

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2015.06.009

# 跨国界流域重金属污染溯源体系框架初步构建

郑军<sup>1</sup>, 张立<sup>1</sup>, 杨常青<sup>2</sup>, 魏亮<sup>1</sup>, 国冬梅<sup>1</sup>

(1. 中国-东盟环境保护合作中心, 北京 100035; 2. 中日友好环境保护中心, 北京 100029)

**摘要:** 通过调研国内外水环境污染溯源的主要研究方法, 结合我国跨国界流域重金属污染和监管的现状, 提出构建以空间溯源为主线、行业溯源和成分溯源作为重要补充的跨国界流域重金属污染溯源技术体系, 综合运用基于最优搜索理论的优化监测排查法、主成分分析和因子分析法, 对跨国界流域内的重金属污染源的空间位置、行业类型及工艺环节等多个方面进行分析定位, 旨在为我跨国界流域污染控制和外事协调管理提供重要依据。

**关键词:** 跨国界流域; 重金属; 污染溯源; 最优搜索理念; 因子分析; 主成分分析; 污染控制

**中图分类号:** X501      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1004-6933(2015)06-0057-05

## Initial framework construction of sources identification system of heavy metal pollution in trans-boundary river basin

ZHENG Jun<sup>1</sup>, ZHANG Li<sup>1</sup>, YANG Changqing<sup>2</sup>, WEI Liang<sup>1</sup>, GUO Dongmei<sup>1</sup>

(1. China-ASEAN Environmental Cooperation Center, Beijing 100035, China;  
2. Sino-Japan Friendship Centre for Environmental Protection, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Based on investigation of the internal and external research on water pollution source identification methods, combined with heavy metal pollution and regulatory status of trans-boundary river, a framework of sources identification for heavy metal pollution in Chinese trans-boundary water was constructed, which regards space identification as the main line, industry and component identification methods as the important supplementary. Optimization of monitoring investigation method based on optimal search theory, principal component analysis and factor analysis was applied to identify the comprehensive locating of the spatial position, industry type and process of heavy metal pollution sources in the trans-boundary river, which provides a scientific basis for trans-boundary water pollution control and foreign coordination.

**Key words:** trans-boundary river; heavy metal; pollution sources identification; optimal search theory; factor analysis; principal component analysis; pollution control

跨国界流域重金属污染是指产生于一国管辖范围内的重金属污染物,通过跨国界河流这一介质,在另一国领土范围内产生环境影响或危害。我国有跨国界河流40多条,涉及19个主要国家<sup>[1]</sup>,边境地区的发展大多依托当地自然资源,其中重金属采矿与冶炼加工企业基本分布在边境流域的上游,潜在重大的重金属跨境污染风险。2005年“松花江事件”发生至今,从国外政治和谈判压力看,周边国家对于

跨界河流水质的关注已经上升到前所未有的高度<sup>[2]</sup>。其中,跨国界流域重金属污染的跨界影响日益受到中外双方关注,如中俄跨界水体联合监测中专门就水中和底泥中的砷、汞、镉、六价铬和铅等重金属污染物进行联合监测,并拟就溯源分析展开谈判;中国和哈萨克斯坦交换的跨界河流水质监测指标中也包括了砷、汞、镉、六价铬和铅等主要重金属污染物。目前,国内对跨国界河流重金属污染状况

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07503-004-03);环保公益性行业科研专项(201009040)

作者简介:郑军(1982—),男,工程师,博士,主要从事跨国界环境问题研究。E-mail: zheng.jun@chinaaseanenv.org

掌握得较少,还没有开展系统有效的溯源分析,而对重金属污染溯源是整个跨国界河流污染防治技术合作与利益协调的基础和关键。

## 1 国外河流污染溯源概况

“溯源”又称“源解析”,起源于对大气颗粒物的识别与解析。发达国家于20世纪六七十年代开始,为了有效控制大气颗粒物的污染源,逐渐研究、发展了许多用于计算污染源对受体环境贡献值的计算模型<sup>[3]</sup>。大气源解析技术大体可以分为3种:①排放清单;②以污染源为对象的扩散模型;③以污染区域为对象的受体模型。河流水环境的污染溯源研究主要借助了部分大气污染源解析的扩散和受体模型,如贝叶斯推理法、多元统计、化学质量平衡模型(CMB)<sup>[4]</sup>等。Simeonov等<sup>[5]</sup>用主成分分析法、多元线性回归法解析希腊北部流域水体污染源。

但在实际应用中,发达国家由于建立了系统完整的排放清单,并通过普及自动在线监测设备,建立了完善的水质监测系统,大部分水污染能通过在线监测数据直接查找到污染源。如,美国于1959年开始进行水质自动监测,现有覆盖全美各河流与水源超过7000个观测站点,并且所有站点都与卫星联网,所有站点全天候监控,并且所有站点2h前的数据均可在网络上查到<sup>[6]</sup>。英国在1975年建成的泰晤士河流域水环境监测系统由1个监控中心站和250个子站组成。德国莱茵河各州内部中,北威州有3500个基础监测站,250个强化监测站,91个趋势监测站<sup>[7]</sup>。荷兰在34000 km<sup>2</sup>内设置了30000多个水质监测点,密度接近1个/km<sup>2</sup><sup>[8]</sup>。日本在1971年后,由环境厅支持,开始在东京、大阪等地建立水质自动监测系统,至1992年已设置169个水质自动监测站<sup>[9]</sup>。这些监测站所采用的水质监测设备在应用中逐渐引入了现代尖端微电子技术,如嵌入式微控制器技术,完全实现数据采集、分析和运算的智能化和自动化。因此,在水污染事故发生后,可通过查看在线监测数据迅速开展溯源工作,并且结果准确。

## 2 国内常见水环境污染溯源方法

我国在环境污染溯源方面的研究主要集中在大气环境的研究<sup>[10-11]</sup>,而水环境的污染溯源研究起步较晚。在实际工作中,国内水环境的污染源排查比较常用的方法依然是传统的排查法,即首先通过基础资料调研与现场勘查确定污染物质与污染范围,然后对沿河污染源进行现场调查,确定疑似污染源,采集该污染源下游断面具有代表性的水质样品,进行

监测分析,从而确定污染源。传统的排查法有耗时长,人力、物力、财力消耗大等缺点。鉴于此,国内相关专家也尝试从其他角度开展污染溯源的理论方法研究。

### 2.1 基于少量监测数据的水动力学理论反演法

水动力学反演法是指以水动力学理论为基础,根据当地水文地形、污染指标监测值、污染源分布基本情况等实测数据,从空间上借助数学模型,推算反演污染源的排放强度并定位污染源位置的方法。该方法主要包括遗传算法(GA)<sup>[12]</sup>、贝叶斯推理法<sup>[13]</sup>和正则化法<sup>[14]</sup>3种。水动力学反演法能在少量几个污染源的情况下对实际污染源进行精确的回溯与定位,但对该法对水文数据的要求较高,计算过程需涉及流速、扩散系数、污染物降解速率等参数。由于我国各跨国界流域水文情势较为复杂,监测断面相对不足,并且污染源来源繁多,因此水动力学反演法并未得到广泛应用。

### 2.2 基于一定量监测数据的成分比例分析法

成分比例分析法是指在已知若干疑似目标污染源的情况下,通过多元统计、化学质量平衡、源解析受体等模型,推断各疑似污染源对特征污染元素的污染贡献比例。该方法主要包括主成分分析/因子分析法<sup>[15-16]</sup>、化学质量平衡模型(CMB)<sup>[17-18]</sup>、源解析受体模型(IDNN)<sup>[19]</sup>3种。其中CMB法曾被美国EPA规定为源解析标准方法。该方法根据质量守恒定律,将各污染源的污染物质乘以沿途消耗系数,再进行线性组合,得出污染区域的污染物质成分谱。CMB法国际认可度较高,但沿途损耗系数的给出需实时更新排放源数据,因此工作量较大。成分比例分析对水文参数的需要较少,但对监测断面的数量和监测数据有一定的要求,并且要求各污染源之间互不相关,采样和分析期间变化不大。以上3种方法在国内重金属的污染溯源中都有所应用<sup>[17,20-21]</sup>。

### 2.3 基于大量监测数据的污染源排查法

污染源排查法是指利用现有环保部门的水质监测网,收集大量监测断面或监测点的环境数据,结合系统科学的分析,反复排查以搜索到最有可能产生污染事件的污染源。该方法包括传统的监测排查法以及基于最优搜索理论的优化监测排查法2种。基于最优搜索理论的优化监测排查法是刘颖<sup>[20]</sup>在系统分析我国环境应急监测现状的基础上,引入属于运筹学范畴的最优搜索理论,从目标和搜索资源2个方面优化了流域事故性污染源的搜索体系。

基于最优搜索理论的优化监测排查法的主要过程是:首先在详细掌握当地污染源分布和管理状况的基础上,由专家组对排污口和污染子区域进行划

分,并分类计算不同子区域污染源的出现概率,最后对不同排污子区域提出优化后的监测排查方案<sup>[16]</sup>。污染源排查法对水文和监测数据要求相对不高,是目前环保部门掌握并应用最多的污染溯源方法,比较适合我国目前重金属污染的空间溯源工作。笔者认为,根据我国不同流域事故性污染源的特点,运用基于最优搜索理论的优化监测排查法是值得推荐的污染溯源方法。

## 2.4 基于特殊监测方法的溯源法

这是一种利用同位素<sup>[21]</sup>、遥感<sup>[22]</sup>和流场模拟<sup>[23]</sup>等特殊监测手段的溯源方法。这些方法对监测技术、设备以及技能要求较高,实际应用中需要考虑的因素较多,结果相对粗略。目前这些方法在我国基本停留在理论研究阶段,还不具备开展大范围实践工作的条件。

## 2.5 其他辅助方法

其他辅助方法有,通过对比监测点与当地不同背景沉积物中重金属质量浓度来辨别监测点的重金属来源途径的背景值比较法<sup>[24]</sup>;通过比较各种重金属之间、重金属与其他污染指标之间、重金属与运移载体之间的相关性,辨别污染来源的相关性分析法<sup>[25]</sup>;将污染物质以及相关离子按浓度绘制成图,根据图形特征和当地污染源的特征推断污染源的绘图法<sup>[26]</sup>。以上这些方法基本上都无法独立给出污染物的确切来源,因此多作为辅助性的溯源方法。

以上5大类污染溯源方法各有特点,其中前3类方法中越靠后的方法所需数据量和获取难度都越大,得到的结果也越精准。第4类方法则要基于特殊的监测手段,数据获取的技术难度相较前3种更高,实际应用的案例也更少。而第5类则是辅助性说明方法,基本不能作为独立的溯源手段判定污染的来源。此外,从在国内的应用层面来看,我国水环境污染溯源技术体系并不成熟,大部分文献报道属于学术研究阶段,并且也多集中在有机物尤其是多环芳烃(PAHs)的源解析研究,而有关重金属源解析的学术研究大部分采用第2类成分比例法。究其原因,化合物的含量和成分在污染物来源解析中起到了非常重要的作用,相比有机物污染源成分复杂且多变,重金属在水体中具有很高的稳定性和难降解性,因此因子分析、CMB、受体模型等基于一定量监测数据的成分比例法是解析无机污染物尤其是重金属的首选方法。

## 3 跨国界流域重金属污染溯源技术体系构建

### 3.1 跨国界流域重金属污染溯源技术体系框架

我国跨国界河流水量占有所有河川水量27%,虽

然对跨境河流的利用率不足5%,但近年来我国对跨境河流的开发利用还是引起了一些周边国家的争议<sup>[1-2]</sup>。相较于内地河流,跨境河流地处边陲地区,较少受化工类企业的有机污染,而相对较多的矿产资源开发所带来的重金属污染以及尾矿库溃坝风险,使得跨国界河流重金属污染应急溯源的技术体系构建成为当务之急。

国内在重金属污染溯源方面也做过大量的研究。从污染物溯源的发展历程上来看,早期研究方向主要为潜在事故发生源管理、应急管理、自动实时监测与预警、快速响应应急方案等方面,但这些研究大多针对已知(或者疑似)污染源,而针对未知污染源的溯源分析,比较常用的依然为传统的排查法。而目前我国跨国界河流监测断面设置相对较少,重金属实时监测系统的欠缺使得国外的溯源经验很难为国内借鉴。此外,我国跨界流域水质监测数据和水文参数相对不足,而边境地区包括尾矿库在内的疑似重金属污染源数量众多,单靠1种溯源方法很难有效准确地达到定位要求,亟须构建从污染源清单建立和比对,到应用分析技术手段回溯验证的一整套技术体系。

为便于及时而有效地开展跨国界流域重金属污染溯源,必须构建跨国界流域重金属污染溯源技术体系框架(图1)。首先以当地涉重金属污染源排放清单初筛为基础,从空间、行业和成分3个角度入手,并以空间溯源为主线,行业溯源和成分溯源为重要补充,综合运用基于最优搜索理论的优化监测排查法、主成分分析法和因子分析法,实现对跨国界流域内重金属污染源的空间位置、行业类型及工艺环节等多个方面进行逐步回溯、定位的目的。

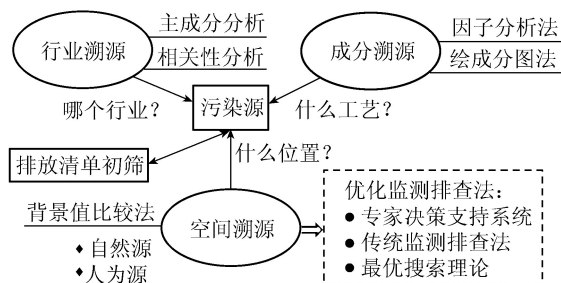


图1 跨国界流域重金属污染溯源技术体系框架

### 3.2 空间溯源是跨界水污染溯源的重点和定责前提

空间溯源就是要找出污染源的具体位置,并明确重金属污染源来自自然源还是人为产生,这是有关跨境双方污染溯源追责的首要前提。目前我国环保部门普遍使用传统监测排查法。优化监测排查法是在传统监测排查法基础上改进而来,容易为地方

环保部门所掌握和使用,因而推荐将其作为地方环保部门空间溯源的主要方法。下一步应按照不同行政区划、受纳跨界水体的具体河段开展优化监测排查的研究与示范工作。此外,背景值比较法是开展空间溯源的重要辅助方法,该方法结合不同历史时期以及当地背景土壤、矿石重金属含量的数据,用以区分污染的自然源和人为源属性,尤其是针对原生地质条件中重金属含量较高地区,可以较好地帮助分析污染的来源情况。

### 3.3 行业溯源和成分溯源是空间溯源的重要补充

行业溯源指通过调查掌握边境地区各类环境质量统计数据,采用主成分分析法或因子分析法分析涉重金属污染源排放数据,判断各河段内相关重金属因子的主要行业来源。行业溯源辅以相关性分析方法,从两两之间寻找关联性,提高行业溯源的准确性。成分溯源是在行业溯源基础上找出该类重金属污染有可能指向的具体生产工艺环节。成分溯源推荐因子分析法作为主要方法,通过对特定重金属的不同形态、价态的分析,找出产生该类重金属污染现象的具体工艺环节。辅助方法为绘图法,即将河流重金属及其相关离子浓度绘制成图,根据图形特征和污染源特征比对,推断生产工艺的重金属污染来源。

## 4 总结与展望

跨国界水环境污染问题事关国家政治外交大局,水污染溯源体系的构建与应用对污染防治和跨界水纠纷的解决具有重要意义。目前由于国内的水质实时监测系统并不完善,适合我国国情的各类排放源成分谱数据库还没有建立起来,因此污染溯源方法并不能直接借用国外的经验,应尽快探索构建一套适合我国国情的水污染溯源技术体系。我国跨国界流域内的重金属污染潜在影响较大,亟须加强边界流域内涉重企业重大风险源的调查与筛选工作,建立流域重金属污染排放源清单。与此同时,借助调查采样与数据分析,综合运用空间溯源、行业溯源和成分溯源的流域重金属污染溯源技术体系,对跨国界流域内重金属污染源的空间位置、行业类型及工艺环节等多个方面进行定位,逐步缩小回溯范围,为重金属溯源以及判断污染的发展趋势提供参考,也为跨国界水矛盾的调处提供科学基础。

### 参考文献:

[1] 李志斐. 跨国界河流问题与中国周边关系[J]. 学术探索,2011(1):27-33. (LI Zhifei. The issue of cross-border rivers and the relationship between China and the

circumjacent countries [J]. Academic Exploration, 2011 (1):27-33. (in Chinese))

- [2] 国冬梅,张立. 跨国界流域内上下游国家权利与义务分析[J]. 环境与可持续发展,2011(6):65-70. (GUO Dongmei,ZHANG Li. Analysis of rights and obligations of upstream and downstream countries in transboundary basin [J]. Environment and Sustainable Development, 2011 (6):65-70. (in Chinese))
- [3] GORDON G E. Receptor models [J]. Environmental Science & Technology,1980,14(7):792-800.
- [4] GLESER L J. Some thoughts on chemical mass balance models [J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems,1997,37(1):15-22.
- [5] SIMEONOV V, STRATIS J A, SAMARA C, et al. Assessment of the surface water quality in Northern Greece [J]. Water Research,2003,37(17):4119-4124.
- [6] 王炳华,赵明. 美国环境监测一百年历史回顾及其借鉴(续四)[J]. 环境监测管理与技术,2001,13(4):13-17. (WANG Binghua, ZHAO Ming. The review of USA environmental monitoring in one century and it's reference to US (Continuation 4) [J]. The Administration and Technique Of Environmental Monitoring, 2001, 13 (4):13-17. (in Chinese))
- [7] 李红旭. 德国环境保护及其管理概况[J]. 新疆环境保护, 1997, 19 (4): 33-35. (LI Hongxu. Germany environmental protection and its management [J]. Environmental Protection of Xinjiang, 1997, 19 (4): 33-35. (in Chinese))
- [8] 张靖,吴莘,田一平. 德国水体区域和流域的环境管理[J]. 环境科学与技术, 2005, 28 (4): 2-4. (ZHANG Jing, WU Ping, Tian Yiping. Environment protection of regional and valley water bodies in Germany [J]. Environmental Science and Technology, 2005, 28 (4): 2-4. (in Chinese))
- [9] 张伟,唐德善,曾令刚. 水环境与社会经济发展阶段关系:太湖流域与日本之比较研究[J]. 水资源保护, 2004, 20 (2): 34-36. (ZHANG Wei, TANG Deshan, CENG Linggang. Preliminary analysis on the relation of water environment and social—economic development phases: a comparative study between Taihu River Basin and Japan [J]. Water Resources Protection, 2004, 20 (2):34-36. (in Chinese))
- [10] 戴树桂,朱坦. 受体模型在大气颗粒物源解析中的应用和进展[J]. 中国环境科学,1995,15(4):252-257. (DAI Shugui, ZHU Tan, BAI Zhipeng. Application and development of receptor models for the source apportionment of airborne particulate matter [J]. China Environmental Science, 1995, 15 (4): 252-257. (in Chinese))
- [11] GORDON G E. Receptor models [J]. Environmental Science & Technology,1988,22(10):1132-1142.

- [12] 闵涛,周孝德,张世梅,等. 对流-扩散方程源项识别反问题的遗传算法[J]. 水动力学研究与进展,2004,19(4):520-524. (MINTao,ZHOU Xiaode,ZHANG Shimei, et al. Genetic algorithm to an inverse problem of source term identification for convection diffusion equation [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2004, 19(4): 520-524. (in Chinese))
- [13] 曹小群,宋君强,张卫民,等. 对流-扩散方程源项识别反问题的MCMC方法[J]. 水动力学研究与进展,2010,25(2):127-136. (CAO Xiaoqun,SONG Junqiang,ZHANG Weimin, et al. MCMC method on an inverse problem of source term identification for convection-diffusion equation [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics,2010,25(2):127-136. (in Chinese))
- [14] 潘军峰,闵涛,周孝德,等. 对流-扩散方程逆过程反问题的稳定性及数值求解[J]. 武汉大学学报:工学版,2005,38(1):10-13. (PAN Junfeng, MIN Tao, ZHOU Xiaode, et al. Stability analysis and numerical solution of inverse problem in reverse process of convection-diffusion equation [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2005,38(1):10-13(in Chinese))
- [15] 卜红梅,谭香,张全发. 陕西省金水河中溶解性重金属的分析及污染源识别[J]. 环境化学,2009,28(1):107-111 (BU Hongmei, TAN Xiang, ZHANG Quanfa. Dissolved heavy metals analysis and pollution sources recognition in the Jinshui River, Shaanxi [J]. Environmental Chemistry, 2009, 28(1): 107-111. (in Chinese))
- [16] 李如忠,洪齐齐,罗月颖. 巢湖十五里河沉积物污染特征及来源分析[J]. 环境科学研究,2010,23(2):144-151. (LI Ruzhong, HONG Qiqi, LUO Yueying. Pollution characteristics and source analysis of contaminants in bed sediments from Shiwuli River, Chaohu Lake [J]. Research of Environmental Sciences, 2010, 23(2): 144-151. (in Chinese))
- [17] 苏丹,唐大元,刘兰岚,等. 水环境污染源解析研究进展[J]. 生态环境学报,2009,18(2):749-755. (SU Dan, TANG Dayuan, LIU Lanlan, et al. Reviews on source apportionment of pollutions in water environment [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(2): 749-755. (in Chinese))
- [18] 祝云龙,姜加虎,孙占东,等. 洞庭湖沉积物中重金属污染特征与评价[J]. 湖泊科学,2008,20(4):477-485. (ZHU Yunlong, JIANG Jiahu, SUN Zhandong, et al. Character and assessment of heavy metals in the sediments from Lake Dongting [J]. Lake Science, 2008, 20(4): 477-485. (in Chinese))
- [19] 黄小平. 源解析受体模型在伶仃洋沉积物重金属污染研究中的应用[J]. 热带海洋, 1995, 14(1): 1-6. (HUANG Xiaoping. Application of the receptor model to research on heavy metal pollution of sediments in Lingdingyang estuary [J]. Tropic Oceanology, 1995, 14(1):1-6. (in Chinese))
- [20] 刘颖. 基于最优搜索理论的流域事故性污染源搜索方法研究[D]. 成都:西南交通大学,2007.
- [21] 刘茜. 湘江下游沉积物重金属污染及铅同位素地球化学分析[D]. 长沙:湖南师范大学,2011.
- [22] 王爱华,姜小三,潘剑君. CBERS与TM在水体污染遥感监测中的比较研究[J]. 遥感信息,2008(2):46-50. (WANG Aihua, JIANG Xiaosan, PAN Jianjun. Comparative study between CBERS and TM data in water pollution [J]. Remote Sensing Information, 2008(2):46-50. (in Chinese))
- [23] 吴文强,李文文,卫福旺. 济源盆地浅层地下水污染溯源模拟[J]. 地下水, 2009, 31(4): 95-97. (WU Wenqiang, LI Wenwen, WEI Fawang. Simulation of the shallow groundwater pollution Trace to the source model of Jiyuan Basin [J]. Ground Water, 2009, 31(4):95-97. (in Chinese))
- [24] 刘伟,陈振楼,许世远,等. 上海市小城镇河流沉积物重金属污染特征研究[J]. 环境科学,2006,27(3):538-543. (LIU Wei, CHEN Zhenlou, XU Shiyuan, et al. Pollution character of heavy metals in river sediments from small towns [J]. Shanghai. Environmental Science, 2006, 27(3):538-543. (in Chinese))
- [25] 韦蔓新,何本茂. 钦州湾近20a来水环境指标的变化趋势Ⅲ微量重金属的含量分布及其来源分析[J]. 海洋环境科学,2004,23(1):29-32. (WEI Manxin, HE Benmao. Change trend of water environment indices in Qinzhou bay in 20 years Ⅲ: quantitative change of water temperature, salinity and pH and effect of environment [J]. Marine Environmental Science, 2004, 23(1): 29-32. (in Chinese))
- [26] 赵解春,李玉中,ICHIJI Y,等. 地下水硝酸盐污染来源的推断与溯源方法概述[J]. 中国农学通报,2010,26(18):374-378. (ZHAO Jiechun, LI Yuzhong, ICHIJI Y, et al. Summary on deduction and trace the source methods for ground water nitrate contamination [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(18):374-378. (in Chinese))

(收稿日期:2015-08-15 编辑:彭桃英)

