

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第9期

Vol.33 No.9

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国4个WMO/GAW本底站大气CH ₄ 浓度及变化特征	方双喜,周凌晔,许林,姚波,刘立新,夏玲君,王红阳	(2917)
我国东北地区大气降水稳定同位素特征及其水汽来源	李小飞,张明军,马潜,李亚举,王圣杰,汪宝龙	(2924)
2010年广州亚运期间空气质量与污染气象条件分析	李婷苑,邓雪娇,范绍佳,吴兑,李菲,邓涛,谭浩波,蒋德海	(2932)
厦门市冬春季灰霾期间大气PM ₁₀ 中多环芳烃的污染特征及来源分析	钱冉冉,闫景明,吴水平,王新红	(2939)
气溶胶OCEC切割点确定方法改进及应用	王莉华,董华斌,闫才青,曾立民,郑玫,张延君,刘久萌,Weber R J	(2946)
松花江上游夹皮沟金矿土壤与大气汞污染特征	张刚,王宁,王媛,刘特,艾建超	(2953)
河北农居环境颗粒态汞污染特征及健康评估研究	赵亚娟,龚巍巍,栾胜基	(2960)
印刷电路板(PCB)厂挥发性有机物(VOCs)排放指示物筛选	马英歌	(2967)
烹调油烟中挥发性有机物的排放初探	何万清,田刚,聂磊,曲松,李靖,王敏燕	(2973)
生物滴滤塔降解甲苯废气长期运行生物膜相特性研究	胡俊,郑江玲,吴越新,张丽丽,陈建孟	(2979)
分期布液生物滴滤床净化H ₂ S废气性能研究	刘春敬,李坚,刘佳,彭淑婧,李超,陈英,何洪	(2987)
粉煤灰综合利用过程中汞的二次释放规律研究	孟阳,王书肖	(2993)
太湖、巢湖水体总悬浮物浓度半分析反演模型构建及其适用性评价	刘忠华,李云梅,檀静,郭宇龙,周莉,刘阁	(3000)
巢湖水质与流域农业投入的关联性研究	张燕,高翔,张洪	(3009)
巢湖十五里河水花生生长区沉积物及间隙水中营养盐的基本特性	李如忠,李峰,周爱佳	(3014)
巢湖沉积物中磷蓄积时空变化及人为污染定量评价	刘恩峰,杜臣昌,羊向东,沈吉	(3024)
巢湖周边表土中有机质、全氮和全磷空间分布及其相关性	陈书琴,储昭升,胡社荣,刘俊,王长春,王曼	(3031)
丹江口水库典型入库支流氮磷动态特征研究	雷沛,张洪,单保庆	(3038)
水温分层对三峡水库香溪河库湾春季水华的影响	刘流,刘德富,肖尚斌,孔松,陈媛媛,方小凤	(3046)
平水期和丰水期殷村港污染物浓度时空变异比较研究	杨晓英,罗兴章,郑正,方淑波	(3051)
江苏西部湖泊沉积物营养盐赋存形态和释放潜力差异性分析	刘涛,胡志新,杨柳燕,肖琳,席北斗,许其功	(3057)
太湖西岸湖滨带沉积物氮磷有机质分布及评价	甘树,卢少勇,秦普丰,金相灿,焦伟,王佩	(3064)
南四湖流域种植业面源污染氮磷源解析研究	刘静,路风,杨廷钊,徐娜,王田妮	(3070)
珠江水体中有机物分布、组成及与消毒副产物生成的关系	何洪威,周达诚,王保强,梁艳红	(3076)
东江流域典型乡镇饮用水源地重金属污染健康风险评价	王若师,许秋瑾,张炯,魏群山,颜昌宙	(3083)
深圳茅洲河表层沉积物卤代多环芳烃污染研究	孙建林,倪宏刚,丁超,曾辉	(3089)
福建罗源湾潮间带沉积物重金属含量空间分布及其环境质量影响	高文华,杜永芬,王丹丹,高抒	(3097)
渤海湾大型底栖生物群落结构变化及原因探讨	蔡文倩,刘录三,乔飞,林岍璇,周娟	(3104)
地下水污染防治区划体系构建研究	王俊杰,何江涛,陆燕,刘丽雅,张小亮	(3110)
北京市平原区地下水污染防治区划不确定性分析	陆燕,何江涛,王俊杰,刘丽雅,张小亮	(3117)
川东平行岭谷区典型岩溶含水系统中NO ₃ ⁻ 的存储和运移	杨平恒,袁道先,任幼蓉,谢世友,贺秋芳,胡晓风	(3124)
改性活性炭对水中PFOS的吸附去除研究	董锡臻,石宝友,解岳,王东升	(3132)
水溶液中臭氧和溴离子的反应研究	俞潇婷,张家辉,潘循哲,张仁熙,侯惠奇	(3139)
HPSEC-UV-TOC联用技术测定有机物相对分子质量分布	张晗,董秉直	(3144)
不同有机基质诱发的水体黑臭及主要致臭物(VOSC _s)产生机制研究	卢信,冯紫艳,商景阁,范成新,邓建才	(3152)
不同pH下纳米铁镍颗粒对生物降解苯酚的影响	况烨,周琰,王清萍,陈祖亮	(3160)
多级微氧生物流化床预处理高浓度丙烯酸废水	李莎,郑盛之,宋玉栋,周岳溪,朱长军,刘淑玲,潘玲,蒲文晶	(3167)
三级生物膜深度处理腈纶废水生化出水的脱氮研究	徐少阳,蒋进元,周岳溪,崔俊涛,段妮妮	(3172)
改性花生壳对水中镉的动态吸附研究	龙腾,易筱筠,党志	(3177)
硫氰酸根在粒状镁铝复合氧化物上的吸附性能	王秀娟,王海增,孙宝维,韩文军	(3182)
海水生物滤器氨氮沿程转化规律模型	罗荣强,侯沙沙,沈加正,陈珠,刘鹰	(3189)
营养物质缺乏引起的好氧颗粒污泥膨胀及其恢复	张著,高大文,袁向娟,勾倩倩	(3197)
生物表面活性剂强化污泥水解的研究	易欣,罗琨,杨麒,李小明,邓伟光,张植平	(3202)
厌氧氨氧化菌的富集培养与分子鉴定	刘冬英,邱艳玲,袁宪正,师晓爽,郭荣波	(3208)
阿特拉津降解菌株的分离、鉴定及降解特性研究	李绍峰,朱静,李铁晶	(3214)
农业废物堆肥中高产漆酶新菌株的分离鉴定及酶学性质研究	任秀娟,范长征,鲁伦慧,王聪,曾光明	(3220)
糖蜜酒精废水脱色微生物的筛选及鉴定	李必金,刘幽燕,贺锴,滕芳明,何熙璞,李青云	(3228)
餐厨垃圾乳酸发酵过程中的微生物多样性分析	刘建国,汪群慧,王爽,孙晓红,仇天雷,李焕	(3236)
共价功能化对单壁碳纳米管产生DNA损伤和活性氧的影响研究	吴仁人,陶雪琴,党志,李开明,蔡美芳	(3241)
<i>Geobacter sulfurreducens</i> 对汞的甲基化及其影响因素研究	邹嫣,司友斌,颜雪,陈艳	(3247)
单一与复合胁迫下油菜对镉、铅的吸收效应	武文飞,南忠仁,王胜利,赵转军,周婷	(3253)
金铜矿下游农户家养番鸭体内重金属分布特征及其评价	杭小帅,梁斌,王文林,王霞,李维新	(3261)
环境激素氯菊酯对萼花臂尾轮虫繁殖的影响	董学兴,杨家新,吕林兰,赵卫红,於叶兵	(3266)
地聚物固化生活垃圾焚烧飞灰固化体抗氧化硫杆菌腐蚀性能的研究	金漫彤,孙鑫,董海丽,金赞芳	(3272)
焚烧飞灰高温过程中重金属的挥发及其氯化特征	刘敬勇,孙水裕	(3279)
城市废弃物处理温室气体排放研究:以厦门市为例	于洋,崔胜辉,林剑艺,李飞	(3288)
NPEOs及其代谢产物在城市污水处理厂中的归趋分析	连静,刘俊新	(3295)
《环境科学》征订启事(3037)	《环境科学》征稿简则(3151)	信息(2999,3030,3096,3227)

不同有机基质诱发的水体黑臭及主要致臭物 (VOSCs) 产生机制研究

卢信^{1,2}, 冯紫艳^{1,3}, 商景阁^{1,2}, 范成新^{1*}, 邓建才¹

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 南京农业大学生命科学学院, 南京 210095)

摘要: 目前在研究湖泛发生方面还主要停留在视觉 (黑色) 水平, 嗅觉 (臭味) 因为更加难以判断, 有关致臭机制及致臭物质的研究仍停留在检测分析和理论假设方面, 缺乏有效的证据证实. 采用自制室内模拟装置研究不同有机基质作用下黑臭发生的情况, 以确定挥发性有机硫化物 (VOSCs) 的前驱物并初步研究其降解机制. 结果表明, 有机物只要达到一定负荷水平 ($1.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) 对水体均有致黑作用, 但含硫有机物能使水体在 7~13 d 就变黑, 而不含硫有机物需要 13 d 以上才能使水体变黑, 且含硫有机物能使水体颜色变得更深 (最高色度值达 410 度以上). 只有含硫有机物才具有致臭作用, 其中二甲基二硫醚 (DMDS)、二甲基三硫醚 (DMTS) 和二甲基四硫醚 (DMTeS) 是黑臭水体主要的致臭物质. 根据蛋氨酸降解产生的 VOSCs 情况, 可确定蛋氨酸为 VOSCs 的主要前驱物. 蛋氨酸以生物降解为主, 硫酸还原菌 (SRB) 是水环境中重要的蛋氨酸降解菌之一, 添加 SRB 使蛋氨酸快速分解为以 DMDS、DMTS 和 DMTeS 为主的 VOSCs, 降解率在第 35 d 高达 95%, 并使黑臭暴发的时间从 13 d 提前至 8 d; 产甲烷菌对蛋氨酸降解有抑制的趋势, 其大量存在可能会抑制小分子硫化物的形成, 因此添加甲烷菌抑制剂使黑臭暴发时间提前 1 d. 非生物降解是蛋氨酸降解的次要途径, 仅能使蛋氨酸发生初步降解而水体始终未变黑.

关键词: 有机基质; 黑臭; 含硫氨基酸; 挥发性有机硫化物; 硫酸还原菌; 产甲烷菌

中图分类号: X131.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2012)09-3152-08

Black Water Bloom Induced by Different Types of Organic Matters and Forming Mechanisms of Major Odorous Compounds

LU Xin^{1,2}, FENG Zi-yan^{1,3}, SHANG Jing-ge^{1,2}, FAN Cheng-xin¹, DENG Jian-cai¹

(1. State Key Laboratory of Lake and Environment, Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Life Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Self-made glass reactors were employed to study the occurrence of black water bloom induced by different types of organic matters, to clarify the precursor of volatile organic sulfur compounds (VOSCs), and then to preliminarily study its degradation mechanisms under laboratory-controlled conditions. Our research indicated that provided organic matrix were as high as $1.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, all organic matters could blacken the lake water regardless of sulfur appearance or not. However, compared with sulfur-free compounds that took more than 13 d to blacken the water, sulfur containing materials could accelerate the occurrence of black color to 7-13 d and increase the water chromaticity to above 410 which causing offensive odor consisted chiefly of DMDS, DMTS and DMTeS. Based on the function of methionine on the production of VOSCs, methionine was identified to be the precursors of VOSCs. Methionine was readily broke down by sulfate-reducing bacteria (SRB) (also other bacteria) (at 95% with the duration of 35 d) to produce hydrogen sulfide, methanethiol, and dominantly dimethylpolysulfides such as DMDS, DMTS and DMTeS. And the occurrence of black color had been advanced from 13 d to 8 d. Methanogenic bacteria slightly inhibited the degradation of methionine and reduced the evolution of sulfide. Therefore, the addition of methanogenic bacteria inhibitor set the formation of black color ahead by 1 d. Methionine was also degraded by nonbiodegradation, but it was a secondary pathway and cannot completely degrade methionine to blacken the water.

Key words: organic matrix; black water bloom; sulfur-containing amino acid; volatile organic sulfur compounds (VOSCs); sulfate-reducing bacteria (SRB); methanogenic bacteria

收稿日期: 2011-11-12; 修订日期: 2012-02-13

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50979102); 中国科学院重要方向性项目 (KZCX2-EW-314); 江苏省基础研究计划项目 (SBE201078397); 水利部公益性科研院所基本科研业务专项 (201001029)

作者简介: 卢信 (1978~), 女, 博士, 主要研究方向为湖泊污染与环境工程, E-mail: lxdeng@126.com

* 通讯联系人, E-mail: cxfan@niglas.ac.cn

蓝藻水华是水体富营养化的严重后果,近年来,太湖、巢湖和滇池都遭受了不同程度的蓝藻水华灾害,尤其是太湖,每年到春末夏初的时候,湖面聚集大量的蓝藻^[1]。然而,太湖污染问题真正引起国内外广泛关注的是2007年无锡水危机事件,这是由于蓝藻大规模暴发而引发的次生灾害——“湖泛”(亦称黑臭或黑水团),将水体富营养化问题推向极端。2007年5月底,因太湖藻华聚集造成了无锡贡湖水厂取水口水质恶化,进而发生“黑水团”而造成的自来水停产事件,致使市民多日无饮用水供应。黑水团发生时最明显的感官现象就是水体发黑,并伴有刺激性异味的气泡产生;氧化还原电位急剧下降,溶解氧趋于0^[2-4]。黑水团的出现往往与过高的有机负荷和较高的气温联系在一起,当湖泊富营养化水体在藻类大量暴发、积聚和死亡后,大量有机残体在适合的环境条件下厌氧分解,使得水体严重缺氧变黑,并释放出恶臭的硫化氢和二甲基硫醚类物质,其中二甲基三硫醚(DMTS)质量浓度高达11 399 ng·L⁻¹^[5]。此外,主要致臭物的种类及含量还可能随湖泛持续的时间变化而有所变化^[6]。

目前在研究湖泛发生方面还主要停留在视觉(黑色)水平,嗅觉(臭味)因为更加难以判断,相关研究非常少。本课题组采用Y型沉积物再悬浮发生装置已成功在室内动态仿真再现出藻源性湖泛,并逐步开展了致黑过程以及致黑物质的研究。研究已表明,FeS是湖泛过程中主要的致黑因子^[7-9],而挥发性有机硫化物(volatile organic sulfur compounds, VOSCs)也已被证实为主要的致臭物质^[5,6]。虽然在黑臭过程中也有硫化氢产生,但硫化氢极易逸散到大气中或与水体中的Fe²⁺结合生成FeS,因此水中检测到的硫化氢含量很少。从以上致黑和致臭物质的成分来看,硫是湖泛发生过程中的一个关键要素。目前国内外有关于海洋、富氧湖泊以及黑臭河流中VOSCs的研究较多,结果表明二甲基硫丙酸(DMSP)、无机多硫化物和含硫有机物质是VOSCs的主要前驱物^[10-13]。然而,有关藻源性湖泛可能的致臭机制及致臭物质的研究仍停留在致臭物检测分析及理论假设阶段^[14],缺乏有效的证据证实。由于太湖黑臭的直接原因是蓝藻水华,水华蓝藻的生物物质组成以蛋白质为主,其含量达40%以上,其中仅含硫氨基酸含量就高达1%左右^[15,16],因此可以推测含硫氨基酸是藻源性湖泛暴发过程中主要的硫源。然而,除了含硫化合物之外,藻体降解同时还产生其他类型的有机物质,因此黑臭发生过程中还有

更多的不含硫化合物共存,其在黑臭过程中的作用也应该考虑。本研究采用室内模拟装置研究不同类型有机基质:单糖、多糖、蛋白质以及VOSCs潜在前驱物——含硫氨基酸作用下黑臭发生的过程,旨在探明湖泛发生过程中致黑和致臭的机制、相互联系及各自特征,以确定湖泛主要致臭物质VOSCs的前驱物,并初步研究其降解机制,为今后的湖泛预控工作提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 采样地点及样品采集

采样点选择在太湖月亮湾水域。月亮湾位于太湖北部梅梁湾与竺山湾之间,北靠马山,南面为太湖开阔区域,面积约10.51 km²。由于受偏南风的影响,月亮湾成为太湖北部一个主要的聚藻区,导致近年来该水域近岸带湖泛频发,已成为一个湖泛易发敏感点。采样区域及采样点位置如图1所示,采用无扰动采样方式,使用Φ84 mm沉积物柱状样采样器采集原位沉积物样品,并保留柱状样上覆水。用采水器采集采样点湖水,装于25 L聚乙烯水桶带回实验室。

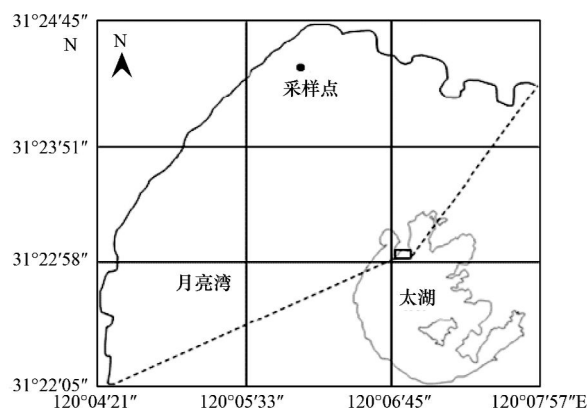


图1 采样区域与采样点示意

Fig. 1 Location of the sampling site in Yueliang Bay, Lake Taihu, China

1.2 实验方法及处理

取采集的柱状样表层0~6 cm深度的沉积物,充分混匀后各称600 g分别放入自制的玻璃实验装置中,根据不同处理加入相应溶液,所有溶液均用湖水配制(图2)。实验装置由上下2个球体组成,下部球体靠近土水界面处设液体样品取样口,取水样时可避免顶空气体逸出或与外部发生气体交换。上部球体设指标测定口和气体取样口,气体取样口位于球体最上部靠近瓶口处,溶液液面尽可能接近但略低于取样口以减少顶空体积,以便多收集到气体。

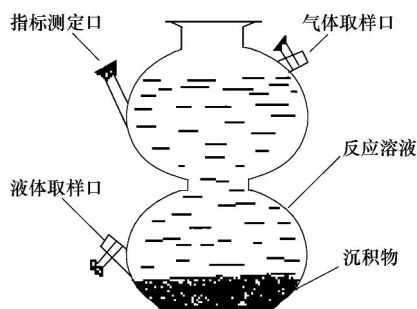


图2 实验装置示意

Fig. 2 A schematic diagram of the self-made airtight reaction system

指标测定口下端低于气体取样口,上端则高于溶液液面以防测定时液体溢出(可放入溶氧、ORP、硫化氢电极等测定相应指标)。

1.2.1 不同类型有机基质诱发的水体黑臭

分别将葡萄糖、淀粉、蛋白胨以及含硫氨基酸-蛋氨酸、半胱氨酸溶解于湖水中配制成质量浓度均为 $1.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的溶液,依次加入实验装置中,对照处理仅加湖水。

1.2.2 不同微生物类群在黑臭过程中的作用

所有处理均含 $1.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的蛋氨酸,一共设5个处理:高温高压灭菌,添加产甲烷菌抑制剂——溴乙基磺酸钠(BES) $5.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$,添加硫酸还原菌抑制剂——钨酸钠 $2.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$,添加SRB118菌液(50 mL)以及对照处理,以考察微生物类群对蛋氨酸作为有机负荷下黑臭发生的情况。

观察实验过程中的感官变化,测定氧化还原电位(ORP)并定期采水样测定色度、挥发性硫化物和残留的蛋氨酸,气体采样口接100 mL聚四氟乙烯气袋采集产生的气体,气袋充满后立即更换以防止气液达到平衡影响反应进程,整个系统始终保持气密性。所采集的水样在 4°C 下避光保存并在24 h内完成测定,收集到的气样也尽快测定,由于不同处理气体的产生及数量不同且无持续性,结果仅作定性描述。

1.2.3 硫酸还原菌的分离纯化

实验中所用的硫酸还原菌菌株为采样点沉积物分离出来的土著菌。将采集的沉积物柱状样迅速分层后,采用蜡封双层平板法分离出SRB单菌落;通过荧光素双醋酸酯(FDA)法间接测定微生物生长曲线;经16S RNA序列分析确定硫酸还原菌菌株属于脱硫弧菌目脱硫细菌属(*Desulfovibrio* SRB118)。

1.3 测定项目与分析方法

1.3.1 仪器与试剂

水样中挥发性硫化物分析由顶空固相微萃取(HS-SPME)预浓缩系统和Agilent 7890A/5973N GC-MS(安捷伦公司,美国)系统组合完成。色谱柱为HP-5 MS毛细管柱($30 \text{ m} \times 0.25 \text{ mm} \times 0.25 \mu\text{m}$),顶空固相微萃取手柄和萃取头均为Supelco公司产品,萃取头表面的吸附涂层为DVB-CAR-PDMS($30/50 \mu\text{m}$, No. 57348-U, USA),40 mL玻璃萃取瓶和PTFE涂层硅胶垫(安谱公司,中国),国华88-1大功率数显型磁力加热搅拌器(中国常州)。气相色谱-火焰光度检测器Agilent 7890A GC-FPD用于气体样品的分析,色谱柱为Gas pro毛细管柱($60 \text{ m} \times 0.32 \text{ mm} \times 0.25 \mu\text{m}$)。岛津分光光度计UV-2550,哈纳色度计HI93727,量程范围0~500度,超量程时稀释测定,结果乘以稀释倍数,色度值仅作为本研究处理间横向对比用。

标准样品:甲硫醇(MTL)、甲硫醚(DMS)、二甲基二硫醚(DMDS)、二甲基三硫醚(DMTS),GC纯度>98%(Sigma公司,美国),使用前用甲醇配成 $2000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的储备液,在 -20°C 下避光保存。标气由大连大特公司提供,浓度为:硫化氢 $999.1 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$,甲硫醇 $105.5 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$,甲硫醚 $104.1 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$,二甲基二硫 $101.5 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ 。其他常规试剂均为分析纯(国药集团化学试剂有限公司)。

1.3.2 测试条件

HS-SPME条件:萃取温度为 65°C ,搅拌速率为 $500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,萃取时间30 min。GC-MS载气为高纯氦气(99.999%),流速为 $1.0 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$;不分流进样;柱初始温度为 45°C ,保持3 min,以 $10^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 升温至 200°C ,保持3 min;进样口温度 250°C ;样品解吸3 min;先采用质谱全扫描(Scan)方式并结合标样确定典型样品中主要VOSCs种类,离子扫描范围 m/z 为40~300,扫描时间为3.5~30 min;然后选择离子(SIM)方式进行测定,MTL、DMS、DMDS和DMTS采用相应标样通过外标法进行定量,DMTeS由于标样无法购买,采用DMTS标准曲线进行半定量,方法检测限在 $2.2 \sim 8.9 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,其中以DMDS检测限为最低 $2.2 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$,MTL为最高 $8.9 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

Agilent 7890A GC-FPD测定条件:载气流量(He): $3 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$;氢气流量: $50 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$;空气流量: $65 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$;尾吹流量(He): $30 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$;进样器温度: 120°C ;检测器温度: 250°C ;柱初始温度为 50°C ,保持5 min,以

$25^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升温至 250°C ,保持 7 min. 蛋氨酸采用亚硝基铁氰化钾-可见分光光度法测定^[17]

2 结果与讨论

2.1 不同种类有机基质的致黑作用

从视觉上,除对照处理外,添加葡萄糖、淀粉、蛋白胨、蛋氨酸和半胱氨酸均能使水体变黑,但不同物质使水体变黑的时间以及变黑程度均有显著差异. 蛋白胨和半胱氨酸使沉积物和水体变黑的时间最短,仅在 7 d 左右;蛋氨酸处理在第 13 d 变黑;即使不含硫的糖类物质——葡萄糖和淀粉也能使水体和沉积物变黑,两者变黑的时间分别为第 13 d 和 15 d. 为了量化致黑程度差异,本研究测定了水样的色度,结果见图 3. 实验结果表明,只要存在足够的有机负荷,无论有机物是否为含硫物质,都能引起水体发黑(色度值达到 250 度以上). FeS 已被证实为水体呈现黑色的主要原因^[7~9],但实验中并未额外添加 Fe^{2+} ,说明 Fe^{2+} 主要来源于沉积物中;而不含硫的有机物同样也能使水体变黑,表明形成 FeS 的硫源同样来自湖水和沉积物,因为在缺氧/厌氧条件下,间隙水中高浓度 Fe^{2+} 得以向上覆水体释放,而水体中丰富的 SO_4^{2-} 可能被大量生长的 SRB 还原生成硫化氢,二者反应生成 FeS 类物质,从而使得水体呈现黑色^[18,19]. 蛋白胨、蛋氨酸和半胱氨酸等含硫有机物质作用下水体发黑的速度更快,颜色更深. 由于这类物质分解后以硫化物形式释放出来,更多地与 Fe^{2+} 结合形成黑色的 FeS ,使得水体颜色变得更黑,最高色度值分别达到为 1 200、410 和 430 度. 与蛋氨酸相比,蛋白胨和半胱氨酸使水体变黑的速度更快,颜色更深. 原因可能性是蛋白胨为蛋白质经酸、碱或蛋白酶分解后的混合产物,其中

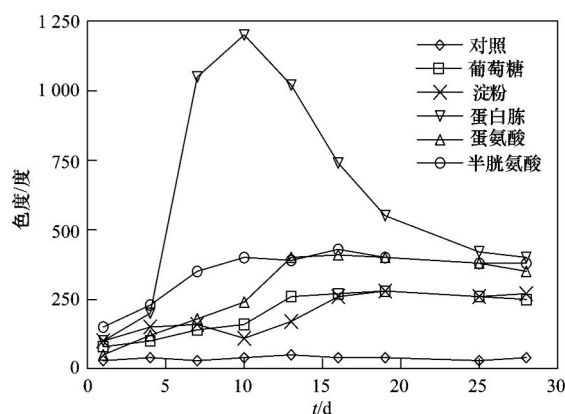


图 3 不同类型有机质下水体色度变化过程

Fig. 3 Time course of water chromaticity during the degradation of different types of organic matters

含硫物质成分较复杂,其中可能存在半胱氨酸以及较半胱氨酸更快速释放出硫化氢的某些组分,使水体快速变黑. 值得注意的是,蛋白胨处理的色度在第 15 d 达到峰值后显著降低,由于在湖泛过程中造成水体发黑的主要原因是厌氧条件下生成的以 FeS 为代表的大量金属硫化物,当氧化还原环境改变时(如水体复氧), FeS 等金属硫化物被氧化成高价态的氧化物,使得湖泛水体黑色迅速消褪^[9]. 然而,在缺乏与外界气体交换的密闭体系内,蛋白胨处理水体黑色同样出现了较迅速的消褪,可能是由于体系中释放出的大量 Fe^{2+} 与硫化氢结合生成大量的 FeS ,高密度的 FeS 分子相互碰撞并絮凝沉淀,从而使水体颜色迅速消褪. 当水中悬浮的 FeS 分子减少到能维持相对稳定状态后,色度随时间的变化较为平稳.

2.2 不同种类有机基质的致臭作用

在嗅觉上,蛋白胨、蛋氨酸和半胱氨酸引起的臭味极强烈、刺鼻. 与对照相似,葡萄糖和淀粉引起的臭味均非常弱. 从图 4 可以看出,实验中检测到的挥发性硫化物种类主要有 MTL、DMS、DMDS、DMTS 和 DMTeS ,然而不同处理中挥发性硫化物的种类和数量均有差异(图 5).

蛋白胨处理释放的 VOSCs 仅次于蛋氨酸处理, VOSCs 总量在第 8 d 达到最高值 $197.7\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,除 MTL 外, DMS、DMDS、DMTS 和 DMTeS 均能检测到,但含量远低于蛋氨酸所产生的数量. 蛋白胨降解初期(前 10 d)释放 VOSCs 的速率快于其他类型有机负荷,但后期缺乏持续性(图 5),表明作为蛋白质水解后的混合产物,蛋白胨中的含硫组分数量比较可观,且含硫组分易于分解转化为 VOSCs. 虽然

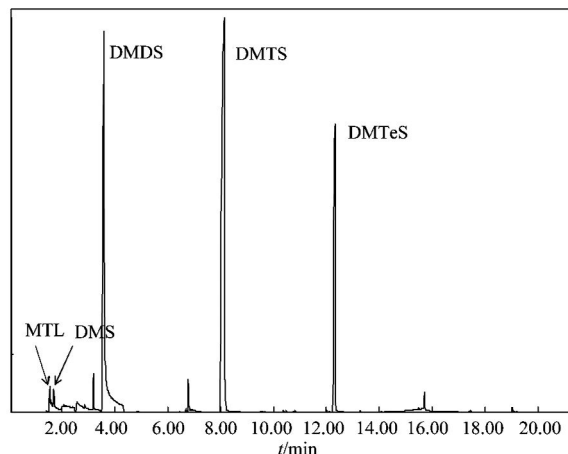


图 4 实验中典型样品的 VOSCs 总离子流色谱图

Fig. 4 Typical gas chromatogram of VOSC species obtained from water samples in this study

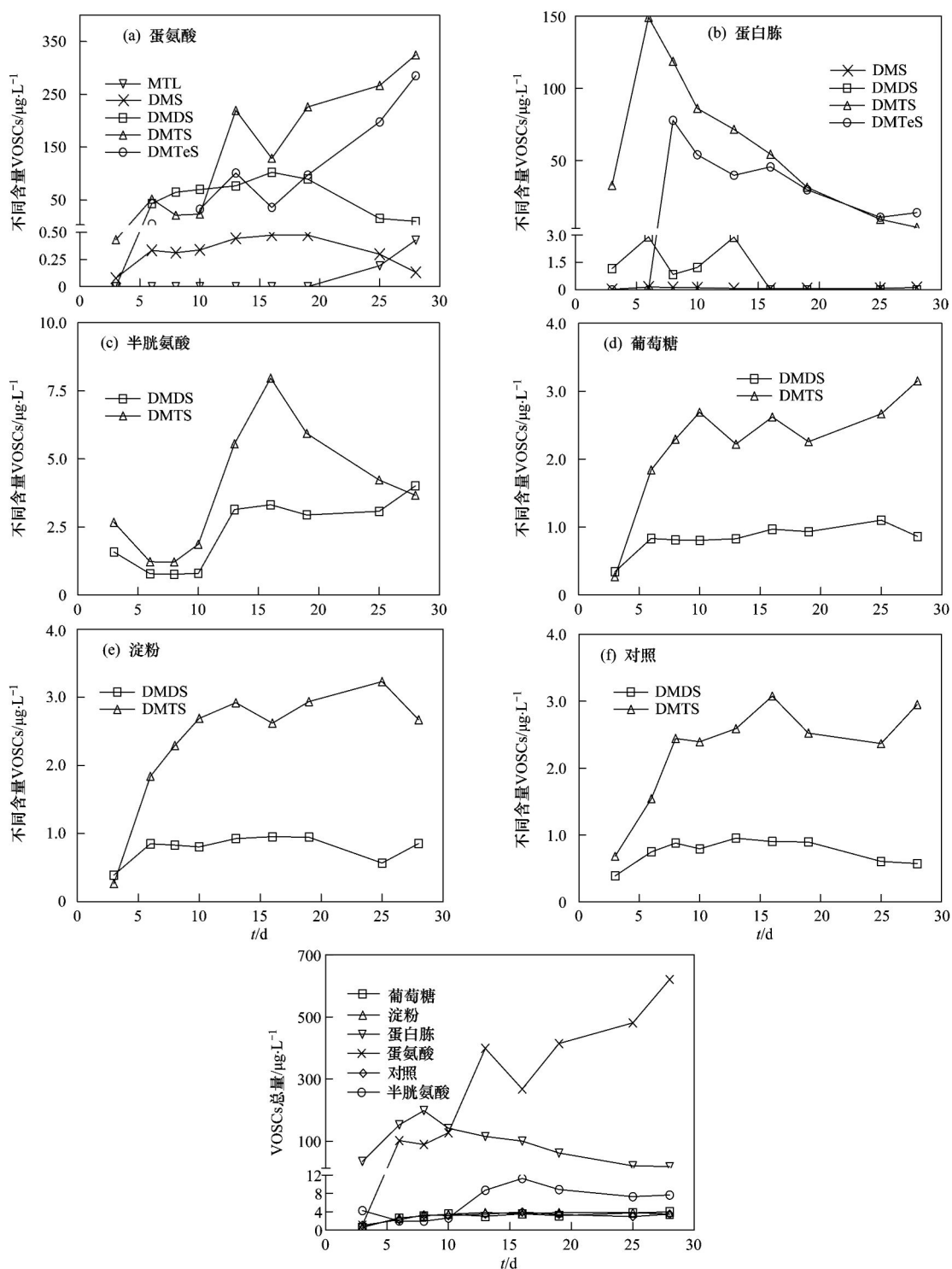


图5 不同种类有机基质作用下产生的 VOSCs 种类及总量随时间的变化

Fig. 5 Dynamics of five VOSC species: MTL, DMS, DMDS, DMTS, DMTeS and total VOSCs in different treatments with durations

半胱氨酸为含硫氨基酸,然而其释放 VOSCs 的量远远低于蛋氨酸和蛋白胨处理的,略高于不含硫的葡萄糖和淀粉处理,检测到的 VOSCs 种类也只有 DMDS 和 DMTS, VOSCs 总量在第 16 d 达到最高值 $11.3 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 结合半胱氨酸强烈的致黑作用,可以推测半胱氨酸中的硫主要转化为硫化氢. 经测定收

集到的气体,发现其中硫化氢的含量异常的高,同时含有微量 MTL 和 DMS,其他 VOSCs 种类则未检出. 表明半胱氨酸所含的硫主要转化为硫化氢形式,而其他 VOSCs 形态则很少,这与前人的研究结果相一致^[20,21]. 葡萄糖和淀粉本身并不含硫,其厌氧降解能使沉积物中的硫被动释放出来,使水体一定程度

地变黑,但自身不会产生含硫臭味物质.与对照处理相似,其中产生的少量 DMDS 和 DMTS 主要来自于沉积物和湖水中残留的含硫有机物,产生的 VOSCs 总量很相近,最高值约为 $4.0 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.虽然蛋白胨同时具备致黑、致臭的作用,但由于其本身是混合物,无法明确其中引起黑臭的组分.而半胱氨酸、葡萄糖和淀粉主要对致黑过程起作用.相比之下,蛋氨酸降解既能产生大量的致臭物质 VOSCs,其降解产物中的硫化氢同时又能引起水体变黑.以上研究结果表明,蛋氨酸是黑臭的主要前驱物之一,黑臭中致黑和致臭是相互独立,又相互联系的两个过程.

2.3 不同微生物类群在黑臭过程中的作用

2.3.1 微生物在蛋氨酸降解中的作用

根据以上实验结果,确定蛋氨酸为黑臭前驱物进行研究.从不同处理蛋氨酸的降解率来看(图6),添加 SRB 的降解率明显高于其他处理,培养 35 d 后降解率达到 95%.然后依次是添加 BES(甲烷菌抑制剂)处理、对照处理、添加钨酸盐(SRB 抑制剂)处理和灭菌处理,培养 35 d 的降解率分别为 74%、71%、67% 和 30%.与对照相比,SRB 抑制剂对蛋氨酸降解有一定的抑制作用,而添加 SRB 菌液对蛋氨酸降解的显著促进作用进一步证实了 SRB 在蛋氨酸降解过程中的重要作用,两者之间的差别又说明了自然水体中 SRB 数量与实验添加的相比要少得多.产甲烷菌抑制剂 BES 对蛋氨酸降解的促进作用说明了产甲烷菌对蛋氨酸降解有抑制的趋势,但两者之间差异并不显著.前人研究表明添加甲烷菌抑制剂能使蛋氨酸降解产生的 MTL 和 DMS 增加^[22,23],虽然研究中未测定蛋氨酸的降解率,但也可以说明甲烷菌可能通过阻碍蛋氨酸降解

产物,如 MTL 和 DMS 的产生进而抑制蛋氨酸的降解.值得注意的是灭菌处理中蛋氨酸仍有一定程度的降解,说明生物降解并非蛋氨酸降解的唯一途径,还有其他非生物途径如水解、光解、还原和氧化分解能使蛋氨酸降解.

2.3.2 微生物对致黑过程的贡献

灭菌处理颜色始终未变黑,SRB 处理第 8 d 变黑,然后依次是 BES 处理第 12 d、对照处理第 13 d、钨酸钠处理第 17 d 变黑.灭菌处理中蛋氨酸虽然也有相当部分发生分解,但颜色始终未变化,可能有 2 个原因,一是缺乏生物降解途径蛋氨酸无法彻底降解为硫化氢;二是由于有机物分解总量较少,降解过程消耗的溶氧少,体系厌氧程度达不到将 Fe^{2+} 释放的还原条件.经测定,灭菌处理中氧化还原电位 ORP 值随时间从 285 mV 逐渐降低至 45 mV,由于整个实验过程中 pH 值在 7.34 ~ 8.33 之间,此条件下 ORP 值要降至 -100 mV 左右才有显著的 Fe^{2+} 出现^[24].此外灭菌后 SRB 的缺失也使得水体中的 SO_4^{2-} 无法还原为硫化氢,使水体不能变黑.相比之下,添加 SRB 处理体系的 ORP 值在第 5 d 迅速下降至最低值 -163 mV,因而 SRB 的致黑作用是显而易见的.此外,由于 SRB 不仅能有效降解含硫氨基酸,释放出硫化氢;而且能将水体中丰富的 SO_4^{2-} 还原为硫化氢,从而使水体快速变黑^[25].BES 有使水体加速变黑的趋势,并且与对照相比收集到的气体中硫化氢含量有所增加,说明 BES 能使蛋氨酸降解生成更多的硫化氢,使水体加速变黑,也就是说产甲烷菌能抑制硫化氢生成,延迟水体变黑的时间.

2.3.3 微生物在致臭过程的作用

蛋氨酸降解产生的 VOSCs 以 DMDS、DMTS、DMTeS 为主,MTL 和 DMS 的含量不到 0.5%.研究表明 MTL 在水中不稳定,极易被化学氧化为 DMDS、DMTS、DMTeS 等二甲基多硫化物,加之强挥发性,因此在水中含量较低^[26,27].DMS 含量低的原因除了也比较容易挥发之外,其产生途径与 MTL、DMDS、DMTS 和 DMTeS 不同,在蛋氨酸降解中为次要途径,产生的量较少^[28].SRB 能使产生的挥发性硫化物总量明显增加,在前 15 d 尤为明显,随后 VOSCs 总量有明显下降,表明 SRB 能使蛋氨酸中的硫快速释放出来(图7).尽管 BES 有促进蛋氨酸降解的趋势,但水样中 VOSCs 的总量并无明显变化,从图7可以看出 BES 处理中 MTL、DMS 的含量明显高于对照处理,但 DMDS、DMTS 以及

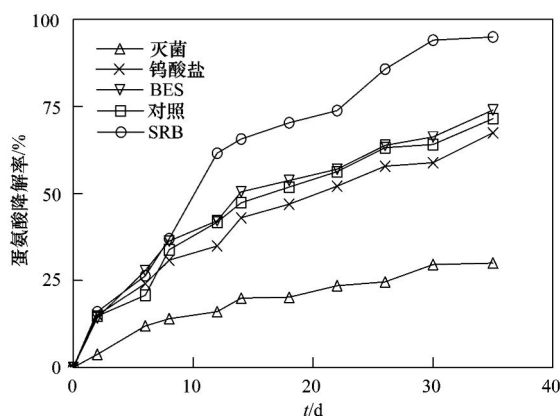


图6 不同微生物类群对蛋氨酸降解过程的影响

Fig. 6 Variation of degradability of methionine influenced by microbial activity with durations

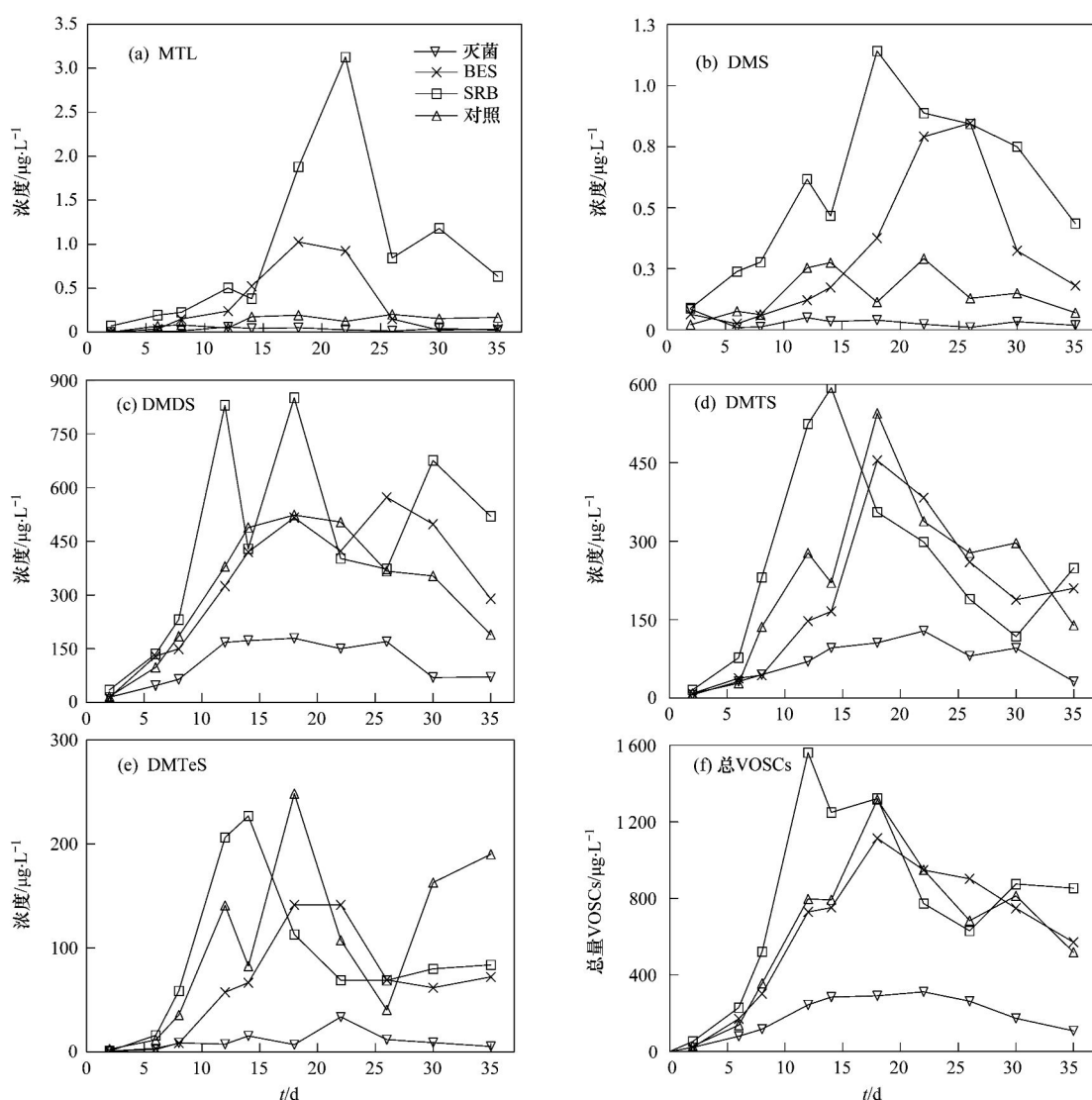


图7 微生物作用下蛋氨酸降解产生的不同种类 VOSCs 及总量随时间的变化

Fig. 7 Dynamics of five VOSC species: MTL, DMS, DMDS, DMTS, DMTeS and total VOSCs produced from methionine degradation influenced by microbial activity with durations

DMTeS 的含量与对照相比无显著差异。气体样品测定结果表明 BES 处理中 MTL、DMS 和硫化氢的含量略高于对照处理中的,说明甲烷菌主要对小分子的 MTL、DMS 甚至是无机的硫化氢的形成有影响,而对蛋氨酸降解产生的其他大分子挥发性硫化物种类如 DMDS、DMTS 等的影响很小。由于水样中 VOSCs 以 DMDS、DMTS、DMTeS 为主,因此水样中 VOSCs 总量并未表现出增加趋势。尽管灭菌处理始终未变黑,但仍有一定的蛋氨酸降解为 VOSCs,以 DMDS、DMTS、DMTeS 为主,而小分子的 DMS 与中间产物 MTL 含量则非常少。此外,未收集到气体可以排除 DMS、MTL 和硫化氢挥发到气态中的可能性,说明非生物降解途径下蛋氨酸主要转化为大分子的挥发性硫化物,而微生物降解才能使蛋氨酸

更容易转化为 DMS 和硫化氢。

3 结论

(1) 无论有机物是否含硫,只要达到一定负荷水平 ($1.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) 对水体均有致黑作用,但不同种类有机物致黑效果不同,含硫有机物使水体变黑的时间更快、颜色更深。从致臭物质的产生情况来看,只有含硫有机物如蛋白胨、蛋氨酸和半胱氨酸等才具有致臭作用,其中蛋氨酸产生的 VOSCs 最多,以 DMDS、DMTS 和 DMTeS 为主,因此可以确定蛋氨酸为 VOSCs 的主要前驱物之一。

(2) 蛋氨酸以生物降解为主,SRB 是水环境中重要的蛋氨酸降解菌之一,能使蛋氨酸快速分解为不同种类的 VOSCs 和硫化氢,引起水体黑臭;产甲

烷菌对蛋氨酸降解有抑制的趋势,其存在对 DMDS、DMTS 和 DMTeS 的产生无显著影响,但可能会抑制小分子硫化物的形成,推迟黑臭暴发时间. 非生物降解是蛋氨酸降解的次要途径,仅能使蛋氨酸发生初步降解,彻底分解还需要与生物降解相配合.

参考文献:

- [1] Guo L. Doing battle with the green monster of Taihu Lake[J]. Science, 2007, **317**(5842): 1166.
- [2] 孔繁翔, 胡维平, 谷孝鸿, 等. 太湖梅梁湾 2007 年蓝藻水华形成及取水口污水团成因分析与应急措施建议[J]. 湖泊科学, 2007, **19**(4): 357-358.
- [3] 陆桂华, 马倩. 太湖水域“湖泛”及其成因研究[J]. 水科学进展, 2009, **20**(3): 438-442.
- [4] 陆桂华, 马倩. 2009 年太湖水域“湖泛”监测与分析[J]. 湖泊科学, 2010, **22**(4): 481-487.
- [5] Yang M, Yu J W, Li Z L, *et al.* Taihu Lake not to blame for Wuxi's woes[J]. Science, 2008, **319**(5860): 158.
- [6] Zhang X J, Chen C, Ding J Q, *et al.* The 2007 water crisis in Wuxi, China: Analysis of the origin[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, **182**(1-3): 130-135.
- [7] 刘国锋, 何俊, 范成新, 等. 藻源性黑水团环境效应: 对水-沉积物界面处 Fe、Mn、S 循环影响[J]. 环境科学, 2010, **31**(11): 2652-2660.
- [8] 刘国锋, 钟继承, 何俊, 等. 太湖竺山湾藻华黑水团区沉积物中 Fe、S、P 的含量及其形态变化[J]. 环境科学, 2009, **30**(9): 2520-2526.
- [9] 申秋实. 藻源性湖泛致黑物质的物化特征及其稳定性研究[D]. 南京: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 2011. 50-58.
- [10] 钱嫦萍, 陈振楼, 王东启. 城市河流黑臭的原因分析及生态危害[J]. 城市环境, 2002, **16**(3): 21-23.
- [11] Kiene R P, Linn L J. The fate of dissolved dimethylsulfoniopropionate (DMSP) in seawater: tracer studies using ³⁵S-DMSP[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2000, **64**(16): 2797-2810.
- [12] Ginzburg B, Dor I, Chalifa I, *et al.* Formation of dimethyloligosulfides in Lake Kinneret: Biogenic formation of inorganic oligosulfide intermediates under oxic conditions[J]. Environmental Science and Technology, 1999, **33**(4): 571-579.
- [13] Gun J, Goifman A, Shkrob I, *et al.* Formation of polysulfides in an oxygen rich freshwater lake and their role in the production of volatile sulfur compounds in aquatic systems[J]. Environmental Science and Technology, 2000, **34**(22): 4741-4746.
- [14] 戴玄吏, 汤佳峰, 章霖之. “湖泛”恶臭物质分析及来源浅析[J]. 环境监控与预警, 2010, **2**(3): 39-41.
- [15] 李克朗. 太湖蓝藻资源化利用可行性研究[D]. 无锡: 江南大学, 2009. 12-13.
- [16] 范良民. 滇池蓝藻成份分析及利用途径探讨[J]. 云南环境科学, 1999, **18**(2): 46-47, 36.
- [17] McCarthy T E, Sullivan M X. A new and highly specific colorimetric test for methionine [J]. Journal of Biological Chemistry, 1941, **141**(3): 871-876.
- [18] Duval B, Ludlam S D. The black water chemocline of meromictic Lower Mystic Lake, Massachusetts, USA [J]. International Review of Hydrobiology, 2001, **86**(2): 165-181.
- [19] Stahl J B. Black water and 2 peculiar types of stratification in an organically loaded strip-mine lake[J]. Water Research, 1979, **13**(5): 467-471.
- [20] Bloes-Breton S, Bergère J L. Production de composés soufrés volatils par des *Micrococcaceae* et des bactéries corynéformes d'origine fromagère[J]. Lait, 1997, **77**(5): 543-559.
- [21] Lopez del Castillo Lozano M, Tache R, Bonnarne P, *et al.* Evaluation of a quantitative screening method for hydrogen sulfide production by cheese-ripening microorganisms: The first step towards L-cysteine catabolism [J]. Journal of Microbiological Methods, 2007, **69**(1): 70-77.
- [22] Demarigny Y, Berger C, Desmasures N, *et al.* Flavour sulphides are produced from methionine by two different pathways by *Geotrichum candidum*[J]. Journal of Dairy Research, 2000, **67**(3): 371-380.
- [23] Kiene R P, Visscher P T. Production and fate of methylated sulfur compounds from methionine and dimethylsulfoniopropionate in anoxic salt marsh sediments[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1987, **53**(10): 2426-2434.
- [24] 戴树桂. 环境化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1996. 216-217.
- [25] Jørgensen B B, Weber A, Zopfi J. Sulfate reduction and anaerobic methane oxidation in Black Sea sediments[J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 2001, **48**(9): 2097-2120.
- [26] Chin H W, Lindsay R C. Ascorbate and transition-metal mediation of methanethiol oxidation to dimethyl disulfide and dimethyl trisulfide[J]. Food Chemistry, 1994, **49**(4): 387-392.
- [27] Arfi K, Spinnler H E, Tache R, *et al.* Production of volatile compounds by cheese-ripening yeasts: requirement for a methanethiol donor for S-methyl thioacetate synthesis by *Kluyveromyces lactis* [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2002, **58**(4): 503-510.
- [28] Bonnarne P, Psoni L, Spinnler H E. Diversity of L-methionine catabolism pathways in cheese-ripening bacteria[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2000, **66**(12): 5514-5517.

CONTENTS

CH ₄ Concentrations and the Variation Characteristics at the Four WMO/GAW Background Stations in China	FANG Shuang-xi, ZHOU Ling-xi, XU Lin, <i>et al.</i> (2917)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation over Northeast China and Its Water Vapor Sources	LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, MA Qian, <i>et al.</i> (2924)
Study on Air Quality and Pollution Meteorology Conditions of Guangzhou During the 2010 Asian Games	LI Ting-yuan, DENG Xue-jiao, FAN Shao-jia, <i>et al.</i> (2932)
Characteristics and Sources of PM ₁₀ -bound PAHs During Haze Period in Winter-Spring of Xiamen	QIAN Ran-ran, YAN Jing-ming, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (2939)
Improvement and Application of the Method for Determination of OCEC Split	WANG Li-hua, DONG Hua-bin, YAN Cai-qing, <i>et al.</i> (2946)
Characteristics of Mercury Pollution in Soil and Atmosphere in Songhua River Upstream Jia-pi-gou Gold Mining Area	ZHANG Gang, WANG Ning, WANG Yuan, <i>et al.</i> (2953)
Pollution Characteristics and Health Assessment of Particulate Mercury in Hebei Rural Households	ZHAO Ya-juan, GONG Wei-wei, LUAN Sheng-ji (2960)
Composition and Characteristics of Volatile Organic Chemicals Emission from Printed Circuit Board Factories	MA Ying-ge (2967)
Preliminary Study Concerning Emissions of the Volatile Organic Compounds from Cooking Oils	HE Wan-qing, TIAN Gang, NIE Lei, <i>et al.</i> (2973)
Characteristics of Biofilm Phase During the Long-term Degradation of a Toluene-contaminated Gas Stream Using BTF	HU Jun, ZHENG Jiang-ling, WU Yue-xin, <i>et al.</i> (2979)
Performance of Cross Flow Trickling Filter for H ₂ S Gas Treatment	LIU Chun-jing, LI Jian, LIU Jia, <i>et al.</i> (2987)
Study on Mercury Re-emissions During Fly Ash Utilization	MENG Yang, WANG Shu-xiao (2993)
Construction of Semi-analytical Model for Inversing Total Suspended Matter in Lake Taihu and Chaohu and Assessment of Its Applicability	LIU Zhong-hua, LI Yun-mei, TAN Jing, <i>et al.</i> (3000)
Association Study Between Water Quality of Chaohu Lake and Resources Input in Agriculture of Basin	ZHANG Yan, GAO Xiang, ZHANG Hong (3009)
Sediment and Pore Water Nutrient Characteristics in Growing Zones of <i>Alternanthera philoxeroides</i> in the Shiwuli River, Chaohu Lake	LI Ru-zhong, LI Feng, ZHOU Ai-jia (3014)
Enrichment Characteristic of Phosphorus in Surface and Core Sediments of Chaohu Lake and the Pollution Quantification	LIU En-feng, DU Chen-chang, YANG Xiang-dong, <i>et al.</i> (3024)
Spatial Distribution Characteristics and Correlation Analysis of Organic Matter, Total Nitrogen and Total Phosphorus in Topsoil Around Chaohu Lake	CHEN Shu-qin, CHU Zhao-sheng, HU She-rong, <i>et al.</i> (3031)
Dynamic Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in the Representative Input Tributaries of Danjiangkou Reservoir	LEI Pei, ZHANG Hong, SHAN Bao-qing (3038)
Effects of Thermal Stratification on Spring Blooms in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	LIU Liu, LIU De-fu, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (3046)
Explore the Spatial and Temporal Patterns of Water Pollution in the Yincungang Canal of the Lake Taihu Basin, China	YANG Xiao-ying, LUO Xing-zhang, ZHENG Zheng, <i>et al.</i> (3051)
Analysis on the Forms and Release Potential of Nutrients in Sediments from Lakes in the West Jiangsu Province	LIU Tao, HU Zhi-xin, YANG Liu-yan, <i>et al.</i> (3057)
Spatial Distribution and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Surface Sediments from Western Lakeside Belt of Lake Taihu	GAN Shu, LU Shao-yong, QIN Pu-feng, <i>et al.</i> (3064)
Source Apportionment of Nitrogen and Phosphorus from Cropping Non-point Source Pollution in Nansi Lake Basin	LIU Jing, LU Feng, YANG Yan-zhao, <i>et al.</i> (3070)
Relationship Between Dissolved Organic Carbon and DBP in the Pearl River Water	HE Hong-wei, ZHOU Da-cheng, WANG Bao-qiang, <i>et al.</i> (3076)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Typical Township Water Sources in Dongjiang River Basin	WANG Ruo-shi, XU Qiu-jin, ZHANG Xian, <i>et al.</i> (3083)
Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediments of Maozhou River, Shenzhen	SUN Jian-lin, NI Hong-gang, DING Chao, <i>et al.</i> (3089)
Distribution Patterns of Heavy Metals in Surficial Sediment and Their Influence on the Environment Quality of the Intertidal Flat of Luoyuan Bay, Fujian Coast	GAO Wen-hua, DU Yong-fen, WANG Dan-dan, <i>et al.</i> (3097)
Study on the Changes of Macrobenthos Communities and Their Causes in Bohai Bay	CAI Wen-qian, LIU Lu-san, QIAO Fei, <i>et al.</i> (3104)
Construction of Groundwater Contamination Prevention Mapping System	WANG Jun-jie, HE Jiang-tao, LU Yan, <i>et al.</i> (3110)
Uncertainty Analysis of Groundwater Protection and Control Zoning in Beijing Plain	LU Yan, HE Jiang-tao, WANG Jun-jie, <i>et al.</i> (3117)
Nitrate Storage and Transport Within a Typical Karst Aquifer System in the Paralleled Ridge-valley of East Sichuan	YANG Ping-heng, YUAN Dao-xian, REN You-rong, <i>et al.</i> (3124)
Adsorption of Perfluorooctanesulfonate (PFOS) onto Modified Activated Carbons	TONG Xi-zhen, SHI Bao-you, XIE Yue, <i>et al.</i> (3132)
Investigation of the Oxidation Reaction of O ₃ with Bromide Ion in Aqueous Solution	YU Xiao-ting, ZHANG Jia-hui, PAN Xun-xi, <i>et al.</i> (3139)
Determination of the Distribution of Relative Molecular Mass of Organic Matter by High Pressure Size Exclusion Chromatography with UV and TOC Detectors	ZHANG Han, DONG Bing-zhi (3144)
Black Water Bloom Induced by Different Types of Organic Matters and Forming Mechanisms of Major Odorous Compounds	LU Xin, FENG Zi-yan, SHANG Jing-ge, <i>et al.</i> (3152)
Effect of Fe and Fe/Ni Nanoparticles on the Biodegradation of Phenol by BFN at Different pH Values	KUANG Ye, ZHOU Yan, WANG Qing-ping, <i>et al.</i> (3160)
Pretreatment of High-Concentration Acrylic Acid Wastewater by the Multi-Stage Microaerobic Biological Fluidized Bed Reactor	LI Sha, ZHENG Sheng-zhi, SONG Yu-dong, <i>et al.</i> (3167)
Denitrification on Secondary Effluent of Acrylic Fiber Wastewater by Tri-Stage Biofilm Advanced Reactor	XU Shao-yang, JIANG Jin-yuan, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (3172)
Dynamic Adsorption of Cadmium (II) in Water on Modified Peanut Shells	LONG Teng, YI Xiao-yun, DANG Zhi (3177)
Adsorption Properties of Thiocyanate Anion on Granular Mg/Al Mixed Oxides	WANG Xiu-juan, WANG Hai-zeng, SUN Bao-wei, <i>et al.</i> (3182)
Model of Regularity of Ammonia Transformation Along Marine Biological Aerated Filter	LUO Rong-qiang, HOU Sha-sha, SHEN Jia-zheng, <i>et al.</i> (3189)
Aerobic Granular Sludge Bulking Due to the Lack of Nutrient and Its Recovery	ZHANG Zhu, GAO Da-wen, YUAN Xiang-juan, <i>et al.</i> (3197)
Enhanced Hydrolysis of Waste Activated Sludge by Biosurfactant	YI Xin, LUO Kun, YANG Qi, <i>et al.</i> (3202)
Enrichment and Identification of Anaerobic Ammonium Oxidation Bacteria	LIU Dong-ying, QIU Yan-ling, YUAN Xian-zheng, <i>et al.</i> (3208)
Isolation, Identification and Characterization of an Atrazine Degrading Bacterium	LI Shao-feng, ZHU Jing, LI Tie-jing (3214)
Isolation, Identification and Enzymological Characterization of a New Fungal with High Laccase Production from Agricultural Waste Composting	REN Xiu-juan, FAN Chang-zheng, LU Lun-hui, <i>et al.</i> (3220)
Screening and Identification of Microorganisms for Decolorization of Molasses Spent Wash	LI Bi-jin, LIU You-yan, HE Kai, <i>et al.</i> (3228)
Analysis of Microbial Community Structure in Lactic Acid Fermentation from Kitchen Waste	LIU Jian-guo, WANG Qun-hui, WANG Shuang, <i>et al.</i> (3236)
Effect of Covalent Functionalization on DNA Cleavage Activity and ROS Formation of Single-Walled Carbon Nanotubes	WU Ren-ren, TAO Xue-Qin, DANG Zhi, <i>et al.</i> (3241)
Research on Mercury Methylation by <i>Geobacter sulfurreducens</i> and Its Influencing Factors	ZOU Yan, SI You-bin, YAN Xue, <i>et al.</i> (3247)
Uptake Effect of Cd and Pb by Rape Under Single Cd/Pb and Cd-Pb Combined Stress	WU Wen-fei, NAN Zhong-ren, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (3253)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Farming Domestic Muscovy Duck Originated from Au/Cu Mining and Smelting Activities	HANG Xiao-shuai, LIANG Bin, WANG Wen-lin, <i>et al.</i> (3261)
Effects of the Environmental Hormone Cypermethrin on the Reproduction of <i>Brachionus calyciflorus</i>	DONG Xue-xing, YANG Jia-xin, LÜ Lin-lan, <i>et al.</i> (3266)
Research on Anti-Corrosion of <i>Thiobacillus</i> for the Geopolymer Solidification MSWI Fly Ash	JIN Man-tong, SUN Xin, DONG Hai-li, <i>et al.</i> (3272)
Chlorination Transformation and Volatilization of Heavy Metals in Fly Ash from the Incineration During the Disposal Process with Higher Temperature	LIU Jing-yong, SUN Shui-yu (3279)
Study on Greenhouse Gas Emissions from Urban Waste Disposal System; A Case Study in Xiamen	YU Yang, CUI Sheng-hui, LIN Jian-yi, <i>et al.</i> (3288)
Fate Analysis of NPEOs and Their Metabolites in Municipal Wastewater Plants	LIAN Jing, LIU Jun-xin (3295)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2012年9月15日 33卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 9 Sep. 15, 2012

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in-Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市 2871 信箱(海淀区双清路 18 号, 邮政编码: 100085) 电话: 010-62941102, 010-62849343 传真: 010-62849343 E-mail: hjkx@rcees.ac.cn http://www.hjkx.ac.cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel: 010-62941102, 010-62849343; Fax: 010-62849343 E-mail: hjkx@rcees.ac.cn http://www.hjkx.ac.cn
出 版	科学出版社 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印刷装订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科学出版社 电话: 010-64017032 E-mail: journal@mail.sciencep.com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@mail.sciencep.com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京 399 信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 70.00 元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行