

## 净水技术前沿与热点综述

胡梦昌, 刘保森, 王永磊, 等. 饮用水中典型臭味污染物的检测和净化研究进展[J]. 净水技术, 2025, 44(2): 10-22.

HU M C, LIU B S, WANG Y L, et al. Research progress on determination and purification of typical taste and odor pollutants in drinking water [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(2): 10-22.

## 饮用水中典型臭味污染物的检测和净化研究进展

胡梦昌<sup>1</sup>, 刘保森<sup>1,2,\*</sup>, 王永磊<sup>1</sup>, 贾瑞宝<sup>2</sup>, 刘宝震<sup>1,2</sup>, 孙大成<sup>1</sup>

(1. 山东建筑大学市政与环境工程学院, 山东济南 250101; 2. 山东省城市供排水监测中心, 山东济南 250021)

**摘要** 【目的】近年来,随着工业化进程的加速和人类活动的频繁,湖泊、水库等自然水体的富营养化问题愈发严重,进而导致了藻类的大量暴发,其不仅破坏了水生生态系统,还使得饮用水中2-甲基异莰醇(2-MIB)和土臭素(GSM)等臭味污染物的浓度显著增加,对水质安全构成了严重威胁。鉴于传统水处理技术去除这类臭味污染物存在明显的局限性,亟须探索发展新型净化技术以去除这类有害物质。【方法】文章深入剖析了饮用水中2-MIB和GSM的来源及其污染现状,对比分析了当前热门的检测技术及其特点,在此基础上,重点综述了各类高级氧化技术、活性炭吸附技术以及组合技术在去除2-MIB和GSM方面的研究进展,包括各技术的净化机理、优缺点、当前的应用现状以及针对不同浓度2-MIB和GSM的适用性等。【结果】通过综合分析,认为发展臭氧、紫外高级氧化技术、活性炭吸附技术,并积极探索组合技术策略,是当前水厂去除臭味物质研究的重点方向。此外,类芬顿、水辐照技术与等离子体等新型技术由于具有独特的优势和潜力,也被视为未来研究的重要热点,值得科研人员深入探索与关注。【结论】文章旨在为相关研究人员提供一份全面而深入的综述,以期对未来深入研究饮用水中2-MIB和GSM的净化技术提供坚实的理论依据和有益的参考。

**关键词** 饮用水 2-甲基异莰醇(2-MIB) 土臭素(GSM) 检测 净化技术

中图分类号: TU991 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)02-0010-13

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.02.002

## Research Progress on Determination and Purification of Typical Taste and Odor Pollutants in Drinking Water

HU Mengchang<sup>1</sup>, LIU Baosen<sup>1,2,\*</sup>, WANG Yonglei<sup>1</sup>, JIA Ruibao<sup>2</sup>, LIU Baozhen<sup>1,2</sup>, SUN Dacheng<sup>1</sup>

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China;

2. Shandong Municipal Water Supply and Drainage Quality Monitoring Center, Jinan 250021, China)

**Abstract** [Objective] In recent years, with the acceleration of industrialization and frequent human activities, the eutrophication of natural water bodies such as lakes and reservoirs has become more and more serious, which has led to a large number of algae outbreaks. It not only destroys the aquatic ecosystem, but also makes the concentration of taste and odorous pollutants such as 2-methylisoborneol (2-MIB) and geosmin (GSM) in drinking water increase significantly, posing a serious threat to water quality safety. In view of the obvious limitations of traditional water treatment technology to remove such odor pollutants, it is urgent to explore and develop new purification technology to remove such harmful substances. [Methods] In this paper, sources and pollution status of 2-MIB and GSM in drinking water are deeply analyzed, and the current popular detection technologies and their characteristics are compared and analyzed. On this basis, the research progress of various advanced oxidation technologies, activated carbon adsorption technologies and combined technologies in removal of 2-MIB and GSM are reviewed, including the purification mechanism, advantages

[收稿日期] 2024-07-19

[基金项目] 国家重点研发计划(2022YFC3203705)

[作者简介] 胡梦昌(2001—),男,硕士,研究方向为水处理理论与技术,E-mail:1225368401@qq.com。

[通信作者] 刘保森(1982—),博士,副研究员,研究方向为水处理理论与技术,E-mail:baosen163@163.com。

and disadvantages of each technology, the current application status and the applicability of different concentrations of 2-MIB and GSM. [Results] Through comprehensive analysis, it is considered that the development of ozone, ultraviolet advanced oxidation technology, activated carbon adsorption technology, and active exploration of combined technology strategies are the key directions of current research on odor removal in water treatment plants. In addition, new technologies such as Fenton-like, water radiation and plasma are also regarded as important hotspots in future research due to their unique advantages and potential, which are worthy of in-depth exploration and attention by researchers. [Conclusion] This paper aims to provide a comprehensive and in-depth review for relevant researchers, in order to provide a solid theoretical basis and useful reference for the future in-depth study of the purification technology of 2-MIB and GSM in drinking water.

**Keywords** drinking water 2-methylisoborneol (2-MIB) geosmin (GSM) determination purification technology

近年来,工业化和城市化的快速发展和污染物排放量的增加导致湖泊、水库的富营养化问题日益严重,藻类快速繁殖,散发臭味物质导致水体恶臭<sup>[1-2]</sup>。2-甲基异莰醇(2-MIB)和土霉素(GSM)是饮用水中最常见的泥土味和霉味臭味物质(T & O)<sup>[3]</sup>。这2种臭味物质气味阈值低于10 ng/L,以及原水基质的复杂性,给大多数水厂带来了重大挑战<sup>[4]</sup>。研究表明,2-MIB、GSM等臭味污染物对水厂常规处理工艺(如混凝、沉淀和过滤等)的净化具有极强的抵抗力。因此,常规工艺不能有效去除水中的2-MIB和GSM<sup>[5]</sup>。为了确保出厂水质达到《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)的要求,还需引入预处理或深度处理技术,有效减轻水中的异臭,提供更优质的饮用水给用户<sup>[6]</sup>。文章深入探究饮用水中臭味污染物的净化过程,从典型臭味污染物2-MIB和GSM的来源和污染出发,介绍针对其在饮用水中低浓度特点的检测技术,分析目前控制这类污染物的有效技术(高级氧化、活性炭吸附以及它们的组合技术),详细阐述这些技术的净化机理、处理效果和应用情况,为更好地理解和应用这些技术提供有力的支撑。

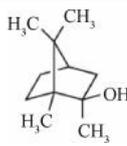
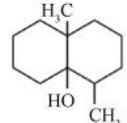
### 1 2-MIB和GSM的来源和污染

2-MIB和GSM是水体中的典型臭味污染物,我国发生的水体臭味问题通常由这2种物质造成。2006年,我国首次将2-MIB和GSM列入《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)附录中,新版《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)又将这2种物质纳入扩展指标中。2-MIB,别名2-甲基异冰片,它属于环醇类物质,为弱极性脂溶性化合物,分子式为C<sub>11</sub>H<sub>20</sub>O,相对分子质量为168,沸点为196.7℃;GSM是一种极具土腥味的易挥发性物质,在许多微生物的代谢过程中都会产生,由碳、氢、氧3种元素

构成,分子式为C<sub>12</sub>H<sub>22</sub>O,相对分子质量为182,沸点为165.1℃。湖泊及水库型水源的臭味类型以土霉味为主,而河流型水源则以腐败味/腥臭味为主,调查发现,湖泊/水库型原水中土霉味臭味污染物的检出率为80%,河流型原水中的检出率为69%。且2-MIB和GSM的浓度受季节性的影响,在夏秋季较高,在冬春季相对较低,这归因于水体中藻类生长的变化<sup>[7-8]</sup>。在各类原水中,2-MIB和GSM的来源主要分为2个方面:一方面来源于工农业生产和人类生活;另一方面由微生物生成,蓝藻和非光合细菌是湖泊河流中2-MIB、GSM的主要生产者<sup>[9-10]</sup>。2种臭味污染物的结构和微生物来源如表1所示。

近年来,由这2种臭味污染物导致的饮用水污染问题发生频繁。2016年6月,天津市滨海新区部分地区自来水出现臭味异常问题,经过对水源水和自来水水质的检测分析,确定了致嗅物质为GSM,且释放GSM的藻类为鱼腥藻<sup>[11]</sup>;2019年—2020年,湖北安陆市解放山水库多次发生“水华”现象,水体呈异常绿色,并伴有明显异味<sup>[12]</sup>;2021年,东太湖流域调查发现2-MIB质量浓度在8月和9月分别达到(727±426)ng/L和(369±176)ng/L,远超限值,造成水体臭味污染<sup>[13]</sup>。

表1 2-MIB与GSM的结构和来源<sup>[14]</sup>  
Tab. 1 Structure and Source of 2-MIB and GSM<sup>[14]</sup>

臭味污染物名称	嗅阈值/(ng·L <sup>-1</sup> )	化学结构式	微生物来源
2-MIB	10		颤藻属、席藻属、浮丝藻属、拟浮丝藻属、假鱼腥藻属和细鞘丝藻属等
GSM	4		颤藻属、席藻属、浮丝藻属、长孢藻属、鱼腥藻属和束丝藻属等

## 2 2-MIB 和 GSM 的检测方法

国内外针对嗅味污染物的检测方法分为感官分析法和仪器分析法,感官分析法因其受主观因素影响较大,且无法进行准确的定性定量分析,通常在研究中不考虑。针对饮用水中嗅味污染物易挥发和低检测阈值的特点,目前热门的仪器分析法是预处理后通过气相色谱-质谱联用仪(GC-MS)检测,其中预处理阶段常用的方法包括:液液萃取(LLX)、膜萃

取(ME)、固相萃取(SPE)、吹扫捕集(P & T)、固相微萃取(SPME)等,各预处理方法的原理、优缺点及适用范围如表 2 所示。对比各预处理方法,P & T 和 SPME 方法具有操作简单、检出限低、灵敏度高、无需使用有机溶剂等优点,是近年来臭味检测预处理阶段最常用的技术,吹扫捕集/固相微萃取-气相色谱-质谱检测 2-MIB 和 GSM 的优势已被很多研究证明。

表 2 不同预处理方法对比<sup>[15-19]</sup>  
Tab. 2 Comparison of Different Pretreatment Methods<sup>[15-19]</sup>

预处理方法	原理	优点	缺点	适用范围
LLX	利用相似相溶的原理,利用有机相将水相中的嗅味污染物萃取出来	能够从大量水中提取微量物质,可以分离不同性质不同状态的物质,操作方法成熟、所需设备简单,实现容易	萃取剂用量大且毒害较大、多次萃取操作繁琐、效率较低、方法回收率较差、方法重复性差	适用于需要较大规模分离和提纯的场合,方法检出限一般为 $\mu\text{g}$ ,一般为 10~100 $\mu\text{g}/\text{L}$
ME	利用微孔膜作为分离介质,将有机相(萃取剂)和水相(被萃取物)分隔开,在微孔膜的油水接触界面上,被萃取物从水相中扩散到膜界面,然后通过膜孔进入有机相中,实现萃取过程	由于膜萃取过程不需要两相的直接混合与分离,因此可以减少萃取剂在两相中的夹带损失	膜孔易堵塞、膜的稳定性差,萃取时要考虑膜和被萃取物质极性是否相同,技术难度较高、效率较低、有机溶剂污染风险存在	方法检出限一般为 $\mu\text{g}$ ,适用于 $\mu\text{g}$ 级浓度嗅味污染物的检测
SPE	利用固体吸附剂将液体样品中的目标化合物吸附,与样品的基体和干扰化合物分离,然后再用洗脱液洗脱,达到分离和富集的目的	操作简便易行,比 LLX 萃取效率高且节省溶剂,可对样品同时富集与净化,灵敏度高、重现性好、回收率高	固相萃取小柱价格高、寿命短(使用次数为 3~5 次)、吸附剂孔道易过载或堵塞、有机溶剂污染风险存在	方法检出限根据条件在几十到几百 $\text{ng}/\text{L}$ 不等,适用于 $\mu\text{g}$ 级或 $\text{ng}$ 级浓度嗅味污染物的检测
P & T	吹扫气体以一定速度通过样品溶液内部,将其中的挥发性组分吹脱后使其在装有适当吸附剂的捕集阱中被吸附浓缩	操作简单、自动化精度高、检出限低、灵敏度高,无需使用有机溶剂,环境友好	仪器价格昂贵、耗时较长、对样品要求较高	适用于富集挥发性或半挥发性有机物,方法检出限一般为 1~3 $\text{ng}/\text{L}$ ,适用于嗅味污染物痕量分析
SPME	利用特定的固体纤维吸附水样中的目标物质,脱离样品本身以及干扰化合物,吸附后的目标物质经过洗脱液洗脱或者热解析,使目标化合物达到分离、富集目的	操作简单、萃取快捷,无需有机溶剂,检出限低、灵敏度高、自动化可实现	萃取头机械性能差,使用寿命一般为 20~100 次,价格昂贵、对于难挥发性物质萃取效果差	适用于富集挥发性或半挥发性有机物,方法检出限一般在 1 $\text{ng}/\text{L}$ 以内,适用于嗅味污染物痕量分析

### 2.1 吹扫捕集-气相色谱-质谱检测(P & T-GC-MS)

P & T 法是利用流动氮气将样品中的嗅味物质吹脱出来,出口处利用捕集器将吹脱后的嗅味物质进行吸附,最后将吸附的嗅味物质热解析送入仪器进行测定。Deng 等<sup>[20]</sup>采用自动 P & T 技术和 GC-MS 联用技术测定包括 2-MIB 和 GSM 在内的 8 种嗅味物质,该方法使这 8 种嗅味物质在 1.0~500.0  $\text{ng}/\text{L}$  呈现良好的线性关系,相关系数( $R^2$ )>0.999,且方法的检出限均低于 1.5  $\text{ng}/\text{L}$ 。

### 2.2 固相微萃取-气相色谱-质谱检测(SPME-GC-MS)

SPME 是利用特定的固体纤维吸附水样中的目标物质,脱离样品本身以及干扰化合物,吸附后的目标物质经过洗脱液洗脱或者热解析,使目标化合物达到分离、富集的目的。Bristow 等<sup>[21]</sup>优化和评估了一种新的 SPME-GC-MS 方法,该方法对 2-MIB 和 GSM 这 2 种化合物均表现出良好的线性( $R^2$ >0.999)和低检测限(分别为 4.3  $\text{ng}/\text{L}$  和 2.0  $\text{ng}/\text{L}$ )。何云峰等<sup>[22]</sup>应用顶空 SPME-GC-MS 法测定太湖水

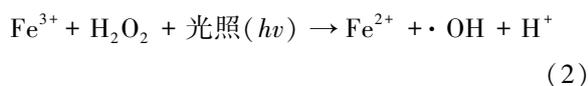
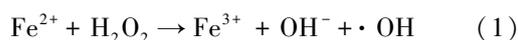
源水中嗅味物质 2-MIB、GSM 以及 $\beta$ -紫罗兰酮的含量,2-MIB、GSM 的质量浓度为 2.0~200.0 ng/L 与其对应的峰面积呈良好的线性关系,检出限分别为 1.12、1.38 ng/L,测定 6 组的相对标准偏差为 0.98%~13%,适用于水源水中嗅味物质的测定。

### 3 高级氧化技术净化 2-MIB 和 GSM

高级氧化技术是在光、电、催化剂等反应条件下,产生具有强氧化性的自由基[以羟基自由基( $\cdot\text{OH}$ )为主],通过其强氧化性将大分子难降解有机物氧化成低毒或无毒小分子物质。芬顿/类芬顿、臭氧( $\text{O}_3$ )高级氧化、水辐射技术、放电等离子体(plasma)、紫外(UV)高级氧化等高级氧化技术对饮用水中 2-MIB、GSM 的净化效果好,有着良好的应用前景。

#### 3.1 芬顿/类芬顿高级氧化技术

芬顿法是一种处理难降解有机污染物应用广泛的高级氧化技术,该技术的核心是利用亚铁离子( $\text{Fe}^{2+}$ )和过氧化氢( $\text{H}_2\text{O}_2$ )组成的芬顿试剂,在酸性条件下产生强氧化性的 $\cdot\text{OH}$ ,从而引发更多的其他活性氧,实现对有机物的降解<sup>[23]</sup>。类芬顿法是在芬顿法的基础上引入光、电、超声波、微波等额外能量以激发 $\text{H}_2\text{O}_2$ 产生更多的 $\cdot\text{OH}$ 。Park 等<sup>[24]</sup>进行小试试验发现普通芬顿法去除 2-MIB 和 GSM 的效果不明显,去除率不足 20%,主要是因为芬顿法产生的 $\cdot\text{OH}$ 浓度低而导致去除效率差,后又通过在芬顿法的基础上增加紫外光照形成光芬顿法,具体反应原理如式(1)~式(3)。



对比 2 种技术,光芬顿法对于 2-MIB 和 GSM 的去除具有明显优势。影响光芬顿法处理效果的主要因素为光强、pH、 $\text{H}_2\text{O}_2$  用量、 $\text{H}_2\text{O}_2$  与  $\text{Fe}^{2+}$  浓度比等,控制紫外剂量为 3 348  $\text{mJ}/\text{cm}^2$ , $\text{H}_2\text{O}_2$  投加质量浓度为 20  $\text{mg}/\text{L}$ , $\text{Fe}^{2+}$  投加质量浓度为 2  $\text{mg}/\text{L}$  条件下可将 2-MIB 和 GSM 的去除效率提高到 84.25% 和 48.38%,并且该体系随着 pH 的降低,去除效率还在逐步增加。在该体系的氧化作用下 2-MIB 脱碳、脱氢生成 2-乙基-1-己醇、异辛醇等醇类,GSM 断键生成丙酸甲酯、甲基丙烯酸甲酯、乙酸乙酯等脂

类,氧化产物相对本体毒性降低,危害减少。

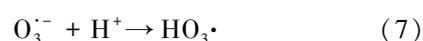
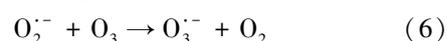
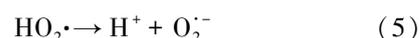
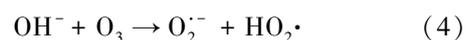
王长平等<sup>[25]</sup>针对深圳市原水水质特征,对深圳某水厂进行提标改造,设计了  $\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$  高级氧化工艺,对比原工艺 2-MIB 和 GSM 的去除效果明显提高,在  $\text{Fe}^{2+}$  投加质量浓度为 3  $\text{mg}/\text{L}$ , $\text{Fe}^{2+}$  与  $\text{H}_2\text{O}_2$  的物质的量之比在 1:4,pH 值为 5 条件下,2-MIB 的去除率从原来的 35.24% 提高到了 78.82%,水质整体明显提高。

芬顿法因其  $\text{H}_2\text{O}_2$  消耗量大、条件苛刻、会产生二次铁泥污染物等问题而更多是在废水处理领域发挥作用。类芬顿法在芬顿法的基础上改进,优化了反应条件,减少了二次污染,具有环境友善、氧化性强等优点,被认为是饮用水嗅味污染物净化的有效方法<sup>[26]</sup>,随着科技进步和研究深入,类芬顿法有望在实际水厂中得到广泛应用。

#### 3.2 基于 $\text{O}_3$ 的高级氧化技术

$\text{O}_3$  作为一种强氧化剂,以 2 种不同的方式氧化有机污染物:其一是  $\text{O}_3$  直接攻击目标分子中的富电子基团,如不饱和键,这种氧化会导致不完全矿化,主要发生在酸性 pH 下;第二种氧化方式是  $\text{O}_3$  降解时被间接促进,这时会产生能够氧化目标有机分子的高反应性物质(例如 $\cdot\text{OH}$ 和反应性氧物质)<sup>[27]</sup>。

Peng 等<sup>[28]</sup>比较研究了单独  $\text{O}_3$  技术和  $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$  技术去除 2-MIB、GSM 效果。结果表明,当  $\text{O}_3$  投加量为 3  $\text{mg}/\text{L}$  时, $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$  体系产生的 $\cdot\text{OH}$ 浓度约为  $1.58 \times 10^{-12}$   $\text{mol}/\text{L}$ ,是单独投加  $\text{O}_3$  的 2.1 倍,表现出更强的氧化能力,在去除 2-MIB 和 GSM 方面表现出更高的效率。王兴林<sup>[29]</sup>研究了  $\text{O}_3$  氧化与微纳气泡技术联用处理 2-MIB 和 GSM,发现微纳气泡对  $\text{O}_3$  氧化性能具有强化作用,二者能够产生协同效应,会生成大量的 $\cdot\text{OH}$ ,使得氧化能力增强,具体反应原理如式(4)~式(8)。



其中: $\text{O}_2^{\cdot-}$ ——超氧阴离子自由基;

$\text{HO}_2\cdot$ ——过氧化氢自由基;

$O_3^-$ —— $O_3$  的负离子形态;  
 $H^+$ ——氢离子;  
 $HO_3\cdot$ ——臭氧酸。

研究发现,处理 15 min 后 2-MIB 和 GSM 的去除率最高达 94.38% 和 95.45%。 $O_3$  高级氧化技术对嗅味污染物的去除效果明显, $O_3$  浓度是影响该方法处理效果的重要因素,在适合条件下对 2-MIB 和 GSM 这 2 种土霉类物质的处理效率可达 90% 以上。 $O_3$  高级氧化技术作为一种成熟的技术,比较容易通过工艺改造应用于实际水厂。Xu 等<sup>[30]</sup> 在山东潍坊某水厂建立了 1 套流量为 0.6 m<sup>3</sup>/h 的连续流中试装置,控制条件(2.0 mg/L  $O_3$  和 2.0 mg/L  $H_2O_2$ )连续运行 14 d 后,原水中 2-MIB 的质量浓度由 61.7 ng/L 降低至 3.8 ng/L,符合我国饮用水中 2-MIB 的浓度标准。彭锦玉等<sup>[31]</sup> 在山东某水厂(处理水量为 4×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d)常规工艺前增设了  $O_3$  催化氧化-生物流化床工艺,新工艺将进水 2-MIB 质量浓度由 160.3 ng/L 降至 5.5 ng/L,去除率为 96.6%,同时对溶解性有机碳等指标也有极好的去除效果。研究表明, $O_3$  高级氧化技术在实际水厂运行下对嗅味污染物的去除效果仍然较好。

### 3.3 水辐射技术

辐射技术是近年来一项治理环境污染的高新技术,它利用各种射线或者电子加速器产生的高能电子束对污染物进行处理。与传统氧化工艺相比,辐射技术是一种新的净化技术,不需要投加化学试剂,不会产生二次污染,具有降解效率高、降解彻底、反应速度快等优点<sup>[32]</sup>。

水处理领域中主要应用  $\gamma$  射线或电子束辐照水体,通过能量转移到轨道电子,产生水分子的瞬时转化,导致原子间键的断裂并生成高反应性产物,该产物主要包括活性氧( $\cdot OH$ 、 $O_2^-$ )以及反应性物质(RS)、[氢自由基( $\cdot H$ )、水合电子( $e_{aq}^-$ )]等活性粒子<sup>[33]</sup>。Christophoridis 等<sup>[34]</sup> 首次研究了应用水辐射技术去除 2-MIB 和 GSM,研究发现,水辐射技术能有效地净化饮用水中的 2-MIB 和 GSM,在不同试验条件下,2-MIB 和 GSM 的去除速率均符合一级动力学,速率常数遵循以下顺序: $\cdot OH > \cdot H > e_{aq}^- > (O_2^- / HO_2\cdot)$ ,在水辐射技术作用下 2-MIB 和 GSM 的去除率达到 90% 以上,该技术的降解速率和途径在很大程度上取决于操作试验条件和 RS 的选择性存在。

目前辐射技术在饮用水嗅味污染物净化领域研究较少,主要为实验室小试的形式,在水厂实际生产中的运用还暂未有文献报道。该技术在嗅味污染物净化方向具有优秀的前景,解决辐射技术能耗高等问题是未来研究的方向。

### 3.4 放电 plasma

plasma 的基本概念最早由美国科学家 Langmuir 提出,它由大量电子、激发态原子、正负离子、分子以及各种自由基粒子组成,呈电中性状态<sup>[35]</sup>。根据工作时宏观温度的差异,可将 plasma 分为高温 plasma 和低温 plasma,低温 plasma 又可分为非热平衡态等离子体(NTP)和热平衡态等离子体(EP)<sup>[36]</sup>。在 NTP 中,虽然电子温度很高,但体系对外呈现出的温度较低,甚至接近于室温,这使得它在室温下即可产生大量活性物质并作用于多种污染物。因此,具有广阔的研究和应用前景<sup>[37]</sup>。王瑞刚<sup>[38]</sup> 研究了 NTP 对于 2-MIB 和 GSM 的去除效果,NTP 氧化有机物的机理如图 1 所示,当施加的电压为 6 kV 时,经 NTP 氧化处理 5 min 后 2-MIB 和 GSM 的去除效果分别达到 100% 和 99.8%。水体中 pH 和环境因素对 NTP 氧化 2-MIB 和 GSM 的影响显著,2-MIB 和 GSM 在酸性条件下的去除效果最好,而水质基中碳酸氢根离子和藻类有机物(AOM)的存在会抑制其去除效率。放电 plasma 在水处理领域作为新型技术,研究表明,该技术单独使用或与其他高级氧化技术结合是去除水中污染物的有效策略,但是几乎所有基于 NTP 的水处理技术都仅存在于小规模试验中。该技术的工业应用或作为辅助工艺应用于水处理还需要大量的研究工作,除了监测中间降解产物的形成外,还必须确定净化过程中涉及的确切机制、成本经济性以及处理过程完成后水中残留反应性物质的可能性<sup>[39]</sup>。因此,应用于实际水厂还需要未来研究人员的努力。

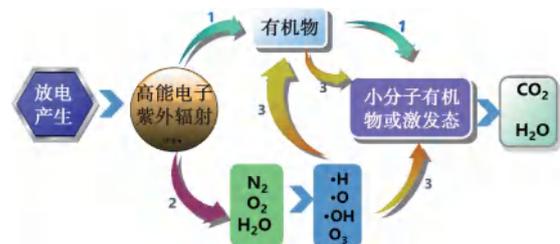


图 1 NTP 氧化有机物的机理<sup>[35]</sup>

Fig. 1 Mechanism of NTP Oxidation of Organic Compounds<sup>[35]</sup>

### 3.5 基于UV的高级氧化技术

基于UV的高级氧化技术是一种高效且先进的污染物去除技术,其核心原理在于利用UV激发产生高活性的初级活性物种(PRS)。PRS具有极强的氧化能力,可以迅速与臭味污染物发生反应,从而将其分解为低毒性或无毒性的小分子物质,甚至直接矿化为 $\text{CO}_2$ 和 $\text{H}_2\text{O}$ 。单独UV降解对水中臭味污染物的去除效果不佳,常需要与其他技术联用提高降解效果,目前常用的技术有UV/氯、UV/ $\text{O}_3$ 、UV/真空紫外(VUV)等。

#### 3.5.1 UV/氯

自由氯在UV照射下会产生 $\cdot\text{OH}$ 和氯自由基( $\cdot\text{Cl}$ ),2种自由基均具有强氧化性,能氧化各种难降解有机物。Ma等<sup>[40]</sup>比较了UV/氯、单独氯和单独UV对100 ng/L 2-MIB和GSM的去除效果,结果表明,UV/氯对2-MIB和GSM的去除效果比单独氯和单独UV效果好得多,在该体系下5 min即可达到90%的去除率。该体系的反应速率主要受自身因素和环境因素影响,提高UV光强度和游离氯剂量会提高反应的速率,pH的升高、碳酸氢根离子的存在会降低反应的速率。Meng等<sup>[41]</sup>分析了在UV/氯体系下2-MIB和GSM的处理效果和转化过程,在UV/氯体系下2-MIB和GSM的二级反应速率常数分别为 $2.57 \times 10^9 \text{ L}/(\text{mol} \cdot \text{s})$ 和 $2.74 \times 10^9 \text{ L}/(\text{mol} \cdot \text{s})$ 。2-MIB和GSM被氧化主要包括脱水、重排和开环3个环节,其中脱水起关键作用,处理后的产物多达十几种,主要为酮、醛、醇、环烷烃和烯烃。

目前各水厂基本都设有UV消毒系统,在已建成的UV消毒系统的基础上,能够添加氯构建UV高级氧化体系,改造相对方便。Wang等<sup>[42]</sup>在加拿大康沃尔市水处理厂中应用容积为40 L的反应装置研究了UV/氯技术对2-MIB、GSM控制的有效性,水源水来自西姆科湖。结果表明,在紫外线剂量为 $1\ 800 \sim 2\ 000 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ ,次氯酸的投加质量浓度为2 mg/L时,2-MIB和GSM质量浓度由400~500 ng/L降到100~150 ng/L,且随着体系pH值从8.5降至6.5,次氯酸投加量提高,去除效果进一步提升。结果表明,UV/氯技术在实际水体中试规模下仍然具有良好的去除效果。

#### 3.5.2 UV/ $\text{O}_3$

UV/ $\text{O}_3$ 体系的原理是当水中 $\text{O}_3$ 暴露在UV下

时,它被非常有效地光解成激发的氧原子 $[\text{O}(^1\text{D})]$ , $\text{O}(^1\text{D})$ 与 $\text{H}_2\text{O}$ 形成 $\text{H}_2\text{O}_2$ ,而 $\text{H}_2\text{O}_2$ 裂解又生成了 $\cdot\text{OH}$ <sup>[43]</sup>。Collivignarelli等<sup>[44]</sup>研究了UV/ $\text{O}_3$ 去除水中GSM和2-MIB的性能,对比了0.5  $\mu\text{g}/\text{L}$  GSM和0.4  $\mu\text{g}/\text{L}$  2-MIB下单独 $\text{O}_3$ 和UV/ $\text{O}_3$ 处理20 min的效果,前者去除率不超过70%,而后者实现了完全地去除。Berlt等<sup>[45]</sup>对比了单独 $\text{O}_3$ 、单独UV和UV/ $\text{O}_3$ 对GSM和2-MIB的去除效果,发现UV/ $\text{O}_3$ 的去除效果远高于2种单独处理的效果,且去除效率随着 $\text{O}_3$ 浓度的提高不断提高,当 $\text{O}_3$ 质量浓度提高到15.84 mg/L时,GSM在15 min内几乎完全去除,2-MIB在30 min内也几乎完全去除。结果表明,UV/ $\text{O}_3$ 体系去除臭味污染物效果明显,处理效率主要受体系内 $\text{O}_3$ 浓度的影响。UV/ $\text{O}_3$ 体系对GSM和2-MIB的净化效果在小试试验阶段明显。但水厂实际运行中考虑到经济因素 $\text{O}_3$ 的投加质量浓度一般为1 mg/L左右,水源水质较差时 $\text{O}_3$ 浓度根据水质有所提高,UV/ $\text{O}_3$ 体系在水厂的实际运行可能达不到理想条件。陈钰杭等<sup>[46]</sup>在山东省潍坊市某水厂进行中试研究发现,在UV/ $\text{O}_3$ 体系下,当 $\text{O}_3$ 投加质量浓度为3 mg/L条件下,GSM和2-MIB的去除率分别为30.7%和30.1%,在该系统的基础上耦合生物炭工艺显著提高了二者的去除效果,可将去除率提高到70%以上。因此,该技术在水厂中实际单独应用可能面临一系列的挑战,如要考虑实际 $\text{O}_3$ 投加量、 $\text{O}_3$ 利用率偏低,需要后处理工艺提高去除效果,这都是后续需要研究的问题。

#### 3.5.3 UV/VUV

在UV高级氧化技术中,常用的UV波长为254 nm。然而,研究发现VUV具有波长短、耗能低等优点,且对大部分臭味物质的去除效果都优于单独波长为254 nm的UV工艺。VUV能同时发射波长为185 nm( $\text{UV}_{185}$ )和254 nm( $\text{UV}_{254}$ )的UV,与波长为254 nm的UV相比具有直接水解和电离的优点<sup>[47]</sup>。Kutschera等<sup>[48]</sup>研究了纯水条件下UV/VUV技术对2-MIB和GSM的去除效果,在 $\text{UV}_{254} : \text{UV}_{185} = 4 : 1$ 、平均紫外通量为 $212 \text{ W}/\text{m}^2$ 的条件下,30 s可将100 ng/L 2-MIB和GSM完全消除,一级反应速率常数分别为 $(1.17 \pm 0.07) \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{J}$ 和 $(1.17 \pm 0.14) \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{J}$ ,进一步研究发现,最佳pH值为

5~8, 较低和较高的 pH 都会影响反应速率,  $\text{HCO}_3^-$  和天然有机物质的存在会抑制 2-MIB、GSM 的去除效果。张焱<sup>[49]</sup>对比了 VUV/氯、UV/氯对 2-MIB 和 GSM 的去除效果, 发现 VUV/氯技术展现出了显著的优势, 反应 30 min 后, 对 2-MIB 和 GSM 的去除率分别高达 96% 和 98%。进一步研究发现, VUV/氯技术去除 2-MIB 和 GAM 的反应过程遵循一级反应动力学模型, 且通过增加氯投加量、UV 光源强度可以有效提高 2-MIB 和 GSM 的去除速率。

VUV 技术去除嗅味污染物具有去除效率高、二次污染小等优点, 该项研究受到越来越多的关注。但 VUV 技术用于水处理的一个普遍问题是 185 nm 辐射

在水中的高吸收截面, 这只允许对小体积 ( $<10 \text{ m}^3/\text{d}$ ) 水进行经济高效地处理, 同时还要注意水中硝酸盐转化成亚硝酸盐的可能<sup>[50]</sup>。VUV 技术近几年的研究热点是以深 UV 灯管的形式应用于直饮水和智能马桶等场景, 在水厂的实际应用还存在许多不足。

高级氧化技术是目前最热门的化学氧化技术, 研究证实各类技术对嗅味污染物等有机污染物普遍具有优秀的去除效果, 能弥补传统氧化技术的不足。但其作为新型技术, 在具有许多优势的同时还存在很多不足之处, 仅少数技术能运用于实际生产中 (表 3)。未来还需科研人员继续研究, 使其能早日广泛应用于水厂实际饮用水处理。

表 3 各类氧化技术的优缺点及发展方向

Tab. 3 Advantages and Disadvantages and Development Direction of Various Oxidation Technologies

技术	优点	缺点	应用现状	发展方向	文献
芬顿/类芬顿高级氧化	环境友善、操作弹性大、氧化性强	需要不断补充 $\text{Fe}^{2+}$ , pH 操作范围窄, 有副产物	芬顿法在污水处理厂应用较广, 类芬顿法处于小试和中试阶段	优化药剂投加量及经济性, 发展光催化电催化组合技术	[26]
$\text{O}_3$ 高级氧化	技术成熟、氧化能力强、操作简单、清洁高效、反应条件温和、适用范围广	$\text{O}_3$ 腐蚀性大、 $\text{O}_3$ 利用率低、设备复杂、运行费用高	实验室小试成熟, 目前部分饮用水水厂已应用该工艺	提高 $\text{O}_3$ 利用率, 发展与 $\text{O}_3$ 相关的组合技术	[27]
水辐射技术	没有二次污染, 无需投加化学试剂, 降解效率高、反应速度快	能耗高、运行成本高	在实验室小试阶段, 应用于实际还比较困难	优化辐射技术的能耗问题	[32]
放电 plasma	操作简单、维护费用低, 使用能源清洁, 不会引入二次污染	水处理领域研究较少、技术要求高	目前以实验室小试为主, 应用于水厂实际运行的难度较大	优化电极结构提高放电效率、能量利用率	[36]
UV 高级氧化	操作简便, 绿色环保, 反应速度快	运行成本较高, 会产生 UV 消毒副产物	目前已经开始运用于预处理消毒阶段	优化 UV 光照体系, 研究智能化控制	[51]

## 4 组合技术净化 2-MIB 和 GSM

### 4.1 活性炭吸附与高级氧化联用

活性炭具有比表面积大、吸附性能好, 几乎不产生二次污染等优点, 且在吸附过程中会优先吸附有机物, 因此常用于水厂的深度处理<sup>[52]</sup>。活性炭吸附剂主要分为粉末活性炭、生物活性炭、颗粒活性炭、纤维活性炭、介孔炭等<sup>[53]</sup>。活性炭对嗅味污染物的去除作用包括 2 方面: 一方面是直接通过活性炭的物理吸附作用; 另一方面是通过附着在活性炭上的微生物的降解作用。由于各类活性炭的结构不同, 表现在活性炭比表面积、粒径、孔径上有区别, 对于嗅味污染物的吸附效果会有差异<sup>[54]</sup>。Bong 等<sup>[55]</sup>对比了不同材质粉末活性炭 (包括椰壳活性炭、煤质活性炭、木质活性炭) 以及介孔炭对 2-MIB 和 GSM 的吸附效果, 发现粉末活性炭对 2-MIB 和 GSM 的吸附效果好于介孔炭, 其中椰壳活性炭具有最大的吸

附容量, 这归因于其大的微孔体积和小而窄的孔径分布。活性炭形态的不同对 2-MIB 和 GSM 的去除效果也有差异, 周日安等<sup>[56]</sup>对比了液体炭浆溶液活性炭和固体活性炭粉末吸附 2-MIB 和 GSM 的效果, 试验发现, 使用液体炭浆溶液比直接加固体活性炭粉末效果更好, 炭浆比固体活性炭粉末对 2-MIB 的去除率平均高 13.8%, 对 GSM 的去除率平均高 10.1%。此外活性炭的吸附效果受环境温度的影响, 且 pH 过低时, 活性炭对嗅味污染物的吸附效果也会降低。因此, 采用活性炭吸附技术去除嗅味污染物时, 不仅要注意活性炭自身的结构特点, 还需注意环境温度和 pH 的影响。

目前各水厂都基本建有砂滤池, 它作为一种常用的水处理装置, 主要基于物理过滤和深度过滤的原理, 通过介质层 (通常为石英砂) 对水进行过滤, 从而去除水中的悬浮物、浑浊度和颗粒物等杂质, 另

外介质层中还存在着一些生物膜和微生物群落,这些生物膜和微生物可以吸附水中的有机物质、微生物等,起到进一步净化水质的作用<sup>[57]</sup>。炭砂滤池是在砂滤池的基础上改造,增加了一层活性炭填料,其除了具有砂滤池对水源的净化作用外,还具有活性炭吸附净化作用,相较于传统的砂滤池更为复杂和高效。炭砂滤池能够在一定程度上避免单独投加活性炭时可能出现的问题,包括活性炭不完全沉淀导致的水质不清澈以及可能产生的粉尘污染。邹磊等<sup>[58]</sup>依托武汉某水厂开展中试探究炭砂滤池对水中常规污染物和臭味物质的去除效果,滤池上下层分别铺设 800 mm×Φ1.5 mm 颗粒活性炭和 500 mm×Φ0.95 mm 石英砂,结果表明,炭砂滤池不仅对 COD<sub>mn</sub>、氨、浑浊度等常规指标有较好去除效果,同时能将 2-MIB 和 GSM 去除 68.86%和 95.83%,去除效果的差异主要归因于二者的分子结构特点,2-MIB 分子结构更加立体,GSM 相对扁平,更易被活性炭微孔吸附。

在高级氧化技术的基础上耦合活性炭吸附技术可提高对臭味污染物的去除效果。Guo 等<sup>[59]</sup>采用溶胶-凝胶法制备了二氧化钛/粉末活性炭复合材料,

在 UV 光照射下,二氧化钛/粉末活性炭能快速去除 2-MIB,且去除效率随时间的延长而增加,约 3 h 后达到平衡,去除率高达 97.8%。Jiang 等<sup>[60]</sup>进行了 UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-生物活性炭组合技术处理 2-MIB 和 GSM 的效能研究,研究发现,该技术在长期稳定运行条件下对臭味物质有较好的去除效果,水样经处理后 2-MIB 和 GSM 质量浓度均低于 5 ng/L,达到《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)要求。

#### 4.2 各技术针对不同浓度 2-MIB 和 GSM 的适用性

近年来,以长江、黄河流域为代表的水域 2-MIB 和 GSM 的检出质量浓度在几十到几百 ng/L 不等。表 4 总结了各技术对不同浓度 2-MIB 和 GSM 的去除效果和工艺参数。由表 4 可知,大部分净化技术对低浓度 2-MIB 和 GSM 均有较好的去除效果,但随着两者浓度的增加各技术去除效果都不同程度的下降,其中 plasma 技术能在较短时间内去除高浓度的 2-MIB 和 GSM,UV/氯和活性炭吸附技术也能去除较高浓度 2-MIB 和 GSM,但反应时间较长。针对不同浓度 2-MIB 和 GSM,可通过优化技术参数、延长运行时间或者组合技术来提高去除效果。

表 4 各净化技术对不同浓度 2-MIB 和 GSM 的去除效果  
Tab. 4 Effects of Various Purification Technologies on 2-MIB and GSM Removal at Different Concentrations

技术	参数	臭味物质初始质量浓度	2-MIB 去除效率	GSM 去除效率	参考文献
UV/芬顿	紫外剂量=3 348 mJ/cm <sup>2</sup> ; C(Fe <sup>2+</sup> )=2 mg/L; C(H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )=20 mg/L	C(2-MIB)=168 ng/L C(GSM)=128 ng/L	k=2.00×10 <sup>-4</sup> s <sup>-1</sup> 60 min 去除 84.25%	k=2.50×10 <sup>-4</sup> s <sup>-1</sup> 60 min 去除 48.38%	[24]
O <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	C(O <sub>3</sub> )=3 mg/L C(O <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )=5	C(2-MIB)=C(GSM)= 168~177 ng/L	12~15 min 去除率达到 96%		[28]
plasma	电压为 6 kV,pH 值=7; 温度(T)=(25±2)℃	C(2-MIB)=C(GSM)= 10 μg/L	5 min 去除 100%	5 min 去除 98%	[38]
UV/氯	UV <sub>254</sub> =2.5 mW/cm <sup>2</sup> ; C(Cl <sub>2</sub> )=0.5 mg/L	C(2-MIB)=C(GSM)= 5 μg/L	k=(0.049 3±0.004 1) min <sup>-1</sup> 40 min 完全去除	k=(0.079 5±0.001 5) min <sup>-1</sup> 60 min 完全去除	[61]
UV/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	C(H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )=6 mg/L; pH 值=7	C(2-MIB)=C(GSM)=25 ng/L C(2-MIB)=C(GSM)=100 ng/L	40 min 去除 70%左右 40 min 去除 40%左右		[62]
		C(2-MIB)=C(GSM)= 250 ng/L	40 min 去除 25%左右	40 min 去除 30%左右	[62]
UV/次氯酸	C(HClO)=0.1 mmol/L	C(2-MIB)=130 ng/L C(GSM)=110 ng/L	k=8.63×10 <sup>-4</sup> s <sup>-1</sup>	k=1.04×10 <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup>	[41]
UV/VUV	UV <sub>254</sub> :UV <sub>185</sub> =4:1; 平均紫外通量为 212 W/m <sup>2</sup>	C(2-MIB)=C(GSM)= 100 ng/L	k=(1.17±0.07)× 10 <sup>-3</sup> m <sup>2</sup> /J 30 s 完全去除	k=(1.17±0.14)× 10 <sup>-3</sup> m <sup>2</sup> /J 30 s 完全去除	[48]
活性炭吸附	C(粉末活性炭)=10 mg/L; 吸附 60 min;	C(2-MIB)=846 ng/L C(GSM)=919 ng/L	去除率为 80%以上	去除率为 60%左右	[63]
	C(粉末活性炭)=10 mg/L; 搅拌 40 min;沉降 30 min	C(2-MIB)=C(GSM)= 100 ng/L	去除率为 95%	去除率为 77%	[55]

注:k 为伪一级反应速率常数。

### 4.3 组合技术净化 2-MIB 和 GSM 的实际应用

水厂在实际运行时,进水往往都是通过一系列技术处理后排出,而组合技术净化臭味污染物的效能研究就至关重要。高炜等<sup>[64]</sup>研究了 O<sub>3</sub>-生物活性炭技术在水厂除臭的应用,结果表明,砂滤出水 2-MIB 去除率为 15%~30%,后 O<sub>3</sub> 出水 2-MIB 去除率为 25%~60%,生物活性炭单元对 2-MIB 平均去除率为 39.9%,出水臭味明显改善,2-MIB 质量浓度基本在 10 ng/L 以下。宋欣等<sup>[65]</sup>在深圳市某深度处理水厂也研究了 O<sub>3</sub>-生物活性炭技术对 2-MIB、GSM 的去除,出水 2-MIB、GSM 的质量浓度分别由 (24.0±10.3)、(33.5±12.2) ng/L 降至 (3.2±2.0)、(3.1±3) ng/L,均能满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)的要求。Ren 等<sup>[66]</sup>在 O<sub>3</sub>-生物活性炭的技术基础上又增加了超滤技术形成了 O<sub>3</sub>-生物活性炭-超滤技术,结果表明,在连续运行中,O<sub>3</sub>-生物活性炭-超滤组合技术能够实现 2-MIB 和 GSM 的 92.5%和 92.2%的去除率。O<sub>3</sub> 氧化改变了有机物的生化特性,有利于后续生物活性炭去除水中的臭味污染物,超滤能有效降低水的浑浊度等<sup>[67]</sup>。Wu 等<sup>[68]</sup>研究了曝气生物滤池(BAF)和超滤的组合技术在去除 2-MIB、GSM 的效果,当 2-MIB/GSM 初始质量浓度为 100 ng/L 时,BAF 反应器出水中 2-MIB 和 GSM 的质量浓度降至 10 ng/L 以下,达到我国最新的《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)。以上研究充分证明了组合技术在水厂除臭味物质的可行性。

各高级氧化技术对臭味污染物的小试去除效果好、效率高,但将其投入到水厂实际运行中可能会因处理水量、水质的变化而导致去除效率变低、氧化剂用量增加、处理成本变高等问题。水厂在原有处理系统的基础上改造形成组合处理系统可一定程度上解决该问题。上述研究表明,组合技术能以一种长期稳定的条件去除 2-MIB 和 GSM 等臭味污染物。因此,组合技术在水厂的实际应用是未来研究的方向。

## 5 总结与展望

(1)预处理后通过 GC-MS 分析是近年最热门的臭味物质检测方法。本文对比了各预处理技术的优劣,总结了各技术的适用范围,其中 SPME 和 P & T 具有操作简单、检出限低、灵敏度高、副作用无等

优点,且 SPME/P & T-GC-MS 分析技术对于 ng/L 级 2-MIB 和 GSM 的检测曲线具有良好的线性关系,是目前水中典型臭味污染物检测最常用的方法。

(2)近年来,研究人员已通过小试试验研究了芬顿/类芬顿高级氧化、O<sub>3</sub> 高级氧化、水辐射技术、放电 plasma 以及 UV 高级氧化技术去除饮用水中 2-MIB 和 GSM 的高效性。其中 O<sub>3</sub> 高级氧化技术、UV 高级氧化技术研究成熟,部分技术已应用于实际水厂中,且表现出良好的净化效果,是水厂除臭工艺的首选,而水辐射技术、放电 plasma 是水处理领域的新型技术,是未来的研究热点。

(3)实际水体中臭味污染物质量浓度从几十到上千 ng/L 不等,各类技术的净化效果因污染物浓度的增加而受到影响,可通过优化各技术反应条件、延长反应时间或与活性炭吸附等技术联用提高净化效果。在水厂的实际运行中,应针对不同水厂的实际情况,水厂进水量、水质情况,因地制宜,将多种高级氧化技术、活性炭以及其他技术进行组合,制定合适的处理方案,这种组合技术的实际应用是未来研究的方向。

## 参考文献

- [1] CHISLOCK M F, OLSEN B K, CHOI J, et al. Contrasting patterns of 2-methylisoborneol (2-MIB) vs. geosmin across depth in a drinking water reservoir are mediated by cyanobacteria and actinobacteria [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28: 32005–32014. DOI: 10.1007/S11356-021-12973-Z.
- [2] TREUER G, KIRCHHOFF C, LEMOS M C, et al. Challenges of managing harmful algal blooms in US drinking water systems [J]. *Nature Sustainability*, 2021, 4(11): 958–964.
- [3] YUAN J, HOFMANN R. Adsorption and biodegradation of 2-methylisoborneol and geosmin in drinking water granular activated carbon filters: A review and meta-analysis [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 440: 129838. DOI: 10.1016/J.JHAZMAT.2022.129838.
- [4] DEVI A, CHIU Y T, HSUEH H T, et al. Quantitative PCR based detection system for cyanobacterial geosmin/2-methylisoborneol (2-MIB) events in drinking water sources: Current status and challenges [J]. *Water Research*, 2021, 188: 116478. DOI:10.1016/j.watres.2020.116478.
- [5] LI L, YANG S, YU S, et al. Variation and removal of 2-MIB in full-scale treatment plants with source water from Lake Tai, China [J]. *Water Research*, 2019, 162: 180–189. DOI: 10.1016/j.watres.2019.06.066.

- [ 6 ] SRINIVASAN R, SORIAL G A. Treatment of taste and odor causing compounds 2-methyl isoborneol and geosmin in drinking water; A critical review[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, 23(1): 1-13.
- [ 7 ] 张永鑫, 仇付国, 王春苗, 等. 我国饮用水嗅味问题的发生、主要嗅味物质及来源[J]. *环境科学学报*, 2023, 43(12): 65-75.  
ZHANG Y X, QIU F G, WANG C M, et al. The occurrence, main odorants and sources of drinking water odor problems in China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2023, 43(12): 65-75.
- [ 8 ] 张建芳, 顾青清, 符策竿, 等. 某浅水湖型水源地土臭素(GSM)和2-甲基异莰醇(2-MIB)的变化规律[J]. *净水技术*, 2018, 37(11): 7-10.  
ZHANG J F, GU Q Q, FU C G, et al. Variation regulation of geosmin (GSM) and 2-methylisoborneol (2-MIB) in a water source of shallow-lake type[J]. *Water Purification Technology*, 2018, 37(11): 7-10.
- [ 9 ] LI H X, LI L, YIN Q, YU S L, et al. Different drinking water production schemes to treat authentic algae-laden source water; Removal of 2-methylisoborneol in different forms[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 440: 135962. DOI:10.1016/j.cej.2022.135962.
- [ 10 ] FRANKLIN H M, PODDUTURI R, JØRGENSEN N O G, et al. Potential sources and producers of 2-methylisoborneol and geosmin in a river supplying a drinking water treatment plant[J]. *Chemical Engineering Journal Advances*, 2023, 14: 100455. DOI:10.1016/J.CEJA.2023.100455.
- [ 11 ] 张旭东, 张学博, 刘畅, 等. 天津滨海新区自来水嗅味事件成因分析及应急处理[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(13): 46-49.  
ZHANG X D, ZHANG X B, LIU C, et al. Causes of odor problem and its emergent treatment in Tianjin Binhai New Area[J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(13): 46-49.
- [ 12 ] 章琦媛. 突发性水污染事件应急管理研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2022.  
ZHANG Q Y. Research on emergency management of sudden water pollution incidents[D]. Wu'han: Huazhong University of Science and Technology, 2022.
- [ 13 ] SHI X Y, HUANG Q H, SHEN X B, et al. Distribution, driving forces, and risk assessment of 2-MIB and its producer in a drinking water source-oriented shallow lake[J]. *Environmental science and pollution research international*, 2023, 30(27): 71194-71208.
- [ 14 ] 杨敏, 于建伟, 等. 饮用水嗅味问题: 来源与控制[M]. 北京: 科学出版社, 2021.  
YANG M, YU J W, et al. Smell in drinking water: Source and control [M]. Beijing: Science Press, 2021.
- [ 15 ] JIANG H J, YANG S X, TIAN H Y, et al. Research progress in the use of liquid-liquid extraction for food flavour analysis[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2023, 132: 138-149. DOI:10.1016/J.TIFS.2023.01.005.
- [ 16 ] YAO L P, ZHANG J Y, XIA J, et al.  $\beta$ -ketoamine covalent organic frameworks based magnetic solid-phase microextraction for rapid determination of 12 organophosphate esters in surface water [J]. *Microchemical Journal*, 2024, 200: 110283. DOI: 10.1016/J.MICROC.2024.110283.
- [ 17 ] CHENG J W, MA J P, LI S, et al. The covalent organic framework based nylon membrane extraction coupled with UHPLC-MS/MS for highly efficiency determination of hexabromocyclododecanes in environmental water[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, 45: 131191. DOI: 10.1016/J.JHAZMAT.2023.131191.
- [ 18 ] FREDES A, SALES C, BARREDA M, et al. Quantification of prominent volatile compounds responsible for muskmelon and watermelon aroma by purge and trap extraction followed by gas chromatography-mass spectrometry determination [J]. *Food Chemistry*, 2016, 190: 689-700. DOI:10.1016/j.foodchem.2015.06.011.
- [ 19 ] 景二丹, 许小燕, 顾青清, 等. 固相微萃取-气相色谱串联两级质谱法测定水中 10 种藻类代谢产物[J]. *净水技术*, 2022, 41(2): 150-156.  
JING E D, XU X Y, GU Q Q, et al. Determination of 10 algal metabolites in water by solid-phase microextraction gas chromatography tandem two-stage mass spectrometry [J]. *Water Purification Technology*, 2022, 41(2): 150-156.
- [ 20 ] DENG X, LIANG G, CHEN J, et al. Simultaneous determination of eight common odors in natural water body using automatic purge and trap coupled to gas chromatography with mass spectrometry [J]. *Journal of Chromatography A*, 2011, 1218(24): 3791-3798.
- [ 21 ] BRISTOW R L, HAWORTH DUFF A, YOUNG I S, et al. An automated micro solid phase extraction gas chromatography-mass spectrometry  $\mu$ SPE-GC-MS[J]. *Scientific Reports*, 2023, 13(1): 1-9.
- [ 22 ] 何云峰, 李翠梅, 薛天一. 顶空固相微萃取-气相色谱-质谱法测定太湖水源水中嗅味物质土臭素、2-甲基异莰醇以及 $\beta$ -紫罗兰酮的含量[J]. *理化检验(化学分册)*, 2022, 58(5): 542-547.  
HE Y F, LI C M, XUE T Y. Determination of odorants of geosmin, 2-methylisoborneol and  $\beta$ -linalone in source water of Taihu Lake by gas chromatography-mass spectrometry after headspace-solid microextraction [J]. *Physical Testing and Chemical Analysis(Part B: Chemical Analysis)*, 2022, 58(5): 542-547.
- [ 23 ] LIU S, LONG Z, LIU H, et al. Recent advances in ultrasound-Fenton/Fenton-like technology for degradation of aqueous organic pollutants[J]. *Chemosphere*, 2024, 352: 141286. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2024.141286.
- [ 24 ] PARK J, NAM H, CHOI J, et al. Oxidation of geosmin and 2-

- methylisoborneol by the photo-Fenton process: Kinetics, degradation intermediates, and the removal of microcystin-LR and trihalomethane from Nak-Dong River water, South Korea [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 313: 345–354. DOI:10.1016/j.cej.2016.12.086.
- [25] 王长平, 王凤鹭, 陈海松, 等. 亚铁/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 高级氧化协同矿化技术用于水厂改造[J]. *中国给水排水*, 2023, 39(24): 100–105.
- WANG C P, WANG F L, CHEN H S, et al. Application of ferrous iron/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> advanced oxidation co-mineralization technology in waterworks renovation [J]. *China Water & Wastewater*, 2023, 39(24): 100–105.
- [26] 俞乙平, 林少华, 钱子姣. 活化 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 的芬顿/类芬顿体系的研究现状[J]. *应用化工*, 2022, 51(4): 1101–1108, 1115.
- YU Y P, LIN S H, QIAN Z J. Research status of Fenton/Fenton like system for activating H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> [J]. *Applied Chemical Engineering*, 2022, 51(4): 1101–1108, 1115.
- [27] VITTORIO Z, ANDREA B, ANDREW R, et al. The application of advanced oxidation processes including photocatalysis-based ones for the off-flavours removal (GSM and MIB) in recirculating aquaculture systems [J]. *Molecular Catalysis*, 2023, 551: 113616. DOI:10.1016/J.MCAT.2023.113616.
- [28] PENG J, WANG Q, LI Z, et al. Pilot testing and engineering application of O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> process for 2-methylisoborneol and geosmin removal in drinking water treatment[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2024, 60: 105140. DOI: 10.1016/j.jwpe.2024.105140.
- [29] 王兴林. 臭氧微纳气泡降解饮用水中典型嗅味物质的效能与机理研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2023.
- WANG X L. Study on the efficiency and mechanism of ozone micro nano bubbles in degrading typical odorants in drinking water [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2023.
- [30] XU H Z, ZHANG J, WANG W J, et al. Moderate pre-ozonation coupled with a post-peroxone process remove filamentous cyanobacteria and 2-MIB efficiently: From bench to pilot-scale study [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 424 (127530): 127530. DOI: 10.1016/J.JHAZMAT.2021.127530.
- [31] 彭锦玉, 李振邦, 张坤乾, 等. 前置臭氧-生物流化床工艺用于水厂提质改造[J]. *中国给水排水*, 2024, 40(12): 94–100.
- PENG J Y, LI Z B, ZHANG K Q, et al. Application of pre ozone biofluidized bed process in water plant quality improvement and renovation [J]. *China Water & Wastewater*, 2024, 40(12): 94–100.
- [32] LIU X Y, WANG J L. Decolorization and degradation of various dyes and dye-containing wastewater treatment by electron beam radiation technology: An overview [J]. *Chemosphere*, 2024, 351: 141255. DOI:10.1016/j.chemosphere.2024.141255.
- [33] WANG J L, CHU L B. Irradiation treatment of pharmaceutical and personal care products (PPCPs) in water and wastewater: An overview [J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2016, 125: 56–64. DOI:10.1016/j.radphyschem.2016.03.012.
- [34] CHRISTOPHORIDIS C, PESTANA C J, KALOUDIS T, et al. Radiolytic degradation of 2-methylisoborneol and geosmin in water: Reactive radical species and transformation pathways [J]. *Chemical Engineering Journal Advances*, 2021, 8: 100196. DOI:10.1016/J.CEJA.2021.100196.
- [35] 施明才. 等离子体技术在环境保护中的应用研究[J]. *环境与发展*, 2019, 31(1): 78–80.
- SHI M C. Research on the application of plasma technology in environmental protection [J]. *Environment and Development*, 2019, 31(1): 78–80.
- [36] SONG R Y, LI H, KANG Z, et al. Surface plasma induced elimination of antibiotic-resistant *Escherichia coli* and resistance genes: Antibiotic resistance, horizontal gene transfer, and mechanisms [J]. *Separation and Purification Technology*, 2021, 275: 119185. DOI:10.1016/j.seppur.2021.119185.
- [37] EL-SHEEKH M M, ABD A M A, MOHAMMED S A. Algae processing by plasma discharge technology: A review [J]. *Algal Research*, 2023, 70: 102983. DOI: 10.1016/J.ALGAL.2023.102983.
- [38] 王瑞刚. 放电等离子体氧化对饮用水源中藻类的去除及藻源消毒副产物削减机制[D]. 陕西: 西北农林科技大学, 2023.
- WANG R G. Removal of algae from drinking water sources by discharge plasma oxidation and mechanism for reducing disinfection by-products of algae sources [D]. Shaanxi: Northwest A & F University, 2023.
- [39] MURUGESAN PHD P, MONICA V E, MOSES PHD J A, et al. Water decontamination using non-thermal plasma: Concepts, applications, and prospects [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2020, 8(5): 104377. DOI:10.1016/j.jece.2020.104377.
- [40] MA L, WANG C, LI H, et al. Degradation of geosmin and 2-methylisoborneol in water with UV/chlorine: Influencing factors, reactive species, and possible pathways [J]. *Chemosphere*, 2018, 211: 1166–1175. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.08.029.
- [41] MENG T, SU X, SUN P Z. Degradation of geosmin and 2-methylisoborneol in UV-based AOPs for photoreactors with reflective inner surfaces: Kinetics and transformation products [J]. *Chemosphere*, 2022, 306: 135611. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.135611.
- [42] WANG D, BOLTON J R, ANDREWS S A, et al. UV/chlorine control of drinking water taste and odour at pilot and full-scale [J]. *Chemosphere*, 2015, 136: 239–244. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2015.05.049.
- [43] ZOSCHKE K, DIETRICH N, BORNICK H, et al. UV-based advanced oxidation processes for the treatment of odour compounds: Efficiency and by-product formation [J]. *Water*

- Research, 2012, 46(16): 5365–5373.
- [44] COLLIVIGNARELLI C, SORLINI S. AOPs with ozone and UV radiation in drinking water: Contaminants removal and effects on disinfection byproducts formation [J]. *Water Science and Technology*, 2004, 49(4): 51–56.
- [45] BERLT M M G, SOUZA D C D R S, LEANDRO Ê M, et al. Comparative assessment of the degradation of 2-methylisoborneol and geosmin in freshwater using advanced oxidation processes [J]. *Environmental technology*, 2020, 42(24): 3832–3839.
- [46] 陈钰杭, 李鑫玮, 甘振东, 等. 中试紫外高级氧化耦合生物活性炭工艺去除典型臭味物质 [J]. *环境化学*, 2023, 42(12): 4366–4374.
- CHEN Y H, LI X W, GAN Z D, et al. Pilot test of removing typical odors by the coupled UV advanced oxidation and biological activated carbon processes [J]. *Environmental Chemistry*, 2023, 42(12): 4366–4374.
- [47] LIAN X Y, YE S J, LIU B Y, et al. Key role of  $\cdot O_2^-$  in promoting deep degradation of VOCs in VUV-based process [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 883: 163806. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.163806.
- [48] KUTSCHERA K, BÖRNICK H, WORCH E. Photoinitiated oxidation of geosmin and 2-methylisoborneol by irradiation with 254 nm and 185 nm UV light [J]. *Water Research*, 2009, 43(8): 2224–2232.
- [49] 张焱. 真空紫外/氯技术去除饮用水致嗅物质 2-MIB 和 GSM 的研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2018.
- ZHANG Y. Study on the removal of odorous substances 2-MIB and GSM from drinking water by vacuum ultraviolet/chlorine technology [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2018.
- [50] ZOSCHKE K, BÖRNICK H, WORCH E. Vacuum-UV radiation at 185 nm in water treatment-A review [J]. *Water Research*, 2014, 52: 131–145. DOI:10.1016/j.watres.2013.12.034.
- [51] 王永磊, 刘杰, 王猛, 等. 紫外高级氧化工艺降解土臭素 (GSM) 和 2-甲基异茨醇 (2-MIB) 的对比 [J]. *环境化学*, 2022, 41(9): 3083–3093.
- WANG Y L, LIU J, WANG M, et al. Comparison of advanced UV oxidation process for degradation of geosmin (GSM) and 2-methylisoborneol (2-MIB) [J]. *Environmental Chemistry*, 2022, 41(9): 3083–3093.
- [52] LEI J M, QI R F, TUMRANI S H, et al. Selective stepwise adsorption for enhanced removal of multi-component dissolved organic chemicals from petrochemical wastewater [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 912: 169600. DOI:10.1016/j.scitotenv.2023.169600.
- [53] GAO J Y, XING X C, CAI W, et al. Effect of micropollutants on disinfection byproducts and antibiotic resistance genes in drinking water in the process of biological activated carbon treatment [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, 46: 1132304. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.1132304.
- [54] JIA Y S, CHEN D H, LI Y, et al. Study on the adsorption mechanism of polar and non-polar VOCs by the activated carbon with surface oxygen [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 490: 151907. DOI:10.1016/j.cej.2024.151907.
- [55] BONG T, KANG J, YARGEAU V, et al. Geosmin and 2-methylisoborneol adsorption using different carbon materials: Isotherm, kinetic, multiple linear regression, and deep neural network modeling using a real drinking water source [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 314: 127967. DOI:10.1016/j.jclepro.2021.127967.
- [56] 周日安, 张苏燕, 郑仕, 等. 活性炭去除水中的 2-甲基异茨醇和土臭素的优化试验研究 [J]. *城镇供水*, 2023(1): 65–68.
- ZHOU R A, ZHANG S Y, ZHENG S, et al. Optimization experimental study on the removal of 2-methylisoborneol and geosmin in water by activated carbon [J]. *Urban Water Supply*, 2023(1): 65–68.
- [57] GABRIELA H, AGATHE M, RAMSEIER S G, et al. Insights into polystyrene nanoplastics adsorption mechanisms onto quartz sand used in drinking water treatment plants [J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 908: 168076. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.168076.
- [58] 邹磊, 贾旭超, 夏娜, 等. 炭砂滤池去除水中典型污染物和嗅味物质中试试验 [J]. *净水技术*, 2024, 43(s1): 82–88.
- ZOU L, JIA X C, XIA N, et al. Pilot test on the removal of typical pollutants and odor substances from water by carbon-sand filter [J]. *Water Purification Technology*, 2024, 43(s1): 82–88.
- [59] GUO X P, ZANG P, LI Y M, et al.  $TiO_2$ -powdered activated carbon ( $TiO_2/PAC$ ) for removal and photocatalytic properties of 2-methylisoborneol (2-MIB) in water [J]. *Water*, 2021, 13: 1622–1622. DOI: 10.3390/w13121622.
- [60] JIANG Q Y, WANG Y L, TIAN L P, et al. Pilot-scale and mechanistic study of the degradation of typical odors and organic compounds in drinking water by a combined UV/ $H_2O_2$ -BAC process [J]. *Chemosphere*, 2022, 292: 133419. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.133419.
- [61] KIM T K, MOON B R, KIM T, et al. Degradation mechanisms of geosmin and 2-MIB during UV photolysis and UV/chlorine reactions [J]. *Chemosphere*, 2016, 162: 157–164. DOI:10.1016/j.chemosphere.2016.07.079.
- [62] 尚菲, 石炳瑞, 丁路明. 基于 UV/ $H_2O_2$  深度处理组合去除饮用水中嗅味物质的工艺研究 [J]. *生物化工*, 2022, 8(2): 65–70.
- SHANG F, SHI B R, DING L M. Study on the process of removing odorous substances in drinking water based on UV/ $H_2O_2$  deep treatment combination [J]. *Biochemistry*, 2022, 8(2): 65–70.
- [63] 李一兵, 方华, 韩正双, 等. 活性炭指标对吸附去除 2-MIB 和土臭素效能的影响 [J]. *工业水处理*, 2021, 41(10): 91–

- 96.
- LI Y B, FANG H, HAN Z S, et al. The influence of activated carbon indicators on the adsorption and removal efficiency of 2-MIB and geosmin [J]. *Industrial Water Treatment*, 2021, 41 (10): 91-96.
- [64] 高伟,王铮. O<sub>3</sub>-BAC 工艺去除原水中典型异嗅物的效果[J]. *净水技术*, 2014, 33(s1): 44-47.
- GAO W, WANG Z. Treatment of raw water by ozone-biological activated carbon process [J]. *Water Purification Technology*, 2014, 33(s1): 44-47.
- [65] 宋欣,李燕君,黄慧,等. 臭氧-上向流 BAC 工艺对常规及新污染物的控制效果[J]. *中国给水排水*, 2024, 40(3): 1-8.
- SONG X, LI Y J, HUANG H, et al. Control of conventional and emerging contaminants by ozone-upflow biological activated carbon process [J]. *China Water & Wastewater*, 2024, 40(3): 1-8.
- [66] REN X Y, WU Q D, SU J Y, et al. Efficient removal of organic matters and typical odor substances in rural drinking water using ozone-BAC-UF combined system to meet new water quality standards in China [J]. *Separation and Purification Technology*, 2023, 327: 124899. DOI: 10.1016/j.seppur.2023.124899.
- [67] HAMID A I K, SANCIOLO P, GRAY S, et al. Comparison of the effects of ozone, biological activated carbon (BAC) filtration and combined ozone-BAC pre-treatments on the microfiltration of secondary effluent [J]. *Separation and Purification Technology*, 2019, 215: 308-316. DOI: 10.1016/j.seppur.2019.01.005.
- [68] WU Q, CHEN C, SHU J, et al. Efficiency of a combined biological aerated filter and ultrafiltration process for removal of odor compounds in rural drinking water [J]. *Separation and Purification Technology*, 2024, 342: 126991. DOI: 10.1016/j.seppur.2024.126991.

## (上接第9页)

- [7] Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety. Water management: Water protection policy in Germany [EB/OL]. [2024-10-20]. <https://www.bmu.de/en/topics/water-resources-waste/water-management>.
- [8] Australia Government, Department of Agriculture, Water and the Environment. Water management policy and legislation: Commonwealth water legislation [EB/OL]. [2024-10-20]. <https://www.agriculture.gov.au/water/policy/legislation>.
- [9] Singapore Food Agency. Drinking water quality [EB/OL]. [2024-10-20]. <https://www.sfa.gov.sg/food-retail/drinking-water-quality/drinking-water-quality>.
- [10] United States Environmental Protection Agency. EPA at 50: Progress in providing safe drinking water [EB/OL]. [2024-10-20]. <https://www.epa.gov/newsreleases/epa-50-progress-providing-safe-drinking-water>.
- [11] National Health and Medical Research Council. Australia drinking water guidelines [M/OL]. [2024-10-20]. <https://www.nhmrc.gov.au/about-us/publications/australian-drinking-water-guidelines>.
- [12] European Union. Directive (EU) 2020/2184 of the European Parliament and of the Council of 16 December 2020 on the quality of water intended for human consumption (recast) (Text with EEA relevance) [EB/OL]. [2024-10-20]. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2020/2184/oj>.
- [13] Attorney General's Chambers. Environmental public health act 1987 [EB/OL]. [2024-10-20]. <https://sso.agc.gov.sg/Act/EPHA1987>.
- [14] Australian Drinking Water Guidelines. National water quality management strategy [EB/OL]. [2023-06-05]. <https://www.waterquality.gov.au/guidelines>.
- [15] 上海市人民政府. 上海市水务局关于贯彻实施《生活饮用水水质标准》的通知 [EB/OL]. (2019-04-28) [2024-10-20]. [https://www.shanghai.gov.cn/nw12344/20200813/0001-12344\\_58847.html](https://www.shanghai.gov.cn/nw12344/20200813/0001-12344_58847.html).
- Shanghai Municipal People's Government. Shanghai Water Affairs Bureau notice on the implementation of the *Standards for Drinking Water Quality* [EB/OL]. (2019-04-28) [2024-10-20]. [https://www.shanghai.gov.cn/nw12344/20200813/0001-12344\\_58847.html](https://www.shanghai.gov.cn/nw12344/20200813/0001-12344_58847.html).
- [16] 深圳市南山区水务局. 关于印发深圳市《生活饮用水水质标准》的公示 [EB/OL]. (2020-05-07) [2024-10-20]. [https://www.szns.gov.cn/nsqhsj/gkmlpt/content/7/7631/post\\_7631346.html#15215](https://www.szns.gov.cn/nsqhsj/gkmlpt/content/7/7631/post_7631346.html#15215).
- Shenzhen Nanshan District Water Affairs Bureau. Public notice on the issuance of Shenzhen's *Standards for Drinking Water Quality* [EB/OL]. (2020-05-07) [2024-10-20]. [https://www.szns.gov.cn/nsqhsj/gkmlpt/content/7/7631/post\\_7631346.html#15215](https://www.szns.gov.cn/nsqhsj/gkmlpt/content/7/7631/post_7631346.html#15215).
- [17] HUERTA-SAENZ L, IRIGOYEN M, BENAVIDES J, et al. Tap or bottled water: Drinking preferences among urban minority children and adolescents [J]. *Journal of Community Health*, 2012, 37: 54-58. DOI: 10.1007/s10900-011-9415-1.
- [18] VIEUX F, MAILLOT M, REHM C D, et al. Trends in tap and bottled water consumption among children and adults in the United States: Analyses of NHANES 2011-16 data [J]. *Nutrition Journal*, 2020, 19: 10. DOI: 10.1186/s12937-020-0523-6.
- [19] FLEGAL K M, KRUSZON-MORAN D, CARROLL M D, et al. Trends in obesity among adults in the United States, 2005 to 2014 [J]. *The Journal of the American Medical Association*, 2016, 315: 2284-2291. DOI: 10.1001/jama.2016.6458.