

我国饮用水中嗅味问题及其研究进展

李勇, 张晓健, 陈超

(清华大学环境科学与工程系, 北京 100084)

摘要: 综述了我国饮用水中的嗅味问题及其国内外研究进展, 着重讨论了我国面临的饮用水中嗅味问题的现状、水中嗅味来源及饮用水中嗅味的定性定量分析技术、致嗅物质组成特性、典型致嗅物质的去除技术及工艺。旨在阐明除了土嗅素(geosmin)和 2-甲基异茨醇(2-MIB)等微生物代谢产物外, 硫醇硫醚类厌氧分解产物也是我国饮用水中重要的致嗅物质。硫醇硫醚类致嗅物质于 2006 年首次在广东饮用水中发现, 后被证明也是 2007 年太湖饮用水危机中的主要致嗅物质。Geosmin 和 2-MIB 的吸附效果好于氧化, 而硫醇硫醚类致嗅物质易于被氧化去除, 不易被吸附去除。需要尽快开展我国饮用水中致嗅物质组成特性及典型致嗅物质去除技术和工艺的研究, 形成应对不同水源、不同季节、不同致嗅物质嗅味的饮用水处理工艺。

关键词: 饮用水; 嗅味; 硫醇; 硫醚; 微生物代谢产物; 土嗅素; 2-甲基异茨醇

中图分类号: X52; TU991.21 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2009)02-0583-06

Review on the Tastes and Odors Compounds in Drinking Water of China

LI Yong, ZHANG Xiao-jian, CHEN Chao

(Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Tastes and odors problems (T&Os) in China and studies on T&Os are reviewed, especially on aspects of the present situation in China, sources of T&Os in water, T&Os qualitative & quantitative technology, odorant composing characters, removal technologies and processes on typical odorant in drinking water. This review aims to elucidate that besides microbial metabolism product such as geosmin and 2-MIB, organic anaerobic decomposition product such as thiol-thioether were also main odorant in drinking water of China. Thiol-thioether odorant which was found in drinking water of Dongguan in 2006 for the first time, was proved to be the main odorant in Taihu Lake drinking water risk in 2007 as well. Geosmin and 2-MIB were more easily removed by adsorption than oxidation, but thiol-thioether was easily removed by oxidation not by adsorption. In order to cope with T&Os in different water source, different season and different odorant, studies on odorant composing character, removal technology, mechanism and process of typical odorant should be carried out as soon as possible in China.

Key words: drinking water; taste and odor; thiol; thioether; microbial metabolism product; geosmin; 2-MIB

随着人们对饮用水的质量的要求越来越高, 水中的嗅味(tastes and odors)已经引起人们的重视。我国新的《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006)已经于 2007 年 7 月 1 日颁布并实施。新标准中非常规检验项目数量多、要求高, 但通常水源中都不会超标, 加上水厂的净化工艺, 一般都能保证水质合格^[1]。而常规检验中, 嗅味列入了出厂水、管网水的必测项目, 水的合格率将会因此而受到影响, 因此必须给予足够的重视。

国外自 20 世纪 50 年代就开始了对于水体异味的研究, 至今已成为当今世界水环境^[2]研究热点之一, 而我国在这方面的研究相对较晚, 相关研究工作也刚刚起步。本文就我国面临的饮用水中嗅味问题的现状, 水中嗅味的危害、分类、来源和水中嗅味的定性定量分析技术、致嗅物质组成特性、典型致嗅物质的去除技术及工艺等方面的国内外研究进展进行综述。

1 饮用水中的嗅味问题

饮用水中的嗅味问题在国内外普遍存在, 成为

各供水者必须面临的重要问题。早在 1850 年, 美国就发现了水体异味。1944 年, 美国 Niagara Falls 水厂由于酚污染产生嗅和味后, 引起广大居民投诉。1997 年在美国 Phoenix 市发生的一次饮用水异味事件中, 该市水务部门每星期都要接到几百个投诉电话^[3]。1969 年 5 月, 日本的琵琶湖发生严重饮用水异味事件, 影响了日本京都、大阪、神户地区的居民供水。

在我国, 许多城镇都以湖泊、河流作为主要的供水水源。近年来, 随着城市建设、工农业生产的发展以及城市人口的增加, 大量未经处理的污水与废水排入天然水体, 饮用水异味的报道越来越多。

表 1 列出了近年来文献报道的国内饮用水中的嗅味问题, 从中可以看出我国面临的饮用水中嗅味问题非常严重, 而且分布范围广, 已经是一个比较普遍的问题。特别是在 2007 年 5 月暴发的太湖水危机

收稿日期: 2008-02-23; 修订日期: 2008-04-07
基金项目: 国家自然科学基金项目(50778097); 国家科技支撑计划项目(2007BAC26B03)
作者简介: 李勇(1979~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为饮用水深度处理, E-mail: yongli05@mails.tsinghua.edu.cn

表 1 近年来文献报道的饮用水嗅味问题

Table 1 Tastes and odors accidents reported in drinking water of China		
地区, 水源	时间	报道的 TON 测定结果
江苏, 太湖	1996	200 ^[4]
辽宁, 浑河	1999	100 ^[5]
湖北, 东湖	2002	70 ^[6]
安徽, 巢湖	2002	100 ^[4]
山东, 玉清湖水库	2004	16 ^[7]
山东, 15 个城市水源	2004	均存在嗅味问题, 其中 2-MIB 在 100 ~ 200 ng/L, 最高达到 700 ng/L ^[7]
北京, 密云水库	2004 (每年 9 ~ 10 月)	24 ^[8] , 2-MIB 浓度在 200 ng/L 以上
内蒙古乌素梅尔海, 黄河	2004	黑臭 ^[9]
内蒙古包头, 黄河	2006	70 ^[10]
广东深圳, 深圳水库	2006	> 100 ^[11]
广东东莞, 东江	春季、夏季	50
上海, 黄浦江	长期 (每年 7 ~ 10 月)	以 2-MIB 为主, 浓度在 50 ~ 150 ng/L
河南郑州, 黄河	春季	鱼腥味
江苏无锡, 太湖	2007-05	200
河北秦皇岛, 北戴河	2007-09	1000

事件中, 自来水中的严重异味影响了无锡市几十万人的正常饮水, 引起了国内外的广泛关注.

2 饮用水中嗅味的危害

一般情况下, 水中的嗅味不会对人体健康造成威胁, 但人及其它生物通过感知这些不良嗅味而避免饮用. 饮用水中的异嗅和异味不仅影响水的可饮性, 严重损害饮用水的质量, 而且产生不良嗅味的某些化合物, 还会直接损害人体健康. 1998 年 9 月 22 日, 某地居民饮用了有异味的水后, 先后发生腹痛、腹泻等消化道症状病例 38 例. 出现症状者, 于饮用该村自来水后最早 1 h, 最晚者 3 h^[12].

3 饮用水中嗅味的来源及分类

3.1 水中嗅味分类

水中的嗅味(flavor)包括嗅(气味, odors)、味(味道, tastes)和口感(mouth feel)3 方面, 以嗅的问题为主, 是水中某些化学物质, 即致嗅物质对人的舌、鼻及口等处感觉末梢神经刺激的一种综合感觉. 在欧美国家, 让一组训练有素的专业人员, 饮用待测水, 并采用日常用语对水中的嗅味进行描述和评价. 依据长时间积累的资料, 他们提出了一个嗅味分析轮型图(drinking water taste and odor wheel), 在这个图上把人的感官性状描述与水中存在的化合物联系起来(如图 1)^[13].

3.2 饮用水中致嗅物质来源

从饮用水的生产过程来看, 致嗅物质可能主要来源于 3 个过程. 首先是原水中本身含有致嗅物质. 目前国内外关于水中嗅味的问题的研究大多集中于该方面. 二是原水经过水厂进行处理时, 投加的药剂及其同原水物质反应所产生的物质带来的异嗅和异味(氯味、臭氧味等). 国外对活性炭去除嗅味及消毒过程所产生的嗅味方面已有详细研究, 而我国在该方面的研究还有待进一步开展. 三是处理后的水在经过配水系统输送到用户过程中, 在管网系统中引入的杂质产生嗅和味. 国外对该方面的研究已经开始, 而国内鲜见相关报道.

根据其来源, 原水中的致嗅物质可分为 2 大类: 一类属于天然来源, 大多数是从土壤、岩石中析出的矿物质, 如铁、锰等; 另一类是人类活动影响的结果, 这类致嗅物质是水中致嗅物质最主要的来源. 一方面人类直接向水体中排放致嗅化合物, 如酚类化合物等, 另一方面人类排入水中有有机物的分解产物(如硫醇、硫化氢、胺类等)以及水中某些微生物的代谢产物的释放, 如土嗅素(geosmin)和 2-甲基异茨醇(2-MIB)等, 使水产生嗅味.

4 水中嗅味问题研究

人们对嗅味的研究, 最早开始于食品工业, 20 世纪 40 年代开始引用于饮用水的研究. 水中嗅味问题的研究是一个多学科交叉的研究领域, 它涉及化学分析、生物生理、湖沼、食品与数理统计等学科领域^[14]. 其中饮用水中嗅味问题的研究主要集中在嗅味的定量分析技术、典型致嗅物质的去除技术及工艺方面.

4.1 水中嗅味的定性定量分析技术

水中嗅味的定性定量分析技术是解决水中嗅味问题的前提和基础. 通常情况下, 水中嗅味组成非常复杂, 并且水中致嗅物质的嗅阈值(odor threshold concentration, OTC)浓度极低, 因而对水中致嗅物质的定量分析技术比较困难, 成为水中嗅味问题研究的关键. 水中嗅味的定性定量分析方法有很多, 一般可以分为 3 种, 感官分析法、仪器分析法和综合分析法.

4.1.1 感官分析法

感官分析法主要包括臭阈值法(threshold odor number, TON)、嗅味等级描述法(flavor rating assessment, FRA)和嗅味层次分析法(flavor profile analysis, FPA)^[15]等. FPA 法首先应用于美国^[16], 它由

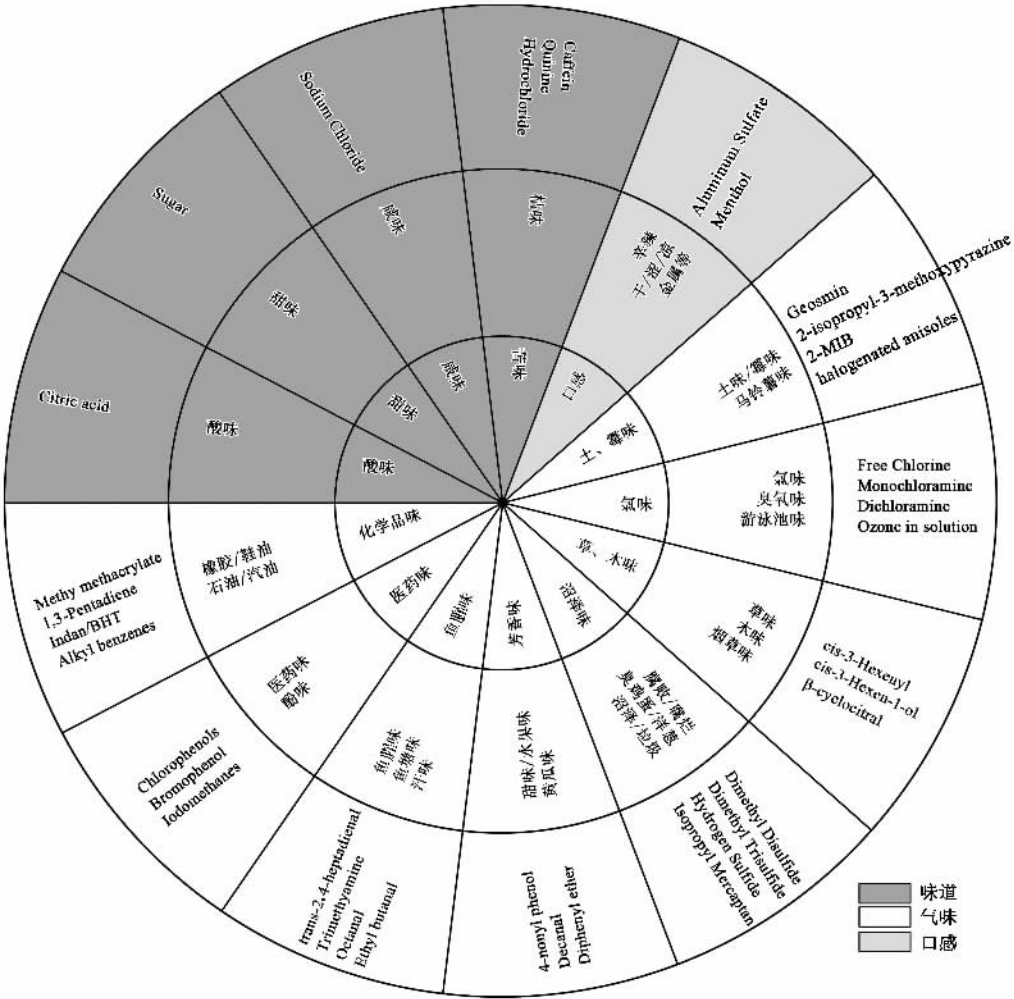


图 1 嗅味分类轮图

Fig.1 Tastes and odors wheel

经过严格训练的分析者对水样进行集体评定嗅味强度与特性.此法不需对水样进行稀释,可对嗅味的种类及强度进行较精确的描述,且具有一定的定性和定量分析能力.该法逐步被欧美等国的许多水厂采用,并已被列入美国水质分析标准方法中,但此法对分析者的要求很高,并且需要专门的培训,还没有在国内推广.

感官分析法可以了解水中气味的物理特性,但由于人们对嗅的敏感度各不相同,在感知气味的过程中可能会出现疲劳现象,往往会导致数据客观性不足,重复性差,不同时间、地点的数据也难以比较,而且对于混合气味,由于不同气味间的协同和中和效应,感官分析法难以区别,对气味难以恰当描述,对引起气味的物质也无法判断^[17].

另外,使用 FPA 法检测水的味道时首先必需确保样品水的卫生安全饮用性,不适宜含有某些危险

性化合物样品的检测.

4.1.2 仪器分析法

色质联检 GC-MS 是分析痕量有机物的有效手段,可以很好地完成挥发性和半挥发性有机物的定性定量.此法测定结果的选择性强、灵敏度高,故在美、日各国普遍采用^[18],而水中气味的分析关键在于气味的富集,气味物质的富集方法有密闭循环吹脱法(closed-loop stripping analysis, CLSA^[19])、开口循环吹脱法(open-loop stripping analysis, OLSA)、吹扫捕集法(purge and trap, P&T)、液液萃取(liquid liquid extraction, LLE)、水蒸气蒸馏萃取(steam distillation extraction, SDE)、固相萃取(solid phase extraction, SPE)、固相微萃取(solid phase Microextraction, SPME)等.其中,CLSA-GC 是目前世界上各国公认最精确的异味测定方法.但该方法对系统的压力控制和循环泵质量要求较高,国内采用 OLAS、P&T 和 SPME 等

方法替代^[17],并在以土嗅素和 2-MIB 为主的异味物质检测方面取得一定效果。

4.1.3 综合分析法

FPA 法适用于确定给水是否有异于无臭水和评价人们在使用过程中的接受程度,如果使用经验丰富的评定人员,将会是一个低成本高效率的检测方法,但灵敏度差,不能精确定量。仪器分析法虽然灵敏度高,可以精确地反映水中嗅味物质的量,但是由于其设备比较昂贵,分析周期长,且每次只能对某一种或几种特定物质进行分析,受富集方法及仪器精度的影响,对浓度很低或难萃取污染物的分析具有一定的局限性。

因此人们希望通过模型建立一种既快捷、又可以比较精确地测定水中嗅味物质总体数量的方法。2004 年, Davies 等^[20]对加拿大各湖泊水进行嗅味定量分析,并考察原水各项水质指标,发现水中嗅味物质总量和水中总磷含量存在某种函数关系。因此,通过对具体某地水体的主要水质指标进行模型分析,建立水质指标同致嗅物质浓度的关系也可能成为一种新的快速、较准确评价水体嗅味的方法。

现今常用的方法是先用 FPA 法对样品水进行分析检测,初步确定引起水中不良口感的物质,如有必要,再用化学或仪器分析法进行进一步的鉴定及定量分析。

此外还有一种酶联免疫法(ELISA),是基于抗原-抗体反应原理发展起来的一种新检测方法,因其具有专一性强、灵敏度高、简便快速等优点,近年来广泛应用于生命科学领域。但由于嗅味化合物的相对分子质量一般 < 300,故不易得到高效的抗体,对 2-MIB 的检测灵敏度低。

4.2 致嗅物质组成特性研究

原水中致嗅物质的组成特性,是解决饮用水中异嗅问题的基础,国外对饮用水中致嗅物质的组成开展了大量研究。研究发现国外饮用水中的致嗅物质主要有土嗅素(geosmin)、2-甲基异茨醇(2-MIB)、2-甲氧基-3-异丙基吡嗪(IPMP)、2-甲氧基-3-异丁基吡嗪(IBMP)、2,3,6-三氯苯甲醚(TCA)等。土嗅素和 2-MIB 最为常见,是导致湖泊、水库等水体中产生土霉味(土腥味)和霉烂味的主要原因。它们主要是藻类和放线菌的代谢产物,嗅阈浓度很低,约为 10 ng/L,即使在水中的含量很小,也能产生嗅味问题。

此外,也有文献报道芳香烃及氧化中间产物^[21],2,3-丁二酮(2,3-butanedione)^[22]造成了饮用水中的嗅味。

我国水污染比发达国家严重,饮用水中致嗅物质的组成要复杂得多。除了土嗅素和 2-MIB 等微生物代谢产物类致嗅物质外,还有随径流进入江河湖库的污染物和厌氧分解产物中的致嗅物质,比如硫醇、硫醚类物质^[23,24]。在我国南方,河流密布雨水多,市内河渠成为污染物的排放地,受厌氧分解产物类致嗅物质污染的情况尤其普遍和严重。硫醇硫醚类物质正是 2007 年 5 月太湖水危机事件中的最主要的致嗅物质^[25]。因此,需要尽快开展适合我国国情的不同水源、不同季节、不同原因致嗅物质组成的研究。

4.3 饮用水中致嗅物质的去除技术

对于土嗅素和 2-MIB 等微生物代谢产物类致嗅物质的去除技术,国外已有一定研究基础,主要是采用吸附法去除,氧化法也有一定的去除效果。对于其他类型的饮用水致嗅物质,已有研究较少,特别是对硫醇、硫醚类致嗅物质的去除技术鲜见报道,而这类致嗅物质也是我国饮用水中普遍存在的致嗅物质组成的一部分。清华大学 2006 年在东莞饮用水处理研究中发现了硫醇、硫醚类致嗅物质的存在,并率先开展了对硫醇硫醚类致嗅物质的去除技术研究^[23,26],研究成果直接指导了无锡水事件的应急处理^[25]。

4.3.1 氧化技术

对于水中土嗅素和 2-MIB 的去除,在水厂通常所用的氧化剂投加量下, KMnO_4 、 NaClO 、 H_2O_2 等氧化剂的效果较差,例如在臭氧投加量为 2 mg/L 左右时,去除率也只在 35% 左右^[27]。因此,对于这类致嗅物质,较低浓度时采用氧化方法可能有效,但无法应对较高浓度的土嗅素和 2-MIB 类致嗅物质。

对于硫醇硫醚类物质的去除,氧化法的去除效果很好^[26]。在水厂常用投加量条件下,初始浓度相近时,完全氧化乙硫醇所需要的接触时间,臭氧最短,其次为二氧化氯,水厂普遍使用的氯和 KMnO_4 所需要的接触时间 > 1 h。

氧化技术的研究主要集中在氧化剂和氧化条件,根据目标去除率确定氧化剂的投加量,缺乏对去除机制的探讨^[28],不能直接应用到不同的水源、不同季节、不同原因、不同致嗅物质的去除^[29]。

4.3.2 吸附技术

大量的研究表明活性炭可以有效吸附土嗅素和 2-MIB,土嗅素的吸附效果稍好于 2-MIB^[30]。但是活性炭吸附容量有限,对于采用颗粒活性炭过滤需要对炭进行周期再生,增加炭床的费用也较高。当嗅味问题只是偶尔存在时可以使用粉状活性炭去除土嗅

素和 2-MIB,但需要根据水源水中致嗅物质的种类和浓度、水源水中其他有机物的性质等确定粉末炭的投加量^[31,32].当原水 2-MIB 为 110 ng/L 时,要使出水浓度低于嗅阈值,粉末炭的投加量需 40 mg/L 以上.

硫醇硫醚类致嗅物质的活性炭吸附效果较差.乙硫醇 30 min 内的吸附去除率仅为 30% 左右,30 min 以后浓度变化不大.

吸附技术去除嗅味的研究主要集中在吸附剂的选择和用量方面,对去除机制的探讨还不够深入.

4.3.3 其他技术

除了常见氧化、吸附技术外,还有膜技术、生物降解技术和催化氧化技术对土嗅素和 2-MIB 的去除研究,未见这些技术对其它类致嗅物质去除的报道.

膜技术:由于水中致嗅物质的分子量较小,单纯使用超滤膜或微滤膜无法有效去除水中的致嗅物质,必须与活性炭吸附联合使用,以去除水中嗅味.

生物降解技术:土嗅素和 2-MIB 的生物降解速率相对较慢,因此,生物降解技术不适用于水厂净水工艺.Izaguirre 等^[33]的研究表明,2-MIB 从 290 ng/L 降解到 17 ng/L 需要 11 d 的时间,土嗅素需要的时间稍短些.Lim 等^[34]采用浸没式生物反应器处理韩国的 Daechung 湖水时发现,水力停留时间为 30 min,土嗅素进水为 52 ng/L 时,出水为 30.4 ~ 25 ng/L,去除率为 41.5% ~ 51.9%,在藻类高发期仅采用生物处理难以去除水中的嗅味.Terauchi 等^[32]研究表明,当进水 2-MIB 浓度为 110 ng/L 时,经生物处理后出水为 40 ng/L,去除率为 63.6%.当进水浓度较高时,经过生物处理后的出水嗅味物质难以达到要求.

高级氧化技术:高级氧化技术通过氧化剂(O_3 、 $KMnO_4$ 、 H_2O_2 等)与某种催化剂($\gamma-Al_2O_3$ ^[35]、 TiO_2 光催化、UV)的相互作用,产生 $\cdot OH$ 氧化分解水中致嗅物质,取得很好的除嗅效果.但该技术需要很高的设备投资,仍然处于试验阶段.

4.4 饮用水中致嗅物质的去除工艺

同致嗅物质去除技术的研究一样,去除致嗅物质的饮用水工艺的研究多是集中在土嗅素和 2-MIB 等微生物代谢产物类致嗅物质上,对其它类致嗅物质的研究鲜见报道.

4.4.1 常规工艺

常规给水处理工艺难以去除水中的嗅味,如武汉团山水厂现有工艺(预氯化-混凝-接触过滤工艺)对土嗅素的去除率只有 23%,滤后水为 72.8 ng/L^[6].Kim 等^[36]研究认为常规处理工艺对 5 种致

嗅物质的去除率为 25% ~ 40%,其中对 IPMP 的去除率最高为 41.3%,其次是土嗅素为 33.3%.

4.4.2 臭氧-生物活性炭深度处理

臭氧生物活性炭除嗅工艺的优势在于可以较长时间保持活性炭的能力,延长了活性炭的工作寿命.日本东京某水厂采用混凝沉淀-臭氧-生物活性炭处理工艺对含 2-MIB 的原水进行处理,常规处理后 2-MIB 为 16 ~ 26 ng/L,经过 O_3 -BAC 技术处理后出水浓度为 0 ~ 10 ng/L,去除率达 60% ~ 100%^[37].臭氧生物活性炭深度处理工艺可高效地去除嗅味物质,同时也可去除水中的有机污染物和消毒副产物的前体物,提高水厂出水的生物稳定性,因此有很好的应用前景.但目前国内外对于臭氧活性炭工艺去除致嗅物质的机制还有待进一步研究.

5 结论

(1) 饮用水嗅味问题是我国当前普遍存在的问题,而此方面的研究与国外存在一定的差距,必须给予足够的重视.

(2) 由于水污染较发达国家严重,我国饮用水中致嗅物质组成比较复杂,除了常见的微生物代谢产物土嗅素、2-MIB 等物质外,还有一些外排的污染物和水体污染厌氧分解产物硫醇、硫醚等.

(3) 水厂实际运行的对饮用水中致嗅物质的去除技术主要是吸附技术和氧化技术,其中对土嗅素、2-MIB 等微生物代谢产物类致嗅物质的去除,吸附法要优于氧化法;对硫醇、硫醚类致嗅物质的去除,宜采用氧化法.

(4) 国内外对去除致嗅物质的饮用水处理工艺研究大多集中于对土嗅素和 2-MIB 的去除,并多限于特定水源、一定浓度致嗅物质的去除工艺参数的确定,不能直接应用到不同水源、不同致嗅物质浓度、不同工艺的情况,对于去除技术机制的研究还有待深入.

(5) 当前,应该尽快开展我国不同地区、不同季节饮用水中致嗅物质组成特性研究,开展针对典型致嗅物质提高饮用水处理技术及工艺除嗅效果及机制的研究,形成可应对不同水源、不同季节、不同致嗅物质种类的饮用水处理工艺.

参考文献:

[1] 王占生. 预计的臭味争议与水质督察[J]. 给水排水, 2007, 33 (3): 1.
[2] Sagehashi M, Shiraishi K, Fujita H, et al. Ozone decomposition of 2-methylisoborneol (MIB) in adsorption phase on high silica zeolites

- with preventing bromate formation[J]. *Water Research*, 2005, **39**(13): 2926-2934.
- [3] Dempster T A. Taste and odor problems in source waters and water treatment facilities[D]. US: Arizona State University, 2006.
- [4] 李镜明, 叶舟, 蒋海涛. 富营养化湖泊水除臭试验研究[J]. 给水排水, 1996, **22**(3): 5-7.
- [5] 徐振林. 二氧化氯除浑河水、水库水的臭味实验[J]. 辽宁城乡环境科技, 1999, **19**(5): 80-81.
- [6] 蒋海涛, 韩润平, 高廷耀. LFSA-GC 技术测定水体臭气[J]. 江苏环境科技, 2002, **15**(1): 1-2.
- [7] 刘强. 高锰酸钾-湿式粉末活性炭除臭技术研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2004.
- [8] 刘洋, 张声, 张晓健. 溶气气浮工艺处理密云水库水的研究[J]. 工业用水与废水, 2004, **35**(6): 17-20.
- [9] 张亚彤, 霍庭秀, 王瑞萍, 等. 黄河内蒙古段“6.26”水污染事件原因及对策[J]. 内蒙古水利, 2006, **105**(1): 62-64.
- [10] 王春娥, 曾慧, 赵劲涛, 等. 二氧化氯预氧化工艺处理微污染黄河水研究[J]. 环境科学与管理, 2006, **31**(7): 115-117.
- [11] 乔铁军, 安娜, 尤作亮, 等. 梅林水厂臭氧/生物活性炭工艺的运行效果[J]. 中国给水排水, 2006, **22**(13): 10-14.
- [12] 魏良勤, 孙桂学, 姜伟李, 等. 一起自来水污染事件[J]. 预防医学文献信息, 1999, **5**(4): 366.
- [13] Suffet I H, Khiani D, Bruchet A. 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.
- [14] 宋立荣, 李林, 陈伟, 等. 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, 2004, **28**(4): 434-439.
- [15] Young J M, Trask B J. The sense of smell: genomics of vertebrate odorant receptors [J]. *Human Molecular Genetics*, 2002, **11**(10): 1153-1160.
- [16] Morran J, Marchesan M. Taste and odour testing: how valuable is training? [J]. *Water Science and Technology*, 2004, **49**(9): 69-74.
- [17] 周勤, 孙伟. 给水中的致味物质及其检测方法[J]. 工业水处理, 2004, **24**(1): 5-7.
- [18] Alfredo D, Francesc V M, Teresa G. Determination of odorous mixed chloro-bromoanisoles in water by solid-phase micro-extraction and gas chromatography-mass detection [J]. *Journal of Chromatography A*, 2005, **1064**: 97-106.
- [19] Zhang L, Hu R, Yang Z. Routine analysis of off-flavor compounds in water at sub-part-per-trillion level by large-volume injection GC/MS with programmable temperature vaporizing inlet [J]. *Water Research*, 2006, **40**(4): 699-709.
- [20] Davies J M, Roxborough M, Mazumder A. Origins and implications of drinking water odours in lakes and reservoirs of British Columbia, Canada [J]. *Water Research*, 2004, **38**(7): 1900-1910.
- [21] Satchwill T. Drinking water taste and odor: Compound identification and treatment[D]. Canada: University of Calgary, 2001.
- [22] Diaz A, Ventura F, Galceran M T. Identification of 2, 3-butanedione (diacetyl) as the compound causing odor events at trace levels in the Llobregat River and Barcelona's treated water (Spain) [J]. *Journal of Chromatography A*, 2004, **1034**(1-2): 175-182.
- [23] 李勇, 张晓健, 陈超, 等. 臭氧活性炭工艺对东江原水中臭味的去除研究[R]. 浙江嘉兴: 中国土木工程学会水工业分会给水深度处理研究会年会, 2006.
- [24] Zhang X J, Li Y, Chen C, *et al.* Determination and Removal of a kind of Rotten Odor in Surface Water of Southern China [R]. Perth, Australia: 2nd IWA-ASPIRE Conference and Exhibition, 2007.
- [25] 张晓健, 张悦, 王欢, 等. 无锡自来水事件的城市供水应急除臭处理技术[J]. 给水排水, 2007, **33**(9): 7-12.
- [26] 李勇, 张晓健, 陈超, 等. 我国饮用水中致嗅物质组成及其去除技术研究[R]. 北京: 第一届全国博士生学术会议, 2007.
- [27] Robert N, Rittmann B E, Soucie W J. Ozone/biofiltration for removing MIB and geosmin [J]. *Journal of American Water Works Association*, 2000, **92**(12): 85-95.
- [28] Bruchet A, Duguet J P. Role of oxidants and disinfectants on the removal, masking and generation of tastes and odours [J]. *Water Science and Technology*, 2004, **49**(9): 297-306.
- [29] Peter A, von Gunten U. Oxidation kinetics of selected taste and odor compounds during ozonation of drinking water [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(2): 626-631.
- [30] Ashitani K, Hishida Y, Fujiwara K, *et al.* Behavior of musty odorous compounds during the process of water treatment [A]. In: 2. IAWPRC International Symposium on Off-flavours in the Aquatic Environment [C]. Japan: Kagoshima, 1988.
- [31] Newcombe G, Morrison J, Hepplewhite C, *et al.* Simultaneous adsorption of MIB and NOM onto activated carbon II. Competitive effects [J]. *Carbon*, 2002, **40**(12): 2147-2156.
- [32] Terauchi N, Ohtani T, Yamanaka K, *et al.* Studies on a Biological Filter for Musty Odor Removal in Drinking-Water Treatment Processes [J]. *Water Science and Technology*, 1995, **31**(11): 229-235.
- [33] Izaguirre G, Wolfe R L, Means E G III. Degradation of 2-Methylisoborneol by Aquatic Bacteria [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1988, **54**: 2424-2431.
- [34] Lim K H, Shin H S. Operating characteristics of aerated submerged biofilm reactors for drinking water treatment [J]. *Water Science and Technology*, 1997, **36**(12): 101-109.
- [35] 陈忠林, 齐飞, 徐冰冰, 等. γ - Al_2O_3 催化臭氧氧化水中嗅味物质 MIB 效能研究[J]. 环境科学, 2007, **28**(2): 322-328.
- [36] Kim Y, Lee Y, Gee C S, *et al.* Treatment of taste and odor causing substances in drinking water [J]. *Water Science and Technology*, 1997, **35**(8): 29-36.
- [37] Muramoto S, Udagawa T, Okamura T. Effective removal of musty odor in the Kanamachi purification plant [J]. *Water Science and Technology*, 1995, **31**(11): 219-222.