

# 城市景观水体藻源异味物质的 时空分布、来源及其驱动因子——以武汉月湖为例<sup>1</sup>

陈晓国, 江天兵, 王思怡, 王淑芳, 杨红刚\*

(武汉理工大学资源与环境工程学院, 湖北武汉 430070)

**【摘要】**: 藻源异味污染广泛存在于世界各地水体, 严重影响水质和水体的景观价值。为研究城市景观水体月湖的藻源异味污染时空变化、来源及驱动因子, 于2021年3月至2022年2月进行了为期1a的逐月采样, 分析了水中4种主要藻源异味物质2-甲基异莰醇, 土臭素, 3-环柠檬醛和3-紫罗兰酮的胞外浓度, 以及水质指标和藻类组成, 采用spearman相关性分析、冗余分析和偏最小二乘结构方程模型(PLS-SEM)对异味来源和驱动因子进行了研究。结果表明, 月湖近岸区域受藻源异味物质2-甲基异莰醇和土臭素污染较严重, 年平均浓度高达35.04和8.58 n&/Lo高浓度污染主要出现在6~9月。2-甲基异莰醇可能主要来自Oscillatoria, Pseudanabaena和Anabaena; 土臭素可能来自Anabaena, AphanizomenonPseudanabaena和Oscillatoria;而3-环柠檬醛和3-紫罗兰酮并非主要来自藻类。PLS-SEM结果表明, 气象条件(辐射和蒸发)是月湖藻源异味的主要驱动力, 而养分(总氮和总磷)的影响相对较弱。气象条件除了对藻类有显著的直接影响外, 还对养分和藻类之间的关系有显著的正向调节作用, 但对藻类和异味物质之间的关系没有调节作用。这些结果表明, 气象条件主要是通过影响藻类的生长, 而非直接影响异味的生成来驱动异味污染。

**【关键词】**: 月湖; 藻类; 异味; 来源; 驱动

**【中图分类号】**: X524 **【文献标识码】**: A **【文章编号】**: 1004-8227 (2023) 11-2383-10

DOI: 10.11870/cjlyzyhj202311013

浮游藻类是水生态系统的重要组成部分, 在水生态系统元素循环中扮演着重要角色。有些藻类会产生异味物质, 其大量繁殖会对水质、水产品质量、水体景观功能, 甚至人类健康产生负面影响[1]。藻类产生的200余种异味物质中, 土臭素(GSM)和2-甲基异莰醇(2-MIB)的出现频率最高, 污染最为严重[2]。二者均具有强烈土腥味, 且嗅觉阈值极低 (<10 ng/L)[3],此外, 藻类还能产生 $\beta$ -环柠檬醛( $\beta$ -cyclocitral)和 $\beta$ -紫罗兰酮( $\beta$ -ionone)[4]。由于异味物质在极低浓度时即可造成人体感官不适, 因此异味污染已经成为饮用水、水产养殖、休闲娱乐等相关行业的一个重要问题[5,6]。考虑到这些异味物质对水体功能的影响, 我国2023年4月1日实施的《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2022)[7]已经将GSM和2-MIB列入扩展检测指标。

异味污染不仅出现在富营养化水体, 在寡营养水体也会出现异味污染问题, 说明异味污染问题要比之前预期的严重[3]。由于环境中异味物质的浓度极低, 使得其难以去除, 传统的处理工艺在去除异味方面效果有限。相比于末端处理, 从源头上控制防止其产生对于异味的防治可能更为有效。而深入了解水体中异味物质的来源和驱动因素, 对于制定有效的防控管理策略至关重要[8]。

<sup>1</sup> 收稿日期: 2023-04-07; 修回日期: 2023-05-15

基金项目: 武汉市生态环境局汉阳区分局科研项目(2020)

作者简介: 陈晓国(1974~), 男, 博士, 主要研究方向为水处理、环境微生物学. E-mail: xiaoguo\_chen@whut.edu.cn

\* 通讯作者 E-mail: yhg0722@163.com

已有的研究表明,不同水体异味物质的主要种类和来源有很大不同,异味污染的驱动因子也不同[5,9]。这些研究结果的不同,一方面可能是因为不同水体的理化性质和藻类群落结构不同,另外一方面也可能与研究采用的方法有关。水生态系统作为一个复杂的体系,各因素之间的关系相互交错,但是以往的研究多用简单的相关性分析或回归分析来分析异味的驱动因子[10,11]。作为一种路径分析方法,偏最小二乘结构方程模型(Partial Least Squares Structural Equation Modeling, PLS-SEM)在研究不同潜变量之间的因果关系方面,具有很强的应对高度复杂模型的能力和样本适应性[12]。利用 PLS-SEM 在研究不同潜变量之间因果关系方面的能力,可以更好地揭示异味的来源及其驱动因子。

城市景观水体作为城市的重要景观元素,不仅给人们提供了一个休闲场所,而且提高了城市生态系统的稳定性,利于城市生态的健康发展。而异味物质污染会影响水体的景观功能,给周边居民带来不良的感官体验。但是,以往关于异味的研究多集中在饮用水源、水库和水产养殖水体,对城市景观水体异味的分布、来源及驱动仍缺乏认识。

本文以武汉市典型的景观水体月湖作为研究对象,通过逐月采样,分析了月湖异味物质、理化指标和藻类群落组成,通过相关性分析、冗余分析(RDA)和 PLS-SEM 相结合的方法,结合文献报道的产异味藻类的信息,对月湖 4 种主要藻源异味物质 2-MIB、GSM、 $\beta$ -cyclocitral 和  $\beta$ -ionone 的来源及驱动因子进行了分析。所得结果能够加深对水体藻源异味物质来源及其驱动因子的认识。

## 1 材料与方方法

### 1.1 研究区域与样品采集

月湖(30° 33' 26" N~30° 33' 48" N,114° 14' 47" E~114° 15' 55" E)位于武汉市汉阳区月湖公园内,是一个典型的城市景观水体(图 1),面积 0.66 km<sup>2</sup>,平均水深 1.2 m。自 20 世纪 90 年代末以来,月湖开始出现严重富营养化,经过多年治理,月湖水体环境得到明显的改善,但仍然处于轻度富营养化状态[13],水体散发出明显的异味。考虑到景观水体近岸水柱中的异味污染更易被感知,从而影响水体的景观功能,因此在月湖水体近岸区选择了 7 个采样点(图 1),从 2021 年 3 月至 2022 年 2 月进行了为期一年的逐月采样监测。使用哈希双输入多参数水质分析仪(HACH HQ40D,美国)现场测定水温、pH 值和溶解氧(DO)。用采样器从水面以下 0.5 m 采集 1 L 水样装于 1L 的玻璃瓶中不留顶空,用于异味物质的测定,采集 1.5 L 湖水用于水质指标分析和藻类计数。

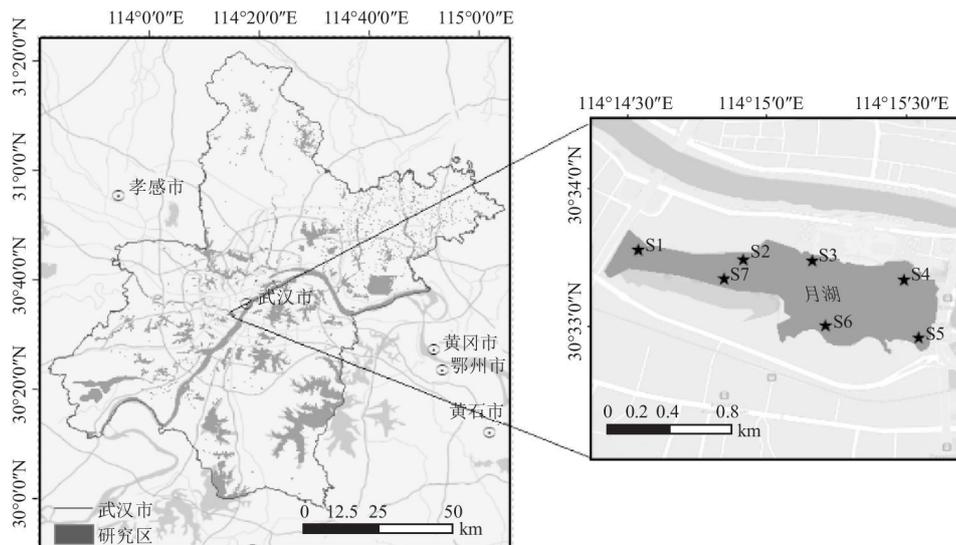


图 1 月湖采样点

## 1.2 分析方法

参照《水和废水检测分析方法》(第四版)[14]对水样的总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH<sub>3</sub>-N)、高锰酸盐指数(CODMn)和叶绿素 a (Chl-a)测定。浮游藻类使用鲁哥氏溶液固定,按照王愿珠等[15]的方法计数和鉴定,并参照《中国内陆水域常见藻类图谱》[16]鉴定到属。

利用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术(HS-SPME-GCMS)测定水样的胞外 2-MIB、GSM、 $\beta$ -cyclocitral 和  $\beta$ -ionone[17]。异味物质的标准品购自 Sigma-Aldrich(美国),SPME 富集异味物质的流程为:向 30 mL 顶空瓶中加入 20 mL 经 0.45  $\mu$ m 滤膜过滤的水样、6 g 氯化钠、0.2 mL 4  $\mu$ g/L 内标物质 2-异丁基-3-甲氧基吡嗪,密封后于 60°C 平衡 10 min,用固相微萃取纤维头(50/30  $\mu$ m DVB/CAR/PDMS, Supelco, 美国)萃取 30 min 后,手动进样到 GCMS 中。GCMS 以高纯氮气为载气,流量为 1 mL/min,进样口温度 250°C,初始柱温 60°C 保持 4 min,以 5°C/min 升至 180°C,再以 20°C/min 升至 250°C 保持,4 min。

## 1.3 气象数据来源

气象数据包括采样期间各月的月均辐射强度、净强度、降雨量、蒸发量、风速、气温、日照时数。数据来源于美国国家海洋和大气管理局(NOAA)国家环境信息中心网站(NCEI)(NOAA-National Centers for Environmental Information, <https://www.ncei.noaa.gov/>)。

## 1.4 统计方法

使用 ArcMap10.8 进行采样点图的绘制;利用 SPSS statistics 25 对实验数据进行统计分析,各指标之间的相关性采用 Spearman 检验,  $p < 0.05$  为显著相关;使用 Rstudio 4.2.2 对浮游藻类、异味物质、水质参数之间进行冗余分析(RDA)。使用 SmartPLS 软件通过 PLS-SEM 研究异味物质的驱动因子。

# 2 结果与分析

## 2.1 月湖藻源异味的分布特征

月湖全年各个监测点位均有异味物质的检出,且 2-MIB、GSM 和  $\beta$ -cyclocitral 的检出率高达 100%, $\beta$ -ionone 的检出率也达到了 78.6%(见表 1)。在所有检测的 4 种异味物质中,2-MIB 浓度最高,平均浓度和中位数浓度均高于嗅味阈值(10 ng/L),超过嗅味阈值的比例为 86.9%。与 2-MIB 相比,GSM 的浓度略低,但其平均浓度(8.58 ng/L)和中位数浓度(6.11 ng/L)也超过了其嗅味阈值(4 ng/L),超过嗅味阈值样本的比例高达 70.2%。 $\beta$ -cyclocitral 和  $\beta$ -ionone 在大多数样本中的含量较低。只有 7.1%样本的  $\beta$ -ionone 高于嗅味阈值,而所有样本的  $\beta$ -cyclocitral 浓度均未超过嗅味阈值。

表 1 四种异味物质的污染特征

异味物质	检出频率 (%)	检出浓度(ng/L)			
		范围	中位数	平均值	超嗅味阈值样本比例(%)
MIB	100	4.49~141.16	22.94	35.04	86.9
GSM	100	1.63 ~56.07	6.11	8.58	70.2
$\beta$ -cyclocitral	100	0.3 ~68.96	3.09	4.88	0
$\beta$ -ionone	78.6	0 ~143.52	2.38	4.83	7.1

月湖藻源异味分布随季节的变化如图 2 所示。异味总浓度有明显的月际差异，夏季(6~8 月)和初秋(9 月)的浓度最高，其次是春季，冬季异味物质的浓度最低。除 2 月以外，全年 2-MIB 占四种藻源异味的比例均为最高，且大部分月份 2-MIB 比例大于 60%。全年各月份 GSM 的占比为 8.7~30.5%，高于  $\beta$ -cyclocitral 和  $\beta$ -ionone 的 3.2~37.2%和 1.3~21.7%。

四种异味物质出现的主要季节也有所不同。2-MIB 主要出现在春夏和初秋季节，浓度呈先增加后下降的趋势，6~9 月浓度最高，为  $54.39 \pm 27.24 \sim 58.37 \pm 22.76$  ng/L，2 月最低，浓度为  $7.86 \pm 1.61$  ng/L。除了在晚冬(2 月)和初春(3 月)的个别点以外，其他时间和采样点的 2-MIB 均超过嗅味阈值。GSM 也有类似规律，高浓度主要出现在 7~8 月，7 月浓度最高达到  $30.69 \pm 12.17$  ng/L，4、5、7 和 8 这 4 个月份所有采样点均超过嗅味阈值。 $\beta$ -cyclocitral 和  $\beta$ -ionone 均为 7 月份最高，平均浓度为  $18.09 \pm 22.97$  和  $29.23 \pm 52.40$  ng/L，其他月份远低于 7 月，且大部分月份低于 7 ng/L。 $\beta$ -ionone 只有个别采样点在 3 和 7 月超过嗅味阈值，而全年所有采样点  $\beta$ -cyclocitral 均低于嗅味阈值。奇怪的是，5 月份 2-MIB 和 GSM 的浓度异常，GSM( $9.15 \pm 0.68$  ng/L)高于相邻月份( $6.03 \pm 1.45 \sim 6.88 \pm 3.75$  ng/L)，而 2-MIB( $17.3 \pm 6.72$  ng/L)低于相邻月份( $51.23 \pm 24.15 \sim 57.33 \pm 29.54$  ng/L)。这可能是受梅雨季节影响，雨水比较集中，一方面导致湖水中原有的异味物质被稀释，另一方面地表径流带入一些陆源的异味。

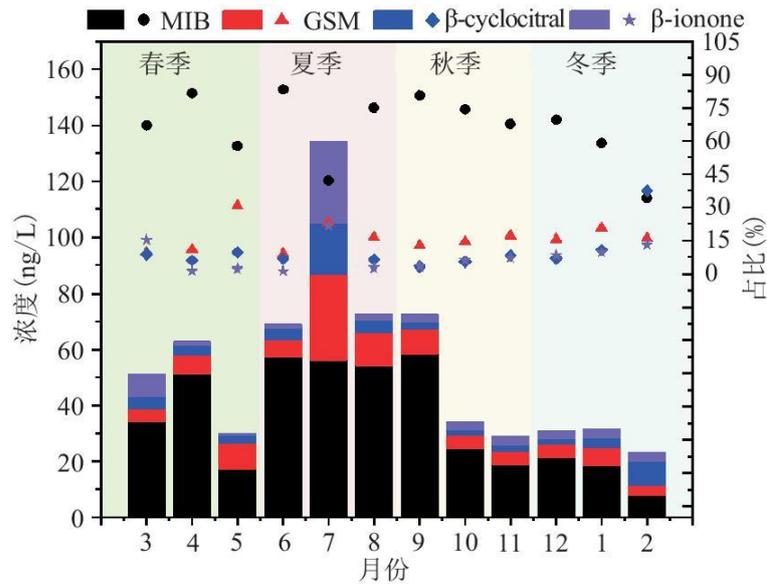


图2 异味物质的季节分布特征

注：柱状图表示异味物质的浓度，散点图表示异味物质的占比。

四种藻源异味的空间分布也有很大差异。2-MIB 空间分布随季节有明显的变化，夏季高浓度 2-MIB 主要出现在北部的几个采样点(1~4 点),冬季主要出现在南面的采样点(5~7 点)。与季节性主导风向较为一致，高浓度 2-MIB 主要处于下风向。与 2-MIB 不同，GSM 的空间差异不大。 $\beta$ -cyclocitral 和  $\beta$ -ionone 浓度有明显的空间分布特点，但空间分布受季节影响较小。 $\beta$ -cyclocitral 主要出现在湖泊的东部 2 个采样点(1 和 7),其他采样点只有夏季有较高浓度。 $\beta$ -cyclocitral 最高浓度出现在夏季的 7 位点，浓度为 68.96 ng/L,远高于其他位点或月份。 $\beta$ -ionone 主要出现在南部的几个采样点(5,6,7)且高浓度主要出现在 3 和 7 月，其他月份均低于嗅味阈值。

## 2.2 异味物质与环境因素的相关性分析结果

Spearman 相关性分析结果表明,2-MIB 和 GSM 均与蓝藻门藻类生物量高度相关( $\rho = 0.55, p < 0.01$ ;  $\rho = 0.45, p < 0.01$ )。并且 2-MIB 与其中的 Aphanizomenon( $\rho = 0.56, p < 0.01$ )、Merismopedia( $\rho = 0.48, p < 0.01$ )、Pseudanabaena( $\rho = 0.47, p < 0.01$ )、Oscillatoria( $\rho = 0.43, p < 0.01$ )、Anabaena( $\rho = 0.39, p < 0.01$ )和 Arthrospira( $\rho = 0.38, p < 0.01$ )的生物量显著相关，GSM 与 Anabaena( $\rho = 0.49, p < 0.01$ )、Aphanizomenon( $\rho = 0.49, p < 0.01$ )、Pseudanabaena( $\rho = 0.48, p < 0.01$ )、Oscillatoria( $\rho = 0.29, p < 0.01$ )的生物量高度相关。此外，二者还与硅藻门 Synedra 的生物量高度相关。而  $\beta$ -cyclocitral 和  $\beta$ -ionone 与这些藻类的生物量均无显著正相关。所有这些藻属的生物量均与水温呈高度相关( $\rho = 0.39 \sim 0.77, p < 0.01$ ),其中大部分与气象条件(如月平均气温、日照强度、降雨量和月蒸发量)显著相关，但与  $\text{NH}_3\text{-N}$  呈负相关。其中一些藻类的生物量与 TN(Merismopedia、Arthrospira 和 Anabaena)或 TP(Aphanizomenon、Merismopedia 和 Arthrospira)呈高度相关。

对异味物质与水质指标 TN, TP,  $\text{NH}_3\text{-N}$ , CODMn, 水温, pH 和 DO 进行了相关性分析。结果表明，2-MIB 主要与水温( $\rho = 0.57, p < 0.01$ )和 TP( $\rho = 0.31, p < 0.01$ )有显著相关性，而 GSM 只与水温显著相关( $\rho = 0.53, p < 0.01$ )。 $\beta$ -cyclocitral 除了与水温显著相关外( $\rho = 0.3, p < 0.01$ ),还与 TN( $\rho = 0.25, p < 0.01$ )显著相关。而  $\beta$ -ionone 与温度呈显著负相关( $\rho = -0.32, p < 0.01$ )。

## 2.3 RDA 分析结果

根据去趋势对应分析结果,选择 RDA 分析分别研究了藻类组成对异味物质的影响和水质参数对藻类组成的影响,结果见图 3。蒙特卡洛置换检验表明,RDA1 轴与其他轴显著不同( $p < 0.01$ ),说明藻类组成与异味物质之间存在统计学上的显著关系。如图 3a 所示,藻类组成对 4 种异味物质的总解释度为 81.41%,其中 RDA1 和 RDA2 分别贡献 74.95%和 22.18%。在所有藻属中,Aphanizomenon 对异味物质的条件解释度最高,为 11.93%,其次是 Oscillatoria、Synedra、Anabaena 和 Arthrospira,条件解释度分别为 8.26%、4.16%、2.97%和 1.56%。不同异味物质对藻类生物量的响应也有显著差异。2-MIB 与所有 7 个藻属呈正相关,而 GSM 主要与 Aphanizomenon、Merismopedia、Anabaena 和 Oscillatoria 相关。 $\beta$ -cyclocitral 和  $\beta$ -ionone 与这些藻类生物量没有相关性或相关性较弱。图 3b 显示了藻类组成与水质参数之间的相关性。水质参数对藻类组成的总解释度为 41.47%,其中 RDA1 和 RDA2 分别贡献了 76.5%和 15.33%。在所有水质参数中,水温具有最大的条件解释度,为 25.06%,其次是 pH(3.44%)和 DO(1.80%)。营养物质 TN、TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$  和 TN/TP 分别解释了 5.58%、1.02%、1.02%和 1.03%。

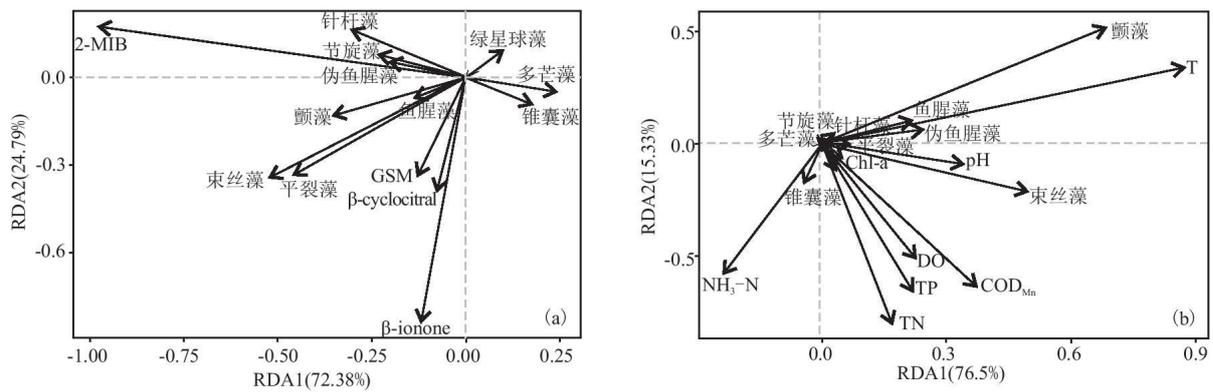


图 3 月湖异味物质、优势藻类和环境变量的冗余分析(RDA)排序

#### 2.4 异味物质驱动力的 PLS-SEM 分析

通过构建 PLS-SEM 模型,研究了藻类和环境因素对藻源异味的驱动作用,结果如图 4 所示。该模型包括一个外生潜变量(营养物质)、两个中介潜变量(藻类和 Chl-a)、3 个内生潜变量(GSM、2-MIB、 $\beta$ -cyclocitral 和  $\beta$ -ionone)和一个调节变量(气象)。藻类潜变量由与异味物质显著相关的藻属组成,且同时满足荷载 $>0.5$ 和  $p < 0.05$ 。由于其他气象指标共线性问题,所以气象调节变量中仅包含辐射和蒸发。测量模型的 Cronbach's alpha  $> 0.8$ 、平均提取方差(AVE) $> 0.5$ 、组合信度(CR) $> 0.8$ 和异质单一性比(HTMT) $< 0.85$ ,说明测量模型满足可靠性和有效性要求。结构模型的拟合优度(GoF)为 0.52( $> 0.5$ ),表明该模型有效。

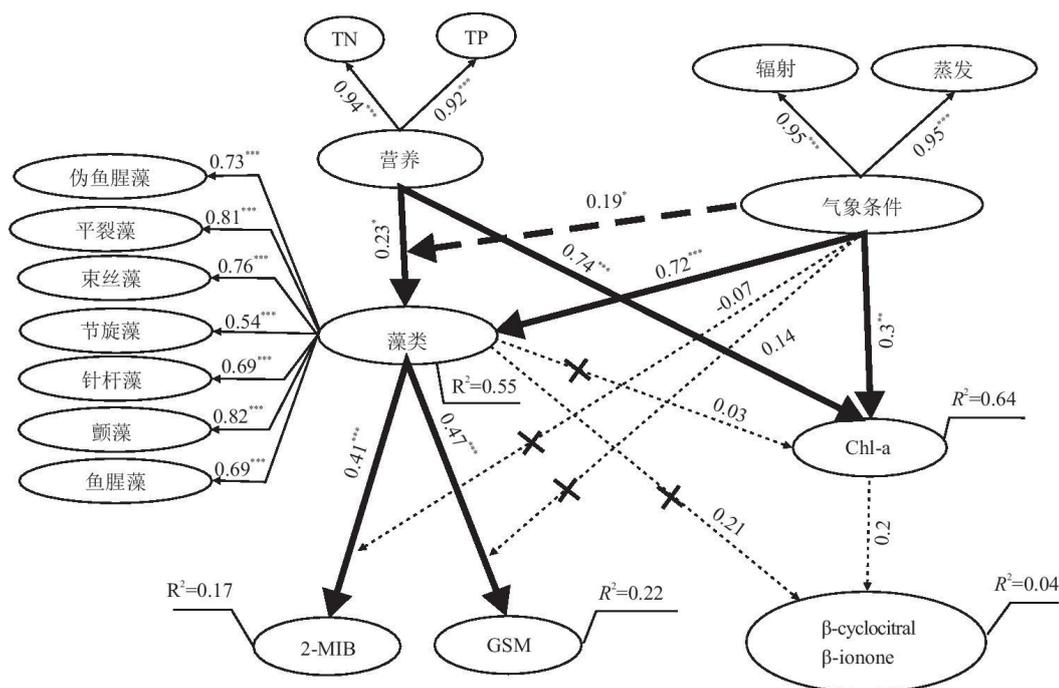


图 4 PLS-SEM 分析结果

注: \*表示  $p < 0.05$ , \*\*表示  $p < 0.01$ , \*\*\*表示  $p < 0.001$ .

该模型对 Chl-a、藻类、GSM、和 2-MIB 的方差解释率分别为 64%、54.9%、22.4%和 16.9%,而对  $\beta$ -cyclocitral 和  $\beta$ -ionone 的方差解释仅为 3.9%。潜变量藻类与 GSM ( $\beta = 0.47, p < 0.001$ )和 2-MIB ( $\beta = 0.41, p < 0.001$ )显著相关,而潜变量藻类和 Chl-a 均与  $\beta$ -cyclocitral 和  $\beta$ -ionone 无显著相关性 ( $\beta = 0.2, p = 0.294$ ;  $\beta = 0.2, p = 0.307$ )。

营养物质显著影响潜变量藻类 ( $\beta = 0.23, p < 0.05$ )和 Chl-a ( $\beta = 0.74, p < 0.001$ ),但对潜变量藻类的影响不如对 Chl-a 的影响强。营养物质通过藻类的中介作用间接影响 GSM ( $\beta = 0.11, p < 0.05$ ),但对 2-MIB 没有显著影响 ( $\beta = 0.09, p = 0.07$ )。

气象条件(辐射、蒸发)对潜变量藻类 ( $\beta = 0.72, p < 0.001$ )和 Chl-a ( $\beta = 0.3, p = 0.004$ )有很大影响,并通过藻类的中介作用对 GSM 和 2-MIB 产生显著影响 ( $\beta = 0.34, p < 0.001$ ;  $\beta = 0.3, p < 0.001$ )。此外,气象条件对营养物质与藻类的关系有显著调节作用 ( $\beta = 0.19, p < 0.05$ ),而对藻类与两种异味物质(2-MIB 和 GSM)的关系无显著调节作用。

### 3 讨论

#### 3.1 月湖异味污染特征

为期一年的逐月调查结果表明,月湖藻源异味污染严重。污染主要以 2-MIB 和 GSM 为主,  $\beta$ -ionone 和  $\beta$ -cyclocitral 污染影响不大。全年 2-MIB 和 GSM 超嗅味阈值的样品比例高达 86.9%和 70.2%,全年大部分月份 2-MIB 月均占比大于 60%,GSM 占比为 10%~20%。 $\beta$ -ionone 和  $\beta$ -cyclocitral 污染程度较轻,主要集中在 7 月。由于  $\beta$ -cyclocitral 嗅味阈值较高,月湖所有样本  $\beta$ -cyclocitral 浓度均未超出嗅味阈值,不会造成异味污染。

不同水体报道的主要异味种类及浓度有很大区别。与我们的结果类似, Wu 等[18]发现 7 个水库的异味主要以 2-MIB 和 GSM 为主,但平均浓度仅为 2.68 ng/L 和 3.64 ng/L。且不同水库也有所不同,7 个水库都检测到了 GSM,但是有 3 个水库没有检测

到 2-MIB[18]。美国的 Eagle Creek 水库同时存在 2-MIB 和 GSM 污染,且浓度较高,平均为 10.8 和 12.6 ng/L [19]。而在瑞士 3 个不同营养程度的湖泊中,GSM 为主要异味物质,浓度为 1.5~19.0 ng/L [8]。GSM 也是养殖水体中主要的异味物质,浓度为 1.39~6.00 ng/L [20]。Zhang 等[21]发现,松花湖异味以 GSM 为主,平均浓度很低(<10 ng/L),而巢湖则以  $\beta$ -ionone 为主(95.2 ng/L),2-MIB 很低只有 2.30 ng/L;太湖也以  $\beta$ -ionone 为主,平均浓度高达 723.15 ng/L,2-MIB 和 GSM 均低于 10 ng/L。这些结果说明,不同水体由于功能不同,水文和水质特点各异,可能会导致主要异味种类和浓度有很大区别。总体来讲,月湖异味污染处于较高水平。月湖作为景观水体,近岸水样异味污染更易被人感知,对其景观功能影响很大,需要引起重视。

月湖的异味污染呈现明显的季节性变化,异味主要出现在温暖的夏季和初秋。其他水体也观察到了类似的现象[22],说明温暖季节可能更有利于 GSM 和 2-MIB 的生成,异味污染风险较高。月湖中 2-MIB 浓度的空间分布受季节的影响,高浓度区域主要位于相应季节主导风向的下风处。这可能是由于 2-MIB 主要来源于浮游藻类,浮游藻类易上升到水面,可随风移动并聚集在下风区,导致该区域异味浓度较高。然而 GSM 并未出现类似的规律,这可能是由于产生 2-MIB 和 GSM 的藻类物种不同。许多产生 GSM 的藻类是底栖或附着型[23],受风向影响较小。

### 3.2 月湖藻源异味的来源

我们的研究表明,月湖水体中 4 种异味物质的来源并不相同,2-MIB 和 GSM 主要来自藻类,而  $\beta$ -cyclocitral 和  $\beta$ -ionone 的主要来源不是藻类。相关性分析和冗余分析结果均表明,2-MIB 主要与蓝藻门的 *Aphanizomenon*, *Merismopedia*, *Pseudanabaena*, *Oscillatoria*, *Anabaena*, *Arthrospira* 以及硅藻门 *Synedra* 的生物量高度相关。PLS-SEM 结果表明,这些藻对 2-MIB 有重要贡献。此前文献报道 *Oscillatoria* 和 *Pseudanabaena* 均可以产 2-MIB,且有些水体浮游型 *Oscillatoria*[24]和 *Pseudanabaena*[25]是主要的 2-MIB 贡献者。相比之下,*Anabaena* 产 2-MIB 的报道不多[26]。此外,相关性分析和 RDA 分析结果表明,*Aphanizomenon* 与 2-MIB 高度相关,类似的结果在 Tianmuhu 水库也有报道( $r=0.51$ )[27]。尽管 *Aphanizomenon* 可以产 GSM,甚至是某些水体 GSM 的主要来源[28],但是目前还没有 *Aphanizomenon* 产 2-MIB 的报道,所以 *Aphanizomenon* 对 2-MIB 的贡献尚不清楚。目前也没有 *Merismopedia*,*Arthrospira* 和 *Synedra* 产异味的报道。综合以上结果可知,月湖水体 2-MIB 很可能来自 *Oscillatoria*, *Pseudanabaena* 和 *Anabaena*。相关性分析和 RDA 分析结果表明,GSM 与 *Anabaena*, *Aphanizomenon*, *Pseudanabaena*, *Oscillatoria* 和 *Synedra* 的生物量高度相关,PLS-SEM 结果表明这些藻与 GSM 有显著的因果关系,且这些藻中的 *Anabaena*, *Aphanizomenon*, *Pseudanabaena* 和 *Oscillatoria* 均可以产 GSM [2],因此可以推测它们可能是月湖 GSM 的主要贡献者。

已有研究表明,真核藻类和原核藻类都可以产  $\beta$ -ionone 和  $\beta$ -cyclocitral。如真核藻类 *Scenedesmus*,*Dinobryon*,*Uroglena* 和 *Ulothrix* 以及原核藻类 *Microcystis* 均可以产生  $\beta$ -cyclocitral[4,29]。而月湖水体中也检测到了大量的 *Scenedesmus* 和 *Dinobryon*,以及少量的 *Microcystis*,但是这些藻类与  $\beta$ -cyclocitral 并无显著相关性。同样,月湖水体中也检测到了能产  $\beta$ -ionone 的真核藻类 *Synura* 和原核藻类 *Anabaena* 和 *Aphanizomenon*[4],但是这些藻类与  $\beta$ -ionone 也没有显著相关性。RDA 和 PLS-MES 结果表明, $\beta$ -ionone 和  $\beta$ -cyclocitral 与藻类没有因果关系。并且  $\beta$ -cyclocitral 和  $\beta$ -ionone 的空间分布特征不随季节性风向变化。这些结果说明, $\beta$ -cyclocitral 和  $\beta$ -ionone 主要不是由藻类产生。

与月湖不同,阳澄湖 2-MIB 主要来自 *Microcystis* 和 *Phormidium*[22],巢湖的异味物质可能来自 *Microcystis*、*Anabaena* 和 *Actinomyces*[21],而太湖的 *Dolichospermum*、*Oscillatoria* 和 *Aphanizomenon* 更可能是 2-MIB 的来源 [30]。不同水体异味来源对这种差异可能与不同水体水文和水质条件的差异较大,优势藻类不同有关。

### 3.3 月湖藻源异味污染的驱动力

此前研究表明,N 和 P 等营养元素是很多水体藻源异味污染的主要驱动因子[31,32,33]。我们的研究结果也表明,营养元素尤其是 P 对月湖藻源异味 2-MIB 和 GSM 污染有一定的驱动作用,但是气象条件是月湖藻源异味产生的主要驱动力。

4种异味物质仅有2-MIB与TP有显著正相关,且TP和TN对GSM只有较小的间接影响( $\beta=0.11, p<0.05$ ),而对2-MIB没有显著间接影响( $\beta=0.09, p=0.07$ )。这些结果说明营养元素对异味的贡献较小,这可能与月湖的N和P营养浓度较高有关。对于富营养水体,营养并不是影响藻类的主要因素,因此对藻源异味的影响也就不显著[34]。

PLS-SEM和相关分析结果表明,辐射和蒸发等气象条件是月湖藻源异味的最大驱动力。气象条件通过藻类的中介作用对GSM和2-MIB有很大贡献,总效应达到0.34和0.3,远高于营养对GSM和2-MIB的影响。此前已有研究表明,水温和光照对藻类产异味有很大影响[35,36],但是具体通过什么途径影响尚无报道。PLS-SEM表明,气象条件对藻类既有很强的直接影响,也对营养物质与藻类的关系有显著的正向调节作用,但是对藻类与异味的关系没有显著的调节作用。这些结果表明,气象主要是通过影响藻类生长,而不是通过影响藻类产生异味的过程来影响异味的产生。这也说明引起月湖2-MIB和GSM随季节变化的主要原因,可能是由于气象条件的变化影响了藻类的生物量和演替。温暖季节光照强、气温高,导致藻类生物量大量增加,有利于藻源异味的产生。因此,抑制温暖季节藻类的生长,是控制藻源异味的重要途径。

此前的文献报道,藻类产异味过程受光照和温度的影响[37]。较低或中等强度的光照有利于2-MIB和GSM基因的表达,高温和强光抑制表达,但是可促进2-MIB和GSM的释放[38,39,40]。由于水体中异味的分布不仅受基因表达调控的影响,同时还受吸附、降解、挥发等途径的影响[41],气象对这些过程的影响各不相同,导致这些作用相互抵消,这可能是造成月湖水体气候对藻类产异味没有调节作用的一个重要原因。

## 4 结论

(1)月湖近岸区域藻源异味以2-MIB和GSM为主,污染较为严重,浓度随季节变化明显。

(2)高浓度污染主要出现在温暖的夏季和初秋。*Oscillatoria*、*Pseudanabaena*和*Anabaena*可能是月湖2-MIB主要来源;*Anabaena*、*Aphanizomenon*、*Pseudanabaena*和*Oscillatoria*可能是GSM的主要来源;而 $\beta$ -cyclocitral和 $\beta$ -ionone并非主要来自藻类。

(3)气象条件是月湖藻源异味物质2-MIB和GSM的主要驱动因素,营养盐TP和TN的驱动影响有限。

(4)气象条件对营养元素和藻类之间的关系有显著的正向调节作用,对藻类和异味物质之间的关系没有调节作用,所以气象条件通过影响藻类的生长,而非直接影响异味的生成来驱动异味污染。

### 参考文献:

[1] ZHOU J, LEAVITT P R, ZHANG Y, et al. Anthropogenic eutrophication of shallow lakes : Is it occasional? [J]. Water Research, 2022, 221: 118728.

[2] DEVI A, CHIU Y T, HSUEH H T, et al. Quantitative PCR based detection system for cyanobacterial geosmin/2-methylisoborneol (2-MIB) events in drinking water sources : Current status and challenges [ J ]. Water Research, 2021 , 188: 116478.

[3] WATSON S. Aquatic taste and odor: A primary signal of drinking-water integrity [J] . Journal of Toxicology and Environmental Health PartA, 2004, 67(20/21/22) : 1779-1795.

[4] 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.

[5] 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.

[ 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 and Technology : a Journal of the International Association on Water Pollution Research , 2007, 55( 5) : 43-50.

[ 7 ]国家市场监督管理总局.生活饮用水卫生标准 GB 5749-2022, 2022.

State Administration for Market Regulation . Standards for Drinking Water Quality GB 5749-2022 , 2022.

[ 8 ] 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.

[ 9 ] WANG M, YOSHIMURA C, ALLAM A, et al. Causality analysis and prediction of 2 - methylisoborneol production in a reservoir using empirical dynamic modeling [ J ] . Water Research , 2019, 163: 114864.

[ 10 ] YOUN S J, KIM H N, YU S J, et al. Cyanobacterial occurrence and geosmin dynamics in Paldang Lake watershed, South Korea[ J ] . Water and Environment Journal, 2020 , 34 ( 4 ) : 634-643.

[ 11 ] YU C , SHI C, JI M, et al. Taste and odor compounds associated with aquatic plants in Taihu Lake: distribution and producing potential[ J ] . Environmental Science and Pollution Research , 2019, 26(33) : 34510-34520.

[ 12 ] HAIR J F, SARSTEDT M, RINGLE C M, et al. An assessment of the use of partial least squares structural equation modeling in marketing research [ J ] . Journal of the Academy of Marketing Science, 2012, 40( 3) : 414-433.

[13] 杨云梦.月湖沉积物-水界面营养盐的时空分布特征研究 [D].武汉：华中师范大学，2018.

YANG Y M. Study on the spatial - temporal distribution in the sediment-water interface of Yuehu Lake [ D ] . Wuhan: Central China Normal University, 2018 .

[14] 国家环境保护总局水和废水监测分析方法编委会.水和废水监测分析方法[M].北京：中国环境科学出版社，2002.

Committee for Water and Wastewater Monitoring and Analysis Methods of the People's Republic of China National Environmental Protection Agency. Water and waste water monitoring and analysis methods 4th ed. [ M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.

[15] 王愿珠, 张春梅, 毕永红, 等.南水北调中线干渠异味物质 时空动态及其影响因素[J].水生生物学报, 2022, 46(2): 149-159.

WANG Y Z, ZHANG C M, BI Y H, et al. Spatio-temporal pattern of odorous compounds and its influencing factors in the canal of the middle-route of south - to - north water diversion project[ J ] . Acta Hydrobiologica Sinica, 2022 , 46 ( 2 ) : 149 -159.

[16] 邓 坚.中国内陆水域常见藻类图谱[M].武汉：长江出版社，2012: 248.

- 
- DENG J. Atlas of Common Algae in Inland Waters of China [ M ] . Wuhan: Changjiang Publishing House, 2012 : 248.
- [17] 李林, 万 能, 甘南琴, 等.武汉大莲花湖异味化合物 日变化及其相关因子分析[J].水生生物学报, 2007, 31 (1): 112-118.
- LI L, WAN N, GAN N Q, et al. Studies on the diurnal variation of the odorous compounds and correlated factors in Lake Dalianhua, Wuhan[ J ] . Acta Hydrobiologica Sinica, 2007 , 31 (1): 112-118.
- [ 18 ] WU T, ZHU G, ZHU M, 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.
- [ 19 ] CLERCIN N A, DRUSCHEL G K. Influence of environmental factors on the production of MIB and geosmin metabolites by bacteria in a eutrophic reservoir [ J ] . Water Resources Research, 2019, 55(7) : 5413-5430.
- [20] XU L, XIONG B , PAN Y , et al. Relationship between concentrations of odorous compounds and biomass of phytoplankton and actinomycetes in freshwater ponds of Beijing, China[ J ] . Aquaculture International, 2010, 18( 3 ) : 245 - 254.
- [ 21 ] ZHANG R , QI F , LIU C, et al. Cyanobacteria derived taste and odor characteristics in various lakes in China: Songhua Lake , Chaohu Lake and Taihu Lake[ J ] . Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019 , 181: 499- 507.
- [ 22 ] WU A, WANG Y, FRIESE K, et al. Spatial and seasonal distribution of 2 - methylisoborneol in a large eutrophic shallow lake, China [ J ]. Water, Air, & Soil Pollution, 2021 , 232 (9) : 387.
- [23] JUTTNER 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.
- [ 24 ] MARTIN J F, IZAGUIRRE G, WATERSTRAT P. A planktonic Oscillatoria species from Mississippi catfish ponds that produces the off- flavor compound 2 - methylisoborneol [ J ]. Water Research, 1991, 25( 12) : 1447-1451.
- [25] IZAGUIRRE G, TAYLOR W D. A pseudanabaena species from Castaic Lake, California, that produces 2 - methylisoborneol [J]. Water Research, 1998, 32(5): 1673-1677.
- [26] OH H S , LEE C S , SRIVASTAVA A , et al. Effects of Environmental factors on cyanobacterial production of odorous compounds :Geosmin and 2 - methylisoborneol [ J ] . Journal of Microbiology and Biotechnology, 2017 , 27(7) : 1316- 1323.
- [27] WU T, ZHU G, WANG Z, 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.
- [28] DURRER M, ZIMMERMANN U, JUTTNER F. Dissolved and particle-bound geosmin in a mesotrophic lake ( lake Zurich): Spatial and seasonal distribution and the effect of grazers [ J ] . Water Research, 1999 , 33( 17 ) : 3628- 3636.
- [29] MORETTO J A S, DE FREITAS P N N, DE ALMEIDA E C, et al. Effects of different cultivation conditions on the production of p- cyclocitral and p - ionone in Microcystis aeruginosa [ J ]. BMC Microbiology, 2022, 22( 1) : 78-91.

- 
- [30] 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.
- [ 31 ] JIANG Y, CHENG B, LIU M, et al. Spatial and temporal variations of taste and odor compounds in surface water, overlying water and sediment of the western Lake Chaohu , China [ J ] . *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2016 , 96(2) : 186-191.
- [32] OLSEN B K, CHISLOCK M F, REBELEIN A, et al. Nutrient enrichment and vertical mixing mediate 2-methylisoborneol and geosmin concentrations in a drinking water reservoir [ J ] . *Water Supply*, 2017, 17(2) : 500-507.
- [ 33 ] 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.
- [ 34 ] LIU H, PAN D, ZHU M, et al. Occurrence and emergency response of 2 - methylisoborneol and geosmin in a large shallow drinking water reservoir[ J ] . *CLEAN -Soil, Air, Water*, 2016 , 44( 1): 63-71.
- [ 35 ] TUNG S C, LIN T F, YANG F C , et al. Seasonal change and correlation with environmental parameters for 2 - MIB in Feng -Shen Reservoir, Taiwan[ J ] . *Environmental Monitoring and Assessment*, 2008 , 145( 1 ) : 407-416.
- [ 36 ] WANG M, YOSHIMURA C, ALLAM A, et al. Causality analysis and prediction of 2 - methylisoborneol production in a reservoir using empirical dynamic modeling [ J ] . *Water Research* , 2019, 163: 114864.
- [ 37 ] SAADOUN I M K, SCHRADER K K, BLEVINS W T. Environmental and nutritional factors affecting geosmin synthesis by *Anabaena* SP. [ J ] . *Water Research*, 2001 , 35 ( 5 ) : 1209 -1218.
- [ 38 ] ZHANG T, LI L, SONG L, et al. Effects of temperature and light on the growth and geosmin production of *Lyngbya kuetzingii* (Cyanophyta) [ J ] . *Journal of Applied Phycology*, 2009, 21 (3) : 279-285.
- [ 39 ] WANG Z , XU Y, SHAO J, et al. Genes associated with 2 -methylisoborneol biosynthesis in cyanobacteria: Isolation, characterization , and expression in response to light[ J ] . *PLoS One*, 2011, 6( 4 ) : e18665.
- [ 40 ] JIA Z, SU M, LIU T, et al. Light as a possible regulator of MIB-producing *Planktothrix* in source water reservoir, mechanism and in - situ verification [ J ] . *Harmful Algae*, 2019 , 88 : 101658.
- [ 41 ] LI Z, YU J, YANG M, et al. Cyanobacterial population and harmful metabolites dynamics during a bloom in Yanghe Reservoir, North China [ J ] . *Harmful Algae*, 2010 , 9 ( 5 ) : 481 -488.