

废水中可吸附有机卤化物的来源、测定方法及去除技术的研究进展

陈爽, 黄芷君, 龚婷婷, 鲜启鸣*

(南京大学环境学院 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 江苏 南京 210023)

摘要: 简述了废水中可吸附有机卤化物(AOX)的定义、来源和危害,以及国内外废水中 AOX 排放的相关法规。详细介绍了微库仑法、中子活化法、三维荧光法等 AOX 测定方法,以及物理法、化学法、生物法 3 种 AOX 去除技术的研究进展。并对工业废水中 AOX 的检测、表征及其针对性处理提出了今后的研究方向。

关键词: 废水;可吸附有机卤化物;测定方法;去除技术

中图分类号:X832

文献标志码:A

文章编号:1674-6732(2020)03-0020-06

Research Progress on the Sources, Determination Methods and Removal Techniques of Absorbable Organic Halide in Waste Water

CHENG Shuang, HUANG Zhi-jun, GONG Ting-ting, XIAN Qi-ming*

(State Key Laboratory of Pollution and Resource Reuse, School of Environment, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China)

Abstract: In this paper, the definition, sources and hazards of absorbable organic halogen (AOX) were reviewed. The related regulations, determination methods and removal technologies of AOX at home and abroad were also summarized. Test method of AOX by microcoulometry, neutron activation method and three dimensional fluorescence method were illustrated in detail and the research progress on 3 removal techniques of AOX by physical method, chemical method and biological method were reviewed. The direction of future research on monitoring, characterizing and targeted treatment of AOX in industrial wastewater was discussed.

Key words: Wastewater; Absorbable organic halogen (AOX); Determination method; Removal technique

可吸附有机卤化物(Absorbable Organic Halide, AOX)是指在常规条件下,可被活性炭吸附的有机卤化物,按照现有标准测得的 AOX 指的是可吸附有机氯化物(AOCl)、可吸附有机溴化物(AOBr)和可吸附有机碘化物(AOI)的总称,其中不包括有机氟化物(AOF)^[1],在实际工作中, AOX 通常与总有机卤化物(TOX)通用。 AOX 于 1976 年首次被提出,并且作为一个参考指标被应用在地表水、饮用水及工业废水的监控中,是用来衡量水中有机卤化物污染程度的重要综合性指标。 AOX 包含多种物质,从简单的挥发性物质如氯仿,到复

杂的有机物如二噁英等。若按其分子质量的大小,可分为高分子质量 AOX(分子质量 > 1 000)和低分子质量 AOX(分子质量 < 1 000) 2 类^[2]。低分子质量 AOX 由于具有较好的亲脂性和进入细胞膜的能力,具有致癌性和生物累积性,对生物体有害,目前发现的大部分 AOX 属于低分子质量类物质。 AOX 大多具有脂溶性,一般情况下水溶性较差,因此废水中 AOX 的检测限要求为 mg/L 级别,而造纸业产生的漂白废水中 AOX 质量浓度要求相对较低,但也不可超过 100 mg/L。此外, AOX 能够被活性炭吸附,因此可通过适当的方式吸附在活性炭上

收稿日期:2020-01-17;修订日期:2020-03-17

基金项目:江苏省环境监测科研基金资助项目(1801);江苏省社会发展基金资助项目(BE2017711)

作者简介:陈爽(1991—),女,硕士研究生在读,研究方向为环境监测。

* 通讯作者:鲜启鸣 E-mail: xianqm@nju.edu.cn

进行测定^[3-4]。

20世纪70年代,美国环保部门将77种有机卤化物列为优先控制污染物,并作为天然水体被人为污染的标志物。我国原环境保护部2017年发布的《优先控制化学品名录(第一批)》中有机卤化物占有机污染物的一半,以AOX表征的可吸附有机卤化物已经成为一项国际性水质指标^[5]。

1 AOX的来源

1.1 天然来源

陆地上的野生植物、菌类以及海洋生物在其正常的新陈代谢过程中会产生大量的AOX,海洋的生物和非生物过程是天然AOX的重要来源,仅海洋生物产生的AOX就高达2000多种^[6-7],但这类自然源产生的AOX浓度相对较低。

1.2 农业生产

随着大规模农业生产的发展,各种杀虫剂、除草剂、落叶剂、杀菌剂、植物生长素等在农业生产上的使用随之增加,对农业生态系统和人类健康造成的危害也日益显现^[8-9]。尤其是高毒性的AOX、有机磷类及拟除虫菊酯类化合物,自然降解缓慢,微生物分解效果微弱,人为去除成本昂贵,其大量残留会进入水体、土壤和地下水中^[10]。

1.3 纺织行业

印染废水中的AOX来源包括原材料天然纤维中残留的农药、使用的染料和助染剂、处理印染废水用的消毒剂^[11-12]。染色过程中使用的活性染料以及印花工艺中常使用的2-氯-3-羟基丙烯聚合物等助染剂是AOX的主要来源^[13]。干洗工段中使用的四氯乙烯等氯代溶剂,以及大量的含卤素杀虫剂、防腐剂、阻燃剂和卫生整理剂也是AOX的重要来源^[14-16]。印染废水处理工艺中,含氯脱色剂或消毒剂中的有机氯会与废水中其他组分发生化学反应产生AOCl,导致AOX浓度升高^[17]。

1.4 造纸行业

造纸废水中对AOX的产生贡献最大的是漂白所采用的氯气、次氯酸和次氯酸盐等试剂。传统的以氯气为主的漂白工艺已无法满足新时期标准的要求^[18]。采用二氧化氯(ClO₂)代替氯气漂白,生产出来的纸张质量更好,而且废水中不含诱变物质^[19]。但是ClO₂水溶液中仍含有一定量的游离氯,如果工业过程中控制不好,在脱木素过程中会有高达40%的ClO₂转变为游离氯^[20]。此外,工业

上制备的ClO₂漂白液中常含有部分亚氯酸根、氯酸根、氯等,若在漂白过程中ClO₂无效分解,也会造成排放废水中AOX浓度的增加^[21-22]。

1.5 垃圾渗滤液

垃圾填埋是生活垃圾主要的处理方式,填埋过程中产生的垃圾渗滤液具有较大的毒性。垃圾渗滤液中的有机污染物种类近一半是有机卤素化合物^[23]。Noma等^[24]检测了日本46个垃圾填埋场渗滤液中AOX的质量浓度,其范围在10~200 μg/L,且AOX和AOX生成势均与化学需氧量(COD)相关,且封闭的垃圾填埋场渗滤液中AOX浓度低于正在运行的垃圾填埋场。王磊等^[25]研究发现,城市垃圾填埋场调节池渗滤液中COD与AOX具有显著的正相关性,由于AOX测定过程比较烦琐,可以通过测定渗滤液的COD值来估测AOX的浓度。值得注意的是,垃圾渗滤液中低浓度的AOX在处理过程中很难被去除^[25]。

2 AOX的危害

通常AOX的组分为亲脂性化合物,可持久稳定地存在于水环境中,并通过食物链富集和传递,对有机体造成潜在危害^[26-27]。广泛应用于饮用水处理工艺的氯化消毒,在控制水源病原体的同时,会产生大量的消毒副产物如三卤甲烷和卤乙酸^[28]。这些消毒副产物基本都对人体有害,会经口摄入而进入人体循环系统,对人体产生慢性毒副反应,并存在“三致”风险^[29]。因此AOX的浓度已经成为评价饮用水消毒副产物生成量的重要指标。郝莉鹏等^[30]通过建立健康风险评价模型,并结合动物和微生物毒理数据^[31-32],对不同类型的AOX进行毒性评估,并科学量化经口进入人体的风险等级。研究表明,造纸漂白过程产生的废水中含有强致突变的氯代丙酮、氯代丙醇等卤代有机物^[33-34]。

3 AOX的相关立法

近年来,农业、纺织、造纸等生产过程以及垃圾渗滤液中产生的大量有机卤化物均会导致环境水体中AOX浓度不断增加。一些发达国家已将AOX浓度值作为衡量化学工业废水水质的重要指标,并相继出台了一系列法规。针对造纸行业纸浆漂白过程中漂白剂的使用问题,美国环境保护署(EPA)公布的最经济适用的技术是采用ClO₂完全替代氯气漂白,并配合封闭筛选、碱抽提过程中使

用氧和过氧化氢强化技术^[35-36]。针对纺织品生产过程中产生的漂白废水,欧盟发布了 AOX 排放标准,规定废水中 AOX 的排放量限制在 40 mg/L^[37]。德国环保部门颁布的法规提高了 AOX 排放标准,其直接排放量控制在 100 μg/L,而英国政府出台的环保法规明令禁止企业排放含有 AOX 的工业废水。

我国制定废水中 AOX 排放标准起步较晚,在

2008 年颁布实施的《制浆造纸工业水污染物排放标准》(GB 3544—2008)中,根据是否新建企业以及所在地水环境承载力,分别制定了 15、12 和 8 mg/L 的排放标准,后来又推广至其他工业行业。2012 年《纺织染整工业水污染物排放标准》(GB 4287—2012)由原国家环保部与国家质检总局联合发布。国内外饮用水和废水中 AOX 的相关法规、标准以及适用范围汇总见表 1。

表 1 国内外饮用水和废水中 AOX 的相关法规、标准及适用范围

| 地区 | 年份 | 法规和标准 | 适用范围 |
|----|--------|---|-------------------------------|
| 美国 | 1977 年 | 《饮水规程和健康建议》 | 饮用水 |
| 德国 | 1985 年 | 德国检验水、废水和污泥的标准方法、作用和物质的综合指数(H 组)、可吸附有机卤素(AOX)的测定(H14) | 水、废水和污泥中 AOX 的测定 |
| | 1987 年 | 德国联邦废水法 | 废水 |
| 国际 | 1997 年 | 《纸浆、纸和纸板总氯及有机氯的测定》(ISO 11480—1997) | 造纸废水中总氯和有机氯 |
| 欧盟 | 2002 年 | 第 2002/371/EC 号 | 纺织品废水中的 AOX |
| 中国 | 1995 年 | 《水质可吸附有机卤素(AOX)的测定微库仑法》(GB/T 15959—1995) | 饮用水、地下水、地表水、污水中的 AOX |
| | 2001 年 | 《水质可吸附有机卤素(AOX)的测定离子色谱法》(HJ/T 83—2001) | 水和废水中的 AOX,包括 AOCl、AOBr 和 AOF |
| | 2008 年 | 《制浆造纸工业水污染物排放标准》(GB 3544—2008) | 制浆造纸工业废水 |
| | 2012 年 | 《纺织染整工业水污染物排放标准》(GB 4287—2012) | 纺织染整工业废水 |

4 AOX 的测定方法

鉴于有机卤化物理化性质千差万别,用一种检测方法不可能同时测定所有有机卤化物,但可以建立通用的综合指标来评价水环境中有机卤化物的污染状况。目前,人们经常使用 3 种不同的综合指标,分别是 TOX^[38]、AOX 和可萃取性有机卤化物(EOX)^[39]。TOX 是一种概念,而 AOX 和 EOX 是利用 2 种不同的前处理方法测得的值来表征水样中的 TOX。测定 AOX 通常包括以下步骤:(1)采用活性炭吸附待检废水中的有机卤化物;(2)用硝酸钠溶液去除无机卤化物;(3)通过高温燃烧的方法将有机卤化物转化为二氧化碳和卤化氢;(4)采用碱性溶液吸收卤化氢后进行定量测定^[40]。在 AOX 检测中,首先要解决怎样高效率地提取和净化水样中的有机卤化物,快速、简单、低廉、有效、稳定、安全的预处理方法(QuEchERS 法,流程见图 1),广泛用于样品制备与净化^[41],样品经乙腈(或酸化乙腈)提取后,采用盐析分层后,利用基质分散萃取原理,使用 N-丙基乙二胺(PSA)或其他吸附剂与基质中绝大部分干扰物(有机酸、脂肪酸、碳水化合物等)相结合,通过离心方式去除,从而达到萃取净化的目的,此法可用于水样中有机卤化

物快速高效检测的前处理^[42-44]。我国现有的 AOX 准确测定方法还不成熟,目前已经颁布了 2 个水中 AOX 检测方法的国家标准,即《水质可吸附有机卤素(AOX)的测定微库仑法》(GB/T 15959—1995)和《水质可吸附有机卤素(AOX)的测定离子色谱法》(HJ/T 83—2001)。

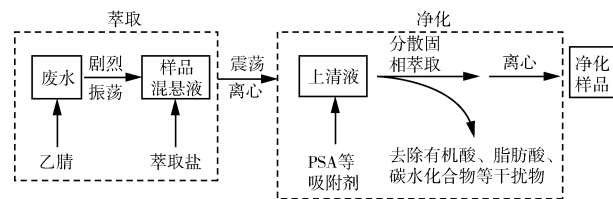


图 1 QuEchERS 法预处理流程

4.1 微库仑法

对于水中 AOX 检测,使用最广泛的是微库仑法,但该方法容易受到氯离子等无机卤化物的干扰。柱吸附法在水样前处理阶段应用最为广泛,同时可以去除无机卤化物。胡雄星等^[45]采用柱吸附法结合微库仑法测定水样中的 AOX(图 2),通过加入亚硫酸钠溶液去除无机卤化物,从而消除氯离子对 AOX 测定的影响。此法不仅可以测定 AOX

浓度较低的饮用水,还可以测定 AOX 浓度较高的工业废水,分析方法精密度高、平行性好。赵延飞等^[46]使用浓度 0.04 mol/L 的亚硝酸钠作为淋洗液,通过扣除空白值可以有效检测氯离子质量浓度高达 100 g/L 的水样,测定方法的相对偏差 < 20%,能满足日常检测的要求,有效降低了氯离子的干扰。

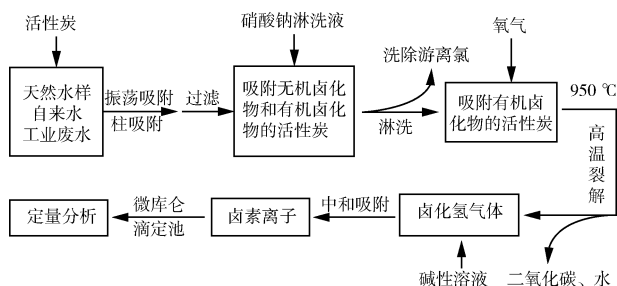


图 2 活性炭吸附结合微库仑法测定水样中的 AOX 流程

4.2 中子活化法

中子活化技术的方法原理是通过卤素的 (n, γ) 反应,测定放射性卤素发射的特征 γ 射线的强度来对废水样品进行定量分析^[47],该方法样品前处理过程简单,对待测样品可实现无损分析,而且灵敏度和准确度高。刘国卿等^[48]在此基础上建立了中子活化分析污水中 AOX 的方法,实验结果表明,此方法可同时测定污水中的 AOC1、AOBr 和 AOI,且快速、简便,对氯、溴、碘的检出限分别为 60,15 和 6 ng。

4.3 三维荧光法

三维荧光光谱是发射波长、激发波长和荧光强度三维坐标表征而成的矩阵光谱,可用于对部分具有荧光反应的有机物质进行快速定性和定量检测。受制于污染物多样性及浓度的动态变化和水域环境的流动状态,三维荧光光谱在水中有有机污染物检测方面,表现出图谱信息特征性不强、数据易受干扰的缺点。茅婷婷^[49]采用三维荧光光谱辅助以形态学灰度重建和交替三线性分解,实现待测样本中低浓度有机污染物的高效定性鉴定。严鹏飞^[50]采用滤膜过滤和三维荧光光谱法,结合常见的荧光峰来分析工业废水中的卤代有机物。

5 AOX 的去除

5.1 物理法

Shawwa 等^[51]采用特殊石油焦可以有效去除

纸浆漂白废水中的 AOX,去除率高达 90%。然而由于吸附材料可再生困难、处理成本高,限制了其在工业生产中的广泛使用,仅适用于少量废水的处理。Vinder 等^[52]使用超滤膜过滤 AOX 浓度低的模拟废水,通过测定过滤前后废水中 AOX 的浓度,发现 AOX 的去除率 > 80%。针对医院污水中 AOX 难以采用常规生物降解或吸附法去除的问题,孙迎雪等^[53]采用序批式膜生物反应器对医院污水中的 AOX 进行去除,去除率达到 63.6%,其中膜截留占 14.5%。

5.2 化学法

Dorica^[54]通过向废水中投入强碱,如氢氧化钠或者氢氧化钙,调节 pH 值 = 11 后,发现 AOX 的去除率分别为 54% 和 67%;再通过升温 and 升压处理后, AOX 的去除率可达到 80%。高级氧化技术 (AOPs) 原理是通过反应产生强氧化性的羟基自由基,通过自由基反应将有机污染物降解为无害的无机物,如二氧化碳和水等。AOPs 具有氧化性强、操作条件易于控制等优点,在去除废水中的 AOX 方面优势显著。袁瑞霞^[55]选择 3 种高级氧化催化体系,系统研究模拟废水中无机卤化物离子 (氯离子和溴离子) 对模拟污染物酸性橙 7 (Acid Orange 7, AO 7) 降解的影响。结果表明,废水中氯离子浓度对模拟污染物的降解具有双重影响,当氯离子浓度 < 50 mmol/L 时,氯离子促进模拟污染物 AO 7 降解,而当氯离子浓度 > 50 mmol/L 时,氯离子对降解的促进作用减弱,而抑制作用增强。Peternel 等^[56]采用 4 种 AOPs 方法对模拟 AOX 废水进行处理研究发现,紫外光/芬顿试剂法 (UV/Fenton) 能最有效、最快速地去 AOX。采用这种方法对模拟废水进行 15 min 的处理, AOX 的去除率可达 98.3%。

5.3 生物法

采用曝气的好氧处理法对 AOX 进行处理,平均去除率约为 30%^[57-58];厌氧处理法可明显提高 AOX 的去除率^[59-60]。颗粒活性炭联用序批式生物膜反应器适用 AOX 质量浓度范围广的水样 (2 ~ 44 $\mu\text{g/L}$),最高去除率可达 99%^[61-62]。有研究者采用多种深度分析方法对工业园区的污水进行定性分析,在确定污水中含有大量卤代物及含硫杂环化合物的基础上,通过改进生化系统的前臭氧氧化工艺流程,来提高污水中卤化物和含硫杂环化合物的可生化率,解决了 COD 去除率偏低的问题,并在

后续阶段采用活性炭吸附的方法进行深度处理,保障了污染物的稳定达标排放^[63]。

6 展望

国际上现有的 AOX 测定方法主要是针对纺织品、造纸行业废水的检测,但其他工业废水中 AOX 的检测也需要引起关注。因此,研究建立不同水样中 AOX 以及 AOCl、AOBr 和 AOI 的可靠检测方法(包括前处理方法),尤其是建立低浓度检测方法是今后的发展方向。虽然纺织和造纸工业废水曾被认为是水中 AOX 的主要来源,但是由于卤素在化学工业中有着非常广泛的应用,因此化学工业集中的化工园区废水已经成为我国废水治理的重点和难点。

目前,我国的 AOX 排放标准主要针对造纸和纺织工业的废水,急需制定和实施其他工业废水(特别是化工园区废水以及垃圾渗滤液处理后废水)中 AOX 的排放标准。同时, AOX 是复杂的混合物,难以确定其中哪些组分、哪类结构的分子能被何种机理去除,且 AOX 一般很难生物降解,通常在好氧条件下, AOX 会发生水解及卤素的氧化降解反应,但卤素的还原降解一般只发生在厌氧条件下。如果能知道 AOX 组成中哪类化合物对废水毒性的贡献较大,进行有针对性的去除,可达到事半功倍的效果,因此,需要研究 AOX 的分级分离方法,并开展毒性和结构的表征来加以甄别。

[参考文献]

- [1] 陈维芳,叶裕才.可吸附有机卤化物的深度处理研究[J].污染防治技术,1999,12(2):77-79.
- [2] YAN G, ALLEN D G. Biosorption of high molecular weight organochlorines in pulp mill effluent[J]. Water Research, 1994, 28(9):1933-1941.
- [3] 邢耀宇,王建平,吕铁梅,等.纺织品中的可吸附有机卤化物及其检测方法的研究进展[J].纺织报道,2014(3):86-88,90.
- [4] 周中木,李现红,张华.微库仑法可吸附有机卤素分析仪校准方法[J].计量与测试技术,2018,45(5):70-72.
- [5] 叶开晓,李昆明,刘繁盛.微库仑法测定制浆造纸漂白废水的 AOX 研究[J].环境科学与管理,2018,45(3):103-106.
- [6] 陈荣圻. AOX 与纺织品[J].印染,2009(22):48-51.
- [7] 王琦.海洋大气边界层中卤素化学过程的数值模拟研究[D].北京:中国海洋大学,2006.
- [8] 张晓淳. SPE-GC/MS 测定地表水中 34 种有机氯农药和氯苯类化合物[J].广东化工,2018,45(2):172-173.
- [9] 孙晓慧.土壤中有机氯农药残留检测方法研究进展[J].吉林农业,2019(20):78.
- [10] 刘晓剑,常丽春,林秀军,等.纺织染整行业中 AOX 污染现状及来源分析[J].纺织导报,2012(6):127-129.
- [11] 孟欣.氯化消毒过程无机溴和碘转化为有机溴和碘消毒副产物机制研究[D].苏州:苏州科技大学,2019.
- [12] 嵇志远.含氯消毒剂处理城镇污水投加量的快速测定[J].环境卫生工程,2015,23(3):48-49,52.
- [13] BHUIYAN M E H, BEHROOZFAR A, DARYADEL S, et al. A hybrid process for printing pure and high conductivity nanocrystalline copper and nickel on flexible polymeric substrates[J]. Scientific Reports,2019,9(1):1-10.
- [14] 刘欣,余琼蕾.纺织品家庭洗涤/干洗后外观保持性的评价[J].印染,2011,37(24):39-42,45.
- [15] 谭晓钧,黄晓锋,刘德全.干洗行业四氯乙烯污染情况及排放因子分析——以深圳市为例[J].三峡环境与生态,2013,35(2):24-27,41.
- [16] 李春梅,唐碎,杨文静,等.顶空-气相色谱法检测干洗剂四氯乙烯[J].实验室研究与探索,2015,34(10):41-43,151.
- [17] 魏青.纺织品中有机卤化物的离子色谱检测方法研究[D].上海:东华大学,2016:1-20.
- [18] 张帅,谭艳君,霍倩,等.芳纶织物分散染料印花性能探究[J].染整技术,2019,41(8):21-24.
- [19] YE B, CANG Y, LI J, et al. Advantages of a ClO₂/NaClO combination process for controlling the disinfection by-products (DBPs) for high algae-laden water[J]. Environmental Geochemistry and Health,2019,41(3):1-13.
- [20] 赵占军,高桂青.二氧化氯消毒工艺在制水生产中的应用分析[J].江西化工,2014(1):190-193.
- [21] 吴思宇,卢小艳,刘丽君,等.二氧化氯及与次氯酸钠联用的消毒方式对消毒副产物的控制[J].净水技术,2016,35(2):38-42.
- [22] 范长香.净水过程中二氧化氯消毒副产物去除研究[J].中国资源综合利用,2019,37(11):32-34.
- [23] JIMENEZ L, ALZAGA R, BAYONA J M. Determination of organic contaminants in landfill leachates: a review[J]. International Journal of Environmental & Analytical Chemistry,2002, 82(7):415-430.
- [24] NOMA Y, YAMANE S, KIDA A. Adsorbable organic halides (AOX), AOX formation potential, and PCDDs/DFs in landfill leachate and their removal in water treatment processes[J]. Matter Cycles Waste Manag, 2001(3):126-134.
- [25] 王磊,王云,陈靖雯.垃圾渗滤液的 NH₃-N、COD 与 AOX 指标的相关性研究——以某城市垃圾填埋场为例[J].化工设计与通讯,2017,43(12):135-136.
- [26] SAVANT D V, ABDUL-RAHRNAN R, RANADE D R. Anaerobic degradation of adsorbable organic halides (AOX) from pulp and paper industry wastewater [J]. Bioresource Technology, 2006,97(9):1092-1104.
- [27] JOLIBOIS B, GUERBET M. Detection of hospital wastewater genotoxicity with the SOS chromotest and Ames fluctuation test [J]. Chemosphere,2003,51(6):539-543.

- [28] 丁锦春. 水中挥发性卤代烃的危害性及其分析方法的研究现状[J]. 中国卫生检验杂志, 1995(6): 364-366.
- [29] HAJIMIRAGHA H, EWERS U, JANSEN - ROSSECK R, et al. Human exposure to volatile halogenated hydrocarbons from the general environment[J]. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 1986(2): 141.
- [30] 郝莉鹏, 孙乔, 刘晓琳, 等. 上海市浦东新区饮用水三卤甲烷和卤乙酸含量及其健康风险评价[J]. 环境与职业医学, 2014, 31(6): 442-447.
- [31] 章杰. 我国纺织印染助剂的安全性问题(一)[J]. 印染, 2012, 38(7): 50-52.
- [32] 郭仁义, ORIT M, PIERRE G. 溴系阻燃剂与环境[J]. 塑料助剂, 2006(2): 12-17.
- [33] BULL R J, ROBINSON M. Carcinogenic activity of haloacetonitriles and haloacetone derivatives in the mouse skin and lung[J]. *Water Chlorination: Chem. Environ. Impact and Health Effects*, 1986(5): 221-227.
- [34] 高乃云, 楚文海. 饮用水中氯代丙酮类消毒副产物的分析方法研究[J]. 水工业市场, 2011(7): 39-42.
- [35] 曹霞, 钟崇林, 王玲玲. 论述造纸行业控制可吸附有机卤化物的必要性[J]. 环境科学与管理, 2008, 33(4): 48-51.
- [36] 宋平, 程言君, 王洁, 等. 关于草浆漂白废水中有机氯化物的研究[J]. 中国造纸, 2005, 24(3): 51-53.
- [37] 王建平, 陈荣圻, 吴岚, 等. REACH法规与生态纺织品[M]. 北京: 中国纺织出版社, 2009.
- [38] 孙悦. 总有机碳测定方法及最新应用进展[J]. 天津药学, 2012, 24(1): 60-64.
- [39] SALARNANCA M, CHANDIA C, HERNANDEZ R A, et al. First long - term record of halogenated organic compounds (AOX, EOX, and PCDD/F) and trace elements (Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Pb, Ni, and Zn) in marine biota of the coastal zone of southcentral Chile[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, 146: 442-453.
- [40] 叶开晓, 李昆明, 刘繁盛. 微库仑法测定制浆造纸漂白废水的AOX研究[J]. 环境科学与管理, 2015, 40(3): 103-106.
- [41] 蔡灏斌, 程雪刚, 陈广银. QuEChERS - 气相色谱法快速测定土壤中8种有机氯农药[J]. 环境监控与预警, 2020, 12(1): 25-28.
- [42] 罗纪军. QuEChERS - 液相色谱串联质谱法测定茶叶中10种农药残留[J]. 安徽农学通报, 2014, 20(24): 132-134.
- [43] MUHARNMAD M, RASUL J M, SHAH J, et al. Determination of isoproturon in environmental samples using the QuEChERS extraction - spectrofluorimetric method[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2019, 38(12): 2614-2620.
- [44] 万译文, 黄向荣, 陈湘艺, 等. QuEChERS/高效液相色谱法同时测定水产品中16种多环芳烃[J]. 湖南师范大学学报(自然科学版), 2014, 37(1): 42-47.
- [45] 胡雄星, 张文英, 韩中豪, 等. 水样中可吸附有机卤化物(AOX)的测定[J]. 中国环境监测, 2006, 22(3): 15-17.
- [46] 赵延飞, 陈娟. 微库仑法测定高氯废水中可吸附有机卤素的改进研究[J]. 环境科学导刊, 2019, 38(6): 93-95.
- [47] 仲维科, 徐殿斗, 柴之芳, 等. 牛奶样品中有机卤素的中子活化分析[J]. 核化学与放射化学, 2002, 24(2): 126-128.
- [48] 刘国卿, 罗奇, 张鸿, 等. 污水中可吸附有机卤素(AOX)的中子活化分析[J]. 核化学与放射化学, 2013, 35(3): 172-174.
- [49] 茅婷婷. 基于三维荧光光谱的饮用水中有机污染物特征提取与分类方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [50] 严鹏飞. 污水及其深度处理水质的三维荧光光谱解析[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.
- [51] SHAWWA A R, SMITH D W, SEGO D C. Color and chlorinated organics removal from pulp mills wastewater using activated petroleum coke[J]. *Water Research*, 2001, 35(3): 745-739.
- [52] VIDER A, SIMONIC M. Removal of AOX from waste water with mixed surfactants by MEUF[J]. *Desalination*, 2012, 289: 51-57.
- [53] 孙迎雪, 张凤, 王科理, 等. 医院污水处理中可吸附有机卤化物(AOX)及其毒性研究[J]. 环境科学, 2007, 28(10): 2219-2222.
- [54] DORICA J. Removal of AOX from bleach plant effluents by alkaline hydrolysis[J]. *Journal of Pulp and Paper Science*, 1992, 18(6): 5231.
- [55] 袁瑞霞. 基于自由基反应的高盐染料废水降解动力学及有机卤代物(AOX)生成机制研究[D]. 上海: 东华大学, 2012.
- [56] PETERNEL I, KOPRIVANAC N, GRCIC I. Mineralization of p - chlorophenol in water solution by AOPs based on UV irradiation[J]. *Environmental Technology*, 2012, 33(1/2/3): 27-36.
- [57] SAUNAMAKI R. Experimental study on the control of nutrient in activated sludge treatment[J]. *Water Science & Technology*, 1994, 29(5/6): 329-342.
- [58] WILSON D G, HOLLORAN M E. Decrease of AOX with various external effluent treatments[J]. *Pulp and Paper Canada*, 1992, 93(12): 372-378.
- [59] DESHMUKH N, LAPSIYA K, SAVANT D, et al. Upflow anaerobic filter for the degradation of adsorbable organic halides (AOX) from bleach composite wastewater of pulp and paper industry[J]. *Chemosphere*, 2009, 75(9): 1179-1185.
- [60] CHAPARRO T R, BOTTA C, PIRES E. Toxicity and recalcitrant compound removal from bleaching pulp plant effluents by an integrated system: anaerobic packed - bed bioreactor and ozone[J]. *Water Science and Technology*, 2010, 61(1): 199-205.
- [61] RAHMAN R A, ZAHIRIM Z, ABU - BAKAR A. Chloro - organics in papermill effluent: identification and removal by sequencing batch biofilm reactor[J]. *Journal of Applied Sciences*, 2007, 7(15): 2160-2163.
- [62] MOHAMAD A B, RAHMAN R A, KADHUM A A H, et al. Removal of adsorbable organic halides (AOX) from recycled pulp and paper (P&P) mill effluent using granular activated carbon - sequencing batch biofilm reactor (GAC - SBBR)[J]. *Modern Applied Science*, 2008, 2(5): 37.
- [63] 商佳吉, 王周, 殷紫, 等. 化工集中区污水处理厂技术改造工程施工研究分析[J]. 环境工程, 2016, 34(S1): 403-406, 410.