

# 基于 WATER9 模型的城镇污水处理中 VOCs 排放量研究

龙彦宇,何成达\*,孙舟,朱强,张淼

(扬州大学环境科学与工程学院,江苏 扬州 225127)

**摘要:**通过开展城镇污水处理模拟实验,与 WATER9 模拟结果比对和误差分析,使用优化后的 WATER9 模型模拟计算扬州汤汪污水处理厂一期工程的 VOCs 排放量,并分析各参数对 VOCs 排放量的影响。结果表明:WATER9 模型满足城市污水处理厂污水处理过程中 VOCs 排放量的模拟要求,优化后的模拟值与实测值之间的相对偏差小于 8%。实验结果表明,加盖处理能大幅度减少污水处理过程中 VOCs 的排放,汤汪一期加盖后 VOCs 排放量下降了 88.8%,废水温度和表面风速也是影响 VOCs 排放量的重要因素。

**关键词:** VOCs 排放量;城镇污水处理;WATER9 模型;预测

中图分类号:X505

文献标志码:B

文章编号:1006-2009(2022)02-0016-04

## Investigation of VOCs Emissions from Urban Sewage Treatment Based on WATER9 Model

LONG Yan-yu, HE Cheng-da\*, SUN Zhou, ZHU Qiang, ZHANG Miao

(College of Environmental Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225127, China)

**Abstract:** Through the simulation experiment of urban sewage treatment, comparison with WATER9 simulation results and error analysis, the optimized WATER9 model was used to simulate and calculate the VOCs emissions from Yangzhou Tangwang Sewage treatment plant phase I project, and the influence of each parameter on VOCs emissions was analyzed. The results showed that WATER9 model met the simulation requirements of VOCs emissions in the sewage treatment process of urban sewage treatment plant, and the relative deviation between optimized simulation value and measured value was less than 8%. The experimental results showed that capping treatment greatly reduced VOCs emissions by 88.8% in sewage treatment of Tangwang phase I project. Wastewater temperature and surface wind speed were also important factors affecting VOCs emissions.

**Key words:** VOCs emissions; Urban sewage treatment; WATER9 model; Prediction

挥发性有机物(VOCs)是指沸点为 50℃~200℃,室温下饱和蒸汽压超过 133.32 Pa 的易挥发有机物质<sup>[1]</sup>。VOCs 污染作为大气污染的重难点问题之一,不仅来源广泛,而且对大气环境和人体健康有着巨大的危害<sup>[2-3]</sup>。随着城市排放的污水量不断上升,城市污水处理厂也在快速发展<sup>[4]</sup>,在污水处理各环节也会排放多种 VOCs 进入大气,造成新的污染<sup>[5]</sup>。虽然生态环境部为了减少 VOCs 的排放制定了各项措施,如加强源头替代、加强无组织排放控制、实施精细化管控等,但是 VOCs 的减排必须建立在了解各环节具体排放值的基础上<sup>[6]</sup>。由于污水处理过程中 VOCs 的逸散

情况复杂、成分种类繁多,难以对每个环节的具体排放量进行定量检测或计算<sup>[7]</sup>。虽然目前已有多种方法和仪器设备可以监测 VOCs 的排放浓度,但仍有一定的局限性,如检测过程中存在滞后性、采样过程烦琐等<sup>[8]</sup>。因此,定量计算污水处理过程中 VOCs 的排放量,为实现减排和减少对周围环境的影响程度及范围具有非常重要的意义<sup>[9]</sup>。

收稿日期:2021-11-28;修订日期:2022-01-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51808482)

作者简介:龙彦宇(1996—),女,重庆人,硕士,研究方向为水处理理论与技术。

\*通信作者:何成达 E-mail: yzhcd6666@163.com

WATER9 模型是由美国环保署 (USEPA) 空气质量规划与标准办公室编制, 用来估算 VOCs 排放量的软件模型, 主要用于石化行业废水处理过程中产生的 VOCs 排放量计算。今先利用污水处理模拟实验修正计算模型的误差, 以提高准确性, 再运用优化后的 WATER9 模型定量估算污水处理厂的 VOCs 排放量, 并进一步分析其影响因素, 为 VOCs 减排提供理论参考。

## 1 WATER9 模型参数率定

建立与污水处理厂工况相同的序批式活性污泥法 (SBR) 装置, 对污水处理过程中 VOCs 进行实时监控。与此同时, 建立 WATER9 模型模拟污水处理过程中的 VOCs 排放量, 将实测值与 WATER9 模型计算值作比较, 研究运用 WATER9 模型计算城市污水处理过程中 VOCs 排放量的可行性。

### 1.1 WATER9 模型流程模拟

WATER9 软件由气体排放解析表达式组成, 内置了城市污水处理厂废水处理工艺的各项构筑物模块, 可以对废水处理系统的局部和整体排放情况进行评估<sup>[10]</sup>。建立与实验装置相同的 SBR 工艺模型, 对进水搅拌、曝气、加水搅拌、静置、排水 5 个流程进行模拟, 并把构筑物参数和水样参数输入模型。水样选取扬州某学校生活污水和餐厨废水, 实验装置的构筑物参数通过计算实验装置与构筑物的水体表面积之比得到。环境条件设置为水温 25 ℃, 污泥质量浓度 3 500 mg/L。

### 1.2 WATER9 模型误差分析与结果优化

污泥驯化完成且系统运行稳定后, 实测得到 VOCs 的排放量, 并在 WATER9 软件中输入水样参数及构筑物参数等数值后, 得到 VOCs 排放量的模拟值。实测值与模拟值对比见图 1(a)。由图 1(a) 可见, 模拟值大于实测值, 存在相对偏差。

分析实测值与模拟值之间的相对偏差, 其原因可能是: ①系统给出的参数均为表面曝气方式对应的参数, 且实验中都是采用循环泵替代搅拌桨进行废水的混合, 就使得模拟部分的参数误差变大; ②沉淀和出水两个步骤挥发形式较为简单, 以静态液面表面分子扩散形式为主, 造成的误差偏小。

传质系数、液相组分中有机物的浓度及表面积是估算开放液体表面排放量的重要因素<sup>[11]</sup>。实验装置中水体表面积为 0.007 9 m<sup>2</sup>, 紊流状态占比 100%。因此, 调整紊流区和静止区的表面积之比

可达到向物理模型结果靠拢的效果。WATER9 软件的计算结果是在流体为连续流的基础公式上得到<sup>[11]</sup>, 与真实的 SBR 实验情况存在一定的偏差。对比实测值与模拟值之间的相对偏差, 以此来修正 VOCs 的排放系数<sup>[12]</sup>。

优化后的对比结果见图 1(b)。由图 1(b) 可见, 通过校正进水搅拌、曝气和加水搅拌三过程的流态计算公式, 相对偏差降低到 8% 以内, 在合理范围内。总体相对偏差为 5.25%, 精度较高, 故认为该模型拟合度较好, 也说明该模型对污水处理中产生的 VOCs 排放量的估算可行。

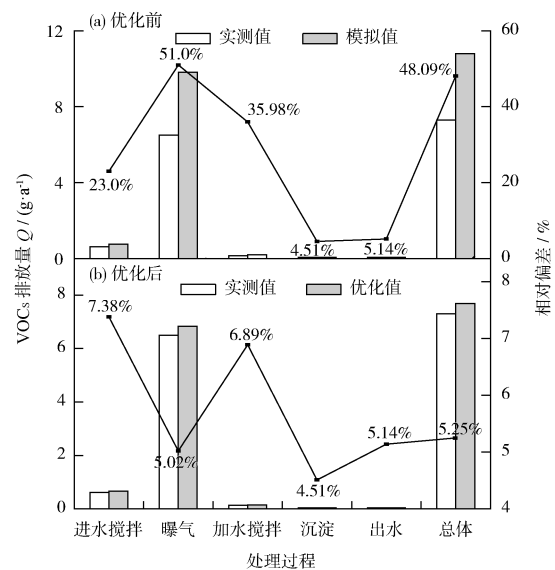


图 1 模型优化前和优化后的实测值与模拟值的对比  
Fig. 1 Comparison between measured value and simulated value before and after model optimization

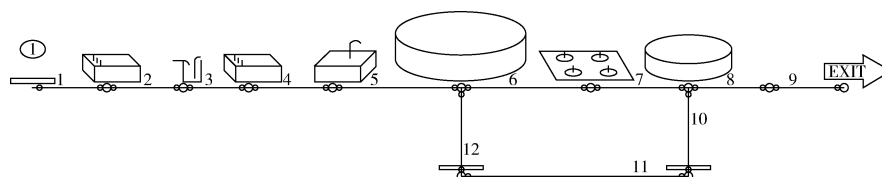
## 2 污水处理实例分析模拟

### 2.1 污水处理厂工艺简介

选取扬州汤汪污水处理厂一期工程 (以下简称汤汪一期) 进行实例分析。汤汪一期主要运用 CAST 工艺, 其工艺特点是在一个或者多个平行的池子中完成微生物的有机物降解和泥水分离。处理流程为进水—粗格栅—提升泵—细格栅—曝气沉砂池—CAST 生化池—二沉池—出水。建立 WATER9 模型, 污水处理流程见图 2。把构筑物参数和水质参数输入模型。

### 2.2 模型数据采集

实地采集汤汪一期进水, 根据《水质 挥发性有机物的测定 吹扫捕集/气相色谱-质谱法》



1—进水口；2—粗格栅；3—提升泵；4—细格栅；5—曝气沉砂池；6—CAST池厌氧选择区；7—CAST池曝气区；8—CAST池沉淀区；9—出水口；10、11、12—回流污泥。

图2 汤汪一期 WATER9 流程

Fig. 2 WATER9 process of Tangwang phase I project

(HJ 639—2012)进行检测<sup>[13]</sup>。先用顶空固相微萃取方法做预处理,再用气相色谱质谱联用仪(GC-MS)对水中有机物定量分析。模拟过程中需要构筑物的尺寸、废水的流量、构筑物的物料和机具等参数。

### 2.3 废水处理中 VOCs 排放情况分析

由 WATER9 模型计算得到汤汪一期 VOCs 排放速率为 8.23 g/s,按照全年不停止运行,VOCs 年排放量达到 259.54 t/a。将排放的 VOCs 归为芳香烃、有机硫化物、含氧有机物、烯烃、卤代烃、烷烃和其他,其他 VOCs 年排放量为 17.04 t/a。汤汪一期废水处理中 VOCs 排放情况见表 1,其中 VOCs 排放去向包括气体排放、工艺去除和废水排放 3 种。

由表 1 可知,汤汪一期废水处理中排放的主要物质为芳香烃和有机硫化物,这与实际情况相符。其中,芳香烃在水相中浓度最高,且挥发性较强,极易挥发到大气中,故排放量最大。芳香烃、有机硫化物和卤代烃 80% 以上成分均通过污水处理中的生物降解过程去除,20% 以下的物质以气体的形式排放;含氧有机物和烯烃由于其在水中的溶解性较高,30% 的物质溶于废水排入水体。

废水处理系统中生物曝气池 VOCs 排放量最高,为 138.48 t/a,占总体的 53.36%。虽然曝气池伴随着大量的生物分解,但由于大量充氧导致水体

扰动较大,剧烈搅拌使得水体形成动荡的紊流,在剧烈的涡流扩散作用下排放出大量 VOCs。生物选择池 VOCs 排放量为 84.70 t/a,占比较高,达到 32.63%。池中设置了潜水搅拌器,将回流的混合液与刚入池的废水混合均匀,防止污泥沉淀,通过搅拌形成湍流的液体表面,加速了 VOCs 的排放。

### 2.4 VOCs 排放量影响参数研究

污水处理各构筑物是否加盖被列为 WATER9 模型中核算 VOCs 排放量的重要参数。从目前的情况来看,污水处理厂尚未做到对水处理构筑物全部加盖。一方面是为了水体生物处理中微生物的生存环境考虑;另一方面,也是可以大幅降低施工成本。汤汪污水处理厂的所有构筑物均未加盖。利用 WATER9 软件计算得出汤汪一期废水处理各构筑物在加盖和不加盖的情况下 VOCs 排放量,见图 3(a)。由图 3(a)可见,汤汪一期废水处理各构筑物加盖后生物选择池和曝气池排放量下降明显。曝气池从 138.48 t/a 下降到 2.11 t/a;生物选择池从 84.70 t/a 下降到 0.19 t/a;沉淀池因在其他构筑物都进行加盖处理后,本应随着空气挥发的部分 VOCs 顺着水流排入沉淀池,使得其排放量不降反增。VOCs 总体排放量相比不加盖减少 230.56 t/a,下降了 88.8%。综上所述,对污水处理构筑物进行加盖处理是实现 VOCs 减排的有效措施。

废水温度和表面风速是影响 VOCs 排放量的重要因素。将汤汪一期的模型温度进行调整,均为不加盖状态。起始温度设为 10 ℃,每升高 1 ℃模拟 1 次并记录 VOCs 的排放量,得到温度与 VOCs 排放量的关系,见图 3(b)。由图 3(b)可见,在其他条件不变的情况下,随着废水温度的升高,废水处理过程中的 VOCs 的排放量也在稳步升高,在废水温度到达 30 ℃左右时趋于稳定。因此,在污水处理过程中对水温实时监测可以有效控制 VOCs 的整体排放量。

表 1 汤汪一期废水处理中 VOCs 排放情况

Table 1 VOCs emission in sewage treatment of Tangwang phase I project

化合物	年排放量 $Q/(t \cdot a^{-1})$	各排放去向占比/%		
		气体排放	工艺去除	废水排放
芳香烃	167.09	16	83	1
有机硫化物	33.11	12	88	0
含氧有机物	11.66	4	65	31
烯烃	0.77	70	0	30
卤代烃	12.30	16	83	1
烷烃	17.57	70	15	15

未加盖的废水处理设施会受到液体表面风的影响,故风速是影响 VOCs 排放的主要变量。WATER9 模型设置中,选取液面上方 10 m 的风速(U10)作为模拟参数,参数值取城市污水处理厂自然风常见风速(0 cm/s ~ 900 cm/s),各构筑物均为

不加盖状态。从风速为 0 cm/s 开始,每上升 50 cm/s 模拟 1 次,记录对应的 VOCs 排放总量,模拟到风速 900 cm/s 时停止,见图 3(c)。由图 3(c)可见,VOCs 排放量随着表面风速的上升而增加,VOCs 排放量从 249.77 t/a 增加到 271.84 t/a。

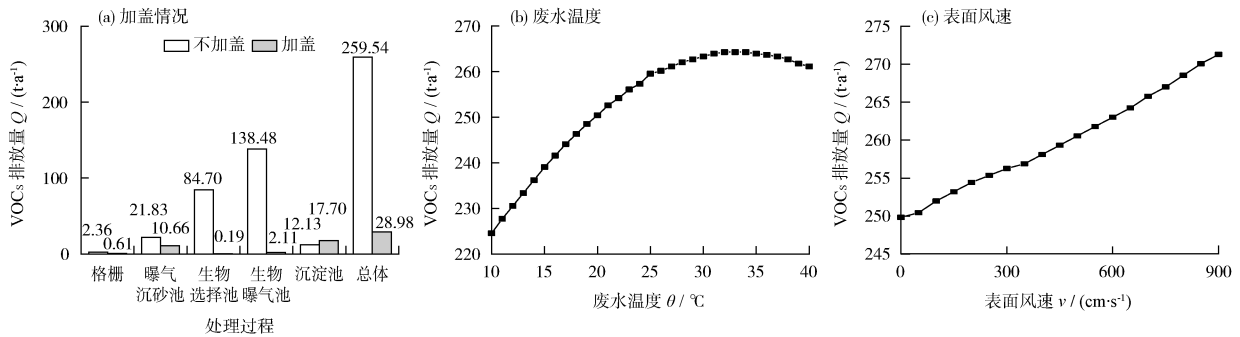


图 3 VOCs 排放量与加盖情况、废水温度及表面风速的关系

Fig. 3 Relationship between VOCs emissions and capping, wastewater temperature and surface wind speed

### 3 结论

(1) WATER9 模型在改进优化后可以满足估算城市污水处理厂处理过程中 VOCs 排放量的模拟要求。汤汪一期废水处理量为 10 万  $\text{m}^3/\text{d}$ ,模拟的 VOCs 年排放量为 259.54 t/a。

(2) 加盖情况、废水温度和表面风速对 VOCs 排放量有明显的影 响,可以通过给构筑物加盖并收集逸散气体、实时监控废水温度等措施实现污水处理过程中 VOCs 的有效减排。

(3) 通过 WATER9 模型估算对污水处理整体工艺和各环节的排放情况进行定性定量的分析,能为实现 VOCs 的减排提供理论支持。因此,提高模拟值准确度和精确度是未来研究的重点内容。例如完善 WATER9 模型中的工艺类型,研究不同曝气形式间的转换公式,使得模拟过程向多元化发展。

#### [参考文献]

[1] LI M,ZHANG Q,ZHENG B, et al. Persistent growth of anthropogenic non-methane volatile organic compound (NMVOC) emissions in China during 1990—2017: drivers, speciation and ozone formation potential [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2019,19(13):8897-8913.  
 [2] 李兴春. 石油化工行业挥发性有机物控制进展研究[J]. 环境保护,2016,44(13):38-42.  
 [3] 丁峰,朱志锋,张良瑜,等. 南京市环境大气质量变化特征及防治对策建议[J]. 环境监测管理与技术,2020,32(5):

63-67.  
 [4] 宋连朋,魏连雨,赵乐军,等. 我国城镇污水处理厂建设运行现状及存在问题分析[J]. 给水排水,2013,39(3):39-44.  
 [5] 王磊磊,何成达,鄢一新,等. 污水处理过程中曝气方式对挥发性有机物排放量影响研究[J]. 环境科学学报,2017,37(5):1774-1779.  
 [6] 郭枝,姚西龙,李晓瑜. 中国工业全要素碳减排效率提升动力探讨[J]. 安全与环境工程,2019,26(5):53-60.  
 [7] ISSA H M. Optimization of wastewater treatment plant design using process dynamic simulation: a case study from Kurdistan, Iraq[J]. ARO-The Scientific Journal of Koya University,2019,7(1):59-66.  
 [8] 莫梓伟,邵敏,陆思华. 中国挥发性有机物(VOCs)排放源成分谱研究进展[J]. 环境科学学报,2014,34(9):2179-2189.  
 [9] 张钢锋,呼佳宁,李向东. 基于 WATER9 模型的石化行业废水处理环节 VOCs 排放研究[J]. 上海化工,2016,41(9):32-36.  
 [10] GOSTELOW P, PARSONS S A, COBB J. Development of an odorant emission model for sewage treatment works[J]. Water Science and Technology,2001,44(9):181-188.  
 [11] 江梅,邹兰,李晓倩,等. 我国挥发性有机物定义和控制指标的探讨[J]. 环境科学,2015,36(9):3522-3532.  
 [12] CALVO M J, PRATA A A, HOINASKI L, et al. Sensitivity analysis of the WATER9 model: emissions of odorous compounds from passive liquid surfaces present in wastewater treatment plants [J]. Water Science and Technology,2018,271(3):903-912.  
 [13] 王芸,高占敬,赵艳,等. 超低沸点挥发性有机物测定中的要点分析[J]. 环境监测管理与技术,2019,31(4):46-48.

本栏目编辑 谢咏梅