

江梅,王洪臣,刘达克,等.北京市城市污水余热潜能评估[J].净水技术,2025,44(8):101-108.

JIANG M, WANG H C, LIU D K, et al. Assessment of excess heat potential of urban wastewater in Beijing City[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(8): 101-108.

北京市城市污水余热潜能评估

江梅^{1,*},王洪臣²,刘达克^{1,3},王绕³,杨胜东³,张帅³

(1.北京城市排水集团有限责任公司,北京 100044;2.中国人民大学低碳水环境技术研究中心,北京 100872;3.北京北排能源科技有限公司,北京 100078)

摘要 【目的】城市污水余热稳定,蕴含巨大潜能。污水源热泵将生活污水中的余热回收利用于生活或生产供暖,减少化石能源消耗,是一种绿色新能源技术,有助于节能减排和环境保护。【方法】文章针对北京市城市污水水量变化趋势、水温变化趋势进行分析,并对北京市城市污水系统的余热潜能和节能效益、环境效益进行评估。【结果】北京市城市污水水量充沛,污水处理量达到23亿 m^3/a ,最大流量的波动幅度为42.79%,最小流量的波动幅度为29.07%。不保证5d的最低水量与全年平均流量的比例为0.75,此流量比例可以作为系数,与年平均日处理量乘积作为污水处理厂含上游污水管网污水余热评估流量。北京市冬季水温比气温高,最高水温的波动幅度为35.3%,最低水温的波动幅度为31.4%,基本维持在13~17 $^{\circ}\text{C}$,不保证5d的最低水温13 $^{\circ}\text{C}$ 可作为北京市城市污水余热评估初始水温。北京市目前主要的48家污水处理厂污水大规模开展污水源热泵供热项目,仅一次取热(温差为5 $^{\circ}\text{C}$)供热能力为1378811kW,供热面积达到3447.03万 m^2 ,节约标准煤为34.77万 t/a ,节能率为48.37%。 CO_2 减排量为96.4万 t/a , SO_2 减排量为945 t/a , NO_x 减排量为945 t/a ,粉尘减排量为157.5 t/a 。【结论】北京市城市污水系统能源潜力和节能效益、环境效益巨大。

关键词 城市污水 余热潜能 污水源热泵 节能效益 环境效益

中图分类号: TU991 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)08-0101-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.08.013

Assessment of Excess Heat Potential of Urban Wastewater in Beijing City

JIANG Mei^{1,*}, WANG Hongchen², LIU Dake^{1,3}, WANG Rao³, YANG Shengdong³, ZHANG Shuai³

(1. Beijing Drainage Group Co., Ltd., Beijing 100044, China;

2. Research Center for Low Carbon Technology of Water Environment, Renmin University of China, Beijing 100872, China;

3. Beijing BeiPai Energy Technology Co., Ltd., Beijing 100078, China)

Abstract [Objective] The residual heat of urban wastewater is stable and contains enormous potential. Wastewater source heat pump recovers and utilizes the excess heat from domestic wastewater for heating purposes in daily life or production, reducing fossil energy consumption. It is a green new energy technology that contributes to energy conservation, emission reduction, and environmental protection. [Methods] This paper analyzed the changing trends of urban wastewater volume and water temperature in Beijing, and assessed the excess heat potential, energy-saving benefits and environmental benefits of the urban wastewater system in Beijing. [Results] The urban wastewater volume in Beijing was abundant, with an annual wastewater treatment capacity of 2.3 billion cubic meters. The fluctuation range of the maximum flow rate was 42.79%, and the fluctuation range of the minimum flow rate was 29.07%. It could not be guaranteed that the ratio of the minimum water volume for five days to the annual average flow rate was 0.75. This flow ratio could be used as a coefficient, multiplied by the annual average daily treatment capacity, to evaluate the flow rate of wastewater excess heat in the upstream sewage pipe network of the wastewater treatment plant. The winter water temperature in Beijing was higher than the air temperature, with a fluctuation range of 35.3% for the highest water temperature and 31.4% for the lowest water temperature, which was basically maintained between 13 $^{\circ}\text{C}$ and 17 $^{\circ}\text{C}$. It could not be guaranteed that the minimum water temperature of 13 $^{\circ}\text{C}$ for 5 days could be used as the initial water temperature for the assessment of urban wastewater excess heat in Beijing. At

[收稿日期] 2025-04-07

[通信作者] 江梅(1984—),女,高级工程师,研究方向为污水处理技术、环境监测,E-mail:jiangmei0205@163.com。

present, 48 major wastewater treatment plants in Beijing were carrying out large-scale wastewater source heat pump heating projects, with a single heat extraction (temperature difference of 5 °C) heating capacity of 1 378 811 kW, a heating area of 34.470 3 million square meters, and an annual savings of 347 700 tons of standard coal, with an energy-saving rate of 48.37%. The annual CO₂ emission reduction was 964 000 tons, the annual SO₂ emission reduction was 945 tons, the annual NO_x emission reduction was 945 tons, and the dust emission reduction was 157.5 tons. [**Conclusion**] The energy potential, energy-saving benefits, and environmental benefits of Beijing's urban wastewater system are enormous.

Keywords urban wastewater excess heat potential wastewater source heat pump energy saving benefit environmental benefit

我国能源消耗量巨大,能源结构仍以化石能源为主^[1]。化石能源的消费,特别是煤炭的大量使用,不可避免地产生了大量的大气污染物和二氧化碳,影响空气质量,加剧了温室效应。面临环境污染和气候变化的严峻形势,优化能源结构是我国能源行业的重要发展方向。其中,城市生活污水余热就是一种宝贵的资源,具有很高的利用价值。

城市污水余热稳定,蕴含巨大潜能。城市污水冬季温度高于气温,夏季温度低于气温,一年四季温差相对气温来说波动较小,流量稳定,且赋存的余热较大,易于通过现有的污水管网收集回用。据《2023年中国城市建设状况公报》^[2]数据,截至2023年年末,全国城市排水管网总长度达到95.25万km,同比增长4.27%,污水处理厂处理能力达到2.27亿m³/d,同比增长4.84%;生活污水集中收集率为73.63%,比上年增加3.57%。

污水源热泵技术可以提取污水或再生水作为低温热源,用于给周边建筑供暖制冷,具有较高能效

比,目前是最重要的污水余热利用技术。通过污水源热泵技术将城市污水的余热加以回收利用,可产生显著的环境效益和节能效益^[3-4]。本文对北京市城市污水水量、水温变化趋势进行分析,确定城市污水余热评估流量和评估水温,对北京市城市污水系统的污水源热泵供暖项目中的余热潜能和节能效益、环境效益进行评估,为城市资源利用规划提供参考方案。

1 北京市城市污水余热资源情况

1.1 北京市城市污水资源概况

北京市城市污水资源充沛。按照《2023北京市水务统计年鉴》^[5]公布数据,截至2023年底,北京市共有污水处理厂82家,处理能力达到721.6万m³/d,2023年全年污水处理量为23.01亿m³,污水处理率为97%。2023年北京市重要污水处理厂运行情况,如图1所示。

图1为北京市大中型污水处理厂运行情况,总

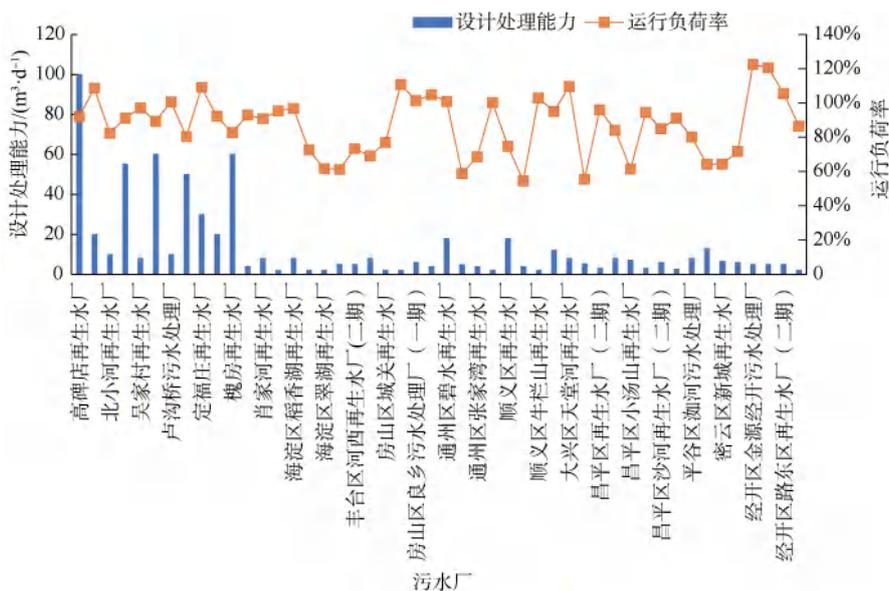


图1 2023年北京市重要污水处理厂运行状况

Fig. 1 Operation Status of Important Urban WWTPs in Beijing in 2023

设计处理能力为 639.2 万 m³/d, 2023 年共处理污水为 20.71 亿 m³, 平均运行负荷率为 87.12%。

鉴于污水源热泵技术绿色低碳、稳定可靠, 北京已在市中心城区 11 座再生水厂推广应用污水源热泵技术。目前已建成利用污水厂出水为厂内以及东升科技园、宝盛里小区等再生水厂周边区域供暖制冷, 此外还利用污水管线原生污水开发了北京南站、洋桥大厦等区域污水源热泵供热制冷项目。截至 2023 年底, 市中心城区污水源热泵服务面积为 225 万 m², 主要项目应用情况如表 1 所示。

1.2 北京市城市污水水量变化情况

北京市为特大型城市, 常住人口为 2 200 余万人, 流动人口为 800 余万人, 城市居民每日排放污水水量基本稳定。以北京某污水处理厂 2020 年 7 月—

2021 年 6 月全年污水进水流量数据为例, 分析城市污水流量全年和供暖季日变化趋势, 如图 2 所示。

表 1 北京市部分污水源热泵项目

Tab. 1 Application Status of Some Wastewater Source Heat Pump System Projects in Beijing

项目名称	热源形式	服务面积/m ²	建成时间	项目类型
东升科技园	再生水	14.3 万	2009 年	公建
东升科技园二期	再生水	55 万	2024 年	公建
北京南站	污水	25 万	2008 年	公建
洋桥大厦	污水	3 万	2011 年	公建
奥运村项目	再生水	41 万	2008 年	住宅、公建
观澳园	再生水	8.94 万	2008 年	学校、住宅
芳清园	再生水	10.7 万	2008 年	学校、住宅
宝盛广场	再生水	6 万	2008 年	公建

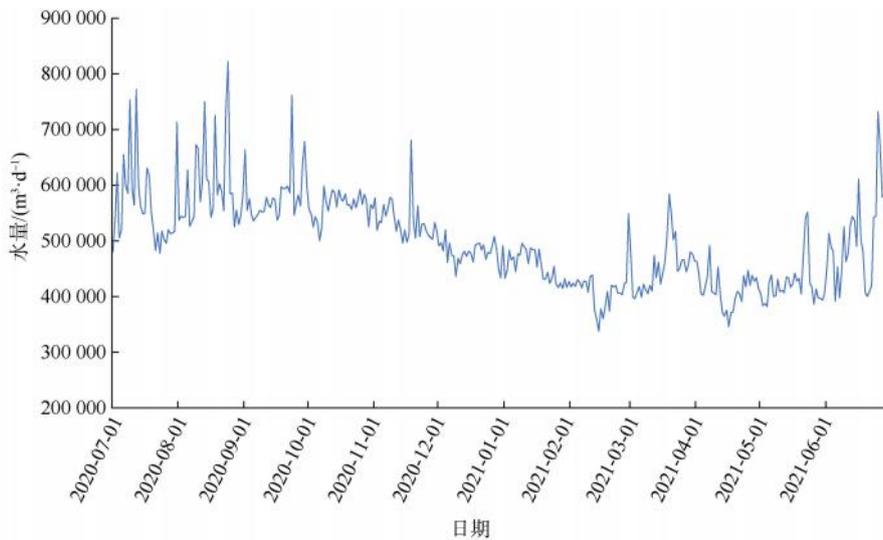


图 2 北京市某污水处理厂进水流量趋势

Fig. 2 Trend of Influent of a WWTP in Beijing

如图 2 所示, 该污水处理厂进水夏季水量高, 冬季水量低。该年度平均流量为 49.94 万 m³/d, 该年最大流量出现在 8 月中旬, 该年最小流量是 2 月中旬。北京市供暖季为 11 月 16 日—次年 3 月 15 日, 共 120 d。在该年供暖季内平均流量为 47.65 万 m³/d; 供暖季最大流量出现 11 月下旬, 最大流量为 68.04 万 m³/d; 供暖季最小流量出现在 2 月中旬, 最小流量为 33.80 万 m³/d。年度最大流量的波动幅度和最小流量的波动幅度计算如式(1)~式(2)。

$$\zeta_{11} = \frac{V_{\max} - V_m}{V_m} \times 100\% \quad (1)$$

其中: ζ_{11} ——该年度的最大流量的波动幅度;

V_{\max} ——该年度的最大流量, m³/d;

V_m ——该年度的平均流量, m³/d。

$$\zeta_{12} = \frac{V_m - V_{\min}}{V_m} \times 100\% \quad (2)$$

其中: ζ_{12} ——该年度的最小流量的波动幅度;

V_{\min} ——该年度的最小流量, m³/d;

V_m ——该年度的平均流量, m³/d。

经计算, 最大流量的波动幅度为 42.79%, 查询气象信息可知, 部分日期水量增加主要是受强降雨影响, 部分雨水进入污水处理厂进口。经计算, 最小流量的波动幅度为 29.07%, 最小流量日期发生在

该年度春节期间,部分在京常住人员离京等原因造成生活污水排放量减少。数据表明,极大水量和极小水量天数都很少,流量基本上稳定在供暖季平均流量附近,且供暖季平均流量与全年平均流量基本持平。

为了更清楚地确定城市污水系统余热潜能评估流量,绘制该年供暖季污水流量延续时间图,如图3所示。

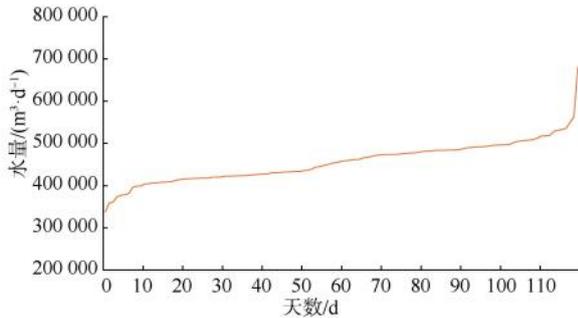


图3 北京市某污水处理厂污水流量延续时间

Fig. 3 Duration of Wastewater Flow in a WWTP in Beijing

北京市供暖室外计算温度采用历年平均不保证5d的日平均温度。按照不保证5d的最低水量作为污水系统余热潜能评估流量^[6],不保证5d的最低水量为37.72万m³/d。此流量可以作为该污水系统开发污水源热泵项目的规划设计流量,该流量(37.72万m³/d)与全年平均流量(49.94万m³/d)的比例约为0.76,在无法获得单日水量准确数据的情况下,可以用这个系数乘以污水处理厂日平均处理量作为城市污水系统潜能评估流量。

1.3 北京市城市污水供暖季水温变化情况

北京市地处亚热带,冬季气温在-5.0~5.0℃,城市污水日均温度较气温高一些。以北京某污水处理厂进水2020年11月中旬—2021年4月中旬供暖季水温数据如图4所示。

图4数据显示,在该年供暖季内此污水处理厂平均水温为15.3℃;最高水温出现11月下旬,最高水温为20.7℃;最低水温出现在1月上旬,最低水温为10.5℃。年采暖季最高水温的波动幅度和最低水温的波动幅度如式(3)和式(4)。

$$\zeta_{21} = \left(\frac{t_{\max} - t_m}{t_m} \right) \times 100\% \quad (3)$$

其中: ζ_{21} ——该年度采暖季最高水温的波动幅度;

t_{\max} ——该年度采暖季最高水温,℃;

t_m ——该年度采暖季平均水温,℃。

$$\zeta_{22} = \left(\frac{t_m - t_{\min}}{t_m} \right) \times 100\% \quad (4)$$

其中: ζ_{22} ——该年度采暖季最低水温的波动幅度;

t_{\min} ——该年度采暖季最低水温,℃;

t_m ——该年度采暖季平均水温,℃。

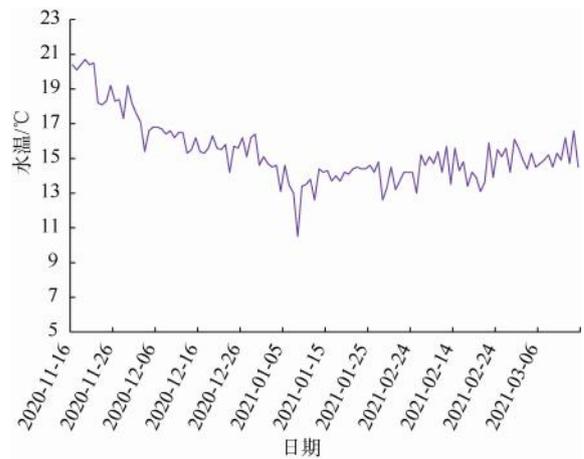


图4 北京市某污水处理厂供暖季进水水温变化趋势

Fig. 4 Trend of Influent Temperature during Heating Supply Season at a WWTP in Beijing

经计算,最高水温的波动幅度为35.3%,最低水温的波动幅度为31.4%。由图5可知,低水温集中在1月上中旬,经气象信息查询低水温是寒流所致。供暖季大部分时间水温集中在13~17℃,在整个供暖季120d中,在13~17℃这个水温段的时间为99d,比例为82.5%。城市污水冬季水温稳定,波动幅度较小。

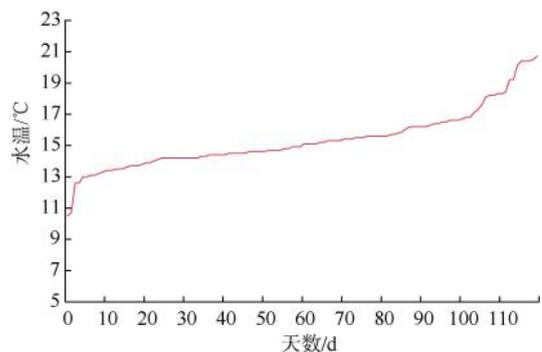


图5 北京某污水处理厂进水水温延续时间

Fig. 5 Duration of Influent Temperature at a WWTP in Beijing

同样,为了确定污水系统余热潜能评估水温,绘制该供暖季污水水温延续时间图,如图5所示。由图5可知,不保证5 d的最低水温为13℃,此温度可以作为城市污水系统余热评估初始水温。

2 北京市城市污水余热潜能和节能效益、环境效益评估

2.1 北京市城市污水余热潜能评估

北京市城市污水水量充沛,季节波动幅度不大,冬季水温恒定,基本维持在13~17℃,是良好的低品位热源,适宜作为污水源热泵项目的热源。本文就1.1小节中2023年北京市重要大中型污水处理厂运行数据,开展污水余热潜能评估。

以污水处理厂污水(再生水)作为污水源热泵项目热源,供热能力计算如式(5)。

$$Q_g = \frac{\varepsilon C m \times \Delta t \times 1\,000}{(\varepsilon - 1) \times 24 \times 3\,600} \quad (5)$$

其中: Q_g ——污水源热泵供热能力,kW;

ε ——污水源热泵系统能效比(COP);

C ——水的比热容,kJ/(kg·℃),取值为4.2 kJ/(kg·℃);

m ——污水源热泵系统取水量,m³/d;

Δt ——取热温差,℃。

以污水处理厂污水(再生水)作为污水源热泵项目热源,供热面积计算如式(6)。

$$F = \frac{Q_g \times 1\,000}{q} \quad (6)$$

其中: F ——供热面积,m²;

Q_g ——污水源热泵供热能力,kW;

q ——热负荷系数,W/m²。

按照2023年北京市各主要污水处理厂的实际污水处理负荷,与设计处理能力,计算日平均处理水量,采用本文1.2小节中最小水量与平均水量的比例经验值0.75,计算供暖季最小水流量,作为城市污水余热评估流量。污水源COP取值为4.0,取热温差取值为5℃,热负荷系数取值为40 W/m²。根据式(5)和式(6),评估北京市城市污水系统的供热潜能,结果如表2所示。

表2 北京市城市污水系统供热潜能

Tab. 2 Heating Supply Potential of Beijing Urban Wastewater System

名称	评估流量/ (m ³ ·d ⁻¹)	供热能力/kW	供热面积/m ²	年供暖量/ (kW·h)	热泵供暖年耗 电量/(kW·h)
高碑店再生水厂	69.05万	223 778	559.44万	64 448万	16 112
酒仙桥再生水厂	16.29万	52 787	131.97万	15 203万	3 801
北小河再生水厂	6.18万	20 018	50.05万	5 765万	1 441
清河再生水厂	37.59万	121 810	304.52万	35 081万	8 770
吴家村再生水厂	5.83万	18 894	47.24万	5 442万	1 360
小红门再生水厂	40.19万	130 244	325.61万	37 510万	9 378
卢沟桥污水处理厂	7.55万	24 464	61.16万	7 046万	1 761
清河第二再生水厂	30.14万	97 684	244.21万	28 133万	7 033
定福庄再生水厂	24.55万	79 559	198.90万	22 913万	5 728
高安屯再生水厂	13.84万	44 849	112.12万	12 916万	3 229
槐房再生水厂	37.22万	120 633	301.58万	34 742万	8 686
北苑再生水厂	2.79万	9 045	22.61万	2 605万	651
肖家河再生水厂	5.45万	17 671	44.18万	5 089万	1 272
五里坨污水处理厂	1.43万	4 641	11.60万	1 337万	334
海淀区稻香湖再生水厂	5.81万	18 824	47.06万	5 421万	1 355
海淀区永丰再生水厂	1.09万	3 530	8.82万	1 017万	254
海淀区翠湖再生水厂	0.93万	2 999	7.50万	864万	216
丰台区河西再生水厂	2.30万	7 441	18.60万	2 143万	536

(续表2)

名称	评估流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	供热能力/kW	供热面积/ m^2	年供暖量/ ($\text{kW} \cdot \text{h}$)	热泵供暖年耗 电量/($\text{kW} \cdot \text{h}$)
丰台区河西再生水厂(二期)	2.75 万	8 914	22.29 万	2 567 万	642
门头沟区第二再生水厂	4.14 万	13 424	33.56 万	3 866 万	967
房山区城关再生水厂	1.16 万	3 745	9.36 万	1 079 万	270
房山区城关污水处理厂	1.66 万	5 386	13.47 万	1 551 万	388
房山区良乡污水处理厂(一期)	4.56 万	14 782	36.95 万	4 257 万	1 064
房山区良乡污水处理厂(二期)	3.14 万	10 183	25.46 万	2 933 万	733
通州区碧水再生水厂	13.62 万	44 131	110.33 万	12 710 万	3 177
通州区河东再生水厂	2.12 万	6 858	17.14 万	1 975 万	494
通州区张家湾再生水厂	2.06 万	6 668	16.67 万	1 920 万	480
通州区马驹桥再生水厂	1.50 万	4 876	12.19 万	1 404 万	351
顺义区再生水厂	10.09 万	32 686	81.71 万	9 413 万	2 353
顺义区马坡再生水厂	1.64 万	5 299	13.25 万	1 526 万	382
顺义区牛栏山再生水厂	1.54 万	4 999	12.50 万	1 440 万	360
大兴区黄村再生水厂	8.56 万	27 746	69.37 万	7 991 万	1 998
大兴区天堂河再生水厂	6.58 万	21 313	53.28 万	6 138 万	1 535
昌平区污水处理厂	2.25 万	7 277	18.19 万	2 096 万	524
昌平区再生水厂(二期)	2.16 万	7 002	17.51 万	2 017 万	504
昌平区未来科技城再生水厂	5.04 万	16 347	40.87 万	4 708 万	1 177
昌平区小汤山再生水厂	3.22 万	10 447	26.12 万	3 009 万	752
昌平区沙河再生水厂(一期)	2.13 万	6 888	17.22 万	1 984 万	496
昌平区沙河再生水厂(二期)	3.82 万	12 381	30.95 万	3 566 万	891
昌平区马池口镇再生水厂	1.71 万	5 534	13.83 万	1 594 万	398
平谷区洳河污水处理厂	4.80 万	15 571	38.93 万	4 484 万	1 121
怀柔区再生水厂	6.25 万	20 270	50.67 万	5 838 万	1 459
密云区新城再生水厂	3.14 万	10 162	25.40 万	2 927 万	732
延庆区城西再生水厂	3.23 万	10 464	26.16 万	3 014 万	753
经开区金源经开污水处理厂	4.60 万	14 902	37.25 万	4 292 万	1 073
经开区路东区再生水厂(一期)	4.52 万	14 657	36.64 万	4 221 万	1 055
经开区路东区再生水厂(二期)	3.96 万	12 832	32.08 万	3 696 万	924
经开区南区再生水厂	1.30 万	4 200	10.50 万	1 209 万	302

由表 2 可知,以北京市目前主要的 48 家污水处理厂污水大规模开展污水源热泵供热项目,评估城市污水余热潜能,一次取热(温差为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$)供热能力为 $1\,378\,811\text{ kW}$,供热面积达到 $3\,447.03\text{ 万 m}^2$ 。

2.2 北京市城市污水余热利用节能效益评估

以北京市目前主要的 48 家污水处理厂污水大规模开展污水源热泵供热项目,评估城市污水余热利用的节能效益。

(1)污水源热泵项目年供暖总量和年耗电总量
污水源热泵系统电单耗计算如式(7)。

$$Q_w = \frac{C_m \times \Delta t \times 1\,000}{(\varepsilon - 1) \times 24 \times 3\,600} \quad (7)$$

其中: Q_w ——污水源热泵系统电单耗, kW 。

以北京市目前主要的 48 家污水处理厂的污水大规模开展污水源热泵供热项目,污水源 COP 取值为 4.0,取热温差取值为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$,热负荷系数取值为

40 W/m²,北京市供暖天数为120 d。通过式(5)和式(7)计算各污水处理厂的污水作为污水源热泵热源的一个年度供暖季的供暖量和耗电量,如表2所示。通过分析表2数据可知,北京市城市污水余热开展污水源热泵项目供暖总量为397 097万kW·h/a,耗电总量为99 274万kW·h/a。用户(以火电计)每使用1 kW·h电相当于燃烧了0.373 8 kg标准煤,由此计算污水源热泵项目供暖期总耗煤总量为37.11万t。

(2)常规供暖年耗煤量

选取燃煤锅炉房作为比较对象,供暖总量为397 097万kW·h/a,锅炉效率为68%,标准煤的热值为29 270 kJ/kg,则实际煤耗为0.181 kg/(kW·h),通过计算可以得出常规燃煤锅炉耗煤总量为71.88万t。

(3)节能量和节能率

将北京市48家污水处理厂的污水开展污水源热泵供暖项目和常规燃煤锅炉作为供暖方式项目对比,常规燃煤锅炉年耗煤总量为71.88万t,污水源热泵项目供暖期年耗煤总量为37.11万t,则节能量为34.77万t,节能率为48.37%。

2.3 北京市城市污水余热利用环境效益评估

以北京市目前主要的48家污水处理厂污水大规模开展污水源热泵供热项目,评估城市污水余热利用的环境效益。

(1)二氧化碳(CO₂)减排量

依据《IPCC2006 国家温室气体清单指南》(2019修订版),标准煤的CO₂排放因子为2.772 5 kg CO₂/(kg 标准煤)^[7],污水源热泵项目节约煤量为34.77万t/a,则CO₂减排量为96.40万t。

(2)二氧化硫(SO₂)减排量

按照《锅炉大气污染物排放标准》(GB 13271—2014)^[8]规定新建锅炉排放标准,SO₂为300 mg/m³,氮氧化物为300 mg/m³,烟尘为50 mg/m³。煤烟排放量以9.071 4 m³/kg计,污水源热泵项目节约煤量为34.77万t/a,则烟气减排量为3.15×10⁹ m³,SO₂减排量为945 t。

(3)NO_x减排量

氮氧化物减排量为945 t。

(4)粉尘减排量

粉尘减排量为157.5 t。

以北京市目前主要的48家污水处理厂污水大规模开展污水源热泵供热项目,城市污水余热利用的环境效益如下。每年可以减排CO₂ 96.4万t,减排SO₂ 945 t,减排NO_x 945 t,减排粉尘减排157.5 t,环境效益显著。

3 总结

(1)以北京市城市污水系统为例,对城市污水水量变化趋势、水温变化趋势进行分析。北京市城市污水水量充沛,年污水处理量达到23亿m³,最大流量的波动幅度为42.79%,最小流量的波动幅度为29.07%,不保证5 d的最低水量与全年平均流量的比例为0.75,此流量比例可以作为系数,与年平均日处理量乘积作为污水处理厂含上游污水管网污水余热评估流量。北京市冬季水温比气温高,最高水温的波动幅度为35.3%,最低水温的波动幅度为31.4%,基本维持在13~17℃,不保证5 d的最低水温13℃可作为北京市城市污水余热评估初始水温。

(2)对北京市城市污水系统开展污水源热泵供暖项目的余热潜能和节能效益、环境效益评估,能源潜力和节能效益、环境效益巨大。北京市目前主要的48家污水处理厂污水大规模开展污水源热泵供热项目,仅一次取热(温差为5℃)供热能力为1 378 811 kW,供热面积达到3 447.03万m²,节约标准煤34.77万t/a,节能率为48.37%。CO₂减排量为96.4万t/a,SO₂减排量为945 t/a,NO_x减排量为945 t/a,粉尘减排量为157.5 t/a。

参考文献

- [1] 国家统计局. 中华人民共和国2023年国民经济和社会发展统计公报[R/OL]. (2024-02-29)[2025-04-07]. https://www.stats.gov.cn/xxgk/sjfb/tjgb2020/202402/t20240229_1947923.html. National Bureau of Statistics. Statistical bulletin on national economic and social development in 2023[R/OL]. (2024-02-29)[2025-04-07]. https://www.stats.gov.cn/xxgk/sjfb/tjgb2020/202402/t20240229_1947923.html.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2023年中国城市建设状况公报[R/OL]. (2024-11-04)[2025-04-07]. <https://www.gscx.gov.cn/zfxxgk/public/32128290/147946462.html>. Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. China urban construction status bulletin in 2023[R/OL]. (2024-11-04)[2025-04-07]. <https://www.gscx.gov.cn/zfxxgk/public/32128290/147946462.html>.
- [3] 刘羊九,王云山,姜衍礼,等. 某污水源热泵系统的节能环保

- 保分析[J]. 制冷与空调, 2018, 18(4): 62-65.
- LIU Y J, WANG Y S, JIANG Y L, et al. Analysis on energy-saving and environmental protection of one sewage source heat pump system[J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2018, 18(4): 62-65.
- [4] 李文卓, 刘慧卿, 杨伟, 等. 污水源热泵技术应用和效益分析[J]. 能源与节能, 2022(11): 88-918.
- LI W Z, LIU H Q, YANG W, et al. Application and benefit analysis of sewage source heat pump technology [J]. Energy and Energy Conservation, 2022(11): 88-918.
- [5] 北京市水务局. 2023 北京市水务统计年鉴[R/OL]. (2024-09-22) [2025-04-07]. <https://swj.beijing.gov.cn/zwgk/swtjnj/202408/P020240828538524300133.pdf>.
- Beijing Municipal Water Affairs Bureau. 2023 Beijing municipal water affairs statistical yearbook [R/OL]. (2024-09-22) [2025-04-07]. <https://swj.beijing.gov.cn/zwgk/swtjnj/202408/P020240828538524300133.pdf>.
- [6] 张承虎, 黄欣鹏, 孙德兴. 城市污水热能资源化理论与技术应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021: 230-234.
- ZHANG C H, HUANG X P, SUN D X. Theory and technical application of urban sewage thermal energy resource utilization [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021: 230-234.
- [7] Intergovernmental Panel on Climate Change. The intergovernmental panel on climate change[R/OL]. (2024-8-22) [2025-04-07]. <https://www.ipcc.ch/>.
- [8] 中华人民共和国生态环境部, 国家市场监督管理总局. 锅炉大气污染物排放标准: GB 13271—2014[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2014.
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision. Emission standard of air pollutants for boiler: GB 13271—2014 [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2014.

(上接第 62 页)

- CHEN T, CUI F Y, XU Y Q, et al. Drinking water treatment plant streams recycle for strengthening coagulation efficiency of low turbidity water and its water quality safety evaluation [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(5): 21-25.
- [17] 姜继平, 李玉立, 王鹏, 等. 水厂低温低浊排泥水混凝处理工艺设计优化 [J]. 净水技术, 2018, 37(8): 61-65.
- JIANG J P, LI Y L, WANG P, et al. Design optimization of coagulation treatment process for sludge wastewater of low temperature and low turbidity in WTP [J]. Water Purification Technology, 2018, 37(8): 61-65.
- [18] 童禛恭, 钟赐龙, 刘卓尧, 等. 微涡流协同排泥水回流混凝增效中试研究[J]. 水处理技术, 2021, 47(10): 75-79.
- TONG Z G, ZHONG C L, LIU Z Y, et al. Pilot-scale study on coagulation synergism of micro-vortex synergistic sludge water reflux[J]. Technology of Water Treatment, 2021, 47(10): 75-79.
- [19] QIAN Y K, HU Y, CHEN Y, et al. Haloacetamides and haloacetamides precursors in filter backwash and sedimentation sludge water during drinking water treatment [J]. Water Research, 2020, 186: 116346. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116346.
- [20] CHEN H, LIN T, WANG P F, et al. A novel solar-activated chlorine dioxide process for atrazine degradation in drinking water [J]. Water Research, 2023, 239: 120056. DOI: 10.1016/j.watres.2023.120056.
- [21] CHEN H, LIN T, WANG P F, et al. Novel solar/sulfite advanced oxidation process for carbamazepine degradation: Radical chemistry, transformation pathways, influence on disinfection byproducts and toxic changes [J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 451: 138634. DOI: 10.1016/j.cej.2022.138634.
- [22] LIU Y H, GUO X Z, WANG Z J, et al. Research progress of N-nitrosamine detection methods: A review [J]. Bioanalysis, 2022, 14(16): 1123-1135.
- [23] SGROI M, VAGLIASINDI F G A, SNYDER S A, et al. N-Nitrosodimethylamine (NDMA) and its precursors in water and wastewater: A review on formation and removal [J]. Chemosphere, 2018, 191: 685 - 703. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.10.089.
- [24] QIAN Y K, CHEN Y N, HU Y, et al. Formation and control of C- and N-DBPs during disinfection of filter backwash and sedimentation sludge water in drinking water treatment [J]. Water Research, 2021, 194: 116964. DOI: 10.1016/j.watres.2021.116964.
- [25] LIAO X B, CHEN C, ZHANG J X, et al. Operational performance, biomass and microbial community structure: impacts of backwashing on drinking water biofilter [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22(1): 546-554.