

活性炭指标对吸附去除 2-MIB 和土臭素效能的影响

李一兵¹, 方 华¹, 韩正双², 田家宇¹

(1. 河北工业大学土木与交通学院, 天津 300401; 2. 天津市公用事业设计研究所, 天津 300100)

[摘要] 研究了粉末活性炭(PAC)主要性能指标对其吸附去除水中 2-甲基异莰醇(2-MIB)和土臭素(GSM)效能的影响。结果表明,影响 2-MIB 和 GSM 吸附量的主要因素是活性炭特定孔径区间的比表面积,其中,2-MIB 和 GSM 吸附量分别与 1.0~1.2 nm、0.64~1.0 nm 孔径区间的比表面积显著相关;活性炭碘值与 2-MIB 吸附量及 1.0~1.2 nm 孔径区间的比表面积均具有良好的一致性,可以作为衡量 2-MIB 吸附量的参考指标。本研究结果可为供水企业选购 PAC 用于应对水源季节性嗅味问题提供技术参考。

[关键词] 粉末活性炭;性能指标;嗅味物质;吸附效能

[中图分类号] TU991.2 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2021)10-0091-06

Effect of powder activated carbon indicators on the adsorption removal efficiency of 2-MIB and geosmin

LI Yibing¹, FANG Hua¹, HAN Zhengshuang², TIAN Jiayu¹

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;

2. Tianjin Public Utility Design & Research Institute, Tianjin 300100, China)

Abstract: The effects of main performance indicators of powder activated carbon on the removal efficiency of 2-methylisoborneol(2-MIB) and geosmin(GSM) in water were studied. The results showed that, the main factor affecting the adsorption of 2-MIB and GSM was the specific surface area of powder activated carbon in the specific pore size range. The adsorptions of 2-MIB and GSM were significantly related to the specific surface area of the 1.0–1.2 nm and 0.64–1.0 nm pore size range respectively. The iodine adsorption value of powder activated carbon, which had significant correlations with the adsorption capacity of 2-MIB and the specific surface area in the pore size range of 1.0–1.2 nm, could be used as a reference index for the adsorption of 2-MIB. The results of this study can provide a technical reference for water supply companies to select PAC to deal with the seasonal taste and odor problems of water sources.

Key words: powder activated carbon; performance indicators; taste and odor compounds; adsorption efficiency

饮用水嗅味问题是供水行业普遍关注的热点问题。导致饮用水出现嗅味问题的致嗅物质种类较多,其中最为常见的是 2-甲基异莰醇(2-MIB)和土臭素(GSM)^[1]。水体中的这 2 种嗅味物质通常由藻类代谢产生。当水体环境适宜产嗅藻生长时,水中产嗅藻类数量会大幅增长,嗅味物质浓度显著升高,其中 2-MIB 和 GSM 质量浓度可达数十、数百甚至数千 ng/L,远远超出这 2 种嗅味物质的嗅阈值(10 ng/L)。

由于传统的混凝-沉淀-过滤-消毒工艺很难有效去除水中的 2-MIB 和 GSM^[2],因此,当水源水中这 2 种嗅味物质浓度较高时,采用传统净水工艺的供水企业必须采取有效的应急预处理以降低水中嗅味物质浓度。

国内外研究报道和实际应用表明,粉末活性炭(PAC)吸附是供水行业应用最广的嗅味应急处理方法^[3-5]。PAC 生产原料广泛,其中煤质 PAC 因其具备较好的沉降性和低廉的价格,尤其受到供水企业的

青睐。但是由于受到产地、原料、生产工艺等因素影响,市售的 PAC 品质往往相差较大,其各种性能指标也存在显著差异,这对供水企业选购 PAC 用于饮用水臭味应急处理造成了极大困扰。因此,为了更好地选择 PAC 应对饮用水臭味问题,有必要深入研究 PAC 主要性能指标对其吸附去除水中 2-MIB 和 GSM 效能的影响,进而明确 PAC 选择依据,提高利用 PAC 应对水源臭味问题的有效性和经济性。

本研究选取 5 种市售煤质 PAC 开展了水中 2-MIB 和 GSM 的吸附试验,考察了 PAC 主要性能指标对其吸附去除水中 2-MIB 和 GSM 效能的影响,明确了用于去除水中 2-MIB 和 GSM 的 PAC 选择的主要参考指标,以为供水企业选购 PAC 用于应对水源季节性臭味问题提供一定的技术参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

煤质粉末活性炭:试验共使用 5 种煤质粉末活性炭,其中 3 种产地分别为河北(记为 PAC-B)、天津(记为 PAC-T)和山西(记为 PAC-S),另外 2 种产地均为河南(分别记为 PAC-N-1 和 PAC-N-2)。5 种 PAC 的粒度均满足 200 目筛网(孔径 75 μm)通过率大于 90%。每种 PAC 在使用前均洗涤并烘干。

标准物质:2-MIB+GSM 混标溶液(质量浓度均为 100 mg/L)、2-仲丁基-3-甲氧基吡嗪(纯度 99%),均购自西格玛奥德里奇(上海)贸易有限公司。稀释放水为超纯水。

其他试剂:碘(粒状),天津市科密欧化学试剂有限公司;亚甲蓝,阿法埃莎(中国)化学有限公司;苯酚,上海阿拉丁生化科技股份有限公司。以上试剂均为分析纯。

1.2 试验方法

采用超纯水稀释 2-MIB+GSM 混标溶液配制理论质量浓度均为 1 000 ng/L 的 2-MIB 和 GSM 混合溶液,以此作为试验原水。将其充分搅拌均匀并静置 10 min,待其稳定后取样,测定水中 2-MIB 和 GSM 浓度,作为原水初始浓度。将稳定后的试验原水分装至 5 个 1 000 mL 具塞溶解氧瓶中,分别投加 10 mg/L 的 PAC-B、PAC-T、PAC-S、PAC-N-1、PAC-N-2,采用磁力搅拌器在 800 r/min 下搅拌吸附 60 min。取样,用 0.45 μm 滤膜过滤,测定滤液中的 2-MIB 和

GSM 浓度。水中 2-MIB 和 GSM 浓度采用顶空固相微萃取-气相色谱质谱联用法(气相色谱-质谱联用仪型号为 Agilent 7890B/5977B)测定,具体测定步骤参考文献[6]。

PAC 表面积和孔容积采用全自动比表面积及孔隙度分析仪(美国麦克 ASAP2460),通过 N_2 -吸附脱附等温线,利用 BET 和 NLDFT 模型得到;采用傅立叶红外光谱仪(赛默飞, NICOLET iS10)测定 PAC 在 4 000~400 cm^{-1} 范围内的吸收光谱;碘吸附值、亚甲蓝吸附值、苯酚吸附值均参考标准 GB/T 7702.7—2008 测定。

PAC 表面酸性官能团和碱性官能团含量采用 Boehm 滴定法^[7]进行测定。准确称取 2 份质量为 1 g 的 PAC 样品置于 250 mL 碘量瓶中,分别加入 30 mL 浓度为 0.05 mol/L 的 NaOH 和 HCl 标准溶液,在室温下振摇 24 h。过滤,取 10 mL 滤液稀释至 50 mL,分别用 HCl 和 NaOH 标准溶液进行滴定,记录体积 V_{HCl} 和 V_{NaOH} 。按照式(1)和式(2)计算酸性官能团和碱性官能团含量(单位为 mmol/g),其中, m 为活性炭质量,单位为 g。

$$\text{酸性官能团的量} = (1.5 - 0.15 \times V_{\text{NaOH}}) / m \quad (1)$$

$$\text{碱性官能团的量} = (1.5 - 0.15 \times V_{\text{HCl}}) / m \quad (2)$$

2 结果与讨论

2.1 PAC 对水中 2-MIB 和 GSM 的吸附效果

图 1 显示了吸附时间为 60 min 时 5 种 PAC 对水中 2-MIB 和 GSM 的吸附去除效果。

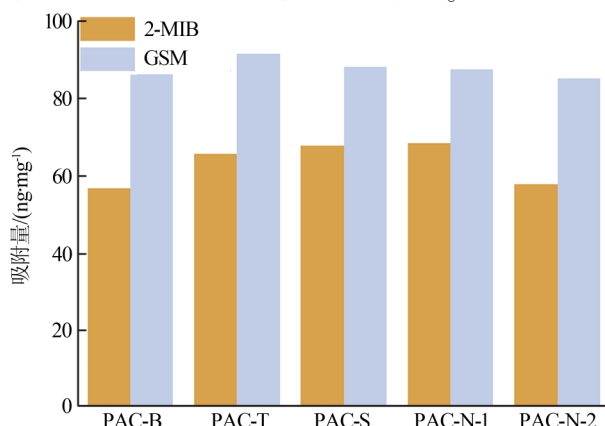


图 1 60 min 时 5 种 PAC 对 2 种嗅味物质的吸附量(原水中 2-MIB 质量浓度为 846 ng/L, GSM 质量浓度为 919 ng/L)

Fig. 1 Adsorption capacity of 2-MIB and GSM by 5 kinds of PAC at 60 min (mass concentration of 2-MIB in raw water is 846 ng/L, mass concentration of GSM is 919 ng/L)

由图 1 可以看出,在相同条件下,5 种 PAC 对 2 种嗅味物质显示出不同的吸附去除效果。具体来看,对于 2-MIB,采用 PAC-B、PAC-T、PAC-S、PAC-N-1 和 PAC-N-2 的吸附去除率分别为 67.0%、77.5%、80.1%、80.9%和 68.2%,吸附量大小依次为 PAC-N-1>PAC-S>PAC-T>PAC-N-2>PAC-B;而对于 GSM,采用 PAC-B、PAC-T、PAC-S、PAC-N-1 和 PAC-N-2 的吸附去除率分别为 93.9%、99.7%、95.9%、95.3%和 92.8%,吸附量大小依次为 PAC-T>PAC-S>PAC-N-1>PAC-B>PAC-N-2,两者顺序并不一致。就同一种 PAC 而言,其对于 GSM 的吸附量比 2-MIB 的吸附量要高出 21.9%~34.3%。由此可见,水中的 2-MIB 和 GSM 都能被 PAC 有效吸附,但针对 GSM 的吸附要相对容易,且吸附 2-MIB 效果较好的 PAC 并不一定在吸附 GSM 时仍具有相对优势,这就意味着决定 2-MIB 和 GSM 吸附效果的关键性指标可能存在差异。

2.2 比表面积和孔容积

图 2 给出了 PAC 总比表面积和微孔比表面积随孔径的累积曲线。

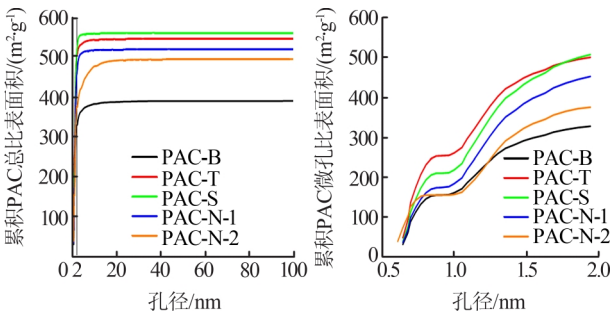


图 2 PAC 比表面积随孔径的累积曲线
Fig. 2 Cumulative curve of specific surface area with pore size in PAC

由图 2 可以看出,5 种 PAC 的总比表面积和微孔 ($d<2\text{ nm}$) 比表面积由大到小均依次为 PAC-S>PAC-T>PAC-N-1>PAC-N-2>PAC-B,且微孔比表面积占据了总比表面积的主要部分。

本研究将 $d<2\text{ nm}$ 微孔区间进一步划分成 0.64~1.0 nm、1.0~1.2 nm 和 1.2~2.0 nm 3 个区间,利用 IBM SPSS Statistics 26 软件对不同孔径区间 PAC 比表面积与 2 种嗅味物质的吸附量进行相关性分析,结果如表 1 所示。

表 1 2 种嗅味物质吸附量与 PAC 性能指标拟合结果

Table 1 Correlation fitting results between the adsorption capacity of 2 kinds of odorants and the performance indicator of PAC												
		BET 比表面积	不同孔径 (nm) 区间比表面积					碘值	亚甲蓝值	酚值	酸性基团	碱性基团
			2~50	<2	0.64~1.0	1.0~1.2	1.2~2.0					
60 min 2-MIB 吸附量	<i>P</i>	0.836	-0.315	0.907	0.713	0.976	0.811	0.979	0.832	0.280	-0.14	-0.414
	Sig.	0.078	0.605	0.033	0.176	0.005	0.096	0.005	0.080	0.648	0.82	0.49
	<i>R</i> ²	—	—	0.823	—	0.952	—	0.959	—	—	—	—
60 min GSM 吸附量	<i>P</i>	0.414	-0.839	0.765	0.963	0.652	0.205	0.586	0.184	0.570	-0.32	-0.033
	Sig.	0.488	0.076	0.132	0.008	0.233	0.741	0.299	0.768	0.316	0.60	0.96
	<i>R</i> ²	—	—	—	0.927	—	—	—	—	—	—	—

由表 1 可以看出,BET 比表面积与 2 种嗅味物质的吸附量之间均没有明显的相关性,因此,在嗅味物质吸附研究中被广泛关注的 PAC 的 BET 比表面积并不具备显著的参考价值^[8]。中孔 ($2\text{ nm}<d<50\text{ nm}$) 比表面积与 2-MIB 和 GSM 的吸附量之间也没有明显的相关性,说明 PAC 中孔不是 2-MIB 和 GSM 的主要吸附区域。相较于 BET 比表面积和中孔比表面积,微孔比表面积与 2 种嗅味物质的吸附量之间显示出了更好的相关性。具体来看,2-MIB 吸附量与微孔比表面积具有明显的相关性 ($P=0.907$),尤其与 1.0~1.2 nm 孔径区间微孔的比表面积显著相关 ($P=0.976$),这与 G. NEWCOMBE 等^[9]的研究结果相符。

对于 GSM,其吸附量与微孔比表面积未显示出明显的相关性 ($P=0.765$),但是与 0.64~1.0 nm 孔径区间微孔的比表面积显著相关 ($P=0.963$)。

分别对 2-MIB 吸附量和 1.0~1.2 nm 孔径区间比表面积、GSM 吸附量和 0.64~1.0 nm 孔径区间比表面积进行线性拟合,结果如图 3 所示。

由图 3 可以看出,2-MIB 吸附量和 1.0~1.2 nm 孔径区间的比表面积、GSM 吸附量和 0.64~1.0 nm 孔径区间的比表面积均具有良好的线性相关性, R^2 分别达到 0.952 和 0.927。这种现象表明,2-MIB 和 GSM 被 PAC 吸附所占据的主要孔径区域是存在差异的,这可能与 2-MIB 和 GSM 的分子结构存在差

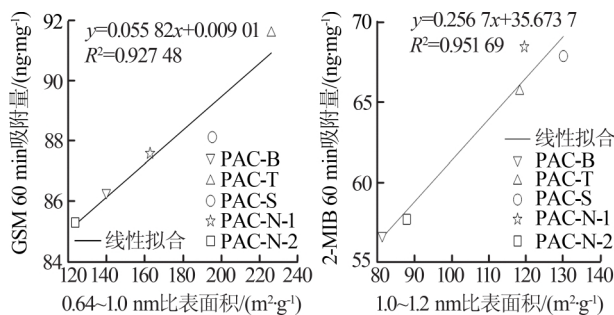


图3 吸附量与特定孔径范围比表面积的线性拟合

Fig. 3 Linear fitting between adsorption capacity of 2 kinds of odorants and specific surface area of specific pore size range

异有关。如图4所示,虽然2种物质的球形分子直径都被认为是0.6 nm,但是2-MIB分子的空间结构更加立体^[10],而PAC中的孔一般是狭缝形的裂隙孔而不是规则的圆孔,因此,结构更加扁平的GSM更容易吸附在0.64~1.0 nm孔径区间的微孔中,2-MIB则主要吸附在1.0~1.2 nm孔径区间的微孔中,这与S. KASAOKA等^[11]提出的“有机化合物吸附在孔隙中的宽度为吸附质最大直径的1.5~2倍”的观点相符。在这些孔隙中,因为尺寸原因,这2种物质很容易与周围的孔壁发生化学或者物理作用,从而达到被吸附的效果。

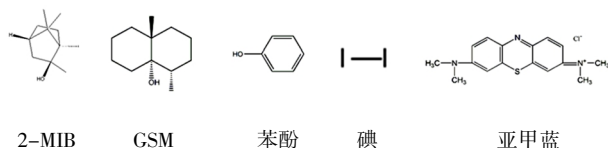


图4 吸附质的分子结构

Fig. 4 Molecular structure of adsorbates

PAC孔容积与比表面积呈线性相关,皮尔逊相关系数高达1.000,因此不再单独分析PAC孔容积与PAC吸附2-MIB和GSM效能的相关性。

2.3 碘吸附值

碘吸附值是厂商经常提供的表征活性炭吸附能力的重要指标。碘分子的直径为0.68 nm^[12],与2-MIB和GSM的分子直径相近。如表2所示,5种PAC碘值由大到小依次为PAC-S>PAC-N-1>PAC-T>PAC-N-2>PAC-B,其与5种PAC对2-MIB吸附量的大小顺序基本一致。进一步将2-MIB吸附量与碘值进行相关性分析(见表1),可以发现碘值与2-MIB吸附量之间呈现显著的相关关系($P=0.979$, $\text{Sig.}=0.005$)。此外还发现,碘值与1.0~1.2 nm孔径区间

微孔的比表面积显著相关($P=0.996$, $\text{Sig.}=0.004$)。上述结果说明,碘被PAC吸附所占据的孔径区间与2-MIB被吸附所占据的孔径区间具有很高的致性,选取PAC用于吸附水中2-MIB时,碘值可以作为一项重要的参考指标。然而,碘值与GSM吸附量的拟合并未显现出明显的相关性,这可能是因为它们被PAC吸附所占据的孔径范围存在差异所引起的。由于本试验结果和大量文献都表明,GSM比2-MIB更容易被PAC所吸附^[13],因此,对于供水企业来讲,当需要同步去除2-MIB和GSM这2种嗅味物质时,碘值仍可以作为选择PAC的参考指标。

表2 PAC性能指标

活性炭	PAC-B	PAC-T	PAC-S	PAC-N-1	PAC-N-2
碘值/(mg·g ⁻¹)	595	775	857	807	634
亚甲蓝值/(mg·g ⁻¹)	106	136	178	164	138
酚值/(mg·g ⁻¹)	167	163	158	146	114
碱性基团/(mmol·g ⁻¹)	1.06	0.60	0.58	0.48	0.37
酸性基团/(mmol·g ⁻¹)	0.20	0.27	0.66	0.15	0.73

2.4 亚甲蓝吸附值

亚甲蓝吸附值同样是厂商经常提供的表征活性炭吸附能力的重要指标。相关性分析结果显示,亚甲蓝吸附值(见表2)与0.64~1.0 nm和1.0~1.2 nm微孔比表面积均不存在相关关系,但与1.2~2.0 nm孔径区间微孔的比表面积具有显著的相关性($P=0.987$, $\text{Sig.}=0.002$),这表明亚甲蓝被PAC吸附所占据的孔主要分布在1.2~2.0 nm区间。此外,并未发现亚甲蓝吸附值与2-MIB和GSM吸附量之间存在相关关系(见表1)。如图4所示,亚甲蓝的分子尺寸明显大于2-MIB和GSM,其被吸附所占据的主要孔径区间为1.2~2.0 nm,与2种嗅味物质被吸附所占据的主要孔径区间并不一致。由此可见,选购PAC用于吸附水中2-MIB和GSM时,亚甲蓝吸附值的参考价值相对较弱。

2.5 苯酚吸附值

苯酚是水体中常见的有机污染物,苯酚吸附值也是表征活性炭吸附有机物能力的重要指标。苯酚的分子尺寸为0.57 nm×0.43 nm,与2-MIB和GSM的分子尺寸相近^[14],并且同样有羟基官能团。但是研究中并未发现苯酚吸附值(见表2)与2-MIB和GSM吸附量之间存在相关性(见表1),与各孔径区间的比表面积也没有表现出明显的相关性。因此,苯

酚吸附值不能作为 PAC 吸附水中 2-MIB 和 GSM 效能的评价指标。

2.6 表面官能团

采用 Boehm 滴定法和 FTIR 吸收光谱法进行 PAC 表面官能团分析,结果分别如表 2 和图 5 所示。

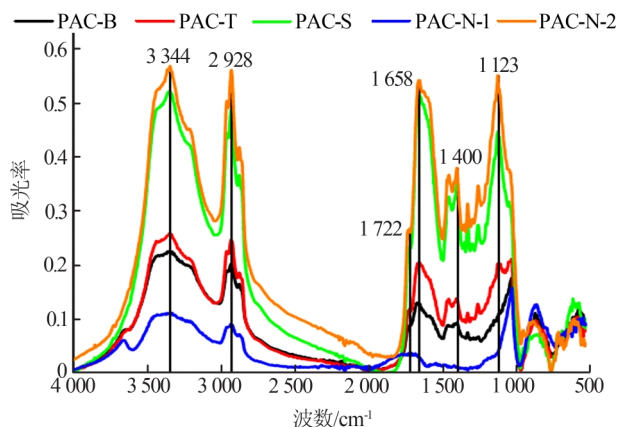


图 5 5 种 PAC 的 FTIR 吸收光谱

Fig. 5 FTIR absorption spectra of 5 kinds of PAC

研究发现,碱性官能团和酸性官能团含量(见表 2)与 2-MIB 和 GSM 吸附量之间均没有显著的相关性。由图 5 可以看出,5 种 PAC 的 FTIR 峰型基本一致,说明 5 种 PAC 所含的官能团种类基本一致。此外,图 5 中 $2\ 800\sim 3\ 400\text{ cm}^{-1}$ 处宽而强的吸收峰对应羧基中的羟基($\text{O}-\text{H}$), $1\ 720\text{ cm}^{-1}$ 附近的吸收带对应于酯、醛、酮基和羧基中的羰基($\text{C}=\text{O}$)^[15], $1\ 600\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\ 400\text{ cm}^{-1}$ 附近的吸收峰分别对应于 $-\text{COO}-$ 的反对称伸缩振动和对称伸缩振动^[16],吸收峰的强度与表 2 所示的 Boehm 滴定的结果具有一致性,PAC-S 和 PAC-N-2 表面具有更多的酸性官能团。再由图 3 可知,PAC-S 和 PAC-N-2 的吸附能力略低于预期水平,而更加饱和的 PAC-N-1 的吸附能力略高于预期水平,因此可以认为,对 2-MIB 和 GSM 的吸附效能来讲,PAC 表面酸性官能团虽然不是主要影响因素,但可能存在一定的抑制作用。

2.7 成本分析

通过文献和实地调研发现,用于应对水源季节性臭味问题的 PAC 投量一般在 $10\sim 50\text{ mg/L}$ 之间(与原水中 2-MIB、GSM 等臭味物质含量以及天然有机物含量等因素密切相关),按照 PAC 价格为 $6\ 000\text{ 元/t}$ 计算,则吨水运行成本增加 $0.06\sim 0.30\text{ 元}$ 。作为短期应急处理使用时,运行费用增加值处于供

水企业可接受的范围内。

3 结论

(1)水中的 2-MIB 和 GSM 都能被 PAC 有效吸附,但对 GSM 的吸附要相对容易,且吸附 2-MIB 效果较好的 PAC 并不一定在吸附 GSM 时仍具有相对优势。

(2)2-MIB 吸附量和 GSM 吸附量分别与 $1.0\sim 1.2\text{ nm}$ 、 $0.64\sim 1.0\text{ nm}$ 孔径区间微孔的比表面积(或孔容积)显著相关,相应孔径区间微孔的比表面积(或孔容积)是影响 PAC 对这 2 种臭味物质吸附能力的主要控制因素。

(3)碘吸附值与 2-MIB 吸附量以及 $1.0\sim 1.2\text{ nm}$ 孔径区间微孔的比表面积存在显著的相关性,碘值大小能够代表 PAC 吸附 2-MIB 的能力,可以作为选购 PAC 用于吸附水中 2-MIB 的重要依据。

(4)亚甲蓝吸附值、酚值、PAC 表面酸和碱性官能团含量与 2 种臭味物质的吸附量之间均没有明显的相关关系,因此不能作为 PAC 吸附这 2 种臭味物质能力的判断依据。

参考文献

- [1] HUANG Xin, SHI Baoyou, HAO Haotian, 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.
- [2] LI Lei, YANG Sihui, YU Shuili, 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.
- [3] COOK D, NEWCOMBE G, SZTAJNBOK P. The application of powdered activated carbon for MIB and geosmin removal; Predicting PAC doses in four raw waters[J]. Water Research, 2001, 35(5): 1325-1333.
- [4] 张素霞, 马刚, 郭强, 等. 粉末活性炭技术处理水中臭味物质的应用研究[J]. 给水排水, 2007, 33(9): 17-22.
- [5] 殷祺, 倪先哲, 鞠佳伟, 等. 东太湖原水 2-MIB 污染应急处理技术[J]. 净水技术, 2019, 38(11): 84-86.
- [6] 闫慧敏, 韩正双, 白雪娟, 等. 顶空固相微萃取-气相色谱质谱法测定 8 种臭味物质[J]. 供水技术, 2018, 12(6): 58-61.
- [7] 远辉, 郝明明, 袁辉, 等. 新疆杏核壳活性炭的改性对含氧官能团的影响[J]. 炭素技术, 2014, 33(2): 30-33.
- [8] 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] NEWCOMBE G, MORRISON J, HEPPELWHITE C, et al. Simultaneous adsorption of MIB and NOM onto activated carbon: II. Competitive effects[J]. Carbon, 2002, 40(12): 2147-2156.



红球菌 KDPy1 在焦化废水生物处理中的强化作用

李 婷, 张玉秀, 祖德彪, 徐伟超

(中国矿业大学(北京), 北京 100083)

[摘要] 喹啉、吡啶等含氮杂环化合物是焦化废水中主要的难降解有机物。以喹啉、吡啶作为目标污染物, 研究了筛选出的高效降解菌红球菌(*Rhodococcus* sp.) KDPy1 对焦化废水 A/O² 生物处理工艺的强化作用。结果表明, 与对照组相比, 红球菌的添加使 O1 池的 COD、喹啉、吡啶去除率分别增加了 11.4%、17.3%、14.0%。经生物强化后, 系统内微生物群落多样性增加, 且有机污染物降解菌如 *Stenotrophomonas* 和 *Ochrobactrum* 等更具优势, 证实了红球菌(*Rhodococcus* sp.) KDPy1 在焦化废水处理中的巨大应用前景。

[关键词] 焦化废水; 生物强化; 含氮杂环化合物; 红球菌

[中图分类号] X703 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2021)10-0096-08

Bioaugmentation of *Rhodococcus* sp. KDPy1 in coking wastewater treatment

LI Ting, ZHANG Yuxiu, ZU Debiao, XU Weichao

(China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Heterocyclic compounds containing nitrogen such as quinoline and pyridine, are the main refractory organic compounds in coking wastewater. In this study, taking pyridine and quinoline as object pollutants, the isolated strain *Rhodococcus* sp. KDPy1 was used to strengthen the A/O² process for coking wastewater treatment. The results showed that compared with the control group, the addition of *Rhodococcus* sp. increased the removal rate of COD, quinoline and pyridine in the O1 pool by 11.4%, 17.3% and 14.0%, respectively. At the same time, the diversity of microbial communities increased after bioaugmentation, and the organic degrading bacteria such as *Stenotrophomonas* and *Ochrobactrum* were more abundant in the system, which proved that *Rhodococcus* sp. KDPy1 had a great application potential in coking wastewater treatment.

Key words: coking wastewater; bioaugmentation; nitrogen heterocyclic compounds; *Rhodococcus* sp.

[基金项目] “十三五”国家科技重大专项水体污染控制与治理项目(2017ZX07402001); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2021YJSHH30)

[10] YU Jianwei, YANG Min, LIN T F, et al. Effects of surface characteristics of activated carbon on the adsorption of 2-methylisobornel (MIB) and geosmin from natural water[J]. Separation and Purification Technology, 2007, 56(3): 363-370.

[11] KASAOKA S, SAKATA Y, TANAKA E, et al. Design of molecular sieving carbon-studies on adsorption of various dyes in liquid phase[J]. Nippon Kagaku Kaishi, 1987, 12: 2260-2266.

[12] 陈双龙. 限域于磷酸铝分子筛一维孔道中碘与水的结构转变研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016.

[13] 吕强, 魏群山, 黄鑫, 等. 应对南方某水厂土霉嗅味的活性炭技术[J]. 环境工程学报, 2018, 12(11): 3034-3042.

[14] LORENC-GRABOWSKA E. Effect of micropore size distribution on

phenol adsorption on steam activated carbons[J]. Adsorption, 2016, 22(4/5/6): 599-607.

[15] GURTEN I I, OZMAK M, YAGMUR E, et al. Preparation and characterisation of activated carbon from waste tea using K₂CO₃[J]. Biomass and Bioenergy, 2012, 37: 73-81.

[16] 张敏, 白波, 胡娜, 等. 羧基化酵母-海藻酸钠复合微球制备及吸附性能[J]. 化学工程, 2019, 47(10): 42-47.

[作者简介] 李一兵(1968—), 教授级高工。E-mail: lybhebut@sina.com。通讯作者: 韩正双, 高级工程师。E-mail: hit08hzs@163.com。

[收稿日期] 2021-07-26(修改稿)