

于建伟, 李宗来, 曹楠, 等. 2007. 无锡市饮用水臭味突发事件致嗅原因及潜在问题分析 [J]. 环境科学学报, 27 (11): 1771 - 1777

Yu J W, Li Z L, Cao N, *et al*. 2007. Analyses on cause for odor and potential problems in water source during odor episode event in Wuxi [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 27 (11): 1771 - 1777

无锡市饮用水臭味突发事件致嗅原因及潜在问题分析

于建伟¹, 李宗来¹, 曹楠¹, 杨敏^{1,*}, 丁建清², 苗婷婷¹, 张君枝¹

1. 中国科学院生态环境研究中心环境水质学国家重点实验室, 北京 100085

2. 无锡市环境监测站, 无锡 214023

收稿日期: 2006-07-09 修回日期: 2007-11-21 录用日期: 2007-11-21

摘要: 针对 2007 年 5 月底 6 月初发生的无锡市饮用水臭味事件, 在嗅味层次分析法 (FPA) 的基础上, 利用感官气相色谱法对污染水团、取水口以及管网水中的致嗅物质种类进行了鉴定, 并利用 GC-MS 对主要致嗅物质进行了定量分析, 同时, 对微囊藻毒素含量以及生物遗传毒性进行了测定. 结果表明, 此次嗅味事件的主要致嗅物质为以二甲基三硫为主的硫醚类有机体腐败产物, 6 月 4 日采集的污染水团中二甲基三硫含量高达 11399 ng·L⁻¹. 同时, 含有一定量的 2-甲基异莰醇 (MB) 等藻类分泌物, 但这些物质的嗅味被二甲基三硫等硫醚类化合物导致的腥臭味所掩盖, 不是主要的致嗅物质. 另外, 6 月 4 日及 6 月 8 日采集的取水口样品分析结果表明, 原水中微囊藻毒素含量远低于新颁布的生活饮用水卫生标准, 而且, 利用 umu 测试得到的水中遗传毒性水平很低.

关键词: 饮用水; 嗅味; 藻华; 微囊藻毒素; 遗传毒性

文章编号: 0253-2468 (2007) 11-1771-07 中图分类号: X132 文献标识码: A

Analyses on cause for odor and potential problems in water source during odor episode event in Wuxi

YU Jianwei¹, LI Zonglai¹, CAO Nan¹, YANG Min^{1,*}, DING Jianqing², MAO Tingting¹, ZHANG Junzhi¹

1. State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085

2. Wuxi Environmental Monitoring Station, Wuxi 214023

Received 9 July 2006; received in revised form 21 November 2007; accepted 21 November 2007

Abstract: An odor episode event, occurring in Wuxi city from the end of May to early June, 2007, were investigated. Using flavor profile analysis (FPA) and sensory GC, the odorous compounds of polluted black agglomeration, raw water and finished water were identified. Meanwhile, main odorous compounds were quantified using GC/MS, and microcystins content and biological genotoxicity were also determined. It showed that the main odorous compounds were some sulfide compounds such as dimethyl trisulfide, coming from organisms decomposition, and concentration of dimethyl trisulfide were 11399 ng·L⁻¹ high in the black agglomeration sampled in 4 June. Some cyanobacterial metabolites like MB were also detected but not the main odorous compound, which was covered by fishy and septic odor caused by sulfide compounds like dimethyl trisulfide. Microcystins content in raw water sampled in 4 June and 8 June was much lower than the standard that was recently implemented in Standards for Drinking Water Quality, and the biological genotoxicity determined by umu test was very low.

Keywords: drinking water; odor; alga blooming; microcystins; genotoxicity

1 引言 (Introduction)

随着水环境质量的下降, 世界范围内饮用水臭味事件的发生频率越来越高, 其中由藻类次生代谢产物引起的水体异味问题是一个严重且普遍存在的环境问题 (Suffet *et al*, 1995, 1996; 宋立荣等,

2004). 2007 年 4 月下旬太湖开始出现蓝藻水华, 5 月底无锡市主要取水口 (沙渚原水厂) 遭受漂流而至的污水团侵袭, 导致城区出现大范围自来水发臭, 引发了罕见的供水危机. 污水团在取水口附近停滞时间长达一周左右, 期间有关部门采取了积极的应急处理措施, 取得了较好的效果.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 50678166); 国家杰出青年科学基金项目 (No. 2004AA649280)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50678166) and the State High Tech Research and Development Project of China for younger researchers (No. 2004AA649280)

作者简介: 于建伟 (1976—), 男, 博士, E-mail: jwyu@rcees.ac.cn; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: yangmin@rcees.ac.cn

Biography: YU Jianwei (1976—), male, Ph.D., E-mail: jwyu@rcees.ac.cn; * Corresponding author, E-mail: yangmin@rcees.ac.cn

一般来说,蓝藻水华暴发后出现的最常见致嗅物质是 2-甲基异莰醇(2-MB)、土臭素(Geosmin)等藻类次生物(Yagi *et al*, 1985; Watson, 2003; Juttner *et al*, 2007)。但是,这次突发事件中产生的嗅味显然与 2-MB 及土臭素产生的嗅味明显不同,是一种恶臭味,而且,沾上后很难洗脱。但是,到底是什么物质导致了此次无锡市的供水危机一直没有一个明确的说法。因此,明确主要的致嗅物质,对于今后采取有力的措施防止类似事件的再次发生,以及有针对性地研究嗅味去除技术具有重要的意义。

目前,国内对于嗅味的测定仍以嗅阈值和嗅味描述法为主,无法为识别主要致嗅物质提供判断依据,而常规的仪器分析法只能对已经确定的致嗅物质进行定量。近年来国际上出现的嗅味层次分析法(Flavor Profile Analysis, FPA)引入了对水中不同异味进行分类的功能,结合感官气相色谱法(Sensory Gas Chromatography, SGC),可以较好地解决嗅味物质的鉴定问题(Khiari *et al*, 1992; Young *et al*, 1997)。

本研究将 FPA 与 SGC 有机结合起来对嗅味事件期间污染水团、取水口原水和管网自来水中的主要异味及致嗅物质进行了鉴定,并利用 GC/MS 对各种主要致嗅物质进行了定量。同时,从水源水质安全评价的角度,利用 LC-MS 对原水中微囊藻毒素的含量进行了分析,利用 umu 测试对原水的生物遗传毒性进行了评价。

2 实验材料和方法 (Materials and methods)

共采集 3 个典型水样进行嗅味分析,包括污染水团(6月 4 日采集)、贡湖(沙渚)原水(6月 4 日采集)及管网末梢自来水(6月 2 日采集)。其中,污染水团样品通过小船接近水团后采集,原水采自取水口附近,管网水样采自无锡市崇安区中山路的某宾馆,为置换前的滞留水样。

同时,对污染水团(6月 4 日采集)以及沙渚原水(6月 4 日、6月 8 日采集)水样进行微囊藻毒素分析和 umu 生物遗传毒性测试。

2.1 嗅味

2.1.1 仪器和试剂 HP6890/5975 气相色谱/质谱联用仪(惠普公司,美国),后接嗅味闻测装置(Gerstel 公司,德国);同时蒸馏萃取(SDE)装置:为自制萃取装置,由冷凝管、萃取装置、3 L 及 100 mL 圆底烧瓶、电加热套组合而成;旋转蒸发仪(R 系列,上海申生);氮吹仪(SE812 型,北京康林);恒温水浴锅(DSY-2-4

型,北京爱琦霞);HZQ-F 型全温振荡培养箱(哈尔滨东联电子);BD-RAD 550 酶标仪;96 孔酶标板;OASIS HLB 固相萃取柱(500mg, Waters, 美国);玻璃纤维滤纸(GF/A, Whatman 公司)。

NaCl 无水 Na_2SO_4 (北京化学试剂公司, 优级纯),使用前 450 ℃ 烘 2 h;二氯甲烷、正己烷(农残级, Fisher, 美国);4-nitroquinoline-1-oxide (4-NQO) (sigma, 美国);二甲基亚砜(AMRESCO);*o*-nitrophenol- β -D-galactopyranoside (ONPG) (东京化成);十二烷基磺酸钠(SDS);Luria-Bertani (LB) broth (DIFCO, 美国);Tryptone (OXDD);二氯甲烷、甲醇、丙酮(色谱级, Fisher, 美国)。

嗅味标准样品:苯甲醛,二甲基三硫,癸醛,1-辛烯-3-醇,苯乙醛,双(二氯异丙基)醚,异佛尔酮,薄荷醇,紫罗兰酮,2-甲基异莰醇,土臭素(Sigma-Aldrich, 美国)。

2.1.2 嗅味分析感官分析按照嗅味层次分析法(FPA)进行(于建伟等, 2007; Rashash *et al*, 1997),判断主要的嗅味种类和强度。

主要致嗅物质及相应异味的确认采用同时蒸馏萃取(SDE)结合 SGC 法进行(于建伟, 2007),从嗅觉测试口闻测到异味后进行标记,利用得到的嗅味图与色谱图的对照初步确定不同嗅味及致嗅物质,通过标样作进一步的确认。根据目标物质的保留时间和碎片离子及其丰度进行定性分析,定量分析利用 GC-MS 在选择离子模式(SM)下进行。

GC-MS 分析条件,色谱柱:HP-5 ms (30 m \times 0.25 mm \times 0.25 μm);电子能量:70 eV;电子倍增电压:824 V;柱头压:50 kPa;进样口温度:240 ℃;程序升温过程:起始温度为 40 ℃,以 8 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升至 240 ℃,保持 5 min,总的升温程序为 32 min。

2.2 藻类及藻毒素

藻类种类通过电动显微镜(ZEISS Axioskop 2 Mot Plus, 德国)进行镜检确认。

水样中的微囊藻毒素(MC-RR、MC-YR、MC-LR)含量采用固相萃取在现场浓缩后带回实验室利用 HPLC-MS 进行测定(张昱等, 2005),将 2 L 水样用固相萃取柱富集后经甲醇洗脱定容至 1 mL。

2.3 生物遗传毒性

利用 umu 测试对水样的生物遗传毒性进行评价(Whong *et al*, 1986; ISO 13829, 2000; 顾炜等, 2006)。

采用固相萃取进行前处理,2 L 水样用玻璃纤

维滤纸过滤后,过 HLB 柱固相萃取,其中 HLB 柱首先用 6 mL 甲醇、6 mL 超纯水活化.氮气吹干固相萃取柱后用 8 mL 丙酮洗脱,洗脱液氮气吹干后用 DMSO 定容至 200 μ L.

unu测试参照 ISO 13829-2000,用式 (1)计算半乳糖苷酶诱导活性 (U).

$$U = 1000 \times (A_{415} - 1.75 \times A_{570}) / (t \cdot v \cdot A_{595}) \quad (1)$$

式中, t 为加入 ONPG 后的反应时间 (本例中为 20 min); v 为反应菌液在显色过程中的稀释倍率 (取 0.09); A_{595} 、 A_{415} 、 A_{570} 为吸光度值.

通过计算 U 值得到样品的诱导比率 R 值: $R = U_{\text{样品值}} / U_{\text{对照值}}$. 当 R 值大于或等于 2 时结果为阳性,反之为阴性.

3 结果 (Results)

3.1 致嗅物质判断与定量

3.1.1 臭味的定性判断 对采集得到的污染水团、贡湖 (沙渚) 原水及管网末梢自来水,首先利用 FPA 法对水样的异味种类和强度进行了感官判断,结果表明,3 个水样中均存在强烈的腥臭味 (藻臭味) / 沼泽味,2 MB 和 Geosmin 不是主要的致嗅物质. 污染水团和原水的异味强度为 10,自来水异味强度为 9,异味强度已达到令人无法接受的程度.

利用 SDE-SGC 对 3 个水样分别进行了嗅味种类及致嗅物质的确认,得到的嗅味图及色谱图见图 1~图 3.

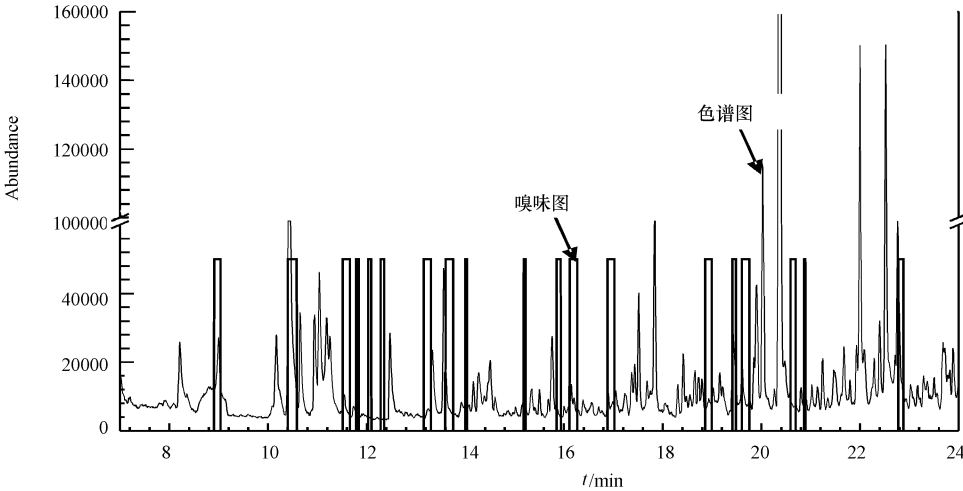


图 1 污染水团 SDE-SGC 分析结果 (6月 4 日水样)

Fig 1 SDE-SGC analysis result of sample from black water agglomeration (sampled on 4 June)

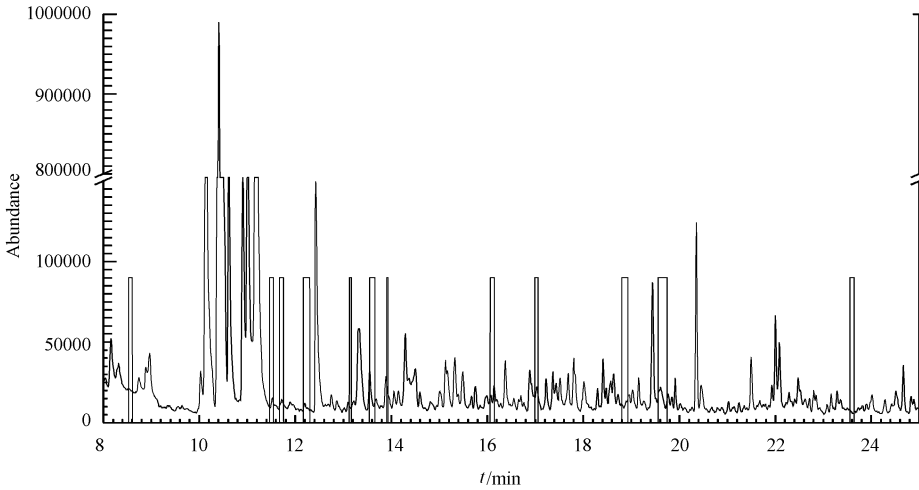


图 2 沙渚原水 SDE-SGC 分析结果 (6月 4 日水样)

Fig 2 SDE-SGC analysis result of sample from Shazhu intake (sampled on 4 June)

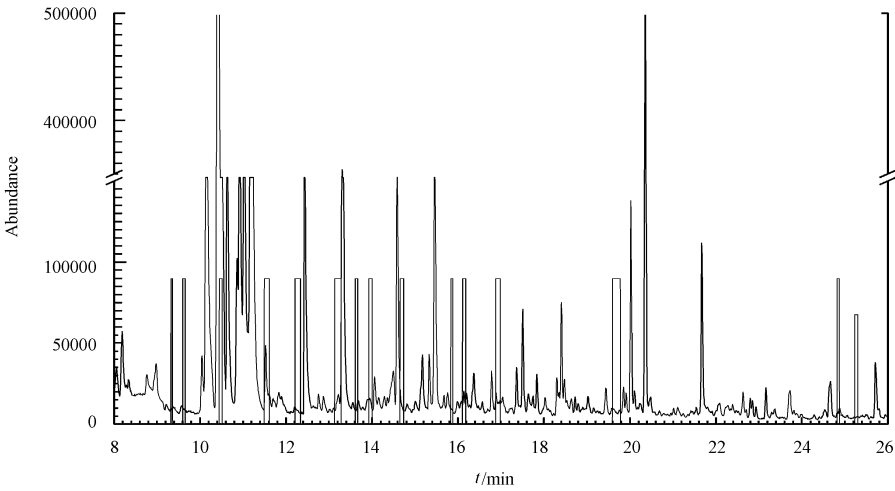


图 3 管网终端自来水 SDE-SGC分析结果 (6月 2日水样)
Fig 3 SDE-SGC analysis result of sample from pipeline (sampled on 2 June)

由图 1~图 3可以看出,利用 SGC进行分析时,无论是污染水团、原水还是自来水,均闻测到多种异味,但相对来说原水中出现的异味种类要少一些.这与 6月 4日采样时,污染水团已经离开取水口,导致原水水质出现好转有关,而自来水采自置换前滞留在管网中的某宾馆,所以臭味种类仍然比较多.

根据 SGC分析结果,可以初步判断臭味事件期间原水及自来水中主要包括以下几类致嗅物质:大量的二甲基硫类化合物,包括二甲基硫、二甲基二硫、二甲基三硫、二甲基四硫,其中以二甲基三硫为主.这类物质主要是有机体腐败的产物,具有很

强的沼泽味或鱼腥味,在 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 含量水平下即能够产生很强的腥臭味;包括 1-辛烯-3-醇和 2,4-庚二烯醛、2,4-癸二烯醛等多种不饱和烯醛类物质,以及 环柠檬醛、雪松醇等在内的典型藻类代谢产物,能够产生鱼腥味以及草臭味等多种异味;典型的藻类代谢产物土霉味类物质 2-MB. 综合 FPA 和 SGC分析结果,可以判断此次异臭事件的主要致嗅物质应该是以二甲基三硫为主的硫醚化合物.同时,水中还有典型土霉味类物质 MB、具有青草味或木头味的 β -cyclocitral 等其它嗅味物质,但均被硫醚化合物的腥臭味掩盖.主要致嗅物质质谱图参见图 4.

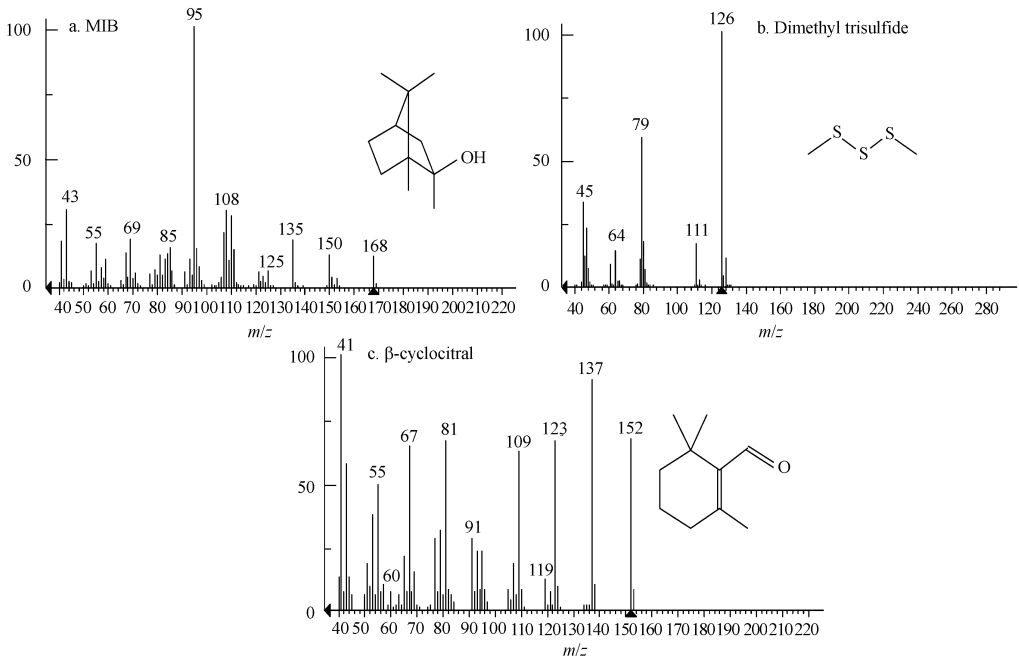


图 4 主要致嗅物质质谱图
Fig 4 Mass chromatograms of main odor compounds

3.1.2 致嗅物质定量分析 对污染水团、贡湖原水以及自来水中的主要致嗅物质,利用 SDE-GC-MS 方法进行了定量分析,结果见表 1。

表 1 主要异味物质定量分析结果
Table 1 Quantitative results of main odor compounds detected from source and finished water

物质名称		含量/(ng·L ⁻¹)			嗅味类别	嗅阈值/ (μg·L ⁻¹)
		污染水团 (06-04)	沙渚原水 (06-04)	自来水 (06-02)		
苯甲醛	Benzaldehyde	172	196	1438	香味	-
二甲基三硫	Dimethyl trisulfide	11399	1768	431	腥臭味	0.01
1-辛烯-3-醇	1-Octen-3-ol	40.3	60.1	53.0	烂草味	-
苯乙醛	Benzeneacetaldehyde	238	110	58.3	花香味	-
双(二氯异丙基)醚	Bis(2-chloroisopropyl) ether	2.4	3.2	2.6	农药味	-
异佛尔酮	Iforone	642	120	158	薄荷味	-
薄荷醇	Menthol	69.4	68.1	13.6	烟草味,药味	-
2-甲基异莰醇	MB	112	57.1	17.6	霉味	0.009
环柠檬醛	-cyclocitral*	-	-	-	草味,藻味	0.5
癸醛	Decanal	579	228	261	果味,柑桔味	-
土臭素	Geosmin	6.6	3.4	4.8	土味	0.004
紫罗兰酮	Ibnone	4054	358	n.a	花香味,草味	0.007

注: *未定量

二甲基三硫在污染水团、沙渚原水及自来水中的浓度分别达到 11400、1769和 430 ng·L⁻¹,在这 3 种水样中均为主要致嗅物,说明该物质可能是此次嗅味事件中的主要原因物质。6月 4日采集沙渚原水时,污染水团已经远离,原水水质处于明显好转状态,但是二甲基三硫浓度仍达 1769 ng·L⁻¹。而 6月 2日的自来水样,为未经置换的管网水,二甲基三硫浓度远高于嗅阈浓度。

MB在污染水团、原水和自来水中的浓度分别达到 112 ng·L⁻¹、57 ng·L⁻¹和 17 ng·L⁻¹,均明显高于其嗅阈值(10 ng·L⁻¹左右)。但是,FPA 分析中没有发现土霉味,说明 MB 不是主要的致嗅物质。但是,随着硫醚类物质的消失,作为藻类代谢物的 MB 导致的土霉味会成为主导嗅味。

由于缺乏标样,无法对另一类藻类次生产物——环柠檬醛进行定量。文献研究表明,环柠檬醛在不同的浓度条件下有 3 种不同的嗅味描述,由低到高其嗅味类型分别为青草味、干草(木头味)及烟草味(Yang *et al*, 1999),主要由蓝藻中的微囊藻所产生,通常在较浅的富营养化湖泊、发生微囊藻藻华时存在较高浓度,具有较强的草味等嗅味(Juttner *et al*, 1984; Yang *et al*, 1999)。但 FPA 分析并没有发现环柠檬醛特征的草味,表明其也不是主要致嗅物质。

3.1.3 致嗅物质来源 二甲基三硫等硫醚类物质

在污染水体中广泛存在,Wajon 等(1988)以及 Khiari等(1997)等就曾报道过澳大利亚原水中的沼泽味(或腥臭味)与二甲基三硫的存在有关系,然而他们报道的浓度仅在 5~250 ng·L⁻¹范围内,而许多细菌可将含硫的蛋氨酸以及半胱氨酸分解代谢产生二甲基三硫,另外青草以及藻类等生物体蛋白质在缺氧腐败过程中也能够产生此类物质。此次从污染水团中测出浓度高达 11400 ng·L⁻¹的二甲基三硫,表明污染水团此前曾经历过高浓度有机体腐败的过程。但是,目前的数据无法确认腐败有机体是来自藻体还是其它有机体。

另外,MB 是许多藻类的代谢产物,一般富营养化湖泊或多或少都含有物质,因而对于太湖水源来说,可能是一个长期存在的问题。

3.2 藻类及藻毒素

鉴于太湖自 4月下旬就出现了蓝藻水华暴发现象,对 6月 4日污染水团及原水水样藻类进行镜检,结果见图 5。

由图 5可见,发现微囊藻占优势(95%以上),同时有少量的颤藻、针杆藻、小球藻以及直链藻等。这与太湖流域常年的藻类监测结果一致。微囊藻以及颤藻等一些藻种在一定的环境条件下可以分泌产生 -Cyclocitral、二甲基三硫醚、MB 以及 Geosmin 等嗅味物质,有些还能够产生毒性很强的微囊藻毒素(MCs)(Dittmann *et al*, 2006; Watanabe *et al*,

1988; Zurawell *et al* , 2005).

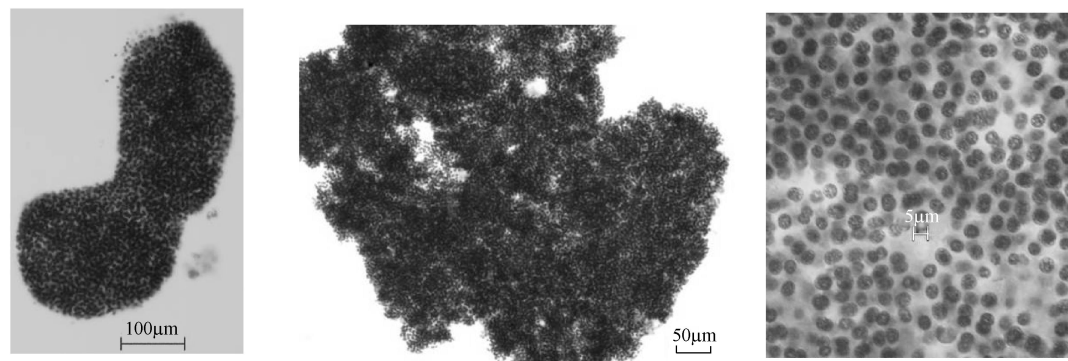


图 5 藻类镜检结果

Fig 5 Microscope analysis of algae

对 6 月 8 日沙渚原水中藻毒素的含量进行了分析,结果发现,原水中 MC-LR、MC-RR 和 MC-YR 的含量分别为: 64 ng·L⁻¹、72 ng·L⁻¹和未检出.我国新颁布的生活饮用水卫生规范规定 MC-LR 的限值为 1000 ng·L⁻¹ (与国际标准一致),水源中 MC-LR 的含量远低于这一标准.但是,今后应该加强对蓝藻暴发时藻毒素的长期监测.

3.3 原水毒理学检测

对污染水团 (6 月 4 日)、贡湖沙渚原水 (6 月 4 日、6 月 8 日)样品进行了 umu 测试,实验结果见表 2

表 2 Umu测定结果		
Table 2 Umu analysis result		
样品	U 值	R 值
污染水团 (6 月 4 日)	200.7 ±20.7	1.16 ±0.12
沙渚原水 (6 月 4 日)	197.1 ±0.5	1.14 ±0.01
沙渚原水 (6 月 8 日)	189.3 ±19.6	1.10 ±0.11

结果发现,3 个水样 umu 测试结果 R 值均小于 2,表明原水没有明显的致突变效应.因而可以初步推断,当时情况下原水中并没有特殊的外来污染物进入,不存在过高的健康风险问题.

4 结论 (Conclusions)

1) 利用 FPA 和 SGC 相结合的方法,成功地对这次无锡饮用水臭味事件的主要致嗅物质进行了识别,发现主要致嗅物是以二甲基三硫为主的硫醚化合物,可能是大量有机体的厌氧腐败造成的.但是,原水中同时存在藻类分泌物 MB,当硫醚类物质问题解决后,由 MB 形成的臭味问题也值得关注.

2) 藻毒素分析、umu 测试等结果表明,当时条

件下原水中藻毒素含量远低于国家标准,外来化学品导致的遗传毒性水平也很低.

3) 鉴于太湖总体上为富营养化水体,随时有暴发蓝藻水华的可能性,建议建立定期监测嗅味物质和藻毒素的制度,以确保饮用水的安全.

责任作者简介:杨敏 (1964—),男,工学博士,研究员,博士生导师,国家杰出青年科学基金获得者,主要从事环境微生物和饮用水安全保障技术研究. Email: yangnin@rcees.ac.cn

References:

Dittmann E, Wiegand C. 2006. Cyanobacterial toxins—occurrence, biosynthesis and impact on human affairs [J]. *Mol Nutr Food Res*, (50): 7—17

Gu Weimin, Hu J Y, Wang W, *et al* 2005. Improvement of Concentration Method for Detecting Genotoxic Activities of Drinking Water Using umuC-Test [J]. *Journal of Environmental Science*, 26 (3): 122—125 (in Chinese)

Juttner F. 1984. Dynamics of the Volatile organic substances associated with cyanobacteria and algae in a eutrophic shallow lake [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 47 (4): 814—820

Juttner F, Watson S B. 2007. Biochemical and ecological control of geosmin and 2-methylisoborneol in Source waters [J]. *Appl Environ Microbiol*, 73 (14): 4395—4406

Khiari D, Barrett S E, Suffet I H. 1997. Sensory GC analysis of decaying vegetation and septic odors [J]. *AWWA*, 89 (4): 150—161

Khiari D, Brenner L, Burlingame G A, *et al* 1992. Sensory gas-chromatography for evaluation of taste and odor events in drinking-water [J]. *Wat Sci Technol*, 25 (2): 97—104

Rashash D M C, Dietrich A M, Hoehn R C. 1997. FPA of selected odorous compounds [J]. *J AWWA*, 89 (2): 131—140

Song L R, Li L, Chen W *et al* 2004. Research progress on the off-

- flavours and secondary metabolites of algae in the aquatic environment [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 28(4): 434—439 (in Chinese)
- Suffet I H, Corado A, Chou D, *et al* 1996. AWWA taste and odor survey [J]. *J Am Water Works Assoc*, 88(4): 168—180
- Suffet I H, Mallevialle J, Kawczynski E 1995. Advances in taste and odor treatment and control [M]. Denver: AWWA Research Foundation, 5—10
- Wajon J E, Kavanagh B V, Kagi R I, *et al* 1988. Controlling swampy odors in drinking water [J]. *Journal AWWA*, 80(6): 77—83
- Watanabe M F, Oishi S, Harda K, *et al* 1988. Toxins contained in *Microcystis* species of cyanobacteria (blue-green algae) [J]. *Toxicon*, 26: 1017—1025
- Watson S B. 2003. Cyanobacterial and eukaryotic algal odour compounds: signals or by-products? A review of their biological activity [J]. *Phycologia*, 42: 332—350
- Whong W Z, Wen Y F, Stewart J, *et al* 1986. Validation of the SOS/umu-test with mutagenic complex mixtures [J]. *Mutation Res*, 175: 139—144
- Wittekindt E, Fischer B, Hansen P D. 2000. ISO/DIS 13829, Genotoxicity assay: umu-test [S]. Beuth Verlag GmbH, Berlin
- Yagi M, Kajino M, Matsuo U, *et al* 1985. Odor problems in Lake Biwa [J]. *Water Sci Technol*, 15(6/7): 311—321
- Young C C, Suffet I H, Crozes G, *et al* 1999. Identification of a woody-hay odor-causing compound in a drinking water supply [J]. *Wat Sci Technol*, 40(6): 273—278
- Yu J W, Guo Z H, Yang M, *et al* 2007. Use of flavor profile analysis for identification of taste and odor in drinking water [J]. *China Water & Wastewater*, 23(8): 79—83 (in Chinese)
- Yu J W. 2007. Study on the identification and activated carbon adsorption of flavor causing compounds in drinking water [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences (in Chinese)
- Zhang Y, Yang M, Li Z L, *et al* 2005. Liquid chromatography/electrospray ionization mass spectrometry process for determination of microcystins in water [J]. *China Water & Wastewater*, 21(4): 94—96 (in Chinese)
- Zurawell R W, Chen H R, Burke J M, *et al* 2005. Hepatotoxic cyanobacteria: a review of the biological importance of microcystins in freshwater environments [J]. *Journal of Toxicology and Environmental Health-Part B-Critical Reviews*, 8: 1—37

中文参考文献:

- 顾炜, 胡建英, 王伟, 等. 2005. 用 umuC测试水中遗传毒性效应的样品前处理方法 [J]. *环境科学*, 26(3): 122—125
- 宋立荣, 李林, 陈伟, 等. 2004. 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*, 28(4): 434—439
- 于建伟, 郭召海, 杨敏, 等. 2007. 嗅味层次分析法对饮用水中嗅味的识别 [J]. *中国给水排水*, 23(8): 79—83
- 于建伟. 2007. 饮用水中嗅味物质的识别和活性炭吸附研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院
- 张昱, 杨敏, 李宗来, 等. 2005. 液相色谱—电离质谱法测定微囊藻毒素 [J]. *中国给水排水*, 21(4): 94—96