



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2017.06.011

王永刚, 伍娟丽, 王旭, 等. 北京市中心城河流表层沉积物重金属污染评价[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(6): 74-80, 107. WANG Y G, WU J L, WANG X, et al. Assessment on heavy metal pollution of the surface sediments from rivers in Beijing central district[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(6): 74-80, 107. (in Chinese)

# 北京市中心城河流表层沉积物重金属污染评价

王永刚<sup>1,2,3</sup>, 伍娟丽<sup>2,3</sup>, 王旭<sup>2,3</sup>, 徐菲<sup>2,3</sup>, 李焕利<sup>2,3</sup>

(1. 天津大学 环境科学与工程学院, 天津 300072; 2. 北京市环境保护科学研究院, 北京 100037;  
3. 国家城市环境污染控制工程技术研究中心, 北京 100037)

**摘要:** 为了解北京市中心城河流表层沉积物中重金属污染现状, 采用地累积指数法、主成分分析法、潜在生态风险指数法评价和分析了沉积物中汞、砷、铅、铬、镉、锰、铜 7 种重金属的污染程度、污染来源及潜在生态风险。结果表明, 重金属平均含量为 Hg 0.670 mg/kg, As 6.01 mg/kg, Pb 31.1 mg/kg, Cr 63 mg/kg, Cd 0.29 mg/kg, Mn 277 mg/kg, Cu 45 mg/kg; 平均地累积指数排序为 Hg(1.49) > Cr(0.34) > Cu(0.24) > Cd(0.14) > Pb(-0.77) > As(-1.41) > Mn(-2.30), 沉积物主要受 Hg、Cr、Cu、Cd 的污染, Hg 处于中等污染程度, Cr、Cu、Cd 处于轻度-中等污染程度, 污染主要来源于三方面: 交通、汽配(修)及供暖燃煤。重金属平均潜在生态风险系数排序为 Hg(357) > Cd(80) > Cu(13) > As(9) > Pb(7) > Cr(4) > Mn(2), 中心城沉积物潜在生态风险指数平均值为 472, 总体上具有较强生态危害。

**关键词:** 沉积物; 重金属; 地累积指数; 主成分分析; 来源; 生态风险

**中图分类号:** X503 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)06-0074-07

## Assessment on heavy metal pollution of the surface sediments from rivers in Beijing central district

WANG Yonggang<sup>1,2,3</sup>, WU Juanli<sup>2,3</sup>, WANG Xu<sup>2,3</sup>, XU Fei<sup>2,3</sup>, LI Huanli<sup>2,3</sup>

(1. School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection, Beijing 100037, China;

3. Chinese National Engineering Research Center for Urban Environmental Pollution Control, Beijing 100037, China)

**Abstract:** To investigate the pollution status of heavy metals in the surface sediments from rivers in Beijing Central District, we used the methods of the Geoaccumulation Index, principal component analysis, and Potential Ecological Risk Index to evaluate the pollution level, pollution sources, and potential ecological risks of the heavy metals including Hg, As, Pb, Cr, Cd, Mn, and Cu, respectively. The results showed that the average contents of the heavy metals were as follows: Hg 0.670 mg/kg, As 6.01 mg/kg, Pb 31.1 mg/kg, Cr 63 mg/kg, Cd 0.29 mg/kg, Mn 277 mg/kg, Cu 45 mg/kg. The descending order by the average Geoaccumulation Index was Hg(1.49) > Cr(0.34) > Cu(0.24) > Cd(0.14) > Pb(-0.77) > As(-1.41) > Mn(-2.30), showing that the surface sediments were mainly polluted by Hg, Cr, Cu, and Cd elements, with Hg at moderate pollution level and Cr, Cu, Cd at mild to moderate pollution level. The pollution mainly came from three sources: traffic, vehicle repairing, and heating coal combustion. The descending order by the average Potential Ecological Risk Coefficient was Hg(357) > Cd(80) > Cu(13) > As(9) > Pb(7) > Cr(4) > Mn(2), and the average Potential Ecological Risk Index of the sediments was 472, suggesting strong ecological hazard of the sediments in general.

**Key words:** sediment; heavy metal; Geoaccumulation Index; principal component analysis; source; ecological risk

收稿日期: 2017-05-21 修回日期: 2017-07-31 网络出版时间: 2017-11-16

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20171116.1459.009.html>

基金项目: 水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07203-001-01)

Fund: Major Project of Water Pollution Control and Treatment Science and Technology (2012ZX07203-001-01)

作者简介: 王永刚(1978-), 男, 四川资阳人, 副研究员, 主要从事水污染防治技术与规划方面研究。E-mail: edward8848@163.com

河流沉积物是水体污染物的重要储存库,人类活动产生的大量重金属等污染物通过污水排放、雨水径流及大气沉降等途径进入河流水体后,被水中的悬浮物或沉积物吸附、络合、絮凝或共沉淀,最终富集于沉积物中。研究表明,在某些条件下,河流中99%的重金属都能以各种不同形态储存于沉积物中<sup>[1]</sup>;沉积物中重金属含量往往比水体中高出数倍,甚至好几个数量级<sup>[2]</sup>。沉积物也是河流重金属等污染的重要二次污染源,表层沉积物位于水相和固相界面处,物理化学性质变化频繁,在水动力作用下,沉积物中富集的重金属又可通过溶解、扩散、解吸、离子交换等<sup>[3]</sup>方式重新进入水体当中,影响河流水质;重金属由于其生物毒性、环境持久性及可生物富集等特点,能通过食物链放大进一步威胁到陆地生物及人体健康<sup>[4]</sup>。沉积物重金属污染问题引起了国内外研究者的广泛关注,研究主要集中于河流、湖泊水库、河口海湾等水域的沉积物中重金属的含量分布和来源<sup>[5-6]</sup>、存在形态<sup>[7]</sup>及生态风险<sup>[8]</sup>等方面。

我国大多数城市河道的沉积物中重金属污染问题突出<sup>[9-10]</sup>,北京市中心城是人类活动时间长、开发强度大的地区,范围包括东城区、西城区、海淀区(不包括山后地区)、丰台区(不包括河西地区)、石景山区,占地总面积为1 085 km<sup>2</sup>。目前中心城部分河道淤积较为严重,通惠河平均淤深1.0 m,南护城河、北护城河平均淤深0.7 m,东便门橡胶坝上游淤深1.5 m<sup>[11]</sup>,受人类活动影响,河道沉积物中重金属污染严重,现有研究中缺少对北京中心城区河流沉积物重金属污染的评估,其污染的潜在生态风险尚不为人们所关注,因此对北京中心城河道沉积物中重金属污染的现状进行调查和研究具有重要的现实意义。

本研究以北京中心城主要河道为研究对象,旨在全面了解中心城河道沉积物中重金属汞、砷、铅、铬、镉、锰、铜的污染特征及潜在生态风险,采用地累积指数法和潜在生态风险指数法对重金属的污染程度和潜在生态风险进行评价,采用主成分分析法判断重金属污染来源,以期为北京中心城的水环境治理及生态风险管理提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 沉积物样品采集

于2016年9月-10月对北京市中心城北护城河、南护城河等21条河流的沉积物进行采样,共设置采样点42个(见图1)。用不锈钢抓泥斗采集表层沉积物(0~10 cm)样品,用聚乙烯密封袋封装,低温保存运回实验室,在-20℃下冷冻。处理前拣

选去除碎石块、树枝等杂质,经自然风干、研磨、过筛等处理后备用。



图1 中心城河流沉积物采样点位置

Fig. 1 Sampling sites for the surface sediments from rivers in Central District

### 1.2 沉积物样品分析

主要监测项目为Hg、As、Pb、Cr、Cd、Mn、Cu共7种重金属的含量。Hg、As分析参照HJ 680-2013,采用原子荧光法测定(AFS-9700);Pb、Cd分析参照GB/T 17141-1997,采用石墨炉原子吸收分光光度法测定(AA7000F/AAC);Cr、Cu分析分别参照HJ 491-2009及GB/T 17138-1997,采用火焰原子吸收分光光度法测定(AA7000F/AAC);Mn分析参照US EPA 3050B:1996及US EPA 6010C:2007,采用电感耦合等离子发射光谱法测定(OPTIMA 8300DV)。

### 1.3 评价方法

#### 1.3.1 地累积指数法

地累积指数( $I_{geo}$ )是由德国科学家Muller<sup>[12]</sup>于1969年提出的用于定量评价沉积物中重金属污染程度的指标。该指标可以直观地反应外源重金属在沉积物中的富集程度,其计算公式为:

$$I_{geo} = \log_2 [C_i / (K \times B_i)]$$

式中: $C_i$ 是沉积物中重金属元素*i*的实测值(mg/kg); $K$ 是考虑各地岩石差异可能引起背景值变化而取的系数(一般取1.5); $B_i$ 为该重金属元素的环境地球化学背景值(mg/kg),本研究采用北京地区土壤重金属元素背景值(见表1)。地累积指数分级标准及其与重金属污染程度的关系见表2。

表1 土壤重金属元素背景值( $B_i$ )<sup>[13-15]</sup>及其毒性系数( $T_i$ )<sup>[16]</sup>  
Tab. 1 Background values( $B_i$ ) and toxicity coefficients( $T_i$ ) of heavy metals in the soil

项目	Hg	As	Pb	Cr	Cd	Mn	Cu
背景值	0.08	7.09	24.6	29.8	0.119	571	18.7
毒性系数	40	10	5	2	30	4	5

表 2 地累积指数( $I_{geo}$ )分级标准

Tab. 2 Grading standard for the Geoaccumulation Index( $I_{geo}$ )

分级标准	级别	污染程度
$I_{geo} \leq 0$	0	无污染
$0 < I_{geo} \leq 1$	1	轻度-中等污染
$1 < I_{geo} \leq 2$	2	中等污染
$2 < I_{geo} \leq 3$	3	中等-强污染
$3 < I_{geo} \leq 4$	4	强污染
$4 < I_{geo} \leq 5$	5	强-极强污染
$I_{geo} > 5$	6	极强污染

### 1.3.2 潜在生态风险指数法

潜在生态风险指数是由瑞典科学家 Hakanson<sup>[17]</sup>于 1980 年提出,该指数将重金属含量与生态危害、生态毒性结合,可以直观地反映沉积物中单种重金属对环境的影响以及环境中多种重金属的综合效应,其计算公式为:

$$E_i = T_i \times C_i / B_i$$

$$RI = \sum E_i$$

式中: $E_i$  为沉积物中重金属  $i$  的潜在生态风险系数; $T_i$  为重金属  $i$  的毒性系数(见表 1); $RI$  为沉积物中多种重金属的潜在生态风险指数,其分级标准及对应的重金属生态风险程度见表 3。

表 3 潜在生态风险系数( $E_i$ )和潜在生态风险指数( $RI$ )分级标准

Tab. 3 Grading standards for the Potential Ecological Risk Coefficient( $E_i$ ) and the Potential Ecological Risk Index( $RI$ )

$E_i$	生态风险度	$RI$	生态风险程度
$E_i < 40$	轻度	$RI < 150$	轻度
$40 \leq E_i < 80$	中等	$150 \leq RI < 300$	中等
$80 \leq E_i < 160$	较强	$300 \leq RI < 600$	较强
$160 \leq E_i < 320$	很强	$RI \geq 600$	很强
$E_i \geq 320$	极强		

### 1.3.3 主成分分析法

主成分分析是利用降维思维,在较少损失原有信息的基础上,将原本多个彼此相关的变量转化成少数几个彼此独立的综合变量的一种多元统计方法。本研究采用 SPSS22 进行主成分分析,通过选取累计方差贡献率大于 85% 的前几个因子或者特征根大于 1 的因子,根据原始变量在各主成分中的因子载荷大小来判断各主成分的主要影响因素及其代表的可能来源。

## 2 结果与讨论

### 2.1 沉积物中重金属含量

北京中心城河流沉积物中重金属含量见表 4,

其含量范围分别为: Hg(0.028~ 3.220) mg/kg, As(0.47~ 54.40) mg/kg, Pb(0.4~ 118.8) mg/kg, Cr(11~ 191) mg/kg, Cd(0.013~ 1.32) mg/kg, Mn(1.3~ 575) mg/kg, Cu(6.0~ 162.5) mg/kg; 平均含量分别为: Hg 0.670 mg/kg, As 6.01 mg/kg, Pb 31.1 mg/kg, Cr 63 mg/kg, Cd 0.29 mg/kg, Mn 277 mg/kg, Cu 45 mg/kg。变异系数分别为 118%、138%、79%、46%、97%、52%、85%, Hg、As、Cd、Cu、Pb 变异系数较大,表明其受人类活动影响的程度较大。

参考北京市土壤背景值, Hg、As、Pb、Cr、Cd、Mn、Cu 最大超标倍数分别为 39.25、6.67、3.83、5.41、10.09、0.01、7.69, 超标点位占比分别为 83.3%、23.8%、50%、92.9%、69.0%、2.4%、76.2%。参考《土壤环境质量标准》(GB 15618-1995) 二级标准(Mn 没有对应的土壤质量标准), Pb、Cr 达到质量标准, Hg、As、Cd、Cu 超标, 最大超标倍数分别为 5.44、1.18、1.20、0.63, 超标点位占比分别 40.5%、2.4%、9.5%、9.5%。

表 4 表层沉积物重金属含量

Tab. 4 Content of heavy metals in surface sediments

河流	采样点位置	mg/kg						
		Hg	As	Pb	Cr	Cd	Mn	Cu
坝河	管庄路	0.689	7.33	29.8	81	0.45	348	47
坝河	东坝中路	0.327	2.11	26.9	79	0.09	388	25
坝河	芳园南街	0.251	1.91	22.7	59	0.10	309	12
坝河	金榆路	0.978	4.79	26.0	75	0.16	349	41
北护城河	安定门外大街	0.361	9.18	45.0	87	0.23	523	119
北护城河	新街口北大街	0.507	6.39	66.0	75	0.17	366	35
北小河	望京西路	1.760	5.33	46.1	90	0.50	356	72
北小河	南皋路	0.574	3.43	23.1	66	0.15	273	30
北小河	滨河路	1.810	5.48	34.1	67	0.36	316	45
丰草河	西三环辅路	0.524	3.62	37.2	64	0.28	432	39
莲花河	菜户营南路	0.028	4.17	1.6	16	0.11	4	18
凉水河	南三环辅路	0.797	1.04	13.5	35	0.11	127	13
凉水河	光彩路	0.445	2.81	20.1	52	0.12	260	23
凉水河	小红门路	0.159	3.85	28.5	66	0.24	151	48
凉水河	大红门	0.108	0.66	13.8	40	0.06	1	7
亮马河	新源街	0.425	10.20	39.3	60	0.41	376	70
马草河	樊羊路	0.457	3.03	21.5	61	0.20	400	26
马草河	芳菲路下游	0.203	54.40	60.6	191	1.32	575	50
南护城河	左安门西街	3.220	15.27	118.8	96	1.05	307	163
南护城河	甘口桥	0.082	0.47	1.2	15	0.07	2	6
南长河	厂洼街与半壁街交叉口	0.670	6.32	36.5	66	0.52	306	42

续表 4 表层沉积物重金属含量

Tab. 4 Content of heavy metals in surface sediments

河流	采样点位置	mg/kg (续表)							
		Hg	As	Pb	Cr	Cd	Mn	Cu	
南长河	高粱桥斜街	1.630	6.27	47.0	79	0.68	294	62	
清河	树村路	0.419	3.77	24.7	59	0.25	303	42	
清河	毛纺路	0.636	2.17	22.2	53	0.27	354	24	
清河	黑泉路	0.472	1.08	18.4	66	0.09	327	14	
清河	安立路	0.282	1.65	16.2	61	0.06	280	9	
通惠灌渠	大鲁店北路	0.110	4.39	20.5	42	0.11	379	22	
通惠灌渠	王四营北路	0.044	5.73	0.4	11	0.34	22	147	
通惠河上段	四惠枢纽西路	0.075	6.93	64.4	63	0.42	17	152	
通惠河下段	双桥路	0.072	2.20	15.2	37	0.08	67	15	
土城沟	樱花园东街	0.043	8.95	36.7	75	0.30	448	47	
温榆河	首都机场辅路	1.440	1.87	13.6	42	0.06	199	6	
温榆河	徐尹路	0.098	9.06	21.2	75	0.05	403	24	
萧太后河	王村路	0.059	4.60	21.9	57	0.26	22	31	
萧太后河	小武基五金建材城对面	0.126	2.70	20.8	35	0.17	309	18	
萧太后河	双桥西路	0.128	3.58	29.1	56	0.32	212	46	
小龙河	大红门南路	2.420	4.92	28.2	104	0.13	359	39	
小月河	志新路	0.291	1.26	16.0	38	0.20	174	39	
永定河	侯庄子桥东边	3.040	8.87	5.9	88	0.31	275	57	
永定河	莲石湖西路东边	0.051	3.26	12.5	48	0.01	371	32	
永引渠	翠微路	1.070	9.90	46.8	53	0.32	370	44	
转河	文慧园西路	1.280	7.50	113.0	77	1.02	285	87	
平均值		0.670	6.01	31.1	63	0.29	277	45	
土壤背景值		0.08	7.09	24.6	29.8	0.119	571	18.7	
土壤二级质量标准		0.50	25	300	300	0.60	100	100	

## 2.2 重金属污染程度及来源分析

### 2.2.1 地累积指数

地累积指数法评价结果(表 5)表明沉积物中 Hg、As、Pb、Cr、Cd、Mn、Cu 的平均地累积指数分别为 1.49、-1.41、-0.77、0.34、0.14、-2.30、0.24, 其大小排序为 Hg > Cr > Cu > Cd > 0 > Pb > As > Mn, 沉积物主要受到重金属 Hg、Cr、Cu、Cd 的污染。

表 5 河流沉积物重金属地累积指数 ( $I_{geo}$ )

Tab. 5 The Geoaccumulation Index ( $I_{geo}$ ) of heavy metals in river sediments

重金属	$I_{geo}$ 平均值	$I_{geo}$ 最小值	$I_{geo}$ 最大值	污染分级百分比 (%)						
				0级	1级	2级	3级	4级	5级	6级
Hg	1.49	-2.10	4.75	26.2	9.5	23.8	16.7	16.7	7.1	0
As	-1.41	-4.50	2.35	95.2	2.4	0	2.4	0	0	0
Pb	-0.77	-6.53	1.69	73.8	21.4	4.8	0	0	0	0
Cr	0.34	-2.02	2.10	23.8	66.7	7.1	2.4	0	0	0
Cd	0.14	-3.78	2.89	45.2	31.0	16.7	7.1	0	0	0
Mn	-2.30	-9.39	-0.57	100	0	0	0	0	0	0
Cu	0.24	-2.22	2.53	38.1	40.5	11.9	9.5	0	0	0

沉积物中 Hg、Cr、Cu、Cd 的污染空间分布见图 2, 中心城区重金属 Hg 污染总体处于 2 级(中等)污染程度, 73.8% 的采样点位均受到了 Hg 元素的污染, 污染最为严重的河流为南护城河、永定河及小龙河, 达到了 5 级(强极强)污染程度。Cr、Cu 和 Cd 污染总体处于 1 级(轻度-中等)污染程度, Cr 污染最为严重的为马草河; Cu 污染最为严重的为南护城河、通惠灌渠、通惠河上段及北护城河; Cd 污染最为严重的为马草河、南护城河、转河。

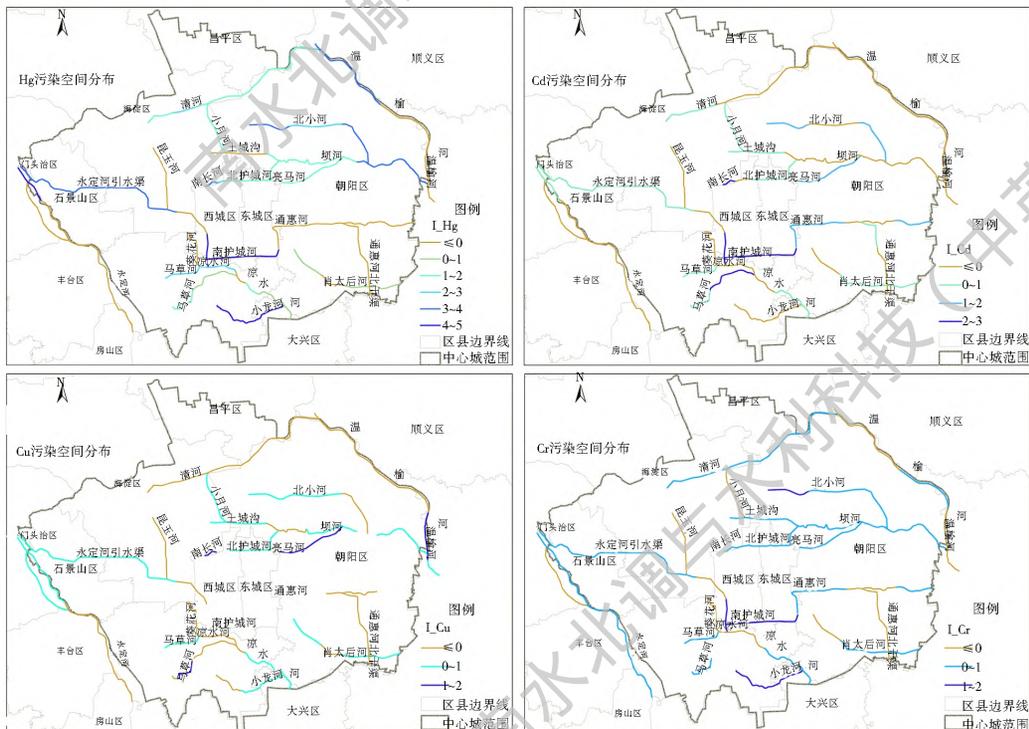


图 2 表层沉积物中 Hg、Cr、Cu 和 Cd 的地累积指数空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of Hg, Cr, Cu, and Cd in surface sediments by Geoaccumulation Index ( $I_{geo}$ )

### 2.2.2 污染来源分析

沉积物中重金属来源可分为自然源和人为源两大类。北京市河流沉积物重金属可能的来源有：矿石开采、冶金、燃煤<sup>[18]</sup>、交通、农药化肥<sup>[19]</sup>、生活及第三产业等<sup>[20]</sup>。北京中心城基本无矿石开采、冶金等工业活动及农业生产活动，城区生活污水收集率较高，因此北京中心城的重金属来源可能主要来源于交通、燃煤及第三产业等活动。

为探究中心城区沉积物中重金属的污染来源，以沉积物中 42 个采样点的重金属含量为变量，采用主成分分析提取出前 3 个主成分（特征值：3 708 + 1.304 + 0.882 = 5 894 变量），其解释了总方差的 84.21%，表明这 3 个主成分可以完全代表原始数据的绝大部分信息，为进一步对变量进行解释，采用方差极大正交旋转法得到各因子变量的载荷分布（图 3）。

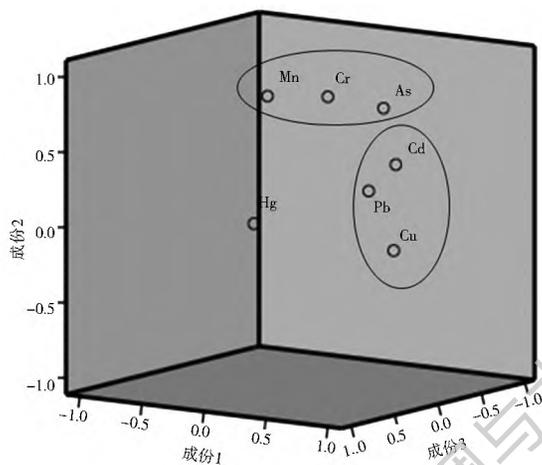


图 3 表层沉积物重金属的因子载荷图

Fig.3 Factor loading plot of heavy metals in surface sediments

第一主成分的贡献率为 52.97%，表现在 Cd、Cu、Pb 元素含量上有较高的正载荷，在 As、Cr、Hg 上也有一定的载荷。Cd、Cu 和 Pb 元素相互之间具有较强的相关性，相关系数大于 0.5（表 6），推测这 3 种元素来源相似。Cd、Cu、Pb 含量最大值出现在南护城河和马草河，污染较为严重的河流（南护城河、转河、北护城河、南长河、通惠河等）均平行于二环等车流量较多的主要交通干线或位于重要交通路口附近（图 4），因此初步推断 Cd、Cu、Pb 来源于机动车尾气排放等交通源及道路灰尘。研究表明，常见的来自于交通源的重金属有：Zn、Cd、Cu、Pb 等，Cd 主要来源于汽车尾气及轮胎磨损，Cu 来源于柴油燃烧及刹车片磨损，Pb 来源于含铅汽油燃烧及轮胎磨损<sup>[21-22]</sup>。相关研究也表明，北京道路灰尘中的 Cd、Cu、Pb 污染较为严重<sup>[23-24]</sup>，这些道路扬尘及汽车尾气排放的污染物会随雨水及城市路面清洁形成

地表径流进入到水体中<sup>[25]</sup>，因此推断第一主成分代表的是交通源排放。

表 6 表层沉积物中重金属元素之间的皮尔逊(Pearson)相关系数

Tab.6 The Pearson correlation coefficients between heavy metals in surface sediments

	Hg	As	Pb	Cr	Cd	Mn	Cu
Hg	1.000						
As	0.091	1.000					
Pb	0.398*	0.417*	1.000				
Cr	0.359*	0.787**	0.529*	1.000			
Cd	0.373*	0.742**	0.768**	0.651**	1.000		
Mn	0.189	0.431**	0.328*	0.662**	0.274	1.000	
Cu	0.310*	0.284	0.599*	0.233	0.571**	0.014	1.000

注：\*\*表示  $P < 0.01$  显著水平(双尾)，\* 表示  $P < 0.05$  显著水平(双尾)



图 4 北京中心城主要交通道路的车流量

Fig.4 The traffic flow on the main roads in Central District of Beijing

第二主成分的贡献率为 18.63%，表现在 Cr、As、Mn 元素含量上有较高的正载荷，同时在 Cd、Pb 上也有一定载荷。Cr、As、Mn 元素之间有良好的相关性，相关系数为 0.431 (As-Mn)、0.662 (Cr-Mn) 和 0.787 (As-Cr)。重金属 Cr、As 含量最大值均出现在马草河，这可能与马草河附近分布着以花乡桥为中心的众多汽修、汽配厂排放的污染物有关。研究表明 As、Cr 为常见的水环境污染物质，同时存在于颜料、墨水制造等废水及城市污水中<sup>[26]</sup>，汽修时油漆中含有的颜料、汽车的废弃零部件及润滑油等含有 Cr、As、Cd、Pb 等重金属<sup>[27]</sup>，这些可能随着生活污水和地面雨水径流进入河道；Mn 元素污染程度非常小，可能主要是自然来源，因此推断第二成分代表的是汽修废水排放及自然源。

第三主成分的贡献率为 12.60%，表现在 Hg 元素含量上有较高的正载荷。第三成分的特征值小于 1，贡献率也较小，若只提取 2 个主成分，则第一主成分在 Cd、Cu、Pb 与 Hg 上有较高正载荷，但 Hg

与 Cd、Cu、Pb 之间的相关系数不高,这说明 Hg 与 Cd、Cu、Pb 可能都来自于大气沉降及雨水径流,但具体来源有所不同。北京中心城沉积物的 Hg 污染比较普遍, Hg 的这种分散性污染特征与大气沉降污染特性有关<sup>[28]</sup>;研究表明,燃煤是 Hg 最重要的排放源,北京地区 2012 年大气中汞的人为排放以燃煤为主,占到了总排放量的 65.6%<sup>[29]</sup>。大气环境中的 Hg 通过大气沉降及雨水径流进入河流及其沉积物中,Chen 等<sup>[30]</sup>也表示流经城区的河流中 Hg 的浓度高于农村地区,主要来源于城市径流。Hg 含量最大值出现在南护城河,其次永定河、小龙河等处的污染也较为严重,可能与这些地方使用小煤炉有关,研究表明民用蜂窝煤多为富汞的劣质煤,排放的汞含量要远高于工业用煤<sup>[31]</sup>,因此推断第三主成分代表煤炭燃烧排放。

### 2.3 中心城沉积物中重金属生态风险评价

重金属潜在生态风险系数结果(表 7)表明, Hg、As、Pb、Cr、Cd、Mn、Cu 的平均潜在生态风险系数  $E_i$  分别为 357、9、7、4、80、2、13,其大小排序为 Hg> Cd> Cu> As> Pb> Cr> Mn。重金属 Hg 的潜在生态风险最大,总体上具有较强生态危害,其潜在生态风险系数( $E_i$ )对潜在生态风险指数( $RI$ )的贡献率为 75.6%;重金属 Cd 具有轻度生态危害,其潜在生态风险指数的贡献率为 16.9%。

中心城区河道潜在生态风险指数( $RI$ )最大值为 1275,最小值为 54,平均值为 472,总体上具有较强生态危害。21 条河流中,33.3% 的河流具有很强的生态危害,28.6% 具有较强的生态危害,14.3% 具有中等生态危害,23.8% 具有轻度生态危害。具有很强生态危害的河流为小龙河、南护城河、转河、永定河、北小河、南长河及永定河引水渠 7 条河流。

### 3 结论与建议

(1)北京中心城河流表层沉积物主要受到 Hg、Cr、Cd、Cu 的污染,其中 Hg 污染处于 2 级(中等)污染程度,Cr、Cd 和 Cu 处于 1 级(轻度-中等)污染程度,总体上污染较严重的河流主要为南护城河、小龙河、转河等。重金属污染来源主要有三个途径:一是机动车尾气排放及道路灰尘,二是汽修、汽配厂排放,三是供暖燃煤排放;这些污染源排放的重金属通过雨水径流的方式逐渐累积于河流沉积物中。

(2)北京中心城河流表层沉积物总体上具有较强生态危害,其中 Hg 的生态危害最大,其对潜在生态风险指数的贡献率为 75.6%,对中心城的水生态

表 7 表层沉积物潜在生态风险指数及风险等级

Tab. 7 Potential ecological risk index and risk level of the surface sediments

河流名称	样品数	重金属潜在生态风险系数 $E_i$							RI	生态风险等级
		Hg	As	Pb	Cr	Cd	Mn	Cu		
坝河	4	281	6	5	5	50	2	8	358	较强
北护城河	2	217	11	11	5	50	3	21	319	较强
北小河	3	691	7	7	5	85	2	13	810	很强
丰草河	1	262	5	8	4	71	3	10	363	较强
莲花河	1	14	6	0	1	28	0	5	54	轻度
凉水河	4	189	3	4	3	33	1	6	239	中等
亮马河	1	213	14	8	4	103	3	19	364	较强
马草河	2	165	41	8	8	192	3	10	427	较强
南护城河	2	826	11	12	4	141	1	23	1017	很强
南长河	2	575	9	8	5	151	2	14	764	很强
清河	4	226	3	4	4	42	2	6	288	中等
通惠灌渠	2	39	7	2	2	57	1	23	130	轻度
通惠河	2	37	6	8	3	63	0	22	140	轻度
土城沟	1	22	13	7	5	76	3	13	138	轻度
温榆河	2	385	8	4	4	14	2	4	420	较强
萧太后河	3	52	5	5	3	63	1	8	138	轻度
小龙河	1	1210	7	6	7	33	3	10	1275	很强
小月河	1	146	2	3	3	50	1	10	215	中等
永定河	2	773	9	2	5	41	2	12	843	很强
永定河引水渠	1	535	14	10	4	81	3	12	657	很强
转河	1	640	11	23	5	257	2	23	961	很强
平均值		357	9	7	4	80	2	13	472	较强

造成了严重威胁,需引起足够的重视;中心城具有很强生态危害的河流主要为小龙河、南护城河、转河、永定河等。

(3)建议基于本研究沉积物重金属污染来源分析的结果,采取相应措施控制控制 Hg 等重金属的地表径流输入,并采取原位或异位生态修复技术对已污染的沉积物进行治理。

#### 参考文献(References):

- [1] PENG J F, SONG Y H, YUAN P, et al. The remediation of heavy metals contaminated sediment [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 161: 633-640.
- [2] 严长安, 崔小丽, 王建, 等. 扬州市城区地表水底泥重金属污染现状与风险评价[J]. 环境污染与防治, 2009, 31(8): 50-54. (YAN C A, CUI X L, WANG J, et al. Assessment on heavy metal pollution in bottom sediments of surface waters in Yangzhou [J]. Environmental Pollution & Control, 2009, 31(8): 50-54. (in Chinese))
- [3] 魏俊峰, 吴大清, 彭金莲, 等. 污染沉积物中重金属的释放及其

- 动力学[J]. 生态环境, 2003, 12(2): 127-130. (WEI J F, WU D Q, PENG J L, et al. Release and kinetics of heavy metals from the contaminated sediments [J]. Ecology and Environment, 2003, 12(2): 127-130. (in Chinese))
- [4] CHABUKDHARS M, NEMA A K. Assessment of heavy metal contamination in Hindon River sediments: A chemometric and geochemical approach [J]. Chemosphere, 2012, 87: 945-953.
- [5] HUANG L L, PU X M, PAN J F, et al. Heavy metal pollution status in surface sediments of Swan Lake lagoon and Rongcheng Bay in the northern Yellow Sea [J]. Chemosphere, 2013, 93: 1957-1964.
- [6] YIN S, WU Y H, XU W, et al. Contribution of the upper river, the estuarine region, and the adjacent sea to the heavy metal pollution in the Yangtze Estuary [J]. Chemosphere, 2016, 155: 564-572.
- [7] MA X L, ZUO H, TIAN M J, et al. Assessment of heavy metals contamination in sediments from three adjacent regions of the Yellow River using metal chemical fractions and multivariate analysis techniques [J]. Chemosphere, 2016, 144: 264-272.
- [8] YAN N, LIU W B, XIE H T, et al. Distribution and assessment of heavy metals in the surface sediment of Yellow River, China [J]. Journal of Environmental Science, 2016, 39: 45-51.
- [9] 张伯镇, 雷沛, 潘延安, 等. 重庆主城区次级河流表层沉积物重金属污染特征及风险评价[J]. 环境科学学报, 2015, 35(7): 2185-2192. (ZHANG B Z, LEI P, PAN Y A, et al. Pollution and ecological risk assessment of heavy metals in the surface sediments from the tributaries in the main urban districts, Chongqing City [J]. Acta Science Circumstantiae, 2015, 35(7): 2185-2192. (in Chinese))
- [10] 吴光红, 朱兆洲, 刘二保, 等. 天津城市排污河道沉积物中重金属含量及分布特征[J]. 环境科学, 2008, 29(2): 413-420. (WU G H, ZHU Z Z, LIU E B, et al. Concentrations and distribution of heavy metals in urban sewage discharge channel of Tianjin [J]. Environmental Science, 2008, 29(2): 413-420. (in Chinese))
- [11] 杨毅, 赵月芬, 石维新, 等. 北京市中心城河道现状及治理对策措施[J]. 北京水务, 2013(4): 35-37. (YANG Y, ZHAO Y F, SHI W X, et al. Status and management measures of the river channel in Central District, Beijing [J]. Beijing Water, 2013(4): 35-37. (in Chinese))
- [12] MULLER G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River [J]. Geo Journal, 1969, 2(3): 108-118.
- [13] 陈同斌, 郑袁明, 陈煌, 等. 北京市土壤重金属含量背景值的系统研究[J]. 环境科学, 2004, 25(1): 117-122. (CHEN T B, ZHENG Y M, CHEN H, et al. Background concentrations of soil heavy metals in Beijing [J]. Environmental Science, 2004, 25(1): 117-122. (in Chinese))
- [14] 高彦鑫. 北京密云水库上游金属矿区土壤中重金属污染及风险评价[D]. 北京: 首都师范大学, 2012, 13. (GAO Y X. Pollution and risk assessment of heavy metals in soils of iron and gold mine areas of Miyun Reservoir upstream in Beijing [J]. Beijing: Capital Normal University, 2012, 13. (in Chinese))
- [15] 李健, 郑春江. 环境背景值数据手册[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1988, 55. (LI J, ZHENG C J. Data manual of environmental background value [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1988, 55. (in Chinese))
- [16] FORSTNER U. Lecture notes in earth sciences (contaminated sediments) [M]. Berlin: Springer Verlag, 1989, 107-109.
- [17] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.
- [18] 姚晓飞, 周岩梅, 于晓华, 等. 南沙河表层沉积物重金属污染评价及来源解析[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(12): 197-200. (YAO X F, ZHOU Y M, YU X H, et al. Pollution evaluation and source identification of heavy metals in surface sediments of Nansha River [J]. Environmental Science & Technology, 2011, 34(12): 197-200. (in Chinese))
- [19] 李祥玉, 季宏兵, 朱先芳, 等. 北京北部水源区沉积物中重金属元素分布及形态研究[J]. 现代农业科技, 2010, (9): 273-277. (LI X Y, JI H B, ZHU X F, et al. Analysis on distribution and partition of heavy metal in sediments of Northern Beijing water source [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2010, (9): 273-277. (in Chinese))
- [20] 朱先芳, 唐磊, 季宏兵, 等. 北京北部水系沉积物中重金属的研究[J]. 环境科学学报, 2010, 30(12): 2553-2562. (ZHU X F, TANG L, JI H B, et al. Analysis of heavy metals in sediments of the water system in the north of Beijing [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, 30(12): 2553-2562. (in Chinese))
- [21] ATKHASHMAN O A. Heavy metal distribution in dust, street dust and soils from the work place in Karak Industrial Estate, Jordan [J]. Atmosphere Environment, 2004, 38(39): 6803-6812.
- [22] 王鹏. 北京某公路两侧土壤重金属污染现状及风险评价研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2014, 6. (WANG P. Investigation and risk assessment of heavy metals pollution in soil on both side of some roads in Beijing [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2014, 6. (in Chinese))
- [23] 晏星, 罗娜娜, 赵文吉, 等. 北京城区交通边缘带土壤重金属污染研究[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(12): 175-180. (YAN X, LU O N N, ZHAO W J, et al. Heavy metal pollution evaluation and spatial influence range analysis for main roads within the fifth ring road of Beijing urban [J]. Environmental Science & Technology, 2013, 36(12): 175-180. (in Chinese))
- [24] 唐荣莉, 马克明, 张育新, 等. 北京城市道路灰尘重金属污染的健康风险评价[J]. 环境科学学报, 2012, 32(8): 2006-2015. (TANG R L, MA K M, ZHANG Y X, et al. Health risk assessment of heavy metals of street dust in Beijing [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(8): 2006-2015. (in Chinese))
- [25] PRATT P L, LOFTERMOSER B G. Mobilisation of traffic derived trace metals from road corridors into coastal stream and estuarine sediments, Cairns, northern Australia [J]. Environmental Geology, 2007, 52(3): 437-448.
- [26] JHA A K, BOSE A, DOWNEY J P. Removal of As(V) and Cr(VI) Ions from aqueous solution using a continuous, hybrid field gradient magnetic separation device [J]. Separation Science and Technology, 2006, 41: 3297-3312.

(下转第107页)

- [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. 1988, 45(3): 492-501. DOI: 10.1139/f88-059.
- [10] ZHANG G P. Time series forecasting using a hybrid ARIMA and neural network model[J]. Neurocomputing, 2003, 50: 159-175. DOI: 10.1016/S0925-2312(01)00702-0.
- [11] JAIN A, Kumar A M. Hybrid neural network models for hydrologic time series forecasting[J]. Applied Soft Computing, 2007, 7(2): 585-592. DOI: 10.1016/j.asoc.2006.03.002.
- [12] 邓聚龙. 灰色系统理论简介[J]. 内蒙古电力, 1993(3): 51-52. (DENG J L. Introduction to the grey system theory[J]. Inner Mongolia Electric Power, 1993(3): 51-52. (in Chinese))
- [13] 刘思峰. 灰色系统理论的产生与发展[J]. 南京航空航天大学学报, 2004(2): 267-272. (LIU S F. Emergence and development of grey system theory and its forward trends[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2004(2): 267-272. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1005-2615.2004.02.027.
- [14] LIU S, FORREST J, YANG Y. A brief introduction to grey systems theory[J]. Grey Systems: Theory and Application, 2012, 2(2): 89-104. DOI: 10.1109/GSIS.2011.6044018.
- [15] BAI C, SARKIS J. Integrating sustainability into supplier selection with grey system and rough set methodologies[J]. International Journal of Production Economics, 2010, 124(1): 252-264. DOI: 10.1016/j.ijpe.2009.11.023.
- [16] LOU Y X, ZHUANG L T, CAI A H, et al. Grey GM(1, 1) model with function transfer method and application to energy consuming prediction[J]. Kybernetes, 2004, 33(2): 322-330.
- [17] TRIVEDI H V, SINGH J K. Application of grey system theory in the development of a runoff prediction model[J]. Biosystems Engineering, 2005, 92(4): 521-526. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2005.09.005.
- [18] 刘思峰, 谢乃明. 灰色系统理论及其应用[M]. 第6版. 北京: 科学出版社, 2013: 217. (LIU S F, XIE N M. Grey system theory and its application[M]. Beijing: Science Press, 2013: 217. (in Chinese))
- [19] 刘思峰, 蔡华, 杨英杰, 等. 灰色关联分析模型研究进展[J]. 系统工程理论与实践, 2013(8): 2041-2046. (LIU S F, CAI H, YANG Y J, et al. Advance in grey incidence analysis modeling[J]. Systems Engineering - Theory & Practice, 2013(8): 2041-2046. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1008-6788.2013.08.018.
- [20] 易德生, 郭萍. 灰色理论与方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 1992. (YI D S, GUO P. Grey theory and method[M]. Beijing: Oil Industry Press, 1992. (in Chinese))
- [21] 邓聚龙. 灰预测与灰决策[M]. 武汉: 华中理工大学, 2002. (DENG J L. Grey forecasting and decision[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2002. (in Chinese))

(上接第 80 页)

- [27] 苏毅, 杨延梅, 岳波, 等. 典型废矿物油的产生工艺及其重金属浓度特征[J]. 环境工程技术学报, 2015, 5(2): 106-113. (SU Y, YANG Y M, YUE B, et al. Study on generation processes of used mineral oil and their heavy metal concentration characteristics[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2015, 5(2): 106-113. (in Chinese))
- [28] 李霞, 张慧鸣, 徐霞, 等. 农田 Cd 和 Hg 污染的来源解析与风险评估研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(7): 1314-1320. (LI X, ZHANG H M, XU X, et al. Source apportionment and risk assessment of Cd and Hg pollution in farmland[J]. Journal of Agro Environment Science, 2016, 35(7): 1314-1320. (in Chinese))
- [29] 董灿. 我国人为源大气汞排放清单的分析研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015, 26-27. (DONG C. Anthropogenic atmospheric mercury emissions inventory and analysis in China[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2015, 26-27. (in Chinese))
- [30] CHEN M, ZHENG Z H, FU D F, et al. Characteristics of Hg pollution in urban stormwater runoff in Nanjing city, China[J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2014, 30(2): 158-163.
- [31] 李珊, 李洋, 梁汉东, 等. 北京城郊燃煤汞排放及其对当地空气环境的影响[J]. 环境科学研究, 2014, 27(12): 1420-1425. (LI S, LI Y, LIANG H D, et al. Atmospheric mercury emissions from domestic coal and impacts on local environment of Suburban Beijing[J]. Research of Environmental Sciences, 2014, 27(12): 1420-1425. (in Chinese))