

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2024.0803

南方某水库异味物质溯源及其成因分析

王炎东¹, 吕文洲^{1*}, 景晓², 钱欣聪², 甘慧慧¹

(1.宁波大学 土木工程与地理环境学院, 浙江 宁波 315211; 2.宁波市水务环境集团, 浙江 宁波 315012)

摘要: 随着水体富营养化的加剧, 以由丝状蓝藻大量繁殖引起的 2-甲基异莰醇(2-MIB)为主的饮用水水源地水体臭味问题频繁发生. 为确定南方某水库型饮用水水源地臭味物质的来源及其成因, 自 2023 年 1 月至 2023 年 12 月对该水库进行了为期 1 a 的水质监测, 分析了常见的臭味物质种类、质量浓度以及藻类. 结果表明, 该水库主要臭味物质为 2-MIB, 其质量浓度呈现出季节性差异, 春末夏初最高可达 $144 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$; 通过 *mic* 功能基因高通量测序技术确定了假鱼腥藻是该水库中 2-MIB 的主要生产者; 最后通过水质与臭味物质的相关性分析, 表明了硝氨比、氨氮、水温及总磷是影响该水库 2-MIB 质量浓度的主要环境因子.

关键词: 水库; 饮用水水源地; 臭味物质; 溯源; 成因分析

中图分类号: X524

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2025) 01-0082-09

饮用水中的臭味是消费者和自来水公司关注的重要水质问题, 湖库夏季蓝藻暴发导致的水华现象呈现多发态势. 在高辐照度、高温和营养条件下, 蓝藻通过上调相关基因的表达和氧化降解 β -胡萝卜素, 释放出大量挥发性有机化合物(VOCs), VOCs 不仅会增加水体的异味, 还会向藻类和水生植物传递化感作用信号, 导致蓝藻在富营养化水体中占据主导地位^[1-2]. 日前, 我国水库的总蓄水能力已经达到了湖泊蓄水量的 3 倍^[3], 而城市饮用水水源中约 40% 为湖泊或水库, 其中大部分为水库, 当前异味问题是我国城市水库型水源所面临的主要水质风险之一^[4]. 经调查发现, 中国主要城市 111 个饮用水处理厂中水源水样的异味主要为泥土味/霉味^[5], 而丝状蓝藻的次生代谢产物 2-MIB 和土臭素(GSM)是饮用水水源中土霉味的主要来源^[6]. 2-MIB 和 GSM 都属于萜类化合物, 臭味阈值很低, 可以被鱼类等通过摄食、呼吸等行为在体内富集, 严重影响水产品的食用体验^[7].

丝状蓝藻的生长及产嗅受到多种环境因素影响. Olsen 等^[8]进行现场实验时发现单独添加氮或

磷并不会促进 2-MIB 的产生, 同时添加氮和磷可以观察到 2-MIB 显著增加. Wu 等^[9]对全国范围内的 7 座水库型饮用水源的臭味进行了调查研究, 发现 GSM 浓度与 TN 显著相关($P < 0.01$). 最近有研究表明夏季水库温度分层的增强促进了丝状蓝藻在表层水体的种群优势, 还可通过调节氮磷比值间接影响藻类生长和产嗅^[10]. Wu 等^[11]的研究发现水库浅层臭味物质浓度易受短期水文气象过程的影响, 浓度变化较大. 对于不同地理位置的水库, 各环境因子对于臭味物质的影响也不尽相同, 尚无一致定论, 不同水库暴发臭味物质的种类和成因需要具体情况具体分析^[12]. 此外, 臭味生产者的识别是备受关注的问题之一. 利用显微镜进行藻类分析是常见的方法之一, 它旨在对藻类进行识别并计数, 再通过统计学方法识别出臭味生产者. 但是水中藻类繁多, 对水中存在的各种藻类进行鉴定识别需要长期的经验累积; 更重要的是, 这种基于形态学的方法无法区分 2-MIB 生产者与非生产者, 因为 2-MIB 生产行为是菌株特异性的, 而不是属/种特异性的^[13]. 除显微镜分析法外, 分子生物

收稿日期: 2024-08-07.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 宁波大学可持续排水实验室开放课题; 企业委托项目(HX2023000403).

第一作者: 王炎东, 硕士研究生, 主要研究方向: 饮用水安全与保障. E-mail: wyd18365049158@163.com

*通信作者: 吕文洲, 博士/教授, 主要研究方向: 废水生物处理及资源化、水质安全. E-mail: luwenzhou@nbu.edu.cn

学方法是近年得到快速发展的一种方法,其中利用实时荧光定量PCR法对水体中特定藻类生物量、臭味物质生产潜力等进行定量分析的方法近年来受到关注。此外,高通量测序技术可将样品中所有的基因序列按照一定长度随机截取并准确测出,后期通过软件进行基因序列拼接,以及与已有生物信息数据库比对可获得样品中的生物种群信息及其相对丰度^[14]。然而,对于这些分子生物学方法而言,其不可忽视的局限在于缺乏通用的引物。最近, Suruzzaman 等^[13]设计了一套通用引物组,适用于所有已知的 2-MIB 生产者。

南方某水库型水源地在 2022 年上下半年各出现了一次臭味事件,鉴于此,本研究以该水库为对象,从 2023 年 1 月到 12 月定期取样并分析水体理化指标,探究水中臭味物质的种类及成因,为该水库的管理提供臭味物质防控方面的指导。

1 材料与方法

1.1 研究地点与样品采集

该水库是一座以防洪、灌溉为主,结合发电、养鱼、供水等综合利用的大(二)型水利工程,地处亚热带季风气候区,冬夏季风交替显著,年温适中,四季分明,雨量丰沛,日照充足。水库水系图及采样点利用 ArcGIS 10.8 软件进行绘制,如图 1 所示。

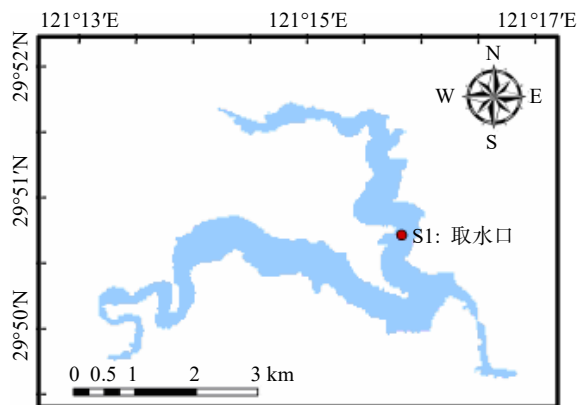


图1 水库水系图及采样点位

采样过程中使用 GPS 定位至准确位置,采样频率为每月一次。使用抓泥斗采集水库沉积物,搅拌均匀后装于密封袋,低温保存。使用有机玻璃采水器分别采集表层、供水层及底层水样,水样装于洁净聚四氟乙烯空瓶,样品采集完成后立即密封,放入低温储物箱保存,运回实验室进行各项指标

的分析。其中 500 mL 用于水中总氮与总磷的测定,500 mL 经滤膜过滤后用于硝态氮和氨氮的测定,滤膜用于叶绿素 a 的测定。另取 500 mL 密封低温避光保存,用于臭味物质的分析测定。

1.2 水质指标分析

利用美国 YSI ProPlus 便携式多参数水质仪(东方嘉仪)原位测定水体 pH、溶解氧、水温及电导率等指标,总氮采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(HJ 636—2012)测定,硝态氮使用紫外分光光度法(HJ/T 346—2007)测定,氨氮使用纳氏试剂分光光度法(HJ 535—2009)测定,总磷采用钼酸铵分光光度法(GB/T 11893—1989)测定,叶绿素 a 使用分光光度法(HJ 897—2017)测定,采用 WGZ-1A 台式浊度仪(深圳源恒通)测定浊度。

1.3 水体异味物质分析

样品中 2-MIB 的定量分析参考《生活饮用水标准检验方法 第 8 部分:有机物指标》(GB/T 5750.8—2023),采用顶空固相微萃取(HSPME)与气相色谱-质谱(GC/MS)联用法。具体操作步骤如下:在 20 mL 的顶空瓶中加入 3.5 g 氯化钠和小型磁力搅拌子加速水体中 2-MIB 的挥发溶出,加入 10 mL 经 0.45 μm 滤膜过滤的样品溶液和 50 μL 一定浓度的内标物 2-异丁基-3-甲氧基吡嗪,使用具有聚四氟乙烯涂层的硅胶垫密封。恒温磁力搅拌器温度为 65 $^{\circ}\text{C}$,待溶液中氯化钠完全溶解后进行顶空吸附萃取。萃取 30 min 后,取出萃取纤维,擦干吸附针头水分,将萃取纤维插入气相色谱进样口,在 250 $^{\circ}\text{C}$ 下解析 5 min,使用 Agilent 7890A-5975C 气质联用仪进行检测分析。分析条件:载气为高纯氦气,恒流 1 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$;进样口温度为 250 $^{\circ}\text{C}$;进样方式为不分流进样;程序升温是 60 $^{\circ}\text{C}$ 保持 2 min,以 8 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速率升温至 240 $^{\circ}\text{C}$ (保持 2 min);传输线温度为 280 $^{\circ}\text{C}$;离子源温度为 230 $^{\circ}\text{C}$;电子轰击能量为 70 eV;色谱柱使用 Agilent HP-5MS (30 $\text{m}\times 250\mu\text{m}\times 0.25\mu\text{m}$);定量模式为 SIM 模式;定量离子为 95。

1.4 产嗅藻识别

在臭味暴发的峰值时期(即 5 月份),取 3 份等体积表层水样,混合后,再经 0.22 μm 醋酸纤维滤膜过滤,将滤得的生物样和滤膜一起放入 15 mL 无菌离心管中,在 -80 $^{\circ}\text{C}$ 下保存。滤膜样品由广东美

格基因生物科技有限公司进行 *mic* 基因的高通量测序. 测序平台采用 IlluminaPE250, 测序引物为 MIBQSF: 5'-GACAGCTTCTACACCTCCATGA-3'和 MIBQSR: 5'-CAATCTGTAGCACCATGTTGAC-3'^[13], 该引物能够扩增之前研究中无法扩增的 *mic* 基因序列, 表现出更强的适用性.

1.5 数据分析

本研究利用 R 4.2.2 与 Origin 2021 进行统计分析与绘图.

2 结果和讨论

2.1 水库臭味物质种类及主要臭味物质浓度变化

在本研究中共检出了 2-MIB、GSM、2,4-癸二烯醛及 β -环柠檬醛等 10 种臭味物质. 有研究也表明 2,4-癸二烯醛可能是硅藻的代谢产物^[15]. 值得注意的是, 除 2-MIB 外, 其他臭味物质检出率低且未超出臭味阈值. 另外, 对沉积物也进行了臭味物质分析, 结果显示, 二甲基二硫醚和二甲基三硫醚的浓度均处于较高水平, 但在水体中并未检出. 因此, 对于该水库而言, 水体中臭味物质主要为 2-MIB, 沉积物对水体中的臭味贡献不大.

调查期间 2-MIB 质量浓度变化趋势如图 2 所示. 水库 2-MIB 质量浓度变化范围为 0~144 ng·L⁻¹, 整体呈现单峰模式, 在 5 月份达到峰值, 表层水体 2-MIB 质量浓度最高为 144 ng·L⁻¹; 6 月份表层水体 2-MIB 质量浓度骤降至 21 ng·L⁻¹, 且低于供水层和底层; 8 月份降至饮用水臭味阈值(10 ng·L⁻¹)以下; 1~4 月及 10~12 月份 2-MIB 质量浓度低于检出限. 5~7 月 2-MIB 质量浓度超过臭味阈值, 故将其划为臭味发生时期.

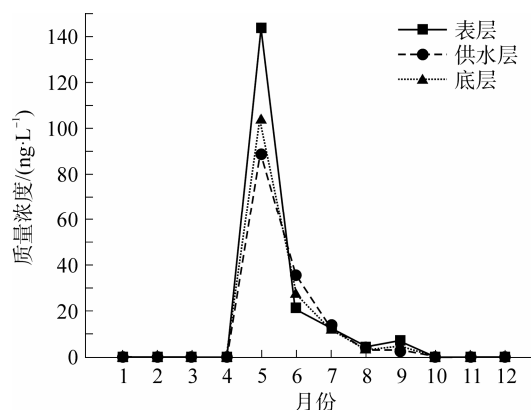


图 2 2023 年水库不同水层 2-MIB 质量浓度变化

2.2 水库中 2-MIB 来源

高通量测序结果见表 1. 从该水库采集的水样中发现了 4 种产生 2-MIB 的蓝藻, 分别为 3 种假鱼腥藻(*Pseudanabaena galeata*、*Pseudanabaena yagii*、*Pseudanabaena* sp. FACHB-1277)及 1 种颤藻(*Oscillatoria limosa*). 3 种假鱼腥藻的相对丰度在被识别出的 2-MIB 生产者中累计占比高达 99.79%, 进一步确定该水库中臭味物质的源头是生物源的, 具体来说就是由 3 种假鱼腥藻的生长繁殖引起. 此外, 其他几种细菌(*Polynucleobacter difficilis*、*Rhodobacter ruber*、*Variovorax paradoxus*、*Pedobacter* sp. ASV19、*Nocardioidees massiliensis*、*Iamia* sp. SCSIO 61187)也可能产生 2-MIB, 但是占比极低.

表 1 水库 2-MIB 生产者及其相对丰度

2-MIB 生产者	相对丰度/%
<i>Pseudanabaena galeata</i>	79.77
<i>Pseudanabaena yagii</i>	13.39
<i>Pseudanabaena</i> sp. FACHB-1277	6.63
<i>Oscillatoria limosa</i>	0.01
<i>Polynucleobacter difficilis</i>	0.09
<i>Rhodobacter ruber</i>	0.05
<i>Variovorax paradoxus</i>	0.01
<i>Pedobacter</i> sp. ASV19	0.02
<i>Nocardioidees massiliensis</i>	0.01
<i>Iamia</i> sp. SCSIO 61187	0.00

2-MIB 最早在放线菌培养物中被发现, 并且许多饮用水臭味(T&O)事件与放线菌有关^[16]. 后续研究表明, 丝状蓝藻, 包括假鱼腥藻、浮丝藻、席藻、颤藻、鞘丝藻、拟浮丝藻等才是饮用水源中 2-MIB 的主要生产者^[17]. 水库中产 2-MIB 丝状蓝藻并不罕见, 于桥水库自 2018 年来深受 2-MIB 生产的影响, Qiu 等^[18]通过基于 *mic* 基因的高通量测序确定了该水库中 2-MIB 生产者为假鱼腥藻属及泽丝藻属. 2011 年夏季, 上海青草沙水库水体 2-MIB 质量浓度最高为 2 528 ng·L⁻¹, 后续研究发现该水库中 2-MIB 的主要生产者为浮丝藻属^[19]. 不同 2-MIB 生产者之间的产臭能力也不尽相同, 有人在太湖非水华区检测到较高浓度的 2-MIB, 并被归因于颤藻强大的产 2-MIB 能力^[20]. 假鱼腥藻曾在我国华东地区某水源水库被检出, 是常见的 2-MIB 生产者之一^[21]. 假鱼腥藻具有较强的产 2-MIB 能力, 若

每条藻丝包含 30 个细胞,且每毫升水中存在 27~64 条这样的藻丝,则足以使水体散发出泥土味和霉味^[22]。研究发现,尽管某种假鱼腥藻从指数期生长至衰退期,其 2-MIB 的总产量并未发生显著变化,但胞外和胞内的 2-MIB 产量却呈现出不同的趋势。具体而言,胞外 2-MIB 的产量在此过程中显著增加,而胞内 2-MIB 的产量则从指数期的每细胞 0.89 fg 显著下降至衰退期的 0.51 fg^[23]。本研究中,该水库中产生 2-MIB 的源头被鉴定为丝状蓝藻,且主要为 3 种假鱼腥藻,尽管也检测出了其他可能产生 2-MIB 的物种,但其相对丰度低,不可能为水库中高浓度 2-MIB 的来源。综上所述,该水库中高浓度 2-MIB 的主要来源是假鱼腥藻。

2.3 水库水环境因子变化

2023 年 1 月至 12 月,水库水体温度随水深下降,表层水体平均温度为 20.6 ℃,最高值 31.1 ℃出现在 7 月,随后逐月下降;正常情况(除了 1 月份有底层扰动外)下,3 个水层间的电导率、浊度相差不大;溶解氧和 pH 自表层至底层逐渐降低(表 2)。

表 2 水库不同水层基本水质参数(均值±标准差)

水质指标	水层	年度(1~12 月)	臭味发生(5~7 月)
水温/℃	表层	20.63±7.65	27.13±5.16
	供水层	19.26±6.61	24.73±4.58
	底层	18.79±6.48	24.23±4.13
电导率/ (10 ⁻⁶ S·cm ⁻¹)	表层	63.80±4.91	66.57±3.93
	供水层	62.15±2.40	64.10±0.61
	底层	62.15±1.76*	63.03±2.04
浊度/NTU	表层	1.41±1.09	0.58±0.17
	供水层	1.45±1.79	0.63±0.18
	底层	1.62±1.42*	0.61±0.17
溶解氧/ (mg·L ⁻¹)	表层	9.49±1.73	8.58±2.00
	供水层	9.04±1.85	7.62±2.02
	底层	8.90±1.89	7.44±2.02
pH	表层	8.23±1.04	9.17±0.55
	供水层	7.68±0.44	7.97±0.38
	底层	7.50±0.54	8.17±0.75

注:上标“*”表示统计范围为 2~12 月。

臭味发生期间水库平均温度为 24.2~27.1 ℃,适合产嗅藻的生长代谢。水体表层与供水层之间存在一定程度的热分层现象,这可能会促进产嗅藻在表层成为优势物种,导致表层水体臭味物质

浓度较高^[11]。电导率随水深下降,最高值 71.11×10⁻⁶ S·cm⁻¹ 出现在 7 月。供水层浊度较高,最高值 0.79 NTU 出现在 7 月,而表层水体臭味物质浓度低于深层水体的现象可能由异重流引起^[9]。溶解氧波动范围较大,为 5.20~10.68 mg·L⁻¹。3 个水层中,表层水体溶解氧质量浓度最高,最高值出现在 5 月;6 月份 3 个水层溶解氧质量浓度均较低,分别为 6.70、5.40 及 5.20 mg·L⁻¹。在此期间,有机质的分解以及浮游藻类的活动减弱可能是导致溶解氧降低的主要原因。表层水体 pH 高于供水层和底层,7 月表层最高为 9.71,6 月底层最低为 7.42。藻类光合作用会导致水体 pH 上升,结合 2-MIB 在 5~7 月的变化可以推测,产嗅藻在此期间的代谢活动减弱,取而代之的是其他浮游植物。

如图 3(a)所示,水库表层水体硝态氮质量浓度波动范围为 0.66~1.30 mg·L⁻¹,平均为 1.04 mg·L⁻¹。相比之下,供水层与底层水体的硝态氮更为稳定,波动范围分别为 1.00~1.30、0.92~1.30 mg·L⁻¹。如图 3(b)所示,水库表层水体氨氮平均质量浓度为 0.12 mg·L⁻¹,且 3 个水层氨氮波动范围较为接近。此外,表层水体总磷质量浓度平均为 0.026 mg·L⁻¹,变化范围为 0.020~0.033 mg·L⁻¹且与供水层、底层相近(图 3(c))。在总氮质量浓度方面,表层水体相对较低,平均为 1.23 mg·L⁻¹,波动范围为 0.88~1.51 mg·L⁻¹。而供水层水体总氮质量浓度最高,平均为 1.47 mg·L⁻¹,波动范围为 1.07~1.91 mg·L⁻¹(图 3(d))。水库水体氮磷比都大于 29,而硝氮比仅在氨氮质量浓度低于 0.02 mg·L⁻¹时超过 100(图 3(e~f))。

3 个水层的水质变化趋势大同小异,此处仅以表层水体为例来分析各水质参数的变化趋势。自 4 月起,硝态氮质量浓度逐渐下降,8 月份降至最低值 0.66 mg·L⁻¹,10 月份恢复至 1.10 mg·L⁻¹(图 4(a))。臭味暴发前氨氮质量浓度为 0.11 mg·L⁻¹,5 月份 2-MIB 暴发时,氨氮质量浓度低于 0.02 mg·L⁻¹,6 月份升高至 0.09 mg·L⁻¹,8 月份氨氮质量浓度最高为 0.36 mg·L⁻¹,10 月份降低至 0.07 mg·L⁻¹(图 4(a))。氮素作为蓝藻生命活动所需的营养,氨氮与硝态氮含量降低可能是 6 月份 2-MIB 下降的原因之一。总磷也被认为是影响丝状蓝藻产生 2-MIB 的重要因素,本研究中总磷与 2-MIB 暴发前后的趋势一致(图 4(b))。表层水体溶解氧平均质量浓度为

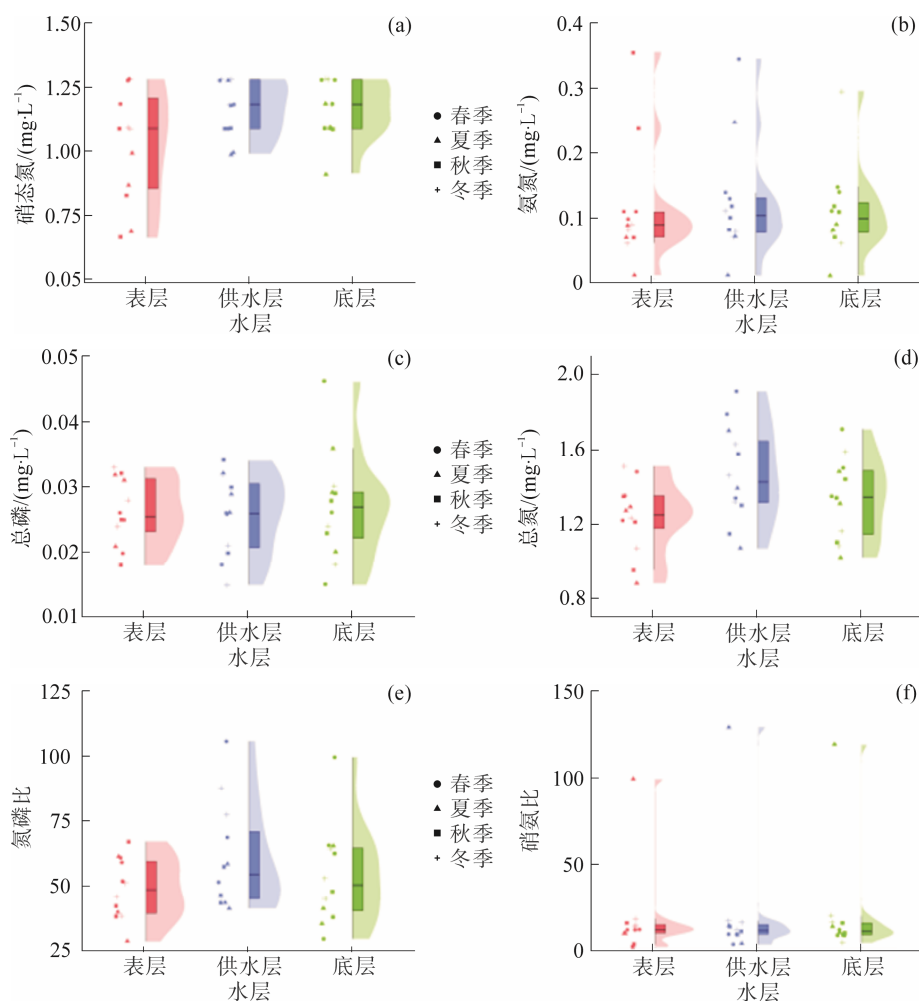


图3 水库2023年氮、磷营养物质在各水层的分布情况

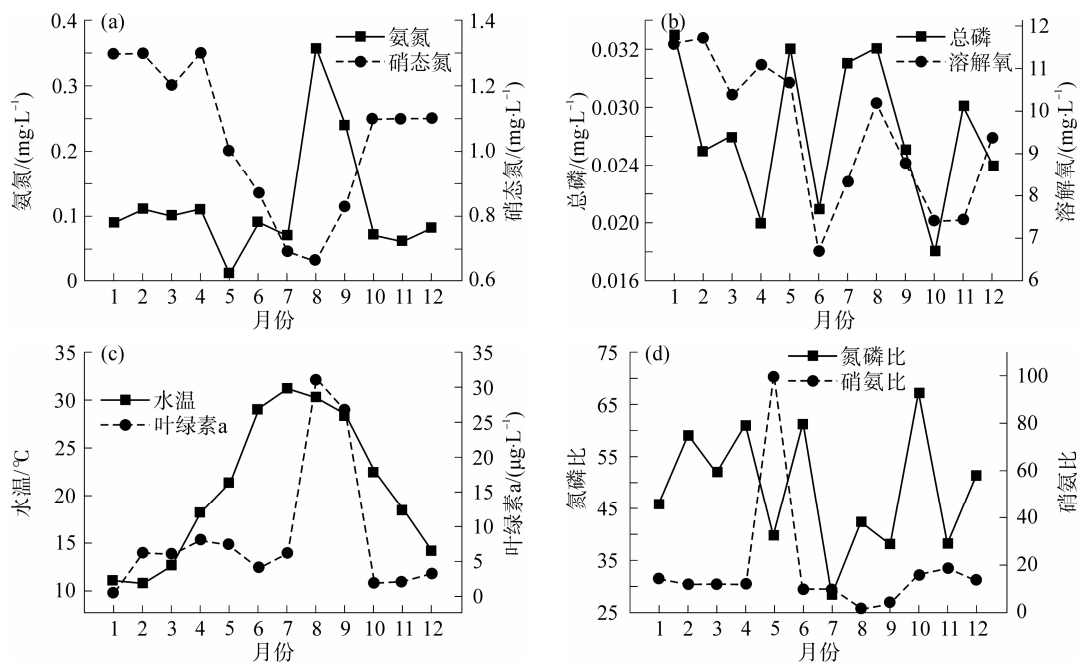


图4 表层水体水质指标的变化趋势

9.49 mg·L⁻¹, 6月份最低为 6.70 mg·L⁻¹ (图 4(b)). 叶绿素 a 在上半年波动不大, 即使是在 2-MIB 暴发时也仅有 7.39 μg·L⁻¹, 这说明产嗅藻暴发时并不会对叶绿素 a 有显著贡献. 8 月份叶绿素 a 升高至 31.07 μg·L⁻¹ (图 4(c)), 与此同时 2-MIB 质量浓度低于 10 ng·L⁻¹, 说明此时叶绿素 a 质量浓度上升并非由 2-MIB 生产者引起. 水温自 2 月起逐步上升, 7 月达到最高值 31.1 °C, 随后逐渐下降. 水温为 21.3 °C 时 2-MIB 质量浓度最高, 水温继续升高时, 2-MIB 质量浓度则逐渐降低 (图 4(c)). 4~7 月氮磷比的变化趋势与总磷相反 (图 4(d)), 还可以观察到硝氮比与 2-MIB 质量浓度之间存在相同的变化趋势 (图 4(d)).

2.4 水体 2-MIB 质量浓度影响因子分析

如图 5 所示, 2-MIB 与水温、pH、电导率、叶绿素 a 及总磷显著正相关, 与溶解氧、硝态氮及氮磷比显著负相关. 其中, pH 与 2-MIB 的显著性相关是由藻类光合作用减少水库中溶解的二氧化碳引起的. 因此, pH 并不是引起水库中 2-MIB 质量浓度上升的直接原因^[24]. 叶绿素等色素合成的中间产物香叶二磷酸(GPP)和法尼基二磷酸(FPP)是合成 2-MIB 与 GSM 的前体物质, 当环境适宜浮游植物生长时, 类异戊二烯途径更偏向于合成叶绿素等

光合色素, 但当处于逆境环境时, 积累的 GPP 和 FPP 则更多地转化为异味物质, 同时向其他藻类和水生植物传递化感作用信号, 以帮助其对抗不利环境^[1,25-26]. 如图 4(c)所示, 叶绿素 a 质量浓度在 2-MIB 暴发前后均比较稳定, 春季水温及光照等条件适合水生生物生长, 假鱼腥藻为保持更好的竞争力占据适合自身生长的生态位, 大量合成并释放 2-MIB 至水体中. 5 月份 2-MIB 质量浓度达到峰值时并没有观察到叶绿素 a 质量浓度有显著变化, 可能是因为前体物质 GPP 大多被用于合成 2-MIB.

水中 2-MIB 与环境因子的主成分分析如图 6 所示, 前两个主成分特征值均大于 1, 总方差解释分别为 78.9%、88.7%, 均可以解释大部分变量. 其中, 高质量浓度 2-MIB 时期 PC1 主要由硝氮比、溶解氧、叶绿素 a、2-MIB、水温、氨氮及总磷构成, PC2 主要由 pH、总氮及电导率构成; 低质量浓度 2-MIB 时期 PC1 主要由氨氮、水温、溶解氧、pH、叶绿素 a、硝氮比及硝态氮构成, PC2 主要由总磷、浊度、总氮及氮磷比构成. 不同时期 2-MIB 与环境因子的关系有所不同, 高质量浓度 2-MIB 与硝氮比、总磷、浊度及水温较为相关, 低质量浓度 2-MIB 与氮磷比、总氮、浊度及总磷较为相关.

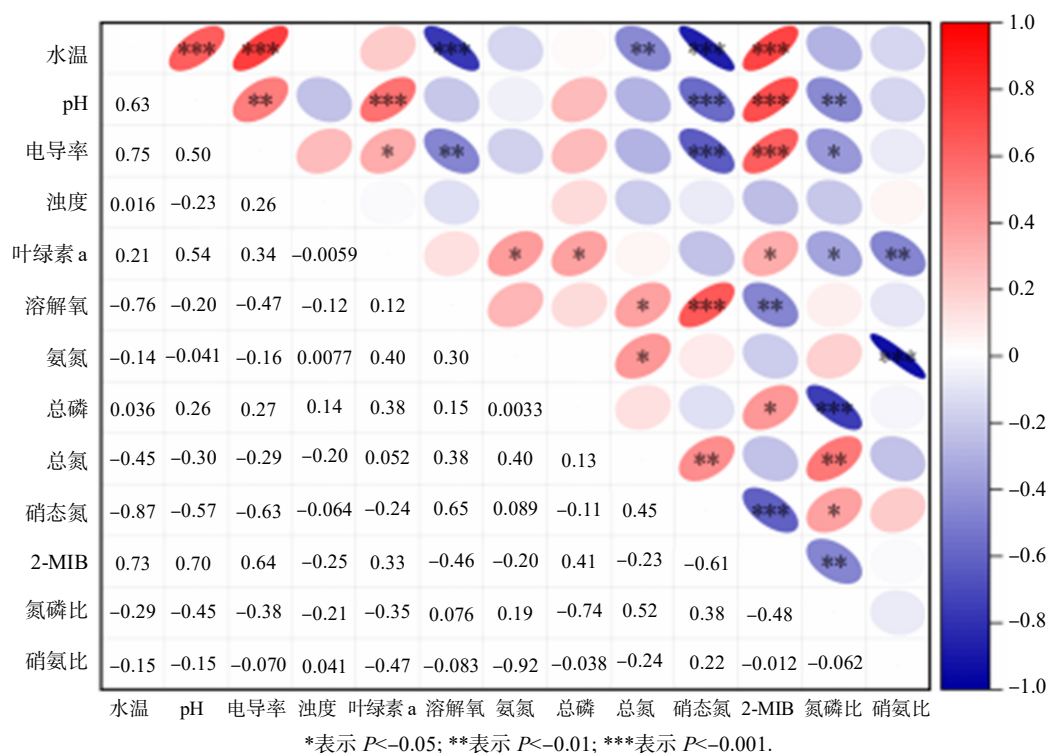


图 5 2-MIB 与水质参数的相关性分析热图

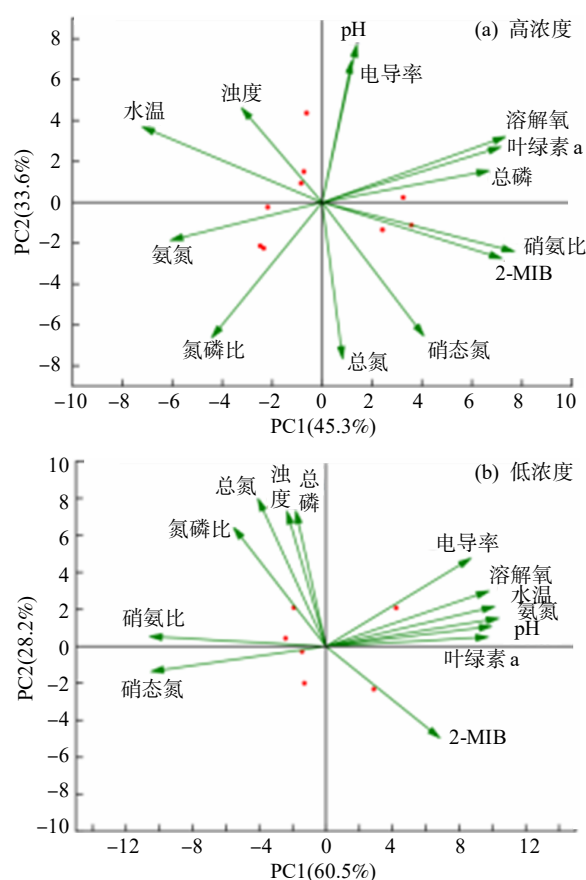


图6 2-MIB 与环境因子的主成分分析

相比而言,假鱼腥藻对水温的敏感程度不及光照强度^[27]。在温暖的夏季,T&O 化合物往往会增加,此时温度升高和长时间的光辐照会刺激蓝藻的生产力,从而刺激 T&O 化合物的产量。研究表明当温度低于 20℃或高于 30℃时,假鱼腥藻细胞数量会显著降低,但是其 2-MIB 产量会随着温度上升而增加,并在 35℃时达到峰值,这可能是产异味蓝藻抗逆的一种自我保护机制,以提高异味化合物产率的方式来干扰其所处逆境中其他生物的生长,确保自身的生态位^[27]。Shen 等^[28]的研究结果表明较高的温度(25℃)有利于蓝藻产生 T&O 化合物,但不利的温度条件(15℃与 35℃)可能会从基因表达层面上增加假鱼腥藻产生 2-MIB 的潜力。此外,水库由于自身结构特性,温暖季节时会在垂直方向上出现热分层现象。该现象能促进丝状蓝藻在表层水体形成优势种群,还能通过调节氮磷比值间接影响藻类生长和产嗅^[10]。本研究中高浓度 2-MIB 时期(5~7 月),2-MIB 与水温负相关,说明较高的水温对假鱼腥藻的产嗅产生抑制作用。

此外,水库水体的温度是累积太阳辐射的反映,因此认为水库中较高的水温与较强的太阳辐射对 6 月份 2-MIB 质量浓度骤降的贡献不可忽略。夏季异重流的出现会导致水库水体表层嗅味物质质量浓度低于深层水体^[9],但本研究中并未发现浊度与 2-MIB 质量浓度之间的关联。表层水体 2-MIB 质量浓度易受短期水文气象过程的影响^[11],因此本研究中 6 月份表层水体中 2-MIB 质量浓度低于供水层及底层,可能是由降雨冲刷引起而非异重流。

营养物作为触发蓝藻与嗅味物质暴发的重要因素,已经得到充分研究,其中氮磷营养条件受到了广泛关注。Smith 理论认为水体中氮磷比相对较低(按质量算小于 29:1)时,蓝藻的优势地位往往会加强^[24]。本研究中,2-MIB 质量浓度与总磷质量浓度显著正相关($P<0.05$),而与氮磷比极显著负相关($P<0.01$),水库水体表现出一定程度的磷限制。同时,夏季温度升高促使微生物生理活动加剧,底泥中磷酸盐可能会释放至上覆水,有利于丝状蓝藻的生长及 2-MIB 产生^[29]。虽然磷被认为是藻类生长及产嗅的限制因素,但后来的研究更多地强调了氮限制在水库生态系统中的普遍性^[24]。可利用氮的类型对蓝藻丰度有很大影响,与还原无机氮(NH_4^+)相比,氧化无机氮(NO_3^-)对于不同的浮游植物具有不同的能量成本和同化率,而蓝藻更喜欢还原形式的氮^[24]。Perkins 等^[30]的研究确定了氨氮是蓝藻产生 2-MIB 与 GSM 的关键触发因素,这一发现支持了氨氮作为触发因素刺激蓝藻生产力,进而刺激蓝藻通过异戊二烯途径合成 2-MIB 与 GSM 的理论。在本研究中,5~7 月 2-MIB 质量浓度与氨氮负相关,可以观察到 2-MIB 质量浓度到达峰值时,氨氮质量浓度低于 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,说明除总磷之外,氨氮也可能是限制假鱼腥藻产嗅的因素之一。当水体中可利用氨氮不足时,蓝藻还能通过酶促反应利用硝态氮,但这些酶促反应需要细胞能量,因此会影响细胞生长和产嗅能力^[24],6 月份 2-MIB 与硝态氮质量浓度骤降可能与之有关。此外,夏季较高的温度和较长的水力停留时间与反硝化速率的增加有关,这些因素的共同作用也可能是导致水库硝态氮减少的另一个原因^[30]。而在蓝藻消亡分解过程中,蓝藻中的营养盐会快速向水体中释放,从而导致 6~8 月份水库水体氨氮和总磷质

量浓度升高^[31]。同时还观察到水库水体的硝氮比与 2-MIB 质量浓度几乎保持相同的关系,且在 2-MIB 暴发前硝氮比一直较低,这与 Howard^[32]的研究吻合,他认为低氮磷比有利于蓝藻的生长和保持优势,而低硝氮比促进了 T&O 化合物的产生。

2.5 展望

尽管本研究确定了目标水库 2-MIB 的来源,但 2-MIB 与水环境因子的关系尚未被揭示。后续的研究将在积累更多年份的环境参数和嗅味物质数据后,识别出影响 2-MIB 的关键环境因子并以此构建预警模型,为水库的管理提供嗅味物质防控指导。

3 结论

(1)基于 *mic* 基因的高通量测序表明某南方水库中 2-MIB 生产者主要为假鱼腥藻。

(2)2023 年间 2-MIB 质量浓度呈单峰模式,于春末夏初达到峰值。水温、总磷和氨氮是影响 2-MIB 变化的重要因子,其中氨氮是高质量浓度 2-MIB 的限制因子。

(3)嗅味暴发时,2-MIB 质量浓度在不同水层存在一定差异,且降雨冲刷会影响表层水体中 2-MIB 的质量浓度,但对供水层和底层影响不大。

参考文献:

- [1] ZUO Z J. Emission of cyanobacterial volatile organic compounds and their roles in blooms[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2023, 14:1097712.
- [2] ZHENG T F, ZHOU M, YANG L, et al. Effects of high light and temperature on *Microcystis aeruginosa* cell growth and β -cyclocitral emission[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 192:110313.
- [3] YANG X K, LU X X. Drastic change in China's Lakes and reservoirs over the past decades[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4:6041.
- [4] 朱广伟, 许海, 朱梦圆, 等. 我国城市水源水库水质风险成因及对策[J]. *湖泊科学*, 2024, 36(1):1-16.
- [5] SUN D L, YU J W, YANG M, et al. Occurrence of odor problems in drinking water of major cities across China [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2014, 8(3):411-416.
- [6] JÜTTNER F, WATSON S B. Biochemical and ecological control of geosmin and 2-methylisoborneol in source waters[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2007, 73(14):4395-4406.
- [7] ABD EL-HACK M E, EL-SAADONY M T, ELBESTAWY A R, et al. Undesirable odour substances (geosmin and 2-methylisoborneol) in water environment: sources, impacts and removal strategies[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2022, 178:113579.
- [8] OLSEN B K, CHISLOCK M F, WILSON A E. Eutrophication mediates a common off-flavor compound, 2-methylisoborneol, in a drinking water reservoir[J]. *Water Research*, 2016, 92:228-234.
- [9] WU T H, ZHU G W, ZHU M Y, et al. Effects of algae proliferation and density current on the vertical distribution of odor compounds in drinking water reservoirs in summer[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 288:117683.
- [10] YUE Z Y, CHEN Y R, WU Z X, et al. Thermal stratification controls taste and odour compounds by regulating the phytoplankton community in a large subtropical water source reservoir (Xin'anjiang Reservoir) [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, 466:133539.
- [11] WU T H, ZHU G W, WANG Z C, et al. Seasonal dynamics of odor compounds concentration driven by phytoplankton succession in a subtropical drinking water reservoir, southeast China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 425:128056.
- [12] 贾泽宇. 水库型水源地产嗅藻生长驱动因子解析与调控研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.
- [13] SURUZZAMAN M, CAO T X, LU J P, et al. Evaluation of the MIB-producing potential based on real-time qPCR in drinking water reservoirs[J]. *Environmental Research*, 2022, 204(Part C):112308.
- [14] 杨敏, 于建伟. 饮用水嗅味问题: 来源与控制[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- [15] 简文浩, 马兴冠. 红升水库藻源性嗅味问题解析[J]. *环境工程学报*, 2022, 16(12):3975-3983.
- [16] 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.
- [17] CAO T X, FANG J, JIA Z Y, et al. Early warning of MIB episode based on gene abundance and expression in drinking water reservoirs[J]. *Water Research*, 2023, 231: 119667.
- [18] QIU P F, CHEN Y X, LI C J, et al. Using molecular detection for the diversity and occurrence of cyanobacteria and 2-methylisoborneol-producing cyanobacteria in an eutrophicated reservoir in Northern China[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 288:117772.

- [19] SU M, ZHU Y P, JIA Z Y, et al. Identification of MIB producers and odor risk assessment using routine data: a case study of an estuary drinking water reservoir[J]. *Water Research*, 2021, 192:116848.
- [20] DENG X W, QI M, REN R, et al. The relationships between odors and environmental factors at bloom and non-bloom area in Lake Taihu, China[J]. *Chemosphere*, 2019, 218:569-576.
- [21] 陈志文, 徐亚楠, 苏命, 等. 某水源水库臭味来源及潜在产嗅藻分布特征解析[J]. *环境工程学报*, 2020, 14(11):3063-3071.
- [22] ZHANG T, ZHENG L L, LI L, et al. 2-Methylisoborneol production characteristics of *Pseudanabaena* sp. FACHB 1277 isolated from Xionghe Reservoir, China[J]. *Journal of Applied Phycology*, 2016, 28(6):3353-3362.
- [23] WANG H L, LI L, CHENG S Z, et al. Production and release of 2-MIB in *Pseudanabaena*: effects of growth phases on cell characteristics and 2-MIB yield[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2024, 274: 116198.
- [24] HOOPER A S. Environmental triggers for geosmin and 2-MIB production in drinking water reservoirs[D]. Cardiff: Cardiff University, 2023.
- [25] 朱慧. 天目湖沙河水库臭味物质时空变化及其影响因素[D]. 无锡: 江南大学, 2023.
- [26] 吴天浩. 水源地水库异味物质分布规律及影响因素[D]. 北京: 中国科学院大学, 2021.
- [27] 张婷. 产土霉异味蓝藻的生态学调查及其生理学特性的研究[D]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2008.
- [28] SHEN Q Y, WANG Q, MIAO H C, et al. Temperature affects growth, geosmin/2-methylisoborneol production, and gene expression in two cyanobacterial species[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(8):12017-12026.
- [29] 任俊宏, 成小英, 石亚东, 等. 太湖贡湖湾 2-甲基异茨醇(2-MIB)时空变化特征及影响因子[J]. *湖泊科学*, 2024, 36(3):717-730.
- [30] PERKINS R G, SLAVIN E I, ANDRADE T M C, et al. Managing taste and odour metabolite production in drinking water reservoirs: the importance of ammonium as a key nutrient trigger[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 244:276-284.
- [31] 郭西亚, 常闻捷, 杨志伟, 等. 蓝藻消亡分解过程中的水质变化及营养盐释放特征[J]. *中国环境监测*, 2024, 40(4):143-152.
- [32] HOWARD C S. Taste and odor event dynamics of a midwestern freshwater reservoir[D]. Bloomington: Indiana University, 2020.

Source identification and cause analysis of odorous substances in a reservoir in southern China

WANG Yandong¹, LÜ Wenzhou¹, JING Xiao², QIAN Xincong², GAN Huihui¹

(1.School of Civil & Environmental Engineering and Geography Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Ningbo Water & Environment Group, Ningbo 315012, China)

Abstract: As the eutrophication of water bodies intensifies, the occurrence of odor in drinking water sources, primarily caused by the proliferation of filamentous cyanobacteria and resulting in the production of 2-methylisoborneol (2-MIB), has become increasingly frequent. This has led to numerous user complaints, significantly impacting the reputation of water utility companies. To identify the sources and causes of odor compounds in a reservoir-type drinking water source in southern China, a year-long water quality monitoring study was conducted from January 2023 to December 2023. The study analyzed common odor compounds, their concentrations, and the associated algae. The results indicated that 2-MIB was the primary odor compound in the reservoir, with its concentration exhibiting seasonal variation, peaking at $144 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ in late spring and early summer. High-throughput sequencing of the *mic* functional gene identified *Pseudanabaena* as the main producer of 2-MIB in the reservoir. Furthermore, correlation analysis between water quality and odor compounds revealed that the nitrate to ammonia ratio, ammonia nitrogen, water temperature, and total phosphorus were the main environmental factors influencing the concentration of 2-MIB in the reservoir.

Key words: reservoir; drinking water source area; odorous substances; source identification; cause analysis

(责任编辑 韩 超)