

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20150415008

卜庆伟, 王东红, 许宜平, 等. 基于风险分析的流域优先有机污染物筛查: 研究与应用[J]. 生态毒理学报, 2016, 11(1): 126-132

Bu Q W, Wang D H, Xu Y P, et al. A risk-based screening approach for priority organic contaminants at the watershed scale: research and application [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2016, 11(1): 126-132 (in Chinese)

# 基于风险分析的流域优先有机污染物筛查:研究与应用

卜庆伟<sup>1,3</sup>, 王东红<sup>2,\*</sup>, 许宜平<sup>2</sup>, 胡江波<sup>2</sup>, 王子健<sup>3</sup>

1. 中国矿业大学(北京) 化学与环境工程学院, 北京 100083

2. 中国科学院生态环境研究中心 中国科学院饮用水科学与技术重点实验室, 北京 100085

3. 中国科学院生态环境研究中心 环境水质学国家重点实验室, 北京 100085

收稿日期: 2015-04-15 录用日期: 2015-06-11

**摘要:** 应用高通量分析方法对大清河流域 47 个沉积物中的潜在风险有机污染物进行了分析, 共筛查到 104 种有毒有机污染物。应用基于风险分析的筛查体系对检出率高于 10% 的 54 种污染物进行了概率风险评估, 筛查出 11 种具有潜在风险的流域优先有机污染物, 包括农药(特草克、氨磺磷、枯莠隆)、工业用品及副产物(二苯胺、9,10-蒽醌、萘、2-甲基萘)及家庭及个人护理品(咖啡因、苯乙酮、苯甲酮、联苯)等。结果表明, 基于风险分析的流域污染物筛查方法体系可成功地对流域内优先污染物进行识别与筛查, 为流域管理提供科学依据。

**关键词:** 沉积物; 筛查; 大清河流域; 高通量分析方法

文章编号: 1673-5897(2016)1-126-07 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

## A Risk-based Screening Approach for Priority Organic Contaminants at the Watershed Scale: Research and Application

Bu Qingwei<sup>1,3</sup>, Wang Donghong<sup>2,\*</sup>, Xu Yiping<sup>2</sup>, Hu Jiangbo<sup>2</sup>, Wang Zijian<sup>3</sup>

1. School of Chemical & Environmental Engineering, China University of Mining & Technology-Beijing, Beijing 100083, China

2. Key Laboratory of Drinking Water Science and Technology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, P.O. Box 2871, Beijing 100085, China

3. State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, P.O. Box 2871, Beijing 100085, China

Received 15 April 2015 accepted 11 June 2015

**Abstract:** A high throughout screening method was applied to screening the organic pollutants in 47 sediments from the Daqinghe River Watershed. A total of 104 organic contaminants were identified, of which 54 were detected at more than 10% sites. The developed risk-based screening procedure was used for priority setting of the 54 contaminants and the probability of risk was calculated. The results showed that 11 contaminants were selected as priorities in the Daqinghe River Watershed. These were pesticides, industry chemicals, and home and personal care products. This study has proved that the developed risk-based screening procedure has the ability of identifying and ranking the priority pollutants in the environment at the watershed scale.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(21307068); 国家自然科学基金(51290283); 国家高技术研究发展计划(863 计划)(2014AA06A506)

作者简介: 卜庆伟(1983-), 男, 博士, 研究方向为水生态毒理学及生态风险评价, E-mail: qingwei.bu@cumt.edu.cn

\* 通讯作者(Corresponding author), E-mail: dhwang@rcees.ac.cn

**Keywords:** sediments; screening; Daqinghe River Watershed; high throughout analytical method

海河流域属于典型的网状河系,流经北京、天津、河北全部及河南、山东、山西、内蒙古的部分地区,流域面积320 000 km<sup>2</sup>,占全国总面积的3.3%。海河流域内工农业高度发达,其水资源开发程度处于全国最高水平,也是污染最为严重的流域之一。流域面临着“有河皆干、有水皆污”的困难局面。海河流域75%的河流水质不符合III级标准,超过60%的地下水达不到饮用水要求<sup>[1]</sup>。由于海河流域面积较大,产业结构类型复杂,导致污染物的区域化特征较为明显。目前针对海河流域的有机污染调查研究基本是针对某一类污染物,尚无对流域或子流域进行有机污染物全面筛查的相关研究。

本文的主要目的是将前文构建流域优先污染物筛查方法体系应用于大清河流域<sup>[2]</sup>,识别该流域沉积物中的优先有机污染物。大清河流域位于海河流域中部,覆盖河北省大部分地区、北京、天津部分地区和山西省的部分地区,是海河流域内典型的工农业高度发达与集中的子流域。本研究有助于识别流域环境优先管理目标,为下一步研究提供对象,以期为流域水污染防治工作提供重要的基础数据。

## 1 材料与方法 (Materials and methods)

### 1.1 样品采集与保存

采用抓斗式采泥器抓取表层0~20 cm沉积物样品,每个采样点采集3个子样形成混合样品,用不锈钢容器密封保存于低温冰箱并尽快运回实验室,保存于-20℃的冰箱中。样品经冷冻干燥后,研磨通过60目钢筛,铝箔包好密封保存于阴凉处。样品采集共设置47个采样点,时间为2009年7月至8月,采样点分布如图1所示。

### 1.2 样品前处理

样品前处理过程参考前期研究所建立的高通量分析方法<sup>[3]</sup>。使用戴安加速溶剂萃取仪(戴安ASE350,美国)进行样品中有机污染物提取,准确称取5 g沉积物并将样品装入萃取池中,提取溶剂为二氯甲烷:丙酮(1:1,体积比)。使用凝胶色谱对提取液进行净化,凝胶色谱柱为Bio-Beads SX3(Bio-Rad实验室,美国),流动相为体积比为1:1的环己烷与乙酸乙酯混合液。凝胶色谱净化后的提取液经旋转蒸发、氮吹置换溶剂为正己烷,经Florisil固相萃取柱(Supeelo公司,美国)进一步净化,使用5 mL二氯甲烷:丙酮(1:1,体积比)混合溶液洗脱目标污染物,

洗脱液收集在K-D浓缩器中,经氮吹定容到0.2 mL,待分析。

### 1.3 仪器分析与半定量

使用安捷伦GC6890N/5975MSD对样品中的有机污染物进行分析;色谱柱为DB-5MS(30 m×0.25 mm×0.25 μm);载气为高纯氦气(99.9999%)。采用保留时间锁定(RTL)及解卷积技术(DRS)对所得数据进行分析;本研究中所采用的污染物数据库含有1 093种污染物<sup>[4]</sup>,包括农药及其降解产物、持久性有机污染物、大量生产的常见化学品以及新兴污染物<sup>[5-6]</sup>。应用解卷积技术对所有样品进行分析:AMDIS匹配值高于60%,预期保留时间与观测保留时间差值小于10 s。此外,将解卷积得到的污染物在NIST(National Institute of Standards and Technology)谱图库中进行反向检索匹配以保证结果的准确性。鉴于筛查分析中涉及的污染物数目较大,针对每一种物质定量具有较大的困难,因此对于识别到的污染物定量采用“一种定一类”的半定量方式,详细操作步骤可参考Bu等<sup>[4]</sup>。

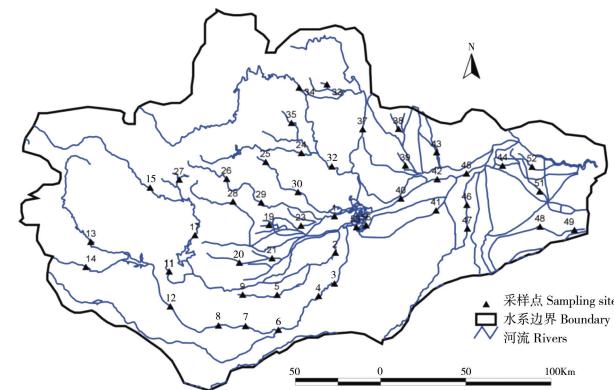


图1 大清河流域沉积物采样点位分布图

Fig. 1 A diagram showing the sampling sites in the Daqinghe River watershed

样品分析过程加入方法空白和程序空白,均无目标污染物检出。采用干净的沉积物进行基质加标实验,加标回收率范围为84.1%~128.6%,较为理想,符合筛查水平的有机污染物风险评估需求。

## 2 结果与讨论 (Results and discussion)

### 2.1 污染物识别与定量

大清河流域沉积物中共检出104种潜在风险污

表 1 大清河流域沉积物中优先污染物筛查结果  
Table 1 Screening results for priority pollutants in sediments of the Daqinghe River watershed

CAS号 CAS No.	污染物 Contaminant	检出率 Frequency	危害评估 Hazard Assessment			暴露浓度 Exposure concentration			效应评估 Effect assessment			风险概率 Probability	筛查结果 Results
			Bioaccumulation	Persistence	Average	均值	标准偏差	Type	PNEC	Average	均值	标准偏差	
1918112	特草克 Terbucarb	100%	L	H	4.68	0.28	PNEC	330				95%	Regional
122394	二苯胺 Diphenylamine	79%	L	M	4.38	0.40	PNEC	3 790				95%	Regional
52857	氯磺磷 Famphur	57%	L	M	4.31	0.71	PNEC	650				85%	Regional
58082	咖啡因 Caffeine	66%	L	M	4.51	0.44	SSD		4.59	0.84		45%	Regional
98862	苯乙酮 Acetophenone	100%	L	M	5.09	0.58	PNEC	180 962				35%	Regional
91576	2-甲基萘 2-Methylnaphthalene	91%	M	M	2.82	0.27	SSD		3.04	0.14		20%	Regional
14214325	枯莽隆 Difenoxuron	91%	L	M	3.75	0.37	PNEC	10 430				20%	Regional
84651	9,10-蒽醌 9,10-Antraquinone	100%	L	M	2.81	0.23	SSD		3.83	1.14		15%	Regional
91203	萘 Naphthalene	100%	L	M	3.55	0.42	SSD		6.18	1.99		5%	Regional
9224	联苯 Biphenyl	100%	M	M	2.82	0.37	SSD		3.39	0.22		5%	Regional
119619	苯甲酮 Benzophenone	85%	L	M	3.43	0.46	PNEC	13 539				5%	Regional
85416	苯邻二甲酰亚胺 Phthalimide	17%	L	M	4.69	0.29	PNEC	38 700				60%	Local
21087649	嗪草酮 Metribuzin	17%	L	M	5.52	1.38	SSD		4.93	1.05		60%	Local
95761	3,4-二氯苯胺 3,4-Dichloroaniline	17%	L	M	4.52	0.40	SSD		4.36	0.69		55%	Local
148798	噻苯咪唑 Thia bendazole	17%	L	M	3.17	0.30	SSD		3.71	0.74		25%	Local
72259	p,p'-DDE	32%	H	H	1.15	0.53	SSD		2.17	0.82		15%	Local
26259450	密草通 Sebumeton	13%	L	H	3.92	0.33	PNEC	18 000				15%	Local
50563365	克草胺 Dimethachlor	17%	L	H	3.66	0.37	PNEC	11 030				10%	Local
119904	邻联茴香胺 o-Dianisidine	32%	L	M	3.18	0.50	PNEC	9 040				5%	Local
103333	偶氮苯 Azobenzene	23%	L	M	2.46	0.44	PNEC	1 470				5%	Local
40341046	吡咪唑 Rabenzazole	23%	L	M	2.53	0.73	PNEC	3 970				5%	Local
85018	菲 Phenanthrene	100%	H	H	2.97	0.20	SSD		6.42	0.60		0%	Non priority
86737	芴 Fluorene	100%	M	M	2.63	0.28	SSD		5.80	0.72		0%	Non priority
129000	芘 Pyrene	100%	M	H	1.79	0.53	SSD		4.53	0.96		0%	Non priority
206440	荧蒽 Fluoranthene	100%	H	H	2.06	0.30	SSD		4.66	0.36		0%	Non priority
56553	苯并[a]蒽 Benzo[a]anthracene	96%	L	H	1.06	0.38	PNEC	210				0%	Non priority
120514	苯甲酸苄酯 Benzyl benzoate	94%	L	M	2.31	0.36	PNEC	2 180				0%	Non priority
78591	异佛尔酮 Isophorone	91%	L	M	3.89	0.43	SSD		5.38	0.12		0%	Non priority
132649	二苯并呋喃 Dibenzofuran	91%	M	M	2.47	0.19	SSD		3.48	0.42		0%	Non priority

续表1

CAS号 CAS No.	污染物 Contaminant	检出率 Frequency	危害评估			暴露浓度			效应评估			筛查结果 Results
			生物累积 Bioaccumulation	持久性 Persistence	Hazard Assessment Type	Average	标准偏差 SD	Type	PNEC	Average	标准偏差 SD	
<b>暴露浓度</b>												
205992	苯并[b]荧蒽 Benzol[b]fluoranthene	83%	H	H	0.47	0.42	PNEC	28.7			0%	Non priority
90437	邻苯基苯酚 o-Phenylphenol	79%	L	M	2.46	0.21	SSD	3.83	0.33	0%	0%	Non priority
2941551	硫草酸 Ethiolate	79%	L	M	3.68	0.38	PNEC	65 070			0%	Non priority
99876	对异丙基甲苯 <i>p</i> -isopropyltoluene	70%	L	M	1.95	0.22	SSD	4.22	0.46	0%	0%	Non priority
100516	苄醇 Benzyl alcohol	70%	L	M	4.13	0.35	PNEC	460 000			0%	Non priority
207089	苯并[k]荧蒽 Benzol[k]fluoranthene	70%	H	H	-0.29	0.40	PNEC	34.8			0%	Non priority
218019	䓛 Chrysene	70%	L	H	1.42	0.40	SSD	3.35	0.24	0%	0%	Non priority
120127	蒽 Anthracene	66%	M	H	1.95	0.47	SSD	4.68	0.74	0%	0%	Non priority
108952	苯酚 Phenol	45%	L	M	4.13	0.45	SSD	7.19	0.78	0%	0%	Non priority
115968	磷酸三(2'-氯乙基)酯 Trichlorethyl phosphate	43%	L	H	2.93	0.53	PNEC	32 840			0%	Non priority
541731	1,3-二氯苯 1,3-Dichlorobenzene	43%	L	M	2.39	0.23	SSD	5.89	0.46	0%	0%	Non priority
208968	苊烯 Acenaphthylene	36%	L	M	1.90	0.42	PNEC	2 350			0%	Non priority
616983	杀虫脒 Chlordimeform	34%	L	M	2.26	0.53	SSD	4.56	0.35	0%	0%	Non priority
83329	苊 Acenaphthene	32%	M	M	2.20	0.10	SSD	5.58	0.45	0%	0%	Non priority
86306	N-亚硝基二苯胺 N-nitrosodiphenylamine	28%	L	M	2.55	0.29	PNEC	6 680			0%	Non priority
16606023	2,4'-5-三氟联苯 PCB 31	28%	H	H	1.13	0.64	PNEC	430			0%	Non priority
50328	苯并[a]芘 Benzol[ah]pyrene 3,3'-二氯联苯 3,3'-Dichlorobenzidine	23%	M	H	-0.20	0.65	SSD	4.60	1.26	0%	0%	Non priority
91941	烯效唑 Uniconazole-P	19%	L	H	1.21	0.37	PNEC	2 026			0%	Non priority
83657174	4-氨基联苯 4-Aminodiphenyl	17%	L	M	3.22	0.09	PNEC	14 800			0%	Non priority
92671	771517 3-吲哚乙腈 3-Indolylacetonitrile	15%	L	M	1.86	0.39	PNEC	8 980			0%	Non priority
7012375	2,4,4'-三氯联苯 PCB28	15%	H	H	2.16	0.38	PNEC	2 590			0%	Non priority
25569806	2,3'-二氯联苯 PCB6 二苯并[a,h]蒽 Dibenz[a,h]Anthracene	15%	H	M	1.57	0.17	PNEC	1 010			0%	Non priority
53703		11%	H	H	-0.67	0.50	PNEC	98.3			0%	Non priority

注:暴露浓度为经过去对数转换的水相平衡分配浓度,单位 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ;SSD毒性数据为经常用对数转换后数据,单位均为 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ;PNEC:根据评价因子法得出的预测无效应浓度;SSD:物种敏感度分布曲线;L,M,H用以表示危害评估的判定等级,分别代表低、中、高;Regional指的是区域性优先污染物(检出率大于50%);Local代表局部地区优先污染物(检出率小于50%);Non priority代表非优先污染物。Note: The exposure concentration was log transformed,  $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ; toxicity data for SSD was log transformed,  $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ; PNEC, predicted no effect concentration; SSD, species sensitivity distribution; L, low; M, medium; H, high; "Regional" means that the contaminant is regional priority pollutant; "Local" means that the contaminant is local priority pollutant; "Non-priority" means that the contaminant is not risky.

染物,其中检出率高于 10% 的污染物为 54 种(表 1),检出率为 100% 的污染物为 9 种,包括芽根灵、苯乙酮、9,10-蒽醌、萘、联苯、菲、芴、芘和荧蒽。不同采样点沉积物中污染物检出数目介于 19~47 种之间,检出污染物数目较多的采样位点主要集中在流域中部的汇入白洋淀的河流,但是出淀之后的采样点中污染物检出数目有所降低,可能与白洋淀淀区内的湿地有一定的污染物净化作用有关。河流汇入渤海前,污染物检出数目有所增加,这是由于大清河水系东部为工农业发达地区,污染有所加重。污染物的检出数目从一定程度上可以反映当地的污染严重程度,但是其污染的具体情况还需根据污染物的定量信息来判断。不同采样点检出的污染物种类也有所不同,这与当地的污染源有密切关系。对于检出率高于 10% 的污染物进行定量计算,浓度范围为未检出(ND)~25.8  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ,具有较高的空间变异性。

流域污染物控制优先针对具有广泛区域分布的污染物,因此,应用基于风险分析的筛查体系对上述检出率高于 10% 的 54 种污染物进行危害及生态风险评估,识别大清河流域沉积物中的重点关注污染物。

## 2.2 危害评估

生物累积性危害等级为中(M)或者高(H)的污染物分别为 9 种和 8 种,大多数污染物的生物累积性较弱。但是,持久性等级为中(M)的污染物有 35 种、高(H)的有 18 种,仅有 1 种污染物的持久性等级为低(L),结果如表 1 所示。

## 2.3 暴露与效应评估

对于大部分检测到的有机污染物而言,针对其沉积物中的生物毒性数据较为匮乏,不同沉积物的性质(如有机碳含量)差异很大,导致沉积物中的风险评价具有一定的困难。同时,采用有机溶剂萃取和化学分析手段得到的污染物浓度,没有考虑污染物在沉积物中的生物有效性。因此,对于沉积物中有机污染物的生态风险评价一般是根据其在沉积物与水相之间的平衡作用,通过平衡分配系数将沉积物中的污染物浓度转换为自由溶解态浓度,可按照式(1)进行计算:

$$C_{\text{dis}} = \frac{C_{\text{sed}}}{f_{\text{OC,sed}} \times K_{\text{OC}}} \quad (1)$$

其中, $C_{\text{dis}}$  为自由溶解态浓度( $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ); $C_{\text{sed}}$  为沉积物浓度( $\text{ng}\cdot\text{kg}^{-1}$ ); $K_{\text{OC}}$  为污染物的有机碳归一化沉积物/水分配系数( $\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}$ ); $f_{\text{OC,sed}}$  为沉积物的有机碳含量。

大清河流域污染物的预测自由溶解态浓度符合

对数正态分布,其均值与标准偏差均列于表 1。

根据前文建立的筛查体系,效应评估的方法为 2 种。在 53 种污染物中,仅有 24 种污染物的毒性数据足够构建物种敏感度分布曲线(SSD),具备使用慢性毒性数据构建 SSD 的污染物则更少。多数污染物没有毒性数据,本文选取最敏感的实测毒性终点或根据定量结构-活性关系估计的毒性数据,根据评价因子法<sup>[7]</sup>推导预测无效应浓度(PNEC)。毒性数据的常用对数均值和标准偏差、污染物的 PNEC 值均列于表 1。

## 2.4 大清河流域优先污染物

利用水晶球软件(学生版)对上述污染物的商值分布进行蒙特卡罗模拟分析。根据不同污染物风险商的累计百分数分布,计算出在 95% 置信区间下,风险商超出 1 的概率(表 1)。结果表明,21 种污染物可能存在局部或区域性生态风险,其中,特草克、二苯胺的风险概率高达 95%;氨磺磷产生生态风险的概率高达 85%。

鉴于区域污染控制的需求,本文结合污染物的检出率,以 50% 为分界点区分潜在风险污染物的影响范围,可将其分为区域性(regional)优先污染物和局部性(local)优先污染物。从表 1 可知,大清河流域沉积物中共筛查出 11 种流域潜在优先污染物。此外,10 种污染物被列为具有局部潜在风险的优先污染物。

农药类优先污染物包括特草克、氨磺磷及枯萎隆。特草克是一种氨基甲酸酯类的除草剂和杀虫剂,具有细胞毒性,其作用靶位为线粒体呼吸系统<sup>[8]</sup>。特草克几乎在整个流域均有检出,从空间分布上看,污染浓度较高的区域主要为大清河流域的下游地区。目前在地下水、地表水以及海水中均有特草克检出<sup>[9-11]</sup>。氨磺磷是目前使用较为广泛的硫代磷酸酯类农药<sup>[12]</sup>,污染程度较重的区域主要集中在大清河流域南部的入淀河流。枯萎隆是一种脲类除草剂,是农业生产中广泛使用的芽前和芽后除草剂。由于其环境持久性,已在地表水、地下水和农作物中均有检出<sup>[13]</sup>。大清河流域沉积物中枯萎隆的浓度呈现出由西向东逐渐增高的趋势。

与工业生产活动相关的优先污染物包括二苯胺、9,10-蒽醌、萘及 2-甲基萘。二苯胺被列为欧盟第三批优先控制污染物,已经在土壤以及地下水中发现二苯胺的存在。毒理学研究表明,二苯胺对水生态系统具有潜在危害作用<sup>[14]</sup>。较高浓度的二苯胺主要集中在大清河流域的南部,目前未见针对

该流域内环境介质中二苯胺的相关研究。9,10-蒽醌主要用于造纸、染料、医药等工业的中间体。我国是生产蒽醌的重要国家,且在北京、河北一带有生产该物质的工厂<sup>[15]</sup>。风险较高的区域集中在流域的中部和南部。萘和2-甲基萘属于多环芳烃及其甲基取代物。多环芳烃类污染物由于其潜在毒性、致癌致畸效应而被广泛关注<sup>[16]</sup>。有关海河流域多环芳烃的报道已经很多<sup>[17-21]</sup>。多环芳烃来源复杂,既有可能是本地污染所致,也有可能来自长距离的迁移,判断其来源还需结合其他污染物的空间分布进行综合分析。

较为重要的一类污染物则是新近引起关注的新兴污染物,本研究中筛查到的优先新兴污染物主要是用于家庭及个人护理品中的物质,包括咖啡因、苯乙酮、苯甲酮及联苯。咖啡因是一种生物碱类中枢兴奋剂<sup>[22]</sup>,可在许多植物中检出其存在。白洋淀及周边河流为其高浓度区域,可能与该区域植被较多有关。研究表明,咖啡因可作为城市排泄物污染的标志物,用于反映该区域城市化水平的高低<sup>[23]</sup>。目前,针对咖啡因的报道已经较多,如张爱涛等<sup>[24]</sup>研究发现污水厂各级处理单元均可检出咖啡因,浓度水平为0.46~25.36 μg·L<sup>-1</sup>;Daneshvar等<sup>[23]</sup>对水源水以及污水厂出水中的咖啡因分析发现其污染水平分别为112~781 ng·L<sup>-1</sup>和13 755~34 354 ng·L<sup>-1</sup>。苯乙酮和苯甲酮属于个人护理品中添加的新兴污染物。苯乙酮可用作香料的调和原料,污水厂的进出水中均有苯乙酮检出<sup>[25-26]</sup>。此外,苯乙酮也可能来自壬基酚或者某些染料的降解产物。苯甲酮可用作光敏剂或者香料增强剂。对鼠类的致癌实验表明,苯甲酮可能会引起癌变<sup>[27]</sup>。目前尚未见针对环境介质的相关研究。联苯以前用作多氯联苯的原料,目前也用作保存剂。联苯已被欧盟列为疑似内分泌干扰物质<sup>[28]</sup>。大清河流域中部和南部的沉积物中均有检出较高浓度的联苯。

以上讨论表明,本研究所建立的优先污染物筛查方法可成功的用于流域尺度的环境潜在优先污染物识别,成功的识别到大清河流域沉积物中具有区域性潜在风险的污染物11种。在日后的研究中,可优先开展针对上述污染物的区域存在验证实验、生态毒理学等方面的研究,以便进一步验证其环境存在及风险水平,为流域污染防控提供科学支持。

**通讯作者简介:**王东红(1968—),女,副研究员,主要研究天饮用水和地表水中持久性有机污染物的赋存形态和潜在风险

污染物的筛查研究和风险评价。

#### 参考文献(References) :

- [1] 朱永华,夏军,刘苏峡,等.海河流域生态环境承载能力计算[J].水科学进展,2005,16(5): 649-654  
Zhu Y H, Xia J, Liu S X, et al. Calculation of carrying capacity of eco-environments in Haihe River basins [J]. Advances in Water Science, 2005, 16(5): 649-654 (in Chinese)
- [2] 卜庆伟,王东红,王子健.基于风险分析的流域优先有机污染物筛查:方法构建[J].生态毒理学报,2016,11(1): 61-69  
Bu Q W, Wang D H, Wang Z J. A risk-based screening approach for priority organic contaminants at the watershed scale: Method development [J]. Asia Journal of Eco-toxicology, 2016, 11(1): 61-69 (in Chinese)
- [3] Bu Q, Wang D, Liu X, et al. A high throughout semi-quantification method for screening organic contaminants in river sediments [J]. Journal of Environmental Management, 2014, 143: 135-139
- [4] Bu Q, Wang D, Wang Z, et al. Identification and ranking of the risky organic contaminants in the source water of the Danjiangkou reservoir [J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2014, 8(1): 42-53
- [5] Wylie P L. Screening for 926 pesticides and endocrine disruptors by GC/MS with deconvolution reporting software and a new pesticide library [R]. Agilent Technologies, 2006
- [6] Quimby B, Szelewski M. Screening for hazardous chemicals in homeland security and environmental samples Using a GC/MS/ECD/FPD with a 731 compound DRS database [R]. Agilent Technologies, 2006
- [7] EC, Technical guidance document on risk assessment [R]. Joint Research Centre, Institute for Health and Consumer Protection, European Chemicals Bureau, 2003
- [8] Suzuki T, Yaguchi K, Suga T, et al. Cytotoxic effects of 2,6-di-tert-butyl-4-methylphenyl N-methylcarbamate (terbutol) herbicide on hepatocytes and mitochondria isolated from male rats [J]. Environmental Toxicology and Pharmacology, 1997, 3(3): 167-173
- [9] Kadokami K, Jinya D, Iwamura T, et al. Pollution of Coastal Water by Man-made Chemicals [C]. The Twelfth (2002) International Offshore and Polar Engineering Conference, Kitakyushu, Japan, 2002
- [10] Toshiya S, Mihoko U, Yutaka O, et al. Monitoring of pesticides in drinking water from private wells in the tama district in Tokyo [J]. Journal of Japan Society on Water Environment, 2009, 29(10): 659-662

- [11] Derbalah A S H, Nakatani N, Sakugawa H. Distribution, seasonal pattern, flux and contamination source of pesticides and nonylphenol residues in Kurose River water, Higashi-Hiroshima, Japan [J]. *Geochemical Journal*, 2003, 37: 217-232
- [12] 王宇, 刘树深, 高树梅, 等. 硫代磷酸酯类化合物对斑马鱼的急性毒性及 QSAR 分析 [J]. 生态毒理学报, 2006, 1(2): 139-143  
Wang Y, Liu S S, Gao S M, et al. Acute toxicity of thiophosphates to zebra fish and QSAR analysis [J]. *Asia Journal of Ecotoxicology*, 2006, 1(2): 139-143 (in Chinese)
- [13] 王金成, 徐青, 薛兴亚, 等. 苯基脲类除草剂分子印迹聚合物的合成和识别性能研究 [J]. 高等学校化学学报, 2006, 27(7): 1227-1231  
Wang J C, Xu Q, Xue X Y, et al. Preparation of molecularly imprinted polymer and its recognition property for phenylurea herbicides [J]. *Chemical Journal of Chinese Universities*, 2006, 27(7): 1227-1231 (in Chinese)
- [14] Drzyzga O. Diphenylamine and derivatives in the environment: A review [J]. *Chemosphere*, 2003, 53(8): 809-818
- [15] 何燕. 菲醌生产应用与市场分析 [J]. 化工中间体, 2002, 23: 22-23
- [16] Yang Y, Zhang X X, Korenaga T. Distribution of polynuclear aromatic hydrocarbons (PAHs) in the soil of Tokushima, Japan [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2002, 138(1): 51-60
- [17] Hu G, Luo X, Li F, et al. Organochlorine compounds and polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediment from Baiyangdian Lake, North China: Concentrations, sources profiles and potential risk [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, 22(2): 176-183
- [18] Li W H, Tian Y Z, Shi G L, et al. Concentrations and sources of PAHs in surface sediments of the Fenhe reservoir and watershed, China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2012, 75: 198-206
- [19] Zhang P, Song J, Yuan H. Persistent organic pollutant residues in the sediments and mollusks from the Bohai Sea coastal areas, North China: An overview [J]. *Environment International*, 2009, 35(3): 632-646
- [20] Zheng B, Zhao X, Liu L, et al. Effects of hydrodynamics on the distribution of trace persistent organic pollutants and macrobenthic communities in Bohai Bay [J]. *Chemosphere*, 2011, 84(3): 336-341
- [21] Jiang B, Zheng H-L, Huang G-Q, et al. Characterization and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbon in sediments of Haihe River, Tianjin, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, 19(3): 306-311
- [22] Nehlig A. Are we dependent upon coffee and caffeine? A review on human and animal data [J]. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 1999, 23(4): 563-576
- [23] Daneshvar A, Aboulfadl K, Viglino L, et al. Evaluating pharmaceuticals and caffeine as indicators of fecal contamination in drinking water sources of the Greater Montreal region [J]. *Chemosphere*, 2012, 88(1): 131-139
- [24] 张爱涛, 卜龙利, 李薛刚, 等. 西安市某污水处理厂医药类污染物的分布与迁移转化规律 [J]. 化工学报, 2011, 62(12): 3518-3524  
Zhang A T, Bu L L, Li X G, et al. Distribution and transformation regularity of pharmaceutical pollutants in a Xi'an sewage treatment works [J]. *CIESC Journal*, 2011, 62(12): 3518-3524 (in Chinese)
- [25] Sun Q, Deng S, Huang J, et al. Contributors to estrogenic activity in wastewater from a large wastewater treatment plant in Beijing, China [J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2008, 25(1): 20-26
- [26] Botalova O, Schwarzbauer J, Sandouk N A. Identification and chemical characterization of specific organic indicators in the effluents from chemical production sites [J]. *Water Research*, 2011, 45(12): 3653-3664
- [27] Rhodes M C, Bucher J R, Peckham J C, et al. Carcinogenesis studies of benzophenone in rats and mice [J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2007, 45(5): 843-851
- [28] Groshart C, Okkerman P C. Towards the establishment of a priority list of substances for further evaluation of their role in endocrine disrupters [R]. Delft, Netherland: BHK Consulting Engineers, 2006