

述评与讨论

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.08.002

## 中国城镇污水处理厂能耗统计与基准分析

张羽就, 席佳锐, 陈玲, 宫徽

(同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 基于《城镇排水统计年鉴(2016)》数据, 针对全国范围内1 291座城镇污水处理厂的单位能耗, 使用归一化方法进行统计分析, 揭示了污水厂规模、处理水量负荷率、水处理工艺、出水标准和进水COD等因素与单位污水处理能耗的关系, 探究了双因素协同影响下的能耗情况。研究表明, 我国污水处理厂的单位污水能耗均值为 $(0.317 \pm 0.229) \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ , 选取的五种因素与能耗之间存在显著关系, 并存在一定协同效应。结合污水厂自身规模、进水水质和水量负荷等条件, 给出现阶段我国城镇污水处理厂能耗基准表。建议制定阶段性发展规划, 短期内所有污水处理厂均应以单位能耗50%作为能耗基准值, 开展污水厂节能降耗工作。随着运营逐渐稳定和操作水平上升, 未来可采用前25%或10%作为能耗基准值。

**关键词:** 污水处理厂; 单位污水处理能耗; 能耗基准

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)08-0008-10

## Energy Consumption Statistics and Benchmarking Analysis of Urban Wastewater Treatment Plants (WWTPs) in China

ZHANG Yu-jiu, XI Jia-rui, CHEN Ling, GONG Hui

(College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Based on energy consumption data of 1 291 wastewater treatment plants (WWTPs) from the *China Urban Drainage Statistical Yearbook* (2016), energy consumption statistical analysis was conducted with the normalized method, revealing the interaction between energy consumption and various factors including scale, loading rate, treatment process, effluent standard and influent COD of the WWTPs. The interactive effects of two factors were investigated. The total average unit energy consumption was  $(0.317 \pm 0.229) \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$  in China. There was a significant relationship between the five selected factors and energy consumption, and there was a certain synergistic effect. A matrix table of China WWTP energy benchmarking was constructed based on scale, influent quality and loading rate. Finally, this research proposed to formulate a phased development plan for WWTP energy management strategies. In the short term, the median value (top 50%) of statics should be set as the benchmarking, and the value of top 25% or 10% should be considered as benchmarking in the long-term plan with the gradual stability of operation and the rise of operation level.

**Key words:** WWTPs; unit energy consumption of wastewater treatment; energy consumption benchmarking

面向未来的污水处理愈来愈重视污水处理过程的能耗控制,其目标从“节能降耗”逐步发展到“能源自给”的长远目标。2015年联合国可持续发展峰会上正式通过17个全球可持续发展目标,对建设可持续城市和社区以及污水处理厂的节能降耗、减少碳排放提出了较高要求。目前,发达国家的污水处理能耗占据全社会总能耗相当大的比重。美国自来水和污水处理能耗达到市政公用事业能耗的 $1/3$ <sup>[1]</sup>。挪威持续8年的研究表明,能源成本一直占据水处理总成本的主导地位<sup>[2]</sup>。英国废水处理行业2007年左右成为第四大电力密集型行业<sup>[3]</sup>。我国污水处理起步略晚,但增速较快,目前污水处理总体量已经达到世界前列。2007年—2017年,我国水供应与水处理能源消耗总量从 $648.06 \times 10^8 \text{ MW} \cdot \text{h}$ 增长至 $1216.75 \times 10^8 \text{ MW} \cdot \text{h}$ ,污水处理过程的能源消耗控制具有重要现实意义。能耗基准是开展污水厂能源管理、优化污水处理能耗的有力工具<sup>[3]</sup>,反映了一定条件下单位体积污水处理所需能耗的基本水准。能耗基准按用途可分为与历史能耗对比的纵向基准和与同类型项目对比的横向基准<sup>[4]</sup>等。发达国家在污水处理能耗基准研究领域开展了大量工作。2008年德国联邦环境署编写了最早的污水处理能源消耗手册<sup>[5]</sup>,该手册为欧洲各国提供了有价值的参考基准。美国<sup>[6]</sup>、日本<sup>[7]</sup>、澳大利亚<sup>[5]</sup>、奥地利<sup>[8]</sup>、意大利<sup>[9]</sup>等国学者相继研究制定了本国的污水处理厂能耗基准。在能耗基准的选取依据上,意大利采用大量污水厂能耗统计数据的第一四分位数(前25%)作为能耗基准,奥地利以统计数据的前10%和中位数为能耗基准,美国、日本等国则给出不同处理规模污水处理的能耗基准范围。总体上,目前污水处理能耗基准并无统一定义,各国往往根据自身实际需求开展相关研究,以指导本国污水处理厂的能源管理工作。

在污水处理能耗不断增长和可持续发展目标指引的双重背景下,基于我国污水处理厂长期历史统计数据,有必要制定一套可供参照的能耗基准,有助于我国污水处理厂的能源消耗优化与管理。因基准单位不同、地域及出水标准差异、工艺单元参数差异等因素,现有的国外能耗基准不适用于我国的污水处理行业。我国污水处理能耗研究中,多以污水处理全过程能耗分析为主<sup>[10]</sup>,部分文献提出了污水处理能耗单因素基准<sup>[11]</sup>,缺少近期污水处理能耗分析

及多因素下的能耗基准。本研究以城镇供水排水协会发布的全国城镇污水处理厂吨水能耗数据为研究对象,分析污水厂规模、处理水量负荷率、水处理工艺、出水标准和进水COD等因素与单位能耗(单位水量电耗)之间的关系,最终提出多因素综合作用下的能耗基准矩阵表。

## 1 数据来源与研究方法

数据来源于中国城镇供水排水协会编撰的《城镇排水统计年鉴(2016)》,包含全国26个省、市、自治区(辽宁、湖北、甘肃、青海、新疆五个省及港澳台地区未被年鉴收录)的城镇污水处理情况(不含建制镇及以下地区),共涵盖了1353座污水处理厂在统计年份的生产运营信息和年处理规模、年用电量、处理工艺等信息。经校核,各省污水排放量和污水处理总量的数据均与《中国城市建设统计年鉴(2016)》一致。由于北京市、内蒙古自治区和西藏自治区缺失部分污水厂的电耗信息,实际分析对象共涉及1291座污水处理厂。2016年全国城镇污水处理总量为 $529.81 \times 10^8 \text{ m}^3$ (住房和城乡建设部)。尽管调查数据缺失部分省份数据,但其覆盖的污水处理总量达到 $468.67 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ,约占全国总量的88.5%,具有一定的代表性。

目前污水处理单位能耗研究领域的常见分析指标有单位处理水量电耗( $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ )、单位污染物削减量电耗( $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{kgCOD}$ 或 $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{kgNH}_3 - \text{N}$ )和年服务人口当量电耗 $[\text{kW} \cdot \text{h}/(\text{PE} \cdot \text{a})]$ 三种。由于我国缺乏污水处理厂服务人口当量数据,故分别选取单位处理水量、COD削减当量和氨氮削减当量与总电耗进行相关性分析,其中处理水量与总电耗相关性最好, $R^2$ 为0.8286,COD削减当量和氨氮削减当量的 $R^2$ 分别为0.7703和0.7313。欧洲污水处理厂规划过程中常采用人口当量水量及污染代表污水处理厂规模,而我国习惯以污水水量代表污水处理厂规模。同时考虑到基于水量的能耗单位在我国文献中得到广泛使用<sup>[12]</sup>,故选择单位处理水量电耗( $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ )作为能耗分析对象。

使用归一化方法<sup>[13]</sup>,利用R语言对1291座污水处理厂数据进行统计分析,探索污水处理能耗的主要影响因素及其相互关系,依照规模量为权重进行加权计算,给出单因素、双因素下的能耗分析和多因素基准。基于污水处理规模量的加权均值和标准差的计算分别见式(1)和式(2)。在此分析过程中,

重点关注电耗,暂不考虑其他能耗。

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i \times E_i}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad (1)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n S_i}} \quad (2)$$

式中: $n$ 为污水处理厂总数; $\bar{x}$ 为加权均值; $S_i$ 为第*i*个污水厂的日污水规模量; $E_i$ 为第*i*个污水厂的单位水量电耗; $\sigma$ 为加权标准差。

## 2 能耗统计分析

### 2.1 污水厂的统计描述与因素分析

对我国1291座污水处理厂的数据统计分析表明,单位能耗均值为 $(0.317 \pm 0.229) \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ,在95%的置信区间内,单位能耗为 $0.030 \sim 1.418 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 。统计数据还显示,我国污水处理厂能源消耗差异较明显,污水厂规模、处理水量负荷率、水处理工艺、出水标准等因素会影响污水处理厂的单位能耗<sup>[14]</sup>。由于我国幅员辽阔,地域差异使得进水存在差异,以COD为代表的进水水质也会影响单位能耗。将以上五种因素分别划分区间,其中各区间内污水处理厂的数量分布见图1。

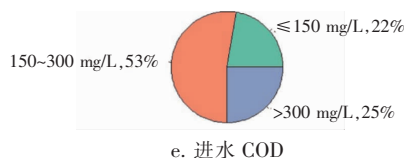
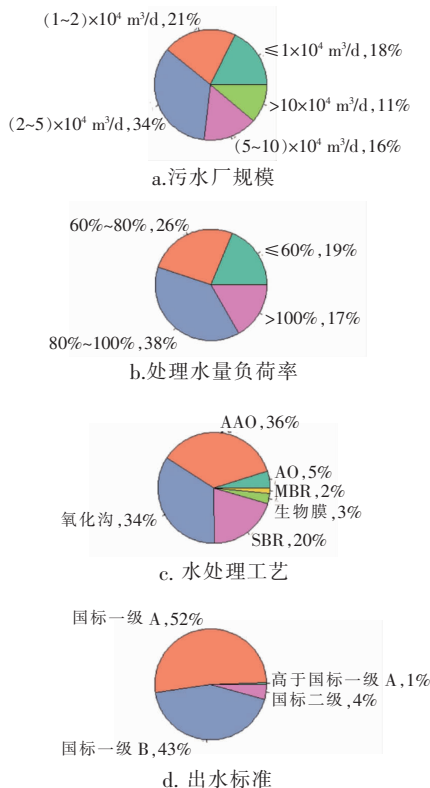


图1 污水处理厂不同条件下的整体分布情况

Fig.1 Overall distribution of WWTPs under different influencing factors

目前,我国污水处理厂规模在 $(2 \sim 5) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的最多, $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 以下规模的污水处理厂数量占到73%。55%的污水处理厂负荷率 $> 80\%$ ,仅有一半左右的污水处理厂负荷率较好。我国处理工艺以厌氧-缺氧-好氧法(AAO)、氧化沟工艺和序批式活性污泥法(SBR)为主,厌氧好氧工艺(AO)、生物膜法、膜生物反应器(MBR)和其他工艺仅占10%左右。96%的污水处理厂出水都达到国家一级标准,出水高于国标一级A的污水处理厂约占1%。污水处理厂进水COD分布较为集中,多分布于150~300  $\text{mg/L}$ 。

### 2.2 单因素控制下的污水能耗分析

#### 2.2.1 不同规模下的能耗情况

污水处理单位能耗与污水处理厂规模密切相关。芬兰<sup>[4]</sup>、意大利<sup>[9]</sup>、奥地利<sup>[8]</sup>、美国<sup>[6]</sup>等研究表明,单位能耗一般随处理规模增大而减少。我国污水处理厂单位能耗随规模区间的变化趋势如图2所示。由图2可知,单位能耗随规模增大而递减,规模小可能会消耗更多能源。此外,规模 $< 2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 时单位能耗离散程度较大,相比之下大规模污水处理厂具有更高的稳定性。

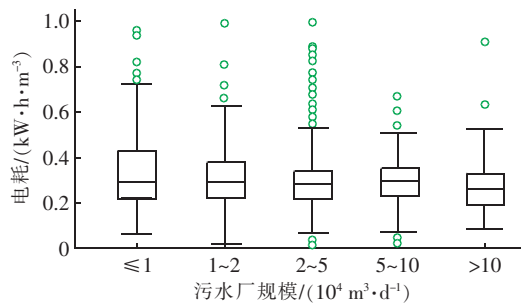


图2 不同规模下的污水厂单位能耗

Fig.2 Unit energy consumption of wastewater treatment plants under different scale

用基于污水处理规模加权的能耗均值来评估不同规模区间下的能耗情况。当污水处理厂规模 $\leq 1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 时,单位能耗加权均值为 $(0.346 \pm$

0.211)  $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ;当规模为 $(1 \sim 2) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 时,单位能耗加权均值为 $(0.323 \pm 0.245) \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ;当规模为 $(2 \sim 5) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 时,单位能耗加权均值为 $(0.311 \pm 0.273) \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ;当规模为 $(5 \sim 10) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 时,单位能耗加权均值为 $(0.300 \pm 0.155) \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ;当规模 $> 10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 时,单位能耗加权均值为 $(0.268 \pm 0.112) \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 。

## 2.2.2 不同负荷率下的能耗情况

Mizuta 等<sup>[7]</sup>的研究表明,污水厂水量负荷率越高,单位能耗越低。统计分析得到单位能耗随水量负荷率变化的趋势如图3所示。由图3可看出,单位能耗随负荷率增加呈现显著下降趋势,负荷率 $> 100\%$ 时,单位能耗下降明显。这表明高负荷甚至超负荷运行更加节能降耗,但超负荷运行必须在系统及设备可承载的情况下进行。

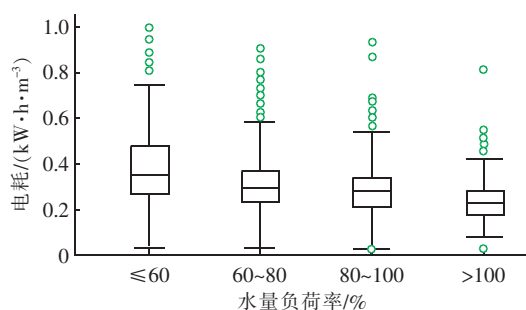


图3 不同负荷率下的污水厂单位能耗

Fig. 3 Unit energy consumption of wastewater treatment plants under different loads

不同负荷率下基于规模量加权的能耗基准均值分析结果如下:当负荷率 $\leq 60\%$ 时,单位能耗加权均值为 $(0.395 \pm 0.299) \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ;当负荷率为 $60\% \sim 80\%$ 时,单位能耗加权均值为 $(0.315 \pm 0.135) \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ;当负荷率为 $80\% \sim 100\%$ 时,单位能耗加权均值为 $(0.282 \pm 0.184) \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ;当负荷率 $> 100\%$ 时,单位能耗加权均值为 $(0.226 \pm 0.076) \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 。

## 2.2.3 不同处理工艺下的能耗情况

我国污水处理常用工艺有AO、AAO、氧化沟、SBR、生物膜、MBR、生物滤池等,污水处理厂通常针对不同的水质水量及出水标准,选择适合的工艺。选取AO、AAO、氧化沟、SBR、生物膜和MBR六种工艺共计1153座污水厂数据进行统计分析,其他工艺暂不考虑。各工艺的单位能耗如图4所示。由图4可知,AO、AAO、氧化沟、SBR和生物膜工艺的单

位能耗分布相近,其中SBR工艺单位能耗最小,AO工艺单位能耗离散度最大。MBR工艺单位能耗较其他工艺显著偏高,该结论在He等<sup>[15]</sup>的研究中也得到证明,MBR工艺能耗还有改善空间。

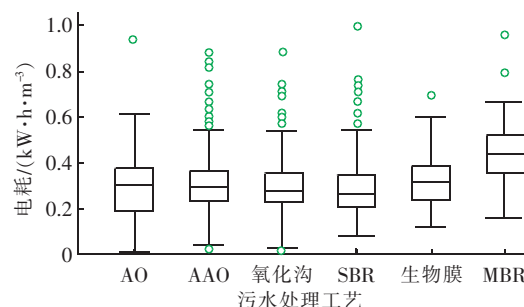


图4 不同工艺下的污水厂单位能耗

Fig. 4 Unit energy consumption of wastewater treatment plants under different treatment processes

不同工艺基于规模量的加权能耗基准均值分析表明,AO工艺的单位能耗加权均值为 $(0.267 \pm 0.111) \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ,AAO工艺单位能耗加权均值为 $(0.294 \pm 0.201) \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ,氧化沟工艺单位能耗加权均值为 $(0.292 \pm 0.192) \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ;SBR工艺单位能耗加权均值为 $(0.183 \pm 0.152) \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ;生物膜工艺单位能耗加权均值为 $(0.293 \pm 0.114) \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ;MBR工艺单位能耗加权均值为 $(0.373 \pm 0.145) \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 。

## 2.2.4 基于出水标准的能耗情况

污水处理厂出水标准对处理过程中的有机物削减量及相应能耗具有一定影响。我国大部分污水处理厂普遍执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中的一级A、B和二级标准,部分执行高于国标一级A的地方排放标准。不同出水标准下的污水处理厂能耗情况如图5所示。

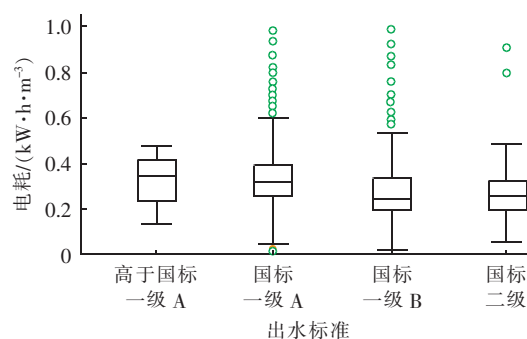


图5 不同出水标准下的污水厂单位能耗

Fig. 5 Unit energy consumption of wastewater treatment plants under different effluent discharge standards



由图5可以看出,达到或高于国标一级A标准的污水处理厂单位能耗明显偏高,单位能耗受出水标准的影响显著。基于规模量的加权能耗均值统计结果表明,国标一级A标准的单位能耗加权均值为 $(0.321 \pm 0.156) \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ,国标一级B标准的单位能耗加权均值为 $(0.210 \pm 0.157) \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ,国标二级标准的单位能耗加权均值为 $(0.243 \pm 0.145) \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 。

### 2.2.5 基于进水COD的能耗情况

Hanna等<sup>[6]</sup>的研究指出,进出水水质(即有机物削减量)会直接影响能源消耗情况。污水处理厂关注的主要进水指标为COD、氨氮、总氮和总磷。由于COD能较好地反映有机物相对含量,故选择进水COD作为影响因素。进水COD与能耗的关系如图6所示。

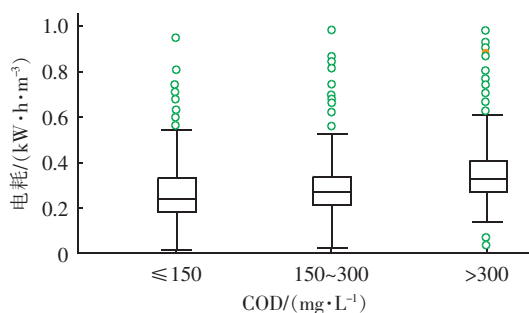


图6 不同进水COD下的污水厂单位能耗

Fig. 6 Unit energy consumption of wastewater treatment plants under different influent COD

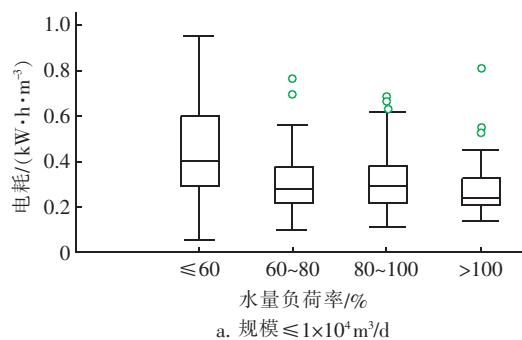
由图6可以看出,随着污水厂进水COD浓度的升高,单位能耗也随之增高,当进水COD  $>300 \text{ mg/L}$  时单位能耗有显著升高趋势。基于规模量加权计算的单位能耗均值分析结果如下:当进水COD  $\leq 150 \text{ mg/L}$  时,单位能耗加权均值为 $(0.234 \pm 0.185) \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ;当进水COD为 $150 \sim 300 \text{ mg/L}$  时,单位能耗加权均值为 $(0.275 \pm 0.185) \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ;当进水COD  $>300 \text{ mg/L}$  时,单位能耗加权均值为 $(0.338 \pm 0.171) \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 。

### 2.3 双因素协同影响下的污水处理能耗分析

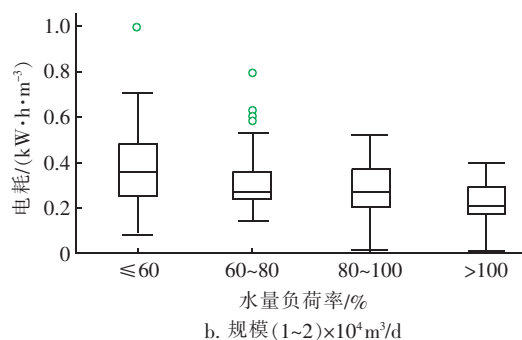
污水处理厂规模、处理水量负荷率、水处理工艺、出水标准、进水水质五种因素之间存在相关性,如污水处理规模越大,其负荷率接近满负荷的情况越普遍。污水实际处理情况同时受到多种因素的影响,因此有必要分析双因素乃至多因素情况下的污水能耗情况。

#### 2.3.1 基于规模与负荷率的能耗情况

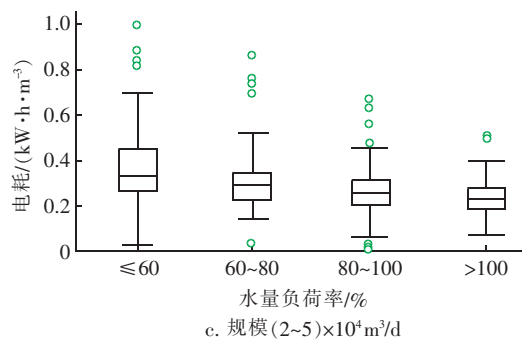
基于污水厂规模与负荷率的单位能耗情况见图7。由图7可以看出,当规模 $>10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  及负荷率 $>100\%$  时,单位能耗的中位数最低;规模为 $(5 \sim 10) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  及负荷率 $>100\%$  时,单位能耗最稳定。对于现有污水处理厂,确保满负荷条件运行有望控制能耗处于较优水平并更稳定;对于新建污水处理厂,大型污水处理厂有助于发挥规模效应,实现能耗优化。



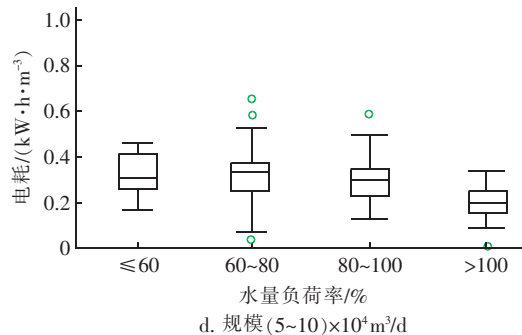
a. 规模 $\leq 1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$



b. 规模 $(1 \sim 2) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$



c. 规模 $(2 \sim 5) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$



d. 规模 $(5 \sim 10) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$

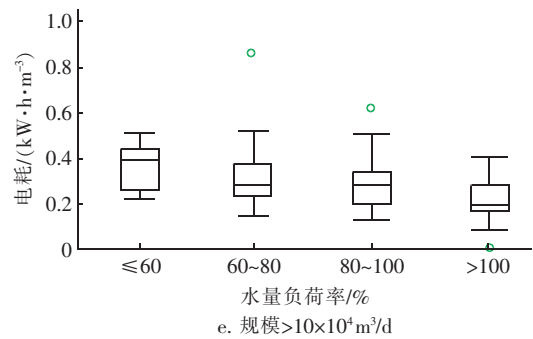


图 7 规模与负荷率协同下的污水处理厂单位能耗  
Fig. 7 Unit energy consumption of WWTPs under the synergy of scale and loading rate

2.3.2 基于规模与进水 COD 的能耗情况

通常污水厂规模越大,进水 COD 稳定性越高,前述研究表明规模和进水 COD 对单位能耗有相反相关性。基于规模与进水 COD 的单位能耗基准如图 8 所示。

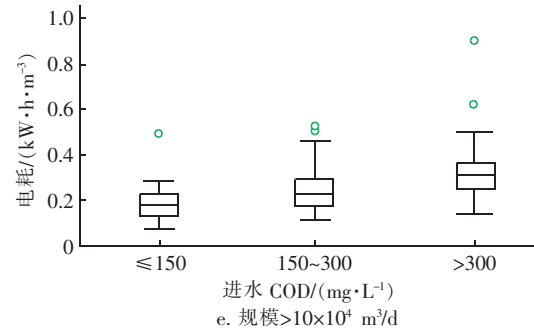
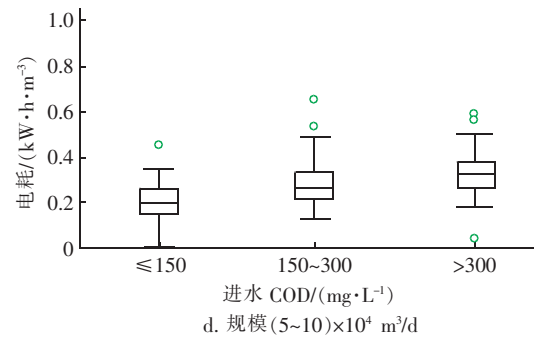
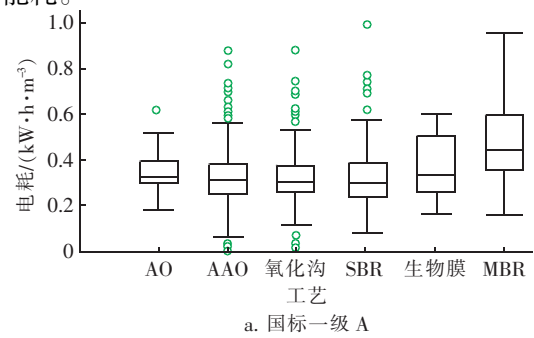
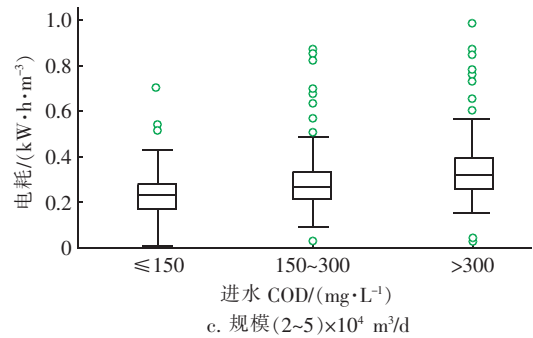
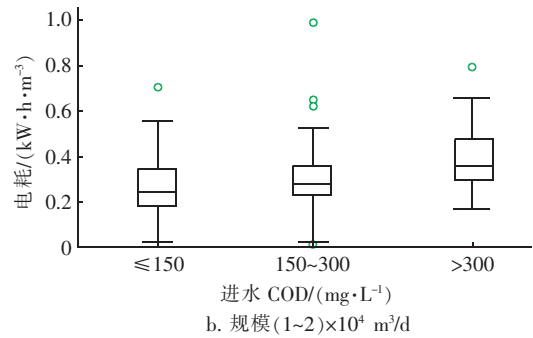
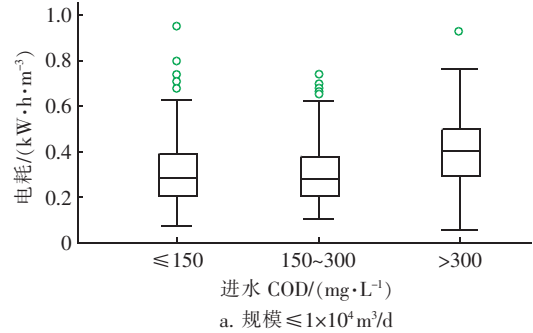


图 8 处理规模与进水 COD 协同下的污水处理厂单位能耗  
Fig. 8 Unit energy consumption of WWTPs under the synergy of scale and influent COD

由图 8 可知,在规模  $> 10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  及进水  $\text{COD} \leq 150 \text{ mg/L}$  时,单位能耗中位数最低且离散程度最小,能耗低且较稳定。数据分析发现,规模超过  $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  或小于  $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  时,进水 COD 对单位能耗的影响较大,规模居中时进水 COD 的影响较小。

2.3.3 基于出水标准与工艺的能耗情况

基于出水标准与处理工艺的单位能耗基准如图 9 所示,生物膜和 MBR 工艺常用于高出水标准的污水处理厂中,这两种工艺的单位能耗通常也较高。当出水标准较低时,AO 工艺往往获得相对较低的单位能耗,但其工艺能耗稳定性弱。对于国标一级 A 标准来说,AAO 和 SBR 工艺可能取得稳定且理想的能耗。



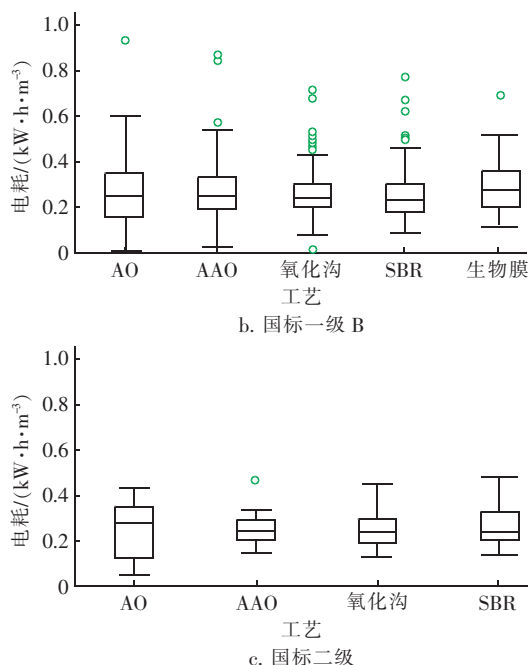


图9 出水标准与工艺协同下的污水处理厂单位能耗

Fig.9 Unit energy consumption of WWTPs under the synergy of effluent standard and treatment process

### 2.3.4 基于进水 COD 与工艺的能耗情况

基于进水 COD 与工艺的单位能耗基准见图 10。当进水 COD  $> 150 \text{ mg/L}$  时,6 种工艺样本均较为丰富。而进水 COD  $\leq 150 \text{ mg/L}$  时,仅有极少污水厂采用生物膜或 MBR 工艺,由于样本量过少未在图中展示。当进水 COD  $> 300 \text{ mg/L}$  时,SBR 工艺的单位能耗较其他工艺偏低,该工艺较适用于高有机负荷进水。

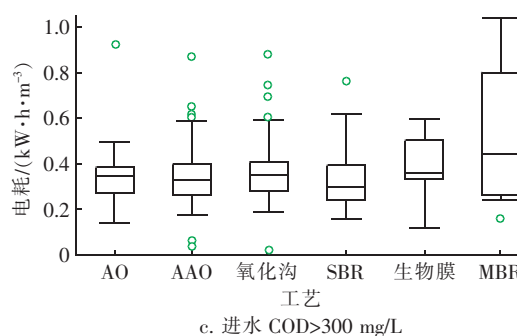
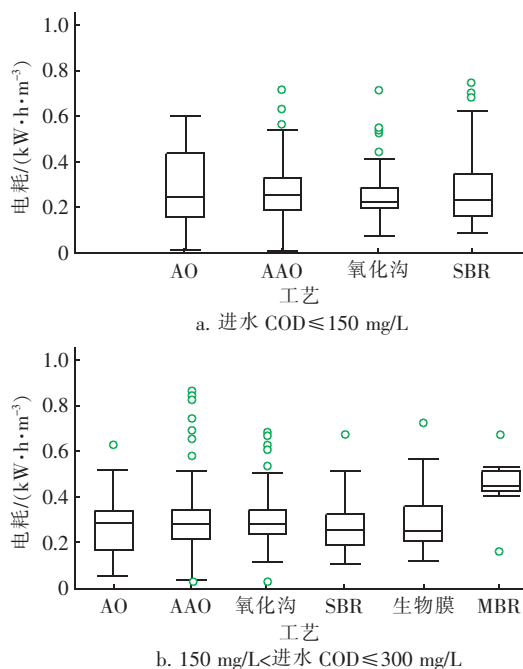


图10 进水 COD 与工艺协同下的污水处理厂单位能耗

Fig.10 Unit energy consumption of WWTPs under the synergy of influent COD and treatment process

### 3 多因素综合影响下的污水处理能耗基准

如上所述,规模、负荷率、工艺、出水标准和进水水质等因素均对单位能耗产生影响,且产生协同作用。仅单因素及双因素无法概括污水处理厂的整体情况,为给现有及新建污水厂提供能耗参考,有必要制定出符合当前技术水平的多因素能耗基准,甚至根据历史数据库追踪能耗基准的长期演变。

我国污水处理厂多因素综合影响下能耗基准矩阵见表 1。其中, $S$  代表污水厂规模,包含全部五个区间;负荷率包含 60% ~ 80%、80% ~ 100% 两个常见区间;出水标准包含国标一级 A 和国标一级 B 两个常见标准。剔除能耗偏高的 MBR 工艺样本,因其他五种工艺能耗差别不大,数据均包含在内,未在表中分类。当区间样本量极低时(4 个以下)不做分析,并舍去区间内与平均值之差超过两倍标准差的异常值。

根据该能耗基准表,现有的污水处理厂可以在其相应水厂规模、进水水质和负荷条件下,了解其能耗状况在国内所处水平及改进空间。其中,单位能耗统计数据的前 90% 作为污水厂单位能耗基准参考的极大值,即最差情况;前 75% 为及格线,表明仍有巨大的能耗降低空间;前 50% 为合格线,表明污水厂能耗情况良好;而达到 25% 则在节能降耗方面表现较优秀;超过 10% 已经在同等污水厂中处于极佳状态。能耗基准是污水厂能耗管理的有力工具,是开展能耗优化工作的基础。建议制定阶段性发展规划,短期内所有污水处理厂均应以单位能耗中位数(前 50%)作为能耗基准值,开展水厂节能降耗工作。随着运营逐渐稳定和操作水平上升,未来可采用前 25% 或 10% 作为能耗基准值。

表 1 多因素单位能耗基准

Tab. 1 Multi-factor unit energy consumption benchmarking

出水标准	规模/ ( $10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )	负荷率/%	进水 COD/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	单位能耗/( $\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$ )						样本数/个
				10%	25%	50%	75%	90%	均值	
国标一级 A	$\leq 1$	60 ~ 80	150 ~ 300	0.208	0.290	0.290	0.480	0.540	$0.368 \pm 0.163$	9
			> 300	0.391	0.423	0.465	0.543	0.637	$0.500 \pm 0.142$	4
		80 ~ 100	$\leq 150$	0.502	0.520	0.580	0.643	0.665	$0.583 \pm 0.088$	4
			150 ~ 300	0.260	0.285	0.370	0.445	0.540	$0.385 \pm 0.123$	15
			> 300	0.275	0.300	0.325	0.440	0.475	$0.358 \pm 0.096$	6
			$\leq 150$	0.194	0.255	0.320	0.360	0.368	$0.300 \pm 0.081$	7
	$1 < S \leq 2$	60 ~ 80	150 ~ 300	0.240	0.265	0.345	0.413	0.500	$0.359 \pm 0.114$	16
			> 300	0.288	0.310	0.370	0.495	0.591	$0.411 \pm 0.123$	10
			$\leq 150$	0.120	0.190	0.270	0.335	0.348	$0.257 \pm 0.100$	7
		80 ~ 100	150 ~ 300	0.239	0.258	0.290	0.383	0.450	$0.311 \pm 0.107$	20
			> 300	0.302	0.330	0.350	0.405	0.414	$0.357 \pm 0.057$	7
			$\leq 150$	0.186	0.220	0.250	0.270	0.330	$0.253 \pm 0.074$	7
	$2 < S \leq 5$	60 ~ 80	150 ~ 300	0.210	0.253	0.290	0.340	0.397	$0.299 \pm 0.070$	34
			> 300	0.236	0.275	0.320	0.380	0.468	$0.346 \pm 0.165$	19
			$\leq 150$	0.038	0.160	0.180	0.240	0.280	$0.182 \pm 0.097$	13
		80 ~ 100	150 ~ 300	0.206	0.250	0.270	0.310	0.330	$0.278 \pm 0.071$	47
			> 300	0.230	0.263	0.290	0.373	0.417	$0.332 \pm 0.164$	20
			$\leq 150$	0.230	0.295	0.350	0.405	0.446	$0.357 \pm 0.114$	15
	$5 < S \leq 10$	60 ~ 80	> 300	0.260	0.293	0.345	0.390	0.420	$0.338 \pm 0.112$	16
			150 ~ 300	0.177	0.210	0.250	0.310	0.365	$0.269 \pm 0.088$	20
			> 300	0.260	0.300	0.350	0.400	0.444	$0.355 \pm 0.078$	29
		80 ~ 100	150 ~ 300	0.200	0.230	0.280	0.310	0.340	$0.274 \pm 0.058$	11
			> 300	0.238	0.031	0.330	0.360	0.396	$0.329 \pm 0.076$	17
			$\leq 150$	0.154	0.215	0.250	0.280	0.346	$0.256 \pm 0.084$	15
国标一级 B	$\leq 1$	60 ~ 80	150 ~ 300	0.210	0.220	0.260	0.368	0.435	$0.296 \pm 0.102$	14
			$\leq 150$	0.204	0.230	0.280	0.325	0.404	$0.362 \pm 0.366$	18
		80 ~ 100	150 ~ 300	0.183	0.200	0.240	0.310	0.368	$0.272 \pm 0.116$	24
			> 300	0.250	0.283	0.305	0.373	0.660	$0.405 \pm 0.263$	6
			$\leq 150$	0.182	0.190	0.220	0.250	0.258	$0.219 \pm 0.035$	13
			150 ~ 300	0.180	0.200	0.240	0.250	0.270	$0.225 \pm 0.041$	11
	$1 < S \leq 2$	60 ~ 80	$\leq 150$	0.150	0.180	0.210	0.250	0.390	$0.233 \pm 0.110$	21
			150 ~ 300	0.169	0.245	0.330	0.340	0.377	$0.290 \pm 0.106$	14
			> 300	0.260	0.305	0.350	0.470	0.510	$0.373 \pm 0.118$	6
		80 ~ 100	$\leq 150$	0.180	0.195	0.220	0.230	0.250	$0.212 \pm 0.031$	11
			150 ~ 300	0.183	0.210	0.250	0.385	0.497	$0.318 \pm 0.173$	24
			> 300	0.268	0.280	0.320	0.370	0.426	$0.339 \pm 0.075$	9
	$2 < S \leq 5$	60 ~ 80	$\leq 150$	0.130	0.165	0.190	0.215	0.270	$0.199 \pm 0.072$	11
			150 ~ 300	0.138	0.185	0.240	0.305	0.344	$0.245 \pm 0.084$	39
			> 300	0.170	0.220	0.280	0.350	0.380	$0.288 \pm 0.093$	11
		80 ~ 100	$\leq 150$	0.100	0.145	0.190	0.213	0.217	$0.168 \pm 0.068$	4
			150 ~ 300	0.172	0.205	0.300	0.325	0.390	$0.281 \pm 0.114$	7
			> 300	0.185	0.220	0.265	0.293	0.355	$0.262 \pm 0.065$	16
	$5 < S \leq 10$	60 ~ 80	150 ~ 300	0.210	0.240	0.325	0.380	0.440	$0.325 \pm 0.116$	6
			> 300	0.210	0.240	0.325	0.380	0.440	$0.325 \pm 0.116$	6
		80 ~ 100	150 ~ 300	0.150	0.160	0.195	0.230	0.270	$0.205 \pm 0.058$	6
			> 300	0.144	0.170	0.190	0.210	0.248	$0.201 \pm 0.056$	13
			$\leq 150$	0.214	0.273	0.295	0.343	0.386	$0.303 \pm 0.068$	12



#### 4 我国污水处理能耗基准分析与展望

能耗基准的制订主要分为两类方法:第一类针对行业整体能耗水平,基于大量污水厂的历史数据,从实践的角度描绘当前污水处理的能耗水平;第二类针对具体污水处理流程,基于某个具体污水厂的数据,从理论的角度分析各个环节的理论能耗和涉及能耗水平。第二类能耗基准的分析需要对具有代表性的污水厂进行长期跟踪研究,例如国际上首例实现能源自给的奥地利 Strass 污水厂曾公开过去 10 年间能耗及能量回收情况,描绘了不同工况及节能措施下的污水厂整体能耗水平<sup>[16]</sup>。本研究属于第一类,从当前污水厂实际运行水平出发制订可供行业参考的能耗基准。

不同国家的污水厂能耗基准对比结果见表 2,可以看出我国污水厂平均能耗水平偏低。其中部分原因可能是我国约 22.5% 的进水 COD 值偏低,小于 150 mg/L。造成进水水质指标低的原因比较复杂,如何通过管网优化、厂网一体化等措施提升污水厂进水水质也是近年来行业关注的热点问题。从数据统计的角度分析,大量低浓度进水水质污水厂拉低了我国平均吨水处理能耗。

从能耗的影响因素分析,规模、负荷率、工艺、出水标准和进水 COD 均会影响单位能耗,各因素对单位能耗的影响趋势与国际研究一致。因此,多因素综合影响下能耗基准矩阵表可以更好地用于不同场景下能耗基准的选取。

表 2 不同国家污水厂的能耗情况

Tab. 2 Energy consumption for WWTP of different countries

项 目	芬兰 <sup>[4]</sup> (2018 年)	意大利 <sup>[9]</sup> (2018 年)	德国 <sup>[17]</sup> (2014 年)	南非 <sup>[17]</sup> (2016 年)	西班牙 <sup>[18]</sup> (2014 年)	印度 <sup>[19]</sup> (2017 年)	本研究
平均能耗/ (kW · h · m <sup>-3</sup> )	0.490 ± 0.197	0.45	—	—	0.565	—	0.317 ± 0.229
单位能耗范围/ (kW · h · m <sup>-3</sup> )	0.39 ~ 0.57	—	0.40 ~ 0.43	0.33 ~ 1.03	—	0 ~ 1	0.01 ~ 3.75
样本数/个	22	241	5 668	—	90	16	1 291

#### 5 结语

对我国 1 291 座污水处理厂的能耗基准情况进行统计分析,现阶段我国单位能耗均值为(0.317 ± 0.229) kW · h/m<sup>3</sup>。研究发现,规模、负荷率、工艺、出水标准及进水 COD 均会影响污水处理的单位能耗。其中,单位能耗随规模、负荷率的增大而降低;生物膜、MBR 工艺的单位能耗高于其他工艺,SBR 工艺单位能耗偏低;出水标准越严格、进水 COD 越高,单位能耗越高。除单因素影响外,四种双因素组合情况下存在协同作用。结合多因素综合影响给出多因素作用下的能耗基准表,可用于不同场景下能耗基准的选取。

#### 参考文献:

- [1] 许世伟,刘菲,白宇,等.北京市地方标准《污水单位产品能耗限额》的研究与思考[J]. 给水排水,2014,40(11):109-111.  
XU Shiwei, LIU Fei, BAI Yu, et al. Study on the Norm of Energy Consumption Per Unit Product of Sewerage of Beijing City [J]. Water & Wastewater Engineering, 2014, 40(11): 109-111 (in Chinese).

- [2] VENKATESH G, BRATTEBO H. Analysis of chemicals and energy consumption in water and wastewater treatment, as cost components: case study of Oslo, Norway [J]. Urban Water Journal, 2011, 8(3): 189-202.
- [3] BELLOIR C, STANFORD C, SOARES A. Energy benchmarking in wastewater treatment plants: the importance of site operation and layout [J]. Environmental Technology, 2015, 36(2): 260-269.
- [4] GURUNG K, TANG W Z, SILLANPAA M. Correction to: unit energy consumption as benchmark to select energy positive retrofitting strategies for finnish wastewater treatment plants (WWTPs): a case study of Mikkeli WWTP [J]. Environmental Processes, 2018, 5(4): 931.
- [5] KRAMPE J. Energy benchmarking of South Australian WWTPs [J]. Water Science and Technology, 2013, 67(9): 2059-2066.
- [6] HANNA S M, THOMPSON M J, DAHAB M F, et al. Benchmarking the energy intensity of small water resource recovery facilities [J]. Water Environment Research, 2018, 90(8): 738-747.
- [7] MIZUTA K, SHIMADA M. Benchmarking energy

- consumption in municipal wastewater treatment plants in Japan [J]. *Water Science and Technology*, 2010, 62 (10): 2256 – 2262.
- [8] HASLINGER J, LINDTNER S, KRAMPE J. Operating costs and energy demand of wastewater treatment plants in Austria: benchmarking results of the last 10 years [J]. *Water Science and Technology*, 2016, 74 (11): 2620 – 2626.
- [9] VACCARI M, FOLADORI P, NEMBRINI S, *et al.* Benchmarking of energy consumption in municipal wastewater treatment plants – a survey of over 200 plants in Italy [J]. *Water Science and Technology*, 2018, 77 (9/10): 2242 – 2252.
- [10] 张显忠,戴晓虎,唐建国,等. 生物工艺过程控制系统的设计及节能降耗估算[J]. *中国给水排水*, 2019, 35 (9): 77 – 82.
- ZHANG Xianzhong, DAI Xiaohu, TANG Jianguo, *et al.* Design of biological process control system and estimation of its energy-saving & cost-reducing [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35 (9): 77 – 82 (in Chinese).
- [11] 沈昌明,刘战广. 产业密集型城镇污水处理厂能耗基准确定方法研究[J]. *城市道桥与防洪*, 2015 (11): 103 – 107.
- SHEN Changming, LIU Zhanguang. Research on the method of determining energy consumption benchmark for industry-intensive urban wastewater treatment plants [J]. *Urban Roads Bridges & Flood Control*, 2015 (11): 103 – 107 (in Chinese).
- [12] NIU K Y, WU J, QI L, *et al.* Energy intensity of wastewater treatment plants and influencing factors in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 670: 961 – 970.
- [13] 李云,蒋进元,白璐,等. 污水处理厂能耗评估与优化现状[J]. *工业水处理*, 2018, 38 (9): 1 – 4.
- LI Yun, JIANG Jinyuan, BAI Lu, *et al.* Present situation of the energy consumption evaluation and optimization in wastewater treatment plants [J]. *Industrial Water Treatment*, 2018, 38 (9): 1 – 4 (in Chinese).
- [14] ZHANG Q H, YANG W N, NGO H H, *et al.* Current status of urban wastewater treatment plants in China [J]. *Environment International*, 2016, 92/93: 11 – 22.
- [15] HE Y, ZHU Y S, CHEN J H, *et al.* Assessment of energy consumption of municipal wastewater treatment plants in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 228: 399 – 404.
- [16] LINDTNER S, SCHAAR H, KROISS H. Benchmarking of large municipal wastewater treatment plants treating over 100,000 PE in Austria [J]. *Water Science and Technology*, 2008, 57 (10): 1487 – 1493.
- [17] WANG H T, YANG Y, KELLER A A, *et al.* Comparative analysis of energy intensity and carbon emissions in wastewater treatment in USA, Germany, China and South Africa [J]. *Applied Energy*, 2016, 184: 873 – 881.
- [18] TRAPOTE A, ALBALADEJO A, SIMON P. Energy consumption in an urban wastewater treatment plant: the case of Murcia Region (Spain) [J]. *Civil Engineering and Environmental Systems*, 2014, 31 (4): 304 – 310.
- [19] SINGH N K, KAZMI A A. Performance and cost analysis of decentralized wastewater treatment plants in Northern India: case study [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2018. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000886.

作者简介:张羽就(1996 – ),女,山东德州人,硕士研究生,研究方向为污水处理厂的可持续发展。

E-mail: 1830520@tongji.edu.cn

收稿日期:2020-09-03

修回日期:2020-09-24

(编辑:丁彩娟)