



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2016.02.007

陈锋, 孟凡生, 王业耀, 等. 地表水环境污染物受体模型源解析研究与应用进展[J]. 2016, 14(2): 32-37.

CHEN Feng, MENG Fan sheng, WANG Ye yao, et al. Research and application progress of source apportionment in receptor model for surface water pollutant[J]. 2016, 14(2): 32-37. (in Chinese)

地表水环境污染物受体模型源解析研究与应用进展

陈 锋², 孟凡生³, 王业耀^{1,4}, 张铃松³, 杨 琦¹

(1. 中国地质大学(北京) 水资源与环境学院, 北京 100083; 2. 北华航天工业学院, 河北 廊坊 065000;

3. 中国环境科学研究院 水污染控制技术研究中心, 北京 100012;

4. 中国环境监测总站 国家环境保护环境监测质量控制重点实验室, 北京 100012)

摘要: 当前地表水体污染问题严重, 准确掌握污染物的来源并从源头上对污染物实施总量控制是实现污染源有效监管的技术依据, 也是我国流域污染防治工作的重要技术支撑。在对国内外已有的水环境污染源解析技术归纳的基础上, 着重对地表水污染源解析受体模型中的成分/比值法、指纹图谱法、化学质量平衡模型和多元统计法等方法的研究和应用进展进行了详细阐述, 并对国内外地表水污染源解析技术存在的问题和应用前景进行了评述和展望, 指出当前水环境源解析技术存在的主要问题为: 现有源解析技术的局限性和约束条件难于满足, 使得分析结果存在较大误差; 污染源指纹谱不完整等现状制约了源解析的研究深度; 特定区域污染源指纹谱的修订存在较多困难; 现有模型仅反映过去时段对受体的贡献; 源解析研究的目标污染物相对有限。对现有技术的完善与优化, 各模型间的综合分析、耦合应用为当前研究的热点与发展趋势。

关键词: 地表水; 污染物; 源解析; 清单分析; 扩散模型; 受体模型

中图分类号: X52 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2016)02-0032-06

Research and application progress of source apportionment in receptor model for surface water pollutant

CHEN Feng^{1,2}, MENG Fan sheng³, WANG Ye yao^{1,4}, ZHANG Ling song³, YANG Qi¹

(1. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. North China

Institute of Aerospace Engineering, Langfang 065000, China; 3. Research Center of Water Pollution

Control Technology, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China;

4. China National Environmental Monitoring Centre, State Environmental Protection Key Laboratory of Quality Control in Environmental Monitoring, Beijing 100012, China)

Abstract: Abstract: The surface water pollution is a serious problem. Mastering the water pollution source and controlling the total amount are the technical bases for achieving regulation of water pollution source, and can provide the necessary technical support for the surface water pollution control. In this paper, the surface water pollution source methods were summarized both in China and abroad. The research and application progresses of receptor model which was the more effective source apportionment model technology were discussed in detail, such as ratio method, fingerprint method, chemical mass balance method and multivariate statistical model. The existing problems and application prospect of surface water pollution source analysis technology were reviewed and prospected. It pointed out that the main problems of current source of water environment analytical technology were as follows: The research objectives of source parse pollutants were relatively limited; The complete technical system was lacking and the limitations of existing technology limited the rationalization of the source parse results; The incompleting of pollution source component spectrum and the existing monitoring means restricted the deep of source analytical research. It also put

收稿日期: 2015-02-10 修回日期: 2015-03-18 网络出版时间: 2016-04-14

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160414.1406.001.html>

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07502-002; 2015ZX0720F-008)

Fund: National Water Pollution Control and Governance of Science and Technology Major Special(2014ZX07502-002; 2015ZX0720F-008)

作者简介: 陈 锋(1981-) 女, 河北廊坊人, 副教授, 博士, 主要从事水污染防治方面研究。E-mail: chf_chenfeng@126.com

forward that the improvement and optimization for the existing technology as well as the multivariate analysis and coupling application were becoming a source of parsing technology development trend. The geographic information technology, engineering mathematics methods and the development of analysis monitoring technology will write a new page for water environment pollution source analytical research.

Key words: surface water; pollutant; source apportionment; inventory analysis; diffusion model; receptor model

水污染源解析主要通过对水环境污染物与污染源间的关系进行评估来准确地追踪污染物的来源^[1],是研究污染源对其周围环境的影响和作用的一种技术方法。

近些年,我国河流面临着农药、有机物、重金属等污染物带来的巨大压力,河流污染问题日益突出^[2]。因此,针对水体环境的特点及其污染物特征,筛选出影响水体水质的特征污染物,准确识别水体污染的自然源和人为源,并确定其贡献程度,建立水体污染源解析技术体系,可以对水环境质量评估、水体环境风险评价和污染物削减提供技术支持。

1 水体污染类型及其污染特征

地表水环境污染物源解析必须通过特征污染物的源解析实现,所以选择和优化目标化合物尤其重要^[1]。水体污染方式主要为:点源污染、面源污染和内源污染。点源污染主要是由工业废水和生活污水排入引发的;面源污染主要是农药化肥、污水灌溉等地表径流和基流渗入引起的;内源主要是自然源。污水中污染物的种类可分为无机物和有机物。无机物有重金属、硝酸根离子、氰化物、氮、磷等,有机物包括多环芳烃、氯代物、DDT、甲基汞、酚类和酯类等。当前,国内外特征污染物的研究主要集中在有机污染物,尤其是持久性有机污染物。20世纪70年代,水环境污染带来的一系列问题引起了西方发达国家的高度重视,美国于1976年颁布了65类179种优先监测污染物,各国的研究重点从常规污染物向持久性污染物转移。我国从“七五”期间开始筛选优先控制污染物,1989年颁布了我国14类68种优先控制污染物黑名单^[3]。水环境的污染物源解析要明确水体的污染类型和其污染特征,而这两者又受到当地的社会发展状况、经济发展水平、产业结构和资源消耗状况等影响。

2 污染物源解析方法及其应用

当前的水体污染物源解析技术主要分为三类:清单分析法、扩散模型和受体模型^[4,5]。清单分析法^[6]是通过观测和模拟污染物的源排放量、排放特

征及排放地理分布等,建立列表模型的一种源解析方法;扩散模型^[7,9]是一种预测式模型,它对污染物的时空变化情况的预测是通过输入各个污染源的排放数据和相关参数信息来实现的;受体模型^[10]通过对受体样品进行化学分析进而计算出各污染源贡献率,该技术的最终目的是对受体有贡献的污染源进行识别,可以对各污染源的分担率定量计算。在三大源解析模型中,受体模型不依赖于污染源排放条件,不需追踪目标污染物迁移过程,因而得到飞速发展并成为目前使用最广泛的源解析技术,适合用来实现污染源的定性和定量分析^[11,12]。受体模型包括^[13]显微分析法、物理法、化学法、同位素法和逸度模型法。化学方法是受体模型中实现条件最简单,并能充分利用现实中监测数据实现较为精准源解析的一种方法,是目前应用最广泛的源解析技术。以下将对主要的化学受体模型的研究和应用情况进行详细介绍。

2.1 成分/比值法

该方法是一种定性的源解析研究方法,属于受体模型中的化学方法。其原理是依据各种污染源生成污染物的机理和具体条件不同,其生成的污染物组成和相对含量会不同。该方法属于受体模型化学法中的定性污染源研究方法,常用的比值有:(1)轻重组分比例;(2)同分异构体比例。Immaculada^[14], Jang^[15], Sctta^[16], Mohamad^[17], Mai^[18]等选用比值法研究得出沉积物中的多环芳烃(PAHs)来源包括自然源,燃烧(汽车排放、燃煤、森林火灾、生物质燃烧、冶炼厂)源和石油源。在国内外学者进行了大量研究工作的基础上,多环芳烃(PAHs)污染源的确定已经有了较成熟的比值数据。如根据菲/蒽、荧蒽/芘、芘/苯并[a]芘等单体的比值可以判别多环芳烃(PAHs)的来源。Sicre等^[19]研究表明当荧蒽与芘的质量比值小于1,PAHs主要来自石油类产品的输入;当比值大于1时,则主要来自化石燃料燃烧。Budzinski等^[20]研究表明,沉积物中菲/蒽的质量比值小于10表示多环芳烃(PAHs)以燃烧源为主,比值大于10则以石油来源为主。

2.2 指纹图谱法

该方法通过比较环境样品和特征污染源中污染物的指纹图谱来识别某种污染物的来源,也属于定性研究的受体模型,其局限在于需要预先知道特征污染物的指纹图谱,当各污染源的指纹图谱区分不明显或较难获得时,使用该方法识别污染源将非常困难。杨玉霞等^[21]应用该法对黄河兰州段多环芳烃(PAHs)进行污染源解析,得出兰维厂、兰炼管道桥、中山桥、什川桥断面主要为石油污染,油污干管断面为受到石油冶炼燃烧所得污染,八盘峡断面主要是木材及煤燃烧所致污染的结论。Cheng 等^[22]应用指纹图谱法对铅(Pb)进行了源解析研究。

2.3 化学质量平衡模型(CMB)

CMB 模型是一种发展较为成熟并在源解析中得到广泛应用的模型,适用于污染源数目较多、指纹图谱明确的污染物定量解析,多用于生化性质稳定的有机物或重金属的源解析。该方法的局限在于需要满足 4 个假设条件,即(1)存在对受体污染物有贡献的若干污染源;(2)污染物组成有明显差异;(3)污染物组成相对稳定;(4)污染物间无相互多用。CMB 模型在水环境中的源解析主要集中在水体、沉积物等介质的研究,主要包括多环芳烃(PAHs)、多氯联苯(PCBs)等有机污染物。Christensen 等^[23]应用 CMB 模型对美国 Kinnickinnic 河沉积物中的多环芳烃(PAHs)进行了来源解析研究,表明该地区主要污染源是炼焦炉和煤气厂。Li^[24]运用 CMB 对芝加哥 Calumet 湖沉积物中的多环芳烃(PAHs)开展了源解析研究。人们还应用 CMB 模型成功对美国 Pepin 湖^[25]、Black River 河流^[26]、Wisconsin 河 Green 湾^[27]以及 Ashtabula 河流^[28]等水体沉积物中多环芳烃(PAHs)成功进行了源解析。我国也对 CMB 模型的源解析进行了一定的实践研究,如黄海近岸表层沉积物中的多环芳烃(PAHs)^[29]、黄河兰州段表层沉积物中的多环芳烃(PAHs)^[30]和黄河口及莱州湾沉积物^[31]中多环芳烃(PAHs),并取得了较好的结果。

2.4 多元统计法

近年来,随着检测技术和采样技术的提高多元统计方法得到了很快的发展,它的基本原理是应用统计技术对观测信息中物质间的相互关系进行统计计算,产生源成分谱或产生暗示重要排放源类型的因子数,通过对成分谱或因子数的判定进行污染源解析。多元统计法应用简单,且不需要预先知道各个污染源成分谱,仅需要受体样品监测数据,并可以

反推出污染源的成分谱。该方法可以分为如下几类:(1)因子分析/多元线性回归法(FA/MLR);(2)绝对因子得分/多元线性回归法(APCS/MLR);(3)非负约束的因子分析法(FA-NNC);(4)正定矩阵因子分解模型(PMF);(5)UNMIX 模型;(6)主成分分析/多元线性回归法(PCA/MLR)。多元统计法适用于污染源数目较少的定量研究,局限在于不能准确识别成分相似的源,存在较大偏差。Bzdusek 等^[32]运用 PMF 法对 Cheboygan 河沉积物中多氯联苯(PCBs)同聚物的来源进行了分析,确定了两个主要的来源,一个是类似 50% Aroclor 1248 和 50% Aroclor1254 的多氯联苯(PCBs)混合物,另一个是脱氯的混合物。PCA 曾被用于中国澳门海滨多环芳烃(PAHs)^[33]和 Milwaukee 市港口沉积物中的多氯联苯(PCBs)的源解析^[34]。Michael 等^[35]应用 FA/MLR 方法对 Perch 河水体和底泥中的 Hg 进行了源识别。Wu 等^[36]应用 APCS/MLR 方法对南京扬子江中的有机污染物进行了源识别。马振邦等^[37]利用 PMF 法,解析了深圳市王家庄集水区降雨径流污染的主要来源。刘春慧等^[38]将 PMF 和 FA-NNC 成功用于中国大辽河流域沉积物中多环芳烃(PAHs)的来源解析,并比较两种模型得到的来源类型与贡献,得到了两种模型对于多环芳烃来源的判定一致的结论。Du S 等^[39]和 Lisa A^[40]等分别使用 PMF 方法对 Delaware 河和 New Jersey 港的多氯联苯(PCBs)进行了来源解析研究。

2.5 其他方法

随着科学技术的不断进步,各学科交互发展,受体模型的研究也不断涌现新的技术手段,例如特征化合物法、富集因子法、逸度分析法和同位素法。特征化合物法是根据污染源排放物中某种特征化合物来确定污染物来源的方法。例如晕苯(Coronene)是汽车尾气的特征化合物,萜烯(Retene)是木材燃烧的特征化合物。富集因子法是以某种相对稳定的元素作参比元素,通过求得污染物粒子中待考查元素的相对浓度以得到富集因子数来判断污染源类型。逸度分析法是根据质量平衡原理和稳态条件,通过求出各污染物在环境中的逸度值得到各环境单元对受体污染的贡献率,从而判断污染源状况。同位素法是通过受体样品中稳定同位素或放射性同位素的测定来区分污染源。以上方法目前在国外已有应用,Kaushik^[41]等对印度的 Yamna 河流中的重金属进行了源解析研究。Donald MacKay^[42]对加拿大 Saint Louis 湖的多环芳烃(PAHs)应用逸度模型进行了源解析研究,得到了较好的结果。Kim M

等^[43]对南极洲 McMurdo 科考站附近陆地土壤及 Winter Quarters 湾表层沉积物中的多环芳烃 (PAHs) 进行了稳定碳同位素与分子组成分析,得到了较好的源解析结果。

3 源解析技术述评

3.1 存在问题

通过前文对水环境污染物源解析方法类型及应用现状的归纳,不难看出,水体污染源解析方法尚未形成完整的技术体系。同国外相比,目前我国水环境污染物源解析技术的理论研究和实践应用相对较少。主要存在如下几方面问题:(1)上述源解析技术都存在一定的局限性,且某些约束条件在水体环境中较难满足^[2,44],使得目前的源解析结果具有较大误差。(2)现实研究中污染源指纹谱的不完整、历史数据的缺失及分析监测技术的不完善,使得水环境污染物源解析技术的进展较慢^[44]。(3)由于污染源具有区域性特征,同一类污染源在不同条件下产生的指纹谱存在一定差异,因此需要针对特定地区进行指纹谱的修订,但污染源谱的修订存在诸多困难。(4)现有模型只能给出受体贡献较大的几类排放源,仅反映过去某一时段对受体有贡献的污染源,而不能反映当前对受体有贡献的污染源。(5)目前的研究主要集中在某些特征污染物,应进一步实施更多样化的污染物源解析研究。

3.2 发展趋势及展望

针对现有源解析技术的局限性,国内外很多学者对改进现有技术模型提出了改进研究探讨。Matt F 等^[45]对多元线性回归模型进行了修正并成功对 Michigan 湖的多环芳烃 (PAHs) 进行了源解析分析, August A^[46]通过研究数据样品分摊优化模型,提高了受体模型源解析的精准度。Wu^[47]和 Zhang^[48]通过聚类分析和主成分分析的耦合应用,分别对长江南京段的水质和湘江流域的水质进行了源解析,取得了很好的分析结果。田福林^[49]对非负约束受体模型的迭代终止判定条件进行了优化研究,并应用于白洋淀沉积物中多环芳烃 (PAHs) 的源解析。陈海洋^[50]提出非负约束因子分解化学质量平衡模型的复合受体模型和基于模式识别的正定矩阵分解源解析技术,并以晋江流域沉积物中重金属和日照岚山港水体沉积物种的多环芳烃 (PAHs) 为例进行了源解析的应用。污染物源解析受体模型已从定性研究发展为定量研究,对现有技术的不断完善和优化也成为当前研究的热点,各模型间进行

综合分析、多元研究、耦合应用已成为发展趋势,源解析结果更趋于合理化和精准化。

同时,随着各学科的发展,一些新技术新方法也将融入到源解析技术中,目前主要集中在三个领域:

(1) 地理信息技术在源解析技术中的应用,可以在空间中展示出污染源的变化规律,使源解析结果更形象化和具体化。(2) 工程数学方法在源解析技术中的应用,如遗传算法、投影寻踪回归和粗集理论等,但目前这些方法还有待于大量的实践来验证。(3) 分析监测技术的进步,可以极大的促进污染源受体成分谱的建立和特征污染物清单的完善。

我国水环境源解析方面的研究还很薄弱,源解析技术的发展不仅需要技术本身的进步,还需要各学科间的互助。相信随着源解析技术研究的深入和数据的积累,我国的源解析技术体系的完整性和可靠性也会随之提高,我国的地表水污染防治工作也将进入崭新的领域。

参考文献 (References):

- [1] 张怀成,董捷,王在峰.水污染源源解析研究最新进展[J].中国环境监测,2013,29(1):18-22.(ZHANG Huicheng, DONG Jie, WANG Zaifeng. The Latest progress on source apportionment of water pollution source[J]. Environmental Monitoring in China, 2013, 29(1): 18-22. (in Chinese))
- [2] 苏丹,唐大元,刘兰岚,等.水环境污染解析研究进展[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))
- [3] 周文敏,傅德黔,孙宗光.中国水中优先控制污染物黑名单的确定[J].环境科学研究,1991,4(6):9-12.(ZHOU Wenmin, FU Deqian, SU Zongguang. Determination of black list of China, s priority pollutants in water[J]. Research of Environmental Sciences, 1991, 4(6): 9-12. (in Chinese))
- [4] Li, Jang J K, Scheff P A. Application of EPA CMB8.2 model for source apportionment of sediment PAHs in Lake Calumet, Chicago [J]. Environmental Science & Technology, 2003, 37(13): 2958-2965.
- [5] 张蓓,叶新,井鹏.城市大气颗粒物源解析技术的研究进展[J].能源与环境,2008,3:130-131.(ZHANG Bei, YE Xin, JING Peng. The research progress of analytical technology urban atmospheric particulate matter sources[J]. Energy and Environment, 2008, 3: 130-131. (in Chinese))
- [6] Yang H H, Chen C M. Emission inventory and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in the atmosphere at a suburban area in Taiwan[J]. Chemosphere, 2004, 56: 879-887.
- [7] Roberta S, Arianna A, Renato V. Diffuse apportionment of the Po river eutrophying load to the Adriatic sea: Assessment of Lombardy contribution to Po river nutrient load apportionment by means of an integrated modeling approach [J]. Chem-

- sphere, 2006, 65: 2168-2177.
- [8] James J S, Wolfgang F R, Lynn M, et al. Source apportionment of airborne particulate matter using organic compounds as tracers[J]. Atmospheric Environment, 2007, 41(1): 241-259.
- [9] Danyel H, John C, Ian B, et al. Predicting microbial pollution concentrations in UK rivers in response to land use change[J]. Water Research, 2010, 44: 4748-4759.
- [10] Henry R C, Lewis C W, Hopke P K, et al. Review of receptor model fundamentals[J]. Atmospheric Environment, 1984, 18: 1507-1515.
- [11] Imamoglu I, Li K, Christensen E R, et al. Sources, transformations, and contributions in recent Fox River, Wisconsin sediments determined from receptor modeling[J]. Water Research, 2002, 36(14): 3449-3462.
- [12] Tian D L, Chen J W, Qiao X L, et al. Sources and seasonal variation of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons in Dalian, China: Factor analysis with non-negative constraints combined with local source fingerprints[J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(17): 2747-2753.
- [13] 戴树桂, 朱坦, 白志鹏. 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): 252-256. (DAI Shu gui, ZHU Tan, BAI Zhi peng. Application and development of receptor models for the source apportionment of airborne Particulate matter[J]. China Environmental Science, 1995, 15(4): 252-256. (in Chinese))
- [14] Immacalada T, Josep M B, Joan A. Aliphatic and polycyclic aromatic hydrocarbons and sulfur/oxygen derivatives in North western Mediterranean sediments: Spatial and temporal variability, fluxes, and budgets[J]. Environmental Science & Technology, 1996, 30(8): 2495-2503.
- [15] Jang J K. Temporal and spatial distribution and source identification of organic pollutants in Lake Columbia[D]. Chicago, University of Illinois, 2001.
- [16] Soota S. Characterization of naturally occurring and anthropogenic PAHs in urban sediments Wycoff/Eagle harbor superfund site[J]. Environmental Forensics, 2001, (2): 287-300.
- [17] Mohamad P Z. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in rivers and estuaries in Malaysia: A widespread input of petrogenic PAHs[J]. Environmental Science & Technology, 2002, 36(9): 1904-1918.
- [18] Mai B X. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in the coastal region off Macao, China: Assessment of input sources and transport pathways using compositional analysis[J]. Environmental Science & Technology, 2003, 37(21): 4855-4863.
- [19] Sicrem A, Marty J C, Saliota, et al. Aliphatic and aromatic hydrocarbons in the Mediterranean aerosol[J]. Environmental Chemistry, 1987, 29(1): 73-94.
- [20] Budzinskih, Jones I, Belocq J, et al. Evaluation of sediment contamination by polycyclic aromatic hydrocarbons in the ground estuary[J]. Marine Chemistry, 1997(58): 85-97.
- [21] 杨玉霞, 徐晓琳. 黄河兰州段水环境中多环芳烃来源解析[J]. 地下水, 2007, 29(1): 20-23. (YANG Yuxia, XU Xiaolin. Sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in water environment in Lanzhou Section of the Yellow River[J]. Ground Water, 2007, 29(1): 20-23. (in Chinese))
- [22] Cheng H. F., Hu y. n., Lead (Pb) isotopic fingerprinting and its applications in lead pollution studies in China: A review[J]. Environmental Pollution, 2010, 158: 1134-1146.
- [23] Christensen E R, Arora S. Source of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Sediments of the Kinnickinnic River Wisconsin[J]. Journal of Great Lakes Research, 1997, 23(1): 61-73.
- [24] Li A, Jang J K, Scheff P A. Application of EPA CM B8. 2 model for source apportionment of sediment PAHs in Lake Calumet, Chicago[J]. Environmental Science & Technology, 2003, 37(13): 2958-2965.
- [25] Kelley D W, Nater E A. Source apportionment of lake bed sediments to watersheds in an Upper Mississippi basin using a chemical mass balance method[J]. Catena, 2000, 41(4): 277-292.
- [26] Gus H, Andrew C K, Erik R, et al. Source apportionment of PAHs in dated sediments from the Black River, Ohio[J]. Water Research, 2003, 37: 2149-2161.
- [27] Su M C, Christensen E R, Karls J F. Determination of PAH sources in dated sediments from Green Bay, Wisconsin, by a chemical mass balance model[J]. Environmental Pollution, 1998, 98: 411-419.
- [28] Christensen E R, Zhang X. Sources of polycyclic aromatic hydrocarbons to Lake Michigan determined from sedimentary records[J]. Environmental Science & Technology, 1993, 27(1): 139-146.
- [29] 薛荔栋, 郎印海, 刘爱霞, 等. 黄海近岸表层沉积物中多环芳烃来源解析[J]. 生态环境, 2008, 17(4): 1369-1375. (XUE Lidong, LANG Yin hai, LIU Aifeng, et al. Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in coastal surface sediments from the Yellow Sea[J]. Ecology and Environment, 2008, 17(4): 1369-1375. (in Chinese))
- [30] 郭炜峰. 黄河兰州段沉积物多环芳烃源解析研究[D]. 天津: 南开大学, 2005. (GUO Weifeng. Source Apportionment of PAHs in estuarine sediments from the Yellow River[D]. Tianjin: Nankai University, 2005. (in Chinese))
- [31] 刘宗峰. 黄河河口及莱州湾表层沉积物中多环芳烃来源解析研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008. (LIU Zongfeng. Source apportionment of PAHs in sediments from the Yellow River estuary and Laizhou Bay[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2008. (in Chinese))
- [32] Incardona J P, Day H L, Collier T K, et al. Developmental toxicity of 4 ring polycyclic aromatic hydrocarbons in zebrafish is differentially dependent on Ah receptor isoforms and hepatic cytochrome P4501A metabolism. Toxicology and Applied Pharmacology, 2006, 217(3): 308-321.
- [33] Emmenegger C, Kalberer M, Sarnburova V, et al. Time resolution and size segregated analysis of aerosol bound polycyclic aromatic hydrocarbons[J]. Environmental Science & Technology, 2005, 39(11): 4213-4219.
- [34] Huang S B, Wang Z J, Xu Y, et al. Distribution, sources and pro-

- tential toxicological significance of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Guanting Reservoir sediments, China [J]. *Journal of Environmental Sciences China*, 2005, 17(1): 48-53.
- [35] Michael A, Gulen G, Ilhan O. Atmospheric mercury in the vapor phase, and in fine and coarse particulate matter at perch river, New York [J]. *Atmospheric Environment*, 1998, 32(5): 865-872.
- [36] Wu B, Zhao D Y, Zhang Y, et al. Multivariate statistical study of organic pollutants in Nanjing reach of Yangtze River [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 169: 1093-1098.
- [37] Jang J K. Temporal and spatial distribution and source identification of organic pollutants in Lake Column [D]. University of Illinois at Chicago, 2001.
- [38] 刘春慧, 田福林, 陈景文, 等. 正定矩阵因子分解和非负约束因子分析用于大辽河沉积物中多环芳烃源解析的比较研究 [J]. 《科学通报》, 2009, 52(24): 3817-3822. (LIU Chunhui, TIAN Fur lin, CHEN Jingwen, et al. Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments of the Daliao River, China: Positive matrix factorization and factor analysis with nonnegative constraints [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 52(24): 3817-3822. (in Chinese))
- [39] Du S, Belton T J, Rodenburg L A. Source apportionment of polychlorinated biphenyls in the tidal Delaware River [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(11): 4044-4051.
- [40] Lisa A, Rodenburg, Du S Y, Xiao B H, et al. Source apportionment of polychlorinated biphenyls in the New York/New Jersey Harbor [J]. *Chemosphere*, 2011, 103: 792-798.
- [41] Kaushik A, Ankur K, Santosh, et al. Heavy metal contamination of river Yamuna, Haryana, India: Assessment by Metal Enrichment Factor of the Sediments [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 164(1): 265-270.
- [42] Donald M, Hickie B. Mass balance model of source apportionment, transport and fate of PAHs in Lac Saint Louis, Quebec [J]. *Chemosphere* 2000, 41(5): 681-692.
- [43] Kim M, Mahlon C, Kennelcutt M C, et al. Molecular and stable carbon isotopic characterization of PAH contaminants at McMurdo Station, Antarctica [J]. *Mar Pollut Bull*, 2006, 52(12): 1585-1590.
- [44] 胡成, 王彤, 苏丹, 等. 水环境中污染物的源解析方法及其应用 [J]. *水资源保护*, 2010, 26(1): 57-60. (HU Cheng, WANG Tong, SU Dan, et al. Methods for source apportionment of contaminants and their application in aquatic environment [J]. *Water Resources Protection*, 2010, 26(1): 57-60. (in Chinese))
- [45] Matt F, Simcik, I, Steven J, et al. Source apportionment and source/sink relationships of PAHs in the coastal atmosphere of Chicago and Lake Michigan [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, 44(10): 5071-5079.
- [46] August Andersson. A systematic examination of a random sampling strategy for source apportionment calculations [J]. *Science of the Total Environment*, 2011: 232-238.
- [47] Wu B, Zhao D Y, Zhang Y, et al. Multivariate statistical study of organic pollutants in Nanjing reach of Yangtze River [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 169: 1093-1098.
- [48] Zhang Y, Guo F, Meng W, et al. Water quality assessment and source identification of Daliao river basin using multivariate statistical methods [J]. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2009, 152(1/4): 105-121.
- [49] 田福林. 受体模型应用于典型环境介质中多环芳烃、二噁英和多氯联苯的来源解析研究 [D]. 大连: 大连理工大学博士论文, 2009. (TIAN Fur lin. Source apportionment of persistent toxic substances in typical environmental media by receptor modeling: polycyclic aromatic hydrocarbons, dioxins and polychlorinated biphenyls [D]. DaLian: Dalian university of technology, 2009. (in Chinese))
- [50] 陈海洋. 河流水体污染源解析技术及方法研究 [D]. 北京: 北京师范大学博士论文, 2012. (CHEN Haiyang. Study on technical methods of source apportionment and identification for river aquatic environment [D]. Beijing: Beijing Normal University, 2012. (in Chinese))

(下接第 92 页)

- [23] 芮孝芳, 张超. Muskingum 法的发展及启示 [J]. *水利水电科技进展*, 2014, 34(3): 1-6. (RUI Xiaofang, ZHANG Chao. Development and inspiration of Muskingum method [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2014, 34(3): 1-6. (in Chinese))
- [24] Gomez M., Rodellar J, Mantecon J A. Predictive control method for decentralized operation of irrigation canals [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2002, 26: 1039 - 1056.
- [25] 杨启文, 蔡亮, 薛云灿. 差分进化算法综述 [J]. *模式识别与人工智能*, 2008, 21(4): 506-513. (YANG Qiwen, CAI Liang, XU Yun can. A survey of differential evolution algorithms [J]. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2008, 21(4): 506-513. (in Chinese))