

城镇水系统全流程水质监测技术专栏

黄东龙, 陈如霞, 陈诚, 等. 基于高分辨质谱的靶向/拟靶向联合评估原水中挥发性有机物的环境风险[J]. 净水技术, 2026, 45(2): 196-214.

Huang D L, Chen R X, Chen C, et al. Environmental risk of VOCs in raw water based on joint-evaluation of high-resolution mass spectrometry-targeted/pseudo-targeted analysis [J]. Water Purification Technology, 2026, 45(2): 196-214.

基于高分辨质谱的靶向/拟靶向联合评估原水中挥发性有机物的环境风险

黄东龙^{1,2,*}, 陈如霞^{1,2}, 陈诚^{1,2}, 朱争亮^{1,2}

(1. 广州市自来水有限公司, 广东广州 510600; 2. 国家城市供水水质监测网广州监测站, 广东广州 510600)

摘要 【目的】 本文旨在基于高分辨质谱靶向定量与拟靶向筛查相结合的分析方法, 系统分析广东省某水源河段在枯水期、平水期和丰水期水体中挥发性有机物(VOCs)的污染特征, 并评估其环境风险。【方法】 本文采用吹扫捕集结合气相色谱-三重四极杆串联质谱仪定量分析水中 60 种 VOCs, 通过顶空提取结合气相色谱-四级杆飞行时间质谱建立了水体中 196 种 VOCs 的拟靶向筛查方法, 以此实现对研究河段不同水期 VOCs 的全面检测与量化。【结果】 靶向定量分析检出 14 种 VOCs, 其质量浓度为 0.001~16.363 $\mu\text{g/L}$, 拟靶向筛查技术在研究河段中共识别出 53 种 VOCs, 对比发现, 枯水期水体中 VOCs 的种类、数量与浓度均高于平水期和丰水期, 该差异主要与丰水期径流量增大带来的稀释作用相关。【结论】 生态风险评估表明: 除枯水期所有点位以及平水期点位 B 呈现低生态风险外, 其余点位在平水期和丰水期均无风险。

关键词 高分辨质谱 挥发性有机物(VOCs) 原水 污染特征 风险评估

中图分类号: TU991 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-0177(2026)02-0196-19

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.02.021

Environmental Risk of VOCs in Raw Water Based on Joint-Evaluation of High-Resolution Mass Spectrometry-Targeted/Pseudo-Targeted Analysis

Huang Donglong^{1,2,*}, Chen Ruxia^{1,2}, Chen Cheng^{1,2}, Zhu Zhengliang^{1,2}

(1. Guangzhou Water Supply Co., Ltd., Guangzhou 510600, China;

2. National Network of Water Quality Monitoring for City Water Supply, Guangzhou 510600, China)

Abstract [Objective] This paper aims to systematically analyze the pollution characteristics and assess the environmental risks of volatile organic compounds (VOCs) in water bodies during low-flow, normal-flow, and high-flow periods of a drinking water-source river in Guangdong Province, based on comprehensive target and suspect screening strategies by using high-resolution mass spectrometry. [Methods] Quantitative analysis of 60 VOCs in water was performed using purge and trap coupled with gas chromatography-triple quadrupole tandem mass spectrometry. A suspect screening method for 196 VOCs in water was established using headspace extraction coupled with gas chromatography-quadrupole time-of-flight mass spectrometry. These approaches enabled comprehensive detection and quantification of VOCs across different water seasons in the studied river section. [Results] The proposed targeted quantitative analysis detected 14 VOCs with mass concentrations ranging from 0.001 $\mu\text{g/L}$ to 16.363 $\mu\text{g/L}$, while the suspect screening method identified 53 VOCs in the river. Comparative analysis revealed that both the number of VOCs types and their concentrations in water bodies during the low-flow period exceeded those observed during the normal-flow and high-flow periods.

[收稿日期] 2025-10-22

[基金项目] 国家自然科学基金面上项目(42377368); 广东省基础与应用基础研究基金面上项目(2024A1515011534)

[通信作者] 黄东龙(1985—), 男, 工程师, 主要从事水环境监测、水处理和突发污染应急处置等工作, E-mail: 448378337@qq.com。

This disparity primarily resulted from the dilution effect associated with increased runoff during the high-flow period. [**Conclusion**] The ecological risk assessment indicates that, all monitoring sites during low-flow period and site B during normal-flow period exhibited low ecological risk, all other sites showed no risk during both normal-flow and high-flow periods.

Keywords high-resolution mass spectrometry volatile organic compounds (VOCs) raw water pollution characteristics risk assessment

挥发性有机物 (VOCs) 是指在常温、常压下具有较高饱和蒸汽压、易于从液态挥发至气态的一类有机化合物,通常具备较强的挥发性和脂溶性。其化学组成涵盖烷烃、烯烃、卤代烃等多种类型^[1]。VOCs 的来源多样,包括自然过程(如火山活动、植被释放、微生物活动等)和人为活动(如工业有机溶剂使用、农业面源污染、生活污水排放等)^[2]。这些化合物进入水体后将对水质及水生生态系统造成严重威胁。

近年来,基于高分辨质谱的水体 VOCs 的分析检测方法得到快速发展,主要有靶向定量和非(拟)靶向筛查等。靶向定量方法针对性强,能够依据预设指标选择适宜的分析策略,实现对已知 VOCs 的精确检测与准确定量。当前,气相色谱-质谱(GC-MS)联用技术已成为水体中 VOCs 靶向定量检测的主流手段。例如,刘建卓等^[3]采用顶空-固相微萃取结合气相色谱-三重四极杆质谱(GC-MS/MS)联用仪,实现了 51 种 VOCs 的同步检测。Huybrechts 等^[4]则采用吹扫捕集结合 GC-MS 技术,成功测定了斯凯尔特河水样中的 27 种氯化烷烃、烯烃、单环芳烃及氯化单环芳烃,检测限达纳克级水平。然而,靶向定量检测技术高度依赖标准物质与先验知识,其检测范围通常局限于预设的目标化合物清单,难以有效识别与评估环境中广泛存在的未知或非目标 VOCs 污染物。

非(拟)靶向筛查是一种结合高分辨质谱与计算工具的分析技术^[5]。该技术基于已知或预测的 VOCs 污染物列表,借助高分辨率质谱进行系统筛查,从而识别出传统靶向方法可能无法覆盖的微量 VOCs 污染物。例如,Ccanccapa-Cartagena 等^[6]使用拟靶向筛查对图里亚河流域水和沉积物中新出现的 VOCs 污染物进行评估,成功鉴定出 68 种 VOCs,其中水样中检出 45 种 VOCs,沉积物中检出 42 种 VOCs,所有鉴定出的化合物均被归类为 2 级识别置信度。Hinnenkamp 等^[7]采用拟靶向筛查方法对污水处理厂废水进行分析,共检出 42 种 VOCs 符合预设识别标准。其中,8 种化合物通过比准确质量数、

保留时间及碎片离子谱图与标准品得到确认。然而,目前水中 VOCs 的检测仍以靶向筛查为主,非(拟)靶向筛查技术在该领域的应用研究仍相对有限。

基于此,本研究采用 GC-MS/MS 与气相色谱-四极杆飞行时间质谱(GC-QTOF-MS),对广州市某饮用水源河流中的 VOCs 进行 3 个季度的靶向定量以及拟靶向筛查分析,旨在:(1)揭示饮用水源河段中已知与未知 VOCs 的污染特征与赋存状况;(2)分析饮用水源河段中 VOCs 的季节性变化规律;(3)评估其潜在的生态风险。研究结果为饮用水源河流水体中 VOCs 的来源解析、迁移转化行为与风险评估研究提供案例支撑,并为区域水环境安全管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验试剂

本研究试验过程中使用的主要试剂包括:60 种 VOCs 混合标准品(质量浓度为 2 000 mg/L),分别符合美国国家环境保护局(US EPA) 8260 方法要求,来源于 ANPEL-TRACE(实验室用标准物质与标准品,上海安谱瑾世标准技术服务有限公司,中国)。3 种替代物标准品(4-溴氟苯、甲苯-D8、二溴氟甲烷)及 2 种内标物(氟化苯、1,4-二氯苯-D4),质量浓度均为 2 000 mg/L,用于质量控制。其他辅助试剂包括超纯水(上海骏思仪器科技有限公司,中国)、甲醇(色谱纯,Merck,德国)、氯化钠(优级纯,上海晶纯生化科技股份有限公司,中国)、抗坏血酸(优级纯,上海安谱实验科技股份有限公司,中国)以及盐酸(体积比为 1:1)等。

1.2 样品采集及前处理

本研究选取了广州市某饮用水源型河流河段,分别于枯水期(2024 年 12 月)、平水期(2025 年 4 月)与丰水期(2025 年 7 月)在该河段取水口附近设置了 5 个采样点位,如图 1 所示。各点位沿河流流向自 E 至 A 依次分布,其中 A 为饮用水取水口,B 和 C 为小支流汇入位置。所有采样点位均平行采集 3 份样品,样品采集完成后立即置于 4 °C 冷藏保存。

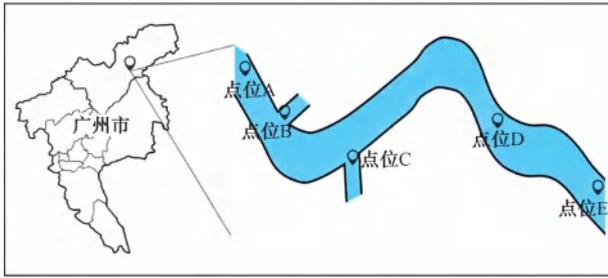


图 1 采样点位

Fig. 1 Location of Sampling Points

对于靶向定量样品,在 40 mL 棕色吹扫瓶中加入 25 mg 抗坏血酸及 100 μL 盐酸(体积比为 1:1)。随后,用微量注射器准确加入 10.0 μL 内标及替代物混合标准液,立即用带有聚四氟乙烯内衬硅胶垫的瓶盖密封拧紧,确保瓶内无顶空气隙且液面溢满,以防止挥发性目标物损失。

对于拟靶向筛查样品,在 22 mL 顶空瓶中加入 4 g 氯化钠和 10 mg 抗坏血酸,随后加入 10 mL 水样,并同步加入 10 μL 盐酸(体积比为 1:1)以保障目标组分的稳定性。接着使用微量注射器分别加入 200 μL 内标和替代物混合标准溶液,立即压盖

密封。

1.3 分析仪器及参数条件

1.3.1 水体 VOCs 靶向定量分析

水体 VOCs 靶向定量分析采用 Agilent 7890B-7000D GC-MS/MS,外接 TEKMAR 吹扫捕集装置。吹扫捕集条件:吹扫温度为 20 $^{\circ}\text{C}$;吹扫流量为 40 mL/min;吹扫时间为 11 min;干吹扫时间为 2 min;预脱附温度为 200 $^{\circ}\text{C}$;脱附温度为 250 $^{\circ}\text{C}$;脱附时间为 2 min;烘烤温度为 260 $^{\circ}\text{C}$;烘烤时间为 5 min。

气相色谱条件:色谱柱采用 DB-WAXUI (60.0 m \times 250.0 μm \times 0.5 μm)。进样口温度为 220 $^{\circ}\text{C}$;进样方式采用分流进样(分流比为 20:1)。程序升温:50 $^{\circ}\text{C}$ (2 min) \rightarrow 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ \rightarrow 70 $^{\circ}\text{C}$ (5 min) \rightarrow 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ \rightarrow 140 $^{\circ}\text{C}$ \rightarrow 8 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ \rightarrow 220 $^{\circ}\text{C}$ (5 min);载气采用高纯氮气,流量为 1.0 mL/min。

质谱条件:质谱仪使用电子电离(EI)方式离子化,标准电子能量为 70 eV。进样口温度为 250 $^{\circ}\text{C}$;传输线温度为 280 $^{\circ}\text{C}$;离子源温度为 230 $^{\circ}\text{C}$;采用多反应监测(MRM)模式进行检测。60 种 VOCs 的质谱参数如表 1 所示。

表 1 60 种 VOCs 质谱参数

Tab. 1 Mass Spectrometry Parameters for Targeted 60 VOCs

类别	物质名称	保留时间/min	定量离子对(m/z)	碰撞能/V	定性离子对(m/z)	碰撞能/V
卤代烃	氯丙烯	6.327	41.1~39.1	11	76.0~41.1	9
	二氯甲烷	8.613	83.9~49.0	3	85.9~49.0	14
	三氯甲烷	12.034	82.9~47.0	30	84.9~49.0	30
	一溴二氯甲烷	17.760	84.9~49.0	44	82.9~48.0	47
	1,1,2-三氯乙烷	21.709	98.9~61.0	17	96.9~61.0	18
	一氯二溴甲烷	23.111	128.9~48.0	55	126.9~48.0	50
	1,1,2,2-四氯乙烷	28.931	84.9~48.0	37	82.9~48.0	39
	六氯-1,3-丁二烯	29.103	226.8~191.8	19	224.8~189.9	20
	四氯乙烯	12.296	165.8~130.9	22	163.8~128.9	23
	二溴甲烷	18.173	173.8~92.9	20	175.8~94.9	24
	1,3-二氯丙烷	19.031	78.0~41.1	6	76.0~41.1	7
	环氧氯丙烷	19.750	49.0~47.0	23	57.1~57.0	2
	1,2-二溴乙烷	21.857	108.9~93.6	54	106.9~92.9	58
	五氯乙烷	27.368	166.9~131.9	22	164.9~129.9	23
	六氯乙烷	27.520	202.8~167.8	18	200.8~165.8	21
	三溴甲烷	27.763	174.8~93.9	51	172.8~91.9	52
	芳香烃类	甲苯	13.130	91.0~65.0	18	92.0~91.0
乙苯		16.642	91.0~65.0	24	106.0~91.0	18
间-二甲苯		16.959	91.0~65.0	23	106.0~91.0	17

(续表1)

类别	物质名称	保留时间/min	定量离子对(m/z)	碰撞能/V	定性离子对(m/z)	碰撞能/V
	对二甲苯	17.196	91.0~65.0	19	106.0~91.0	14
	苯乙烯	21.785	104.0~78.0	18	103.0~77.0	14
	溴苯	24.993	157.9~77.0	21	155.9~77.0	22
	1,3-二氯苯	27.064	147.9~111.0	21	145.9~111.0	21
	1,4-二氯苯	27.777	147.9~111.0	18	147.9~75.0/145.9~111.0	32/17
	1,2-二氯苯	29.044	147.9~111.0	18	147.9~75.0/145.9~111.0	30/23
	1,2,4-三氯苯	32.328	181.9~146.9	28	179.9~144.9	27
	1,2,3-三氯苯	33.984	181.9~146.9	22	179.9~144.9	17
	萘	34.304	128.0~102.0	23	128.0~78.0	50
	异丙基苯	18.534	120.0~105.1	13	105.0~77.0	21
	邻二甲苯	19.098	106.0~91.0	17	91.0~65.0	20
	丙基苯	19.969	120.0~91.0	10	91.0~65.0	19
	氯苯	20.190	114.0~77.0	20	112.0~77.0	21
	叔丁基苯	20.980	134.1~119.1	5	134.1~91.0/119.0~91.0	23/13
	1,3,5-三甲苯	21.307	120.0~105.1	15	105.0~77.0	21
	仲丁基苯	21.386	134.1~105.1	24	105.0~77.0	7
	4-异丙基甲苯	22.168	134.1~119.1	14	119.0~91.0	17
	1,2,4-三甲基苯	22.719	120.0~105.1	15	105.0~77.0	21
	2-氯甲苯	23.508	126.0~91.0	13	91.0~65.0	22
	正丁基苯	23.771	92.0~91.0	15	91.0~65.0	15
	4-氯甲苯	23.983	126.0~91.0	21	91.0~65.0	14
醚类	二乙醚	4.740	74.1~59.0	2	74.1~45.1/59.0~39.1	13/15
	甲基叔丁基醚	5.090	73.1~43.1	17	73.1~45.1	28
	四氢呋喃	7.408	42.1~41.1	6	42.1~39.1/72.0~71.0	17/4
	4-氯苯甲醚	31.990	144.0~129.0	13	144.0~101.0/142.0~127.0	25/17
	2,4-二氯苯甲醚	36.545	175.9~160.9	11	160.9~132.9/175.9~132.9	13/23
酮类	4-甲基-2-戊酮	11.759	43.1~41.1	4	43.1~39.1/58.1~43.1	17/11
	α -紫罗兰酮	35.798	136.0~121.0	8	136.0~77.0/121.0~77.0	27/21
	β -紫罗兰酮	37.339	177.1~162.1	17	177.1~147.1	27
酯类	甲基丙烯酸甲酯	11.522	69.0~41.1	7	100.0~41.1	17
	甲基丙烯酸乙酯	13.260	99.0~43.1	15	69.0~41.1	9
腈类	丙腈	12.577	54.1~52.1	32	54.1~54.0	2
	氯乙腈	26.398	77.0~50.0	8	75.0~48.0	7
硝基化合物	硝基苯	34.202	123.0~77.0	14	77.0~51.0	20
	2-硝基丙烷	16.267	43.1~41.1	6	43.1~39.1/41.1~39.1	20/11
醛类	糠醛	28.207	96.0~95.0	15	95.0~39.1	18
致嗅物质	土臭素	35.758	112.0~97.0	11	112.0~69.0	40
	2-EMD	13.052	87.1~59.0	5	87.1~41.1/59.1~41.1	13/3
	2-EDD	18.118	115.1~69.0	6	115.1~41.1/69.1~41.1	20/7
	2-IDD	18.800	115.1~41.1	20	56.1~41.1/69.1~41.1	7/7
	2-甲基异茨醇	31.302	95.0~67.0	11	95.0~55.0	14

标准溶液的配制:100 mg/L 的 60 种 VOCs 混合标准溶液取 500 μ L 用甲醇将其稀释为 10 mg/L 工作液,再将工作液配制为 0.5~60.0 μ g/L 系列标准混合溶液。用甲醇将内标及替代物标准溶液稀释至 5 μ g/L,使用微量注射器加入到 40 mL 棕色吹扫瓶中。将标准系列溶液置于吹扫捕集自动进样装置中,于室温条件下依次进行吹扫、捕集、脱附,并自动导入 GC-MS 进行分析。采用 MRM 模式采集色谱信号,以目标物峰面积与内标峰面积之比对其相应浓度绘制标准工作曲线。

1.3.2 水体 VOCs 拟靶向筛查分析

水体 196 种 VOCs 拟靶向筛查采用 Agilent 8890 GC/7250 GC-QTOF-MS,配备有 CTC 自动进样器(多功能全自动进样器,CTC Analytics AG,瑞士)。

CTC 自动进样器条件:采用顶空进样模块,加热平衡温度为 65 $^{\circ}$ C;加热平衡时间为 20 min;取样针温度为 80 $^{\circ}$ C;进样体积为 1.0 mL。

气相色谱条件:色谱柱为 DB-WAXUI (60 m \times

250 μ m \times 0.5 μ m)。进样口温度为 220 $^{\circ}$ C;载气为氦气;进样模式采用分流进样(分流比为 20:1);柱流量为 1.0 mL/min,恒流模式。升温程序:35 $^{\circ}$ C 保持 5 min,以 5 $^{\circ}$ C/min 的速率升至 120 $^{\circ}$ C,保持 3 min,再以 12 $^{\circ}$ C/min 的速率升至 230 $^{\circ}$ C,保持 5 min。

质谱条件:质谱仪离子源为 EI 离子源。TOF 质量准确度 <2 mg/L(在 m/z 为 271.9867),TOF 质量分辨率(FWHM) >25 000(在 m/z 为 271.9867 处),与采集速率无关。TOF 质量范围为质荷比 20~3 000,四极杆分离质量范围为质荷比 20~1 050。离子源温度为 230 $^{\circ}$ C,离子化能量为 70 eV,接口温度为 250 $^{\circ}$ C,四极杆温度为 150 $^{\circ}$ C。扫描模式采用全扫描(Scan),扫描分子量为 35~300 u。

数据处理:在 Agilent Masshunter 定性软件中使用自建的 PCDL 数据库分析数据,构建包含 196 种化合物的两级置信度 PCDL 数据库^[8-9],具体化合物信息如表 2 所示。获得各化合物响应值后使用 Microsoft Excel 2019 进行统计分析。

表 2 196 种化合物名称、分子式、CAS 号、精确质量数

Tab. 2 Names, Molecular Formulas, CAS Numbers, and Precise Masses for 196 VOCs

类别	中文名称	分子式	CAS 号	精确质量数
卤代烃	1,1-二氯丙烯	C ₃ H ₄ Cl ₂	563-58-6	109.969 0
	1,2-二氯乙烷	C ₂ H ₄ Cl ₂	107-06-2	97.969 0
	二溴甲烷	CH ₂ Br ₂	74-95-3	171.852 0
	反式-1,3-二氯丙烯	C ₃ H ₄ Cl ₂	10061-02-6	109.969 0
	1,1,2-三氯乙烷	C ₂ H ₃ Cl ₃	79-00-5	131.930 0
	五氯乙烷	C ₂ HCl ₅	27766	199.852 0
	六氯乙烷	C ₂ Cl ₆	67-72-1	233.813 0
	六氯-1,3-丁二烯	C ₄ Cl ₆	87-68-3	257.813 0
	1,2-二溴-3-氯丙烷	C ₃ H ₅ Br ₂ Cl	35407	233.845 0
	三氯一氟甲烷	CCl ₃ F	75-69-4	135.905 0
	二溴氟甲烷	CHBr ₂ F	1868-53-7	189.843 0
	1,1-二氯乙烯	C ₂ H ₂ Cl ₂	75-35-4	95.953 0
	碘甲烷	CH ₃ I	74-88-4	141.928 0
	溴甲烷	CH ₃ Br	74-83-9	93.942 0
	1-氯丁烷	C ₄ H ₉ Cl	109-69-3	92.039 0
	2,2-二氯丙烷	C ₃ H ₆ Cl ₂	594-20-7	111.985 0
	顺式-1,2-二氯乙烯	C ₂ H ₂ Cl ₂	156-59-2	95.953 0
	四氯化碳	CCl ₄	56-23-5	151.875 0

(续表2)

类别	中文名称	分子式	CAS 号	精确质量数
	1,1,1-三氯乙烷	C ₂ H ₃ Cl ₃	71-55-6	131.930 0
	二氯甲烷	CH ₂ Cl ₂	27639	83.953 0
	反式-1,2-二氯乙烯	C ₂ H ₂ Cl ₂	156-60-5	95.953 0
	氯仿	CHCl ₃	67-66-3	117.914 0
	四氯乙烯	C ₂ Cl ₄	127-18-4	163.875 0
	顺式-1,3-二氯丙烯	C ₃ H ₄ Cl ₂	10061-01-5	109.969 0
	三溴甲烷	CHBr ₃	75-25-2	249.763 0
	1,2,3-三氯丙烷	C ₃ H ₅ Cl ₃	96-18-4	145.946 0
	1,1,2,2-四氯乙烷	C ₂ H ₂ Cl ₄	79-34-5	165.891 0
	一溴二氯甲烷	CHBrCl ₂	75-27-4	74.036 8
	环氧氯丙烷	C ₃ H ₅ ClO	106-89-8	106.078 0
	1,1,1,2-四氯乙烷	C ₂ H ₂ Cl ₄	630-20-6	134.110 0
	1,2-二溴乙烷	C ₂ H ₄ Br ₂	106-93-4	185.868 0
	一氯二溴甲烷	CHBr ₂ Cl	124-48-1	205.813 0
	二氯二氟甲烷	CCl ₂ F ₂	75-71-8	119.934 5
	氯丁二烯	C ₄ H ₅ Cl	129-99-8	88.008 0
	三氯乙醛	C ₂ HCl ₃ O	75-87-6	145.909 3
	溴氯甲烷	CH ₂ BrCl	74-97-5	127.902 8
	3-氯丙烯	C ₃ H ₅ Cl	107-05-1	76.008 0
	氯乙烯	C ₂ H ₃ Cl	27398	61.992 3
	氯乙烷	C ₂ H ₅ Cl	75-00-3	64.008 0
	1,2-二氯丙烷	C ₃ H ₆ Cl ₂	78-87-5	111.984 7
	1,1-二氯乙烷	C ₂ H ₄ Cl ₂	75-34-3	97.969 0
卤代芳香烃	溴苯	C ₆ H ₅ Br	108-86-1	155.957 0
	对氯苯甲醚	C ₇ H ₇ ClO	623-12-1	142.019 0
	2,4-二氯苯甲醚	C ₇ H ₆ Cl ₂ O	553-82-2	175.980 0
	氟苯	C ₆ H ₅ F	462-06-6	96.038 0
	1,2,3-三氯苯	C ₆ H ₃ Cl ₃	87-61-6	179.930 0
	1,3-二氯苯	C ₆ H ₄ Cl ₂	541-73-1	145.969 0
	1,4-二氯苯	C ₆ H ₄ Cl ₂	106-46-7	145.969 0
	1,2,4-三氯苯	C ₆ H ₃ Cl ₃	120-82-1	179.930 0
	氯苯	C ₆ H ₅ Cl	108-90-7	120.094 0
	2-氯甲苯	C ₇ H ₇ Cl	95-49-8	126.024 0
	4-氯甲苯	C ₇ H ₇ Cl	106-43-4	126.024 0
	邻二氯苯	C ₆ H ₄ Cl ₂	95-50-1	145.969 0
	对溴氟苯	C ₆ H ₄ BrF	460-00-4	173.948 0

(续表2)

类别	中文名称	分子式	CAS 号	精确质量数	
芳香烃类	苜基氯	C ₇ H ₇ Cl	100-44-7	126.023 6	
	1,2,4-三甲苯	C ₉ H ₁₂	95-63-6	120.094 0	
	对伞花烃	C ₁₀ H ₁₄	99-87-6	134.110 0	
	苯	C ₆ H ₆	71-43-2	78.047 0	
	甲苯	C ₇ H ₈	108-88-3	92.063 0	
	乙苯	C ₈ H ₁₀	100-41-4	106.078 0	
	邻二甲苯	C ₈ H ₁₀	95-47-6	106.078 0	
	间二甲苯	C ₈ H ₁₀	108-38-3	106.078 0	
	对二甲苯	C ₈ H ₁₀	106-42-3	120.094 0	
	异丙苯	C ₉ H ₁₂	98-82-8	161.864 0	
	丙苯	C ₉ H ₁₂	103-65-1	125.964 0	
	叔丁基苯	C ₁₀ H ₁₄	35952	112.008 0	
	均三甲苯	C ₉ H ₁₂	108-67-8	134.110 0	
	仲丁基苯	C ₁₀ H ₁₄	135-98-8	120.094 0	
	苯乙烯	C ₈ H ₈	100-42-5	104.063 0	
	正丁基苯	C ₁₀ H ₁₄	104-51-8	134.110 0	
	间伞花烃	C ₁₀ H ₁₄	535-77-3	134.109 6	
	萘	C ₁₀ H ₈	91-20-3	128.063 0	
	醛类	1,2-二苯氧基乙烷	C ₁₄ H ₁₄ O ₂	104-66-5	214.099 4
		2-甲基丁醛	C ₅ H ₁₀ O	96-17-3	86.073 0
糠醛		C ₅ H ₄ O ₂	35796	96.021 0	
乙醛		C ₂ H ₄ O	75-07-0	44.026 2	
4-庚烯醛		C ₇ H ₁₂ O	929-22-6	112.088 8	
2-己烯醛		C ₆ H ₁₀ O	6728-26-3	98.073 2	
丙烯醛		C ₃ H ₄ O	107-02-8	56.026 2	
水杨醛		C ₇ H ₆ O ₂	32912	122.036 8	
十二醛		C ₁₂ H ₂₄ O	112-54-9	184.182 7	
柠檬醛		C ₁₀ H ₁₆ O	5392-40-5	152.120 1	
酮类		甲基异丁基酮	C ₆ H ₁₂ O	108-10-1	100.089 0
		2-己酮	C ₆ H ₁₂ O	591-78-6	100.089 0
	1,1-二氯丙酮	C ₃ H ₄ Cl ₂ O	513-88-2	92.003 0	
	α-紫罗兰酮	C ₁₃ H ₂₀ O	127-41-3	192.151 0	
	β-紫罗兰酮	C ₁₃ H ₂₀ O	14901-07-6	192.151 0	
	3-羟基-2-丁酮	C ₄ H ₈ O ₂	513-86-0	88.052 4	
	十二烷-3-酮	C ₁₂ H ₂₄ O	1534-27-6	184.182 7	
	2-癸酮	C ₁₀ H ₂₀ O	693-54-9	156.151 4	

(续表2)

类别	中文名称	分子式	CAS 号	精确质量数
酯类	丁酮	C ₄ H ₈ O	78-93-3	72.057 5
	丙烯酸甲酯	C ₄ H ₆ O ₂	96-33-3	86.037 0
	甲基丙烯酸甲酯	C ₅ H ₈ O ₂	80-62-6	100.052 0
	甲基丙烯酸乙酯	C ₆ H ₁₀ O ₂	97-63-2	114.068 0
	丁酸甲酯	C ₅ H ₁₀ O ₂	623-42-7	102.068 1
	苯甲酸甲酯	C ₈ H ₈ O ₂	93-58-3	102.068 1
	乙酸甲酯	C ₃ H ₆ O ₂	79-20-9	136.052 4
	丁酸异戊酯	C ₉ H ₁₈ O ₂	106-27-4	158.130 7
	2-甲基丁酸异丁酯	C ₉ H ₁₈ O ₂	2445-67-2	158.130 7
	油酸乙酯	C ₂₀ H ₃₈ O ₂	111-62-6	310.287 2
	亚油酸乙酯	C ₂₀ H ₃₆ O ₂	544-35-4	308.271 5
	δ-十二内酯	C ₁₂ H ₂₂ O ₂	713-95-1	198.162 0
	γ-十二内酯	C ₁₂ H ₂₂ O ₂	148051	198.162 0
	丙酸己酯	C ₉ H ₁₈ O ₂	2445-76-3	158.130 7
	异丁酸庚酯	C ₁₁ H ₂₂ O ₂	2349-13-5	186.162 0
	丁酸己酯	C ₁₀ H ₂₀ O ₂	2639-63-6	172.146 3
	乙酸己酯	C ₈ H ₁₆ O ₂	142-92-7	144.115 0
	反式-3-己烯乙酸酯	C ₈ H ₁₄ O ₂	3681-82-1	142.099 4
	丙酸庚酯	C ₁₀ H ₂₀ O ₂	2216-81-1	172.146 3
	丙烯酸乙酯	C ₅ H ₈ O ₂	140-88-5	100.052 4
	硬脂酸甲酯	C ₁₉ H ₃₈ O ₂	112-61-8	298.287 2
	亚油酸甲酯	C ₁₉ H ₃₄ O ₂	112-63-0	294.255 9
	邻苯二甲酸二丁酯	C ₁₆ H ₂₂ O ₄	84-74-2	278.151 8
	棕榈酸甲酯	C ₁₇ H ₃₄ O ₂	112-39-0	270.255 9
	邻苯二甲酸二异丁酯	C ₁₆ H ₂₂ O ₄	84-69-5	278.151 8
	5-己烯酸甲酯	C ₇ H ₁₂ O ₂	2396-80-7	128.083 7
	戊酸乙酯	C ₇ H ₁₄ O ₂	539-82-2	130.099 4
	辛酸乙酯	C ₁₀ H ₂₀ O ₂	106-32-1	172.146 3
	甲酸香叶酯	C ₁₁ H ₁₈ O ₂	105-86-2	182.130 7
	癸酸乙酯	C ₁₂ H ₂₄ O ₂	110-38-3	200.177 6
	癸酸甲酯	C ₁₁ H ₂₂ O ₂	110-42-9	186.162 0
氨基甲酸乙酯	C ₃ H ₇ NO ₂	51-79-6	89.047 7	
异丁酸丁酯	C ₈ H ₁₆ O ₂	97-87-0	144.115 0	
对苯二甲酸二辛酯	C ₂₄ H ₃₈ O ₄	6422-86-2	390.277 0	
醚类	乙醚	C ₄ H ₁₀ O	60-29-7	74.073 0
	甲基叔丁基醚	C ₅ H ₁₂ O	1634-04-4	88.089 0

(续表2)

类别	中文名称	分子式	CAS 号	精确质量数
	四氢呋喃	C ₄ H ₈ O	109-99-9	72.058 0
	2-乙基-5,5-二甲基-1,3-二噁烷	C ₈ H ₁₆ O ₂	768-58-1	144.115 0
	2-异丙基-5,5-二甲基-1,3-二噁烷	C ₉ H ₁₈ O ₂	7651-50-5	16.230 0
	二异丙基醚	C ₆ H ₁₄ O	108-60-1	31.049 3
	2,5,5-三甲基-1,3-二噁烷	C ₇ H ₁₄ O ₂	766-55-6	20.465 0
	二异丙醚	C ₆ H ₁₄ O	108-20-3	102.104 5
	甲基叔戊基醚	C ₆ H ₁₄ O	994-05-8	102.104 5
酚类	2,6-二甲基苯酚	C ₈ H ₁₀ O	576-26-1	42.097 7
	2-甲氧基-4-甲基苯酚	C ₈ H ₁₀ O ₂	93-51-6	138.068 1
	百里香酚	C ₁₀ H ₁₄ O	89-83-8	150.104 5
	2-甲氧基-4-丙烯基苯酚	C ₁₀ H ₁₂ O ₂	94-86-0	178.099 4
	2-甲氧基-4-乙炔基苯酚	C ₉ H ₁₀ O ₂	7786-61-0	150.068 1
	2,4-二叔丁基苯酚	C ₁₄ H ₂₂ O	96-76-4	206.167 1
	4-氯苯酚	C ₆ H ₅ ClO	106-48-9	128.002 9
	4-氯-2-甲基苯酚	C ₇ H ₇ ClO	1570-64-5	142.018 5
	2,5-二氯苯酚	C ₆ H ₄ Cl ₂ O	583-78-8	161.963 9
	2,4-二氯苯酚	C ₆ H ₄ Cl ₂ O	120-83-2	161.963 9
	4,5-二氯邻苯二酚	C ₆ H ₄ Cl ₂ O ₂	3428-24-8	177.958 8
	3,4-二氯苯酚	C ₆ H ₄ Cl ₂ O	95-77-2	161.963 9
	2,6-二氯苯酚	C ₆ H ₄ Cl ₂ O	87-65-0	161.963 9
	4,5-二氯邻苯二酚	C ₆ H ₄ Cl ₂ O ₂	3428-24-8	177.958 8
	4-叔丁基邻苯二酚	C ₁₀ H ₁₄ O ₂	98-29-3	166.099 4
	1-萘酚	C ₁₀ H ₈ O	90-15-3	144.057 5
醇类	异戊醇	C ₅ H ₁₂ O	123-51-3	88.088 8
	2-甲基-1-丁醇	C ₅ H ₁₂ O	137-32-6	88.088 8
	1-庚醇	C ₇ H ₁₆ O	111-70-6	116.120 1
	乙缩醛	C ₆ H ₁₄ O ₂	105-57-7	118.099 4
	2,4-己二烯-1-醇	C ₆ H ₁₀ O	—	98.073 2
	1-癸醇	C ₁₀ H ₂₂ O	112-30-1	158.167 1
	α-松油醇	C ₁₀ H ₁₈ O	98-55-5	154.135 8
	2-丁醇	C ₄ H ₁₀ O	78-92-2	74.073 2
烯烃类	1,3-丁二烯	C ₄ H ₆	106-99-0	54.047 0
	异松油烯	C ₁₀ H ₁₆	586-62-9	136.125 2
	柠檬烯	C ₁₀ H ₁₆	138-86-3	136.125 2
	1,13-十四碳二烯	C ₁₄ H ₂₆	21964-46-8	194.203 5
腈类	甲基丙烯腈	C ₄ H ₅ N	126-98-7	67.042 0

(续表2)

类别	中文名称	分子式	CAS 号	精确质量数
酸类	丙腈	C ₃ H ₅ N	107-12-0	55.042 0
	氯乙腈	C ₂ H ₂ ClN	107-14-2	74.988 0
	丙烯腈	C ₃ H ₃ N	107-13-1	53.027 0
	异戊酸	C ₅ H ₁₀ O ₂	503-74-2	102.068 1
	2-甲基丁酸	C ₅ H ₁₀ O ₂	116-53-0	102.068 1
	油酸	C ₁₈ H ₃₄ O ₂	112-80-1	282.255 9
	亚油酸	C ₁₈ H ₃₂ O ₂	60-33-3	280.240 2
含硫化合物	二硫化碳	CS ₂	75-15-0	75.944 0
	二甲基二硫	C ₂ H ₆ S ₂	624-92	93.991 1
	2-己硫醇	C ₆ H ₁₄ S	1679-06-7	118.081 6
	二乙基硫醚	C ₄ H ₁₀ S	352-93-2	90.050 3
	1-丁硫醇	C ₄ H ₁₀ S	109-79-5	90.050 3
含氮化合物	2-(乙硫基)乙醇	C ₄ H ₁₀ OS	110-77-0	106.045 2
	2-硝基丙烷	C ₃ H ₇ NO ₂	79-46-9	89.048 0
	2-甲氧基-3-异丙基吡嗪	C ₈ H ₁₂ N ₂ O	25773-40-4	152.095 0
	2-甲氧基-3-异丁基吡嗪	C ₉ H ₁₄ N ₂ O	24683-00-9	166.111 0
	硝基苯	C ₆ H ₅ NO ₂	98-95-3	123.032 0
	2-乙基-5-甲基吡嗪	C ₇ H ₁₀ N ₂	13360-64-0	122.084 4
	2,5-二乙基吡嗪	C ₈ H ₁₂ N ₂	13238-84-1	136.100 1
	对氯苯胺	C ₆ H ₆ ClN	106-47-8	127.018 9
	1,4-丁二胺	C ₄ H ₁₂ N ₂	110-60-1	88.100 1
	其他	土臭素	C ₁₂ H ₂₂ O	16423-19-1
2-甲基异莰醇		C ₁₁ H ₂₀ O	2371-42-8	168.151 0
7,9-二叔丁基-1-氧杂螺[4.5]癸-6,9-二烯-2,8-二酮		C ₁₇ H ₂₄ O ₃	82304-66-3	276.172 5
氘代甲苯		C ₇ D ₈	2037-26-5	100.113 0
氘代对二氯苯		C ₆ D ₄ Cl ₂	3855-82-1	149.994 0
2-乙基-4-甲基-1,3-二氧戊环		C ₅ H ₁₀ O ₂	4359-46-0	240.281 7
十七烷		C ₁₇ H ₃₆	629-78-7	128.156 5
壬烷		C ₉ H ₂₀	111-84-2	58.041 9
环氧丙烷		C ₃ H ₆ O	75-56-9	61.052 8
乙醇胺		C ₂ H ₇ NO	141-43-5	116.083 7
双丙酮醇		C ₆ H ₁₂ O ₂	123-42-2	152.047 3
香兰素		C ₈ H ₈ O ₃	121-33-5	116.084 0
7,9-二叔丁基-1-氧杂螺[4.5]癸-6,9-二烯-2,8-二酮		C ₁₇ H ₂₄ O ₃	82304-66-3	109.969 0

1.4 质量保证与质量控制(QA/QC)

1.4.1 靶向定量方法

在样品采集过程中,同步设置运输空白与全程序空白以监控潜在污染。运输空白于实验室内制备,将40 mL棕色样品瓶装满超纯水,并预先加入盐酸与抗坏血酸,采样全程保持密封,用于评估运输与保存过程中的污染引入情况。全程序空白同样于实验室内以超纯水制备并加入抗坏血酸,在采样现场与其他样品同时开盖加入盐酸,以反映现场操作可能带来的污染。

为评估方法的准确度与精密度,分别制备了空白加标和基质加标样品。空白加标样品通过向超纯水中加入定量混合标准品制备,用于评估方法准确度;基质加标样品则通过向水源取水口水样中加入等量标准品制备,并设置平行样,用于考察方法在实际基质中的精密度。所有质控样品均与实际样品同步进行前处理与仪器分析。

在仪器分析阶段,每次样品测定前均重新配制系列浓度梯度标准溶液以建立校准曲线,确保定量准确性。同步开展的基质加标回收率计算作为关键质控指标,用于保障每批次分析结果的可靠性。

1.4.2 拟靶向筛查分析

在样品采集阶段,同步设置运输空白与全程序空白以监控污染来源。运输空白于实验室内制备,在22 mL顶空瓶中加入4 g氯化钠、10 mL超纯水以及盐酸,全程密封运输,用于评估运输与保存过程中的污染。全程序空白于实验室内装入4 g氯化钠与10 mL超纯水,在采样现场与其他样品同时加入盐酸,以模拟现场操作的影响。

为验证方法精密度,对加标质量浓度为100 $\mu\text{g/L}$ (60种VOCs)的超纯水空白样品进行6次平行测定,并调用已构建的PCDL数据库(个人化合物数据库与谱库,安捷伦科技有限公司,美国)对采集数据进行定性筛查。

为评估方法准确度,对水源取水口水样进行混合目标物加标(加标质量浓度为200 $\mu\text{g/L}$),与实际样品同步测定,并通过计算实际检出化合物与加标化合物数量之比进行评价。

在仪器分析阶段,每批次样品测定时均设置2个空白试验,于22 mL顶空瓶中加入4 g氯化钠与10 mL超纯水,与样品同步进行分析。

1.5 风险评价

生态风险评估是评价水体中VOCs对水生生态系统潜在危害的重要手段。本研究采用生态风险商(RQ)作为评估指标,计算如式(1)~式(2)。

$$R_{\text{RQ}} = \frac{M}{P} \quad (1)$$

$$P = \frac{C}{A} \quad (2)$$

其中: R_{RQ} ——RQ;

M ——污染物的环境质量浓度, $\mu\text{g/L}$;

P ——预测无效应质量浓度, $\mu\text{g/L}$;

C ——慢性毒性值,参照US EPA污染预防数据库PBT(持久性、生物累积性和毒性物质信息数据库,美国国家环境保护局,美国);

A ——评估因子,取值为100^[10]。

为评价饮用水取水口附近水体中目标化合物的总体生态风险,将各检出物质的生态风险数值采取叠加的形式分别计算各点位总体生态风险,具体如式(3)。

$$R_{\text{总}} = R_1 + R_2 + \dots + R_n \quad (3)$$

其中: $R_{\text{总}}$ ——总体生态风险值;

R_1 ——第1种被检出目标化合物的个体生态风险值;

R_2 ——第2种被检出目标化合物的个体生态风险值;

R_n ——第 n 种被检出目标化合物的个体生态风险值。

根据RQ值的范围,生态风险分为4个等级:无明显风险($\text{RQ} < 0.010$)、低风险($0.010 \leq \text{RQ} < 0.100$)、中风险($0.100 \leq \text{RQ} < 1.000$)、高风险($\text{RQ} \geq 1.000$)。

2 结果与讨论

2.1 水体VOCs分析方法表征情况

2.1.1 靶向定量分析方法表征情况

目前已建立60种VOCs的定量方法,包括16种卤代烃、24种芳香烃、5种醚类、3种酮类、2种酯类、2种腈类、2种硝基化合物、1种醛类以及5种致嗅物质,各参数信息如表3所示。该方法检测的各化合物线性较好, $R^2 > 0.99$,线性值为0.2~60.0 $\mu\text{g/L}$,方法检出限为0.03~0.22 $\mu\text{g/L}$,方法测定下限为

0.064 ~ 0.868 μg/L, 加标回收率为 71.28% ~ 106.95%, 本方法准确度高、重复性好, 可以满足同时测定水中 60 种 VOCs 的要求。

在方法可靠性上, 本文建立的靶向定量分析方法与文献中报道的方法性能相当。例如, 毛燕青等^[11]建立了基于吹扫捕集-全二维气相色谱/飞行

时间质谱 (PT/GC×GC-TOFMS) 的分析方法, 其加标回收率为 60.1% ~ 128.7%, 相对标准偏差为 0.8% ~ 19.5%, 已成功应用于多种水体中 VOCs 的检测。Wu 等^[12]开发的 GC×GC-TOFMS 分析方法的精密度 (RSD) < 19.3%, 加标回收率为 50.0% ~ 124.0%, 能够有效鉴定水样中 100 多种目标与非目标化合物。

表 3 化合物名称、回归方程、检出限、定量限等参数

Tab. 3 Compound Name, Regression Equation, Detection Limit, Quantification Limit and Other Parameters

类别	物质名称	回归方程	R ²	检出限/ (μg · L ⁻¹)	定量限/ (μg · L ⁻¹)	平均加标回收率			
						5 μg/L	10 μg/L	50 μg/L	
卤代烃	氯丙烯	y=0.133x+0.008 4	0.999 2	0.03	0.14	80.89%	85.25%	98.60%	
	二氯甲烷	y=0.223x-8.880 7	0.997 6	0.14	0.56	74.87%	97.55%	105.52%	
	三氯甲烷	y=0.377x-0.142 1	0.998 5	0.07	0.30	81.21%	71.62%	92.37%	
	一溴二氯甲烷	y=0.401x-0.133 3	0.999 5	0.10	0.39	75.98%	75.87%	91.16%	
	1,1,2-三氯乙烷	y=0.849 0x-0.235 9	0.997 7	0.07	0.26	72.33%	78.51%	93.90%	
	一氯二溴甲烷	y=0.196x-0.098 8	0.998 8	0.10	0.40	73.03%	93.55%	74.30%	
	1,1,2,2-四氯乙烷	y=0.651x-0.340 1	0.994 3	0.13	0.52	98.13%	87.53%	86.94%	
	六氯-1,3-丁二烯	y=2.263x-0.222 0	0.999 1	0.08	0.33	94.14%	105.05%	80.48%	
	四氯乙烯	y=0.855x+0.181 4	0.997 1	0.02	0.06	75.94%	103.14%	90.40%	
	二溴甲烷	y=1.327x-0.610 5	0.994 8	0.07	0.29	90.20%	86.27%	97.20%	
	1,3-二氯丙烷	y=0.489x-0.378 9	0.993 7	0.06	0.24	85.91%	101.27%	85.33%	
	环氧氯丙烷	y=0.007x-0.005 3	0.995 3	0.08	0.30	90.06%	77.21%	81.53%	
	1,2-二溴乙烷	y=0.002x-0.001 1	0.997 4	0.12	0.49	73.72%	85.71%	95.90%	
	五氯乙烷	y=0.372x-0.309 3	0.995 3	0.03	0.14	84.99%	75.30%	89.97%	
	六氯乙烷	y=0.185x-0.134 3	0.998 1	0.06	0.22	73.32%	84.84%	93.43%	
	三溴甲烷	y=0.266x-0.083 3	0.998 1	0.09	0.34	95.73%	105.20%	88.74%	
	芳香烃类	甲苯	y=1.647x+0.024 4	0.995 4	0.09	0.34	86.66%	76.32%	78.02%
		乙苯	y=8.303x+0.783 3	0.996 2	0.13	0.54	84.41%	79.39%	75.44%
		间-二甲苯	y=7.728x+0.551 4	0.999 9	0.07	0.27	76.21%	89.63%	82.04%
对二甲苯		y=7.441x-1.834 5	0.998 8	0.14	0.55	84.13%	72.83%	92.63%	
苯乙烯		y=1.493x-0.297 5	0.998 6	0.09	0.35	85.04%	83.46%	85.42%	
溴苯		y=2.406x-0.127 2	0.999 4	0.10	0.38	91.41%	102.80%	84.87%	
1,3-二氯苯		y=4.014x-1.457 1	0.995 4	0.12	0.47	101.75%	97.09%	86.69%	
1,4-二氯苯		y=2.374x-0.242 3	0.998 9	0.22	0.87	96.42%	105.86%	81.45%	
1,2-二氯苯		y=2.564x-0.933 0	0.996 5	0.08	0.30	101.69%	74.03%	84.03%	
1,2,4-三氯苯		y=2.475x-0.497 7	0.997 7	0.07	0.26	106.00%	98.85%	80.40%	
1,2,3-三氯苯		y=1.882x-0.171 1	0.997 7	0.07	0.28	103.30%	97.51%	89.03%	
萘		y=1.254x-0.151 5	0.999 3	0.11	0.42	79.25%	71.28%	90.51%	
异丙基苯		y=8.157x-0.853 6	0.998 4	0.06	0.22	73.97%	87.53%	82.49%	
邻二甲苯		y=6.069x+2.654 0	0.994 8	0.12	0.47	80.49%	84.65%	92.46%	
丙基苯		y=12.096x-0.787 2	0.995 5	0.11	0.42	91.75%	101.34%	80.68%	

(续表3)

类别	物质名称	回归方程	R^2	检出限/ ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	定量限/ ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	平均加标回收率		
						5 $\mu\text{g/L}$	10 $\mu\text{g/L}$	50 $\mu\text{g/L}$
醚类	氯苯	$y=1.223x+0.6069$	0.9992	0.04	0.17	78.69%	77.76%	81.92%
	叔丁基苯	$y=4.316x+0.0455$	0.9999	0.11	0.46	85.65%	98.47%	99.13%
	1,3,5-三甲苯	$y=7.275x-3.1787$	0.9977	0.12	0.46	88.25%	74.80%	84.01%
	仲丁基苯	$y=1.537x-0.1115$	0.9949	0.09	0.38	71.74%	76.76%	91.60%
	4-异丙基甲苯	$y=2.775x+0.6187$	0.9979	0.10	0.39	84.65%	91.75%	90.59%
	1,2,4-三甲苯	$y=4.904x-1.3799$	0.9993	0.08	0.32	91.56%	99.35%	106.37%
	2-氯甲苯	$y=2.582x+1.4564$	0.9971	0.09	0.35	103.70%	104.41%	99.24%
	正丁基苯	$y=1.255x+0.0023$	0.9967	0.10	0.40	95.59%	95.87%	93.70%
	4-氯甲苯	$y=3.531x+0.9297$	0.9938	0.02	0.07	91.51%	84.13%	90.31%
	二乙醚	$y=0.186x-0.131$	0.9997	0.04	0.17	73.37%	75.29%	88.09%
	甲基叔丁基醚	$y=0.3177x-0.1936$	0.9966	0.08	0.30	85.52%	87.26%	96.22%
	四氢呋喃	$y=0.050x-0.0293$	0.9984	0.09	0.34	87.80%	85.13%	98.82%
	4-氯苯甲醚	$y=0.835x-0.1361$	0.9948	0.12	0.49	103.78%	76.16%	97.16%
	2,4-二氯苯甲醚	$y=0.311x-0.0919$	0.9945	0.09	0.38	94.96%	73.22%	99.37%
酮类	4-甲基-2-戊酮	$y=0.054x-0.0318$	0.9979	0.11	0.43	104.17%	90.58%	89.09%
	α -紫罗兰酮	$y=0.251x-0.1562$	0.9973	0.05	0.20	85.74%	73.86%	101.21%
	β -紫罗兰酮	$y=0.122x-0.0682$	0.9996	0.05	0.20	79.96%	79.87%	106.95%
酯类	甲基丙烯酸甲酯	$y=0.259x-0.1563$	0.9992	0.08	0.32	105.65%	87.96%	86.44%
	甲基丙烯酸乙酯	$y=0.427x-0.1498$	0.9976	0.11	0.42	80.73%	81.63%	87.69%
腈类	丙腈	$y=0.186x-0.151$	0.9961	0.20	0.80	94.82%	98.42%	87.93%
	氯乙腈	$y=0.011x-0.0099$	0.9988	0.07	0.26	99.22%	91.58%	100.38%
硝基化合物	硝基苯	$y=0.057x-0.0274$	0.9968	0.09	0.35	73.80%	77.67%	95.00%
	2-硝基丙烷	$y=0.014x-0.0068$	0.9991	0.09	0.35	72.39%	72.02%	98.37%
醛类	糠醛	$y=0.007x-2.6578$	0.9994	0.19	0.78	88.39%	95.26%	93.10%
致嗅物质	土臭素	$y=0.338x-0.2220$	0.9973	0.09	0.34	90.65%	81.27%	98.18%
	2-乙基-4-甲基-1,3-二氧戊环	$y=0.526x-0.1488$	0.9969	0.09	0.34	78.85%	87.55%	76.52%
	2-乙基-5,5-二甲基-1,3-二氧杂环乙烷	$y=2.398x-1.769$	0.9987	0.06	0.23	87.25%	88.47%	93.46%
	2-异丙基-5,5-二甲基-1,3-二氧杂环己烷	$y=0.679x-0.0911$	0.9947	0.09	0.70	87.83%	96.75%	98.18%
	2-甲基异茨醇	$y=0.174x-0.1121$	0.9983	0.04	0.18	90.01%	84.78%	98.65%

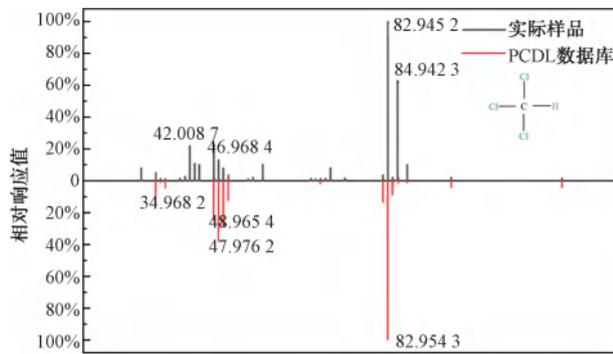
2.1.2 拟靶向筛查表征情况

本研究自建的 PCDL 数据库包括置信等级 1 级 VOCs 共计 60 种,2 级 136 种。在精密度方面,6 组质控样品中加标 60 种 VOCs 后,平均有 53 种 VOCs 被准确识别,识别率为 88.33%。在准确度方面,对加标质量浓度为 200 $\mu\text{g/L}$ 混合目标物(60 种 VOCs)的实际水样进行分析,共检出 VOCs 51 种,检

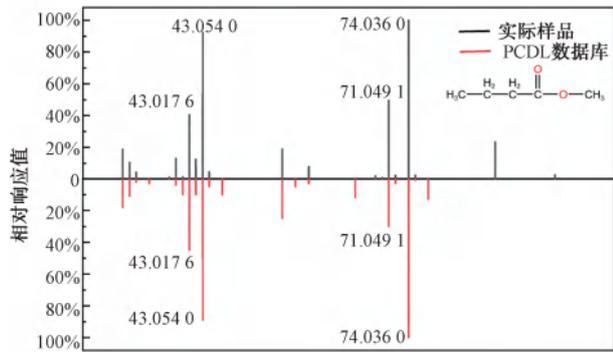
出率为 85%。该方法灵敏度高、分辨率优良,具备良好的重复性与稳定性。

图 2 展示了三氯甲烷(PCDL 数据库中置信度 L1)与丁酸甲酯(置信度 L2)在实际样品中的质谱图与 PCDL 数据库中参考谱图的对比结果[图 2(a)为实测谱图,图 2(b)为数据库谱图]。对比分析表明:具有标准品的三氯甲烷实测谱图与数据库谱图

匹配度较高,展现出 L1 级鉴定结果具有较高的可靠性;而未配备标准品的丁酸甲酯,其谱图整体仍具备可匹配的特征离子与裂解规律,符合 L2 级推定性鉴定的结果。



(a) 三氯甲烷在实际样品(上半部分)与PCDL数据库中的质谱图(下半部分)对比



(b) 丁酸甲酯在实际样品(上半部分)与PCDL数据库中的质谱图(下半部分)对比

图2 实际样品与PCDL库中质谱图对比

Fig. 2 Comparison of Actual Samples and Mass Spectra in the PCDL library

相较于游亦农等^[13]基于 GC×GC-TOFMS 技术,通过特征离子峰、精确质量数、保留指数偏差和 NIST 谱库(标准参考数据库,美国国家标准与技术研究院,美国)匹配定性分析太湖流域水样的研究方法,本研究购买标准品建立 PCDL 库,不仅提供了精确质量数,更包含了标准品的保留时间信息,提升鉴定的准确性。

2.2 饮用水源型河段中 VOCs 的污染特征

2.2.1 靶向定量分析检出情况

表 4 列出了平水期与丰水期在饮用水源型河段中不同点位 VOCs 靶向定量分析的检出情况。枯水期共检出一溴二氯甲烷、三氯甲烷、二溴一氯甲烷、氯乙腈、糠醛、丙腈、1-氯丁烷、2-甲基异茨醇、土臭素,质量浓度在 0.001~16.363 μg/L。平水期共检出四氢呋喃、甲苯、一溴二氯甲烷、三氯甲烷、1,1,2-三氯乙烷、二溴一氯甲烷、糠醛 7 种 VOCs,质量浓度在 0.130~1.363 μg/L。丰水期则检出三氯甲烷、二乙醚、氯乙腈、一溴二氯甲烷、叔丁基甲基醚 5 种 VOCs,质量浓度在 0.096~0.804 μg/L。其他 VOCs 如二乙醚、1,1-二氯乙烯、碘甲烷、1-氯丁烷等 40 种 VOCs 在所有水样中的检测结果都低于它们各自的检出限,因而,未在表中列出。

从空间分布来看,点位 B 和点位 C 作为水源型河段的支流,检出的 VOCs 种类最多,除了枯水期外点位 B 的三氯甲烷均高于点位 C,推测与其邻近工业园有关^[14]。沿河流流向分析,点位 A 处于所有检测点位中最下游的位置,易受上游污染累积影响,从而产生污染物叠加效应^[15],这可能是该点位 VOCs

表 4 枯水期、平水期与丰水期饮用水源中不同点位 VOCs 靶向定量检出情况

Tab. 4 Targeted Quantitative Detection of VOCs at Different Sampling Sites in Drinking Water Source during Low-Flow, Normal-Flow, and High-Flow Periods

化合物名称	枯水期/(μg·L ⁻¹)					平水期/(μg·L ⁻¹)					丰水期/(μg·L ⁻¹)				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
四氢呋喃	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.370	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
甲苯	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.161	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
一溴二氯甲烷	1.418	1.406	1.457	ND	ND	ND	0.130	0.137	ND	ND	ND	0.111	ND	ND	ND
三氯甲烷	0.135	0.105	0.525	ND	ND	ND	1.363	0.715	ND	ND	0.419	0.804	0.429	ND	ND
1,1,2-三氯乙烷	ND	ND	ND	ND	ND	0.324	ND	ND	0.324	0.324	ND	ND	ND	ND	ND
二溴一氯甲烷	0.005	0.002	0.010	0.001	0.001	0.260	0.262	0.262	0.259	ND	ND	ND	ND	ND	ND
二乙醚	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.044	ND	ND
氯乙腈	ND	ND	0.013	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.136	ND	ND	ND

(续表4)

化合物名称	枯水期/($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)					平水期/($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)					丰水期/($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
叔丁基甲基醚	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.096	ND	0.118	ND	ND
糠醛	0.487	0.729	0.429	0.226	0.539	1.357	ND	ND	ND	0.308	ND	ND	ND	ND	ND
丙腈	3.387	3.356	3.280	3.563	3.490	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
1-氯丁烷	1.547	1.577	1.545	1.559	1.547	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
2-甲基异茨醇	ND	ND	5.605	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
土臭素	ND	3.843	16.363	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

注:ND表示未检出。

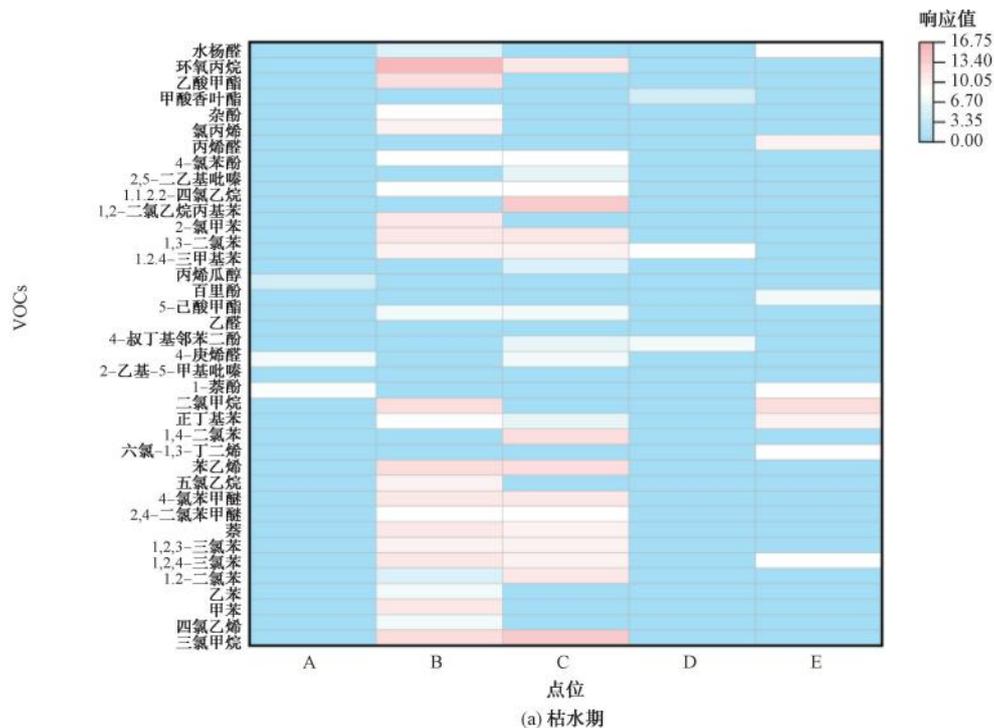
检出种类较多的主要原因。

从时间分布来看,枯水期 VOCs 的检出种类与浓度最高,丰水期最低。这一规律主要可归因于两方面水文效应:枯水期径流量减少导致污染物不易扩散而趋于聚集;相反,丰水期径流量显著增大,对水体中污染物产生显著的稀释作用^[16-17]。在枯水期,1-氯丁烷在所有采样点位均有检出。该物质作为工业生产中常用的有机合成中间体与溶剂,其普遍存在提示该区域可能受到持续性工业废水排放的影响^[18]。此外,枯水期水样中同时检出 2-甲基异茨醇与土臭素 2 种致嗅物质。其中土臭素的检测质量浓度为 16.363 ng/L,已超过《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)中规定的限值(10 ng/L)。这 2 种物质均为藻类和放线菌的代谢产物^[19],其在水

体中出现可能与上一丰水期蓝藻水华大量增殖、衰亡后汇入沉积物,并在枯水期发生分解释放有关^[20]。

2.2.2 拟靶向筛查分析检出情况

图 3 列出了枯水期、平水期与丰水期在饮用水源型河段中不同点位 VOCs 拟靶向筛查的检出情况,响应值为峰面积。枯水期共检出 39 种 VOCs,检出率为 19.90%;平水期共检出 38 种 VOCs,检出率为 19.39%;丰水期共检出 32 种 VOCs,检出率为 16.33%。以最主要的官能团或结构特征对这些 VOCs 进行分类,共可分为九大类,分别为卤代烃类、芳香烃类、醛类、酚类、杂环化合物、酯类、酮类、醚类以及醇类。这些 VOCs 的响应表明:区域内的工业生产以及农业活动对河流造成了潜在的 VOCs



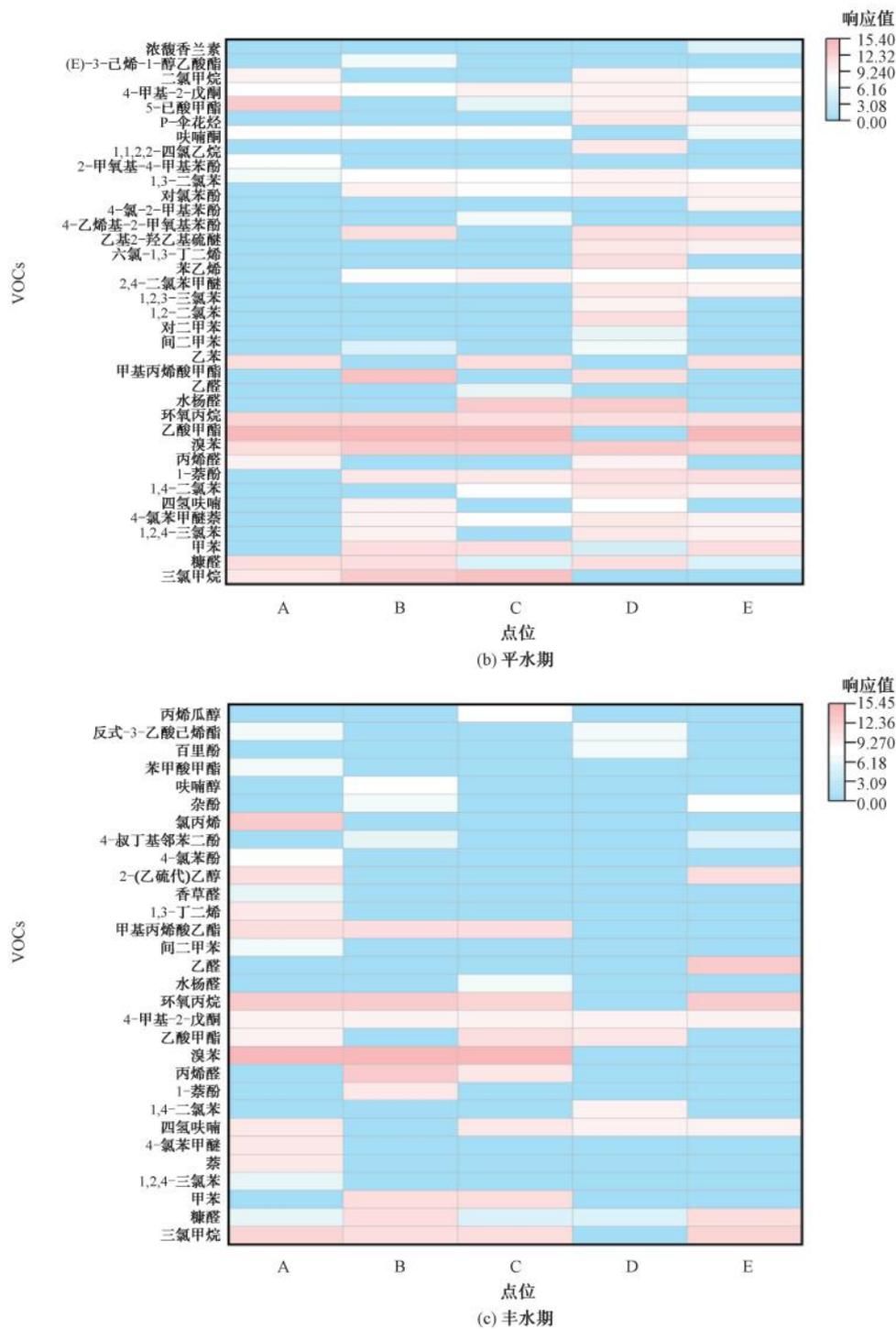


图3 枯水期、平水期与丰水期在饮用水源中不同点位 VOCs 拟靶向筛查的检出情况

Fig. 3 Detection Results of VOCs in Drinking Water Source during Low-Flow, Normal-Flow, and High-Flow Periods by Suspect Screening Method

污染。此外,如 1,1,2-三氯乙烷、二溴一氯甲烷、一溴二氯甲烷等 144 种 VOCs 在所有水样中的检测结果都低于空白响应值,因而未在表中列出。

从时间分布来看,河段中 VOCs 的污染水平呈现枯水期>平水期>丰水期的特征。这一分布模式主要受水文条件与污染物迁移转化的综合影响^[21],

与定量数据基本吻合。在空间分布上,不同水期呈现出明显的污染格局差异:在枯水期,点位 B 与点位 C 检出的 VOCs 种类与浓度最高。这与二者所处的水文位置有关——均位于水源型河段支流与主河道的分叉口,易受多种污染来源共同影响,污染负荷相对较大^[14];在平水期,点位 B、点位 C 和点位 E 均检出乙酸甲酯、溴苯与丙烯醛,响应值为 12.32~15.40。这些物质均为典型的化工合成原料或中间体,其同步出现提示该区域可能存在化学品泄漏或非法倾倒等突发性或间歇性工业污染输入^[22];在丰水期,点位 A、点位 B、点位 C 中溴苯仍维持较高响应水平,同时新增检出甲基丙烯酸乙酯、环氧丙烷、4-甲基-2-戊酮、三氯甲烷等 VOCs,响应值普遍较高,表明污染源结构可能发生变化。

2.3 靶向定量与拟靶向筛查方法比对

综合分析靶向定量与拟靶向筛查的数据,发现四氢呋喃、甲苯、三氯甲烷及糠醛为 2 种方法共同检出的 VOCs。然而,2 种方法在检出能力上表现出显著差异,反映出各自不同的技术特点与应用价值。

在检测已知低浓度 VOCs 方面,靶向定量方法展现出更高的灵敏度。二乙醚、一溴二氯甲烷、二溴一氯甲烷、氯乙腈、叔丁基甲基醚以及 1,1,2-三氯乙烷,仅靶向定量中检出。可能是由于靶向定量分析预设的分析目标和优化的检测条件,在特定化合物的检出限方面往往更低。刘建卓等^[3]对 51 种水体异味物质的检出限达 0.4 ng/L。相比之下,拟靶向筛查分析需要同时检测所有离子,其整体检出限往往会受到限制^[13]。因此,当水中 VOCs 信息明确时,靶向定量方法更具优势。

在发现未知污染物方面,拟靶向筛查则表现出独特价值。拟靶向筛查分析中检出的水杨醛、呋喃醇、乙基 2-羟乙基硫醚、浓馥香兰素等 48 种 VOCs,在靶向定量中未检出。这些很可能是传统检测清单中被忽略的潜在污染物。Yang 等^[14]采用分散液-液微萃取结合气相色谱-质谱联用技术对饮用水进行非靶向筛查,结果识别出至少 8 种潜在未知的 VOCs。在北加利福尼亚萨克拉门托-圣华金河三角洲的研究中, Moschet 等^[23]使用 GC-QTOF-MS 开展非靶向筛查,不仅检出 16 种目标化合物,还通过精确质量数与保留时间匹配,额外识别出 42 种非目标化合物。因此,拟靶向分析方法能够有效突破靶向定量方法的预设局限,更全面地对环境中未知的污

染物进行风险筛查。

2.4 风险评价

如图 4 所示,枯水期所有点位的 RQ 为 0.023~0.031,平水期点位 B 的 RQ 为 0.013,这些点位均处于低风险水平($0.010 \leq RQ < 0.100$),其余各点位均未呈现明显风险。枯水期的 RQ 远高于平水期和丰水期,可能是河流流量的减少削弱了水体的稀释能力,导致水中 VOCs 浓度升高。这与 Beaudéau^[24]关于流量对污染物稀释效应的影响研究结论一致。丰水期监测结果显示:所有点位的 RQ 值均低于 0.010,表明目标化合物在当前浓度水平下对水体中的水生生物未产生可察觉的生态风险。

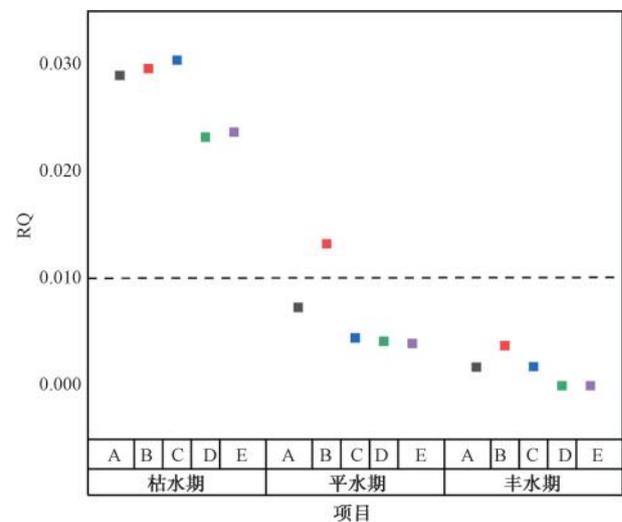


图 4 饮用水源型河段枯水期、平水期与丰水期不同点位 RQ

Fig. 4 RQ at Different Sites in the River Sections of Drinking Water Source during Low-Flow, Normal-Flow, and High-Flow Periods

3 结论

本研究对饮用水源型河段枯水期、平水期与丰水期的水体进行了 VOCs 的靶向定量与拟靶向筛查。靶向定量检出 14 种 VOCs,拟靶向筛查则检出 53 种。部分靶向定量检出的物质未在拟靶向中检出表明:靶向方法具有更低检出限,适用于明确目标的精准分析。拟靶向筛查结果揭示了水体 VOCs 污染的复杂性与隐蔽性,体现了该方法在环境分析中的独特价值及其与靶向定量的互补性。

在 VOCs 污染物分布方面,枯水期检出的 VOCs 种类与浓度均高于平水期和丰水期,这主要归因于丰水期的水文条件变化,增加的水流导致径流稀释

作用增强;同时,水动力提升促进了污染物的迁移扩散,二者共同降低了局部浓度。

在风险评估方面,除枯水期所有点位以及平水期点位 B 呈现低生态风险外,其余点位均未表现出明显生态风险。

参考文献

- [1] Bagawan K, Roshni M, Jagadeesan D. An overview of volatile organic compounds (VOCs) [J]. *Resonance*, 2022, 27: 2183-211. DOI: 10.1007/s12045-022-1513-0.
- [2] Wang S S, Zhang J, Zhang Y, et al. Review on source profiles of volatile organic compounds (VOCs) in typical industries in China [J]. *Atmosphere*, 2023, 14(5): 878.
- [3] 刘建卓, 陈秋玲, 吴岳峻, 等. 顶空-固相微萃取-气相色谱-三重四极杆质谱法同时测定水体中 51 种异味物质[J]. *质谱学报*, 2023, 44(4): 576-588.
Liu J Z, Chen Q L, Wu Y J, et al. Simultaneous determination of 51 odor-causing substances in water by headspace-solid phase microextraction-gas chromatography/triple quadrupole mass spectrometry[J]. *Journal of Chinese Mass Spectrometry Society*, 2023, 44(4): 576-588.
- [4] Huybrechts T, Dewulf J, Moerman O, et al. Evaluation of purge-and-trap-high-resolution gas chromatography-mass spectrometry for the determination of 27 volatile organic compounds in marine water at the ng L⁻¹ concentration level [J]. *Journal of Chromatography A*, 2000, 893(2): 367-382.
- [5] Manz K A, Feerick A, Braun J M, et al. Non-targeted analysis (NTA) and suspect screening analysis (SSA): A review of examining the chemical exposome [J]. *Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 2023, 33(4): 524-536.
- [6] Ceancapca-Cartagena A, Pico Y, Ortiz X. Suspect, non-target and target screening of emerging pollutants using data independent acquisition: Assessment of a Mediterranean River basin [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 687: 355-368. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.06.057.
- [7] Hinnenkamp V, Balsaa P, Schmidt T C. Target, suspect and non-target screening analysis from wastewater treatment plant effluents to drinking water using collision cross section values as additional identification criterion [J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2021, 414(1): 425-438.
- [8] Chary N S, Fernandez-Alba A R. Determination of volatile organic compounds in drinking and environmental waters [J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2012, 32: 60-75. DOI: 10.1016/j.trac.2011.08.011.
- [9] Kuo H W, Chiang T F, Lo I I, et al. VOC concentration in Taiwan's household drinking water [J]. *Science of the Total Environment*, 1997, 208(1/2): 41-47. DOI: 10.1016/S0048-9697(97)00274-X.
- [10] 张坤锋 赵少延, 孙兴滨, 等. 海拉尔河及傍河地下水饮用水源中挥发性有机物的污染特征与风险[J]. *河南师范大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(5): 74-86.
Zhang K F, Zhao S Y, Sun X B, et al. Pollution characteristics and risks of volatile organic compounds in drinking water sources of Hailar River and Nearby Rivers Groundwater[J]. *Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition)*, 2021, 49(5): 74-86.
- [11] 毛燕青, 郑森, 杨文龙, 等. 吹扫捕集-全二维气相色谱飞行时间质谱测定环境水体中 73 种挥发性有机物[J/OL]. *环境化学*, 2025. <https://link.cnki.net/urlid/11.1844.X.20250626.1630.028>.
Mao Y Q, Zheng S, Yang W L, et al. Determination of 73 volatile organic compounds in environmental water by purge and trap-comprehensive two-dimensional gas chromatography-time of flight mass spectrometry [J/OL]. *Environmental Chemistry*, 2025. <https://link.cnki.net/urlid/11.1844.X.20250626.1630.028>.
- [12] Wu M M, Ma Q, Li M. Online sequential analysis of volatile and semivolatile organic compounds in water matrices by double robotic sample preparations and dual-channel mono and comprehensive two-dimensional gas chromatography coupled with time-of-flight mass spectrometry system [J]. *Journal of Chromatography A*, 2024, 1726: 464963. DOI: 10.1016/j.chroma.2024.464963.
- [13] 游亦农, 黄奕华, 陈鸿展, 等. 基于 GC×GC-TOF MS 对太湖流域水体中有机物的非靶标识别[J]. *质谱学报*, 2023, 44(5): 685-695.
You Y N, Huang Y H, Chen H Z, et al. Non-target Identification of Organic Compounds in Water of Taihu Lake Based on GC×GC-TOF MS [J]. *Journal of Chinese Mass Spectrometry Society*, 2023, 44(5): 685-695.
- [14] Yang X Q, Wang C, Shao H C. Non-targeted screening and analysis of volatile organic compounds in drinking water by DLLME with GC-MS [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 694: 13349. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.07.300.
- [15] Coors A, Vollmar P, Sacher F, et al. Prospective environmental risk assessment of mixtures in wastewater treatment plant effluents-Theoretical considerations and experimental verification [J]. *Water Research*, 2018, 140: 56-66. DOI: 10.1016/j.watres.2018.04.031.
- [16] Qin P, Cao F M, Lu S Y, et al. Occurrence and health risk assessment of volatile organic compounds in the surface water of Poyang Lake in March 2017 [J]. *RSC Advances*, 2019, 9(39): 22609-22617.
- [17] 程云轩, 高秋生, 李捷, 等. 淮河流域南四湖可挥发性有机物污染特征及风险评价[J]. *环境科学*, 2021, 42(4): 1820-1829.
Cheng Y X, Gao Q S, Li J, et al. Characteristics of volatile organic compounds pollution and risk assessment of Nansi Lake in Huaihe River Basin[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(4): 1820-1829.

- [18] Martínez E, Lacorte S, Llobet I, et al. Multicomponent analysis of volatile organic compounds in water by automated purge and trap coupled to gas chromatography-mass spectrometry [J]. *Journal of Chromatography A*, 2002, 959(1/2): 181–190. DOI: 10.1016/S0021-9673(02)00439-9.
- [19] Hu T L, Chiang P C. Odorous compounds from a cyanobacterium in a water purification plant in central Taiwan [J]. *Water Research*, 1996, 30(10): 2522–2525.
- [20] 陈辉, 陈跃安, 余丽娟, 等. 黄浦江原水中土臭素冬季超标机制研究[J]. *环境科学学报*, 2019, 39(4): 1134–1139.
Chen H, Chen Y A, Yu L J, et al. Mechanism of geosmin over-limitation in winter in the raw water of Huangpu River[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, 39(4): 1134–1139.
- [21] Gollinopoulos S K, Kostopoulou M N, Lekkas T D. Volatile halogenated organics in the water supply system in Athens, Greece [J]. *Water Research*, 1998, 32(6): 1811–1818.
- [22] Pecoraino G, Scalici L, Avellone G, et al. Distribution of volatile organic compounds in Sicilian groundwaters analysed by head space-solid phase micro extraction coupled with gas chromatography mass spectrometry (SPME/GC/MS) [J]. *Water Research*, 2008, 42(14): 3563–3577.
- [23] Moschet C, Lew B M, Hasenbein S, et al. LC- and GC-QTOF-MS as complementary tools for a comprehensive micropollutant analysis in aquatic systems [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 51(3): 1553–1561.
- [24] Beaudreau P. A systematic review of the time series studies addressing the endemic risk of acute gastroenteritis according to drinking water operation conditions in urban areas of developed countries [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15(5): 867.

(上接第 195 页)

参考文献

- [1] 宁运芳, 刘柱, 陈学水, 等. 大型老旧水厂不断水集约化重建技术与实践[J]. *给水排水*, 2022, 48(9): 1–6.
Ning Y F, Liu Z, Chen X S, et al. Technology and practice of intensive reconstruction of large and old water plants under continuous water supply conditions [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2022, 48(9): 1–6.
- [2] 陆志惠. 上海市《生活饮用水水质标准》(DB31/T 1091—2018)实施评估及修订建议[J]. *净水技术*, 2022, 41(6): 57–64.
Lu Z H. Implementation evaluation and revision proposal of Shanghai standards for drinking water quality (DB31/T 1091–2018) [J]. *Water Purification Technology*, 2022, 41(6): 57–64.
- [3] 王圣, 赵欣, 姜蕾, 等. 对标国际, 标准引领——从源头到龙头的高品质饮用水水质安全保障技术与管理[J]. *净水技术*, 2023, 42(1): J1–J4.
Wang S, Zhao X, Jiang L, et al. Benchmarking international standards, leading by standards—Safety assurance technology and management of high-quality drinking water from the source to the leader [J]. *Water Purification Technology*, 2023, 42(1): J1–J4.
- [4] 赵加斌. 基于上海市高品质供水的水厂设计思考[J]. *净水技术*, 2023, 42(S1): 281–288.
Zhao J B. Design consideration of WTP based on Shanghai high quality water supplying [J]. *Water Purification Technology*, 2023, 42(S1): 281–288.
- [5] 董秉直, 肖健, 华建良, 等. 高品质饮用水的思考以及苏州实践[J]. *给水排水*, 2021, 57(8): 19–27.
Dong B Z, Xiao J, Hua J L, et al. View of high quality drinking water and its practice in Suzhou [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2021, 57(8): 19–27.
- [6] 朱建文. 杭州主城区饮用水深度处理的发展与实践[J]. *净水技术*, 2022, 41(2): 168–173.
Zhu J W. Development and practice of advanced treatment for drinking water in main urban area of Hangzhou [J]. *Water Purification Technology*, 2022, 41(2): 168–173.
- [7] 张立尖. 上海市饮用水水质标准发展历程与 2025 新地标解读[J]. *净水技术*, 2025, 44(4): 1–11.
Zhang L J. Developing process of drinking water quality standards in Shanghai and interpretation of the 2025 new local standard [J]. *Water Purification Technology*, 2025, 44(4): 1–11.
- [8] 包伟忠. 高品质饮用水建设及运维中关键问题探讨[J]. *净水技术*, 2024, 43(S1): 71–75.
Bao W Z. Discussion on key problems of high quality drinking water building and management [J]. *Water Purification Technology*, 2024, 43(S1): 71–75.
- [9] 镇祥华, 黄智, 张文胜, 等. 实现低出水浊度常规处理工艺探讨[J]. *给水排水*, 2021, 47(9): 6–12.
Zhen X H, Huang Zhi, Zhang Wensheng, et al. Discussion on reducing effluent turbidity of conventional treatment process [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2021, 47(9): 6–12.
- [10] 王智, 郗燕秋, 董蕾茜, 等. 水厂滤池改造方法及应用案例[J]. *净水技术*, 2017, 36(9): 78–85, 90.
Wang Z, Qie Y Q, Dong L X, et al. Reconstruction methods and application cases of filters in water treatment plant (WTP) [J]. *Water Purification Technology*, 2017, 36(9): 78–85, 90.
- [11] 韦舒. 低浊度进水条件下提高滤池出水水质的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
Wei S. Improvement of water quality treated by filtration tank under the condition of influent with low-turbidity [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.