其

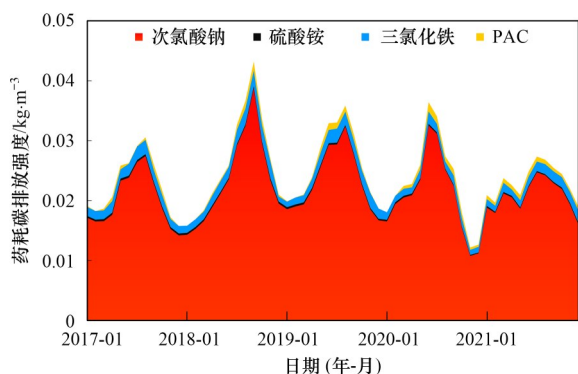


图5 2017~2021年间L水厂月度药耗碳排放强度
Fig. 5 Monthly carbon emission intensity of reagent consumption of the L DWTP from 2017 to 2021

碳排放受原水水质变化影响显著.

2.3 典型净水工艺碳排放特征

为了比较传统净水工艺和深度处理工艺的碳排放特征, 核算2021年快滤池工艺线和超滤膜工艺线各工艺单元的碳排放强度. 进水泵房电耗与水处理工艺流程的水头损失有关, 故纳入碳排放核算范畴; 送水泵房的运行电耗与供水管网布置、供水压力需求相关, 与净水工艺过程无关, 因此不考虑该部分碳排放. 快滤池工艺线中三氯化铁和PAC的投加点位于进水泵的吸水口和泵前位置, 无机械混合池和絮凝池, 因此主要耗电单元为沉淀池和快滤池. 沉淀池和快滤池的电耗强度分别为 $1.75 \text{ W}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$ [35~37] 和 $9.74 \text{ W}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$ [35,38]. 超滤膜工艺线的设计满足远期水质提标和原水水质变化需求, 在当前出水水质达标的情况下, 出于节能降耗的考虑, 未启用臭氧接触池以及澄清池的脉冲系统. 在脉冲澄清池的前端设置机械搅拌混凝池. 因此超滤膜工艺线的主要耗电单元包括机械混凝、澄清池和超滤膜工艺, 机械混凝和澄清池的电耗强度分别为 $2.40 \text{ W}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $1.75 \text{ W}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$ [35].

快滤池工艺线的总电耗碳排放强度为 $0.0448 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 各工艺单元的电耗碳排放强度依次为: 进水泵房 > 快滤池 > 沉淀池, 碳排放贡献率分别为 75.86%、20.46% 和 3.68% (表2). 超滤膜工艺线的主要碳排放工艺单元为进水泵房和超滤膜, 电耗碳排放强度分别为 $0.0444 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $0.0404 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 合计占总电耗碳排放的 95.6%; 机械混凝 ($0.0023 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) 和澄清池 ($0.0016 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) 的碳排放贡献率较低. 超滤膜工艺线的总电耗碳排放强度为 $0.0888 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 是快滤池工艺线的 1.98 倍 (图6). 超滤膜工艺线进水泵房的电耗碳排放强度比快滤池工艺线增加了 30.66%, 表明深度处理工艺水头损失较传统处理工艺更大. 净水药剂在不同工艺线的药耗碳排放强度和投药量如图7所示. 引江原水水质变化使得次氯酸钠、三氯化铁、PAC和硫酸铵的投加量分别在 $2.30 \sim 4.58$ 、 $1.63 \sim 6.60$ 、 $0.64 \sim 1.92$ 和 $0.26 \sim 0.60 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内波动. 研究结果表明, 超滤膜工艺能够显著降低净水过程的药耗及其碳排放. 与快滤池工艺相比, 次氯酸钠、三氯化铁、PAC和总药耗碳排放强度分别减少了 21.16%、40.69%、29.10% 和 22.44%. 快滤池工艺线的总碳排放强度为 $0.0709 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 电耗和药耗碳排放占比分别为 63.26% 和 36.74%; 超滤膜工艺线的总碳排放强度为 $0.1090 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 电耗和药耗碳排放分别占 81.47% 和 18.53%. 与传统处理工艺相比, 超滤膜工艺能减少 23% 的药剂用量, 电耗却增长了 1 倍, 导致总体碳排

放强度为快滤池工艺线的 1.54 倍。有研究表明,采用微滤和臭氧消毒的深度处理工艺能够显著降低药剂使用量及其碳排放,而深度处理工艺的电耗碳排放却达到了传统处理工艺的 2.14 倍^[16]。

表 2 典型净水工艺单元碳排放强度及其占比¹⁾

Table 2 Carbon emission intensity and contribution rate of typical water purification process unit

项目	快滤池工艺线	超滤膜工艺线
电耗碳排放强度 /kg·m ⁻³	进水泵房 0.034 0 (75.86%)	进水泵房 0.044 4 (50.07%)
	沉淀池 0.001 6 (3.68%)	机械混凝 0.002 3 (2.55%)
	快滤池 0.009 2 (20.46%)	澄清池 0.001 6 (1.86%)
	总量 0.044 8	超滤膜 0.040 4 (45.53%)
药耗碳排放强度 /kg·m ⁻³	次氯酸钠 0.023 2 (88.94%)	次氯酸钠 0.018 3 (90.42%)
	三氯化铁 0.001 9 (7.29%)	三氯化铁 0.001 1 (5.57%)
	PAC 0.000 8 (2.98%)	PAC 0.000 6 (2.72%)
	硫酸铵 0.000 2 (0.79%)	硫酸铵 0.000 3 (1.29%)
	总量 0.026 0	总量 0.020 2
	合计 0.070 9	合计 0.109 0

1) 括号内数值为工艺单元(药剂)占工艺线总电耗(总药耗)碳排放强度的比例

2.4 关键碳排放影响因素分析

给水厂总碳排放量的 90.9% 来源于消耗药剂的生产碳排放和电力消耗碳排放,与之对应的关键碳排放节点分别为次氯酸钠碳排放(约占药耗碳排放的 90%)和送水泵房碳排放(约占电耗碳排放的 55%)。次氯酸钠碳排放呈明显的季节性波动变化,因

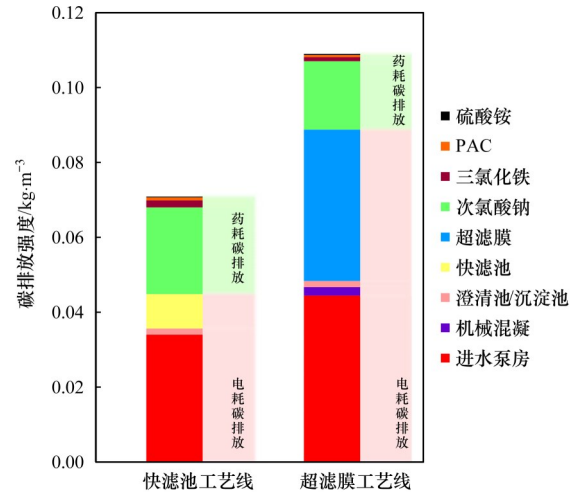


图 6 典型净水工艺碳排放构成与碳排放强度

Fig. 6 Carbon emission composition and intensity of typical water purification process

此对原水水质参数与次氯酸钠碳排放强度进行皮尔逊相关性分析。为排除工艺变化对次氯酸钠药耗及其碳排放的影响,采用2019年快滤池工艺线单独运行时期数据进行分析。数据经过预处理后,相关性分析样本个数为358个,相关性分析结果如表3所示。浊度、pH、氨氮、温度、总碱度、氯化物、蛋白性氮、亚硝酸盐氮、耗氧量、总硬度均和次氯酸钠碳排放强度在0.01水平(双侧)上显著相关,其中pH、总碱度和总硬度是负相关关系,其余水质参数为正相关。

送水泵房的年度碳排放曲线呈规律变化,初步推测受出厂水压力和送水量的影响。对2021年日均出厂水压力、日送水量与送水泵房电耗碳排放强度进行相关性和线性回归分析。结果表明,日均出厂水压力、日送水量与送水泵房碳排放强度在0.01水平(双侧)上显著正相关。回归模型的拟合度调整 $R^2 = 0.695$,拟合度较好,送水泵房碳排放强度有69.5%

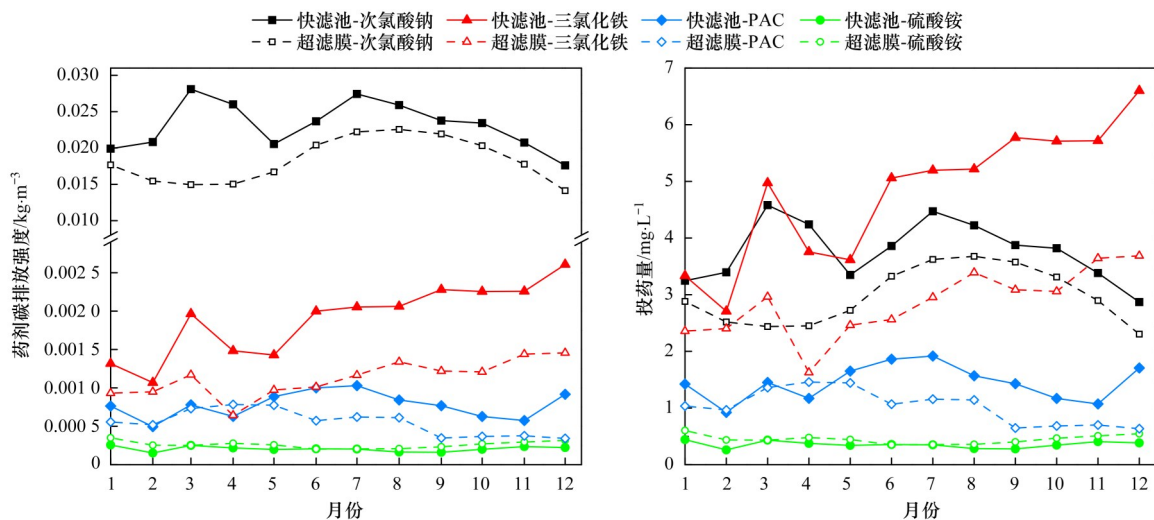


图 7 2021 年典型净水工艺药耗碳排放强度与投药量

Fig. 7 Carbon emission intensity of reagent consumption and dosage in typical water purification process in 2021

表 3 原水水质参数与次氯酸钠碳排放强度的皮尔逊相关系数¹⁾

Table 3 Pearson's correlation coefficient of raw water quality parameters and carbon emission intensity of sodium hypochlorite

项目	次氯酸钠碳排放强度
浊度	0.775**
pH	-0.227**
氨氮	0.813**
温度	0.916**
总碱度	-0.709**
氯化物	0.384**
蛋白性氮	0.852**
亚硝酸盐氮	0.850**
耗氧量	0.501**
总硬度	-0.638**

1)**表示在 0.01 水平(双尾),相关性显著

是由日均出厂水压力和日送水量决定的($P<0.01$),得到的回归方程如公式(7)所示.

$$EI_{ss} = 33.718 + 0.267p_{ss} + 0.01Q_{ss} \quad (7)$$

式中, EI_{ss} 表示送水泵房碳排放强度, $g \cdot m^{-3}$; p_{ss} 表示日均出厂水压力,kPa; Q_{ss} 表示日送水量, $10^3 m^3$. 经检验,VIF值为 1.37,自变量之间不存在多重共线性,且残差服从正态分布,因此回归分析结果准确可信. 给水厂关键碳排放影响因素分析结果表明,优化原水调度、实施原水预处理等原水水质调控措施,以及根据最不利点实时合理调控出厂水压力的水压调控措施,是控制和减少给水厂碳排放的有效途径.

3 结论

(1)给水厂总碳排放强度为 $0.254 kg \cdot m^{-3}$,电耗和药耗碳排放占比分别为 81.76%和 9.15%.

(2)给水厂的关键电耗碳排放环节为送水泵房、超滤膜工艺和进水泵房,分别占总电耗碳排放的 50.99% ~ 73.51%、17.64% ~ 20.70%和 17.97% ~ 22.40%;关键药耗碳排放环节为次氯酸钠,占总药耗碳排放的 89.12% ~ 90.30%.

(3)快滤池和超滤膜工艺线的碳排放强度分别为 $0.0709 kg \cdot m^{-3}$ 和 $0.1090 kg \cdot m^{-3}$;超滤膜工艺线的药耗和电耗碳排放强度分别是快滤池工艺线的 77.69%和 1.98倍.

(4)浊度、pH、氨氮和温度等原水水质参数与次氯酸钠碳排放强度显著相关;出厂水压力、日送水量与送水泵房碳排放强度呈显著的线性回归关系,相关水质和水压调控措施可有效减少给水厂碳排放.

参考文献:

[1] Ma J, Yin Z Y, Cai J. Efficiency of urban water supply under carbon emission constraints in China[J]. Sustainable Cities and Society, 2022, 85, doi: 10.1016/j.scs.2022.104040.

[2] 刘晴靓,王如菲,马军. 碳中和愿景下城市供水面临的挑战、安全保障对策与技术研究进展[J]. 给水排水, 2022, 48(1):

1-12.

Liu Q L, Wang R F, Ma J. Challenges of urban water supply and discussions on the strategic solution with related technology developments of urban water quality under the vision of carbon neutrality[J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(1): 1-12.

[3] 赵荣钦,余娇,肖连刚,等. 基于“水-能-碳”关联的城市水系统碳排放研究[J]. 地理学报, 2021, 76(12): 3119-3134.

Zhao R Q, Yu J, Xiao L G, et al. Carbon emissions of urban water system based on water-energy-carbon nexus[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(12): 3119-3134.

[4] Lee M, Keller A A, Chiang P C, et al. Water-energy nexus for urban water systems: A comparative review on energy intensity and environmental impacts in relation to global water risks[J]. Applied Energy, 2017, 205: 589-601.

[5] Smith K, Liu S M, Chang T. Contribution of urban water supply to greenhouse gas emissions in China [J]. Journal of Industrial Ecology, 2016, 20(4): 792-802.

[6] Rothausen S G S A, Conway D. Greenhouse-gas emissions from energy use in the water sector[J]. Nature Climate Change, 2011, 1(4): 210-219.

[7] Zhang Q, Nakatani J, Wang T, et al. Hidden greenhouse gas emissions for water utilities in China's cities[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 162: 665-677.

[8] Saidan M, Khasawneh H J, Aboelnga H, et al. Baseline carbon emission assessment in water utilities in Jordan using ECAM tool [J]. Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua, 2019, 68(6): 460-473.

[9] Liu Y, Mauter M S. High-resolution carbon accounting framework for urban water supply systems [J]. Environmental Science & Technology, 2022, 56(19): 13920-13930.

[10] 秦华鹏,袁辉洲. 城市水系统与碳排放[M]. 北京: 科学出版社, 2014.

Qin H P, Yuan H Z. Urban water system and carbon emission [M]. Beijing: Science Press, 2014.

[11] 郭怡,陈广,马艳. 城市水系统关键环节碳排放影响因素分析及减排对策建议[J]. 净水技术, 2021, 40(10): 113-117.

Guo Q, Chen G, Ma Y. Analysis on influencing factors of carbon emission in key processes of urban water system and suggestions for emission reduction [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(10): 113-117.

[12] 翁晓姚. 碳达峰与碳中和目标下供水企业绿色低碳发展的思考[J]. 净水技术, 2022, 41(5): 1-4, 13.

Weng X Y. Consideration for green and low-carbon development of water supply enterprises under the goals of carbon peaking and carbon neutrality [J]. Water Purification Technology, 2022, 41(5): 1-4, 13.

[13] Bukhary S, Batista J, Ahmad S. Water-energy-carbon nexus approach for sustainable large-scale drinking water treatment operation[J]. Journal of Hydrology, 2020, 587, doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.124953.

[14] Lin J L, Kang S F. Analysis of carbon emission hot spot and pumping energy efficiency in water supply system [J]. Water Supply, 2019, 19(1): 200-206.

[15] Racoviceanu A I, Karney B W, Kennedy C A, et al. Life-cycle energy use and greenhouse gas emissions inventory for water treatment systems[J]. Journal of Infrastructure Systems, 2007, 13(4): 261-270.

[16] Kyung D, Kim D, Park N, et al. Estimation of CO₂ emission from water treatment plant-Model development and application [J].

- Journal of Environmental Management, 2013, **131**: 74-81.
- [17] Frijns J. Towards a common carbon footprint assessment methodology for the water sector [J]. Water and Environment Journal, 2012, **26**(1): 63-69.
- [18] Bukhary S, Batista J, Ahmad S. An analysis of energy consumption and the use of renewables for a small drinking water treatment plant [J]. Water, 2020, **12**(1), doi: 10.3390/w12010028.
- [19] Al-Omari A, Al-Houri Z, Muhammetoglu H, *et al.* Energy and carbon footprints for the urban water cycle in Amman, Jordan [J]. International Journal of Environmental Research, 2022, **16**(5), doi: 10.1007/s41742-022-00469-8.
- [20] 赵新娟, 刘伯一. 短流程超滤膜工艺在凌庄水厂的应用[J]. 中国给水排水, 2021, **37**(10): 71-74.
- Zhao X J, Liu B Y. Application of short process ultrafiltration membrane in Lingzhuang waterworks [J]. China Water & Wastewater, 2021, **37**(10): 71-74.
- [21] 马骏, 段方旭, 袁野, 等. 凌庄水厂升级改造一期工程设计运行介绍[J]. 供水技术, 2021, **15**(2): 32-36.
- Ma J, Duan F X, Yuan Y, *et al.* Introduction to the design and operation of the first phase project of upgrading and reconstruction of Lingzhuang waterworks [J]. Water Technology, 2021, **15**(2): 32-36.
- [22] WBCSD/WRI. The greenhouse gas protocol [EB/OL]. <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/ghg-protocol-revised.pdf>, 2012-04-01.
- [23] ISO 14064-1: 2018, Greenhouse gases-Part 1: Specification with guidance at the organization level for quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals [S].
- [24] 郭怡. 城市污水厂污泥处理处置过程中碳排放核算边界浅析[J]. 净水技术, 2019, **38**(10): 131-134, 142.
- Guo Q. Brief analysis of carbon emission accounting boundaries in process of sludge treatment and disposal of municipal sewage plant [J]. Water Purification Technology, 2019, **38**(10): 131-134, 142.
- [25] 李哲坤, 张立秋, 杜子文, 等. 城市污泥不同处理处置工艺路线碳排放比较[J]. 环境科学, 2023, **44**(2): 1181-1190.
- Li Z K, Zhang L Q, Du Z W, *et al.* Comparison of carbon emissions in different treatment and disposal process routes of municipal sludge [J]. Environmental Science, 2023, **44**(2): 1181-1190.
- [26] 孟红旗, 李红霞, 赵爱平, 等. 市政污水厂典型A²O工艺低碳运行的系统性评估[J]. 环境科学, 2023, **44**(2): 1174-1180.
- Meng H Q, Li H X, Zhao A P, *et al.* Systematic evaluation of low-carbon operation of typical A²O processes in municipal sewage plant [J]. Environmental Science, 2023, **44**(2): 1174-1180.
- [27] 国家气候变化对策协调小组办公室, 国家发展和改革委员会能源研究所. 中国温室气体清单研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007.
- [28] 国家发展和改革委员会应对气候变化司. 省级温室气体清单编制指南(试行) [EB/OL]. <http://www.cbcsd.org.cn/sjk/nengyuan/standard/home/20140113/download/shengjiwenshiqiti.pdf>, 2011-05-01.
- [29] Homa J, Hoffmann E. Life cycle analysis of leading coagulants: executive summary [R]. Karlsruhe: Incopa, 2014.
- [30] Winnipeg. Emission factors in kg CO₂-equivalent per unit [EB/OL]. https://legacy.winnipeg.ca/finance/findata/matmgtdocuments/2012/682-2012/682-2012_Appendix_H-WSTP_South_End_Plant_Process_Selection_Report/Appendix%207.pdf, 2012-01-01.
- [31] Fertilizers Europe. Carbon footprint reference values: Energy efficiency and greenhouse gas emissions in European mineral fertilizer production and use [EB/OL]. https://issuu.com/efma2/docs/carbon_footprint_web_v4, 2014-04-01.
- [32] 中国城镇供水排水协会组织. 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.
- China Urban Water Association. Guidelines for carbon accounting and emission reduction in the urban water sector [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2022.
- [33] Jones T G, Evans C D, Freeman C. The greenhouse gas (GHG) emissions associated with aquatic carbon removal during drinking water treatment [J]. Aquatic Sciences, 2016, **78**(3): 561-572.
- [34] 余娇. 基于“水—能—碳”关联的郑州市水系统碳排放研究 [D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2020.
- Yu J. Study on carbon emissions of water system in Zhengzhou based on “Water-Energy-Carbon” nexus [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2020.
- [35] 陆柯. 城市给水系统能耗分析与节能技术研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2005.
- Lu K. Research on energy consumption of urban water treatment system and energy saving technology [D]. Chongqing: Chongqing University, 2005.
- [36] 苏小桐. 基于节水减碳的上海市水资源与能源消耗分析及关系研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2022.
- Su X T. Analysis and relationship between water and energy consumption in Shanghai based on water saving and carbon reduction [D]. Shanghai: East China Normal University, 2022.
- [37] 王圃. 城市给水处理厂及泵站能耗分析与应用研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2004.
- Wang P. Research on energy consumption of urban water treatment plant and pump station and application [D]. Chongqing: Chongqing University, 2004.
- [38] Plappally A K, Lienhard V J H. Energy requirements for water production, treatment, end use, reclamation, and disposal [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, **16**(7): 4818-4848.

CONTENTS

Prediction of Autumn Ozone Concentration in the Pearl River Delta Based on Machine Learning	CHEN Zhen, LIU Run, LUO Zheng, <i>et al.</i> (1)
Remote Sensing Model for Estimating Atmospheric PM _{2.5} Concentration in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DAI Yuan-yuan, GONG Shao-qi, ZHANG Cun-jie, <i>et al.</i> (8)
Variation Characteristics of PM _{2.5} Pollution and Transport in Typical Transport Channel Cities in Winter	DAI Wu-jun, ZHOU Ying, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (23)
Characteristics of Secondary Inorganic Ions in PM _{2.5} and Its Influencing Factors in Summer in Zhengzhou	HE Bing, YANG Jie-ru, XU Yi-fei, <i>et al.</i> (36)
Characteristics and Source Apportionment of Carbonaceous Aerosols in the Typical Urban Areas in Chongqing During Winter	PENG Chao, LI Zhen-liang, XIANG Ying, <i>et al.</i> (48)
Analysis of Influencing Factors of Ozone Pollution Difference Between Chengdu and Chongqing in August 2022	CHEN Mu-lan, LI Zhen-liang, PENG Chao, <i>et al.</i> (61)
Analysis of O ₃ Pollution Affected by a Succession of Three Landfall Typhoons in 2020 in Eastern China	HUA Cong, YOU Yuan, WANG Qian, <i>et al.</i> (71)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs Initial Mixing Ratio in Beijing During Summer	ZHANG Bo-tao, JING Kuan, WANG Qin, <i>et al.</i> (81)
Review of Comprehensive Evaluation System of Vehicle Pollution and Carbon Synergistic Reduction	FAN Zhao-yang, TONG Hui, LIANG Xiao-yu, <i>et al.</i> (93)
Study of Peak Carbon Emission of a City in Yangtze River Delta Based on LEAP Model	YANG Feng, ZHANG Gui-chi, SUN Ji, <i>et al.</i> (104)
Driving Forces and Mitigation Potential of CO ₂ Emissions for Ship Transportation in Guangdong Province, China	WENG Shu-juan, LIU Ying-ying, TANG Feng, <i>et al.</i> (115)
Carbon Emission Characteristics and Influencing Factors of Typical Processes in Drinking Water Treatment Plant	ZHANG Xiang-yu, HU Jian-kun, MA Kai, <i>et al.</i> (123)
Distribution Characteristics of Arsenic in Drinking Water in China and Its Health Risk Based on Disability-adjusted Life Years	DOU Dian-cheng, QI Rong, XIAO Shu-min, <i>et al.</i> (131)
Spatiotemporal Occurrence of Organophosphate Esters in the Surface Water and Sediment of Taihu Lake and Relevant Risk Assessment	ZHANG Cheng-nuo, ZHONG Qin, LUAN Bo-wen, <i>et al.</i> (140)
Exposure Level and Risk Impact Assessment of Pesticides and Veterinary Drugs in Aquaculture Environment	ZHANG Kai-wen, ZHANG Hai-yan, KONG Cong, <i>et al.</i> (151)
Variation in Phosphorus Concentration and Flux at Zhutuo Section in the Yangtze River and Source Apportionment	LOU Bao-feng, XIE Wei-min, HUANG Bo, <i>et al.</i> (159)
“Load-Unload” Effect of Manganese Oxides on Phosphorus in Surface Water of the Pearl River Estuary	LI Rui, LIANG Zuo-bing, WU Qi-rui, <i>et al.</i> (173)
Factors Influencing the Variation in Phytoplankton Functional Groups in Fuchunjiang Reservoir	ZHANG Ping, WANG Wei, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (181)
Hydrochemical Characteristics and Formation Mechanism of Groundwater in the Western Region of Hepu Basin, Beihai City	CHEN Wen, WU Ya, ZHANG Hong-xin, <i>et al.</i> (194)
Controlling Factors of Groundwater Salinization and Pollution in the Oasis Zone of the Cherchen River Basin of Xinjiang	LI Jun, OUYANG Hong-tao, ZHOU Jin-long (207)
Spatial-temporal Evolution of Ecosystem Health and Its Influencing Factors in Beijing-Tianjin-Hebei Region	LI Kui-ming, WANG Xiao-yan, YAO Luo-lan (218)
Spatial and Temporal Evolution and Impact Factors Analysis of Ecosystem Service Value in the Liaohe River Delta over the Past 30 Years	WANG Geng, ZHANG Fu-rong (228)
Effects of Photovoltaic Power Station Construction on Terrestrial Environment: Retrospect and Prospect	TIAN Zheng-qing, ZHANG Yong, LIU Xiang, <i>et al.</i> (239)
Spatiotemporal Evolution and Quantitative Attribution Analysis of Vegetation NDVI in Greater Khingan Mountains Forest-Steppe Ecotone	SHI Song, LI Wen, QU Chen, <i>et al.</i> (248)
Spatio-temporal Variation in Net Primary Productivity of Different Vegetation Types and Its Influencing Factors Exploration in Southwest China	XU Yong, ZHENG Zhi-wei, MENG Yu-chi, <i>et al.</i> (262)
Impacts of Extreme Climate Events at Different Altitudinal Gradients on Vegetation NPP in Songhua River Basin	CUI Song, JIA Zhao-yang, GUO Liang, <i>et al.</i> (275)
Spatial and Temporal Evolution and Prediction of Carbon Storage in Kunming City Based on InVEST and CA-Markov Model	Paruke Wusimanjiang, AI Dong, FANG Yi-shu, <i>et al.</i> (287)
Spatial-Temporal Evolution and Prediction of Carbon Storage in Jiuquan City Ecosystem Based on PLUS-InVEST Model	SHI Jing, SHI Pei-ji, WANG Zi-yang, <i>et al.</i> (300)
Soil Carbon Pool Allocation Dynamics During Soil Development in the Lower Yangtze River Alluvial Plain	HU Dan-yang, ZHANG Huan, SU Bao-wei, <i>et al.</i> (314)
Spatial Distribution Patterns of Soil Organic Carbon in Karst Forests of the Lijiang River Basin and Its Driving Factors	SHEN Kai-hui, WEI Shi-guang, LI Lin, <i>et al.</i> (323)
Effect of Land Use on the Stability of Soil Organic Carbon in a Karst Region	CHEN Jian-qi, JIA Ya-nan, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (335)
Spatial Distribution Characteristics of Soil Carbon and Nitrogen in Citrus Orchards on the Slope of Purple Soil Hilly Area	LI Zi-yang, CHEN Lu, ZHAO Peng, <i>et al.</i> (343)
Effects of Experimental Nitrogen Deposition and Litter Manipulation on Soil Organic Components and Enzyme Activity of Latosol in Tropical Rubber Plantations	XUE Xin-xin, REN Chang-qi, LUO Xue-hua, <i>et al.</i> (354)
Analysis on Driving Factors, Reduction Potential, and Environmental Effect of Inorganic Fertilizer Input in Chongqing	LIANG Tao, ZHAO Jing-kun, LI Hong-mei, <i>et al.</i> (364)
Research Progress on Distribution, Transportation, and Control of Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Chinese Soils	LIU Hao-ran, XING Jing-yi, REN Wen-jie (376)
Prediction of Spatial Distribution of Heavy Metals in Cultivated Soil Based on Multi-source Auxiliary Variables and Random Forest Model	XIE Xue-feng, GUO Wei-wei, PU Li-jie, <i>et al.</i> (386)
Health Risk Assessment and Priority Control Factors Analysis of Heavy Metals in Agricultural Soils Based on Source-oriented	MA Jie, GE Miao, WANG Sheng-lan, <i>et al.</i> (396)
Contamination Characteristics and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in an Abandoned Pyrite Mining Area of Tongling City, China	LI Ru-zhong, LIU Yu-hao, HUANG Yan-huan, <i>et al.</i> (407)
Source Appointment and Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Dust in the Main District Bus Stops of Tianshui City	LI Chun-yan, WANG Xin-min, WANG Hai, <i>et al.</i> (417)
Response of Cadmium in Soil-rice to Different Conditioners Based on Field Trials	TANG Le-bin, LIU Xin-cai, SONG Bo, <i>et al.</i> (429)
Regulation Effects of Humus Active Components on Soil Cadmium Availability and Critical Threshold for Rice Safety	HU Xiu-zhi, SONG Yi, WANG Tian-yu, <i>et al.</i> (439)
Using Biochar and Iron-calcium Material to Remediate Paddy Soil Contaminated by Cadmium and Arsenic	WU Qiu-chan, WU Ji-zi, ZHAO Ke-li, <i>et al.</i> (450)
Research Progress on Characteristics of Human Microplastic Pollution and Health Risks	MA Min-dong, ZHAO Yang-chen, ZHU Long, <i>et al.</i> (459)
Effects of Polystyrene Microplastics Combined with Cadmium Contamination on Soil Physicochemical Properties and Physiological Ecology of <i>Lactuca sativa</i>	NIU Jia-rui, ZOU Yong-jun, JIAN Min-fei, <i>et al.</i> (470)
Transcriptome Analysis of Plant Growth-promoting Bacteria Alleviating Microplastic and Heavy Metal Combined Pollution Stress in Sorghum	LIU Yong-qi, ZHAO Si-yu, REN Xue-min, <i>et al.</i> (480)
Effects of Microplastics on the Leaching of Nutrients and Cadmium from Soil	ZHAO Qun-fang, CHU Long-wei, DING Yuan-hong, <i>et al.</i> (489)
Effect of Microplastics and Phenanthrene on Soil Chemical Properties, Enzymatic Activities, and Microbial Communities	LIU Sha-sha, QIN Jian-qiao, WU Xian-ge (496)
Prediction of Soil Bacterial Community Structure and Function in Minqin Desert-oasis Ecotone Artificial <i>Haloxylon ammodendron</i> Forest	WANG An-lin, MA Rui, MA Yan-jun, <i>et al.</i> (508)
Response of Soil Fungal Community to Biochar Application Under Different Irrigation Water Salinity	ZHENG Zhi-yu, GUO Xiao-wen, MIN Wei (520)
Effects of Organic Fertilizer of Kitchen Waste on Soil Microbial Activity and Function	LIU Mei-ling, WANG Yi-min, JIN Wen-hao, <i>et al.</i> (530)
Response Characteristics of Soil Fungal Community Structure to Long-term Continuous Cropping of Pepper	CHEN Fen, YU Gao, WANG Xie-feng, <i>et al.</i> (543)
Effects of Foliar Application of Silicon Fertilizers on Phyllosphere Bacterial Community and Functional Genes of Paddy Irrigated with Reclaimed Water	LIANG Sheng-xian, LIU Chun-cheng, HU Chao, <i>et al.</i> (555)
Analysis of Bacterial Communities and Antibiotic Resistance Genes in the Aquaculture Area of Changli County	WANG Qiu-shui, CHENG Bo, LIU Yue, <i>et al.</i> (567)
High-throughput qPCR and Amplicon Sequencing as Complementary Methods for Profiling Antibiotic Resistance Genes in Urban Wetland Parks	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, PAN Ting, <i>et al.</i> (576)
Characteristics of Vertical Distribution and Environmental Factors of Antibiotics in Quaternary Sedimentary Column in Urban Areas	LIU Ke, TONG Lei, GAN Cui, <i>et al.</i> (584)
Adsorption Performance and Mechanism of Oxytetracycline in Water by KOH Modified Biochar Derived from Corn Straw	LIU Zong-tang, SUN Yu-feng, FEI Zheng-hao, <i>et al.</i> (594)
Comparison of Pb ²⁺ Adsorption Properties of Biochars Modified Through CO ₂ Atmosphere Pyrolysis and Nitric Acid	JIANG Hao, CHEN Rui-zhi, ZHU Zi-yang, <i>et al.</i> (606)