

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.01.008

新型吸附剂强化混凝去除异味物质应用实践与探讨

王洋¹, 吕莎莎¹, 范爱萍¹, 马伟²

(1. 大连市水务集团水质监测有限公司, 辽宁 大连 116000; 2. 大连理工大学 化学学院, 辽宁 大连 116000)

摘要: 针对原水中2-甲基异莰醇(2-MIB)和土臭素(GSM)两种典型臭味物质带来的饮用水水质问题,采用新型吸附剂开展了2-MIB和GSM的强化去除应用研究,探究了吸附剂加料方式(湿法或干法)、投加量、腐殖酸浓度对2-MIB和GSM去除效果的影响,并验证了实际应用效果。结果表明,新型吸附剂湿法加料方式对2-MIB和GSM的去除效果更好;随着吸附剂投加量的增加,对2-MIB和GSM的去除率均呈现增加趋势,当投加量超过10.0 mg/L时,对两种污染物的去除率均超过80%;水中腐殖酸等有机物浓度对2-MIB和GSM的去除效果有一定影响,但整体上可控。在辽宁某净水厂原水GSM浓度高达400~600 ng/L时进行了应急处理,并取得了理想效果。

关键词: 新型吸附剂; 强化混凝; 2-甲基异莰醇; 土臭素

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)01-0048-05

Application and Discussion on Removal of Odorous Substances through Enhanced Coagulation Using a Novel Adsorbent

WANG Yang¹, LÜ Shasha¹, FAN Aiping¹, MA Wei²

(1. *Water Quality Monitoring Corporation of Dalian Water Group Co. Ltd., Dalian 116000, China;*
2. *School of Chemistry, Dalian University of Technology, Dalian 116000, China*)

Abstract: A novel adsorbent was applied to enhance the removal of two typical odor-causing compounds including 2-methylisoborneol (2-MIB) and geosmin (GSM) to address drinking water quality issues arising from these two substances in raw water. The influence of key operational parameters, including adsorbent dosing method (wet vs. dry), dosage, and humic acid concentration, on the removal efficiency of 2-MIB and GSM was systematically investigated, and the practical applicability of the approach was experimentally validated. The wet dosing method employing the novel adsorbent demonstrated a more effective removal performance for 2-MIB and GSM. As the adsorbent dosage increased, the removal efficiencies of both compounds exhibited a consistent upward trend. When the dosage exceeded 10.0 mg/L, the removal efficiencies for both compounds surpassed 80%. The presence of organic compounds in water, such as humic acid, exerted a moderate influence on the removal efficiency of 2-MIB and GSM; however, this interference remained generally within acceptable limits. Emergency treatment measures were implemented upon detecting a GSM concentration in the raw water of a water purification plant in Liaoning Province ranging from 400 ng/L to 600 ng/L, resulting in favorable outcomes.

Keywords: novel adsorbent; enhanced coagulation; 2-methylisoborneol; geosmin

通信作者: 马伟 E-mail: mawei@dlut.edu.cn

随着生活质量的提升,人们对饮用水中嗅味问题愈发关注。近年来,我国饮用水的异味问题屡有发生^[1],水体中的2-甲基异莰醇(2-MIB)和土臭素(GSM)是具有强烈土霉味的藻类次代谢产物^[2],嗅阈值较低。当其在水体中的浓度超过嗅阈值时,水体会散发出特殊气味,使用户感到不适。根据《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022),两种物质的国标限值均为10 ng/L。目前,常规混凝-沉淀-过滤-消毒水处理工艺对2-MIB和GSM的去除效果有限^[3]。高级氧化和活性炭吸附对嗅味物质具有较好的去除效果,但均需要增加大型水处理设施^[4-5],这对部分净水厂造成了经济压力。活性炭吸附剂颗粒较小,有些细粉在水中难以完全沉淀,进而影响浊度等指标。当原水中2-MIB和GSM浓度较高且净水厂缺乏增添大型水处理设施预算时,如何快速有效地去除饮用水中的2-MIB和GSM成为供水企业亟待解决的问题。

笔者采用一种新型复合吸附剂,并在实际应用中取得一定效果的基础上,进行了实验室测试,分析了新型吸附剂的组分和结构特征,探讨了投加方式、投加量和水中有有机物等的影响,提出了优化吸附-混凝强化处理技术,并在辽宁某万吨级净水厂进行了应用,实现了在不增加大型处理设施的前提下,提高对2-MIB和GSM的去除效果,通过快速、简单的方法保障了安全供水,为异味问题的应急处理提供了参考。

1 材料与方法

1.1 新型吸附剂特征及投加方式

采用的新型吸附剂为辽宁某公司生产的碳硅基复合吸附剂,具有涉水资质,孔道直径主要集中在1.2~5.0 nm,比表面积为200~700 m²/g,粒度在50 μm以下,易于配制成浆料。

实验配制100 ng/L的2-MIB和GSM,考察不同加料方式下,新型吸附剂投加量对2-MIB和GSM去除效果的影响。其中,湿法加料是将新型吸附剂配制成5%的浆料备用;干法加料是利用干粉投加,投加量为2.5~30.0 mg/L。利用密封锥形瓶进行吸附-混凝实验,对吸附剂的搅拌速度为300 r/min,混合10 min后,加入5 mg/L的聚合氯化铝(PAC),继续搅拌10 min,减速到30 r/min搅拌20 min,静置30 min后取样并检测相关指标。

在研究吸附剂投加量对2-MIB和GSM去除效果的影响方面,首先配制浓度为50 ng/L的2-MIB和GSM,利用密封锥形瓶进行吸附-混凝实验。然后将吸附剂配制成5%的浆料,搅拌速度为300 r/min,吸附剂投加量控制在2.5~30.0 mg/L。吸附10 min后,加入5 mg/L的PAC,在300 r/min下搅拌10 min,减速到30 r/min搅拌20 min,静置30 min后取样并检测相关指标。

1.2 水样采集与分析方法

采用40 mL棕色瓶(螺旋盖及聚四氟乙烯隔垫),取实际原水至满瓶,密封水样后立即进行分析。2-MIB和GSM采用固相微萃取/气相色谱-质谱法检测,并通过内标法进行定量。

2 结果与讨论

2.1 新型吸附剂的表征

新型吸附剂的X射线衍射(XRD)图谱和红外光谱(IR)如图1所示。

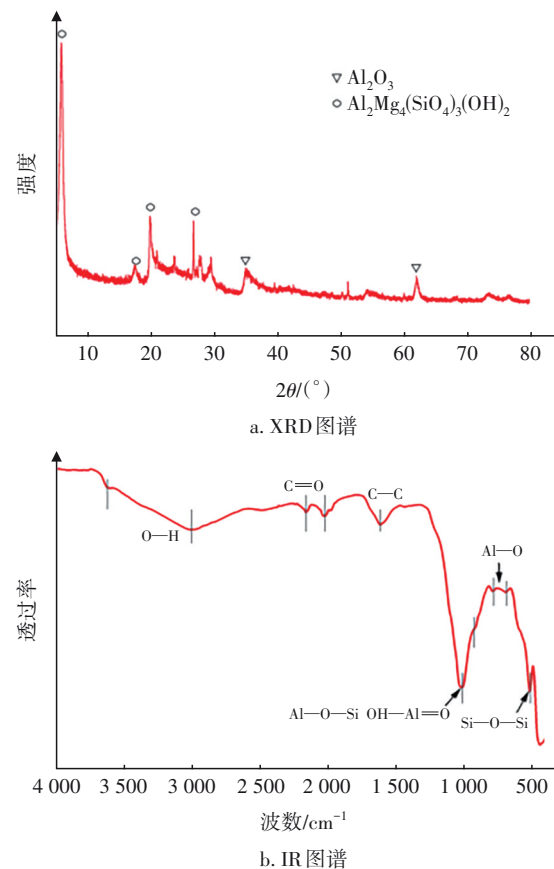


图1 新型吸附剂的XRD和IR图谱

Fig.1 XRD and IR spectra of novel adsorbent

从图1(a)可知,新型吸附剂中的晶体相主要由氧化铝和硅铝酸盐组成,且两种物质均表现出了一

定的结晶度,具有良好的稳定性。从图 1(b)可知,除了硅铝酸盐外,还有羟基、碳碳官能团和羰基官能团。此外,利用扫描电子显微镜(SEM)和能谱分析(EDS)对吸附剂形貌及元素进行了表征,结果表明,吸附剂中的碳与硅铝化合物形成了非对称结构,吸附剂表面粗糙,具有不同尺寸的孔道,主要成分包括 Si、C、O、Al 和少量的 Mg 等元素。结构表征结果表明,该吸附剂不但具有亲水性官能团,还存在疏水性官能团,且具有一定非对称特征的稳定结构。

2.2 新型吸附剂加料方式的影响

新型吸附剂加料方式对去除 2-MIB 和 GSM 的影响如图 2 所示,可知湿法加料方式对 2-MIB 和 GSM 的去除效果优于干法加料方式。分析原因,湿法界面的水化层强化了界面物质的扩散作用^[6]。

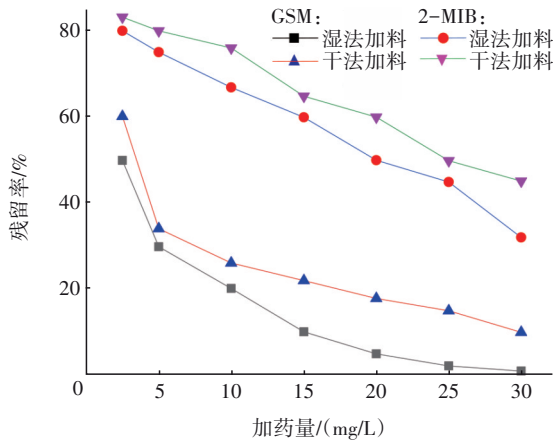


图 2 新型吸附剂加料方式对去除 2-MIB 和 GSM 的影响

Fig.2 Influence of novel adsorbent dosing method on 2-MIB and GSM removal

表 1 不同吸附剂对 2-MIB 和 GSM 的去除效果

Tab.1 Removal efficiency of various adsorbents on 2-MIB and GSM

项 目		投加量=2.5 mg/L	投加量=5.0 mg/L	投加量=10.0 mg/L	投加量=20.0 mg/L	投加量=30.0 mg/L	投加量=40.0 mg/L	投加量=50.0 mg/L
2-MIB 去除率	新型吸附剂吸附 0.5 h, 原水浓度为 50 ng/L	10.04	29.92	80.60	89.81	96.66		
	煤质粉末活性炭吸附 2.67 h, 原水浓度为 61 ng/L ^[7]		26.18	44.45	55.14	57.34	80.26	
	煤质粉末活性炭吸附 2.25 h, 原水浓度为 300 ng/L ^[8]			32.08	58.07	71.20		
	煤质粉末活性炭吸附 2.25 h, 原水浓度为 100 ng/L ^[8]			54.08	65.10	74.04		
	活性炭+PAC 吸附 1 h, 原水浓度为 100 ng/L ^[9]			51.50	71.30	85.40	87.20	89.20
GSM 去除率	新型吸附剂吸附 0.5 h, 原水浓度为 50 ng/L	19.83	40.85	88.68	97.53	99.68		
	活性炭+PAC 吸附 1 h, 原水浓度为 100 ng/L ^[9]			71.40	92.70	98.80	98.80	99.90

当新型吸附剂投加量为 10.0 mg/L 时,对 2-MIB 的去除率超过 80%。而传统活性炭需投加 40.0 mg/L 才能达到相似的效果。即使对于活性炭+PAC 的复合吸附剂而言,其投加量也需要达到 30.0 mg/L 时,

2.3 新型吸附剂投加量的影响

近年来,辽宁某区域原水中 2-MIB 和 GSM 偶有超标情况出现,超标浓度通常为标准限值的 3~5 倍,因此配制相近浓度的混合水样进行测试,以便有效指导实际操作。新型吸附剂投加量对去除 2-MIB 和 GSM 的影响如图 3 所示。可以看出,当吸附剂投加量为 10.0 mg/L 时,对 2-MIB 和 GSM 的去除率均可以达到 80% 以上。因此,针对该区域 2-MIB 和 GSM 超标情况,可以投加 10.0 mg/L 的新型吸附剂以去除污染物。同时可以发现,该吸附剂对 GSM 的强化混凝去除效果比 2-MIB 的好。

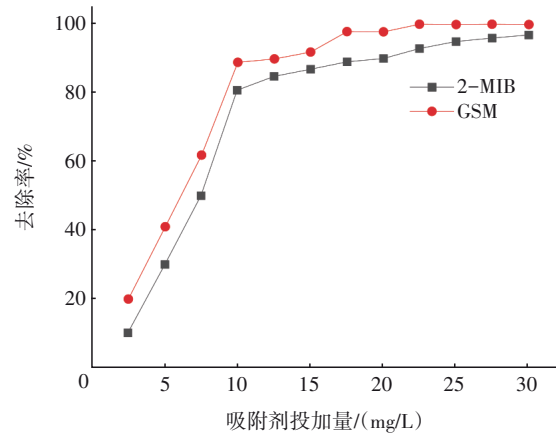


图 3 新型吸附剂投加量对去除 2-MIB 和 GSM 的影响

Fig.3 Influence of novel adsorbent dosage on 2-MIB and GSM removal

表 1 为新型吸附剂与传统典型粉末活性炭吸附剂对 2-MIB 和 GSM 的去除效果对比。可以看出,在相同吸附剂投加量情况下,新型吸附剂在较短的时间内对 2-MIB 和 GSM 的去除率更高。

对 2-MIB 的去除率才超过 80%。新型吸附剂对 GSM 的去除率与活性炭+PAC 复合吸附剂的相当,且略高于活性炭+PAC 复合吸附剂。对比可见,新型吸附剂对 2-MIB 和 GSM 的去除率更高。

2.4 吸附与混凝的协同作用

2-MIB和GSM主要是放线菌、蓝藻、细菌和真菌的次生代谢产物。目前,普遍认为2-MIB和GSM通常具有两种形态,即结合态和溶解态。对于结合态2-MIB和GSM而言,当外界环境变化时,如细胞组织被氧化、光照等刺激下2-MIB和GSM会向胞外释放,并变为溶解态。不同的存在形态对吸附、混凝、吸附-混凝的过程具有一定影响。水样1和水样2均为天然水样,但其腐殖化指数具有明显差别,水样1在90以上,而水样2在5以下。单独采用混凝法时,对水样1和水样2中GSM的去除率分别为19.1%和12.3%,去除率相差约7个百分点,如图4所示;对2-MIB的去除率分别为28.2%和8.2%,去除率相差20个百分点。而单独采用吸附法对水样1和水样2中GSM的去除率分别为48.2%和41.8%,去除率相差约6个百分点;对2-MIB的去除率分别为41.8%和35.5%,去除率差异与GSM相近,同样约为6个百分点。由此可见,待检测水样中腐殖酸对混凝过程的影响较大,但对吸附的影响不显著,这可能是由于本实验中吸附剂投加量较高而造成吸附效果难以呈现差别。

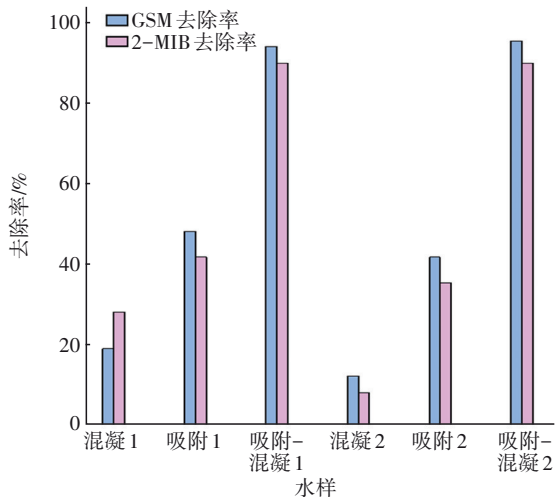


图4 吸附、混凝及其协同作用对2-MIB和GSM的去除效果

Fig.4 Removal efficiency of adsorption, coagulation and synergistic effect on 2-MIB and GSM

从图4还可以看出,同步采用混凝法和吸附法对水样中2-MIB和GSM的去除效果更佳。对于腐殖酸浓度较高的水样1,两种方法协同作用对GSM和2-MIB的去除率能够分别达到94.0%和90.0%,显著高于单独采用两种方法简单叠加以后的去除率之和(67.3%和70.0%)。同时,针对腐殖酸浓度

较低的水样2,也可以观察到类似现象:即两种方法协同作用对GSM和2-MIB的去除率能够分别达到95.0%和90.0%,亦显著高于两种方法简单叠加后的去除率之和(54.1%和43.7%)。综上所述,无论腐殖化指数高低,吸附和混凝联合作用的效果明显高于单独的方法,说明新型吸附剂与混凝剂PAC具有良好的协同作用。因此,为获得最优的2-MIB和GSM去除效果,应尽可能采用混凝和吸附协同去除的方法。

2.5 实际应用效果

辽宁某区域7月初水库原水出现异味,经分析确认为2-MIB和GSM超标。采用应急手段,将吸附剂稀释为浆料后,利用管道泵直接加入配水塔中,并经过管道进入净水间,调整PAC投加量,以吸附-混凝强化方式去除2-MIB和GSM。初期采用的吸附剂投加量为10.0 mg/L,PAC投加量为3 mg/L,沉淀后没有出现吸附剂漂浮现象,滤池运行参数未变,但需要适当增加刮泥机的运行频率。进出水中2-MIB和GSM的变化如图5所示。

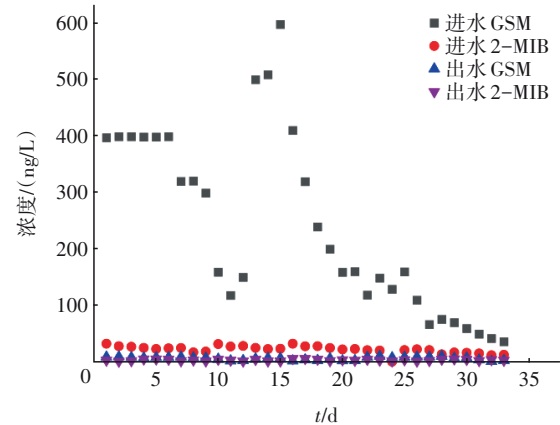


图5 进出水2-MIB和GSM的变化

Fig.5 Change in 2-MIB and GSM of influent and effluent

从图5可以明显看出,进水GSM浓度最高可以达到600 ng/L,将吸附剂投加量提高至50.0 mg/L以后,出水GSM浓度显著降低,可以控制在10 ng/L以内。同时还发现,进水2-MIB浓度没有出现过高的情况,基本在20~40 ng/L范围内,投加吸附剂以后,2-MIB浓度也可以降低至10 ng/L以内。处理过程连续运行了1个月左右,随着天气的变化以及受降雨影响,原水水质明显变好。综上所述,通过向水厂配水塔或进入配水塔的管网投加新型吸附剂以强化混凝去除2-MIB和GSM的方法简便、实施简单

且见效快。

3 结论

采用湿法加料的方式,且投加量超过10.0 mg/L时,新型吸附剂对2-MIB和GSM均具有显著的去除效果,去除率超过80%。在辽宁某净水厂的实际应用效果表明,该吸附剂与聚合氯化铝通过吸附+混凝连续强化工艺去除2-MIB和GSM的效果较好,能够为净水厂处理此类水污染突发事件提供参考。

参考文献:

- [1] 陆娴婷,张建英,朱荫涓. 饮用水的异臭味研究进展[J]. 环境污染与防治, 2003, 25(1): 32-34, 42.
LU X T, ZHANG J Y, ZHU Y M. Research of smell and taste in drinking water[J]. Environmental Pollution & Control, 2003, 25(1): 32-34, 42(in Chinese).
- [2] 马晓雁. 土臭素和二甲基异冰片的控制技术及其机理研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
MA X Y. Control Technology and Mechanism of Geosmin and 2-Methylisoborneol[J]. Shanghai: Tongji University, 2007(in Chinese).
- [3] 陈祎思. 典型氧化技术对饮用水中化学类臭味物质的控制效果及机制研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2021.
CHEN Y S. Removal Effects and Mechanism Study on the Chemical Odorants in Drinking Water by Selected Oxidation Process [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2021(in Chinese).
- [4] 黄美心, 邹苏红, 张金松. 臭氧-生物活性炭技术在我国饮用水深度处理的研究进展[J]. 城镇供水, 2021(3): 46-50.
HUANG M X, ZOU S H, ZHANG J S. Research progress of ozone-biological activated carbon technology in advanced treatment of drinking water in China [J]. City and Town Water Supply, 2021 (3) : 46-50 (in Chinese).
- [5] 顾玉蓉, 张苗, 李旭, 等. 臭氧氧化法降解典型臭味物质影响因素研究[J]. 天津科技, 2020, 47(8): 35-40.
GU Y R, ZHANG M, LI X, et al. Study on factors affecting degradation of typical odor compounds by ozonation[J]. Tianjin Science & Technology, 2020, 47 (8): 35-40(in Chinese).
- [6] MA X Y, CHEN Z, SUN Y W, et al. Effect on kinetics and energy distribution of riboflavin adsorption from magnetic nano-carbon composites with adsorbed water layer[J]. Separation and Purification Technology, 2022, 292: 120995.
- [7] 李土雄, 范丹, 刘岳峰, 等. 粉末活性炭去除饮用水中2-MIB应用研究[J]. 给水排水, 2024, 50(2): 14-19, 26.
LI T X, FAN D, LIU Y F, et al. Study on the application of powdered activated carbon to remove 2-methylisoborneol in drinking water [J]. Water & Wastewater Engineering, 2024, 50(2) : 14-19, 26(in Chinese).
- [8] 高蕴成. 粉末活性炭-臭氧工艺去除水中臭味中试研究[J]. 给水排水, 2022, 48(S1): 705-710.
GAO Y C. Pilot study on the removal of odor of water by powdered activated carbon-ozone process [J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(S1) : 705-710 (in Chinese).
- [9] 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[J]. 城镇供水, 2023(1): 65-68.
ZHOU R A, ZHANG S Y, ZHENG S, et al. Study on the removal of 2-methylisoborneol and geosmin from water by activated carbon [J]. City and Town Water Supply, 2023(1): 65-68(in Chinese).

作者简介:王洋(1978—),女,辽宁大连人,本科,高级工程师,主要研究方向为水质管理、水质监测及水处理技术。

E-mail:szdljcz@163.com

收稿日期:2025-05-28

修回日期:2025-07-22

(编辑:任莹莹)