

邓绪伟,陶敏,张路,等.洞庭湖水体异味物质及其与藻类和水质的关系[J].环境科学研究,2013,26(1):16-21.

DENG Xuwei,TAO Min,ZHANG Lu,et al. Relationships between odors and algae and water quality in Dongting Lake[J]. Research of Environmental Sciences,2013,26(1):16-21.

## 洞庭湖水体异味物质及其与藻类和水质的关系

邓绪伟<sup>1,2</sup>,陶敏<sup>1,2</sup>,张路<sup>3</sup>,谢平<sup>1\*</sup>,陈隽<sup>1</sup>,张静<sup>4</sup>

1. 中国科学院水生生物研究所,湖北 武汉 430072
2. 中国科学院大学,北京 100049
3. 中国科学院南京地理与湖泊研究所,江苏 南京 210008
4. 华中农业大学水产学院,湖北 武汉 430070

**摘要:**以洞庭湖水体中异味物质为研究对象,开展异味物质调查,并结合藻类结构、水质及其营养状况等因素,深入分析洞庭湖异味物质的来源和变化情况.结果表明,DMS(dimethylsulfide,甲硫醚)、DMTS(dimethyltrisulfide,二甲基三硫醚)、 $\beta$ -cyclocitral( $\beta$ -环柠檬醛)、MIB(2-methylisoborneol,二甲基异冰片)和 GSM(geosmin,土嗅素)在全湖广泛存在,其最高质量浓度分别达到 500.80、28.80、21.84、14.50 和 22.40 ng/L.结合与藻类生物量的相关分析发现,直链藻、冠盘藻等硅藻可能是洞庭湖中 DMS、DMTS 和  $\beta$ -cyclocitral 的重要来源,湖区土壤、沉积物中的微生物和死亡分解的藻类是 MIB 和 GSM 主要来源.洞庭湖水体绝大部分处于中营养水平,其中东洞庭湖 TLI(综合营养状态指数,为 48.3)最高,南洞庭湖(为 47.3)其次,西洞庭湖(为 42.7)最低.异味物质含量和水质的相关分析发现,异味物质质量浓度与 TLI、水温、pH、 $\rho$ (DO)、 $\rho$ (TN)和  $\rho$ (COD<sub>Mn</sub>)显著相关,说明水质对异味物质含量有重要影响.

**关键词:**洞庭湖;异味物质;藻类;水质营养

中图分类号: X524 文献标志码: A 文章编号: 1001-6929(2013)01-0016-06

## Relationships between Odors and Algae and Water Quality in Dongting Lake

DENG Xu-wei<sup>1,2</sup>,TAO Min<sup>1,2</sup>,ZHANG Lu<sup>3</sup>,XIE Ping<sup>1</sup>,CHEN Jun<sup>1</sup>,ZHANG Jing<sup>4</sup>

1. Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
3. Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China
4. College of Fisheries, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

**Abstract:** The Dongting Lake is the second largest freshwater lake in China. It is for the first time to study on the taste and odor compounds in the lake. Five chemical compounds, dimethylsulfide (DMS), dimethyltrisulfide (DTMS), 2-methylisoborneol (MIB),  $\beta$ -cyclocitral, and geosmin (GSM) were detected and the highest concentrations of these compounds were 500.80, 28.80, 21.84, 14.50, and 22.40 ng/L, respectively. DMS, DMTS and  $\beta$ -cyclocitral were closely related to *Melosira* and/or *Stephanodiscus* in Bacillariophyceae. This suggested that these algae probably were the sources of DMS, DMTS, and  $\beta$ -cyclocitral in the Dongting Lake. The particle-bound MIB and GSM were not detected, which suggested that MIB and GSM were probably produced by microorganisms in sediment, the soil around Dongting Lake or the rotten algae. The trophic state of the Dongting Lake is mesotrophication with TLI of three regions between 42.7 and 48.3. The concentrations of these five odors were directly influenced by the water environmental factors.

**Key words:** Dongting Lake; odorants; algae; water trophic state

洞庭湖作为我国三大淡水湖之一,其水资源对整

个流域有重要影响.洞庭湖不仅是区域内工农业的重要资源,更是其流域内重要饮用水源和渔业生产地<sup>[1]</sup>.但目前鲜见洞庭湖水水质异味调查研究的相关报道.基于对洞庭湖区域内饮用水安全和水产品质量的要求,对洞庭湖水水质中异味物质的研究十分必要.

自然水体中常见异味物质有硫醚类、萜类和脂肪

收稿日期: 2012-05-04 修订日期: 2012-08-10

基金项目: 国家科技基础性工作专项(2006FY110600)

作者简介: 邓绪伟(1985-),男,湖北潜江人, dxw-whu@163.com.

\* 责任作者: 谢平(1961-),男,湖北洪湖人,研究员,博士,博导,从事湖泊生态学研究, xieping@ihb.ac.cn

酸及其代谢物等<sup>[2]</sup>. 其中硫醚类以 DMS (dimethylsulfide, 甲硫醚)、DMDS (dimethyldisulfide, 二甲基二硫醚) 和 DMTS (dimethyltrisulfide, 二甲基三硫醚) 最常见<sup>[3-4]</sup>; 萜类以 MIB (2-methylisoborneol, 二甲基异冰片)、GSM (geosmin, 土嗅素) 和胡萝卜素降解产物 (主要包括  $\beta$ -cyclocitral ( $\beta$ -环柠檬醛) 和  $\beta$ -ionone ( $\beta$ -紫罗兰酮)) 最常见<sup>[5]</sup>. 关于这些异味物质来源的研究有诸多报道<sup>[6-9]</sup>, 少数种类异味物质源于工农业污染直接排放, 如  $H_2S$ 、 $NH_3$  等<sup>[10]</sup>. 研究者一致认为水体及其生态系统中天然异味物质的主要贡献者是微生物, 如藻类、真菌和放线菌<sup>[2, 5, 7, 11-12]</sup>. 这些微生物的生物量又与水环境因子有重要联系, 因此在研究水体中异味物质时, 研究者常会考虑水环境因子与异味物质的关系<sup>[13-14]</sup>. 一般认为湖泊富营养化导致了蓝藻水华, 而蓝藻水华能够导致大量 MIB 和 GSM 等异味物质的释放<sup>[7, 15]</sup>; 水温、pH 和  $\rho$ (DO) 等会直接影响异味物质的浓度<sup>[13, 16-17]</sup>. 就洞庭湖而言, 其水体受江流水质、湖区人口和流域工、农业影响, 呈中营养状态, 同时局部营养水平升高<sup>[1, 18]</sup>. 洞庭湖内优势藻类主要是绿藻、蓝藻和硅藻, 其中春季以硅藻为主, 夏季以蓝藻居多, 秋冬季以绿藻为主<sup>[1]</sup>. 绿藻、蓝藻和硅藻中有大量产异味的种类<sup>[2, 12]</sup>.

该研究以洞庭湖湖区为研究对象, 开展主要异味物质调查研究, 主要关注的异味物质包括 DMS、DMTS、MIB、GSM 和  $\beta$ -cyclocitral. 分析水中溶解态和悬浮颗粒结合态异味物质的含量, 通过对藻类鉴定分析, 初步判断洞庭湖中藻类与异味物质的关系, 分析洞庭湖水环境因子、水体营养指数及异味物质质量浓度, 判断水环境因子对异味物质质量浓度的影响.

## 1 材料与方法

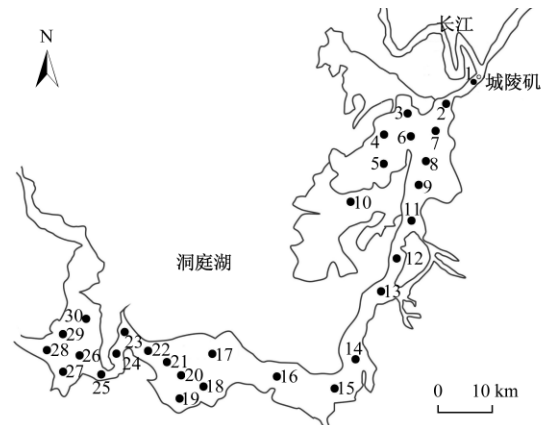
### 1.1 样品采集

2008年7月在洞庭湖全湖布置了30个采样点(见图1). 采集水面以下0.5 m和湖底以上0.5 m处的混合水样, 一部分水样经 GF/C 滤膜过滤后, 滤液密闭低温保存用于水中溶解态异味物质的测定, 滤膜由锡箔纸包裹后  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  保存, 用于水中结合态异味物质的测定; 另一部分水样  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  保存后带回实验室分析水质. 每个样点采集 1 L 水样用于浮游植物分析.

### 1.2 分析方法

采集水样的同时, 采用 YSI6600V2 多参数水质分析仪现场测定水温( $T$ )、透明度(SD)、pH、 $\rho$ (DO)、电导率、矿化度、浊度、 $E_h$  (氧化还原电位).

$\rho$ ( $NH_4^+ - N$ )、 $\rho$ ( $NO_3^- - N$ )、 $\rho$ ( $PO_4^{3-} - P$ ) 由微量流动注射分析仪 (Skalar - SA1000) 测定,  $\rho$ (TSS)、 $\rho$ (TN)、 $\rho$ (TP)、 $\rho$ (Chla) 及  $\rho$ ( $COD_{Mn}$ ) 的测定参考《水和废水监测分析方法》<sup>[19]</sup>. 水样中浮游植物定性定量分析方法见文献<sup>[20]</sup>.



注: 东洞庭湖采样点为 1~13 号, 南洞庭湖采样点为 14~22 号, 西洞庭湖采样点为 23~30 号.

图 1 采样点分布

Fig. 1 Station locations

水中溶解态的异味物质采用吹扫捕集 (Eclipse 4660, OI 分析仪器公司, 美国) - 气相色谱 - 质谱联用 (P&T-GCMS, 岛津 GCMS - QP2010Plus, 岛津公司, 日本) 法分析<sup>[21]</sup>. 具体条件: 水样体积 25 mL, 采用高纯度氮气 (99.999%) 为吹扫气体和气相色谱 - 质谱联用仪载气, 吹扫流量为 40 mL/min, 吹扫时间为 12 min; 气相色谱仪进样口  $270\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 总流量 14 mL/min, 柱流量 1 mL/min, 分流比 10:1; 炉温程序为  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  保持 2 min,  $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  升至  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  升至  $220\text{ }^{\circ}\text{C}$ . 质谱离子源温度  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 接口温度  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 容积切除时间 1.69 min, 电子轰击源 (70 eV). 选择离子见表 1, 其余条件通过仪器自动调谐生成.

水中结合态异味物质采用微波辅助吹扫捕集气相色谱质谱 (MAPTE-GCMS) 法分析<sup>[22]</sup>. 微波辅助系统由一个 800 W 的微波炉 (APEX 微波化学工作站, 上海) 构成; 吹扫捕集仪和气相色谱质谱仪配置与溶解态异味物质测定相同; 吹扫捕集仪程序选择无自动进样器模式, 脱附不干燥, 烘焙不吹扫模式, 吹扫时间为 10 min, 其余设置与溶解态异味物质分析中相同. 微波辅助装置处理过程: 100 mL 反应釜模式, 样品加热至  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 加热时间为 10 min, 磁搅拌器最大转速与吹扫保持同步工作; 所有的参数确定后, 将 50 mL 25% 的氯化钠溶液和 5 g 氯化钙加入反应釜 (氯化钠

能够降低异味物质的溶解度<sup>[23-24]</sup>,氯化钙用来抑制基质起泡被吹起) 然后加入样品,启动微波程序。

5种异味物质及其相关信息见表1。数据分析采用SPSS 17.0统计分析软件。

表1 5种异味物质的相关信息

Table 1 The relative information of the five odor compounds

化合物	CAS号	嗅阈值 <sup>1)</sup> / (ng/L)	选择离子	保留时间/min	检出限 / (ng/L)	标准偏差 / (ng/L)
DMS	75-48-3	$2 \times 10^3$	62 <sup>2)</sup> , 47	1.897	1.0	1.44
DMTS	3658-80-8	10	126 <sup>2)</sup> , 79, 111	6.957	2.2	3.67
MIB	2371-42-8	15	95 <sup>2)</sup> , 108, 135	10.471	1.4	6.05
$\beta$ -cyclocitral	432-25-7	$1.93 \times 10^4$	137 <sup>2)</sup> , 152, 123, 109	11.017	1.1	4.29
GSM	19700-21-4	10	112 <sup>2)</sup> , 125, 149	13.835	0.5	5.13

1) 引自文献[21]; 2) 为定量离子。

## 2 结果与讨论

### 2.1 洞庭湖水质状况

一般认为水体富营养化导致藻类大量生长,而藻类等微生物恰恰是很多异味物质的直接来源。因此,对水体营养指数和藻类的分析有助于了解洞庭湖水体异味的发生情况。

该研究采用TLI(综合营养状态指数法)<sup>[25]</sup>对洞庭湖30个采样点的水质营养状态进行了分析,洞庭湖全湖TLI介于34.0~52.0,绝大部分湖区处在中营养水平,局部呈富营养(如1号和8号采样点的TLI为52.0,12~13号采样点的TLI为51.0)。西洞庭湖(24~30号采样点)营养水平最低,平均TLI为42.7;南洞庭湖(14~23号采样点)平均TLI为47.3;东洞庭湖(1~13号采样点)营养水平最高,平均TLI为48.3。全湖TLI最低处为10号采样点(漉湖),TLI为34.0。

由于5号采样点浮游植物样品丢失,对全湖30个采样点中的29个样品开展了浮游植物的定性和定量分析,共鉴定出7门77属,其中蓝藻门10个属、绿藻门34个属、硅藻门21个属、隐藻门2个属、甲藻门3个属、裸藻门3个属、金藻门4个属。东洞庭湖采样点的藻类平均生物量最高,达2.72 mg/L;南洞庭湖最低,为1.04 mg/L;西洞庭湖居中,为1.19 mg/L。研究期间,洞庭湖全湖浮游植物群落结构如图2所示,洞庭湖藻类优势类群为硅藻,其中直链藻生物量所占比例最大,为该时期洞庭湖优势种。这与李利强等<sup>[26-29]</sup>报道洞庭湖浮游植物群落研究结果基本一致。据姜加虎等<sup>[1]</sup>报道,因洞庭湖“四水”流域在4月进入汛期,致使湖泊水位不断上涨,洞庭湖水体中硅藻可能与湘江等“四水”中的硅藻关系密切;其次,该时期绿藻在全湖也有较大生物量,其中以小球藻和衣藻生物量最高;而蓝藻、隐藻和甲藻在局部样点生物量较大,

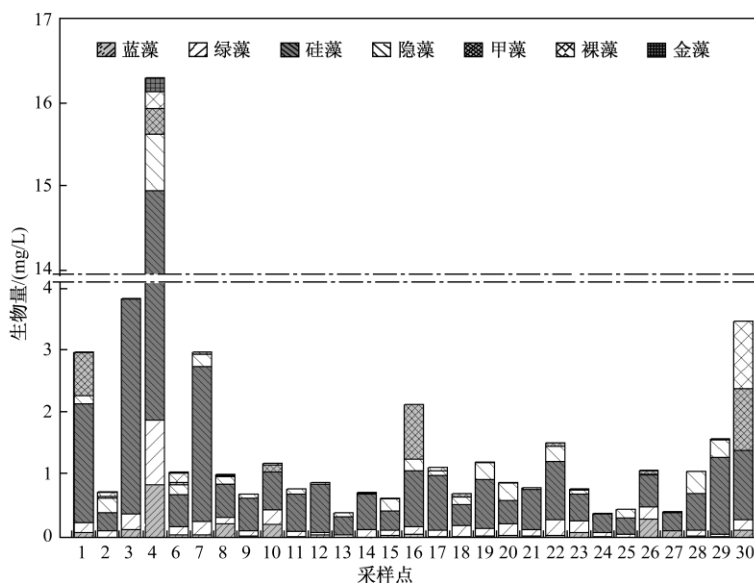


图2 洞庭湖浮游植物群落结构

Fig. 2 Phytoplankton community composition in Dongting Lake

其中蓝藻以微囊藻和颤藻为主。

## 2.2 异味物质污染特征

人们常把水体中悬浮颗粒含有的异味物质简称为结合态异味物质,把水中溶解的异味物质称为溶解态异味物质<sup>[30]</sup>。通过对结合态异味物质的研究,可确定藻体等悬浮物中异味物质含量,对研究水体中溶解态的异味物质有重要作用。

通过对洞庭湖水体中 5 种异味物质的溶解态 (S-) 和结合态 (P-) 含量的研究 (见图 3) 可见,  $\rho$ (S-DMS) 在全湖都很高,其中在南洞庭湖平均值达 168.23 ng/L, P-DMS 在全湖普遍存在,在 3 个湖区  $\rho$ (P-DMS) 平均值均小于 4 ng/L。DMTS 在洞庭湖 3 个湖区中普遍存在,其中  $\rho$ (S-DMTS) 平均值为 2.89 ~ 10.44 ng/L,  $\rho$ (P-DMTS) 平均值均小于 1 ng/L。MIB 和 GSM 在全湖中主要以溶解态存在,  $\rho$ (S-MIB) 和  $\rho$ (S-GSM) 平均值在 1.00 ~ 3.87 ng/L 之间,这表明洞庭湖中 MIB 和 GSM 的藻源性来源少,水体中的 MIB 和 GSM 很可能来自死亡的藻类细胞或者湖区土壤、沉积物中的微生物。从图 3 可知,在 3 个湖区结合态和溶解态的  $\rho$ ( $\beta$ -cyclocitral) 的平均值为 2.40 ~ 13.72 ng/L,  $\rho$ (S- $\beta$ -cyclocitral) 在西洞庭湖最高,东洞庭湖最低,这表明西洞庭湖  $\beta$ -cyclocitral 污染较东洞庭湖严重。对每个采样点的溶解态异味物质的质量浓度与其嗅阈值 (见表 1) 进行比较发现,在东洞庭湖 1、3、5、7、13 号采样点和南洞庭湖 15、16、17、18、19、20 和 22 号采样点  $\rho$ (DMTS) 均超过其嗅阈值 10 ng/L 以上,最高达 28.80 ng/L。30 号采样点  $\rho$ (MIB) 达 21.84 ng/L,超过其嗅阈值 15 ng/L; 10 和 30 号采样点  $\rho$ (GSM) 分别为 11.99 和 14.50 ng/L,均超过其嗅阈值 10 ng/L 以上。虽然  $\rho$ (DMS) 和  $\rho$ ( $\beta$ -cyclocitral) 均在其嗅阈值范围以内,但是其最高值分别达到 500.80 和 22.40 ng/L。

以上结果表明,洞庭湖水体中异味在全湖均有发生,在南洞庭湖和东洞庭湖相对严重,西洞庭湖个别采样点呈较为严重的水体异味。在洞庭湖水体中广泛存在 DMS、DMTS、MIB、 $\beta$ -cyclocitral 和 GSM。目前仅有少数采样点异味物质的质量浓度超过其嗅阈值。

## 2.3 洞庭湖异味污染解析

水体中异味物质有广泛的藻类及微生物来源,同时也受水体理化性质等因素的影响。对洞庭湖水体中异味物质质量浓度和水质营养状况与藻类生物量分别做了双变量相关分析 (见表 2),以深入分析洞庭湖中异味物质的来源及影响因素。

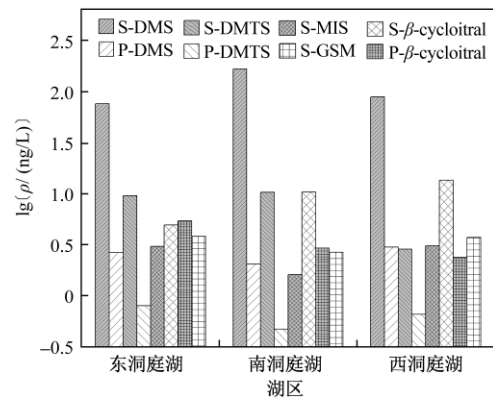


图 3 湖区的异味物质污染情况

Fig. 3 The pollution of taste and odor in Dongting Lake

由表 2 可见  $\rho$ (S-DMS) 与浮游植物总生物量、硅藻生物量和裸藻生物量显著相关;  $\rho$ (P-DMS) 与浮游植物总生物量相关,与硅藻生物量显著相关,这表明洞庭湖中的 DMS 很可能来自硅藻。  $\rho$ (S-DMTS) 虽仅表现出与 TLI 和隐藻生物量相关,与硅藻生物量无显著相关性,但  $\rho$ (P-DMTS) 有和  $\rho$ (DMS) 相似的规律,即与浮游植物总生物量和硅藻生物量显著相关,可能是  $\rho$ (S-DMTS) 受环境因子影响,而  $\rho$ (P-DMTS) 是直接由悬浮颗粒中测定的<sup>[22]</sup>,这些悬浮颗粒中含大量藻类,而  $\rho$ (P-DMTS) 和硅藻生物量显著相关,因而其可能的来源也为硅藻。由于 P-MIB 和 P-GSM 很少有检出,说明洞庭湖水体中悬浮颗粒 (包含大量藻类) 中 MIB 和 GSM 含量少;  $\rho$ (S-GSM) 与藻类生物量没有相关关系,  $\rho$ (S-MIB) 与甲藻生物量和裸藻生物量相关。根据报道<sup>[12, 31]</sup>, MIB 与 GSM 的藻类来源主要为蓝藻,因而推测洞庭湖中 S-MIB 和 S-GSM 很可能来自死亡分解的藻细胞或湖区土壤、沉积物中的微生物。  $\rho$ (P- $\beta$ -cyclocitral) 与 TLI 显著相关,而  $\rho$ (S- $\beta$ -cyclocitral) 则与这些因子无明显关系,原因可能是  $\beta$ -cyclocitral 在水体中容易被分解,从而表现出与这些因子不相关。

为进一步证实以上分析,对  $\rho$ (DMS)、 $\rho$ (DMTS) 和  $\rho$ ( $\beta$ -cyclocitral) 与硅藻中的优势种进行了分析,并把这 5 种异味物质与环境因子做进一步分析。结果表明  $\rho$ (DMS) 与直链藻生物量显著相关 (相关系数为 0.607),与针杆藻生物量相关 (相关系数为 0.510);  $\rho$ (DMTS) 与冠盘藻生物量显著相关 (相关系数为 0.921),  $\rho$ ( $\beta$ -cyclocitral) 与直链藻生物量相关 (相关系数为 0.442)。表明洞庭湖中直链藻与 DMS 和  $\beta$ -cyclocitral 关系密切,很可能是洞庭湖中这 2 种

异味物质的主要来源之一,而冠盘藻与 DMTS 关系紧密,也可能是 DMTS 在洞庭湖中的主要来源。

表 2 水体异味与水体营养和藻类的相关性

Table 2 Relationship between odor and TLI and algae

项目	TLI	浮游植物 总生物量	蓝藻 生物量	绿藻 生物量	硅藻 生物量	隐藻 生物量	甲藻 生物量	裸藻 生物量	金藻 生物量
$\rho$ (S-DMS)	0.255	0.520**	0.279	0.261	0.575**	0.037	0.297	0.636**	0.005
$\rho$ (P-DMS)	0.314	0.440*	0.223	0.034	0.582**	-0.082	0.194	0.338	-0.182
$\rho$ (S-DMTS)	0.407*	0.355	-0.102	0.236	0.380	0.482*	0.164	-0.003	0.044
$\rho$ (P-DMTS)	0.050	0.660**	0.357	0.265	0.629**	0.111	0.447*	0.127	0.054
$\rho$ (S-MIB)	-0.125	0.288	0.319	0.371	0.037	-0.165	0.567*	0.631*	0.275
$\rho$ (S- $\beta$ -cyclocitral)	-0.176	-0.214	0.085	-0.278	-0.268	-0.012	-0.043	-0.287	-0.151
$\rho$ (P- $\beta$ -cyclocitral)	0.517**	0.202	0.105	-0.003	0.322	0.166	0.057	0.232	0.227
$\rho$ (S-GSM)	0.344	0.259	0.174	0.228	0.392*	-0.022	0.284	0.307	0.185

注: \* 表示相关 ( $P < 0.05$ ); \*\* 表示显著相关 ( $P < 0.01$ )。下同。

5 种溶解态异味物质的质量浓度与环境因子的相关分析结果见表 3。其中  $\rho$ (S-DMS) 与水温 and  $\rho$ (TN) 相关, DMS 的沸点仅约 38 °C, 高水温极易导致其挥发到空气中, 因此  $\rho$ (S-DMS) 与水温显著相关。  $\rho$ (S-DMTS)

与 pH 相关,  $\rho$ (S- $\beta$ -cyclocitral) 与  $\rho$ (DO) 相关,  $\rho$ (S-GSM) 与  $\rho$ (DO) 和  $\rho$ (COD<sub>Mn</sub>) 相关, 而  $\rho$ (S-MIB) 则与这些环境因子关系不明显。说明这些异味物质不仅受到藻类及生物来源的影响, 也与环境因子紧密关联。

表 3 异味物质与环境因子的关系

Table 3 Relationship between odor and environmental factors

项目	水温	pH	$\rho$ (DO)	$E_h$	$\rho$ (TP)	$\rho$ (TN)	$\rho$ (COD <sub>Mn</sub> )
$\rho$ (S-DMS)	-0.535**	0.216	0.090	-0.250	0.214	0.413*	-0.253
$\rho$ (S-DMTS)	0.086	0.446*	-0.029	-0.141	-0.101	0.070	0.124
$\rho$ (S-MIB)	-0.070	-0.111	-0.156	0.239	-0.095	-0.155	0.301
$\rho$ (S- $\beta$ -cyclocitral)	-0.316	0.006	0.389*	-0.283	-0.096	0.194	-0.344
$\rho$ (S-GSM)	0.074	-0.034	-0.391*	0.256	-0.085	-0.151	0.362*

### 3 结论

a) 洞庭湖湖区水体呈中营养水平, 其中东洞庭湖营养水平最高, TLI 为 48.3, 南洞庭湖 TLI 为 47.3, 西洞庭湖为 42.7, 并且东洞庭湖局部富营养化 (TLI 为 51.0 ~ 52.0)。藻类平均生物量东洞庭湖为 2.72 mg/L, 西洞庭湖为 1.19 mg/L, 南洞庭湖为 1.04 mg/L。硅藻门直链藻是该时期洞庭湖的优势种。洞庭湖水体普遍受 DMS、DMTS、MIB、GSM 和  $\beta$ -cyclocitral 异味物质污染, 其中异味物质的溶解态最高质量浓度分别为 500.80、28.80、21.84、14.50 和 22.40 ng/L, 其中南洞庭湖异味污染最严重, 部分采样点  $\rho$ (DMTS)、 $\rho$ (MIB) 和  $\rho$ (GSM) 超过了嗅觉阈值。

b)  $\rho$ (DMS) 与直链藻生物量和针杆藻生物量显著相关,  $\rho$ (DMTS) 与冠盘藻生物量显著相关,  $\rho$ ( $\beta$ -cyclocitral) 与直链藻生物量相关。表明洞庭湖中直链藻、针杆藻和冠盘藻可能是这些异味的主要来源。MIB 和 GSM 由于没有检测到结合态, 它们在水体中极可能来自湖区土壤、沉积物或者死亡分解的藻细胞。此外, 这些异味物质还与环境因子关系紧密,

受 TLI、水温、pH、 $\rho$ (DO)、 $\rho$ (TN) 和  $\rho$ (COD<sub>Mn</sub>) 等环境因子的影响。

#### 参考文献 (References):

- [1] 姜加虎, 龚鸿身. 中国五大淡水湖 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2003.
- [2] WATSON S B. Cyanobacterial and eukaryotic algal odour compounds: signals or by-products? a review of their biological activity [J]. Phycologia, 2003, 42(4): 332-350.
- [3] YANG Min, YU Jianwei, LI Zonglai, et al. Taihu Lake not to blame for Wuxi's woes [J]. Science, 2008, 319: 158.
- [4] GINZBURG B, CHALIFA I, GUN J, et al. DMS formation by dimethylsulfoniopropionate route in freshwater [J]. Environ Sci Technol, 1998, 32(14): 2130-2136.
- [5] CHEN Jun, XIE Ping, MA Zhimei, 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]. Sci Total Environ, 2010, 409(2): 314-325.
- [6] 宋立荣, 李林, 陈伟, 等. 水体异味及其藻源次生代谢产物研究进展 [J]. 水生生物学报, 2004, 28(4): 434-439.
- [7] ZAITLIN B, WATSON S B. Actinomycetes in relation to taste and odour in drinking water: myths, tenets and truths [J]. Water Res, 2006, 40(9): 1741-1753.

- [ 8 ] ZIMBA P V ,GRIMM C C. A synoptic survey of musty/muddy odor metabolites and microcystin toxin occurrence and concentration in southeastern USA channel catfish ( *Ictalurus punctatus* Rafinesque) production ponds[J]. *Aquaculture* 2003 218( 1/2/3/4) : 81-87.
- [ 9 ] DAVIES J M ,ROXBOROUGH M ,MAZUMDER A. Origins and implications of drinking water odours in lakes and reservoirs of British Columbia ,Canada [J]. *Water Res* ,2004 ,38 ( 7) : 1900-1910.
- [10] 赵鹏 ,刘杰民 ,伊芹 等. 异味污染评价与治理研究进展[J]. *环境化学* 2011 30( 1) : 310-325.
- [11] WNOROWSKI A U. Taste and odors in the aquatic environment: a review[J]. *Water SA* ,1992 ,18( 3) : 203-214.
- [12] WATSON S B. Outbreaks of taste/odour causing algal species: theoretical ,mechanistic and applied approaches [ D ]. Alberta: University of Calgary ,1999.
- [13] DZIALOWSKI A R ,SMITH V H ,HUGGINS D G , *et al.* Development of predictive models for geosmin-related taste and odor in Kansas ,USA ,drinking water reservoirs[J]. *Water Res* 2009 43( 11) : 2829-2840.
- [14] SAADOUN I ,SCHRADER K K ,BLEVINS W T. Environmental and nutritional factors affecting geosmin synthesis by *Anabaena* sp. [J]. *Water Res* 2001 35( 5) : 1209-1218.
- [15] SMITH V H ,SIEBER-DENLINGER J ,DENOYELLES F , *et al.* Managing taste and odor problems in a eutrophic drinking water reservoir[J]. *Lake Reserv Manage* 2002 ,18( 4) : 319-323.
- [16] WATSON S B ,CHARITON M ,RAO Y R , *et al.* Off flavours in large waterbodies: physics ,chemistry and biology in synchrony [J]. *Water Sci Technol* 2007 55( 5) : 1-8.
- [17] HEUSCHELE J ,CANDOLIN U. An increase in pH boosts olfactory communication in sticklebacks [J]. *Biol Lett* 2007 3( 4) : 411-413.
- [18] 杨汉 ,黄艳芳 ,李利强 等. 洞庭湖的富营养化研究[J]. *甘肃环境研究与监测* ,1999 ,12( 3) : 120-122.
- [19] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社 2002.
- [20] 张霞. 上行 - 下行作用对浮游植物群落影响的生态学研究 [D]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所 2008.
- [21] DENG Xuwei ,LIANG Gaodao ,CHEN Jun , *et al.* Simultaneous determination of eight common odors in natural water body using automatic purge and trap coupled to gas chromatography with mass spectrometry [J]. *J Chromatogr A* 2011 ,1218 ( 24) : 3791-3798.
- [22] DENG Xuwei ,XIE Ping ,QI Min , *et al.* Microwave-assisted purge-and-trap extraction device coupled with gas chromatography and mass spectrometry for the determination of five predominant odors in sediment ,fish tissues and algal cells [J]. *J Chromatogr A* 2012 , 1219: 75-82.
- [23] SALEMI A ,LACORTE S ,BAGHERI H , *et al.* Automated trace determination of earthy-musty odorous compounds in water samples by on-line purge-and-trap-gas chromatography-mass spectrometry [J]. *J Chromatogr A* 2006 ,1136: 170-175.
- [24] MACHADO S , GONCALVES C , CUNHA E , *et al.* New developments in the analysis of fragrances and earthy-musty compounds in water by solid-phase microextraction ( metal alloy fibre ) coupled with gas chromatography-( tandem ) mass spectrometry [J]. *Talanta* 2011 84( 4) : 1133-1140.
- [25] 金相灿. 中国湖泊环境 [M]. 北京: 海洋出版社 ,1995.
- [26] 李利强 ,张建波. 洞庭湖浮游植物群落结构及与水质营养状况的关系 [J]. *甘肃环保科技* ,1999 5( 2) : 8-11.
- [27] 李利强 ,张建波 ,田琪. 洞庭湖南嘴水域浮游藻类及与水质关系的研究 [J]. *甘肃环境研究与监测* 2002 ,15( 3) : 158-161.
- [28] 李杰 ,彭福利 ,丁栋博 等. 湘江藻类水华结构特征及对重金属的积累 [J]. *中国科学: 生命科学* 2011 41( 8) : 669-677.
- [29] 杨强 ,谢平 ,徐军 等. 河流型硅藻水华研究进展 [J]. *长江流域资源与环境* 2011 20( Z1) : 159-165.
- [30] PETER A ,KOSTER O ,SCHILDKNECHT A , *et al.* Occurrence of dissolved and particle-bound taste and odor compounds in Swiss Lake waters [J]. *Water Res* 2009 43( 8) : 2191-2200.
- [31] 齐飞 ,徐冰冰 ,樊慧菊 等. 北京市景观水体臭味污染特征 [J]. *环境科学研究* 2011 24( 10) : 1115-1122.

(责任编辑: 郑朔方)