

若干水华相关藻类对太湖水体异味物质贡献的初步研究*

李维唯¹, 郭康宁¹, 刘莉文¹, 杨 莹¹, 李继影², 徐恒省², 李建宏^{1**}

(1: 南京师范大学生命科学学院, 南京 210023)

(2: 苏州市环境监测中心, 苏州 215004)

摘要: 太湖水体中臭味物质 2-甲基异莰醇 (MIB) 和土臭素 (Geo) 的出现与水华发生在时间上高度重叠, 为探寻水华中常见藻类与臭味的关系, 本研究通过对实验室培养藻株和野外水样比较分析, 探寻了部分藻株与太湖水体臭味物质的关系. 分析实验室培养的 15 株蓝藻 (其中 11 株微囊藻)、4 株绿藻和 4 株硅藻, 仅硅藻培养物测定出了 Geo, 所有藻株均未检测出 MIB; 对太湖典型水样分析结果显示, 水体中 MIB 与 Geo 的浓度与微囊藻细胞浓度无相关性; 实验室模拟微囊藻水华腐败结果显示, 无论是好氧还是厌氧条件下均未产生 MIB 和 Geo; 这些数据结果说明湖水中 MIB 和 Geo 与水华主要种群微囊藻无直接关系. 在鱼腥藻水华中测出了高浓度的 MIB, 周年水样分析结果显示鱼腥藻细胞数与 MIB 浓度变化规律一致, 因此鱼腥藻可能是 MIB 的重要来源. 但实验室培养的 *Anabaena* sp. PCC7120 无论是在缺氮还是有氮培养条件下均未产生 MIB 和 Geo, 说明臭味物质的产生具有藻株特异性.

关键词: 臭味物质; 蓝藻水华; 微囊藻; 藻类; 太湖

Relationship of odor compounds to some algal strains associated with bloom in Lake Taihu

LI Weiwei¹, GUO Kangning¹, LIU Liwen¹, YANG Ying¹, LI Jiyong², XU Hengsheng² & LI Jianhong^{1**}

(1: School of Life Sciences, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, P.R.China)

(2: Suzhou Environmental Monitoring Centre, Suzhou 215004, P.R.China)

Abstract: Odor compounds 2-methylisocrotene (MIB) and the geosmin (Geo) were highly overlapped with the water blooms in the Lake Taihu. In this study, the relationship between odor compounds and cyanobacterial or algal strains of blooms in Lake Taihu were investigated by analyzing laboratory cultures and field samples. The cultured strains included 15 cyanobacteria (11 *Microcystis* strains), 4 green algae and 4 diatoms. No MIB was detected in all strains, and Geo was only detected in the culture of diatoms. Analysis of field water samples showed that the concentration of *Microcystis* cells was not correlated with the concentration of MIB and Geo. Decay of *Microcystis* bloom did not produced MIB and Geo in either aerobic or anaerobic conditions. These data demonstrated that MIB and Geo were not directly related to *Microcystis*, dominant population of bloom. A high concentration of MIB was found in an *Anabaena* bloom. Data analysis of annual water samples showed that the cell density of *Anabaena* was consistent with the change of MIB concentration, which suggested *Anabaena* should be an important producer of MIB. However, the *Anabaena* PCC 7120 cultured in laboratory did not produced MIB and Geo both in the culture medium with nitrate or without nitrogen. The result implied that the production of odor substances was of strain specificity.

Keywords: Odor compound; cyanobacterial bloom; *Microcystis*; algae; Lake Taihu

饮用水中的臭味问题是公众十分关注的问题,也是世界上水环境研究的热点问题.太湖是苏州、无锡等城市的重要水源地,近十几年来,由于夏季出现严重的微囊藻水华,伴随着总体水质的恶化,水中时常出现

* 国家自然科学基金项目(31370217)、江苏省高校优势学科建设工程(PAPD)和太湖水污染治理专项资金(第八期)管理类科研课题(JSZC-G2014-211)联合资助. 2017-09-25 收稿;2017-11-16 收修改稿. 李维唯(1993-),女,硕士研究生;E-mail:li_weiwei0817@163.com.

** 通信作者; E-mail:lljianhong@njnu.edu.cn.

土味和腥味等异味,引起了人们的普遍关注.藻类是水体中多种异味物质的来源之一,藻类在生长过程中分泌以及死亡后细胞裂解释放多种具有各种味道的物质,包括水果味、泥土味、鱼腥味和青草味等^[1-2].2-甲基异茨醇(2-methylisoborneol, MIB)和土臭素(geosmin, Geo)是最常见的导致饮用水产生异味的(土味、霉味)物质(嗅觉阈值浓度分别仅为9和4 ng/L)^[3-4],太湖水体中主要出现的也是这2种物质.以前的研究分析已发现,太湖中高浓度MIB和Geo的出现与微囊藻水华的发生时间高度重叠,主要出现在5-9月^[5-9],因此,占水华生物量90%以上的微囊藻与2种异味物质是否存在因果关系为人们所关注.已报道的大部分研究认为微囊藻并不在产MIB和Geo的蓝藻之列^[10-11],但也有研究显示^[12]在微囊藻培养物中测得较高浓度的MIB.由于蓝藻的次生代谢具有复杂的多样性,有必要进一步通过本土藻株的研究确认微囊藻与这些异味物质的关系.同时,水华发生过程伴随着部分藻体死亡,也有必要弄清微囊藻藻体腐败过程是否会这些异味物质的直接来源.另一方面,除了微囊藻外,水华中也含有鱼腥藻等其他蓝藻种类,同时还伴生有少量绿藻和硅藻,这些藻类对太湖水体的异味有怎样的贡献都是有待弄清的问题.

国内外已有很多关于湖泊河流水体中异味物质与藻类相关性的研究报道,但很多报道是基于野外调查的数据,分析异味物质与藻之间的关系.由于自然生态系统的复杂性,这些调查结果难以确认产生异味物质的藻类.通过分析实验室纯培养的藻株,可以确定它们产异味物质的特性,然而,由于自然水体中绝大部分种类是难以分离培养的,不同水体中藻类的生理状态(生态类型)也存在一定的差异,所以虽然已有不少研究确定了一些藻株产异味物质的特性^[10-11],但对于不同地域的水体,还必须通过分析土著藻株,才能得出较准确的结论.本文从太湖和邻近水体中分离培养了一些水华常见种类,测定了实验室纯藻株培养物产异味物质的特性,并结合天然水华样品的分析,讨论了太湖主要异味物质MIB和Geo的来源,旨在为饮用水水质的管理提供科学依据.

1 实验材料及方法

1.1 实验藻株

为探明水华相关的常见藻类产异味物质的特点,本实验以太湖、南京小水体中分离的微囊藻为主,结合模式藻株,选择了夏季水体中常见的蓝藻门、绿藻门和硅藻门的代表性种类为材料,用于分析各门类产异味物质的特点.本研究所用的藻株及来源见表1.

1.2 藻类培养

除了硅藻采用硅藻培养基DM^[13]以外其余藻类均采用BG-11培养基培养.藻类在28℃、白色日光灯3000 lux连续光照下静置培养,每天间隙摇动数次.

藻类培养至对数生长期(接种培养8~10 d, OD₇₀₀为0.5~0.8),藻液每10 ml加1 ml 3 g/L的CuSO₄溶液保存,采用已灭菌的0.45 μmol/L醋酸纤维滤膜过滤去除细胞后测定水样的异味物质.

1.3 微囊藻水华腐败实验

捞取太湖水表层含浓稠微囊藻水华的水样用于腐败实验.好氧腐败处理:取微囊藻水华样品50 ml放入灭菌的250 ml锥形瓶中,置于光照摇床150转/min摇动培养,光照强度500 lux,温度30℃;厌氧腐败处理:取100 ml蓝藻水华样品,置于灭菌的大试管中,用塑料膜包裹封口,置于30℃下处理;上述处理持续10 d后离心取上清液测定异味物质.

1.4 异味物质测定

采用顶空固相微萃取、气-质联用的方法进行定性定量测定^[14].主要测定4种藻类产生的常见异味物质:2-甲基异茨醇(MIB)、土臭素(Geo)、β-柠檬环醛(Cyc)和β-紫罗兰酮(Ion).

顶空固相微萃取:取10 ml水样置于20 ml的广口瓶中,加入3 g烘好后的氯化钠,在60℃下预平衡5 min后,萃取30 min.在250℃下热解析3 min后进样.

气相色谱:DB-5 ms(30 m×0.25 mm×0.25 μm)色谱柱,载气为氦气,恒流模式,流量1.0 ml/min.柱温:50℃保持2 min,以8℃/min升至160℃,再以20℃/min升至280℃保持3 min.进样口温度250℃,质谱接口温度250℃.不分流进样,进样时间3 min.

质谱:EI离子源,能量70 eV,温度230℃;四级杆温度150℃;2,4,6-TCA-D5内标物质的保留时间是1

min, 定量离子是 215.

表 1 实验用藻株
Tab.1 Strain list in the experiment

门类	属	藻株	藻株来源
蓝藻门	微囊藻属 <i>Microcystis</i>	W0	太湖(群体状态)
	微囊藻属 <i>Microcystis</i>	W1	太湖(群体状态)
	微囊藻属 <i>Microcystis</i>	W2	太湖(群体状态)
	微囊藻属 <i>Microcystis</i>	W3	太湖(群体状态)
	微囊藻属 <i>Microcystis</i>	W4	太湖(群体状态)
	微囊藻属 <i>Microcystis</i>	L1	栖霞山小水体(群体状态)
	微囊藻属 <i>Microcystis</i>	L2	牛首山小水体(群体状态)
	微囊藻属 <i>Microcystis</i>	L3	紫金山小水体(群体状态)
	微囊藻属 <i>Microcystis</i>	XW01	玄武湖(群体状态)
	微囊藻属 <i>Microcystis</i>	PCC7806	法国巴斯德研究所(单细胞)
	微囊藻属 <i>Microcystis</i>	FACHB315	武汉水生所(单细胞)
	鱼腥藻属 <i>Anabaena</i>	PCC7120	法国巴斯德研究所
	鱼腥藻属 <i>Anabaena</i>	DY	太湖冬季水华(非培养物)
	集胞藻属 <i>Synechocystis</i>	PCC6803	法国巴斯德研究所
	浮丝藻 <i>Planktothrix</i>	SP	南京中山陵小水体
绿藻门	栅列藻属 <i>Scenedesmus</i>	G1	南京仙林小水体
	栅列藻属 <i>Scenedesmus</i>	G2	太湖
	小球藻属 <i>Chlorella</i>	G3	太湖
	衣藻属 <i>Chlamydomonas</i>	G4	南京仙林小水体
硅藻门	舟形藻属 <i>Navicula</i>	Si1	南京仙林小水体
	脆杆藻属 <i>Fragilaria</i>	Si2	南京仙林小水体
	脆杆藻属 <i>Fragilaria</i>	Si3	太湖
	脆杆藻属 <i>Fragilaria</i>	Si4	太湖

表 2 几株微囊藻产生的臭味物质 (ng/L)

Tab.2 Odor compounds produced by *Microcystis* strains

微囊藻藻株	臭味物质			
	Cyc	Ion	MIB	Geo
W0	1855	3222	ND	ND
W1	6041	1458	ND	ND
W2	3458	2284	ND	ND
W3	187	259	ND	ND
W4	971	1264	ND	ND
L1	11531	2784	ND	ND
L2	10689	1738	ND	ND
L3	2864	1894	ND	ND
FACHB315	803	7.6	ND	ND

ND 表示低于检测限, 未检出.

2 结果分析

2.1 不同门类藻产生的臭味物质

对分离纯化培养的 14 株水华发生期间常见的藻类进行异味物质分析, 结果如图 1 所示. 包括微囊藻在内的 8 个蓝藻藻株仅检测出 Cyc 和 Ion; 4 株绿藻仅产生极少量的臭味物质; 4 株硅藻培养物中检出不同浓度的 Geo, 最高浓度达 109 ng/L. 然而在所有的藻株中均未检出 MIB.

为进一步确认太湖蓝藻水华主要种类——微囊藻产臭味物质的特性, 又对分离自太湖的 5 株微囊藻(W0~W4)和一株源于中国科学院水生生物研究所淡水藻种库的微囊藻 FACHB315 进行分析, 与上述结果相同(表 2, 其中的 L1~L3 为图 1 中藻株的重复实验), 所有这些本土微囊藻藻株均不产生 MIB 和 Geo, 仅仅产生 Cyc 和 Ion, 这与文献已报道的研究结果一致^[15-16]. 但 Cyc 和 Ion 是具有高嗅觉阈值的芳香物质, 并不是导致太湖水体臭味的主要物质.

2.2 天然水样中微囊藻密度与臭味物质浓度的相关性

为进一步探寻太湖水体中 MIB 和 Geo 与微囊藻水华的关系, 2015 年夏季对出现显著臭味的某取水口进

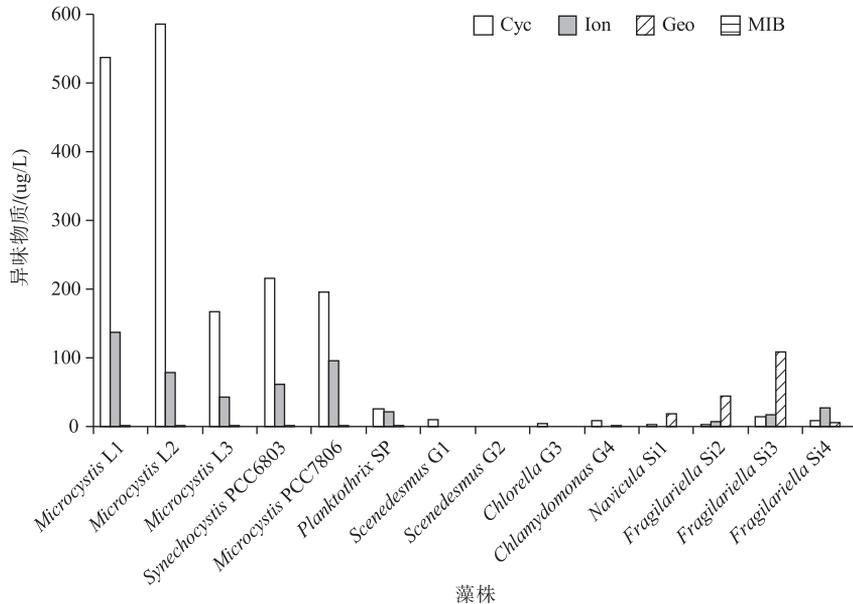


图1 不同藻株产嗅味物质的特性

Fig.1 Odor compounds produced by algal strains

行了采样,相距约 500~1000 m 的 3 个采样点分别为 SSC1 (31°18'37"N, 120°16'19"E)、SSC2 (31°18'28"N, 120°15'43"E) 和 SSCN (31°17'14"N, 120°16'19"E)。采样时水面可见显著漂浮的微囊藻水华, 样点的基本水质参数和微囊藻细胞密度见表 3。测定结果表明, 3 个样点水体中存在较高浓度的 MIB 和 Geo (图 2)。比较 SSC1 和 SSC2 水样, 二者的藻密度和其他水质参数基本相同, 但 MIB 浓度却相差甚远, 取水口南侧样点 (SSCN) 的微囊藻细胞密度明显低于 SSC1 和 SSC2 点位, 但 MIB 浓度却显著高于 SSC2 水样 (图 2)。由此可见水体中 MIB 浓度与微囊藻细胞密度并无直接关系。对 Geo 的测定也呈现出类似的结果 (图 2b), 其浓度与藻密度未见相关性。这些数据与上述实验室培养物的测定结果吻合, 显示了微囊藻与太湖水体中 MIB 和 Geo 的出现不存在直接的相关性。

已有的调查数据显示^[17], 高浓度 MIB 的出现虽然总体上与微囊藻水华的发生存在时间上的吻合 (5—9 月), 但二者的浓度变化并不完全一致: 一方面在 7 月的水华高峰期 MIB 出现一个显著的浓度低谷, 使水体中 MIB 浓度曲线呈明显的 M 型; 另一方面仅到了 9 月底, MIB 浓度就迅速降低到了很低的水平, 而此时微囊藻水华依然处在较高浓度。这些现象均表明了微囊藻与太湖水体的嗅味物质没有直接关系。

表 3 几个采样点的微囊藻细胞密度和水质参数

Tab.3 *Microcystis* concentration and water quality in sampling sites

采样点	水温/℃	pH	浊度/NTU	溶解氧/(mg/L)	微囊藻细胞密度/($\times 10^4$ cells/L)
SSC1	24.66	8.93	49	9.35	4800
SSC2	24.66	8.93	49	9.35	4800
SSCN	24.37	8.92	69	9.37	3800

2.3 水华腐败过程对嗅味物质的影响

水华发生期间通常伴随一定量微囊藻细胞的死亡, 死亡裂解的藻细胞会为附生的微生物提供营养, 从而产生嗅味物质。为了分析水华在自然腐败过程中是否会产生 MIB 和 Geo, 以天然水华样品为材料, 在实验室内模拟了水华腐败的过程。腐败过程模拟设置了好氧 (有光) 和厌氧 (黑暗) 2 种腐败环境。结果表明, 无论是好氧还是厌氧条件下, 腐败一段时间后 2 种嗅味物质浓度都显著降低, 特别是在好氧环境条件下, 2 种嗅

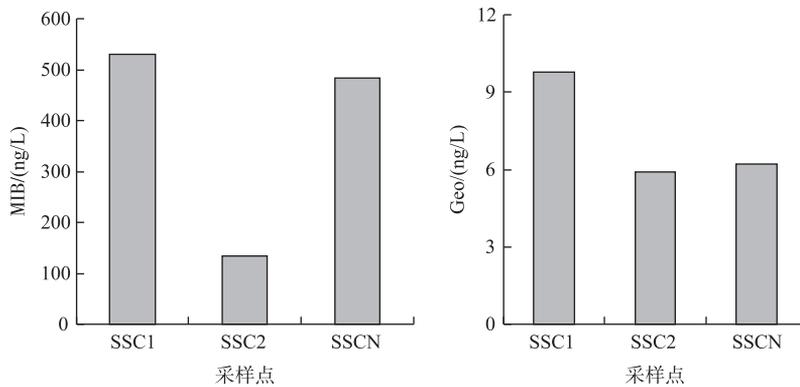


图2 太湖水样中的 MIB 和 Geo 浓度

Fig.2 MIB and Geo concentrations in water samples of Lake Taihu

味物质的浓度几乎降至 0 (图 3). 这一结果显示,微囊藻水华腐败的过程,并不会直接产生 MIB 和 Geo,相反一些微生物的生长,特别是好养菌的代谢会分解这些臭味物质.

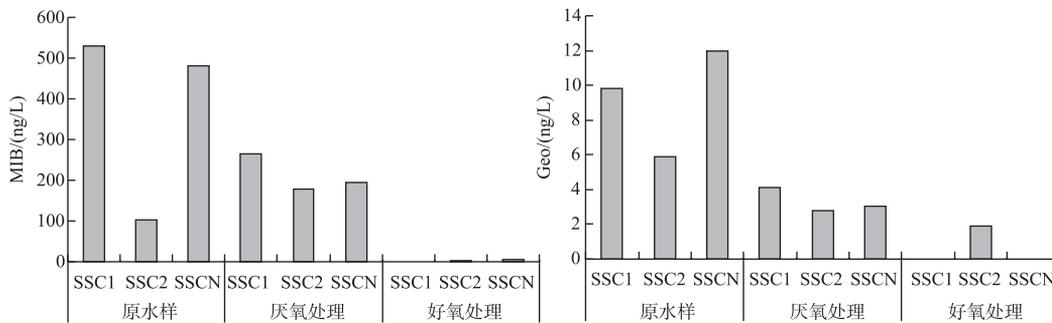


图3 水华腐败前、后 MIB 和 Geo 的浓度变化

Fig.3 MIB and Geo concentrations before and after bloom decay

表4 冬季鱼腥藻水华水样的臭味物质 (ng/L)

Tab.4 Odor compounds of *Anabaena* bloom in winter

编号	MIB	Cyc	Geo	Ion
DY1	886	7387	ND	1606
DY2	2626	4793	ND	348
DY3	1480	11236	ND	943
平均值	1664	7805	ND	966

ND 表示低于检测限,未检出.

MIB 可被水样中许多细菌分解,长期维持培养的样品中一直存在如此高浓度的 MIB,理应是藻不断产生的结果. 因此,鱼腥藻可能对太湖水体中的 MIB 有一定的贡献.

夏季太湖水华发生期间,鱼腥藻属也是常见的伴生种类. 根据 2014 年 8 月至 2015 年 8 月太湖某典型样点 MIB 浓度与鱼腥藻细胞密度变化统计结果显示,鱼腥藻属细胞密度与 MIB 浓度的变化趋势相似 (图 4),这一现象也提示,鱼腥藻可能是太湖水体 MIB 的重要来源. Izaguirre 等^[10]研究指出,鱼腥藻是 MIB 和 Geo 的典型生产者,Wang 等^[18]也从乌克兰鱼腥藻 (*Anabaena ucrainica*) 中分析鉴定出了 Geo 合成基因,但在本研究测定的样品中却并未发现鱼腥藻产生 Geo. 这一结果也显示了不同地域的藻类产臭味物质的特性有较大的

2.4 鱼腥藻对 MIB 的贡献

鱼腥藻是太湖中常见的种类,2015 年 12 月末无锡等地的局部水域出现了鱼腥藻水华,对水华区域的 3 个样品 DY1、DY2 和 DY3 (样点相距约 50 m) 的分析结果显示,MIB 浓度最高达到了 2626 ng/L (表 4). 对这一水样中的鱼腥藻用太湖原水在实验室内维持培养了 6 个月 (无法分离培养,在维持培养过程中藻逐渐死亡),测得的培养液中 MIB 浓度始终维持在 1000 ng/L 以上 (数据未列出). 由于有氧条件下

差异.

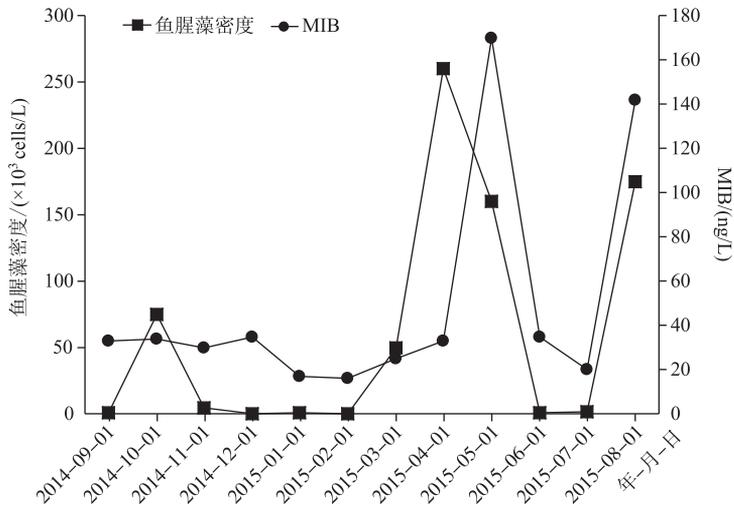


图4 太湖某取水口鱼腥藻密度与MIB浓度的周年变化

Fig.4 Annual variation of cell density of *Anabaena* and MIB concentration of a water intake in Lake Taihu

为进一步验证鱼腥藻产MIB的能力,需对纯培养鱼腥藻进行产臭味物质研究,但由于未能成功分离培养太湖的鱼腥藻藻株,故以模式藻株 *Anabaena* sp. PCC7120 为材料进行了实验. 然而实验的结果显示,不论是新鲜培养物(指数生长期)还是久置的培养物(稳定期),也不论是有氮培养还是无氮培养,所有条件下均未测定出MIB和Geo(数据未列出),与Suurnäkki等^[19]对两株鱼腥藻的研究结果一致. 这些结果显示:臭味物质的产生不仅仅有属种的特异性,更具有藻株的差异.

3 讨论

3.1 微囊藻与臭味物质的关系

藻类与饮用水中臭味物质的关系,是国内外广泛关注的问题,已有研究表明,各个门类的藻类可能会产生不同的臭味物质,水体中的MIB和Geo主要源于蓝藻和放线菌^[20],束丝藻(*Aphanizomenon*)、浮丝藻(*Planktothrix*)、伪鱼腥藻(*Pseudanabaena*)和聚球藻(*Synechococcus*)属等都可产生MIB和Geo,而微囊藻属并不产生这两种物质^[21]. 但可能是由于大部分野外藻株难以分离的缘故,对同一个属不同种类开展的筛查研究相对较少. 微囊藻属是导致蓝藻水华的重要种类,从产生微囊藻毒素(MCs)的能力来看,不同的藻株产生MCs种类和产量有很大的差异. 由此可见,作为原核生物的蓝藻,在次生代谢产物上具有复杂的多样性. 虽然过往的文献报道中,微囊藻属并不在产MIB和Geo的蓝藻之列,但Zhang等^[22]在一株铜绿微囊藻的培养物质中测定出了MIB和Geo. 虽然作者将微囊藻衰亡期的MIB和Geo浓度增加归结为伴生的放线菌产生,但对新鲜培养物中浓度高达308 ng/L的MIB来源并没有给出合理的解释. 本研究通过11株微囊藻培养物和野外水华样品测定的数据分析,进一步验证了太湖水体中的MIB与Geo并非微囊藻代谢产生;另一方面,天然微囊藻水华的腐败无论是在好氧还是厌氧条件下,MIB和Geo浓度均显著降低,这一结果说明,微囊藻附生菌中可产MIB的放线菌并不能直接以腐败藻为“培养基”,大量生长繁殖合成MIB和Geo,这一数据结果也不同于Zhang等^[22]的结果. 上述这些研究结果表明,微囊藻与水体中的MIB和Geo没有直接的关联. 微囊藻水华中虽然有较高浓度的Cyc和Ion,但Cyc和Ion是两种臭味阈值较高、带芳香味的物质,测得的结果大多并未达到臭味阈值浓度,因此通常并不会导致异味.

除了藻类外,水体中许多异养微生物也是MIB和Geo的来源^[1],虽然在本文的实验中微囊藻水华样品中的细菌(包括微囊藻附生菌和周际水体中的细菌)并未产生MIB和Geo,但在天然水体中通常都具有非常丰富的产臭味物质微生物类群,蓝藻水华的细胞死亡、裂解可为这些异养微生物提供丰富的有机物营养,为

它们的大量繁殖和臭味物质的合成提供物质基础. 因此,微囊藻水华虽然不是 MIB 和 Geo 的直接生产者,但依然可能是水华发生期间水体臭味物质浓度较高的主要原因之一.

3.2 硅藻培养物中测定出 Geo 的分析

很多调查发现,一些湖泊和河流中硅藻与 MIB/Geo 浓度存在明显的相关性,但硅藻是否直接产 Geo 似乎是一个尚无定论的问题. Olsen 等^[23]指出,目前关于硅藻(无菌藻株)与异味物质关系的研究仅有 Sugiura 等^[24]的研究,结果显示实验室无菌培养的硅藻不产 MIB 和 Geo,因此一般认为与硅藻相关的 Geo 源于伴生的放线菌. 但这一研究似乎并不能说明所有的硅藻都不产生 Geo.

Juttner^[25]对采集的底栖硅藻进行了细胞内容物的测定,测得其 Geo 浓度相对较高; Schafran^[26]在 AWWA Water Quality and Research Committee 2016 年 3 月的报告中指出,产生 MIB 和 Geo 的硅藻包括星杆藻(*Asterionella*)和小环藻(*Cyclotella*). 李继影等^[17]对太湖某饮用水源的数据分析显示,2013 年全年 MIB 和 Geo 浓度均与硅藻浓度呈高度正相关. 因此,硅藻是否产 MIB 和 Geo 有待更多的研究去证实.

本研究中采用的硅藻藻株虽然是纯培养藻种,但无法排除存在附生的产 Geo 放线菌,因此硅藻培养物中的 Geo 不能排除是附生放线菌的产物. 即便如此,本文的测定结果依然可以说明:硅藻与 Geo 的出现密切相关.

3.3 鱼腥藻产 MIB 的分析

Qi 等^[27]对全太湖的调查分析显示颤藻(*Oscillatoria*)可能是 MIB 的来源,但对于水华发生水域,鱼腥藻的生物量更大,在太湖某些区域往往和微囊藻同为水华的重要组成^[28]. 因此鱼腥藻对水华发生区域高浓度 MIB 的出现应该有更大的贡献. 刘洋^[29]采用分子标记的方法对 2009—2010 年太湖水样中水华鱼腥藻时空分布进行了分析,结果显示在不同湖区都普遍存在丰富的鱼腥藻,密度最高值达 4×10^7 cells/L. 近年来由于加强了对太湖污染的治理,部分水域总氮水平显著降低,具有固氮能力的鱼腥藻密度有显著增加的趋势,部分水域甚至发生鱼腥藻水华,因此,鱼腥藻产异味物质对饮用水源的影响更应值得关注.

3.4 产臭味物质藻株的特异性

从已报道的文献来看^[11,19,26],不同藻株臭味物质产生的能力是完全不同的,无法通过简单的藻种鉴定来确定其是否产臭味物质. 仅以鱼腥藻为例来看,文献的报道有的藻株只产 MIB,有的藻株只产 Geo,有的藻株两种都产生,也有藻株两种都不产生(如本研究中测定的藻株 PCC7120). 因此必须通过纯化培养,结合产异味物质基因的分析进行确认^[18-19]. 然而由于自然界中大部分藻株的分离培养都很困难,特别是要排除附生菌的干扰,需采用无菌藻株进行分析. 因此,要完全弄清藻类与臭味物质的关系还需要大量的研究.

对于放线菌和粘细菌合成 MIB 和 Geo 的代谢途径目前已有较深入的研究,基于这些代谢途径的分析,在蓝藻中也可以通过基因分析推测一些种类产臭味物质的可能性^[30],但是由于萜类物质在不同生物体中的代谢途径会有很大的差异,目前对蓝藻和其他物种的 MIB 和 Geo 合成代谢途径,以及这些代谢的调控机制所知甚少,有待进一步的研究发掘. 关于藻类对太湖臭味物质的贡献也有待更多的研究去补充完善.

致谢:2015 年冬季鱼腥藻水华样品由无锡市环境检测中心张军毅博士采集提供,在此表示感谢.

4 参考文献

- [1] Knappe D, Viswakumar A. Development of an analytical method for taste and odor compounds commonly found in drinking water sources. Water Resources Research Institute of the University of North Carolina, 2011.
- [2] Jin CX, Zhang JW, Wang R *et al.* Research progress of smell and taste reason in drinking water. *Environment and Development*, 2010, **22**(2): 83-87. [靳朝喜, 张军伟, 王锐等. 饮用水中致嗅和味原因研究进展. 环境与发展, 2010, **22**(2): 83-87.]
- [3] Watson SB. Cyanobacterial and eukaryotic algal odour compounds; signals or by-products? A review of their biological activity. *Phycologia*, 2003, **42**(4): 332-350.
- [4] Watson SB. Aquatic taste and odor: A primary signal of drinking-water integrity. *Journal of Toxicology & Environmental Health Part A*, 2004, **67**(20/21/22): 1779-1795.
- [5] Jin X. Research on the typical odor substances and their changes in algae metabolism products [Dissertation]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009. [金星. 藻类代谢产物中典型异味物质及其变化规律研究 [学位论文].

- 论文]. 南京: 南京理工大学, 2009.]
- [6] Zhang JF. Study on the monitoring of odor substances and its changes in the water of Taihu Lake[Dissertation]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2010. [张建芳. 太湖原水中异味物质的监测及其变化规律研究[学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2010.]
- [7] Qin HB, Zhang XY, Fan L *et al.* Off-flavor compounds in drinking water sources of Taihu in Suzhou and their correlations with environmental factors. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2016, **8**(3): 38-42. [秦宏兵, 张晓赟, 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. 环境监控与预警, 2016, **8**(3): 38-42.]
- [8] Xu ZQ, Zhang XY, Liao L *et al.* Study on the detection of the main odor substances and the temporal and spatial variation of the drinking water source in Taihu. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2016, **22**(15): 73-74. [徐振秋, 张晓赟, 廖蕾等. 太湖饮用水源地主要异味物质检测及其时空变化规律研究. 安徽农学通报, 2016, **22**(15): 73-74.]
- [9] Xu ZQ, Zhang XY, Liao L *et al.* Study the time relationship with the main odor source water in Taihu. *Guangdong Chemistry*, 2016, **43**(17): 162-163. [徐振秋, 张晓赟, 廖蕾等. 太湖饮用水源地主要异味物质时间变化规律研究. 广东化工, 2016, **43**(17): 162-163.]
- [10] Izaguirre G, Taylor WD. A guide to geosmin- and MIB-producing cyanobacteria in the United States. *Water Science & Technology*, 2004, **49**(9): 19-24.
- [11] Sugiura N, Utsumi M, Wei B *et al.* Assessment for the complicated occurrence of nuisance odours from phytoplankton and environmental factors in a eutrophic lake. *Lakes & Reservoirs: Research and Management*, 2004, **9**: 195-201.
- [12] Zhang K, Lin TF, Zhang T *et al.* Characterization of typical taste and odor compounds formed by *Microcystis aeruginosa*. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, **25**(8): 1539-1548.
- [13] Andersen RA ed. Diatom medium, modified. London: Elsevier Academic Press, 2005: 481.
- [14] Fan L, Qin HB, Zhang XY. Determination of nine off-flavor compounds in water by gas chromatography-mass spectrometry with head space solid phase micro-extraction. *Journal of Jiangnan University: Natural Science Edition*, 2014, **13**(3): 355-359. [范苓, 秦宏兵, 张晓赟. 顶空固相微萃取-气相色谱/质谱法同时测定富营养化水体中 9 种异味物质. 江南大学学报: 自然科学版, 2014, **13**(3): 355-359.]
- [15] Watson SB, Ridal J, Boyer G. 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.
- [16] Xi Y, Xie P, Yu Y *et al.* *Microcystis aeruginosa*/*Pseudomonas pseudoalcaligenes* interaction effects on off-flavors in algae/bacteria co-culture system under different temperatures. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, **31**(5): 38-43.
- [17] Li JY, Zhang XY, Xu HS *et al.* Preliminary study on variation and source of main odor compounds in taihu drinking water source. *Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2016, **28**(3): 69-71. [李继影, 张晓赟, 徐恒省等. 太湖水源水主要异味物质变化规律及来源初探. 环境监测管理与技术, 2016, **28**(3): 69-71.]
- [18] Wang Z, Shao JH, Xu Y *et al.* Genetic basis for geosmin production by the water bloom-forming cyanobacterium, *Anabaena ucrainica*. *Water*, 2015, **7**: 175-187.
- [19] Suurmäki S, Gomez-Saez GV, Rantala-Ylinen A *et al.* Identification of geosmin and 2-methylisoborneol in cyanobacteria and molecular detection methods for the producers of these compounds. *Water Research*, 2015, **68**: 56-66.
- [20] Peter A. Taste and odor in drinking water: sources and mitigation strategies[Dissertation]. Switzerland: Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 2008.
- [21] Graham JL, Loftin KA, Ziegler AC *et al.* Cyanobacteria in lakes and reservoirs: Toxin and taste-and-odor sampling guidelines. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, 2008.
- [22] Zhang K, Lin TF, Zhang T *et al.* Characterization of typical taste and odor compounds formed by *Microcystis aeruginosa*. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, **25**(8): 1539-1548.
- [23] Olsen BK, Chislock MF, Wilson AE. Eutrophication mediates a common off-flavor compound, 2-methylisoborneol, in a drinking water reservoir. *Water Research*, 2016, **92**: 228-234.
- [24] Sugiura N, Inamori Y, Hosaka Y *et al.* Algae enhancing musty odor production by actinomycetes in Lake Kasumigaura. *Hydrobiologia*, 1994, **288**(1): 57-64.
- [25] Jüttner F. Evidence that polyunsaturated aldehydes of diatoms are repellents for pelagic crustacean grazers. *Aquatic Ecology*, 2005, **392**: 271-282.
- [26] Schafran GC. Controlling algae-related tastes and odors: From source to tap. VA AWWA Water Quality and Research Com-

mittee Seminar, March 23, 2016.

- [27] 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.
- [28] Zhang JY, Zhu BC. The study on the species and succession of cyanobacteria in Taihu Lake (Wuli Lake). Nanning: Proceedings of academic annual meeting of Chinese Society For Environmental Sciences, 2012: 1495-1499. [张军毅, 朱冰川. 太湖(五里湖)蓝藻水华种类及其演替规律研究. 南宁: 中国环境科学学会学术年会, 2012: 1495-1499.]
- [29] Liu Y. Studies on the diversity, spatial-temporal distribution, and physiological characters of *Anabaena flos-aquae* in Taihu Lake[Dissertation]. Wuhan: University of Chinese Academy of Sciences, 2013. [刘洋. 太湖水华鱼腥藻的多样性、时空分布及生理特性研究[学位论文]. 武汉: 中国科学院大学, 2013.]
- [30] Zhang T, Li DL, Li J. Biosynthesis of geosmin and 2-methylisoborneol in the prokaryotes—A review. *Acta Microbiologica Sinica*, 2012, **52**(2): 152-159. [张婷, 李德亮, 李杰. 原核生物中土霉味化合物二甲萜烷醇和 2-甲基异茨醇生物合成研究进展. 微生物学报, 2012, **52**(2): 152-159.]