

紫外高级氧化技术去除 2-MIB 的研究与应用

姜清月¹, 王永磊¹, 李 雷², 张 坤³, 栗静静¹, 金 丽⁴,
邵明睿¹, 赵银河¹, 刘建广¹

(1. 山东建筑大学市政与环境工程学院, 山东济南 250101;

2. 青岛平度市自来水公司, 山东青岛 266700;

3. 山东省创新发展研究院, 山东济南 250101;

4. 山东省水利科学研究院, 山东济南 250014)

[摘要] 近些年来, 人类活动产生大量农业、市政、工业等污水。排放此类废水会向水中释放大量的氮、磷等营养盐, 使水体发生富营养化, 藻类迅速繁殖, 极易产生臭味物质。二甲基异莰醇(2-MIB)等一系列臭味物质对饮用水品质及人类健康造成一定影响, 其产生的土霉味令人感觉不悦, 引发供水危机。因此, 有效去除 2-MIB 等臭味物质对于提升水质具有重要意义。基于紫外光的高级氧化技术具有高效、环保等优点, 用于处理 2-MIB 等臭味物质时具有广阔的研究前景。阐述了目前亟待解决的饮用水臭味问题, 综述了 UV/H₂O₂、UV/Cl₂、UV/PS、UV/O₃ 等高级氧化组合技术去除 2-MIB 的研究进展, 以及在实际工程中的应用情况, 提出高级氧化技术去除水中臭味物质未来的研究方向以及需要解决的问题。

[关键词] 紫外光; 高级氧化; 臭味物质; 二甲基异莰醇

[中图分类号] X524 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)04-0024-06

Research and application on removal of dimethylisoborneol by UV advanced oxidation technology

JIANG Qingyue¹, WANG Yonglei¹, LI Lei², ZHANG Kun³, LI Jingjing¹, JIN Li⁴,
SHAO Mingrui¹, ZHAO Yinhe¹, LIU Jianguang¹

(1. College of Environmental and Municipal Engineering, Shandong Jianzhu University, Ji'nan 250100, China;

2. Qingdao Pingdu Waterwork Co., Qingdao 266700, China; 3. Innovation and Development Institute of Shandong Province, Ji'nan 250101, China; 4. Water Resource Research Institute of Shandong Province, Ji'nan 250014, China)

Abstract: In recent years, human activities have produced large amounts of agricultural, municipal and industrial wastewater. Discharge of such wastewater releases large amounts of nutrients such as nitrogen and phosphorus into the water, causing water eutrophication and rapid algal propagation, which can easily produce odorous substances. Dimethylisoborneol (2-MIB) and a series of odorous substances have a certain impact on the quality of drinking water and human health, and its mildewy smell is unpleasant and causes water supply crisis. Therefore, effective removal of 2-MIB and other odor substances is of great significance for improving water quality. The advanced oxidation technology based on ultraviolet light has the advantages of high efficiency and environmental protection, and has a broad research prospect for the treatment of 2-MIB and other odorous substances. The current problem of odor substances in drinking water was described. The research progress of UV/H₂O₂, UV/Cl₂, UV/PS, UV/O₃ and other advanced oxidation combined technologies to remove 2-MIB, as well as their applications in practical engineering were reviewed. And the future research directions and problems need to be solved for the removal of odor substances in water by advanced oxidation technologies were proposed.

[基金项目] 2020 年度山东省自然科学基金项目(ZR2020 mE221); 潍坊市科技发展计划项目(2020ZJ1320)

Key words: ultraviolet; advanced oxidation; odor substance; 2-methylisoborneol

水体富营养化导致藻类迅速繁殖,产生臭味物质,不仅降低饮用水的感官品质,同时对人类健康产生一定影响。其中,蓝藻代谢产物是产生臭味物质的主要因素,放线菌和真菌也会产生一定量的臭味物质^[1]。2-甲基异莰醇(2-MIB)是最典型、分布最广泛的臭味物质之一,具有稳定的环状结构,对化学氧化有一定抵抗力。各国的水质标准均对2-MIB有限值要求^[2-4]。而常规水处理方法无法满足对臭味物质的处理需求^[5],亟需研发新的技术以保障供水安全。

近年来,研究者采用生物法、物理法、化学法对2-MIB进行去除。自然生物降解臭味物质的速度在1.0 ng/(L·d)左右,生物法对2-MIB的去除效果较好,但处理后的浓度仍超出水质标准阈值^[6]。物理法多采用活性炭作吸附剂,通过生物粉末活性炭—超滤组合工艺处理2-MIB,平均去除率可达65.86%^[7],但活性炭的回收会加大投资成本。在化学氧化法中,高级氧化工艺(AOPs)可快速降解臭味物质^[8],并将其最终矿化为CO₂、H₂O。

高级氧化技术包括光化学过程、电化学过程、电离辐射的声波分解等。其中,基于紫外光的高级氧化技术具有无二次污染、污染物降解效率高等特点^[9]。笔者综述了基于紫外光的高级氧化技术对2-MIB的去除机理、相关研究进展,以及高级氧化联用技术的应用情况,并对基于紫外光的高级氧化技术处理2-MIB的发展应用前景进行展望。

1 去除2-MIB的紫外高级氧化技术

紫外高级氧化技术通过产生无选择性且氧化性强的自由基,如羟基自由基(·OH)、硫酸根自由基(SO₄^{·-})、氯自由基(Cl·)等,直接矿化有机污染物或提高其可生化性。该过程反应快速、选择性低,不会引进新物质。

1.1 UV/H₂O₂

UV/H₂O₂是近年来新兴的高级氧化技术,降解机理包括紫外光直接光解、H₂O₂直接氧化和自由基氧化^[10-11]。UV除能活化H₂O₂分解,还具有消毒作用。E. J. ROSENFELDT等^[12]发现UV/H₂O₂体系中产生的·OH可降解2-MIB,且·OH起到主要作用^[13]。C. H. JO等^[14]用UV/H₂O₂工艺处理水中臭味物质,直接UV光解时2-MIB浓度降低20%;UV与H₂O₂联用

具有协同作用,对于初始质量浓度为100 ng/L的2-MIB,紫外光辐射强度为1 200 mJ/cm²、H₂O₂为6 mg/L时2-MIB降解率为65%;辐射强度为2 700 mJ/cm²时降解率可提升至90%。可见,UV/H₂O₂工艺对臭味物质有很好的去除效果,且随着紫外光辐射强度的增加,去除率提高。

王昊^[15]采用济南玉清水厂砂滤池出水进行2-MIB降解中试研究,当进水流量为2.9 m³/h、UV功率为2.0 kW、H₂O₂质量浓度为6 mg/L时,UV/H₂O₂工艺对2-MIB的去除率最高,可达99.26%,2-MIB质量浓度降至5 ng/L以下,可满足国家饮用水质量标准要求。

1.2 UV/Cl

UV/Cl技术是在氯消毒的基础上增加UV辐射,光解产物为·OH和Cl·等,可有效处理水中的污染物^[16]。在UV/Cl工艺处理2-MIB过程中,UV直接光解与·OH氧化起到关键作用,原因在于:Cl·虽为亲电物种,可通过电子转移与有机化合物发生反应,但2-MIB缺少电子,Cl·可能不易与2-MIB反应^[2]。

T. K. KIM等^[2]比较了单独氯化、单独UV光解和UV/Cl对2-MIB的处理效果。单独氯化时,在氯质量浓度较低(0.5 mg/L)、较高(2 mg/L)条件下2-MIB含量无明显变化。有报道指出常见的氧化剂如Cl₂、ClO₂、KMnO₄对2-MIB的去除无效^[17]。2-MIB分子中的发色团对紫外线的吸收能力较差,在254 nm处的光敏性较低^[12],因此单独采用UV光解时需要相当大的能量。UV与Cl联用时,通过UV直接光解、HOCl光解、Cl·与水反应可产生更多·OH,pH为5~7时2-MIB可在1 h内被完全去除。

张焱^[18]研究发现VUV(真空紫外)/Cl去除2-MIB的效果比UV/Cl的好。单独VUV光源作用下的反应速率常数约为UV光源的9倍。单独VUV光源不仅可通过光解去除部分2-MIB,还可通过VUV中的185 nm紫外光辐射水体产生·OH。采用VUV/Cl联用工艺,在pH为5、臭味物质初始质量浓度为400 ng/L条件下,反应10 min 2-MIB去除率可达95%,反应30 min去除率达到98%。

有报道称UV/Cl工艺对2-MIB的降解效果优于UV/H₂O₂,但UV/Cl工艺可能形成氯化副产物。因此,该工艺投入使用前需考虑反应过程中的副产物或中间产物的影响。

1.3 UV/PS

$\text{SO}_4^{\cdot-}$ 的氧化还原电位(2.5~3.1 V)与 $\cdot\text{OH}$ 相当,逐渐引起人们关注。与 $\cdot\text{OH}$ 相比, $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 的选择性更强,能与许多有机底物快速反应。UV辐照活化过硫酸盐(UV/PS)工艺可产生 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 而不产生 $\cdot\text{OH}$ ^[19~20],但在无自由基抑制剂条件下, $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 会与水、氢氧根反应生成 $\cdot\text{OH}$ 。

Pengchao XIE等^[21]研究了pH为7、2-MIB为40 $\mu\text{g/L}$ 条件下UV/PDS(过二硫酸盐)的降解效果,并与单独PDS、单独UV光解体系进行对比。结果表明,PDS为200 $\mu\text{mol/L}$ 、反应时间为1 800 s时,2-MIB降解率可忽略不计,表明2-MIB几乎不被PDS直接氧化;在紫外光单独照射下,900 s内2-MIB降解率不足3%;接触时间为600 s、PDS浓度为10 $\mu\text{mol/L}$ 时,UV/PDS体系对2-MIB的降解率为86.0%,其中 $\cdot\text{OH}$ 对2-MIB的降解贡献为 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 的3.5倍。史路肖^[22]发现,同等反应条件下VUV/PS工艺对2-MIB的降解率优于UV/PS工艺,能耗也低于UV/PS工艺。相似条件下(pH为6.8~7.2、2-MIB初始质量浓度为200 ng/L 、PS为0.5 mmol/L 、VUV光强为487.6 $\mu\text{W/cm}^2$ 、UV光强为524.3 $\mu\text{W/cm}^2$),UV/PS对2-MIB的降解率比VUV/PS低将近15%,且电能消耗高于VUV/PS。

在实际水处理中,碳酸氢盐和天然有机物(NOM)是主要的自由基清除剂,会消耗 $\cdot\text{OH}$ 和 $\text{SO}_4^{\cdot-}$,且对 $\cdot\text{OH}$ 的影响比 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 更明显。市政管网中存在的多种有机物及无机离子会竞争消耗体系中的 $\text{SO}_4^{\cdot-}$,导致2-MIB的去除率降低,因此蒸馏水体系中2-MIB的去除率要明显高于市政管网。

1.4 UV/O₃

UV/O₃工艺将UV直接光降解与O₃氧化分解结合起来产生大量 $\cdot\text{OH}$,可去除水中大部分难降解有机污染物^[23~24]。由于该工艺无需添加催化剂、反应速率快,在处理饮用水方面有广阔的应用前景^[25],成为水处理领域的研究热点。

S. W. JUNG等^[26]投加3.8 mg/L 臭氧处理初始质量浓度为100 ng/L 的2-MIB,接触时间为6.4 min时2-MIB去除率达到84.8%。K. ZOSCHKE等^[27]研究发现,O₃投加量为2~3 mg/L 、UV辐射光强为5 000~6 000 J/m^2 、接触时间为2~3 min条件下,UV/O₃工艺对200~500 ng/L 2-MIB的降解率达到90%。可见

UV/O₃工艺对2-MIB的降解效果比单独O₃更好。

VUV/O₃工艺可处理水中的臭味化合物,并减少副产物的产生。VUV产生的少量臭氧能够氧化VUV照射过程中形成的亚硝酸盐,并阻止溴酸盐的形成。优化VUV/O₃工艺可降低能耗,最小化亚硝酸盐的生成。但由于VUV辐射在水中的吸收截面高,该体系仅限于小规模应用^[27]。

1.5 UV/TiO₂

何燕等^[28]研究了380 nm紫外光下TiO₂对2-MIB的光催化降解效果。结果表明UV/TiO₂体系对2-MIB有明显降解作用,紫外照射60 min后可去除95%的2-MIB;水中共存的低浓度腐殖酸($\leq 0.5 \text{ mg/L}$)可提高UV/TiO₂体系对2-MIB的降解率;在254、312 nm下,UV/TiO₂体系可大幅降低2-MIB浓度^[29]。

1.6 降解效果对比

紫外高级氧化技术处理2-MIB的参数与效果对比如表1所示。相比于传统氧化技术,紫外高级氧化技术在去除2-MIB方面有很大优势,各组合工艺均能较好地降解2-MIB,但都存在一些劣势,需进一步优化。

UV/H₂O₂工艺的缺点在于H₂O₂残留,处理结束时H₂O₂浓度几乎与初始浓度相等,而从毒理学角度考虑,环境中不能存在高浓度的H₂O₂^[30]。因此,在残留过氧化物猝灭成本及二次消毒方面存在挑战^[31]。

当氧化剂投加量均为10 $\mu\text{mol/L}$ 、反应600 s时,UV/H₂O₂体系对2-MIB的降解率为74.2%,UV/PS体系的降解率达到85.9%。重碳酸根对UV/H₂O₂及UV/PS体系降解2-MIB具有抑制作用,且在UV/PS体系中表现得更为显著;NOM对上述2个体系也有影响^[32]。

2 紫外高级氧化组合技术

UV/H₂O₂工艺易出现H₂O₂残存,因此在实际工程应用中一般与其他技术联用。

2.1 UV/H₂O₂/活性炭

A. ZAMYADI等^[33]将UV/H₂O₂与颗粒活性炭(GAC)联用对残余H₂O₂进行催化还原,以免残余H₂O₂消耗余氯而影响出水水质,同时避免H₂O₂竞争消耗 $\cdot\text{OH}$,研究结果显示UV/H₂O₂/GAC工艺可很大程度提高出水水质。

山东德州双龙湖水厂出水呈现季节性臭味问题,春夏季2-MIB质量浓度高达22.4 ng/L 。为解决该问题、提高出水水质及口感,该水厂采用UV/H₂O₂/

表1 不同技术对2-MIB的处理效果对比

Table 1 Comparison of treatment effects of different technologies on 2-MIB					
工艺	技术参数	降解率/%	优点	缺点	文献
UV/H ₂ O ₂	UV强度为2 700 mJ/cm ² , H ₂ O ₂ 质量浓度为6 mg/L	90	氧化能力强,绿色、环保、无污染	H ₂ O ₂ 易分解且残留过多, 易受NOM影响	[14]
UV/Cl	pH为5~7,反应1 h内	几乎完全去除	经济性较好,消毒杀菌效果较好	易产生氯代消毒副产物	[2]
VUV/Cl	pH为5,反应30 min,2-MIB 初始质量浓度400 ng/L	98	较UV/Cl效果好,产生的自由基多	易产生氯代消毒副产物	[18]
UV/PS	PDS浓度为10 μmol/L,反应600 s, 2-MIB初始质量浓度为40 μg/L	86	中性和碱性条件下氧化能力更强	易受碳酸氢盐和NOM影响	[21]
VUV/PS	PS浓度为0.05 mmol/L,反应60 min	79	效率高,能耗低	易受有机物影响,争夺自由基	[22]
UV/O ₃	O ₃ 投加量为2~3 mg/L,UV强度 500~600 mJ/cm ² ,反应2~3 min	90	氧化能力强,操作简单	臭氧设备投资高,产率和利用率低	[27]
UV/TiO ₂	UV波长380 nm, 反应60 min	95	反应环境温和,适用范围广	光能利用率低,运行能耗、费用高	[28]

BAC(生物活性炭)进行深度处理^[34]。实际运行结果表明,在H₂O₂最佳质量浓度为15~20 mg/L、UV最佳强度为400 mJ/cm²条件下,2-MIB去除率提高了85%,出水中的2-MIB保持在3.3 ng/L以下。该工艺可应对藻类、臭味物质、有机污染等复杂水质问题,同时能有效规避溴酸盐的生成风险。具体工艺流程如图1所示。

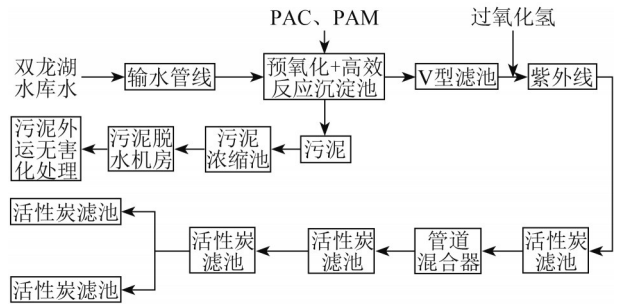


图1 双龙湖水厂净水工艺流程
Fig. 1 Water purification process
of Shuanglong Lake Water Plant

2.2 UV/H₂O₂+Cl₂/NaClO

焦浩等^[35]将NaClO与UV/H₂O₂工艺联用处理济南鹊华水厂的滤后水,通过加氯中和处理残余的H₂O₂,对NaClO投加量进行控制以保证出水余氯含量要求。滤后水中的2-MIB质量浓度为275 ng/L,在紫外光辐射强度为350 mJ/cm²、H₂O₂质量浓度为6 mg/L、NaClO投加量为7.5 mg/L的运行条件下,2-MIB去除率达到96.95%,最终出水水质可满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)要求。当水厂出现偶发性臭味超标时,可优先考虑UV/H₂O₂+Cl₂/NaClO组合技术作为应急措施。

3 结论与展望

研究发现紫外高级氧化技术可有效去除水中嗅味物质2-MIB,充分弥补传统氧化处理的不足。但目前多数水厂采用臭氧—活性炭工艺,或临时投加活性炭处理突发嗅味污染,采用高级氧化工艺的水厂较少。因此,加强紫外高级氧化技术对不同水质的适用性,可扩大该技术在水厂中的应用范围。

(1)UV/H₂O₂技术相对环保,但H₂O₂易分解且反应后存在较多残留。其与其他技术联用可消除残余H₂O₂对余氯的影响,有利于推广应用。UV/O₃工艺中臭氧利用率低,应研究寻找提高利用率的方法。UV/TiO₂技术对紫外光的利用不充分,催化性不强,应提高TiO₂对紫外光的利用率和光催化活性。

(2)关于紫外高级氧化技术处理嗅味物质中间产物的研究有限。未来应重视对中间产物的研究,掌握污染物变化历程,有助于提高处理出水水质。

(3)实验室中对紫外高级氧化的研究较为局限。鉴于实际水体中污染物种类多、结构复杂,计算机建模有助于找到具有针对性且经济性的技术,建立可靠数学模型对未来的研究和应用有极大作用。

(4)寻找环境友好型氧化剂可弥补高级氧化技术的不足,有助于该技术的广泛应用。

参考文献

[1] ZHANG Junzhi, LI Luwei, QIU Lijia, et al. Effects of climate change on 2-methylisoborneol production in two cyanobacterial species[J]. Water, 2017, 9(11): 859.
[2] 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.

- [3] 生活饮用水卫生标准:GB 5749—2006[S].
- [4] 杜康. 生物降解 2-甲基异莰醇的特性及分子机理研究[D]. 北京:北京科技大学, 2018.
DU Kang. Property and molecular mechanism of 2-MIB biodegradation[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2018.
- [5] LIN T F, WONG J Y, KAO H P. Correlation of musty odor and 2-MIB in two drinking water treatment plants in South Taiwan[J]. Science of the Total Environment, 2002, 289(1/2/3): 225-235.
- [6] ELHADI S L N, HUCK P M, SLAWSON R M. Factors affecting the removal of geosmin and MIB in drinking water biofilters[J]. Journal-American Water Works Association, 2006, 98(8): 108-119.
- [7] 宣雍祺, 周丽, 邓慧萍, 等. 生物粉末活性炭-超滤组合工艺对微污染源水中嗅味物质的去除效能及其微生物特性[J]. 环境科学, 2016, 37(10): 3864-3869.
XUAN Yongqi, ZHOU Li, DENG Huiping, et al. Odorants removal and microbial characteristics in treatment of micro-polluted source water with biological powdered activated carbon-ultrafiltration combined process[J]. Environmental Science, 2016, 37(10): 3864-3869.
- [8] GLAZE W H, KANG J W, CHAPIN D H. The chemistry of water treatment processes involving ozone, hydrogen peroxide and ultraviolet radiation[J]. Ozone: Science & Engineering, 1987, 9(4): 335-352.
- [9] VOGELPOHL A. Applications of AOPs in wastewater treatment[J]. Water Science and Technology, 2007, 55(12): 207-211.
- [10] YUAN Fang, HU Chun, HU Xuexiang, et al. Degradation of selected pharmaceuticals in aqueous solution with UV and UV/H₂O₂[J]. Water Research, 2009, 43(6): 1766-1774.
- [11] RAUF M A, MARZOUKI N, KÖRBAHTI B K. Photolytic decolorization of Rose Bengal by UV/H₂O₂ and data optimization using response surface method[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 159(2/3): 602-609.
- [12] ROSENFELDT E J, MELCHER B, LINDEN K G. UV and UV/H₂O₂ treatment of methylisoborneol (MIB) and geosmin in water[J]. Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua, 2005, 54(7): 423-434.
- [13] HAN D H, CHA S Y, YANG H Y. Improvement of oxidative decomposition of aqueous phenol by microwave irradiation in UV/H₂O₂ process and kinetic study[J]. Water Research, 2004, 38(11): 2782-2790.
- [14] JO C H, DIETRICH A M, TANKO J M. Simultaneous degradation of disinfection byproducts and earthy-musty odorants by the UV/H₂O₂ advanced oxidation process[J]. Water Research, 2011, 45(8): 2507-2516.
- [15] 王昊. UV/H₂O₂ 高级氧化法深度去除水中臭味物质[J]. 中国给水排水, 2018, 34(19): 48-51.
WANG Hao. Removal of odorous compounds in water by UV/H₂O₂ advanced oxidation process[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(19): 48-51.
- [16] WANG Chengjin, MOORE N, BIRCHER K, et al. Full-scale comparison of UV/H₂O₂ and UV/Cl₂ advanced oxidation: The degradation of micropollutant surrogates and the formation of disinfection byproducts[J]. Water Research, 2019, 161: 448-458.
- [17] 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.
- [18] 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 Yi. Study on removing odorants of 2-MIB and GSM in drinking water by vacuum ultraviolet combined with chlorine[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2018.
- [19] MARK G, SCHUCHMANN M N, SCHUCHMANN H P, et al. The photolysis of potassium peroxodisulphate in aqueous solution in the presence of tert-butanol: A simple actinometer for 254 nm radiation[J]. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 1990, 55(2): 157-168.
- [20] 孙子为, 高乃云, 王奕岚, 等. 紫外激活过硫酸盐降解水中氯霉素的研究[J]. 中国给水排水, 2015, 31(21): 124-128.
SUN Ziwei, GAO Naiyun, WANG Yilan, et al. Study on UV-activated persulfate oxidation of chloramphenicol in water[J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(21): 124-128.
- [21] XIE Pengchao, MA Jun, LIU Wei, et al. Removal of 2-MIB and geosmin using UV/persulfate: Contributions of hydroxyl and sulfate radicals[J]. Water Research, 2015, 69: 223-233.
- [22] 史路肖. 紫外光—过二硫酸盐高级氧化技术联用去除饮用水中典型致嗅物质[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2018.
SHI Luxiao. Removal of typical odorants in drinking water by advanced oxidation technology of ultraviolet combined with peroxodisulfate[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2018.
- [23] FU Pingfeng, FENG Jie, YANG Tianwen, et al. Comparison of alkyl xanthates degradation in aqueous solution by the O₃ and UV/O₃ processes: Efficiency, mineralization and ozone utilization[J]. Minerals Engineering, 2015, 81: 128-134.
- [24] 顾玉蓉, 张苗, 李旭, 等. 臭氧氧化法降解典型嗅味物质影响因素研究[J]. 天津科技, 2020, 47(8): 35-40.
GU Yurong, ZHANG Miao, LI Xu, et al. Study on factors affecting degradation of typical odor compounds by ozonation[J]. Tianjin Science & Technology, 2020, 47(8): 35-40.
- [25] 邵青, 王颖, 李晶, 等. 紫外/臭氧工艺在水处理中的技术原理及研究进展[J]. 中国给水排水, 2019, 35(14): 16-23.
SHAO Qing, WANG Ying, LI Jing, et al. Technical principle and research progress of UV/O₃ process in water treatment[J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(14): 16-23.
- [26] JUNG S W, BAEK K H, YU M J. Treatment of taste and odor material by oxidation and adsorption[J]. Water Science and Technol-

- ogy, 2004, 49(9):289-295.
- [27] ZOSCHKE K, DIETRICH N, BÖRNICK 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.
- [28] 何燕,刘立明,张钰,等. 光催化降解水体异味物质2-MIB的机理[J]. 环境工程学报, 2012, 6(8):2533-2538.
HE Yan, LIU Liming, ZHANG Yu, et al. Mechanism for photocatalytic degradation of odor 2-methylisoborneol in drinking water[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, 6(8):2533-2538.
- [29] 李林,宋立荣,陈伟,等. 淡水藻源异味化合物的光降解和光催化降解研究[J]. 中国给水排水, 2007, 23(13):102-105.
LI Lin, SONG Lirong, CHEN Wei, et al. Degradation of algae-producing odorous compounds in freshwater by photolysis and TiO_2 photocatalysis [J]. China Water & Wastewater, 2007, 23(13):102-105.
- [30] VON GUNTEN U. Ozonation of drinking water: Part II. Disinfection and by-product formation in presence of bromide, iodide or chlorine[J]. Water Research, 2003, 37(7):1469-1487.
- [31] WATTS M J, HOFMANN R, RCDSENFELDT E J. Low-pressure UV/ Cl_2 for advanced oxidation of taste and odor[J]. American Water Works Association, 2012, 104(1):47-78.
- [32] 岳思阳,张爱红,谢鹏超,等. 紫外/PS、紫外/ H_2O_2 降解2-MIB和土臭素对比[J]. 中国给水排水, 2016, 32(19):6-9.
- YUE Siyang, ZHANG Aihong, XIE Pengchao, et al. Comparative study on UV/persulfate and UV/hydrogen peroxide for degradation of 2-MIB and geosmin[J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(19):6-9.
- [33] ZAMYADI A, SAWADE E, HO L, et al. Impact of UV- H_2O_2 advanced oxidation and aging processes on GAC capacity for the removal of cyanobacterial taste and odor compounds [J]. Environmental Health Insights, 2015, 9(3):1-10.
- [34] 刘淑丽. UV/ H_2O_2 高级氧化水中典型致臭物质的试验研究及在净水厂中的应用[D]. 济南:山东建筑大学, 2020.
LIU Shuli. Experimental study of UV/ H_2O_2 advanced oxidation of typical odor-causing substances in water and its application in water purification plants [D]. Ji'nan: Shandong Jianzhu University, 2020.
- [35] 焦浩,崔鹏炜,岳建刚,等. UV/ $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Cl}_2$ 组合工艺处理含2-MIB滤后水的中试研究[J]. 给水排水, 2019, 55(12):29-36.
JIAO Hao, CUI Pengwei, YUE Jiangang, et al. Pilot study on the treatment of 2-MIB filtered water by UV/ $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Cl}_2$ combined process[J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 55(12):29-36.

[作者简介] 姜清月(1997—), 在读硕士研究生。电话: 17866613973, E-mail: 1415006551@qq.com。通讯作者: 张坤, 本科, E-mail: 1149654362@qq.com。

[收稿日期] 2022-03-02(修改稿)

(上接第23页)

- [61] PU Shengyan, QIN Lanlan, CHE Junping, et al. Preparation and application of a novel bioflocculant by two strains of *Rhizopus* sp. using potato starch wastewater as nutrilit[J]. Bioresource Technology, 2014, 162:184-191.
- [62] WATTANASILP C, SONGPRAKORP R, NOPHARATANA A, et al. Techno-cost-benefit analysis of biogas production from industrial cassava starch wastewater in Thailand for optimal utilization with energy storage[J]. Energies, 2021, 14(2):416.
- [63] ANDRADE L R S, CRUZ I A, DE MELO L, et al. Oyster shell-based alkalization and photocatalytic removal of cyanide as low-cost stabilization approaches for enhanced biogas production from cassava starch wastewater[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2020, 139:47-59.
- [64] SINBUATHONG N, KANCHANAKHAN B, LEUNGPRASERT S. Biohydrogen production from normal starch wastewater with heat-treated mixed microorganisms from a starch factory[J]. International Journal of Global Warming, 2015, 7(3):293-306.
- [65] WEI Juan, LIU Zuotao, ZHANG Xin. Biohydrogen production from starch wastewater and application in fuel cell[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(7):2949-2952.
- [66] 肖继波,赵委托,褚淑祎,等. 薯类淀粉废水处理技术及资源化利用研究进展[J]. 浙江农林大学学报, 2013, 30(2):292-298.
XIAO Jibo, ZHAO Weituo, CHU Shuyi, et al. Research progress on treatment technology and resource utilization of potato starch wastewater[J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2013, 30(2):292-298.
- [67] 杜娟,詹成雄,王宏勋,等. 产油真菌在甘薯淀粉废水中发酵的初步研究[J]. 生物技术, 2007, 17(2):72-75.
DU Juan, ZHAN Chengxiong, WANG Hongxun, et al. Elementary study on oil production by fungi growing in sweet potato starch processing waste water[J]. Biotechnology, 2007, 17(2):72-75.
- [68] HAN Zhen, ZHUANG Xuliang, BAI Zhihui, et al. Bioremediation of petroleum-contaminated saline soil using straw and starch wastewater as biostimulation agents[J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2011, 20(11):2977-2983.

[作者简介] 何文文(1997—), 硕士研究生, 电话: 17693174990, E-mail: 1348569542@qq.com。通讯作者: 陈正军, 博士, E-mail: chenzhengjun85@126.com。

[收稿日期] 2022-02-19(修改稿)