

技术总结

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2024. 21. 006

# 多水源供水条件下的臭味复合效应及综合去除效果

张孝洪<sup>1</sup>, 赖浩林<sup>2,3</sup>, 张可佳<sup>2,3</sup>, 傅舟跃<sup>1</sup>, 吴小刚<sup>2,3</sup>

(1. 舟山市自来水有限公司, 浙江 舟山 316021; 2. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310058; 3. 浙江省饮用水安全与输配技术研究重点实验室, 浙江 杭州 310058)

**摘要:** 多水源供水模式会增加水中臭味问题的复杂性。为研究多水源供水条件下多种臭味之间的复合效应及多种臭味物质共存对工艺除臭效果的影响,采用嗅觉层次分析法(FPA)和气相色谱-质谱(GC-MS)联用法进行检测分析。结果表明,不同臭味类型之间的复合效应形式存在差异,即掩蔽、协同或共存,且臭味之间复合效应的形式会随臭味强度等级的改变而变化。当臭味强度等级较低时(FPA=2~6),土霉味与鱼腥味或土霉味与青草味易共存,即两种臭味类型可同时表达;当臭味强度等级较高时(FPA=8~10),鱼腥味、青草味均会对土霉味产生掩蔽效应。多种臭味物质共存会对高锰酸钾的除臭能力产生影响,针对臭味物质总浓度均为100 ng/L的2-甲基异莰醇、二甲基三硫醚、 $\beta$ -环柠檬醛单一物质溶液与混合溶液,高锰酸钾对臭味物质的总去除率分别为11.72%、46.58%、82.79%和49.34%,这与臭味物质的分子结构有关;粉末活性炭对上述溶液中臭味物质的总去除率分别为88.78%、96.58%、87.95%和91.71%,说明多种臭味物质共存对粉末活性炭除臭能力的影响较弱,这主要与粉末活性炭的孔径、炭表面化学性质等自身特性有关。

**关键词:** 多水源供水; 臭味; 复合效应; 除臭能力

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)21-0034-09

## Odor Compound Effect and Its Comprehensive Removal under the Condition of Multi-source Water Supply

ZHANG Xiao-hong<sup>1</sup>, LAI Hao-lin<sup>2,3</sup>, ZHANG Ke-jia<sup>2,3</sup>, FU Zhou-yue<sup>1</sup>,  
WU Xiao-gang<sup>2,3</sup>

(1. Zhoushan Water Supply Co. Ltd., Zhoushan 316021, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 3. Zhejiang Key Laboratory of Drinking Water Safety and Distribution Technology, Hangzhou 310058, China)

**Abstract:** The multi-source water supply is likely to increase the complexity of the odor issue in the water. To investigate the compound effect of various odors and the influence of their coexistence on the odor removal effect of the water treatment process under multi-source water supply condition, the flavor profile analysis (FPA) and gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) were employed for detection and analysis. There existed disparities in the form of compound effect among different odor types, namely, masking, coordination or coexistence, and the form of compound effect among odor types varied along with

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3203601); 浙江省自然科学基金资助项目(LR24E080003)

通信作者: 张可佳 E-mail: zhangkj@zju.edu.cn

the alteration of odor intensity level. When the odor intensity level was low (FPA ranging from 2 to 6), earthy and fishy odor or earthy and grassy odor could coexist effortlessly, that was, both types of odors could be manifested simultaneously. When the odor intensity level was higher (FPA ranging from 8 to 10), both the fishy and grassy odor exerted a masking effect on the earthy odor. The coexistence of diverse odor substances influenced the removal capability of potassium permanganate. For the single substance solution and the mixed solution of 2-methylisoborneol (2-MIB), dimethyl trisulfide (DMTS) and  $\beta$ -cyclocitral with the total concentration of odor substances at 100 ng/L, the total removal efficiencies of odorants by potassium permanganate were 11.72%, 46.58%, 82.79% and 49.34%, respectively, which were associated with the molecular structure of odorants. The total removal efficiencies of odor substances in the aforementioned solution by powdered activated carbon (PAC) were 88.78%, 96.58%, 87.95%, and 91.71%, respectively. This indicated that the coexistence of various odor substances had a limited impact on the odorant removal capacity of PAC, which was mainly associated with the pore size and surface chemical properties of PAC.

**Key words:** multi-source water supply; odor; compound effect; odorant removal capacity

近几年,随着供水人口数量的不断增加、用户对供水水质要求的不断提升,以及考虑到单一水源供水存在的风险,越来越多的城市开始采用多水源供水模式,以满足水质型缺水和资源型缺水的供水需求<sup>[1-2]</sup>。但与此同时,多水源供水模式也会造成水体嗅味问题更加严重。如珠海市通过引江入库的方式形成多水源供水格局,但由于江河水中营养盐成分过高,导致水库水富营养化发展加速,藻类大量增殖,原水中的嗅味物质浓度增加<sup>[3]</sup>。

同时,多水源供水模式还会增加水体嗅味问题的复杂程度,例如水中嗅味类型和嗅味物质的多样性、嗅味之间的复合效应等。孔艳丽<sup>[4]</sup>研究了多水源供水模式下,土臭素(GSM)、2-甲基异莰醇(2-MIB)、 $\beta$ -环柠檬醛和 $\beta$ -紫罗兰酮的浓度变化情况,结果发现,在所研究的3个水源中嗅味物质存在明显的季节性变化规律,而且不同水源之间嗅味物质的浓度分布特征和变化趋势存在差异。Guo等<sup>[5]</sup>通过简单测试证明了由较高浓度硫醚引起的腥臭味可以掩蔽2-MIB引起的土霉味,而在硫醚溶液中加入2-MIB可以增强腥臭味;在随后的研究中,Guo等<sup>[6]</sup>通过重构试验实际验证了黄浦江水中土霉味对腥臭味的协同作用。此外,有学者研究发现,水体中的氯味可以掩盖土霉味及一些天然嗅味物质引起的嗅味<sup>[7]</sup>。由此可见,不同嗅味之间的复合效应会影响嗅味类型的表达,即某种类型嗅味强度或被掩蔽、或被协同加强,从而可能影响检测人员对饮

用水感官品质的判断。但现有的研究存在一些不足,一方面研究对象以土霉味和腥臭味为主,嗅味类型多样性不强;另一方面,现有的研究内容尚不够全面,除了嗅味类型方面,多种嗅味的复合效应是否会对水厂除嗅能力产生影响,仍值得进一步探究。

Z市是一座资源型缺水城市,淡水资源主要来自岛外引水和岛内水库水,具有明显的多水源供水特征。以Z市两个市辖区为例,区内共设有7座水厂,平均每个水厂由4~5个水源供水,其中LC水厂水源数量最多,达到12个;工艺方面,7座水厂中PT、DH、LC和DB水厂有臭氧-生物活性炭工艺,ZX水厂有活性炭过滤工艺,ZJJ水厂有粉末活性炭(PAC)和高锰酸钾( $\text{KMnO}_4$ )的预处理工艺,LWT水厂设计规模较小,仅设常规处理工艺。为此,根据Z市水厂的实际情况,研究了多水源供水条件下多种嗅味之间的复合效应,并考察了多种嗅味物质共存对主要工艺除嗅效能的影响,以期有多水源供水条件下嗅味问题的解决提供理论支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验所用嗅味物质的标准品共有8种,分别是:2-MIB,浓度为100 ng/L,嗅阈值为10 ng/L,土霉味;GSM,浓度为100 ng/L,嗅阈值为4 ng/L,土霉味; $\beta$ -环柠檬醛,纯度为95%,嗅阈值为500~19 000 ng/L,青草味;2,4-庚二烯醛,纯度为90%,嗅阈值为820

ng/L, 鱼腥味;  $\beta$ -紫罗兰酮, 纯度为97%, 嗅阈值为7 ng/L, 芳香味; 二甲基三硫醚(DMTS), 纯度为98%, 嗅阈值为10 ng/L, 腥臭味; 二甲基二硫醚(DMDS), 纯度为98%, 嗅阈值为0.1~30 ng/L, 腥臭味; 己醛, 纯度为 $\geq 99.0\%$ , 嗅阈值为4 500 ng/L, 鱼腥味。所有标准品均为色谱纯。

嗅味物质的检测采用内标法, 内标物为2-异丁基-3-甲氧基吡嗪(IBMP, 纯度为99%)。试验中配制100 mL、100  $\mu\text{g/L}$ 的IBMP标准使用液, 置于4  $^{\circ}\text{C}$ 冰箱保存。PAC参数如下: 200目通过率 $\geq 80\%$ , 水分 $\leq 10\%$ , pH为8~11, 碘值为900 mg/g。高锰酸钾、氯化钠、硫代硫酸钠等均为分析纯。

## 1.2 试验方法

### 1.2.1 水样采集

每月采集Z市ZX水厂原水及其对应水源DD水库、NSN水库和JGC水库的水样, 采样时间为2021年1月—12月, 水样的采集和保存方法参照《生活饮用水标准检验方法 水样的采集与保存》(GB/T 5750.2—2006)。

### 1.2.2 多种嗅味复合效应研究

选取2-MIB、DMTS、 $\beta$ -环柠檬醛和2,4-庚二烯醛为研究对象。参考嗅味物质浓度与嗅味强度等级的一一对应关系<sup>[8]</sup>, 配制不同强度等级的标准溶液。一方面, 将土霉味物质溶液分别与青草味、鱼腥味及腥臭味物质溶液混合, 混合前后各嗅味类型强度等级保持不变, 研究土霉味与3种嗅味类型之间的复合效应; 另一方面, 将相同强度等级的4种嗅味类型溶液混合, 研究4种嗅味类型之间的复合效应。每组试验重复2次, 并以无臭水作为对照。

### 1.2.3 嗅味复合效应对 $\text{KMnO}_4$ /PAC除嗅能力影响

常规工艺对嗅味物质的去除能力有限且去除效果不稳定<sup>[9-10]</sup>, 难以应对嗅味突发事件。 $\text{KMnO}_4$ 和PAC作为常用的嗅味物质应急处理方法, 目前已在诸多水厂应用<sup>[11-12]</sup>, 包括Z市的ZJJ水厂。因此结合Z市嗅味物质的实际情况, 选择2-MIB、 $\beta$ -环柠檬醛和DMTS三种致嗅物质设置4组试验, 试验参数如表1所示。试验期间, 为了防止嗅味物质挥发, 锥形瓶口需要用保鲜膜和封口膜进行密封处理, 并且置于摇床中(150 r/min, 25  $^{\circ}\text{C}$ )。待达到反应时间后,  $\text{KMnO}_4$ 试验组用硫代硫酸钠终止反应; PAC试验组则将溶液过0.45  $\mu\text{m}$ 滤膜以终止吸附。每组试验重复2次。

表1 4组试验的参数设置

Tab.1 Parameters of four experiments ng·L<sup>-1</sup>

项目	$\text{KMnO}_4$ (0.5 mg/L, 反应120 min)			PAC(20 mg/L, 反应60 min)		
	2-MIB	DMTS	$\beta$ -环柠檬醛	2-MIB	DMTS	$\beta$ -环柠檬醛
试验一	100	0	0	100	0	0
试验二	0	100	0	0	100	0
试验三	0	0	100	0	0	100
试验四	100/3	100/3	100/3	100/3	100/3	100/3

## 1.3 分析方法

### 1.3.1 顶空固相微萃取与GC-MS联用法

采用顶空固相微萃取法对水样进行预处理: 向100 mL样品中加入20  $\mu\text{L}$ 、100  $\mu\text{g/L}$ 的IBMP标准使用溶液, 然后将样品转移至萃取瓶中, 并加入30 g NaCl, 磁力搅拌器转速设为600 r/min, 水浴温度设为65  $^{\circ}\text{C}$ , 萃取时间为30 min。富集后, 采用手动进样方式进行GC-MS检测。

GC条件: 进样口温度为250  $^{\circ}\text{C}$ , 柱流压力为90.2 kPa, 柱中流速为1.61 mL/min, 不分流进样。柱初始温度为40  $^{\circ}\text{C}$ , 保持2 min, 以4  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至150  $^{\circ}\text{C}$ , 再以20  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至250  $^{\circ}\text{C}$ , 保持2 min。

MS条件: 电子轰击源(EI), 电子能量为70 eV, 离子源温度为200  $^{\circ}\text{C}$ , 接口温度为250  $^{\circ}\text{C}$ , 离子扫描范围为35~350  $m/z$ , 扫描时间为36 min。

### 1.3.2 嗅觉层次分析法(FPA)

选取4~6名嗅觉正常的人组成嗅味评价小组, 并组织嗅味识别培训。正式试验时, 要求小组成员在试验开始前30 min内不得进行吸烟、饮食等影响嗅味识别的行为。试验开始后, 取200 mL水样于500 mL锥形瓶内, 用封口膜密封后置于45  $^{\circ}\text{C}$ 水浴锅内加热10 min, 然后进行闻测并记录嗅味类型和强度。FPA强度等级分类如表2所示<sup>[13]</sup>。

表2 FPA强度等级

Tab.2 Intensity grade of FPA

等级	强度	嗅味描述
0	嗅阈值	没有任何气味
2	微弱	一般人难察觉, 但嗅觉敏感者能察觉
4	弱	一般人刚能察觉
6	弱到中等	能明显察觉
8	中等	有显著的嗅味
10	中等到强	有强烈的异味, 让人不适
12	强	有强烈的恶臭, 让人感觉恶心难受

2 结果与讨论

2.1 多水源混合前后嗅味类型的变化

对每月采集的水样进行FPA 闻测,并结合水样采集当天水源的实际使用情况进行分析。根据FPA 的结果,水样中主要存在5种嗅味类型,分别是土霉味、腥臭味、青草味、鱼腥味和芳香味。

当DD 水库和NSN 水库中嗅味类型以土霉味和腥味(包括鱼腥味和腥臭味)为主,且两种嗅味类型的嗅味强度等级相差不大的情况下,水源经混合后,原水中可同时表达出土霉味和腥味,见图1。

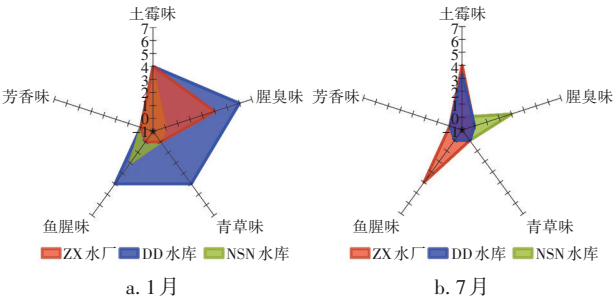


图1 FPA 结果:土霉味、腥臭味和鱼腥味

Fig.1 FPA results: earthy odor, septic odor and fishy odor

当DD 水库和NSN 水库中嗅味类型为土霉味和青草味,且两种嗅味类型的强度等级较低时,水源经混合后,原水中仅表现出土霉味,如图2(a)、(b)、(c)所示。这表明土霉味可能会抑制青草味的表达,即存在掩蔽效应。

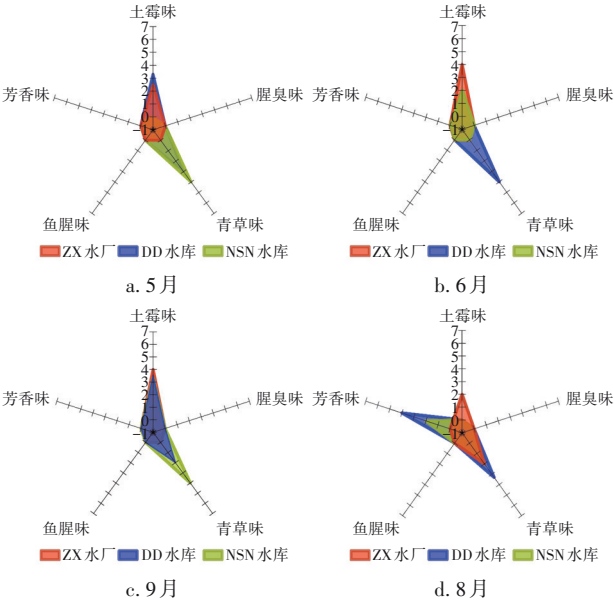


图2 FPA 结果:土霉味、青草味和芳香味

Fig.2 FPA results: earthy odor, grassy odor and aromatic odor

当DD 水库和NSN 水库中嗅味类型为芳香味和青草味时,如图2(d)所示,水源经混合后,原水则表现出了青草味和土霉味。

上述试验结果表明,多水源供水时,原水的嗅味类型并不能简单地通过水源中的嗅味类型进行判断。当水源混合后,多种嗅味类型之间可能存在复合效应(掩蔽或协同效应),从而会影响原水嗅味特征的表达。与本研究结果相似,Watson<sup>[14]</sup>认为不同嗅味物质之间会存在协同效应,这种效应会影响嗅味特征的最终表达;Guo 等<sup>[15]</sup>也在研究中指出水中存在的鱼腥味可能是一种复合嗅味,是不同嗅味物质混合及相互间协同作用的结果。

2.2 多水源混合前后嗅味物质种类的变化

对水厂原水和水库水进行嗅味物质检测后发现,多水源混合过程中,嗅味物质种类一般不易发生变化,而是会以叠加的方式悉数出现在原水中(见表3),进而可能增加水厂除嗅的难度。

表3 水源混合前后嗅味物质种类对比

Tab.3 Comparison of odorant species before and after water source mixing

项目				DD	NSN	ZX	项目				DD	NSN	ZX
1月	己醛	+	+	+	7月	2-MIB	+	+	+				
	2,4-庚二烯醛	+	+	+		GSM	+	+	+				
	2-MIB	+	—	+		DMTS	+	+	+				
	β-环柠檬醛	—	+	+		β-环柠檬醛	+	+	—				
	GSM	—	+	+		DMDS	—	+	+				
5月	2-MIB	+	—	+	8月	2-MIB	+	+	+				
	GSM	+	—	+		GSM	+	+	+				
	DMTS	+	—	+		β-紫罗兰酮	+	+	—				
	2,4-庚二烯醛	+	+	+		β-环柠檬醛	+	+	+				
6月	2-MIB	+	+	+	9月	2-MIB	+	+	+				
	GSM	+	+	+		GSM	+	+	+				
	DMTS	—	+	+		β-紫罗兰酮	+	+	—				
	β-环柠檬醛	+	—	+		β-环柠檬醛	+	+	+				
						DMDS	—	—	+				
注：“+”表示该物质被检出，“—”表示该物质未检出。													

注:“+”表示该物质被检出,“—”表示该物质未检出。

2.3 多种嗅味类型之间的复合效应

2.3.1 土霉味与其他嗅味类型之间的复合效应

① 土霉味与鱼腥味

将FPA 强度等级相同的土霉味溶液与鱼腥味溶液进行混合,混合前后保持2-MIB 和2,4-庚二烯醛的浓度相同,FPA 闻测结果如图3 所示。当FPA=2 时,两种溶液混合后仅表现出土霉味,这说明土霉味会抑制鱼腥味的表达,即土霉味对鱼腥味产生了



掩蔽效应;当FPA=4或6时,混合后的溶液可表现出土霉味和鱼腥味;当FPA=8或10时,混合后的溶液仅表现出鱼腥味,这说明鱼腥味会抑制土霉味的表达,同时自身强度等级会减小。出现这种现象可能与嗅觉受体的拮抗作用有关<sup>[15-16]</sup>。Reddy等<sup>[16]</sup>利用计算模型解释了嗅觉受体神经元对气味混合物的反应过程,并阐述了拮抗作用的发生,即混合气味中的某种气味与嗅觉受体的结合会强于其他气味,从而阻止其他气味结合并激活嗅觉受体,进而影响其他气味特征的表达;但由于和嗅觉受体结合强的气味不一定是最能激活嗅觉受体的气味,因而会影响混合气味特征的最终表达。

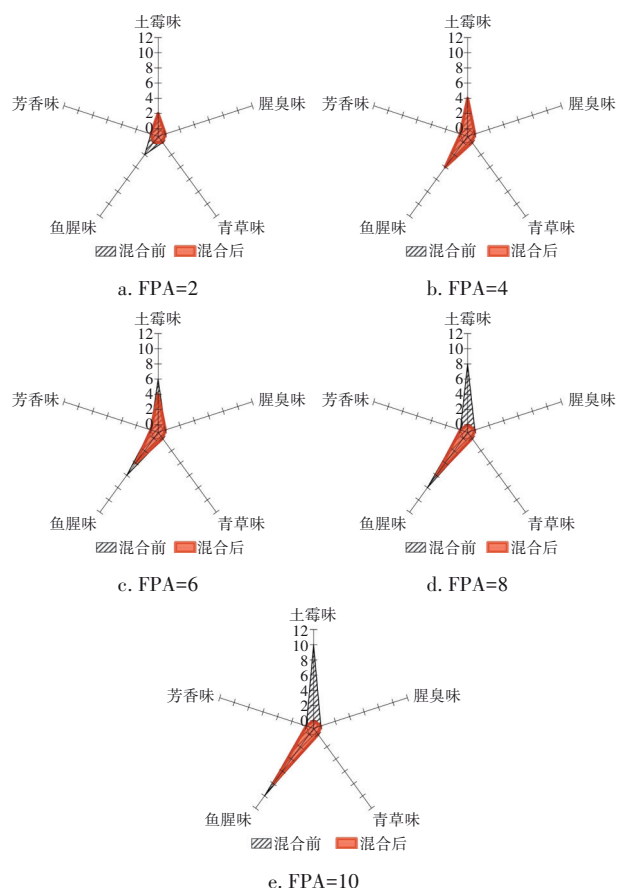


图3 土霉味与鱼腥味溶液混合前后嗅味类型的变化

Fig.3 Change of odor type before and after mixing earthy and fishy odor solutions

## ② 土霉味和青草味

如图4所示,土霉味和青草味之间的嗅味复合效应与土霉味和鱼腥味相似。随着FPA等级的增大,两种嗅味之间的嗅味类型表达会发生变化。当FPA为2和4时,土霉味与青草味可以共存,但土霉味在嗅味强度等级方面更占优势。这与2.1节中土

霉味对青草味具有掩蔽效应的结果存在差异,可能是因为实际水体中的嗅味成分较为复杂,一方面土霉味物质不仅包括2-MIB,还包括GSM等;另一方面水体中还包含其他嗅味类型,如芳香味和腥臭味,从而会对水体嗅味类型的整体表现产生影响。当FPA等级为6、8、10时,两种溶液混合后,青草味会对土霉味产生掩蔽效应,同时青草味的强度等级会存在减弱现象。

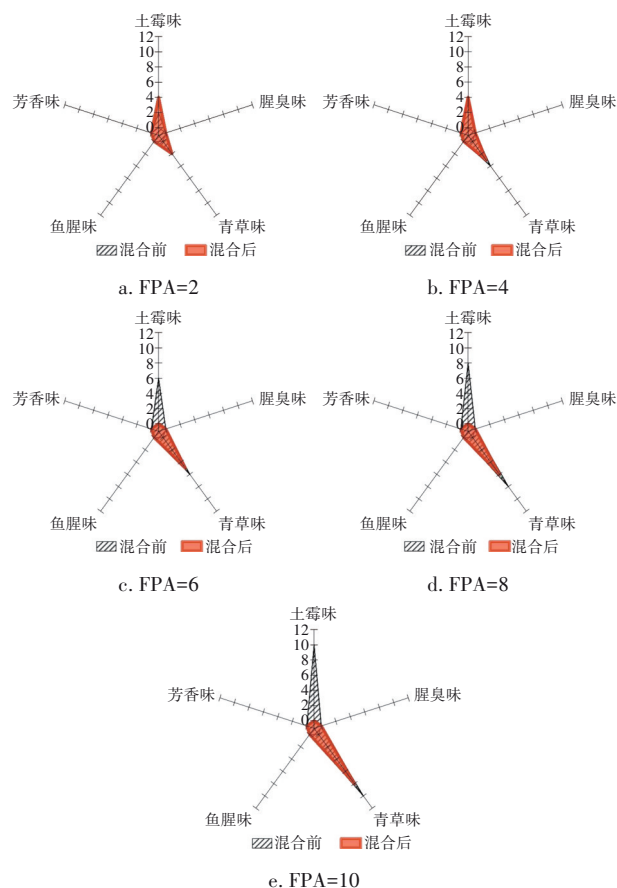


图4 土霉味和青草味溶液混合前后嗅味类型的变化

Fig.4 Change of odor type before and after mixing earthy and grassy odor solutions

## ③ 土霉味和腥臭味

如图5所示,在嗅味类型方面,当FPA等级从2增大到10时,土霉味与腥臭味可以共存,两种嗅味类型可在水中同时表达;在嗅味强度方面,当FPA等级相同的土霉味和腥臭味溶液混合后,土霉味的强度等级会出现一定程度的减小。相比较而言,腥臭味的强度等级受影响较小,且当土霉味和腥臭味的强度等级均较小时(如FPA均为2时),腥臭味的强度等级会有所增加,这可能是由于2-MIB的土霉味对DMTS的腥臭味具有协同效应<sup>[6]</sup>。

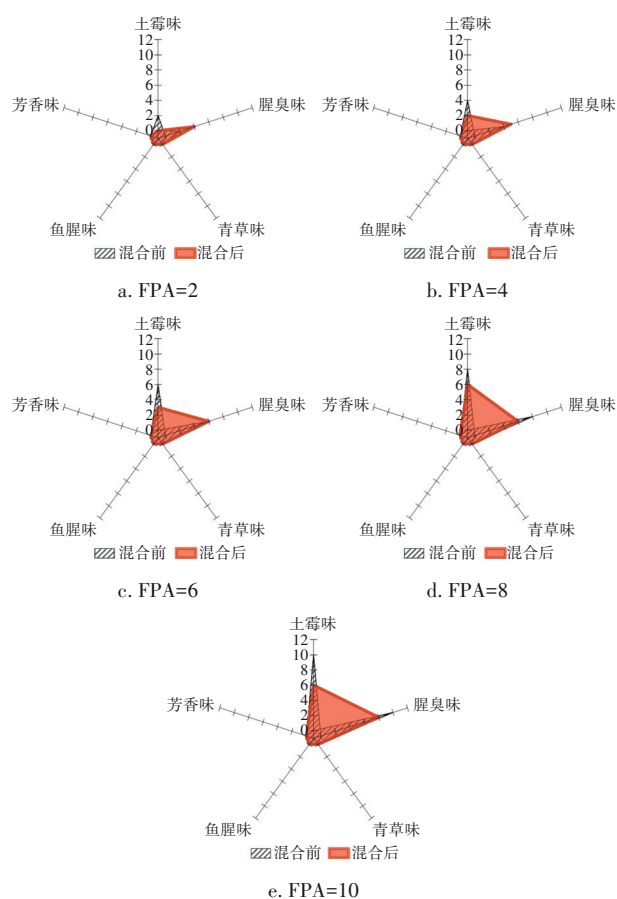


图5 土霉味和腥臭味溶液混合前后臭味类型的变化情况  
Fig.5 Change of odor type before and after mixing earthy and septic odor solutions

### 2.3.2 四种臭味类型之间的复合效应

将四种臭味类型同时混合,分析混合后臭味类型的变化情况,结果见图6。可知,当FPA为2和4时,水体表现出的臭味类型以土霉味、青草味和鱼腥味为主;当FPA为6、8、10时,水体表现出的臭味类型以青草味和鱼腥味为主。这说明 $\beta$ -环柠檬醛的青草味和2,4-庚二烯醛的鱼腥味容易对2-MIB的土霉味和DMTS的腥臭味产生掩蔽效应,从而抑制土霉味和腥臭味的表达,尤其在臭味强度等级均较大的情况下。

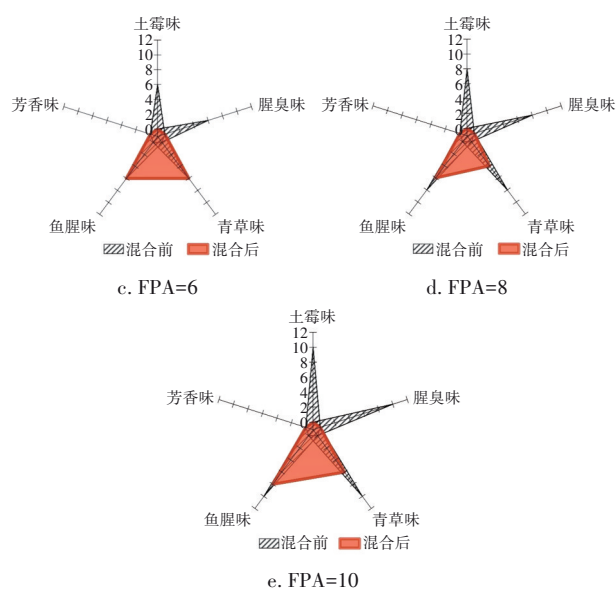
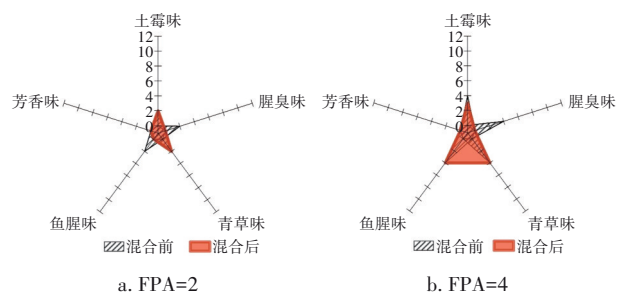


图6 四种臭味类型溶液混合前后臭味类型的变化  
Fig.6 Change of odor type before and after mixing four odor types of solutions

### 2.4 多种臭味物质共存对工艺除臭能力的影响

由2.2节可知,多水源混合过程中,各水源中的臭味物质会悉数出现在原水中,形成多种臭味物质共存的局面,进而可能影响自来水厂的除臭能力。为探明多种臭味物质共存对工艺除臭能力的影响,一方面基于Z市的实际情况,另一方面在设计试验时尽可能考虑到所涉及臭味物质种类的多样性,最终选择2-MIB、DMTS和 $\beta$ -环柠檬醛为臭味物质,以 $\text{KMnO}_4$ 氧化和PAC吸附为除臭工艺,进行以下试验。

#### 2.4.1 对 $\text{KMnO}_4$ 除臭能力的影响

在 $\text{KMnO}_4$ 投加量为0.5 mg/L、反应时间为120 min条件下, $\text{KMnO}_4$ 对浓度均为100 ng/L的2-MIB、DMTS和 $\beta$ -环柠檬醛单一臭味物质的去除率分别为11.72%、46.58%、82.79%,其中对 $\beta$ -环柠檬醛的去除率约为2-MIB的7倍。 $\text{KMnO}_4$ 主要通过破坏臭味物质的分子结构而使其转化为无臭物质<sup>[17-18]</sup>。但是 $\text{KMnO}_4$ 由于氧化能力较弱,并不能直接氧化2-MIB的复杂分子结构<sup>[19]</sup>,因此其对2-MIB的去除效果不佳。相比较而言,DMTS的分子结构较简单, $\beta$ -环柠檬醛结构中存在一定数量的共轭双键,因而容易与 $\text{KMnO}_4$ 发生反应,去除率也相应较高。

针对以上3种臭味物质总浓度为100 ng/L的混合溶液,保持 $\text{KMnO}_4$ 投加量和反应时间不变, $\text{KMnO}_4$ 对3种臭味物质的总去除率仅为49.34%,其中对

2-MIB、DMTS 和  $\beta$ -环柠檬醛的去除率分别为 4.25%、56.05%、87.74%，这主要是因为  $\text{KMnO}_4$  对 2-MIB 的去除率较低，导致总体去除率偏低。因此可以认为，多种臭味物质共存对  $\text{KMnO}_4$  除嗅能力是有影响的，尤其是针对单一水源臭味物质为硫醚类物质或  $\beta$ -环柠檬醛，多水源混合后臭味物质增加了 2-MIB 或 GSM 的情况，此时  $\text{KMnO}_4$  对臭味物质的总体去除率将会降低。

另外可以发现， $\text{KMnO}_4$  对混合溶液中 2-MIB 的去除率较单一溶液有所降低，其余两种物质的去除率则有所升高，说明当上述 3 种臭味物质混合共存时，相互之间存在竞争关系， $\text{KMnO}_4$  更倾向与 DMTS 及  $\beta$ -环柠檬醛发生反应。

在实际应用中，水体中的背景天然有机物 (NOM) 也会对  $\text{KMnO}_4$  氧化臭味物质产生影响。Li 等<sup>[20]</sup> 研究认为，低浓度的 NOM (1~6 mg/L) 可以与  $\text{KMnO}_4$  反应生成  $\text{MnO}_2$ ，起到直接氧化或催化氧化酚类臭味物质的作用；而高浓度的 NOM (7~100 mg/L) 则会与臭味物质形成竞争，从而降低臭味物质的去除效果。章彩霞<sup>[21]</sup> 的研究发现， $\text{KMnO}_4$  的氧化作用具有选择性，高浓度的腐殖酸 (HA) 对  $\text{KMnO}_4$  氧化甲硫醚有一定的抑制作用，对二甲基三硫醚的氧化则基本不受影响 (当 HA>15 mg/L 时)。因此，在实际应用中，水中低浓度的 NOM (通常水源水中的 NOM 浓度在 6 mg/L 以下) 对高锰酸钾除嗅能力的影响可能较小。

#### 2.4.2 对 PAC 除嗅能力的影响

在 PAC 投加量为 20 mg/L、反应时间为 60 min 条件下，PAC 对浓度均为 100 ng/L 的 2-MIB、DMTS 及  $\beta$ -环柠檬醛溶液单一臭味物质的去除率分别为 88.78%、96.58%、87.95%，表现出较好的吸附去除效果，这与 Zhang 等人<sup>[22]</sup> 的研究结果一致。PAC 主要通过物理吸附、化学吸附和离子交换吸附作用去除臭味物质，吸附去除效果与 PAC 自身性质有较大关系，如 PAC 内部孔道数量、孔径比例及 PAC 表面的化学性质等<sup>[23-25]</sup>。

针对以上 3 种臭味物质总浓度为 100 ng/L 的混合溶液，保持 PAC 投加量和反应时间不变，PAC 对 3 种臭味物质的总去除率为 91.71%，依旧表现出较好的去除效果，其中对 2-MIB、DMTS 和  $\beta$ -环柠檬醛的去除率分别为 86.77%、92.79%、95.56%。这说明对于 PAC 而言，多种臭味物质共存的情况对其除

嗅能力影响不大。

另外发现，PAC 对混合溶液中 2-MIB 和 DMTS 的去除率较单一溶液有所下降， $\beta$ -环柠檬醛的去除率则有所上升，这种差异反映了 3 种臭味物质之间的竞争关系，即在 3 种臭味物质共存情况下， $\beta$ -环柠檬醛可以更好地争取 PAC 表面的吸附点位，从而对 PAC 吸附去除 2-MIB 和 DMTS 产生影响。

在实际应用中，背景 NOM 的存在也可能对 PAC 的除嗅能力产生一定影响。范银萍<sup>[23]</sup> 研究了 HA 等共存物质对椰壳活性炭吸附 GSM 和 2-MIB 的影响，发现 HA 一方面可以形成络合物包裹活性炭表面，从而阻碍臭味物质进入活性炭内部；另一方面 HA 也会和臭味物质竞争活性炭表面的吸附点位，从而对活性炭吸附 GSM 和 2-MIB 产生较大的影响。Pivokonsky 等<sup>[26]</sup> 总结前人的研究发现，水中 NOM 会与臭味物质竞争吸附，从而降低 PAC 对臭味物质的去除效果，低分子质量的 NOM 组分吸附在同一类孔隙中，会直接与臭味物质争夺活性点位，而高分子质量的 NOM 组分则会导致孔隙堵塞。这说明水中背景 NOM 可能会对 PAC 的除嗅能力产生较大影响，使得臭味物质的去除效果降低。需要指出的是，水中 NOM 的浓度远高于臭味物质的浓度，因此 NOM 的存在会对臭味物质的吸附产生较大的竞争；而水中臭味物质之间的浓度差异则较小，因此多种臭味物质共存情况对 PAC 的除嗅能力影响较小。

### 3 结论

① 多水源供水时，水厂原水的臭味类型是各水源水中臭味类型经复合效应得到的结果；原水中臭味物质种类则是水源水中臭味物质种类叠加的结果。

② 不同臭味类型之间存在不同形式的复合效应，土霉味和鱼腥味、土霉味和青草味之间存在掩蔽效应，土霉味和腥臭味之间存在协同效应；且复合效应的形式会随臭味强度等级的改变而发生变化，当 FPA=2 或 4 时，土霉味和鱼腥味、土霉味和青草味之间易共存，当 FPA=8 或 10 时，鱼腥味、青草味会对土霉味产生掩蔽。

③ 多种臭味物质共存时，相互之间存在竞争效应。在  $\text{KMnO}_4$  氧化过程中，DMTS 和  $\beta$ -环柠檬醛更易和  $\text{KMnO}_4$  发生反应；在 PAC 吸附过程中， $\beta$ -环柠檬醛能争取到更多的吸附点位，从而使自身去除

率得到提高。

④ 多种嗅味物质共存会对  $\text{KMnO}_4$  的除嗅能力产生影响,在试验条件下,当 $\beta$ -环柠檬醛单一物质溶液和2-MIB、DMTS及 $\beta$ -环柠檬醛混合溶液的嗅味物质总浓度均为100 ng/L时, $\text{KMnO}_4$ 对嗅味物质的去除率分别为82.79%和49.34%,这主要与嗅味物质的分子结构有关;由于嗅味物质之间的浓度差异较小,多种嗅味物质共存对PAC的除嗅能力影响较小,上述同样条件下PAC对嗅味物质的去除率分别为87.95%和91.71%,这主要与PAC的自身性质有关。

#### 参考文献:

- [1] REN K, HUANG S Z, HUANG Q, *et al.* Assessing the reliability, resilience and vulnerability of water supply system under multiple uncertain sources[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 252: 119806.
- [2] 于冰,梁国华,何斌,等.城市供水系统多水源联合调度模型及应用[J].*水科学进展*, 2015, 26(6): 874-884.  
YU Bing, LIANG Guohua, HE Bin, *et al.* Modeling of joint operation for urban water-supply system with multi-water resources and its application[J]. *Advances in Water Science*, 2015, 26(6): 874-884 (in Chinese).
- [3] 凌艳晨,苏宇亮,胡克武,等.珠海市饮用水水源藻类问题分析与解决方案[J].*南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(4): 729-738.  
LING Yanchen, SU Yuliang, HU Kewu, *et al.* Analysis and solution of algae problems in drinking water sources in Zhuhai City[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2021, 19(4): 729-738 (in Chinese).
- [4] 孔艳丽.江苏某市水源水中特征污染物解析及强化常规除污染效能[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2018: 31-62.  
KONG Yanli. Analysis of Characteristic Pollutants in Source Waters and Pollutant Removal Efficiency of Enhanced Conventional Treatment Processes in a City of Jiangsu[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018: 31-62 (in Chinese).
- [5] GUO Q Y, YU J W, YANG K, *et al.* Identification of complex septic odorants in Huangpu River source water by combining the data from gas chromatography-olfactometry and comprehensive two-dimensional gas chromatography using retention indices[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 556: 36-44.
- [6] GUO Q Y, YU J W, SU M, *et al.* Synergistic effect of musty odorants on septic odor: verification in Huangpu River source water[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 653: 1186-1191.
- [7] KIM Y I, LEE Y J, SHIN H S, *et al.* Masking effect of chlorine on algae-related taste and odor in drinking water supplies[J]. *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, 2008, 22(2): 227-232.
- [8] 散雨龙.基于电子鼻技术的水中嗅味指纹图谱方法的研究[D].杭州:浙江大学, 2021: 34-47.  
SAN Yulong. Research on the Odor Fingerprint Method of Water Based on Electronic Nose Technology[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021: 34-47 (in Chinese).
- [9] 杨舒,吴梦怡,王慕,等.太湖某饮用水厂嗅味物质迁移特征解析[J].*中国给水排水*, 2021, 37(1): 57-63.  
YANG Shu, WU Mengyi, WANG Mu, *et al.* Analysis on migration characteristics of odor and taste compounds in a drinking water plant in Taihu Lake[J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(1): 57-63 (in Chinese).
- [10] FAKIOGLU M, GULHAN H, OZGUN H, *et al.* Removal of taste and odor causing compounds from drinking water sources by peroxone process: laboratory and pilot scale studies[J]. *Ozone: Science & Engineering*, 2021, 43(6): 527-537.
- [11] 梁景堂,关怀宇,吴旭龙,等.土霉味水库水应急处理[J].*城镇供水*, 2022(1): 45-48.  
LIANG Jingtang, GUAN Huaiyu, WU Xulong, *et al.* Emergency treatment of reservoir water with earthy-musty odor[J]. *City and Town Water Supply*, 2022(1): 45-48 (in Chinese).
- [12] GUO Q Y, LI Z X, CHEN T M, *et al.* Implications for emergency response to the severe odor incident occurred in source water: potential odorants and control strategy[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(47): 67022-67031.
- [13] 张可佳.藻类产生典型嗅味物质的机理及其控制技术的研究[D].上海:同济大学, 2011: 41-42.  
ZHANG Kejia. Study on Mechanisms of Typical Taste and Odor (T&O) Compounds Produced by Algae and Control Technology[D]. Shanghai: Tongji University, 2011: 41-42 (in Chinese).
- [14] WATSON S B. Cyanobacterial and eukaryotic algal



- odour compounds: signals or by-products? A review of their biological activity[J]. *Phycologia*, 2003, 42(4): 332-350.
- [15] GUO Q Y, YU J W, ZHAO Y Y, *et al.* Identification of fishy odor causing compounds produced by *Ochromonas* sp. and *Cryptomonas ovate* with gas chromatography-olfactometry and comprehensive two-dimensional gas chromatography[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 671: 149-156.
- [16] REDDY G, ZAK J D, VERGASSOLA M, *et al.* Antagonism in olfactory receptor neurons and its implications for the perception of odor mixtures[J]. *eLife*, 2018, 7: e34958.
- [17] LI X, ZENG J, YU X. Potassium permanganate as a promising pre-oxidant to treat low-viability cyanobacteria and associated removal of cyanotoxins and extracellular organic matters[J]. *Water Research*, 2021, 202: 117353.
- [18] 卢伟. 氧化法去除水中土臭素和2-MIB的研究进展[J]. *供水技术*, 2018, 12(3): 1-5.
- LU Wei. Review on the oxidation process for removing geosmin and 2-MIB from source water[J]. *Water Technology*, 2018, 12(3): 1-5 (in Chinese).
- [19] ZHANG J Z, LIAO Y, WANG Q, *et al.* Degradation of odorous sulfide compounds by different oxidation processes in drinking water: performance, reaction kinetics and mechanism[J]. *Water Research*, 2021, 189: 116643.
- [20] LI J, PANG S Y, WANG Z, *et al.* Oxidative transformation of emerging organic contaminants by aqueous permanganate: kinetics, products, toxicity changes, and effects of manganese products[J]. *Water Research*, 2021, 203: 117513.
- [21] 章彩霞. 高锰酸钾去除水中甲硫醚和二甲基三硫醚的试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2016: 23-48.
- ZHANG Caixia. Experimental Research on Dimethyl Trisulfide and Dimethyl Sulfide Oxidation by Potassium Permanganate in Drinking Water [D]. Changsha: Hunan University, 2016: 23-48 (in Chinese).
- [22] ZHANG K J, GAO N Y, DENG Y, *et al.* Granular activated carbon (GAC) adsorption of two algal odorants, dimethyl trisulfide and  $\beta$ -cyclocitral[J]. *Desalination*, 2011, 266(1): 231-237.
- [23] 范银萍. 活性炭对 GSM 和 2-MIB 的吸附性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017: 9-32.
- FAN Yinping. Study on the Adsorption Properties of Activated Carbon for GSM and 2-MIB[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017: 9-32 (in Chinese).
- [24] PIVOKONSKY M, KOPECKA I, CERMAKOVA L, *et al.* Current knowledge in the field of algal organic matter adsorption onto activated carbon in drinking water treatment[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 799: 149455.
- [25] HUANG X, SHI B Y, HAO H T, *et al.* Identifying the function of activated carbon surface chemical properties in the removability of two common odor compounds[J]. *Water Research*, 2020, 178: 115797.
- [26] PIVOKONSKY M, KOPECKA I, CERMAKOVA L, *et al.* Current knowledge in the field of algal organic matter adsorption onto activated carbon in drinking water treatment[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 799: 149455.

作者简介: 张孝洪(1971- ), 女, 重庆江津人, 学士, 高级工程师, 主要从事水质检测、水质管理和工艺处理等工作。

E-mail: 437674857@qq.com

收稿日期: 2024-01-07

修回日期: 2024-03-21

(编辑: 刘贵春)