程 亚,吴永鹏,王军锋,等.供水管网环境下三种典型致嗅藻产嗅特性研究 [J]. 中国环境科学, 2026,46(1):161-167.
Cheng Y, Wu Y P, Wang J F, et al. Study on the odor production characteristics of three typical odor-producing algae under water supply network environment [J]. China Environmental Science, 2026,46(1):161-167.

# 供水管网环境下三种典型致嗅藻产嗅特性研究

程 亚[1],吴永鹏[1],王军锋[2],马彩云[1],文 刚[1],王峰林[2],黄廷林[1*] (1.西安建筑科技大学,西北资源环境与生态教育部重点实验室,陕西省环境工程重点实验室,陕西省水污染控制与水质安全保障协同创新中心,陕西 西安 710055；2.西安市自来水有限公司,陕西 西安 710055)

**摘要**：针对铜绿微囊藻、灰假鱼腥藻和颤藻 3 种典型致嗅藻,探究管网环境因子(水流剪切力、温度、黑暗/光照、管材)及连续流条件对其产嗅特性的影响.结果表明,水流剪切力显著促进灰假鱼腥藻(链状)和颤藻(丝状)的 2-MIB 释放,高剪切力下两者破损率超 90%,而铜绿微囊藻(球状)因结构耐受破损率低于 30%.温度对铜绿微囊藻产 β-cyclo 影响显著,30℃时浓度达 40ng/L,低温虽致细胞破裂但抑制代谢,嗅味浓度反较低.黑暗环境和管材对 3 者产嗅影响有限,仅轻微增加破损率(<5%)和嗅味浓度(<8ng/L).连续流实验显示,灰假鱼腥藻和颤藻在高流速下 2-MIB 释放更快(0.5h 达峰值)、浓度更高(最高 85ng/L),且嗅味物质达峰时间较序批式实验显著缩短.研究明确水流剪切力和温度为产嗅主控因子,可为管网嗅味控制提供科学依据.

**关键词**：管网；致嗅藻；二甲基异莰醇；土臭素；β-环柠檬醛
**中图分类号**：X172 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2026)01-0161-07

**The odor production characteristics of three typical odor-producing algae under water supply network environment.**

CHENG Ya[1], WU Yong-peng[1], WANG Jun-feng[2], MA Cai-yun[1], WEN Gang[1], WANG Feng-lin[2], HUANG Ting-lin[1*] (1.Key Laboratory of Northwest Resource, Environment and Ecology of Ministry of Education, Shaanxi Provincial Key Laboratory of Environmental Engineering, Collaborative Innovation Center of Shaanxi Province for Water Pollution Control and Water Quality Security, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China；2.Xi'an Water Supply Co., Ltd., Xi'an 710055, China). *China Environmental Science*, 2026,46(1)：161~167

**Abstract**：This study investigated the impacts of pipeline environmental factors (hydraulic shear force, temperature, darkness/light conditions, pipe materials) and continuous flow conditions on odor production characteristics of three typical odor-producing algae: Microcystis aeruginosa, *Pseudanabaena* galeata, and *Oscillatoria*. Key findings revealed that hydraulic shear force significantly promoted 2-MIB release in chain-forming Pseudanabaena galeata and filamentous Oscillatoria, with rupture rates exceeding 90% under high shear conditions. In contrast, spherical Microcystis aeruginosa exhibited structural tolerance with rupture rates below 30%. Temperature markedly influenced β-cyclocitral production in *Microcystis* aeruginosa, reaching 40ng/L at 30℃. Although low temperature induced cell rupture, it suppressed metabolic activity, resulting in lower odorant concentrations. Darkness and pipe materials showed limited effects, only slightly increasing rupture rates (<5%) and odorant concentrations (<8ng/L). Continuous flow experiments demonstrated accelerated 2-MIB release in Pseudanabaena galeata and Oscillatoria under high flow velocity, achieving peak concentrations (up to 85ng/L) within 0.5hours-significantly faster than batch experiments. The study identifies hydraulic shear force and temperature as primary control factors for odor production, providing scientific guidance for odor management in water distribution systems.

**Key words**：water distribution system；odorigenic algae；2-methylisoborneol(2-MIB)；geosmin(GSM)；β-cyclocitral

受人类活动和全球气候变暖的影响,全球范围内藻类在水中异常繁殖的问题十分突出,给饮用水的供水安全带来巨大的威胁[1-2].藻类污染会对水质产生直接和间接的有害影响,导致颜色变化、难闻的味道和气味、浊度[3].特别是,供水中藻类引起的气味事件一直在增加[4-5].国外 60 年代初开始对水中嗅味物质展开研究,至今,已有几十个国家的研究人员陆续报道了水体中的嗅味问题[6].中国科学院生态环境研究中心杨敏团队对全国 34 个主要城市的 111 个供水厂的饮用水嗅味问题调查结果表明,82%的原水和 53%的出厂水存在不同程度的嗅味问题[7].嗅味问题对饮用水的感官影响较大,极易引发用户

**收稿日期**：2025-06-09
**基金项目**：国家自然科学基金项目(52570111);陕西省重点科技创新团队项目(2023-CX-TD-32);陕西省杰出青年科学基金资助项目(2025JC-JCQN-019)
* 责任作者, 教授, huangtinglin@xauat.edu.cn

投诉,在 2023 年 4 月 1 日国家市场监督管理总局批准实施的《生活饮用水卫生标准》(GB5749-2022)中将 2-甲基异莰醇(2-MIB)和土臭素(GSM)两种嗅味物质指标列为扩展-毒理性指标,浓度限值均为 10ng/L[8].

蓝藻是水体富营养化的主要藻类之一,其中的微囊藻、鱼腥藻和颤藻等优势藻属往往快速繁殖于淡水水体,且持续时间长,常规工艺难以控制,从而产生更为严重的危害[9-10].现有的研究表明 β-环柠檬醛(β-cyclo)在较低浓度范围内便可导致水体散发出难闻的木头味,常与 GSM 和 2-MIB 共存于水环境中.2-MIB,β-cyclo 和 GSM 具有的气味检测限值分别为 6.3,16.3 和 1.3ng/L[11].而微囊藻能产生大量的 β-cyclo,鱼腥藻能产生大量的 2-MIB,颤藻能产生大量的 2-MIB 和 GSM.现有的调研表明,在藻类爆发季节,经水厂处理的出厂水仍可能含有百万级藻细胞,其中包含铜绿微囊藻、假鱼腥藻等产嗅藻[12-13].当致嗅藻细胞进入到管网中,受管网环境胁迫,容易造成二次致嗅的问题.当前的研究大多集中在水源地以及水厂藻类去除[14]以及嗅味去除的问题,对于供水管网中致嗅藻细胞二次致嗅的问题缺少系统的研究.

因此,本研究选取 3 种在水厂出水中频繁检出的产嗅蓝藻(铜绿微囊藻,灰假鱼腥藻和颤藻),并测定其产嗅潜能,模拟供水管网系统胁迫环境(水流剪切力,温度,黑暗/光照和管材)探究环境因素对藻及其产嗅特性的影响,分析影响藻产嗅的管网主控环境因子.最后,通过连续流实验分析不同致嗅藻在连续流条件下藻源嗅味物质的产生情况,对于保障用户端龙头水饮用水质安全具有重要意义.

## 1 材料与方法

### 1.1 实验装置与方法

序批式实验装置由若干密闭容器、电动恒速搅拌器两部分组成.实验时在 500mL 容器中加入自来水和实验藻液使其达到一定藻浓度静置或者使用电动恒速搅拌器连续搅 24h.在 0,0.5,2,5,8,12,24h,通过一次性注射器快速移取容器内的藻液,一部分用 0.22μm 针头过滤器过滤后测定水中溶解性嗅味浓度;一部分用于测定反应过程中藻的破碎情况.探究水流剪切力的影响时设置温度为(18±3)℃,无光照,水流剪切力作为唯一变量设置为 0,200,400r/min,分别代表静置、低流速、经济流速条件.探究管材的影响时选取两种不同的管材,分别为铸铁管和 PE 管,以烧杯作为对照组,控制实验条件为:转速 200r/min,氯浓度 0.5mg/L,水温(20±2)℃,反应时间 24h.

连续流系统装置由泵、循环管道、进出水管路、排水箱组成,管材采用给水管网系统中常用的 UPVC 管,管道全长约 7m,管道内径为 40mm.管道装置接口采用 PVC 胶组合连接,与泵连接处另外采用生料带密封.管道内充满了自来水,上端设置一个进水口、右侧设置一个取水口、下端设置一个排水口,直径分别为 40,20,40mm.分别在 0,0.5,1,2,3,4,5,6h 取样,过滤测量溶解性嗅味浓度.每次反应结束后,用超纯水重复洗涤管道 3 次.

### 1.2 检测方法

藻的生物活性检测方法:将藻细胞利用 SYTOX Green 染色剂染色后放置在荧光显微镜(BX51,奥林巴斯)下观察.

嗅味浓度的测量使用 GC-MS(Agilent 8890B-7000GC/MSD,美国)检测,由于嗅味物质具有低含量与可挥发的特性,因此在检测前需要对其进行浓缩富集.选择的样品前处理方法为固相顶空微萃取(HS-SPME)[15-16].具体如下:20mL 样品瓶中加入 10mL 水样(若测溶解性致嗅物质,则用 0.22 μm 有机滤膜过滤),3.0g NaCl 固体(400℃下烘干 2h),使用 PAL3 与 GC-MS 配套使用.

仪器所用的萃取头为:120μm DVB/C-WR/PDMS(5191-5874,Agilent 5191-5874,美国),气相色谱部分使用 DB-WAX 色谱柱(30m×250μm×0.25μm),在分流进样模式(分流比 5:1)下操作,进样口温度为 250℃.载气为氦气,采用恒流模式,流速设定为 2.25mL/min(色谱柱恒流流速为 1.016mL/min).柱箱温度程序为:初始温度 40℃保持 3min,然后以 10℃/min 的速率升温至 250℃,并在 250℃保持 10min.色谱柱与质谱之间的传输线温度为 240℃.质谱部分在电子轰击(EI)离子源(电子能量 70eV)下运行,支持多重反应监测(MRM)和单离子监测(SIM)两种扫描模式.碰撞气和淬灭气分别为氮气(1.50mL/min)和氦气(2.25mL/min).离子源温度设定为 230℃,四级杆温度设定为 150℃.

使用 SIM 模式,确定产物离子,2-MIB 的特征离子为:95,107;GSM 特征离子为:112;β-cyclo 特征离子

为:137,152.使用MRM模式,运行SCAN方法,确定目标嗅味物质的保留时间,2−MIB,β−cyclo,GSM 的保留时间分别为:13.5,14.3,16.5min.利用 GC−QQQ 软件对嗅味物质定量检测,建立 3 种嗅味物质的检测方法并绘制标准曲线(表 1).

**表 1　3 种藻源嗅味化合物的外标标准曲线**

Table 1　The standard curve of three algal odorous compounds

| 嗅味物质 | 标准曲线 | 相关系数 |
|---|---|---|
| 2−MIB | $Y$=3826.24$X$+659.00 | $R^2$=0.999 |
| GSM | $Y$=6229.81$X$+39762.75 | $R^2$=0.999 |
| β−cyclo | $Y$=2537.38$X$−13056.42 | $R^2$=0.998 |

### 1.3　三种致嗅藻的产嗅潜能测定

为了控制三种致嗅藻细胞处于相同的生长阶段,本研究统一取处于对数生长期的藻.为了测定三种致嗅藻的致嗅潜力,取一定数量的致嗅藻细胞,用细胞破碎机破碎 10min,离心 30min 后,测定其产嗅潜力如表 2 所示,约 200 万个/L 的铜绿微囊藻完全破损可释放 100ng/L 的 β−cyclo,约 50 万个/L 的灰假鱼腥藻完全破损可释放 70ng/L 的 2−MIB,约 20 万个/L 的颤藻完全破损可释放 30ng/L 的 2−MIB 和 40ng/L 的 GSM,由此可见,少量产嗅藻进入管网系统中引发嗅味问题的风险极大[17],所以本实验所取三种藻的藻数量分别为铜绿微囊藻 200 万个/L,灰假鱼腥藻 50 万个/L,颤藻 20 万个/L,本实验所用藻类均购自中科院武汉水生生物研究所国家淡水藻种库[18].

**表 2　3 种致嗅藻的产嗅潜能**

Table 2　Odor−producing potential of three odorous algae

| 藻种类 | 藻破碎量(万个/L) | 嗅味物质名称:浓度(ng/L) |
|---|---|---|
| 铜绿微囊藻 | 200 | β−cyclo:100 |
| 灰假鱼腥藻 | 50 | 2−MIB:70 |
| 颤藻 | 20 | 2−MIB:30<br>GSM:40 |

### 1.4　数据分析

嗅味物质的定量分析使用 GC−QQQ 软件分析,其余数据及绘图均使用 Origin 2021 完成.

## 2　结果与讨论

### 2.1　管网环境对不同致嗅藻产嗅特性的影响

**2.1.1　水流剪切力对 3 种致嗅藻产嗅的影响**　在水流剪切力的作用下,3 种致嗅藻的嗅味浓度变化如图 1(a)(c)(e)所示,随着剪切力增大,3 种藻类的嗅味物质释放量均呈上升趋势,其中,灰假鱼腥藻的 2−MIB 浓度增幅最为显著,最高可达 60ng/L;铜绿微囊藻释放的 β−cyclo 峰值浓度为 23ng/L;颤藻产生的 2−MIB 浓度最高为 20ng/L,而其 GSM 浓度始终维持在 5ng/L 以下,未超过嗅阈值.3 种致嗅藻细胞破损情况如图 1(b)(d)(f)所示,灰假鱼腥藻与颤藻在高水流剪切力下作用 24h 后,其破损率均会达到 90%以上,而铜绿微囊藻的破损率始终保持在 30%以内,这可能与藻的形状以及体型有关,铜绿微囊藻细胞呈球状团块且体积小,水流剪切力对其损伤较小,而灰假鱼腥藻呈链状,颤藻呈丝状并且其体型较大,水流剪切力容易对其造成损伤,在经济流速下其破损率已经能达到很高的水平[19],从而导致其胞内嗅味物质释放至水体[20].

值得注意的是,在静止条件下,3 种致嗅藻的嗅味浓度均有一定程度的上升,但是,铜绿微囊藻与颤藻的嗅味浓度始终保持在嗅阈值 10ng/L 以内,从这两种藻细胞破损情况来看,其破损率均保持在 20%以内,这说明这两种藻细胞的耐受性比较好,而嗅味浓度的略微上升是由于藻细胞正常的代谢过程产生;灰假鱼腥藻在静止条件下 24h 后,嗅味浓度大幅度上升,最高可达到 45ng/L,远超嗅阈值 10ng/L,从藻细胞破碎情况来看,灰假鱼腥藻细胞破碎率会达到 50%,这是由于灰假鱼腥藻在自来水这种贫营养环境下不易存活,在渗透压的作用下,部分活性较差的藻细胞吸水胀破[21],大量的 2−MIB 从胞内渗出,从而导致水体嗅味浓度的大幅上升.

**2.1.2　温度对 3 种致嗅藻产嗅特性的影响**　管网系统多埋于地下,水温波动相对较小,多数情况下水温稳定维持在 10~20℃之间[22],然而,在供水末端(如高层供水),供水管可能出现裸露,致使水温产生较大幅度波动,因此,本研究设置 0,18,30℃ 3 个温度梯度,探究不同条件下藻源嗅味物质的生成规律,结果如图 2(a)(c)(e)所示.铜绿微囊藻在 0 和 18℃环境下,β−cyclo 生成量基本相同,最大值为 25ng/L;当温度升至 30℃时,其 β−cyclo 浓度显著上升,峰值可达 40ng/L.与之相比,灰假鱼腥藻在 18℃时 2−MIB 浓度便开始显著增加,于 0,18 和 30℃条件下,其 2−MIB 浓度分别为 48,60 和 70ng/L.颤藻产生 2−MIB 的规律与灰假鱼腥藻相似,在上述 3 个温度下,2−MIB 浓度依次为 25,50 和

56ng/L.从藻细胞的破损情况来看(图 2(b)(d)(f)),3 种藻细胞均呈现0℃时细胞破损率较高,而在18和30℃下破损率显著降低的特征.这表明低温虽易导致藻细胞破裂,但同时也减缓了细胞代谢活动,抑制了胞内嗅味物质的合成,从而致使 0℃条件下嗅味浓度相对较低.此外,实验还发现,12h后嗅味浓度均出现不同程度下降,推测其原因,一方面,藻源嗅味物质可能被内壁生物膜、沉积物吸附,从水体转移至固相;另一方面,会被管网中残留的消毒剂氧化分解为无嗅小分子,或被微生物代谢为 $CO_2$ 和水等.

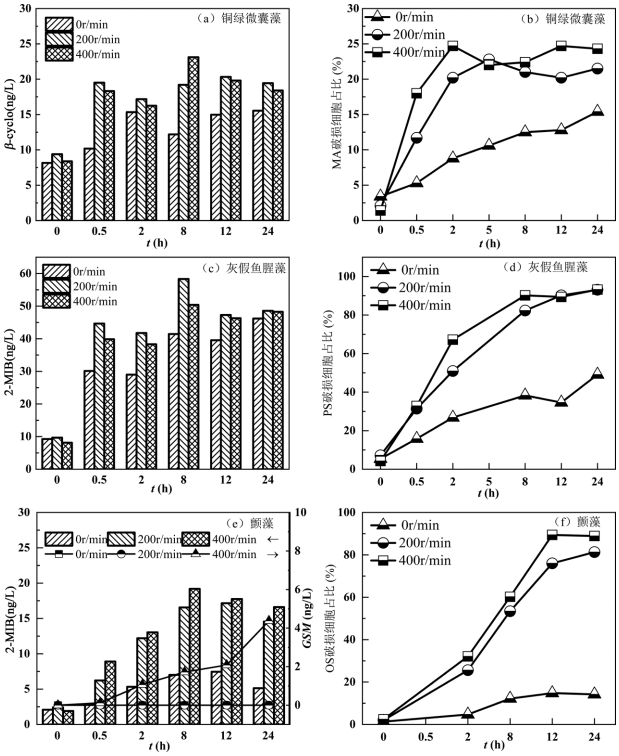



图 1 水流剪切力对 3 种致嗅藻产嗅的影响以及破损细胞占比

Fig.1 The effect of hydrodynamic shear force on odor production by three odor-producing algae and the proportion of damaged cells

2.1.3 黑暗环境对 3 种藻产嗅特性的影响 黑暗环境下不同藻源嗅味物质生成情况如图 3(a)(c)(e)所示.研究表明,三种致嗅藻细胞在黑暗与光照条件下的嗅味浓度无显著差异;铜绿微囊藻与灰假鱼腥藻所产嗅味物质变化量均在 2ng/L 以内,颤藻细胞所产 2-MIB 变化量为 5ng/L.从细胞破损情况分析(图 3(b)(d)(f)),黑暗环境中 3 种藻类的破损率均高于光照条件.具体来看,黑暗环境下铜绿微囊藻、灰假鱼腥藻和颤藻的细胞破损率分别较光照条件增加 4%,5%和 5%,这一现象可能与藻细胞严格的光依赖性生长特性密切相关——黑暗胁迫会抑制藻细胞的正常代谢活性和增殖能力,随着黑暗暴露时间的延长,逐步引发的程序性细胞死亡促使胞内嗅味物质释放[23],从而导致黑暗环境下嗅味浓度较光照条件略有升高.

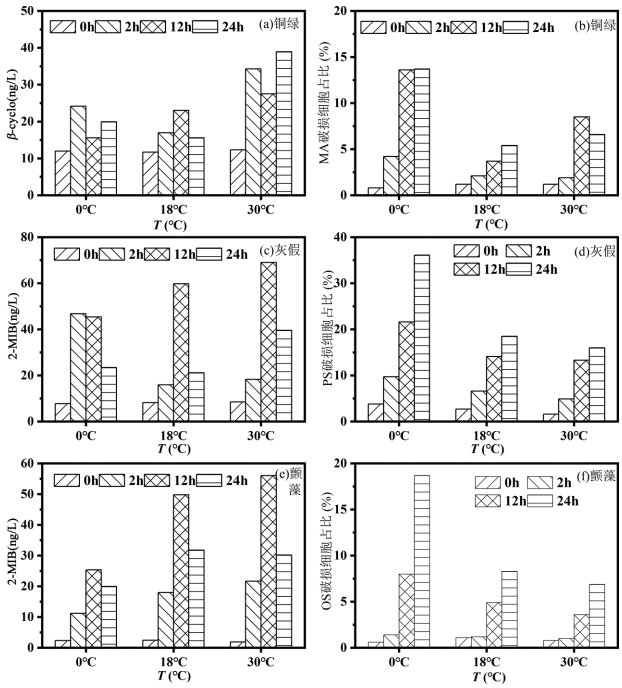



图 2 温度对 3 种致嗅藻产嗅的影响以及破损细胞占比

Fig.2 The effect of temperature on odor production by three odor-producing algae and the proportion of damaged cells

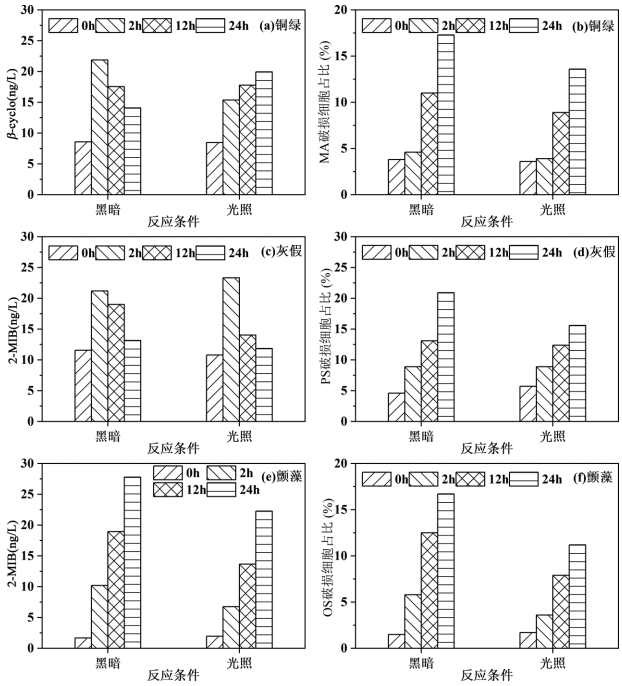



图 3 光照对 3 种致嗅藻产嗅的影响以及破损细胞占比

Fig.3 The effect of illumination on odor production by three odor-producing algae and the proportion of damaged cells

2.1.4　管材对 3 种致嗅藻产嗅特性的影响　本研究考察了致嗅藻细胞在两种不同管材(PE 管、铸铁管)及烧杯空白对照条件下的产嗅情况,结果如图 4(a)(c)(e)所示.数据显示,铜绿微囊藻产生的 β-cyclo 和颤藻产生的 2-MIB 未呈现明显变化,两者最高浓度分别维持在 20 和 17ng/L;而灰假鱼腥藻在烧杯、PE 管以及铸铁管中所产的 2-MIB 浓度分别为 12、20 以及 18ng/L,PE 管和铸铁管中的浓度均高于烧杯空白组.从三种致嗅藻细胞的破损情况分析(图 4(b)(d)(f)),PE 管和铸铁管中的藻细胞破损率略高于烧杯,这可能与铸铁管和 PE 管的粗糙度大于烧杯有关[24],导致藻细胞接触管壁时破损程度轻微增加.由于三种藻细胞破损率升高幅度均控制在 10%以内,铜绿微囊藻和颤藻的嗅味物质浓度未出现显著上升,仅灰假鱼腥藻的 2-MIB 浓度较空白组升高 8ng/L.

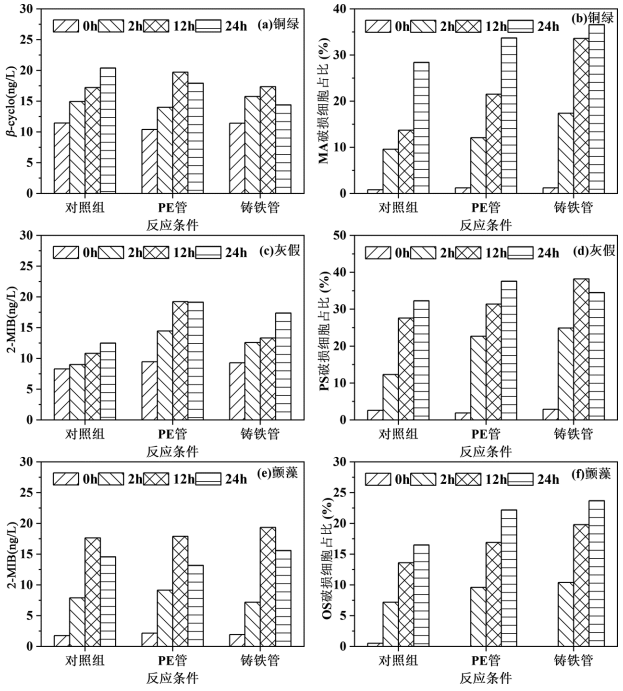



图 4　管材对 3 种致嗅藻产嗅的影响以及破损细胞占比

Fig.4　The effect of pipe materials on odor production by three odor-producing algae and the proportion of damaged cells

2.1.5　影响藻产嗅的主控环境因子分析　为综合评判不同致嗅藻细胞产嗅的主控环境因子,本研究对比了不同水流剪切力、温度、光照和管材条件下,藻细胞在 2,12,24h 3 个反应时间点的活性及嗅味释放情况,结果如图 5 所示.分析表明:铜绿微囊藻产嗅的主控因子为低温,其最适生长温度约为 35℃,对低温环境耐受性较差;灰假鱼腥藻的产嗅主控因子为水流剪切力,因其链状形态特性,即使在低剪切力条件下也易受损,导致大量 2-MIB 释放.此外,短时间低温刺激也会诱导其释放部分 2-MIB;颤藻的产嗅主控因子为水流剪切力,这与其丝状结构密切相关.其他环境因子(如温度、光照、管材)对颤藻产嗅无显著影响,可能与其自身较强的环境适应能力有关[25].

不同影响因素方差分析如表 3 所示,通过方差分析可知温度对铜绿微囊藻产嗅影响显著($P$<0.05),水流剪切力对灰假鱼腥藻和颤藻产嗅影响显著($P$<0.05),其他环境因子对三种致嗅藻产嗅无显著影响,与上文结论一致.

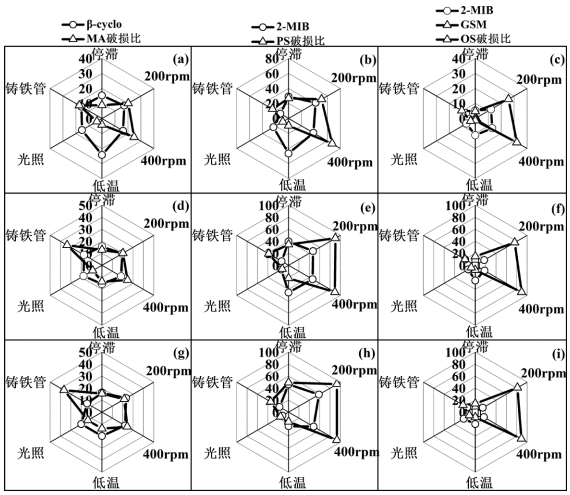



图 5　多因子影响下 3 种致嗅藻的活性和产嗅的影响比较

Fig.5　Comparative analysis of the activity and odor production in three odor-producing algal species under the influence of multiple factors

**表 3　不同影响因素对致嗅藻产嗅影响方差分析**

Table 3　ANOVA analysis of the effects of different influencing factors on odor production by odor-producing algae

| 致嗅藻 | 温度 | | 剪切力 | | 管材 | | 光照 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $F$ | $P$ | $F$ | $P$ | $F$ | $P$ | $F$ | $P$ |
| 铜绿 | 4.47 | 0.045* | 3.34 | 0.06 | 0.13 | 0.88 | 0.01 | 0.97 |
| 鱼腥 | 0.11 | 0.89 | 5.03 | 0.04* | 1.39 | 0.30 | 2.75 | 0.15 |
| 颤藻 | 0.56 | 0.59 | 3.87 | 0.044* | 0.01 | 0.99 | 0.24 | 0.64 |

注:*表示$P$<0.05影响显著.

2.2　连续流运行过程中致嗅藻的产嗅特性

2.2.1　连续流条件下致嗅藻的产嗅特性　连续流条件下不同致嗅藻细胞的产嗅特性如图 6 所示.在此条

件下,灰假鱼腥藻和颤藻表现出极强的嗅味释放能力:初期阶段,由于致嗅藻细胞对管道环境的应激反应,灰假鱼腥藻和颤藻在管道内仅停留 10min 时,便分别向主体水中释放了 40 和 20ng/L 的 2-MIB;后续阶段,灰假鱼腥藻在 2h 内快速释放 2-MIB 至 70ng/L,颤藻释放速度相对缓慢,最终 2-MIB 浓度也达到 30ng/L.相比之下,铜绿微囊藻对管道环境的适应性较强,其 β-cyclo 释放量始终保持在 10ng/L 以内.

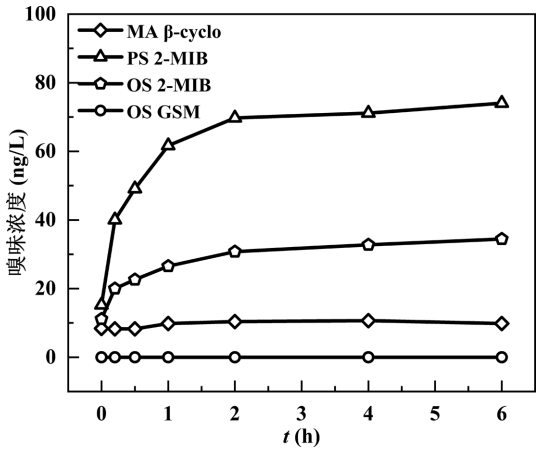



图 6 管道停留时间对 3 种藻产嗅的影响

Fig.6 Effect of pipe remain time on odor production in three algal species

2.2.2 流速对致嗅藻产嗅特性的影响 连续流实验中流速对三种致嗅藻产嗅特性的影响如图 7 所示,在静止条件下,铜绿微囊藻细胞和颤藻释放的嗅味物质较少,而灰假鱼腥藻可释放大量嗅味物质.随着流速升高,3 种致嗅藻释放的特异性嗅味物质均呈上升趋势,其中灰假鱼腥藻和颤藻产生的 2-MIB 增幅最为显著;高流速下其最大浓度分别可达 85 和 60ng/L.此外,颤藻产生的 GSM 浓度随流速升高呈现上升趋势,但始终低于 10ng/L,这可能与颤藻细胞内与蛋白质嵌合的结合态 GSM 不易释放有关[26].

对比连续流实验与序批式实验发现,两者的致嗅藻产嗅趋势一致,但相同藻数量条件下,连续流实验的嗅味浓度更高.例如序批式实验中灰假鱼腥藻的 2-MIB 浓度均低于 60ng/L,而在连续流实验中最高超过 80ng/L;颤藻的 2-MIB 在序批式实验中低于 20ng/L,连续流实验中则超过 60ng/L.从嗅味物质达到峰值的时间看,序批式实验中铜绿微囊藻、灰假鱼腥藻和颤藻的特异性嗅味物质均会在 8h 达到峰值(图 1),而连续流实验中该时间分别缩短至 6,0.5 和 4h(图 7).

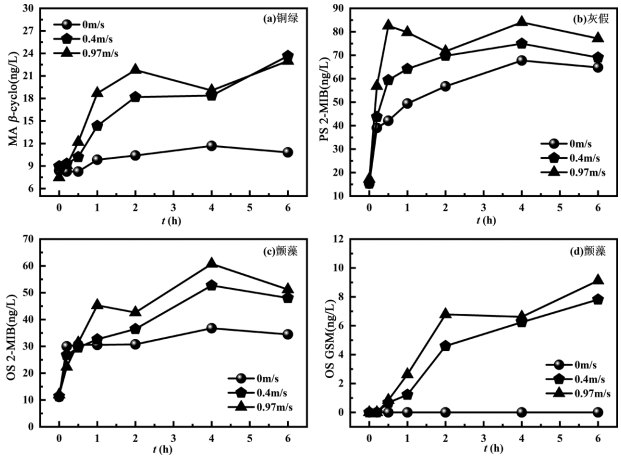



图 7 流速对 3 种致嗅藻产嗅的影响

Fig.7 The effect of flow velocity on odor production by three odor-producing algae

## 3 结论

3.1 少量致嗅藻细胞进入管网即可引发嗅味问题.灰假鱼腥藻(50 万个/L)和颤藻(20 万个/L)在水流剪切力或低温下可快速释放高浓度 2-MIB(最高达 85ng/L 和 60ng/L),铜绿微囊藻(200 万个/L)在低温下 β-cyclo 峰值为 40ng/L.

3.2 水流剪切力和温度是主要影响因素,其中灰假鱼腥藻和颤藻的 2-MIB 释放主要受剪切力驱动,与其链状/丝状形态相关;铜绿微囊藻的 β-环柠檬醛释放主要受温度影响(最适 35℃,低温抑制代谢).黑暗环境和管材对 3 者产嗅无显著影响,嗅味浓度变化均小于 5ng/L.

3.3 铜绿微囊藻产嗅主控因子为温度,灰假鱼腥藻和颤藻均为水流剪切力.颤藻的 GSM 释放量始终低于嗅阈值(10ng/L),可能与结合态 GSM 不易释放有关.

3.4 连续流与序批式实验产嗅趋势一致,但连续流条件下嗅味物质浓度更高、释放更快.50 万个/L 灰假鱼腥藻所产 2-MIB 浓度从序批式的 60ng/L 升至连续流的 80ng/L 以上,达到峰值时间从 8h 缩短至 0.5h.

**参考文献:**

[1] Burford M A, Carey C C, Hamilton D P, et al. Perspective: Advancing the research agenda for improving understanding of cyanobacteria in a

future of global change [J]. Harmful Algae, 2020,91:101601.

[2] Paerl H W, Paul V J. Climate change: Links to global expansion of harmful cyanobacteria [J]. Water Research, 2012,46(5):1349−1363.

[3] Arii S, Yamashita R, Tsuji K, et al. Differences in susceptibility of cyanobacteria species to lytic volatile organic compounds and influence on seasonal succession [J]. Chemosphere, 2021,284:131378.

[4] Zhang K J, Zhang T Q, Deng Y, et al. Occurrence of algae and algae−related taste and odour (T&O) compounds in the Qingcaosha Reservoir, China [J]. Journal of Water Supply Research and Technology−Aqua, 2015,64(7):824−831.

[5] Wang C, An W, Guo Q, et al. Assessing the hidden social risk caused by odor in drinking water through population behavioral responses using economic burden [J]. Water Research, 2020,172:115507.

[6] Chang D W, Hsieh M L, Chen Y M, et al. Kinetics of cell lysis for Microcystis aeruginosa and Nitzschia palea in the exposure to β−cyclocitral [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011,185(2):1214−1220.

[7] 郭庆园,王春苗,于建伟,等.饮用水中典型嗅味问题及其研究进展 [J]. 中国给水排水, 2020,36(22):82−88.
Guo Q Y, Wang C M, Yu J W, et al. Research progress on typical taste and odor problems in drinking water [J]. China Water & Wastewater, 2020,36(22):82−88.

[8] GB/T 5749−2022　生活饮用水卫生标准 [S].
GB/T 5749−2022　Hygienic standard for drinking water [S].

[9] 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 [J]. Science of the Total Environment, 2010,409(2):314−325.

[10] Ren B, Weitzel K A, Duan X, et al. A comprehensive review on algae removal and control by coagulation−based processes: mechanism, material, and application [J]. Separation and Purification Technology, 2022,293:121106.

[11] Rider Z, Percich A, Hiripitiyage Y, et al. Drivers of cyanotoxin and taste−and−odor compound presence within the benthic algae of human−disturbed rivers [J]. Water Research, 2024,253:121357.

[12] Zamyadi A, Dorner S, Sauvé S, et al. Species−dependence of cyanobacteria removal efficiency by different drinking water treatment processes [J]. Water Research, 2013,47(8):2689−2700.

[13] 王　婵,张锡辉,冯兆敏,等.沿海城市复杂水源对城市安全供水的影响 [J]. 给水排水, 2009,45(11):135−139.
Wang C, Zhang X. H, Feng Z M., et al. Influence of complex water sources on urban safe water supply in coastal cities [J]. Water & Wastewater Engineering, 2009,45(11):135–139.

[14] Han Y T, Zheng J J, Jiang C, et al. Hydrochloric acid−modified algal biochar for the removal of Microcystis aeruginosa: Coagulation performance and mechanism [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2022,10(6):108903.

[15] 张永鑫,仇付国,王春苗,等.顶空固相微萃取−气相色谱三重四极杆串联质谱同时测定饮用水中 9 种嗅味物质 [J]. 环境工程学报, 2023,17(11):3730−3737.
Zhang Y X, Qiu F G, Wang C M, et al. Simultaneous determination of nine olfactory substances in drinking water by headspace solid−phase microextraction and gas chromatography−triple quadrupole tandem mass spectrometry [J]. Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(11):3730−3737.

[16] 陈　亮.臭氧氧化对颤藻及其异味物质去除的研究 [D]. 南昌,江西师范大学, 2023.
Chen L. Study on the removal of tremella and its odour substances by ozone oxidation [D]. Nanchang: Jiangxi Normal University, 2023.

[17] Ozaki K, Ohta A, Iwata C, et al. Lysis of cyanobacteria with volatile organic compounds [J]. Chemosphere, 2008,71(8):1531−1538.

[18] 张　琪,夏逸若,李　林,等.淡水藻种库(FACHB)库藏产 2−MIB 蓝藻的鉴定及其产嗅特征研究 [J]. 水生生物学报, 2023,47(7):1115−1128.
Zhang Q, Xia Y R, Li L, et al. Identification and odor−producing characteristics of 2−MIB−producing cyanobacteria from freshwater algae culture collection (FACHB) [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2023,47(7):1115−1128.

[19] Liu T, Yu J W, Su M, et al. Production and fate of fishy odorants produced by two freshwater chrysophyte species under different temperature and light conditions [J]. Water Research, 2019,157:529−534.

[20] 庞一鸣,陈淑华,徐杭州,等.伪鱼腥藻(Pseudanabaena sp.)及其产生 2−甲基异莰醇(2−MIB)的研究进展 [J]. 生态学杂志, 2021,40(5):1530−1548.
Pang Y M, Chen S H, Xu H Z, et al. Progress of Pseudanabaena sp. and its production of 2−methylisobornyl alcohol (2−MIB) [J]. Journal of Ecology, 2021,40(5):1530−1548.

[21] Li Z, Hobson P, An W, et al. Earthy odor compounds production and loss in three cyanobacterial cultures [J]. Water Research, 2012,46(16):5165−5173.

[22] 张盛楠,田一梅,刘　骋.华北某再生水管网余氯衰减分析及影响因素研究 [J]. 工业用水与废水, 2017,48(3):10−14.
Zhang S N, Tian Y M, Liu C. Study on the analysis of residual chlorine attenuation and influencing factors in a reclaimed water pipeline network in North China [J]. Industrial Water and Wastewater, 2017,48(3):10−14.

[23] Zheng T, Zhou M, Yang L, et al. Effects of high light and temperature on Microcystis aeruginosa cell growth and β−cyclocitral emission [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020,192:110313.

[24] 苗义龙.给水管网生物膜微生物多样性及颗粒物对生物膜的影响研究 [D]. 泉州:华侨大学, 2016.
Miao Y L. Study on the diversity of biofilm microorganisms in water supply network and the influence of particulate matter on biofilm [D]. Quangzhou: Huaqiao University, 2016.

[25] 陈明俊.鹊山水库有害蓝藻的检测与生物控制研究 [D]. 济南:山东大学, 2014.
Chen M J. Research on detection and biological control of harmful cyanobacteria in Magpie Mountain Reservoir [D]. Jinan: Shandong University, 2014.

[26] Reese K L, Fisher C L, Lane P D, et al. Chemical profiling of volatile organic compounds in the headspace of algal cultures as early biomarkers of algal pond crashes [J]. Scientific Reports, 2019,9:10.

**作者简介：**程　亚(1990−),女,山东济宁人,副教授,博士,主要研究方向为微污染水源水处理.发表论文 20 余篇.chengya@xauat.edu.cn.