

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.11.003

曝气吹脱控制水源水库中典型臭味物质的效能

刘家政¹, 田宝义², 李荣光², 韩正双³, 胡瑞柱¹, 高 晗¹,
党漾舟¹, 黄廷林¹, 李 凯¹

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710055; 2. 天津水务集团有限公司, 天津 300202; 3. 天津市公用事业设计研究所, 天津 300100)

摘要: 为探究曝气吹脱原位控制水源水库中2-甲基异莰醇(2-MIB)和土臭素(GSM)的效能与影响因素,采用配水和水库原水开展了小试研究。结果表明,曝气头孔径、单位面积曝气量和温度是影响曝气吹脱去除臭味物质效率的主要因素,在曝气头孔径为5 μm、曝气量为2.830 L/(min·m²)、温度为25 °C条件下曝气48 h后,对2-MIB及GSM的削减率分别达到81.7%和84.3%。对于水库原水,曝气吹脱除了直接去除水中游离态的2-MIB外,还通过抑制藻类及放线菌等产嗅微生物的繁殖实现对水体中2-MIB的削减,与无曝气对照组相比,25 °C下曝气吹脱对原水中2-MIB的削减率达到88.5%。初步经济性分析表明,水库原位曝气吹脱控制臭味物质的运行成本仅为0.042元/m³,远低于水厂内应急处理。

关键词: 水源水库; 曝气吹脱; 2-甲基异莰醇; 土臭素; 原位控制

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)11-0016-08

Effectiveness of Aeration Stripping for Controlling Typical Taste and Odor Compounds in Water Source Reservoirs

LIU Jia-zheng¹, TIAN Bao-yi², LI Rong-guang², HAN Zheng-shuang³, HU Rui-zhu¹,
GAO Han¹, DANG Yang-zhou¹, HUANG Ting-lin¹, LI Kai¹

(1. Key Laboratory of Northwest Water Resources, Environment and Ecology <Ministry of Education>, School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Tianjin Water Group Co. Ltd., Tianjin 300202, China; 3. Tianjin Public Utility Design & Research Institute, Tianjin 300100, China)

Abstract: To investigate the effectiveness and influencing factors of aeration stripping for the in-situ control of 2-methylisoborneol (2-MIB) and geosmin (GSM) in water source reservoirs, a bench-scale study was conducted using synthesized water and reservoir source water. The results showed that the aerator head aperture, aeration flow rate per unit area, and temperature were the primary factors influencing the efficiency of aeration stripping in removing odor-causing substances. Under conditions of a 5 μm aerator head aperture, an aeration rate of 2.830 L/(min·m²), and a temperature of 25 °C, 48 hours of aeration resulted in reduction rates of 2-MIB and GSM by 81.7% and 84.3%, respectively. For

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52470015); 天津水务集团有限公司科技项目(2023KY-01)

通信作者: 李凯 E-mail: likai@xauat.edu.cn

reservoir source water, aeration not only directly removed the dissolved 2-MIB in the water but also inhibited the growth of odor-producing microorganisms, such as algae and actinomycetes, thus reducing 2-MIB in the water. Compared to the non-aeration control group, aeration at 25 °C achieved a reduction rate of 88.5% for 2-MIB in the raw water. Preliminary economic analysis indicated that the operational cost of in-situ aeration stripping for controlling odor substances in the reservoir was only 0.042 yuan/m³, significantly lower than the emergency treatment costs at the water treatment plant.

Key words: water source reservoir; aeration stripping; 2-methylisoborneol; geosmin; in-situ control

臭味是用户评价饮用水质量最直接的指标之一,它会使用户对饮用水产生不信任感。湖库是重要的饮用水水源地,特殊的水文水动力条件使其面临着较高的臭味物质超标风险^[1-2]。Wang 等人^[3]对中国 31 个城市的 56 座自来水厂原水的调查发现,约有 50% 的湖库存在臭味问题。2-甲基异莰醇(2-MIB)和土臭素(GSM)是饮用水中最常见、分布最广泛的致嗅物质^[4],目前普遍认为主要由水中藻类^[5]及放线菌^[6]代谢产生,《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)规定其限值均为 10 ng/L。

针对饮用水臭味物质的控制可分为水源地原位控制和水厂内强化去除。研究表明,饮用水常规处理工艺通过去除藻类等颗粒物能够去除胞内的臭味物质,但无法去除已释放到水中的游离态臭味物质^[7];活性炭吸附^[8]、化学氧化^[9]等是水厂强化去除臭味物质的常用方法,但成本较高,且会带来污泥量增加、氧化副产物增多等问题。水源地原位控制是一种从源头上解决臭味物质超标风险的思路。通过调控水库水位^[10]、浊度^[11]、水动力条件^[12]等能够抑制产嗅藻的大量繁殖,有效解决水源臭味物质超标问题,具有不使用化学药剂、成本相对较低等优点,但许多水库不具备调控上述参数的条件。

曝气吹脱法是去除水中挥发性物质的一种常用方法,具有不使用化学药剂、无副作用等优点^[13]。Yoon 等^[14]的研究表明多级涡旋曝气对河流中的臭味物质具有良好的控制效果;周政等^[15]发现超微曝气可以快速去除黑臭水体中的臭味物质;李鑫斐等^[16]的中试表明,曝气既可以作为臭味超标的预防措施,也可以作为臭味污染暴发后的应急处理措施。为探明曝气吹脱对已释放到水中的臭味物质的去除效果以及对水中产嗅微生物的控制效果,在考察曝气吹脱去除水中 2-MIB 和 GSM 两种典型嗅

味物质影响因素的基础上,研究了曝气吹脱对实际水库原水中臭味物质的去除效能以及对藻类和放线菌生长的影响,并初步估算了其应用成本,以期工程设计提供依据。

1 材料与方 法

1.1 实验材料

2-MIB 和 GSM 标准物质购自上海安普;5% 鲁哥试剂购自江苏伊势久;放线菌培养采用高氏一号培养基;实验用纯水采用泰斯特纯水机制备。曝气吹脱实验在直径为 15 cm、高为 150 cm 的 PVC 材质曝气柱中进行,采用空气泵充氧,不锈钢粉末烧结曝气头(直径为 1.2 cm,有效高度为 2.2cm)置于水下 1 m 处,孔径分别为 5、20、80、100 μm,气体流量使用气体转子流量计计量。

为考察曝气吹脱对实际水库原水中 2-MIB 的去除效果,取天津某水库 3 月份原水进行实验,其主要水质参数如下:浊度为 3.30 NTU, pH 为 8.35, COD_{Mn} 为 4.70 mg/L,叶绿素 a 为 18.5 μg/L, 2-MIB 为 20.0 ng/L, GSM 为 3.0 ng/L。

1.2 实验方法

采用纯水配制 2-MIB 和 GSM 溶液,采用单因素实验的方法,分别改变曝气头孔径(5、20、80、100 μm)、单位面积曝气量[0.566、1.132、1.698、2.264、2.830 L/(min·m²)]、温度(10、15、20、25、30 °C)、臭味物质初始浓度(20、50、100、150、200 ng/L)进行曝气吹脱实验,于 1、2、4、8、12、24、48 h 时取 10 mL 水样,并测量 2-MIB 及 GSM 残余浓度。预实验表明,曝气柱内水体处于完全混合状态,臭味物质浓度垂向差异很小,因此统一在水深为 10 cm 处取样。

由于该水库原水 2-MIB 超标问题突出,而 GSM 基本不超标,因此采用水库原水时仅考察对 2-MIB 的去除效果。共设置 4 组实验,其中原水组 2-MIB

浓度为 (20.0 ± 0.5) ng/L, 原水加标组为原水加入30 ng/L的2-MIB标准样品, 同时用纯水配制两种浓度的2-MIB标准溶液作为对照。采用的曝气头孔径为 $5 \mu\text{m}$ 、单位面积曝气量为 $2.830 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$, 采用 (10 ± 1) 和 $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$ 两种温度, 在1、4、12、24、48、72 h时取10 mL水样, 并测定2-MIB残余浓度, 同时对曝气前后的藻类及放线菌数量进行测定。

1.3 分析方法与仪器

2-MIB和GSM采用顶空固相微萃取-气相色谱质谱联用法测定^[17], 每次吸取10 mL水样加入顶空瓶, 使用Agilent 7890B/5977B气相色谱质谱联用仪(内接Agilent HP-5MS色谱柱), 配置CTC自动进样器, 固相微萃取头采用50/30 μm DVB/CAR/PDMS。

藻类密度及种属采用OLYMPUS光学显微镜进行测定, 鉴定到属水平, 藻类的识别参考《中国淡水藻类——系统、分类及生态》。操作步骤如下: 分别取1 L运行前和运行结束后的水样, 加入10 mL鲁哥试剂固定后用真空泵抽滤, 将浓缩后的藻液放入10 mL离心管中, 在显微镜下 10×40 倍视野进行藻类计数与鉴定。藻细胞密度计算公式如下:

$$N = \left(\frac{A}{A_c} \times \frac{V_w}{V} \right) \times n \quad (1)$$

式中: N 为水样中的浮游藻类数目, 个/L; A 为平板计数框面积, 取 400 mm^2 ; A_c 为计数面积, mm^2 ; V_w 为每升水样沉淀浓缩稀释后的体积, mL; V 为计数框的体积, mL; n 为计数所得浮游藻类个数。

放线菌数量采用滤膜过滤、高氏一号培养基和平板计数进行测定^[18]。具体操作步骤如下: 分别取1 L运行前和运行结束后的水样, 经 $0.22 \mu\text{m}$ 滤膜过滤, 将过滤后的滤膜置于高氏一号固体培养基中, 培养温度为 $(28 \pm 2)^\circ\text{C}$, 培养时间为7 d, 菌落计数在培养结束后进行, 每个样品重复进行三次($n=3$); 在培养过程中需要加入最终浓度为80 mg/L的重铬酸钾作为抑制剂。

为了更直观地比较去除率的差异, 采用一级动力学方程拟合曝气吹脱过程, 见式(2)。

$$-\ln \frac{C_t}{C_0} = kt \quad (2)$$

式中: C_t 为 t 时刻2-MIB或GSM剩余浓度, ng/L; C_0 为曝气前2-MIB或GSM浓度, ng/L; k 为曝气吹脱时2-MIB或GSM速率变化常数, h^{-1} ; t 为曝气吹脱时间, h。

2 结果与分析

2.1 曝气头孔径的影响

在2-MIB和GSM初始浓度均为100 ng/L、单位面积曝气量为 $1.698 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$ 、温度为 25°C 条件下, 考察了曝气头孔径对曝气吹脱效率的影响, 结果如图1所示。采用5、20、80、100 μm 孔径的曝气头曝气24 h后, 2-MIB的去除率分别为50.35%、37.87%、23.55%和20.70%, 而GSM的去除率分别为45.14%、40.78%、24.45%、22.28%; 曝气48 h后, 相应的2-MIB去除率分别为74.27%、59.82%、41.52%、36.72%, 而GSM的去除率分别为80.34%、61.42%、45.69%、37.96%。可以看出, 2-MIB和GSM的去除率均随着曝气头孔径减小而提高。

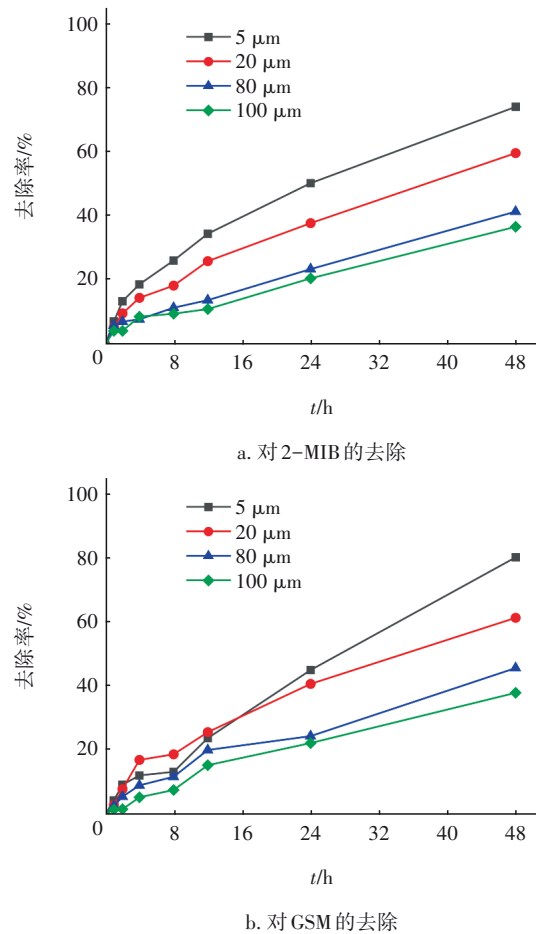


图1 曝气头孔径对曝气吹脱去除2-MIB和GSM的影响

Fig.1 Effect of aerator head aperture on removal of 2-MIB and GSM by aeration stripping

采用一级动力学方程对实验结果进行拟合, 当曝气头孔径为5、20、80、100 μm 时, 2-MIB的 k 值分别为0.029 2、0.019 7、0.011 4、0.009 7 h^{-1} , R^2 分别

为0.9887、0.9847、0.9815、0.9831;GSM的 k 值分别为0.0314、0.0207、0.0130、0.0102 h^{-1} , R^2 分别为0.9801、0.9859、0.9822、0.9924。可以看出,2-MIB和GSM的吹脱速率常数均随着曝气头孔径的增大而减小。曝气头孔径决定了曝气产生的气泡直径,孔径越小则产生的气泡直径也越小,气泡的停留时间就越长,气液接触面积会更大^[19]。同时,曝气头孔径也决定了曝气头的孔隙率,孔径越小,孔隙率越大,生成的气泡数量就越多,水中的湍流运动也就越剧烈,两相接触的气液膜变薄。因此,曝气头孔径越小,对嗅味物质的曝气吹脱效果也就越好。但是当曝气头孔径变小时,曝气过程中的阻力损失会变大,设备能耗相应提高。

2.2 单位面积曝气量的影响

在2-MIB和GSM初始浓度均为100 ng/L、曝气头孔径为5 μm 、温度为25 $^{\circ}\text{C}$ 条件下考察了单位面积曝气量对曝气吹脱效率的影响,结果见图2。

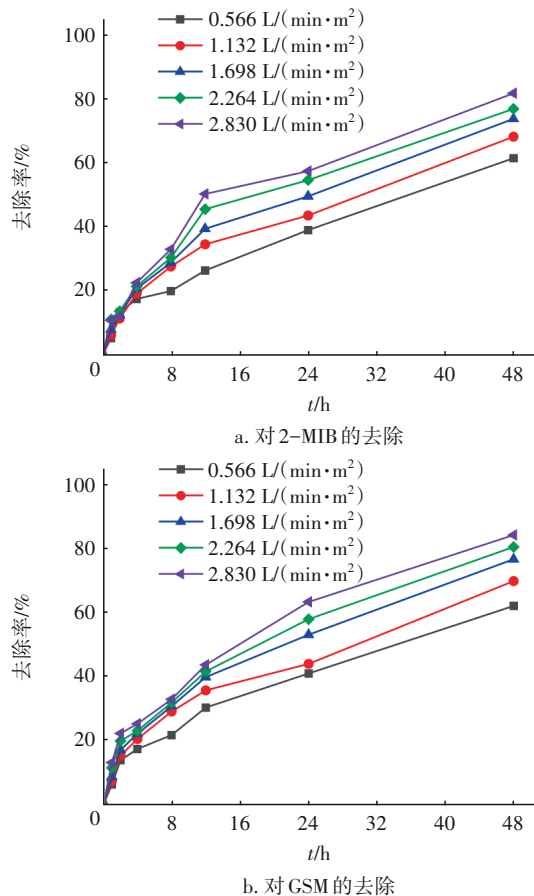


图2 单位面积曝气量对曝气吹脱去除2-MIB和GSM的影响

Fig.2 Effect of aeration flow rate on removal of 2-MIB and GSM by aeration stripping

由图2可以看出,2-MIB和GSM的去除率均随着单位面积曝气量的增大而提高,但单位面积曝气量增大到一定程度时,2-MIB和GSM去除率的提高幅度均变小。

单位面积曝气量的增加能通过以下三方面的作用提高嗅味物质去除效果:①增大了气液间的接触表面积;②增大了液相湍流的剧烈程度,使得两相接触的气液膜变薄,降低了传质阻力;③使得扩散到气相中的嗅味物质被气流快速带走,降低了气相中的浓度,使得气液两相之间的浓度梯度增大,增大了传质通量,从而提高了嗅味物质的去除率。

采用一级动力学方程对实验结果进行拟合,当单位面积曝气量为0.566、1.132、1.698、2.264、2.830 $\text{L}/(\text{min}\cdot\text{m}^2)$ 时,2-MIB的 k 值分别为0.0206、0.0249、0.0292、0.0324和0.0370 h^{-1} , R^2 分别为0.9760、0.9725、0.9887、0.9719和0.9759;GSM的 k 值分别为0.0214、0.0260、0.0318、0.0356和0.0402 h^{-1} , R^2 分别为0.9725、0.9666、0.9784、0.9815和0.9841。可见,在单位面积曝气量较小时2-MIB和GSM的去除率随单位面积曝气量增大而快速提高,当单位面积曝气量增大到一定程度时去除率增幅均变小。因此,在实际应用时选取合适的单位面积曝气量非常重要。

2.3 嗅味物质初始浓度的影响

在曝气头孔径为5 μm 、单位面积曝气量为1.698 $\text{L}/(\text{min}\cdot\text{m}^2)$ 、温度为25 $^{\circ}\text{C}$ 的条件下,考察了嗅味物质初始浓度对曝气吹脱效率的影响。在初始浓度为20、50、100、150、200 ng/L时,曝气24 h以后2-MIB的去除率分别为48.34%、46.17%、50.35%、46.15%和46.44%,曝气48 h以后的去除率分别为69.19%、68.96%、73.26%、70.96%和68.74%;在相同条件下曝气24 h以后GSM的去除率分别为49.76%、47.92%、50.15%、48.28%和46.94%,曝气48 h以后GSM的去除率分别为72.25%、70.30%、74.32%、72.75%和69.57%。可以看出,在不同2-MIB和GSM初始浓度下,相同时间内的去除率并没有很明显的变化,即初始浓度对去除效果基本没有影响。

采用一级动力学方程对实验结果进行拟合,结果见表1。可以看出,不同初始浓度下2-MIB和GSM的 k 值相差不大,说明吹脱去除效率与嗅味物质初始浓度无关。当去除率相同时,嗅味物质初始

浓度越大,单位时间内去除臭味物质的量越多;同时也意味着,随着臭味物质初始浓度的增加,为将臭味物质控制在标准值以下,所需要的时间也就越长。因此,臭味物质初始浓度越高,降到标准值以下所需要的气水比越大,对设备和能耗的要求也就越高。所以在实际应用中需综合考虑臭味物质浓度、设备和能耗等因素,以确定最优的曝气参数。

表 1 不同初始浓度下曝气吹脱一级动力学模拟结果

Tab.1 First-order dynamics simulation results of aeration stripping under different initial concentrations

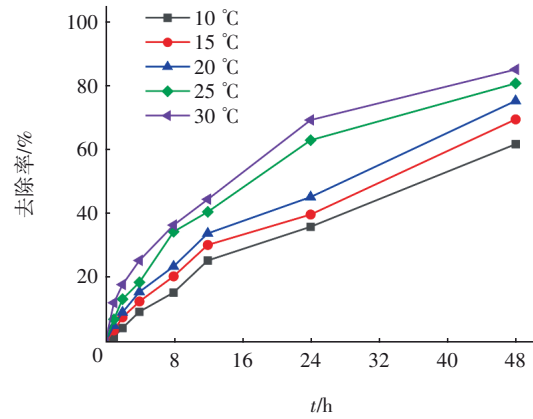
初始浓度/ (ng·L ⁻¹)	2-MIB		GSM	
	k/h ⁻¹	R ²	k/h ⁻¹	R ²
20	0.025 3	0.994 7	0.027 4	0.996 0
50	0.025 5	0.981 0	0.026 5	0.985 0
100	0.028 6	0.984 9	0.029 2	0.985 5
150	0.026 5	0.985 2	0.027 8	0.988 9
200	0.025 0	0.992 4	0.025 7	0.991 3

2.4 温度的影响

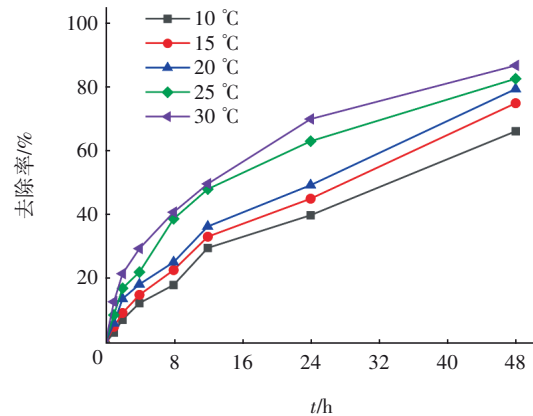
在 2-MIB 和 GSM 浓度均为 100 ng/L、曝气头孔径为 5 μm、单位面积曝气量为 1.698 L/(min·m²) 条件下考察了温度对曝气吹脱效率的影响,结果见图 3。在温度为 10 °C 时,曝气 4 h 后 2-MIB 和 GSM 的去除率分别为 9.56% 和 12.60%,而在 30 °C 时曝气 4 h 后 2-MIB 和 GSM 的去除率分别提高至 25.65% 和 29.66%,分别增加了 16.09% 和 17.06%。在 10 °C 时曝气 48 h 后 2-MIB 和 GSM 的去除率分别为 61.95% 和 66.33%,而在 30 °C 时曝气 48 h 后去除率分别提高至 85.23% 和 86.87%,分别提升了 23.28% 和 20.54%。可以看出,无论是短时间曝气还是长时间曝气,2-MIB 和 GSM 的去除率均随温度的升高而增加。

采用一级动力学方程对实验结果进行拟合,当温度为 10、15、20、25、30 °C 时,2-MIB 的 k 值分别为 0.020 1、0.024 6、0.029 0、0.036 8 和 0.042 7 h⁻¹,R² 分别为 0.996 3、0.992 1、0.992 4、0.986 1 和 0.982 5; GSM 的 k 值分别为 0.022 9、0.028 6、0.032 6、0.039 1 和 0.045 4 h⁻¹,R² 分别为 0.993 1、0.993 2、0.991 3、0.977 3 和 0.977 6。可见,2-MIB 和 GSM 的吹脱速率常数均随着温度的升高而增大,说明温度的升高有利于 2-MIB 和 GSM 的曝气吹脱去除。当温度升高时,水体的黏度降低,两相接触的气液膜厚度减

小,因而臭味物质更易通过气液膜扩散到气相中去。自然水体中臭味暴发大多集中在夏秋季节,此时水温保持在 20 °C 以上,用曝气吹脱的方法去除臭味物质具有一定优势。



a. 对 2-MIB 的去除



b. 对 GSM 的去除

图 3 温度对曝气吹脱去除 2-MIB 和 GSM 的影响

Fig.3 Effect of temperature on removal of 2-MIB and GSM by aeration stripping

2.5 曝气吹脱法对实际水库原水的控嗅效果

在单位面积曝气量为 2.830 L/(min·m²)、曝气头孔径为 5 μm 的条件下,曝气吹脱去除水库原水中 2-MIB 的小试结果见图 4。可以看出,在 10 和 25 °C 条件下曝气吹脱均能有效削减 2-MIB,且 25 °C 下的削减效率较高,由于臭味超标问题主要出现在水温较高的夏秋季,有利于采用曝气吹脱技术进行控制。在 25 °C 条件下,曝气吹脱 72 h 后对初始浓度为 20 和 50 ng/L 纯水组的削减率分别为 90.0% 和 85.0%,与之相比,对水库原水中 2-MIB 的削减效果略差,削减率分别为 76.2% 和 80.7%。但无曝气对照组的 2-MIB 浓度明显上升,在 10 和 25 °C 下由 20

ng/L 分别升高至 30.0 ng/L 和 38.2 ng/L,说明原水中产嗅微生物会持续释放臭味物质,以无曝气水库原水组第 72 小时的 2-MIB 浓度为对照,10 和 25 °C 下水库原水曝气 72 h 后其浓度分别削减 68.7% 和 88.5%。

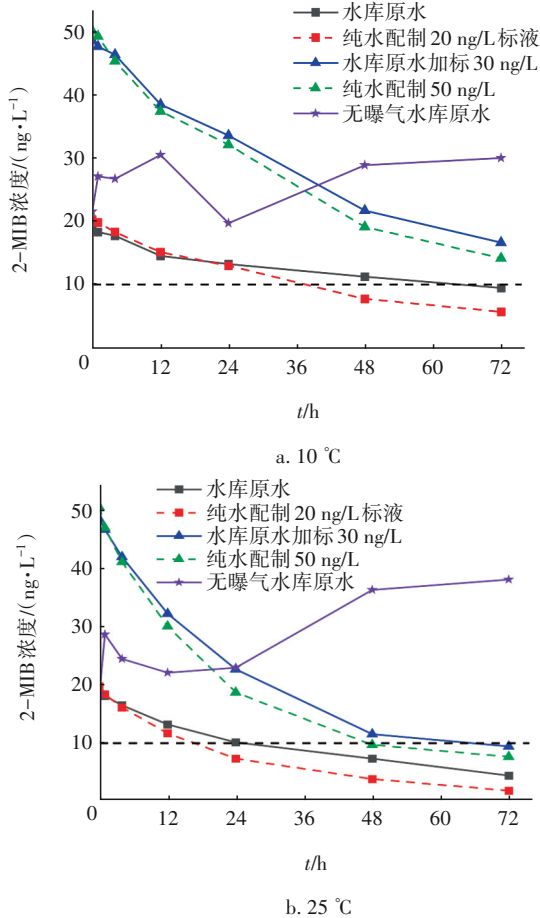


图 4 曝气吹脱去除水库原水中 2-MIB 的效果

Fig.4 Removal of 2-MIB in reservoir source water by aeration stripping

进一步分析了曝气吹脱前后原水中藻类和放线菌的变化。实验前,总放线菌密度为 994 CFU/L;在 10 °C 下,对照组和曝气 72 h 后的放线菌密度分别为 1 046、787 CFU/L;在 25 °C 下,对照组和曝气 72 h 后的放线菌密度分别为 1 430、409 CFU/L。不同温度下实验前后藻类种属的变化见表 2。

由表 2 及上述可知,在 10 和 25 °C 下,无曝气对照组的藻类和放线菌均有一定程度增殖,而曝气对藻类和放线菌都有一定的控制效果,与无曝气对照组相比,10 °C 下曝气 72 h 后产嗅藻和非产嗅藻分别削减 48.9% 和 42.0%,放线菌削减 24.8%;25 °C 下曝气 72 h 后产嗅藻和非产嗅藻分别削减 71.6% 和

61.3%,放线菌削减 71.4%。这可能是由于曝气改变了水动力等条件,从而抑制了产嗅藻和放线菌的增殖。这进一步表明曝气吹脱除了直接去除水中游离态的 2-MIB 外,还能够通过抑制产嗅微生物的繁殖实现对水中 2-MIB 的削减。需要说明的是,水环境中致嗅放线菌主要为链霉菌及诺卡氏菌属^[6],但同期对该水库水样的分子生物学分析中并未检出相应的放线菌属,这表明该时期放线菌不是该水库臭味物质的主要来源。

表 2 不同温度下实验前后藻类种属的变化

Tab.2 Change in algae species before and after experiment at different temperatures

项目		藻密度/(10 ⁴ 个·L ⁻¹)				
		实验前	10 °C		25 °C	
			对照组	曝气 72 h 后	对照组	曝气 72 h 后
产嗅藻	席藻	22.0	27.0	10.5	27.0	5.5
	束丝藻	14.5	17.0	12.0	20.5	8.0
非产嗅藻		779.5	823.0	477.5	1 032.5	399.5
总藻密度		816.0	867.0	500.0	1 080.0	413.0

2.6 曝气吹脱经济性初步分析

根据上述实验结果,在水库取水口前区域设置曝气吹脱系统(考虑大面积布设曝气装置的可行性和控制藻类等功能,可采用扬水曝气或扬水曝气强化生物系统^[20])时可按照控制区域内平均水力停留时间为 48~72 h 设计。以取水口供水量为 10×10⁴ m³/d 计,水力停留时间为 72 h,则控制区域水体体积应为 30×10⁴ m³;按照平均水深为 5 m 计,则需控制的水面面积为 6×10⁴ m²;按照单位面积曝气量为 2.830 L/(min·m²)计且曝气头位于水深为 1 m 处,所需气量为 169.8 m³/min,折算为标准体积为 186.8 m³/min,参考《给水排水设计手册(第 11 册 常用设备)》,可选用 2 台出口压力为 49.0 kPa、进口流量为 93.5 m³/min 的罗茨鼓风机,所配电机总功率为 220 kW,按照工业用电平均价格为 0.80 元/(kW·h)计算,运行电费为 4 224 元/d,按水量计为 0.042 元/m³。若在水厂内采用粉末活性炭吸附、氧化等应急处理,增加的运行成本一般为 0.3~0.6 元/m³^[2]。可见,采用曝气吹脱法在水源水库进行原位削减的运行成本远低于水厂内应急处理。

上述分析主要基于小试,考虑到实际水源水库气象、水文、水动力等条件的复杂性,后续将通过原

位围隔实验等进一步验证和评估曝气吹脱控制臭味物质的效能和经济性。

3 结论

① 曝气吹脱能够有效去除水中的2-MIB和GSM,曝气头孔径越小、温度越高、单位面积曝气量越大,曝气吹脱对2-MIB和GSM的去除率越高。在曝气头孔径为5 μm、曝气量为2.830 L/(min·m²)、温度为25℃条件下曝气48 h后,对2-MIB和GSM的去除率分别达到81.7%和84.3%。

② 对于水库原水,曝气吹脱除了直接去除水中游离态的2-MIB外,还通过抑制藻类及放线菌等产臭微生物的繁殖实现对水中2-MIB的削减,与无曝气对照组相比,25℃下曝气吹脱对原水中2-MIB的削减率达到88.5%。

③ 初步经济性分析表明,水源水库内曝气吹脱原位控制臭味物质的运行成本仅为0.042元/m³,远低于水厂应急处理。

参考文献:

- [1] 苏晓,韩正双,张楠,等.天津某水库2-MIB季节性变化规律及来源分析[J].中国给水排水,2020,36(19):39-45.
SU Xiao, HAN Zhengshuang, ZHANG Nan, *et al.* Seasonal variation rule and source analysis of 2-MIB in a reservoir of Tianjin [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(19): 39-45 (in Chinese).
- [2] 郭庆园,王春苗,于建伟,等.饮用水中典型臭味问题及其研究进展[J].中国给水排水,2020,36(22):82-88.
GUO Qingyuan, WANG Chunmiao, YU Jianwei, *et al.* Research progress on typical taste and odor problems in drinking water[J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(22): 82-88 (in Chinese).
- [3] WANG C, YU J, GUO Q, *et al.* Occurrence of swampy/septic odor and possible odorants in source and finished drinking water of major cities across China [J]. Environmental Pollution, 2019, 249: 305-310.
- [4] LI H, GU X, CHEN H, *et al.* Co-occurrence of multiple cyanotoxins and taste-and-odor compounds in the large eutrophic Lake Taihu, China: dynamics, driving factors, and challenges for risk assessment [J]. Environmental Pollution, 2022, 294: 118594.
- [5] 朱厚亚,刘波,张凌云,等. pH值和光照强度对颤藻生长及产臭特征的影响[J].中国给水排水,2019,35(7):77-80,85.
ZHU Houya, LIU Bo, ZHANG Lingyun, *et al.* Effects of pH and light intensity on growth and odorous compounds production characteristics of *Oscillatoria* [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(7): 77-80, 85 (in Chinese).
- [6] 张海涵,苗雨甜,黄廷林,等.典型水环境微生物源异嗅物研究进展[J].环境科学,2020,41(11):5201-5214.
ZHANG Haihan, MIAO Yutian, HUANG Tinglin, *et al.* Advances in microbe-derived taste and odor compounds in typical aquatic ecosystems [J]. Environmental Science, 2020, 41(11): 5201-5214 (in Chinese).
- [7] LI L, YANG S, YU S, *et al.* Variation and removal of 2-MIB in full-scale treatment plants with source water from Lake Tai, China [J]. Water Research, 2019, 162: 180-189.
- [8] 张旭东,张学博,刘畅,等.天津滨海新区自来水臭味事件成因分析及应急处理[J].中国给水排水,2017,33(13):46-49.
ZHANG Xudong, ZHANG Xuebo, LIU Chang, *et al.* Cause for odor problem and its emergent treatment in Tianjin Binhai New Area [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(13): 46-49 (in Chinese).
- [9] 焦洁,陆纳新,王海湧,等.太湖原水藻类代谢产物中臭味物质的去除技术研究[J].中国给水排水,2016,32(11):64-67.
JIAO Jie, LU Naxin, WANG Haiyong, *et al.* Removal of odorous substances from algae metabolites in raw water of Taihu Lake [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(11): 64-67 (in Chinese).
- [10] SU M, JIA D, YU J, *et al.* Reducing production of taste and odor by deep-living cyanobacteria in drinking water reservoirs by regulation of water level [J]. Science of the Total Environment, 2017, 574: 1477-1483.
- [11] SU M, ZHU Y, ANDERSEN T, *et al.* Light-dominated selection shaping filamentous cyanobacterial assemblages drives odor problem in a drinking water reservoir [J]. npj Clean Water, 2022, 5(1): 37.
- [12] LU J, SU M, SU Y, *et al.* MIB-derived odor management based upon hydraulic regulation in small drinking water reservoirs: principle and application [J]. Water Research, 2023, 244: 120485.
- [13] 张伟.曝气吹脱去除水源水中挥发性有机物的应急处理技术研究[D].北京:清华大学,2011.

- ZHANG Wei. Study on Air Stripping as an Emergency Treatment Technology for Removing Volatile Organic Compounds in Source Water [D]. Beijing: Tsinghua University, 2011 (in Chinese).
- [14] YOON D, CHOI M, PARK S. Urban streams' water quality and odor control using pure oxygen and vortex aerator [J]. *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, 2021, 41(5): 493-504.
- [15] 周政,柴晓利. 超微曝气快速去除黑臭水体中臭味物质的研究[J]. *山东化工*, 2021, 50(2):253-255,257.
- ZHOU Zheng, CHAI Xiaoli. Research on the rapid removal of odorous compounds in black and odorous water by micro-nano aeration [J]. *Shandong Chemical Industry*, 2021, 50(2):253-255,257(in Chinese).
- [16] 李鑫斐,韩宏大,赵林,等. 平原水库遮光、曝气防治臭味污染中试试验研究[J]. *环境污染与防治*, 2024, 46(9):1309-1316.
- LI Xinfei, HAN Hongda, ZHAO Lin, *et al.* Pilot study on prevention of odor pollution by shading and aeration in plain reservoirs [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2024, 46(9): 1309-1316(in Chinese).
- [17] 彭睿,马越,张文艺. 顶空固相微萃取/气质联用测定水中10种致嗅物质[J]. *中国给水排水*, 2023, 39(18): 147-154.
- PENG Rui, MA Yue, ZHANG Wenyi. Online headspace solid-phase microextraction/gas chromatography-mass spectrometry for determination of ten odorous compounds in water [J]. *China Water & Wastewater*, 2023, 39(18): 147-154 (in Chinese).
- [18] 赵代娟. 水源水库放线菌群结构、生长特征与控制研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2023.
- ZHAO Daijuan. Actinobacterial Community Structure in the Drinking Water Reservoir: Novel Insight into Growth Characteristics and Inactivation of Odor-producing *Actinobacteria* [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2023(in Chinese).
- [19] 胡鹏,刘玲花,吴雷祥,等. 微孔曝气充氧性能的影响因素研究[J]. *工业水处理*, 2015, 35(8):49-52.
- HU Peng, LIU Linghua, WU Leixiang, *et al.* Study on the influencing factors of oxygenation performance of microporous aeration [J]. *Industrial Water Treatment*, 2015, 35(8): 49-52(in Chinese).
- [20] 翟振起,黄廷林,陈凡. 扬水曝气技术在调水型水库水质改善中的应用[J]. *中国给水排水*, 2022, 38(8): 31-37.
- ZHAI Zhenqi, HUANG Tinglin, CHEN Fan. Application of water-lifting aeration technology in water quality improvement of water diversion reservoir [J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(8): 31-37 (in Chinese).

作者简介:刘家政(1999-),男,山东临沂人,硕士研究生,研究方向为水源水质污染控制。

E-mail: 1372677249@qq.com

收稿日期:2024-12-16

修回日期:2025-01-06

(编辑:李德强)

扎实推进水源地规范化建设和备用水源地建设,保障好城乡饮用水安全