

# 我国城镇污水处理厂的能耗现状分析

楚想想<sup>1</sup>, 罗丽<sup>1</sup>, 王晓昌<sup>1</sup>, 章武首<sup>2</sup>

(1. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 中国市政工程西北设计研究院有限公司, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 基于节能降耗的目的, 引入耗氧总污染物(OCTP)的概念作为污水处理厂能耗综合评价指标, 并结合吨水电耗指标从处理工艺和规模两个角度对2014年我国1980座污水厂进行能耗分析评价。结果表明, 全国污水处理厂的平均吨水电耗和消减1 kg OCTP电耗分别为 $0.325 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 、 $1.924 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{kg}$ ; 4种主要污水处理工艺的能耗从高到低为 $\text{SBR} > \text{AAO} > \text{AO} > \text{氧化沟}$ , 污水厂的能耗随着其处理规模的降低而显著增加, 提高污水厂的负荷率和OCTP去除率有利于降低其能耗; 中小型污水处理厂的能耗占全国污水处理厂总能耗的54%, 是未来节能降耗的重点。

**关键词:** 污水处理厂; 能耗; 耗氧总污染物; 节能降耗

**中图分类号:** TU992.3 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)07-0070-05

## Analysis on Current Energy Consumption of Wastewater Treatment Plants in China

CHU Xiang-xiang<sup>1</sup>, LUO Li<sup>1</sup>, WANG Xiao-chang<sup>1</sup>, ZHANG Wu-shou<sup>2</sup>

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. CSCEC AECOM Consultants Co. Ltd., Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Based on the purpose of saving and reducing energy consumption, concept of oxygen consumption of total pollutant (OCTP) was defined as the comprehensive index for energy consumption evaluation in wastewater treatment plants, and energy consumption of 1980 domestic wastewater treatment plants (WWTPs) in 2014 was evaluated from the aspects of treatment process and treatment scale combined with electricity consumption of per ton wastewater. The results showed that the average electricity consumption of per ton wastewater and 1 kg OCTP degradation was  $0.325 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$  and  $1.924 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{kg}$  respectively, and the energy consumption of four main processes was  $\text{SBR} > \text{AAO} > \text{AO} > \text{oxidation ditch}$ . Energy consumption of WWTPs increased significantly with the decrease of the treatment scale, and increase of the load rate and the OCTP removal efficiency was beneficial to reduce energy consumption of WWTPs. The energy consumption of small and medium WWTPs accounted for 54% of the total energy consumption of the domestic WWTPs, which was the key point of energy saving in the future.

**Key words:** wastewater treatment plant; energy consumption; oxygen consumption of total pollutant; energy saving and consumption reducing

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51508448); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07323001); 陕西省污水处理与资源化重点科技创新团队项目(2013KCT-13)

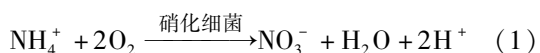
通信作者: 罗丽 E-mail: liluo@xauat.edu.cn

近年来我国城镇污水处理事业快速发展,截至2014年底,全国设市城市、县(不含建制镇及以下)建成运行污水处理厂3362座,总污水处理能力为 $1.60 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{d}$ ,为削减污染物排放、改善水环境起到了关键的作用。但是污水处理属于能耗密集型行业,其能耗费用占到运行费用的30%~60%。因此,对污水处理厂进行能耗分析与评价可以为其实实现节能降耗提供理论基础。

目前污水处理厂能耗评价多是对单个污水处理厂内的污水处理单元进行分析或抽样调查某一区域或规模污水处理厂的能耗,缺少对于全国污水处理厂能耗方面的分析。为了综合评价污水处理厂的能耗,本研究通过对主要污染物的分析,引入了耗氧总污染物(OCTP)的电耗指标,并以全国污水处理厂调研数据为依据,对全国污水处理厂不同工艺、不同规模的能耗情况进行分析,指出我国污水处理厂在能耗方面存在的问题,为节能提供相应的建议。数据主要来源于2015年城镇排水统计年鉴,数据覆盖了2014年运行的有能耗信息的1980座城镇污水处理厂。在分析前,所有数据都经过预处理和筛查,数据可信度较高。由于这些数据属于非抽样的普查数据,因此可以代表现阶段我国城镇污水处理厂能耗的总体情况。

## 1 耗氧总污染物计算方法

目前,城镇污水处理厂主要是以吨水电耗和消减1 kg COD电耗作为能耗指标。污水处理厂能耗与其去除的污染物质密切相关,实际污水中的污染物种类繁多、含量差异大,采用消减1 kg COD电耗指标很难对实际污水的电耗情况进行综合分析,因此需要引入总污染电耗指标来进行综合评价。在Karlsson和Yang等人<sup>[1,2]</sup>研究的基础上,本研究提出耗氧总污染物(OCTP)的计算方法。由于城镇污水处理厂中的主要污染物为有机物、氮和磷,且污染物的耗氧量主要是由有机物和氨氮分解产生的,因此在计算OCTP时仅考虑有机物和氨氮的作用。对于有机物而言,其在污水处理厂的去除可以认为是生物氧化分解,则可以用污水的生物需氧量(BOD)来代表污水中的有机污染物在污水处理过程中的耗氧量。对于氨氮而言,其耗氧量是由硝化作用所贡献,生化反应方程如下:



根据式(1)可以得到,1 g氨氮的耗氧量为4.57 g O<sub>2</sub>。则城镇污水处理过程中的耗氧总污染物的计算公式为:

$$\text{OCTP} = \text{BOD} + 4.57\text{NH}_3 - \text{N} \quad (2)$$

式中,BOD为污水生物需氧量的浓度,mg/L;NH<sub>3</sub>-N为污水中氨氮的浓度,mg/L。

## 2 能耗现状分析

利用SPSS软件对全国1980座污水处理厂的日耗电量与日消减OCTP量、日处理水量和日消减COD量之间的相关性进行统计分析,结果表明,污水处理厂的日耗电量与日消减OCTP量、日处理水量和日消减COD量都表现出极显著相关,相关性依次减小(分别为0.870、0.843、0.818),因此本研究主要使用吨水电耗和消减1 kg OCTP电耗作为能耗分析的指标。

### 2.1 整体能耗分析

对全国1980座污水处理厂的能耗数据进行分析,可以获得2014年度我国污水处理厂的能耗特征值,见表1。总体上看,全国吨水平均能耗为0.325 kW·h/m<sup>3</sup>,消减1 kg OCTP的平均电耗为1.924 kW·h/kg;80%的污水处理厂的吨水电耗、消减1 kg OCTP电耗分别在0.094~0.462 kW·h/m<sup>3</sup>之间和0.466~2.903 kW·h/kg之间。其中吨水平均能耗值比杨凌波等人<sup>[3]</sup>对2006年全国559座污水处理厂统计得到的平均能耗值(0.290 kW·h/m<sup>3</sup>)和蒋勇等人<sup>[4]</sup>对2011年全国处理规模在 $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 以上的1441座污水处理厂统计得到的平均能耗值(0.290 kW·h/m<sup>3</sup>)均略高,且比美国的高1/3,表明我国污水处理厂还存在很大的节能空间。

表1 我国城镇污水处理厂电耗特征值

Tab. 1 Characteristic values of energy consumption for WWTPs in China

项 目	1/10 分位数	1/5 分位数	中位数	4/5 分位数	9/10 分位数	平均值
吨水电耗/ (kW·h·m <sup>-3</sup> )	0.094	0.160	0.256	0.372	0.462	0.325
消减1 kg OCTP 电耗/(kW·h· kg <sup>-1</sup> )	0.466	0.808	1.309	2.136	2.903	1.924

有研究表明,某一区域污水处理厂能耗与运行负荷之间具有较好的相关性<sup>[5]</sup>。为了探究全国污水处理厂能耗与运行负荷率之间的关系,将全国污水厂的负荷率分成超低负荷(≤60%)、低负荷

(60%~80%)、正常负荷(80%~100%)、高负荷(100%~120%)、超高负荷(>120%)5类,并对不同负荷率的吨水电耗和消减1 kg OCTP 电耗这两个能耗指标进行分析,结果见图1。可以看出,污水处理厂平均能耗随着运行负荷率的增加而降低;在低负荷到超低负荷区段,污水处理厂吨水电耗和消减1 kg OCTP 电耗均大幅度增加,且高于全国平均水平;在正常负荷及以上时,能耗变化趋势较平缓,且低于全国平均水平。

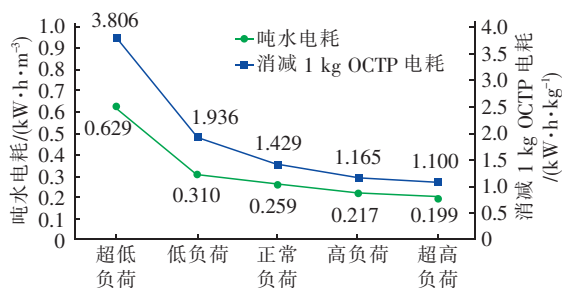


图1 污水处理厂能耗指标与运行负荷率的关系

Fig. 1 Relationship between energy consumption index and operating load rate of WWTPs

污水处理厂的能耗与所去除的污染物密切相关,根据 OCTP 的计算公式,通过各个污水处理厂进、出水 BOD 和氨氮浓度数据,计算出全国 1 980 座城镇污水处理厂 OCTP 的去除率。为了探究全国污水处理厂能耗与 OCTP 去除率之间的关系,将计算得到的 OCTP 去除率分成 100%~90%、90%~80%、80%~70%、70%~60% 和 <60% 这 5 个范围,并对不同 OCTP 去除率范围的吨水电耗和消减 1 kg OCTP 电耗这两个指标进行分析,结果见图2。

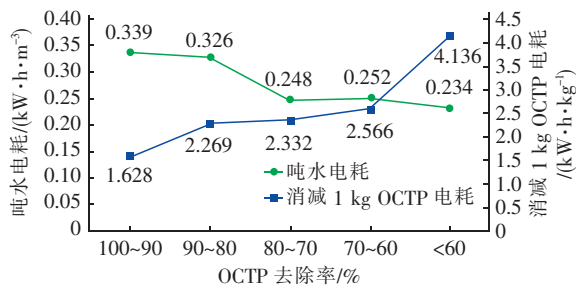


图2 污水处理厂能耗指标与 OCTP 去除率的关系

Fig. 2 Relationship between energy consumption index and OCTP removal efficiency of WWTPs

由图2可以看出,污水处理厂吨水电耗随着 OCTP 去除率的降低呈下降的趋势,消减 1 kg OCTP 电耗随着 OCTP 去除率的降低而增加,但是吨水电

耗的变化趋势比消减 1 kg OCTP 电耗的变化趋势缓慢,因此提高 OCTP 的去除率有利于降低污水处理厂的能耗水平。

## 2.2 不同工艺污水处理厂的能耗分析

全国 1 980 座污水厂的工艺类型分类结果如图3所示,目前我国污水处理工艺有 AAO、氧化沟、SBR、AO、百乐克、生物滤池、活性污泥法、MBR、湿地氧化塘、生物接触氧化法等,其中 AAO、氧化沟、SBR、AO 这 4 种工艺使用最多,占全国污水处理厂总数的 87%。对这 4 种污水处理工艺的出水 BOD 和氨氮浓度进行统计分析,结果见图4。

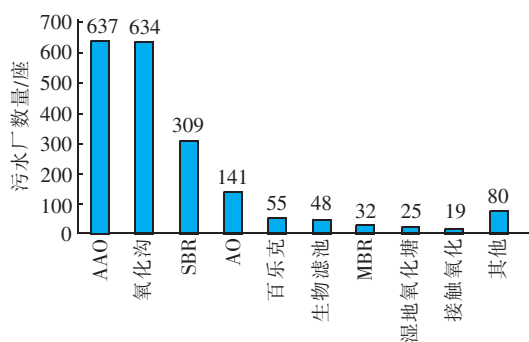
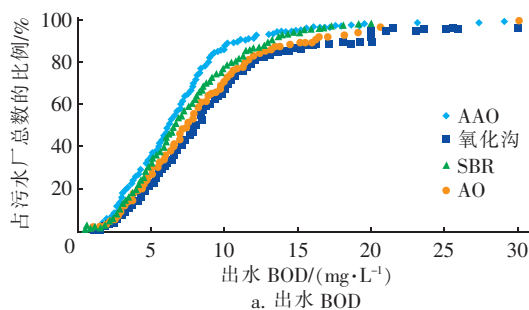
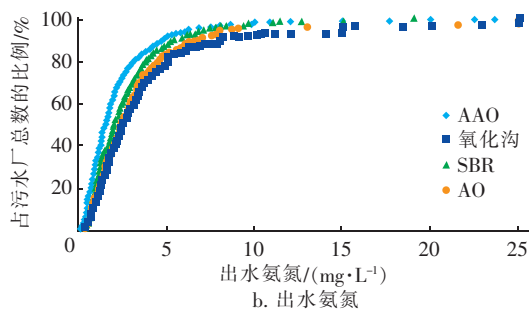


图3 全国污水处理厂工艺分类

Fig. 3 Application of different processes of WWTPs in China



a. 出水 BOD



b. 出水氨氮

图4 AAO、氧化沟、SBR、AO 工艺出水 BOD 和氨氮浓度的累计概率分布

Fig. 4 Cumulative probability distribution of BOD and  $\text{NH}_3 - \text{N}$  concentrations for AAO, OD, SBR and AO processes

从图 4 可知,采用 AAO、SBR、AO 和氧化沟这 4 种工艺的污水处理厂中至少有 96% 的污水厂出水 BOD 浓度能够达到国家一级 B 标准;4 种工艺出水 BOD 浓度的国家一级 A 达标率分别为 88.5%、71.5%、79.3%、73.0%。此外,对于采用这 4 种工艺的污水处理厂,90% 以上的污水厂出水氨氮浓度能够达到国家一级 B 标准,80% 以上的污水厂出水氨氮浓度能够达到国家一级 A 标准。

不同处理工艺和不同规模污水厂的平均吨水电

耗和消减 1 kg OCTP 电耗见表 2。可以看出,4 种主要污水处理工艺在能耗方面的差异不大,消减 1 kg OCTP 能耗指标更能直观反映出城镇污水处理厂平均电耗的差异,平均吨水电耗和消减 1 kg OCTP 平均电耗大小排序为:SBR > AAO > AO > 氧化沟。两个能耗指标总体表明,SBR 工艺的能耗水平明显高于氧化沟工艺,AAO 工艺和 AO 工艺的能耗与全国平均水平相接近,SBR 工艺的平均电耗显著超过了全国污水处理厂平均电耗水平。

表 2 污水处理厂不同工艺和规模的能耗值

Tab. 2 Energy consumption values of different processes and scales for WWTPs

项 目	污水处理工艺				污水处理规模			
	AAO	氧化沟	SBR	AO	小型	中型	大型	超大型
平均吨水电耗/(kW·h·m <sup>-3</sup> )	0.330	0.270	0.428	0.310	0.408	0.324	0.247	0.251
消减 1 kg OCTP 电耗/(kW·h·kg <sup>-1</sup> )	1.901	1.751	2.422	1.861	2.743	1.922	1.105	0.926

2.3 不同规模污水处理厂的能耗分析

按处理规模将我国 1 980 座城镇污水处理厂分为小型(<1×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d)、中型[(1~10)×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d]、大型[(10~40)×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d]和超大型(>40×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d)这 4 类,结果见图 5。可以看出,我国污水处理厂以中小型为主,约占全国污水处理厂总数的 90.6%;中小型污水处理厂能耗占全国污水处理厂总能耗的 54.6%,且能耗和污水处理量有关。从表 2 可以看出,中型规模的污水处理厂的平均吨水电耗和消减 1 kg OCTP 电耗接近于全国污水处理厂平均能耗水平;小型规模的污水处理厂的平均吨水电耗和消减 1 kg OCTP 电耗远高于全国污水处理厂平均能耗水平,表明中小型污水处理厂尤其是小型污水处理厂是节能的关键所在。

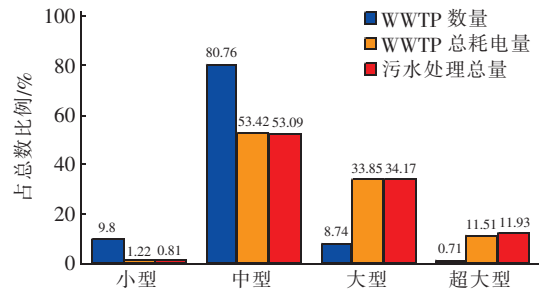


图 5 不同规模污水处理厂的数量、总电耗、污水处理总量比例

Fig. 5 Ratios of number, energy consumption and wastewater treatment volume for different scales of WWTPs

对全国不同规模污水处理厂的负荷率和 OCTP 去除率进行分析,结果如图 6 所示(虚线为全国污

水厂的平均负荷率即 81.96% 和 OCTP 平均去除率即 89.31%)。

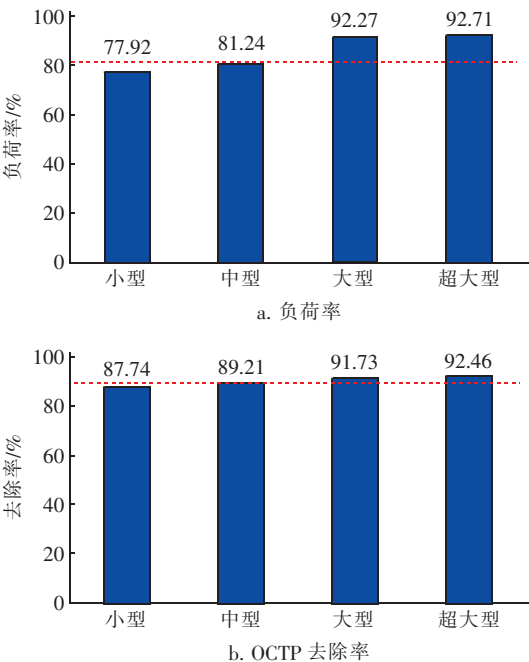


图 6 不同规模污水处理厂的负荷率和 OCTP 去除率  
Fig. 6 Operating load rate and OCTP removal efficiency of different scales of WWTPs

由图 6 可知,随着污水处理厂规模的增大,其平均负荷率和 OCTP 去除率亦增加;中型和小型污水处理厂的平均负荷率和 OCTP 平均去除率都低于全国平均水平。中小型污水处理厂建在人口较少的小城镇,其污水量变化幅度较大,污水收集系统不完善,导致负荷率较低;低负荷往往致使污水处理厂的



出水水质较差,对OCTP的去除率也较低。结合表2中不同规模污水处理厂平均吨水电耗和消减1 kg OCTP电耗的统计结果,发现平均吨水电耗和消减1 kg OCTP电耗指标在不同规模污水处理厂的能耗统计结果中的规律大致相同,由高到低的顺序为:小型、中型、大型、超大型,但消减1 kg OCTP电耗比吨水电耗指标显示出更明显的差异。这表明我国污水处理厂平均能耗过高主要是由于中小型污水处理厂的能耗较大和数量较多导致的,进一步说明了降低中小型污水处理厂能耗的重要性。

### 3 结论

① 通过统计分析得到,污水处理厂耗电量和消减耗氧总污染物(OCTP)量之间的相关性大于其与处理水量和消减COD量之间的相关性,因此消减1 kg OCTP耗电量更适用于综合评价污水厂的能耗情况。

② 现阶段我国污水处理厂吨水电耗和消减1 kg OCTP电耗分别为 $0.325 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 和 $1.924 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{kg}$ ,明显高于美国的能耗水平,存在较大的节能空间。提高污水处理厂的负荷率和OCTP去除率有利于降低其能耗水平。

③ 我国污水厂4种主要污水处理工艺的平均电耗大小为:SBR > AAO > AO > 氧化沟。SBR工艺的平均电耗显著超过全国平均水平,AAO工艺和AO工艺的平均电耗与全国平均水平相接近。

④ 中小型污水处理厂的数量占全国污水处理厂总数的90.6%,能耗占全国污水厂的54.6%。OCTP能耗指标和吨水能耗指标均表明污水处理厂能耗随着其规模的减小而明显增大,所以中小型污水处理厂是全国污水处理厂节能的关键。

### 参考文献:

- [1] Karlsson I. Environmental and energy efficiency of different sewage treatment processes[J]. Water Sci Technol, 1996,34(3/4):203-211.
- [2] Yang L, Zeng S, Chen J, et al. Operational energy performance assessment system of municipal wastewater treatment plants[J]. Water Sci Technol, 2010,62(6):1361-

1370.

- [3] 杨凌波,曾思育,鞠宇平,等. 我国城市污水处理厂能耗规律的统计分析与定量识别[J]. 给水排水,2008,34(10):42-45.  
Yang Lingbo, Zeng Siyu, Ju Yuping, et al. Statistical analysis and quantitative recognition of energy consumption of municipal wastewater treatment plants in China[J]. Water & Wastewater Engineering, 2008, 34(10):42-45 (in Chinese).
- [4] 蒋勇,阜葳,毛联华,等. 城市污水处理厂运行能耗影响因素分析[J]. 北京交通大学学报,2014,38(1):33-37.  
Jiang Yong, Fu Wei, Mao Lianhua, et al. Influence factors analysis of urban sewage treatment plant on energy consumption[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2014, 38(1):33-37 (in Chinese).
- [5] 孙鹏程,曾琳,曾思育,等. 山西省城镇污水处理工程能耗水平与特征研究[J]. 给水排水,2012,38(3):48-51.  
Sun Pengcheng, Zeng Lin, Zeng Siyu, et al. Study on energy consumption and its characteristic of the urban wastewater treatment plants in Shanxi Province[J]. Water & Wastewater Engineering, 2012, 38(3):48-51 (in Chinese).



作者简介:楚想想(1992-),男,安徽蒙城人,硕士研究生,主要研究方向为水处理理论与技术。

E-mail:chu\_xiangx@163.com

收稿日期:2016-08-30