



文章栏目：水污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.201901060

中图分类号 X505

文献标识码 A

邹吕熙, 李怀波, 王燕, 等. 太湖流域城镇污水处理厂能耗评价与分析[J]. 环境工程学报, 2019, 13(12): 2890-2897.

ZOU Lüxi, LI Huaibo, WANG Yan, et al. Energy consumption evaluation and analysis of wastewater treatment plants in Taihu basin, China[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13(12): 2890-2897.

## 太湖流域城镇污水处理厂能耗评价与分析

邹吕熙<sup>1</sup>, 李怀波<sup>1</sup>, 王燕<sup>1</sup>, 郑凯凯<sup>1</sup>, 王硕<sup>1,2,3</sup>, 李激<sup>1,2,3,\*</sup>

1. 江南大学环境与土木工程学院, 无锡 214122

2. 江苏省厌氧生物技术重点实验室, 无锡 214122

3. 江苏高校水处理技术与材料协同创新中心, 苏州 215009

第一作者: 邹吕熙(1995—), 男, 硕士研究生。研究方向: 废水处理工程。E-mail: 6171402031@stu.jiangnan.edu.cn

\*通信作者: 李激(1970—), 女, 博士, 教授。研究方向: 水污染控制工程。E-mail: lij@jiangnan.edu.cn

**摘要** 为分析太湖流域污水处理厂的能耗情况, 以比能耗分析法为基础, 结合多种统计学方法, 探究了太湖流域污水处理厂能耗现状、水量比能耗、污染物削减量比能耗、能耗与日处理水量和耗氧污染物削减量之间的关系。结果表明: 太湖流域污水处理厂 2017 年能耗均值为  $0.458 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ , 高于发达国家污水处理厂能耗平均值; 太湖流域处理规模大于  $5\times 10^4 \text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$  的污水处理厂水量比能耗基本稳定在  $0.33 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ , 而处理规模小于  $5\times 10^4 \text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$  的污水处理厂水量比能耗波动较大; 化学需氧量(COD)和氨氮( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ )削减量与污染物削减量比能耗之间均存在幂函数关系, 在每个污染物出水浓度区间内, 均呈现削减污染物量越多, 污染物削减量比能耗越低的趋势; 污水处理厂能耗与日处理水量和耗氧污染物削减量之间存在线性关系。因此, 对污水处理厂的节能降耗须重点关注污染物削减量比能耗的降低。

**关键词** 污水处理厂; 能耗评价; 比能耗分析法; 幂函数分析; 太湖流域

随着太湖流域地区工业化和城市化进程的不断加快, 工业废水和生活污水排放造成了严重的水环境污染问题, 建设城镇污水处理厂成为了解决水污染问题的主要途径之一<sup>[1-2]</sup>。城市污水产生量巨大, 因此, 污水处理厂在处理污水的过程中往往会消耗大量的能耗。据统计, 2017 年, 太湖流域地区城镇污水处理厂能耗占地区总能耗的 0.26%, 加上工业废水处理和污泥处理, 所占比例超过 2%<sup>[3]</sup>。随着污水处理厂在社会能源的消耗中占比的提高, 太湖流域经济的持续发展将会受到越来越严重的影响, 因此, 对太湖流域污水处理厂的节能降耗已迫在眉睫。

污水处理行业的能耗主要用于电力消耗、药剂消耗和污泥处理处置过程等<sup>[4]</sup>。科学合理地对城镇污水处理厂能耗进行评价是实现污水处理节能降耗的基础。杨凌波等<sup>[5]</sup>利用聚类统计法研究了全国 529 座污水处理厂的能耗分布情况, 得出我国污水处理厂能耗水平比较均匀的结论。金昌权等<sup>[6]</sup>采用单元能耗分析法对北京市某污水处理厂进行了能耗分析, 得出的结论是, 曝气系统所消耗的能耗在总能耗中所占比例最高为 56.5%。BRAVO 等<sup>[7]</sup>使用生命周期评价法对东南亚地区某污水处理厂生命周期全过程能耗进行分析, 并在此基础上提出了改善其能耗的措施。

目前, 对于污水处理厂运行能耗的研究多以比能耗分析法作为基础, 关注不同处理规模下单

收稿日期: 2019-01-09; 录用日期: 2019-05-22

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07202001)

位处理水量的能耗，即水量比能耗，或是污水处理设备的能耗，而对不同处理工艺下污水处理厂水量比能耗和处理规模之间的关系、污染物削减量比能耗、能耗与日处理水量和耗氧污染物削减量之间的关系等的研究相对较少。本研究调研了太湖流域不同工艺与处理规模的 204 座污水处理厂，探究了太湖流域污水处理厂能耗现状、水量比能耗、污染物削减量比能耗、能耗与日处理水量和耗氧污染物削减量之间的关系，为太湖流域污水处理厂节能降耗提供了参考。

## 1 数据来源、评价指标与分析方法

本研究选取江苏省太湖流域 204 座城镇污水处理厂作为研究对象，其中南京市 15 座、无锡市 51 座、常州市 32 座、苏州市 86 座、镇江市 20 座。数据主要来源于住房和城乡建设部城镇污水处理管理信息系统中污水处理厂自行上报信息，在分析前对所有数据进行预处理与筛查，剔除了数据中存在的异常值，并进行了随机抽样调查，数据的可信度较高。

以比能耗分析法为基础，以化学需氧量 (COD)、氨氮 ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ) 2 项水质指标作为污染物指标。通过将单位体积污水所消耗的能耗作为污水处理厂水量比能耗，以单位污染物削减量所消耗的能耗作为污染物削减量比能耗。

以 SPSS 22.0 和 ORIGIN 2017 为分析软件工具，运用统计分析中的正态分布、聚类分析、回归分析等方法，对数据进行处理分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 太湖流域污水处理厂能耗现状

2017 年，太湖流域污水处理厂能耗特征值的统计结果与正态检验分析结果如下：样本容量  $N=204$ ，样本最小值为  $0.16 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ ，样本最大值为  $1.32 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ ，样本均值为  $0.458 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ ，样本标准差为  $0.225 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ ，样本中间值为  $0.385 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ ，Kolmogorov-Smirnov 检验 Sig. 为 0.158，Shapiro-Wilk 检验 Sig. 为 0.051。太湖流域现阶段能耗主要分布在  $0.2\sim 0.5 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ ，高于我国污水处理厂的平均值<sup>[8]</sup>。采用 Kolmogorov-Smirnov 检验和 Shapiro-Wilk 检验对数据进行正态分布。一般情况下，当样本容量  $N < 1\ 000$  时，使用 Shapiro-Wilk 检验的数值较为精准，当显著性水平 (Sig.)  $> 0.05$  时，则认为指标服从正态分布<sup>[9]</sup>。经过 Shapiro-Wilk 检验，发现太湖流域总体能耗指标的 Sig.  $> 0.05$ ，服从正态分布。

进一步采用 K-Means 快速聚类法研究 204 座污水处理厂的能耗分布情况，在  $K=3$ ，迭代次数为 5 次的情况下，得出 3 个最终类中心点的数据分别为 0.34、1.08、0.68。对数据组进行升序排列可知，73% 的污水处理厂 (149 座) 能耗不高于  $0.51 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ ，43 座污水处理厂能耗为  $0.51\sim 0.86 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ ，其余 12 座污水处理厂能耗则大于  $0.86 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ 。该结果表明，太湖流域污水处理厂的能耗水平比较均匀， $0.51 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$  的能耗值可以作为太湖流域污水处理厂运行绩效的警戒上限值。

据报道，发达国家污水处理厂的能耗中，美国污水处理厂的平均能耗为  $0.20 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ ，日本为  $0.26 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ ，德国为  $0.32 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ <sup>[10]</sup>。目前，国际上能耗控制较好的污水处理厂，如新加坡乌鲁班丹再生水厂，进水设计流量为  $3.6 \times 10^5 \text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ ，采用 A/O 处理工艺，其主要处理过程能耗约为  $0.31 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ <sup>[11]</sup>；奥地利 STRASS 污水处理厂，进水设计流量为  $1.7 \times 10^4\sim 3.8 \times 10^4 \text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ ，处理工艺为 AB 法，采用碳中和的运行模式，其能耗约为  $0.11 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ <sup>[12]</sup>。由此可见，2017 年，太湖流域污水处理厂平均能耗为  $0.458 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ ，与发达国家污水处理厂能耗均值相比，仍然具有较大的节能空间。

### 2.2 太湖流域污水处理厂比能耗分析

1) 水量比能耗分析。按污水处理厂处理工艺，将工艺分为 A/O、A<sup>2</sup>/O、氧化沟、SBR、MBR 5 种常见的工艺类型。在同一处理工艺下，将污水处理厂处理水量分为  $< 1 \times 10^4 \text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 、 $1 \times 10^4\sim 5 \times 10^4 \text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 、 $5 \times 10^4\sim 1 \times 10^5 \text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 、 $1 \times 10^5\sim 2 \times 10^5 \text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 、 $> 2 \times 10^5 \text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$  5 个等级，分析同种工艺下不同规模污水处理厂的日处理水量与水量比能耗之间的关系。由图 1(a)~(e) 和表 1 可以发现，在同种处理工艺下，污

水处理厂不同规模的日处理水量与水量比能耗之间呈幂函数的关系。 $A^2/O$  和 MBR 工艺的污水处理厂日处理水量与水量比能耗之间呈现日处理水量越大, 水量比能耗越低的趋势, 而 A/O 工艺、处理水量  $< 1 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$  和  $1 \times 10^5 \sim 2 \times 10^5 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$  的氧化沟工艺、处理水量为  $1 \times 10^4 \sim 5 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$  的 SBR 工艺污水处理厂则呈现日处理水量越大, 水量比能耗越大的趋势。

由图 1(f) 可以发现, 太湖流域处理水量低于  $5 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$  的小型污水厂水量比能耗值较为分散, 许多小型污水处理厂水量比能耗较低, 部分甚至低于大型污水厂, 但是同样也有 42% 的小型

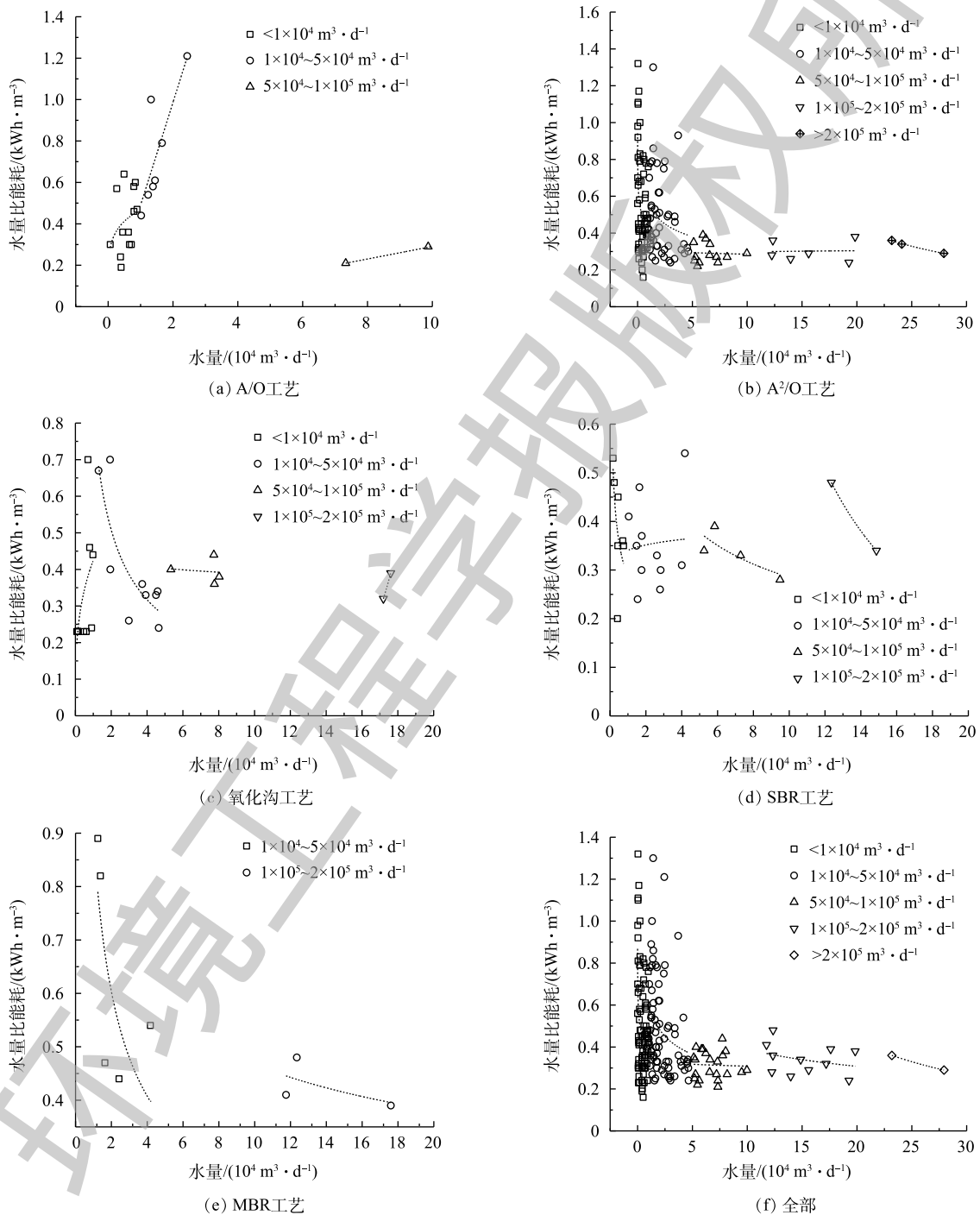


图 1 水量比能耗与日处理水量关系

Fig. 1 Relation between wastewater specific energy consumption and wastewater treatment volume

表 1 日处理水量-水量比能耗函数关系

Table 1 Functional relation between wastewater treatment volume and wastewater specific energy consumption

水量/(10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	函数关系				
	A/O	A <sup>2</sup> /O	氧化沟	SBR	MBR
<1	$y=0.436x^{0.1642}$ $R^2=0.0917$	$y=0.4013x^{-0.141}$ $R^2=0.1321$	$y=0.3809x^{0.2475}$ $R^2=0.3511$	$y=0.2896x^{-0.279}$ $R^2=0.2275$	
1~5	$y=0.4675x^{1.0759}$ $R^2=0.6668$	$y=0.5203x^{-0.253}$ $R^2=0.0747$	$y=0.7683x^{-0.644}$ $R^2=0.6504$	$y=0.3388x^{0.0163}$ $R^2=0.0009$	$y=0.7922x^{-0.4}$ $R^2=0.3717$
5~10	$y=1.372x^{0.9959}$ $R^2=1$	$y=0.2917x^{-0.01}$ $R^2=0.0001$	$y=0.4488x^{-0.066}$ $R^2=0.0226$	$y=0.7525x^{-0.426}$ $R^2=0.6747$	
10~20		$y=0.3035x^{-0.007}$ $R^2=0.0001$	$y=1.1595x^{0.9562}$ $R^2=1$	$y=51.245x^{-1.858}$ $R^2=1$	$y=0.92x^{-0.295}$ $R^2=0.3601$
>20		$y=12.754x^{-1.137}$ $R^2=0.9965$			

污水处理厂水量比能耗高于太湖流域平均值，而太湖流域处理水量大于  $5 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$  的大型污水厂水量比能耗值则较为接近，水量比能耗基本稳定在  $0.33 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3}$ 。可见，污水处理厂日处理水量规模与处理工艺并不是影响污水处理厂水量比能耗的决定性因素，推测水量比能耗可能与污水处理厂设计和实际运行水平相关，设计和运行水平较好的污水处理厂水量比能耗值相对较低。

2) COD 比能耗分析。污水中的 COD 去除主要依靠好氧池中异养菌的新陈代谢转化为  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$ 。按照生物处理的难易程度，可将污水中的 COD 分为易降解 COD 和难降解 COD。一般易降解 COD 在好氧池前端被去除，而难降解 COD 则随着水力停留时间 (HRT) 的延长而在曝气中逐渐去除<sup>[13]</sup>。

目前，太湖流域污水处理厂 COD 出水标准均执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002) 一级 A 标准，结合江苏省对太湖流域污水处理厂新一轮的提标改造，将出水 COD 分为 5 个区间： $<15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $15 \sim 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $20 \sim 30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $30 \sim 40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $40 \sim 50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，不同区间内污染物削减量与单位污染物比能耗之间的关系见图 2(a)~图 2(f)。在不同的出水 COD 下，COD 的削减量与 COD 比能耗之间呈幂函数相关性。在同一出水 COD 区间内，随着污水处理厂对 COD 削减量的增加，单位 COD 的比能耗降低，并逐步趋于稳定。这是由于太湖流域污水处理厂普遍未采取精确曝气的控制策略，曝气系统并未根据实际进水 COD 进行曝气量的调节，过度的曝气加剧了电能的浪费，造成了 COD 比能耗的增加，而随着进水 COD 削减量的逐渐增加，单位 COD 的比能耗逐渐降低，并在可处理的最大值范围内，将单位 COD 的比能耗确定在一个稳定值内。

表 2 描述了不同出水 COD 区间内 COD 的比能耗。当出水达到一级 A 排放标准，即出水 COD 小于  $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时，COD 比能耗均值为  $1.77 \text{ kWh} \cdot \text{kg}^{-1}$ ；当出水满足太湖流域特别排放限值 ( $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 的标准时，COD 比能耗均值为  $1.78 \text{ kWh} \cdot \text{kg}^{-1}$ ；而当出水低于  $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时，COD 比能耗均值反而大于  $30 \sim 40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $40 \sim 50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  这 2 个区间。由此可见，污水处理厂对 COD 的削减量只是和 COD 的比能耗相关联，但并不是影响 COD 比能耗的主要原因，COD 比能耗的高低取决于曝气系统能耗的大小。

3)  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  比能耗分析。去除污水中的  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  主要依靠活性污泥中的亚硝化菌和硝化菌，其属于自养型菌，能够从  $\text{CO}_2$  中获取碳源，无机物氧化中获得能量<sup>[14]</sup>。异养型好氧菌相比于硝化菌在对底物 ( $\text{O}_2$ ) 的竞争中占优势，好氧异养菌将进水中大量的有机物氧化，硝化菌利用水体中的  $\text{O}_2$  作为电子受体进行硝化反应，将  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  转化为  $\text{NO}_x^-$ <sup>[15]</sup>。

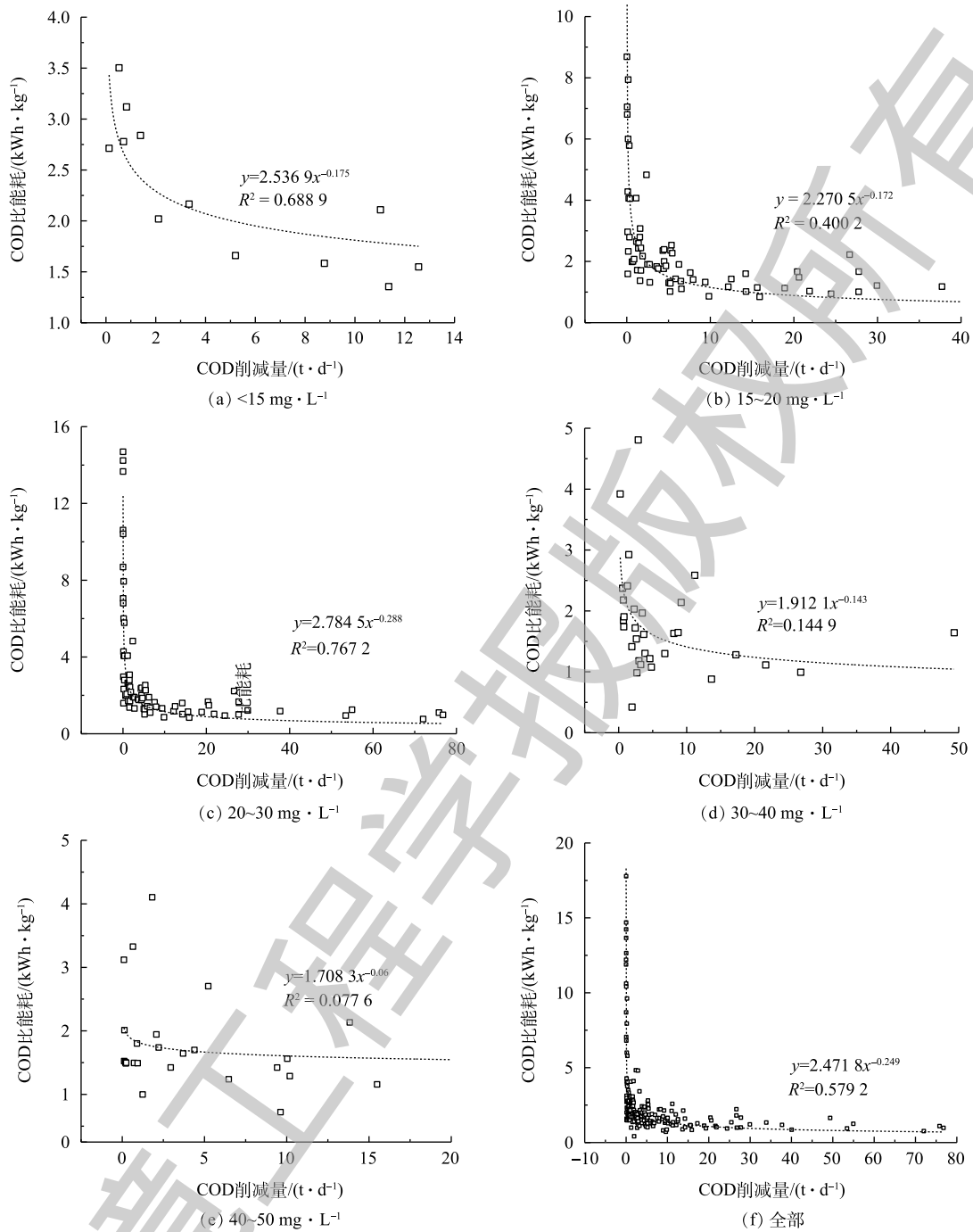


图2 COD比能耗与COD削减量关系

Fig. 2 Relation between COD specific energy consumption and COD reduction

因此,对于采用脱氮处理工艺的污水处理厂不应采用COD比能耗作为评估污水处理厂能耗的指标,采用 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 比能耗能够较好地反映脱氮工艺污水处理厂的能耗情况。将 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 出水浓度分为3个区间: $<1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $1 \sim 3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $3 \sim 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,不同区间污染物削减量与比能耗之间的关系见图3(a)~图3(d)。当出水 $\text{NH}_4^+\text{-N} < 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的削减量与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 比能耗之间的相关性较好, $R^2$ 为0.5265,当出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在 $1 \sim 3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $3 \sim 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的削减量与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 比能耗之间基本不存在相关性。随着 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 削减量的增加,比能耗逐渐降低并趋于稳定值。这主要是因为当进

水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  削减量降低时，污水处理厂并没有及时减少曝气量，从而由于过度曝气增加了  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的比能耗。

表 3 列举了不同出水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度的比能耗，当出水达到一级 A 排放标准，即出水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  小于  $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时， $\text{NH}_4^+\text{-N}$  比能耗均值为  $21.35 \text{ kWh}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，当出水须满足特别排放限值 ( $3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 的标准时， $\text{NH}_4^+\text{-N}$  比能耗均值为  $37.40 \text{ kWh}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，高于出水  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  小于  $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  比能

表 2 COD 出水浓度-比能耗关系

Table 2 Relationship between COD effluent concentration and COD specific energy consumption

出水水质/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	COD 比能耗/( $\text{kWh}\cdot\text{kg}^{-1}$ )		
	均值	最小值	最大值
<15	2.28	1.35	3.50
15~20	2.19	0.81	9.62
20~30	2.97	0.76	14.69
30~40	1.78	0.42	4.80
40~50	1.77	0.72	4.10

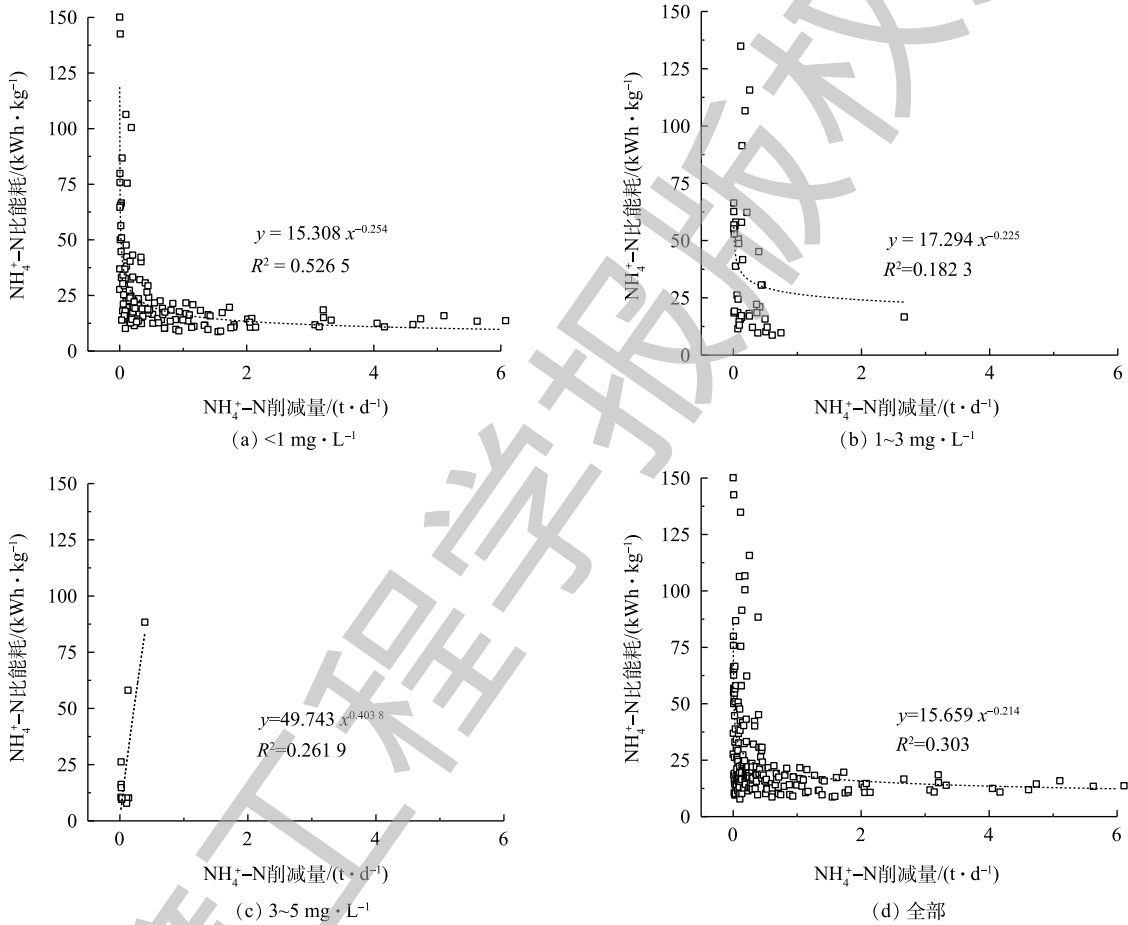


图 3  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  比能耗与  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  削减量关系

Fig. 3 Relation between  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  specific energy consumption and  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  reduction

耗均值。可见，污水处理厂对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的削减量虽然与  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的比能耗呈现相关性，但并不是影响  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  比能耗的主要原因。污水处理厂的过度曝气会增加  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的比能耗。

### 2.3 能耗与水量和耗氧污染物之间的关系

太湖流域污水处理厂能耗主要分为 2 个部分：一部分为用于提升污水的污水泵，受日处

表 3  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  出水浓度-比能耗关系

Table 3 Relationship between  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  effluent concentration and  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  specific energy consumption

出水浓度/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 比能耗/( $\text{kWh}\cdot\text{kg}^{-1}$ )		
	均值	最小值	最大值
<1	25.78	8.70	150.12
1~3	37.40	8.68	134.85
3~5	21.35	7.79	88.36

理水量规模的影响,当污水处理厂日处理水量增大时,污水泵消耗的电能也随之增加;另一部分为生化池中的曝气系统,当进水中COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 等耗氧污染物增多时,须及时增大曝气量去除污染物,导致曝气系统能耗的增加。因此,采用污水厂日均进水量和耗氧污染物削减量分别反映污水泵与曝气系统的能耗情况,采用回归分析来量化太湖流域污水处理厂能耗与日处理水量和耗氧污染物削减量之间的关系。其回归线性方程如式(1)所示。

$$Y = 1480.1242 + 2221.7457X_1 + 0.5378X_2 - 1.9858X_3 \quad (1)$$

式中:  $Y$ 为能耗,  $\text{kWh}\cdot\text{d}^{-1}$ ;  $X_1$ 为水量,  $10^4 \text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ ;  $X_2$ 为COD削减量,  $\text{kg}\cdot\text{d}^{-1}$ ;  $X_3$ 为 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 削减量,  $\text{kg}\cdot\text{d}^{-1}$ 。

回归线性方程的 $R^2$ 为0.968,  $Y$ 与 $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 的线性拟合程度较好。该方程说明,污水处理厂日处理水量规模、COD日削减量与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 日削减量对污水处理总能耗存在影响,随着实际日处理水量和COD日削减量的增高,总能耗增高,而如果 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 日削减量增加,则总能耗降低。

### 3 结论

1) 太湖流域污水处理厂2017年能耗均值为 $0.458 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ ,高于发达国家污水处理厂能耗平均值,能耗服从正态分布。通过K-Means快速聚类法得出太湖流域污水处理厂的能耗水平比较均匀, $0.51 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ 的能耗值可以作为太湖流域污水处理厂运行绩效时的警戒上限值。

2) 太湖流域污水处理厂日处理水量规模与处理工艺并不是影响污水处理厂能耗的决定性因素,太湖流域处理规模大于 $5\times 10^4 \text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 的污水处理厂水量比能耗较为接近;污染物削减量与污染物削减量比能耗之间均存在幂函数关系,在每个污染物出水浓度区间内,呈现削减污染物量越多,污染物削减量比能耗越低的趋势。

3) 太湖流域污水处理厂能耗与日处理水量和耗氧污染物削减量之间存在线性回归关系。实际日处理水量和COD日削减量的增高会导致总能耗增高,而 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 日削减量增加则会导致总能耗的降低。

### 参考文献

- [1] 管凛,荆肇乾,熊顺华,等.太湖流域污水处理厂升级改造的措施与思考[J].自然灾害学报,2011,20(5):65-68.
- [2] 杨敏,颜秀勤,孙雁,等. $\text{A}^2/\text{O}-\text{MBR}$ 工艺城镇污水处理厂能耗特征与运行优化[J].给水排水,2016,52(12):44-47.
- [3] 陆桂勇,刘礼祥,杨旭良,等.城市污水厂提标后全流程节能优化控制[J].中国给水排水,2013,29(4):94-99.
- [4] LONGO S, D ANTONI B M, BONGARDS M, et al. Monitoring and diagnosis of energy consumption in wastewater treatment plants. A state of the art and proposals for improvement[J]. Applied Energy, 2016, 179(5): 1251-1268.
- [5] 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.
- [6] 金昌权,汪诚文,曾思育,等.污水处理厂能耗特征分析方法与节能途径研究[J].给水排水,2009,45(S1):270-274.
- [7] BRAVO L, FERRER I. Life cycle assessment of an intensive sewage treatment plant in Barcelona (Spain) with focus on energy aspects[J]. Water Science & Technology, 2011, 64(2): 440-447.
- [8] TANG Y, GUO L L, HONG C Y, et al. Seasonal occurrence, removal and risk assessment of 10 pharmaceuticals in two sewage treatment plants of Guangdong, China[J]. Environmental Technology, 2017, 40(4): 458-469.
- [9] 郭泓利,李鑫玮,任钦毅,等.全国典型城市污水处理厂进水水质特征分析[J].给水排水,2018,54(6):12-15.
- [10] MIZUTA K, SHIMADA M. Benchmarking energy consumption in municipal wastewater treatment plants in Japan[J]. Water Science & Technology, 2010, 62(10): 2256-2262.

- [11] 徐靖. 新加坡第五个水回用厂正式投运[J]. 水处理技术, 2017, 43(3): 67-70.
- [12] 郝晓地, 孟祥挺, 付昆明. 新加坡再生水厂能耗目标及其技术发展方向[J]. 中国给水排水, 2014, 30(24): 7-11.
- [13] ELAWWAD A, NAGUIB A, ABDELHALIM H. Modeling of phenol and cyanide removal in a full-scale coke-oven wastewater treatment plant[J]. Desalination & Water Treatment, 2016, 57(52): 1-13.
- [14] AN D, QU F, LIANG H, et al. A novel integrated vertical membrane bioreactor (IVMBR) for removal of nitrogen from synthetic wastewater/domestic sewage[J]. Chemical Engineering Journal, 2013, 223(3): 908-914.
- [15] ZHANG P Y, QU Y, YU D S, et al. Comparison of heterotrophic nitrification and aerobic denitrification system by strain qy37 and its accelerating removal characteristic of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ [J]. Environmental Science, 2010, 31(8): 1819-1826.

(本文编辑: 金曙光, 王萌萌, 郑晓梅)

## Energy consumption evaluation and analysis of wastewater treatment plants in Taihu basin, China

ZOU Lüxi<sup>1</sup>, LI Huaibo<sup>1</sup>, WANG Yan<sup>1</sup>, ZHENG Kaikai<sup>1</sup>, WANG Shuo<sup>1,2,3</sup>, LI Ji<sup>1,2,3,\*</sup>

1. College of Environmental and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China

2. Jiangsu Key Laboratory of Anaerobic Biotechnology, Wuxi 214122, China

3. Jiangsu College of Water Treatment Technology and Material Collaborative Innovation Center, Suzhou 215009, China

\*Corresponding author, E-mail: lijij@jiangnan.edu.cn

**Abstract** In order to analyze the energy consumption of wastewater treatment plants (WWTPs) in Taihu basin, based on specific energy consumption, the energy consumption status, wastewater specific energy consumption and specific energy consumption of pollutant reduction, as well as the linear relationship between the energy consumption and wastewater volume and the reduction of oxygen-consuming pollutants of WWTPs in Taihu Basin were explored with combination of various statistical methods. The results show that the average energy consumption of WWTPs in Taihu basin in 2017 are  $0.458 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ , which are considerably higher than the average values of WWTPs in developed countries. The wastewater specific energy consumption of WWTPs with treatment capacity greater than  $5\times 10^4 \text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$  in Taihu Basin is basically stable at  $0.33 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$ , while the wastewater specific energy consumption of WWTPs with treatment capacity less than  $5\times 10^4 \text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$  presents great fluctuation. There is power function relationship between specific energy consumption of pollutant reduction and the reduction of chemical oxygen demand (COD) and ammonia nitrogen ( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ). Within the effluent concentration range of each pollutant, the more reduction of pollutants is during the wastewater treatment process, the lower specific energy consumption of pollutant reduction is. There is a linear relationship between the energy consumption and wastewater volume or the reduction of oxygen-consuming pollutants. Therefore, attention should be paid to the specific energy consumption of pollutant reduction to save energy and reduce consumption in WWTPs.

**Keywords** wastewater treatment plant; energy consumption evaluation; specific energy consumption method; power function analysis; Taihu basin