

给排水系统全生命周期碳排放评估与减排路径研究

杨建龙

江西吉干发建设工程有限公司 江西吉安 331300

摘要：本文系统研究了给排水系统全生命周期的碳排放评估与减排路径。研究首先构建了涵盖建设、运行、维护与废弃四个阶段的碳排放构成体系，明确了各阶段的主要碳源，特别是材料隐含碳与运行能耗药耗碳的核心地位。在此基础上，阐述了从确定系统边界、识别碳源到建立多维度评估指标体系的科学评估方法，为精准量化碳足迹提供了标准化框架。进而，文章提出了贯穿规划设计、建设施工和运行维护三大阶段的系统性减排路径，强调了在规划阶段进行源头控制、在建设阶段推行绿色施工、在运行阶段实施智能优化与资源回收的核心策略。该研究旨在为城市水务行业提供一个全周期、多维度的碳管理理论框架与实践指南，推动其向绿色、低碳、可持续的方向转型。

关键词：给排水系统；全生命周期；碳排放评估

引言

在全球应对气候变化的背景下，建筑与基础设施领域的碳减排已成为实现“双碳”目标的关键环节。给排水系统作为城市基础设施的重要组成部分，其全生命周期涉及材料生产、能源消耗、药剂使用等多个环节，碳排放总量巨大。然而，传统的管理多聚焦于运行阶段的能耗，缺乏对全生命周期碳足迹的系统认知与管控。因此，建立科学的碳排放评估方法，并探索涵盖各阶段的系统性减排路径，对于精准识别碳源、制定有效减排策略、推动城市水务行业绿色低碳转型具有重要的理论价值和紧迫的现实意义。

一、给排水系统全生命周期碳排放的构成

（一）建设阶段的材料生产与施工碳排放

建设阶段碳排放是给排水系统全生命周期碳足迹起始部分，构成“隐含碳”，来源分材料生产和现场施工两部分。材料生产碳排放是主要部分，核算涵盖给排水系统建材和设备从开采到运输至现场全过程的温室气体排放，包括管材、建材、机电设备等生产能耗和排放，量化评估需依赖LCA数据库和统计工程量清单。施工过程碳排放相对次要，源于现场能源消耗和材料运输，还包括废弃物处置间接碳排放。解析此阶段碳排放构成，可通过选低碳建材、优化设计、采用高效施工方案降低隐含碳^[1]。

（二）运行阶段的能耗与药耗碳排放

运行阶段碳排放是给排水系统全生命周期中持续最

长、总量最大部分，核心是能源和化学药剂消耗产生的直接或间接碳排放。能耗碳排放是主体，给水系统能耗集中在原水输送、水处理、配水管网输送；排水系统能耗来自污水管网输送和污水处理厂处理单元，污泥处理也是能耗大户，碳排放量按当地电网碳排放因子计算。药耗碳排放是水处理药剂生产和运输的“隐含碳”，虽单次量小但总量可观。分析此阶段碳排放构成，可通过优化泵站调度、推广节能设备、采用低能耗工艺、精准投加药剂减排。

（三）维护与废弃阶段的碳排放

维护与废弃阶段碳排放是给排水系统全生命周期碳足迹收尾部分。维护阶段碳排放来自日常维修和设备更换，日常维修碳排放分散量小但长期累积不容忽视，设备更换碳排放显著，选耐用可靠设备可减少更换次数降低总体碳排放。废弃阶段碳排放计算复杂，有正向排放和负向“碳信用”，正向排放来自拆除能耗和废弃物处置，负向碳信用源于材料回收再利用。分析此阶段碳排放构成，应在设计时考虑“可拆卸性”等，推广绿色拆除技术和完善回收体系实现碳减排^[2]。

二、给排水系统全生命周期碳排放评估方法

（一）确定系统边界与评估范围

确定系统边界与评估范围是进行给排水系统全生命周期碳排放评估的首要步骤，其科学性和严谨性直接决定了评估结果的准确性、可比性和实用性。系统边界确定旨在清晰界定评估应纳入与排除的物理设施和过程，避免计算遗漏或重复。给排水系统边界通常“从摇篮

到坟墓”设定，需明确划分。空间上，涵盖给水从水源取水构筑物到用户水龙头，排水从用户排水口到尾水排放或回用设施的整个系统，大型系统还需考虑附属设施。时间上，评估覆盖系统30至50年设计寿命的建设、运行、维护和废弃阶段。关键边界决策涉及“上游”和“下游”取舍，通常设“截止规则”避免无限追溯，下游间接碳效应常因复杂不确定排除在核心评估外，可作辅助分析。功能单位定义是边界设定重要部分，给水常见为“供应1立方米符合标准的自来水”，排水为“处理1立方米市政污水”。明确系统边界与评估范围，为后续数据收集、碳源识别和量化计算提供清晰统一框架，确保评估结果可比，助决策者理解结果意义和范围，为减排策略制定提供可靠基础。

（二）识别碳排放源与核算方法

在确定系统边界之后，识别边界内所有相关的碳排放源并选择合适的核算方法，是进行定量评估的核心技术环节。碳排放源识别需系统全面，覆盖系统边界内直接和间接温室气体排放。直接排放（范围一）指系统拥有或控制的排放源排放，在给排水系统较少，如污水处理厂污泥厌氧消化产生的甲烷逸散、应急发电设备消耗化石燃料产生的二氧化碳。间接排放（范围二）指外购能源消耗产生的排放，是给排水系统主要碳排放源，涵盖水泵等电力消耗。其他间接排放（范围三）指范围二之外的间接排放，在给排水系统体量巨大、构成复杂，包括建设、运行、维护、废弃阶段相关生产、运输、处理等排放。识别碳源后，需针对不同排放源选科学核算方法。范围一直接排放通常用于基于物料平衡或排放因子的方法计算，如根据污泥产量和甲烷产生因子算甲烷排放量。范围二电力消耗排放核算方法较统一，通过统计总耗电量乘以所在区域电网平均碳排放因子计算。范围三间接核算主要依赖生命周期评价（LCA）方法，从专业LCA数据库获取对应活动的碳排放因子，乘以系统对应活动总量得到碳排放。识别碳源并选核算方法，将宏观碳排放问题分解为可测量、可计算的具体活动，其结构化核算体系确保评估透明度和结果可靠性，为量化给排水系统碳足迹、识别关键减排环节提供标准化技术工^[3]。

（三）建立评估指标体系

建立评估指标体系是将前述核算结果进行系统化、多维度呈现的关键步骤，其目的在于超越单一的碳排放总量，通过一系列相互关联的指标，全面、深入地揭示

给排水系统的碳排放特征、结构和效率，为横向比较和纵向分析提供科学依据。一个完善的评估指标体系应涵盖多层次指标。首先是核心总量指标，即全生命周期碳排放总量，以二氧化碳当量（CO₂e）衡量系统全寿命期对气候变化的总体影响。其次是结构分解指标，用于剖析碳排放总量构成，包括按生命周期阶段和排放源类型划分的指标，可揭示系统碳排放主要来源，是识别减排重点的依据。再次是强度绩效指标，将碳排放总量与系统服务功能或规模关联，评估碳效率，核心指标是单位功能碳排放，还包括单位管网长度、单位处理规模的碳排放等，可消除系统规模差异影响，便于不同给排水系统进行碳效率横向比较。最后可引入辅助性指标，如单位能耗碳排放反映能源结构清洁程度，碳减排潜力指标评估减排措施效果。建立此多维度、多层次评估指标体系，能为给排水系统碳管理提供全面“仪表盘”，让管理者了解排放情况，回答深层次问题，通过监测和分析指标，可评估减排效果、发现薄弱环节，为制定碳达峰、碳中和路线图提供数据支持和决策依据。

三、给排水系统全生命周期减排路径

（一）规划设计阶段的低碳减排路径

规划设计阶段是给排水系统全生命周期碳减排的源头和最具决定性的环节，此阶段的决策对系统未来数十年的碳排放轨迹具有“锁定效应”。因此，此阶段融入低碳理念是实现系统性、根本性减排的关键。核心路径是通过系统布局优化、工艺方案比选和材料设备选型，从顶层设计上最小化系统隐含碳和未来运行碳。在系统规划层面，一是优化管网布局和供水压力分区。科学规划水厂位置和主干管走向，缩短输配水距离，可降低泵送扬程和水头损失，减少运行电耗；供水系统采用合理压力分区，避免整体抬高管网压力；排水系统优先利用地形重力流，减少中途提升泵站设置和提升高度。在工艺方案选择层面，要进行全生命周期碳排放评估。给水处理中，对比不同工艺全生命周期碳足迹，选综合碳排放低的方案；污水处理推广低碳或负碳工艺，如短程脱氮工艺、污泥厌氧消化-热电联产系统。在材料与设备选型层面，优先选用低碳建材和高效设备。非承压结构探索用再生骨料混凝土，管道材料综合评估生产碳排放、水力特性和使用寿命；设备选型强制采购高能效等级产品并配变频调速装置。规划设计阶段减排路径具有前瞻性和根本性，投入智慧和资源，能以小成本避免未来运行维护阶段产生大量难削减的碳排放，是给排水系统绿

色低碳转型的关键举措^[4]。

(二) 建设施工阶段的低碳减排路径

建设施工阶段是将规划设计蓝图转化为物理实体的过程，此阶段的减排路径聚焦于减少材料消耗、优化能源使用以及管理施工过程中的废弃物，核心是实践“绿色施工”。其减排潜力虽然不及运行阶段，但对于控制全生命周期的隐含碳至关重要。在材料管理方面，首要路径是推行精细化设计和工厂化预制。通过BIM技术深化设计，可精确计算材料用量，减少因设计误差导致的材料浪费与现场切割。将非标构件工厂预制、现场拼装，能提高施工质量，减少建筑垃圾与碳排放。优先采购本地化、低碳化建材，缩短运输距离，降低运输碳排放；探索使用低碳新型材料，如用工业固废作掺合料的高性能混凝土。在能源消耗方面，优化施工方案，推广清洁能源应用。施工单位制定能耗管理计划，合理安排大型机械作业时间，避免设备空载和低效运行；现场临时用电优先接入市政电网，条件允许的工地可安装临时光伏发电设施。在废弃物管理方面，建立分类回收和再利用体系。对建筑垃圾分类收集，废混凝土和砖石破碎后就地利用，废金属全部回收。建设施工阶段减排路径将低碳理念落实到建造行动，通过精细化管理有效控制“隐含碳”，减少建设阶段碳排放，推广绿色建材和循环经济模式，为建筑行业低碳转型树立标杆，推动相关产业链成熟。

(三) 运行维护阶段的低碳减排路径

运行维护阶段是给排水系统碳排放持续时间最长、总量最大的阶段，因此也是减排潜力最大、任务最重的环节。此阶段的减排路径核心在于通过智能化管理和精细化操作，最大限度地降低系统的能耗、药耗以及维护过程中的碳足迹。在能耗控制方面，首要路径是实施泵站和曝气系统的智能优化调度。对于供水泵站，应基于管网水力模型和实时需水预测开发优化算法，动态调整水泵运行组合与转速，使其高效运行，并尽量在电价低谷储水。对于污水处理厂曝气系统，应基于进水水质水量和溶解氧在线监测建立精确控制模型，按需供气，避免能源浪费。其次，要持续提升设备能效、进行系统节能改造，强制更换服役期满的高能耗设备，应用高效节能设备。在药耗控制上，要实现精准投加和源头替代，通过在线水质分析仪与自动加药系统联动建立反馈控制

模型，精准投加药剂，同时探索绿色替代药剂以降低碳排放。在维护管理方面，要推行预测性维护和资源循环利用，利用传感器和数据分析技术监测设备状态、评估健康度、预测故障风险，实现“状态维修”。污水处理厂应最大化资源回收，利用污泥沼气发电或提纯，回用尾水，回收污泥有价物质，减少废弃物处置碳排放和实现系统外碳减排。运行维护阶段减排路径将碳减排融入日常运营管理，通过技术与管理创新将成本和负荷转化为优化动力，是给排水系统碳中和“主战场”，其成效决定城市水务行业能否绿色低碳转型^[5]。

结语

给排水系统全生命周期碳排放评估与减排路径研究，为城市水务行业绿色低碳转型提供系统理论框架与实践可操作性。研究涵盖建设、运行、维护与废弃阶段，揭示各环节碳源特性与减排潜力，打破“重运行、轻全周期”局限。通过建立多维度评估体系，为精准减排提供数据支撑。规划设计、建设施工、运行维护三大阶段减排路径相互衔接，形成闭环管理。研究强调低碳转型经济性与可行性，通过多种措施降低碳排放并创造双重红利。未来，给排水系统碳管理将更精细化。本研究评估方法与减排路径适用于多行业，将低碳理念融入全生命周期，通过技术与管理驱动，可实现城市水务行业跨越式发展，为全球气候治理贡献中国智慧与方案。

参考文献

- [1] 马艺. 基于生命周期评价的风电场建设与运营碳排放评价及减排潜力研究[D]. 深圳大学, 2022.
- [2] 赵愈, 孙思园, 刘陆. 装配式建筑碳减排驱动因素与路径研究[J]. 建筑经济, 2022(010): 043. DOI: 10.14181/j.cnki.1002-851x.202210090.
- [3] 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, 40(6): 77-82. DOI: 10.13205/j.hjgc.202206010.
- [4] 陈露. 住宅建筑全生命周期碳排放测算及减排策略研究——以沈阳市丽水新城项目为例[D]. 沈阳建筑大学, 2020.
- [5] 周丁琳. 中国居民直接生活能源碳排放分析与减排路径研究[D]. 华中科技大学, 2021.