

武汉东湖水体异味物质及其与水环境因子相互关系*

胡宇飞^{1,2}, 余得昭^{1,2}, 过龙根¹, 谢平^{1**}

(1: 中国科学院水生生物研究所东湖湖泊生态系统试验站, 武汉 430072)

(2: 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 根据 2014 年 1—12 月东湖 3 个湖区(水果湖、郭郑湖及汤菱湖)中 9 种溶解态异味物质(DMS、DMDS、DMTS、 β -cyclocitral、 β -ionone、MIB、GEO、IBMP 和 IPMP)的月间采样结果,对异味化合物浓度之间的相关性及其与东湖水体中主要环境因子的相关关系进行了分析。研究发现 9 种异味物质浓度整体水平在夏、秋季相对冬、春季较高,其中 DMS、DMTS、 β -cyclocitral、 β -ionone 的月平均浓度较高,且在夏季均超出嗅味阈值,其他几种异味物质浓度检出较低,对东湖的异味强度影响较小。低浓度 β -cyclocitral 及 β -ionone 具有烟草或芳香味,DMS 与 DMTS 具有腐臭味,因此 DMS 及 DMTS 为东湖异味的主要致嗅物质。从异味物质空间分布来看,郭郑湖区的 DMS、DMDS、 β -cyclocitral 及 β -ionone 年平均浓度均低于其他两个湖区。综合该湖区中相对较低的年平均总氮(TN)和叶绿素 a(Chl.a)浓度以及受人类活动影响程度较低的情况,该湖区的异味问题要轻于水果湖及汤菱湖区。此外,研究发现 DMTS、 β -cyclocitral 和 β -ionone 浓度与 Chl.a 浓度均呈显著正相关,DMDS 及 DMTS 浓度与 TN 浓度呈显著正相关,DMS 及 β -cyclocitral 浓度与溶解氧浓度呈显著负相关,表明由于大量藻类快速腐败导致的水体含氧量下降可能会对水体异味产生重要影响。为防止东湖水体恶臭的发生,对藻类进行控制尤为重要。

关键词: 东湖; 异味物质; 环境因子; 相互关系

Relationships of water taste and odor compounds and their related environmental factors in Lake Donghu, Wuhan

HU Yufei^{1,2}, YU Dezhao^{1,2}, GUO Longgen¹ & XIE Ping^{1**}

(1: Donghu Experimental Station of Lake Ecosystems, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, P.R.China)

(2: University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R.China)

Abstract: Nine dissolved taste and odor compounds (T & O), namely DMS, DMDS, DMTS, β -cyclocitral, β -ionone, MIB, GEO, IBMP and IPMP were investigated in three water areas (Lake Shuiguo, Lake Guozheng and Lake Tangling) of Lake Donghu monthly in 2014. According to the changes of the nine T & O compounds and related environmental factors of each month, relationships of these compounds as well as the relationships with environmental factors were analyzed in this study. It was found that the concentrations of the nine T & O compounds were higher in the summer and fall than in the winter and spring. The seasonal concentrations of DMS, DMDS, DMTS, β -cyclocitral and β -ionone were high and their concentrations all surpassed OTC (Over The Count) in the summer, while other T & O compounds made little contributions to the odor problems of Lake Donghu because of their relative low concentrations. Low concentrations of β -cyclocitral and β -ionone can make water smell flavoury while DMS and DMTS contribute fusty smelling, making the main odors that led Lake Donghu smelly. As for the distributions of odors, the yearly concentrations of DMS, DMDS, β -cyclocitral and β -ionone in Lake Guozheng were all lower than that of the other two areas in Lake Donghu. Based on the relative low concentrations of total nitrogen and chlorophyll-a(Chl.a) and the relative low influence of human activities on Lake Guozheng, odor problem in this area is lighter than that of Lake Shuiguo and Lake Tangling. Meanwhile, there were significantly positive correlations between concentrations of Chl.a and the three taste and odor compounds (DMTS, β -cy-

* 淡水生态与生物技术国家重点实验室项目(2015FB13 2014FBZ02)资助。2016-03-03 收稿; 2016-05-03 收修改稿。
胡宇飞(1991~)女, 硕士研究生; E-mail: yufei@ihb.ac.cn.

** 通信作者; E-mail: xieping@ihb.ac.cn.

clocital and β -ionone), as well as between concentrations of total nitrogen and the two odors (DMDS and DMST) in the study. Besides, negative correlations were presented in concentration of dissolved oxygen (DO) with DMS and β -cyclocital, respectively, indicating that low DO concentration induced by decayed algae could aggravate odor problems. To manage the occurrences of taste and odor events in Lake Donghu, it is critical to control the growth of algae.

Keywords: Lake Donghu; taste and odor compounds; environmental factors; correlation

湖泊是重要的饮用水及水产品源地. 近年来的湖泊水体富营养化引起的蓝藻水华或形成的优势种群的藻类导致的水体异味污染对湖泊生态及人类生活有严重的危害. 水体中高含量异味物质的存在不仅严重影响水质, 而且还可进一步积累于水生生物体内, 带来一系列水产品异味问题. 如在 1970s 末, 北欧挪威 Mjosa 湖中大量颤藻“水华”引起的难闻霉味影响了当地约 20 万人的正常供水^[1]; 1969 年在芬兰 Oulu 海域, 由于鱼肉中难闻的霉味致使当地渔民失去主要经济收入^[2]; 类似事件在其他国家也经常发生. 在众多水体异味的报道中, GEO(geosmin, 土臭素)和 MIB(2-methylisoborneol, 二甲基异茨醇)两种土霉味化合物在藻类次生代谢产物中最为常见. 近年来, 对 β -cyclocital(β -环柠檬醛)、 β -ionone(β -紫罗兰酮)、IPMP(2-isopropyl-3-methoxy pyrazine, 2-异丙基-3-甲氧基吡嗪)及 IBMP(2-isobutyl-3-methoxy pyrazine, 2-异丁基-3-甲氧基吡嗪)的研究也逐渐增多^[3-5]. 挥发性有机硫化物也会导致水体产生异味, Bechard 等^[6]在调查湖泊的富营养化时发现在绿藻水华腐烂过程中产生了大量的 DMS(甲硫醚)、DMDS(二甲基二硫醚)和 DMST(二甲基三硫醚). 以上 9 种主要异味物质与水环境因子之间有着密切的联系, 且现在经常被用来判断水体异味的情况. 因此找出这 9 种物质与水环境因子间的关系对于湖泊水体中异味物质的防控具有重要意义.

东湖(30°31'~30°36'N, 114°21'~114°28'E)位于长江中游, 是一个典型的中型浅水内陆湖泊, 面积约 32 km², 平均水深 2.2 m, 最大水深 4.8 m. 它是武汉市生活、工业与农业灌溉用水的水源地, 全国闻名的风景区和水上休闲运动场, 还具有防汛调蓄、水产养殖、调节小气候等多种功能^[7]. 由于东湖受周边地区工农业迅速发展及人口迅速增加的影响, 水体富营养化程度较重, 严重破坏了生态平衡, 水体中藻源性次生代谢产物产生的异味物质对饮用水安全及水产品质量具有重要影响, 因此对东湖水体中异味物质的研究十分必要. 本研究以东湖为研究对象, 分析了 2014 年东湖水体中溶解态异味物质的含量, 并分析了各异味物质之间以及其水环境因子之间的相关关系, 旨在找出影响东湖水体中异味化合物的主要环境因素.

1 材料与方法

1.1 试剂与仪器

DMS、DMDS、DMST、MIB、GEO、 β -Cyclocital、 β -ionone、IBMP 及 IPMP 的标准品购自 Sigma 公司, 并用色谱级甲醇(Merck 公司)配置成 1 mg/L 的溶液用于标准曲线溶液的配制. 用于分离溶解态及结合态异味物质的玻璃纤维素薄膜 GF/C 膜购自 Brentford 公司. 水体中的溶解态异味物质采用吹扫捕集(Eclipse4660, 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)法进行分析^[8]. 色谱柱为 HP-5MSUI 石英毛细管柱(30 m×0.25 mm×0.25 μ m).

1.2 样品采集与水环境因子的测定

2014 年 1—12 月, 每月定期在东湖 3 个采样点(图 1: 1[#]位于水果湖区: 30.551111°N, 114.363611°E; 2[#]位于郭郑湖区: 30.560833°N, 114.385278°E; 3[#]位于汤菱湖区: 30.586667°N, 114.408333°E)采集水面以下 0.5 m 和湖底以上 0.5 m 处的混合水样, 迅速混匀后装入样品瓶(不留顶空)放入便携式冰箱保存. 迅速转移至实验室后, 用 1.2 μ m 玻璃纤维 GF/C 滤膜迅速过滤水样, 滤液转入 40 ml 样品瓶中, 不留顶空及气泡, 旋紧瓶盖密封, 所有样品均于 4 h 内分析完. 同时参照金相灿等^[9]的方法测定水化学指标, 包括总氮(TN)、总磷(TP)、铵态氮(NH₄⁺-N)及叶绿素 a(Chl.a). 水温(T_w)、溶解氧(DO)、电导率(COND)和 pH 等指标在采样时用 YSI 6600 多参数水质分析仪测定.

1.3 水中溶解态异味物质的测定

参考 Deng 等^[8]的方法对经 Whatman GF/C 膜过滤后的水样中的异味物质进行测定.

1.4 数据分析

采用 SPSS 22.0 软件对各样点的水环境因子与异味物质的空间分布数据进行分析.

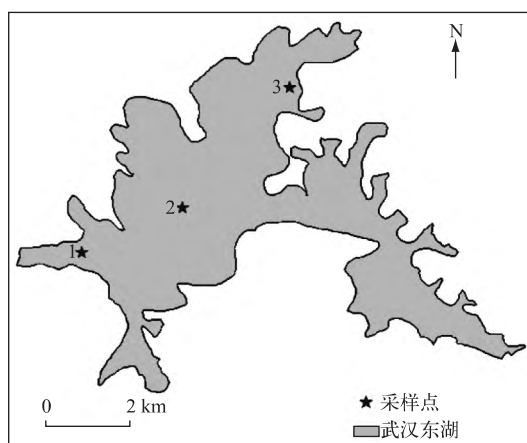


图 1 武汉东湖采样点分布

Fig.1 Schematic diagram of the sampling sites in Lake Donghu

2 结果与分析

2.1 水环境理化指标的变化

在时间变化上, 2014 年东湖 Chl.a 浓度夏季较高, Chl.a 的月平均最高值出现在 10 月, 为 44.81 $\mu\text{g/L}$, 月平均最低值出现在 2 月, 为 6.70 $\mu\text{g/L}$. 其中单点最高值出现在 6 月的汤菱湖区, 高达 68.63 $\mu\text{g/L}$. TN 浓度在夏季较高, 春季偏低, 但在 1 月出现月平均浓度最高值, 为 1.59 mg/L . TP 浓度在 6—9 月较高, 月平均浓度最高值为 0.17 mg/L (9 月). $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度的最大值也出现在 9 月, 为 0.44 mg/L , 冬季 (11、12 月) 浓度仅次于 9 月的最大值, 于 5 月出现最小值 (0.06 mg/L). DO 月平均最大值为 11.35 mg/L (3 月), 最小值为 6.39 mg/L (7 月), 全年浓度波动幅度不大. 水温随季节变化而明显变化, 范围为 5.51~31.20 $^\circ\text{C}$. pH 范围为 5.39~10.20. 水环境理化指标范围及年平均值如表 1 所示.

在空间分布上, 东湖采样点水果湖区 (1 $^\#$) 和汤菱湖区 (3 $^\#$) 的年平均 TP 浓度分别为 0.13 和 0.12 mg/L , 郭郑湖 (2 $^\#$) 最低, 为 0.11 mg/L . 同时郭郑湖区 Chl.a 年均浓度最低, 为 21.91 $\mu\text{g/L}$. 汤菱湖区年平均 TN、Chl.a 及 DO 浓度均最高, 分别为 1.28 mg/L 、33.13 $\mu\text{g/L}$ 及 9.36 mg/L . 其年平均 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度最低, 为 0.22 mg/L (表 2).

表 1 研究期间东湖水环境因子范围及均值

Tab.1 Annual means and ranges of water quality variables in Lake Donghu during the study period

参数	范围	年平均值
$T_w / ^\circ\text{C}$	5.51~31.20	19.97
DO/(mg/L)	4.73~13.73	8.94
pH	5.39~10.20	8.75
电导率/($\mu\text{S/cm}$)	307~439	398.20
Chl.a/($\mu\text{g/L}$)	5.58~68.63	28.33
TN/(mg/L)	0.49~1.95	1.16
$\text{NH}_4^+\text{-N}$ /(mg/L)	0.02~0.62	0.25
TP/(mg/L)	0.03~0.42	0.12

表 2 研究期间东湖各采样点环境因子的年平均值

Tab.2 Annual means of water quality variables at each sampling site of Lake Donghu during the study period

位点	TP/ (mg/L)	TN/ (mg/L)	$\text{NH}_4^+\text{-N}$ / (mg/L)	Chl.a/ ($\mu\text{g/L}$)	电导率/ ($\mu\text{S/cm}$)	T_w / $^\circ\text{C}$	pH	DO/ (mg/L)
1	0.13	1.09	0.27	29.95	404.7	20.39	8.97	8.77
2	0.11	1.10	0.26	21.91	403.4	20.02	8.49	8.70
3	0.12	1.28	0.22	33.13	386.6	19.49	8.80	9.36

2.2 溶解态异味物质浓度变化

在对东湖水体周年采样过程中,可以感知到6—9月期间东湖水体整体散发出轻微腥臭味,夏、秋之交时较轻,秋、冬季时明显减轻,甚至没有感知到异味。从湖区分布来看,水果湖及汤菱湖区异味程度相近,在夏季时均散发轻微腥臭味,而郭郑湖区夏季散发的腥臭味相比另外两个湖区要弱很多。

9种溶解态异味物质中除IBMP在6、7、8、9、10及12月均未被检测到,其余异味物质在3个采样点中均被检出。除DMDS及IPMP外,其他7种异味物质均有月平均浓度超出异味阈值(OTC)的情况。超出OTC的异味物质中以DMS、 β -cyclocitral及 β -ionone最为显著,其中DMS及 β -cyclocitral浓度全年均超出异味阈值, β -ionone浓度仅1月低于7 ng/L,其余11个月均超出。DMS、DMTS、 β -cyclocitral及 β -ionone浓度在夏季时普遍偏高。由于 β -ionone及 β -cyclocitral嗅味主要为烟叶或花香味,而DMS及DMTS主要为腐臭味,因此夏季东湖散发出的轻微腥臭味主要由DMS及DMTS贡献(表3)。

从异味物质空间分布(表4)来看,水果湖区的DMS年平均浓度为54.09 ng/L,高于郭郑湖区及汤菱湖区(49.17及49.61 ng/L)。DMDS的年平均浓度中,郭郑湖区最低,为4.96 ng/L,郭郑湖及汤菱湖区稍高,分别为8.04及9.23 ng/L。3个位点的 β -cyclocitral年平均浓度分别为14.27、12.39和16.12 ng/L。水果湖区及汤菱湖区的 β -ionone年平均浓度(24.43及32.53 ng/L)均高于郭郑湖区(19.94 ng/L)。其他几种异味物质在3个采样位点的差异不大。由此可见,郭郑湖区的异味问题要轻于其他两个位点。

表3 研究期间东湖3个位点水样异味物质月平均浓度(ng/L)变化*

Tab.3 Seasonal changes of taste and odor compounds concentrations at the 3 sampling sites of Lake Donghu during the study period

月份	DMS	DMDS	DMTS	β -cyclocitral	β -ionone	IBMP	IPMP	MIB	GEO
1	8.87	1.24	3.74	6.41	6.17	17.82	1.16	10.89	0.92
2	25.36	0.61	1.54	3.62	13.76	5.31	4.07	2.99	0.52
3	21.46	0.39	0.34	2.86	14.85	8.55	1.60	6.26	1.01
4	15.98	0.29	0.24	2.92	29.35	7.39	1.12	34.08	1.54
5	21.12	0.31	0.46	3.09	17.95	11.92	0.94	11.32	2.46
6	82.02	13.38	16.67	30.93	34.84	—	0.43	15.97	4.01
7	100.15	7.03	19.40	23.36	25.87	—	0.28	14.98	1.95
8	139.33	8.20	16.87	27.67	42.71	—	0.41	11.31	2.45
9	64.03	4.16	14.13	21.68	38.23	—	0.36	5.77	1.64
10	61.65	14.77	33.33	23.06	38.14	—	2.23	10.54	0.90
11	38.75	23.02	20.51	16.41	27.30	1.23	0.46	3.44	0.83
12	32.79	15.54	24.68	9.09	18.41	—	0.59	3.15	1.00
年平均	50.96	7.41	12.66	14.26	25.63	4.35	1.14	10.89	1.60
OTC	0.3~1000	2200	10	0.5~19300	7	2~16	20	15	4

* 各异味物质 OTC 值引自文献[10-13]; 月平均值为3个位点的月平均值,超出OTC的用下划线标出。

表4 研究期间东湖各采样点异味物质年浓度(ng/L)

Tab.4 Annual concentrations of taste and odor compounds at each sampling site of Lake Donghu during the study period

位点	DMS	DMDS	DMTS	IPMP	IBMP	MIB	β -cyclocitral	GEO	β -ionone
1	54.09	8.04	12.79	0.91	4.29	16.11	14.27	2.07	24.43
2	49.17	4.96	11.19	0.90	5.29	17.29	12.39	1.64	19.94
3	49.61	9.23	14.00	1.03	3.27	15.27	16.12	1.11	32.53

2.3 水环境因子与异味物质及异味物质之间的相关关系

相关分析结果(表5)表明,东湖水体中DMS浓度与水温呈极显著正相关($P < 0.01$),与DO浓度呈显著

负相关 ($P < 0.05$)。DMDS 浓度与 TP 浓度呈极显著正相关 ($P < 0.01$)，与 TN 浓度呈显著正相关 ($P < 0.05$)。DMTS 浓度与 Chl.a 和 TN 浓度呈显著正相关 ($P < 0.05$)，与 pH 呈显著负相关 ($P < 0.05$)。β-cyclocitral 及 β-ionone 浓度与 Chl.a 浓度和水温分别呈极显著正相关 ($P < 0.01$)，分别与 TP 浓度显著正相关 ($P < 0.05$)，并与电导率呈极显著负相关 ($P < 0.01$)。β-cyclocitral 浓度还与 DO 浓度呈显著负相关 ($P < 0.05$)，与 TN 浓度呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。同时分析了 9 种异味物质浓度之间的相关关系 (表 6)，发现 DMTS 浓度与 DMS 及 DMDS 浓度均呈极显著正相关 ($P < 0.01$)，β-cyclocitral 浓度与 β-ionone 浓度呈极显著正相关 ($P < 0.01$)，同时与 3 种硫醚类异味物质也分别呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。

表 5 东湖异味物质和水质变量之间的相关关系

Tab.5 Correlations between water quality variables and taste and odor compounds in Lake Donghu

	DMS	DMDS	DMTS	MIB	GEO	β-cyclocitral	β-ionone	IBMP	IPMP
Chl.a	—	—	0.370*	—	—	0.527**	0.853**	—	-0.465**
DO	-0.422*	—	—	—	-0.405*	-0.367*	—	—	0.416*
pH	—	—	-0.371*	—	—	—	—	—	—
NH ₄ ⁺ -N	—	—	—	—	—	—	—	—	—
TP	—	0.471**	—	—	—	0.372*	0.407*	—	-0.355*
TN	—	0.341*	0.336*	—	—	0.469**	—	—	-0.396*
T _w	0.707**	—	—	—	0.649**	0.655**	0.557**	—	-0.626**
COND	—	-0.402*	-0.493**	—	—	-0.594**	-0.738**	-0.532*	0.532**

* 表示 $P < 0.05$ ，** 表示 $P < 0.01$ ，“—”表示相关性不显著，下同。

表 6 东湖异味物质之间的相关关系

Tab.6 Correlations among taste and odor compounds in Lake Donghu

	DMS	DMDS	DMTS	MIB	GEO	β-cyclocitral	β-ionone	IBMP	IPMP
DMS	1								
DMDS	—	1							
DMTS	0.433**	0.764**	1						
MIB	—	—	—	1					
GEO	0.432**	—	—	—	1				
β-cyclocitral	0.778**	0.479**	0.701**	—	0.400*	1			
β-ionone	0.544**	—	0.419*	—	—	0.698**	1		
IBMP	—	0.677**	0.712**	—	—	0.783**	-0.489*	1	
IPMP	-0.433*	-0.355*	-0.514**	—	—	-0.527**	-0.396*	—	1

3 讨论

3.1 异味物质来源

除了工农业废水及生活污水污染外，水体富营养化导致的藻类水华也是引起水体异味的重要原因。在富营养化水体中，由于营养物质过剩，使得淡水生态系统的平衡遭到破坏，一些藻、菌微生物群落过剩生长，这些藻、菌等能在生长繁殖或死亡分解时不断分泌和产生出各种具有异味的次生代谢产物。东湖自 1980s 的观测数据就显示富营养化程度比较严重^[14-15]，近年来虽然水体中个别因子（如浮游植物等）变化较大，但总体上富营养化程度没有显著变化。

在以往水体中检测到的硫化物中，最常见的为 DMS、DMDS 和 DMTS^[16-17]，而本研究也表明在东湖水体中广泛存在硫化物类异味物质，尤其是 DMS (表 3)。研究表明，DMS、DMDS 和 DMTS 可由藻类或水生植物在生长过程中及死亡腐烂后的有机质中分解产生^[18-19]。在湖泊等富营养化水体中，藻体细胞死亡分解可放出二甲基磺基丙酯 (DMSP)，DMSP 是一种可以通过调节细胞渗透压及抗凝作用来对细胞本身提供保护的化

学物质. 经过一些微生物(如淡水 SAR11 细菌)以及物理化学降解过程, DMSP 可以转化成 DMS 并进一步转化成 DMDS 和 DMTS^[20]. 其次, 微生物降解含硫有机物也是这类异味物质产生的重要途径之一^[21]. 含有蛋白质的工业废水和生活污水等排入水体后, 在厌氧条件下也可以生成甲硫醇, 甲硫醇可以在好氧条件下转化成 DMDS, DMDS 可以进一步转化为 DMS^[22]. 因此, 本研究中 DMTS 与 DMS 及 DMDS 分别表现出显著相关的关系可能是由于它们的产生途径类似. 2[#] 采样点郭郑湖区夏季时散发的腥臭味相比另外两个湖区要弱很多, 该湖区的 DMS 及 DMTS 年平均浓度要低于另外两个湖区, 且该湖区年平均 TN 及 Chl.a 浓度均为 3 个湖区中最低的, 表明可能是水体中相对较低的营养盐浓度没有造成藻类的大量产生, 从而由藻类生长及死亡腐烂后的有机质中产生的 DMS 及 DMTS 浓度相对较低; 且相比其他两个采样点, 该湖区采样点距离岸边较远, 可能受人类活动(工业废水及生活污水的排放等)干扰较小, 污染物来源主要是工业尘埃、生活污水及工业废水所占比例低于 28%, 湖中心具有较强的自净能力^[23]. 在厌氧条件下产生了相对较少的硫化物类异味物质. 综合以上原因, 郭郑湖区的异味问题相比其他两个湖区较轻. β -cyclocitral 和 β -ionone 主要是由微囊藻属体内的 β -胡萝卜素氧化得来, 在藻体生长过程中伴随少量产生, 当藻体衰败死亡时, 经酶催化作用会大量产生^[24-25]. 此外 β -cyclocitral 和 β -ionone 能够加速蓝藻的腐败, 从而增加 DMS 和 DMTS 的释放量, 这也解释了本实验中 β -cyclocitral 和 β -ionone 与 DMS、DMTS 紧密相关. MIB 和 GEO 是放线菌、黏细菌和一些浮游藻类如颤藻属、束丝藻属及鱼腥藻的代谢产物^[10, 26-27]. IBMP 和 IPMP 检出量较低, 通常在水的贮存过程中产生, 是蓝藻在微生物分解过程中的产物^[3, 28], 已有研究报道 IBMP 及 IPMP 两种物质的检出都很低^[29-30]. DMS、DMDS 及 DMTS 3 种硫化物和 β -cyclocitral、 β -ionone 的浓度较高, 分别为 50.96、7.41、12.66、14.26 和 25.63 ng/L, 其中 DMS、DMTS、 β -cyclocitral 和 β -ionone 超出它们的异味阈值. β -cyclocitral 和 β -ionone 是具有烟叶或花香味的异味化合物, 虽然能引起人的嗅觉感知, 但对东湖水体异味贡献不大, 为非主要致嗅物质. 而 DMS 及 DMTS 具有腐臭味, 夏季浓度较高时可以使得东湖水体呈现出轻微腥臭味, 对湖泊生态系统及人类生活具有较大的潜在危害.

3.2 东湖水体中与异味物质密切相关的水环境因子

异味物质不仅受到其来源的影响, 也受到众多非生物因子的影响. Qi 等^[31]通过对太湖中常见异味物质与环境因子之间的分析表明: TN、总溶解氮、DO、化学需氧量、pH 等均与水体中的异味物质有重要的关系. 这些非生物环境因子不仅能够影响藻类产异味的能力, 还能够直接导致异味物质的分解与转化.

富营养化水体中的异味通常发生在气温较高的季节, 如春季、夏季或秋季. 夏季水温较高时, DMS 极易挥发到空气中. 而夏季水体中 DMS 浓度明显较高, 这与 DMS 的挥发性相矛盾. DMS 从水体挥发进入大气时满足公式: $Flux = K \cdot C$ (C 为水体中 DMS 浓度; K 为交换系数, 与水温、风速等因子呈正相关)^[32]. DMS 沸点为 38℃, 水温越高, 其挥发越多. 但是在温度较高的水环境中藻类生物量代谢过程加快, 可间接导致异味物质浓度的升高, 因而 DMS 浓度与水温表现出显著正相关, 在夏季高温时 DMS 浓度较高. β -cyclocitral 和 β -ionone 与 Chl.a 浓度均具有显著正相关可能是由于它们主要由藻类产生^[33-34], 而 Chl.a 浓度可以作为水体中藻类生物量的一个指标. 湖水中藻类通过呼吸作用消耗水中的氧气, 同时微生物呼吸作用及藻类自身衰亡分解过程均会导致 DO 浓度降低, 此外藻类死亡分解也会伴随着大量异味物质及营养盐的释放, 这可能是硫化物类异味物质浓度与 DO 浓度呈显著负相关、与 TN、TP 浓度呈显著正相关的原因. NH_4^+-H 浓度与异味物质浓度之间未发现显著相关关系, pH 等环境因子对异味化合物的解释量都很小, 这可能与水中溶解态异味物质受到多种因素的影响有关. MIB 能够被假单胞菌(*Pseudomonas* sp.) 和肠杆菌(*Enterobacter* sp.) 降解^[35]; 太阳光能够有效降解水中溶解态的 β -cyclocitral 和 β -ionone^[36]; 湖泊水产品如鱼、虾等会通过鳃、皮肤等吸附异味物质^[37-38]. 除了微生物降解、光降解及吸附作用, 细胞产生速率、波浪干扰及异味化合物本身的挥发等因素也会影响水中溶解态异味物质的浓度变化^[31, 39]. 因此, 本实验中检测到的异味物质是多种环境因素综合作用的结果.

致谢: 感谢中国科学院水生生物研究所陈隽研究员的指导, 感谢于佳帮助制作采样位点示意图.

4 参考文献

- [1] Holtan H. The Lake Mjøsa story. *Arch Hydrobiol Beih Ergebn Limnol*, 1979, **13**: 242-258.

- [2] Presson PE. Off-flavours in aquatic ecosystem—an introduction. *Water Science and Technology* ,1983 ,**15**(6/7) : 1-11.
- [3] Peter A , Köster O , Schildknecht A *et al.* Occurrence of dissolved and particle-bound taste and odor compounds in Swiss lake waters. *Water Research* ,2009 ,**43**(8) : 2191-2200.
- [4] Li L , Wan N , Gan N *et al.* Annual dynamics and origins of the odorous compounds in the pilot experimental area of Lake Dianchi , China. *Water Science and Technology* ,2007 ,**55**(5) : 43-50.
- [5] Xu LP , Xiong BX , Pan Y *et al.* Relationship between concentrations of odorous compounds and biomass of phytoplankton and actinomycetes in freshwater ponds of Beijing , China. *Aquaculture International* ,2010 ,**18**(3) : 245-254.
- [6] Bechard RG , Rayburn WR. Volatile organic sulfides from freshwater algae. *Journal of Phycology* ,1979 ,**15**(4) : 379-383.
- [7] Shen Xiaoli. Ecological environment of East Lake: Vicissitude and recovery. *Environmental Science and Technology* ,2003 ,**26**(4) : 24-26. [沈晓鲤. 武汉东湖的生态环境变迁与恢复问题. *环境科学与技术* ,2003 ,**26**(4) : 24-26.]
- [8] Deng XW , Liang G , Chen J *et al.* Simultaneous determination of eight common odors in natural water body using automatic purge and trap coupled to gas chromatography with mass spectrometry. *Journal of Chromatography A* ,2011 ,**1218**(24) : 3791-3798.
- [9] Jin Xiangcan , Tu Qingying eds. The standard methods in lake eutrophication investigation. Beijing: China Environmental Science Press ,1990. [金相灿,屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范. 北京: 中国环境科学出版社,1990: 229-230.]
- [10] Mallevalle J , Suffet IH. Identification and treatment of tastes and odors in drinking water. *Regional Anesthesia and Pain Medicine* ,1981 ,**33**(5) : e99.
- [11] Young W , Horth H , Crane R *et al.* Taste and odour threshold concentrations of potential potable water contaminants. *Water Research* ,1996 ,**30**: 331-340.
- [12] Waston SB , Ridal J. Periphyton: A primary source of widespread and severe taste and odour. *Water Science and Technology* ,2000 ,**49**: 33-39.
- [13] Juttner F. Characterization of *Microcystis* strains by alkyl sulfides and beta-cyclocitral. *Zeit Schrift fur Anturforschung C-A. Journal of Biosciences* ,1984 ,**39**: 867-871.
- [14] Liu Jiankang ed. Studies on the ecology of Lake Donghu. Beijing: Science Press ,1990: 1-407. [刘健康. 东湖生态学研究. 北京: 科学出版社,1990: 1-407.]
- [15] Ruan Jingrong , Cai Qinghua , Liu Jiankang. A phosphorus-phytoplankton dynamics model for lake Donghu in Wuhan. *Acta Hydrobiologica Sinica* ,1988 ,**12**(4) : 289-307. [阮景荣,蔡庆华,刘健康. 武汉东湖的磷-浮游植物动态模型. *水生生物学报* ,1988 ,**12**(4) : 289-307.]
- [16] Richards SR , Kelly CA , Rudd JWM. Organic volatile sulfur in lakes of the Canadian Shield and its loss to the atmosphere. *Limnology and Oceanography* ,1991 ,**36**(3) : 468-482.
- [17] Hu H , Mylon SE , Benoit G. Volatile organic sulfur compounds in a stratified lake. *Chemosphere* ,2007 ,**67**(5) : 911-919.
- [18] Lomans BP , Smolders A , Intven LM *et al.* Formation of dimethyl sulfide and methanethiol in anoxic freshwater sediments. *Applied and Environmental Microbiology* ,1997 ,**63**(12) : 4741-4747.
- [19] Ginzburg B , Dor I , Chalifa I *et al.* Formation of dimethyloligosulfides in Lake Kinneret: Biogenic formation of inorganic oligosulfide intermediates under oxic conditions. *Environmental Science and Technology* ,1999 ,**33**(4) : 571-579.
- [20] Jiang Lin , Hu Min , Ren Changjiu. Biogenic production and consumption of dimethylsulfide in ocean. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis* ,1997 ,**33**(2) : 240-245. DOI: 10.13209/j.0479-8023.1997.034. [蒋林,胡敏,任长久. 海洋二甲基硫的生物生产与降解. *北京大学学报: 自然科学版* ,1997 ,**33**(2) : 240-245.]
- [21] Lu X , Fan C , He W *et al.* Sulfur-containing amino acid methionine as the precursor of volatile organic sulfur compounds in algae-induced black bloom. *Journal of Environmental Sciences* ,2013 ,**25**(1) : 33-43.
- [22] Zhang Xiaojian , Zhang Yue , Wang Huan *et al.* Emergent drinking water treatment for taste and odor control in Wuxi City water pollution incident. *Water And Wastewater Engineering* ,2007 ,**33**(9) : 7-12. [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.]
- [23] Xiong Zhiping. Study on water environment pollution factors and renovation measurements of the East Lake. *Water Saving Irrigation* ,2007 , (4) : 13-16. [熊志平. 东湖水环境污染因素与整治措施. *节水灌溉* ,2007 , (4) : 13-16.]
- [24] Watson SB , Ridal J , Boyer GL. Taste and odour and cyanobacterial toxins: Impairment , prediction , and management in the Great Lakes. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* ,2008 ,**65**(8) : 1779-1796.
- [25] Smith JL , Boyer GL , Zimba PV. A review of cyanobacterial odorous and bioactive metabolites: Impacts and management

- alternatives in aquaculture. *Aquaculture* , 2008 , **280**(1) : 5-20.
- [26] Wnorowski AU. Tastes and odours in the aquatic environment: A review. *Water SA* , 1992 , **18**(3) : 203-214.
- [27] Xu Ying , Li Wen , Wu Wenzhong *et al.* Study on aquatic off-flavors in eutrophic Donghu Lake. *Acta Ecologica Sinica* , 1999 , **19**(2) : 212-216. [徐盈, 黎雯, 吴文忠等. 东湖富营养水体中藻菌异味性次生代谢产物的研究. 生态学报, 1999 , **19**(2) : 212-216.]
- [28] Khiari D , Barrett SE , Suffet IH. Sensory GC analysis of decaying vegetation and septic odors. *American Water Works Association Journal* , 1997 , **89**(4) : 150.
- [29] Ma ZM , Xie P , Chen J *et al.* Microcystis blooms influencing volatile organic compounds concentrations in Lake Taihu. *Fresenius Environmental Bulletin* , 2013 , **22**(1) : 95-102.
- [30] Chen J , Xie P , Ma ZM *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. *Science of the Total Environment* , 2010 , **409**(2) : 314-325.
- [31] Qi M , Chen J , Sun X *et al.* Development of models for predicting the predominant taste and odor compounds in Taihu Lake , China. *PLoS One* , 2012 , **7**(12) : e51976.
- [32] Barnard WR , Andreae MO , Watkins WE *et al.* The flux of dimethylsulfide from the oceans to the atmosphere. *Journal of Geophysical Research: Oceans* , 1982 , **87**(C11) : 8787-8793.
- [33] Smith VH. Eutrophication of freshwater and coastal marine ecosystems a global problem. *Environmental Science and Pollution Research* , 2003 , **10**(2) : 126-139.
- [34] Watson SB. Cyanobacterial and eukaryotic algal odour compounds: Signals or by-products? A review of their biological activity. *Phycologia* , 2003 , **42**(4) : 332-350.
- [35] Tanaka A , Oritani T , Uehara F *et al.* Biodegradation of a musty odour component , 2-methylisoborneol. *Water Research* , 1996 , **30**(3) : 759-761.
- [36] Li Lin , Song Lirong , Chen Wei *et al.* Degradation of algae production odorous compounds in freshwater by photolysis and TO₂ photocatalysis. *China Water & Wastewater* , 2007 , **23**(13) : 102-105. [李林, 宋立荣, 陈伟等. 淡水藻源异味化合物的光降解和光催化降解研究. 中国给水排水, 2007 , **23**(13) : 102-105.]
- [37] Selli S , Prost C , Serot T. Odour-active and off-odour components in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) extracts obtained by microwave assisted distillation-solvent extraction. *Food Chemistry* , 2009 , **114**(1) : 317-322.
- [38] Robin J , Cravedi JP , Hillenweck A *et al.* Off flavor characterization and origin in French trout farming. *Aquaculture* , 2006 , **260**(1) : 128-138.
- [39] Chorus I ed. Cyanotoxins: Occurrence , causes , consequences. Berlin: Springer , 2012. DOI: 10.1007/978-3-642-59514-1.