

黄河流域河南段饮用水中内分泌干扰物的分布特征及健康风险评估

卞战强¹, 于建¹, 夏云婷¹, 苏永恒², 王谢², 马青青²

1. 中国疾病预防控制中心农村改水技术指导中心农村饮水监测室, 北京 102200;

2. 河南省疾病预防控制中心卫生检测检验中心理化室

摘要: 目的 了解黄河流域河南段饮用水中壬基酚、辛基酚和双酚 A 三种内分泌干扰物(endocrine disrupting chemicals, EDCs)的分布特征, 并进行健康风险评估。方法 2023 年 10 月, 选取黄河流域河南段 32 个城乡水厂进行采样, 每个水厂分别采集水源水、出厂水和末梢水各 1 份, 共计 96 份。采用固相萃取-超高效液相色谱串联质谱法(SPE-UPLC-MS/MS)测定 EDCs 的含量, 并采用风险熵值法评估其对人体的潜在风险。结果 黄河流域河南段饮用水中三种 EDCs 均有检出, 总体浓度为未检出(not detected, ND)~234.00 ng/L, 壬基酚和辛基酚总体检出率为 100%, 双酚 A 总体检出率为 36.46%。从三种 EDCs 平均值看, 不同水样类型中均为壬基酚>辛基酚>双酚 A。从单一 EDCs 平均值来看, 水源水>末梢水>出厂水。不同城市饮用水中 EDCs 普遍存在, 检出浓度平均值最高是壬基酚。与国内外相关研究结果比较, 黄河流域河南段饮用水中 EDCs 处于中低等污染水平。健康风险评估结果显示, 成人和儿童非致癌健康风险值为 1.07×10^{-5} ~ 9.34×10^{-5} , 均远小于 1, 儿童风险高于成人。结论 黄河流域河南段饮用水普遍存在 EDCs 污染, 浓度水平较低, 人群健康风险处于可接受水平。

关键词: 内分泌干扰物; 饮用水; 分布特征; 健康风险

中图分类号: R122.7; R123 文献标志码: A 文章编号: 1003-8507(2025)11-1963-06

DOI: 10.20043/j.cnki.MPM.202502208

Distribution characteristics and health risk assessment of endocrine disruptors in drinking water in the Henan section of the Yellow River Basin

BIAN Zhan-qiang*, YU Jian, XIA Yun-ting, SU Yong-heng, WANG Xie, MA Qing-qing

*Rural Drinking Water Monitoring Office, National Center for Rural Water Supply Technical Guidance, Chinese Center for Disease Control and Prevention, Beijing 102200, China

Abstract: Objective To investigate the distribution characteristics of three endocrine disruptors (EDCs)—nonylphenol (NP), octyl phenol (OP), and bisphenol A (BPA)—in drinking water in the Henan section of the Yellow River Basin and to conduct a health risk assessment. **Methods** In October 2023, water samples were collected from 32 urban and rural water plants in the Henan section of the Yellow River Basin, with each plant providing one sample each of source water, treated water, and tap water, totaling 96 samples. The concentrations of EDCs were determined using solid-phase extraction coupled with ultra-high-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry (SPE-UPLC-MS/MS), and potential health risks were assessed using the risk entropy method. **Results** All three EDCs were detected in the drinking water of the Henan section of the Yellow River Basin, with overall concentrations ranging from Not Detected (ND) to 234.00 ng/L. The detection rates for NP and OP were 100%, while BPA had a detection rate of 36.46%. Among the average values of the three EDCs, NP was found to be greater than OP, which was greater than BPA across different water sample types. Specifically, the average concentration of EDCs followed the order: source water > tap water > treated water. EDCs were commonly found in drinking water across various cities, with NP exhibiting the highest average concentration. Compared to relevant domestic and international studies, the level of EDC contamination in drinking water in this region was considered to be moderate to low. The health risk assessment indicated that the non-carcinogenic health risk values for adults and children ranged from 1.07×10^{-5} to 9.34×10^{-5} , both of which were well below 1, with children's risks being higher than those for adults. **Conclusion** EDC contamination is prevalent in drinking water in the Henan section of the Yellow River Basin, with low concentration levels and acceptable health risk levels for the population.

Keywords: Endocrine disruptors; Drinking water; Distribution characteristics; Health risk

基金项目: 河南省医学科技攻关计划项目(LHGJ20240621)

作者简介: 卞战强(1981—), 男, 硕士, 副研究员, 研究方向: 环境卫生学和分析化学

通信作者: 卞战强, E-mail: bianzq@ncrwstg.chinacdc.cn

内分泌干扰物 (endocrine disrupting chemicals, EDCs) 是指由于人类的生产、生活而释放到环境中的,影响人体和动物体内正常激素水平的外源性化学物质^[1-2]。EEDs 主要通过污水处理厂的出水、生活污水以及工业废水等途径直接排放进入到水环境中,对水生生态系统和人类健康构成了严重的威胁^[3-4]。近年来,EDCs 在国内外一些饮用水源地和自来水厂中均有检出的报道,含量一般在 ng/L 水平^[5-7]。双酚 A、壬基酚和辛基酚是内分泌干扰物中的典型代表^[8],它们不仅具有内分泌干扰性,还具有生物毒性。壬基酚和辛基酚已被联合国环境规划署列入持久性有毒污染物清单^[9],双酚 A 被我国生态环境部列入《第一批化学物质环境风险优先评估计划》^[10],因此,开展饮用水中三种 EDCs 的分布特征及健康风险评估研究具有积极的现实意义。

黄河作为我国第二大河流,不仅是主要的农业、工业用水来源,也是众多城市生活用水的重要水源,其河南段流经三门峡、洛阳、济源、郑州、焦作、新乡、开封和濮阳等地区,为这些城市提供了重要的水资源。随着城市的发展,环境污染问题日益凸显,特别是对饮用水的潜在污染^[11]。为探究该流域河南段饮用水中 EDCs 的污染特征和健康风险,本研究选择该流域河南段城乡水厂为研究对象,采集水源水、出厂水及末梢水,检测饮用水中三种 EDCs 的含量,并评估其对人体健康的潜在风险,以期为黄河流域河南段 EDCs 的管理和防控提供科学依据和参考。

1 对象与方法

1.1 仪器和试剂 超高效液相色谱串联质谱 (美国 Waters 公司, ACQUITY UPLC TM BEH); 色谱柱 (C18 柱, 100 mm × 2.1 mm, 1.7 μm); 固相萃取柱 (Agilent 公司, HLB, 500 mg, 6 ml); 三种内分泌干扰物标准物质 (德国 Dr. Ehrenstorfer GmbH 公司); 甲醇 (美国 Fisher 公司, 色谱纯); 抗坏血酸 (国药集团上海化学试剂有限公司, 分析纯)。

1.2 样品采集 2023 年 10 月选取黄河流域河南段城乡水厂进行采样,三门峡、洛阳、济源、焦作、开封,每市选择 2 个以黄河流域为水源的水厂,再选择 2 个该流域附近以地下水为水源的水厂;郑州、新乡和濮阳由于缺少以黄河流域为水源的水厂,故每市选择 4 个在该流域附近以地下水为水源的水厂,共选取 32 个水厂,每个水厂分别采集水源水、出厂水和末梢水各 1 份,共计 96 份。水样采集于 1 L 螺口棕色玻璃瓶中,每升水样加入 50 mg 抗坏血酸,4 °C 下避光保存,并尽快进行前处理。

1.3 样品前处理和样品分析 取 500 ml 水样,用 6

mol/L 盐酸调节 pH 至 3.0,加入内标物充分混匀;采用固相萃取装置配合 HLB 固相萃取柱进行萃取,用甲醇洗脱,收集洗脱液,40 °C 氮气吹至近干,用 1 ml 40% 甲醇 / 水 (v/v) 溶液溶解定容;采用 BEH C18 色谱柱 (100 mm × 2.1 mm, 1.7 μm) 对化合物进行分离,甲醇 - 水梯度洗脱,超高效液相色谱串联质谱 (UPLC-MS/MS) 法测定,内标法定性定量分析。该分析方法灵敏度较高,三种 EDCs 标准曲线相关系数 ≥ 0.995。分析过程中通过方法空白、样品平行和加标回收对实验进行质量控制,三种 EDCs 的方法检出限 (LOQ) 为 0.19 ~ 0.57 ng/L; 平行样品测定结果的相对标准差 (relative standard deviation, RSD) ≤ 10%; 抽取不少于 10% 的样品进行加标回收测定,平均加标回收率为 97.0% ~ 120.1%, RSD 为 2.51% ~ 8.82%。

1.4 统计分析 采用 Excel 2016 进行数据整理,采用 SPSS 23.0 进行统计分析。当待测物质未检出时,以方法检出限的 1/2 进行统计计算。由于数据为非正态分布,采用 Kruskal-Wallis *H* 检验,检验水准 α = 0.05。

1.5 健康风险评估 本研究重点考虑饮用水摄入三种 EDCs 所导致的非致癌风险,采用美国环境保护署 (EPA) 推荐的非致癌评价风险模型^[12-14],以儿童和成年人为受试人群,对研究区三种 EDCs 的健康风险进行评价。计算公式如下:

$$HQ = CDI / RfD \text{ 或 } ADI \quad \text{公式(1)}$$

式中, *HQ* 为非致癌风险值,当 $HQ \geq 1$ 时认为会对人体产生健康危害,当 $HQ < 1$ 时表示风险较小; *CDI* 为长期单位体重日摄入量 [mg/(kg·d)]; *RfD* 为目标物的非致癌参考剂量 [mg/(kg·d)]。双酚 A 的 *RfD* 值为 0.05,从美国 EPA 综合风险信息数据库 (IRIS) 中查询^[15];壬基酚和辛基酚的 *ADI* 值分别为 0.15、0.015,从澳大利亚水循环利用指南中查询^[16]。

水中化学物质经口摄入途径的暴露量,使用公式 (2) 计算:

$$CDI = C \times IR \times EF \times ED / (BW \times AT) \quad \text{公式(2)}$$

式中: *C* 为饮用水中 EDCs 的浓度 (mg/L); *IR* 为饮水摄入量 (L/d); *EF* 为暴露频率 (d/a); *ED* 为暴露持续时间 (a); *BW* 是体重 (kg); *AT* 是平均暴露时间 (d)。 *EF*、*ED* 和 *AT* 取值参照文献^[17-18], *EF* 取值为 365 d/a,成人 *ED* 取 30 a, *AT* 取 10 950 d; 儿童 *ED* 取 6 a, *AT* 取 2 190 d。河南省人群 *BW* 和 *IR* 采用《中国人群暴露参数手册》(成人卷和儿童卷) 推荐值^[19-20]。见表 1。

2 结果

2.1 EDCs 在不同水样类型中检出情况 所采集的水样, pH 值在 6.82 ~ 8.41 之间,水温在 16.0 °C ~ 26.0

℃之间。三种 EDCs 在不同水样类型中的检出率和浓度见表 2。黄河流域河南段饮用水中 EDCs 均有检出, 壬基酚和辛基酚总体检出率为 100%, 双酚 A 总体检出率为 36.46%; 总体浓度为 ND ~ 234.00 ng/L。在水源水中, 壬基酚检出率为 100%, 检出浓度为 8.62 ~ 234.00 ng/L; 辛基酚检出率为 100%, 检出浓度为 0.54 ~ 59.20 ng/L; 双酚 A 检出率为 46.88%, 检出浓度为 ND ~ 191.20 ng/L。在出厂水中, 壬基酚检出率为 100%, 检出浓度为 6.86 ~ 170.87 ng/L; 辛基酚检出率为 100%, 检出浓度为 14.62 ~ 49.20 ng/L; 双酚 A 检出率为 28.13, 检出浓度为 ND ~ 7.52 ng/L。在末梢水中, 壬基酚检出率为 100%, 检出浓度为 7.74 ~ 210.00 ng/L; 辛基酚检出率为 100%, 检出浓度为 1.24 ~ 45.20 ng/L; 双酚 A 检出率为 34.38%, 检出浓度为

ND ~ 26.40 ng/L。从壬基酚和辛基酚的检出率来看, 这两种 EDCs 普遍存在于黄河流域河南段城市饮用水中。从三种 EDCs 平均值看, 不同水样类型中均为壬基酚 > 辛基酚 > 双酚 A。从单一 EDCs 平均值看, 水源水 > 末梢水 > 出厂水。通过 Kruskal-Wallis *H* 检验, 三种 EDCs 在同水样类型中的浓度, 差异有统计学意义 ($P < 0.05$)。单种 EDC 在不同水样类型中的浓度, 差异无统计学意义 ($P > 0.05$)。

表 1 河南省人群的体重和饮水摄入量取值

Table 1 The BW and IR values of human in Henan Province

项目	男性		女性	
	儿童	成人	儿童	成人
饮水摄入量 (L/d)	0.854	1.535	0.784	1.220
体重 (kg)	28.3	68.4	25.3	60.1

表 2 不同水样类型中 EDCs 浓度水平

Table 2 The concentration levels of EDCs in different water sample types

化合物	水样类型	样本数量	检出情况[n(%)]	检出浓度(ng/L)			
				平均值	最小值	中位值	最大值
壬基酚	水源水	32	32(100.00)	82.63	8.62	82.96	234.00
	出厂水	32	32(100.00)	65.86	6.86	57.40	170.87
	末梢水	32	32(100.00)	76.99	7.74	83.76	210.00
	合计	96	96(100.00)	75.16	6.86	79.52	234.00
辛基酚	水源水	32	32(100.00)	18.27	0.54	11.57	59.20
	出厂水	32	32(100.00)	14.62	1.60	8.56	49.20
	末梢水	32	32(100.00)	16.85	1.24	11.90	45.20
	合计	96	96(100.00)	16.56	0.54	11.27	59.20
双酚 A	水源水	32	15(46.88)	8.15	ND	ND	191.20
	出厂水	32	9(28.13)	1.07	ND	ND	7.52
	末梢水	32	11(34.38)	2.06	ND	ND	26.40
	合计	96	35(36.46)	3.76	ND	ND	191.20

2.2 EDCs 在不同城市中检出情况 黄河流域河南段不同城市饮用水中均有 EDCs 的检出, 结果见表 3。不同城市饮用水中壬基酚和辛基酚检出率均为 100%, 双酚 A 检出率为 ND ~ 75.00%; 壬基酚检出浓度为 6.86 ~ 234.00 ng/L, 辛基酚检出浓度为 0.54 ~ 59.2 ng/L, 双酚 A 检出浓度为 ND ~ 191.20 ng/L, 检出浓度平均值最高的是的壬基酚, 其次为辛基酚, 双酚 A

最低。壬基酚浓度平均值最高点在三门峡, 依次是济源和郑州, 最大值在濮阳。辛基酚浓度平均值最高点在济源, 依次是郑州和濮阳, 最大值在济源; 双酚 A 浓度平均值最高点在济源, 依次是濮阳和焦作, 最大值在济源。通过 Kruskal-Wallis *H* 检验, 三种 EDCs 在不同城市饮用水中的浓度, 差异有统计学意义 ($P < 0.05$)。

表 3 不同城市饮用水中 EDCs 的浓度水平

Table 3 The concentration levels of EDCs in drinking water in different cities

化合物	城市	样本数量	检出情况[n(%)]	检出浓度(ng/L)			
				平均值	最小值	中位值	最大值
壬基酚	三门峡	12	12(100.00)	116.08	84.38	117.57	144.53
	洛阳	12	12(100.00)	48.13	12.06	28.80	210.00
	济源	12	12(100.00)	109.55	78.43	109.84	170.87
	郑州	12	12(100.00)	95.06	76.93	96.85	112.60
	焦作	12	12(100.00)	32.56	6.86	13.49	87.20
	新乡	12	12(100.00)	70.12	9.98	23.50	176.20

(续表)

化合物	城市	样本数量	检出情况[n(%)]	检出浓度(ng/L)			
				平均值	最小值	中位值	最大值
辛基酚	开封	12	12(100.00)	41.17	14.82	29.40	102.80
	濮阳	12	12(100.00)	88.60	19.76	82.50	234.00
	合计	96	96(100.00)	75.16	6.86	79.53	234.00
	三门峡	12	12(100.00)	10.72	7.63	11.20	12.06
	洛阳	12	12(100.00)	6.46	0.54	4.45	24.00
	济源	12	12(100.00)	33.48	24.80	30.60	59.20
	郑州	12	12(100.00)	29.32	15.08	23.80	49.20
	焦作	12	12(100.00)	7.19	3.72	5.70	18.02
	新乡	12	12(100.00)	14.91	1.24	6.12	37.80
	开封	12	12(100.00)	11.59	3.80	8.93	32.80
双酚 A	濮阳	12	12(100.00)	18.99	1.99	9.26	46.20
	合计	96	96(100.00)	16.58	0.54	11.23	59.2
	三门峡	12	4(33.33)	1.58	ND	ND	7.52
	洛阳	12	3(25.00)	0.94	ND	ND	5.09
	济源	12	3(25.00)	18.00	ND	ND	191.2
	郑州	12	ND	ND	ND	ND	ND
	焦作	12	3(25.00)	2.06	ND	ND	8.60
	新乡	12	5(41.67)	0.88	ND	ND	2.44
	开封	12	8(66.67)	2.05	ND	2.10	5.66
	濮阳	12	9(75.00)	4.36	ND	1.81	26.40
合计	96	35(36.46)	3.76	ND	ND	191.20	

2.3 与国内外水体中 EDCs 的污染水平的对比 表 4 对比了国内外水体中三种 EDCs 的污染水平情况。从中可以看出,与国内外水体相比,本研究中壬基酚的浓度水平与法国水源地处于同一水平,低于我国珠江三角洲河流水源地及重庆长江流域地表水,高于马来西亚饮用水、塞尔维亚饮用水和我国无锡-常州地下水及黄浦江上游水源;辛基酚的浓度水平与法国水源地和我国珠江三角洲河流水源地及重庆长江流

域地表水处于同一水平,高于马来西亚饮用水、塞尔维亚饮用水和我国无锡-常州地下水及黄浦江上游水源;双酚 A 的浓度水平与马来西亚饮用水、塞尔维亚饮用水和我国无锡-常州地下水、珠江三角洲河流水源地及黄浦江上游水源地处于同一水平,低于法国水源地和我国重庆长江流域地表水。总之,与国内外水体相比,本研究中三种 EDCs 的污染处于较低至中等水平。

表 4 国内外水中 EDCs 的浓度比较(ng/L)

Table 4 Comparison of EDCs concentration in water between domestic and abroad

采样点 Sampling sites	壬基酚	辛基酚	双酚 A
珠江三角洲河流水源地 ^[3]	15.2 ~ 2 270	ND ~ 121	1.19 ~ 177
无锡-常州地下水 ^[12]	ND ~ 0.29	ND ~ 0.40	0.02 ~ 72.09
黄浦江上游水源地 ^[6]	ND ~ 19.45	ND	26.00 ~ 64.32
重庆长江流域地表水 ^[21]	ND ~ 10 749.69	1.18 ~ 343.37	13.10 ~ 1 134.86
法国水源地 ^[22]	100 ~ 605	17 ~ 130	25 ~ 1 430
马来西亚饮用水 ^[23]	ND	ND ~ 0.44	0.06 ~ 66.4
塞尔维亚饮用水 ^[24]	1.2 ~ 7.9	0.4 ~ 3.7	2.5 ~ 35.6
黄河流域河南段饮用水	6.86 ~ 234.00	0.54 ~ 59.2	ND ~ 191.20

2.4 健康风险评估 为了更好地评估黄河流域河南段饮用水中 EDCs 对人体健康风险水平,且考虑到末梢水会对人体健康产生直接影响,因此,选取了末梢水中三种 EDCs 最大值来评估人群的健康风险。由表 5 可知,三种 EDCs 对于成人和儿童的非致癌风

险值 HQ 处于 $1.07 \times 10^{-5} \sim 9.34 \times 10^{-5}$ 之间,均远小于 1,表明在研究区内饮用水中三种 EDCs 所致人体健康风险处于较低水平。儿童段女性 HQ 值高于男性,成人段男性 HQ 值高于女性,不同 EDCs 对人群的健康 HQ 值为辛基酚 > 壬基酚 > 双酚 A,从整体看,儿童

所受的非致癌风险高于成人。

表 5 黄河流域河南段饮用水中 EDCs 的非致癌风险

Table 5 The non-carcinogenic risk of EDCs in drinking water in

Henan section of Yellow River

人群	性别	壬基酚	辛基酚	双酚 A
		HQ 值	HQ 值	HQ 值
儿童	男	4.22×10^{-5}	9.09×10^{-5}	1.59×10^{-5}
	女	4.34×10^{-5}	9.34×10^{-5}	1.64×10^{-5}
成人	男	3.14×10^{-5}	6.76×10^{-5}	1.18×10^{-5}
	女	2.84×10^{-5}	6.12×10^{-5}	1.07×10^{-5}

3 讨论

黄河流域河南段饮用水中 EDCs 均有检出,壬基酚和辛基酚总体检出率为 100%,双酚 A 总体检出率为 36.46%;壬基酚总体浓度为 6.86 ~ 234.00 ng/L,辛基酚总体浓度为 0.54 ~ 59.20 ng/L,双酚 A 总体浓度为 ND ~ 191.20 ng/L;饮用水双酚 A 最大值未超过《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2022)中规定限值 0.01 mg/L 的要求;壬基酚最大值未超过深圳城市生活饮用水卫生标准 (DB4403/T 60-2020) 中规定限值 0.03 mg/L 和美国 EPA 推荐淡水中壬基酚限值 6.6 $\mu\text{g/L}$ 的要求。末梢水中三种 EDCs 平均值均高于出厂水,这可能是饮用水在输送的过程,所使用的塑料水管在和长期接触过程中会从管材中逐渐溶出造成的^[25-26]。

不同城市饮用水中壬基酚和辛基酚检出率均为 100%,双酚 A 检出率为 ND ~ 75.00%;检出浓度平均值最高的是壬基酚,其次为辛基酚,双酚 A 最低。壬基酚最大值为濮阳某集体自建井的水源水,附近存在生活垃圾堆放现象。辛基酚和双酚 A 最大值均为济源某一水厂的水源水,该水厂周围存在多家工业园区和风景游览区,这可能是沿岸工业废水或生活污水经处理后排放到水环境中造成的^[27]。

与国内外研究相比较,黄河流域河南段城市饮用水中三种 EDCs 处于中低等污染水平,健康风险评估结果显示,成人和儿童通过饮水途径引起的非致癌风险值都远低于规定值 1,表明黄河流域河南段饮用水中三种 EDCs 的暴露水平目前处于可接受范围内。但长期持续低剂量暴露,也可能在人体内逐渐蓄积,对人体健康造成潜在危害,需引起持续关注。

本研究存在一定的局限性。第一,监测数据是从具有代表性水厂收集的,只采集一次水样,缺乏连续监测结果,可能无法完全反映 EDCs 浓度的真实变化趋势,使得代表性存在局限,除此之外,暴露参数(暴露周期、性别等)、检测技术灵敏程度等,也可能使健康风险评估结果具有不确定性。第二,本研究分析了三种 EDCs,且只计算了单种 EDCs 的健康风险,而

未考虑 EDCs 之间的联合作用以及在人体内的累积效应,存在低估健康风险的可能。第三,本研究仅从饮水途径分析了 EDCs 对人体的健康危害,未评估其他摄入途径的健康风险,如经皮肤暴露途径、经食物摄入途径等,可能低估了健康风险。

利益冲突声明 本研究不存在任何利益冲突

参考文献

- [1] Yilmaz B, Terekeci H, Sandal S, et al. Endocrine disrupting chemicals: exposure, effects on human health, mechanism of action, models for testing and strategies for prevention [J]. Reviews in Endocrine & Metabolic Disorders, 2020, 21(1): 127-147.
- [2] Thacharodi A, Hassan S, Acharya G, et al. Endocrine disrupting chemicals and their effects on the reproductive health in men [J]. Environmental Research, 2023, 236(Part 2): 116825.
- [3] 熊小萍, 龚剑, 林黎源, 等. 珠江三角洲河流饮用水源中的环境内分泌干扰物及其风险 [J]. 生态环境学报, 2020, 29(5): 996-1004.
Xiong XP, Gong J, Lin CY, et al. Occurrence of typical environmental endocrine disruptors in drinking water sources of the pearl river delta and their risks [J]. Ecology and Environment Sciences, 2020, 29(5): 996-1004. (In Chinese)
- [4] 石运刚, 刘嘉烈, 唐娜, 等. 重庆城市垃圾处理厂和污水处理厂中典型环境内分泌干扰物的排放特征 [J]. 生态毒理学报, 2022, 17(3): 189-200.
Shi YG, Liu JL, Tang N, et al. Emission characteristics of typical environmental estrogens from waste treatment plants and sewage treatment plants in Chongqing [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2022, 17(3): 189-200. (In Chinese)
- [5] Huang Y, Xie XA, Zhou LJ, et al. Multi-phase distribution and risk assessment of endocrine disrupting chemicals in the surface water of the Shaying River, -Huai River Basin, China [J]. Ecotoxicology and Environment Safety, 2019, 173: 45-53.
- [6] 黄文平, 鲍轶凡, 胡霞林, 等. 黄浦江上游源地中 31 种内分泌干扰物的分布特征以及生态风险评估 [J]. 环境化学, 2020, 39(6): 1488-1495.
Huang WP, Bao YF, Hu XL, et al. Occurrence and ecological risk assessment of 31 endocrine disrupting chemicals in the water source of upstream Huangpu River [J]. Environmental Chemistry, 2020, 39(6): 1488-1495. (In Chinese)
- [7] 沈朝辉, 裴赛峰, 陈宇航, 等. 饮用水中 16 种双酚类化合物的在线固相萃取超高效液相色谱串联质谱测定方法研究 [J]. 环境与职业医学, 2024, 41(10): 1173-1179.
Shen CY, Pei SF, Chen YH, et al. Determination of 16 bisphenols in drinking water by online solid-phase extraction-ultra high performance liquid chromatography tandem mass spectrometry [J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2024, 41(10): 1173-1179. (In Chinese)
- [8] 王盼, 马继平, 李爽, 等. 基于金属有机骨架多孔碳材料的分散固相萃取-超高效液相色谱-串联质谱法测定水中 4 种酚类内分泌干扰物 [J]. 色谱, 2024, 42(3): 264-274.
Wang P, Ma JP, Li S, et al. Determination of four phenolic endocrine-disrupting chemicals in water by dispersive solid-phase extraction-ultra performance liquid chromatography-tandem mass

- spectrometry based on metal-organic skeleton porous Carbon materials [J]. Chinese Journal of Chromatography, 2024, 42 (3): 264-274.(In Chinese)
- [9] 汪素芳,曹莹,董淮晋,等. 气相色谱-质谱法测定沉积物中的烷基酚和双酚 A[J]. 环境化学,2024,43(3):1064-1068.
Wang SF, Cao Y, Dong HJ, et al. Determination of alkylphenols and bisphenol A in sediment by gas chromatography-mass spectrometry [J]. Environmental Chemistry, 2024, 43(3): 1064-1068.(In Chinese)
- [10] 王斐,郭晋君,张新颖,等. 固相萃取-高效液相色谱-荧光检测法快速测定水中 9 种烷基酚和双酚 A [J]. 化学试剂, 2024,46(10):72-77.
Wang F, Guo JJ, Zhang XY, et al. Rapid determination of 9 alkylphenols and bisphenol a in water by using Solid-Phase Extraction-High performance liquid Chromatography-Fluorescence detection[J]. Chemical Reagents, 2024, 46(10): 72-77.(In Chinese)
- [11] 焦士兴,王雅思,夏楚,等. 黄河流域河南段排污产业集聚与水污染耦合协调研究 [J]. 水资源与水工程学报,2023,34(2): 9-16.
Jiao SX, Wang YS, Xia C, et al. Industrial agglomeration and water pollution in Henan section of the Yellow River Basin [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2023, 34 (2): 9-16.(In Chinese)
- [12] 王淑婷,饶竹,郭峰,等. 无锡-常州地下水中内分泌干扰物的赋存特征和健康风险评价 [J]. 环境科学,2021,42(1): 166-174.
Wang ST, Rao Z, Guo F, et al. Occurrence characteristics and health risk assessment of endocrine disrupting chemicals in groundwater in Wuxi-Changzhou[J]. Environmental Science, 2021, 42(1): 166-174.(In Chinese)
- [13] Jamshidi A, Morovati M, Golbini Mofrad MM, et al. Water quality evaluation and non-carcinogenic risk assessment of exposure to nitrate in groundwater resources of Kamyaran, Iran: spatial distribution, Monte-Carlo simulation, and sensitivity analysis [J]. Journal of Environmental Health Science and Engineering, 2021, 19 (1): 1117-1131.
- [14] Nakazawa K, Nagafuchi O, Okano KJ, et al. Non-carcinogenic risk assessment of groundwater in South Gobi, Mongolia [J]. Journal of Water and Health, 2016, 14(6): 1009-1018.
- [15] EPA. Integrated risk information system[EB/OL]. [2025-04-25]. <https://www.epa.gov/iris>.
- [16] National Water Quality Management Strategy. Australian guidelines for water recycling: managing health and environmental risks(phase2)-Augmentation of drinking water supplies [EB/OL]. [2025-04-29]. <https://www.waterquality.gov.au/sites/default/files/documents/water-recycling-guidelines-augmentation-drinking-22.pdf>.
- [17] 范传刚,王婧,李翔,等. 湖北省 3 种类型饮用水水源地壬基酚浓度及风险评价[J]. 环境与职业医学,2024,41(5):533-538.
Fan CG, Wang J, Li X, et al. Concentration and risk assessment of nonylphenol in three types of drinking water sources in Hubei Province [J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2024, 41(5): 533-538.(In Chinese)
- [18] 谭吴言,张彩香,李佳森,等. 鄱阳湖流域天然劣质地下水中锰富集特征及其健康风险评估[J]. 生态毒理学报,2023,18(5): 227-235.
Tan WY, Zhang CX, Li JS, et al. Enrichment of manganese in natural inferior groundwater and its health risk assessment in Poyang Lake Basin[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2023, 18(5): 227-235.(In Chinese)
- [19] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册(成人卷)[M]. 北京:中国环境出版社,2013.
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Exposure factors handbook of Chinese population (Adult)[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2013.(In Chinese)
- [20] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册(儿童卷 6~17 岁)[M]. 北京:中国环境出版社,2016.
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Exposure factors handbook of Chinese population (Children 6~17 years)[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2016.(In Chinese)
- [21] 卓丽,许榕发,石运刚,等. 重庆长江流域水体中 8 种典型环境雌激素污染特征[J]. 生态毒理学报,2020,15(3):149-157.
Zhuo L, Xu RF, Shi YG, et al. Estrogens in surface water of the Yangtze river in Chongqing section [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2020, 15(3): 149-157.(In Chinese)
- [22] Colin A, Bach C, Rosin C, et al. Is drinking Water a Major Route of Human Exposure to Alkylphenol and Bisphenol Contaminants in France?[J]. Archives of Environment Contamination and Toxicology, 2014, 66(1): 86-99.
- [23] Wee SY, Aris AZ, Yusoff FM, et al. Occurrence of multiclass endocrine disrupting compounds in a drinking water supply system and associated risks[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 17755.
- [24] Čelić M, Škrbić BD, Insa S, et al. Occurrence and assessment of environmental risks of endocrine disrupting compounds in drinking, surface and wastewaters in Serbia[J]. Environmental Pollution, 2020, 262: 114344.
- [25] 朱杰民,吴西梅,罗振奎,等. 高效液相色谱法测定自来水及供水塑料管材浸泡液中的烷基酚类化合物[J]. 中国卫生检验杂志, 2008,18(12):2457-2466.
Zhu JM, Wu XM, Luo ZK, et al. Analysis of environmental estrogen-alkyl pheols in tap water and soak water of plastic tube for water supply by high performance liquid chromatography[J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2008, 18(12): 2457-2466.(In Chinese)
- [26] 张慧,曹慧,姜侃,等. 高效液相色谱-三重四极杆串联质谱法研究塑料接触材料中酚类化合物向奶油中的迁移[J]. 食品科学,2022,43(18):339-345.
Zhang H, Cao H, Jiang K, et al. Migration of phenolic compounds from plastic contact materials into cream by high performance liquid Chromatography-Tandem mass spectrometry[J]. Food Science, 2022, 43(18): 339-345.(In Chinese)
- [27] Zhang YZ, Tang CY, Song XF, et al. Behavior and fate of alkylphenols in surface water of the Jialu River, Henan Province, China[J]. Chemosphere, 2009, 77(4): 559-565.