

饮用水深度处理过程中臭味物质控制技术探讨

陈英¹ 王飞² 姚慎康¹

1.杭州天创环境科技股份有限公司, 浙江 杭州 310000

2.杭州天泽净化科技有限公司, 浙江 杭州 310000

[摘要]饮用水里有臭味物质严重影响水质感官接受度以及居民用水满意度,水源水体污染不断加剧且传统水处理工艺去除气味化合物的效果差使得深度处理技术成为解决这一问题的关键,分析常见臭味物质的形成机理和分布特性并探讨生物活性炭、臭氧-活性炭联用、高级氧化技术等控制手段的适用性和处理效果,再结合实际案例评估不同技术的去除效率与工艺稳定性为饮用水安全保障提供参考。

[关键词]臭味物质; 深度处理; 饮用水; 生物活性炭; 高级氧化技术

DOI: 10.33142/nsr.v2i2.16968

中图分类号: X703

文献标识码: A

Discussion on the Control Technology of Odorous Substances in the Deep Treatment Process of Drinking Water

CHEN Ying¹, WANG Fei², YAO Shenkang¹

1. Hangzhou Tianchuang Environmental Technology Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310000, China

2. Hangzhou Tianze Purification Technology Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310000, China

Abstract: Odorous substances in drinking water seriously affect the sensory acceptance of water quality and the satisfaction of residents with water use. The continuous aggravation of water source pollution and the poor effectiveness of traditional water treatment processes in removing odorous compounds make advanced treatment technology the key to solving this problem. Analyzing the formation mechanism and distribution characteristics of common odorous substances, and exploring the applicability and treatment effects of control methods such as biological activated carbon, ozone activated carbon combination, and advanced oxidation technology, combined with practical cases to evaluate the removal efficiency and process stability of different technologies, providing reference for ensuring drinking water safety.

Keywords: odorous substances; deep processing; drinking water; biological activated carbon; advanced oxidation process

引言

公众健康得以保障的基本要求是有清洁且无异味的饮用水,生活质量得以提升的重要标志也是有清洁且无异味的饮用水,但是水源污染问题越来越突出,水中频繁出现藻类代谢产物、有机物降解物等臭味物质,严重影响水质的感官标准且可能导致用户投诉与信任危机,常规处理手段常无法彻底除掉这些微量却敏感的化合物,高效、稳定的深度处理技术探索就成了行业关注焦点,系统研究和优化臭味物质控制策略、构建安全优质的饮用水系统很有现实意义。

1 饮用水中常见臭味物质的来源与形成机制

饮用水里的臭味问题越来越被关注,而要想有效控制臭味就得先知道臭味物质的来源和形成机制。

1.1 藻类代谢的气味物质

富营养化明显的水体环境里,藻类尤其是蓝藻种群常会迅猛爆发性增长从而出现“水华”现象,这类生物代谢过程中会产生多种挥发性气味物质,其中最主要的是二甲基异冰片(2-MIB)和土味素(Geosmin),这两种化合物嗅觉阈值极低,通常人类嗅觉系统只需察觉到几纳克每升

(ng/L)的浓度就会闻到明显的霉味或者泥土腥味,严重影响饮用水感官质量,夏秋季节大多是其释放时间,这时候水体温度高、光照强、营养盐充足,为蓝藻等浮游植物繁殖提供了理想条件,藻类死亡或者大量衰老时细胞结构破裂,内部储存的气味物质进一步释放会加剧水体异味污染。

1.2 有机物降解的副产物

天然有机物(像腐殖酸、富里酸之类的)以及人为有机污染物(由生活污水、农业径流、工业排放带入)在天然水体里到处都有,在微生物作用、氧化还原等化学反应过程中,大分子有机物常被降解成低分子量的挥发性副产物(像挥发性脂肪酸如乙酸、丁酸,硫醇如甲基硫醇,胺类如三甲胺等),这些副产物往往刺激性很强且有腥臭味或者腐败味,对水体臭味特征影响很大,硫化氢(H_2S)会有臭鸡蛋味,甲基硫醇是恶臭腐烂味,还有些工业来源的有机物(像酚类、氯酚类)含量低到ppb级别也可能散发刺鼻药味或者消毒水味,水体流速低、溶解氧不足且微生物活动旺盛的时候,这些异味就更容易积攒。

1.3 饮用水处理过程中的臭味生成环节

饮用水处理时,工艺运行和管理不到位就可能出现臭

味物质的重要生成源，加氯消毒阶段尤其如此，若控制不好，游离氯跟水体里的天然有机物（NOM）一反应就容易产生多种氯代有机化合物，像三氯酚、四氯苯、氯仿之类的，这些物质大多有明显刺激性药味或者化学气味，不仅影响水的感官质量还可能带来潜在健康风险。而且，曝气、絮凝、沉淀这些处理单元在处理高有机负荷水体时，若不同步排泥或者不定期清洗就容易发生微生物滋生繁殖，其代谢产物可能进一步散发臭味从而会影响整个系统的出水质量。滤池若长期不换滤料且反冲洗强度和频率不够，滤料里有机质和细菌生物膜就会累积成为臭味源，跟着处理水一起释放，出现典型的“二次污染”现象。

2 现有常规处理工艺的局限性分析

水源环境越来越复杂，常规饮用水处理工艺在保障水质安全方面受到挑战且在臭味物质去除方面明显不足的问题尤其突出，急需对其局限性进行系统分析。

2.1 去除效率有限

多数水厂目前依旧把以混凝沉淀、砂滤和氯消毒为核心的传统处理工艺当作主要手段，在控制浊度、杀灭病原体 and 去除悬浮颗粒方面这一流程体系效果较好，对常规水质保障起着关键作用，但传统工艺在面对 2-甲基异冰片（2-MIB）、土味素（Geosmin）、硫醇类这些臭味物质时就不行了，这些物质浓度极低、嗅阈极低，大多是极性较强或者分子量较小的化合物，物理过滤、常规絮凝或者吸附手段很难有效去除它们，且增加混凝剂投加量或者调整滤速，去除率也没法显著提高，还可能影响其他水质指标，导致出厂水往往还残留异味，影响用户感官体验和公众对水质安全的信任，只靠传统工艺没法彻底控制臭味污染物，得引入生物活性炭、臭氧氧化这些更有针对性的高级处理技术来弥补它的不足。

2.2 处理路径单一

日益复杂的水体异味问题摆在面前，现有水处理工艺的应对手段普遍存在路径单一、应急性强的情况，多数水厂应对气味污染依旧在采用“加氯掩盖”和“投加粉末活性炭”这两个传统方法，虽然短时间内异味可被加氯掩盖，但这容易让水中有机物生成氯代副产物，像三氯甲烷、氯酚类物质，有潜在健康风险，且活性炭吸附虽有一定效果，但其投加剂量难以精确控制，而且会让出水混浊升高、污泥负荷加重，长效机制也没能形成，现有工艺识别气味形成前驱物的能力弱，缺乏针对不同异味成因的分类控制手段，在蓝藻暴发季节或者突发性有机污染事件时，系统应对能力差，往往只能靠临时加药、换源等手段“止损”，这不但增加运行压力与成本，也让异味污染应对的结构不足暴露出来，工艺流程的系统优化和智能预判机制急需被引入。

2.3 运行管理受限

常规工艺运行时，气味物质的监测大多滞后，主要靠

人工嗅辨或周期性理化检测，缺少实时、灵敏的感官监控手段，臭味物质一旦进入处理系统产生感官影响往往就错过最佳干预时机，而且部分处理设备老化、管理粗放，像滤池不及时冲洗、污泥堆积、消毒系统稳定性差等问题也会加大气味异常风险，现行工艺体系没形成闭环监测与动态调节机制，工艺反应难以应对外界污染变化，满足不了现代饮用水品质控制对稳定性、前瞻性和精细化的要求，常规处理工艺面对复杂臭味物质时，去除能力不够、应对机制单一、运行管控落后等短板明显，这就为深度处理技术的引入和优化提供了现实基础和迫切动力。

3 深度处理技术在臭味物质去除中的应用现状

常规工艺在控制臭味物质上存在局限，近年来多种深度处理技术随之出现并逐渐成为提升饮用水感官质量、保障其安全的重要手段与发展方向。

3.1 生物活性炭吸附技术

传统活性炭吸附和微生物降解功能被生物活性炭技术结合起来，在水处理末端设置滤池后，臭味物质像 2-MIB 和 Geosmin 就能够被持续吸附并且生物降解，活性炭作载体，不但高效吸附水中有机气味化合物，还能给附着微生物提供稳定的生长环境以实现异味分子的协同降解，该技术运行稳定且处理持续性强，但它对温度、水质条件依赖大，温度低或者进水负荷波动时，处理效率可能受影响，滤料更换周期和生物膜管理对技术长期稳定性要求也高。

3.2 臭氧-活性炭联用技术

臭氧与活性炭联用（O₃-BAC）在气味控制中被广泛应用，其核心是臭氧强氧化力既能裂解难降解异味有机物，又能产生可被活性炭吸附和生物降解的中间产物，在氧化 2-MIB、土味素和部分氯酚类化合物时表现优异，可明显降低水的气味强度且对微生物和病毒等有辅助灭活作用，而活性炭作为后续处理单元，会进一步去除臭氧未完全降解有机物和副产物，这一技术组合高效且广谱，只是投资成本高且操作参数控制要求严格，在臭氧投加浓度和反应接触时间精准控制方面尤其如此。

3.3 高级氧化与新兴技术

羟基自由基是高级氧化工艺（AOPs）的主要氧化剂，这工艺有着极强的非选择性氧化能力能快速破坏臭味分子的结构键能。臭氧/紫外、UV/H₂O₂、Fenton 反应等都属于常见的 AOPs，在实验和中试条件下它们能将多种臭味化合物的去除比率达到 80%且尤其适用于应急处理和高浓度污染场景。近年来饮用水深度净化逐步应用到光催化、膜分离、生物膜反应器等新兴技术，这些技术有着不错的潜力和拓展空间，不过这些技术大多处于推广初期阶段存在运行能耗高、系统复杂、管理技术门槛高的问题还需要在实际工程里进一步验证和优化，在臭味物质控制方面深度处理技术有良好的应用前景和实际成效，但在广泛推广应用时得因地制宜科学选型兼顾水质特征、运行成本

和管理水平。

4 典型控制技术的对比分析与工程案例评估

深度处理技术有很多种且各有各的特点,其应用效果会被多种因素影响,典型技术对比分析和工程实践案例评估能给饮用水臭味控制提供科学依据和技术路径。

4.1 技术特点对比分析

常用的臭味物质控制技术有生物活性炭、臭氧-活性炭联用、高级氧化等,生物活性炭有着持续吸附和生物降解的能力,稳态水质条件下适用且运行维护成本不高,但起效慢且低温对其影响大;臭氧-活性炭技术有氧化-吸附联合作用、适用范围广且去除效率挺高,不过设备复杂、能耗高且臭氧需精确控制投加;高级氧化(像臭氧/紫外、UV/H₂O₂等)氧化能力强、反应快,污染高峰或者突发事件时适用,只是对设备、管理技术要求高且运行费用也比较高,各技术选型得结合水源特性、气味成因和处理目标,不能搞“一刀切”。

4.2 工程案例一:杭州九溪水厂

西湖水域藻类高发时期会产生霉味问题困扰着杭州九溪水厂,原有混凝沉淀、砂滤加消毒的工艺在高温季节难以有效去除 2-甲基异莰醇(2-MIB)和土臭素(geosmin)致使居民用水投诉屡屡发生。2019 年九溪水厂引入深度处理系统即“臭氧+生物活性炭(臭氧-BAC)”并设置双段臭氧接触池和生物炭滤池且对臭氧投加量进行动态调节,运行数据表明 2-MIB 平均去除率能达到 88%,出厂水气味强度从之前的 3 级降到 1 级以下,水质显著改善且用户满意度也提高了,这个项目显示臭氧-BAC 组合在处理高负荷臭味污染方面效果显著且特别契合富营养化水源季节性气味突发状况的处理需求。

4.3 工程案例二:深圳石岩水厂

深圳石岩水厂主要以水库为水源,雨季时地表径流对水体影响较大,有机污染物易引发腐败味和药味问题,2021 年“UV/H₂O₂ 高级氧化+纳滤膜”组合深度处理系统在该厂实施,前端用高级氧化裂解低分子异味物,后端纳滤系统进一步截留残余有机物及副产物,改造后运行稳定,臭味化合物平均去除率达 92%,即便在台风季节污染暴增时出厂水感官质量也能保持,这个案例表明高级氧化技术在应急和复杂水质环境下适应性很强,但高能耗和管理要求对运维团队是更高的挑战。

臭味物质去除方面不同工艺各有好坏,要结合地域、水源、水质和经济条件科学选型优化且推广需因地制宜,这样在提升饮用水感官质量时才能兼顾成本控制和运行可持续性。

5 臭味物质控制技术的发展趋势与优化方向

饮用水安全标准不断提升且公众对水质感官需求也在增强,臭味物质控制技术朝着智能化、集成化、绿色化方向发展,未来重点在于技术升级和系统优化的研究

与应用。

5.1 精准识别与智能监测

要控制未来的臭味物质,关键得先快速、灵敏、精准地识别异味化合物,传统的人工嗅辨或者定期实验室检测滞后性很严重,很难适应突发性污染事件和动态水质变化,而新兴的在线监测技术,像电子鼻、气质联用仪(GC-MS)在线系统、分子探针传感器等逐渐在实际水厂得到应用,能实时追踪 2-MIB、Geosmin、氯酚类等关键气味指标,并且利用物联网平台和大数据技术构建水质感官特征预测模型,推动监测—预警—响应智能闭环体系建设,这会大大提升臭味控制的前瞻性和管理水平。

5.2 多技术协同集成发展

水源污染形势复杂多变,单一控制技术通常难以全面处理不同类型、不同季节的臭味问题,“组合拳”策略在未来技术发展中更受重视,一方面是工艺路径集成化,像臭氧-BAC 和膜分离技术组合、高级氧化与活性炭联用、生物滤池和纳滤系统互补等可实现各单元技术优势互补并提高处理稳定性与冗余能力,另一方面工艺布局朝着模块化与可调节化方向演变,能依据季节、水质波动灵活切换处理方式且调整运行参数,“源-厂-网”一体化管理思路也在兴起,控制原水污染源、强化处理厂末端深度净化、保障供水管网中水质稳定就能达成臭味控制的全过程管理。

5.3 绿色环保与可持续性优化

臭味控制技术在保障处理效果时需兼顾能源消耗、碳排放和运维成本等绿色环保指标,未来优化重点会放在低能耗、低副产物、可再生材料这些方向,开发新型纳米材料和高性能碳材料来替换传统活性炭可提高吸附效率并延长更换周期,用太阳能驱动的光催化系统取代电力密集型 UV 设备会降低运行能耗,采用生物强化工艺凭借天然微生物群体提升降解效率可减少化学药剂的依赖,而且完善污泥副产物的资源化利用、臭氧尾气回收、膜污染物再处理等辅助技术有助于构建资源闭合与环境友好的处理体系,使水处理从“高效”朝着“高效+生态”并行发展。

臭味物质控制技术正在从“补救型”朝着“预防+治理”并重转变并从“被动处理”升级为“主动智能”,而提升监测能力、整合多种工艺路径、注重绿色运行会不断拓展饮用水深度净化技术的广度和深度以有力支撑安全优质宜人的城市供水系统建设。

6 结语

公众对饮用水质量的要求一天天提高,这使得臭味物质的控制成为供水安全管理的重要环节,在分析臭味物质来源与形成机制后揭示出常规处理工艺的局限性且系统梳理生物活性炭、臭氧联用、高级氧化等深度处理技术的应用现状与工程实践,以后臭味控制技术会朝着精准监测、多元集成、绿色高效方向发展,建立科学、系统、智能的

臭味管理体系对保障饮用水感官质量、提升公众满意度和饮水安全来说很关键。

[参考文献]

- [1]王乐.臭氧—活性炭去除饮用水中嗅味物质的研究[D].苏州:苏州科技学院,2015.
- [2]杨欣,唐玉霖,辛怀佳.饮用水中典型臭味物质及其去除方法研究进展[J].净水技术,2018,37(3):37-43.
- [3]张宁吉,方敏.城市水厂中给水深度处理技术的应用[J].

城市建筑,2019,16(35):147-148.

[4]刘淑丽.UV/H₂O₂ 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.

[5]徐鹏成.纳滤联用工艺控制饮用水中消毒副产物的应用研究[D].兰州:兰州交通大学,2022.

作者简介:陈英(1991.11—),毕业院校:浙江农林大学,所学专业:环境工程,当前就职单位:杭州天创环境科技股份有限公司,职务:工艺工程师,职称级别:中级。