

## 合肥塘西河异味物质及异味影响因子研究\*

周 洋, 代嫣然, 钟 非, 吴 娟, 李 柱, 崔娜欣, 成水平\*\*

(同济大学长江水环境教育部重点实验室, 上海 200092)

**摘 要:** 以合肥市塘西河为研究对象, 2014—2015 年逐月对其水体水质和异味物质进行监测, 同时结合塘西河浮游植物群落结构调查, 综合分析塘西河异味物质变化规律及其影响因素。研究发现, 塘西河异味暴发集中发生在夏季, 夏季二甲基苄醇浓度可达 4909 ng/L, 土腥素浓度可达 197 ng/L。浮游植物群落结构调查表明, 秋、冬季塘西河优势种类为蓝藻, 春、夏季为硅藻、绿藻或隐藻。主成分分析得到 5 种主成分分别解释了光照、有机质、微生物活动、氮、磷等对水质的影响。相关性分析结果表明, 氮是塘西河异味的限制因素, 水体中氮浓度较高是异味产生的重要原因。

**关键词:** 城市景观河流; 藻; 二甲基苄醇; 土腥素; 异味; 塘西河

## Odor compounds and the related impact factors in Tangxi River, Hefei

ZHOU Yang, DAI Yanran, ZHONG Fei, WU Juan, LI Zhu, CUI Naxin & CHENG Shuiping\*\*

(Key Laboratory of Yangtze River Water Environment, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, P.R.China)

**Abstract:** The spatio-temporal variation of odor compounds, together with water quality parameters and composition and quantity of algae, were monitored in Tangxi River, Hefei City, during 2014–2015. The results showed that the odor in Tangxi River outbreaked in summer and the highest concentration of 2-methylisoborneol and geosmin were 4909 and 197 ng/L, respectively. Extensive algae composition analysis revealed that Cyanophyta was the dominant species in autumn and winter, while Euglenophyta, Chlorophyta or Cryptophyta were the dominant species in spring and summer. Principal component analysis showed that the water quality was influenced by light, organic compound, microbial activity, nitrogen and phosphorus in water. Additionally, significant relationships were detected between nitrogen concentration and odor compounds, which indicated that nitrogen was one of the main reasons for odor problems in Tangxi River.

**Keywords:** Landscape river; algae; 2-methylisoborneol; geosmin; odor; Tangxi River

水体中存在的异味物质主要为硫醚类、萜类和脂肪酸及其代谢产物等<sup>[1]</sup>, 萜类物质中的二甲基苄醇(2-MIB)和土腥素(geosmin)是主要的产异味物质<sup>[2]</sup>。尽管很多微生物都可能分泌异味物质, 但研究者一致认为水体中异味物质的主要贡献者是蓝藻和放线菌<sup>[3-5]</sup>。二甲基苄醇和土腥素在水中嗅阈值分别为 15 和 10 ng/L<sup>[6]</sup>, 极低浓度下都可造成人体不适感。土臭味作为水体中最常发生的异味, 会影响饮用水和水产品的使用价值和经济价值<sup>[7-9]</sup>, 已经引起了人们的关注。国内外不乏有关于富营养化湖泊<sup>[10-12]</sup>、水库<sup>[13-15]</sup>异味问题的报道, Bruder 等<sup>[16]</sup>尝试采用自适应模糊推理系统确定异味物质(二甲基苄醇和土腥素)、藻类、水质理化指标之间潜在的非线性定量关系, 并取得了良好的模拟预测效果。此外, 饮用水厂的异味问题研究也愈发普遍<sup>[17-18]</sup>, Sun 等<sup>[19]</sup>对中国境内的 111 所饮用水处理厂进行异味综合调查, 为饮用水异味控制提供了重要依据。饮用水中异味物质处理技术也不断革新<sup>[20-21]</sup>。然而, 关于水体异味物质的研究主要集中在饮用水和水产养殖等方面, 对于景观水体异味问题则鲜有涉及。随着人们生活水平的提高, 对于生活环境的要求也在不断提高。景观水体中的异味物质严重影响其使用价值和美学价值, 对周围居民的生活产生负面影响, 因此了解景观水体水质、研究景观水体中异味物质的影响因子就显得尤为重要。

\* 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2011ZX07303-001)资助。2015-09-25 收稿; 2015-11-14 收修改稿。

周洋(1991~), 男, 硕士研究生; E-mail: 1076358436@qq.com.

\*\* 通信作者; E-mail: shpcheng@tongji.edu.cn.

塘西河是巢湖水系的一条河流,自西北向东南流经合肥市经济技术开发区和滨湖新区,最终汇入巢湖,流域面积 50 km<sup>2</sup><sup>[22]</sup>。作为一条城市河流,塘西河具有行洪、蓄水、生态等功能,同时,塘西河还是合肥市的一条重要景观河流,对周边景点和居民生活有重要作用。此外,塘西河下游与巢湖连接处设有闸门,塘西河水位为人工调控,具有风浪较小和自净能力较差的特征,此种情况更容易产生异味问题影响周边居民。

本文基于对城市景观河道功能要求,研究塘西河富营养化现状和异味污染特征,将为合肥市景观水体富营养化的修复、防治和管理提供参考依据,也对美化合肥市旅游环境具有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

塘西河共布置 6 个采样点,自上游至下游编号分别为 1<sup>#</sup>~6<sup>#</sup>,1<sup>#</sup>采样点位于摩恩大酒店旁,2<sup>#</sup>采样点位于徽州大道,3<sup>#</sup>采样点位于塘西河公园,4<sup>#</sup>采样点位于泸州大道,5<sup>#</sup>采样点位于包河大道,6<sup>#</sup>采样点位于塘西河入湖口处。自 2014 年 4 月至 2015 年 3 月(2014 年 9 月由于仪器故障导致数据失效),逐月中旬采集各样点水面以下 0.5 m 的水样,一部分保存于玻璃瓶中用带聚四氟乙烯(PTFE)涂层的盖子密封,并用锡箔纸包裹后-4℃条件下保存,用于检测水样中异味物质。另一部分水样保存于塑料瓶中,密封后于-4℃条件下保存,用于检测水样的理化指标。此外,于 3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>、6<sup>#</sup>采样点采集 1 L 水样用于浮游植物分析,分别采集 3、6、9、12 月浮游植物样品代表春、夏、秋、冬 4 个季节。

### 1.2 理化指标、叶绿素 a 浓度及藻类鉴定

采用 YSI 6600V2 多参数水质分析仪现场测定水温(T)、pH 值、溶解氧(DO)、氧化还原电位(ORP)、电导率(COND);采用 HACH 便携式总悬浮颗粒分析仪测定总悬浮颗粒物(SS);采用 HACH 便携式浊度仪测定浊度(TURB);透明度(TRAN)由塞氏盘法测定;水体中氨氮(NH<sub>3</sub>-N)、硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)、亚硝态氮(NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N)、磷酸盐(PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P)、总氮(TN)、总磷(TP)、化学需氧量(COD<sub>Cr</sub>)浓度测定参考《水和废水监测分析方法》<sup>[23]</sup>。叶绿素 a(Chl. a)浓度测定参照陈宇炜等<sup>[24]</sup>提出的热乙醇萃取法。采用 CytoSense 流式细胞仪每季度对浮游藻类进行 1 次鉴定。

### 1.3 异味物质

采用固相微萃取-气相色谱质谱联用方法进行异味物质的定量测定。固相微萃取条件为:85 μm CAR/PDMS 萃取纤维、萃取时间 30 min、萃取温度 65℃、搅拌速率 1500 转/min、萃取离子浓度 30%。色谱质谱条件为:色谱柱:气相毛细管柱 HP-5MS(30 m×250 μm×0.25 μm);进样方式:不分流进样,解吸时间 3 min;载气为高纯氮气,流量为 3 ml/min;柱头压为 7.1 psi;进样口温度为 250℃;控制模式:恒流,1 ml/min,不分流进样;程序升温过程:初始温度 40℃,温度保持 2 min,然后以 8℃/min 升至 130℃,最后再以 15℃/min 升至 250℃,保持 5 min;定量模式:SIM 模式,特征离子为 95(二甲基异莰醇)和 112(土腥素)<sup>[25]</sup>;EI 电离源,电子能量 70 eV,电子倍增电压 1400 V;离子源温度 230℃;传输线温度 280℃。气相色谱质谱仪型号为 7890A 型气相色谱(Agilent);5975C 型质谱检测器(Agilent)。采用该方法对二甲基异莰醇和土腥素 2 种异味物质进行检测,检出限分别为 1.48 和 1.08 ng/L,均低于异味物质嗅阈值<sup>[26]</sup>,二甲基异莰醇和土腥素加标回收率分别为 85.6%±4.7% 和 117.2%±6.1%,可以实现精确定量。

### 1.4 数据分析

塘西河各采样点上覆水体监测指标的变化范围及平均值见表 1。对各变量数据进行相应转化使其经 Kolmogorov-Smirnov(KS)( $P<0.05$ )检验符合正态分布,且具方差齐性。然后进行单因素方差分析(One-way ANOVA, $P<0.05$ ),通过 Tukey HSD 检验比较不同样点两两差异。采用主成分分析方法(PCA)对水质指标及异味物质进行分析<sup>[27-28]</sup>。各变量数据经 Kaiser-Meyer-Olkin(KMO)和 Bartlett's 检验得出 KMO 值为 0.55( $P<0.001$ )。变量数据均经最大方差法(varimax)旋转。参照许秋瑾等<sup>[29]</sup>的方法对塘西河进行营养状态评价。数据采用 SPSS 20.0 统计软件进行分析。

2 结果与讨论

2.1 塘西河水质状况

塘西河冬季 TN、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度较高,最高平均浓度均出现在 1 月,分别达到 12.3 和 4.65 mg/L. NH<sub>3</sub>-N 浓度在夏、冬季浓度较高,最高平均浓度出现在 7 月,为 6.77 mg/L. PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 最高浓度出现在 10 月,但这可能是由于外源污染排入造成的,原因是除 10 月以外,其余月份 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 平均浓度均小于 0.39 mg/L. TP 与 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 浓度呈现相似的变化趋势,除 10 月外全年变化并不显著. 营养状态评价结果表明,塘西河 6 个样点的综合营养状态指数 (TLI) 在 78.2~92.2 范围内,均属于重度富营养. 其中,3#样点上覆水 TN、COD<sub>Cr</sub>、NH<sub>3</sub>-N 浓度年均值明显高于 6#样点 (表 1),这可能是由于 3#样点位于塘西河公园内,受周围城市环境干扰较多,且有污水排入. 而 6#样点邻近塘西河汇入巢湖的河口区域,周边多为荒地,受人类活动影响较小.

表 1 塘西河水质状况  
Tab. 1 Water quality of Tangxi River

水质指标	1#样点		2#样点		3#样点		4#样点		5#样点		6#样点	
	均值	变化范围	均值	变化范围	均值	变化范围	均值	变化范围	均值	变化范围	均值	变化范围
T/℃	17.0	5.5~30.2	16.7	5.9~29.1	17.1	5.5~30.6	17.5	6.2~29.7	17.4	6.1~29.9	17.2	5.4~30.5
pH	8.4	8.0~9.1	8.2	7.8~8.6	8.3	7.5~8.9	8.5	8.1~9.5	8.6	8.0~9.4	8.7	8.0~9.8
DO/(mg/L)	6.6	4.7~9.1	4.7	2.8~7.7	4.6	1.4~7.7	4.0	1.0~13.4	5.1	0.8~11.5	8.2	3.3~12.9
COND/(μS/cm)	298	207~345	389	288~598	425	265~596	423	216~609	406	232~521	381	290~475
TURB/NTU	23.0	4.1~67.6	23.5	6.6~80.8	30.6	4.8~108	26.8	5.0~118	23.5	4.5~89.7	28.0	4.9~71.4
Chl. a/(mg/m <sup>3</sup> )	12.5	1.1~53.0	9.2	2.2~29.0	15.8	0~68.4	25.4	0~167	16.5	0~54.4	25.7	0~78.1
COD <sub>Cr</sub> /(mg/L)	14.4	4.0~19.2	19.9	10.0~24.6	33.2	17.3~79.0	28.8	15.5~49.0	23.9	15.5~31.0	28.7	14.8~52.5
TN/(mg/L)	5.5	1.7~9.4	8.0	3.9~10.7	11.9	3.9~23.8	11.5	5.1~18.8	9.8	5.9~17.1	6.5	3.4~10.7
NH <sub>3</sub> -N/(mg/L)	0.8	0~1.5	3.8	0.6~6.8	6.6	1.9~12.9	7.0	2.7~14.1	5.6	1.1~13.4	2.6	0~9.1
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N/(mg/L)	2.6	0.6~5.9	2.3	0.4~6.2	1.8	0.1~5.6	1.8	0.2~4.7	1.4	0.5~2.8	1.8	0.4~3.7
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N/(mg/L)	0.1	0~0.7	0.2	0~0.8	0.2	0~0.4	0.2	0~1.0	0.2	0~0.3	0.2	0~0.3
TP/(mg/L)	0.3	0.1~1.2	0.5	0.2~1.3	1.1	0.1~3.5	0.7	0.3~1.3	1.0	0.2~6.5	0.9	0.1~6.3
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P/(mg/L)	0.1	0~0.6	0.3	0.1~0.8	0.5	0.1~1.5	0.4	0.2~0.8	0.8	0.1~6.5	0.7	0~6.8
SS/(mg/L)	38.1	11.0~124.0	45.2	14.0~151.0	54.5	13.0~179.0	52.1	14.0~188.0	55.4	11.0~174.0	59.1	20.0~167.0
ORP/mV	175.0	84.1~237.0	179.0	67.4~237.0	187.0	113.0~244.0	140.0	-128.0~206.0	128.0	-147.0~200.0	139.0	27.2~179.0
TRAN/cm	68.5	20.0~150.0	56.8	20.0~93.0	49.8	16.0~100.0	65.6	15.0~160.0	58.6	18.0~160.0	46.9	15.0~120.0

2.2 浮游植物群落结构特征

对塘西河 3#、4#及 6#样点进行浮游植物的定性和定量分析 (分别以 3、6、9、12 月采样数据代表春、夏、秋、冬 4 个季节),共鉴定出 5 门 74 属,其中蓝藻门 19 属、绿藻门 34 属、硅藻门 13 属、隐藻门 4 属、裸藻门 4 属. 3#、4#样点群落结构相似,故取 3#和 6#样点进行具体分析. 6#样点藻类生物量最高,达 101.8 mg/L (图 1). 3#样点秋、冬季藻类优势类群为蓝藻,其中铜绿微囊藻生物量所占比例最大,为优势种,这与姜霞等<sup>[30]</sup>对巢湖的藻类群落结构分析一致. 春、夏季 3#样点藻类总生物量明显增大,硅藻和绿藻生物量所占比例超过 60%,成为优势种;而蓝藻生物量较秋、冬季反而减少. 6#样点秋、冬季蓝藻为优势类群,春、夏季优势类群则为隐藻,与 3#样点群落结构差异较大,可以反映这 2 个采样点水质存在差异,与 2.1 节的结果一致.

2.3 异味物质浓度变化规律

塘西河二甲基苄醇浓度呈现明显的季节差异,异味物质在夏季 (7、8 月) 集中暴发. 河流中二甲基苄醇浓度最高可达 4909 ng/L,超过其嗅阈值近 500 倍,造成严重的土臭味污染. 一般而言,水中二甲基苄醇的主要来源是颤藻和放线菌<sup>[31]</sup>. 夏季气温高,颤藻和放线菌代谢旺盛,导致二甲基苄醇浓度激增. 对比藻类调查结果与异味物质浓度变化趋势,9 月蓝藻生物量有明显增长,且蓝藻处于绝对优势地位. 而二甲基苄醇浓度最大值出现在 8 月,此时浮游植物群落结构与 9 月相近,蓝藻为绝对优势类群,蓝藻大量繁殖

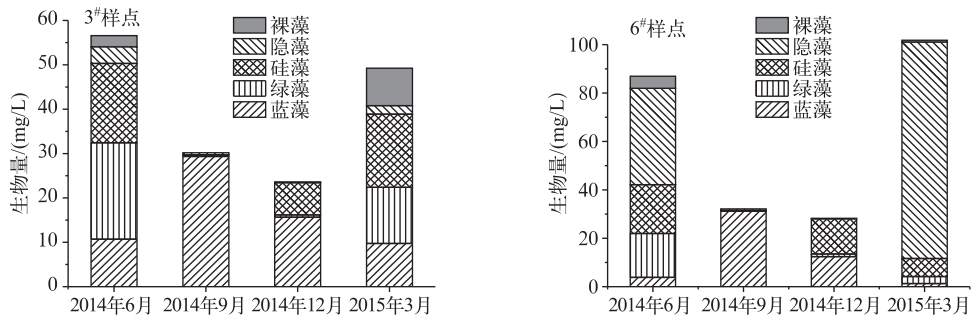


图1 塘西河浮游植物群落结构

Fig.1 Phytoplankton community composition in Tangxi River

形成水华,同时释放大量的次代谢产物。春季二甲基巯基醇则维持在较低浓度水平,原因可能有2个方面,一是春季蓝藻生物量较小,二是二甲基巯基醇在自然水体中容易流失,特别是被悬浮物吸附或者被异养好氧微生物降解<sup>[32]</sup>。而10月以后二甲基巯基醇浓度骤减,则是由于温度回落,藻类和微生物代谢不及夏季旺盛,此外,李林等<sup>[33]</sup>的研究也表明藻类在不同生长阶段释放次代谢产物的能力存在差别,这也可能是秋季二甲基巯基醇浓度减少的原因。

相较于二甲基巯基醇,塘西河土腥素浓度变化趋势较为平缓。土腥素浓度峰值同样出现在夏季,达到197 ng/L,春、秋季浓度在20 ng/L左右,冬季浓度较低但仍有检出(图2)。藻类代谢并不旺盛的冬季仍然检出土腥素,原因可能是沉积物释放及沉积物中微生物的作用<sup>[34]</sup>。有报道指出土腥素和叶绿素的合成存在密切联系,即二者合成需要共同的中间产物法尼基焦磷酸(FPP),故土腥素与叶绿素合成存在竞争关系<sup>[35]</sup>。这种竞争关系可能制约土腥素的大量合成,也解释了在藻生物量较大的情况下并没有出现土腥素激增的原因。

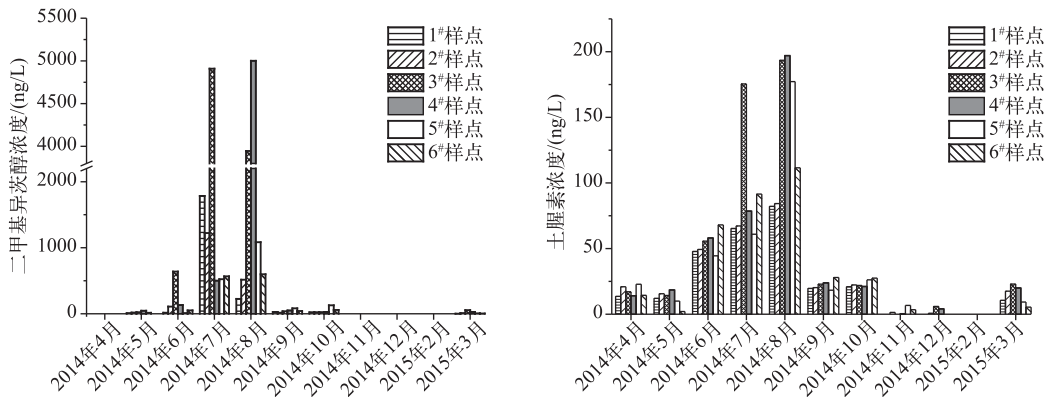


图2 塘西河各样点二甲基巯基醇和土腥素浓度

Fig.2 Variation of 2-MIB and geosmin concentration of each sampling site in Tangxi River

#### 2.4 异味物质与水质状况的关系

对检测的16个水质指标进行主成分分析,结果表明5个主成分可以解释75%的变量(表2)。其中主成分1主要由pH值、DO、TURB、SS和TRAN构成;主成分2主要由T、DO、COND、COD<sub>Cr</sub>、2-MIB、GSM构成;主成分3主要由T、pH值、Chl. a、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、GSM、ORP构成;主成分4主要由DO、COND、TN、NH<sub>3</sub>-N构成;主成分5主要由TP、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P构成。主成分1中TURB、SS、TRAN均与光照相关,可以反映光照对河流水质的影响,二甲基巯基醇与土腥素并未在主成分1中出现,表明光照对2种异味物质浓度并没有重要影响。之前的报道中有类似的结论,Wang等<sup>[36]</sup>的研究结果甚至表明,光照强度与异味物质浓度之间存在负相关。主成分2

表 2 塘西河水质主成分矩阵

Tab. 2 Component's matrix of water quality of Tangxi River

水质指标	主成分				
	1	2	3	4	5
T	—	0.348	0.759	—	—
pH	0.631	—	0.398	—	—
DO	0.549	0.416	—	-0.398	—
COND	—	-0.477	—	0.512	—
TURB	0.897	—	—	—	—
Chl. a	—	—	0.416	—	—
COD <sub>Cr</sub>	—	0.512	—	—	—
TN	—	—	—	0.850	—
NH <sub>3</sub> -N	—	—	—	0.894	—
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	—	—	-0.739	—	—
TP	—	—	—	—	0.989
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	—	—	—	—	0.989
2-MIB	—	0.852	—	—	—
GSM	—	0.771	0.375	—	—
SS	0.850	—	—	—	—
ORP	—	—	-0.812	—	—
TRAN	-0.875	—	—	—	—

故在此种情况下藻类生长的限定因素依然是氮,这与朱伟<sup>[39]</sup>和孟顺龙<sup>[40]</sup>等的报道一致. TN 浓度限定微生物的生长,进而限定了作为微生物代谢产物的土臭味物质的释放. 2 种异味物质与 TN 浓度显著相关而与 TP 浓度无显著相关也可以在一定程度上证明该观点. 因此,削减水体氮素可能是解决塘西河土臭味问题的关键. 此外,一般而言,异味物质来源于藻类代谢,然而异味物质土腥素和二甲基异莰醇浓度与 Chl. a 浓度相关系数分别为 0.480、0.336, Chl. a 浓度反映藻的总量而非特定藻属的生物量,这是一方面原因,另一方面可能是其他微生物和沉积物中异味物质的释放.

表 3 塘西河水质指标与异味物质的 Pearson 相关性

Tab. 3 Pearson correlation coefficients of odor compounds with water parameters in Tangxi River

异味物质	T	pH	DO	COND	TURB	Chl.a	COD <sub>Cr</sub>	TN
GSM	0.731 **	0.457 **	0.402 **	0.024	0.078	0.480 **	0.279 *	0.288 *
2-MIB	0.493 **	0.235	0.319 *	-0.252	0.252	0.336 *	0.257	0.508 **
异味物质	NH <sub>3</sub> -N	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N	TP	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	SS	ORP	TRAN
GSM	0.243 *	-0.501 **	0.150	-0.021	-0.009	0.145	-0.355 **	-0.242 *
2-MIB	0.324 *	-0.386 **	-0.057	-0.039	-0.034	0.297 *	-0.139	-0.171

\* 表示在 0.05 水平(单侧)上显著相关; \*\* 表示在 0.01 水平(单侧)上显著相关.

3 结论

1) 塘西河营养状态为重度富营养,加之带有一定的死水特征,极易产生水华. 塘西河秋、冬季浮游植物优势类群为蓝藻,春、夏季优势类群为绿藻、硅藻和隐藻.

2) 塘西河二甲基异莰醇浓度变化规律呈现明显的季节波动,冬季没有二甲基异莰醇检出,夏季二甲基异莰醇浓度则可达 4909 ng/L,表明温度对二甲基异莰醇的释放有重要影响. 而土腥素浓度则并未表现出明

中 COD<sub>Cr</sub>、2-MIB、GSM 主要反映水体中有机质的变化,2 种异味物质均与 COD<sub>Cr</sub> 和 DO 处于同一主成分,这与之前报道中提出的水体中有机物较多时微生物有充足的碳源供给来生产 2-MIB 等代谢产物的观点一致<sup>[37]</sup>;主成分 3 中 T、ORP 可以反映微生物活动;主成分 4 主要反映氮的影响;主成分 5 主要反映磷的影响.

通过 Pearson 相关系数量化各水质指标与二甲基异莰醇及土腥素浓度的关系,结果见表 3. 土腥素浓度与 T、pH 值、DO、Chl. a、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、ORP 呈极显著相关( $P<0.01$ ),与 COD<sub>Cr</sub>、TN、NH<sub>3</sub>-N、TRAN 呈显著相关( $P<0.05$ ). 二甲基异莰醇浓度则与 T、TN、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度呈极显著相关( $P<0.01$ ),与 DO、Chl. a、NH<sub>3</sub>-N、SS 均呈显著相关( $P<0.05$ ).

有报道指出,当氮磷质量比小于 7 时,氮可能是限制性营养盐;当氮磷质量比大于 7 时,磷可能是限制性营养盐<sup>[38]</sup>,6# 样点氮磷比约为 7,故氮为限制性营养盐. 3# 样点尽管氮磷比超过 10,但 TP 浓度也高达 1.1 mg/L,此时 TP 浓度可能已经达到藻类生长的最适浓度,

显的季节规律,全年均有检出,温度对土腥素释放的影响并不明显。此外,从塘西河异味物质浓度变化趋势可以发现,藻类并非异味物质的唯一来源,尤其在气温较低的月份,异味物质的其他来源可能处于主导地位。

3)主成分分析得到5种主成分为光照、有机质、微生物活动、氮、磷。其中藻类代谢产物二甲基异茨醇、土腥素均与氮素呈显著相关,削减水体氮素可能是解决塘西河土臭味的关键。

致谢:感谢盛光遥、尹大强教授给予的仪器与分析帮助!

#### 4 参考文献

- [1] Watson SB. Cyanobacterial and eukaryotic algal odour compounds: signals or by-products? A review of their biological activity. *Phycologia*, 2003, **42**(4): 332-350.
- [2] Tung SC, Lin TF, Yang FC *et al.* Seasonal change and correlation with environmental parameters for 2-MIB in Feng-Shen Reservoir, Taiwan. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2008, **145**(1/2/3): 407-416.
- [3] 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. *水生生物学报*, 2004, **28**(4): 434-439.
- [4] Chen J, Xie P, Ma Z *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.
- [5] Srinivasan R, Sorial GA. Treatment of taste and odor causing compounds 2-methyl isoborneol and geosmin in drinking water: A critical review. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, **23**(1): 1-13.
- [6] Krishnani KK, Ravichandran P, Ayyappan S. Microbially derived off-flavor from geosmin and 2-methylisoborneol: sources and remediation//Reviews of environmental contamination and toxicology. New York: Springer, 2008: 1-27.
- [7] Lin TF, Wong JY, Kao HP. Correlation of musty odor and 2-MIB in two drinking water treatment plants in South Taiwan. *Science of the Total Environment*, 2002, **289**(1): 225-235.
- [8] Whelton AJ, Dietrich AM. Relationship between intensity, concentration, and temperature for drinking water odorants. *Water Research*, 2004, **38**(6): 1604-1614.
- [9] Li Y, Zhang X, Chen C. Review on the tastes and odors compounds in drinking water of China. *Environmental Science*, 2009, **2**: 49.
- [10] 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): 1-10.
- [11] Juan F, Hao Z, Yang Y *et al.* Monitoring results on quality of drinking water sourced from Taihu Lake in 2008—2012. *Journal of Environmental Hygiene*, 2013, **6**: 557-565.
- [12] Liu C, Shen Q, Zhou Q *et al.* Precontrol of algae-induced black blooms through sediment dredging at appropriate depth in a typical eutrophic shallow lake. *Ecological Engineering*, 2015, **77**: 139-145.
- [13] Winston B, Hausmann S, Scott JT *et al.* The influence of rainfall on taste and odor production in a south-central USA reservoir. *Freshwater Science*, 2014, **33**(3): 755-764.
- [14] Kehoe MJ, Chun KP, Baulch HM. Who smells? Forecasting taste and odor in a drinking water reservoir. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**: 10984-10992.
- [15] Su M, Yu J, Zhang J *et al.* MIB-producing cyanobacteria (*Planktothrix* sp.) in a drinking water reservoir: Distribution and odor producing potential. *Water Research*, 2015, **68**: 444-453.
- [16] Bruder S, Babbar-Sebens M, Tedesco L *et al.* Use of fuzzy logic models for prediction of taste and odor compounds in algal bloom-affected inland water bodies. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, **186**(3): 1525-1545.
- [17] Papageorgiou A, Voutsas D, Papadakis N. Occurrence and fate of ozonation by-products at a full-scale drinking water treatment plant. *Science of the Total Environment*, 2014, **481**: 392-400.
- [18] Kishida N, Sagehashi M, Takanashi H *et al.* Nationwide survey of organism-related off-flavor problems in Japanese drinking water treatment plants (2010-2012). *Journal of Water Supply: Research & Technology-AQUA*, 2015, **64**(7): 832.
- [19] Sun D, Yu J, Yang M *et al.* Occurrence of odor problems in drinking water of major cities across China. *Frontiers of Environmental Science and Engineering*, 2014, **8**(3): 411-416.
- [20] Antonopoulou M, Evgenidou E, Lambropoulou D *et al.* A review on advanced oxidation processes for the removal of taste and odor compounds from aqueous media. *Water Research*, 2014, **53**: 215-234.



- [21] Lebrero R, Gondim A C, Pérez R *et al.* Comparative assessment of a biofilter, a biotrickling filter and a hollow fiber membrane bioreactor for odor treatment in wastewater treatment plants. *Water Research*, 2014, **49**: 339-350.
- [22] 周桃志. 谈塘西河河道生态综合治理的思路与方法. 安徽建筑, 2014, (1): 135-136.
- [23] 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: 第4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2012: 836.
- [24] 陈宇炜, 陈开宁, 胡耀辉. 浮游植物叶绿素 a 测定的“热乙醇法”及其测定误差的探讨. 湖泊科学, 2006, **18**(5): 550-552. DOI 10.18307/2006.0519.
- [25] Saito K, Okamura K, Kataoka H. Determination of musty odorants, 2-methylisoborneol and geosmin, in environmental water by headspace solid-phase microextraction and gas chromatography-mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*, 2008, **1186**(1): 434-437.
- [26] Watson SB, Brownlee B, Stachwill T. Quantitative analysis of trace levels of geosmin and MIB in source and drinking water using headspace SPME. *Water Research*, 2000, **34**(10): 2818-2828.
- [27] Barbieri P, Andersson CA, Massart DL *et al.* Modeling bio-geochemical interactions in the surface waters of the Gulf of Trieste by three-way principal component analysis (PCA). *Analytica Chimica Acta*, 1999, **398**(2): 227-235.
- [28] Shrestha S, Kazama F. Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques: a case study of the Fuji river basin. *Japanese Environmental Modelling Software*, 2007, **22**: 464-475.
- [29] 许秋瑾, 郑丙辉, 朱延忠等. 三峡水库支流营养状态评价方法. 中国环境科学, 2010, (4): 453-457.
- [30] 姜霞, 王书航, 钟立香等. 巢湖藻类生物量季节性变化特征. 环境科学, 2010, **31**(9): 2056-2062.
- [31] 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.
- [32] Westerhoff P, Rodriguez-Hernandez M, Baker L *et al.* Seasonal occurrence and degradation of 2-methylisoborneol in water supply reservoirs. *Water Research*, 2005, **39**(20): 4899-4912.
- [33] 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**(3): 102-105.
- [34] 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. 环境科学研究, 2013, **26**(1): 16-21.
- [35] Jiang J, Saint CP, Cane DE *et al.* Isolation and characterization of the gene associated with geosmin production in cyanobacteria. *Environmental Science and Technology*, 2008, **42**(21): 8027-8032.
- [36] 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). *Biochemical Systematics and Ecology*, 2015, **58**: 219-226.
- [37] Westerhoff P, Rodriguez-Hernandez M, Baker L *et al.* Seasonal occurrence and degradation of 2-methylisoborneol in water supply reservoirs. *Water Research*, 2005, **39**(20): 4899-4912.
- [38] 刘靖, 杜桂森, 武佃卫等. 北京城市河湖营养状态与蓝藻水华研究. 安全与环境学报, 2006, **6**(2): 5-8.
- [39] 朱伟, 万蕾, 赵联芳. 不同温度和营养盐质量浓度条件下藻类的种间竞争规律. 生态环境, 2008, **17**(1): 6-11.
- [40] 孟顺龙, 裴丽萍, 胡庚东等. 氮磷比对两种蓝藻生长及竞争的影响. 农业环境科学学报, 2012, **31**(7): 1438-1444.