

Doi: 10.11840/j.issn.1001-6392.2019.06.010

海洋表层沉积物中金属镉的来源解析

谭赛章^{1,2}, 杨涛^{1,2}, 可愚^{1,2}, 刘材材^{1,2}, 张昊飞^{1,2}

(1. 自然资源部东海环境监测中心, 上海 200137;

2. 海洋赤潮灾害立体监测技术与应用国家海洋局重点实验室, 上海 200137)

摘 要: 利用 2015 年 8 月份对长江口及其邻近海域表层沉积物的监测数据, 基于主成分分析/绝对主成分分数 (PCA/APCS) 受体模型定量解析了重金属元素镉 (Cd) 的可能来源, 并结合地统计学插值了 Cd 的源贡献量的空间分布状况, 结果表明沉积物中镉污染主要存在 3 个可能来源, 源头及贡献率分别为工业污染 (18.8%)、陆地径流输入 (66.0%)、生物活动等自然因素 (13.6%), 并且各个源头贡献量具有不同的空间分布状况, 其中工业污染的高值区主要集中在靠近陆地区域, 陆地径流输入的分布呈现由近岸向外海逐减降低的特征, 生物活动等自然因素的高值区主要集中在远离陆地的外海区域。

关键词: 长江口; 表层沉积物; 镉; PCA/APCS 受体模型; 地统计学

中图分类号: X55 文献标识码: A 文章编号: 1001-6932(2019)06-0683-07

Source apportionment of metal Cd in the surfacemarine sediments

TAN Sai-zhang^{1,2}, YANG Tao^{1,2}, KE Yu^{1,2}, LIU Cai-cai^{1,2}, ZHANG Hao-fei^{1,2}

(1. East China Sea Environment Monitoring Center, SMNR, Shanghai 200137; 2. Key Laboratory of Integrated Marine Monitoring and Applied Technologies for Harmful Algal Blooms, Shanghai 200137, China)

Abstract: The principal component analysis/absolute principal component scores (PCA/APCS) receptor model and the ordinary kriging interpolation method were combined to identify and apportion the pollution sources of Cd in the sediments of the Yangtse River Estuary and its adjacent sea area. Three sources and their contribution rates, obtained using the receptor model, were as follows: industry drainage (18.8%), land-based runoff input (66.0%) and biological activities (13.6%), respectively. Results show that every Cd source had its unique spatial pattern. Among them, the high-value areas of industrial pollution are mainly concentrated in the areas close to the land, the distribution of land runoff input decreases gradually from the nearshore to the open sea, while the high-value areas of natural factors such as biological activities are mainly concentrated in the open sea areas far away from the land.

Keywords: Yangtse River Estuary; surface sediments; Cd; PCA/APCS receptor model; geostatistics

随着长三角地区经济开发力度的不断加强, 长江口及其附近海域所承受的环境压力越来越大, 其中重金属元素因具有来源广、残留时间长、易于沿食物链转移富集等特点, 一直是该区域备受关注的有毒污染物之一 (马德毅等, 2003)。在河口区域不同来源的重金属经过吸附、絮凝、生物积累等过程, 只以很少的溶解态停留在水体中, 会有相当数量的重金属元素转移到沉积物中 (Valdes et al,

2005), 进入沉积物中的重金属通常能够长期稳定存在, 有较强的分布规律, 并能够直接对底栖生物群落结构和功能产生影响 (贾海波等, 2011), 海洋沉积物中重金属元素含量也因此成为国内外监测和评价海洋环境污染程度的重要指标。近年来国内外针对长江口及其附近海域沉积物重金属的研究较多, 但主要集中在含量分布及生态风险评价方面, 方明等 (2013) 对长江口沉积物重金属的分布、来

收稿日期: 2018-12-18; 修订日期: 2019-02-25

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFC1402403; 2017YFC1405002); 东海分局青年科技基金项目 (201606)。

作者简介: 谭赛章 (1988-), 工程师, 主要从事海洋环境化学研究。电子邮箱: tansz@eastsea.gov.cn。

源及潜在生态风险评价后发现,镉(Cd)的平均污染程度要明显高于其他元素,潜在的生态风险系数也较高;柴小平等(2015)对杭州湾及其邻近海域表层沉积物中的重金属进行评价后,发现汞(Hg)和镉(Cd)是主要生态风险贡献因子;贾海波等(2011)利用底栖生物作为指标,应用Bivariate和BIOENV分析表明,表层沉积物中铜(Cu)、铅(Pb)和镉(Cd)的含量已对大型底栖生物的丰度、均匀度等产生显著的影响,并强调长江口及其邻近海域的重金属污染必须得到高度的重视;He等(2019)对长江口及其邻近海域表层沉积物中重金属的形态进行研究,发现元素Cd的可交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态等在总镉中占比较高,极容易在河口演化过程中发生化学反应释放到水体中,具有较高的潜在生态风险(2019)。大量研究都表明,在长江口及其邻近海域表层沉积物中的重金属元素已经对生态环境造成了潜在的威胁,需要引起重视。

若要真正的重视重金属污染,并为后续修复工作打下基础,首先要摸清其主要来源,目前来说,对污染源的解析存在两种层次(瞿明凯等,2013),第一层次是定性判断主要的污染物来源类型,单纯的识别污染物的来源,即源识别;第二层次不仅要定性判断主要的污染源类型,还要定量计算各污染源的贡献量,即源解析。目前对长江口及其附近海域沉积物中重金属元素来源的研究主要集中在第一层次,量化源头贡献率的研究较少。正是基于这点,本文选取潜在生态风险系数较高的Cd元素,

采用主成分分析/绝对主成分分数(PCA/APCS)受体模型,在定性识别潜在污染源的基础上量化污染源的贡献率,同时为了直观理解可能的Cd污染源贡献量的空间分布和在源未知的情况下推测具体的污染源,本研究引进地统计学分析,利用地统计学揭示区域内重金属空间变异的趋势,并通过插值得到Cd污染源贡献量的空间分布图,以期为长江口及其邻近海域重金属污染防治和生态风险管理提供科学依据。

1 基础数据与研究方法

1.1 研究区域与数据来源

研究数据来源于国家海洋局东海环境监测中心2015年8月表层沉积物环境质量监测数据,采样站位共60个(图1)。沉积物质量分析按照《海洋监测规范》(GB 17378.4-2007)中所规定的方法进行,虽然本研究是对单一元素Cd的源解析,但是使用PCA/APCS受体模型的方法时,若借助其他重金属含量数据较单纯使用Cd含量数据可以得到更多信息,起到更好的解析效果,因此选取的指标包括沉积物中7种重金属元素:镉(Cd)、铜(Cu)、铅(Pb)、锌(Zn)、铬(Cr)、汞(Hg)和砷(As)。

1.2 PCA/APCS受体模型

主成分分析(PCA)是统计学中一种简化数据集的技术,具体计算过程有3步,奇异值分解(SDV)、选择维数(选择主成分)和旋转(使因子

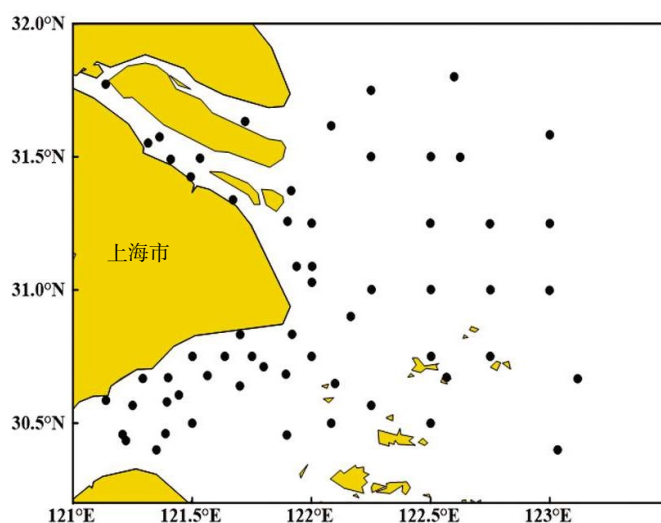


图1 采样站位

更具有代表性) (瞿明凯 等, 2013; Hou et al, 2017)。通过对 7 种重金属元素 (Cd、Cu、Pb、Zn、Cr、Hg、As) 的含量进行主成分分析, 采用 varimax 旋转来得到有意义的因子, 并采用累计贡献率 (达到 80 % 以上) 和特征值 (接近 1) 为标准来决定合适的因子数目 (赖国毅 等, 2010)。绝对主成分分数 (APCS) 是通过主成分因子得分定量地估计源对每种污染物的分担率, 也用于估计源对重金属的贡献量, 该技术被广泛应用于大气科学和水文学 (Guo et al, 2004; Song et al, 2006)。主要步骤为: 首先对所有金属元素含量进行标准化, 如下式所示:

$$Z_{ij} = \frac{C_{ij} - C_i}{\sigma_i}$$

式中: Z_{ij} 为标准化后的浓度值 (无量纲); C_i 和 σ_i 分别是元素 i 的平均浓度和标准偏差。从 PCA 得到的是归一化的因子分数, 即均值为 0 和标准偏差为 1。对所有元素引入一个浓度为 0 的人为样本, 可计算得到该 0 浓度样本的因子分数为:

$$(Z_0)_i = \frac{0 - C_i}{\sigma_i} = -\frac{C_i}{\sigma_i}$$

通过使用 PCA 可得到这些归一化的重金属浓度的因子分数。每个重金属元素的 APCS 可由每个样本的因子分数减去 0 浓度样本的因子分数得到。再用重金属浓度数据对 APCS 做多元线性回归可得到相应的回归系数。该回归系数可将 APCS 转化为每个污染源对每个样本的浓度贡献。对 C_i 的源贡献量可由一个多元线性回归得到, 相应公式为:

$$C_i = b_{\alpha} + \sum_{p=1}^n (APCS_p \times b_{pi})$$

式中: b_{α} 为对金属元素 i 做多元线性回归所得的常数项。 b_{pi} 是源 p 对金属元素 i 的回归系数。 $APCS_p$ 为调整后的因子 p 的分数。 $APCS_p \times b_{pi}$ 表示源 p 对 C_i 的质量浓度贡献, 所有样本的平均值就表示了源平均绝对贡献量。

1.3 地统计学分析

地统计是以区域化变量为基础, 借助半变异函数, 揭示样本背后的随机性和结构性, 以及空间相关性和依赖性。这里利用地统计学进行沉积物中重金属元素的空间变异分析, 主要是通过对半变异函数的计算和拟合, 将重金属空间变异特征定量化、

模型化, 计算出相关参数, 从而揭示出影响重金属空间变异的主要因素和作用方式 (汤国安 等, 2013)。半变异函数的数学表达式为:

$$r(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$$

式中, $r(h)$ 为半变异函数; $Z(x_i)$ 为元素在 x 处的含量值; $Z(x_i + h)$ 为元素在 $(x + h)$ 处的含量值; n 代表距离为 h 的个数。

半变异函数的拟合将提供 3 个参数, 即块金值、基台值、变程。当间隔距离 $h = 0$ 时, 半变异函数值称为块金值, 是由于存在测量仪器误差和一定空间范围内的自然变化引起的。当半变异函数随着间隔距离 h 的增大, 函数值从非零值达到一个相对稳定的常数时, 该常数成为基台值。基台值是系统中最大的变异, 半变异函数达到基台值时的间隔距离称为变程 (记作 R), 在 $h \geq R$ 以后, 区域化变量 $Z(x)$ 空间相关性消失。沉积物重金属各元素的空间变异性可根据块金值与基台值的比值大小, 即块金系数进行划分 (王利东 等, 2011), 块金系数表示由随机部分引起的空间变异性占总体变异的比, 若块金系数小于 25 % 说明变量有强烈的空间相关性, 多由内部区域因素控制, 如地形、气候、海流等引起的变异; 25 %~75 % 之间说明变量有中等强度的空间相关, 说明同时受内部区域因素和外部随机因素的控制; 大于 75 % 时变量空间弱相关, 说明变异主要由外部随机因素控制, 如社会经济活动 (如排污口等) 引起的空间变异 (Yang et al, 2015)。

2 结果与讨论

2.1 Cd 源解析

表 1 中是研究区域内沉积物中重金属含量的描述性统计分析, 其中重金属元素 Cd 的均值为 0.136×10^{-6} , Cu 的均值为 20.6×10^{-6} , Pb 的均值为 23.8×10^{-6} , Zn 的均值为 72.0×10^{-6} , Cr 的均值为 33.1×10^{-6} , Hg 的均值为 0.0608×10^{-6} , As 的均值为 7.58×10^{-6} , 与白有成等 (2011) 在相同海域 2009 年 6 月的调查结果基本一致。变异系数反映了采样总体中各样点之间的平均变异程度, 通过变异系数可以看出, Cd 和 Hg 的变异系数较大, 变异性较强, 说明沉积物中 Cd、Hg 受外界干扰比较显著, 空间

分异较大,这种分异很大程度上归结于自然与人为活动的共同影响(杨秀虹等,2005)。

表1 表层沉积物重金属元素的统计特征值

元素	最小值 ×10 ⁻⁶	最大值 ×10 ⁻⁶	平均值 ×10 ⁻⁶	标准 偏差	变异系 数/%	文献均值数据 (白有成等, 2011)
Cd	*	0.310	0.136	0.066 9	49	0.17
Cu	3.23	37.9	20.6	8.66	42	37.4
Pb	5.79	38.0	23.8	6.94	29	36.8
Zn	38.2	123	72.0	18.7	26	93.5
Cr	8.61	65.3	33.1	14.5	44	-
Hg	*	0.216	0.060 8	0.035 2	58	0.043
As	2.94	13.4	7.58	2.02	27	10.60

注: *代表未检出。

运用 SPSS 软件对沉积物中的 7 项重金属数据进行 KMO 检验,得到统计量值大于 0.80, Bartlett 球型检验相伴概率小于 0.01,表明各重金属间相关性较强(时立文,2013),可以做主成分分析。由表 2 和表 3 可见,通过 varimax 旋转以后,提取 3 个因子包含了原来 7 个指标全部方差的 93.302%,说明提取的 3 个因子能够比较好地体现原来 7 种金属元素的情况,第一主成分与 Cu、Pb、Zn、As 相关,占总体方差的 56.078%,第二主成分与 Cd、Hg 相关,占总体方差的 19.406%,第三主成分与 Cr、As 相关,占总体方差的 17.818%。

表2 各主成分对沉积物重金属元素浓度的总体解释方差百分比

成分	初始特征值			旋转平方和载入		
	合计	方差百分比/%	累计百分比/%	合计	方差百分比/%	累计百分比/%
1	3.208	64.153	64.153	2.804	56.078	56.078
2	0.980	19.609	83.762	0.970	19.406	75.484
3	0.477	9.539	93.302	0.891	17.818	93.302
4	0.143	2.860	96.162			
5	0.101	2.020	98.182			
6	0.052	1.018	99.200			
7	0.040	0.800	100.000			

表3 沉积物重金属元素浓度的成分矩阵和旋转成分矩阵

元素	旋转成分矩阵		
	PC1	PC2	PC3
Cd	0.273	0.940	0.200
Cu	0.911	0.139	0.288
Pb	0.923	0.067	-0.049
Cr	0.404	0.249	0.874
Zn	0.941	0.008	0.039
Hg	0.209	0.611	0.238
As	0.523	0.167	0.479

3 个因子代表了重金属元素的 3 个可能污染源,分别记为源 1、源 2、源 3。图 2 所示为根据 PCA/APCS 源解析计算得到的 Cd 污染源的贡献率。可以看到,在本研究区域内,3 个可能污染源的贡献量依次为源 1 (18.8%)、源 2 (66.0%)、源 3 (13.6%),其他未知源头为 1.6%。

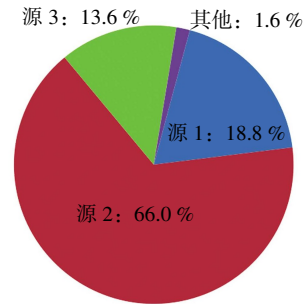


图2 Cd源贡献率

2.2 Cd空间变异特征分析

由于 PCA/APDC 对重金属元素空间尺度的分布提供的信息很少,而地统计学分析能够最大限度地保留空间变异信息,很好地描述金属含量的空间变异结构,提供区域化变量尺度的视角(马菲,2008;Lv,2019),因此,半变异函数分析能够进一步证实 PCA/APDC 的结果。为了保证半变异函数的计算和拟合的准确性,我们通过交叉验证的方式帮助确定拟合的模型,交叉验证将忽略数据集中的点,利用数据的其余部分预测该点的位置值,然后将测量值与预测值进行比较,测量值与预测值的差值称为预测误差,具体判断条件包括:验证预测具有无偏性,判定条件是平均预测误差接近 0;标准误差是准确的,判定条件是均方跟标准化预测误差接近 1;预测与测量值的偏差不大,判定条件是均方根误差和平均标准误差尽可能小。拟合好后通过获得的块金值和基台值,计算得到块金系数,见表 4。

表4 半变异函数拟合参数

因素	块金系数/%	理论模型
源 1	84	stable
源 2	18	Exponential
源 3	57	Exponential

通过表 4 可以看出,源 1 拟合的半变异函数参数中,块金系数大于 75%,分析结果表明空间弱相关,说明源头 1 主要受外部随机因素控制,受人

为影响较大; 源 2 块金系数小于 25%, 表明空间强相关, 说明源头 2 主要受内部区域因素控制; 源 3 块金系数介于 25%~75%, 表明空间中等相关,

说明源头 3 同时受内部区域因素和外部随机因素控制。

根据得到的半变异函数模型, 应用普通克里格

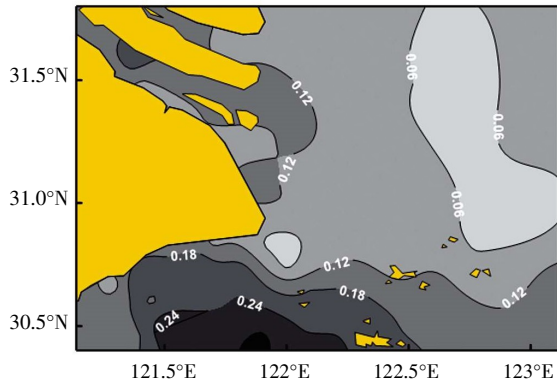


图 3 Cd 空间分布图

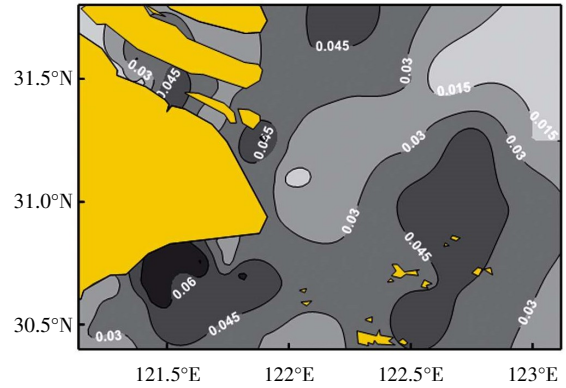


图 4 源 1 空间分布图

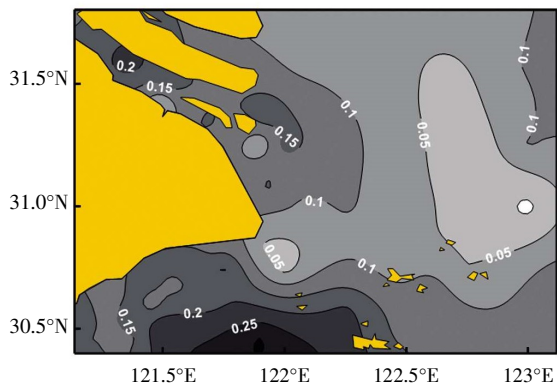


图 5 源 2 空间分布图

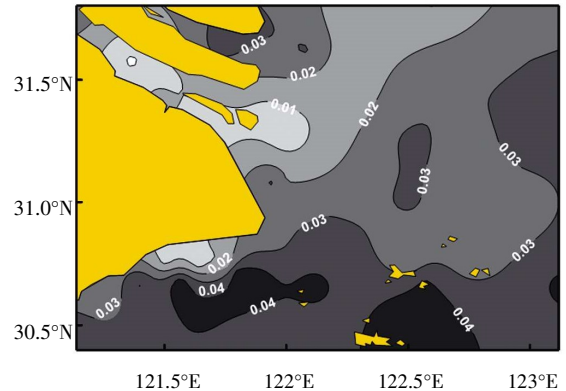


图 6 源 3 空间分布图

(Ordinary Kriging) 法进行最优内插, 绘制了不同源头对重金属 Cd 贡献的空间分布格局图。图 3 为研究区域重金属元素 Cd 的空间分布图, 可以看出, Cd 元素的高值区主要分布在杭州湾及长江口一带, 随着向外海延伸, 含量逐渐降低, 这与已有的研究成果基本一致 (Liu et al, 2019)。

图 4-图 6 为可能源头对 Cd 污染贡献的空间分布图, 源 1 的高值区主要出现在靠近陆地、岛屿的海域, 如在金山、横沙岛及舟山群岛等人类活动密集和工业密布区域。这些区域分布有大量的入海排污口, 根据上海市海洋环境调查结果, 2015 年沿海区县崇明、宝山、金山、奉贤、浦东新区共有 19 个陆源入海排污口, 年内共排放处理后的尾水 20.5 亿立方米, 排放重金属 (铜、锌、铅、镉、汞) 约 120 t。根据浙江省海洋环境调查结果, 2015 年沿海地区共有入海排污口 48 个, 年内排放

入海的污水总量约为 5.80 亿立方米, 携带入海的重金属 (铜、锌、铅、镉、汞、铬) 约 41.9 t, 其中嘉兴沿岸 3 个、舟山沿岸 21 个、宁波沿岸 8 个, 占总数 2/3 的排污口都会对长江口及其邻近海域产生影响, 这些重金属入海后会有相当部分沉降到底部, 对沉积物中的重金属产生贡献 (Valdes et al, 2005)。结合半变异函数分析结果, 源 1 主要受外部随机因素控制受人为影响较大, 推断源头 1 主要代表了人类活动的工业排污, 对 Cd 污染的贡献率约为 18.8%, 是 Cd 污染的第二大可能源头。

源头 2 呈现出明显的由河口向外海递减的趋势, 尤其在长江入海口区域和钱塘江入海口区域, 表现更为显著。长江口及邻近海域入海河流流量每年可达 10 000 亿立方米, 其中长江和钱塘江流量占研究区域总河流流量的 90% 以上 (王长友等, 2010), 这两条河流带入的污染物质也占了研究区

域总河流输入的绝大部分,根据东海区海洋环境调查结果,2015年长江重金属(铜、锌、铅、镉、汞)入海通量约12 026 t,钱塘江重金属(铜、铅、锌、镉、汞)入海通量约325 t,分别占东海区江河入海重金属总通量的73.9%和2.0%。河流携带的这些重金属物质会随着悬浮物慢慢沉降进入沉积物,对沉积物的地球化学特征产生影响。结合半变异函数分析结果,源头2主要受内部区域因素控制,推断源头2代表了以长江、钱塘江为主的陆源径流输入,源2对Cd污染的贡献率约为66.0%,是Cd污染的最大可能源头。

源头3的高值区主要出现在远离陆地的外海区域。对长江口及其邻近海域表层沉积物中Cd的形态研究后发现,Cd的碳酸盐结合态在总量中所占比例较高,进一步研究发现,从长江口口内区域到外海区域,沉积物中Cd的形态构成不断发生变化,尤其是碳酸盐结合态逐渐变高,而碳酸盐结合态的镉与生物作用息息相关(Liu et al, 2019; He et al, 2019)。这与Lin等研究结果基本一致,他们发现相关区域Cd的高值来源主要由生物成因的碳酸盐所控制(2002),因为Cd元素能作为一种营养金属元素被浮游植物从表层海水中迁移,并且有研究认为东海外陆架的黑潮水可能提供了Cd源,随后被生物碳酸盐储存并引起该区域沉积物中较高的Cd元素现象。结合Yu等(2013)对长江口及其邻近海域表层沉积物中碳酸钙的研究发现,分布趋势与源3呈现的趋势基本一致,这也表明源3与生源要素具有一定关联。结合半变异函数分析结果,源3同时受内外因素控制,这表明源3除了包含生物活动的影响外,还可能存在其他来源,尚需进一步研究。源3对Cd污染的贡献率约为13.6%,是Cd污染的第三大可能源头。

已有的对长江口及邻近海域表层沉积物中重金属的来源研究认为,长江等河流的输入占绝对优势,且影响整体海域,陆源排污主要影响排污的近岸海域(范丽等,2008;何松琴等,2011),这与本文的研究结果基本一致。王长友等(2010)研究人员汇总并分析了20世纪80年代初以来东海陆扰海域重金属排海通量年变化规律及主要来源,并应用多介质海洋环境中重金属迁移-转化模型,估算了东海陆扰海域重金属排海通量,由于研究区域、研究介质及目标元素存在差异,源头的量化比例略

有差别,但结果同样表明东海陆扰海域铜、铅、锌、镉污染物主要来源于以河流为主的陆源排放,其次是排污口,与本文研究结果一致。因此在针对研究海域表层沉积物中重金属元素Cd制定污染防治措施及开展修复工作时,应重点控制陆源径流输入的重金属含量。

3 结论

(1) 基于PCA/APCS受体模型,对长江口及其附近海域沉积物中重金属元素Cd的来源进行了解析,结果表明沉积物中Cd主要存在3个可能污染源,其贡献率分别为源1(18.8%)、源2(66.0%)、源3(13.6%)。

(2) 结合地统计学技术,对Cd的空间变异性进行了分析,其中源头1表现出空间弱相关,主要受外部随机因素控制,源头2表现出较强的空间自相关,表明主要受内部区域因素控制。源头3空间中等相关,表明同时受内部自然因素和外部随机因素控制。

(3) 根据克里格插值结果,源头1高值区主要出现在靠近陆地区域,推断代表了人类的工业排污。源头2呈现出明显的由近岸向外海递增的趋势,代表了以长江钱、塘江为主的陆源径流输入。源头3的高值区主要出现在远离陆地的外海区域,包含了生物活动等自然因素的影响。由于源2为主要源头,因此在提出该区域重金属Cd污染防治措施时应重点控制陆源径流输入。

参 考 文 献

- Guo H, Wang T, Simpson I J, et al. Source contributions to ambient VOCs and CO at a rural site in eastern Chin. *Atmospheric Environment*, 2004, 38: 4551-4560.
- He Z F, Li F L, Dominech S, et al. Heavy metals of surface sediments in the Chanjiang (Yangtze River) Estuary: Distribution, speciation and environmental risks. *Journal of Geochemical Exploration*, 2019, 198: 18-28.
- Hou D Y, O'Connor D, Nathanail P, et al. Integrated GIS and Multivariate statistical analysis for regional scale assessment of heavy metal soil contamination: A critical review. *Environmental Pollution*, 2017, 231: 1188-1200.
- Lin S, Hsieh I J, Huang K M, et al. Influence of the Yangtze River and grain size of the spatial variation of heavy metals and organic carbon in the East China Sea continental shelf sediment. *Chemical Geology*,

- 2002, 182(2/4): 377-394.
- Liu M, Chen J B, Sun X S, et al. Accumulation and transformation of heavy metals in surface sediments from the Yangtze River estuary to the East China Sea shelf. *Environmental Pollution*, 2019, 245: 111-121.
- Lv J S. Multivariate receptor models and robust geostatistics to estimate source apportionment of heavy metals in soils. *Environmental Pollution*, 2019, 244: 72-83.
- Song Y, Xie S D, Zhang Y H, et al. Source apportionment of PM_{2.5} in Beijing using principal component analysis/absolute principal component scores and UNMIX. *Science of the Total Environment*, 2006, 372: 278-286.
- Valdes J, Varga G, Sifeddine A, et al. Distribution and enrichment evaluation of heavy metals in Mejillones Bay(23°S), Northern Chile: geochemical and statistical approach. *Marine Pollution Bulletin*, 2005, 50: 1558-1568.
- Yang G G, Qu S L, Jian H F, et al. Identification of heavy metal sources in the reclaimed farmland soils of the pearl river estuary in China using a multivariate geostatistical approach. *Ecotoxicology and environmental safety*, 2015, 105: 7-12.
- Yu Y, Song J M, Li X G, et al. Environmental significance of biogenic elements in surface sediments of the Chanjiang Estuary and its adjacent areas. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, 25 (11): 2185-2195.
- 白有成, 高生泉, 金海燕, 等, 2011. 长江口及其邻近海域沉积物重金属潜在生态风险评价. *海洋学研究*, 29(4): 32-40.
- 柴小平, 胡宝兰, 魏娜, 等, 2015. 杭州湾及邻近海域表层沉积物重金属的分布、来源及评价. *环境科学学报*, 35(12): 3906-3916.
- 范丽, 程金平, 郭广勇, 2008. 长江口污染物种类及其来源. *江苏环境科技*, 21(1): 10-15.
- 方明, 吴友军, 刘红, 等, 2013. 长江口沉积物重金属的分布、来源及潜在生态风险评价. *环境科学学报*, 33(2): 563-568.
- 国家海洋局东海分局, 2016. 2015年东海区海洋环境公报 5.
- 何松琴, 宋金明, 李学刚, 等, 2011. 长江口及邻近海域夏季表层沉积物中重金属等的分布、来源与沉积物环境质量. *海洋科学*, 35(5): 4-9.
- 贾海波, 胡颖琰, 唐静亮, 等, 2011. 长江口及其邻近海域表层沉积物中重金属含量对大型底栖生物的影响. *海洋环境科学*, 30(6): 809-813.
- 赖国毅, 陈超, 2010. SPSS17.0 常用功能与应用实例精讲. 北京: 电子工业出版社, 316-320.
- 马德毅, 王菊英, 2003. 中国主要河口沉积物污染及潜在生态风险评价. *中国环境科学*, 23(5): 521-525.
- 马菲, 汪亚平, 李炎, 等, 2008. 地统计法支持的北部湾东部海域沉积物粒径趋势分析. *地理学报*, 63(11): 1207-1217.
- 瞿明凯, 李卫东, 张传荣, 等, 2013. 基于受体模型和地统计学相结合的土壤镉污染源解析. *中国环境科学*, 33(5): 854-860.
- 上海市海洋局, 2016. 2015年上海市海洋环境质量公报, 5.
- 时立文, 2013. 统计分析. 北京: 清华大学出版社, 150-256.
- 汤国安, 杨昕, 等, 2013. 地理信息系统空间分析实验教程. 北京: 科学出版社, 265-299.
- 王利东, 李朝奎, 李吟, 2011. 基于地统计学模型的惠州市土壤重金属污染评价. *矿业工程研究*, 26(1): 65-70.
- 王长友, 王修林, 李克强, 等, 2010. 东海陆扰海域铜、铅、锌、镉重金属排海通量及海洋环境容量估测. *海洋学报*, 32(4): 62-76.
- 杨秀虹, 李适宇, 2005. 地统计学方法在环境污染研究中的应用. *中山大学学报(自然科学版)*, 44(3): 97-101.
- 浙江省海洋与渔业局, 2016. 2015年浙江省海洋环境公报, 4.

(本文编辑: 崔尚公)