

西北某水厂原水中土臭素和二甲基异莰醇 年变化特征与来源分析

王文东^{1,2}, 刘国旗¹, 范银萍¹, 张 轲¹

(1. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 浙江清华长三角研究院 生态环境研究所, 浙江 嘉兴 314006)

摘要: 为了探究西北某水厂致嗅物质的来源及其变化规律, 解决其饮用水嗅味问题, 选取我国西北某城市 A 水厂第二系列各工艺出水, 以土臭素(Geosmin, GSM)和二甲基异莰醇(MIB)两种致嗅物质为研究对象, 运用顶空-固相微萃取-气相色谱法(HS-SPME-GC)进行检测。结果表明: 一年中 A 水厂原水 GSM 和 MIB 在 4—5 月和 11—12 月两个时段浓度均明显升高, 最高浓度达到其嗅阈值的 40~50 倍。其他时段 GSM 均处于 10 ng/L 以下, MIB 则在 10~50 ng/L 之间。通过比较两种嗅味物质浓度变化得出: MIB 为 A 水厂水源的主要致嗅物质; 原水的水温和浊度对两种嗅味物质浓度变化影响具有协同作用; 水厂净水工艺对 GSM 和 MIB 无明显的去除效果。利用 BG11 液体培养基对原水中的藻类进行培养后, 发现优势藻种为浮丝藻, 属于蓝藻门; GSM、MIB 浓度从最初的 10 ng/L 以下分别升高到 28 ng/L 和 1 317 ng/L。

关键词: 土臭素; 二甲基异莰醇; 固相微萃取; 蓝藻

中图分类号: X524

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2017)04-0548-07

Seasonal variation characteristic and source analysis of GSM and MIB in raw water in a water plant of northwest China

WANG Wendong^{1,2}, LIU Guoqi¹, FAN Yinping¹, ZHANG Ke¹

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Department of Environmental Technology and Ecology, Yangtze Delta Region Institute of
Tsinghua Univ., Jiaxing 314006, China)

Abstract: In order to explore the sources and variations of odor substances in a water plant of Northwest China, and to solve the odor problem of drinking water, a water plant in a city of Northwest China was selected as monitor object, using the method of headspace-solid phase microextraction-gas chromatography to do the detection. As a result, the concentration of GSM and MIB in raw water of the water plant significantly increased between in the April and May and also between November and December in a same year. The highest concentrations of both materials are 40~50 times when they are mentioned to each corresponding threshold odor number. At other stages, the concentration of GSM is under 10 ng/L, while MIB is in 10~50 ng/L. Through comparison of these two odor materials, MIB becomes the main odor substance in raw water of the water plant. The water temperature and turbidity have a synergistic effect to the concentration of GSM and MIB. The traditional water treatment process is no use for T & O compounds removal. At the same time, BG11 liquid medium was used to cultivate algae in the raw water in June 25, and analysis on the change of algae and the concentrations of GSM and MIB were carried out. Results showed that dominant algae becomes phormidium tenue, an algae that belongs to cyanobacteria. The concentration of GSM and MIB increases from under 10 ng/L rise to 28 ng/L and 1 317 ng/L respectively.

Key words: GSM; MIB; SPME; cyanobacteria

我国饮用水嗅味问题长期存在^[1]。土臭素(Geosmin, GSM)和二甲基异莰醇(2-methylisoborneol, MIB)是天然水体中两种最常见的致嗅物质^[2-3], 两者的嗅阈值很低, 均为 10 ng/L。常伴

随浮游藻类, 尤其是蓝藻的生长而产生: 在藻细胞生长旺盛期, 细胞内嗅味物质浓度不断增加, 在藻细胞生长衰亡期, 积累在细胞内的嗅味物质随着细胞的裂解而释放到水体中; 藻类的胞外分

收稿日期: 2016-03-16

修改稿日期: 2017-07-15

基金项目: 陕西青年科技新星计划(2014KJXX-66); 教育部博士点基金(20106120120014); 陕西省重大科技成果转化引导专项(2016KTCG01-17)

第一作者: 王文东(1980—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为水处理理论与技术。E-mail: wdwang_xauat@hotmail.com

泌物分解是产生臭味物质的另一个潜在来源^[4,5]. 同时水体中存在的放线菌和真菌也能够产生 GSM 和 MIB 等臭味物质^[6-9]. 目前关于水体臭味物质的检测多集中在水系发达、人口密集的南方城市^[10-11], 对于西北地区, 尤其是以远离城市的深水湖库为原水的水厂中臭味物质的变化规律少有研究. 现有研究主要侧重臭味物质浓度本身的变化规律^[12], 而对能够引起臭味浓度变化的影响因素关注较少.

A 水厂是市区饮水工程的重要组成部分, 水处理能力达 60 万 m³/d. 原水取自秦岭北麓的 B 水库. 经引水暗渠自流进入水厂. 原水预加氯后经聚合氯化铝铁^[13-14]混凝处理, 再经沉淀和消毒工艺处理后向市区供水. 然而, 在处理出水中存在间歇性臭味物质超标的问题, 且关于本地区湖泊水体中臭味物质含量的调查较少. 拟通过本项目研究探明水中臭味物质的来源和变化特征, 同时分析臭味物质浓度变化与水体水质指标之间的关系, 以

期为同类水厂的运行管理提供参考, 保障该地区的饮用水安全.

1 实验材料与方法

1.1 实验仪器与试剂

固相微萃取装置(SUPELCO, 美国); SPME 萃取头(DVB/CAR on PDMS), (No. 57328-U, SUPELCO, 美国); 分析天平(JA2003, 上海恒平科学仪器有限公司); 磁力加热搅拌器(85-2 型, 上海浦东物理光学仪器厂); GC-2014 气相色谱仪(岛津公司, 日本); 荧光显微镜(尼康 90i, 日本); AUTO M10 藻类分析仪(Cellometer, 美国); 马弗炉(TM93703, 北京美诚科学仪器有限公司); 氯化钠(分析纯, 天津天力化学试剂有限公司); 超纯水(Millipore, 18.2 MΩ·cm); 甲醇(色谱纯, Fisher, 美国); 100 mg/L GSM/MIB 色谱纯混合标准液(98%, 美国 Sigma-Aldrich 公司). 两种臭味物质的物化性质如表 1 所示.

表 1 GSM 和 MIB 物理化学性质^[15]

Tab. 1 The chemical and physical properties of GSM and MIB

名称	分子式	相对分子质量/g·mol ⁻¹	蒸汽压/atm	25℃溶解度/mg·L ⁻¹	沸点/℃
GSM	C ₁₂ H ₂₂ O	103	5.49×10 ⁻⁵	150.2	165
MIB	C ₁₁ H ₂₀ O	908	6.68×10 ⁻⁵	194.5	197

1.2 实验方法

1.2.1 臭味物质分析方法

顶空-固相微萃取步骤: 将 2 mL 待测水样放入 4 mL 萃取瓶(Supelco 公司)中, 加入 0.48 g NaCl(分析纯, 105℃下烘干 2 h), 加入微小磁力搅拌子, 拧紧瓶盖后固定于磁力加热搅拌器上进行水浴加热, 在 65℃下利用固相微萃取装置, 萃取 30 min, 然后迅速进行 GC 分析, 为解吸充分并且不影响后续萃取效果, 解吸附时间为 5 min.

气相色谱分析条件: 载气(高纯 N₂)流速 30 mL/min, 氢气 30 mL/min, 空气 40 mL/min; 进样口温度 250℃; FID 检测器温度 280℃; RTX-1 毛细管柱(30 m×0.25 mm×0.25 mm);

升温程序: 起始温度 60℃, 保持 0.5 min, 以 30℃/min 升温至 100℃, 再以 15℃/min 升温至 185℃, 再以 30℃/min 升温至 250℃, 保持 6 min, 总的升温程序为 15.67 min. 选取 MIB 和 GSM 两种致臭物质的混和标准液, 配制质量浓度在 5~1 000 ng/L 之间的一系列样品. 先用色谱纯甲醇分别稀释 GSM 和 MIB 的母液至某相同中间浓度、再用超纯水配制实验标准使用液, 然后用

HP-SPME-GC 法进行分析, 再以致臭物质的峰面积为纵坐标, 质量浓度为横坐标绘制标准曲线(图 1). 可以看出, 两者的标准曲线都具有良好的线性相关性, 相关系数均达到 0.99 以上. 按照 HJ168-2010 标准, 计算得出: GSM 检出限为 0.5 ng/L, MIB 检出限为 1.0 ng/L, 均低于《生活饮用水卫生标准》(GB5792-2006)规定的 10 ng/L 标准.

1.2.2 水厂臭味物质检测

从 2014 年 10 月—2015 年 9 月, 每半月取样一次, 在水厂西侧二系列进厂配水井处及后续各个水处理构筑物的出水处取水, 取样时采用 250 mL 聚乙烯瓶, 装满水样且不留气泡, 并尽快带回实验室进行 GSM 和 MIB 的处理分析. 否则保存于 4℃冰箱, 保存时间不超过 12 h. 同时用两种臭味物质的混合标准溶液配制一定浓度梯度的样品, 1 000 ng/L 的混合标准溶液分析结果如图 2 所示, MIB、GSM 的出峰时间分别为 6.077 min 和 8.132 min.

1.2.3 藻类培养及鉴定方法

实验室内, 首先称取配制 BG11 液体培养基所需的药品: 将一个 1 000 mL 的锥形瓶放入 10%稀

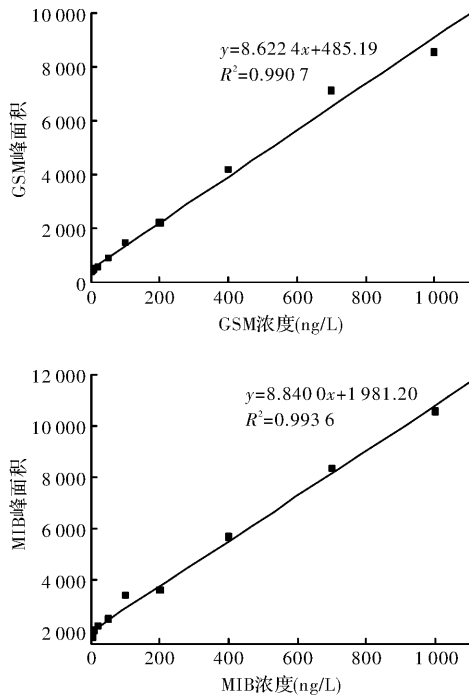
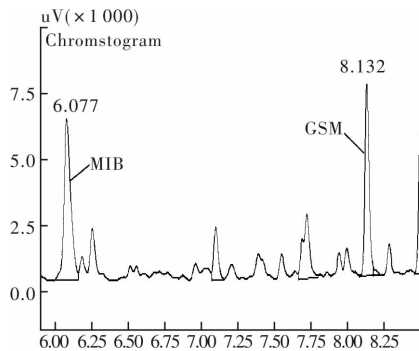


图1 两种致嗅物质的标准曲线

Fig. 1 The standard curves of two T & O compounds

图2 1000ng/L的GSM/MIB
混标气相色谱图Fig. 2 The gas chromatography figure of 1000ng/L GSM/
MIB blended standard

硝酸中浸泡 24 h, 再用超纯水清洗干净后, 最后放入马弗炉经 400 ℃, 30 min 烘干以去除有机杂质. 然后将 BG11 液体培养基以 1:1 的比例与水厂原水混合均匀, 然后放入恒温培养箱中培养, 一段时间后观察藻类数量及藻种的变化, 同时分析 GSM 和 MIB 的浓度. 然后采用 Cellmeter 藻类分析仪进行计数、分析藻类组成, 并用尼康 90i 荧光显微镜观测藻类形态, 然后对比中国常见淡水浮游藻类图谱^[16]确定藻属.

2 结果与分析

2.1 GSM 和 MIB 变化规律

2014 年 10 月—2015 年 9 月之间, 对 A 水厂原水中的 GSM 和 MIB 浓度进行检测分析, 结果表

明: 原水中 GSM 和 MIB 的浓度在 14 年 11—12 月和 15 年 4—5 月份两个时间段, 均明显升高, 但不同时段, 两种嗅味物质的变化程度不同. 以下具体分开阐述.

2.1.1 MIB 浓度变化规律

如图 3 所示, MIB 浓度在 14 年 11 月 18 号达到首个高峰值, 为 401.9 ng/L, 也是监测时间段内的最大浓度, 超过其嗅阈值(10 ng/L)40 余倍; 在 15 年 4 月 20 日, MIB 达到第二个高峰值, 为 106.8 ng/L. 其他时段, MIB 多在 10~50 ng/L 之间, 比 GSM 浓度略高, 并且高于自身嗅阈值.

2.1.2 GSM 浓度变化规律

GSM 浓度在 14 年 12 月 4 日达到首个高峰值, 为 90.3 ng/L; 在 15 年 5 月 25 日达到第二个高峰值, 也是监测时间段内的最大浓度, 为 484.7 ng/L, 超过其嗅阈值(10 ng/L)40 余倍. 监测时间的其他时段, GSM 基本处于其嗅阈值以下.

从两种嗅味物质的浓度变化量来看, 虽然 GSM 浓度在 14 年 12 月 4 日达到 90.3 ng/L, 但是 MIB 浓度在 10 月底和 11 月份的检测中均处于 100 ng/L 以上, 且出现 401.9 ng/L 的浓度峰值, 因此可确定 11—12 月之间, 水厂的主要嗅味物质为 MIB. 而在 15 年 4—5 月份, MIB 浓度在 4 月 20 日达到 106.8 ng/L, 5 月初下降到 63.4 ng/L. 5 月末到 6 月底, MIB 浓度均处于 3 ng/L 以下, 而 GSM 则在 5 月 25 日达到 484.7 ng/L 的浓度峰值, 因此在 5 月, 水厂主要嗅味物质为 GSM. 在监测时间内的其他时段, MIB 浓度普遍高于 GSM, 且高于自身嗅阈值, 为水厂水源的主要致嗅物质. 因此得出, 一年中除了 5 月的下半月外, MIB 均为 A 水厂原水中的主要致嗅物质.

从两种嗅味物质的浓度变化率来看, MIB 变化相对平稳, 在 11 月 18 日达到最大浓度之前的两周, MIB 已经处于 100 ng/L 以上, 而在达到最大浓度之后的一个月, MIB 浓度也要高出自身嗅阈值 5 倍左右. 从图 3 可以看出, GSM 的浓度变化相对 MIB 而言, 明显具有突然变化的规律, 15 年 5 月 25 日, GSM 浓度从的正常水平急剧升高后又迅速返回正常水平.

2.2 嗅味物质浓度变化影响因素分析

天然水体中, 嗅味物质的来源主要是藻类, 而藻类的生长和环境温度有很大关系; 自然水体中, 浊度的大小在一定程度上能反映出水体中污染物的多少, 如氮、磷的含量. 因此可以参照温度和浊度两种指标, 来分析嗅味物质的变化.

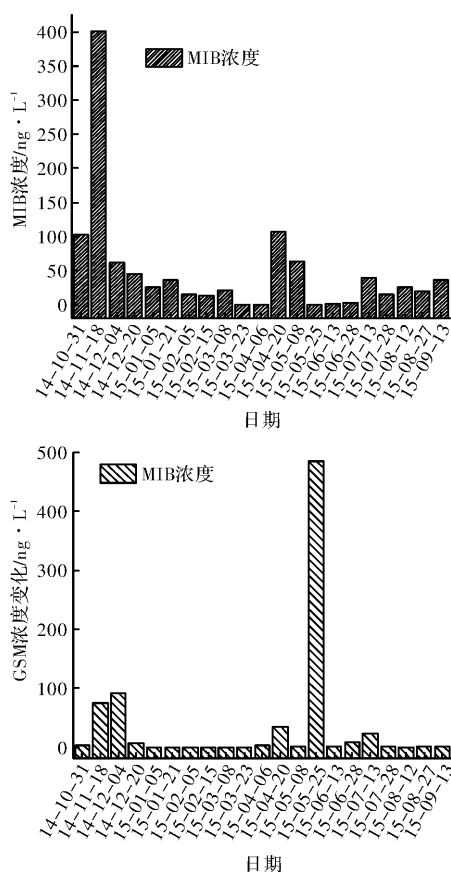


图3 两种致嗅物质浓度变化

Fig. 3 The concentration changes of two T & O compounds

2.2.1 嗅味物质浓度变化与温度的关系

监测时间段内,冬季水温很低,1—3月份水温都在 9°C 左右;夏季水温较高,6月份即达到 16°C 以上,监测时间内水温最大相差 10°C ,相邻两时间段的水温变化则趋势平缓.从图4可以看出两种嗅味物质浓度变化与温度的关系.

在致嗅物质浓度显著升高的两个时间段内,水体温度都在 $14\sim 16^{\circ}\text{C}$ 之间.具体而言,在14年11月18号,当MIB浓度达到峰值时,水温为 14.2°C ;在15年5月25号,当GSM浓度达到峰值时,水温为 15.6°C .其他时段,温度都不在 $14\sim 16^{\circ}\text{C}$ 之间,即使在水温较低的1—3月和温度高于 16°C 的6—9月时,GSM和MIB也均未出现浓度剧增的情况.

2.2.2 嗅味物质与浊度的关系

由图5可知,监测时间内,A水厂的进水浊度存在三个峰值,与此同时,GSM和MIB两种嗅味物质也均出现了突发性的浓度上升.然而,浊度与GSM和MIB的浓度变化并不同步,致嗅物质的峰值一般发生在浊度达到峰值后的回落期.在致嗅物质浓度激增的两个时段,MIB的浓度峰值和原水浊度峰值发生的时期间隔为15d左右(图5(a));

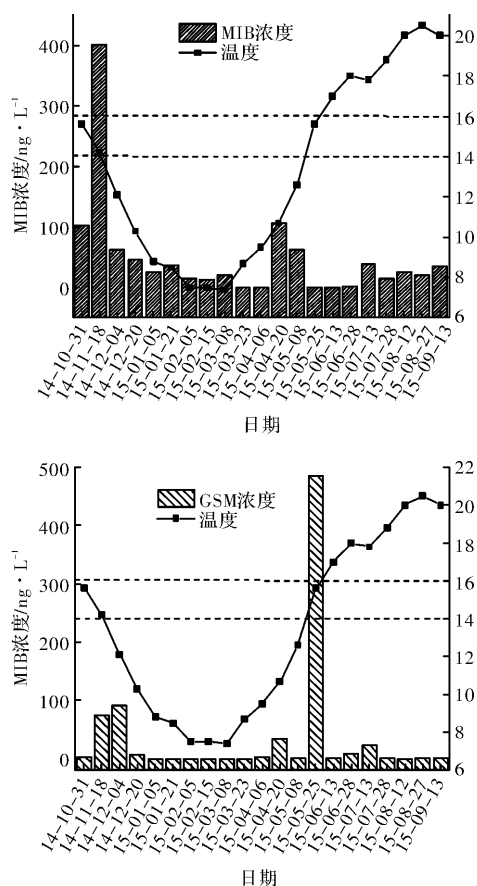


图4 水体温度变化对两种致嗅物质浓度的影响

Fig. 4 The influence of water temperature change on the concentration of two T & O compounds

GSM的浓度峰值均是在水体浊度从峰值下降到3NTU以下时出现,其与浊度峰值的时间间隔则更长(图5(b)).浊度的第三个峰值发生在7月中旬,此时的水温达到 18°C ,但是致嗅物质浓度并没有出现大幅度变化.说明嗅味物质的浓度的变化受到水温和浊度的协同影响.

除了原水的温度和浊度外,还对水厂原水中的pH值、氨氮、耗氧量等水质指标进行了检测.监测时段内,三个指标在整个监测时段内均变化不大,pH值基本维持在 $7.6\sim 8.0$ 之间,水质呈弱碱性.

原水中的氨氮含量在 $0.07\sim 0.14\text{ mg/L}$ 之间,耗氧量基本维持在 $2.48\sim 3.76\text{ mg/L}$ 之间.由于三种水质指标的变化较为恒定,因而它们与原水中GSM和MIB两种嗅味物质浓度变化的关联不大.

2.3 水厂净水工艺对GSM和MIB的去除效果

A水厂水处理工艺采用前加氯、混凝、沉淀、过滤、消毒的净水工艺.原水经过格栅后采用前加氯工艺,以聚合氯化铝铁作为混凝剂,V型滤池的填充滤料为普通均质石英砂滤料.图6为水厂采

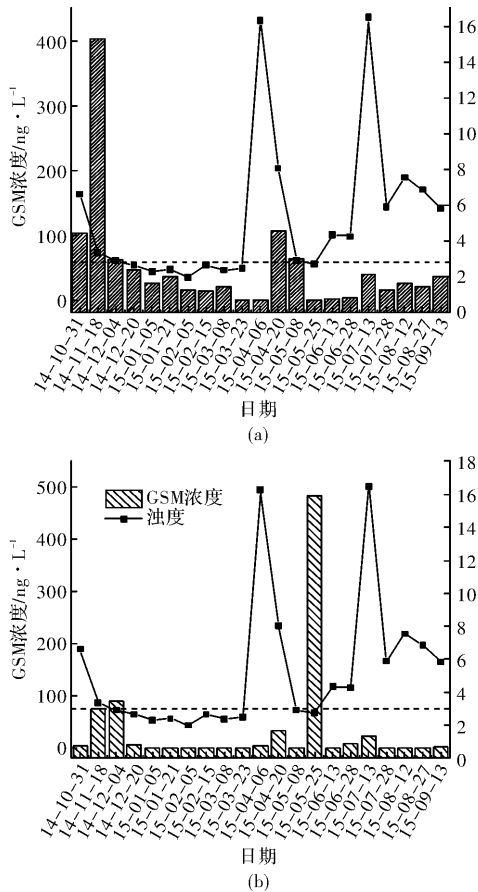


图 5 水体浊度变化对致嗅物质浓度影响

Fig. 5 The influence of water turbidity change on the concentration of T & O compounds

用的具体工艺流程。

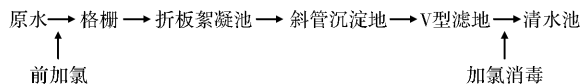


图 6 水厂工艺流程图

Fig. 6 The process flow diagram of the water plant, hmzghkhhvyto

选择嗅味物质偏高的 14 年 11 月 18 日 (MIB) 和 15 年 5 月 25 日 (GSM) 作为分析对象, 分析各个水处理工艺的除嗅效果, 如图 7 所示。

采用混凝、沉淀、过滤、消毒的传统水处理工艺对 GSM 和 MIB 两种嗅味物质基本无去除效果。

具体说来, GSM 的出厂水浓度反而比原水浓度还要高一些, 这可能是因为当天水体中藻类过多, 前加氯和后续工艺使藻细胞死亡、裂解, GSM 从藻细胞中释放出来造成的结果; MIB 的浓度在各净水工艺之间变化不大, 且出厂水浓度和原水浓度基本持平。

两种嗅味物质在水厂各个工艺的含量变化差异, 除了和各自的原水浓度有关外, 还可能与两物质的结构差异有关, GSM 分子结构相比 MIB 较

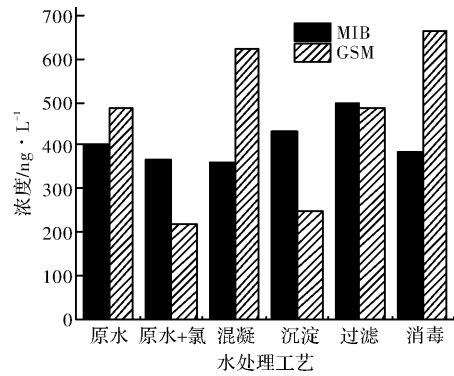


图 7 水厂水处理工艺去除 GSM/MIB 的效果

Fig. 7 The effects of water treatment processes to remove GSM and MIB

为扁平, 这样就较容易进入混凝阶段聚合氯化铝铁的矾花中, 并被包裹吸附, 最终沉淀下来, 因此在混凝和沉淀两工艺之间, GSM 浓度下降较大, 去除效果较明显。

而 GSM 在过滤后浓度升高的原因可能是藻细胞进一步裂解, 继续释放嗅味物质造成的。

2.4 嗅味物质来源分析

B 水库作为水厂的原水, 此类缓流水体中的微生物代谢是产生水体嗅味问题的重要原因^[17]。由于水库水体藻种类丰富, 且数量较少, 所以在实验室内选用 BG11 培养基进行培养。将原水与培养基混合均匀, 在振荡培养箱里放置 28 d 后, 用 Cellmeter 藻类计数仪计算藻类数量, 1 mL 溶液中活藻数为 2.07×10^5 , 总藻数为 5.21×10^5 。其中, 浮丝藻总数为 3.33×10^5 , 为优势藻种占到藻总数的 64%; 栅藻总数为 0.94×10^5 , 占总藻数的 18%; 针杆硅藻和钝脆杆藻数量相当, 总数均不足 0.3×10^5 个, 二者数量之和占总藻数的 11% 左右。有相关研究表明^[18], 浮丝藻属于蓝藻门, 能够产生 MIB 和 GSM 两种嗅味物质。28 d 后, 培养水体散发出强烈的土霉味, 水颜色呈现深棕色, 水中 MIB 和 GSM 的浓度从最初的 10 ng/L 以下分别升高到 1 317 ng/L 和 28 ng/L。图 8 为尼康 90i 荧光显微镜下藻类的形态(其中: 针杆硅藻、栅藻和钝脆杆藻均放大 400 倍, 浮丝藻放大 200 倍)。

3 结论

(1) 水厂原水 GSM 和 MIB 两种嗅味物质的浓度呈规律性变化: 一年中, MIB 浓度在 4 月中旬和 11 月中旬两个时段明显升高, GSM 浓度陡增发生在 5 月下旬和 12 月上旬, 且两种物质的最高浓度均达到其嗅阈值的 40 余倍; 其余时间, MIB 浓度一般略超过自身嗅阈值, GSM 浓度则普遍低于

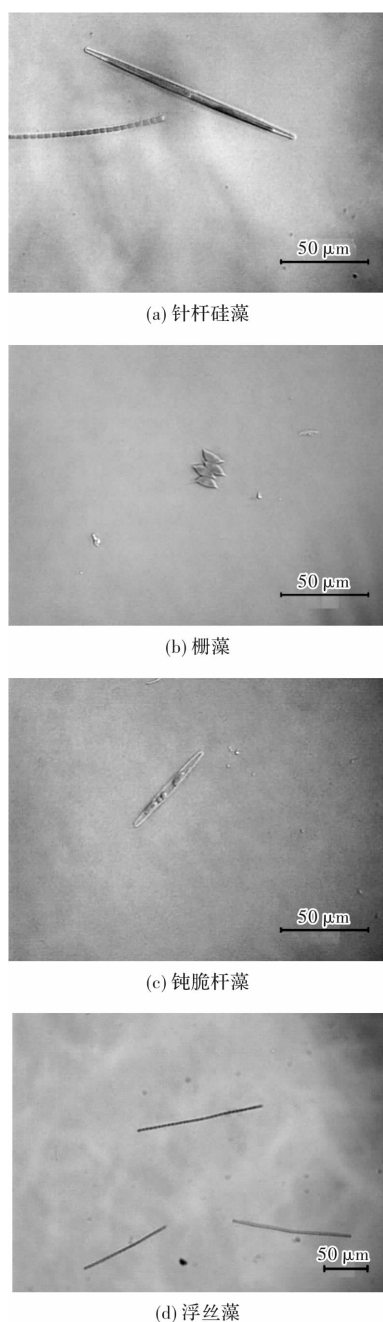


图8 藻类显微镜照片

Fig. 8 Microscope photos of typical odor producing algae

自身嗅阈值. 一年中除了 GSM 浓度陡增的 5 月下旬外, MIB 浓度均高于 GSM 浓度, 为水厂原水中的主要致嗅物质. 水厂传统处理工艺对 GSM 和 MIB 的去除效果不明显.

(2) 水厂原水臭味物质的浓度变化情况受到水体水温 and 浊度的协同影响. 当水体的温度在 14~16 °C 之间, 同时水体的浊度处于回落期时, 水厂的 GSM 和 MIB 两种臭味物质就可能会出现浓度陡增的情况. 在水厂生产过程中, 可以提前采取一定的措施, 如在水厂进水口处投加活性炭来防范臭味物质升高带来的自来水水质问题.

(3) 水厂水体中藻类众多, 通过 BG11 培养基

的筛选和实验室的验证, 水厂水体中能够产生臭味物质的藻类主要为蓝藻门的浮丝藻, 这也为致嗅物质的藻类来源提供了有力证明. 同时, 后续还应对原水藻类进行不同培养基的筛选, 进而确定出更多能够产生 GSM 和 MIB 的藻类.

参考文献 References

- [1] 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[J]. 环境科学研究,2013,26(1):16-21.
DENG Xuwei, TAO Min, ZHANG Lu, et al. Relationships between odors and algae and water quality in Dongting Lake[J]. Research of Environmental Sciences, 2013,26(1):16-21.
- [2] NEGORO T, ANDO M, ICHIKAWA N. Blue-green algae in Lake Biwa which produce earthy-musty odors[J]. Water Science & Technology, 1988,20(8/9):117-123.
- [3] LI Z L, HOBSON P, AN W, et al. Earthy odor compounds production and loss in three cyanobacterial cultures[J]. Water Research, 2012,46(16):5165-5173.
- [4] SUFFETL H. The drinking water taste and odor wheel for the millennium: beyond geosmin and 2-methylisoborneol[J]. Water Science and Technology, 1999,40(6):1-13.
- [5] 逯南南,贾瑞宝,孙韶华,等. 饮用水中藻源臭味物质的研究进展[J]. 给水排水,2012,38(S1):93-95.
LU Nannan, JIA Ruibao, SUN Shaohua, et al. The research progress of algae source material odor in drinking water[J]. Water & Wastewater Engineering, 2012,38(S1):93-95.
- [6] JONES G J, KORTH W. In situ production of volatile odor compounds by river and reservoir phytoplankton populations in Australia[J]. Water Science and Technology, 1995,31(11):145-151.
- [7] IZAGUIRRE G, TAYLOR W D. A pseudanabaena species from Castaic Lake, California, that produces 2-methylisoborneol[J]. Water Research, 1998,32(5):1673-1677.
- [8] IZAGUIRRE G. A copper-tolerant Phormidium species from Lake Mathews, California, that produces 2-methylisoborneol and geosmin[J]. Water Science and Technology, 1992,25(2):217-223.
- [9] PERSSON P E. Sensory properties and analysis of two muddy odour compounds, geosmin and 2-methylisoborneol, in water and fish[J]. Water Research, 1980,14(8):1113-1118.
- [10] 邵晨,黎雷,于水利,等. 产嗅藻类对东太湖某地原水中臭味物质 2-MIB 的贡献[J]. 中国环境科学,2014,34(9):2328-2333.
SHAO Chen, LI Lei, YU Shuili, et al. Contribution of algae on the occurrence of odor and taste compound 2-MIB in drinking water source of east tai lake[J].

- China Environmental Science, 2014, 34 (9): 2328-2333.
- [11] 李巧霞, 潘纲, 王丹, 等. 太湖十八湾嗅味物质变化规律及除臭方法[J]. 环境工程学报, 2012, 6 (9): 3191-3195.
- LI Qiaoxia, PAN Gang, WANG Dan, et al. Variations and removal methods of odor substances in Shiba Bay of Lake Taihu[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, 6(9): 3191-3195.
- [12] 马晓雁, 高乃云, 李青松, 等. 上海市饮用水中痕量土臭素和二甲基异冰片年变化规律及来源研究[J]. 环境科学, 2008, 29(4): 902-908.
- MA Xiaoyan, GAO Naiyun, LI Qingsong, et al. Source and fluctuation of trace geosmin and 2-MIB in drinking water of shanghai[J]. Environmental Science, 2008, 29(4): 902-908.
- [13] 李赞忠, 白凤荣, 刘进荣, 等. 复合型絮凝剂 PAFC 的合成与应用研究[J]. 工业水处理, 2010, 30 (12): 80-82.
- LI Zanzhong, BAI Fengrong, LIU Jinrong, et al. Synthesis and application of compound flocculant PAFC[J]. Industrial Water Treatment, 2010, 30(12), 80-82.
- [14] 邹有红, 李文兵, 周蓬蓬, 等. 聚合氯化铝铁去除微污染水体中藻类的研究[J]. 环境工程学报, 2009, 3(1): 108-112.
- ZOU Youhong, LI Wenbing, ZHOU Pengpeng, et al. Algae removal in micropollution water with flocculant of polyaluminum ferric chloride[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2009, 3(1): 108-112.
- [15] 庞雅丽. 高锰酸钾与粉末活性炭联用去除水中嗅味物质[D]. 北京: 北京工业大学, 2011.
- PANG Yali. Study on the use of potassium permanganate in combination with powder activated carbon for the removal of taste and odor in drinking water[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2011.
- [16] 翁建中, 徐恒省. 中国常见淡水浮游藻类图谱[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2010: 9-31.
- WENG Jianzhong, XU Hengxing. Chinese common freshwater planktonic algae atlas [M]. Shanghai: Shanghai science and technology press, 2010: 9-31.
- [17] 刘妍娟, 储昭升, 金相灿, 等. 螺旋鱼腥藻土臭素的产生和分布规律[J]. 中国环境科学, 2009, 29 (10): 1082-1085.
- LIU Yanyuan, CHU Zhaosheng, Jin Xiangcan, et al. Geosmin production and distribution of Anabaena sp [J]. China Environmental Science, 2009, 29 (10): 1082-1085.
- [18] 李勇, 张晓健, 陈超. 我国饮用水中嗅味物质及其研究进展[J]. 环境科学, 2009, 30(2): 583-588.
- LI Yong, ZHANG Xiaojian, CHEN Chao. Revive on the tastes and odors compounds in drinking water of China[J]. Environmental Science, 2009, 30 (2): 583-588.

(编辑 桂智刚)

(上接第 529 页)

- [5] 刘军民, 唐伊娟, 郑建栋. 传统聚落人居环境保护的现状、问题及对策研究: 以陕西省米脂窑洞古城为例[J]. 城市发展研究 2015, 22 (9): 12-15.
- LIU Junmin; TANG Yijuan; ZHENG Jiandong. Situation, question and solution on protection of vernacular settlements: cave dwelling in mizhi county as example [J]. Urban Development Studies, 2015, 22 (9): 12-15.
- [6] SALAT Serge. 关于可持续城市化的研究: 城市与形态[M]. 陆阳, 张艳, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- SALAT Serge. Cities and forms: on sustainable urbanism[M]. LU Yang, ZHANG Yan, translation. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [7] 陈延斌, 李永, 王厚军, 等. 基于分形理论的山东省城市体系非线性研究[J]. 资源开发与市场, 2008(10): 881-883.
- CHEN Yanbin, LI Yong, WANG Houjun, et al. Non-linear Study on Urban System in Shandong Province Based on Fractal Theory[J]. Resource Development & Market, 2008(10): 881-883.
- [8] 綦伟琦. 城市设计与自组织的契合[D]. 上海: 同济大学, 2006: 142.
- QI Weiqi. A new method: urban design compatible with self-organization [D]. Shanghai: Tongji University, 2006: 142.
- [9] 王中德, 赵万民. 对西南山地城市公共空间系统复杂性与复杂问题的解析[J]. 中国园林, 2011(8): 58-61.
- WANG Zhongde, ZHAO Wanmin. Analysis of the complexity and complex problems of the public space system in southwest mountainous cities [J]. Chinese Landscape Architecture, 2011(8): 58-61.
- [10] 赵珂, 冯月, 韩贵锋. 基于人地和谐分形的城乡建设用地面积测算[J]. 城市规划, 2011, 35(7): 20-23.
- ZHAO Ke, FENG Yue, HANG Guifeng. Calculating the area of urban-rural construction land based on the human-earth harmonious fractal relations [J]. City Planning Review, 2011, 35(7): 20-23.
- [11] 李云燕. 西南山地城市空间适灾理论与方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014: 45.
- LI Yunyan. Study on theories and methods of urban space adapt to disaster in southwest mountainous cities [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014: 45.

(编辑 桂智刚)