

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.21.005

预氧化联合PAC强化混凝沉淀去除引滦水中2-MIB

苏晓¹, 韩宏大¹, 胡建坤¹, 韩正双², 李荣¹

(1. 天津水务集团有限公司, 天津 300042; 2. 天津市公用事业设计研究所, 天津 300100)

摘要: 针对天津市引滦水中2-甲基异莰醇(2-MIB)超标引起的水源水臭味问题,开展了常规混凝沉淀、氧化、粉末活性炭(PAC)吸附以及预氧化联合PAC强化混凝沉淀工艺去除引滦水中2-MIB的研究。结果表明,混凝沉淀、氧化、PAC吸附对不同形态的2-MIB有不同的作用效果,但这3种单一技术并不能有效去除水中的2-MIB;NaClO/KMnO₄/O₃+PAC+混凝沉淀组合工艺对引滦水中的2-MIB均有较好的去除效果,其中O₃+PAC+混凝沉淀组合工艺的处理效果最佳。另外,结合现场实际情况,开展了NaClO与PAC联用技术的实际应用研究,发现NaClO+PAC+PAC(PAC分两点投加)对2-MIB有很好的去除效果,保证了天津市冬季引滦供水安全运行,可以为后续应对引滦水中2-MIB污染提供借鉴。

关键词: 引滦水; 2-甲基异莰醇(2-MIB); 预氧化; 粉末活性炭; 混凝沉淀

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)21-0027-07

Pre-oxidation Combined with Powdered Activated Carbon Enhanced Coagulation-Sedimentation for Removal of 2-Methylisoborneol in Water from Luanhe Diversion Project

SU Xiao¹, HAN Hong-da¹, HU Jian-kun¹, HAN Zheng-shuang², LI Rong¹

(1. Tianjin Water Group Co. Ltd., Tianjin 300042, China; 2. Tianjin Public Utility Design & Research Institute, Tianjin 300100, China)

Abstract: The conventional coagulation-sedimentation, oxidation, powdered activated carbon (PAC) adsorption and pre-oxidation combined with PAC enhanced coagulation-sedimentation were employed for the removal of 2-methylisoborneol (2-MIB) in water from Luanhe Diversion Project in Tianjin, so as to solve the odor problem caused by excessive 2-MIB in water. Coagulation-sedimentation, oxidation and PAC adsorption showed different removal effect for different forms of 2-MIB, but 2-MIB could not be effectively removed by these three single technologies. The NaClO/KMnO₄/O₃+PAC+coagulation-sedimentation combined process demonstrated good removal effect for 2-MIB in water from Luanhe Diversion Project, among which the O₃+PAC+coagulation-sedimentation process was the best. Combined with the field situation, the NaClO and PAC combined process was employed in practical application, and the NaClO+PAC+PAC process (PAC was added in two positions) demonstrated a good performance for removal of 2-MIB in water from Luanhe Diversion Project, which ensured the safe operation of water supply in winter of Tianjin, and provided reference for dealing with 2-MIB pollution in

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(2020M670671); 天津水务集团有限公司科技项目(2019KY-03)

water from Luanhe Diversion Project.

Key words: water from Luanhe Diversion Project; 2-methylisoborneol (2-MIB); pre-oxidation; powdered activated carbon; coagulation-sedimentation

多年来,天津市水源基本以引滦入津外调水为主,2014年12月南水北调中线工程正式通水后,天津市形成了以南水北调中线工程来水和引滦入津工程来水为水源的城市双水源供水格局。但自2015年以来,引滦水发生以土臭素(GSM)为主要致嗅物质的嗅味问题,致嗅物质种类由以GSM为主逐渐演变成以2-甲基异莰醇(2-MIB)为主,且呈现逐年加重的趋势^[1]。

GSM和2-MIB是饮用水中最常见的两种代谢物,具有强烈的土霉味,嗅阈值极低(4~10 ng/L),它们的存在已成为自来水消费者投诉比例最高的一类问题^[2-3]。为了解决饮用水中GSM和2-MIB引起的嗅味问题,国内外学者开展了大量相关研究^[4-6]。研究表明,大多数水厂采用的混凝/沉淀/过滤/消毒等常规水处理工艺对GSM和2-MIB的去除效果有限^[4]。粉末活性炭(PAC)吸附是最有效、最具实用价值的除嗅方法,当饮用水水源出现突发性或季节性GSM和2-MIB嗅味问题时,PAC可以作为应急处理措施投加使用^[4]。另外,常用的氯、二氧化氯、高锰酸钾等氧化剂对GSM和2-MIB的去除效果甚微^[5],这些氧化剂在实际水体中还可能会杀死藻细胞,使胞内的GSM和2-MIB释放到胞外,进而导致更严重的嗅味问题^[6]。而O₃不仅能够有效去除GSM和2-MIB,还有显著的微絮凝促进作用,可以强化常规工艺对GSM和2-MIB的去除^[7]。

由于不同季节引滦水中2-MIB的浓度和存在形态不尽相同,故单一技术不能很好地去除引滦水中的2-MIB,往往需要采用不同技术组合。为此,笔者开展了常规混凝沉淀、氧化、PAC吸附去除引滦水中2-MIB的研究,重点考察了NaClO/KMnO₄/O₃与PAC联用强化混凝沉淀去除引滦水中2-MIB的效果。同时,基于小试结果和现场实际情况,开展了NaClO+PAC+PAC(PAC分两点投加)技术在冬季引滦供水中的实际应用研究。

1 材料与方法

1.1 试验仪器与材料

试验仪器:气相色谱质谱联用仪(Agilent

7890B-5977B),配置CTC三合一自动进样器;固相微萃取采用Supelco 50/30 μm DVB/CAR/PDMS固相微萃取针;六联搅拌器;臭氧发生器。

试验材料:PAC(煤质、200目)购自天津某公司,比表面积为798 m²/g,孔容积为0.41 cm³/g;采用臭氧发生器在臭氧浓度为60%、流速为0.5 L/min的条件下通入超纯水中制得一定浓度的臭氧水,后续试验通过加入一定量的臭氧水来投加臭氧,试验用水为Millipore超纯水机制水。

1.2 试验方法

混凝沉淀工艺去除引滦水中2-MIB的试验:混凝剂采用聚合氯化铝(PACl)和三氯化铁(FeCl₃),投加量分别为2、8 mg/L,试验采用六联搅拌器进行,先投加PACl并快速搅拌(150 r/min)反应10 s,再投加FeCl₃并快速搅拌(150 r/min)反应1 min,然后慢速搅拌(50 r/min)反应20 min,最后静沉30 min。

不同氧化剂去除引滦水中2-MIB的试验:引滦水取自于桥水库放水洞,NaClO、KMnO₄、O₃三种氧化剂的投加量分别为0.5、1、2 mg/L,预氧化时间均为30 min。

不同氧化剂联合PAC强化混凝沉淀去除引滦水中2-MIB的试验:NaClO、KMnO₄、O₃的投加量均为1 mg/L,预氧化时间为1 h;PAC第1次投加量为30 mg/L、反应时间为2 h,第2次投加量为20 mg/L、反应时间1 h。混凝沉淀条件同上。

2-MIB的测试采用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用法,水样经0.45 μm醋酸纤维素滤膜过滤后测得的2-MIB即为水中溶解态2-MIB。

1.3 引滦沿线情况介绍

天津市引滦输水沿线情况见图1。引滦输水路线为于桥水库—暗渠出口—鲍丘河倒虹吸—潮白河自流道—入塘节制闸—新建节制闸,最后进入天津市各水厂。在实际应用时,NaClO投加位置在暗渠出口,投加量为0.5 mg/L(经多次试验优化);PAC第1次投加位置在鲍丘河倒虹吸处,投加量为30 mg/L;PAC第2次投加位置在新建节制闸之后、天津市各水厂取水泵站进口,投加量为20 mg/L。



图1 天津市引滦沿线各位置分布情况

Fig.1 Distribution of various positions along the Luanhe Diversion Project in Tianjin

2 结果与分析

2.1 混凝沉淀工艺对2-MIB的去除效果

试验期间,引滦水中的总2-MIB、溶解态和结合态2-MIB浓度分别为84.3、29.0、55.3 ng/L,经过混凝沉淀工艺处理之后,总2-MIB、溶解态和结合态2-MIB浓度分别降为67.9、28.4、39.5 ng/L,去除率分别为19.45%、2.07%、28.57%。可以看出,常规混凝沉淀工艺对溶解态2-MIB几乎没有去除效果,对结合态2-MIB有一定的去除,但去除效果有限,主要原因是结合态2-MIB存在于藻细胞内部,而混凝沉淀工艺对藻类的去除效果不佳,故导致对藻细胞内结合态2-MIB的去除效果也不佳。已有的研究亦表明,水厂常规混凝沉淀工艺对2-MIB的去除效果较低^[8]。因此当水源水中出现2-MIB时,仅靠混凝沉淀工艺不能有效去除,需要采用预处理及强化处理措施。

2.2 氧化剂对2-MIB的去除效果

不同氧化剂对引滦水中2-MIB的去除情况见图2。引滦水中总2-MIB、溶解态和结合态2-MIB浓度分别为90.1、28.1、62.0 ng/L,此时水中结合态2-MIB占比较高,为68.84%。课题组之前的研究表明,不同季节引滦水中2-MIB的浓度和存在形态是不同的,进而会影响2-MIB去除工艺的选择^[1]。

在NaClO氧化试验中,总2-MIB几乎没有变化,溶解态2-MIB浓度明显升高,结合态2-MIB浓度明

显降低,说明NaClO对总2-MIB无去除作用,但对结合态2-MIB有明显去除作用。主要原因是NaClO会破坏藻类的细胞壁,使藻细胞内部结合态2-MIB释放到胞外成为溶解态,进而使水中溶解态2-MIB浓度升高。但由于NaClO氧化性偏低,不足以氧化溶解态2-MIB,因此总2-MIB浓度几乎没有变化。

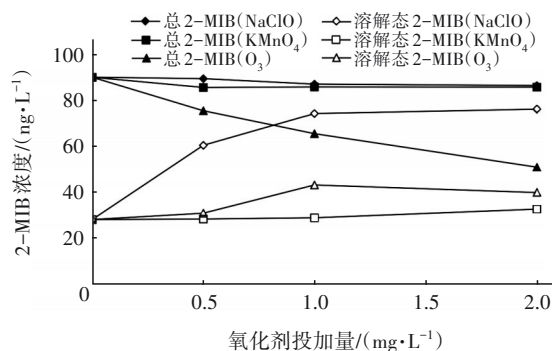


图2 不同氧化剂对引滦原水中2-MIB的去除情况

Fig.2 Removal of 2-MIB in water from Luanhe Diversion Project by different oxidants

KMnO₄对总2-MIB、溶解态和结合态2-MIB几乎没有去除作用,说明本试验条件下KMnO₄既不能氧化2-MIB,也不能破坏藻细胞壁,但KMnO₄可以氧化胞外有机物使藻类失活,进而强化混凝沉淀对藻的去除^[9],从而去除藻细胞内部结合态2-MIB。

O₃对总2-MIB有较好的去除效果,0.5、1和2 mg/L的O₃对总2-MIB的去除率分别为16.11%、27.22%和43.44%,对结合态2-MIB的去除率分别为27.90%、63.87%和82.10%,但溶解态2-MIB浓度由28.1 ng/L分别升至30.8、43.1和39.8 ng/L,表明O₃会破坏藻类细胞壁,使胞内结合态2-MIB释放出来转化成溶解态,从而造成溶解态2-MIB浓度升高,同时O₃也会氧化溶解态2-MIB,进而实现2-MIB的真正去除。试验过程中O₃对2-MIB的整体去除效果不是很好,主要是由于水中藻类和有机物消耗了大量O₃所致。因此,在实际应用中,应根据实际水质情况,通过试验确定O₃最佳投量,同时也可以考虑与PAC联用以保证出水2-MIB达标。

2.3 PAC对引滦水中2-MIB的去除效果

以引滦水作为背景水质,通过标准2-MIB加标方法研究不同投量PAC对引滦水中溶解态2-MIB的去除情况,结果见图3。有研究表明,PAC主要通过吸附作用去除水中溶解态2-MIB^[4],因此本试验仅分析PAC对引滦水中溶解态2-MIB的去除效果。

由图3可知,随着PAC投量的增加,2-MIB去除效果显著升高,试验结束时,10、20、30、50 mg/L的PAC对溶解态2-MIB的去除率分别为60.10%、80.86%、88.49%、94.95%,表明PAC对溶解态2-MIB有很好的吸附效果。由图3还可知,在前1 h内吸附速率最快,且随着时间的延长吸附速率逐渐降低,表明PAC对2-MIB的吸附是快速吸附和慢速吸附的叠加过程,符合准二级动力学方程^[10]。

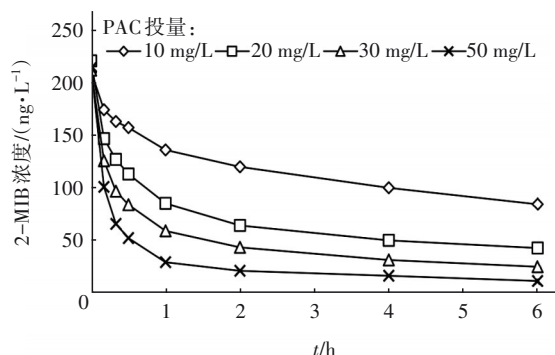


图3 PAC对引滦水中2-MIB的去除情况

Fig.3 Removal of 2-MIB in water from Luanhe Diversion Project by PAC

除PAC投量为10 mg/L的试验外,在其他投量条件下当试验结束时均基本达到了吸附平衡,由此可知,低PAC投量下2-MIB达到吸附平衡的时间较长。当吸附时间由1 h增至6 h时,在PAC投量为10 mg/L条件下,2-MIB去除率增加24.57%,去除率变化明显;而在PAC投量为50 mg/L条件下,2-MIB去除率仅增加了8.31%,去除率变化不明显。因此,当PAC投量足够大时,延长吸附时间对PAC吸附2-MIB的效率并没有太大的影响。

在实际生产运行中,大多数情况下PAC在水厂内投加,其吸附停留时间一般不超过1 h,其实际吸附量要比平衡吸附量低很多。因此,可以通过增加PAC投量来提高2-MIB的去除效果,但这会给企业增加运营成本,故在有条件的情况下,可以在原水管道或输水明渠中投加PAC以延长其吸附时间。综上,混凝沉淀、氧化、PAC吸附等单一技术对不同存在形态的2-MIB有不同的去除效果,故需考虑将单一技术进行组合来高效去除水中的2-MIB。

2.4 组合工艺对2-MIB的去除效果

为了使引滦水中的2-MIB达到饮用水水质标准,进行不同氧化剂联合PAC强化混凝沉淀去除引滦水中2-MIB的研究,结果如图4所示。此时引滦

水中总2-MIB、溶解态2-MIB、结合态2-MIB浓度分别为74.90、25.70、49.20 ng/L,结合态2-MIB占比较高,为65.69%。

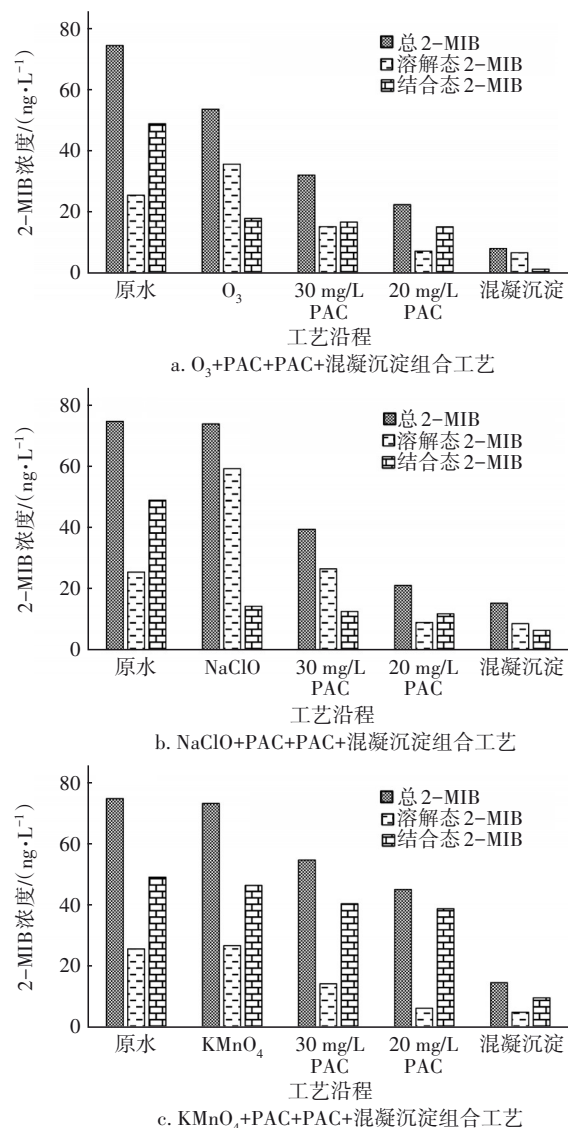


图4 不同氧化剂联合PAC强化混凝沉淀去除引滦水中2-MIB的效果

Fig.4 Removal of 2-MIB in water from Luanhe Diversion Project by different oxidants+PAC+coagulation-sedimentation process

O_3 +PAC+PAC+混凝沉淀组合工艺出水的总2-MIB、溶解态2-MIB、结合态2-MIB浓度分别为8.2、6.8、1.4 ng/L, $NaClO$ +PAC+PAC+混凝沉淀组合工艺出水浓度分别为15.6、8.9、6.7 ng/L, $KMnO_4$ +PAC+PAC+混凝沉淀组合工艺出水浓度分别为14.7、5.0、9.7 ng/L,可以看出,预氧化联合PAC可以有效强化混凝沉淀工艺对引滦水中2-MIB的去除,

且 O_3 +PAC+PAC+混凝沉淀组合工艺对2-MIB的去除效果最好。

在 O_3 +PAC+PAC+混凝沉淀组合工艺中,引滦水经 O_3 预氧化之后,总2-MIB降低、溶解态2-MIB升高;投加PAC后,溶解态2-MIB显著降低,但结合态2-MIB变化不大;最后,经混凝沉淀后水中大多数结合态2-MIB被去除,最终使出水总2-MIB低于10 ng/L。由此可知, O_3 +PAC+混凝沉淀组合工艺对水中2-MIB的去除主要通过三方面作用来实现:一是 O_3 的氧化作用,二是PAC对水中溶解态2-MIB的吸附作用,三是 O_3 预氧化作用强化了混凝沉淀对结合态2-MIB的去除。

$NaClO$ +PAC+PAC+混凝沉淀和 $KMnO_4$ +PAC+PAC+混凝沉淀两个组合工艺对引滦水中的2-MIB也有较好的去除效果,但出水2-MIB浓度不能满足饮用水水质标准要求。在 $NaClO$ +PAC+PAC+混凝沉淀组合工艺中,引滦水经 $NaClO$ 预氧化之后,大部分结合态2-MIB转化成溶解态,然后通过投加两次PAC将水中大部分溶解态2-MIB去除,最后经混凝沉淀进一步去除部分结合态2-MIB。在 $KMnO_4$ +PAC+PAC+混凝沉淀组合工艺中,引滦水经 $KMnO_4$ 预氧化之后总2-MIB、溶解态和结合态2-MIB几乎没有变化;投加两次PAC对溶解态2-MIB的去除效果较好,但对结合态2-MIB没有明显去除作用;最后,经混凝沉淀后绝大多数结合态2-MIB被去除,去除率达到75.06%。

综上, O_3 +PAC+混凝沉淀组合工艺是去除引滦水中2-MIB的最优工艺,其可以充分发挥各单一技术的优势,最终使出水2-MIB满足饮用水水质标准要求。另外两个组合工艺虽未能使最终出水2-MIB浓度达标,但也各具特点。 $NaClO$ +PAC+混凝沉淀组合工艺利用 $NaClO$ 将藻细胞破壁使结合态2-MIB转化成溶解态,之后主要依靠PAC吸附作用将其去除,PAC吸附作用占主导;而 $KMnO_4$ +PAC+混凝沉淀组合工艺是利用 $KMnO_4$ 预氧化作用将藻杀死,之后主要依靠混凝沉淀作用将大多数结合态2-MIB去除,混凝沉淀作用占主导。实际应用时, $NaClO$ +PAC+混凝沉淀和 $KMnO_4$ +PAC+混凝沉淀组合工艺的选择主要取决于原水中2-MIB的存在形态。当原水中溶解态2-MIB占比较高时,宜选择 $NaClO$ +PAC+混凝沉淀组合工艺;当原水中结合态2-MIB占比较高时,宜选择 $KMnO_4$ +PAC+混凝沉淀组合工艺。

故采用预氧化+PAC+混凝沉淀组合工艺时,应根据原水中2-MIB的不同存在形态,选择适宜的预氧化方式,并结合原水2-MIB浓度,优化调整工艺参数,最终使出水2-MIB达标。

2.5 实际应用情况

为保障2020年—2021年度冬季引滦供水安全,进行冬季引滦水中2-MIB去除技术研究及应用。上述小试结果表明, O_3 +PAC+混凝沉淀组合工艺最优,但由于现场没有设置 O_3 投加设备,且根据冬季引滦水中2-MIB的存在形态占比情况(溶解态占比较高),最终选择采用 $NaClO$ +PAC+PAC组合工艺去除引滦水中的2-MIB。

为了验证组合工艺对引滦水中2-MIB的去除效能,取潮白河暗渠出口引滦水进行投加 $NaClO$ +PAC与单独投加PAC对引滦水中2-MIB的去除效果对比,结果如图5所示。

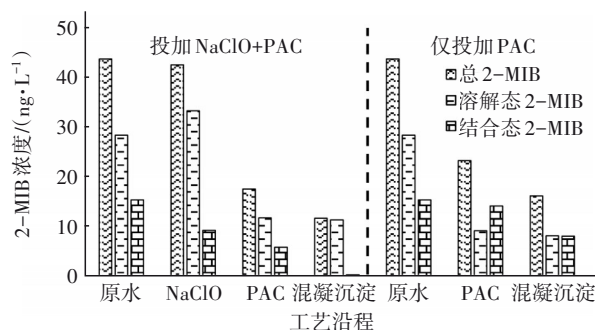


图5 $NaClO$ +PAC+混凝沉淀组合工艺与PAC+混凝沉淀组合工艺对引滦水中2-MIB的去除效果

Fig.5 Removal of 2-MIB in water from Luanhe Diversion Project by $NaClO$ +PAC+coagulation-sedimentation combined process and PAC+coagulation-sedimentation combined process

由图5可知, $NaClO$ +PAC+混凝沉淀组合工艺对引滦水中2-MIB有很好的去除效果,出水总2-MIB、溶解态2-MIB、结合态2-MIB分别为11.6、11.3、0.30 ng/L。而PAC+混凝沉淀组合工艺对引滦水中2-MIB的去除效果不佳,出水总2-MIB、溶解态2-MIB、结合态2-MIB分别为16.1、8.1、8.0 ng/L,其中结合态2-MIB较 $NaClO$ +PAC+混凝沉淀组合工艺高很多,说明增加 $NaClO$ 预氧化显著提高了引滦水中结合态2-MIB的去除效果,故后续实际应用中选择优先投加 $NaClO$,以降低后续水厂常规混凝沉淀工艺去除2-MIB的负担。

取潮白河暗渠出口引滦水,进行 $NaClO$ +PAC+

PAC组合工艺去除2-MIB的试验研究,结果如图6所示。引滦水中总2-MIB、溶解态2-MIB、结合态2-MIB浓度分别为39.3、25.4、13.9 ng/L,溶解态占比较高。投加NaClO之后溶解态2-MIB升至32.4 ng/L,试验a中投加30 mg/L PAC之后总2-MIB降至10.0 ng/L,满足饮用水水质标准要求。试验b中投加20 mg/L PAC之后总2-MIB降至13.2 ng/L,再投加20 mg/L PAC之后总2-MIB才降至10.0 ng/L以下。由此可以看出,NaClO+PAC+PAC组合工艺对引滦水中2-MIB有很好的去除效果,但实际应用时,应根据原水中2-MIB浓度以及PAC投加装置的投加能力来选择适宜的投加量和投加方式。

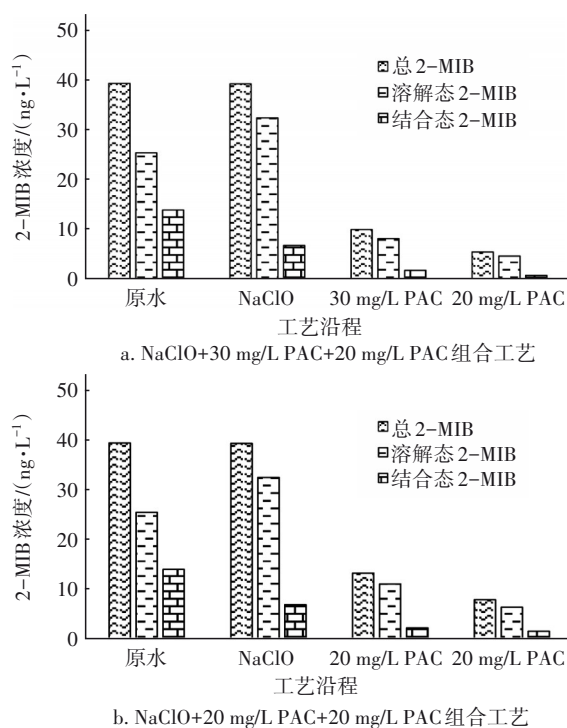


图6 NaClO+PAC+PAC组合工艺去除引滦水中2-MIB的效果
Fig.6 Removal of 2-MIB in water from Luanhe Diversion Project by NaClO+PAC+PAC combined process

冬季引滦水正式供水后,对NaClO+PAC+PAC组合工艺进行实际应用研究,结果如图7所示。可以看出,在实际应用过程中,水中溶解态2-MIB占比为64%~81%,因此采用NaClO+PAC+PAC组合工艺是合理的。在暗渠出口投加NaClO之后,溶解态2-MIB升高;在鲍丘河倒虹吸处投加PAC之后,溶解态2-MIB被吸附去除;至新建节制闸时,溶解态2-MIB浓度介于14.8~23.7 ng/L,在尔王庄区域入塘泵站再次投加PAC之后,水厂进水2-MIB浓度低于10.0 ng/L,再经过水厂常规工艺处理之后2-MIB

再次降低,最终保证了水厂出水2-MIB浓度达到饮用水水质标准要求。实际应用中PAC对2-MIB的去除效果较小试要差,一方面,可能是现场实际应用时PAC投量没有小试中的投量精确,实际投量可能较小试要低;另一方面,可能是引滦明渠中水力混合条件较差,PAC投加后不能与水中2-MIB充分混合接触,进而使其不能充分吸附2-MIB。因此,后续将进一步优化PAC投加设备投加的准确性和输水明渠的水力条件,最大程度发挥PAC的吸附作用。通过NaClO+PAC+PAC组合工艺的实际应用,保证了水厂出水2-MIB稳定达标,保障了冬季引滦供水安全运行。

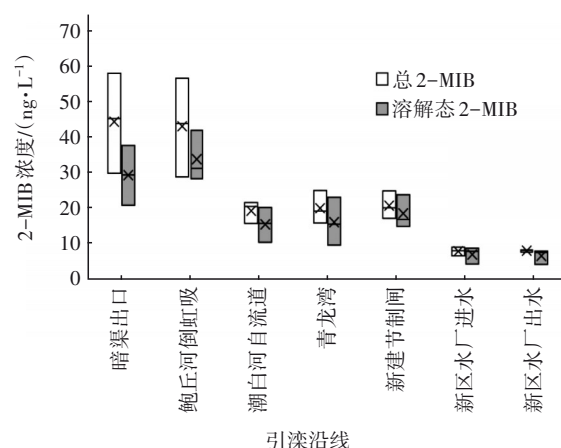


图7 引滦沿线总2-MIB和溶解态2-MIB浓度的变化
Fig.7 Change in total 2-MIB and dissolved 2-MIB concentrations along Luanhe Diversion Project

3 结论

① 常规混凝沉淀工艺对引滦水中的溶解态2-MIB几乎没有去除效果,对结合态2-MIB的去除效果也不佳。氧化剂NaClO和KMnO₄对总2-MIB几乎没有去除效果,但NaClO会破坏藻类的细胞壁,使藻细胞内部的结合态2-MIB释放到胞外成为溶解态;而KMnO₄可以氧化胞外有机物进而使藻失活。O₃对2-MIB有较好的去除效果,既能破坏藻的细胞壁,也能氧化水中溶解态的2-MIB。

② NaClO/KMnO₄/O₃+PAC+混凝沉淀组合工艺对引滦水中2-MIB有较好的去除效果,其中O₃+PAC+混凝沉淀组合工艺最优,其可以充分发挥各单一技术的优势。3个组合工艺各有不同的特点,故在实际应用时,要根据2-MIB的存在形态及浓度,并结合现场可以采取的处理措施和手段,选择适宜的工艺组合。

③ 根据现场和原水水质实际情况,开展了组合工艺的实际应用研究,发现NaClO+PAC+PAC组合工艺对引滦水中2-MIB有很好的去除效果,保证了水厂出水水质达标,保障了天津市冬季引滦供水安全运行。

④ 建议原水公司和水厂设置O₃投加设备,以应对引滦水中2-MIB嗅味问题,保证水厂出水水质稳定达标。

参考文献:

- [1] 苏晓,韩正双,张楠,等. 天津某水库2-MIB季节性变化规律及来源分析[J]. 中国给水排水,2020,36(19): 39-45.
- SU Xiao, HAN Zhengshuang, ZHANG Nan, *et al.* Seasonal variation rule and source analysis of 2-MIB in a reservoir of Tianjin [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(19): 39-45 (in Chinese).
- [2] ANTONOPOULOU M, EVGENIDOU E, LAMBROPOULOU D, *et al.* A review on advanced oxidation processes for the removal of taste and odor compounds from aqueous media [J]. Water Research, 2014, 53: 215-234.
- [3] LI L, YANG S H, YU S L, *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.
- [4] 苏晓,贾霞珍,胡建坤,等. 饮用水中Geosmin和2-MIB去除技术研究现状及展望[J]. 给水排水,2021, 47(S1):517-523.
- SU Xiao, JIA Xiazhen, HU Jiankun, *et al.* Research status and prospect of Geosmin and 2-MIB removal technology in drinking water [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(S1): 517-523 (in Chinese).
- [5] 李学艳,马军,陈忠林,等. 若干氧化剂对水中嗅味物质2-MIB的氧化去除[J]. 黑龙江大学自然科学学报, 2007,24(1):76-80.
- LI Xueyan, MA Jun, CHEN Zhonglin, *et al.* Comparison on the removal efficiency of 2-methylisoborneol by several oxidants in drinking water [J]. Journal of Natural Science of Heilongjiang University, 2007, 24(1): 76-80 (in Chinese).
- [6] LI L, ZHU C W, XIE C Q, *et al.* Kinetics and mechanism of *Pseudoanabaena* cell inactivation, 2-MIB release and degradation under exposure of ozone, chlorine and permanganate [J]. Water Research, 2018, 147: 422-428.
- [7] 黄瑜琪,李翠梅,徐琛宇,等. 预臭氧对常规工艺去除2-MIB & GSM效果与机理中试研究[J]. 水处理技术, 2017,43(9):96-100.
- HUANG Yuqi, LI Cuimei, XU Chenyu, *et al.* Pilot study on the efficiency and mechanism of pre-ozonation conventional process for 2-MIB & GSM removal [J]. Technology of Water Treatment, 2017, 43(9): 96-100 (in Chinese).
- [8] 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.
- [9] CHO K, AN B M, SO S, *et al.* Simultaneous control of algal micropollutants based on ball-milled powdered activated carbon in combination with permanganate oxidation and coagulation [J]. Water Research, 2020, 185: 116263.
- [10] 宋武昌,李星,潘章斌,等. PAC对水库型水源水中嗅味物质2-MIB的吸附特性[J]. 北京工业大学学报, 2015,41(9):1422-1429.
- SONG Wuchang, LI Xing, PAN Zhangbin, *et al.* Adsorption characteristics of 2-MIB onto powdered activated carbons in the reservoir type source water [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2015, 41(9): 1422-1429 (in Chinese).

作者简介:苏晓(1987-),男,山东新泰人,博士,高级工程师,主要从事饮用水水质安全保障与供水管网漏损控制等方面的工作。

E-mail:13821348810@126.com

收稿日期:2022-04-18

修回日期:2022-08-31

(编辑:刘贵春)