

基于“水—能—碳”关联的城市水系统碳排放研究

赵荣钦¹, 余 娇^{1,2}, 肖连刚¹, 孙 锦¹, 罗慧丽¹, 杨文娟¹, 揣小伟³, 焦士兴⁴

(1. 华北水利水电大学测绘与地理信息学院, 郑州 450045; 2. 汉源县水利局, 雅安 625300;
3. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023; 4. 安阳师范学院资源环境与旅游学院, 安阳 455002)

摘要: 揭示城市水系统与碳排放的内在关系机理, 对于推动城市水能节约和水系统低碳运行具有重要的理论和实践意义。本文分析了城市水系统“水—能—碳”关联机理, 并构建了城市水系统碳排放的核算体系, 采用2008—2017年的统计数据和调查问卷等资料, 对郑州市水系统碳排放进行了核算和实证分析, 探讨了其“水—能—碳”关联特征, 并分析了不同情景下水系统的碳减排潜力。结果显示: ① 郑州市水系统碳排放涉及取水、给水、用水、排水及污水处理等不同环节。其中, 用水系统是郑州市水系统碳排放的主要来源, 这表明由城市扩展和人口增长导致的用水需求增加是碳排放增长的主要因素; ② 郑州市水系统不同环节的碳排放构成及其强度具有较大差异。其中, 用水和取水系统能耗和碳排放强度增长态势明显, 而给水与排水及污水处理系统则相对稳定。取水和用水系统的能耗增加, 特别是由城市远距离供水和污水回用引起的碳排放增长应引起关注; ③ 郑州市水系统不同环节“水—能—碳”关联特征的差异主要受城市水消耗量的变化、水处理方式和工艺、居民用水行为习惯和节水意识、自然条件及气候变化等因素的影响; ④ 未来应重点从城市工业和生活节水、水处理工艺改进、水系统能效提升等方面入手, 降低水系统能源消耗和碳排放。

关键词: 水系统; 碳排放; 郑州市; “水—能—碳”关联

DOI: 10.11821/dlxb202112017

1 引言

区域多要素资源耦合作用与协同管理成为近年来的研究热点之一^[1]。城市水系统涉及到多个环节和子系统, 其运行过程的能源消耗造成了大量碳排放。研究表明, 城市水系统碳排放占城市总碳排放的12%^[2]。城市水系统不同环节的能源消耗和碳排放的结构及强度差异明显, 这主要与供水方式和距离、能源类型、用水方式和节水意识、污水处理方式等密切相关^[3]。因此, 识别城市水系统不同环节“水—能—碳”的关联机制, 揭示城市水系统中水循环过程及其伴生的能源消耗与碳排放的内在关系机理, 对于科学系统评估城市水系统碳排放, 推动城市水系统资源节约与可持续管理具有重要意义。

城市“水—能”关联最早由学者 Wilkinson 提出, 2000 年以美国加利福尼亚为例, 对水系统全生命周期的“水—能”关联进行了探讨, 并计算了水系统的能源强度及水资源高效利用情景下的节能潜力^[4]。城市水系统能源强度与水风险呈正相关, 原水的可获取性对水—能关系具有较大影响, 特别是在原水为地下水、原水来源于海水淡化或能源密集

收稿日期: 2020-12-09; 修订日期: 2021-08-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(41971241); 河南省高校科技创新人才项目(人文社科类)(2021-CX-011); 2020 年河南省留学人员科研择优资助项目 [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41971241; Talents Supporting Project of Science & Technology Innovation in Henan Universities, No.2021-CX-011; Research Projects for Overseas Students in Henan Province]

作者简介: 赵荣钦(1978-), 男, 河南孟津人, 教授, 博导, 主要从事资源环境与碳排放研究。E-mail: zhaorq234@163.com
3119-3134 页

型输入方式的地区^[5]。近年来,国外学者开展了不同城市水系统碳排放研究,比如,奥斯陆^[6]、墨尔本、悉尼、布里斯班^[7]、墨西哥城^[8]等城市水系统碳排放的研究表明,随着城市化的快速发展,水系统碳排放呈不断增长趋势;同时,关于高层建筑供水^[9]、工业用水^[10]、海水淡化^[11]、污水回用^[12]等不同用水环节的碳排放研究也逐渐展开。另外,国内学者也从水—能关联的角度开展了水系统碳排放的研究^[3, 13-14],为明晰城市水系统运行的能耗和碳排放特征、推动城市“水—能—碳”多要素管理提供了重要参考^[15]。此外,水系统碳排放的情景模拟也逐渐成为热点领域之一^[3],一些学者采用碳排放因子评估法^[16]、投入产出法^[17]、“水—能—温室气体”关联模型^[18]、物质流分析^[19]、全生命周期评价^[20]、系统动力学^[21]及过程分析法^[22]等方法开展了水系统碳排放的模拟和预测,为城市水能资源优化和低碳管理提供了理论和实践指导。

总体而言,已有研究既包括城市宏观尺度的水系统碳排放研究,又涉及到微观尺度如地下水抽取、输调水、水处理等不同环节的碳排放研究,但更多侧重于从水系统运行的某一环节入手开展研究,比如南水北调中线工程^[23]、地表供水^[8, 24]、工业用水^[25]、农业用水^[26]、生活用水^[27-28]和污水处理^[29-30]等,而对于城市水系统整体碳排放及“水—能—碳”关联特征的研究还需要进一步加强。郑州市是中国严重缺水的城市之一,随着经济社会快速发展和城市框架的拉大,不断增长的用水需求导致郑州市水系统能源消耗和碳排放也呈明显增长态势。另外,郑州市地处黄河流域,水资源是最大的刚性约束,这在中国中西部(特别是沿黄地区)快速城市化地区较具代表性。因此,开展郑州市水系统碳排放研究,不仅有助于深入揭示城市水系统“水—能—碳”的内在关系机理,识别城市水系统水能资源节约和碳减排的主要环节、模式和路径,而且对于推动郑州市乃至中西部缺水城市碳减排、提升城市资源环境承载力具有重要的现实意义。本文构建了城市水系统“水—能—碳”关联研究的理论和方法,以郑州市为例,对其水系统碳排放进行了全面核算,分析了不同运行情景下的水系统碳减排潜力,并提出了面向水能协同优化和碳减排的城市水系统低碳管理的政策建议。

2 基于水 能 碳 关联的城市水系统碳排放研究框架

城市水系统是指由城市社会经济活动引起的涵盖取水、给水、用水、排水及污水处理等在内的各种供水排水设施的总称。城市水系统碳排放来源于水系统运行过程中与水有关的(包括与水消费伴生的)各种直接或间接的能源消耗,主要包括:①取水系统碳排放。城市取水系统包括地表水、地下水及非常规水源供给,碳排放主要来自于蓄水工程基础设施的运行、地表水提升和远距离供水过程中的能源消耗、雨污水回用的电力消耗;②给水系统碳排放。给水系统主要包括水源输送、水厂的制水过程及向用户输送等不同环节,碳排放主要来自于输水(含加压)或制水过程中能源消耗的碳排放;③用水系统碳排放。城市用水环节多样,其碳排放来源也相对复杂。农业用水碳排放主要来源于打井、抽水和灌溉等过程的能源消耗;工业用水碳排放来源于工艺用水、循环冷却用水和锅炉用水等的加热、冷却和循环等的能源消耗;居民生活用水碳排放主要来源于烹饪、洗浴、洗涤等过程中水的加热或电器运行的能源消耗;公共生活用水碳排放主要来自于学校、政府部门、服务行业等的办公用水、餐厅用水、浴室用水和宿舍用水等环节的能源消耗;此外,城市市政用水(比如城市景观河道补水、公园湖泊补水等)等过程的能源消耗会产生一定的碳排放;④排水及污水处理系统碳排放。主要来源于污水收集和输送、污水净化处理过程中水泵、曝气和污水处理设备运行中的能源消耗和药剂使用导致的间接碳排放(图1)。

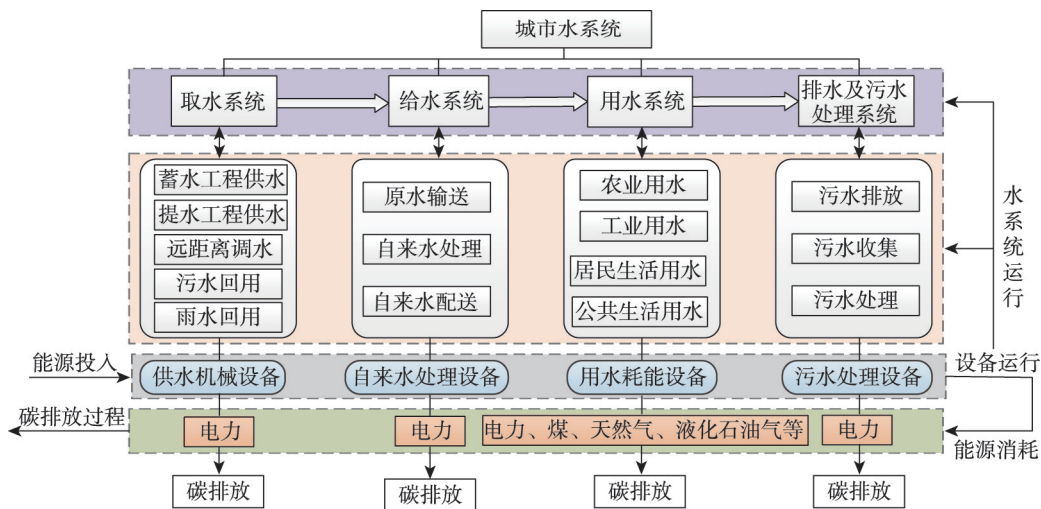


图1 基于“水—能—碳”关联的城市水系统碳排放的研究框架

Fig. 1 Theoretical framework of carbon emissions of urban water system based on "water-energy-carbon" nexus

从“水—能—碳”关联的视角来看，城市水系统碳排放具有如下特征：① 碳排放来源多样、构成复杂。城市水系统碳排放涉及到不同子系统和终端用水环节。碳排放不仅与城市供水和用水量有关，也与城市供水和输水的方式和距离、子系统运行过程和终端使用的能源类型及其效率有关；② “水—能”关联强度是决定城市水系统碳排放的重要因素。碳排放主要来自于系统运行的能源消耗，因此各子系统能源结构和消耗强度直接决定了其碳排放水平；③ 城市社会经济发展规模是决定水系统碳排放强度的根本原因。在快速城市化背景下，城市生产和生活用水需求剧增，这会增加“上游”取水和给水系统及“下游”排水及污水处理系统的能耗，并最终导致碳排放的增长；④ 经济社会用水及家庭用水效率、用水设施及节水潜力、居民节水意识等也会影响能耗和碳排放。比如，随着高层建筑的增多，输配水环节消耗更多的能源；而提高工业用水循环效率，不仅能减少取水环节的碳排放，还会降低污水处理环节的碳排放；⑤ 城市水系统能源结构是影响碳排放的重要因素。比如，用水环节中清洁能源的比例、水处理环节的能源效率等都会影响城市水系统碳排放。此外，区域自然条件、地下水位、水源类型及其可获得程度、水能资源政策等也是城市水系统碳排放的重要影响因素。

3 数据与方法

3.1 数据来源

研究数据主要来源于郑州市水资源公报、统计年鉴、问卷调查和实地走访等。其中：① 蓄水工程供水、提水工程供水、引黄供水、南水北调供水、地下水供水、污水回用、雨水回用、农业灌溉用水、工业用水、居民生活用水和公共生活用水环节的水资源量来自于2008—2017年《郑州市水资源公报》；② 自来水处理量、污水处理量、社会经济数据（包括人口、工业产值和能源消费等相关数据）来自于《郑州统计年鉴》（2009—2018年）；③ 蓄水、引黄供水、南水北调供水、雨水回用、农业灌溉用水等环节能源消耗量等来自《郑州市统计年鉴》和《郑州市国民经济和社会发展统计公报》，各类能源的碳排放系数参考《综合能耗计算通则》（GB/T 2589-2008）和《省级温室气体清单编制指

南》；④ 居民生活用水能耗的相关数据来自于2019年12月的居民问卷调查；⑤ 污水处理、公共生活用水的能耗数据主要来源于2019年11—12月对相关单位的调研和走访。

3.2 城市水系统碳排放核算方法

基于以上理论框架,结合郑州市水系统的实际状况建立了城市水系统碳排放的核算方法。需要说明的是本文主要考虑水系统不同环节的能耗,而未考虑水系统设施建设、维修和保养等过程中各类材料生产和运输等过程的能耗。

3.2.1 取水系统碳排放

① 蓄水工程供水碳排放。采用蓄水过程平均能源强度的平均值进行计算,公式为:

$$C_X = Q_X \times W_X \times EF_{CO_2} \quad (1)$$

式中: C_X 为蓄水工程供水碳排放量 (kg); Q_X 为蓄水工程供水量 (m^3); W_X 为蓄水工程供水的能源强度,取值 $0.109 \text{ kWh}/m^3$ [31-32]; EF_{CO_2} 为电力碳排放系数,取值 $0.801 \text{ kg}/\text{kWh}$ (《综合能耗计算通则》(GB/T 2589-2008)和《省级温室气体清单编制指南》,下同)。

② 提水工程供水碳排放。根据能量转换原理,郑州市提水工程供水碳排放计算公式为[27]:

$$C_B = \frac{g \times h_B \times Q \times \rho}{3.6 \times 10^6 \times \eta} \times EF_{CO_2} \quad (2)$$

$$C_D = \frac{g \times h_D \times Q \times \rho}{3.6 \times 10^6 \times \eta} \times EF_{CO_2} \quad (3)$$

式中: C_B 和 C_D 分别为地表水和地下水提水工程供水碳排放量 (kg); g 为重力加速度,取值 $9.8 \text{ m}/s^2$; h_B 和 h_D 分别为郑州市地表水 [33] 和地下水 [34] 提水扬程 (m); Q 为提水量 (m^3); ρ 为水的密度,取值 $1 \times 10^3 \text{ kg}/m^3$; η 为泵站效率,取值 0.75 [2]。

③ 引黄供水碳排放。采用单位距离输水的平均能源强度、输水线平均长度及引黄供水量等进行计算,公式为:

$$C_H = Q_H \times W_H \times L \times EF_{CO_2} \quad (4)$$

式中: C_H 为引黄供水碳排放量 (kg); Q_H 为引黄供水量 (m^3); W_H 为引黄调水工程单位距离单位输水的平均能源强度,取值 $0.0045 \text{ kWh}/m^3 \times km$ [35]; L 为输水线长度,黄河郑州段的平均输水线长度为 20 km [33]。

④ 南水北调供水碳排放。采用供水量及单位供水的能源消耗量进行估算,计算公式为:

$$C_N = Q_N \times W_N \times EF_{CO_2} \quad (5)$$

式中: C_N 为南水北调供水碳排放量 (kg); Q_N 为南水北调水源供水量 (m^3); W_N 为南水北调供水的能源强度为 $0.102 \text{ kWh}/m^3$ [23]。

⑤ 污水/雨水回用供水碳排放。污水回用供水的碳排放以实地调研的郑州市某污水回用工程处理的平均能耗数据进行推算,取值 $0.621 \text{ kWh}/m^3$; 雨水回用供水碳排放采用雨水回用量及相应的能源强度进行估算,计算公式为:

$$C_Y = Q_Y \times W_Y \times EF_{CO_2} \quad (6)$$

式中: C_Y 为雨水/污水回用碳排放量 (kg); Q_Y 为雨水/污水回用量 (m^3); W_Y 为雨水回用的能源强度,取值 $1.55 \text{ kWh}/m^3$ [32]。

3.2.2 给水系统碳排放 给水系统的碳排放借助郑州市主要水厂单位制/配水能源消耗的相关数据进行计算,公式为:

$$C_Z = Q_Z \times W_Z \times EF_{CO_2} \quad (7)$$

$$C_p = Q_z \times W_p \times EF_{CO_2} \quad (8)$$

式中: C_z 和 C_p 分别为制水和配水的碳排放量(kg); Q_z 为制水(配水)量(m^3); W_z 和 W_p 分别为单位制水和配水的能源强度, 本文结合郑州自来水投资股份有限公司等4个水厂的相关数据, 计算得到单位制水能源强度均值为0.543 kWh/ m^3 ; 单位配水的能源强度均值为0.320 kWh/ m^3 。

3.2.3 用水系统碳排放

① 农业用水碳排放。农业用水碳排放主要来自于灌溉过程的能源消耗, 计算公式为:

$$C_A = Q_A \times W_A \times EF_{CO_2} \quad (9)$$

式中: C_A 为农业用水碳排放量(kg); Q_A 为农业用水量(m^3); W_A 为农业用水的能源强度, 取值0.336 kWh/ m^3 [36]。

② 工业用水碳排放。由于不同工业类型用水耗能存在较大差异, 结合相关研究对火力发电 [25]、钢铁 [37]、石油化工 [38]、汽车制造 [39] 等行业各环节用水比例和能耗的计算结果, 发现工业用水耗能主要集中在工业水源供给、循环冷却用水、锅炉加热用水等环节。本文结合前期对郑州市典型企业的调查研究 [40], 取2008—2017年各类工业产值占郑州市整体工业产值权重的均值, 推算各环节用水的比例及工业用水能源强度, 并结合电力和原煤在郑州市工业用水过程中的用量、发热量、碳排放系数等, 得到郑州市工业用水的综合能耗碳排放系数。郑州市工业用水碳排放计算公式为:

$$C_I = Q_I \times W_I \times I_{CO_2} \quad (10)$$

式中: C_I 为工业用水碳排放量(kg); Q_I 为工业用水量(m^3); W_I 为工业用水的能源强度; I_{CO_2} 为郑州市工业用水综合能耗的碳排放系数, 取值0.642 kg/kWh。

③ 居民生活用水碳排放。2019年12月对郑州市辖区的城镇和农村居民家庭用水(洗衣、淋浴、烹饪等环节)耗能情况分别进行了问卷调查, 计算得到郑州市单位居民生活用水的平均能耗。参考各种能源类型的热值和碳排放系数, 计算得到居民生活用水综合能耗的碳排放系数为0.601 kg/kWh。郑州市居民生活用水碳排放的计算公式为:

$$C_J = Q_J \times W_J \times J_{CO_2} \quad (11)$$

式中: C_J 为居民生活用水碳排放量(kg); Q_J 为居民生活用水量(m^3); W_J 为居民生活用水的能源强度; J_{CO_2} 为郑州市居民生活用水综合能耗的碳排放系数, 取值0.601 kg/kWh。

④ 公共生活用水碳排放。选取饭店宾馆、机关和学校三大部门作为代表进行分析, 发现公共生活用水耗能主要集中在办公楼、食堂、浴室和宿舍用水环节 [1], 参考已有研究中不同环节的用水比例和耗能的计算方法 [2, 41-42], 结合这几个环节占公共用水比例进行加权求和得到单位公共用水能耗, 并以此计算郑州市公共生活用水的碳排放, 公式为:

$$C_G = Q_G \times W_G \times G_{CO_2} \quad (12)$$

式中: C_G 为公共生活用水碳排放量(kg); Q_G 为公共生活用水量(m^3); W_G 为公共生活用水的能源强度; G_{CO_2} 为郑州市公共生活用水综合能耗的碳排放系数, 取值0.753 kg/kWh。

3.2.4 排水及污水处理系统碳排放 基于对郑州市五龙口污水处理厂的调研, 以该厂污水处理工艺、能耗种类等作为参考数据 [43], 对郑州市污水处理的能耗碳排放进行核算。计算公式为:

$$C_W = Q_W \times W_W \times EF_{CO_2} \quad (13)$$

式中: C_W 为污水处理系统碳排放量(kg); Q_W 为污水处理量(m^3); W_W 为污水处理能源强度, 取值0.281 kWh/ m^3 [43]。

3.2.5 对城市水系统核算参数的说明 对以上方法中涉及的相关核算系数的适用性说明如下：① 蓄水工程取水、雨水回用、农业用水、公共生活用水的能源强度主要取自全国层面的相关研究成果，可以作为全国通用数据引用；② 提水工程、引黄供水、污水回用、制水配水、工业用水、居民生活用水、污水处理等环节的能源强度或碳排放系数取自郑州市相关研究成果或根据郑州市实际情况进行调研确定的，仅适用于郑州市；③ 南水北调环节的能源强度参数来自相关研究，可应用于南水北调中线工程所涉及区域的研究。④ 电力消耗的碳排放系数来自于《省级温室气体清单编制指南》，可以作为全国通用参数引用。

4 结果分析

4.1 郑州市水系统碳排放及其构成分析

(1) 取水系统碳排放。2008—2017年郑州市取水系统碳排放呈明显增长态势，从2008年的15.45万t上升到2017年的25.62万t，年均增长量为1.13万t（表1）。其中，地下水供水的碳排放占主导地位，2008—2017年基本保持在7.94万~11.01万t，这归因于郑州市水源供给主要依靠地下水开采。近年来，随着郑州市快速城市化进程和人口增长对用水量的需求增加，地下水的开采量持续增长。引黄供水的碳排放在2.20万~5.42万t之间，仅次于地下水供水的碳排放。2014年年底南水北调中线开始向郑州市供水，2015—2017年南水北调供水占郑州市总供水量的比例分别为29.87%、45.37%和51.55%，产生的碳排放分别为1.84万t、3.14万t、4.27万t，呈明显的上升趋势。此外，尽管2007—2018年郑州市污水回用只占总取水量的1.73%~9.50%，但由于污水回用的能源强度较大（0.621 kWh/m³），其碳排放不断增长，2017年达到8.82万t，甚至超过了地下水供水的碳排放。由于供水模式及其构成比例的变化，郑州市单位取水碳排放（取水碳排放与总取水的比值）存在明显的年际差异。总体来看，郑州市单位取水碳排放呈上升趋势，从2008年的0.09 kg/m³增长到2017年的0.14 kg/m³，主要是城市供水水源中非常规水的比例逐年增加所致。

(2) 给水系统碳排放。郑州市给水系统碳排放主要包括制水和配水过程的碳排放。研究期内，郑州市给水系统的碳排放呈小幅波动上升趋势。原因在于2008—2017年郑州市自来水供应量稳定，年际变化不大。自来水供应量的多少直接影响给水系统的能源消耗，进而决定给水系统碳排放的大小。郑州市给水系统年均碳排放为29.27万t，略高于取水系统的碳排放，2007年碳排放最大，为32.43万t，2008年的碳排放最小，为26.25

表1 2008—2017年郑州市取水系统的碳排放(万 t)

Tab. 1 Carbon emissions of different water intake systems in Zhengzhou during 2008-2017 (10⁴ t)

取水模式	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
蓄水工程	0.23	0.33	0.54	0.35	0.35	0.38	0.72	0.82	0.66	0.67
提水工程	0.20	0.15	0.12	0.16	0.26	0.32	0.79	0.17	0.53	0.76
引黄供水	3.45	3.94	5.42	3.50	3.93	3.57	3.36	2.71	2.20	2.24
南水北调								1.84	3.14	4.27
地下水供水	9.78	10.57	11.01	10.09	10.71	10.17	9.33	9.50	10.00	7.94
污水回用	1.79	1.79	1.74	1.74	2.57	2.80	3.59	3.61	4.12	8.82
雨水回用							0.87	0.87	1.11	0.93
总计	15.45	16.79	18.83	15.84	17.83	17.24	18.66	19.53	21.76	25.62

万t(图2)。2008—2017年郑州市累计供应42.35亿 m^3 的自来水,消耗36.55亿kWh的电力,产生292.74万t的碳排放。郑州市给水系统向用户提供1 m^3 水的能源强度为0.863 kWh/ m^3 ,其中,制水和配水过程能源强度分别为0.543 kWh/ m^3 、0.320 kWh/ m^3 。制水过程对碳排放的贡献率更大,2008—2017年郑州市制水过程的碳排放为184.19万t,占给水系统碳排放的63%,而配水过程产生的碳排放为108.55万t,贡献率为37%。

(3) 用水系统碳排放。2008—2017年郑州市用水系统碳排放呈小幅波动上升态势,从535.97万t增长到760.79万t。其中,居民生活用水环节的碳排放占主导地位,在321.77万~506.96万t之间,对用水系统碳排放贡献率为60%以上(图3);工业用水环节的碳排放占20%~30%之间,且呈波动下降趋势;公共生活用水仅占6%~12%;农业用水环节的碳排放最少,贡献率基本维持在1%~3%,且年际波动较小。用水系统不同环节能源强度和用水量是郑州市用水系统碳排放的决定因素。不同用水环节的单位用水能源强度具有较大差异,其大小排序为:居民生活用水(17.931 kWh/ m^3)、公共生活用水(8.766 kWh/ m^3)、工业用水(5.033 kWh/ m^3)、农业用水(0.336 kWh/ m^3)。此外,不同环节的用水量占郑州市用水系统总用水量的比例明显不同,这导致了用水系统碳排放的变化。其中工业用水量占比最大,为34.28%~42.94%;公共生活用水量仅占总用水量的5%~10%。因此,受单位用水能源强度和用水量的综合影响,居民生活用水和工业用水碳排放的贡献率较大;而农业用水的碳排放占比相对较小,几乎可以忽略不计。

(4) 排水及污水处理系统碳排放。2008—2017年污水处理系统碳排放呈明显上升趋势(图4)。其中,2008—2011年稳步增长,从5.90万t增长到7.08万t;2012—2017年快速增长,从6.93万t增长到14.32万t。污水处理碳排放的变化主要取决于污水处理量和相应的能源消耗的变化,比如,郑州市污水处理碳排放的最小值和最大值出现在2008年和2017年,分

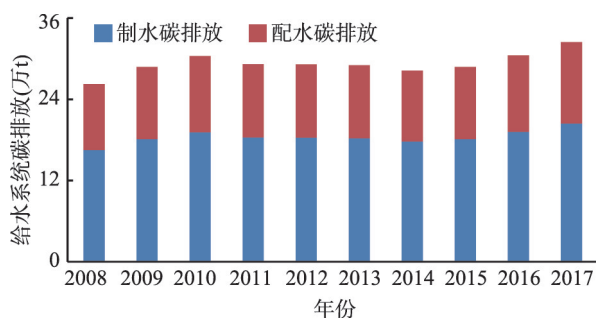


图2 2008—2017年郑州市给水系统碳排放

Fig. 2 Carbon emissions of water supply subsystem in Zhengzhou during 2008-2017

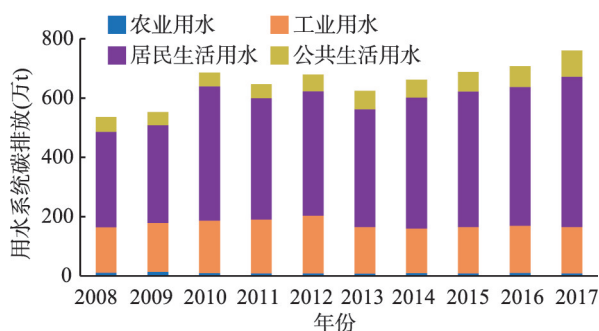


图3 2008—2017年郑州市用水系统碳排放

Fig. 3 Carbon emissions of water use subsystem in Zhengzhou during 2008-2017

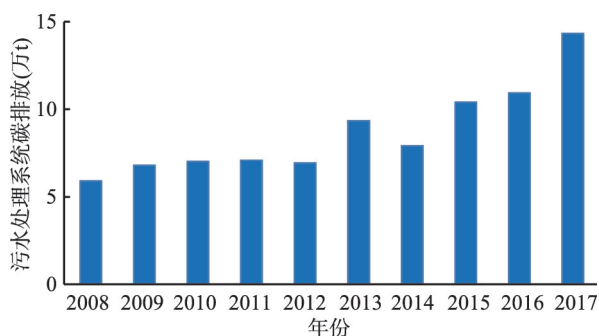


图4 2008—2017年郑州市污水处理碳排放

Fig. 4 Carbon emissions of wastewater treatment subsystem in Zhengzhou during 2008-2017

别为 5.90 万 t、14.32 万 t，主要原因在于郑州市污水处理量由 2.62 亿 m³ 增长到 6.36 亿 m³，污水处理能耗也从 0.74 亿 kWh 增长到 1.79 亿 kWh。同时，2008—2017 年郑州市污水处理量累计达到 38.47 亿 m³，产生的能耗和碳排放分别达 10.81 亿 kWh 和 86.59 万 t。

(5) 郑州市水系统碳排放总体特征分析。对各子系统的碳排放进行汇总发现，2008—2017 年郑州市水系统总碳排放总体呈上升趋势，从 2008 年的 583.58 万 t 上升到 2017 年的 833.16 万 t，年均增长率为 4.04%（图 5）。由于用水系统中能源强度远大于其他子系统，郑州市水系统碳排放变化主要受用水系统碳排放影响，用水系统碳排放占据主导地位（均值为 654.42 万 t），对城市水系统整体碳排放的贡献率为 91.31%~92.65%；其他几个子系统的碳排放贡献率相对较低，其中给水系统的碳排放贡献率为 3.86%~4.76%，其余依次为取水系统、排水及污水处理系统，碳排放贡献率范围分别为 2.27%~3.07%、0.94%~1.72%。这表明在各子系统中，用水系统的能耗明显高于取水、给水、排水及污水处理过程的能耗，并成为影响郑州市水系统碳排放的决定性因素。

2008—2017 年郑州市水系统碳排放占郑州市全社会能源消费碳排放的占比为 9.85%~14.15%，年均值为 11.73%（表 2）。水系统碳排放占比的时间特征变化明显，2008—2010 年和 2013—2017 年两个时段呈上升趋势，这归因于该时段内水系统碳排放不断增加，而全社会碳排放基本平稳甚至稍有下降；2010—2013 年全社会其他部门的能源消费碳排放增速明显高于用水部门能源消费的增速，而使水系统碳排放对全社会能源碳排放的贡献率有所下降。此外，2008—2017 年郑州市单位 GDP 水系统碳排放下降态势明显，从 0.19 t/万元下降到 0.09 t/万元，而人均水系统碳排放变化幅度不大，维持在 0.74~0.86 t/人之间，且人均碳排放与水系统碳排放的变化趋势基本一致。

4.2 郑州市水系统“水—能—碳”关联特征

2008—2017 年郑州市水系统总能耗为 1114.65 亿 kWh，总碳排放为 7111.09 万 t，平均能耗强度为 2.86 kWh/m³，碳排放强度为 1.82 kg/m³（表 3）。在研究期内，能耗强度和碳排放强度均呈小幅增长趋势。不同子系统的能耗强度和碳排放强度具有较大的差异，其中用水系统最高，分别为 7.68 kWh/m³ 和 4.81 kg/m³；取水系统最低，分别为 0.14 kWh/m³ 和 0.11 kg/m³。此外，随着用水需求的增加，城市水系统能耗和碳排放总量均呈增长趋势，但不同子系统能耗强度和碳排放强度的变化趋势不同，其中用水系统和取水系统的

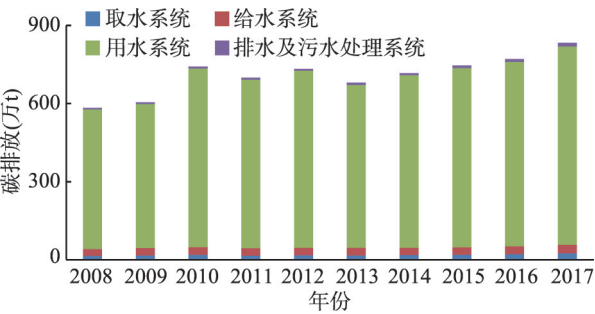


图 5 2008—2017 年郑州市各子系统碳排放
Fig. 5 Carbon emissions of various subsystems in Zhengzhou during 2008-2017

表 2 2008—2017 年郑州市水系统碳排放占比
Tab. 2 The proportion of carbon emissions of water system in Zhengzhou during 2008-2017

年份	水系统碳排放 (万 t)	社会能源消费 碳排放(万 t)	贡献率 (%)
2008	583.58	5580.62	10.46
2009	604.92	5370.28	11.26
2010	742.04	5244.75	14.15
2011	699.39	5804.06	12.05
2012	733.57	6399.01	11.46
2013	680.55	6910.49	9.85
2014	716.63	6790.08	10.55
2015	746.45	6532.35	11.43
2016	770.79	6157.65	12.52
2017	833.16	6159.13	13.53

表3 2008—2017年郑州市水系统“水—能—碳”关联分析

Tab. 3 Water-energy-carbon nexus of water system in Zhengzhou during 2008-2017

子系统	类别	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	合计/均值
取水系统	取水量(亿m ³)	16.29	17.42	20.23	16.25	17.03	15.99	16.32	16.73	18.00	18.65	172.92
	能耗(亿kWh)	1.93	2.10	2.35	1.98	2.23	2.15	2.33	2.44	2.72	3.20	23.41
	能耗强度(kWh/m ³)	0.12	0.12	0.12	0.12	0.13	0.13	0.14	0.15	0.15	0.17	0.14
	碳排放(万t)	15.45	16.79	18.83	15.84	17.83	17.24	18.66	19.53	21.76	25.62	187.55
	碳排放强度(kg/m ³)	0.09	0.10	0.09	0.10	0.10	0.11	0.11	0.12	0.12	0.14	0.11
给水系统	给水量(亿m ³)	3.80	4.16	4.39	4.22	4.21	4.20	4.09	4.16	4.41	4.69	42.35
	能耗(亿kWh)	3.28	3.59	3.79	3.64	3.64	3.63	3.53	3.59	3.81	4.05	36.55
	能耗强度(kWh/m ³)	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
	碳排放(万t)	26.25	28.78	30.37	29.18	29.14	29.06	28.26	28.78	30.50	32.43	292.74
	碳排放强度(kg/m ³)	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69
用水系统	用水量(亿m ³)	12.65	13.92	14.04	13.51	14.03	12.68	13.16	13.53	14.24	14.16	135.92
	能耗(亿kWh)	85.16	87.85	109.88	103.46	108.42	99.50	105.75	109.83	112.86	121.17	1043.88
	能耗强度(kWh/m ³)	6.73	6.31	7.83	7.66	7.73	7.85	8.04	8.12	7.93	8.56	7.68
	碳排放(万t)	535.97	552.56	685.83	647.29	679.67	624.91	661.80	687.76	707.61	760.79	6544.20
	碳排放强度(kg/m ³)	4.24	3.97	4.88	4.79	4.84	4.93	5.03	5.08	4.97	5.37	4.81
排水及污水处理系统	污水处理量(亿m ³)	2.62	3.02	3.12	3.15	3.08	4.15	3.51	4.62	4.85	6.36	38.47
	能耗(亿kWh)	0.74	0.85	0.88	0.88	0.86	1.17	0.99	1.30	1.36	1.79	10.81
	能耗强度(kWh/m ³)	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28
	碳排放(万t)	5.90	6.79	7.02	7.08	6.93	9.34	7.91	10.39	10.92	14.32	86.59
	碳排放强度(kg/m ³)	0.23	0.22	0.23	0.22	0.23	0.23	0.23	0.22	0.23	0.23	0.23
城市水系统(合计)	总水量(亿m ³)	35.36	38.52	41.78	37.13	38.35	37.02	37.08	39.04	41.50	43.86	389.66
	能耗(亿kWh)	91.10	94.39	116.90	109.96	115.15	106.45	112.59	117.16	120.74	130.21	1114.65
	能耗强度(kWh/m ³)	2.58	2.45	2.80	2.96	3.00	2.88	3.04	3.00	2.91	2.97	2.86
	碳排放(万t)	583.58	604.92	742.04	699.39	733.57	680.55	716.63	746.45	770.79	833.16	7111.09
	碳排放强度(kg/m ³)	1.65	1.57	1.78	1.88	1.91	1.84	1.93	1.91	1.86	1.90	1.82

能耗强度和碳排放强度明显增长，而给水系统与排水及污水处理系统则基本稳定在一定水平。这表明城市水系统碳排放很大程度上受“水—能”关联特征的影响，特别是与用水系统的能耗和碳排放强度密切相关。

以2017年为例，郑州市通过地下水开采、南水北调和引黄工程等取水模式提供了18.65亿m³的水资源量，消耗了3.20亿kWh的能源，产生了25.62万t的碳排放；给水系统配置的水资源量为4.69亿m³，能耗和碳排放分别为4.05亿kWh和32.43万t；农业、工业和居民生活等用水环节的水、能消耗分别为14.16亿m³、121.17亿kWh，碳排放为760.79万t；排水及污水处理系统中污水处理量为6.36亿m³，产生的能耗和碳排放分别为1.79亿kWh和14.32万t（图6）。

城市水系统不同环节的水能关联强度是造成碳排放差异的主要因素。2017年用水系统碳排放比重为91.31%，其次是给水系统碳排放（3.89%），取水、排水及污水处理系统占比相对较低，分别为3.07%、1.72%，可见用水系统的能源消耗是碳排放的主要来源。在水系统的不同环节中，能源强度从高到低的排序为：居民生活用水（17.931 kWh/m³）>公共生活用水（8.766 kWh/m³）>工业用水（5.033 kWh/m³）>雨水回用（1.550 kWh/m³）>污水回用（0.621 kWh/m³）>制水过程（0.543 kWh/m³）>农业用水（0.336 kWh/m³）>配水

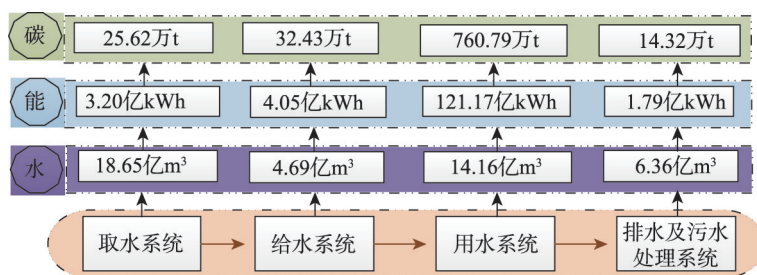


图6 2017年郑州市水系统的“水—能—碳”关联分析

Fig. 6 Water-energy-carbon nexus of water system in Zhengzhou in 2017

过程 (0.320 kWh/m^3) > 污水处理 (0.281 kWh/m^3) > 地下水供水 ($0.116\sim 0.149 \text{ kWh/m}^3$) > 蓄水工程 (0.109 kWh/m^3) > 提水工程 (0.105 kWh/m^3) > 南水北调 (0.102 kWh/m^3) > 引黄供水 (0.090 kWh/m^3)。能源强度最高的居民生活、公共生活和工业用水等均属于用水系统, 其中居民生活环节的能耗强度远大于其他环节。

水系统不同环节的“水—能—碳”关联特征的差异主要受以下因素影响: ① 城市水消耗量的增长。2008—2017年郑州市水系统碳排放总体呈上升趋势应归因于快速城市化、产业发展和人口规模增长导致的城市工业和居民生活用水需求量的增加。对郑州市水系统碳排放与人口、GDP和城镇化率进行相关性检验, 其相关系数分别为0.90、0.849、0.842, 均通过了显著性检验, 表明了城市水系统碳排放的变化与人口、地区生产总值和城镇化率均呈高度的正向相关。② 不同子系统水处理方式和工艺等。比如, 水源类型直接关系到取水过程的能耗, 如取南水北调、蓄水工程等地表水源的能耗较小, 而地下水和污水回用等水源供水的单位能耗较大。地下水位深度是影响地下水供水能耗的决定因素; 水质标准和水处理工艺则会影响自来水净化和污水处理的能耗水平, 一般而言, 水质标准要求越高、水处理工艺越复杂, 带来的能耗和碳排放就越大。③ 居民用水行为习惯和节水意识。居民的节水行为不仅会减少家庭能源消耗, 而且通过降低用水需求可减少水系统供水、制水和污水处理等相应的能源消耗, 并降低水系统的碳排放强度。④ 自然条件及气候变化的因素。比如, 降水量的变化会影响农业灌溉用水的使用, 并进一步影响能源消耗和碳排放。以2009年为例, 由于干旱的原因, 郑州市灌溉用水明显大于相邻年份, 产生的能耗和碳排放也相对较多。

4.3 郑州市水系统碳减排潜力分析

本文通过情景分析方法预测郑州市水系统的碳减排潜力。3种情景的设置依据如下: ① 基准情景: 按照2008—2017年水系统水能消耗强度的变化趋势预测未来水系统能耗和碳排放。② 中度低碳情景: 基于郑州市相关政策的约束指标、技术水平提升的预期或全国其他城市参考值设置能耗强度指标。其中, 取水系统不同模式及取水量参照《郑州都市区整体规划(2012—2030)》等文件设定; 给水系统的能源强度按照河南省平均水平 (0.730 kWh/m^3) 设定^[44]; 用水系统中相关参数的设定参照《郑州市节水“十三五”规划》《郑州市“十三五”水资源消耗总量和强度双控实施方案》等文件设定; 排水及污水处理系统的能耗强度参照华东地区城市的平均水平 (0.220 kWh/m^3) 设定^[45]。③ 高度低碳情景: 在中度低碳的情景下, 进一步约束能耗强度指标和用水总量。其中, 取水系统假设郑州市2040年实际用水总量超额完成当年控制量的18.5% (取2013—2017年平均值) 设定; 给水系统能耗按上海、广东等平均水平 (0.55 kWh/m^3) 设定^[44], 同时假定2040年郑州市供水管网漏损率达国内平均水平 (较基准情景下减少0.34亿m³的自来水浪

费);用水系统的相关参数根据已有研究结果^[46-47]设定;排水及污水处理系统中,假设未来污水处理设备进一步优化,能源强度下降到中国华南地区城市的平均水平(0.194 kWh/m^3)^[45]。

预测结果显示(图7),在基准情景下,2040年郑州市水系统碳排放为1540.78万t,较2017年增长707.62万t,主要原因在于该情景下能源强度较高,且快速城市化导致用水量逐年增加,尤其是用水和排水及污水处理系统碳排放增速较快。

而在综合考虑能耗和用水约束及技术水平提升的中度和高度低碳情景下,2040年郑州市水系统碳排放分别为1119.73万t、817.16万t,较基准情景的碳排放分别下降了421.05万t、723.62万t。其中,碳减排潜力最大的是用水系统,中度低碳情景和高度低碳情景下用水系统碳减排量分别为397.05万t和678.03万t,碳减排贡献率分别为94.30%、93.70%。高度低碳情景下2040年郑州市水系统碳减排量甚至超过了2008年水系统总碳排放(583.58万t)。此外,预测结果发现,中度低碳和高度低碳情景下,郑州市水系统碳排放峰值分别出现在2033年和2027年,分别为1211.55万t和1052.90万t。由此可见,水、能约束条件越严格,水系统碳排放峰值出现的时间越早。这表明未来应进一步强化城市水能资源约束,加大节水力度,并着力提高城市水系统(特别是用水环节)水能利用效率和技术水平,这会在长期内起到显著的减排效果。

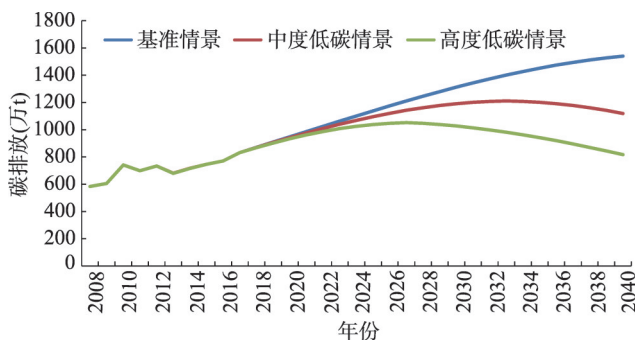


图7 不同情景下郑州市水系统碳排放预测

Fig. 7 Carbon emission prediction of water system in Zhengzhou under different scenarios

5 结论与讨论

5.1 结论

本文构建了基于“水—能—碳”关联的城市水系统碳排放研究框架,以郑州市为例分析了水系统碳排放的构成及其“水—能—碳”关联特征,并预测了不同情景下水系统的碳减排潜力。主要结论如下:

(1) 郑州市水系统涉及取水、给水、用水、排水及污水处理等不同阶段,其碳排放不仅与城市供水和用水量有关,也受城市供水和输水的方式和距离、子系统运行过程和终端使用的能源类型、结构及效率的影响。其中由城市扩展和人口增长导致的用水需求的增加是碳排放增长的主要因素。郑州市水系统碳排放总体呈上升趋势,从2008年的583.58万t增长到2017年的833.16万t。其中,用水系统碳排放占91.31%~92.65%,尤其是居民生活和工业用水环节的碳排放占比较大;其他依次为给水、取水、排水及污水处理系统的碳排放。水系统碳排放对郑州市全社会能源消费碳排放的贡献率为9.85%~14.15%。

(2) 郑州市水系统不同环节的碳排放构成及其强度具有较大差异,且呈现出不同的时间变化态势。总体而言,水系统能耗和碳排放总量均呈增长趋势,其中用水和取水系统能耗和碳排放强度增长态势明显,而给水与排水及污水处理系统则相对稳定。2008—2017年郑州市水系统总能耗为1114.65亿kWh,碳排放为7111.09万t,平均能耗强度为

2.86 kWh/m³, 碳排放强度为 1.82 kg/m³。其中, 用水系统最高, 平均能耗强度和碳排放强度分别为 7.68 kWh/m³ 和 4.81 kg/m³; 取水系统最低, 分别为 0.14 kWh/m³ 和 0.11 kg/m³。这表明郑州市水系统碳排放在很大程度上受“水—能”关联特征的影响, 特别是与用水系统中单位用水的能耗和碳排放密切相关。同时, 取水系统的能耗增长, 特别是由城市远距离供水和污水回用引起的碳排放增长应引起关注。

(3) 郑州市水系统不同环节“水—能—碳”关联特征的差异主要受城市水消耗量的变化、水处理方式和工艺、居民用水行为习惯和节水意识、自然条件及气候变化等因素的影响。因此, 未来应着重从城市工业和生活节水、水处理工艺改进、节水宣传、水系统优化管理和能源效率提升等方面提高水系统运行效率。

(4) 考虑水能约束的高度低碳情景下郑州市水系统具有较大的碳减排潜力, 2040 年较基准情景减少 723.62 万 t。其中用水系统的碳减排潜力最大 (贡献度达 93.70%)。在中度低碳和高度低碳情景下, 水系统碳排放峰值分别出现在 2033 年 (1211.55 万 t) 和 2027 年 (1052.90 万 t)。未来应进一步强化城市水能资源约束, 着力提高城市水系统 (特别是用水环节) 水能利用效率和技术水平, 将有助于推动水系统碳达峰的提前实现, 并在长期内起到显著的减排效果。

5.2 政策建议

基于本文的研究结果, 提出以下政策建议: ① 面向节能减碳目标开展城市水系统低碳优化设计。建议适当调整以往“大型集中”的水系统设施分布模式, 实现城市水系统设施的小型化分散布局和雨污水的就近处理, 能够显著降低长距离运输导致的能源消耗和碳排放; ② 基于“水—能”关联的视角加强水系统的节能改造, 实现水系统低碳运行。重点提升农业、工业和生活等环节的水能利用效率, 以实现“上游”和“下游”子系统的协同节能减排, 进而减少整个水系统的碳排放; ③ 加强资源综合管理, 构建水能协同优化和管理信息平台。打破水系统内部分割式管理, 加强资源管理部门的协调并构建城市水系统综合管理信息平台, 实现水系统全过程的实时监测和智能管理; ④ 基于碳达峰目标建立水系统水能资源节约的约束机制, 制定水系统碳减排路线图, 加强不同部门和产业的协同减排; ⑤ 建立节水节能效果精准评价的标准和保障体系。从政策导向、法规约束和经济手段等方面进一步完善节水节能激励机制, 以促进用水过程的能源节约和碳减排。

5.3 讨论

(1) 本文在研究框架构建方面突出从水系统运行的全过程入手, 将与水有关的 (包括与水消费伴生的) 直接或间接能源消耗都涵盖在内, 以便于探讨不同环节水—能关联状况及其对碳排放影响的差异。从研究结果来看, 郑州市用水系统碳排放明显高于其他环节 (年均 654.42 万 t), 对城市水系统整体碳排放的贡献率为 91.31%~92.65%。这里需要说明的是: 对于用水系统中的工业循环冷却、锅炉用水、家庭生活的洗衣、沐浴等环节而言, 水只是作为介质存在并不是引起碳排放的原因, 碳排放是由用水过程伴生的能源消耗引起的。因此不同各环节“水—能”关系的实质也不同。比如取水、给水 (包括制水)、水处理等环节碳排放主要来自于水的获取、生产、供应、输送和处理过程中各类设施的能源消耗; 用水系统碳排放则主要来自于生活水消费、用水过程伴生的能耗、生产用水或耗水环节的能源消耗, 即作为消费水的用水环节的碳排放不是“用水”的结果, 而只是“水”参与了这一过程而已, 这与生产水、处理污水等过程有着本质的区别。

(2) 本文重在突出水系统碳排放研究框架和核算方法的构建, 核算体系和综合能耗是在对郑州市水系统进行调研、走访等的基础上综合确定的。实际上, 不同城市水系统

运行过程存在一定差异, 因此在对其他城市开展碳排放核算时, 应结合当地水系统特点深入调查统计, 以确定符合地方实际的能耗因子。比如, 水资源可获得量及供给方式和距离的差异是影响供水系统碳排放的重要因素, 在实践中需结合不同城市的供水结构和综合能耗来确定核算系数; 不同城市工业及生活用水能耗和碳排放差异明显, 这主要与产业结构、能源效率和家庭用能方式密切相关, 应结合城市企业和居民生活调查数据来综合确定; 给水和污水处理环节的能耗和碳排放应该以当地的自来水厂和污水处理厂的综合能耗为基础进行核算, 这样才能使核算体系更加科学合理。

(3) 由于本文涉及的水系统环节较多, 要详细获取每个环节能源消费量数据并进而确定年度能源强度参数较为困难。因此, 除了工业和生活用水、污水处理、雨污水回用等环节来自于企业和家庭调查之外, 其他的能源消耗强度参数主要取自其他相关研究成果, 也未考虑时间尺度上的变化。因此, 在默认能源强度不变的情况下, 本文得出的水系统四大环节能源强度和碳排放强度的变化实际上主要是由不同环节用水量的变化引起的, 这在一定程度上影响了研究的精度。

参考文献(References)

- [1] Zhao Rongqin, Li Zhiping, Han Yuping, et al. The coupling interaction mechanism of regional water-land-energy-carbon system. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(9): 1613-1628. [赵荣钦, 李志萍, 韩宇平, 等. 区域“水—土—能—碳”耦合作用机制分析. *地理学报*, 2016, 71(9): 1613-1628.]
- [2] Zhu Yongxia. Study on energy consumption evaluation method during the whole process of social water cycle [D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2017. [朱永霞. 社会水循环全过程能耗评价方法研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2017.]
- [3] Qin Huapeng, Yuan Huizhou. Urban Water System and Carbon Emission. Beijing: Science Press, 2014. [秦华鹏, 袁辉洲. 城市水系统与碳排放. 北京: 科学出版社, 2014.]
- [4] California Energy Commission. California's Water-Energy Relationship, Final Staff Report. Sacramento: CEC, 2005.
- [5] 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. *Applied Energy*, 2017, 205: 589-601.
- [6] Venkatesh G, Brattebø H. Energy consumption, costs and environmental impacts for urban water cycle services: Case study of Oslo (Norway). *Energy*, 2011, 36(2): 792-800.
- [7] Kenway S J, Priestley A, Cook S, et al. Energy use in the provision and consumption of urban water in Australia and New Zealand. CSIRO: Water for a Healthy Country National Research Flagship, 2008.
- [8] Valek A M, Sušnik J, Grafakos S. Quantification of the urban water-energy nexus in México City, México, with an assessment of water-system related carbon emissions. *Science of the Total Environment*, 2017, 590-591: 258-268.
- [9] Cheung C T, Mui K W, Wong L T. Energy efficiency of elevated water supply tanks for high-rise buildings. *Applied Energy*, 2013, 103: 685-691.
- [10] DeNooyer T A, Peschel J M, Zhang Z X, et al. Integrating water resources and power generation: The energy-water nexus in Illinois. *Applied Energy*, 2016, 162: 363-371.
- [11] Segurado R, Costa M, Duić N, et al. Integrated analysis of energy and water supply in Islands. Case study of S. Vicente, Cape Verde. *Energy*, 2015, 92: 639-648.
- [12] Vieira A S, Ghisi E. Water-energy nexus in low-income houses in Brazil: The influence of integrated on-site water and sewage management strategies on the energy consumption of water and sewerage services. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 133: 145-162.
- [13] Zhou Y C, Zhang B, Wang H K, et al. Drops of energy: Conserving urban water to reduce greenhouse gas emissions. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(19): 10753-10761.
- [14] Zuo Yeying, Xu Xiaotian. Research progress of the sustainability of city water system. *Environment and Sustainable Development*, 2014, 39(5): 90-93. [左叶颖, 许效天. 城市水系统的可持续性研究进展. *环境与可持续发展*, 2014, 39(5): 90-93.]
- [15] Zhou Luming, Xie Xinghua, Yu Li, et al. Water-energy-economy coupling relationship in water resources management.

- Water Resources and Power, 2019, 37(4): 144-147, 166. [周露明, 谢兴华, 余丽, 等. 水资源管理中的水—能源—经济耦合关系. 水电能源科学, 2019, 37(4): 144-147, 166.]
- [16] Yan Xu, Qiu Dezhi, Guo Dongli, et al. Emission inventory of greenhouse gas from urban wastewater treatment plants and its temporal and spatial distribution in China. *Environmental Science*, 2018, 39(3): 1256-1263. [闫旭, 邱德志, 郭东丽, 等. 中国城镇污水处理厂温室气体排放时空分布特征. 环境科学, 2018, 39(3): 1256-1263.]
- [17] Wang Yongqin, Zhou Ye, Zhang Rong. A review of the research methods on influencing factors of carbon emissions and carbon footprint. *Environmental Engineering*, 2017, 35(1): 155-159. [王永琴, 周叶, 张荣. 碳排放影响因子与碳足迹文献综述: 基于研究方法视角. 环境工程, 2017, 35(1): 155-159.]
- [18] Dale A T, Bilec M M. The Regional Energy & Water Supply Scenarios (REWSS) model, Part I: Framework, procedure, and validation. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2014, 7: 227-236.
- [19] Kenway S J, Scheidegger R, Larsen T A, et al. Water-related energy in households: A model designed to understand the current state and simulate possible measures. *Energy and Buildings*, 2013, 58: 378-389.
- [20] Zawartka P, Burchart-Korol D, Blaut A. Model of carbon footprint assessment for the life cycle of the system of wastewater collection, transport and treatment. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 5799. DOI: 10.1038/s41598-020-62798-y.
- [21] Chhipi-Shrestha G, Hewage K, Sadiq R. Water-energy-carbon nexus modeling for urban water systems: System dynamics approach. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2017, 143(6): 04017016. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000765.
- [22] Li Lu, Chen Yuansheng, He Xiwu, et al. Studies on water-energy relationship in urban water system. *China Water Resources*, 2012(6): 22-25. [李璐, 陈远生, 何希吾, 等. 城市水系统水—能关系研究进展. 中国水利, 2012(6): 22-25.]
- [23] Liu J H, Chen S L, Wang H, et al. Calculation of carbon footprints for water diversion and desalination projects. *Energy Procedia*, 2015, 75: 2483-2494.
- [24] Friedrich E, Pillay S, Buckley C A. Carbon footprint analysis for increasing water supply and sanitation in South Africa: A case study. *Journal of Cleaner Production*, 2009, 17(1): 1-12.
- [25] Kang Liang, Wang Junyou. Discussion on water-saving and consumption reduction measures in thermal power plants. *Electric Power Environmental Protection*, 2008, 24(2): 40-43. [康亮, 王俊有. 火电厂节水降耗措施. 电力环境保护, 2008, 24(2): 40-43.]
- [26] Li C, Wang Y, Qiu G Y. Water and energy consumption by agriculture in the Minqin oasis region. *Journal of Integrative Agriculture*, 2013, 12(8): 1330-1340.
- [27] Rothausen S G S A, Conway D. Greenhouse-gas emissions from energy use in the water sector. *Nature Climate Change*, 2011, 1(4): 210-219.
- [28] Zhou N, Zhang J J, Khanna N, et al. Intertwined impacts of water, energy development, and carbon emissions in China. *Applied Energy*, 2019, 238: 78-91.
- [29] Singh P, Kansal A, Carliell-Marquet C. Energy and carbon footprints of sewage treatment methods. *Journal of Environmental Management*, 2016, 165: 22-30.
- [30] Xie Tao, Wang Chengwen. Greenhouse gas emissions from wastewater treatment plants. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2012, 52(4): 473-477. [谢涛, 汪诚文. 污水处理厂温室气体排放评估. 清华大学学报(自然科学版), 2012, 52(4): 473-477.]
- [31] Jiang Shan. Scientific concept of water-energy nexus and coupling simulation [D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2017. [姜珊. 水—能源纽带关系解析与耦合模拟[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2017.]
- [32] Xiang X Z, Jia S F. China's water-energy nexus: Assessment of water-related energy use. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 144: 32-38.
- [33] Hou Chunxi. Based on construction of ecological city of Zhengzhou Yellow River project plan research [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2016. [侯春喜. 基于郑州生态城市建设引黄工程方案研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2016.]
- [34] Meng Chunli, Li Sao, Guo Hui. Analysis on dynamic change pattern of groundwater in Zhengzhou City. *Water Resources & South to North Water Diversion*, 2014(16): 3-4. [孟春丽, 李骚, 郭辉. 浅析郑州市地下水动态变化规律. 河南水利与南水北调, 2014(16): 3-4.]
- [35] Liu J G, Zang C F, Tian S Y, et al. Water conservancy projects in China: Achievements, challenges and way forward.

- Global Environmental Change, 2013, 23(3): 633-643.
- [36] Meng F X, Liu G Y, Liang S, et al. Critical review of the energy-water-carbon nexus in cities. *Energy*, 2019, 171: 1017-1032.
- [37] Wu Xiaodong. Study on water balance test and water saving measures in a steel company. *Yangtze River*, 2014, 45 (Suppl.2): 227-228. [吴晓东. 某钢铁厂水平衡测试及节水措施研究. *人民长江*, 2014, 45(Suppl.2): 227-228.]
- [38] Wang Bingxuan. Assessment of water utilization level in petrochemical enterprises [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2016. [王炳轩. 石化企业用水水平评价研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.]
- [39] Liu Hongshu, Wang Baoqing, Liu Dongfang, et al. Study on water-saving potential for automobile-manufacturing enterprises. *Water & Wastewater Engineering*, 2009, 45(8): 64-66. [刘红姝, 王宝庆, 刘东方, 等. 汽车生产企业节水潜力研究. *给水排水*, 2009, 45(8): 64-66.]
- [40] Yu Jiao, Zhao Rongqin, Hou Lipeng, et al. Study on the relationship between land-use efficiency and carbon emission intensity of typical industrial land in Zhengzhou: Based on the investigation data of 181 enterprises. *China Land Science*, 2018, 32(8): 74-80. [余娇, 赵荣钦, 侯丽朋, 等. 郑州市典型产业用地效益与碳排放强度的关系研究: 基于181家企业的调查. *中国土地科学*, 2018, 32(8): 74-80.]
- [41] Wang Ying, Chen Yuansheng, Weng Jianwu, et al. Characteristic analyze of public domestic water of Beijing City. *Water & Wastewater Engineering*, 2008, 34(11): 138-143. [王莹, 陈远生, 翁建武, 等. 北京市城市公共生活用水特征分析. *给水排水*, 2008, 34(11): 138-143.]
- [42] Hu Yajie, Che Jianming, Ma Jing, et al. Water consumption of Beijing's government departments and institutions. *China Water Resources*, 2014(17): 22-24. [胡雅杰, 车建明, 马静, 等. 北京市机关单位用水分析. *中国水利*, 2014(17): 22-24.]
- [43] Yu Jiao, Zhao Rongqin, Xiao Liangang, et al. Carbon emissions of urban wastewater treatment system based on the "water-energy-carbon" nexus. *Resources Science*, 2020, 42(6): 1052-1062. [余娇, 赵荣钦, 肖连刚, 等. 基于“水—能—碳”关联的城市污水处理系统碳排放研究. *资源科学*, 2020, 42(6): 1052-1062.]
- [44] Gao Jinjing. The nexus of water resource and electricity production in China [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. [高津京. 我国水资源利用与电力生产关联分析[D]. 天津: 天津大学, 2012.]
- [45] Mei Xiaole, Zhou Yan. Discussion on municipal wastewater treatment plant energy-saving evaluation standards. *Water & Wastewater Engineering*, 2011, 47(3): 45-49. [梅小乐, 周燕. 城市污水处理厂节能水平评估标准探讨. *给水排水*, 2011, 47(3): 45-49.]
- [46] Deng Min. Evaluation of water resources carrying capacity of Zhengzhou city based on "three red lines" [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2018. [邓敏. 基于“三条红线”的郑州市水资源承载力评价研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2018.]
- [47] Wang Limin, Sun Huan, Yang Hong, et al. Water resource carrying capacity in Zhengzhou city. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(20): 101-108. [王丽敏, 孙环, 杨宏, 等. 郑州市水资源承载力评价研究. *中国农学通报*, 2015, 31(20): 101-108.]

Carbon emissions of urban water system based on water-energy-carbon nexus

ZHAO Rongqin¹, YU Jiao^{1,2}, XIAO Liangang¹, SUN Jin¹, LUO Huili¹,
YANG Wenjuan¹, CHUAI Xiaowei³, JIAO Shixing⁴

(1. College of Surveying and Geo-informatics, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 2. Water Conservancy Bureau of Hanyuan County, Yaan, 625300, Sichuan, China;

3. School of Geography & Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 4. Department of Resources & Environment and Tourism, Anyang Normal University, Anyang 455002, Henan, China)

Abstract: Discovering the inherent mechanisms between water cycle process and carbon emissions in urban water system is of important theoretical and practical significance for promoting water-energy conservation and low-carbon optimization. From the perspective of "water-energy-carbon" nexus, a theoretical framework and a series of calculation methods of carbon emissions within urban water system were established in this study. Based on statistical data from 2008 to 2017 and data obtained through questionnaires, the carbon emissions of water system in Zhengzhou city were calculated according to the energy consumptions of each subsystem. The characteristics of water-energy-carbon nexus in water system were demonstrated, based on which further analysis was made under different scenarios of carbon emission reduction potential. The main conclusions are as follows: (1) Water system of Zhengzhou city involves various subsystems, including water intake, water supply, water use, and wastewater treatment. The carbon emissions of urban water system were not only influenced by the amount of water supply and use, but also affected by the mode and distance of water delivery, energy type, structure and efficiency of operation facilities, and terminal use in each subsystem. Water use subsystem was the main source of carbon emissions, indicating that the main reason for the growth of carbon emissions was the increasing water demands driven by urban expansion and population growth. (2) There exist huge differences in carbon emission composition and intensity, as well as the temporal changing trends of carbon emissions among different water subsystems in Zhengzhou. Specifically, the intensity of energy consumption and carbon emissions of water intake and water use increased obviously, while it was relatively stable in water supply and wastewater treatment. Attentions should be paid to the increase of energy consumption of water intake and water use system, especially the increase of carbon emissions caused by long distance water supply and the reuse of raw sewage. (3) The different characteristics of "water-energy-carbon" nexus of different subsystems of water system in Zhengzhou were mainly affected by changes of water use, water treatment methods and processes, residential water use habits, water conservation awareness, natural conditions, and climate change. (4) In the future, water system efficiency should be improved to reduce energy consumption and carbon emissions. Effective measures include urban industrial and domestic water saving, water treatment process improvement, water saving promotion, water system optimization, low-carbon management, and energy efficiency improvement.

Keywords: water system; carbon emission; Zhengzhou city; water-energy-carbon nexus