

乔茜, 高志霖, 曲军辉, 等. 太湖某水源地主要致嗅物质与环境因子相关性分析[J]. 净水技术, 2025, 44(7): 202-209.
 QIAO Q, GAO Z L, QU J H, et al. Correlation analysis of main odorous compounds and environmental factors in a water source of the Taihu Lake [J].
 Water Purification Technology, 2025, 44(7): 202-209.

太湖某水源地主要致嗅物质与环境因子相关性分析

乔茜¹, 高志霖¹, 曲军辉^{1,*}, 胡宗长²

(1. 国家城市供水水质监测网无锡监测站<无锡市政公用检测有限公司>, 江苏无锡 214000; 2. 无锡市水务集团有限公司, 江苏无锡 214000)

摘要 【目的】近年来,太湖地区水源地嗅味异常问题呈现频发状态,探究水源地嗅味物质变化规律和来源,对提高水厂嗅味突发事件应急能力有重要意义。【方法】文章以2022年太湖某饮用水源地A为研究对象,对该水源水中2-甲基异莰醇(2-MIB)、土臭素(GSM)、 β -环柠檬醛(β -cyc)和 β -紫罗兰酮(β -ion)4种常见致嗅物质以及藻类、总磷、总氮、温度等环境指标进行检测,并通过环境因子相关性分析,对4种致嗅物质的变化规律和来源进行分析。【结果】太湖水源地在高温期以蓝藻为优势藻种,其中可致嗅藻种伪鱼腥藻和微囊藻数量在蓝藻中占比最高可达44.4%和97.7%,水源地主要嗅味物质为2-MIB。Pearson相关性分析结果表明,2-MIB和GSM浓度变化与伪鱼腥藻数量呈显著正相关, β -cyc浓度与微囊藻数量呈显著正相关。嗅味物质变化节点与藻类数量并不完全一致,存在时空差异性。引水工程会显著改变太湖水源地理化条件,但氮、磷在藻类生长和嗅味物质变化中非关键因素。【结论】太湖水源地4种致嗅物质的变化与藻的种类和数量密切相关,同时引水工程 and 高温、大风等异常气象条件会加剧水体嗅味问题。水厂应综合考虑气象变化和藻类生长状况,对可能突发的嗅味异常事件做好应急准备工作。

关键词 2-甲基异莰醇(2-MIB) 土臭素(GSM) β -环柠檬醛(β -cyc) β -紫罗兰酮(β -ion) 藻类 变化规律 来源

中图分类号: X52 **文献标志码**: A **文章编号**: 1009-0177(2025)07-0202-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.07.024

Correlation Analysis of Main Odorous Compounds and Environmental Factors in a Water Source of the Taihu Lake

QIAO Qian¹, GAO Zhilin¹, QU Junhui^{1,*}, HU Zongzhang²

(1. Wuxi Monitoring Station of National Urban Water Quality Monitoring Network <Wuxi Municipal Public Testing Co., Ltd. >, Wuxi 214000, China;

2. Wuxi Water Group Co., Ltd., Wuxi 214000, China)

Abstract [Objective] In recent years, the odor problem in water source area of the Taihu Lake has to occur frequently. Exploring the changed rules and source of odorous compounds in water source area is of great significance to improving the emergency response capacity of the water treatment plants (WTPs) for odor emergencies. [Methods] Taking the drinking water source A of Taihu Lake in 2022 as the research object, 2-methylisoborneol (2-MIB), geosmin (GSM), β -cyclocitral (β -cyc), β -ionone (β -ion) of four odorous compounds, as well as environmental indices such as algae, total phosphorus, total nitrogen, and temperature were detected. The changes and sources of four odorous compounds were preliminary analyzed by the correlation analysis of environmental factors. [Results] Cyanobacteria were the dominant algae in water source area of the Taihu Lake during the high temperature period, among which the number of odorous-causing algae species, *Pseudoanabaena* and *Microcystis* accounted for 44.4% and 97.7% of the Cyanobacteria, respectively. The main odorous compounds in water source area were 2-MIB. The Pearson correlation analysis result showed that the concentration changes of 2-MIB and GSM were significantly positively correlated with the number of *Pseudoanabaena*,

[收稿日期] 2024-05-14

[作者简介] 乔茜(1985—),女,研究方向为水质检测及城市供水水质保障,E-mail:421349173@qq.com。

[通信作者] 曲军辉(1991—),男,主要从事水质检测和环境微生物研究等工作,E-mail:1576710386@qq.com。

and the concentration of β -ion was significantly positively correlated with the number of *Microcystis*. The nodes of odorous compounds changes were not completely consistent with the number of algae, and there were spatial and temporal differences. Water diversion project will change the physical and chemical conditions of the Taihu Lake water source area, but nitrogen and phosphorus were not the key factors in growth of algae and the change of odorous compounds. [**Conclusion**] The changes of four odorous compounds in water source of the Taihu Lake are closely related to the species and quantity of algae. At the same time, water diversion projects and abnormal meteorological conditions such as high temperature and strong wind will aggravate the problem of water odor. WTPs should comprehensively consider meteorological changes and algal growth conditions, and make active emergency preparations for possible odor emergencies.

Keywords 2-methylisoborneol(2-MIB) geosmin(GSM) β -cyclocitral(β -cyc) β -ionone(β -ion) algae change mechanism source

近年来,随着生活水平的提高,人民群众对高品质饮用水的需求不断增长,饮用水异味问题引起社会的广泛关注,也是水环境研究的热点问题之一。太湖饮用水源地检出的主要致嗅物质有 2-甲基异莰醇(2-MIB)、土臭素(GSM)、 β -环柠檬醛(β -cyc)和 β -紫罗兰酮(β -ion)4 种^[1]。2-MIB 和 GSM 是最常见的导致水体呈现土霉味的物质,主要来源于放线菌、细菌和蓝藻、硅藻等浮游藻类代谢产物^[2]。伪鱼腥藻在分类上属于蓝藻门蓝藻纲颤藻目伪鱼腥藻科,其对不同水体环境的适应能力较强,在生长过程中会产生大量异嗅物质 2-MIB,严重影响水体环境和供水水质^[3]。

此外,研究^[4]表明, β -cyc 和 β -ion 也是由藻类产生的主要藻源性臭味污染物。 β -cyc 和 β -ion 在不同浓度下分别呈现青草味、甘草味、木头味和烟草味,通常在浅水富营养化湖泊中有较高的浓度,并与微囊藻细胞的数量呈现出良好的相关性^[5]。

太湖饮用水源地 A 致嗅物质每年偶发激增,具体时间及浓度变化并未呈现显著规律性。此研究以 2022 年该水源地水样为研究对象,对致嗅物质、藻类以及总磷、总氮、温度等环境指标进行检测。通过环境因素相关性分析,对致嗅物质的变化规律和来源作初步分析。

1 材料与方法

1.1 试验仪器

美国 Varian 450GC-300 MS 气相色谱-质谱仪, CTC COMBIPAL 自动进样系统,带固相微萃取模块; OLYMPUS BX51 生物显微镜;流动注射分析仪 Auto Analyzer 3。

1.2 试剂、标准品

2-MIB、GSM、 β -ion 标准物质质量浓度均为 100

mg/L,购于美国 Accustandard; β -cyc 标准物质质量浓度为 100 mg/L,购于美国 o2si;总磷、总氮标准物质质量浓度为 1 000 mg/L,购于国家有色金属及电子材料分析测试中心;浮游生物计数板(规格为 20 mm×20 mm,100 方格,体积为 0.1 mL),由中国科学院水生生物研究所生产。

1.3 试验方法

1.3.1 致嗅物质分析方法

参考标准《生活饮用水臭味物质 土臭素和 2-甲基异莰醇检验方法》(GB/T 32470—2016)。取 10 mL 样品在 60 ℃ 下平衡 10 min,振摇速率为 300 r/min,萃取时间为 15 min,解析时间为 3 min,进行气相-色谱质谱法(GC/MS)分析。气化室温度为 250 ℃;柱温为 60 ℃ 保持 1 min,15 ℃/min 升至 180 ℃ 保持 1 min,40 ℃/min 升至 250 ℃;载气流速为 1.0 mL/min。采用电子电离源(EI),离子化能量为 70 eV,离子源温度为 230 ℃。采用选择离子扫描模式(SIM),4 种致嗅物质检出限如表 1 所示。

表 1 致嗅物质检出限
Tab. 1 The Detecton Limits of Odorous Compounds

嗅味物质	特征离子 (m/z)	检出限/ ($\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$)	嗅觉阈值/ ($\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$)	回收率
2-MIB	91,107,135	2	10	78.5%~117.2%
GSM	97,112	2	10	89.2%~111.0%
β -cyc	137,152	2	10 000	74.2%~111.5%
β -ion	43,177	2	7	70.1%~109.1%

1.3.2 藻类分析方法

《水和废水监测分析方法》(第四版)中浮游生物的测定。

1.3.3 总氮、总磷分析方法

总氮检测方法为《水质 总氮的测定 连续流动-盐酸萘乙二胺分光光度法》(HJ 667—2013),总磷的检测方法为《水质 磷酸盐和总磷的测定 连续流动-钼酸铵分光光度法》(HJ 670—2013)。

1.3.4 数据相关性分析方法

对4种致嗅物质和环境因子的监测数据进行统计,并采用IBM SPSS Statistics 24软件对嗅味物质浓度变化与环境因子的相关性进行分析。

1.3.5 采样点布置

采样点布设主要考虑饮用水源取水口和周边控制点设置,能较好地反映饮用水源地周边致嗅物质空间分布差异,共设置了7个监测点(图1),采样时间为2022年1月—2022年12月,频次为1次/月(嗅味物质高峰期增加频次至每周或每天),各点位采样时间保持一致。对2-MIB、GSM、 β -cyc、 β -ion 4种致嗅物质以及藻类、总磷、总氮、温度等环境指标进行监测。

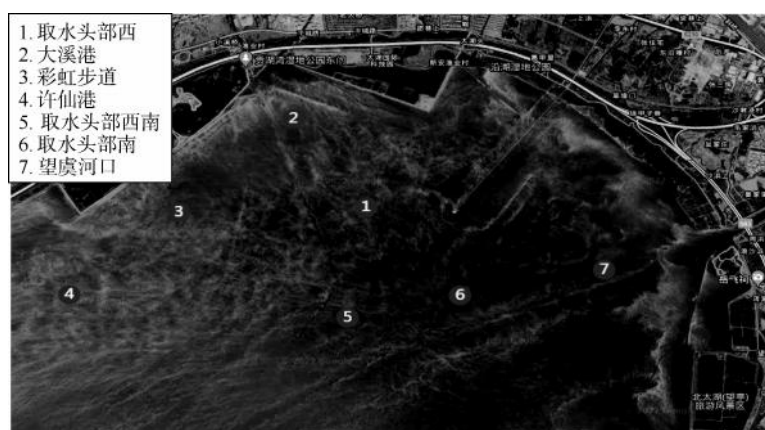


图1 水源地监测点位

Fig. 1 Monitoring Points of Water Source

2 结果与分析

2.1 致嗅物质

2.1.1 致嗅物质浓度变化

对7个监测点位4种致嗅物质的监测数据作统计分析,浓度变化情况如图2所示。

由图2可知,1月—6月2-MIB、GSM、 β -cyc和 β -ion 4种致嗅物质浓度远低于或相当于嗅觉阈值,7月—8月达到最高值,9月开始呈下降趋势,10月之后基本未检出。与嗅味阈值相比,导致水源地异味的主要物质是2-MIB,水体异味表现为土霉味。

2.1.2 2-MIB和GSM时空分布

对5月—9月高温期各点位2-MIB及GSM浓度变化进行统计,结果如图3和图4所示。7月26日伪鱼腥藻数量明显升高(平均值为 1.2×10^6 个/L),与此同时,2-MIB浓度骤增(点位1~5质量浓度为153~382 ng/L,点位6质量浓度为1295 ng/L,点位7质量浓度为1088 ng/L)。8月2日—9月27日各点位伪鱼腥藻数量平均值达到 4.9×10^6 个/L,2-MIB平均质量浓度为181 ng/L。整体上,伪鱼腥

藻数量先后在8月14日(各点位平均值为 5.0×10^6 个/L)和8月23日(各点位平均值为 1.1×10^7 个/L)到达峰值,2-MIB浓度在8月14日到达峰值(各点位平均质量浓度为397 ng/L),8月23日平均质量浓度为218 ng/L。其中点位6和点位7更靠近引江济太入湖口,受水流冲击影响较其它点位显著,2-MIB浓度处于相对较高水平。对5月—9月高温期,4种嗅味物质浓度与总藻数、伪鱼腥藻、微囊藻、总氮、总磷、硝酸盐氮和温度等环境因子变化情况的相关性进行分析,结果如表2所示。由表2相关性分析结果可知,2-MIB的生成与伪鱼腥藻数量密切相关,与朱慧等^[6]研究结果一致。但是可能受到其他致嗅藻类及微生物作用、引水初期外源性输入或水力作用使底泥中的异嗅物质受到扰动并大量释放、雷暴大风及强降雨造成藻类大量聚集等各种复杂因素的影响,水体中2-MIB浓度峰值与伪鱼腥藻的数量峰值出现时间并不完全一致。

相比2-MIB,GSM非主要致嗅物质,其浓度在8月23日达到峰值(各点位平均质量浓度为20 ng/L),

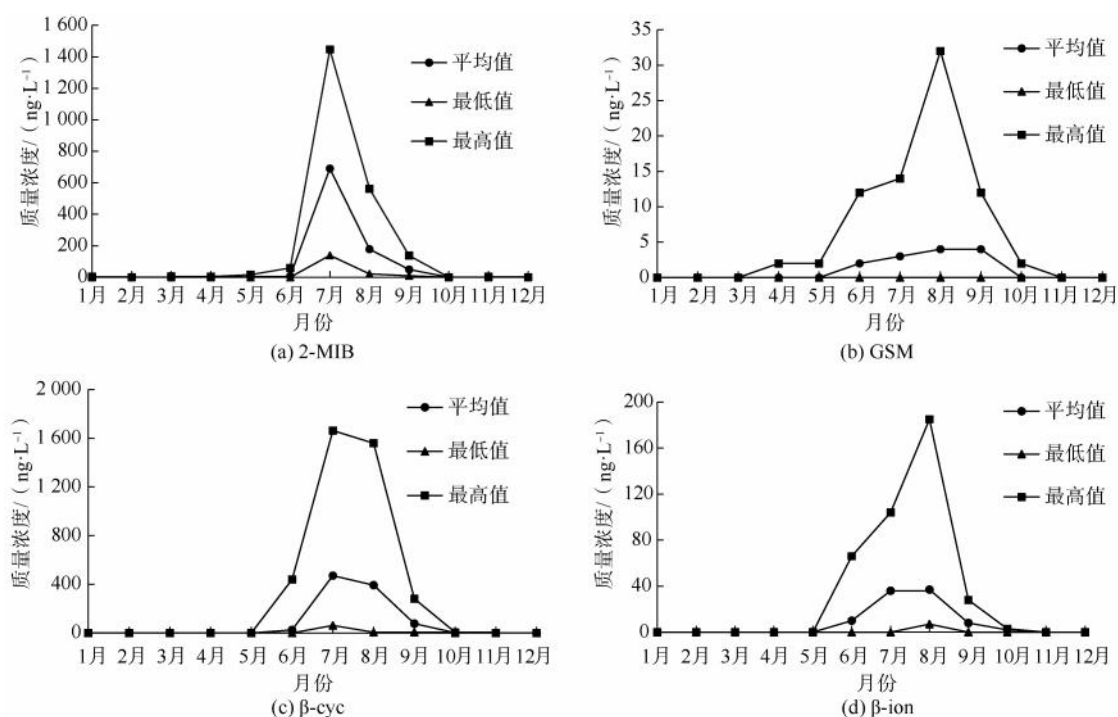


图2 致嗅物质浓度变化

Fig. 2 Changes in Concentration of Odorous Compounds

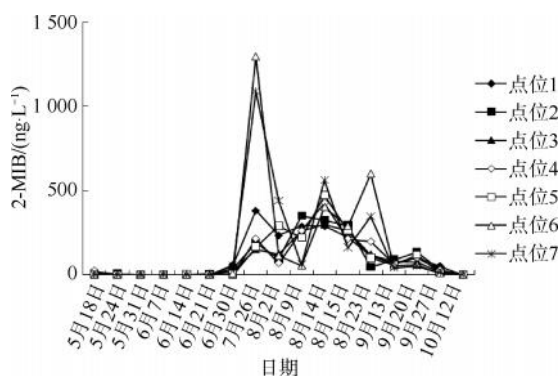


图3 各点位 2-MIB 浓度变化

Fig. 3 Changes in 2-MIB Concentration at Each Point

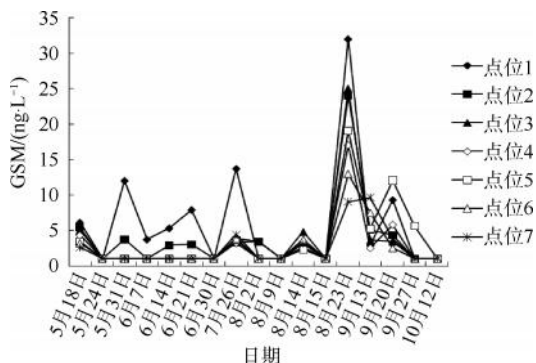


图4 各点位 GSM 浓度变化

Fig. 4 Changes in GSM Concentration at Each Point

其余时间段基本在嗅味阈值以下。由图 4 可知,点位 1、2、3 浓度略高于其他点位,可能与点位周边环境受河口水流冲击影响较小,为放线菌、蓝藻等相关微生物的生长提供了稳定条件。同时近河口处点位 GSM 浓度会被较低浓度河水进一步稀释。一般情况下 2-MIB 含量的变化主要与伪鱼腥藻有关,而 GSM 含量的变化主要与鱼腥藻有关^[7]。但伪鱼腥藻在高温和富营养化水体中也可能通过共生作用间接促进其他藻类产生 GSM。表 2 相关性分析结果表明,GSM 浓度变化与伪鱼腥藻数量在 $p < 0.05$ 水平呈显著正相关,印证了此观点的合理性。

2.1.3 β -cyc 和 β -ion 时空分布

对 5 月—9 月高温期各点位 β -cyc 和 β -ion 浓度变化进行统计,结果如图 5 和图 6 所示, β -cyc、 β -ion 分别于 7 月 26 日、8 月 9 日、8 月 23 日出现了不同程度高峰值(各点位 β -cyc 平均质量浓度达到 773、786、1 190 ng/L, β -ion 平均质量浓度达到 59、42、123 ng/L)。与此同时微囊藻数量也先后出现峰值(各点位平均值分别为 4.4×10^7 、 5.9×10^7 、 1.4×10^8 个/L)。各点位 β -cyc 和 β -ion 浓度与微囊藻数量峰值出现时间高度匹配,对 5 月—9 月高温期嗅味物质浓度与环境理化因子变化情况进行相关性分

表2 致嗅物质与环境因子相关性分析结果

Tab. 2 Results of Correlation Analysis between Odorous Compounds and Environmental Factors

致嗅物质与环境因子	总藻数	伪鱼腥藻	微囊藻	总氮	总磷	硝酸盐氮	温度
2-MIB	0.562 *	0.686 **	0.332	-0.412	0.262	-0.641 *	0.626 **
GSM	0.339	0.516 *	0.205	0.099	-0.074	0.314	0.583 *
β -cyc	0.407	0.330	0.232	0.053	0.583 *	-0.459	-0.216
β -ion	0.459	0.425	0.481 *	0.111	0.190	0.051	0.222

注: * 表示 $p < 0.05$ 水平显著相关; ** 表示 $p < 0.01$ 水平显著相关。

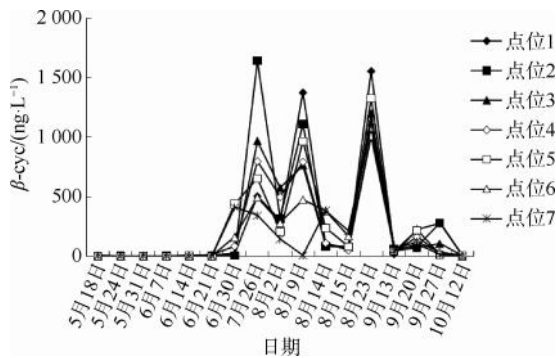


图5 各点位 β -cyc浓度变化

Fig. 5 Changes in β -cyc Concentration at Each Point

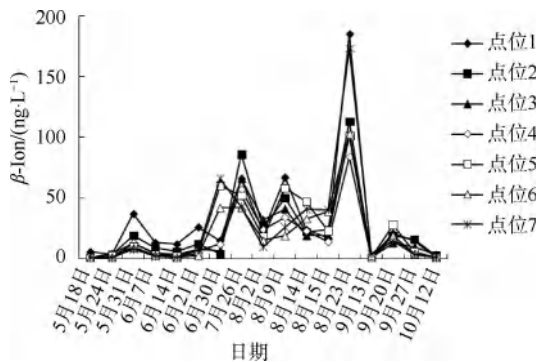


图6 各点位 β -ion浓度变化

Fig. 6 Changes in β -ion Concentration at Each Point

析,结果也表明,微囊藻数量与 β -ion浓度呈显著正相关。微囊藻是太湖蓝藻水华暴发的常见藻类,其数量水平与2-MIB和GSM的浓度并无直接关系^[8]。但微囊藻在繁殖和消亡阶段会产生 β -cyc和 β -ion 2种重要嗅味物质^[5]。而影响微囊藻生长和群体化的因素主要分为环境理化因素和水动力因素两大类,在富营养化的水体中,高强度的水流扰动会抑制微囊藻聚集成群形成水华^[9]。微囊藻群体大小与风速呈负相关,湖泊中风生紊流会影响微囊藻群体大小。当紊流达到一定强度时,微囊藻群体会发生破碎现象^[10]。因此受夏季大风等强对流天气影响,

监测点位微囊藻数量波动较大,导致 β -cyc和 β -ion浓度随之波动。

2.2 藻类变化分析

因水源地地形为半封闭湖湾类型,水体流动性差,藻类容易大量生长和堆积。此外,当地2022年35℃以上高温天数达49 d,创下历史之最。在此复杂环境下,水源地藻类总数和优势种属持续发生变化。对5月—9月份高温期藻类数据变化分析发现,5月—6月水源地水体中藻类总数维持在 1×10^7 个/L水平,藻类种群可见衣藻、小环藻、小球藻、针杆藻、纤维藻和蓝隐藻等以及较低浓度水平的微囊藻和伪鱼腥藻。6月底开始,各监测点位藻类数量开始出现不同程度的增加,7月—8月多次出现高峰,最高可达 4.7×10^8 个/L。与此同时,蓝藻逐渐成为各监测点位优势藻属,各点位藻类变化情况相似,以点位1为例,部分主要藻类占比情况如图7所示。

由图7可知,伪鱼腥藻和微囊藻在蓝藻中占比最高时分别可达44.4%和97.7%。伪鱼腥藻属是丝状藻中可产生2-MIB的常见藻,其数量的变化可直接导致水体嗅味的异常。各监测点位藻总数、微囊藻、伪鱼腥藻的变化情况如图8~图10所示。受引水工程影响,7月26日伪鱼腥藻数量突增至 1.2×10^6 个/L。伴随长期的高温天气,各点位藻类总数在8月23日(高温期最后一天,同时伴有7~9级雷暴大风)达到最大值,伪鱼腥藻和微囊藻数量最高分别达到 1.9×10^7 个/L和 2.2×10^8 个/L。可能受极端天气采样环境异常及风生紊流影响,点位5微囊藻数量与其他点位出现较大差异。文献^[11-14]认为,伪鱼腥藻在其他藻类竞争下会改变自身的代谢路径,在细胞内产生2-MIB并将其释放到细胞外来抑制其他藻类的生长,以维持在水库水中的优势地位。罗璋^[15]发现伪鱼腥藻和铜绿微囊藻之间有明显的竞争抑制作用,伪鱼腥藻通过释放2-MIB来抑

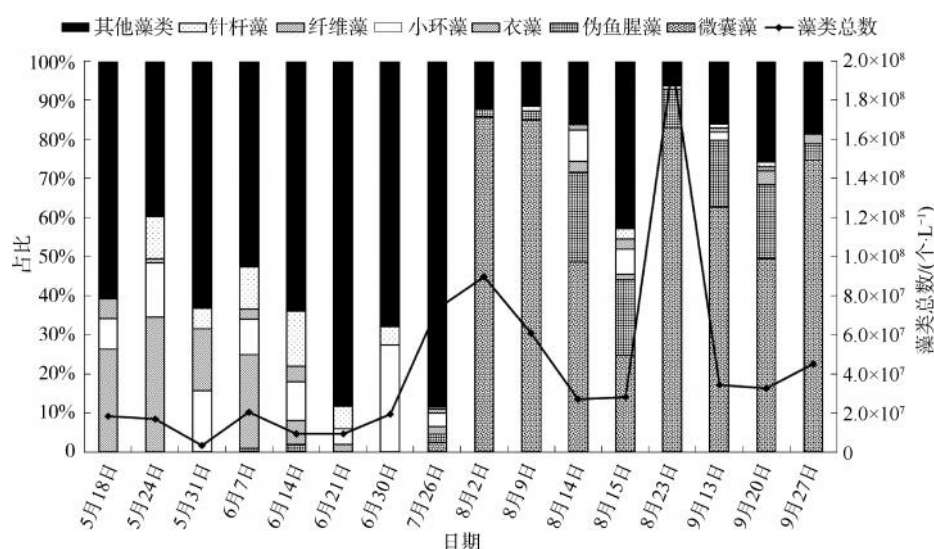


图 7 点位 1 藻类变化情况

Fig. 7 Algae Changes of Point 1

制铜绿微囊藻的生长,而铜绿微囊藻通过释放 β -cyc 来抑制伪鱼腥藻的生长。由图 9~图 10 可知,虽然伪鱼腥藻和微囊藻存在竞争关系,但在富营养化、温度和光照等合适的水体环境条件下可能大量共存。

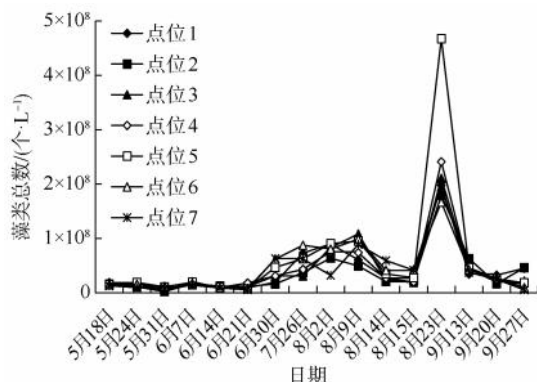


图 8 各点位藻类总数变化

Fig. 8 Changes in the Total Number of Algae at Each Point

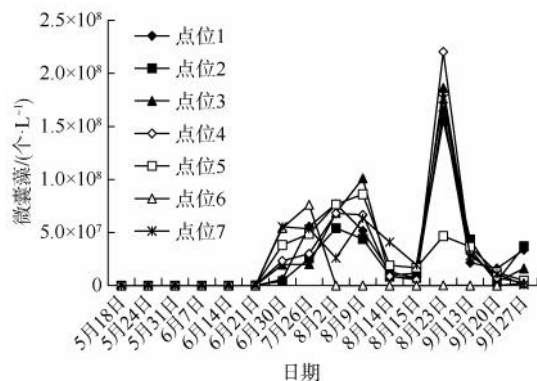


图 9 各点位微囊藻变化

Fig. 9 Changes of *Microcystis* at Each Point

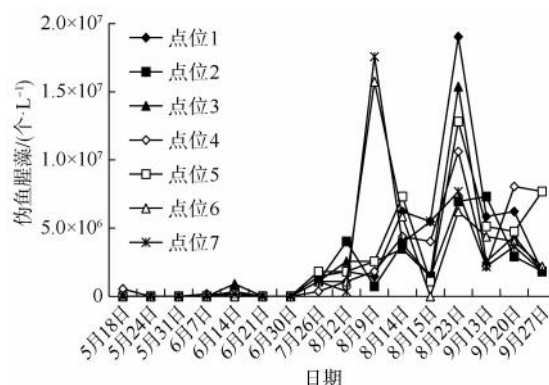


图 10 各点位伪鱼腥藻变化

Fig. 10 Changes of *Pseudanabaena* at Each Point

2.3 水源地水质变化特征及对致嗅物质的影响

大量研究^[3,11,16-17]表明,湖泊和水库中伪鱼腥藻在 4~35℃ 下均可持续生长繁殖,往往在夏秋高温季节密度较高。据统计,太湖某水源地 5 月—6 月平均水温为 24℃,7 月—8 月平均水温为 31℃,9 月—10 月平均水温为 24℃,均适于伪鱼腥藻生长繁殖。文献^[18]发现,台湾 Feng-Shen 水库中 2-MIB 与水温及气温显著相关。水温升高,促进水体中藻类等微生物生长和代谢,同时促进 2-MIB 和 GSM 等释放,导致水体产生土霉味等水体异味问题^[1]。根据表 2 相关性分析结果表明,太湖水源地 A 中 2-MIB 和 GSM 的浓度均与水温呈显著正相关。可见水温是影响致嗅物质浓度的重要因素之一。

同时,7 月 16 日水利部启动夏季引江济太水量调度工程,20 日长江水通过望虞河进入太湖水源地

A。引水工程初期会带入大量河道底泥,同时因水力冲刷作用使水源地底泥受到扰动,水体浑浊度升高。自7月25日受引水的影响,水源水中氯化物、高锰酸盐指数、pH等指标发生明显变化(表3),有可能对藻类的生长产生不利影响。在胁迫环境下伪鱼腥藻产生的胞外2-MIB占比高,原因可能是藻细胞损伤或死亡时会向胞外释放2-MIB^[19]。通过过膜试验对水源地原水中溶解态2-MIB进行分析,发现原水中溶解态2-MIB占比为16.7%~39.1%。因此,当底泥及其他可附着物中的颗粒态2-MIB受到扰动大量释放时,也可能造成2-MIB的异常升高,并因此导致2-MIB浓度变化与伪鱼腥藻数量峰值出现时间不完全一致的情况发生。

表3 引水前后常规水质指标变化情况
Tab. 3 Changes in Conventional Water Quality Indices before and after Water Diversion

常规指标	引水前 (7月15日— 7月24日)	引水后 (7月25日— 8月3日)
氨氮/(mg·L ⁻¹)	0.08~0.11	0.06~0.10
氯化物/(mg·L ⁻¹)	41~43	18~35
高锰酸盐指数/(mg·L ⁻¹)	3.7~4.7	4.1~5.8
pH值	8.0~8.5	8.4~8.9
溶解氧/(mg·L ⁻¹)	6.1~7.4	6.4~9.1

根据《江苏省生态环境状况公报》发布的2022年太湖水体富营养状态相关信息可知,近年来太湖蓝藻水华聚集现象逐年递增,整体水质为Ⅳ类。试验期间水体总氮和总磷平均质量浓度分别为0.64 mg/L和0.047 mg/L,达到地表水Ⅲ类水质标准。研究^[3]认为,伪鱼腥藻对磷缺乏的环境具有较强耐受性,这可能是伪鱼腥藻在一些水库中占据优势地位的原因之一。将5月—9月高温期各监测点位4种致嗅物质浓度的平均值和各环境理化因子的平均值进行相关性分析,结果如表3所示。由表3可知,太湖水源地4种常见致嗅物质中的主要物质2-MIB和GSM浓度与水体温度、藻类数量变化呈现良好相关性。

3 结论

(1)自6月底,太湖水源地A各监测点位藻类数量随水温升高开始出现不同程度的增加,7月—8月达到高峰,以微囊藻和伪鱼腥藻为主的产嗅蓝藻逐渐成为太湖水源地优势藻属。

(2)7月—8月,4种致嗅物质浓度多次出现高

峰,其中伪鱼腥藻与2-MIB的生成密切相关。微囊藻数量是影响 β -cyc和 β -ion浓度的关键因素。可以通过跟踪太湖水源地A藻类的变化情况,来预测致嗅物质的变化规律。

(3)引水工程会显著改变太湖水源地A的理化条件,促进2-MIB等嗅味物质的升高。

(4)长期处于低水平富营养化状态是太湖水源地A水质嗅味异常问题的根本原因。高温天气、引水工程等诱因下出现的藻类水华会直接导致水质嗅味异常问题持续频发。

参考文献

- [1] 秦宏兵, 张晓赞, 范苓, 等. 苏州市太湖饮用水源地异味物质种类及其与环境因子相关性分析[J]. 环境监控与预警, 2016, 8(3): 38-42.
QIN H B, ZHANG X Y, FAN L, et al. Off-flavor compounds in drinking water sources of Taihu in Suzhou and their correlations with environmental factors [J]. Environmental Monitoring and Forewarning, 2016, 8(3): 38-42.
- [2] JÜTTNER F, WASON S B. Biochemical and ecological control of geosmin and 2-methylisoborneol in source water [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2007, 73(14): 4395-4406.
- [3] 庞一鸣, 陈淑华, 徐杭州, 等. 伪鱼腥藻(*Pseudanabaena* sp.)及其产生2-甲基异莰醇(2-MIB)的研究进展[J]. 生态学杂志, 2021, 40(5): 1530-1548.
PANG Y M, CHEN S H, XU H Z, et al. Research progress on *Pseudanabaena* sp. and its metabolite 2-methylisoborneol (2-MIB) [J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(5): 1530-1548.
- [4] 刘宪圣. 蓝藻聚积衰亡过程中 β -环柠檬醛和 β -紫罗兰酮释放特征[D]. 南京: 南京师范大学, 2017.
LIU X S. Release characteristics of β -Cyclocitral and β -Ionone during the accumulation and decay of blue-green algae [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2017.
- [5] 代志刚, 蒋永光, 谷依露, 等. 异味物质 β -环柠檬醛降解菌的分离和鉴定[J]. 水生生物学报, 2014(2): 222-226.
DAI Z G, JIANG Y G, GU Y L, et al. Isolation and identification of β -cyclocitral degrading bacteria [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2014(2): 222-226.
- [6] 朱慧, 许海, 詹旭, 等. 氮磷增加对水源水库嗅味物质影响的模拟研究[J]. 环境科学学报, 2023, 43(8): 165-178.
ZHU H, XU H, ZHAN X, et al. Nitrogen and phosphorus enrichment influencing odor compounds production in drinking reservoir [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2023, 43(8): 165-178.
- [7] 李荣, 贾霞珍, 胡建坤, 等. 天津于桥水库嗅味物质来源及变化原因分析[J]. 天津师范大学学报(自然科学版), 2020,

- 40(6): 37-43.
- LI R, JIA X Z, HU J K, et al. Analysis on origin and change of odor substances of water body in Yuqiao Reservoir of Tianjin[J]. Journal of Tianjin Normal University (Natural Science Edition), 2020, 40(6): 37-43.
- [8] 李维唯, 郭康宁, 刘莉文, 等. 若干水华相关藻类对太湖水体异味物质贡献的初步研究[J]. 湖泊科学, 2018, 30(4): 916-924.
- LI W W, GUO K N, LIU L W, et al. Relationship of odor compounds to some algal strains associated with bloom in Lake Taihu[J]. Journal of Lake Science, 2018, 30(4): 916-924.
- [9] 胡怡玲, 杨忠勇, 杨京, 等. 水流扰动环境中微囊藻群体的生长及成群过程分析[J]. 中国环境科学, 2025, 45(6): 3280-3288.
- HU Y L, YANG Z Y, YANG J, et al. Analysis of growth and aggregation processes of microcystis colonies in flow disturbed environments[J]. China Environmental Science, 2025, 45(6): 3280-3288.
- [10] 朱伟, 陈怀民, 肖曼, 等. 风生紊流导致微囊藻群体破碎和形态变化[J]. 湖泊科学, 2021, 33(2): 349-365, 647.
- ZHU W, CHEN H M, XIAO M, et al. Wind induced turbulence caused colony disaggregation and morphological changes in the cyanobacterium microcystis[J]. Journal of Lake Science, 2021, 33(2): 349-365, 647.
- [11] HUGNG X, HUGNG Z, CHEN X, et al. The predominant phytoplankton of *Pseudoanabaena* holding specific biosynthesis gene-derived occurrence of 2-MIB in a drinking water reservoir [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(19): 19134-19142.
- [12] KAKIMOTO M, ISHIKAWA T, MIYAGI A, et al. Culture temperature affects gene expression and metabolic pathways in the 2-methylisoborneol-producing cyanobacterium *Pseudanabaena galeata* [J]. Journal Plant Physiology, 2014, 171: 292-300. DOI: 10.1016/j.jplph.2013.09.005.
- [13] WANG Z J, SONG G F, SHAO J H, et al. Establishment and field applications of real-time PCR methods for the quantification of potential MIB-producing cyanobacteria in aquatic systems[J]. Journal of Applied Phycology, 2016, 28: 325-333. DOI: 10.1007/s10811-015-0529-1.
- [14] 苏晓, 韩正双, 张楠, 等. 天津某水库 2-MIB 季节性变化规律及来源分析[J]. 中国给水排水, 2020, 36(19): 39-45.
- SU X, HAN Z S, ZHANG N, et al. Seasonal variation rule and source analysis of 2-MIB in a reservoir of Tianjin [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(19): 39-45.
- [15] 罗璋. 蓝藻在化感作用下致嗅物的代谢释放机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- LUO Z. Metabolism-release mechanism of cyanobacteria under allelopathic effect[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [16] WANG Z, LI R. Effects of light and temperature on the odor production of 2-methylisoborneol-producing *Pseudanabaena* sp. and geosmin-producing *Anabaena ucrainica* (cyanobacteria) [J]. Biochemical Systematics and Ecology, 2015, 58: 219-226. DOI: 10.1016/j.bse.2014.12.013.
- [17] GAO J S, ZHU J, WANG M W, et al. Dominance and growth factors of *Pseudanabaena* sp. in drinking water source reservoirs, Southern China [J]. Sustainability, 2018, 10(11): 1-15.
- [18] 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: 407-416. DOI: 10.1007/s10661-007-0049-9.
- [19] 陈晓萌. 上海 H 水厂二甲基异茨醇和土臭素年变化规律及其影响因素探索[J]. 净水技术, 2022, 41(s2): 1-7, 41.
- CHEN X M. Exploration on the annual variation laws and influencing factors of 2-methylisoborneol and geosmin in WTP H of Shanghai[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(s2): 1-7, 41.

(上接第 183 页)

- [8] 庄琪, 栾超, 马强. 反渗透浓水回收利用的探索研究[J]. 辽宁化工, 2020, 46(10): 65-71.
- ZHUANG Q, LUAN C, MA Q. Research on recycling and utilization of reverse osmosis concentrate [J]. Liaoning Chemical Industry, 2020, 46(10): 65-71.
- [9] 何灿, 黄祁, 何文丽, 等. 臭氧催化氧化深度处理焦化废水的研究及应用[J]. 给水排水, 2020, 46(10): 65-71.
- HE C, HUANG Q, HE W L, et al. Study on ozone catalytic oxidation in advanced treatment of coking wastewater and its application [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 46(10): 65-71.
- [10] 王金龙. 双膜法中水厂反渗透系统运行分析[J]. 净水技术, 2024, 43(1): 95-100, 109.
- WANG J L. Summary of experience in reverse osmosis operation of sewage source UF-RO process WTPs [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(1): 95-100, 109.