

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.01.010

太湖某饮用水厂臭味物质迁移特征解析

杨舒¹, 吴梦怡¹, 王慕², 高志霖³, 王瑞杰², 王远^{1,2}, 唐玉霖¹

(1. 同济大学污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092; 2. 无锡市政公用环境检测研究院有限公司, 江苏 无锡 214063; 3. 无锡市政公用检测有限公司, 江苏 无锡 214073)

摘要: 针对近年来水源地臭味物质频发、严重威胁饮用水水质安全的问题,对太湖某饮用水厂进行了从原水到出厂水的全流程检测,分析了原水中臭味物质的来源、含量变化及其与水环境因子的相关性,并探究了其在水处理工艺中的去除规律。原水中的主要致嗅物质为 β -紫罗兰酮(β -Ion)、2,4,6-三氯苯甲醚(TCA)、二甲基三硫醚(DMTS)以及 β -环柠檬醛(β -cyc),其主要源于藻类活动以及有机物的降解。DMTS含量与TCA含量呈极显著正相关,且均与氨氮含量呈显著正相关; β -Ion含量与 COD_{Mn} 含量呈显著正相关,并与叶绿素a(Chl-a)含量和 UV_{254} 值呈极显著正相关。在饮用水厂处理工艺中,臭氧和生物预处理对TCA和 β -cyc有一定去除效果;生物活性炭滤池对主要臭味物质具有较好的去除效果;超滤膜过滤可对DMTS与TCA进一步去除。另外,在预处理、原水长距离输送、臭氧处理和清水池储存等过程中均存在臭味物质含量回升的问题,应受到重点关注。

关键词: 饮用水厂; 臭味物质; 环境因子; 水处理工艺

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)01-0057-07

Analysis on Migration Characteristics of Odor and Taste Compounds in a Drinking Water Plant in Taihu Lake

YANG Shu¹, WU Meng-yi¹, WANG Mu², GAO Zhi-lin³, WANG Rui-jie²,
WANG Yuan^{1,2}, TANG Yu-lin¹

(1. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Wuxi Public Utilities Environment Testing Research Institute Co. Ltd., Wuxi 214063, China; 3. Wuxi Public Utilities Testing Co. Ltd., Wuxi 214073, China)

Abstract: In recent years, the frequent occurrence of odor and taste compounds in water sources has seriously threatened the safety of drinking water quality. A drinking water plant in Taihu Lake was monitored from the raw water to the treated water. The source, content and correlation with water environmental factors of taste and odor compounds in raw water were analyzed, and their removal rules in the water treatment process were explored. The main odor and taste compounds in the raw water were β -Ion, TCA, DMTS, and β -cyc, which mainly originated from algae activity and organic matter degradation. The content of DMTS was significantly positively correlated with that of TCA, and they were both significantly positively correlated with $\text{NH}_3 - \text{N}$ content. The content of β -Ion was significantly

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(21776224); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07201-002)
通信作者: 唐玉霖 E-mail: tangtongji@126.com

positively correlated with COD_{Mn} content, and extremely significantly positively correlated with the Chl-a content and UV_{254} . In the drinking water treatment process, ozone and biological pretreatment only had a certain removal effect on TCA and $\beta\text{-cyc}$. The biological activated carbon filter had a good effect on removing the main odor and taste compounds. Ultrafiltration membrane filtration could further remove DMTS and TCA. In addition, the content of odor and taste compounds increased in the process of pretreatment, raw water long-distance transportation, ozonation and clean water storage, which should be paid more attention to.

Key words: drinking water plant; odor and taste compounds; environmental factor; water treatment process

随着生活水平的提升,居民对饮用水水质的要求越来越高,其中嗅味等感官指标直接影响着居民对饮用水品质的评价。近年来随着水环境的恶化,嗅味物质频繁暴发于水源地水体,影响饮用水厂的处理工艺,甚至进入供水管网,严重威胁饮用水水质及供水安全^[1-2]。为进一步提升饮用水水质,上海市、深圳市和江苏省均在《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)的基础上出台了各自的地方水质标准,一方面增加水质指标,另一方面提高指标限值标准。其中,两种典型嗅味物质 2-甲基异莰醇(2-MIB)和土臭素(GSM)被列入地方水质检测指标,限值为 10 ng/L ^[3-4]。原水中嗅味物质种类繁多,主要包括土霉味的 2-MIB、GSM 和 2,4,6-三氯苯甲醚(TCA),腐败蔬菜味的二甲基三硫醚(DMTS),植物腐烂气味和植物气味的 2-异丙基-3-甲氧基吡嗪(IPMP)、2-异丁基-3-甲氧基吡嗪(IBMP),芳香味的 β -紫罗兰酮(β -Ion),以及烟草味的 β -环柠檬醛(β -cyc)等^[5-6]。以上嗅味物质在我国各饮用水源地中较为常见,其来源与控制受到广泛关注^[7-9]。

针对嗅味物质的来源已有较多研究,可以概括为藻类代谢产物、细菌或真菌代谢产物以及有机物的降解产物等。典型的 2-MIB、GSM 是颤藻、假鱼腥藻、鱼腥藻等藻类和某些放线菌的代谢产物。 β -cyc 的产生主要与栅藻和铜绿微囊藻等有关,而 β -Ion 主要产生于栅藻及鱼腥藻^[5,10]。DMTS 则是藻源性有机物的厌氧分解产物,如 2007 年无锡市自来水危机中的致嗅物即为以 DMTS 为主的硫醚类嗅味物质^[11]。TCA 可由多种真菌分解木质素或细菌、藻类对水体中经常被检测到的 2,4,6-三氯酚(TCP)的邻甲基化作用而形成^[12-13]。另外,IBMP 是由厌氧条件下微生物对有机物的降解过程中形

成,IPMP 的产生也与放线菌等微生物有关^[7,14-15]。以上研究多集中于某一嗅味物质与分离藻类或细菌等的关系^[13,16],缺乏与实际原水水质情况结合。原水中嗅味物质种类繁多,不同水源地水质情况各不相同,因此建立嗅味物质与原水中各项水环境因子之间的相关性分析,可对嗅味物质的追踪溯源以及预测防控提供技术支撑。与此同时,当原水中嗅味物质含量较高时,对后续饮用水处理工艺会造成不利影响。目前,针对饮用水嗅味物质的去除研究主要停留在实验室阶段或是单一水处理工艺的效果研究方面^[17-18],关于饮用水厂全流程嗅味物质去除效果的系统性研究尚不充分。鉴于此,笔者以太湖某饮用水厂为研究对象,结合原水及饮用水厂全流程工艺对嗅味物质 DMTS、IPMP、IBMP、TCA、2-MIB、GSM、 β -cyc 和 β -Ion 等进行全面检测。分析了原水中主要嗅味物质来源、含量变化及其与水环境因子的相关性,并探究饮用水厂各处理工艺对主要嗅味物质的去除效果,以期为水源地主要嗅味物质的溯源与预测,以及饮用水厂针对嗅味物质的处理工艺的选择提供重要指导。

1 材料与方法

1.1 样品采集

太湖某原水经预处理水厂 A 处理后,由长距离管道输送至水厂 B 进行常规及深度处理。水厂 A 采用臭氧预处理和生物预处理工艺,预臭氧投加量为 $0.6 \sim 0.8 \text{ mg/L}$ 。水厂 B 的处理工艺为混凝沉淀、砂滤、臭氧接触氧化、生物活性炭以及超滤,出厂水前投加液氯消毒,其中混凝剂采用硫酸铝、投加量为 $20 \sim 25 \text{ mg/L}$,后臭氧投加量为 $1.0 \sim 1.5 \text{ mg/L}$ 。本研究每月定期在取水口附近采集水面以下 0.5 m 处水样,并按图 1 所示在预处理水厂 A 及水厂 B 的各处理工艺出水采样点采集水样,其中,Y1、Y2、Y3、

Y4 分别代表原水、预臭氧接触池出水、预生物反应池出水、预处理出水, C1、C2、C3 分别代表水厂 B 进水、混凝沉淀池出水、砂滤池出水, S1、S2、S3 及 Z1 分别代表臭氧接触池出水、生物活性炭滤池出水、超滤膜车间出水、出厂水。将水样装入样品瓶(不留顶空)后,迅速转移至实验室,于 24 h 内完成所有项目的检测分析。

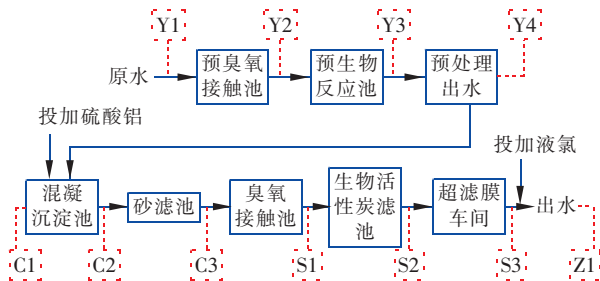


图 1 预处理水厂 A 和水厂 B 的工艺流程及采样点分布

Fig. 1 Treatment processes and sampling points of water pretreatment plant A and water treatment plant B

1.2 样品检测及数据分析

检测嗅味物质所用标准品 (Sigma) 用甲醇 (色谱级, Adamas) 配制成 10 $\mu\text{g/L}$ 的溶液, 用于标准曲线的绘制。采用气相色谱 - 质谱联用仪 (Varian450GC - 300MS) 测定嗅味物质, 色谱柱型号为 DB - 5MS, 规格为 30 cm \times 0.25 mm \times 0.25 μm 。首先, 采用萃取纤维 (50/30 μm DVB/CAR/PDMS) 对顶空瓶内含 30% 氯化钠的水样进行 15 min 顶空固相微萃取, 萃取温度为 60 $^{\circ}\text{C}$ 。萃取完的纤维头插入 GC 进样口解吸 3 min 以后进行分析, 解吸温度为 250 $^{\circ}\text{C}$ 。具体分析条件如下: GC 使用高纯氮气 (99.999%) 作为载气, 载气流速为 1.00 mL/min, 不分流进样, 柱温初始 60 $^{\circ}\text{C}$ 保持 1 min, 以 15 $^{\circ}\text{C/min}$ 升至 180 $^{\circ}\text{C}$, 再以 40 $^{\circ}\text{C/min}$ 升至 250 $^{\circ}\text{C}$ 保持 1 min。质谱为电子轰击源 (EI), 电子能量为 70 eV, 离子源温度为 230 $^{\circ}\text{C}$ [19]。参照《水和废水监测分析方法》测定常规水质指标, 主要包括 TN、TP、 COD_{Mn} 、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、叶绿素 a (Chl - a)。同时水样经 0.45 μm 玻璃纤维滤膜过滤后采用紫外可见分光光度计测定 UV_{254} 。采用 Microsoft Excel 和 SPSS 22.0 软件对数据进行分析。

2 结果与分析

2.1 原水中水环境因子变化规律

原水的 TN 含量范围为 0.69 ~ 2.65 mg/L, 夏季

含量较高, 在 7 月出现最大值, 年平均值为 1.58 mg/L, 低于地表水 V 类水体 TN 限值 (2.0 mg/L); $\text{NH}_3 - \text{N}$ 含量范围为 0.05 ~ 0.17 mg/L, 秋季含量较高, 在 9 月出现最高值, 年平均值为 0.09 mg/L, 低于地表水 I 类水体的氨氮限值 (0.15 mg/L); TP 含量范围为 0.06 ~ 0.54 mg/L, 在 3 月和 10 月出现明显峰值, 分别为 0.31、0.54 mg/L, 年平均值为 0.18 mg/L, 低于地表水 V 类水体的 TP 限值 (0.2 mg/L), 是影响原水水质的主要因素; COD_{Mn} 含量范围为 1.50 ~ 8.62 mg/L, 冬季含量最低, 在 7 月、10 月出现峰值, 分别为 8.62、7.49 mg/L, 年平均值为 4.56 mg/L, 低于地表水 III 类水体的 COD_{Mn} 限值 (6.0 mg/L); UV_{254} 和 Chl - a 的变化趋势均为夏、秋季含量高, 在 7 月出现最高值, 分别为 0.15 cm^{-1} 、95.02 $\mu\text{g/L}$ 。以上常规指标中, UV_{254} 的变化趋势与 Chl - a 含量变化非常一致, 表明原水中的藻类活动可能是溶解性有机物的主要来源, 原水水质与藻类生长繁殖密切相关。

2.2 原水中嗅味物质变化规律

原水中各嗅味物质含量的年平均值及其嗅阈值如表 1 所示 [5-6, 20-21]。原水中的主要致嗅物质为 $\beta - \text{Ion}$ 、 $\beta - \text{cyc}$ 、TCA 和 DMTS, 其年平均含量均超出了嗅阈值。其他几种嗅味物质含量较低, 年平均均未超出嗅阈值。这 4 种主要嗅味物质的含量变化规律如图 2 所示。 $\beta - \text{Ion}$ 含量在夏季较高, 在 7 月达到峰值 386.3 ng/L; $\beta - \text{cyc}$ 含量在 10 月达到最大值 17.4 $\mu\text{g/L}$, 其余月份在 0.03 ~ 1.9 $\mu\text{g/L}$ 之间波动; TCA 含量在全年出现多个峰值, 四季均有分布, 在 9 月达到最大值 232.0 ng/L; DMTS 含量在夏季较高, 在 6 月、9 月分别达到峰值 110.8、145.9 ng/L。

表 1 原水中嗅味物质含量均值及其嗅阈值

Tab. 1 Annual means and threshold value of odor and taste compounds in raw water

项 目	年平均值	嗅阈值 (OTC)
DMTS/(ng \cdot L $^{-1}$)	25.9	10
IBMP/(ng \cdot L $^{-1}$)	8.5	2 ~ 16
IPMP/(ng \cdot L $^{-1}$)	2.8	20
TCA/(ng \cdot L $^{-1}$)	47.5	10
2 - MIB/(ng \cdot L $^{-1}$)	< 1	9 ~ 42
GSM/(ng \cdot L $^{-1}$)	2.4	4 ~ 10
$\beta - \text{cyc}$ /($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	2.2	0.5 ~ 1
$\beta - \text{Ion}$ /(ng \cdot L $^{-1}$)	91.4	7

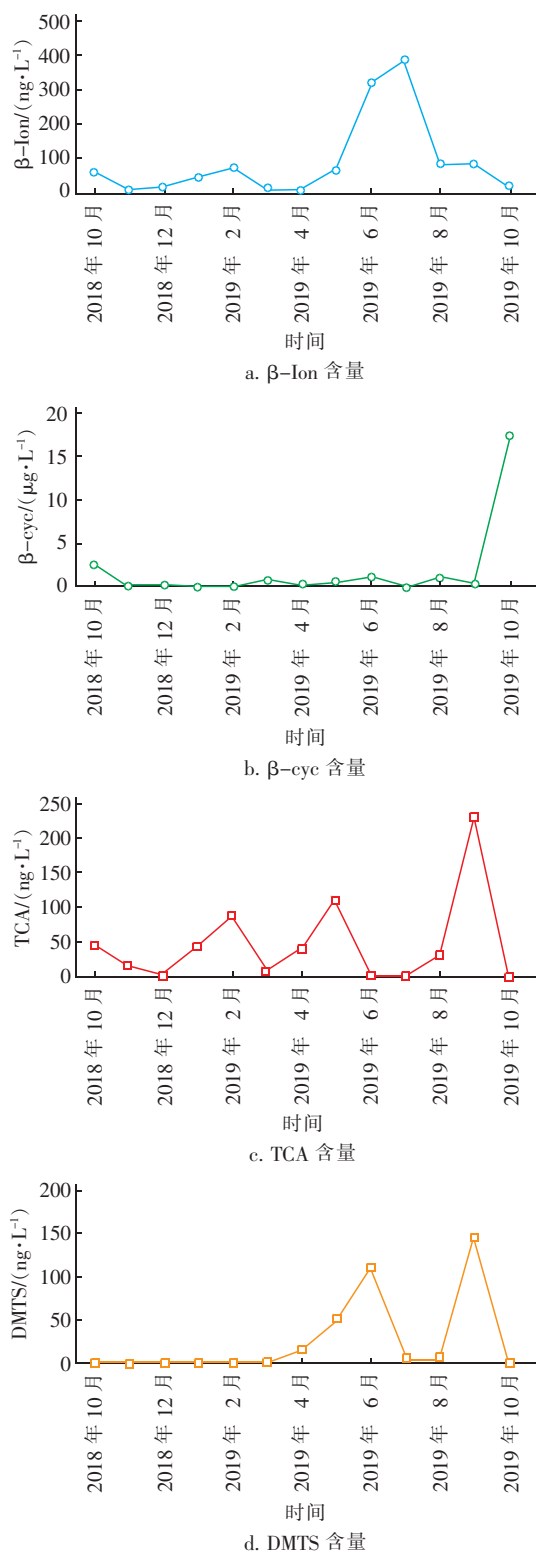


图2 原水中嗅味物质含量变化

Fig. 2 Change of odor and taste compounds concentration in raw water

2.3 原水中嗅味物质与水环境因子的相关性

原水中主要嗅味物质与水环境因子,以及各嗅

味物质之间的相关性分析结果如表2和表3所示。DMTS含量与TCA含量呈极显著正相关($P < 0.01$),且均与 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 含量呈显著正相关($P < 0.05$),这可能是因为DMTS和TCA的产生均与微生物对有机物的降解有关,而微生物分解有机物的过程中,往往也会伴随着氨氮的升高。原水中的 $\beta - \text{Ion}$ 含量与 COD_{Mn} 含量呈显著正相关($P < 0.05$),并与 $\text{Chl} - \text{a}$ 和 UV_{254} 值呈极显著正相关($P < 0.01$),这可能是因为 $\beta - \text{Ion}$ 可由颤藻和鱼腥藻等浮游藻类产生,而藻类的大量生长也会造成水体中有机物含量的上升。以上表明,原水中主要嗅味物质与藻类的活动以及有机物的降解有关。

表2 原水中嗅味物质与水环境因子之间的相关关系

Tab. 2 Correlation between odor and taste compounds and water quality variables in raw water

项目	$\beta - \text{Ion}$	$\beta - \text{cyc}$	TCA	DMTS
TN	0.256	-0.37	-0.257	-0.384
TP	-0.173	-0.034	0.045	-0.246
COD_{Mn}	0.588 *	0.362	-0.373	-0.136
$\text{NH}_3 - \text{N}$	0.012	-0.224	0.547 *	0.537 *
$\text{Chl} - \text{a}$	0.765 **	-0.116	0.203	0.309
UV_{254}	0.744 **	-0.204	0.01	0.026

注: “*”表示 $P < 0.05$, “**”表示 $P < 0.01$,下同。

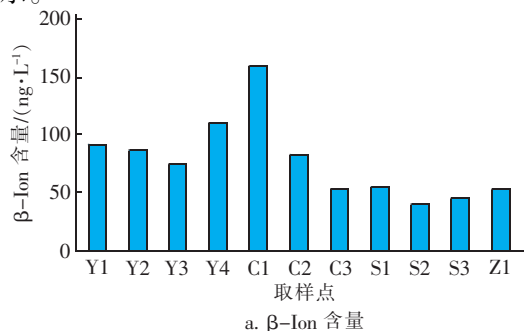
表3 原水中嗅味物质之间的相关关系

Tab. 3 Correlation between odor and taste compounds in raw water

项目	$\beta - \text{Ion}$	$\beta - \text{cyc}$	TCA	DMTS
$\beta - \text{Ion}$	1	-0.182	-0.161	0.32
$\beta - \text{cyc}$		1	-0.231	-0.178
TCA			1	0.659 **
DMTS				1

2.4 饮用水厂中嗅味物质的变化规律

在该饮用水厂处理工艺流程中,各处理单元出水中主要嗅味物质含量的年平均值变化情况如图3所示。



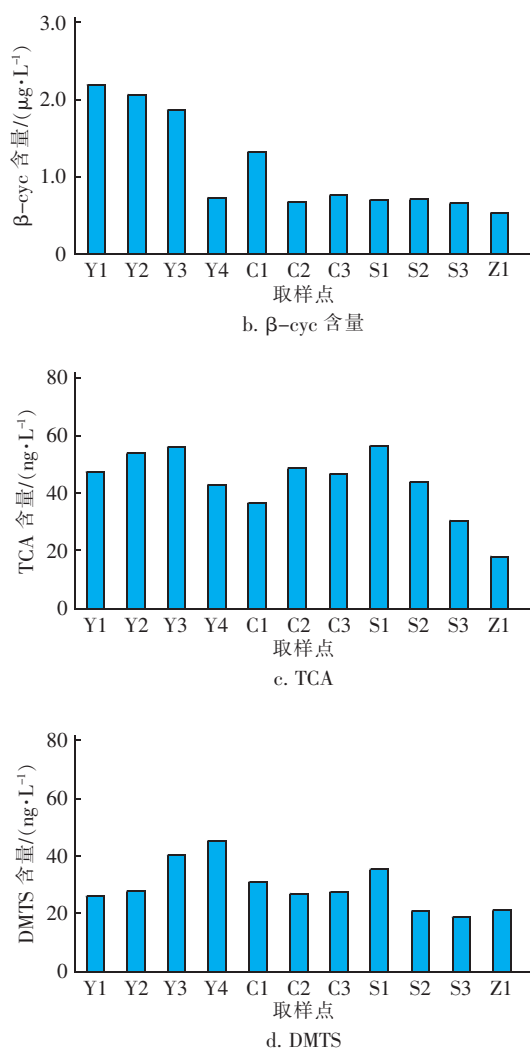


图3 水处理工艺全流程中嗅味物质年平均含量变化

Fig. 3 Change of annual concentrations of odor and taste compounds in water treatment process

从图3可以看出,DMTS与TCA的去除规律较为一致。预处理工艺(Y1~Y4)对TCA和 β -cyc有一定的去除效果,但会使得 β -Ion与DMTS含量升高,可能是因为臭氧预处理破坏了藻细胞结构完整性并释放了胞内嗅味物质。预处理水厂A出水经管道运输进入水厂B后(Y4~C1),水中DMTS和TCA的含量均有一定下降,这是因为在输送过程中,泵站提升及沿途跌水产生了一定的曝气效果,而曝气可通过增加水中溶解氧量氧化分解部分嗅味物质^[22]。同时, β -Ion与 β -cyc的含量反而会上升,可能是由于长距离管道输送过程中,藻类和细菌滋生并生成了这几种嗅味物质。常规处理工艺中的混凝沉淀及砂滤对DMTS、 β -cyc以及 β -Ion均有一

定的去除效果,但TCA含量会有部分上升,这表明常规处理工艺对这几种嗅味物质的去除效果一般,这几种嗅味物质的分子质量在120~220 u之间,属于小分子物质,因此难以被混凝沉淀工艺有效去除^[21]。在深度处理工艺中,臭氧接触池出水中的 β -cyc含量下降,但其余几种嗅味物质含量上升,这可能是因为臭氧的氧化作用使得藻细胞或菌细胞破裂,释放出内部的嗅味物质。生物活性炭滤池对这4种嗅味物质均具有良好的去除效果。超滤膜过滤可进一步去除水中的 β -cyc、DMTS和TCA。经消毒处理后的出厂水中,TCA和 β -cyc含量进一步下降,而其他嗅味物质的含量上升,这可能是因为清水池中水体停留时间较长,部分微生物重新繁殖并释放嗅味物质。最终出厂水中 β -Ion、 β -cyc、TCA、DMTS的年平均含量分别为51.6 ng/L、0.5 μg/L、18.7 ng/L、21.1 ng/L,去除率分别为43.47%、75.63%、60.69%和18.69%,饮用水厂全流程工艺可将 β -cyc的含量成功降至嗅阈值以下,但对DMTS、TCA和 β -Ion的去除效果有待提高。

3 结论

① 原水中主要致嗅物质为 β -Ion、 β -cyc、TCA及DMTS。其中, β -Ion含量在夏季较高,7月时达到峰值386.3 ng/L; β -cyc含量在10月达到最大值17.4 μg/L,其余月份在0.03~1.9 μg/L之间波动;TCA含量全年内出现多个峰值,四季均有分布,在9月达到最大值232.0 ng/L;DMTS含量在夏季较高,9月达到最大值145.9 ng/L。

② DMTS含量与TCA含量呈极显著正相关($P < 0.01$),而且均与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量呈显著正相关($P < 0.05$); β -Ion含量主要与藻类指标Chl-a含量以及有机物指标 COD_{Mn} 、 UV_{254} 值具有显著的正相关关系。原水中的主要嗅味物质与藻类的活动以及有机物的降解有关。

③ 预臭氧及生物预处理对TCA和 β -cyc有一定的去除效果;常规处理工艺的除嗅效果一般;生物活性炭滤池对主要嗅味物质均具有较好的去除效果;超滤膜过滤和消毒对 β -cyc和TCA有进一步的去除作用。总的来说,预处理水厂A及水厂B对 β -cyc的控制效果较好,对DMTS、TCA和 β -Ion的控制效果不理想。在预处理阶段、长距离输送管段、臭氧接触池及清水池中均存在部分嗅味物质的含量回升问题,应受到重点关注。

参考文献:

- [1] 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).
- [2] 徐振秋,徐恒省. 太湖饮用水源地主要臭味物质污染现状及其防治对策研究[J]. 污染防治技术,2017,30(2):80-82.
XU Zhenqiu, XU Hengsheng. Study on the odor materials pollution and the control countermeasures of drinking water source in Taihu Lake [J]. Pollution Control Technology, 2017, 30(2): 80-82 (in Chinese).
- [3] 陈国光. 上海市《生活饮用水水质标准》制定及实施步骤与措施[J]. 给水排水,2019,45(5):25-30.
CHEN Guoguang. Formulation and implement of standard for drinking water quality in Shanghai City [J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 45(5): 25-30 (in Chinese).
- [4] 林国峰. 《江苏省城市自来水厂关键水质指标控制标准》解读[J]. 净水技术,2020,39(4):1-5.
LIN Guofeng. Interpretation of the control standards of the key water quality parameters for urban water treatment plants in Jiangsu Province [J]. Water Purification Technology, 2020, 39(4): 1-5 (in Chinese).
- [5] LEE J, RAI P K, JEON Y J, *et al.* The role of algae and cyanobacteria in the production and release of odorants in water [J]. Environmental Pollution, 2017, 227: 252-262.
- [6] LI L, WAN N, GAN N Q, *et al.* Annual dynamics and origins of the odorous compounds in the pilot experimental area of Lake Dianchi, China [J]. Water Science & Technology, 2007, 55(5): 43-50.
- [7] 卢信,刘成,尹洪斌,等. 生源性湖泛水体主要含硫致臭物及其产生机制[J]. 湖泊科学,2015,27(4):583-590.
LU Xin, LIU Cheng, YIN Hongbin, *et al.* The main sulfur-containing odorous compounds and their forming mechanisms in waters during bio-induced black bloom [J]. Journal of Lake Sciences, 2015, 27(4): 583-590 (in Chinese).
- [8] 刘祖发,陈记臣,卓文珊,等. 中山市河涌水体臭味物质分布及其去除研究[J]. 生态环境学报,2018,27(9):1724-1731.
LIU Zufa, CHEN Jichen, ZHUO Wenshan, *et al.* Distribution and removal of odor and taste compounds in the sewage streams of Zhongshan City [J]. Ecology and Environment Sciences, 2018, 27(9): 1724-1731 (in Chinese).
- [9] 陈锡超,罗茜,宋翰文,等. 北京官厅水库特征污染物筛查及其健康风险评估[J]. 生态毒理学报,2013,8(6):981-992.
CHEN Xichao, LUO Qian, SONG Hanwen, *et al.* Screening of priority contaminants and health risk assessment in Beijing Guanting Reservoir [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2013, 8(6): 981-992 (in Chinese).
- [10] ZAITLIN B, WATSON S B. Actinomycetes in relation to taste and odour in drinking water: myths, tenets and truths [J]. Water Research, 2006, 40(9): 1741-1753.
- [11] 于建伟,李宗来,曹楠,等. 无锡市饮用水臭味突发事件致臭原因及潜在问题分析[J]. 环境科学学报,2007,27(11):1771-1777.
YU Jianwei, LI Zonglai, CAO Nan, *et al.* Analyses on cause for odor and potential problems in water source during odor episode event in Wuxi [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2007, 27(11): 1771-1777 (in Chinese).
- [12] SIMPSON R F, SEFTON M A. Origin and fate of 2,4,6-trichloroanisole in cork bark and wine corks [J]. Australian Journal of Grape and Wine Research, 2007, 13(2): 106-116.
- [13] ZHANG K J, LUO Z, ZHANG T Q, *et al.* Study on formation of 2,4,6-trichloroanisole by microbial *O*-methylation of 2,4,6-trichlorophenol in lake water [J]. Environmental Pollution, 2016, 219: 228-234.
- [14] PETER A, KOESTER O, SCHILDKNECHT A, *et al.* Occurrence of dissolved and particle-bound taste and odor compounds in Swiss lake waters [J]. Water Research, 2009, 43(8): 2191-2200.
- [15] KHIARI D, BARRETT S E, SUFFET I H. Sensory GC analysis of decaying vegetation and septic odors [J]. Journal AWWA, 1997, 89(4): 150-161.
- [16] 马晓雁,高乃云,李青松,等. 上海市饮用水中痕量土臭素和二甲基异冰片年变化规律及来源研究[J]. 环境科学,2008,29(4):902-908.
MA Xiaoyan, GAO Naiyun, LI Qingsong, *et al.* Source and fluctuation of trace geosmin and 2-MIB in drinking water of Shanghai [J]. Environmental Science, 2008, 29

- (4):902-908(in Chinese).
- [17] ZHU H H, JIA R B, SUN S H, *et al.* Elimination of trichloroanisoles by UV/H₂O₂: kinetics, degradation mechanism, water matrix effects and toxicity assessment [J]. *Chemosphere*, 2019, 230:258-267.
- [18] LI L, ZHANG W, ZHANG Y, *et al.* Sulfate radical-based technology for the removal of 2-methylisoborneol and 2-methylisoborneol-producing algae in drinking water sources[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 356: 43-52.
- [19] 孙静,王锐,尹大强. 顶空固相微萃取-气质联用法同时测定城市水源水中的九种嗅味物质[J]. *环境化学*, 2016, 35(2):280-286.
SUN Jing, WANG Rui, YIN Daqiang. Simultaneous determination of nine taste and odor compounds in source water of Chinese cities by headspace solid phase micro-extraction combined with gas chromatography-mass spectrometry [J]. *Environmental Chemistry*, 2016, 35 (2):280-286 (in Chinese).
- [20] CHEN J, XIE P, MA Z, *et al.* A systematic study on spatial and seasonal patterns of eight taste and odor compounds with relation to various biotic and abiotic parameters in Gonghu Bay of Lake Taihu, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, 409(2):314-325.
- [21] PARK N, LEE Y, LEE S, *et al.* Removal of taste and odor model compound (2,4,6-trichloroanisole) by tight ultrafiltration membranes [J]. *Desalination*, 2007, 212 (1/2/3):28-36.
- [22] 刘海洪,李先宁,宋海亮. 浅水湖泊防控黑臭水体复氧技术[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2015, 45 (3):526-530.
LIU Haihong, LI Xianning, SONG Hailiang. Re-oxygenation technology for prevention and control of black water in shallow lakes [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2015, 45 (3): 526-530(in Chinese).

作者简介:杨舒(1997-),女,河南信阳人,硕士研究生,研究方向为水处理理论与技术。

E-mail:1832832@tongji.edu.cn

收稿日期:2020-07-03

修回日期:2020-08-11

(编辑:刘贵春)

(上接第56页)

- Journal AWWA, 2006, 98(4):133-146.
- [11] HOWE K J, MARWA A, CHIO K P, *et al.* Effect of coagulation on the size of MF and UF membrane foulants [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40 (24):7908-7913.
- [12] JUNG C W, SON H J, KANG L S. Effects of membrane material and pretreatment coagulation on membrane fouling: fouling mechanism and NOM removal [J]. *Desalination*, 2006, 197(1/2/3):154-164.
- [13] ARNAL J M, GARCIA-FAYOS B, SANCHEZ M, *et al.* Ultrafiltration membrane cleaning with different chemical solutions after treating surface water [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2009, 7(1/2/3):198-205.
- [14] WANG D, SUN W, XU Y, *et al.* Speciation stability of inorganic polymer flocculant-PACl [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2004, 243(1/2/3):1-10.
- [15] 冯瑞齐. 铝铁混凝剂对混凝-超滤联用工艺膜污染的影响研究[D]. 济南:山东大学, 2016.
- FENG Ruiqi. Effect of Al-Fe Based Coagulants on Membrane Fouling in Coagulation-Ultrafiltration Hybrid Process [D]. Jinan: Shandong University, 2016 (in Chinese).
- [16] 王振北. 基于铝形态影响分析的混凝超滤过程膜污染控制机制研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2018.
WANG Zhenbei. Study on Control Mechanism of Membrane Fouling during Coagulation/Ultrafiltration Process Based on Effect of Aluminum Species [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018 (in Chinese).

作者简介:郑利祥(1982-),男,浙江绍兴人,硕士,副研究员,主要从事矿井水处理技术研究。

E-mail:zhenglx117@126.com

收稿日期:2020-07-09

修回日期:2020-07-27

(编辑:孔红春)