

分析与监测

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2024. 02. 022

搅拌棒吸附萃取-气相色谱-质谱测定臭味物质

顿咪娜, 王明泉, 陈燕, 宋艳, 孙韶华, 贾瑞宝

(山东省城市供排水水质监测中心, 山东 济南 250021)

摘要: 建立了搅拌棒吸附萃取-气相色谱-质谱测定水中土臭素(GSM)、2-甲基异莰醇(2-MIB)、2,4,6-三氯苯甲醚(2,4,6-TCA)、2,3,6-三氯苯甲醚(2,3,6-TCA)、2,3,4-三氯苯甲醚(2,3,4-TCA)、2-异丙基-3-甲氧基吡嗪(IPMP)、2-异丁基-3-甲氧基吡嗪(IBMP)、 β -环柠檬醛、 β -紫罗兰酮及异佛尔酮10种臭味物质的方法。水样经搅拌棒浸没式吸附和顶空吸附的混合吸附模式富集60 min,氯化钠添加量为3.0 g。目标组分于进样口热解吸后通过气相色谱-质谱法测定,10种臭味物质的峰面积和质量浓度线性关系良好,相关系数均 >0.996 ,检测限为2.0~8.0 ng/L。采用该方法测定某水库水样品,共检出2-MIB、 β -环柠檬醛及异佛尔酮3种臭味物质,其中2-MIB质量浓度较高。对水库水样品进行加标回收试验,回收率为90.0%~98.3%,相对标准偏差 $\leq 6.8\%$ ($n=6$)。该方法操作简便高效、无需有机溶剂、环境友好,可快速准确测定水中10种臭味物质浓度,满足其检测需求。

关键词: 搅拌棒; 吸附萃取; 气相色谱-质谱; 臭味物质

中图分类号: TU991 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2024)02-0131-06

Stir Bar Sorptive Extraction-Gas Chromatography-Mass Spectrometry for Determination of Odorous Compounds

DUN Mi-na, WANG Ming-quan, CHEN Yan, SONG Yan, SUN Shao-hua,
JIA Rui-bao

(Shandong Province City Water Supply and Drainage Water Quality Monitoring Center, Jinan
250021, China)

Abstract: This paper established the stir bar sorptive extraction-gas chromatography-mass spectrometry method for the determination of 10 kinds of odorous compounds including geosmin(GSM), 2-methylisoborneol (2-MIB), 2,4,6-trichloroanisole (2,4,6-TCA), 2,3,6-trichloroanisole(2,3,6-TCA), 2,3,4-trichloroanisole (2,3,4-TCA), 2-isopropyl-3-methoxy pyrazine (IPMP), 2-methoxy-3-isobutyl pyrazine (IBMP), β -cyclocitral, β -ionone and isophorone in water. The water sample was enriched for 60 min through two mixed adsorption modes: solution adsorption and headspace adsorption, and the dosage of sodium chloride in the solution was 3.0 g. After thermal desorption at the injector port, the target components were determined by gas chromatography-mass spectrometry. There was a good linear relationship between the peak area and the mass concentration of 10 odorous compounds. The correlation coefficients were all greater than 0.996, and the limits of detection were in the range of 2.0~8.0 ng/L. The

基金项目: 山东省重点研发计划项目(2020CXGC011406); 国家重点研发计划项目(2021YFC3200802-03)

通信作者: 贾瑞宝 E-mail: jiaruibao68@126.com

method was employed to determine the water samples from a reservoir, and three kinds of odorous compounds including 2-MIB, β -cyclocitral and isophorone were detected, among which the mass concentration of 2-MIB was higher than those of the other two compounds. The standard addition test results suggested that the recoveries of reservoir water samples was in the range of 90.0%–98.3% with relative standard deviation less than or equal to 6.8% ($n=6$). The method is simple, efficient and environmental friendly, requires no use of organic solvents, and can quickly and accurately detect the concentration of 10 kinds of odorous compounds in water and meet their detection requirements.

Key words: stir bar; sorptive extraction; gas chromatography–mass spectrometry; odorous compound

臭味物质对饮用水感官及供水水质安全性均存在不良影响^[1–2],这些物质的嗅阈值极低,ng/L级浓度即可引起不适感觉^[3–4]。水体中的臭味包括土腥味、土霉味、草木味以及芳香味等,其中:引起水体土腥味的物质包括土臭素(GSM)、2-甲基异莰醇(2-MIB);引起土霉味的物质包括2-异丙基-3-甲氧基吡嗪(IPMP)、2-异丁基-3-甲氧基吡嗪(IBMP)及三氯苯甲醚如2,3,4-三氯苯甲醚(2,3,4-TCA)、2,3,6-三氯苯甲醚(2,3,6-TCA)和2,4,6-三氯苯甲醚(2,4,6-TCA)等^[5–6];含 β -环柠檬醛和异佛尔酮的水体通常表现为芳香味和类似樟脑味; β -紫罗兰酮为类似松木香味。臭味物质的检测评价引起了供水行业的广泛关注,新版《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)在常规指标清单中增加了GSM和2-MIB(限值为10 ng/L)。建立高灵敏度且快速的臭味物质检测技术对水体中臭味物质的预警及饮用水水质安全均具有重要意义^[7–8]。

水中臭味物质多为痕量物质,需进行样品的富集和净化。目前常用的前处理技术有固相萃取法、固相微萃取法以及吹扫捕集法等。仪器测定方法有气相色谱法以及气相色谱–质谱法^[9–14]。固相萃取前处理过程较为复杂,需消耗大量有机溶剂,所需样品量较大且萃取时间长。固相微萃取法和吹扫捕集法通常采用振荡或流动气体吹脱将臭味物质从水中顶空分离,然后以涂层或捕集管吸附捕集。搅拌棒吸附萃取技术是一种集萃取、净化和富集为一体,用于痕量有机物分离和浓缩的前处理方法^[15–16]。搅拌棒吸附涂层体积通常为50~300 μL ,与固相微萃取纤维材料相比,吸附容量明显增大且灵敏度更高。富集过程可根据目标物特性选用浸没式吸附、顶空吸附以及混合吸附等多种吸附模

式,吸附完成后直接转移至热脱附管进行热解吸,操作过程简便,减少了目标组分损失且全程无需有机溶剂。另外,该吸附萃取技术前处理过程可搭配使用多点磁力搅拌器实现样品的批量测定^[17]。

目前,有学者应用搅拌棒吸附萃取–气相色谱–质谱法测定地表水中多环芳烃、多氯联苯单体等^[15,17],但有关该方法富集并检测臭味物质的报道较少。本研究通过优化搅拌棒吸附模式及其他参数等,建立了搅拌棒吸附萃取–气相色谱–质谱测定水中10种臭味物质的方法,克服了臭味物质吸附过程中的组分损失,并成功应用于实际样品的检测。

1 材料与方法

1.1 仪器与试剂

TQ 8040型气相色谱–质谱仪配热脱附单元(TDU)和程序升温单元(CIS4);多功能自动进样器;IKA RO15型磁力搅拌器;搅拌棒[长为10 mm,聚二甲基硅氧烷(PDMS)涂层,膜厚为1.0 mm];Milli-Q Advantage A10型超纯水系统。

甲醇为色谱纯,氯化钠为分析纯。

1.2 标准溶液的配制

GSM和2-MIB混合标准溶液:质量浓度为100 mg/L。2,4,6-TCA、2,3,6-TCA、2,3,4-TCA、IPMP、IBMP、 β -环柠檬醛、 β -紫罗兰酮等单标准溶液:质量浓度为100 mg/L。异佛尔酮标准溶液:质量浓度为1 000 mg/L。

混合标准储备溶液:10.0 mg/L。取GSM和2-MIB混合标准溶液、2,4,6-TCA、2,3,6-TCA、2,3,4-TCA、IPMP、IBMP、 β -环柠檬醛、 β -紫罗兰酮标准溶液各1 mL,异佛尔酮标准溶液100 μL ,用甲醇定容至10 mL,配制成质量浓度均为10.0 mg/L的混合标准储备溶液。

混合标准溶液系列:取适量混合标准储备溶液,用超纯水逐级稀释,配制成质量浓度分别为2.0、4.0、8.0、16.0、50.0、100、200、300 ng/L的混合标准溶液系列。

1.3 样品前处理

移取10 mL水样于20 mL带盖玻璃样品瓶中,加入3.0 g氯化钠,将2根搅拌棒分别置于样品瓶溶液底部及液面以上位置,旋紧瓶盖。将样品瓶放置于磁力搅拌器上,室温条件下以2 000 r/min搅拌吸附60 min。萃取完成后,使用干净镊子取出搅拌棒,以超纯水去除表层氯化钠及其他杂质等,用吸水纸吸干搅拌棒表层水分后将其置于热脱附样品管中,待气相色谱-质谱测定。

1.4 仪器工作条件

1.4.1 色谱条件

TDU条件:不分流模式;升温程序为起始20℃,保持20 s后以60℃/min速率升温至180℃,保持2 min。CIS4条件:衬管选用Tennax填料;采用溶剂排空模式,排空流量为20 mL/min;升温程序为起始20℃,保持20 s后以12℃/min速率升温至180℃,保持2 min;吹扫时间为3 min,吹扫流量为20 mL/min。

采用DB-5MS色谱柱(60 m×0.25 mm×2.5 μm);载气为氦气,纯度>99.999%,流速为2.0 mL/min;不分流进样;升温程序为起始80℃,保持1 min,以5℃/min速率升至180℃,保持5 min。

1.4.2 质谱条件

EI⁺离子化模式;离子源温度230℃;离子化能量70 eV;传输线温度260℃;采用全扫描(SCAN)模式用于定性,扫描范围为质荷比(m/z)=50~650;选择离子扫描(SIM)模式用于定量,质谱参数见表1。

表1 质谱参数

Tab.1 MS parameters

项目	保留时间/ min	质荷比(m/z)	
		定量离子	定性离子
GSM	14.69	112	95,125
2-MIB	10.72	95	107,135
2,4,6-TCA	13.13	210	199,167
2,3,6-TCA	13.84	210	195,167
2,3,4-TCA	15.89	210	195,199
IPMP	8.71	137	124,152
IBMP	10.29	124	151,81
β-环柠檬醛	11.25	109	137,124
β-紫罗兰酮	15.59	177	179,162
异佛尔酮	9.39	82	138,110

2 结果与讨论

2.1 吸附萃取条件的优化

2.1.1 吸附模式的优化

试验根据臭味物质特性选择涂覆PDMS吸附涂层的搅拌棒进行搅拌吸附,搅拌棒可采用顶空吸附或将搅拌棒直接放置于样品溶液进行浸没式吸附萃取,研究报告中多采用后者富集待测目标物^[15]。试验以另外配制的10 ng/L的混合标准溶液为待测对象,考察了吸附萃取模式对目标分析物峰面积的影响。单一吸附模式是将第1根搅拌棒置于样品溶液底部,采用浸没式吸附;2种混合吸附模式是在单一浸没式吸附的基础上,增加第2根搅拌棒,将其固定在样品溶液上方进行顶空吸附。测定结果见图1。

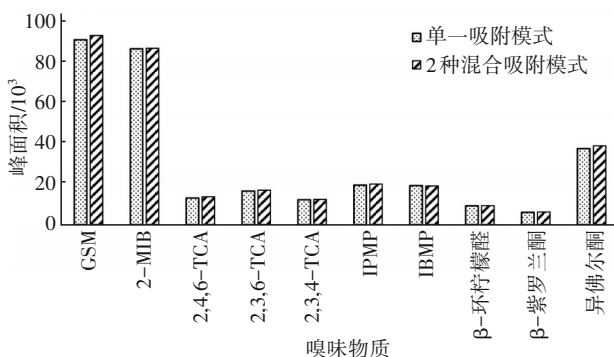


图1 吸附萃取模式对10种臭味物质峰面积的影响

Fig.1 Effect of sorptive extraction pattern on the peak areas of the 10 odorous compounds

结果表明,采用2种模式混合吸附和单一浸没式吸附相比,GSM、2-MIB、2,4,6-TCA、2,3,6-TCA、IPMP及异佛尔酮的测定峰面积增大,吸附回收率提高;2,3,4-TCA、IBMP、β-环柠檬醛及β-紫罗兰酮在不同模式下测定的峰面积差异较小。采用2种模式混合吸附样品测定效果较佳,可能与搅拌过程中组分的迁移析出有关^[15]。混合吸附模式中2根搅拌棒吸附完成后可同时置于热脱附管中解吸,操作简便,因此为进一步提高样品测定的准确度,减少目标组分损失,本研究采用浸没式吸附和顶空吸附2种混合模式。

2.1.2 吸附萃取时间的优化

吸附萃取时间直接影响待测组分在样品和搅拌棒涂层间的分配平衡,决定了臭味物质的萃取效果。涂层需要足够的时间达到吸附平衡,但过长的平衡时间会影响样品的萃取效果及测定效率。试

验以 10 ng/L 的混合标准溶液为待测对象,考察吸附萃取时间(30、40、60 及 90 min)对目标分析物峰面积的影响,结果见图 2。

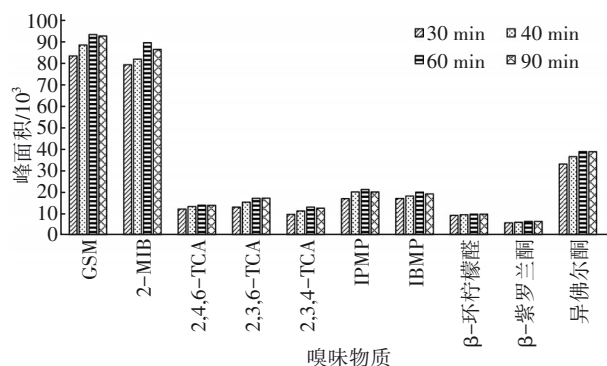


图 2 吸附萃取时间对 10 种嗅味物质峰面积的影响

Fig.2 Effect of sorptive extraction time on the peak areas of the 10 odorous compounds

由图 2 可知,萃取时间在 30~60 min 内,10 种嗅味物质由水相逐渐转移至搅拌棒吸附涂层中,测定峰面积随吸附时间的延长而增大,萃取时间为 60 min 时测定峰面积最大。60 min 后继续延长萃取时间,萃取效果无明显变化,目标物在吸附涂层和水相间达到吸附平衡状态。结合萃取效果和测定效率,试验选择 60 min 为最佳吸附萃取时间。

2.1.3 助剂添加量的优化

萃取中添加氯化钠助剂的目的通常是利用盐析效应降低目标化合物在水溶液中的溶解度,有利于目标组分向吸附材料涂层转移,从而提高吸附效果^[8]。试验以 10 ng/L 的混合标准溶液为待测对象,向 10 mL 样品溶液中加入氯化钠,考察不同氯化钠添加量(0、1.0、2.0、3.0 及 4.0 g)对目标分析物峰面积的影响,结果见图 3。

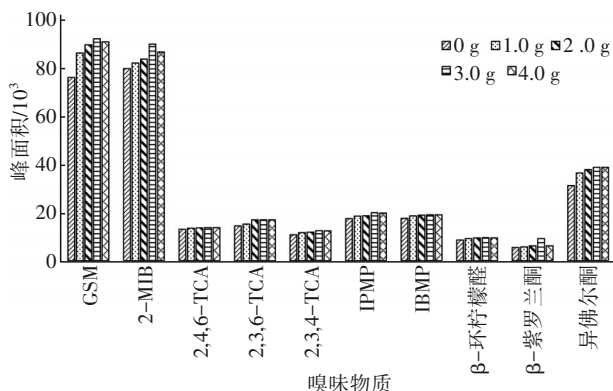


图 3 氯化钠添加量对 10 种嗅味物质峰面积的影响

Fig.3 Effect of sodium chloride addition on the peak areas of the 10 odorous compounds

由图 3 可知,氯化钠添加量在 0~3.0 g 范围内,10 种嗅味物质的峰面积随氯化钠添加量的增加而增大,表明该添加量范围内氯化钠降低了目标物在水中的溶解,对吸附效果起促进作用。而当添加量从 3.0 g 增加至 4.0 g 时,峰面积趋于平稳。有研究^[5]提出,盐的加入量过大会导致出现盐溶效应,使溶液中逃逸至上层空气中的组分含量增加,造成搅拌棒涂层吸附组分含量降低,同时过量氯化钠的析出还容易造成仪器堵塞及吸附材料老化等。试验中选择氯化钠添加量为 3.0 g。

2.2 线性响应范围及方法检测限

测定 10 种嗅味物质不同浓度的标准溶液系列,以响应峰面积和对应的质量浓度分别作为纵坐标和横坐标,绘制校准曲线。选择约 3 倍信噪比(S/N)质量浓度的 3~4 倍配制样品,按照试验方法测定 7 次,计算相关参数,结果见表 2。结果表明,10 种嗅味物质的质量浓度和峰面积的线性相关性较好,相关系数均大于等于 0.996。其中 GSM 和 2-MIB 的检测限均为 3.0 ng/L,低于《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)规定的 10 ng/L 限值。

表 2 线性参数和检测限

Tab.2 Linearity parameters and detection limits

项目	线性范围/ (ng·L ⁻¹)	线性回归方程	相关系数	检测限/ (ng·L ⁻¹)
GSM	3.0~200	$y=9\,341x+2\,106$	0.998	3.0
2-MIB	3.0~200	$y=8\,876x+266.4$	0.997	3.0
2,4,6-TCA	8.0~200	$y=1\,041x+5\,893$	0.999 9	8.0
2,3,6-TCA	4.0~200	$y=3\,386x+4\,314$	0.998	4.0
2,3,4-TCA	4.0~200	$y=3\,027x+1\,425$	0.998	4.0
IPMP	2.0~200	$y=8\,882x+3\,289$	0.999 2	2.0
IBMP	2.0~200	$y=8\,197x+3\,551$	0.998	2.0
β-环柠檬醛	4.0~200	$y=2\,183x+1\,320$	0.996	4.0
β-紫罗兰酮	4.0~200	$y=1\,483x+632$	0.998	4.0
异佛尔酮	4.0~200	$y=8\,189x+7\,807$	0.998	4.0

2.3 检测方法的精密度和准确度

为验证方法的准确度和精密度,分别配制质量浓度为 10 ng/L 的 10 种嗅味物质的纯水样品,平行测定 6 次,计算测定结果的回收率和相对标准偏差(RSD)。检测结果表明,GSM、2-MIB、2,4,6-TCA、2,3,6-TCA、2,3,4-TCA、IPMP、IBMP、β-环柠檬醛、β-紫罗兰酮及异佛尔酮的回收率分别为 98.3%、97.2%、95.4%、93.2%、94.3%、96.8%、95.2%、

92.1%、90.6%及95.1%,RSD分别为4.1%、4.3%、5.6%、6.2%、5.3%、4.7%、5.1%、7.3%、6.4%及6.0%。该搅拌棒吸附萃取-气相色谱-质谱法测定10种臭味物质具有较好的精密度和准确度,满足其定量分析要求。

2.4 实际应用

采集济南市某水库水样品,按照优化后的方法测定实际样品中的10种臭味物质浓度,并对其进行10、50及100 ng/L三个浓度水平的加标回收试验,每个浓度水平平行测定6次,计算回收率及RSD,结果见表3。

表3 回收试验结果($n=6$)

Tab.3 Results of test for recovery ($n=6$)

项目	测定浓度/(ng·L ⁻¹)	加入量/(ng·L ⁻¹)					
		10		50		100	
		回收率/%	RSD/%	回收率/%	RSD/%	回收率/%	RSD/%
GSM	—	94.5	5.5	97.4	3.2	98.3	4.9
2-MIB	10.2	96.3	4.8	92.2	6.3	97.1	3.3
2,4,6-TCA	—	93.6	6.1	92.8	6.0	91.1	5.1
2,3,6-TCA	—	93.9	6.6	93.2	6.7	95.2	5.2
2,3,4-TCA	—	94.6	5.1	95.1	5.2	95.0	5.4
IPMP	—	92.8	4.3	96.6	3.6	95.5	4.2
IBMP	—	91.4	5.6	95.8	6.8	92.7	3.7
β-环柠檬醛	10.1	90.5	6.0	94.0	6.5	95.0	4.1
β-紫罗兰酮	—	90.0	4.4	97.4	3.2	97.3	3.4
异佛尔酮	6.2	93.5	6.1	94.8	5.7	91.7	4.5

由表3可知,该水库水检出的臭味物质有2-MIB、β-环柠檬醛及异佛尔酮,其余7种臭味物质均未检出。2-MIB是造成水体土腥味的主要物质,β-环柠檬醛呈柠檬香味,含异佛尔酮的水体通常有刺鼻的樟脑味道。测定加标回收率为90.0%~98.3%,RSD测定值均不超过6.8%,说明该方法测定臭味物质具有较好的准确度和精密度,可应用于实际水体中臭味物质的分析测定。

3 结论

采用搅拌棒吸附萃取-气相色谱-质谱法快速测定水中10种臭味物质,可达到2.0~8.0 ng/L的检测限。前处理过程可搭配多点位磁力搅拌器实现样品的批量测定;搅拌棒采用混合吸附模式富集萃取,减少了待测组分损失,提高了样品测定的准确度;萃取过程简便快捷,无需有机溶剂,克服了传统富集萃取方法溶剂消耗量大、耗时长等问题,能够满足水体中10种臭味物质的测定需求。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] CHEN L, FU W Y, TAN Y, *et al.* Emerging organic contaminants and odorous compounds in secondary effluent wastewater: identification and advanced treatment [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 408: 124817-124863.
- [3] 冯桂学,刘莉,顿咪娜,等. 固相萃取-气相色谱-质谱法测定水中10种臭味物质的含量[J]. *理化检验-化学分册*, 2017, 53(5): 82-85.
FENG Guixue, LIU Li, DUN Mina, *et al.* SPE-GC-MS determination of 10 odorous materials in water [J]. *Physical Testing and Chemical Analysis Part B: Chemical Analysis*, 2017, 53(5): 82-85 (in Chinese).
- [4] QI F, XU B, CHEN Z, *et al.* Influence of aluminum oxides surface properties on catalyzed ozonation of 2,4,6-trichloroanisole [J]. *Separation and Purification Technology*, 2009, 66(2): 405-410.
- [5] 林麒,吕华东,许冬梅,等. 吹扫捕集-气相色谱/质谱联用法测定水中土臭素和二甲基异莰醇[J]. *中国卫生检验杂志*, 2010, 20(11): 2763-2765.
LIN Qi, LÜ Huadong, XU Dongmei, *et al.* Determination of geosmin and 2-methylisoborneol by purge and trap gas chromatography mass spectrometry [J]. *Chinese Journal of Health Laboratory Technology*, 2010, 20(11): 2763-2765 (in Chinese).
- [6] 鹿文慧,马继平,肖荣辉,等. 环境水体中致嗅有机物分析的样品前处理技术研究进展[J]. *分析测试学报*, 2009, 28(5): 621-626.
LU Wenhui, MA Jiping, XIAO Ronghui, *et al.* Progress in pre-treatment techniques for analysis on odorous compounds in environmental water [J]. *Journal of Instrumental Analysis*, 2009, 28(5): 621-626 (in Chinese).
- [7] 尤为,彭锋. 固相微萃取-气质联用法测定水中土臭素、2-甲基异莰醇[J]. *中国给水排水*, 2016, 32(6): 91-93.
YOU Wei, PENG Feng. Determination of geosmin and 2-methylisoborneol in water with solid-phase micro-extraction and GC-MS method [J]. *China Water & Wastewater*, 2016, 32(6): 91-93 (in Chinese).
- [8] 徐晓庆,苏命,朱宜平,等. 基于荧光定量PCR技术构建水源地典型致嗅物质2-甲基异莰醇的评估方法及

- 其应用[J]. 环境工程学报, 2020, 14(11): 3208-3215.
- XU Xiaoqing, SU Ming, ZHU Yiping, *et al.* Evaluation of typical odorant 2-methylisoborneol based on real time qPCR in source water and its application [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(11): 3208-3215 (in Chinese).
- [9] 何云峰, 李翠梅, 薛天一. 顶空固相微萃取-气相色谱-质谱法测定太湖水源水中臭味物质土臭素、2-甲基异莰醇以及 β -紫罗兰酮的含量[J]. 理化检验-化学分册, 2022, 58(5): 542-547.
- HE Yunfeng, LI Cuimei, XUE Tianyi. Determination of odorants of geosmin, 2-methylisoborneol and β -ionone in source water of Taihu Lake by gas chromatography-mass spectrometry after headspace-solid phase microextraction [J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part B: Chemical Analysis, 2022, 58(5): 542-547 (in Chinese).
- [10] 周广安, 陈漪洁, 潘慧慧, 等. 全自动固相微萃取-气相色谱串联质谱法检测水中土臭素和2-甲基异莰醇[J]. 净水技术, 2021, 40(5): 46-50.
- ZHOU Guang'an, CHEN Yijie, PAN Huihui, *et al.* Automatic detection method of 2-MIB and GSM in water by SPME-GC-MS/MS [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(5): 46-50 (in Chinese).
- [11] 余沛芝, 阮春蓉, 陈琳琳, 等. 水中2-甲基异莰醇和土臭素的固相微萃取-气相色谱串联质谱检测方法[J]. 净水技术, 2018, 37(9): 10-14.
- YU Peizhi, RUAN Chunrong, CHEN Linlin, *et al.* Detection methods of 2-MIB and GSM in water by SPME-GC-MS/MS [J]. Water Purification Technology, 2018, 37(9): 10-14 (in Chinese).
- [12] YOU Yean-Woong. 饮用水中2-甲基异莰醇(2-MIB)和土臭素的高灵敏检测[J]. 环境化学, 2016, 35(8): 1733-1736.
- YOU Yean-Woong. Sensitive detection of 2-MIB and geosmin in drinking water [J]. Environmental Chemistry, 2016, 35(8): 1733-1736 (in Chinese).
- [13] 夏雪, 陈倩茹, 王川, 等. 顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用测定黑臭水体中的4种主要异味物[J]. 环境化学, 2019, 38(12): 2789-2796.
- XIA Xue, CHEH Qianru, WANG Chuan, *et al.* Determination of four major odor compounds in black and odorous water by headspace solid phase microextraction combined with gas chromatography-mass spectrometry [J]. Environmental Chemistry, 2019, 38(12): 2789-2796 (in Chinese).
- [14] 郭庆园, 王春苗, 于建伟, 等. 饮用水中典型臭味问题及其研究进展[J]. 中国给水排水, 2020, 36(22): 82-88.
- GUO Qingyuan, WANG Chunmiao, YU Jianwei, *et al.* Research progress on typical taste and odor problems in drinking water [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(22): 82-88 (in Chinese).
- [15] 冯利, 张胜军, 朱国华, 等. 大体积搅拌棒吸附萃取技术与热脱附-气相色谱-质谱法测定地表水中多环芳烃[J]. 色谱, 2017, 35(4): 466-471.
- FENG Li, ZHANG Shengjun, ZHU Guohua, *et al.* Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface water using large volume stir bar sorptive extraction coupled with thermal desorption-gas chromatography-mass spectrometry [J]. Chinese Journal of Chromatography, 2017, 35(4): 466-471 (in Chinese).
- [16] 陈林利, 黄晓佳, 袁东星. 搅拌棒固相萃取的研究进展[J]. 色谱, 2011, 29(5): 375-381.
- CHEN Linli, HUANG Xiaojia, YUAN Dongxing. Advance of stir bar sorption extraction [J]. Chinese Journal of Chromatography, 2011, 29(5): 375-381 (in Chinese).
- [17] 顾海东, 秦宏兵, 尹燕敏, 等. SBSE-GC/MS法测定饮用水源水中7种多氯联苯单体[J]. 环境监测管理与技术, 2010, 22(2): 44-47.
- GU Haidong, QIN Hongbing, YIN Yanmin, *et al.* Determination of 7 PCBs in drinking source water by SBSE-GC/MS [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2010, 22(2): 44-47 (in Chinese).
-
- 作者简介: 顿咪娜(1983-), 女, 河南许昌人, 硕士, 高级工程师, 主要从事水质检测与水污染控制研究工作。
- E-mail: dxiaomi@163.com
- 收稿日期: 2023-03-13
- 修回日期: 2023-04-13

(编辑: 沈靖怡)