

# 长江经济带污水处理厂能源效率及其影响因素

王洪涛<sup>1,2</sup>, 黄润垚<sup>1,2</sup>, 谢 丽<sup>1</sup>, 倪晓航<sup>1</sup>

(1. 同济大学 长江水环境教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 联合国环境规划署—同济大学环境与可持续发展学院, 上海 200092)

**摘要:** 采用基于归一化的能源强度和基于数据包络分析的相对能源效率指标, 对长江经济带 970 座污水处理厂进行评估, 分析了设计要素、运行状况与外部条件的影响。结果表明: 970 座污水处理厂的能源强度范围以处理水量和 COD 削减量计分别为 0.10~1.84 kWh·m<sup>-3</sup> 和 0.41~1.42 kWh·kg<sup>-1</sup>, 相对能源效率变化范围为 0.02~2.35; 能源效率受规模效应影响显著; 活性污泥相关工艺的能源效率较高; 污染物入水质量浓度较高或出水排放标准等级较低时, 能源效率较高; 长江经济带上、中、下游污水处理厂能源效率水平存在差异, 这是不同子区域污水处理厂设计要素、运行状况、外部条件等因素综合作用的结果。该结果可为污水处理厂节能减排提供理论基础和技术支撑。

**关键词:** 污水处理厂; 能源效率指标; 长江经济带; 数据包络分析

中图分类号: X321

文献标志码: A

## Energy Efficiency and Influencing Factors of Wastewater Treatment Plants in Yangtze River Economic Belt

WANG Hongtao<sup>1,2</sup>, HUANG Runyao<sup>1,2</sup>, XIE Li<sup>1</sup>, NI Xiaohang<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Yangtze River Water Environment of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Tongji University Sustainable Development And New Type Urbanization THINK-TANK, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The energy efficiency indicators of 970 WWTPs in the Yangtze River Economic Belt (YREB) were evaluated, including the energy intensity (EI) via normalization and the relative energy efficiency (REE) via data envelopment analysis. Meanwhile, influencing factors of designing, operational conditions, and externalities were analyzed. The results show that the EIs of 970 WWTPs change from 0.10 to 1.84 kWh·m<sup>-3</sup> and from 0.41 to 1.42 kWh·kg<sup>-1</sup> in terms of wastewater treated and COD removed, while the variation range of REE is

0.02~2.35. The impact of scale effect on energy efficiency is significant. The WWTPs configured with activated sludge-based processes tend to own better performance on energy efficiency. Besides, relatively higher pollutant concentrations in influent and less strict discharge standards would facilitate the energy efficiency. Finally, WWTPs in subregions of upstream, midstream, and downstream in YREB have different energy efficiency situations. This phenomenon is resulted from the factors such as designing factors, operational conditions, and externalities of WWTPs. This paper is expected to provide theoretical basis and technical support for energy-saving and emission-reduction of WWTPs.

**Key words:** wastewater treatment plants; energy efficiency indicator; Yangtze River Economic Belt; data envelopment analysis

在碳达峰与碳中和背景下, 我国区域发展面临新的挑战 and 机遇。长江经济带覆盖我国 11 个省级行政区, 总面积约 205.23 万 km<sup>2</sup>, 人口和生产总值均超过全国的 40%。随着经济快速发展, 区域内各省市污水处理量迅速增加。2017 年国家出台了《长江经济带生态环境保护规划》, 以推动该区域的绿色发展。

在众多行业中, 污水处理的碳排放强度较大。污水处理厂在运行过程中通过消耗能源的方式去除污染物质, 同时排放大量温室气体<sup>[1]</sup>。当前污水处理厂的主要减碳措施大都与能源有关, 分别为降低能源消耗(reduce)、回收能源(recovery)与再生能源(renewables)<sup>[2]</sup>。因此, 能源效率提升是污水处理厂节能减排和实现碳中和的重要途径。污水处理厂能源效率评估经历了从归一化(normalization)到前沿分析(frontier analysis)的发展<sup>[3]</sup>。其中, 归一化指直

收稿日期: 2021-12-18

基金项目: 上海市科委国际合作项目(21230712200); 上海市科技创新研发计划(17DZ1202100)

第一作者: 王洪涛(1979—), 男, 副教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为污水厂能源效率与碳排放。

E-mail: hongtao@tongji.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

接将污水处理厂的某项产出同能源消耗做比值,而前沿分析则是基于水能耦合关系构建投入产出框架。从归一化到前沿分析,评估所得关键指标(key performance indicator)的综合度得到了较大提高,但其复杂程度也在上升<sup>[4]</sup>。以数据包络分析(data envelopment analysis, DEA)为代表的线性规划方法则是前沿分析的常见手段。现有研究主要存在以下问题:在使用DEA模型的过程中通常采用比值形式的投入和产出变量,无法直观反映污水处理厂的实际情况<sup>[3]</sup>,且所获结果很可能超出生产可能集(production possibility set)<sup>[4]</sup>;缺乏对影响因素的系统性分析;缺乏对归一化结果和线性规划结果的综合性研究。

本文以长江经济带作为研究边界,基于污水处理厂能源效率指标(energy efficiency indicator, EEI)<sup>[5]</sup>,采用DEA综合评估并结合归一化方法,对污水处理厂能源效率进行评估;同时分析了相关因

素对能源效率的影响,为污水处理行业“双碳”目标的实现提供科学依据和技术支撑。

## 1 数据与方法学

### 1.1 数据收集与筛选

本文数据主要来源为《2018中国城镇排水统计年鉴》,该年鉴收录了2017年全国范围内3 460多座污水处理厂的基本信息以及运行情况,其中关于长江经济带9省2市(图1)的污水处理厂数量为1 440座。本文从中摘录的数据类型包括年总用电量、年污水处理总量、5种污染物指标(COD、BOD<sub>5</sub>、TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N和TP)的年均入水质量浓度和排放质量浓度。此外,污水处理厂的设计处理能力(万t·d<sup>-1</sup>)和主体工艺类型来源于生态环境部发布的《全国投运污水处理设施清单》以及Dowater污水处理工程网数据库。

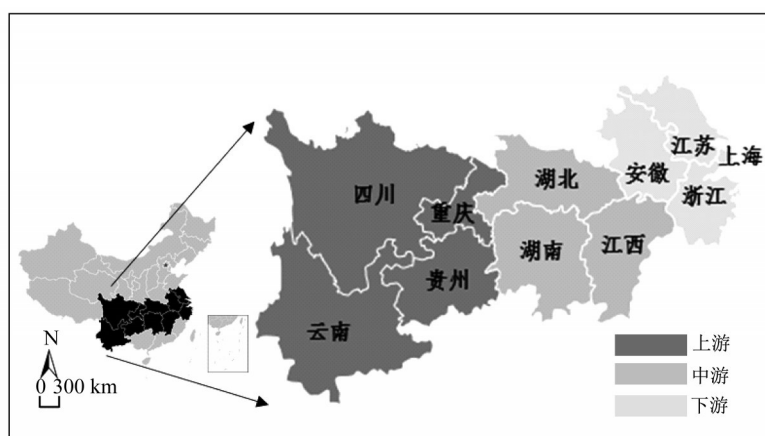


图1 长江经济带研究边界

Fig.1 Study area of Yangtze River Economic Belt

为保证结果的可信度,本文对所有数据进行了全面的筛查和清洗,具体流程见图2。首先,为保障基本的分析条件,删除了存在关键数据缺失和异常的污水处理厂条目,包括年总用电量、年污水处理总量、污染物年均入水质量浓度与排放质量浓度。后续通过《全国投运污水处理设施清单》和Dowater污水处理工程网补充设计处理能力和工艺的相关数据,同时剔除两项来源中存在不匹配情形的污水处理厂条目。因数据缺失、异常值、不匹配而删除的条目数量分别为337、55和78。最后,共计获得了长江经济带970座污水处理厂的数据,其中上游、中游和下游的污水处理厂数量分别为236、274和460座。

### 1.2 能源效率评估与影响因素分析

#### (1)污水处理厂能源效率指标构建

某行业的能源效率可以用生产过程的有效产出和该生产过程中的能源投入的比率来表示<sup>[6]</sup>:

$$\text{能源效率} = \frac{\text{生产过程的有效产出}}{\text{生产过程中的能源投入}} \quad (1)$$

由于污水处理厂能源消耗的主要形式为电能,式(1)的投入可以设置为总电耗量(kWh)。同时,污水处理厂的产出可以从水量和水质两大角度加以呈现。通过归一化即可实现对于污水处理厂能源效率指标的量化,例如单位处理水量电耗(kWh·m<sup>-3</sup>)和单位COD削减电耗(kWh·kg<sup>-1</sup>)<sup>[7]</sup>。这些指标在部分研究中亦被称作能源强度(energy intensity, EI)<sup>[8]</sup>,对

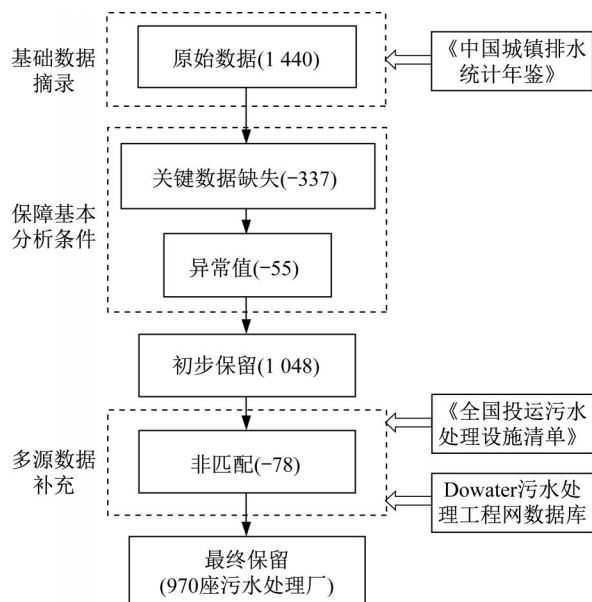


图2 数据收集与筛查流程

Fig.2 Process of data collection and screening

应的公式如下:

$$\text{单位处理水量电耗} = \frac{\text{污水处理厂能源消耗量}}{\text{污水处理量}} \quad (2)$$

$$\text{单位COD削减电耗} = \frac{\text{污水处理厂能源消耗量}}{\text{COD削减量}} \quad (3)$$

然而,归一化的计算方法难以将多个变量完全涵盖在内。对于污水处理厂而言,涉及的污染物的类型往往不止一种。因此,本文采用DEA的方法,将污水处理厂视作“多投入、多产出”的决策单元(decision-making units, DMUs)进行非参数线性规划运算。其中的投入为年总用电量,而产出则为多种污染物削减量,包括COD、BOD<sub>5</sub>、TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N和TP。在参照前人研究<sup>[9-10]</sup>的基础上,遵循规模报酬可变(variable returns to scale, VRS)的条件选择,采用SBM DEA的超效率模型<sup>[11]</sup>。DEA的运算结果为效率得分,该得分描述了DMU的相对有效程度,数值越大代表对应DMU的效率水平越高<sup>[12]</sup>。从定性分析的角度,效率得分小于1的DMU为相对无效的生产单元,而其他则为有效单元<sup>[13]</sup>。有效单元为无效单元的参考标杆。本文的评估对象为污水处理厂,因此直接将有效单元定义为标杆污水处理厂,而将无效单元称为普通污水处理厂。对于投入产出变量的统计见表1,其中的年总处理水量仅用于式(2)单位处理水量电耗的归一化运算。

表1 污水处理厂能源效率指标相关变量统计

Tab.1 Statistics of input and output variables for energy efficiency indicators of wastewater treatment plants

变量类型	单位	最小值	中位数	最大值	平均值	标准差
年总用电量	kWh	17 342	2 032 872	138 869 383	3 875 158	7 140 333
年总处理水量	万 t	7.00	745	24 034	1 354	2 036
COD年削减量	t	16.15	1 211	87 787	2 762	5 449
BOD <sub>5</sub> 年削减量	t	3.00	506	37 624	1 161	2 341
TN年削减量	t	1.78	129	7 048	263	461
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N年削减量	t	1.04	126	9 408	265	524
TP年削减量	t	0.14	14	1 371	36	83

## (2) 影响因素分析

本文从设计要素、运行状况和外部条件揭示标杆污水处理厂和普通污水处理厂的特征与影响情况,具体因素及其聚类详见表2。

其中,设计要素包括规模(万 t·d<sup>-1</sup>)和主体工艺。对于规模,采用的数据类型为污水处理厂的實際处理负荷(即年总处理水量),其聚类划分参考住房和城乡建设部发布的《城市污水处理厂建设标准》。对于工艺,则依据《城市污水处理厂建设标准》和现有文献<sup>[14]</sup>的分类方式划分出12个主要类别:厌氧—缺氧—好氧(anaerobic-anoxic-oxic, AAO)、厌氧—好氧(anaerobic-oxic, AO)、氧化沟(oxidation ditch, OD)、序批式活性

污泥法(sequencing batch reactor, SBR)、循环活性污泥技术(cyclic activated sludge technology, C-Tech)、传统活性污泥法(conventional activated sludge technology, CAS)、改良序批式活性污泥法(modified sequencing batch reactor, MSBR)、曝气生物滤池(biological aerated filter, BAF)、膜生物反应器(membrane bio-reactor, MBR)、移动床生物膜工艺(moving bed biofilm reactor, MBBR)及组合工艺。其中,组合工艺主要是AAO或OD等活性污泥衍生方法和膜工艺的联用,例如缺氧/好氧-膜生物反应器<sup>[15]</sup>。而仅注明“二级生化”的污水处理厂都被纳入了“其他”的聚类中。运行状况包括5种污染物指标(即COD、BOD<sub>5</sub>、TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N和TP)的



入水质量浓度。外部条件包括排放水质的达标情况和空间位置。参照《城镇污水处理厂污染物排放标准 GB18918—2002》的限值,将排放水质划分为4种不同的排放情况,即一级A、一级B、二级和低于二级。

本文一方面揭示污水处理厂能源效率随不同影响要素聚类的变化趋势,另一方面则通过统计学方法分析影响因素的作用情况。对于聚类中数据类型为有序分类资料的因素,采用二分类逻辑回归(binary logistic regression)探索该因素对标杆污水处理厂的显著性与倾向性。该类型因素包括规模、污染物入水质量浓度和排放达标情况等。其中,通过假定概率(probability, P)判断影响显著水平,通过优势比(odds ratio, OR)的大小判断不同影响因素的增大对能源效率定性结果的作用情况,并依据受试者工作特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线下方的面积(area under curve, AUC)确定二分类逻辑回归结果的可信度。同时,对于聚类中数据类

型为无序分类资料的因素(即主体工艺和空间位置),采用卡方检验(Chi-square test)推断标杆与普通污水处理厂构成比的差异情况。对于理论频数小于1或总例数小于40的情形,采用Fisher确切概率法。

## 2 结果与讨论

### 2.1 能源效率指标评估

对于3种能源效率指标的统计如表3所示。单位处理水量电耗平均值为0.32 kWh·m<sup>-3</sup>,单位COD削减电耗平均值为1.99 kWh·kg<sup>-1</sup>,而相对能源效率的平均值为0.33。单位处理水量电耗和单位COD削减电耗数值越低,表明污水处理厂能源效率越高;而相对能源效率越高,代表其能源效率越高。从表3可见,各项能源效率指标的最大值和最小值之间差距较大,可认为长江经济带970座污水处理厂的能源效率水平存在较大差异。

表2 影响因素类别与聚类  
Tab.2 Categories and clusters of the influencing factors

类别	影响因素聚类	聚类
设计要素	规模(处理负荷)/(万 t·d <sup>-1</sup> )	[0, 1)、[1, 5)、[5, 10)、[10, 20)、[20, 50)和[50, 100)
	主体工艺	AAO、AO、OD、SBR、C-Tech、CAS、MSBR、BAF、MBR、MBBR、其他(二级生化)和组合工艺
运行状况	入水 COD 质量浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	[0, 100)、[100, 150)、[150, 200)、[200, 250)和≥250
	入水 BOD <sub>5</sub> 质量浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	[0, 40)、[40, 80)、[80, 120)和≥120
	入水 TN 质量浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	[0, 20)、[20, 30)、[30, 40)和≥40
	入水 NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N 质量浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	[0, 10)、[10, 20)、[20, 30)和≥30
	入水 TP 质量浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	[0, 2)、[2, 3)、[3, 4)和≥4
外部条件	排放达标情况	GB18918—2002 一级A、一级B、二级和低于二级
	空间位置	长江经济带上游、中游和下游

表3 长江经济带970座污水处理厂能源效率指标基本统计  
Tab.3 Basic statistics on energy efficiency indicators of 970 wastewater treatment plants in Yangtze River Economic Belt

能源效率指标		最小值	中位数	最大值	平均值	标准差
单位处理水量电耗/(kWh·m <sup>-3</sup> )		0.10	0.27	1.84	0.32	0.18
单位COD削减电耗/(kWh·kg <sup>-1</sup> )		0.41	1.69	14.42	1.99	1.27
相对能源效率	总体	0.02	0.29	2.35	0.33	0.21
	标杆	1.00	1.06	2.35	1.13	0.27
	普通	0.02	0.28	0.90	0.30	0.16

相对能源效率的评估结果显示,长江经济带970座污水处理厂中有27个样本被判定为标杆污水处理厂,占总体比重仅为2.78%,其余943个样本则为普通污水处理厂。相对能源效率与两项能源强度指标总体呈负相关(图3),且与单位处理水量电耗的散点图趋势更为离散(图3a)。鉴于长江经济带970座污水处理厂在能源效率指标方面存在较大差异,后续将从设计要素、运行状况和外部条件进行影响因

素特征分析。

### 2.2 影响因素特征分析

#### (1) 设计要素

长江经济带970座污水处理厂不同处理负荷以及主体工艺的相对能源效率见图4。随着处理负荷的增大,各聚类污水处理厂的相对能源效率呈现出单调递增的趋势,无论是均值还是中位数都有明显上升。对于主体工艺按照均值从小到大的排序如图

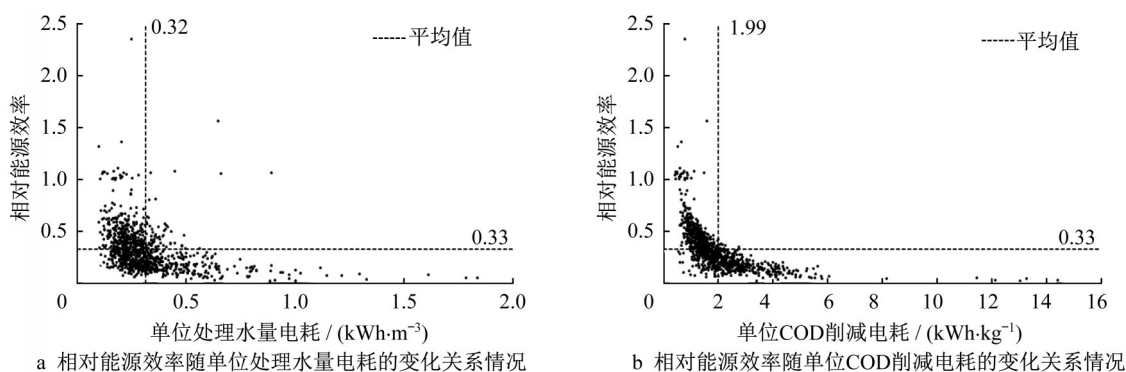


图3 相对能源效率与能源强度指标对比分析

Fig.3 Comparative analysis on the relative energy efficiency and the energy intensity indicators

4b。总体而言,采用活性污泥法相关工艺的污水处理厂的相对能源效率均值较高,而配备了MBBR、其他、组合工艺的污水处理厂的相对能源效率均值偏低。值得注意的是,OD工艺虽然从均值角度排名靠后,但其拥有许多相对能源效率较高的污水处理厂,

其中有9座污水处理厂被判定为标杆。本文OD工艺对应的污水处理厂样本数量为347,是970个样本中数量最多的工艺。因此,OD工艺总体较低的相对能源效率均值和其较大的样本量有关。

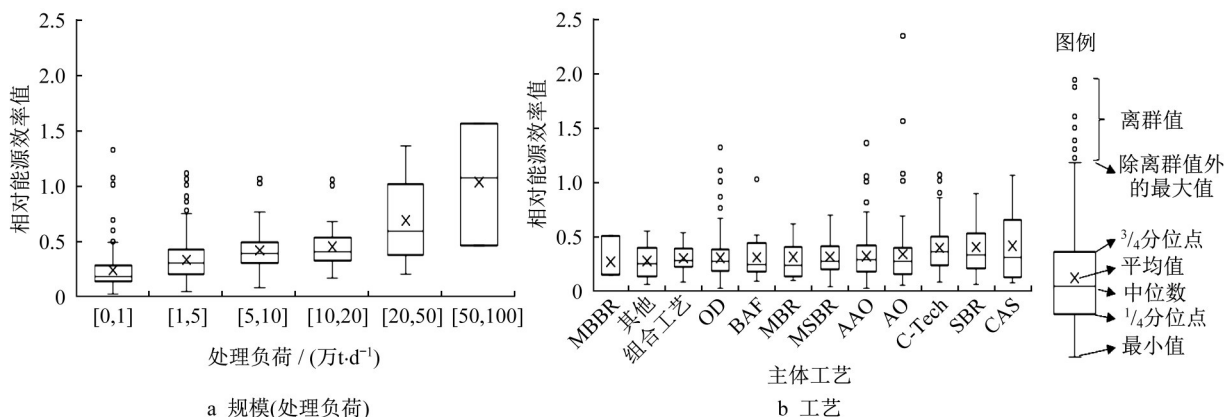


图4 不同设计要素的污水处理厂的相对能源效率

Fig.4 Relative energy efficiency of wastewater treatment plants in respect of designed parameters

二分类逻辑回归对于处理负荷的检验结果显示, $P$ 值小于0.001,这意味着规模对污水处理厂相对能源效率具备显著影响。不同规模在逻辑回归分析过程中的AUC高于0.5,因此分析结果的可信度较高。此外,其OR等于2.373,这意味着污水处理厂的相对能源效率每增大一个单位,其成为标杆污水处理厂的概率约为变化前的2.373倍。该现象符合“规模效应”,即污水处理负荷越高,对应的能源效率越高<sup>[16]</sup>。针对不同工艺的Fisher确切概率法检验结果显示, $P$ 值小于0.001,即不同工艺内部标杆与普通污水处理厂的构成比存在显著差异。如表4所示,部分工艺类别的聚类中不包含任何标杆污水处理厂,包括MSBR、MBBR、其他(二级生化)和组合工艺。除MSBR以外,和活性污泥法相关的工艺都

具备一定数量的标杆污水处理厂,这也说明活性污泥相关处理工艺的能源效率水平整体较优。

## (2)运行状况

对于不同污染物入水质量浓度的相对能源效率情况如图5,污水处理厂频数在不同入水质量浓度聚类间的分布相对均匀。无论哪一种污染物,在入水质量浓度较高的情况下,对应污水处理厂的相对能源效率也更高,该项特征从COD的角度尤为明显(图5a)。

同时,依据二分类逻辑回归的结果,所有污染物对应的 $P$ 值都小于0.001,可认为不同程度的污染物入水质量浓度对污水处理厂能源效率具有显著影响。由于本文所涉及的5种污染物对应的AUC皆高于0.5,可认为回归结果的可信度较高。入水

表 4 不同主体工艺聚类污水处理厂能源效率指标统计

Tab.4 Statistics on energy efficiency indicators of wastewater treatment plants in different clusters of technical processes

影响因素	聚类	相对能源效率标杆污水处理厂		单位处理水量电耗均值(标准差)/(kWh·m <sup>-3</sup> )		单位 COD 削减电耗均值(标准差)/(kWh·kg <sup>-1</sup> )	
		数量	占比/%	标杆污水处理厂	普通污水处理厂	标杆污水处理厂	普通污水处理厂
主体工艺	AAO	7	2.55	0.23(0.06)	0.35(0.20)	0.87(0.29)	1.98(1.32)
	AO	5	6.85	0.34(0.21)	0.36(0.23)	0.93(0.44)	2.05(1.24)
	BAF	1	5.00	0.20(—)	0.35(0.10)	0.62(—)	2.30(1.09)
	CAS	4	19.05	0.45(0.39)	0.41(0.23)	0.59(0.13)	2.17(1.24)
	C-Tech	3	2.91	0.19(0.02)	0.27(0.14)	0.85(0.01)	1.65(0.83)
	MBR	1	6.67	0.21(—)	0.40(0.29)	0.56(—)	2.30(1.18)
	MSBR	0	0.00	—(—)	0.33(0.22)	—(—)	2.01(1.24)
	OD	4	1.15	0.15(0.05)	0.28(0.14)	0.51(0.08)	2.16(1.40)
	SBR	2	4.88	0.12(0.00)	0.30(0.15)	0.46(0.04)	1.71(0.95)
	MBBR	0	0.00	—(—)	0.39(0.19)	—(—)	3.24(1.60)
	其他(二级生化)	0	0.00	—(—)	0.35(0.18)	—(—)	1.91(0.99)
	组合工艺	0	0.00	—(—)	0.36(0.14)	—(—)	1.95(0.60)

COD 质量浓度的 OR 值等于 7.712,这意味着入水 COD 质量浓度在对应的聚类中每增大一个级别,对应的污水处理厂样本点成为标杆污水处理厂的概率增大至 7.712 倍。较高的入水 COD 质量浓度意味着较为充足的碳源,有利于污染物的生化处理。这一点在其他文献中也有报道,例如较高的入水 COD 质量浓度可以促进资源回收<sup>[17]</sup>和能源回收<sup>[18]</sup>的效果。类似地,入水 BOD<sub>5</sub>质量浓度和入水 TN 质量浓度的 OR 值分别为 5.338 和 3.210。由此可推断,入水 BOD<sub>5</sub>质量浓度和入水 TN 质量浓度每增大一个级别,污水处理厂从相对能源效率的角度被判定为标杆的概率将上升至 5.338 和 3.210 倍。对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 TP 而言,情况是类似的,其 OR 值分别为 3.091 和 3.029。据相关研究,若污水处理厂入水质量浓度低,其能源消耗强度会更大<sup>[3]</sup>,但若以处理单位水量的能耗来计,则会得到相反的结论<sup>[3]</sup>。在规模条件较为接近的情况下,污染物入水质量浓度越高,意味着可供削减的污染物总量也越大。尽管更高的污染物质量浓度所对应的能源消耗总量也更大,但其相对能源效率反而更高。

(3)外部条件

对于不同排放标准和空间位置的污水处理厂能源效率评估结果见图 6。按照不同排放标准聚类,从“一级 A”到“一级 B”,再到“二级”和“低于二级”,相关污染物的排放质量浓度增加。换言之,污水处理厂所执行的排放限值也在趋于宽松。由图 6a 可知,“低于二级”的污水处理厂样本点的相对能源效率值远高于其他 3 个排放条件的聚类。

二分类逻辑回归检验结果显示,不同的排放标准对于污水处理厂的能源效率具备显著统计学差异( $P$ 值 $<0.01$ )。其 AUC 高于 0.5,回归结果的可信度较高。同时,OR 等于 2.233,意味着随着达标级别的下降,污水处理厂样本点成为标杆污水处理厂的概率上升至 2.233 倍。由此可以推测,污水处理厂排放限值越严格,对应的能源效率就会越低。相关文献结果表明,趋于严苛的排放标准将引起更多的能源消耗与碳排放足迹<sup>[19]</sup>,提高污水排放标准对于化石燃料、全球气候的潜在影响是成倍增加的<sup>[20]</sup>。本文的结果与上述结论一致,即排放限值的严苛程度对污水处理厂能源效率具备显著影响。

从图 6b 中看,依据空间位置所划分的聚类中,

表 5 长江经济带不同空间位置污水处理厂能源效率指标统计

Tab.5 Statistics on energy efficiency indicators of wastewater treatment plants in different spatial location of Yangtze River Economic Belt

影响因素	聚类	相对能源效率标杆污水处理厂		单位处理水量电耗均值(标准差)/(kWh·m <sup>-3</sup> )		单位 COD 削减电耗均值(标准差)/(kWh·kg <sup>-1</sup> )	
		数量	占比/%	标杆污水处理厂	普通污水处理厂	标杆污水处理厂	普通污水处理厂
空间位置	上游	8	3.39	0.36(0.11)	0.40(0.22)	1.57(1.22)	1.98(1.25)
	中游	2	0.73	0.44(0.09)	0.31(0.17)	2.15(0.53)	2.06(1.32)
	下游	17	3.70	0.24(0.07)	0.28(0.15)	2.35(0.95)	1.94(1.27)



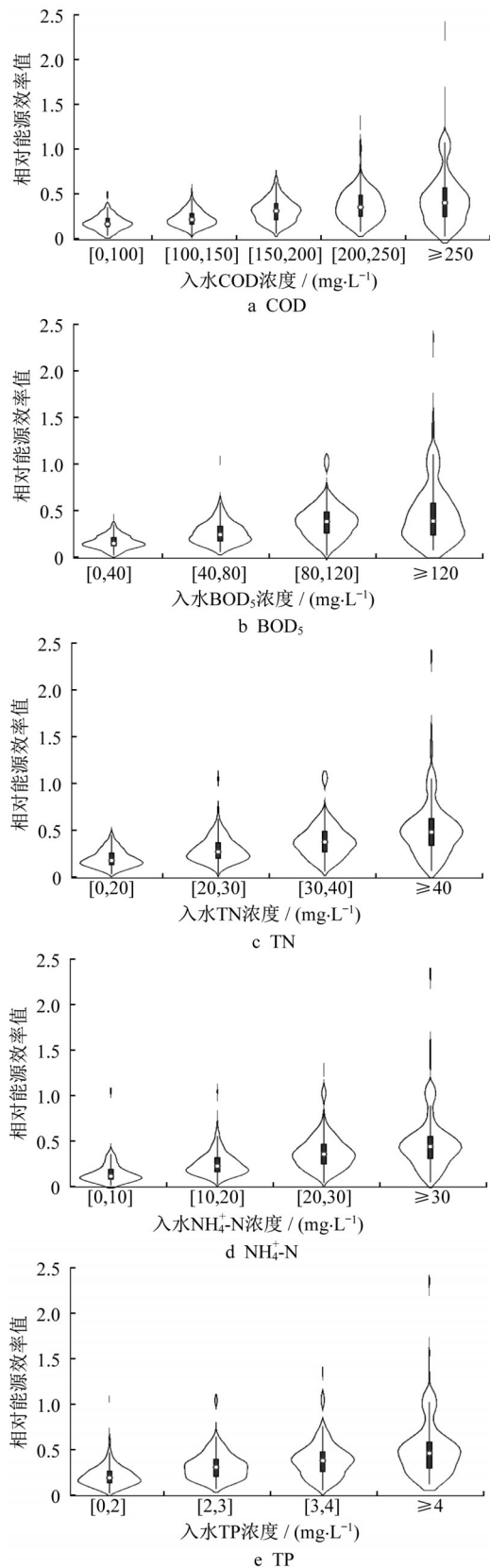


图5 不同入水水质的污水处理厂的相对能源效率  
Fig.5 Relative energy efficiency of wastewater treatment plants in respect of influent water quality

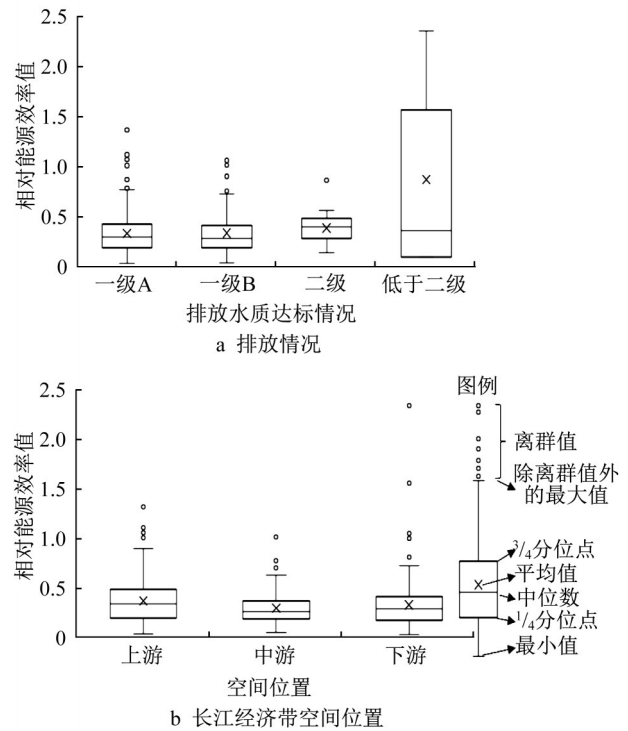


图6 不同外部条件的污水处理厂的相对能源效率  
Fig.6 Relative energy efficiency of wastewater treatment plants in respect of externalities

长江经济带上游、中、下游污水处理厂样本点的相对能源效率均值及中位数总体较为接近。同时,27个标杆污水处理厂在长江经济带上游、中、下游子区域的分布频数分别为8,2和17,占比3.39%、0.73%和3.70%,可认为不同子区域中标杆和普通污水处理厂的构成比具备一定的显著差异(Fisher确切概率法, $P$ 值 $<0.05$ )。对于不同空间位置污水处理厂的能源效率指标统计如表5所示。

依据表5,从相对能源效率的角度,下游地区的污水处理厂的总体表现较好。从单位处理水量电耗的角度,下游地区的标杆及普通污水处理厂全面优于中游和上游;而上游的标杆污水处理厂优于中游,但普通污水处理厂劣于中游。从单位COD削减电耗的角度,上游总体优于中游和下游,一方面其标杆污水处理厂的均值等于 $1.57 \text{ kWh} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,远低于中游和下游标杆污水处理厂的数值;另一方面,上游的普通污水处理厂的均值等于 $1.98 \text{ kWh} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,与下游的 $1.94 \text{ kWh} \cdot \text{kg}^{-1}$ 较为接近,同时高于中游地区普通污水处理厂的总体水平。

### 2.3 长江经济带污水处理厂特征分析

对长江经济带970座污水处理厂样本点从污染物削减率、排放质量浓度和设计规模方面的特征归纳如图7所示。从污染物削减率的角度,中游地区

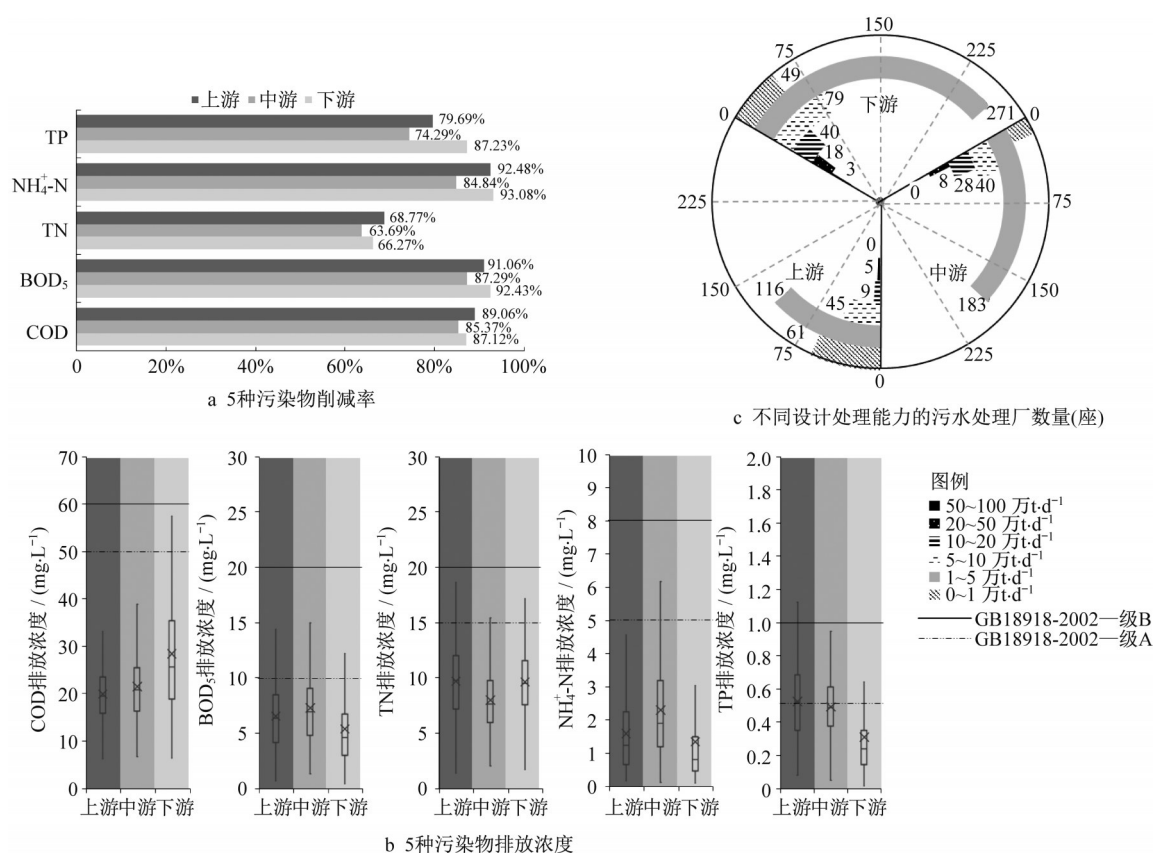


图7 长江经济带子区域污水处理厂样本点特征分析

Fig.7 Characteristics of 970 wastewater treatment plants in the subregions of Yangtze River Economic Belt

污水处理厂的总体水平最低,而上游和下游地区相对接近(图7a)。

此外,本文970座长江经济带污水处理厂样本点中,大多数都达到了GB18918—2002一级B的限值(图7b)。上、中、下游设计规模间于1~5万t·d<sup>-1</sup>的污水处理厂数量分别为116、183和271座,合计570座(图7c)。因此,长江经济带以中小型污水处理厂为主。值得注意的是,下游地区拥有的大型污水处理厂数目最多,设计处理能力不低于10万t·d<sup>-1</sup>的污水处理厂数目合计61座,并且其中3座的设计处理负荷高于50万t·d<sup>-1</sup>。结合2.2节的相关结果,下游地区总体较高的能源效率水平与该区域数目较多的大规模污水处理厂有关。

### 3 结论

本文对长江经济带970个污水处理厂样本进行能源效率评估和影响因素分析。采用的指标为相对能源效率、单位处理水量电耗和单位COD削减电耗,考虑的影响因素包括设计要素、运行情况和外部

条件。结果表明:较大的处理规模和较高的污染物入水质量浓度有利于污水处理厂达到较高的能源效率水平,而较为严格的排放标准会降低污水处理厂的能源效率;采用活性污泥法相关工艺的污水处理厂总体能源强度和能源效率水平均较高;长江经济带上、中、下游子区域污水处理厂的能源效率水平存在较大差异,主要是由于不同区域污水处理厂的规模、入水水质和排放质量浓度等要素综合作用的结果。

#### 作者贡献声明:

王洪涛:学术指导,研究方案制定,数据分析,论文撰写与修改。

黄润垚:资料搜集,数据处理,论文撰写与修改。

谢丽:学术指导,论文审阅。

倪晓航:修改论文。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] NAKKASUNCHI S, HEWITT N J, ZOPPI C, *et al.* A review of energy optimization modelling tools for the decarbonisation of wastewater treatment plants [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 279: 123811.
- [3] 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: 1251.
- [4] EMROUZNEJAD A, AMIN G R. DEA models for ratio data: convexity consideration [J]. Applied Mathematical Modelling, 2009, 33(1): 486.
- [5] SAGHAFI S, EBRAHIMI A, MEHRDADI N, *et al.* Energy-efficiency index in industrial wastewater treatment plants using data-envelopment analysis [J]. Journal of the Environmental Engineering, 2020, 146(2): 16680.
- [6] LI M J, TAO W Q. Review of methodologies and policies for evaluation of energy efficiency in high energy-consuming industry [J]. Applied Energy, 2017, 187: 203.
- [7] LUO L, DZAKPASU M, YANG B, *et al.* A novel index of total oxygen demand for the comprehensive evaluation of energy consumption for urban wastewater treatment [J]. Applied Energy, 2019, 236: 253.
- [8] LU J Y, WANG X M, LIU H Q, *et al.* Optimizing operation of municipal wastewater treatment plants in China: The remaining barriers and future implications [J]. Environment International, 2019, 129: 273.
- [9] SALA-GARRIDO R, MOLINOS-SENANTE M. Benchmarking energy efficiency of water treatment plants: effects of data variability [J]. Science of the Total Environment, 2020, 701: 134960.
- [10] 张浩, 尤建新. 基于数据包络分析和托宾模型的城市轨道交通运输效率 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(9): 1306.
- ZHANG Hao, YOU Xinjian. An empirical study of transport efficiency of urban rail transit based on data envelopment analysis and tobit model [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2018, 46(9): 1306.
- [11] TONE K. A slacks-based measure of super-efficiency in data envelopment analysis [J]. European Journal of Operational Research, 2002, 143(1): 32.
- [12] CHARNES A, COOPER W W, RHODES E. Measuring efficiency of decision-making units [J]. European Journal of Operational Research, 1978, 2(6): 429.
- [13] CHARNES A, COOPER W, LEWIN A Y, *et al.* Data envelopment analysis theory, methodology and applications [J]. Journal of Operational Research Society, 1997, 48(3): 332.
- [14] 徐冉, 迟成龙, 陈书怡. 污水处理工艺的技术经济综合评价方法 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(6): 869.
- XU Ran, CHI Chenglong, CHEN Shuyi. Comprehensive technical and economic evaluation of sewage treatment processes [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2013, 41(6): 869.
- [15] 李辰, 刘富强, 陈洪斌, 等. 膜生物反应器用于居民区生活污水处理与回用 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(2): 247.
- LI Chen, LIU Fuqiang, CHEN Hongbin, *et al.* Membrane bioreactor technology for the treatment and reuse of mixed domestic wastewater from residential areas [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2013, 41(2): 247.
- [16] HERNÁNDEZ-CHOVER V, BELLVER-DOMINGO Á, HERNÁNDEZ-SANCHO F. Efficiency of wastewater treatment facilities: The influence of scale economies [J]. Journal of Environmental Management, 2018, 228: 77.
- [17] ZHANG Y, ZHANG C, QIU Y, *et al.* Wastewater treatment technology selection under various influent conditions and effluent standards based on life cycle assessment [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2020, 154: 104562.
- [18] SARPONG G, GUDE V G, MAGBANUA B S, *et al.* Evaluation of energy recovery potential in wastewater treatment based on codigestion and combined heat and power schemes [J]. Energy Conversion and Management, 2020, 222: 113147.
- [19] SMITH K, GUO S, ZHU Q, *et al.* An evaluation of the environmental benefit and energy footprint of China's stricter wastewater standards: Can benefit be increased? [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 219: 723.
- [20] LIU W, IORDAN C M, CHERUBINI F, *et al.* Environmental impacts assessment of wastewater treatment and sludge disposal systems under two sewage discharge standards: A case study in Kunshan, China [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 287: 125046.