

# 太湖原水藻类代谢产物中臭味物质的去除技术研究

焦洁, 陆纳新, 王海湧, 胡宗长, 袁君  
(无锡市自来水有限公司, 江苏 无锡 214031)

**摘要:** 在调研太湖原水中存在的主要致嗅物质的基础上,通过试验比选、净水方案制定与实施,确定采用粉末活性炭和臭氧—生物活性炭深度处理工艺,解决了常规工艺不能有效解决的臭味问题。在太湖原水2-MIB浓度超出国标80倍条件下,粉末活性炭与预处理、深度处理工艺联用,可将出厂水2-MIB浓度控制在10 ng/L以下,达到国家饮用水标准。

**关键词:** 臭味; 2-MIB; 粉末活性炭; 臭氧

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2016)11-0064-04

## Removal of Odorous Substances from Algae Metabolites in Raw Water of Taihu Lake

JIAO Jie, LU Na-xin, WANG Hai-yong, HU Zong-zhang, YUAN Jun  
(Wuxi City Water Co. Ltd., Wuxi 214031, China)

**Abstract:** Based on the investigation of odorous compounds existing in raw water of Taihu Lake, the combined process of powdered activated carbon and ozone-biological activated carbon as advanced treatment process was used through experimental comparison, water purification plan formulation and implementation to solve the odor problem that the conventional technology cannot effectively solve. Under the conditions of 2-MIB concentration in the raw water exceeding 80 times of the national standard, the combination of powdered activated carbon, pretreatment and advanced treatment could control the 2-MIB concentration in the finished water at below 10 ng/L, meeting the national drinking water standard.

**Key words:** odor; 2-MIB; powdered activated carbon; ozone

太湖水源除水体富营养化外,还偶有臭味突发性污染的问题,主要的异味是土霉味和土腥味。常规处理工艺并不能有效去除此类异味物质,而许多研究显示臭氧氧化、粉末活性炭吸附及臭氧—生物活性炭等工艺对此类臭味物质能有效去除。

### 1 太湖水源突发性异味应急处置

#### 1.1 水源水质

某市50%以上饮用水的原水取自太湖,采用“预臭氧—生物预处理—混凝—沉淀—砂滤—臭氧—生物活性炭—消毒”水处理工艺,典型工艺流程如图1所示。2014年8月11日,某市2个以太湖为水源的水厂原水中2-MIB含量急剧上升,检测值

分别达到了335.7、806.1 ng/L,之后不断波动变化。

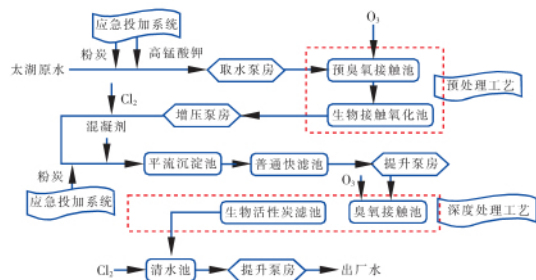


图1 水厂工艺流程

Fig. 1 Flow chart of water treatment plant

A厂原水中2-MIB最高值为8月11日夜间的430.2 ng/L, B厂原水中2-MIB浓度峰值(876 ng/L)

L) 出现在 8 月 13 日。要将超出国标几十倍的原水 2-MIB 浓度降至 10 ng/L 以下,需要达到 97% 以上的去除率。

## 1.2 小试

针对以上现象,生产上立即调整了两厂的供水负荷,其供水总占比由 56% 下降至 50% 左右;同时开展小试,模拟不同臭氧、粉末活性炭(PAC)、氯投加量及其组合情况下对该水源中主要超标物质 2-MIB 的去除情况,其中 1、2 号小试原水的 2-MIB 为 160.5 ng/L,3、4 号为 280.2 ng/L,5、6 号为 200.9 ng/L。试验结果见图 2。

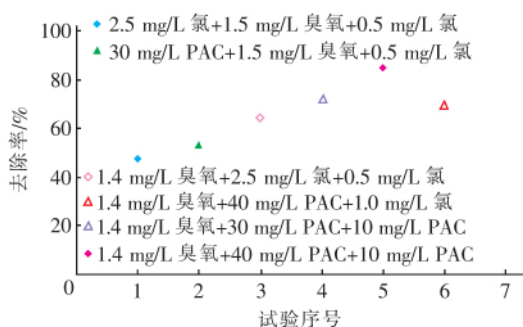


图 2 不同工况下对 2-MIB 的去除

Fig. 2 Removal of 2-MIB under different conditions

由图 2 可以看出,相同预臭氧投加量下,后续增设粉末活性炭投加效果要比单独投加氯好;PAC 投加量为 40 mg/L 相比 30 mg/L,对 2-MIB 的总去除率高 15% 以上,且在水源厂和净水厂都投加粉末活性炭去除 2-MIB 的效果最好。

## 1.3 方案制定及实施

根据小试结果,制定了如下净水方案:适当降低水厂供水负荷,提高水厂预臭氧、后臭氧投加量,且前后相加总量不超过 2.5 mg/L。由于 B 厂原水中 2-MIB 浓度过高,因此在 B 厂采取沉前投加 30 mg/L 的粉末活性炭,吸附部分致嗅物质。

### 1.3.1 以太湖为水源的 A 厂应急处理过程

A 厂原水中 2-MIB 浓度于 8 月 11 日夜间接到 430.2 ng/L,次日降至 200 ng/L 以下,之后有所波动,8 月 15 日开始 2-MIB 含量平稳下降,月末降至 30 ng/L 以下。

8 月 11 日 17 时开始,A 厂水源厂预臭氧投加量由原来的 1.0 mg/L 升至 1.2 mg/L;8 月 12 日 12 时再升至 1.4 mg/L;加氯量维持 2.0 mg/L 不变。净水厂后臭氧投加量提高至 1.0 mg/L,加矾、加氯量分别控制在 30 和 2.5 mg/L。虽然净水厂进水中

2-MIB 浓度最高达到 311.8 ng/L,但出厂水中 2-MIB 基本无检出,确保了出厂水水质安全。

### 1.3.2 以太湖为水源的 B 厂应急处理过程

B 厂原水 8 月 11 日早上 8 点 2-MIB 的检测值为 806.1 ng/L,之后有所下降,但 8 月 13 日出现峰值 876 ng/L,之后在波动中下降,8 月 24 日下降至 40 ng/L 以下。

8 月 11 日 18 时开始,B 厂调整了生产工艺,预臭氧投加浓度由 1.0 mg/L 提升至 1.5 mg/L,后臭氧投加浓度为 0.8 mg/L。19:30 时,B 厂沉淀池前开始投加粉末活性炭,投加量为 30 mg/L。沉淀环节前投加粉末活性炭后,沉淀出水的 2-MIB 平均去除率为 69%,最高时达到 88%,经后续臭氧-生物活性炭深度处理工艺进一步处理后,对 2-MIB 的去除率达到 98% 以上,有效保证了炭滤出水 2-MIB 浓度在 0~1 ng/L 之间,出厂水中 2-MIB 未检出。之后 B 厂根据原水水质情况逐步下调粉末活性炭投加量,至 8 月 24 日下午 2 时停止投加粉末活性炭,恢复沉前加氯量为 1.2 mg/L。

## 2 太湖原水中臭味物质的去除探索

针对本次应急事件,对原水突发异味原因及其处理技术进行了分析。

### 2.1 原水突发异味原因

富营养化水体中的某些藻类和放线菌在新陈代谢过程中产生的致嗅物质可使水体产生异味,本次异味主要是由 2-MIB 产生的土霉味,土臭素(GSM)本次未检出。

虽然 A 厂和 B 厂原水都取自太湖,但 B 厂原水中 2-MIB 浓度异常升高且高于 A 厂,这可能与 A 厂、B 厂原水取自太湖不同地方、原水中藻类构成不同有关。为此,2014 年 8 月 18 日对太湖原水中藻类品种进行了检测,结果见表 1。

太湖取水口原水中优势藻类为蓝藻(色球藻、颤藻、微囊藻)、绿藻(小球藻、衣藻、栅列藻)和硅藻(圆筛藻、直链藻、舟形藻、小环藻),其总数占藻类总数的 90% 以上。根据往年检测数据,同数量级藻类中色球藻数量及占比均保持不变,且暂未查询到有文献及试验数据表明色球藻可产生土霉味物质。Huang 等<sup>[1]</sup>研究了蓝绿藻的微囊藻属及颤藻属的 2-MIB 及 GSM 的产生量,结果表明:2-MIB 产生量为颤藻属 > 微囊藻属,颤藻属产生的 2-MIB 浓度高达 17.6 ng/10<sup>7</sup> 个。

表 1 太湖原水中藻类构成分类

Tab. 1 Classification of algae in raw water of Taihu Lake

项 目	A 厂原水		B 厂原水		门类
	数量/(10 <sup>4</sup> 个·L <sup>-1</sup> )	百分比/%	数量/(10 <sup>4</sup> 个·L <sup>-1</sup> )	百分比/%	
色球藻	290	50.49	410	48.31	蓝藻
颤藻	20		41		
微囊藻	—		20		
衣藻	61	29.48	160	34.97	绿藻
小球藻	100		140		
栅列藻	20		41		
小环藻	41	13.36	—	10.46	硅藻
舟形藻	41		—		
圆筛藻	—		61		
直链藻	—		41		
其他	41	6.68	61	6.26	其他
总量	614	—	975	—	—

为判断色球藻是否对原水臭味有主要贡献,8月21日对A厂外围监测点新港、取水口南、龙头渚东南的藻类品种进行了检测。3个监测点藻类总数分别为896×10<sup>4</sup>、1605×10<sup>4</sup>、5328×10<sup>4</sup>个/L,色球藻占藻类总量的百分比依次为54.69%、87.23%、93.84%,但是3个监测点的2-MIB含量依次为294.7、293.7、299.8ng/L,相差不大,说明色球藻的增殖对臭味虽有贡献,但并不是最主要的,2-MIB的产生可能与其他能产生臭味的藻类品种有关。

近年来,世界各国相继发表了许多有关水体发生异臭和水中藻类增殖有关的研究报告。表2为浮游藻种类以及生物量与异臭异味的关系。

表 2 浮游藻种类以及生物量与异臭异味的关系<sup>[2]</sup>

Tab. 2 Relationship between odor, taste and kinds, biomass of phytoplankton mg·L<sup>-1</sup>

项 目	生物量	
	轻微异臭	严重异臭
颗粒直链藻	0.4~0.9	1.1~22.3
针形藻	3.0~6.2	14.1~34.7
舟形藻	10.0~28.9	—
菱形藻	—	5.2~10.6
栅藻	0.9~2.2	—
蓝球藻	0.1~0.2	0.2~0.7
蓝纤维藻	0.01~0.2	0.3~1.0
颤藻	0.3~0.5	3.3~12.4
席藻	—	0.5~2.5
鱼腥藻	0.3~0.6	—
浮游生物总生物量	12.7~18.1	42.9~94.9

根据表2可初步推断,本次太湖水域2-MIB产生的土霉味主要来源是蓝藻门的颤藻、微囊藻和硅藻门中的直链藻和舟形藻;且蓝藻、绿藻和硅藻总数越大,其藻类代谢产物2-MIB含量也相应较高。

### 2.2 藻类产生的臭味物质去除技术

藻类衍生的次生代谢产物如2-MIB和GSM引起的土霉味已受到广泛关注。这些代谢产物,特别是处于溶解状态时,常规水处理工艺无法对其有效去除。常规水处理工艺可有效地去除IPMP、TCA、IBMP、GSM,但不能有效地将2-MIB去除至其嗅阈值(10ng/L)。

PAC常作为一种辅助手段来去除2-MIB,但是当2-MIB含量较高时,投加粉末活性炭的成本较高。研究表明,臭氧-生物活性炭深度处理工艺可以有效地将2-MIB去除至其嗅阈值(10ng/L),该工艺已被广泛应用于生产中。该技术对2-MIB等臭味物质的去除机理主要为臭氧化学氧化作用、活性炭物理化学吸附作用和微生物的降解作用<sup>[3]</sup>。

某市水司利用该工艺,并结合应急措施(投加粉末活性炭),先后几次成功应对了原水臭味超标事件。

① 2011年4月和2012年2月某厂水源厂先后出现致臭物质超标,主要超标物质为2-MIB和土臭素。在超标期间臭氧投加量为1.2~1.5mg/L,接触时间为6min,臭氧池进出水数据见表3。从表3可以看出,臭氧预氧化能部分去除2-MIB和GSM,去除率在20%左右。

表 3 预臭氧对臭味物质的去除效果对比

Tab. 3 Comparison of ozone effect on removal of odor substances

项 目	臭氧投加量/(mg·L <sup>-1</sup> )	2-MIB			土臭素		
		进水均值/(mg·L <sup>-1</sup> )	出水均值/(mg·L <sup>-1</sup> )	去除率/%	进水均值/(mg·L <sup>-1</sup> )	出水均值/(mg·L <sup>-1</sup> )	去除率/%
2011年4月	1.5	85.76	63.05	26.48	41.21	29.55	28.29
2012年2月	1.2	19.1	15.94	16.54	15.39	12.25	20.4
	1.5	30.3	24.21	20.1	61.99	45.35	26.84

② 2013年8月,某水厂原水中2-MIB浓度上升到314ng/L,根据水质变化,采取预臭氧投加量为1.0~1.5mg/L,后臭氧投加量为0.8~1.0mg/L成功应对。

根据该厂的生产数据,当原水中2-MIB浓度在

70~320 ng/L 范围内,该厂水源厂预处理工艺可去除 70% 左右的臭味物质,净水厂原水中 2-MIB 浓度在 0~85 ng/L 范围内,经臭氧/活性炭深度工艺处理后,出厂水中 2-MIB 无检出;但常规工艺对 2-MIB 基本无去除效果,相反由于胞内致臭物质的释放,滤后水中 2-MIB 含量反而增加。

③ 历年臭味事件处置过程表明预处理、应急处理、常规处理、深度处理对 2-MIB 都有一定的去除效果,其中起主要作用的是臭氧、粉末活性炭与生物活性炭滤池。2012 年—2014 年各流程对臭味物质 2-MIB 的去除效果见表 4。

表 4 2012 年—2014 年工艺各流程对 2-MIB 的去除率

Tab. 4 Removal rate of 2-MIB in process flow between 2012 and 2014 %

项 目	预臭 氧	预臭氧 + 粉末炭	常规	后臭 氧	炭滤 池	全流 程
2012 年	25.68	41.62	-3.27	27.1	21.34	91.92
2013 年	54.72	—	-13.6	43.45	11.09	95.66
2014 年	42.87		56.90			99.77

由表 4 可以看出,2012 年与 2013 年常规处理工艺段对 2-MIB 的去除率为负值,说明水厂常规处理单元中有产生 2-MIB 的可能。查询原因发现,2012 年由于某厂水源厂停氯加炭,致使杀藻效果不明显,使得 2-MIB 的去除率为负值;2013 年检测水样为同一时间段的水样,未考虑水流进入各构筑物的时间差,参考意义有待商榷。2014 年 8 月臭味事件中工艺去除率高于往年同类事件的去除率,除了水温因素外,应该跟原水中竞争性物质少有关系。例如 GSM 与 2-MIB 两者在活性炭上存在着竞争吸附,导致 2012 年对 2-MIB 的去除率较低。

### 3 结论

① 开展小试指导生产,尽量在水处理前道工序削减压力。

② 原水投加粉末炭,在有条件的情况下降低供水负荷,延长吸附时间以提高吸附效果,并与臭

氧—生物活性炭深度处理工艺形成双重水质保障,可以有效应对太湖原水中藻类代谢产物引起的突发性污染水质事件。

③ 适当增加前臭氧和后臭氧投加量,可提高工艺对 2-MIB 的去除效果。

④ 2-MIB 的产生虽然与藻类增殖有关,但更重要的因素在于藻类品种。

⑤ 健全的预处理、常规处理和深度处理工艺进一步保障了水质安全,但并非万无一失,在特殊情况下仍需注重应急处理。

### 参考文献:

- [1] Huang W J, Lai C H, Cheng Y L. Evaluation of extracellular products and mutagenicity in cyanobacteria cultures separated from a eutrophic reservoir [J]. Sci Total Environ 2007, 377(2/3): 214-223.
- [2] 马晓雁. 土臭素和二甲基异冰片的控制技术及其机理研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
- [3] 李勇, 张晓健, 陈超. 我国饮用水中臭味问题及其研究进展[J]. 环境科学, 2009, 30(2): 583-588.



作者简介:焦洁(1978-),女,河北石家庄人,硕士,工程师,主要从事饮用水处理技术研究。

E-mail: jjchery@163.com

收稿日期:2015-12-28