

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.01.012

地埋式净水厂提升泵间臭味污染物排放特征

匡科¹, 李洁¹, 肖香^{2,3}, 常颖¹, 方平^{2,3}

(1. 广州市净水有限公司, 广东 广州 510655; 2. 生态环境部 华南环境科学研究所, 广东 广州 510655; 3. 广东省大气污染控制工程实验室, 广东 广州 510655)

摘要: 针对南方某地埋式净水厂提升泵间臭味污染物的排放特征进行了分析。结果表明, 提升泵间检测到的臭味物质主要包括 NH_3 、 H_2S 、三甲胺、甲硫醇、甲硫醚等5种, 平均浓度分别为1.56、18.70、0.058、0.041 6、0.145 mg/m^3 。计算得到提升泵间总臭味活性值为10 743.34, 其中 H_2S 臭味活性值为10 388.89, 贡献率达96.70%, 因此 H_2S 是臭味的主要贡献者, 为关键管控臭味物质。提升泵间的送、排风口交叉排列在空间顶部, 计算流体力学(CFD)模拟结果表明, 空间内气流和臭味污染物分布整体较为均匀, 臭气收集效率较高。同时, 进一步计算了 H_2S 的产生通量和产生系数, 分别为809.776 $\text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 、19.301 mg/m^3 。该研究确定了提升泵间合理的送排风设计方式、臭味污染物产生量及重点管控物质, 可为同类型净水厂提升泵间臭气污染防治工作提供指导。

关键词: 地埋式净水厂; 提升泵间; 臭味污染物; 计算流体力学模型; 排放特征

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)01-0078-07

Emission Characteristics of Odorous Pollutants in Pumping Room of an Underground Water Purification Plant

KUANG Ke¹, LI Jie¹, XIAO Xiang^{2,3}, CHANG Ying¹, FANG Ping^{2,3}

(1. Guangzhou Sewage Purification Co. Ltd., Guangzhou 510655, China; 2. South China Institute of Environmental Sciences, The Ministry of Ecology and Environment, Guangzhou 510655, China; 3. Guangdong Province Engineering Laboratory for Air Pollution Control, Guangzhou 510655, China)

Abstract: The emission characteristics of odorous pollutants in the pumping room of an underground water purification plant in southern China were analyzed. The odorous substances detected in the pumping room mainly comprised NH_3 , H_2S , trimethylamine, methanethiol, and methyl sulfide, with average concentrations of 1.56 mg/m^3 , 18.70 mg/m^3 , 0.058 mg/m^3 , 0.041 6 mg/m^3 and 0.145 mg/m^3 respectively. The calculated total odor activity value of the pumping room amounted to 10 743.34, among which the odor activity value of H_2S was 10 388.89, with contributing rate of 96.70%. Thus, H_2S was the primary contributor to the odor and the key substance for odor control. The air inlets and exhaust outlets of the pumping room were cross-arranged on the top of the space. The computational fluid dynamics (CFD) simulation revealed that the distribution of air flow and odorous pollutants within the space was relatively

基金项目: 公益性科研院所基本科研业务专项(PM-zx703-202305-211); 广州市净水有限公司资助项目(穗净水合[2023]9号)

通信作者: 方平 E-mail: fangping@scies.org

uniform, and the odor collection efficiency was high. Meanwhile, the production flux and production coefficient of H_2S were further computed, which were $809.776 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ and $19.301 \text{ mg}/\text{m}^3$ respectively. The research ascertained the rational air supply and exhaust design of the pumping room, the quantity of odorous pollutants generated and the key control substances, which could offer guidance for the prevention and control of odorous pollution in the pumping room of the same type of water purification plants.

Key words: underground water purification plant; pumping room; odorous pollutants; CFD model; emission characteristics

随着城市的发展,市政净水厂建设用地受限,且地面式净水厂对周边环境的影响较大,在一些经济发达地区开始要求将市政净水厂建成半地理或地理式^[1-3]。采用地理式净水厂是将主体构筑物置于地下,从而更好地控制净水厂运行过程中臭气污染,减弱邻避效应。但臭气污染依然是地理式净水厂运行过程中较为突出的环境问题,若臭气进行了不当收集处置,则易引起周边居民投诉,更有可能引发安全事故,因此必须加强重视和治理^[4]。

目前,国内外关于地理式净水厂臭味污染管控的研究较少,可借鉴地面式净水厂的相关研究成果,但关于地面式净水厂臭味污染管控的研究主要集中在污水处理单元或其周边主要臭味污染物(NH_3 、 H_2S)浓度的监测、实验室模拟重点单元臭味污染物排放特征、末端臭气治理等方面^[5-8],对污水处理重点单元密闭空间实际排放的敏感性臭味物质种类和浓度等排放特征研究较少。此外,相关文献资料表明,进水预处理区是污水处理过程中主要的臭味污染源之一,臭味体感明显,且其中又以提升泵间的臭味最强烈,为重点管控单元^[9]。因此,笔者对南方某地理式净水厂进水提升泵间臭味污染物排放特征开展研究,具体包括臭味污染物类型、浓度和空间分布,确定了关键管控臭味物质及其产生系数,分析了送排风系统布设与臭味污染物扩散的关系,旨在为臭味收集送排风系统的设计提供有效指导,同时为臭味污染治理工艺选择和参数设计提供参考。

1 材料与方法

1.1 提升泵间概况

选取广州某地理式净水厂的进水提升泵间作为研究对象,其污水处理规模为 $14.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,提升泵间密闭空间尺寸为 $14.4 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 17 \text{ m}$,有效水

深为 9.47 m ,提升泵间臭味污染物扩散空间为 $14.4 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 7.53 \text{ m}$,水面即为臭味污染物扩散源。采取送排风系统对密闭空间内的臭气进行收集,设计依据如下:密闭空间换气频率为 $2 \text{ 次}/\text{h}$,单位水面积排风指标为 $10 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,送风量为 $4896 \text{ m}^3/\text{h}$,排风量为 $6336 \text{ m}^3/\text{h}$,空间维持微负压状态,负压为 $5 \sim 10 \text{ Pa}$ 。提升泵间共设计2个进风口和3个出风口,整体位于提升泵间的东北方向,具体空间分布如图1所示。

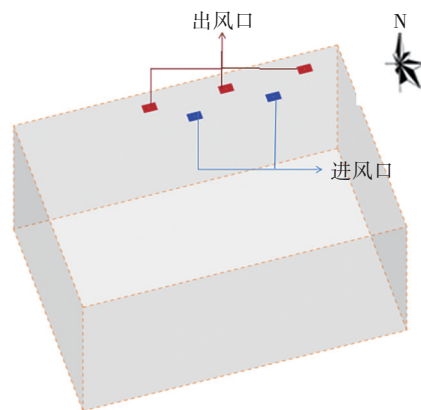


图1 提升泵间示意

Fig.1 Schematic diagram of pumping room

1.2 采样点位及频率

采样点位:提升泵间为全密闭式单元,采样点位于提升泵间密闭空间内。采样点的平面位置为提升泵间的中间位置,采样点的竖向位置为距离密闭空间顶部 1 m 、距离水面 6.53 m 。

运行负荷:采样时提升泵间为满负荷运行,污水处理能力为 $14.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。送排风系统满负荷运行,送风量为 $4896 \text{ m}^3/\text{h}$,排风量为 $6336 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

采样频率:为确保数据具备一定的参考性,进行连续采样,采样时间为2023年5月10日—16日,每日采样3次。采样期间,水温变化范围为 $20 \sim$

28℃,密闭空间温度变化范围为20~30℃。进水中COD、BOD₅和总氮的浓度范围分别为149~182、77~94和26.4~30.8 mg/L。温度和水质会影响臭味污染物的产生,但采样过程中温度和水质变化较小,对臭味污染物浓度的影响不大。

数据选择:选取采样测得数据的平均值进行分析,最大值与最小值的相对偏差<20%。

1.3 采样检测方法

H₂S采用《空气和废气监测分析方法》(第4版增补版)中亚甲基蓝分光光度法测定;NH₃采用《环境空气 氨的测定 次氯酸钠-水杨酸分光光度法》(HJ 534—2009)测定;三甲胺采用《环境空气和废气 三甲胺的测定 溶液吸收-顶空/气相色谱法》(HJ 1042—2019)测定;甲硫醇、甲硫醚、二硫化碳、二甲二硫醚采用《环境空气 挥发性有机物的测定 罐采样/气相色谱-质谱法》(HJ 759—2015)测定;臭气浓度采用《环境空气和废气 臭气的测定 三点比较式臭袋法》(HJ 1262—2022)测定;苯乙烯、总VOCs及VOCs成分和浓度采用《环境空气 挥发性有机物的测定 吸附管采样-热脱附/气相色谱-质谱法》(HJ 644—2013)测定。

1.4 常见典型臭味污染物嗅阈值

2015年,天津市环境保护科学研究院国家环境保护恶臭污染控制重点实验室按照我国臭味污染嗅觉测试的标准方法——三点比较式臭袋法(GB/T 14675—93)对每种物质的嗅阈值进行了测定,得到了我国40种典型臭味物质的本地化嗅阈值库^[10]。检测到的典型臭味物质包括H₂S、NH₃、三甲胺、甲硫醇、甲硫醚、二甲二硫醚、二硫化碳、苯乙烯、甲苯,其对应的嗅阈值分别为0.001 8、0.23、0.002 4、0.000 14、0.005 5、0.046、0.58、0.16、0.40 mg/m³。

1.5 数据分析方法

臭味污染物的产生通量 E 由式(1)计算得到,臭味污染物的产生系数 E_i 由式(2)计算得到。

$$E = \frac{C \times V}{A} \quad (1)$$

$$E_i = \frac{24 \times C \times V}{L} \quad (2)$$

式中: C 为提升泵间臭味污染物的平均浓度,mg/m³; A 为提升泵间污水水面面积,m²; V 为提升泵间的排风量,m³/h; L 为提升泵间的污水日处理能力,m³/d。

臭味污染物的化学浓度贡献率 PC_i 按式(3)计算得到;臭味活性值 OAV_i 由臭味物质的化学浓度和嗅阈值的比值得出^[11-12],见式(4);同时,根据单一臭味 OAV 与总臭味 OAV_s 的比值^[13-14],可以确定每种臭味物质的臭味贡献率 P_i ,见式(5)。

$$PC_i = \frac{C_i}{\sum_{i=1}^n C_i} \times 100\% \quad (3)$$

$$OAV_i = \frac{C_i}{C_{thr}} \quad (4)$$

$$P_i = \frac{OAV_i}{\sum_{i=1}^n OAV_i} \times 100\% \quad (5)$$

式中: C_i 为某臭味物质的化学浓度,mg/m³; C_{thr} 为该物质的嗅阈值,mg/m³。

1.6 CFD扩散模型

计算流体力学(CFD)模拟是运用离散化的数值方法,对流动基本控制方程组进行求解,用一系列有限离散点上的变量数值解集合来代替描述计算域中物理量的连续场,因此CFD成为室内通风建模中应用最广泛的方法。采用室内方法在通风和排气口附近进行流动建模,并采用RANS方法中的Standard $k-\varepsilon$ 模型,利用Ansys Fluent求解稳态流场^[15-16]。通过计算实际气体流速得到进、排气口速度,并输入Ansys Fluent作为模拟流场扩散的初始边界条件。根据实测获得提升泵间某点处臭味污染物浓度,以整个水面作为臭味污染物排放面源,模拟以H₂S和NH₃为代表的臭味污染物扩散规律。

1.7 CFD物理模型建立

根据提升泵间的空间尺寸信息,建立CFD模型,提升泵间包含2个进风口及3个出风口,送排风口尺寸为长0.6 m、宽0.4 m。送排风口尺寸相较于提升泵间空间较小,且送排风百叶窗处速度梯度大,因此加密送排风百叶窗处网格以获取更准确的流场信息,网格膨胀比为1.02~1.15,近壁面最小网格选取中网格尺寸为0.02 m×0.02 m×0.02 m,网格数约为106.9×10⁴,提升泵间网格划分如图2所示。其中,进风口、出风口风速根据送风量、排风量设置计算得出,风速分别为4.05、3.49 m/s。整个污水水面为臭味污染物排放面源。同时,经网格无关性检验,对比不同近壁面最小网格(中网格:0.02 m×0.02 m×0.02 m,网格数约106.9×10⁴;细网格:0.01

$m \times 0.01 m \times 0.01 m$, 网格数共 142.1×10^4) 设置对于模拟结果的影响, 模拟结果不随网格划分改变而产生较大的模拟差异。考虑到计算资源及模拟精度, 选取中网格进行后续研究。

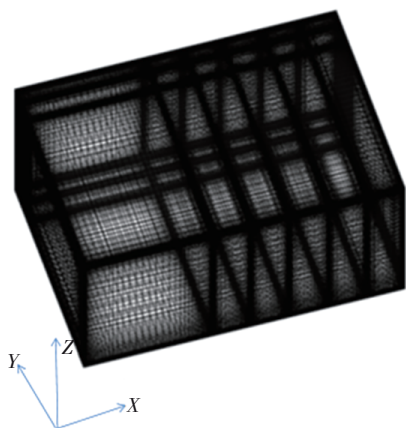


图2 提升泵间网格的划分

Fig.2 Grid arrangements of pumping room

2 结果与讨论

2.1 提升泵间臭味污染物种类分析

经检测, 提升泵间的臭气浓度可高达 5 495, 可能的原因是来自污水输送管道的市政污水流入处理系统后, 污水的水位及水压的变化使原来产生和溶解于污水中的臭味污染物大量逸出。提升泵间的二硫化碳、二甲二硫醚、苯乙烯、总 VOCs 浓度分别为 $0.017 4$ 、 $0.009 4$ 、 $0.002 3$ 、 0.52 mg/m^3 , 可以看出, 二硫化碳浓度明显低于《恶臭污染物排放标准》(GB 14554—93) 规定的二硫化碳一级厂界排放值 (2 mg/m^3) 和其嗅阈值 (0.58 mg/m^3), 因此提升泵间的二硫化碳可忽略不计。同理, 二甲二硫醚和苯乙烯浓度明显低于 GB 14554—93 规定的一级厂界排放值 (0.03 、 3 mg/m^3) 和其嗅阈值 (未规定、 0.16 mg/m^3), 因此二甲二硫醚和苯乙烯也可忽略不计。结合后续的分析可知, 提升泵间逸出的臭味污染物主要为 NH_3 、 H_2S 、三甲胺、甲硫醇、甲硫醚。

检测了 VOCs 的 34 种成分, 其中包括 1,1,2-三氯-1,2,2-三氟乙烷、1,1-二氯乙烯、氯丙烯、二氯甲烷、1,1-二氯乙烷、顺式-1,2-二氯乙烯、三氯甲烷、1,1,1-三氯乙烷、四氯化碳、1,2-二氯乙烷、苯、三氯乙烯、1,2-二氯丙烷、顺式-1,3-二氯丙烯、甲苯、反式-1,3-二氯丙烯、1,1,2-三氯乙烷、四氯乙烯、乙苯、1,2-二溴乙烷、氯苯、间,对-二甲苯、苯乙烯、邻-二甲苯、1,1,2,2-四氯乙烷、4-乙基甲苯、

1,3,5-三甲基苯、1,2,4-三甲基苯、1,3-二氯苯、1,4-二氯苯、苄基氯、1,2-二氯苯、1,2,4-三氯苯、六氯丁二烯。其中检测出 19 种 VOCs 成分, 包括 1,1-二氯乙烯、氯丙烯、二氯甲烷、顺式-1,2-二氯乙烯、三氯甲烷、四氯化碳、1,2-二氯乙烷、苯、三氯乙烯、1,2-二氯丙烷、甲苯、反式-1,3-二氯丙烯、四氯乙烯、乙苯、间,对-二甲苯、苯乙烯、邻-二甲苯、4-乙基甲苯、1,2,4-三甲基苯, 浓度分别为 $0.006 8$ 、 0.103 、 0.047 、 $0.006 4$ 、 $0.062 7$ 、 $0.005 9$ 、 $0.001 7$ 、 $0.001 6$ 、 0.004 、 $0.001 5$ 、 $0.220 3$ 、 $0.003 6$ 、 $0.016 4$ 、 $0.006 1$ 、 $0.015 6$ 、 $0.002 3$ 、 $0.008 5$ 、 $0.002 4$ 、 $0.003 7 \text{ mg/m}^3$ 。可以看出, 提升泵间总 VOCs 浓度较低, 不足 1 mg/m^3 。且检测到的 VOCs 成分主要为氯丙烯、二氯甲烷、三氯甲烷、甲苯、间,对-二甲苯等 5 种。根据嗅阈值资料, 上述 5 种成分仅甲苯为典型臭物质, 其嗅阈值为 0.4 mg/m^3 , 但检测到的甲苯浓度也较低, 约为 0.22 mg/m^3 , 低于嗅阈值浓度。整体来说, 提升泵间的 VOCs 也可忽略不计。

提升泵间 NH_3 、 H_2S 、三甲胺、甲硫醇、甲硫醚的化学浓度分别为 1.56 、 18.70 、 0.058 、 $0.041 6$ 、 0.145 mg/m^3 , 化学浓度贡献率分别为 7.61% 、 91.20% 、 0.28% 、 0.20% 、 0.71% 。可以看出, 提升泵间化学浓度贡献率最高的是 H_2S , 其他依次是 NH_3 、甲硫醚、三甲胺、甲硫醇。根据 H_2S 的产生和排放机理, 提升泵间 H_2S 化学浓度最高的原因是较高的水力压力、较高的水位及较大的水流速度, 极易使产生和溶解于污水中的 H_2S 大量逸出^[17]。

经计算, 提升泵间 NH_3 、 H_2S 、三甲胺、甲硫醇、甲硫醚臭味活性值分别为 6.78 、 $10\,388.89$ 、 24.17 、 297.14 、 26.36 , 其对应的臭味贡献率分别为 0.06% 、 96.70% 、 0.22% 、 2.77% 、 0.25% 。可以看出, 提升泵间总臭味活性值为 $10\,743.34$, 其中 H_2S 为臭味主要贡献者, 臭味贡献率高达 96.70% ; 其次依次为甲硫醇、甲硫醚、三甲胺和 NH_3 。结合化学浓度及臭味活性值可以发现, H_2S 既是化学浓度的主要贡献者, 又是臭味的主要贡献者, 因此提升泵间的重点管控物质为 H_2S 。此外, 通过对比分析发现, 在 5 种臭味污染物中, NH_3 的化学浓度仅次于 H_2S , 但对臭味的贡献最小, 而甲硫醇的化学浓度最低, 反而对臭味的贡献相对较高 (次于 H_2S), 这是因为 NH_3 的嗅阈值相对较高 (0.23 mg/m^3), 甲硫醇的嗅阈值相对较低 ($0.000 14 \text{ mg/m}^3$), 从而较低浓度的甲硫

醇反而产生一定的臭味。整体来说,在臭气污染防治过程中,相较于化学浓度的贡献物,更需对臭味的主要贡献物进行管控,其中 H_2S 对臭味的贡献程度高达96.70%,因此该净水厂提升泵间臭味重点管控物质为 H_2S 。

2.2 模拟提升泵间臭味污染物浓度分布

图3为提升泵间内部流线分布,其中蓝色、绿色和红色分别表示速度为0.1、0.5、1 m/s的等速度面。

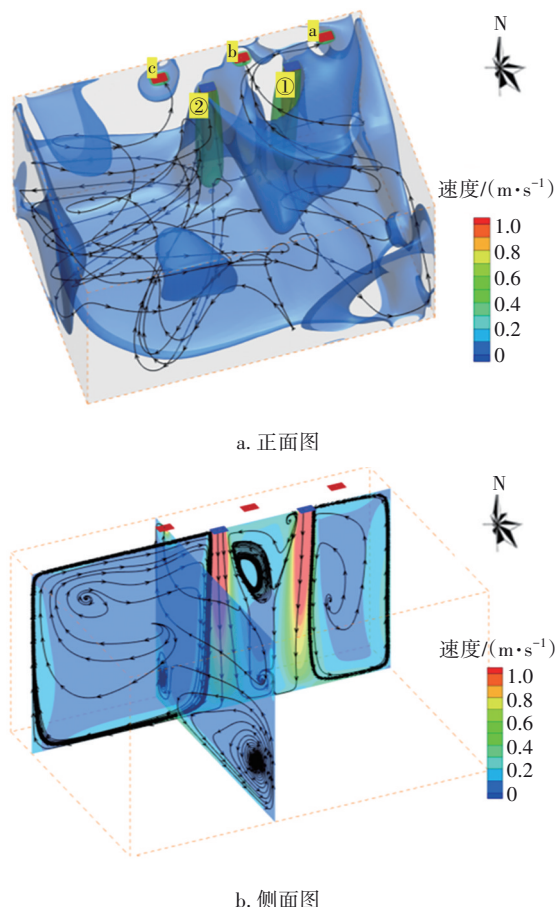


图3 提升泵间内部流线分布

Fig.3 Distribution of internal streamline in pumping room

2个进风口与3个出风口交叉排列,整体位于提升泵间的东北方向。进风口以4.05 m/s的速度送新风,在其下方形成垂直风柱,并向四周扩散。向北流动的气流受北侧壁面阻挡后上升,整体速度较大;向东、南、西侧扩散的气流则在提升泵间进行循环,主要分为两个部分,由①号进风口送出的气流由底部向南、东流动,随后上升并向北流动后由a、b出风口排出,由②号进风口送出的气流在底部向四周扩散后,向西、南部的气流走过较长距离,并主要由c出风口排出。提升泵间的送排风口主要布置在

东北方向,从内部流线分布可以看出,空间内气流分布整体较为均匀,仅存在少部分气流死角区,主要位于空间底部西南角和顶部西北角。此外,通过等速度面和速度截面分布可以看出,风速最大值位于进风口下方。同时出风口处由于垂直向外的速度,在空间内出风口附近也存在速度大值区。速度低值主要在螺旋流线的中部,由提升泵间的东北向西南减小。总体而言,空间内大部分区域速度大于0.1 m/s,产生的臭味污染物可以很好地被收集。该厂提升泵间的送排风设计方式可以为其他同类型净水厂提升泵间臭气收集设计提供参考,从而有效提高臭味污染防治水平。

图4为提升泵间 NH_3 和 H_2S 的浓度分布。由于整个水面为 NH_3 和 H_2S 的扩散源,因此底部 NH_3 和 H_2S 浓度较高,分别约为3和25 mg/m^3 。

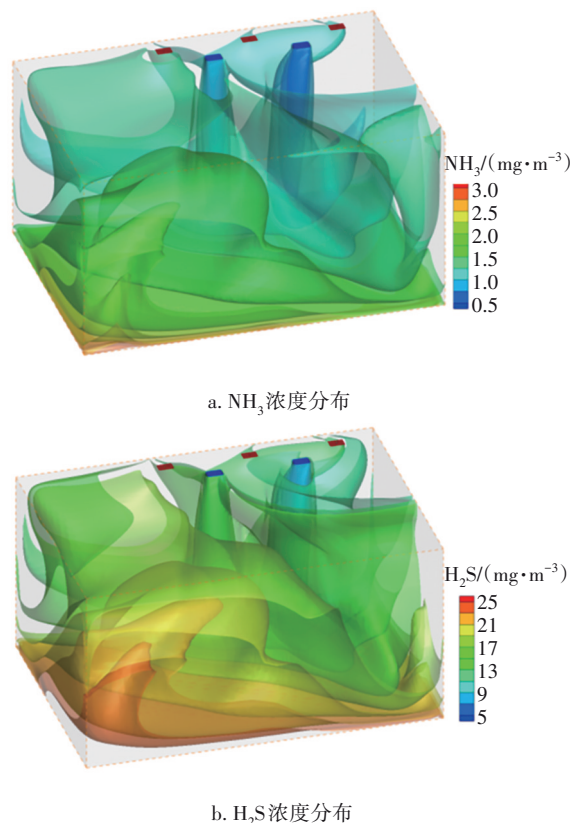


图4 提升泵间臭味污染物浓度分布

Fig.4 Concentration distribution of odorous pollutants in pumping room

从图4还可以看出,在该送排风设置下提升泵间的臭味污染物空间浓度分布较为均匀。若速度偏大值区的 NH_3 和 H_2S 浓度较低,螺旋流线的中部速度较小,则 NH_3 和 H_2S 浓度相对偏高^[18]。 NH_3 、 H_2S

的浓度主要表现为进风口下方浓度较小(分别约为 0.55 mg/m^3),随后向底部西南角空间逐渐增加,在气流死角区 NH_3 和 H_2S 的浓度约为进风口处的5倍(约为 2.523 mg/m^3)。此外,对比 NH_3 和 H_2S 的浓度空间分布可以看出,气流组织形式决定了臭味污染物的扩散,两种臭味污染物的空间规律除数值上的差异外,其等值面的分布规律基本类似,因此也可将此 NH_3 、 H_2S 的扩散规律类比于其他臭味污染物(如三甲胺、甲硫醇、甲硫醚)。

2.3 提升泵间臭味污染物的产生量

通过对提升泵间建立CFD等比例模型,在明确臭味污染物排放空间变化规律的基础上,还可以进一步计算得到提升泵间 NH_3 、 H_2S 、三甲胺、甲硫醇、甲硫醚的平均浓度,分别为 1.535 、 18.404 、 0.0568 、 0.041 、 0.128 mg/m^3 。可以看出,提升泵间臭味污染物的平均浓度和检测点的浓度相差不大,这是因为空间内送排风系统设计合理,气流分布均匀,污染物浓度分布相对均一。

根据臭味污染物的平均浓度,得到提升泵间臭味污染物的产生通量和产生系数,具体如表1所示。提升泵间重点管控臭味污染物为 H_2S ,其产生量为 $116\,607.744\text{ mg/h}$,产生通量为 $809.776\text{ mg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,产生系数为 19.301 mg/m^3 。在一定范围的水质及水温条件下,提升泵间 H_2S 的产生通量和产生系数可为同类型净水厂提升泵间臭味污染物的产量计算和臭味污染治理工艺的选择及参数设计提供参考。

表1 提升泵间臭味污染物排放特征

Tab.1 Emission characteristics of odorous pollutants in pumping room

项目	产生量/ ($\text{mg}\cdot\text{h}^{-1}$)	产生通量/ ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)	产生系数/ ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)
NH_3	9 725.760	67.540	1.610
H_2S	116 607.744	809.776	19.301
三甲胺	359.885	2.499	0.060
甲硫醇	259.776	1.804	0.043
甲硫醚	811.008	5.632	0.134

3 结论

① 南方某埋地式净水厂进水提升泵间的臭味污染物包括 NH_3 、 H_2S 、三甲胺、甲硫醇、甲硫醚等5种,其中 H_2S 的化学浓度最高(18.70 mg/m^3),且 H_2S 的嗅阈值较低,导致 H_2S 对臭味的贡献率最高,

可达96.70%,因此提升泵间重点管控臭味物质为 H_2S 。

② 提升泵间的送、排风口交叉排列在空间顶部,通过构建的CFD模型可以看出,在此送排风设置下,空间内气流分布整体较为均匀,大部分区域速度大于 0.1 m/s ,且臭味污染物浓度分布较为均匀,臭气收集效率较高。该送排风设计方式可为同类型净水厂提升泵间臭气收集送排风系统设计提供参考。

③ 基于CFD模型,并结合送排风系统,计算了提升泵间臭味污染物的产生通量和产生系数,其中 H_2S 的产生通量和产生系数分别为 $809.776\text{ mg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 和 19.301 mg/m^3 ,可为同类型提升泵间的臭味污染物产生量提供参考,并可有效指导臭气污染防治工作。

参考文献:

- [1] 罗维嘉. 埋地式净水厂用地综合开发模式的探索[J]. 工程建设与设计, 2022(23): 143-145.
LUO Weijia. Exploration of the comprehensive land development mode of underground sewage plant [J]. Construction & Design for Engineering, 2022(23): 143-145(in Chinese).
- [2] WANG M S, GONG H. Not-in-my-backyard: legislation requirements and economic analysis for developing underground wastewater treatment plant in China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, 15(11): 2339.
- [3] GIWA A S, ALI N. An extensive analysis of the engineering design of underground sewage plants in China[J]. Processes, 2023, 11(10): 3010.
- [4] 杨涛,何帅,崔容,等. 地下式污水处理厂的卫生防护距离及臭气污染控制[J]. 中国给水排水, 2024, 40(6): 67-73.
YANG Tao, HE Shuai, CUI Rong, et al. Health protection zone and odor pollution control of the underground wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(6): 67-73(in Chinese).
- [5] 林坚,李琳,刘俊新,等. 城市污水厂主要处理单元恶臭及挥发性有机物的逸散[J]. 环境工程学报, 2016, 10(5): 2329-2334.
LIN Jian, LI Lin, LIU Junxin, et al. Odors and volatile organic compounds emission from main processing units of wastewater treatment plant [J]. Chinese Journal of

- Environmental Engineering, 2016, 10 (5) : 2329-2334 (in Chinese).
- [6] RINCON C A, DE GUARDIA A, COUVERT A, *et al.* Chemical and odor characterization of gas emissions released during composting of solid wastes and digestates [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 233: 39-53.
- [7] WANG B Y, LI X D, CHEN D H, *et al.* Development of an electronic nose to characterize water quality parameters and odor concentration of wastewater emitted from different phases in a wastewater treatment plant [J]. Water Research, 2023, 235: 119878.
- [8] LI R Y, HAN Z L, SHEN H Z, *et al.* Emission characteristics of odorous volatile sulfur compound from a full-scale sequencing batch reactor wastewater treatment plant [J]. Science of the Total Environment, 2021, 776: 145991.
- [9] 董晓清, 张钊彬, 邵培兵. 污水处理厂臭气污染控制技术进展[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(14): 4388-4390, 4393.
- DONG Xiaqing, ZHANG Zhaobin, SHAO Peibing. Research progress on the treatment of odor in municipal wastewater treatment plants [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2014, 42(14): 4388-4390, 4393 (in Chinese).
- [10] 王亘, 翟增秀, 耿静, 等. 40种典型恶臭物质嗅阈值测定[J]. 安全与环境学报, 2015, 15(6): 348-351.
- WANG Gen, ZHAI Zengxiu, GENG Jing, *et al.* Testing and determination of the olfactory thresholds of the 40 kinds of typical malodorous substances [J]. Journal of Safety and Environment, 2015, 15 (6) : 348-351 (in Chinese).
- [11] YAN L C, LIU J M, JIANG S, *et al.* The regular interaction pattern among odorants of the same type and its application in odor intensity assessment[J]. Sensors, 2017, 17(7): 1624.
- [12] HAN Z L, LI R Y, SHEN H Z, *et al.* Emission characteristics and assessment of odors from sludge anaerobic digestion with thermal hydrolysis pretreatment in a wastewater treatment plant [J]. Environment Pollution, 2021, 274: 116516.
- [13] 马妍, 郑红光, 史怡, 等. 典型农药污染地块土壤中异味物质的筛查与分布特征研究[J]. 环境科学研究, 2022, 35(6): 1482-1489.
- MA Yan, ZHENG Hongguang, SHI Yi, *et al.* Screening and distribution characteristics of odorous substances in soil of typical pesticide-contaminated site [J]. Research of Environmental Sciences, 2022, 35(6) : 1482-1489 (in Chinese).
- [14] WU C D, LIU J M, ZHAO P, *et al.* Evaluation of the chemical composition and correlation between the calculated and measured odour concentration of odorous gases from a landfill in Beijing, China [J]. Atmospheric Environment, 2017, 164: 337-347.
- [15] JIAO Z R, YUAN S, JI C X, *et al.* Optimization of dilution ventilation layout design in confined environments using computational fluid dynamics (CFD) [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2019, 60: 195-202.
- [16] RAMPONI R, BLOCKEN B. CFD simulation of cross-ventilation for a generic isolated building: impact of computational parameters [J]. Build Environment, 2012, 53: 34-48.
- [17] 袁晟宇, 何义亮, 李彭. 城镇污水处理厂主要处理单元臭气释放特征与控制效果[J]. 净水技术, 2019, 38(5): 103-108, 127.
- YUAN Shengyu, HE Yiliang, LI Peng. Characteristics and control effect of odor release in main treatment units of urban sewage treatment plant [J]. Water Purification Technology, 2019, 38(5): 103-108, 127 (in Chinese).
- [18] YANF X, ZHANG Y, HANG J, *et al.* Integrated assessment of indoor and outdoor ventilation in street canyons with naturally-ventilated buildings by various ventilation indexes [J]. Building and Environment, 2020, 169: 106528.

作者简介: 匡科(1972-), 男, 湖南衡阳人, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为水污染治理。

E-mail: 1442285975@qq.com

收稿日期: 2024-03-18

修回日期: 2024-04-19

(编辑: 任莹莹)