

水源水库致嗅类挥发性有机硫化物 时空变化特性

于 杨 黄廷林* 史建超 文 刚
(西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055)

摘 要 为研究山东周村水库水体中致嗅类挥发性有机硫化物(VOSC)的时间空间变化趋势,通过吹扫捕集-气相色谱质谱连用法(P&T/GC-MS)检测分析确定水库水体中典型的VOSC,并在7—12月对水库进行连续监测,同时结合温度、溶解氧水平、氧化还原电位、硫酸根浓度和硫化物浓度分析该物质含量随时间和空间的变化特性。结果表明,周村水库中较典型的VOSC为乙硫醇,二甲基三硫醚,这2种物质浓度随温度变化明显,温度越高,水中含量越大,具有较强季节性。二者浓度随着水深增加而增大,其中溶解氧含量为主要影响因素,强还原态环境对硫醚硫醇的释放也有一定促进作用。通过水库原位围隔曝气实验证明,向水中曝气充氧能有效降低水库水体中乙硫醇和二甲基三硫醚的含量,曝气量为 $15\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 时连续运行72 h的去除率分别为90%和80%以上。

关键词 水源水库;挥发性有机硫化物;P&T/GC-MS;乙硫醇;二甲基三硫醚;扬水曝气

中图分类号 X524 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2016)10-5709-06 DOI 10.12030/j.cjee.201505066

Spatiotemporal distribution of odorous volatile organic sulfide compounds in source water reservoir

YU Yang HUANG Tinglin* SHI Jianchao WEN Gang

(School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract To clarify the spatiotemporal distribution of odorous volatile organic sulfide compounds (VOSC) in the Zhoucun reservoir of Shandong province, a method of purge and trap coupled with gas chromatography-mass spectrometry was developed and applied to detect continuously the typical species of VOSC in the reservoir water samples from July to December. In addition, the corresponding temperature, dissolved oxygen concentration, oxidation-reduction potential, and concentrations of sulfate and sulfide were recorded. The results indicated that the VOSC in Zhoucun reservoir mainly consisted of ethyl mercaptan and dimethyl trisulfide. The concentrations of these two compounds changed significantly with temperature, with higher temperature leading to higher content. Both compounds increased with increased water depth. The amount of dissolved oxygen was responsible for this trend, as a strong reduction state promotes the release of VOSC. The experiment showed that a water-lifting aerator dramatically reduced ethyl mercaptan and dimethyl trisulfide concentrations. With an aeration rate of $15\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ and continuous operation for 72 hours, the removal efficiencies of ethyl mercaptan and dimethyl trisulfide were higher than 90% and 80%, respectively.

Key words source water reservoir; volatile organic sulfur compounds; P&T/GC-MS; ethyl mercaptan; dimethyl trisulfide; water-lifting aerator

挥发性有机硫化物(volatile organic sulfur compounds, VOSC)是一类典型的恶臭物质,因其具有刺激性的恶臭气味和极低的嗅阈值而受到广泛关

注^[1-2]。我国的水污染比发达国家严重,水中致臭物质的组成要复杂得多。除了常见的Geosmin, 2-甲基异冰片和 β -柠檬醛外,随径流进入江河湖库的污

基金项目:国家科技支撑计划课题(2012BAC04B02)

收稿日期:2015-05-11; 修订日期:2015-06-23

作者简介:于杨(1991—),女,硕士研究生,研究方向:水库水体中挥发性有机硫化物的释放规律与去除。E-mail:zhoucunr@163.com

* 通讯联系人, E-mail: huangtinglin@xauat.edu.cn

染物和厌氧分解产物中的挥发性有机硫化物,如硫醇、硫醚类物质也非常普遍^[3]。在我国,硫醇、硫醚类致嗅物于2006年首次在东莞饮用水中发现,后被证明也是太湖水危机中的主要致嗅物质^[2]。硫醇、硫醚类致嗅物质对人体的中枢神经系统有不同程度的毒害作用,且水厂的常规水处理工艺很难去除,污染源后会导致自来水恶臭^[4];因此,对水源水库中硫醇硫醚类物质的浓度监测很有必要。

周村水库位于山东枣庄市孟庄镇周村南,淮河流域运河水系西泔河上游,控制流域面积121 km²,总库容8 404万 m³,下游有66.7 km²耕地和5 200户居民,相距仅10 km处就是同在一条中运河流上的会宝岭大型水库。周村水库对下游城乡居民及工农业生产具有十分重要的作用;然而前几年兴起的库区网箱养殖活动与上游周边居民的规模化家禽养殖活动,造成库区水体严重污染导致该水库水长期散发恶臭^[5]。作为附近较大范围饮用和生产水源,这极大影响周边地区供水的水质和感官。本研究通过仪器定量分析水库水中主要硫醇硫醚类物质含量及时间空间变化特性,以水库原位围隔曝气实验为依据,为将来周村水库恶臭整治技术的开发与选择提供技术支撑。

1 实验部分

1.1 水样的采集及其特性

由于周村水库整体恶臭现象严重,故在水库坝前主库区选取3个代表性采样点(如图1所示),3个采样点平均水深15 m,每个采样点分别于水深0.5、5、7.5、10和13 m处采集水样测定并取其平均值。采样时间为2014年7—12月。水样用已清洗过的取水器采集后置于250 mL的棕色玻璃采样瓶中,采样瓶使用前用氮气冲洗除去瓶内空气,采集时使水样充满整个棕色采样瓶且瓶中不留气泡,采样后用封口瓶盖塞紧并在瓶口处以封口膜缠紧,样品运输过程中需将样品置于装有冰块的保温箱中,采集的水样在48 h内完成测定。

采样点所取水样均呈无色透明状态,散发不同程度的烂圆白菜味。不同水深处水样基本理化性质:pH 7.06~9.75,电导率324~447 $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$, COD_{Mn} 为3.79~5.56 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,浊度则在1.1~4.7 NTU变化。

1.2 水样的检测分析

本实验采用吹扫捕集-气质联用法(P&T/GC-



图1 采样点位置

Fig. 1 Location of sample sites

MS),总结前人对水中VOSC含量的检测方法^[6-12],对其中参数加以优化使出峰情况达到最佳,并对水样进行测定。所用仪器为Agilent 7890A/5975C气相色谱-质谱联用仪,配有Tekmar 3100型吹扫-捕集浓缩器;HP-5MS毛细管色谱柱(30 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.25 μm)。药剂标准品均购于美国Sigma公司。

吹扫条件:吹扫时间11 min,吹扫温度40 $^{\circ}\text{C}$,吹扫流速40 $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$;热解吸温度250 $^{\circ}\text{C}$,解吸流速300 $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$,解吸时间2 min;解吸后捕集阱在260 $^{\circ}\text{C}$ 下焙烤10 min。吹扫气为高纯氮气。

色谱条件:起始温度为30 $^{\circ}\text{C}$,保持5 min,5 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 升温至120 $^{\circ}\text{C}$,保持1 min;进样口温度为200 $^{\circ}\text{C}$,分流进样,分流比为10:1。载气为高纯氦气,流量为1 $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

质谱条件:电离方式为电子轰击(EI),70 eV;质谱扫描范围为30~300 amu;传输线温度为280 $^{\circ}\text{C}$,离子源温度为230 $^{\circ}\text{C}$,四极杆温度为150 $^{\circ}\text{C}$;溶剂延迟1 min。

待测的水样中加入8 g氯化钠(600 $^{\circ}\text{C}$ 下烘烤6 h),充分溶解后注入40 mL吹扫管中按上述条件进行测定。

此外,水样中硫酸根含量的测定采用铬酸钡光度法,硫化物含量的测定采用对氨基二甲基苯胺光度法^[13]。

1.3 水库原位围隔曝气实验

在水库中选取一处安装围隔曝气装置,该装置为直径1 m,高低14 m的圆筒,底部与直径1 m的钢管固定并插入底泥,水面设置浮体,使整个围隔装置直立于水中。向围隔内部连续不间断曝气,曝气流量为15 $\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$ 。分别于曝气前后测定水中致嗅物质含量。

2 结果与讨论

2.1 挥发性有机硫化物定性分析

经过对 7 月份采集水样进行检测,所得 3 个采样点不同水深的水样色谱图相近,如图 2 所示,说明水库中所含硫醚硫醇普遍一致。根据检测分析,结果表明水样中典型的嗅味物质主要包括乙硫醇,二甲基三硫醚。这类物质主要由生物降解产生:微生物在厌氧环境下分解含硫氨基酸(如蛋氨酸,半胱氨酸)和死亡生物体(如藻类死亡后形成的积聚物),或者还原硫酸盐和其他无机多硫化合物;人为排放的污染物或其他含硫有机物的非生物降解也会生成硫醚硫醇^[14]。这些大分子的挥发性硫化物具有强烈恶臭,一般在 $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 含量水平即可明显嗅出,是水中典型的嗅味物质。

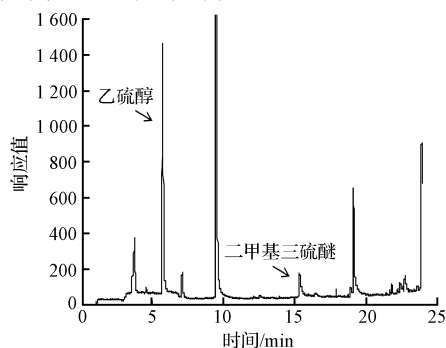


图 2 7 月份典型水样色谱图

Fig. 2 Gas chromatogram obtained from water samples in July

2.2 挥发性有机硫化物定量分析

2.2.1 挥发性有机硫化物含量随时间的变化

通过多次对分析条件的优化,使出峰情况达到最佳,并根据外标法对所采水样中主要致嗅物质乙硫醇,二甲基三硫醚的含量进行了计算并取其平均值,结果见图 3。根据图 3 数据显示,夏季水体致嗅含硫有机物污染严重,7 月份水中硫醇硫醚含量相对较低,但仍处于严重超标的范围,到 8 月份乙硫醇和二甲基三硫醚含量均大幅升高,达到峰值,9 月份二者浓度缓慢降低,到 10 月份回落至与 7 月份大致相同水平,而 11 月与 12 月份硫醇硫醚含量降到最低,较浅水深处水样甚至没有检测出二甲基三硫醚,水样气味也不再强烈刺鼻。

上述变化表明,温度是影响水中硫醇硫醚含量的重要因素。随着天气变得炎热,水体总体温度也明显升高,水温的上升加剧了沉积物间隙水与上覆水的物质交换,使得大量的有机污染物从沉积物中释放出来^[15],同时厌氧微生物繁殖代谢活动变得愈加频繁。结合硫醇硫醚产生原因分析,周村水库流

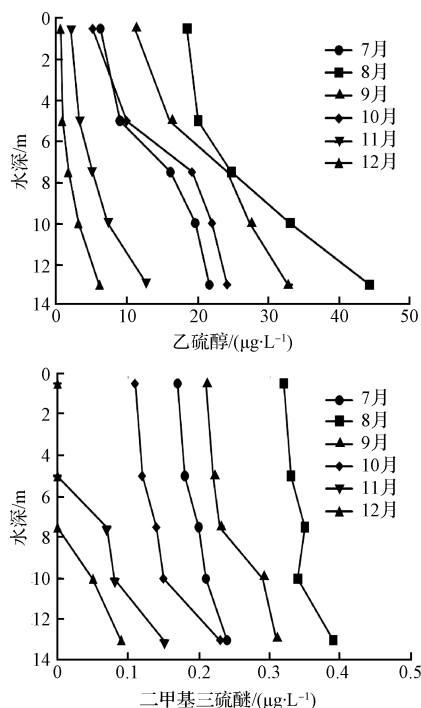


图 3 不同月份在不同水深处乙硫醇和二甲基三硫醚的浓度

Fig. 3 Contents of different depths ethyl mercaptan and dimethyl trisulfide in different months

动性差,水体富营养化问题严重,溶解氧浓度长期处于很低的状态。在硫污染严重且温度较适宜的时期,水库水体中有机物含量较高,耗氧速率较快^[16-17],加上藻类过量繁殖,死亡藻体沉积堆叠,藻类细胞破裂释放大量蛋白质,一系列因素导致厌氧微生物大量繁殖活跃,分解沉积物与上覆水中的蛋白质,死亡生物体或以硫酸盐作为电子供体,经过微生物的不完全降解,产生硫醇硫醚类物质释放入水中,从而导致水体散发恶臭^[18]。

此外,周村水库作为较大的分层型水库,夏季会出现典型的水温分层现象^[5],形成稳定的温跃层,水温在水平方向基本保持不变,仅垂直变化,从而引起密度梯度,上层与下层水很难渗混^[19]。此时,大量释放出来的污染物在垂向扩散的时候会受到温度分层的阻滞作用^[20],堆积在深水层,被厌氧微生物分解为硫醇硫醚类物质,造成水库底部的硫醇硫醚含量剧增,如 7 月份。而当污染物浓度过高时,对温跃层又有一定的穿透能力^[20],这就导致了污染十分严重的 8—9 月份水体中硫醇硫醚含量普遍偏高。秋季以后,表层水温开始下降,密度增加,库面水下沉产生对流现象,温跃层“变薄”,使库水温渐渐达到均匀分布,水体中表层和底层的硫醚硫醇含量差距也逐渐缩小,如 10 月份。到冬季水库处于混合

期^[21],温跃层基本消失,水库接近完全混合,与此同时水温的降低削减了微生物的活性,污染物的释放速率也相应变得缓慢,再加上藻类的减少,多方面因素作用使水中硫醚硫醇都处于很低的含量,甚至检测不到,这与前人研究结果一致^[22]。由此可见,温度是影响水中硫醇硫醚含量的重要影响因素,且水体恶臭季节性较强,夏季最为严重。

2.2.2 挥发性有机硫化物含量随水深的变化

选取8月份(硫醚硫醇浓度最大月)3个采样点的平均值数据作为代表进行纵向定量分析。水深与乙硫醇、二甲基三硫醚浓度关系如图4所示,总体来看,随着水深的增加,乙硫醇和二甲基三硫醚的含量均逐渐升高。乙硫醇浓度普遍很高,在水深5.0~13.0 m处具有明显增大趋势。二甲基三硫醚浓度在0.5~7.5 m处变化不大,10.0~13.0 m处有所上升,虽然在10.0 m处略有下降,但整体还是随水深增大而升高。从嗅觉上也反映出水库底部采集水样(10 m和13 m处)均散发比浅层采集水样(0.5 m和5 m)处更加浓烈的恶臭。

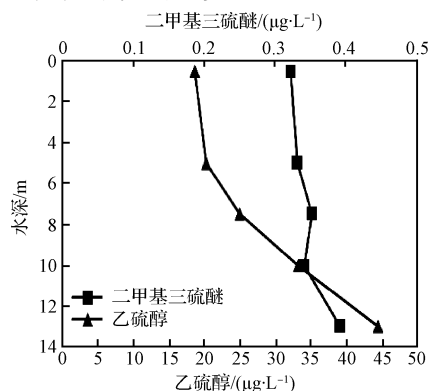


图4 乙硫醇、二甲基三硫醚浓度随水深的变化

Fig. 4 Variation of ethyl mercaptan and dimethyl trisulfide's concentration with water depth

已有研究表明,水体中硫的释放不仅受溶解氧(DO)的影响,也与氧化还原电位(ORP)有关^[23]。这二者与水深变化关系如图5所示,DO随水深的增大由 $9.07 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 逐渐降低为0,ORP则随水深增大由正电位逐渐过渡到负电位,可见水库底部形成了厌氧强还原态环境。分别进行相关性分析发现,乙硫醇与DO, ORP均显著相关($P_{\text{DO}} = 0.015$, $R^2_{\text{DO}} = 0.896$; $P_{\text{ORP}} = 0.008$, $R^2_{\text{ORP}} = 0.931$),而二甲基三硫醚与这二者的相关性则不太显著($P_{\text{DO}} = 0.106$, $R^2_{\text{DO}} = 0.636$; $P_{\text{ORP}} = 0.109$, $R^2_{\text{ORP}} = 0.630$)。夏季的温度热力分层是影响溶解氧在夏季垂直分布的关键因素,并且存在显著的突变层,即“氧跃层”^[24]。在水深5.0~13 m之间,溶解氧大幅度下

降,使厌氧微生物活动性大大增强,代谢释放硫醇硫醚的能力明显提升。而二甲基三硫醚与DO、ORP相关性不显著的原因是该物质浓度普遍较低,并且夏季水库表层大量堆浮的藻类也会产生少量二甲基三硫醚^[16],使上层水体中该物质的含量也相对均匀。而严重缺氧的环境为水库底部提供了强还原态条件,使得相关微生物如硫酸盐还原菌等获得最佳生长繁殖条件,加剧了硫醇硫醚类物质的产生^[18]。

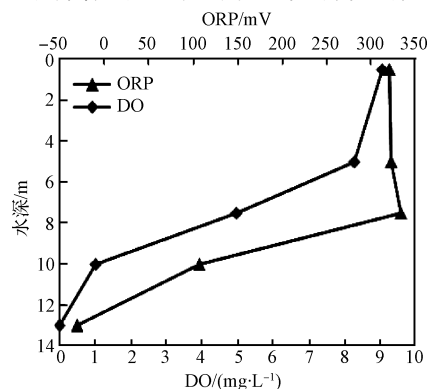


图5 DO、ORP随水深的变化

Fig. 5 Variation of DO and ORP with water depth

硫醇硫醚类物质不仅能由含硫氨基酸等有机物生物分解产生,其含量还与水中的硫酸盐有关。硫酸盐本身是惰性的,既没有挥发性,也没有毒性,但硫酸盐排入微污染或污染水体中后,在厌氧条件下经硫酸盐还原菌作用最终生成硫化物会产生更为严重的污染,是导致水体发臭的重要因素^[25]。硫醇硫醚类物质就是这一过程的中间产物^[18],是臭味问题发生的症结所在。硫酸盐与硫化物含量随水深变化情况如图6所示,水中硫酸盐含量达到了 $34.14 \sim 38.75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,且浓度分布比较均匀,没有随水深增加产生较大波动,这是由于水库水体中的硫酸盐不仅通过沉积物释放所得,也来源于外源流入。较高浓度的硫酸盐为形成硫醇硫醚提供了充足的硫供

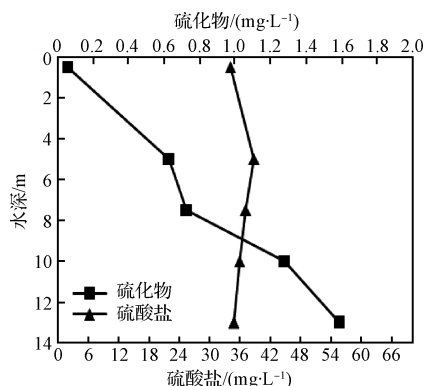


图6 硫酸盐、硫化物随水深的变化

Fig. 6 Variation of sulfate and sulfide with water depth

体。硫化物浓度随水深增加则明显变大,这是因为越接近水底沉积物,厌氧微生物越活跃,还原硫酸盐这一反应进行的越彻底,较多的硫醇硫醚被进一步分解为硫化物,而水体分层使得下层水体中的硫化物难以进行垂向扩散,故形成了下高上低的现象。

综上所述,硫醚硫醇的含量随水深的增加而升高,主要是由于溶解氧的降低造成。水库底部相关微生物在厌氧环境下通过代谢含硫氨基酸或以硫酸盐为硫供体产生硫醇硫醚类物质,并释放到水体中。

2.3 水库原位围隔曝气实验

经过连续曝气 3 d,曝气前后水中硫醇硫醚浓度如表 1 所示。

表 1 曝气前后围隔水中乙硫醇和二甲基三硫醚浓度

Table 1 Contents of ethyl mercaptan and dimethyl trisulfide before and after the aeration

水深/ m	乙硫醇			二甲基三硫醚		
	曝气前/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	曝气后/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	去除率/ %	曝气前/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	曝气后/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	去除率/ %
0.5	9.91	0.93	90.62	0.36	N. D.	100.00
5.0	12.49	1.17	90.63	0.36	N. D.	100.00
7.5	22.16	1.68	92.42	0.36	0.05	86.11
10.0	30.51	1.35	95.58	0.39	N. D.	100.00
13.0	30.54	1.29	95.78	0.41	0.07	82.93

注:N. D. 表示未检出。

曝气器连续运行 72 h 后,围隔内部水体的溶解氧由 $0.21\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 提高到 $7.48\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。说明对水库进行扬水曝气在短期就能明显提升水体溶解氧浓度,改善水体厌氧环境并且减少水中硫醇硫醚物质含量,其中乙硫醇去除率达到 90% 以上,二甲基三硫醚去除率达 80% 以上。扬水曝气对于减少硫醇硫醚的作用分为抑制其产生和直接去除 2 个方面。运行时曝气器底部形成的气弹在上升过程中产生强烈抽吸作用,将底部水体不断携带并输送到表层,使表层水体向下迁移,形成上下层水体的混合与循环迁移运动,最终在扬水曝气器周围形成大范围的垂向混合流场^[26]。这一过程能够有效地混合水体,破坏由于夏季水温形成的水库水体分层,大幅提升整个水深中的溶解氧含量,改善水库底部的厌氧强还原态环境,抑制底泥中污染物的释放,从而抑制硫醇硫醚的产生。此外,在扬水曝气强烈的气体作用下,硫醇硫醚具有的强烈挥发性使得水中的乙硫醇与二甲基三硫醚大量挥发出去,导致水中的浓度不断降低,达到改善水体嗅味问题的效果。因此,若今后要整治周村水库恶臭现象,扬水曝气将是一种

性能优良,高效简便的技术措施。

3 结 论

- 1)周村水库水体中挥发性有机硫化物主要为乙硫醇,二甲基三硫醚。
- 2)周村水库水体中的硫醇硫醚浓度随温度的升高而增加,具有较明显的季节性且夏季最为严重。
- 3)硫醇硫醚浓度随水深增大而升高,主要由于溶解氧随水深增加而降低造成。
- 4)对水库曝气充氧能有效降低硫醇硫醚含量,改善水体恶臭的问题。

参 考 文 献

[1] 刘洋,韩璐,宋永会,等.白塔堡河中致嗅类挥发性有机硫化物污染现状及来源研究.环境科学学报,2013,33(11):3038-3046
LIU Yang, HAN Lu, SONG Yonghui, et al. Pollution status and sources of odorous volatile organic sulfur compounds in Baitapu River. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(11):3038-3046 (in Chinese)

[2] 李勇,张晓健,陈超.我国饮用水中嗅味问题及其研究进展.环境科学,2009,30(2):583-588
LI Yong, ZHANG Xiaojian, CHEN Chao. Review on the tastes and odors compounds in drinking water of China. Environmental Science, 2009, 30(2):583-588 (in Chinese)

[3] 沈斐,苏晓燕,许燕娟,等.太湖水源水致臭物质成因探讨//中国环境科学学会学术年会论文集.北京:中国环境科学出版社,2011

[4] 巢猛,陈貽球,戴晓莹.吹扫-捕集/气质联用法测定水中硫醚类致嗅物.中国给水排水,2011,27(6):94-96
CHAO Meng, CHEN Yiqiu, DAI Xiaoying. Determination of thioether-like odorous compounds in water by purge and trap/GC-MS. China Water & Wastewater, 2011, 27(6):94-96 (in Chinese)

[5] 曹占辉.周村水库水质污染分析评价与模拟研究.西安:西安建筑科技大学硕士学位论文,2013
CAO Zhanhui. Analysis evaluation and simulation study on the water quality pollution of Zhoucun reservoir. Xi'an: Master Dissertation of Xi'an University of Architecture and Technology, 2013 (in Chinese)

[6] 邢大立.水中硫醇和硫醚类致嗅物的吹扫捕集-气相色谱-质谱联用测定法.环境与健康杂志,2010,27(8):711-712
XING Dali. Determination of thioalcohol and thioether in water by purge-and-trap method combined with gas chromatography-mass spectrometry. Journal of Environment and Health, 2010, 27(8):711-712 (in Chinese)

[7] 彭敏,范洪波.环境水体中致嗅物质甲硫醚和二甲基三硫醚的吹扫-捕集-气相色谱-质谱测定法.环境与健康杂志,2012,29(3):260-261
PENG Min, FAN Hongbo. Determination of odorant component dimethyl sulfide and dimethyl trisulfide in water by purge and trap preconcentration-GC-MS. Journal of Environmental and Health, 2012, 29(3):260-261 (in Chinese)

- [8] 许欢,戴吉胜,张晓健,等.气相色谱法测定水中乙硫醇的方法研究.给水排水,2008,34(5):51-53
XU Huan, DAI Jisheng, ZHANG Xiaojian, et al. Determination of ethyl mercaptan in water by gas chromatography. Water & Wastewater Engineering, 2008, 34(5): 51-53 (in Chinese)
- [9] 刘成,胡湛波,郝晓明,等.吹扫捕集-GC/MS法测定南宁市竹排冲黑臭河道水体臭味物质.环境工程学报,2012,6(5):1744-1748
LIU Cheng, HU Zhanbo, HAO Xiaoming, et al. Determination of odorous compounds in black-odorous Zhupai Creek (Nanning) by purge and trap coupled with gas chromatography-mass spectrometry. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, 6(5): 1744-1748 (in Chinese)
- [10] 沈斐,苏晓燕,许燕娟,等.吹扫捕集-GC/MS法测定饮用水中致嗅物质.环境监测管理与技术,2010,22(5):31-35
SHEN Fei, SU Xiaoyan, XU Yanjuan, et al. Determination of odor materials in drinking water by GC/MS with purge and trap. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2010, 22(5): 31-35 (in Chinese)
- [11] 刘洋,韩璐,宋永会,等.吹扫捕集-气相色谱联用同时测定水中致嗅挥发性有机硫化物.中国环境监测,2014,30(1):144-149
LIU Yang, HAN Lu, SONG Yonghui, et al. Simultaneous determination of 16 odor volatile organic sulfur compounds in water sample by purge and trap-gas chromatography. Environmental Monitoring in China, 2014, 30(1): 144-149 (in Chinese)
- [12] 方菲菲,于建伟,杨敏,等.顶空固相微萃取法用于测定水中二甲基三硫醚.中国给水排水,2009,25(6):86-89
FANG Feifei, YU Jianwei, YANG Min, et al. Determination of dimethyl trisulfide in water by headspace solid-phase micro-extraction coupled with gas chromatography/mass spectrometry. China Water & Wastewater, 2009, 25(6): 86-89 (in Chinese)
- [13] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法.4版.北京:中国环境科学出版社,2002
- [14] 卢信,冯紫艳,商景阁,等.不同有机基质诱发的水体黑臭及主要致臭物(VOSCs)产生机制研究.环境科学,2012,33(9):3152-3159
LU Xin, FENG Ziyang, SHANG Jingge, et al. Black water bloom induced by different types of organic matters and forming mechanisms of major odorous compounds. Environmental Science, 2012, 33(9): 3152-3159 (in Chinese)
- [15] 王道增,周旭,朱红伟,等.再悬浮底泥污染物在水体中的分层释放特征.水动力学研究与进展,2014,29(5):592-598
WANG Daozeng, ZHOU Xu, ZHU Hongwei, et al. Stratified release characteristics of sediments contaminants during re-suspension in water column. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2014, 29(5): 592-598 (in Chinese)
- [16] 张晓健,张悦,王欢,等.无锡自来水事件的城市供水应急除臭处理技术.给水排水,2007,33(9):7-12
ZHANG Xiaojian, ZHANG Yue, WANG Huan, et al. Emergent drinking water treatment for taste and odor control in Wuxi City water pollution incident. Water & Wastewater Engineering, 2007, 33(9): 7-12 (in Chinese)
- [17] 李勇,陈超,张晓健,等.饮用水中典型致嗅物质去除技术研究.环境科学,2008,29(11):3049-3053
LI Yong, CHEN Chao, ZHANG Xiaojian, et al. Removal technology of typical odorant in drinking water. Environmental Science, 2008, 29(11): 3049-3053 (in Chinese)
- [18] LOMANS B. P., VAN DER DRIFT C., POL A., et al. Microbial cycling of volatile organic sulfur compounds. Cellular and Molecular Life Sciences, 2002, 59(4): 575-588
- [19] 王煜,戴会超.大型水库水温分层影响及防治措施.三峡大学学报(自然科学版),2009,31(6):11-14
WANG Yi, DAI Huichao. Effects of water temperature delamination in large-scale reservoirs and protection methods. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2009, 31(6): 11-14 (in Chinese)
- [20] 刘春艳,陈铂,罗麟.温度分层对污染物垂向扩散的影响//第九届全国水动力学学术会议暨第二十二届全国水动力学研讨会论文集.北京:海洋出版社,2009
- [21] 董春颖,虞左明,吴志旭,等.千岛湖湖泊区水体季节性分层特征研究.环境科学,2013,34(7):2574-2581
DONG Chunying, YU Zuoming, WU Zhixu, et al. Study on seasonal characteristics of thermal stratification in lacustrine zone of Lake Qiandao. Environmental Science, 2013, 34(7): 2574-2581 (in Chinese)
- [22] 李勇,陈超,张晓健,等.东江水中典型致嗅物质的调查.中国环境科学,2008,28(11):974-978
LI Yong, CHEN Chao, ZHANG Xiaojian, et al. Typical odorant component of Dongjiang River in China: A survey. China Environmental Science, 2008, 28(11): 974-978 (in Chinese)
- [23] 王娟娟,李晓敏,曲克明,等.乳山湾底质中硫化物和氧化-还原电位的分布与变化.海洋水产研究,2006,27(6):64-70
WANG Juanjuan, LI Xiaomin, QU Keming, et al. The distributions and variations of sulfide and redox potential in the sediments of Rushan Bay. Marine Fisheries Research, 2006, 27(6): 64-70 (in Chinese)
- [24] 殷燕,吴志旭,刘明亮,等.千岛湖溶解氧的动态分布特征及其影响因素分析.环境科学,2014,35(7):2539-2546
YIN Yan, WU Zhixu, LIU Mingliang, et al. Dynamic distributions of dissolved oxygen in Lake Qiandao and its environmental influence factors. Environmental Science, 2014, 35(7): 2539-2546 (in Chinese)
- [25] 刘福鑫,黄勇,袁怡,等.厌氧硫酸盐还原-氨氧化的研究.环境工程学报,2015,9(2):699-704
LIU Fuxin, HUANG Yong, YUAN Yi, et al. Study of anaerobic sulfate-reducing ammonium oxidation reaction. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(2): 699-704 (in Chinese)
- [26] 黄廷林,贾三军,丛海兵.污染水源水的扬水曝气强化化学氧化处理试验研究.给水排水,2008,34(12):52-55
HUANG Tinglin, JIA Sanjun, CONG Haibing. Experimental study on the water-lifting aerator enhanced chemical oxidation process for polluted raw water. Water & Wastewater Engineering, 2008, 34(12): 52-55 (in Chinese)