

太湖不同形态异味物质含量、相互关系及其与环境因子关系的探讨^{*}

齐 敏^{1,2}, 孙小雪^{1,2}, 邓绪伟², 陈 隽², 谢 平^{1,2**}

(1: 华中农业大学水产学院, 武汉 430070)

(2: 中国科学院水生生物研究所东湖台站, 武汉 430072)

摘 要: 根据 2009 年 6 月到 2010 年 5 月太湖水样中溶解态和结合态异味化合物(2-甲基异茨醇(MIB)、土嗅素(GEO)、 β -环柠檬醛、 β -紫罗兰酮)的月间采样分析结果, 综合考虑各种环境因子以及蓝藻种属, 探讨了溶解态和结合态异味化合物之间的关系以及影响太湖中异味化合物的主要环境因子. 结果表明溶解态 MIB 和结合态 β -环柠檬醛、 β -紫罗兰酮是研究期间湖水中的主要异味化合物, 这些物质对于太湖水体发生异味具有较大贡献或较大潜在贡献. 通过本文研究和对以往文献讨论推测, 太湖中溶解态和结合态异味化合物相关关系较弱的原因可能是, 异味化合物生产和释放速率的变化、微生物降解、光解、吸附和挥发等. 同时发现微囊藻和叶绿素 a 与太湖异味化合物关系密切. 蓝藻水华对于太湖异味化合物的发生具有重要影响, 控制蓝藻水华发生的关键是控制或减缓太湖异味问题.

关键词: 太湖; 溶解态; 结合态; 异味化合物; 相互关系; 环境因子

Investigations on relationships of different forms of taste and odor compounds and their related environmental factors in Lake Taihu

QI Min^{1,2}, SUN Xiaoxue^{1,2}, DENG Xuwei², CHEN Jun² & XIE Ping^{1,2}

(1: College of Fishery, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, P. R. China)

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

Abstract: The investigation of the taste and odor compounds in Lake Taihu, from June 2009 to May 2010, included MIB, GEO, β -cyclocitral and β -ionone. Given comprehensively consideration to various environmental factors and cyanobacteria taxa, we analyzed the relationships between two forms of odors and some key environmental factors closely related with these odors. It was found that dissolved MIB and particulate β -cyclocitral, β -ionone were the main odors, and they made great contributions or potential contributions to odor problems in Lake Taihu. Combining previous studies with this investigation, it was estimated that the variations of production and release velocities of the odors, microbe degradations, photolysis, absorption and volatilization led to the weak relationships between the dissolved odors and the particulate ones. *Microcystis* and chlorophyll-a had close relationships with taste and odor compounds in Lake Taihu. Cyanobacterial blooms had important influences on occurrences of the taste and odor compounds in Lake Taihu. For managing the occurrences of taste and odor events, it is very critical to control cyanobacterial blooms.

Keywords: Lake Taihu; dissolved form; particulate form; taste and odor compounds; relationships; environmental factors

全球变暖和城市化进程的加快带来了一系列环境问题, 富营养化和藻类水华在湖泊等水体中的频繁暴发就是常见的环境问题. 藻类水华的频繁暴发引起了各种各样的水质问题, 例如藻毒素和异味物质^[1]. 由于直接的毒害作用, 藻毒素受到人们较多的关注^[1]. 而关于水体异味问题的研究则相对较少, 国外从 1950s 开始进行此类研究, 国内至今对于这方面的研究都是屈指可数^[2-4]. 藻类, 尤其是蓝藻在生长和分解过程中能

^{*} 国家重点基础研究发展计划“973”项目(2008CB418101)和淡水生态与生物技术国家重点实验室项目(2008FBZ01)联合资助. 2012-05-08 收稿; 2012-05-23 收修改稿. 齐敏, 女, 1985 年生, 硕士研究生; E-mail: jian18_min20@163.com.

^{**} 通信作者; E-mail: xieping@ihb.ac.cn.

够产生各种胞内和胞外的异味代谢产物^[5]. 目前研究较多的主要有 2-甲基异茨醇 (MIB) 和土嗅素 (GEO), 近年对 β -环柠檬醛和 β -紫罗兰酮的研究也逐渐增多^[4,6]. 除了藻类, 一些放线菌^[7]、真菌^[8]、粘细菌^[9]等也能产生类似的异味化合物. 这些异味物质在世界范围内频繁出现, 同时它们的嗅异味阈值普遍较低^[10-12], 已经成为世界性的水质问题. 它们使水体及水产品带上难闻的异味, 严重影响了水体及水产品的使用价值、美学价值和经济价值. 因此了解水环境中发生较多的异味化合物, 研究其与环境因子的相互关系, 异味物质不同形态间的相互关系, 对于进一步了解和熟悉异味化合物, 控制和缓解水环境的异味问题具有重要意义. 目前关于异味物质的研究多集中于溶解于水体中的异味物质^[13-14], 而对于结合态异味物质的研究则罕见报道. 藻细胞内的异味物质能够在细胞破裂或细胞死亡时释放到周围水体中^[15-16], 引起水体的二次污染. 同时, 自来水工业中的许多水处理措施都会导致藻细胞的破裂. 因此, 胞内结合态异味物质的研究就显得尤为重要.

太湖是我国第三大淡水湖泊, 地处长江三角洲核心区域, 面积 2338 km², 平均水深 1.9 m. 与江苏省、浙江省和上海市交接. 在太湖流域的工农业用水以及饮用水方面占据了不可替代的地位, 对于太湖流域的经济和社会发展发挥了巨大作用. 近 30 年, 太湖经历了严重的污染和富营养化, 蓝藻水华频繁暴发, 发生范围不断扩大, 持续时间不断延长, 特别是夏季高发期间受风力影响堆积在北部湖湾, 产生严重异味. 2007 年 5 月底发生的无锡饮用水危机, 严重影响了当地居民的正常生活^[17]. 本研究的主要目的是调查太湖水体中溶解态和结合态异味物质的分布, 分析太湖中溶解态和结合态异味化合物间的相互关系, 并寻找导致太湖中这些异味化合物出现的主要环境因素.

1 材料与方法

1.1 试剂与仪器

2-甲基异茨醇 (MIB)、土嗅素 (GEO)、 β -环柠檬醛和 β -紫罗兰酮的标准品为 Sigma 公司试剂. 每次使用时, 用色谱级甲醇 (Merck 公司) 配制成 1 mg/L 的溶液, 配制标准曲线系列的溶液均从该溶液稀释得到, 稀释所用的纯水为色谱级纯水 (Milli-Q 超纯水发生器). 用于分离溶解态和结合态异味物质的玻璃纤维素薄膜 (Whatman GF/C, Brentford 公司). 将分析纯级的氯化钠 (Sinopharm 公司) 溶于色谱级纯水用于提取结合态异味化合物.

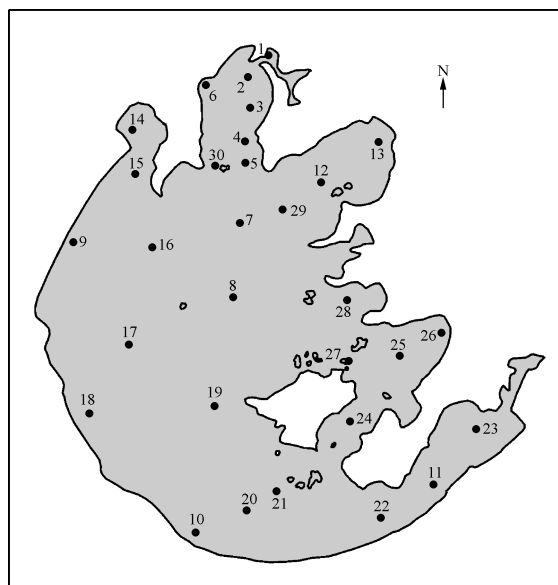


图 1 太湖全湖采样点分布

Fig. 1 Distribution of sampling sites in the whole Lake Taihu

用 QP2010Plus 气相色谱质谱联用仪 (GC-MS) (日本岛津公司) 对异味化合物进行定性和定量分析; 色谱柱为 HP-5MSUI 石英毛细管柱 (30 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.25 μ m), 以氦气作为载气, Eclipse 4660 吹扫捕集样品浓缩仪和 4551A 自动进样器 (美国 OI 公司) 用于异味物质的提取浓缩和样品导入, 以氦气为吹扫气体.

1.2 样品采集与水环境指标测定

综合考虑了太湖各种环境条件, 于 2009 年 6 月到 2010 年 5 月, 在太湖全湖范围内布了 30 个样点 (图 1), 每月定期采集 30 个样点的混合水样 (湖底以上 0.5 m 和湖面以下 0.5 m), 分析湖水中溶解态和结合态的 MIB、GEO、 β -环柠檬醛和 β -紫罗兰酮的含量, 同时测定各种理化因子和蓝藻各属生物量. 水化学指标参照金相灿等^[18]的方法进行测定, 包括总氮 (TN)、溶解性总氮 (TDN)、硝态氮 (NO_3^- -N)、亚硝态氮 (NO_2^- -N)、铵态氮 (NH_4^+ -N)、总磷 (TP)、溶解性总磷 (TDP)、正磷酸盐 (PO_4^{3-} -P), 化学需氧量 (COD)

用硫代硫酸钠滴定法进行测定^[19],叶绿素a(Chl. a)的含量用分光光度法进行测定^[20],透明度(SD)用黑白透明度盘进行测定,水温(Temp)、溶氧(DO)、电导率(COND)、pH、总溶解固体(TDS)和浊度(TURB)在采样时用 YSI 6600 多参数水质分析仪进行测定. 对于蓝藻的分析,在采样的同时采集 1 L 混合水样立即用鲁哥试剂固定,48 h 后浓缩至 50 ml,参照胡鸿钧等^[21]和 Niu 等^[22]的方法进行种属鉴定和定量分析.

1.3 水中溶解态和结合态异味化合物的测定

采集的水样经 Whatman GF/C 过滤后,分为滤液中溶解态异味化合物和滤膜上结合态异味化合物. 两种形态异味化合物的测定方法参考 Chen 等^[6]和 Deng 等^[23-24]. 溶解态异味化合物直接用吹扫捕集仪浓缩目标物后经由自动进样器导入气相色谱质谱联用仪进行分离及定性和定量分析,测定时柱温箱温度程序为:50℃保持 2 min,以 10℃/min 的速度升至 150℃,再以 5℃/min 的速度升至 220℃. 为了提高准确度,质谱监测模式采用选择离子方式,特征离子 m/z 124、112、137 和 177 分别为 MIB、GEO、 β -环柠檬醛和 β -紫罗兰酮的定量离子,同时监测特征离子 94 和 151 作为 MIB 的监控离子,125 和 149 作为 GEO 的监控离子,152 和 123 作为 β -环柠檬醛的监控离子,92 和 135 作为 β -紫罗兰酮的监控离子. 滤膜及其上结合形态的异味化合物先用液氮反复冻融使藻细胞破碎,然后与 50 ml 25% (m/V) 的氯化钠溶液混合,加入容积为 250 ml 的圆底瓶中,放入微波萃取仪器(APEX 常压微波萃取系统),设定程序使系统在 80℃下运行 15 min,同时在仪器设定的最大速度下用磁力搅拌子搅拌混合液,用 80 ~ 100 ml/min 速度的氮气吹扫,则将结合态的异味化合物进行提取并收集冷凝到 100 ml 的玻璃管中,用超纯水定容到 50 ml^[6],至此结合态的异味化合物转化为溶解态并参照上述步骤进行定性和定量分析.

1.4 数据统计分析

将各样点采集到的环境指标与异味化合物的空间分布数据用统计分析软件进行统计分析. 用 SAS 9.1 进行各样点溶解态和结合态异味化合物空间分布数据之间的方差分析和相关关系分析,用 CANOCO 4.5 进行各样点环境因子与异味化合物空间分布数据相互关系的分析.

2 结果与分析

2.1 水环境理化指标及溶解态和结合态异味化合物的含量及时间变化

TN 的月平均浓度最高值出现在 6 月份,为 5.60 mg/L, TN 浓度在冬季较低. NO_3^- -N 浓度在夏季较高,月均最高浓度为 1.45 mg/L,在秋、冬和春季含量均较低. NH_4^+ -N 浓度在冬季较高,月均最高浓度出现在 1 月份,为 0.97 mg/L. PO_4^{3-} -P 含量全年变化不显著,月均最高值出现在 4 月份,为 0.079 mg/L. TP 的月均浓度最高值出现在 6 月份,为 0.19 mg/L. Temp 的最高值出现在 7 月份,月均值为 31.24℃. Chl. a 的月均含量在 7 月份达到最大值,为 23.40 $\mu\text{g/L}$,12 月份含量最低,为 4.13 $\mu\text{g/L}$ (图 2). 微囊藻(*Microcystis*)含量在全年中占有绝对的优势,尤其是在夏、秋季节,占蓝藻总量的 90% 以上. 春季鱼腥藻(*Anabaena*)生物量较大(图 3).

水中溶解态(d-)的异味化合物中,MIB 的含量相对较高,其中有 26.11% 的水样中 MIB 含量超出了 15 ng/L 的嗅异味阈值,仅有 5.83% 的样品超过 4 ng/L 的 GEO 嗅阈值, β -环柠檬醛浓度均低于 500 ng/L 的阈值, β -紫罗兰酮的含量均未超出 7 ng/L 的嗅阈值. 方差分析显示结合态的 β -环柠檬醛和 β -紫罗兰酮的含量显著高于其溶解态的含量,结合态 MIB 的含量显著低于其溶解态的含量.

溶解态 MIB 的月均含量分别在 2009 年 11 月和 2010 年 3 月出现峰值,而结合态(p-)的 MIB 的月均含量在 2009 年 7 月份达到高峰(图 4). 结合态 GEO 含量始终较低,在 3 月份稍有升高,溶解态 GEO 的月均含量在 6 月份达到峰值,但低于其嗅阈值. 溶解态 β -环柠檬醛月均含量始终较低,而结合态的含量很高,尤其在夏季始终保持在较高的浓度,月均含量的最高值达 228.91 ng/L,实际最高浓度则超过了 2154 ng/L. 溶解态 β -紫罗兰酮的含量在一年中绝大部分时间也很低,而结合态含量在夏、秋季都有较高的浓度,实际浓度最高达 223.16 ng/L.

2.2 两种形态异味化合物及其与环境因子关系的统计分析结果

相关分析结果显示异味化合物两种形态间的相关系数分别为 $R_{\text{MIB}} = 0.3016$, $R_{\text{GEO}} = 0.0334$, $R_{\beta\text{-环柠檬醛}} = 0.2846$, $R_{\beta\text{-紫罗兰酮}} = 0.0131$,相关系数显著性检验显示 GEO 和 β -紫罗兰酮两种形态间的相关系数 P 值均大于 0.05, MIB 和 β -环柠檬醛的相关系数 P 值小于 0.01. 四种异味化合物对应的两种形态间相关关系较弱或

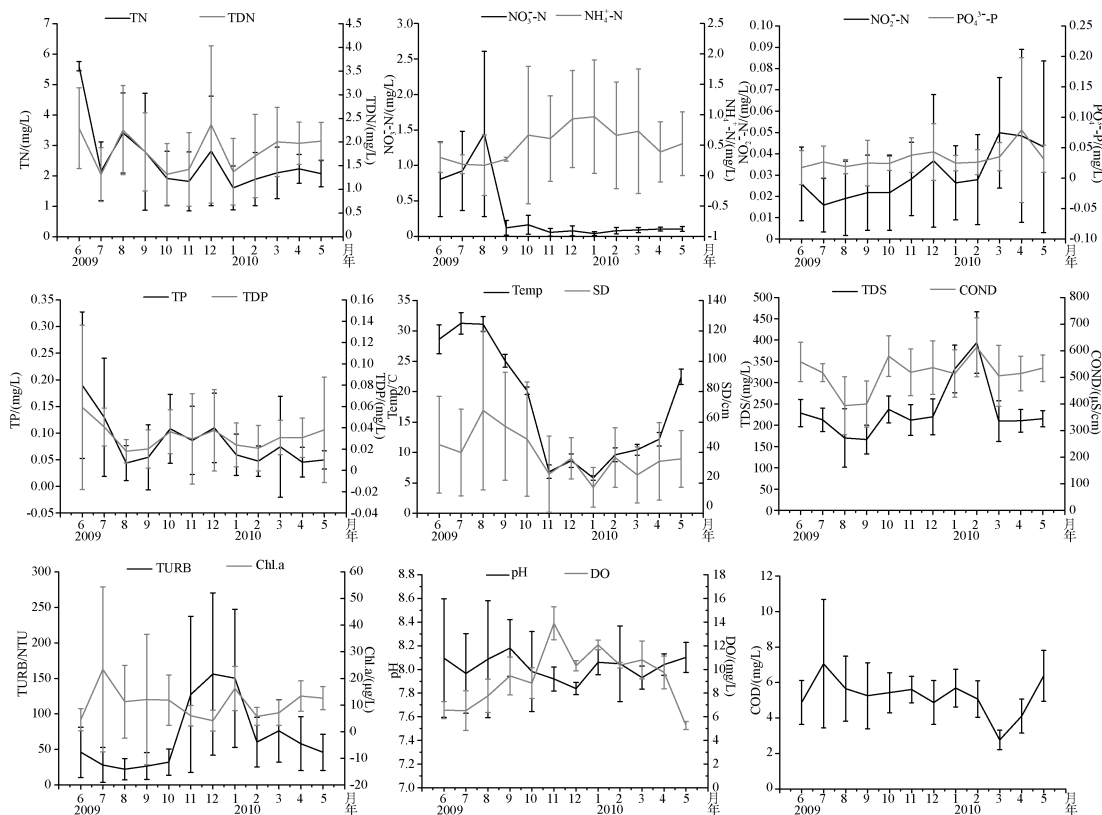


图2 水环境理化指标月平均含量的时间变化(图中数据点代表了全湖30个样点的平均含量)

Fig. 2 Temporal variations of the water physicochemical variables

无相关关系。

RDA (冗余分析) 结果(图5)显示环境因子对四种异味化合物的解释总量为 64.40%, 其中微囊藻解释量最大为 35.56%, 其次叶绿素 a 解释量为 6.73%。环境因子对于结合态异味化合物的解释量(64.80%)相比溶解态异味的解释量要大得多(13.80%, 图中未显示)。类似地, 微囊藻和叶绿素 a 对于结合态异味化合物的解释量最大, 两者共解释了结合态异味化合物变量的 45.46%。

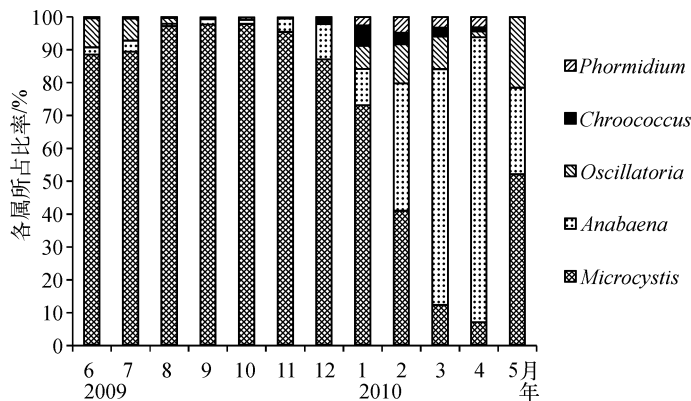


图3 蓝藻主要种属所占比率的时间变化

Fig. 3 Temporal changes of the main taxa in cyanobacteria

3 讨论

3.1 溶解态和结合态异味化合物差异的原因探讨

结果显示, 绝大部分水样中溶解态 β -环柠檬醛的实际浓度都低于 500 ng/L 嗅阈值浓度, 散发鲜草味^[10]。溶解态和结合态 GEO 的含量都很低, 对太湖异味问题贡献较小, 溶解态 β -紫罗兰酮亦是如此。溶解态 MIB 含量相对较高, 对太湖异味问题贡献较大, 结合态 β -环柠檬醛和 β -紫罗兰酮含量高, 具有较大的潜在危

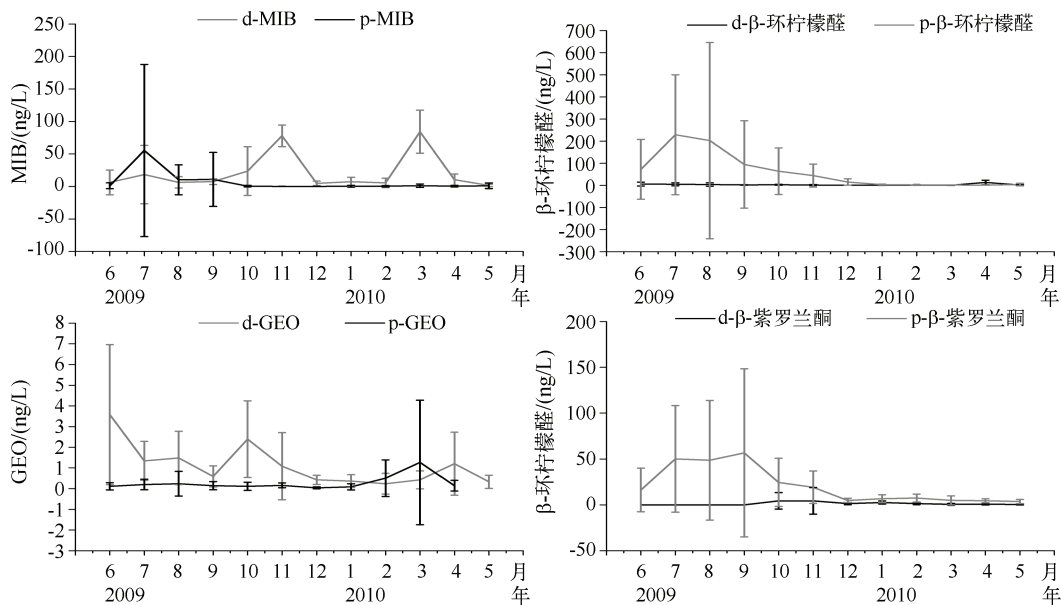


图4 太湖水体中4种溶解态和结合态异味化合物月平均含量的时间变化(“d-”:溶解态,“p-”:结合态)
Fig.4 Monthly variations of four dissolved and particulate taste and odor compounds in Lake Taihu

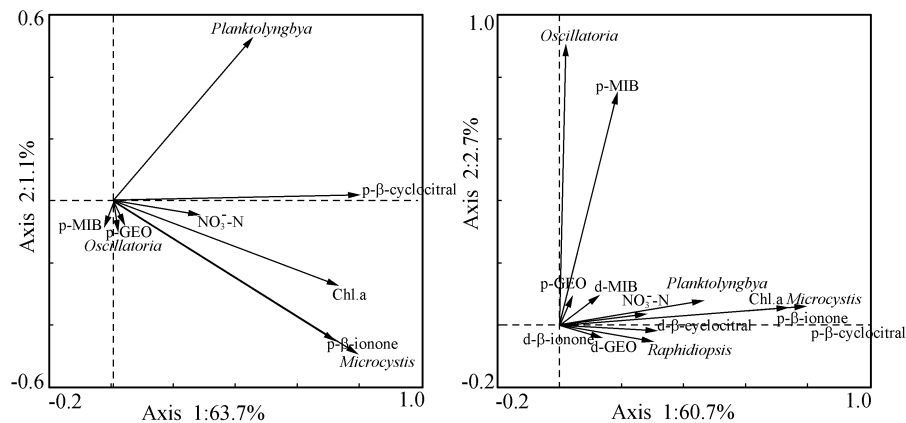


图5 异味化合物与环境因子相互关系的 RDA 结果
Fig. 5 RDA results for relationships between taste and odor compounds and environmental factors

害. 四种异味化合物的不同形态(溶解态和结合态)之间相关关系较弱或无相关关系. 然而,水样中大部分溶解态异味化合物来自结合态的释放,因此溶解态和结合态异味化物理应有相对较好的相关关系. 我们试图寻找在太湖中造成这种差异的主要原因.

首先,已有报道证明有些藻类在不同的生长条件下产生异味化合物以及释放异味化合物的速率或能力是不同的. 例如 Izaguirre 等从加利福尼亚南部的水库中分离了产 MIB 的假鱼腥藻(*Pseudanabaena*),然而培养一段时间后,这些藻株产 MIB 的能力消失^[25]. 另外,李林发现在不同的生长阶段,铜绿微囊藻产生 β-环柠檬醛的能力差别很大,胞内 β-环柠檬醛的产生速率在生长初期较小,随着生长过程缓慢增加,然后迅速增大,到培养到 15 d 时达到最高,然后下降再上升;而培养基中胞外溶解态 β-环柠檬醛的浓度是先升后降,在

培养的前中期达到最大浓度^[26]. 其次, 水体中一些细菌等其它微生物具有降解异味化合物的能力. Westhoff 等^[27]研究了亚利桑那州 3 个水库中 MIB、GEO 的发生和降解情况, 结果发现生物降解似乎是水体中 MIB 流失的主要途径, 其中异养好氧性微生物似乎在其中发挥了重要作用. 此外, 前人发现蜡状芽孢杆菌 (*Bacillus cereus*) 是湖泊中降解土霉味异味化合物的主要杆状细菌种类^[28-30]. Sugiura 等^[31]发现 *Monas guttula* 能够吞噬一种具有产生 MIB 能力的席藻 (*Phormidium tenue*) 并能够降解 MIB. Tanaka 等^[32]从琵琶湖分离的假单胞菌 (*Pseudomonas* sp.) 和肠杆菌 (*Enterobacter* sp.) 能够降解 MIB. 除了生物降解外, 水体中溶解态的 β -环柠檬醛等还能被光解, 李林等发现太阳光能够有效降解水中溶解态的 β -环柠檬醛和 β -紫罗兰酮^[33]. 生物降解或光解作用都会导致水体中溶解态的异味化合物发生较大变化. 再者, 异味化合物能够被水体中的一些颗粒物或水生生物吸附. 如风浪作用搅起的一些颗粒悬浮物和藻类或微生物产生的胞内颗粒物等均能吸附异味化合物^[27], 养殖中的虾类、鱼类和贝类也能够吸附异味化合物并将其传递进入生态系统^[34]. 除此之外, 由于异味化合物本身具有高度的挥发性, 在水中容易挥发, 另外太湖长年受季风气候影响, 冬季盛行偏北风, 夏季盛行东南风, 日平均风速以 2~4 m/s 为主, 占全年时间的一半以上, 另有风速大于 8 m/s^[35], 风浪对湖水的搅动作用, 使得水体中溶解态异味化合物挥发更加严重. 除了这些作用会导致湖水中溶解态异味化合物发生较大变动外, 入湖河流的稀释, 也会对其产生一定的影响. 这些作用可能共同导致了太湖中溶解态和结合态异味化合物之间相关关系较弱或没有相关关系.

3.2 太湖中与异味化合物密切相关的环境因子

从 RDA 分析表明, 对于太湖异味有最大贡献量的环境因子是微囊藻, 对全部异味化合物变化的解释量达 35.56%, 对于结合态的解释量达 37.72% (图 5). 太湖每年都会受到蓝藻水华的危害^[36], 微囊藻在太湖蓝藻中占有绝对的优势 (表 1). 已有报道称微囊藻能够产生 β -环柠檬醛和 β -紫罗兰酮^[37-38]. 另外, Huang 等将 Feng-San 水库中分离的微囊藻进行无菌培养, 一段时间后检测到 MIB 的产生^[39-40]. 而结合态的 β -环柠檬醛、 β -紫罗兰酮和溶解态的 MIB 又是太湖中的主要异味化合物, 因此结合以往的研究和本文的结果可以得出, 微囊藻对于太湖的异味化合物的发生具有极大的贡献作用. 另外除了微囊藻的突出贡献外, Chl. a 的作用也是显而易见的. Chl. a 对于太湖全部异味化合物的解释量为 6.73%, 对于结合态异味化合物的解释量为 7.74%. 前人的研究也证实了湖泊或水库中叶绿素 a 的含量和异味化合物之间具有较好的相关关系^[41-42]. 滇池中叶绿素 a 的含量与 β -环柠檬醛和 β -紫罗兰酮之间相关性较好^[4]. Chl. a 通常作为浮游植物总量的定量指标, 在本研究中 Chl. a 与太湖异味化合物关系紧密, 这表明除了微囊藻外, 其他藻类对于太湖异味也有一定的贡献. 如颤藻和席藻能产生 MIB^[1], 此前也有报道称金藻和硅藻 (*Asterionella formos*, *Mallomonas*, *Synura*, *Uroglena americana*, *Dinobryon divergens*) 的培养基混合液中检测到 MIB 和 GEO 的存在^[43]. 另外, 高叶绿素含量表明了水体中存在大量藻类, 这些藻类能够为微生物提供大量的有机营养物质和碳源用以产生代谢产物, 包括异味化合物如 MIB 等^[27]. 总之, 太湖的蓝藻水华对于异味化合物的发生具有重要的作用. 值得一提的是, 不管是微囊藻、叶绿素还是全部的环境因子对于溶解态异味化合物的解释量都很小, 这可能与溶解态异味化合物在水环境中受到的影响因素较多, 变动较大有关 (如 3.1 所述). 另外, RDA 分析结果显示这些环境因子也仅仅解释了部分异味化合物的变化, 另外细菌、放线菌等的作用也是需要考虑的, 这也是本研究的不足之处.

综上所述, 本文监测的太湖 4 种异味化合物 (MIB、GEO、 β -环柠檬醛、 β -紫罗兰酮) 中, 两种形态的 GEO 和溶解态 β -紫罗兰酮对于太湖水体的异味问题贡献较小, 主要是溶解态 MIB 和结合态 β -环柠檬醛、 β -紫罗兰酮的潜在作用共同导致了太湖的异味问题. 同时湖水中溶解态和结合态异味化合物之间相关关系较弱, 可能主要是异味化合物的合成和释放速率的变化、微生物降解、光解、吸附、挥发等作用导致了异味化合物两种形态之间的较弱的相关关系. 微囊藻和叶绿素 a 与异味化合物具有紧密关系. 太湖蓝藻水华对太湖异味问题的发生具有重要的影响. 因此要彻底解决异味问题, 控制蓝藻水华的发生是不可忽视的一环.

致谢: 感谢陶敏、牛运、马志梅、张伟在采样过程中的帮助, 在此致以诚挚的感谢.

4 参考文献

- [1] Smith JL, Boyer GL, Zimba PV. A review of cyanobacterial odorous and bioactive metabolites: impacts and management

- alternatives in aquaculture. *Aquaculture*, 2008, **280**(1/2/3/4): 5-20.
- [2] 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.
- [3] 黄显怀.巢湖水体异味产生的原因及其治理对策探讨.安徽建筑工业学院学报:自然科学版,1994,**2**(1):5-8.
- [4] Li L, Wan N, Gan NQ *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] Watson SB. Cyanobacterial and eukaryotic algal odour compounds: signals or by-products? A review of their biological activity. *Phycologia*, 2003, **42**(4): 332-350.
- [6] 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.
- [7] Tsuchiya Y, Matsumoto A, Okamoto T. Volatile metabolites produced by actinomycetes isolated from Lake Tairo at Miyakejima. *Yakugaku Zasshi-Journal of the Pharmaceutical Society of Japan*, 1978, **98**(4): 545-550.
- [8] Kikuchi T, Kadota S, Suehara H *et al.* Odorous metabolites of a fungus, *Chaetomium globosum* Kinze ex Fr. identification of geosmin, musty-smelling compound. *Chemical & Pharmaceutical Bulletin*, 1981, **29**(6): 1782-1784.
- [9] Yamamoto Y, Tanaka K, Komori N. Volatile compounds excreted by myxobacteria isolated from lake water and sediments. *Japanese Journal of Limnology*, 1994, **55**(4): 241-245.
- [10] Mallevialle J, Suffet IH. Identification and treatment of tastes and odors in drinking water. Denver, CO; American Water Works Association Research Foundation/Lyonnaise des Eaux, AWWA; 1987. p. 118. AWWARF Report 1987.
- [11] Young W, Horth H, Crane R *et al.* Taste and odour threshold concentrations of potential potable water contaminants. *Water Research*, 1996, **30**(2): 331-340.
- [12] Watson SB, Ridal J. Periphyton: a primary source of widespread and severe taste and odour. *Water Science and Technology*, 2002, **49**(9): 33-39.
- [13] 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.
- [14] Dzialowski AR, Smith VH, Huggins DG *et al.* Development of predictive models for geosmin-related taste and odor in Kansas, USA, drinking water reservoirs. *Water Research*, 2009, **43**(11): 2829-2840.
- [15] 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.
- [16] Tung SC, Lin TF, Liu CL *et al.* The effect of oxidants on 2-MIB concentration with the presence of cyanobacteria. *Water Science and Technology*, 2004, **49**(9): 281-288.
- [17] Yang M, Yu JW, Li ZL *et al.* Taihu Lake not to blame for Wuxi's woes. *Science*, 2008, **319**(5860): 158.
- [18] 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.
- [19] Baumann FJ. Dichromate reflux chemical oxygen demand—Proposed method for chloride correction in highly saline wastes. *Analytical Chemistry*, 1974, **46**: 1336-1338.
- [20] Lorenzen CJ. Determination of chlorophyll and pheo-pigments: spectrophotometric equations. *Limnology and Oceanography*, 1967, **12**: 343-346.
- [21] 胡鸿钧,魏印心.中国水产藻类——系统、分类及生态.北京:科学出版社,2006.
- [22] Niu Y, Shen H, Chen J *et al.* Phytoplankton community succession shaping bacterioplankton community composition in Lake Taihu, China. *Water Research*, 2011, **45**: 4169-4182.
- [23] Deng XW, Liang GD, 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.
- [24] Deng XW, Xie P, Qi M *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. *Journal of Chromatography A*, 2012, **1219**: 75-82.
- [25] Izaguirre G, Hwang CJ, Krasner SW. Investigations into the source of 2-methylisoborneol in Lake Perris, California. In: Proceedings of 11th Annual Water Quality Technology Conference, 4-7 December. 1983, Norfolk VA, USA. American Water Works Association, Denver, CO.

- [26] 李 林. 淡水水体中藻源异味化合物的分布、动态变化与降解研究[学位论文]. 武汉:中国科学院水生生物研究所, 2005.
- [27] 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.
- [28] Danglot C, Amar R, Viagines R. Ability of bacillus to degrade geosmin. *Water Science and Technology*, 1983, **15**(6/7): 291-299.
- [29] Ishida H, Miyaji Y. Biodegradation of 2-methylisoborneol by oligotrophic bacterium isolated from a eutrophied lake. *Water Science and Technology*, 1992, **25**(2): 269-276.
- [30] Oikawa E, Shimizu A, Ishibashi Y. 2-Methylisoborneol degradation by the cam operon from pseudomonas-putida Pgg1. *Water Science and Technology*, 1995, **31**(11): 79-86.
- [31] Sugiura N, Nishimura O, Inamori Y *et al.* Grazing characteristics of musty-odor-compound-producing *Phormidium tenue* by a microflagellate, *Monas guttula*. *Water Research*, 1997, **31**(11): 2792-2796.
- [32] Tanaka A, Oritani T, Uehara F *et al.* Biodegradation of a musty odour component, 2-methylisoborneol. *Water Research*, 1996, **30**(3): 759-761.
- [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**(13): 102-105.
- [34] Rimando AM, Schrader KK. Off-flavors in aquaculture. Washington, DC: American Chemical Society, 2003: 1-13.
- [35] 范成新, 张 路, 秦伯强等. 风浪作用下太湖悬浮态颗粒物中磷的动态释放估算. 中国科学: D 辑, 2003, **33**(8): 760-768.
- [36] Guo L. Doing battle with the green monster of Taihu Lake. *Science*, 2007, **317**: 1166.
- [37] Smith JL, Boyer GL, Zimba PV. A review of cyanobacterial odorous and bioactive metabolites: impacts and management alternatives in aquaculture. *Aquaculture*, 2008, **280**(1/2/3/4): 5-20.
- [38] Zimba PV, Grimm CC. A synoptic survey of musty/muddy odor metabolites and microcystin toxin occurrence and concentration in southeastern USA channel catfish (*Ictalurus punctatus* Rafinesque) production ponds. *Aquaculture*, 2003, **218**(1/2/3/4): 81-87.
- [39] Huang WJ, Lai CH, Cheng YL. Evaluation of extracellular products and mutagenicity in cyanobacteria cultures separated from a eutrophic reservoir. *Science of the Total Environment*, 2007, **377**(2/3): 214-223.
- [40] Huang WJ, Cheng YL, Cheng BL. Ozonation byproducts and determination of extracellular release in freshwater algae and cyanobacteria. *Environmental Engineering Science*, 2008, **25**(2): 139-151.
- [41] Crocker KM, Ondrusek ME, Petty RL *et al.* Dimethylsulfide, algal pigments and light in an Antarctic *Phaeocystis* sp. bloom. *Marine Biology*, 1995, **124**: 335-340.
- [42] Davies JM, Roxborough M, Mazumder A. Origins and implications of drinking water odours in lakes and reservoirs of British Columbia, Canada. *Water Research*, 2004, **38**: 1900-1910.
- [43] Satchwill T, Watson SB, Dixon E. Odorous algal-derived alkenes: differences in stability and treatment responses in drinking water. *Water Science and Technology*, 2007, **55**(5): 95-102.