

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.21.015

生活和工业融合区污水处理厂运行评估分析

尹海龙, 廉 勃

(同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘 要: 以我国城镇化程度高和工业企业众多的江苏省部分区域为调查对象,选择 6 个地级市的 62 座城市污水处理厂,分析了污水厂进水水质和活性污泥系统的运行特征。受调查的污水处理厂进水 COD、BOD₅、SS、NH₃-N、TN 和 TP 的中位值分别为 223、86.6、127、22.8、30.8 和 2.97 mg/L,表现为进水碳源不足和含有难降解 COD。难降解工业废水的接入造成污水厂进水 BOD₅ 浓度降低最为明显和相应的 SS/BOD₅ 值偏高;进水 BOD₅ 浓度最低为 38.5 mg/L,SS/BOD₅ 值最高为 5.8。活性污泥系统 MLVSS 与 MLSS 比值的中位值为 0.52,最低为 0.32,与污水营养物不足导致的活性污泥分解和工业废水中带入的无机细颗粒物在活性污泥中累积有关。为了满足城镇污水处理提质增效行动方案中对污水处理厂进水 BOD₅ 的要求(BOD₅ ≥ 100 mg/L),除了加强管网排查和修复外,还应对工业企业接管进行评估和实施工业废水集中处理。

关键词: 污水处理厂; 进水水质; 工业废水; 活性污泥

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)21-0087-06

Evaluation and Analysis of Wastewater Treatment Plant Operation in Residential and Industrial Hybrid Areas

YIN Hai-long, LIAN Qing

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

Abstract: A survey was carried out in some areas of Jiangsu Province with a high degree of urbanization and a large number of industrial enterprises, in which 62 municipal wastewater treatment plants (WWTPs) in six cities were selected to analyze the influent quality and operational characteristics of activated sludge system. Monthly median concentrations of COD, BOD₅, SS, NH₃-N, TN and TP in influent of the WWTPs were 223 mg/L, 86.6 mg/L, 127 mg/L, 22.8 mg/L, 30.8 mg/L and 2.97 mg/L, respectively, indicating that the carbon source was insufficient and refractory COD was present. Refractory industrial wastewater entering into municipal WWTPs resulted in the most significant decrease of BOD₅ concentrations in the influent and corresponding higher ratio of SS to BOD₅. The lowest BOD₅ concentration in the influent was 38.5 mg/L, and the highest ratio of SS to BOD₅ was 5.8. The median and the lowest ratios of MLVSS to MLSS were 0.52 and 0.32, respectively, which was associated with activated sludge decomposition caused by insufficient nutrients supply and accumulation of inorganic fine sediments from industrial wastewater within the activated sludge. In order to meet the requirement of BOD₅ concentration in the influent more than 100 mg/L in action plan for improving quality and efficiency

基金项目: 中央高校基本科研业务费资助项目(22120200241)

通信作者: 尹海龙 E-mail: yinhailong@tongji.edu.cn

of municipal wastewater treatment, attentions should be paid to assessment of enterprises with industrial wastewater entering into municipal sewers and implement of centralized industrial wastewater treatment, apart from strengthening sewer pipes inspection and repair.

Key words: wastewater treatment plant; influent quality; industrial wastewater; activated sludge

2019年5月,住建部等三部委发布了《城镇污水处理提质增效三年行动方案(2019—2021年)》,明确对于城市污水处理厂(以下简称污水厂)进生化需氧量(BOD_5)浓度低于 100 mg/L 的,要围绕服务片区管网制定“一厂一策”系统化整治方案,明确整治目标和措施。

江苏省是我国经济最为发达的区域之一,工业企业聚集、城镇化程度高,在长期发展过程中形成了厂镇融合的特点,工业废水在企业内预处理达到接管标准后排入城市污水处理厂,因此污水厂接纳生活和工业混合污水的情形较为明显。近年来,围绕我国城市污水厂现状水质特征,已在北京、天津、上海、重庆等地开展了数据调研和统计分析,总结了以生活污染为特点的我国南北方典型地区城镇污水厂进水水质^[1-3]。另有研究测算了我国各省(区、市)城镇污水处理系统的主要污染物削减能力,为开展城镇污水处理系统的运行效能评估提供了依据^[4-5]。但是对于生活和工业融合区域的污水厂进水水质特征和活性污泥系统运行特征还缺乏具体研究。笔者主要针对江苏省中部和南部地区6个地级市(南京、镇江、无锡、泰州、苏州、南通)辖区内的62座污水厂进行调研分析,以期为该区域和其他类似区域的污水处理提质增效提供决策依据。

1 研究对象概述

所调研的6个地级市62座污水厂中,处理规模为 $50 \times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 以上的1座,处理规模为 $10 \times 10^4 \sim 50 \times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 的4座,处理规模为 $5 \times 10^4 \sim 10 \times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 的11座,处理规模低于 $5 \times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 的46座;74%的调研污水厂规模低于 $5 \times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$,总体平均污水处理量为 $4.8 \times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 。总体上调查区域的污水厂以规模小于 $5 \times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 的小型污水厂为主。调查数据来自于现场调研,包括污水厂月均进水水质和部分污水厂的活性污泥系统运行数据。调研时间段为2015年—2017年。同时,为了对比分析调查区域62座污水厂的数据,进一步对苏州市某区域进行了细化调查,调研了2017年—2019年之

间的20座污水厂进水水质。

2 污水厂进水水质特征分析

2.1 总体进水水质统计分析

调研的污水厂进水水质见表1。每个样本数值为一年中污水厂进水的月均浓度值。可以看出,62座污水厂进水COD、 BOD_5 、SS、 NH_3-N 、TN和TP月均值呈偏态分布,浓度平均值分别为244、95.1、150、22.5、30.7和 3.30 mg/L 。有文献报道,2017年江苏省全省污水处理厂进水COD、 BOD_5 以及氨氮浓度的平均值分别为249、100和 23 mg/L ^[4-5],太湖流域204座城镇污水厂进水COD、 BOD_5 、SS、 NH_3-N 、TN、TP浓度的平均值分别为260、104、138、21.4、28.9和 3.16 mg/L ^[6],与该调查结果接近。因此,本研究的调研数据总体能够反映江苏省尤其是经济相对发达的南部和中部地区现状污水处理厂的水质特点。

表1 进水水质统计结果

Tab.1 Statistics results of influent quality

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项 目		平均值	中位值	最小值	最大值
6个地级市 62座污水厂	COD	244	223	79.9	448
	BOD_5	95.1	86.6	38.5	261
	SS	150	127	17.2	774
	NH_3-N	22.5	22.8	6.1	35.2
	TN	30.7	30.8	8.8	53.7
	TP	3.30	2.97	1.02	7.40
苏州市某 区域20座 污水厂	COD	215	214	65.3	449
	BOD_5	111	106	28.6	253
	SS	114	109	45	206
	NH_3-N	25.1	24.6	1.4	57.7
	TN	30.3	29.6	11.7	60.2
	TP	3.9	3.1	0.9	27.0

与苏州市某区域20座污水厂进水水质相比,6个地级市的进水 NH_3-N 、TN、TP浓度的平均值与之相当,但是 BOD_5 浓度偏低、SS和COD浓度偏高,这可能与6个地级市污水厂有工业废水接入有关。若比较表1中的中位值,则两者的 BOD_5 浓度差异较平均值还要明显。由于表1中污水厂进水浓度的

最大值和最小值之间差异显著,考虑到最大值和最小值可能造成的浓度值代表性不足问题,以下主要采用中位值进行讨论分析。

6 个地级市进水中 BOD_5/COD 、 BOD_5/TN 和 SS/BOD_5 值分别为 0.39、2.81、1.47,苏州市某区域的相应比值分别为 0.50、3.58、1.03。通常当污水中 BOD_5/TN 值大于 4~6 时,可以认为碳源充足,苏州市某区域污水厂进水 BOD_5/TN 接近临界值,而 6 个地级市污水厂的进水 BOD_5/TN 中位值为 2.81,表明反硝化碳源不足,与污水厂进水 BOD_5 浓度偏低有关。污水厂进水 BOD_5/COD 值 >0.4 时可生化性较好,表征进水悬浮固体对污泥产率和污泥活性的 SS/BOD_5 值为 1.1~1.2^[6-7],苏州市某区域污水厂的 BOD_5/COD 值和 SS/BOD_5 值总体上在合理范围内,对于 6 个地级市,受到污水厂进水 BOD_5 浓度总体上偏低的影响, BOD_5/COD 值和 SS/BOD_5 值均

不能满足要求,进一步表现为污水厂进水可生化性不高,活性污泥系统效能不高,对城镇污水厂的运行效能造成影响。以下进一步分析 6 个地级市 62 座污水厂进水 BOD_5 偏低的原因。

2.2 进水水质指标相关性和 BOD_5 偏低原因分析

采用最小二乘法对监测数据进行回归计算,分析研究区域各污水厂进水水质指标的相关性。各指标间的回归方程及相关系数(R^2)见表 2。可以看出, BOD_5 与 COD 、 TN 与 NH_3-N 的 R^2 分别为 0.67、0.63;其他指标间的 R^2 均低于 0.50。与国内其他城市污水厂的结果相比,天津市污水厂进水 BOD_5 与 COD 的相关系数为 0.973^[1],上海市污水厂进水 BOD_5 与 COD 的相关系数为 0.968^[3]。天津市污水厂 BOD_5 与 SS 的相关系数为 0.966^[1],而本区域 BOD_5 与 SS 的相关系数仅为 0.26。为此,对 BOD_5 与 SS 相关性差的原因进行深入分析。

表 2 6 个地级市区域污水厂进水水质指标相关性分析

Tab.2 Correlation analysis of WWTPs influent quality indicators in six cities

项目	COD	SS	TN	NH_3-N	TP
BOD_5	$BOD_5 = 0.39COD - 0.15$ ($R^2 = 0.67$)	$BOD_5 = 0.43SS + 34.7$ ($R^2 = 0.26$)	$BOD_5 = 2.76TN + 11.6$ ($R^2 = 0.30$)	$BOD_5 = 2.22NH_3-N + 46.8$ ($R^2 = 0.12$)	$BOD_5 = 13.1TP + 51.4$ ($R^2 = 0.18$)
COD	—	$COD = 1.20SS + 74.5$ ($R^2 = 0.47$)	$COD = 1.54TN + 77.8$ ($R^2 = 0.27$)	$COD = 4.02NH_3-N + 158$ ($R^2 = 0.09$)	$COD = 37.9TP + 120$ ($R^2 = 0.35$)
SS	—	—	$SS = 2.57TN + 64.1$ ($R^2 = 0.18$)	$SS = 1.07NH_3-N + 103$ ($R^2 = 0.05$)	$SS = 18.4TP + 81.9$ ($R^2 = 0.22$)
TN	—	—	—	$TN = 1.01NH_3-N + 8.34$ ($R^2 = 0.63$)	$TN = 3.13TP + 20.1$ ($R^2 = 0.25$)
NH_3-N	—	—	—	—	$NH_3-N = 2.73TP + 14.6$ ($R^2 = 0.23$)

调研的 6 个地级市 62 座污水处理厂中,对进水水质 BOD_5 浓度低于中位值(86.6 mg/L)的污水处理厂数据做进一步统计分析,结果如表 3 所示。可以看出,污水处理厂进水 COD 、 BOD_5 、 SS 、 NH_3-N 、 TN 、 TP 浓度的中位值分别为 189、60.9、118、18.6、25.4 和 2.5 mg/L,分别为 62 座污水厂进水浓度中

位值的 84.5%、70.3%、92.9%、81.6%、82.5%、84.2%,其中以 BOD_5 浓度降低最为显著,低于污水提质增效三年行动方案中要求的“ BOD_5 进水浓度大于 100 mg/L 标准”;相比之下, SS 浓度中位值则基本保持不变,由此导致 SS 与 BOD_5 的相关性差和 SS/BOD_5 值偏高。

表 3 进水 BOD_5 浓度低于中位值的污水厂进水水质分析

Tab.3 Analysis of WWTPs influent quality receiving low BOD_5 in six cities at prefecture level

项目	$COD/(mg \cdot L^{-1})$	$BOD_5/(mg \cdot L^{-1})$	$SS/(mg \cdot L^{-1})$	$NH_3-N/(mg \cdot L^{-1})$	$TN/(mg \cdot L^{-1})$	$TP/(mg \cdot L^{-1})$	BOD_5/COD 值	BOD_5/TN 值	BOD_5/TP 值	SS/BOD_5 值
中位值	189	60.9	118	18.6	25.4	2.5	0.34	2.17	23.4	2.19
最小值	48.4	38.5	61.5	6.13	8.81	0.34	0.1	1.08	9.9	1.42
最大值	372	77.2	220	34.8	44.5	3.9	0.62	6.18	143	5.8

BOD_5 浓度降低和 SS 与 BOD_5 相关性差的主要原因是工业废水的接入。在所有调查的进水 BOD_5

低于中位值的污水厂中,均存在着工业废水接入的情况,涉及化工、印染、医药、食品、机械加工等行业,

其中化工、印染、医药等行业废水接入较为典型;部分城镇污水厂接纳工业废水量占实际处理水量的60%~70%。工业废水接入导致城镇生活污水厂进水 BOD_5 浓度降低的原因可归纳为以下两点:

① 工业企业预处理单元常采用物化和生物组合工艺,导致可生物降解的 BOD_5 几乎被利用,出水以难降解COD为主。

② 一些工业企业的生产工艺所用原料中,含有大量难降解有机物组分。例如,调研的某污水厂中,进水 BOD_5 浓度最低的为38.5 mg/L,进水 BOD_5/COD 值仅为0.1,该污水厂采用卡鲁塞尔氧化沟处理工艺。但是对该厂服务范围内的水量来源进行调查后发现,该污水厂主要处理开发区企业排放的工业废水及城镇生活污水。污水厂主要的接管企业包括开发区内化工、造纸、印染废水和汽车机械加工废水等,进水平均氯化物浓度高达1905 mg/L,约为城镇生活污水氯化物浓度的19倍。再如,某污水厂也采用氧化沟工艺,接纳滨江工业园区、高港区及中国医药城的工业废水和生活污水,进水 BOD_5 浓度仅为43.7 mg/L。针对工业企业水质特征因子的调查表明,氯化物是表征造纸、印染纺织、医药废水等显著性水质特征的因子,其中造纸工艺漂白工序中含有大量二氯苯酚、三氯苯酚、五氯苯酚等氯酚类物质;纺织工业废水中含有大量氯酸钠、过氧化氢及亚氯酸钠等漂白剂组分和染料类物质;医药废水中包含了大量硫酸根离子、氯离子等无机离子,以及苯类、酚类、醛类、酮类等与药品相关的难降解有机物。大量难降解有机物难以通过工业企业的预处理工艺去除,接入城镇污水厂后降低了进水 BOD_5 浓度和污水的可生化性,对以生活污水处理工艺为特点的污水厂运行造成了潜在冲击。

根据表1和表3,在工业废水接入的情况下SS浓度的中位值基本保持不变,工业废水接入城镇污水厂的另一个特点是 SS/BOD_5 值偏高。发达国家污水厂进水 SS/BOD_5 值在1.1左右^[7],调查区域的平均 SS/BOD_5 值为1.5;有文献报道,太湖流域污水厂进水 SS/BOD_5 平均值在1.4左右且呈逐年增长趋势,与本研究的结果相当。当存在大量工业废水接入时,表3中 SS/BOD_5 中位值升高至2.19,最高值达到5.8。目前我国城市污水厂进水 SS/BOD_5 处于超高值(>2.0)和高比值(1.4~2.0)的比例分别达到32%和16%^[7],但是相当一部分污水厂进水

SS/BOD_5 值高与进水SS浓度高有关(如SS浓度大于500 mg/L),与本研究中污水厂进水 BOD_5 浓度低导致的 SS/BOD_5 值高有所不同。

表3中, SS/BOD_5 值最大时,对应前述进水 BOD_5 浓度最低的某污水厂,其进水COD、 BOD_5 、SS、 NH_3-N 、TN、TP浓度的平均值分别为372、38.5、220、16、27.6和3.9 mg/L。可以看出,该污水厂的进水COD浓度与生活污水接近,若以COD甚至SS、 NH_3-N 、TN、TP等指标衡量,很难看出该污水厂存在大量工业废水接入的情况;但是,若以 BOD_5 作为污水厂进水的考核指标,则该厂进水 BOD_5 浓度仅约为生活污水浓度的1/5,对于工业废水接入城镇污水厂有明显的指示效果。这也证明了在城镇污水处理提质考核中,以 BOD_5 作为污水厂进水水质的考核指标,有助于识别工业废水接入对城镇生活污水冲击的影响,解决采用COD造成的判断干扰。

3 污水厂活性污泥系统性能分析

3.1 活性污泥系统总体运行数据统计分析

调研的6个地级市62座污水厂中,选择其中28座进一步收集了活性污泥系统的运行数据。28座污水厂进水COD、 BOD_5 、SS、 NH_3-N 、TN、TP浓度中位值分别为274、100、155、22.9、31.2和3.47 mg/L,与62座污水厂的进水浓度中位值基本接近,因此对评估厂镇融合区域污水厂活性污泥系统的运行效能具有代表性。28座污水厂活性污泥系统MLVSS、MLSS的统计数据见表4。以Shapiro-Wilk检验为依据,各项水质指标显著性水平Sig.均小于0.05,表明各项指标均不服从正态分布。

表4 MLVSS和MLSS的统计数据

Tab.4 Statistics data of MLVSS and MLSS

项 目	中位值	最小值	最大值	S-W Sig.
MLVSS/ ($mg \cdot L^{-1}$)	1 807	803	4 398	0.000
MLSS/ ($mg \cdot L^{-1}$)	4 618	1 109	8 475	0.001
MLVSS/ MLSS 值	0.52	0.32	0.79	0.000

在以处理生活污水为主的污水厂活性污泥系统中,MLVSS/MLSS的设计经验值为0.65~0.85,平均值为0.75左右。本调查区域活性污泥系统中MLVSS/MLSS的平均值和中位值均为0.52,最低值仅为0.32。MLVSS/MLSS值偏低,MLSS浓度偏高。本区域中MLSS的中位值为4 618 mg/L,最大值高

达 8 475 mg/L,明显高于城镇生活污水厂 MLSS 的设计经验值(3 000 ~ 4 000 mg/L)。

3.2 MLVSS/MLSS 值偏低原因分析

理论上,MLSS 与 MLVSS 的差值为污水中的无机物质部分。有研究指出,当污水厂进水 SS 浓度高时(如高于 500 mg/L),大量细微泥沙进入后续生物处理系统,造成生物处理池泥沙淤积和处理效能降低。例如,有研究表明,通过向生化系统进水中投加粒径小于 73 μm 的细微泥沙,运行 40 d 后 MLVSS/MLSS 值从 0.84 下降到 0.26^[7]。另有科研人员对生化池活性污泥浓度及 MLVSS/MLSS 值进行了 1 年的连续监测发现,雨季(4 月—9 月)由于降雨冲刷导致大量细颗粒泥沙进入污水厂,MLVSS/MLSS 值相对于其他月份明显降低^[8]。

本研究中,污水厂进水 BOD_5 浓度低而非进水 SS 浓度高。图 1 为污水厂 MLVSS/MLSS 值的月度变化。可以看出,雨季(4 月—9 月)和旱季(10 月—次年 3 月)污水厂的 MLVSS/MLSS 值没有明显变化。因此,本研究中污水厂 MLVSS/MLSS 值偏低并非完全由降雨冲刷携带的细微无机泥沙所致。

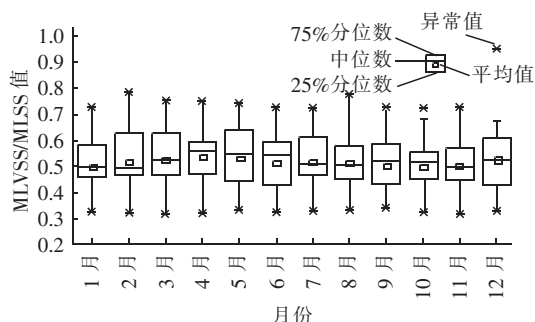


图1 污水厂 MLVSS/MLSS 值的月度变化

Fig.1 Monthly variation of MLVSS/MLSS in WWTPs

污水厂生化系统 MLVSS/MLSS 值低与两方面原因有关:一是与进水 BOD_5 浓度低有关,尽管进水 BOD_5 浓度比较低,但是 MLVSS 浓度维持在 1 000 ~ 2 000 mg/L,由此导致污水厂活性污泥营养物不足,微生物死亡分解导致 MLSS 中的无机质含量增加;二是与工业废水中携带无机悬浮物有关,尽管进水 SS 相对较低,但是工业废水尤其是研究区域医药、印染、化工类废水中,生产工艺或预处理工艺导致纳管工业废水中 SS 的无机组分含量较高。例如,某综合化工废水中无机悬浮物占 60% 以上(包括预处理过程中投加药剂产生的固体物质和各种废水混合过程中新生的难溶于水的物质等),与生活污水中有

机悬浮物含量高不同。这些细颗粒的 SS 进入污水厂曝气池后,容易吸附在活性污泥上,为了维持生物反应池中 MLVSS 浓度,随着污泥回流量的增加,细颗粒无机 SS 不断累积在活性污泥中,使活性污泥系统由运行初期以有机质为主,逐渐转变成以不具有生物活性的无机成分为主,导致了 MLVSS/MLSS 值偏低。

4 结论与建议

① 在城镇和工业融合区域,工业废水接入城镇生活污水厂导致进水 BOD_5 浓度降低最为明显,与工业企业废水经过预处理后易降解有机物组分低和生产工艺中含有大量难降解有机物有关,总体上污水厂进水特点表现为进水碳源不足、可生化性差和 SS/ BOD_5 值升高。在城镇污水处理提质增效工作中,采用进水 BOD_5 作为考核指标,相对于 COD 更有助于识别工业废水接入造成的潜在不利影响。建议在各地城镇污水厂考核中,在考核进水 COD 浓度的基础上,进一步考核进水 BOD_5 浓度。

② 工业废水接入城镇污水厂造成 MLVSS/MLSS 值偏低。调查区域 MLVSS/MLSS 的中位值为 0.52,最低值为 0.32,这与污水中营养物不足导致的活性污泥分解、工业废水中带入的无机细颗粒物在活性污泥中累积有关。这一现象与城镇污水厂进水 SS 浓度高导致的 MLVSS/MLSS 值偏低不同,是由 BOD_5 浓度偏低或 SS/ BOD_5 值偏高所致。

③ 从达到城镇污水处理提质增效行动方案目标($\text{BOD}_5 \geq 100 \text{ mg/L}$)的角度考虑,除了加强管网排查和混接、破损点位修复,以及减少地下水和地表水等外来水流入入渗外,有必要依据企业环评批复和《污水排入城镇下水道水质标准》(GB/T 31962—2015)对接管范围内的工业企业排水情况进行评估。新建、改建、扩建工业企业以及各类开发区、工业园区内产生的工业废水,尤其是难降解工业废水,不应接入市政污水管网。通过城镇生活污水和工业废水分质处理措施,使得城镇生活污水厂更好地发挥其处理效能;同时根据工业废水的特点强化源头管控和预处理等措施,能更好地满足对工业废水尤其是难降解工业废水处理的需要。

参考文献:

- [1] 孙艳,张逢,胡洪营,等. 天津市污水处理厂进水水质特征的统计分析[J]. 环境工程技术学报,2014,4

- (3):173-180.
- Sun Yan, Zhang Feng, Hu Hongying, *et al.* Statistical analysis of influent quality characteristics of municipal wastewater treatment plants in Tianjin [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2014, 4 (3): 173-180(in Chinese).
- [2] 孙艳,张逢,胡洪营,等. 重庆市污水处理厂进水水质特征分析[J]. *环境科学与技术*,2014,37(6N):397-402.
- Sun Yan, Zhang Feng, Hu Hongying, *et al.* Statistical analysis of influent quality characteristics of municipal wastewater treatment plants in Chongqing [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 37 (6N): 397-402(in Chinese).
- [3] 孙艳,张逢,胡洪营,等. 上海市污水处理厂进水水质特征的统计学分析[J]. *环境工程学报*,2014,8(12): 5167-5173.
- Sun Yan, Zhang Feng, Hu Hongying, *et al.* Statistical analysis of influent quality characteristics of municipal wastewater treatment plants in Shanghai, China [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, 8 (12):5167-5173(in Chinese).
- [4] 陈玮,徐慧伟,高伟,等. 基于产污系数法测算城镇污水处理系统的主要污染物削减效能提升潜力[J]. *给水排水*,2018,44(7):24-29.
- Chen Wei, Xu Huiwei, Gao Wei, *et al.* Calculating potential in enhancing major pollutants' removal efficiency in urban wastewater treatment system based on pollutants producing coefficient[J]. *Water & Wastewater Engineering*,2018,44(7):24-29(in Chinese).
- [5] 赵晔,陈玮,徐慧伟,等. 城镇污水收集处理系统提质增效过程中节能减排可行性分析[J]. *给水排水*, 2019,45(1):42-46,54.
- Zhao Ye, Chen Wei, Xu Huiwei, *et al.* Energy conservation and emission reduction in upgrading and reconstruction of urban wastewater collection and treatment system[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2019,45(1):42-46,54(in Chinese).
- [6] 邹吕熙,李怀波,郑凯凯,等. 太湖流域城镇污水处理厂进水水质特征分析[J]. *给水排水*,2019,45(7): 39-45.
- Zou Lüxi, Li Huaibo, Zheng Kaikai, *et al.* Analysis on the characteristics of influent water quality from wastewater treatment plants in Taihu Basin[J]. *Water & Wastewater Engineering*,2019,45(7):39-45(in Chinese).
- [7] 王颖. 细微泥沙粒径对活性污泥 MLVSS/MLSS 的影响及预测研究[D]. 重庆:重庆大学,2016.
- Wang Ying. The Effect of Fine Grit Particle Size on Activated Sludge MLVSS/MLSS and Prediction Research [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016 (in Chinese).
- [8] 何莉. 生化处理系统无机固体分布特性及累积机制研究[D]. 重庆:重庆大学,2014.
- He Li. Distribution Characteristics and Accumulation Mechanisms of Inorganic Suspended Solids in Wastewater Treatment Biochemical System [D]. Chongqing: Chongqing University,2014(in Chinese).



作者简介:尹海龙(1976-),男,山东烟台人,博士,教授,主要研究方向为水环境系统工程、城市排水系统溢流污染控制、城镇智慧水务等。

E-mail:yinhailong@tongji.edu.cn

收稿日期:2020-04-07