

引用格式: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[J].资源科学,2020,42(6):1052-1062. [Yu J, Zhao R Q, Xiao L G, et al. Carbon emissions of urban wastewater treatment system based on the “water-energy-carbon” nexus[J]. Resources Science, 2020, 42(6): 1052-1062.] DOI: 10.18402/resci.2020.06.04

基于“水—能—碳”关联的城市污水处理系统 碳排放研究

余娇¹,赵荣钦¹,肖连刚¹,张林静¹,王帅¹,揣小伟²,韩雨承¹,焦士兴³

(1. 华北水利水电大学测绘与地理信息学院,郑州 450046; 2. 南京大学地理与海洋
科学学院,南京 210023; 3. 安阳师范学院资源环境与旅游学院,安阳 455002)

摘要:从“水—能—碳”关联视角开展城市污水处理系统碳排放研究,有助于揭示污水处理系统中资源的流动、投入过程与碳排放的内在关系机理,并可为城市污水处理系统低碳运行和管理提供重要参考依据。本文基于“水—能—碳”关联的角度,构建了城市污水处理系统碳排放研究的理论框架和方法,以郑州市某污水处理厂为例,评估了污水处理系统运行过程不同环节的碳排放,并对各环节碳排放动态变化的影响因素进行了分析。结果表明:①城市污水处理系统碳排放中,直接碳排放占主导地位,间接碳排放中的能耗和物耗碳排放占比较小;②吨水CH₄排放和吨水N₂O排放主要受污水处理量和进出水水质浓度(BOD浓度和TN浓度)的影响;③吨水能耗碳排放和吨水物耗碳排放均有呈规模效应的趋势;④城市污水处理系统不同环节碳排放受污水处理工艺、污水处理量、运行工况、进出水水质要求、回用水处理率和能源消耗类型等因素影响。因此,加强城市污水处理系统的资源输入和流通过程的综合管理,推动水、能节约和碳减排的协同对于污水处理系统的低碳运行具有重要意义。

关键词:污水处理系统;直接碳排放;间接碳排放;“水—能—碳”关联;动态变化;郑州市

DOI :10.18402/resci.2020.06.04

1 引言

城市污水处理系统是城市主要碳排放源之一^[1],随着大规模城市化进程和水资源消耗的增加,城市污水处理过程及其碳排放问题也得到了学界的诸多关注。研究表明,污水处理系统碳排放占社会总碳排放的1%~2%,且呈不断增长的趋势^[2,3]。随着经济社会发展对水资源保护与再生利用的需要,未来中国污水处理量必将大幅增长^[4-6]。同时,以高能耗和高物耗为基础的严标准出水要求,也会引起污水处理系统碳排放的大量增加^[7,8]。因此,在当前快速城市化和水资源消耗增加的背景下,开展城市污水处理系统碳排放研究显得尤为重要^[9,10]。近年来,国内外学者从不同角度探讨了城市污水处理系统的

碳排放问题,主要采用IPCC指南推荐的碳排放估算法^[11,12]或碳足迹评价方法来核算污水处理过程中的直接和间接碳排放^[13];研究尺度主要涉及国家、省级、市县或某一具体污水处理厂等不同层面^[12,14,15];研究内容既包括污水处理过程的碳排放估算及特征分析,也涉及污水处理碳排放的影响因素及碳减排对策领域^[16,17]。能源消耗是影响城市污水处理系统碳排放的重要因素^[18],因此有众多学者围绕“水—能”关联角度开展了污水处理系统的能耗碳排放研究^[19]。污水生化处理环节产生的CH₄和N₂O是重要的直接温室气体排放源^[20,21]。随着污水处理量的增加,污水处理的直接碳排放问题日益凸显,据美国EPA统计预测,2030年全球污水行业的CH₄和N₂O

收稿日期:2019-09-30 修订日期:2020-05-10

基金项目:国家自然科学基金项目(41971241);教育部人文社会科学项目(17YJCZH257);河南省自然科学基金项目(182300410103)。

作者简介:余娇,女,四川雅安人,硕士研究生,研究方向为城市水系统碳排放。E-mail: yujiao987@163.com

通讯作者:赵荣钦,男,河南孟津人,教授,研究方向为资源环境与碳排放。E-mail: zhaorq234@163.com

2020年6月

逸散量分别会超过 $6 \times 10^8 \text{ tCO}_2\text{e}$ 和 $1 \times 10^8 \text{ tCO}_2\text{e}$, 约占非 CO_2 总排放量的 4.5%^[2]。目前, 学者们针对是否要将污水处理过程中由物耗产生的碳排放纳入到污水处理碳排放的整体核算范围内持不同的观点^[22], 有学者认为由物耗引起的碳排放相比能耗碳排放和直接碳排放, 其比例较小, 可不计入污水处理系统碳排放的核算, 也有学者认为污水处理过程中的物耗碳排放不能被忽略, 尤其是针对大规模的污水处理系统。

城市污水处理的碳排放是一个复杂的系统过程, 不仅包括直接排放(CH_4 和 N_2O 排放)还涉及间接排放(能耗碳排放和物耗碳排放), 且不同环节的碳排放有明显的动态变化特征, 这主要与污水处理量、进出水水质、能源消耗、物质消耗等因素密切相关。同时, 在城市污水处理系统的运行过程中, 水、能等资源流动和投入过程对碳排放也具有直接或间接的影响。因此, 基于“水—能—碳”关联角度, 从小尺度经济单元(污水处理厂)的视角分析资源耦合与碳排放的关系, 可以进一步厘清污水处理不同环节的碳排放动态演变规律, 揭示城市污水处理系统的碳排放机理, 而且有助于从资源节约的视角针对污水处理的过程优化、工艺优选与节能改造等方面制定差别化的碳减排措施, 为城市污水处理系统的资源节约与低碳运行和管理提供实践指导。

基于此, 本文构建了基于“水—能—碳”关联视角的城市污水处理系统碳排放研究的理论框架, 并采用郑州市某污水处理厂的相关数据, 对污水处理系统的直接和间接碳排放进行评估, 并分析其动态变化特征和影响因素。本文从多要素关联的视角为城市污水处理系统的资源节约和碳减排提供理论和实践指导。

2 理论框架

城市污水处理系统的运行是一个涵盖了从污水进入系统, 经过一系列机械和生化处理, 最终达到出水标准的完整过程。在进水到出水的污水处理流程中, 会产生能源消耗、物质消耗和生化反应, 这不可避免地会引起碳排放。城市污水处理系统的碳排放可划分为直接碳排放和间接碳排放两部分(图1)。直接碳排放包括了 CH_4 和 N_2O 排放(在IPCC推荐的方法指南中^[23], 由生物成因产生的 CO_2 未被纳入碳排放清单), CH_4 排放与污水处理的厌氧和好氧过程中的有机物降解有关, 即降低污水的BOD(生化需氧量)浓度, 使其达到出水水质要求; N_2O 排放主要与污水处理的脱氮过程相关, 即将污水的TN(总氮)浓度降低到排放标准。间接碳排放包括了能耗碳排放和物耗碳排放, 其中能耗碳排放是指由耗电量造成的碳排放, 对应于污水处理系统运行过程中各耗能环节, 包括预处理单元、生物处

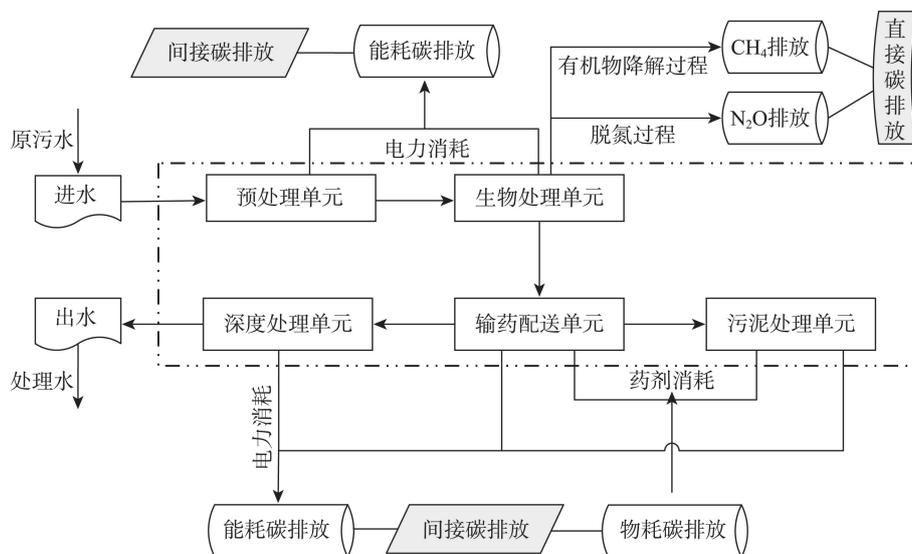


图1 基于“水—能—碳”关联的城市污水处理系统碳排放研究的理论框架

Figure 1 Theoretical framework of research on carbon emissions of urban wastewater treatment system based on “water-energy-carbon” nexus

理单元、配药输送单元、污泥处理等其他机械处理设备的能耗;物耗碳排放与污水处理过程中消毒剂、絮凝剂等药物的消耗有关,主要发生在输送配药单元和污泥处理单元。综上,基于“水—能—碳”关联角度的城市污水处理系统中的“碳”不只是与能源消耗有关,还受多种因素的影响,由于不同的污水处理规模、处理工艺、进出水水质、工况条件等的差异会影响到污水处理系统各环节的碳排放,因此,本文基于“水—能—碳”关联视角,力图对城市污水处理系统的直接碳排放和间接碳排放的年内动态特征变化进行分析,并探讨污水处理碳排放与其影响因子之间的相关关系。

3 污水处理厂概况、数据来源和研究方法

3.1 污水处理厂概况和数据来源

郑州市某污水处理厂位于郑州市西部,服务范围27 km²,服务人口37万,总处理规模为20×10⁴ t/d。该厂一期工程于2004年12月正式建成运行,污水处理工艺为改良A²/O工艺,设计污水处理规模为10×10⁴ t/d,出水水质排放达GB18918-2002二级标准,回用水处理量5×10⁴ t/d,出水水质排放达GB18918-2002一级B标准;二期工程于2010年6月建成使用,污水处理工艺采用升级改良A²/O工艺,污水处理设计规模为10×10⁴ t/d,出水设计全部达回用水标准,执行GB18918-2002一级A排放标准。研

究期内(2011年全年),该厂一期、二期工程为同时独立运行,其工艺流程如图(图2和图3)所示。本文采用了2011年该厂两期污水处理工程的相关基础数据,包括全年逐日的污水处理量、回用水处理量、进出水水质(BOD和TN的浓度)、耗电量、药剂消耗量(聚合氯化铝(PAC)、聚丙烯酰胺(PAM)、盐酸和氯酸钠等)。需要说明的是,该厂污水处理的基本工艺、运行流程、能源和物质消耗种类等情况为城市污水处理厂的一般类型,具有典型代表性。

3.2 研究方法

本文构建了污水处理直接碳排放(CH₄排放和N₂O排放)和间接碳排放(能耗碳排放和物耗碳排放)的核算方法体系,并采用SPSS软件分析污水处理系统碳排放的影响因素。

3.2.1 直接碳排放的核算

城市污水处理系统的直接碳排放核算包括了污水处理生物处理过程中产生的CH₄排放和N₂O排放。其计算公式如下^[24]:

$$M_{\text{CH}_4} = V \times (BOD_0 - BOD_c) \times EF_{\text{CH}_4} \times 10^{-3} \times GWP_{\text{CH}_4} \quad (1)$$

式中: M_{CH_4} 表示污水处理系统的CH₄排放量(kg-CO₂e); V 表示污水处理系统的进水量(t/d); BOD_0 和 BOD_c 分别表示污水处理系统的进、出水的BOD浓度(mg/L); EF_{CH_4} 表示CH₄排放因子,根据《2006年IPCC清单指南》推荐的缺省值和中国污水处理厂的实际情况^[25],本文CH₄排放因子的取值为0.086

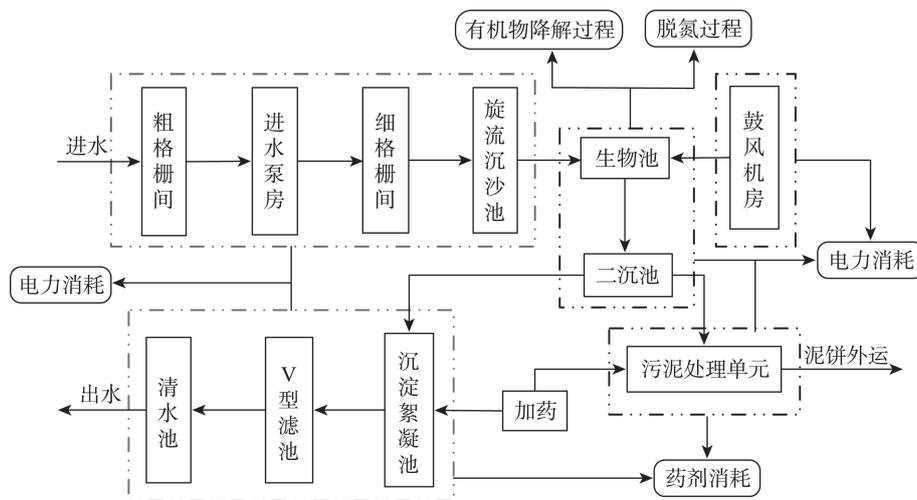


图2 郑州市某污水处理厂一期工程的工艺流程图

Figure 2 Process flow diagram of the first phase of a wastewater treatment plant (WWTP) in Zhengzhou City

2020年6月

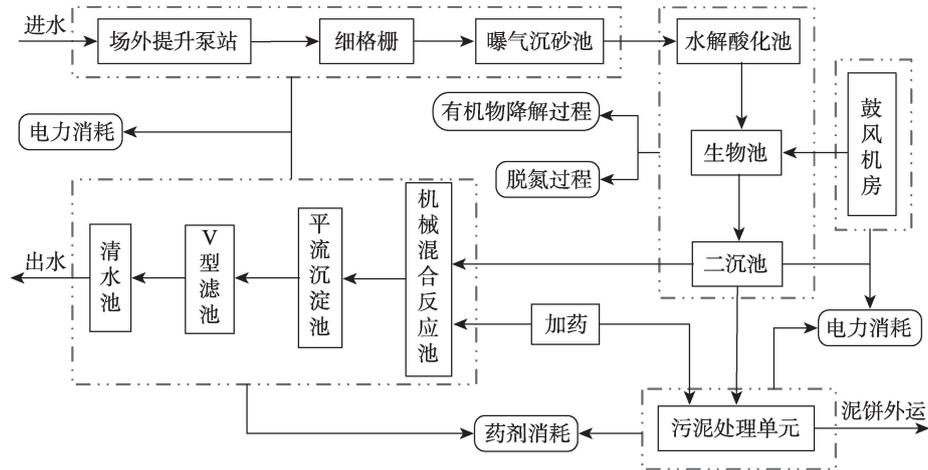


图3 郑州市某污水处理厂二期工程的工艺流程图

Figure 3 Process flow diagram of the second phase of a wastewater treatment plant (WWTP) in Zhengzhou City

kgCH₄/kgBOD; CH₄的 *GWP* 为 25。需要说明的是,由污水处理产生的各类型气体的温室效应有差异,为便于计算和对比,可依据 IPCC《第四次评估报告》(气候变化 2007)规定的全球变暖潜势值(*GWP*)将其温室效应换算为统一的计量单位,换算得到 CO₂、CH₄和 N₂O 的潜势值分别为 1、25 和 298,因此本文的最后计算结果用 *GWP* 表示,单位为碳排放当量(CO₂e)。

$$M_{N_2O} = V \times (TN_0 - TN_e) \times EF_{N_2O} \times 10^{-3} \times GWP_{N_2O} \quad (2)$$

式中: M_{N_2O} 表示污水处理系统的 N₂O 排放量(kgCO₂e); TN_0 和 TN_e 分别表示污水处理系统进、出水的 TN 浓度(mg/L); EF_{N_2O} 表示 N₂O 排放因子,依据脱氮工艺的 N₂O 排放因子推荐值^[26],本文 N₂O 排放因子取值为 0.035 kg/kgTN。

3.2.2 间接碳排放的核算

城市污水处理系统的间接碳排放核算包括了污水处理系统的能耗碳排放和物耗碳排放。能耗碳排放来源于污水处理系统运行过程中的提升泵单元、曝气设备、输送配药单元、污泥处理单元和其他处理环节机械设备的电力消耗。能耗碳排放的计算公式如下:

$$M_{CO_2,E} = EF_{CO_2,E} \times E \times GWP_{CO_2} \quad (3)$$

式中: $M_{CO_2,E}$ 为污水处理系统的能耗碳排放量(kgCO₂e); $EF_{CO_2,E}$ 为电力消耗的 CO₂ 排放因子(kgCO₂/kW·h),合理的电力消耗碳排放折算因子要考虑国家或地区的能源结构差异,河南郑州属中国华

中区域电网,因此根据《2015 中国区域电网基准线排放因子》华中区域电网 $EF_{CO_2,E}$ 的值,取 0.9515 kgCO₂/kW·h; E 为污水处理系统运行阶段的耗电量(kW·h)。

本文所指的物耗碳排放为药剂消耗的碳排放。为达到污水处理后的水质排放标准,在污水处理系统运行过程中会消耗一定量的消毒剂和絮凝剂,这些药剂在其生产和运输等过程中会涉及到碳排放,并且可用相应的碳排放系数进行衡量。物耗碳排放的计算公式如下:

$$M_{CO_2,Y} = \sum EF_{CO_2,Y_i} \times Y_i \times GWP_{CO_2} \quad (4)$$

式中: $M_{CO_2,Y}$ 表示污水处理系统的物耗排放量(kgCO₂e); EF_{CO_2,Y_i} 表示 i 类药剂的 CO₂ 排放因子,单位为 kgCO₂/kg,根据已有研究结果^[24],絮凝剂(包括聚合氯化铝(PAC)、聚丙烯酰胺(PAM)等)取值为 2.5 kgCO₂/kg,消毒剂(包括盐酸、氯酸钠等)取值为 1.4 kgCO₂/kg; Y_i 表示 i 类药剂的消耗量(kg)。

3.2.3 污水处理碳排放影响因素的相关性分析

由于污水处理碳排放(能耗和物耗碳排放)受污水处理量、处理率、进出水水质和浓度这几类因素的影响,且受影响程度有差异,这里采用 SPSS 软件分析城市污水处理系统运行过程中能耗碳排放和物耗碳排放与上述影响因素之间的相关程度(主要通过判断相关系数的大小,以量化污水处理碳排放受污水处理量、处理率、进出水水质和浓度这几类因素不同程度的影响)。运用 SPSS 软件进行相

关性分析的具体方法步骤为:将该厂一期和二期工程2011年全年逐日的吨水能耗碳排放量(能耗碳排放与污水处理量的比值)和吨水物耗碳排放量(物耗碳排放与污水处理量的比值)分别与进水浓度(BOD/TN浓度)、处理率(BOD/TN/回用水处理率)、处理水量的相关数据导入SPSS软件,进行显著性检验和相关性分析。

4 结果与分析

4.1 污水处理总碳排放的特征分析

2011年全年,该污水处理厂的总碳排放为79822.41 tCO₂e,月均碳排放6651.87 tCO₂e,月碳排放的最小(5178.14 tCO₂e)和最大值(8219.90 tCO₂e)分别在12月和8月。该厂一期工程的碳排放总量为38173.57 tCO₂e,月均碳排放3181.13 tCO₂e,无明显季节变化,其中,最大和最小值分别为4267.71 tCO₂e(4月)、2289.38 tCO₂e(8月)。二期工程的总碳排放和月均碳排放分别为41648.85 tCO₂e和3470.74 tCO₂e,月碳排放变化较稳定,最大和最小值分布在12月(4621.81 tCO₂e)和2月(2776.32 tCO₂e)(图4)。

该厂一期工程中,能耗碳排放、物耗碳排放、CH₄排放、N₂O排放分别为9203.98 tCO₂e、883.99 tCO₂e、14627.00 tCO₂e、13458.59 tCO₂e,依次占碳排放总量的24.11%、2.32%、38.31%、35.26%(图5a);二期工程的能耗碳排放、物耗碳排放、CH₄排放、N₂O排放分别为9830.80 tCO₂e、1728.68 tCO₂e、17458.51 tCO₂e、12630.86 tCO₂e,各占总碳排放的23.60%、

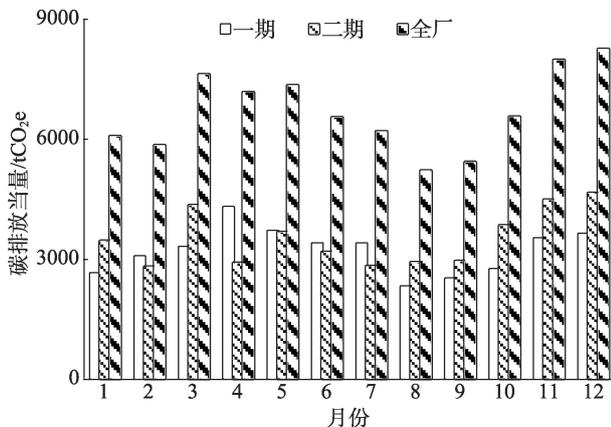


图4 郑州市某污水处理厂的总碳排放变化

Figure 4 Variations of total carbon emissions of the wastewater treatment plant (WWTP) in Zhengzhou City

4.15%、41.92%、30.33%(图5b)。从总体看,该厂不同污水处理环节的碳排放差异明显,直接碳排放占主导地位,贡献率达到了70%左右,其中CH₄排放的贡献率最大,N₂O排放次之;由电力消耗和药剂消耗引起的间接碳排放相对较少。原因在于污水处理过程中对BOD和TN的处理率较高,由此产生的CH₄排放和N₂O排放也相应较多,同时由于污水处理产生的电力消耗和药剂消耗造成的是间接CO₂排放,换算为统一的单位“碳排放当量(CO₂e)”作比较时,CH₄和N₂O的全球变暖潜势值(GWP)分别是CO₂的25和298倍,这就导致了直接碳排放占污水处理全过程的碳排放中占据了主导地位。

在吨水总碳排放(碳排放总量与污水处理总量的比值)中,全厂、一期工程和二期工程的月均值分别为1.06 kgCO₂e/t、1.05 kgCO₂e/t和1.07 kgCO₂e/t。两期工程的吨水总碳排放均有较明显的变化波动(图6),这主要与两期工程每月的污水处理量和回用水处理率的变化有关。

4.2 污水处理直接碳排放的年内动态变化分析

4.2.1 污水处理CH₄排放的动态变化分析

该污水处理厂两期工程的CH₄排放有明显的季节变化,均呈春、冬季排放较多,夏季排放较少的趋势(图7a),这主要与污水处理量和进水BOD浓度的季节变化有关。如,二期工程5月和9月的污水处理量相差不大(5月为347.23×10⁴ t,9月为345.30×10⁴ t),但CH₄排放差异明显(5月和9月分别为1797.24 tCO₂e和939.80 tCO₂e),原因在于二期工程5月和9月的进水BOD浓度差值较大,分别为200 mg/L和87 mg/L,而最终的出水BOD浓度均维持在4 mg/L左右。两期工程的吨水CH₄排放(CH₄排放

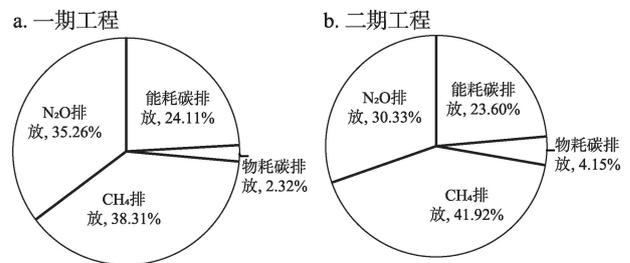


图5 郑州市某污水处理厂的碳排放构成比例

Figure 5 Proportion of carbon emissions of the wastewater treatment plant (WWTP) in Zhengzhou City

2020年6月

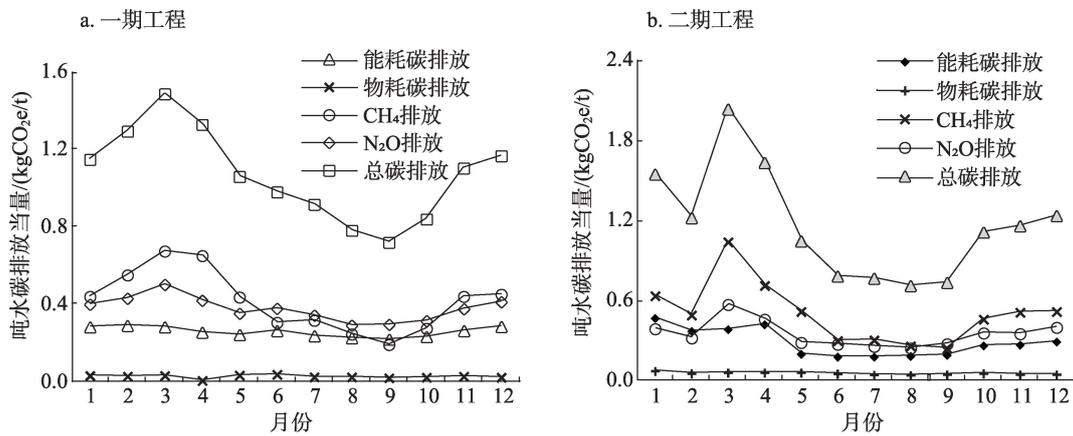


图6 郑州市某污水处理厂的吨水碳排放变化

Figure 6 Variations of carbon emissions per unit volume of wastewater treatment of the wastewater treatment plant (WWTP) in Zhengzhou City

量与污水处理量的比值)的变化趋势和 CH_4 排放的变动基本一致,呈季节变化明显的特点(图6)。不同的污水处理系统对进出水水质中BOD浓度要求的差异会影响 CH_4 排放,例如该厂二期工程对出水水质中BOD浓度的要求严于一期工程(一期和二期工程的出水BOD浓度均值分别为 5.35 mg/L 、 5.28 mg/L),因此造成了二期工程的吨水 CH_4 排放高于一期工程(一期和二期工程的吨水 CH_4 分别为 $0.40 \text{ kgCO}_2\text{e/t}$ 和 $0.45 \text{ kgCO}_2\text{e/t}$)。此外,在污水处理过程中, CH_4 排放也与厌氧反应降解的有机碳有关,在不同的污水处理工艺中,曝气沉砂池、生物池的溶解氧浓度,沉淀池的水温等的差异会直接影响BOD的处理率,进而影响 CH_4 排放的变化。

4.2.2 污水处理 N_2O 排放的动态变化分析

该污水处理厂两期工程的 N_2O 排放呈不同的波

动变化。其中,一期工程的 N_2O 排放月均值为 $1121.55 \text{ tCO}_2\text{e}$, N_2O 排放1~4月和10~12月有大幅度上升,其余月份变化较稳定;二期工程的 N_2O 排放月均值为 $1052.57 \text{ tCO}_2\text{e}$, N_2O 排放的较大值主要分布在3月、11月和12月,较小值主要在1月、2月和4月(图7b)。两期工程的吨水 N_2O 排放(N_2O 排放量与污水处理量的比值)全年变化较平稳,一期和二期工程的吨水 N_2O 排放均值分别为 $0.37 \text{ kgCO}_2\text{e/t}$ 和 $0.33 \text{ kgCO}_2\text{e/t}$ (图6)。从计算公式可知,吨水 N_2O 排放与污水处理量、TN的进出水浓度有关,即污水处理规模、处理工艺和进出水水质(TN浓度)等的差异会影响 N_2O 排放的变化。实质上,污水处理中 N_2O 的产生机理与污水生化处理阶段降解有机氮的过程(降低污水中亚硝酸盐的浓度,以达到污水处理后的排放标准)相关。

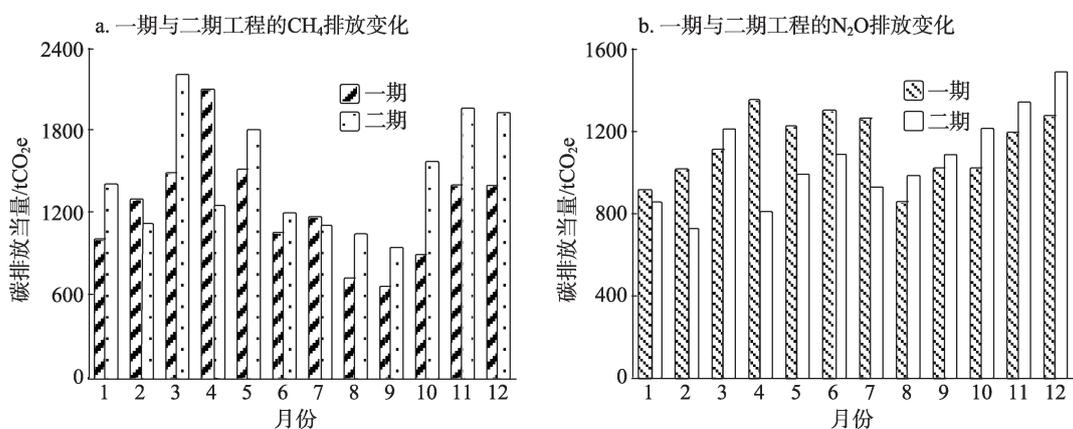


图7 郑州市某污水处理厂的直接碳排放变化

Figure 7 Variations of direct carbon emissions of the wastewater treatment plant (WWTP) in Zhengzhou City

4.3 污水处理间接碳排放的年内动态变化分析

4.3.1 污水处理能耗碳排放的动态变化分析

该污水处理厂两期工程的各月能耗碳排放变化均较平稳,且两期工程的各月能耗碳排放有呈反方向变化的趋势(图8a)。2011年全年,一期和二期工程的月均能耗碳排放分别是767.00 tCO₂e和819.23t CO₂e,其中,一期工程的能耗碳排放较大值主要集中在4—6月,相反地,二期工程的能耗碳排放较小值主要分布在4—6月。在吨水能耗碳排放(能耗碳排放量与污水处理量的比值)中,一期工程的吨水能耗碳排放全年变化态势较稳定,月均值为0.25 kgCO₂e/t,月最大与最小值仅相差0.07 kgCO₂e/t;二期工程的吨水能耗碳排放1—5月期间呈持续下降状态,其余的月份维持平稳变动,月均值为0.24 kgCO₂e/t(图6)。

污水处理系统的碳排放过程是“水—能—碳”

关联的过程,该厂两期污水处理工程的能耗碳排放变化,不仅受污水处理量的影响,还与两期工程不同的污水处理工艺和进出水标准引起的电力消耗差异有关。同时,不同污水处理系统碳排放的“水—能—碳”关联程度有一定的差异,从该厂两期工程的能耗碳排放与其影响因素的相关性分析可知,吨水能耗碳排放与BOD/TN进水浓度、BOD/TN处理率的关系均通过了显著性检验,为低度正相关水平;吨水能耗碳排放与处理水量呈显著的负向相关,其中一期和二期工程的相关系数分别为-0.574、-0.861,表明了污水处理量增加,能耗碳排放有下降的趋势,呈一定的规模效应,且二期工程的规模效应更明显。同时,一期工程的能耗碳排放与回水处理率之间的相关系数为0.176,呈极弱正相关,而二期工程的相关系数是-0.577(表1),为中度负相关,造成该现象的原因是该厂二期工程的回水处理工

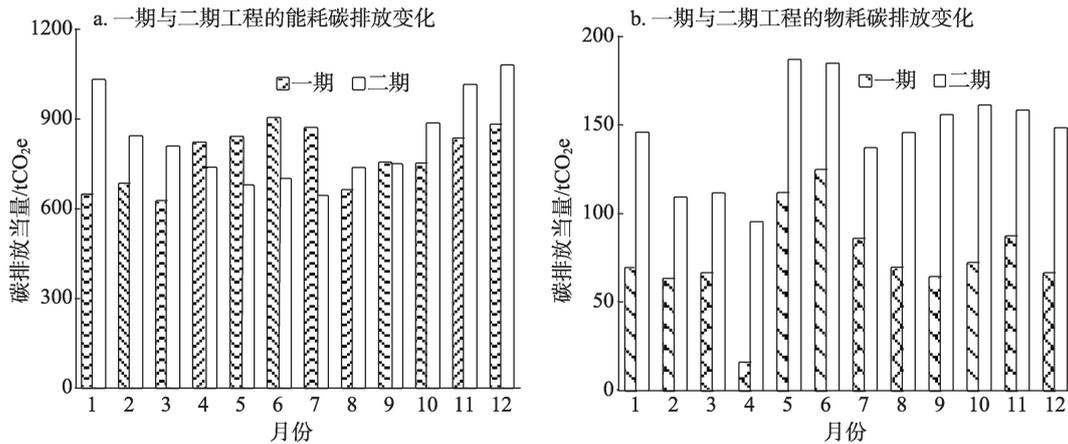


图8 郑州市某污水处理厂的间接碳排放变化

Figure 8 Variations of indirect carbon emissions of the wastewater treatment plant (WWTP) in Zhengzhou City

表1 郑州市某污水处理厂的进水浓度、处理率、处理水量与碳排放的相关性系数

Table 1 Correlation coefficients of influent concentration, treatment rate, wastewater volume, and carbon emissions of the wastewater treatment plant (WWTP) in Zhengzhou City

相关系数	污水处理工艺	进水浓度		处理率			处理水量
		BOD	TN	BOD	TN	回用水	
吨水能耗碳排放/(kgCO ₂ e/t)	一期	0.295**	0.365**	0.122*	0.206**	0.176**	-0.574**
	二期	0.473**	0.486**	0.311**	0.177*	-0.577**	-0.861**
吨水物耗碳排放/(kgCO ₂ e/t)	一期	-0.125*	0.103*	-0.068	0.152**	0.546**	-0.350**
	二期	0.258**	0.154**	0.156**	0.035	-0.259**	-0.613*

注: *、**分别表示在0.05和0.01水平(双侧)上显著相关;相关性系数(r)的相关程度分类: |r| ≥ 0.8时为高度相关, 0.5 ≤ |r| < 0.8时为中度相关, 0.3 ≤ |r| < 0.5时为低度相关, |r| < 0.3时为极弱相关。

2020年6月

艺是一期工程的升级改良版,在污水处理过程中更能体现节能减排和规模效应。综上,主要影响吨水能耗碳排放增减趋势的因子是回用水处理率和污水处理量。

4.3.2 污水处理物耗碳排放的动态变化分析

该污水处理厂两期工程的物耗碳排放有显著差异(图8b),这主要与两期工程不同的回用水处理量有关。2011年全年,该厂二期工程的物耗碳排放总量(1728.68 tCO₂e)约是一期工程(883.99 tCO₂e)的2倍,原因在于一期和二期工程的回用水处理总量分别是 1503.08×10^4 t和 3493.32×10^4 t,回用水处理量越大,消耗的药剂也就越多,相应产生的物耗碳排放就越多。两期工程的物耗碳排放月变化趋势较一致,物耗碳排放的较大值均分布在5—6月份,较小值出现在2—4月份(图8b)。两期工程的吨水物耗碳排放(物耗碳排放量与污水处理量的比值)全年变化较平稳,一期和二期工程的吨水物耗碳排放月平均值分别为0.02 kgCO₂e/t和0.04 kgCO₂e/t(图6)。两期工程的污水处理总量相差不大,但其吨水物耗碳排放均值相差1倍,主要在于二期工程的出水标准要严于一期工程,且二期工程回用水处理量较多,药剂消耗量较大。

与污水处理过程中的能耗碳排放相同,物耗碳排放也受污水处理量、污水处理工艺和进出水水质的影响。各因子对两期工程吨水物耗碳排放的影响没有对吨水能耗碳排放的影响程度明显(表1),如,一期工程的物耗碳排放与BOD/TN进水浓度的相关性系数分别为-0.125、0.103,而一期工程的能耗碳排放与BOD/TN进水浓度的相关性系数分别是0.295和0.365。此外,一期和二期工程的吨水物耗碳排放与BOD、TN处理率的相关性没有通过显著性检验,吨水物耗碳排放的增减趋势基本不受BOD/TN处理率的影响,因为两期工程的BOD和TN处理率全年均较稳定。一期、二期工程的吨水物耗碳排放与回用水处理率、处理水量这两个影响因素的相关显著性水平较高,相关性系数分别为0.546(正向相关)和-0.613(负向相关,体现了规模效应)。

5 讨论与结论

5.1 讨论

城市污水处理系统的碳排放是一个复杂的过

程,是多因素共同作用的结果,即污水处理系统的规模、处理工艺、污水处理量、运行工况、进出水水质要求、回用水处理率、能源消耗类型等的差异会对污水处理过程中的能耗碳排放、物耗碳排放和直接碳排放的变化产生不同程度的影响。Bani等^[27]核算的加拿大某污水处理厂的吨水碳排放为0.39 kgCO₂e/t,该研究结果和本文计算的吨水碳排放(1.06±0.01)kgCO₂e/t差异较大,原因在于Bani等的研究对污水处理碳排放的核算范围局限于生化处理的直接排放,而忽略了能源消耗对碳排放的影响,使得计算结果偏低;宋宝木等^[24]对深圳市某A²/O工艺的污水处理厂的吨水碳排放核算结果为0.29~0.43 kgCO₂e/t,计算结果也偏低,主要是因为本文的碳排放核算范围包括了污水处理过程中污泥处理环节产生的能耗和物耗碳排放,而宋宝木等的研究未考虑该环节的碳排放;Singh等^[13]对英国和印度的50座污水处理厂的碳排放进行了核算,结果发现小规模污水处理系统的吨水碳排放为3.04 kgCO₂e/t,约为本文研究结果的3倍,造成这一现象的主要原因是Singh等核算的小规模污水处理系统运行使用的能源除了电力(碳排放因子较小)之外,还有柴油等其他燃料(碳排放因子较大),且柴油等其他燃料的消耗量较多,而郑州市某污水处理厂的能源消耗只有电力;谢淘等^[28]对中国北方某污水处理厂的碳排放核算结果为0.95 kgCO₂e/t,和本文研究结果相近,原因在于这两座污水处理厂的处理工艺、排放标准、碳排放核算范围等情况基本相同。此外有学者认为,将污水处理量作为评价标准来比较吨水碳排放也有一定的局限性,因为相同的处理水量,若污水处理系统进出水水质指标存在较大差别也会造成其处理过程的碳排放不同^[28]。

事实上,污水处理系统的碳排放研究,一般以污水处理过程为核心^[29],如何实现污水处理过程中的碳减排是应对当前低碳城市建设迫切需要解决的问题之一。从“水—能—碳”关联角度对污水处理过程不同阶段的碳排放进行评估,并探究影响其碳排放动态变化的因素,不仅有利于从污水处理的过程优化、工艺优选与节能改造等方面制定差别化的碳减排措施;还有助于为减缓气候变化和统筹协调城市水、能资源可持续利用政策的制定提供理论

与实践指导。

5.2 结论

本文在“水—能—碳”关联视角下构建城市污水处理系统碳排放核算框架体系,并以郑州市某污水处理厂为具体研究对象,评估了污水处理系统运行阶段不同环节的碳排放,并探讨了其影响因素。主要结论如下:

(1)城市污水处理系统不同环节的碳排放差异明显。各环节碳排放从大到小依次排序为 CH_4 排放、 N_2O 排放、能耗碳排放、物耗碳排放,其中, CH_4 排放和 N_2O 排放这两类直接碳排放占据主导地位,合计约占总碳排放的70%,能耗和物耗碳排放这两类间接碳排放的贡献相对较小,合计约占总碳排放的30%。在污水处理碳排放构成中,直接碳排放的贡献率较大,但间接碳排放同样不容忽视,因此在探索城市污水处理系统低碳运行模式的过程中,可从降低直接碳排放为主要切入点,同时也要兼顾考虑如何减少间接碳排放。

(2)城市污水处理直接碳排放的变化主要受污水处理量和进出水水质浓度(BOD浓度和TN浓度)变化的影响。其中,污水处理量越多,由污水处理生化反应过程产生的直接碳排放就越多;由不同的污水处理工艺和出水水质要求导致的BOD和TN处理率的变化分别可通过影响污水处理厂进水和出水的BOD和TN浓度差,进而导致 CH_4 排放和TN排放发生变化。因此从城市源头节水以降低污水排放量,这有助于通过减少城市污水处理厂的污水处理量进而降低直接碳排放的水平;同时提高污水处理工艺并严格控制进出水水质标准也能在一定程度上实现降低直接碳排放的目标。

(3)城市污水处理间接碳排放与污水处理量、回用水处理率、BOD/TN的浓度和处理率各影响因素之间存在着不同程度的相关关系。其中,吨水能耗碳排放和吨水物耗碳排放与处理水量呈显著的负向相关,表明随着污水处理量增加,能耗和物耗碳排放均有下降的趋势,即呈规模效应;吨水物耗碳排放的增减趋势基本不受BOD/TN处理率的影响,但与回水处理率、污水处理水量的相关性较高。由此在未来可根据城市污水处理间接碳排放与其影响因素之间不同程度的相关关系,针对污水

处理能耗和物耗的碳排放过程制定差别化的碳减排措施。

(4)城市污水处理系统碳排放是多因素共同作用的复杂过程。由于城市污水处理系统不同环节碳排放受污水处理工艺、污水处理量、运行工况、进出水水质要求、回水处理率和能源消耗类型等多因素影响,因此加强城市污水处理系统的资源输入和流通过程的综合管理,推动水、能资源节约和碳减排的协同对于污水处理系统的低碳运行具有重要实践意义。

需要说明的是,由于数据获取较为困难,本文仅采用了2011年的数据对该污水处理厂的碳排放进行了核算,侧重于从污水处理厂“小尺度经济单元”来探讨城市污水处理系统运行过程中资源耦合与碳排放的关系机理;未来还需进一步考虑城市污水处理系统运行各环节、各单元的碳排放,并加强时间序列的研究,以助于进一步探究污水处理运行阶段的碳排放动态变化规律,这对进一步优化污水处理工艺流程、推动城市污水处理系统的节能减排具有重要意义。

参考文献(References):

- [1] Sweetapple C, Fu G, Butler D. Identifying sensitive sources and key control handles for the reduction of greenhouse gas emissions from wastewater treatment[J]. *Water Research*, 2014, 62(5): 249-259.
- [2] 王洪臣. 我国城镇污水处理行业碳减排路径及潜力[J]. *给水排水*, 2017, 53(3): 1-3. [Wang H C. Carbon emission reduction path and potential of urban sewage treatment industry in China[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2017, 53(3): 1-3.]
- [3] Parravicini V, Svardal K, Krampe J. Greenhouse gas emissions from wastewater treatment plants[J]. *Energy Procedia*, 2016, 97: 246-253.
- [4] 孙才志, 姜坤, 赵良仕. 中国水资源绿色效率测度及空间格局研究[J]. *自然资源学报*, 2017, 32(12): 1999-2011. [Sun C Z, Jiang K, Zhao L S. Measurement of green efficiency of water utilization and its spatial pattern in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(12): 1999-2011.]
- [5] 张宁宁, 粟晓玲, 周云哲, 等. 黄河流域水资源承载力评价[J]. *自然资源学报*, 2019, 34(8): 1759-1770. [Zhang N N, Su X L, Zhou Y Z, et al. Water resources carrying capacity evaluation of the Yellow River Basin based on EFAST weight algorithm[J]. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(8): 1759-1770.]

2020年6月

- [6] 李薇, 汤焯, 徐毅. 城市污水处理行业污染物减排与CO₂协同控制研究[J]. 中国环境科学, 2014, 34(3): 681-687. [Li W, Tang Y, Xu Y. Pollutant mitigation and synergistic control of CO₂ in sewage treatment system[J]. China Environmental Science, 2014, 34(3): 681-687.]
- [7] 余灏哲, 李丽娟, 李九一. 基于量-质-域-流的京津冀水资源承载力综合评价[J]. 资源科学, 2020, 42(2): 358-371. [Yu H Z, Li L J, Li J Y. Evaluation of water resources carrying capacity in the Beijing-Tianjin-Hebei Region based on quantity-quality-water bodies-flow[J]. Resources Science, 2020, 42(2): 358-371.]
- [8] 郑思伟, 唐伟, 闫兰玲, 等. 城镇污水处理厂污染物去除协同控制温室气体的核算及排放特征研究[J]. 环境污染与防治, 2019, 41(5): 556-559. [Zheng S W, Tang W, Yan L L, et al. Accounting and emission characteristics study on co-control of pollutants and greenhouse gases in municipal wastewater treatment plant[J]. Environmental Pollution & Control, 2019, 41(5): 556-559.]
- [9] 梁缘毅, 吕爱锋. 中国水资源安全风险评价[J]. 资源科学, 2019, 41(4): 775-789. [Liang Y Y, Lv A F. Risk assessment of water resource security in China[J]. Resources Science, 2019, 41(4): 775-789.]
- [10] 周枕戈, 庄贵阳, 陈迎. 低碳城市建设评价: 理论基础、分析框架与政策启示[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(6): 160-169. [Zhou Z G, Zhuang G Y, Chen Y. Assessment of low-carbon city development: Theoretical basis, analysis framework and policy implications[J]. China Population, Resources and Environment, 2018, 28(6): 160-169.]
- [11] 王安, 赵天忠. 北京市废弃物处理温室气体排放特征[J]. 中国环境监测, 2017, 33(2): 68-75. [Wang A, Zhao T Z. Greenhouse gas emission characteristics of municipal waste management in Beijing [J]. Environmental Monitoring in China, 2017, 33(2): 68-75.]
- [12] 翟萌, 邵越, 徐福军. 西安污水处理厂温室气体排放及减排对策研究[J]. 环境工程, 2016, 34(2): 23-26. [Zhai M, Shao Y, Xu F J. Countermeasures on greenhouse gas emission reduction for the wastewater treatment plants of Xi'an[J]. Environmental Engineering, 2016, 34(2): 23-26.]
- [13] Singh P, Kansal A, Carliell M C. Energy and carbon footprints of sewage treatment methods[J]. Journal of Environmental Management, 2016, 165: 22-30.
- [14] 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[J]. 环境科学, 2018, 39(3): 1256-1263. [Yan X, Qiu D Z, Guo D L et al. Emission inventory of greenhouse gas from urban wastewater treatment plants and its temporal and spatial distribution in China[J]. Environmental Science, 2018, 39(3): 1256-1263.]
- [15] 解清杰, 韩鹏飞, 陈诗龙, 等. CAST工艺污水处理厂CO₂排放特性分析[J]. 环境科技, 2019, 32(3): 39-44. [Xie Q J, Han P F, Chen S L, et al. The characteristics of CO₂ emissions in sewage treatment plant with CAST process[J]. Environmental Science and Technology, 2019, 32(3): 39-44.]
- [16] Singh P, Kansal A. Energy and GHG accounting for wastewater infrastructure[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2018, 128: 499-507.
- [17] Zawartka P, Dorota B K, Agata B. Model of carbon footprint assessment for the life cycle of the system of wastewater collection, transport and treatment[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 1-21.
- [18] Mamais D, Noutsopoulos C, Dimopoulou A, et al. Wastewater treatment process impact on energy savings and greenhouse gas emissions[J]. Water Science and Technology, 2015, 71(2): 303-308.
- [19] Di F S, Massarotti N, Vanoli L. A novel energy assessment of urban wastewater treatment plants[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 163: 304-313.
- [20] Bao Z Y, Sun S C, Sun D Z. Characteristics of direct CO₂ emissions in four full-scale wastewater treatment plants[J]. Desalination and Water Treatment, 2015, 54(4-5): 1070-1079.
- [21] Malila R, Lehtoranta S, Viskari E L. The role of source separation in nutrient recovery-comparison of alternative wastewater treatment systems[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 219: 350-358.
- [22] Koutsou O P, Gatidou G, Stasinakis A S. Domestic wastewater management in Greece: Greenhouse gas emissions estimation at country scale[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 188: 851-859.
- [23] IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Intergovernmental Panel on Climate Change 2006[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [24] 宋宝木, 秦华鹏, 马共强. 污水处理厂运行阶段碳排放动态变化分析: 以深圳某污水处理厂为例[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(10): 204-209. [Song B M, Qin H P, Ma G Q. Analysis for dynamic changes of wastewater treatment plant carbon emissions in operation phase: With a wastewater treatment plant in Shenzhen as an example[J]. Environmental Science and Technology, 2015, 38(10): 204-209.]
- [25] 夏天虹, 董桂君. 我国城镇污水处理厂生命周期的碳排放评估[J]. 环境保护与循环经济, 2018, 38(9): 13-17. [Xia T H, Dong G J. Carbon emission assessment of life cycle of urban sewage treatment plants in China[J]. Environmental Protection and Circular Economy, 2018, 38(9): 13-17.]
- [26] Foley J, Haas D D, Yuan Z, et al. Nitrous oxide generation in full-scale biological nutrient removal wastewater treatment plants[J]. Water Research, 2010, 44(3): 831-844.
- [27] Bani S M, Yerushalmi L, Haghight F. Estimation of greenhouse gas generation in wastewater treatment plants-model development and application[J]. Chemosphere, 2010, 78(9): 1085-1092.
- [28] 谢淘, 汪诚文. 污水处理厂温室气体排放评估[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2012, 52(4): 473-477. [Xie T, Wang C W. Greenhouse gas emissions from wastewater treatment plants[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2012, 52(4): 473-477.]
- [29] 秦华鹏, 袁辉洲, 宋宝木, 等. 城市水系统与碳排放[M]. 北京: 科学出版社, 2014. [Qin H P, Yuan H Z, Song B M, et al. Urban Water System and Carbon Emission[M]. Beijing: Science Press, 2014.]

Carbon emissions of urban wastewater treatment system based on the “water–energy–carbon” nexus

YU Jiao¹, ZHAO Rongqin¹, XIAO Liangang¹, ZHANG Linjing¹, WANG Shuai¹,
CHUAI Xiaowei², HAN Yucheng¹, JIAO Shixing³

(1. School of Surveying & Geo-informatics, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 2. School of Geographic & Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 3. Department of Resources & Environment and Tourism, Anyang Normal University, Anyang 455002, China)

Abstract: The study on carbon emissions of urban wastewater treatment system based on the “water-energy-carbon” nexus can reveal the internal relationship between resource flow, input process, and carbon emissions of a wastewater treatment system, and can provide important references for low-carbon operation and management of wastewater treatment systems. Based on the “water-energy-carbon” nexus, a theoretical framework and accounting method of carbon emissions of urban wastewater treatment system are constructed. The wastewater treatment plant (WWTP) in Zhengzhou City was taken as a case study. Carbon emissions of different links in the operation of the wastewater treatment system were evaluated. Analysis was also made on the factors that affect the dynamic change of carbon emissions in each link of the wastewater treatment system. The research results show that: (1) Among the carbon emissions generated by the operation of the wastewater treatment system, direct carbon emissions are dominant, and indirect carbon emissions (carbon emissions of energy consumption and carbon emissions of material consumption) are relatively small. (2) CH₄ and N₂O emissions per unit volume of wastewater treatment are mainly affected by wastewater treatment volume and water quality. (3) Carbon emissions of energy consumption and material consumption per unit volume of wastewater treatment decrease with the increase of the wastewater treatment volume. (4) Carbon emissions of urban wastewater treatment system are impacted by many factors, such as, wastewater treatment process, wastewater treatment capacity, operating conditions, post-treatment water quality requirements, treatment rate of returned water, and energy consumption types. It is of great significance for the low carbon operation of wastewater treatment system to strengthen the comprehensive management of resource input and circulation process of urban wastewater treatment system, and to promote synergy between water, energy saving, and carbon emissions reduction.

Key words: wastewater treatment system; direct carbon emissions; indirect carbon emissions; “water-energy-carbon” nexus; dynamic change; Zhengzhou City