

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.22.014

饮用水中典型臭味问题及其研究进展

郭庆园^{1,2}, 王春苗^{2,3}, 于建伟^{2,3}, 丁成¹, 陈天明¹, 李朝霞¹, 李璇¹,
马卫星¹, 杨敏^{2,3}

(1. 盐城工学院 环境科学与工程学院, 江苏 盐城 224051; 2. 中国科学院 饮用水科学与
技术重点实验室, 北京 100085; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 臭味是评价饮用水水质的最直观指标之一,有效识别饮用水中的臭味、解析臭味产生原因以及控制臭味,对供水行业的水质管理具有重要的意义。对饮用水中常见的臭味类型、产生原因以及针对性的控制技术进行了总结,全面阐述了从源头到龙头过程中土霉味、腥臭味、化学味等臭味的产生条件以及吸附、氧化、生物降解等去除技术,旨在为供水行业内饮用水臭味预判、干预和控制提供一定的借鉴和参考。

关键词: 饮用水; 土霉味; 腥臭味; 鱼腥味; 化学味; 臭味物质

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)22-0082-07

Research Progress on Typical Taste and Odor Problems in Drinking Water

GUO Qing-yuan^{1,2}, WANG Chun-miao^{2,3}, YU Jian-wei^{2,3}, DING Cheng¹, CHEN Tian-ming¹,
LI Zhao-xia¹, LI Xuan¹, MA Wei-xing¹, YANG Min^{2,3}

(1. College of Environmental Science & Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, China; 2. Key Laboratory of Drinking Water Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The taste and odor is one of the most obvious indexes to evaluate drinking water quality. It is important for water quality management of waterworks and water supply industry to identify, evaluate and analyze, and control the taste and odor and corresponding compounds in drinking water. In this paper, the frequently-occurred types and origins of the taste and odor in drinking water, and the removal technology were reviewed. The generation of the taste and odor, including musty, septic and chemical, etc., as well as the removal techniques of adsorption, oxidation and biodegradation, are expounded from source water to tap water, so as to provide a reference for prediction, intervention and control in drinking water.

Key words: drinking water; musty odor; septic odor; fishy odor; chemical odor; the taste and odor compound

饮用水中的臭味问题一直受到供水企业和消费者的普遍关注。近几年来关于我国水体臭味问题多

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(21707117、51778602); 中国博士后科学基金资助项目(2018M631602); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2015ZX07406001、2017ZX07207004)

通信作者: 于建伟 E-mail: jwyu@rcees.ac.cn

有报道,无锡、杭州等城市的饮用水中均发生过相关的臭味问题^[1-2],臭味已经成为影响供水水质达标的主要问题之一。我国的饮用水水质调查发现臭味问题普遍存在,80%的原水、45%的出厂水具有不同程度的臭味^[2]。除常见土霉味问题外,对腥臭味、鱼腥味、化学味等臭味问题的关注度也越来越高^[3],而保证饮用水中无明显异味一直是供水企业和行业管理的主要目标之一。

1 饮用水中典型臭味类型及其致嗅物质

关于饮用水中臭味及其嗅物质的分类,国际水协会(IWA)水环境臭味专家委员会的学者专家将资料进行了整理,定义了饮用水的臭味轮^[4],臭味轮中将饮用水的臭味分成3类13种,其中包括8种嗅觉异味、4种味觉异味和1种口鼻异感。其中味觉异味主要包括酸、甜、苦、咸四种,嗅觉异味则包括土霉味、氯味/臭氧味、草味/干草味/木材味、腐败味/沼泽味/硫味、芳香味/水果味/蔬菜味/花香味、鱼腥味、药味、化学品味/烃味/杂味。但是臭味轮仅给出了部分臭味类型对应的几种典型致嗅物质,还有很多臭味类型对应的致嗅物质并不明确,饮用水臭味轮还有待于进一步完善。

近年来国内饮用水的臭味问题多有报道,例如太湖的腥臭味、土霉味,黄浦江的腐败味、青草味,以及内蒙古黄河水源结冰期的异臭味和鱼腥味,可以看出饮用水臭味事件分布范围较广,是一个普遍性的问题,而且近年来发生的臭味事件多与化学品泄漏、环境污染等人为因素有关,制水企业面临的臭味问题非常严峻。“十一五”水专项对我国34个重点城市111座饮用水厂的水质调查表明,我国饮用水的臭味类型以土霉味、沼泽/腥臭味为主,其在原水中的发生率分别达到41%、36%^[2]。湖库水源中以土霉味为主,河流水源中的臭味问题则更为复杂,河流类开放性水源容易受到污染影响,通常臭味类型以沼泽/腥臭味为主^[5]。其他臭味类型还有鱼腥味、果蔬味、花香味、草木味、氯味、臭氧味等^[6]。

1.1 土霉味

土霉味是饮用水中最常见的臭味类型,藻类及放线菌代谢过程中产生的萜类化合物2-甲基异莰醇(2-MIB)、土臭素是引起饮用水土霉味的重要原因^[4]。土臭素具有很强的土味,嗅阈值(OTC)仅有4 ng/L,最早是从放线菌、藻类培养中分离得到^[4];2-MIB的OTC报道为10 ng/L,可以从藻类(如蓝

绿藻)培养中分离得到^[5]。已报道的可以产生土霉味的藻中,浮游性藻类约占32%,附着性藻类约占68%。产生2-MIB的藻主要为底栖藻的颤藻属、席藻属,该藻属主要分布在水边、岸边带等光照充足的地方,在生长的一定阶段会脱离基质而上浮至水的上层^[6]。产生土臭素的藻类主要包括颤藻属、席藻属、鱼腥藻属等。另外,铜绿微囊藻、鱼腥藻、颤藻等都被报道能够产生此类嗅物质^[7]。

此外,2,4,6-三氯茴香醚、2-异丙基-3-甲氧基吡嗪、2-异丁基-3-甲氧基吡嗪都具有明显的土霉味,其中2,4,6-三氯茴香醚主要通过三氯苯酚的生物甲基化作用而形成,容易导致配水管网中的异味问题^[6]。文献报道这类嗅物质的嗅阈值非常低,2,4,6-三氯茴香醚、2-异丙基-3-甲氧基吡嗪和2-异丁基-3-甲氧基吡嗪的嗅阈值分别为0.03、0.2和1 ng/L^[4]。

1.2 腥臭味

相对于土霉味而言,导致饮用水腥臭味/腐败味/沼泽味的原因更加复杂,涉及可能的致嗅物质种类更多。其中由微生物厌氧活动产生的含硫化合物是一类典型的腐败恶臭类物质,典型的含硫化合物可以分为硫醇(甲硫醇、二甲基硫醇等)、硫醚(二甲基二硫醚、二甲基三硫醚及其他二甲基多硫化合物)等物质^[3];按化合物中硫原子的数目,硫醚类化合物又可以分为单硫化合物(二甲基硫醚、二乙基硫醚、二丙基硫醚、二丁基硫醚、二戊基硫醚、二异丙基硫醚、二异丁基硫醚、二异戊基硫醚等)和多硫化合物(二甲基二硫醚、二甲基三硫醚、二乙基二硫醚等)。硫醚类化合物嗅阈值较低,其中二甲基三硫醚、二甲基二硫醚和二乙基二硫醚的嗅阈值分别为10、30和20 ng/L^[8]。我国《恶臭污染物排放标准》(GB 14554—93)中规定了8种重点监测恶臭物质,其中就包括二甲基硫醚和二甲基二硫醚。

2007年无锡饮用水突发臭味事件中,由漂流至取水口的污水团厌氧产生的二甲基三硫醚是导致臭味事件的原因,浓度高达11 399 ng/L^[1]。太湖藻类暴发腐烂期产生的二甲基硫醚、二甲基三硫醚的浓度曾高达62 331.8、12 413.3 ng/L^[9]。广东东莞运河排洪期间的水源中曾检出较高浓度的硫醇、硫醚类物质^[9],Galilee湖恶臭味问题是多甲藻暴发后产生的硫醚类物质引起的^[8]。另外,吡嗪、三甲基吡嗪等含氮化合物具有腥臭味、粪便臭味,对水体中腥

臭味/腐败味具有一定的贡献^[8]。该类化合物一般来源于水生生物的腐败或者含氮工业废水的排放。

1.3 鱼腥味

鱼腥味通常由藻类生长、腐败产生的胺类、不饱和和醛类等物质引起^[6],目前发现的鱼腥味嗅味物质有三甲胺、二甲胺、2,4-庚二烯醛、2,4-癸二烯醛、2,4,7-癸三烯醛、2,6-壬二烯醛等^[6,10]。1999年—2000年加拿大Glenmore湖在冰封期出现了严重的鱼腥味问题,研究发现锥囊藻大量繁殖产生的2,4-庚二烯醛、2,4-癸二烯醛、2,4,7-癸三烯醛导致了该嗅味问题^[11]。有研究发现,硅藻门的直链藻、脆杆藻可以产生2,4,7-癸三烯醛、2,4-庚二烯醛、2,4-辛二烯醛等不饱和醛类化合物^[11]。有报道发现水草腐败过程中也会产生2,4-庚二烯醛,进而导致水体的鱼腥味^[11]。我国某些水库在低温季节时有发生鱼腥味事件,2011年内蒙古某水库冰封期鱼腥味事件主要是由锥囊藻、针杆藻生长代谢产生的庚醛、2-辛烯醛、苯甲醛以及2,4-庚二烯醛等多种醛类物质引起^[11]。

1.4 果蔬/花香/草木味

醛类、酮类、醇类物质可引起果蔬/花香/草木味嗅味问题,典型的嗅味物质有2,6-壬二烯醛、 β -环柠檬醛、 β -紫罗兰酮、3-己烯-1-醇等。2,6-壬二烯醛作为一种藻类产生的不饱和脂肪酸衍生物,因具有强烈的黄瓜味又被称为黄瓜醛,嗅阈只有80 ng/L^[8]。 β -紫罗兰酮是一种具有强烈“紫罗兰味”“花香味”的嗅味物质,其嗅阈只有7 ng/L^[8]。3-己烯-1-醇、 β -环柠檬醛可引起水体的青草味和木头味^[8],在暴发异味的自来水配水系统中曾检出这两种物质^[6]。而且 β -环柠檬醛作为典型的藻类代谢产物在不同浓度下可呈现不同的嗅味特征,从高浓度到低浓度该物质的嗅味特征分别可描述为烟草味、木头味、干草味和青草味^[6]。

1.5 化学试剂味

溴甲烷、三碘甲烷、苯酚、2,4-二氯苯酚等卤代烃类、酚类化合物可以引起水体中化学试剂味、药味等问题^[8]。自来水加氯消毒可产生氯味,比如自由态、结合态的氯均会产生氯味^[12]。研究发现,消费者所能接受的氯味强度最高在6级(嗅味层次分析法测定),对应的水中余氯浓度约为0.15 mg/L^[12]。

2 嗅味产生原因

饮用水中嗅味的产生主要有自然、人为原因,导

致饮用水嗅味的自然原因有微生物、藻类、高等植物以及动物生长、代谢、腐败等活动;产生饮用水嗅味的人为原因主要是生活污染、工业污染、农药化肥、消毒剂以及供水管材、粘合剂等释放的化学物质^[3]。在湖库型水源中,藻类的生长代谢、细胞裂解腐败等自然因素产生的致嗅物质是导致嗅味问题的主要原因^[2];由于河流型水源易遭受外源污染,人类生活、生产排放的废物是导致其嗅味的主要原因^[2]。通常情况下,较难明确区分产生的嗅味问题到底是自然原因还是人为原因,比如藻类、水体植物的生长、代谢、腐败是水体嗅味产生的主要自然原因^[1,13],但是排放到水体中携带大量N、P等营养元素的生活污水、生产废水却是藻类、水体植物等过量生长的重要原因。因此,针对水源嗅味问题,只有同时解析其产生的自然、人为等原因,水源管理部门、供水水厂才能采取有效的嗅味预防和控制措施。

2.1 水源嗅味产生的原因

① 自然原因

水源嗅味产生的自然原因比较复杂,主要与微生物生长、代谢、降解、腐败等活动有关。调查发现,约1/2的饮用水源嗅味问题与藻类有关,多元不饱和和脂肪衍生物、有机硫化物、萜类及其衍生物、吡嗪类、胺类等藻源性嗅味物质均可导致水源嗅味问题^[2]。研究发现嗅味物质浓度与藻种属及其数量密切相关,关键藻密度值(嗅味物质浓度达到嗅阈值时藻的生长密度,CDC)常用于衡量藻在水中的产嗅能力,一种藻的CDC值越低,说明其产嗅能力越强。CDC值可为水厂嗅味管理提供预判,提前采取控制措施。

到目前为止已在200多种藻类的代谢产物中分离出2-MIB和土臭素,主要有颤藻属、束丝藻属、席藻属、鞘丝藻和鱼腥藻属等。硅藻代谢产物可以引起鱼腥味、青草味、芳香味等嗅味问题^[14]。近年来,在低温、贫营养化水体中由藻类导致的嗅味问题更是引起了人们的广泛关注,研究发现我国北方某引黄水库在低温及低N、P等营养元素条件下,当锥囊藻、针杆藻、小环藻的总数达到500个/mL以上时,可以产生中等强度的鱼腥味和土霉味(根据嗅味层次分析法测定鱼腥味为6级,土霉味为6级)^[11,14]。一般情况下,水中溶解性致嗅物质浓度仅占藻细胞内浓度的15%~22%。藻类产嗅能力往往受到很多内在因素(不同生长周期阶段)以及

气温、pH 值、溶解氧、氨氮、高锰酸盐指数等外在环境因素的影响。饮用水源中藻体种类多样,产嗅机理复杂,查找藻类致嗅原因面临一定的困难。研究发现,藻类细胞内不同的不饱和脂肪酸可以产生特异性的不饱和醛类化合物,比如 *Ochromonas* sp. 和 *Cryptomonas ovate* 细胞内的 6,9,12-十六碳三烯脂肪酸通过在碳-9 位置的脂肪氧合酶过氧化反应可以产生嗅味化合物 2,4-辛二烯醛,锥囊藻属细胞内的二十碳五烯酸通过在碳-11 位置的脂肪氧合酶过氧化反应可以产生嗅味化合物庚二烯醛和癸三烯醛^[4]。即使藻类种属非常相近,其细胞内不饱和脂肪酸的组成和生物代谢途径也可能是各种各样的^[4]。目前能够确认的产生嗅味问题的藻种比例仅占 0.5% 左右^[14]。因此,产嗅藻种的识别和鉴定对水体异味的预防、控制具有重要的意义。

自然界中存在的化学物质也可以引起水源中的嗅味,这类嗅味大部分与无机物有关,土壤表层中的矿物质、无机物(铁、钠、锰)被水冲刷溶解后,水体产生金属味和土腥味。当水域缺氧形成厌氧环境时,硫酸盐在还原细菌的作用下形成硫化氢,导致水体恶臭类的嗅味问题^[4]。放线菌的代谢活动也是导致水体土霉味问题的重要原因,通过地表径流放线菌进入水源中可导致水体严重的土霉味^[6]。目前已知有几十种可以产生 2-MIB 和土臭素的放线菌,其中链霉菌属可产生 2-MIB,诺卡氏菌属、链霉菌属等可产生土臭素^[6]。在水体缺氧、厌氧时,藻类及其他有机体在一些细菌的作用下会降解、腐败,进而产生大量的硫醚、硫醇类物质,导致水体出现严重的恶臭味。

② 人为原因

水源嗅味产生的人为原因主要包括排放的生活污水、生产废水,以及泄漏的工业化学试剂品、不合理使用农药化肥等。排放的含硫生活污水、生产废水、畜禽养殖废水在厌氧微生物代谢活动作用下产生的硫化氢、硫醚、硫醇类等嗅味物质是导致水体恶臭味问题的主要原因^[3]。进入到水体的苯类、酚类、含氧杂环类、酯类等工业化学药品试剂在很低的浓度下就能引起水体的嗅味问题。湿式法合成环氧丙烷过程中产生的副产物双(2-氯异丙基)醚一旦进入到水源中不仅对人体健康造成威胁,而且还会导致水体出现强烈的臭味、杀虫剂等嗅味问题,该物质嗅阈值只有 17 ng/L^[8]。美国埃文斯维尔城市

俄亥俄河曾受到上游工业化工厂排放的双(2-氯异丙基)醚污染,导致一系列污染和嗅味问题^[3,8]。在我国水源嗅味调查中,也检出过双(2-氯异丙基)醚^[2]。美国西弗吉尼亚州某河流中芳香味/甘草汁味事件是上游化工厂泄漏的 4-甲基环己烷甲醇所致^[15]。其他重链多环芳烃物质如杂芬油、二噁戊烷、二氧杂环乙烷、2-乙基-5,5-二甲基-1,3-二氧杂环乙烷(2-EDD)等含氧杂环类物质,以及苯酚、甲酚、氨基酚、硝基酚等化学品均能产生一定的嗅味问题^[16]。农药、化肥、杀虫剂等随着地表径流进入水源中,也会造成一定的嗅味问题。畜牧废水、化肥雨水径流等高营养盐污染物排入一些封闭性水源,容易导致水体富营养化,引起水体的嗅味问题。目前,国内几乎所有的水源地均已截除了污水的排入,基本上可以避免上述人为原因造成的异味污染问题。

2.2 水厂净水过程中产生的嗅味

饮用水厂的不同处理工艺段也会产生一定的嗅味问题。预氧化除藻过程中,操作不当会造成藻细胞破裂,藻细胞破裂一方面会直接释放出嗅味物质,产生嗅味问题,另一方面,释放出的胞内有机物经过后续氧化工段后也会形成致嗅物质,造成嗅味问题^[7,17];在进行鱼腥味物质识别时发现,衰亡期藻类培养液(细胞完整度 < 30%)的嗅味强度比对数期培养液(细胞完整度 > 80%)高 4~6 个强度等级(嗅味层次分析法测定),这可能与衰亡期藻细胞破裂释放的嗅味物质有关^[18]。因此,水厂在预氧化除藻过程中经常选用“预氧化+粉末活性炭吸附”联用工艺或者后续臭氧、活性炭滤床等深度处理的方式来控制破藻后产生的异味^[13]。水厂沉淀池工段排泥不及时、排泥不净时,残留的藻细胞破裂、沉淀物腐败降解等均可以产生致嗅物质,进而引发嗅味问题^[13];臭氧氧化过程中会产生醛类物质,其浓度达到一定水平时,会产生芳香味、鱼腥味等嗅味问题^[13]。为了抑制输水过程中微生物生长的潜能,通常配水管网系统中会保持一定的余氯量^[19],水处理过程中次氯酸或者一氯胺的投加量一般保持在 0.2~2.0 mg/L 或 1.0~4.0 mg/L,上述投加量远超出其嗅阈值 0.28 和 0.65 mg/L,导致水体产生氯味,特别是在氨氮、化学需氧量偏高等水质污染较为严重的原水中加氯消毒时,可以造成自来水口感差,甚至煮沸后仍存在异味的情况^[19]。如果蓄水池、砂

滤池、活性炭吸附等工艺段操作不当,在相关微生物作用下也会产生一定的嗅味问题^[13]。

2.3 自来水输配过程中产生的嗅味

经过水厂净化后达标的水体也有可能受到不同程度的“二次污染”,出厂自来水经过管网、泵站、蓄水池、水箱等设施送达用户的过程中,容易导致水被污染或者变质。供水管网中的微生物作用、消毒剂、消毒副产物以及管材、粘合剂溶出的化学物质等均能够引起一系列嗅味问题^[19-20]。Zhang等^[21]发现在消毒及管网输配水过程中氯化副产物三氯酚可以通过管网微生物甲基化作用产生2,4,6-三氯茴香醚,其嗅阈值较低,极易引起管网水土霉味问题。当水体中溴化物、碘化物浓度达到一定水平时,在消毒过程中氯的作用下会生成溴和碘,进一步卤化过程可以生成溴仿和碘仿,导致水体产生药味、化学药剂味等嗅味问题^[4];通过聚乙烯管道输水时会生成2,6-二叔丁基-4-甲基苯酚,进而产生塑料味的嗅味问题^[4]。管道材料对输配水过程中产生的嗅味具有显著影响,同等水温、流速、余氯等条件下,采用球墨铸铁管、不锈钢管输水比聚乙烯管(PE)输水可以产生更多的致嗅物质,由蓄水池、供水水箱等“二次污染”引发的嗅味问题也是屡见不鲜^[21]。

3 饮用水嗅味控制

随着对嗅味及致嗅物质研究的不断深入,饮用水中嗅味控制技术和方法得到了不断发展。根据水中异味的种类和来源,饮用水嗅味控制主要包括水源的预防控制、管理和水厂的技术工艺控制。水源嗅味的预防控制主要是指通过各项生态调控、环境管理等策略,预防和控制水体污染、产嗅藻和细菌的生长等。然而当水源嗅味问题已经发生时,就需要通过相应的化学氧化、活性炭吸附、生物处理等控制技术来去除水体异味,以保证出厂水水质达标。

3.1 化学氧化

化学氧化控制异味是指在水体中加入氧化剂削减嗅味的过程。目前,大多数水厂采用加氯预氧化的方式来减少微污染水源中有机物的含量,随着水源污染日趋严重,必须提高加氯量来达到水源污染物的去除效果,同时产生了致癌消毒副产物的问题。而且在含藻水中加氯预氧化可以导致藻细胞破裂和致嗅物质的释放,进一步加剧嗅味问题^[22]。因此,饮用水厂一直在探索替代氧化消毒剂,以达到兼顾嗅味去除效果与安全的目的,常见的替代氧化剂有

高锰酸钾、二氧化氯、次氯酸钠、臭氧等^[22]。高锰酸钾可以氧化和分解水中部分致嗅物质,在中性条件下可以较好地去除有机污染物和致突变物质,而且反应产物水合二氧化锰对有机污染物具有吸附、助凝、助滤的去除作用^[23]。0.6 mg/L的高锰酸钾投加量可以将原水腥味强度从8级降到3级(嗅味层次分析法测定),然而此时水样已经呈现明显的颜色变化。因此,用于饮用水嗅味处理的高锰酸钾用量一般控制在0.5 mg/L以下,否则水体会出现颜色而不会被接受^[14]。一般情况下,高锰酸钾的氧化能力不及氯和臭氧。

臭氧是一种强氧化剂和消毒剂,具有脱色、脱嗅和味的能力以及快速杀灭细菌的作用。臭氧氧化可以有效去除水中的硫醚类、硫醇类等腥臭味物质^[23],土霉味、鱼腥味、青草味等大部分致嗅物质也可以被臭氧氧化去除。臭氧对致嗅物质的氧化去除效果高于氯、高锰酸钾,高锰酸钾、次氯酸钠、双氧水等氧化剂氧化作用效果较差的2-MIB,臭氧却能将其有效氧化,并且pH值对2-MIB的去除率具有显著的影响,在中性及碱性条件下臭氧对2-MIB的去除率要高于酸性条件^[23]。但是,在腐殖质、有机物含量较高且水质复杂的水体中,臭氧氧化会产生醛类、酮类等副产物^[13]。因此,臭氧氧化一般与活性炭吸附联用以去除残余的异味。

3.2 活性炭吸附

水处理中经常使用吸附剂控制嗅味,活性炭吸附可以有效去除水体的异味^[24]。研究发现,相比于硫醇类、硫醚类等腥臭味物质,活性炭对土霉味物质土臭素和2-甲基异茨醇的吸附效果更好^[24-25]。通常情况下,净水厂采用的活性炭滤床需要周期再生,会增加水厂的运行成本。因此,当水体嗅味问题季节性存在时,可以采用在水源至水厂输水管道中、水厂混凝池投加粉状活性炭的方法去除嗅味物质,节约净水成本。研究表明,当煤质粉末活性炭F325投加量为5 mg/L时,对庚醛、2-辛烯醛、 β -环柠檬醛等鱼腥味物质的去除率可达100%;投加量为8 mg/L时,可将鱼腥味强度由8级降到4级(嗅味层次分析法测定);投加量为12 mg/L时,嗅味强度可降到3级以下^[14]。南方某水厂采用投加粉状活性炭控制季节性土霉味,发现碘值为1 030 mg/g的椰壳炭附能力最强,对150 ng/L的2-MIB的吸附容量可达6.2 ng/mg;综合处理效果和经济成本,碘值

为 800 mg/g 的煤质炭对土霉味处理效果最优,将 150 ng/L 的 2-MIB 降至嗅阈值以下时,活性炭成本为 0.3 元/m³;但是水厂的预氧化工艺(预加次氯酸钠及高锰酸钾)会使 2-MIB、土臭素的吸附效果分别降低 29.5% 和 31.6%^[26]。研究表明,活性炭的微孔体积越大,吸附效果越好,微孔体积可作为筛选活性炭的重要参考指标^[26]。

3.3 生物降解

当净水工艺中有生物作用存在时,可以起到部分去除嗅味的作用。生物活性炭滤池、砂滤池的微生物可以吸收、降解部分致嗅物质。但是,单纯使用生物处理来控制水体嗅味的方法在净水工程技术方面尚未成熟。因此,有关生物方法控制嗅味的研究较少。通常情况下,致嗅物质浓度较低,因而生物处理工艺段中微生物的数量并不由其控制,嗅味化合物只能作为次级基质被利用。研究发现,砂滤池中 2-MIB 和土臭素的生物降解符合准一级反应,降解速率常数在 0.10 ~ 0.58 d⁻¹,速率常数主要取决于菌剂的初始浓度。Li 等^[5]对 2-MIB、土臭素的生物降解效果进行了评价,发现土臭素的生物降解速率(半衰期为 0.38 ~ 15.0 h)高于 2-MIB(半衰期为 122 ~ 2 166 h)。

3.4 水源调控

近年来,针对由于产嗅藻特异性生长而导致嗅味的湖库型水源,在产嗅藻生长规律、产嗅藻生长与水环境之间的关系等方面展开了一系列研究,结合水库运行管理中的关键可控因子,实现调控产嗅藻的生长,并可通过调节湖库水位、浊度、水力停留时间来实现。相对于传统的物理、化学、生物等技术,该措施更易于实施、成本更低,而且对水质和水生生物没有任何明显的负作用,然而具体的效果和机理有待于进一步的深入研究。

4 结语

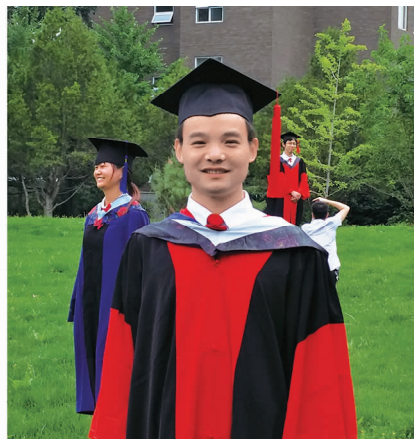
近年来,饮用水中“臭和味”指标受到越来越高的关注度。通过全面总结从水源源头到龙头过程中,土霉味、腥臭味、鱼腥味等常见嗅味的产生原因和控制技术,以及对饮用水中嗅味的产生条件、活性炭吸附、高锰酸钾氧化、臭氧氧化等去除技术参数的分析,可以为水厂嗅味控制提供一定的参考。后续研究可以结合水源特征,建立针对不同嗅味类型、相应致嗅物质及其控制技术的“大数据库”,在发生水体异味事件时,可以采取有效的应对措施,为消费者

提供安全、优质的饮用水。

参考文献:

- [1] Yang M, Yu J, Li Z, et al. Taihu Lake not to blame for Wuxi's woes[J]. Science, 2008, 319(5860): 158.
- [2] Sun D L, Yu J W, Yang M, et al. Occurrence of odor problems in drinking water of major cities across China[J]. Front Environ Sci Eng, 2014, 8(3): 411-416.
- [3] Guo Q Y, Yu J W, Yang K, et al. Identification of complex septic odorants in Huangpu River source water by combining the data from gas chromatography-olfactometry and comprehensive two-dimensional gas chromatography using retention indices[J]. Sci Total Environ, 2016, 556: 36-44.
- [4] Suffet I H, Khiari D, Bruchet A. The drinking water taste and odor wheel for the millennium: Beyond geosmin and 2-methylisoborneol[J]. Water Sci Technol, 1999, 40(6): 1-13.
- [5] Li Z L, Hobson P, An W, et al. Earthy odor compounds production and loss in three cyanobacterial cultures[J]. Water Res, 2012, 46(16): 5165-5173.
- [6] Sun D L, Yu J W, An W, et al. Identification of causative compounds and microorganisms for musty odor occurrence in the Huangpu River, China[J]. J Environ Sci, 2013, 25(3): 460-465.
- [7] Li L, Gao N Y, Deng Y, et al. Characterization of intracellular & extracellular algae organic matters (AOM) of *Microcystis aeruginosa* and formation of AOM-associated disinfection byproducts and odor & taste compounds[J]. Water Res, 2012, 46(4): 1233-1240.
- [8] Guo Q Y, Li X, Yu J W, et al. Comprehensive two-dimensional gas chromatography with time-of-flight mass spectrometry for the screening of potent swampy/septic odor-causing compounds in two drinking water sources in China[J]. Anal Methods, 2015, 7(6): 2458-2468.
- [9] Ma Z, Niu Y, Xie P, et al. Off-flavor compounds from decaying cyanobacterial blooms of Lake Taihu[J]. J Environ Sci, 2013, 25(3): 495-501.
- [10] 魏魏, 郭庆园, 赵云云, 等. 顶空固相微萃取-气质联用法测定水中 7 种致嗅物质[J]. 中国给水排水, 2014, 30(18): 131-135.
Wei Wei, Guo Qingyuan, Zhao Yunyun, et al. Simultaneous determination of seven fishy aldehydes in water samples using headspace solid-phase microextraction coupled with gas chromatography/mass spectrometry[J]. China Water & Wastewater, 2014, 30

- (18):131–135(in Chinese).
- [11] Zhao Y Y, Yu J W, Su M, *et al.* A fishy odor episode in a north China reservoir: Occurrence, origin, and possible odor causing compounds [J]. *J Environ Sci*, 2013, 25 (12):2361–2366.
- [12] 于建伟, 郭召海, 杨敏, 等. 嗅味层次分析法对饮用水中嗅味的识别[J]. *中国给水排水*, 2007, 23(8):79–83.
- Yu Jianwei, Guo Zhaohai, Yang Min, *et al.* Use of flavor profile analysis for identification of taste and odor in drinking water[J]. *China Water & Wastewater*, 2007, 23(8):79–83(in Chinese).
- [13] Guo Q Y, Yang K, Yu J W, *et al.* Simultaneous removal of multiple odorants from source water suffering from septic and musty odors: Verification in a full-scale water treatment plant with ozonation [J]. *Water Res*, 2016, 100:1–6.
- [14] Li X, Yu J W, Guo Q Y, *et al.* Source-water odor during winter in the Yellow River area of China: Occurrence and diagnosis [J]. *Environ Pollut*, 2016, 218:252–258.
- [15] Gallagher D L, Phetxumphou K, Smiley E, *et al.* Tale of two isomers: Complexities of human odor perception for *cis*- and *trans*-4-methylcyclohexane methanol from the chemical spill in West Virginia [J]. *Environ Sci Technol*, 2015, 49(3):1319–1327.
- [16] Jordi R, Ventura F, Josep C, *et al.* Identification of 1,3-Dioxanes and 1,3-Dioxolanes as malodorous compounds at trace levels in river water, groundwater, and tap water [J]. *Environ Sci Technol*, 1998, 32(2):206–216.
- [17] Zamyadi A, Henderson R, Stuetz R, *et al.* Fate of geosmin and 2-methylisoborneol in full-scale water treatment plants [J]. *Water Res*, 2015, 83:171–183.
- [18] Guo Q Y, Yu J W, Zhao Y Y, *et al.* Identification of fishy odor causing compounds produced by *Ochromonas* sp. and *Cryptomonas ovate* with gas chromatography – olfactometry and comprehensive two-dimensional gas chromatography [J]. *Sci Total Environ*, 2019, 671:149–156.
- [19] Wang A Q, Lin Y L, Xu B, *et al.* Factors affecting the water odor caused by chloramines during drinking water disinfection [J]. *Sci Total Environ*, 2018, 639:687–694.
- [20] Sato K, Samejima M, Sasaki R. Drinking water: The problem of chlorinous odours [J]. *J Water Supply*, 2013, 62(2):86–96.
- [21] Zhang K J, Cao C, Zhou X Y, *et al.* Pilot investigation on formation of 2, 4, 6-trichloroanisole via microbial *O*-methylation of 2, 4, 6-trichlorophenol in drinking water distribution system: An insight into microbial mechanism [J]. *Water Res*, 2018, 131:11–21.
- [22] Mizuno T, Ohara S, Nishimura F, *et al.* O_3/H_2O_2 process for both removal of odorous algal-derived compounds and control of bromate ion formation [J]. *Ozone: Sci Eng*, 2011, 33(2):121–135.
- [23] Vega E, Martin M J, Gonzalez-Olmos R. Integration of advanced oxidation processes at mild conditions in wet scrubbers for odourous sulphur compounds treatment [J]. *Chemosphere*, 2014, 109:113–119.
- [24] Vega E, Lemus J, Anfruns A, *et al.* Adsorption of volatile sulphur compounds onto modified activated carbons: Effect of oxygen functional groups [J]. *J Hazard Mater*, 2013, 258/259(16):77–83.
- [25] Antonopoulou M, Evgenidou E, Lambropoulou D, *et al.* A review on advanced oxidation processes for the removal of taste and odor compounds from aqueous media [J]. *Water Res*, 2014, 53(8):215–234.
- [26] 吕强, 魏群山, 黄鑫, 等. 应对南方某水厂土霉嗅味的活性炭技术 [J]. *环境工程学报*, 2018, 12(11):3034–3042.
- Lü Qiang, Wei Qunshan, Huang Xin, *et al.* Powdered activated carbon for treatment of musty odor in a southern China water treatment plant [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2018, 12(11):3034–3042(in Chinese).



作者简介:郭庆园(1985–),男,山东日照人,博士,讲师,主要从事饮用水安全保障技术研究。

E-mail: qyguon986@126.com

收稿日期:2019–04–22