

# 江阴市典型河流沉积物重金属污染和风险评价<sup>\*1</sup>

宋兰兰<sup>1, 2</sup> 杨艳青<sup>1</sup>

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏南京 210098;

2. 南京水利科学研究所, 江苏南京 210029)

**【摘要】**: 在摸清河流表层沉积物重金属 (Cu、Zn、Pb、Cr、As) 含量的基础上, 利用综合污染指数和地累积指数评价其污染状况, 计算潜在生态风险和人体健康风险。结果表明, 江阴市河流沉积物已经受到重金属污染企业和城市径流双重影响, Cu、Zn、Pb 峰值在汛期, As、Cr 峰值在非汛期; 污染负荷指数和地累积指数评价结果显示非汛期污染略轻, 地累积指数法引入背景波动参数而使其评价结果较乐观。重金属潜在生态风险都为轻微风险级别; 致癌风险处于 10—3 数量级, 非致癌风险数量级为 10—7, 致癌风险为人体健康风险主要承担者。潜在生态风险汛期高, 人体健康风险非汛期高, 这可能是重金属元素对致癌风险以及生态风险的贡献不同所致。

**【关键词】**: 江阴市; 重金属; 污染负荷指数; 地累积指数; 潜在生态风险指数; 健康风险指数

**【中图分类号】**: X82 **【文献标识码】**: A **【文章编号】**: 1004-8227(2017) 07-1076-07

DOI: 10. 11870 /cjlyzyyhj201707014

重金属会通过水文循环进入河流, 继而与有机质、碳酸、铁锰氧化物、硫化物结合, 在沉积物表层富集, 环境变化 (如生物扰动、水体酸化、溶解氧变化) 时结合态金属再次溶出, 造成二次污染。沉积物中重金属是水体污染的敏感指示剂<sup>[1]</sup>。因此研究沉积物重金属含量、分布及风险评价可反映人类活动对环境的影响程度<sup>[2]</sup>。

江阴北临长江, 南近太湖, 是典型的江南水乡, 北亚热带季风气候, 年平均气温 16. 7℃, 年平均降水量 1 047. 8 mm, 汛期 (6 ~ 9 月) 雨量占 55%, 降雨年际变化大。区域内河港纵横, 沟塘密布, 水流受闸坝控制, 流向不定, 与长江交换频繁。江阴也是中国工业百强县 (市) 之一, 其主导产业冶金、石化、纺织、机械和装备制造污染风险大, 部分工业园区土壤重金属污染呈逐渐提升趋势<sup>[3]</sup>, 张家港河、应天河重金属污染较严重<sup>[4]</sup>。

## 1 材料与方

### 1. 1 样品采集、预处理与测定

<sup>1</sup> 收稿日期: 2016-11-29; 修回日期: 2017-03-07

基金项目: 江苏省水利科技项目 (2012035) [Water Conservancy Science and Technology Project of Jiangsu Province (2012035) ]

作者简介: 宋兰兰 (1973 ~ ), 女, 助理研究员, 主要从事生态水利方面研究。 E-mail: mailsll@163. com

根据江阴市产业布局,选择利港河、青祝河、桃花港设采样点,采样时间为2015年7月和11月(图1)采集表层沉积物。底泥经冷冻干燥除杂质后,研磨,过100目网筛保存备用。称取0.2~0.5g沉积物样品于50mL坩埚中,少量去离子水润湿,用盐酸-硝酸-氢氟酸-高氯酸消解,过滤至50mL容量瓶,定容。电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-AES,美国热电ICAP6300)测定Cu、Zn、Pb、Cd、As含量;利用水系沉积物标准物质(GBW-07307a)、平行样和空白样进行质量控制,结果符合质量控制要求。

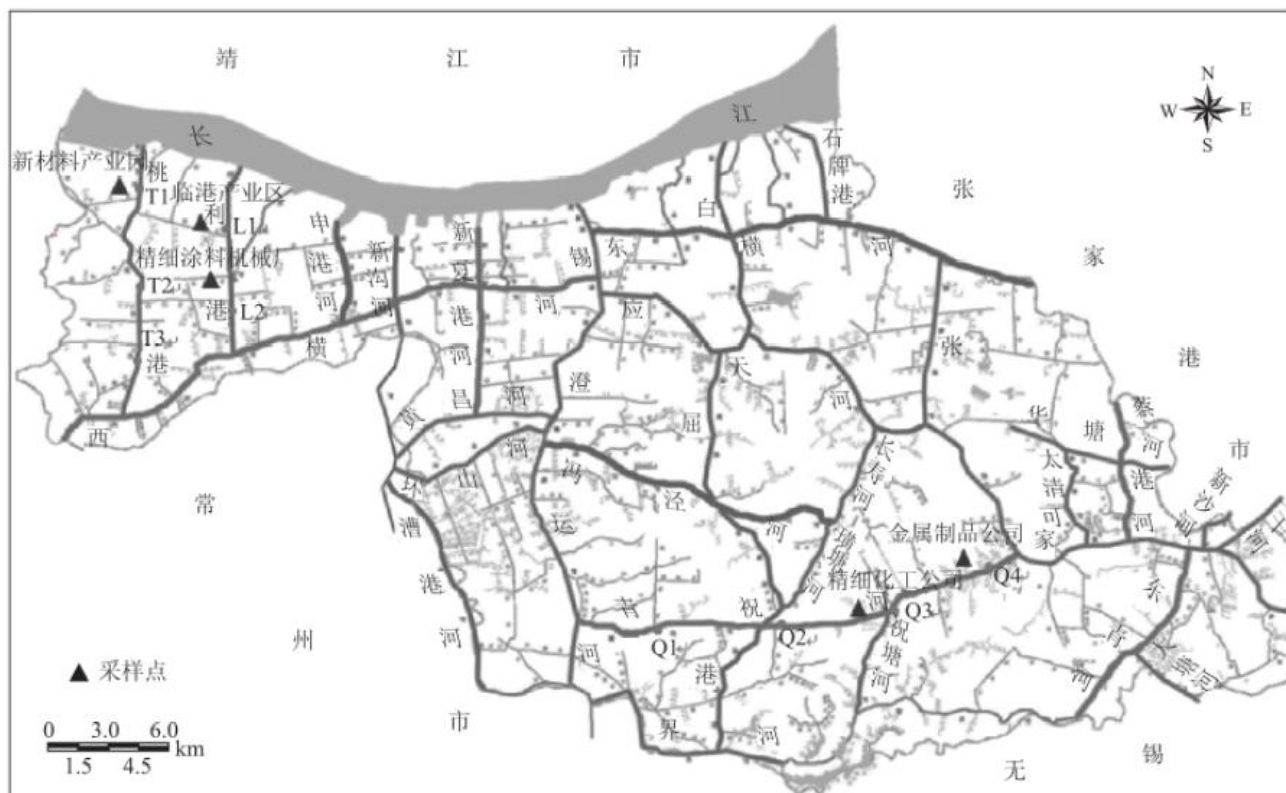


图1 江阴市典型河流采样点和污染源分布图

Fig. 1 Sampling Points and Pollution Source Distribution of Typical Rivers in Jiangyin

### 1.2 沉积物中重金属污染评价标准

河流沉积物受气候、水文、土壤、经济等影响,具有很强的地域性,难以制定统一的质量标准,常以研究区域未受污染的背景值或国家相关质量标准作为评价标准。本文结合背景值、国家质量标准和生态效应确定江阴市河流沉积物质量标准,以颗粒沉积物最高背景值和长江清洁土壤为基准,若背景值高于临界效应浓度阈值时,则参考国家质量标准(表1)。

表 1 沉积物质量标准比较和确定 单位:mg/kg

评价标准	Cu	Zn	Pb	As	Cr
土壤环境质量标准 (GB15618-2008)	100	250	80	25	300
海洋沉积物质量标准 (GB 18668-2002)	35	150	60	20	80
Lars Hakanson 颗粒沉积物的最高背景值 <sup>[5]</sup>	30	80	25	15	60
长江三角洲清洁级土壤 <sup>[6]</sup>	37	102	35	15	101
临界效应浓度阈值 TEL <sup>[7]</sup>	36	123	35	7.2	42
本文重金属评价标准	30	80	35	15	80

## 2 结果与讨论

### 2.1 重金属含量分析

江阴市 7 月和 11 月重金属含量均高于标准(图 2)。利港河受临港产业区<sup>[12]</sup>和长江底泥 Zn 积累<sup>[9]</sup>影响, Zn 污染严重, 在汛期出现 Pb 污染; 桃花港河 T1 断面污染严重, 汛期 Cu、Pb、Cr 污染, 非汛期 Pb、As、Zn 污染。青祝河 Q1 断面 Zn 污染, Q3、Q4 断面非汛期 Zn、Pb 及汛期 Cu 污染严重; 从断面污染程度来看, 江阴市部分河流已受到重金属污染企业影响。元素相关性分析可判断沉积物重金属的同源性(表 3), Cr 和 As 显著相关( $P < 0.05$ ), Zn 和 Pb 极显著相关性( $P < 0.01$ ), 其它重金属相关性不显著, 表明 Zn、Pb 同源, Cr、As 同源。河流重金属来源的不同影响其含量季节变化差异, 江阴市城市化进程导致积累于居民区和交通区土壤中 Zn、Pb、Cu<sup>[10]</sup>随雨水冲刷进入河流, 峰值出现于汛期; As 和 Cr 则受企业排水影响, 峰值出现在非汛期。对比江阴、太湖和长江三区重金属含量, 三区域重金属含量均高于标准, 江阴市除 Cu、As 与太湖相当外, 其它重金属污染比太湖严重, 长江沉积物重金属污染最轻(表 2)。

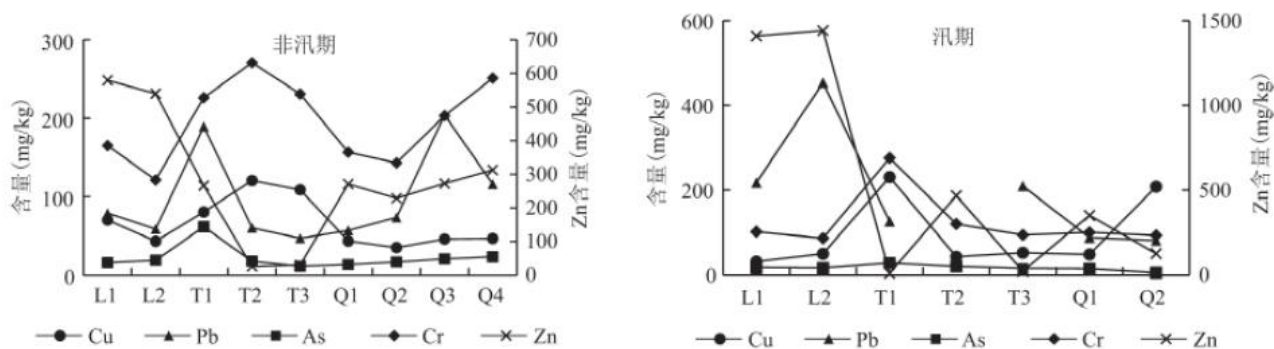


图 2 江阴市典型河流沉积物各金属元素含量

Fig. 2 Contents of Heavy Metals in Sediment of Typical Rivers in Jiangyin

表 2 江阴市典型河流沉积物重金属含量

Tab. 2 Contents of Heavy Metals in Sediments of Typical Rivers in Jiangyin

重金属 (mg/kg)	最大值	最小值	平均值	标准差	
	江阴	231	31	78	61
Cu	太湖 <sup>①</sup>	238	32	97	92
	长江 <sup>②</sup>			50	
	江阴	1441	9	397	440
Zn	太湖 <sup>①</sup>	471	89	223	180
	长江 <sup>②</sup>			143	
	江阴	454	47	137	107
Pb	太湖 <sup>①</sup>	143	48	64	42
	长江 <sup>②</sup>			44	
	江阴	62	4	19	12
As	太湖 <sup>①</sup>	64	7	21	24
	长江 <sup>②</sup>			12	
	江阴	276	86	165	68
Cr	太湖 <sup>①</sup>	155	57	96	45
	长江 <sup>②</sup>			84	

表 3 江阴市河流沉积物各金属元素含量间的相关系数矩阵

Tab. 3 Correlation Coefficient Matrix of Heavy Metals in River Sediment of Jiangyin

相关系数	Cu	Zn	Pb	As	Cr
Cu	1				
Zn	-0.45	1			
Pb	-0.16	0.62 <sup>**</sup>	1		
As	-0.01	-0.07	0.17	1	
Cr	0.38	-0.51	-0.25	0.43 <sup>*</sup>	1

\*\* :表示 0.01 水平上显著相关;\* :表示 0.05 水平上显著相关.

表 4 土壤重金属污染分级标准

Tab. 4 Criteria of Classification of Soil Heavy Metal Pollution

综合污染指数 $P$	污染等级	地累积指数 $I_{geo}$	污染等级
$P \leq 0.7$	清洁(安全)	$I \leq 0$	清洁
$0.7 < P \leq 1.0$	清洁(警戒线)	$0 < I \leq 1.0$	轻度污染
$1.0 < P \leq 2.0$	轻度污染	$1.0 < I \leq 2.0$	偏中度污染
$2.0 < P \leq 3.0$	中度污染	$2.0 < I \leq 3.0$	中度污染
$P > 3.0$	重度污染	$3.0 < I \leq 4.0$	偏重污染
		$4.0 < I \leq 5.0$	重污染
		$P > 5.0$	严重污染

2. 2 沉积物重金属污染评价

重金属污染评价方法有地累积指数法、沉积物富集系数法、潜在生态风险指数法、污染负荷指数法、内梅罗综合指数法和次生与原生相比值法等。地累积指数法、沉积物富集系数法、污染负荷指数法、内梅罗综合指数法和次生与原生相比值法是与背景参照值对比后判定其污染状况；潜在生态风险指数法是在背景参照值对比基础上引入毒性响应参数，将重金属生物毒性和区域背景值结合，评价其生态环境风险，通过简单相加获得综合生态风险，忽略了重金属间的协同和拮抗作用。

本文利用污染负荷指数<sup>[2]</sup>和地累积指数<sup>[11]</sup>评价沉积物重金属污染状况，计算公式如(1)~(2)，污染等级划分如表4。污染负荷指数法结果：汛期以中度和重度污染为主，中度污染断面占57%，重度污染占43%；非汛期重金属污染略轻，出现轻度污染断面(33%)，重度污染断面百分比下降(11%)。地累积指数法结果：汛期、非汛期均以轻度污染断面为主，但非汛期轻度污染断面百分比有所提升，偏中度污染断面百分比下降(图3)。地累积指数法与污染负荷法的结果近似，但地累积指数法引入背景波动参数，弱化了重金属污染程度，使其评价结果较乐观。

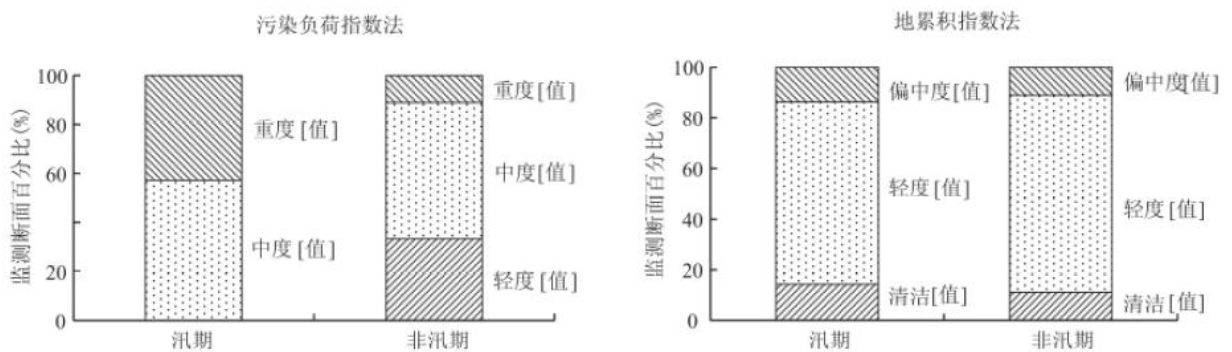


图 3 江阴市典型河流汛期、非汛期沉积物重金属评价结果

Fig. 3 Evaluation Results of Heavy Metals in Sediments during Flood and Non-Flood Season in Jiangyin

污染负荷指数法:



$$P_i = \frac{C_i}{B_{0i}} \quad P_l = \frac{\sum_{i=1}^5 P_i}{m} \quad P_R = \frac{\sum_{l=1}^n P_l}{n} \quad (1)$$

地累积指数:

$$I_{geo, i} = \log_2 \left[ \frac{C_i}{k B_{0i}} \right] \quad I_l = \frac{\sum_{i=1}^5 I_{geo, i}}{m}$$

$$I_R = \frac{\sum_{l=1}^n I_l}{n} \quad (2)$$

式中:  $P_i$  为  $i$  种金属污染系数;  $P_l$  为某一河流断面金属污染指数;  $P_R$  为某一河流污染指数;  $I_{geo, i}$  为  $i$  种金属地累积指数;  $I_l$  为某一河流断面金属地累积指数;  $I_R$  为某一河流地累积指数;  $m$  为参加评价的金属种类数;  $n$  为监测断面数;  $k$  为因岩石差异引入的背景波动参数。

### 3 潜在生态风险和环境健康风险计算

河流沉积物中重金属可由食物链传递对水生态系统和人体健康构成潜在威胁。潜在生态风险指数<sup>[13]</sup> 可用来评价重金属的环境生态效应, 评价公式和标准如式(3) 和表 5。3 条河流汛期和非汛期的潜在生态风险指数都处于轻微风险级别, 汛期风险度高于非汛期; 5 种金属汛期潜在生态风险系数为  $Pb > Cu > As > Zn > Cr$ , 非汛期为  $As > Pb > Cu > Cr > Zn$ ;  $Pb$ 、 $Cu$ 、 $As$  是主要的生态风险贡献因子,  $Pb$ 、 $Cu$  生态风险系数为汛期  $>$  非汛期,  $As$  生态风险系数为非汛期  $>$  汛期。 $Pb$ 、 $Cu$ 、 $As$  季节变化表明江阴河流沉积物质量受企业排污和城市径流双重影响, 产生重金属污染(图 4)。

表 5  $E_{r,i}$  和  $RI$  值对应的污染程度及潜在生态风险程度

Tab. 5 Pollution Level and Potential Ecological

Risk Index of  $E_{r,i}$  and  $RI$

潜在生态风险 参数 $E_{r,i}$	风险 等级	潜在生态风险 指数 $RI$	污染 等级
$E_{r,i} < 40$	轻微生态污染	$RI < 120$	清洁
$40 \leq E_{r,i} < 80$	中等生态污染	$120 \leq RI < 240$	中等污染
$80 \leq E_{r,i} < 160$	强的生态污染	$240 \leq RI < 460$	重污染
$160 \leq E_{r,i} < 320$	很强生态污染	$RI \geq 460$	极重污染
$E_{r,i} \geq 320$	极强生态污染		

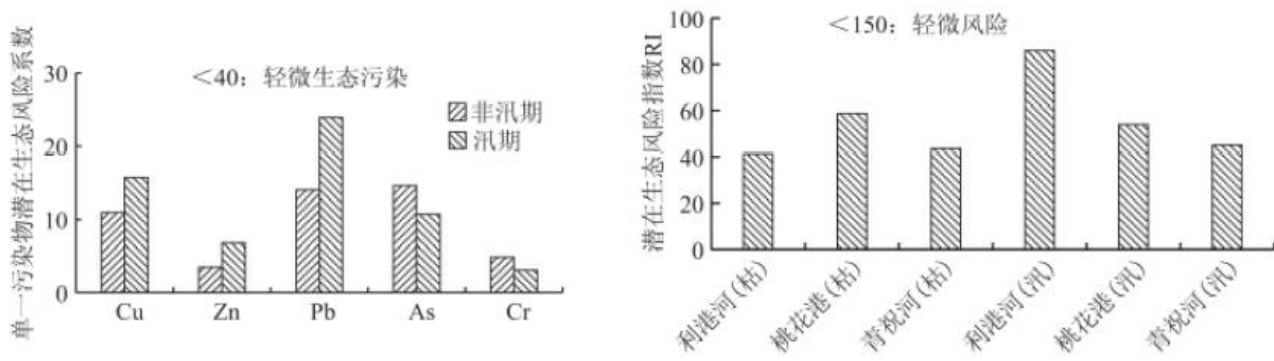


图 4 江阴市典型河流沉积物潜在生态风险指数  
Fig. 4 Potential Ecological Risk Index of River Sediment in Jiangyin

污染物对人体危害效应分非致癌和致癌风险两种，Pb、Cu、Zn 存在非致癌风险，Cr、As 两种风险都有。沉积物中重金属是通过进食鱼类和水产品进入人体，可用健康风险评价模型<sup>[14]</sup>计算人体健康风险，计算公式和所用参数如式(4) ~ (5) 和表 6。重金属非致癌风险数量级为  $10^{-7} < 1$ ，不会对人体产生明显的非致癌健康危害。致癌风险处于  $10^{-3}$  数量级，大于 EPA 规定的  $10^{-4}$  标准，也大于国际防辐射委员会推荐的  $5 \times 10^{-5}$  和其他国际组织公认的  $10^{-6}$  标准。致癌风险比非致癌风险高 104，是人体健康风险主要承担者。非致癌风险是  $Pb > As > Cr > Zn > Cu$ ，Pb、As、Cr 是非致癌风险的主要承担者；致癌风险是  $Cr > As$ 。非汛期致癌风险大于汛期，青祝河非汛期致癌风险明显偏高。这可能青祝河距长江远，优质长江水对含 Cr、As 工业废水稀释作用小(图 4)。

$$Q_i = \frac{C_i}{B_{0i}} \quad E_{r,i} = T_{r,i} \cdot Q_i$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_{r,i} \quad (3)$$

表 6 人类健康风险计算参数值  
Tab. 6 Parameters of Human Health Risk Index

参数	单位	数值
平均人体体重:BW	kg	60.5
平均寿命:L	a	77.5
鱼类等水产品的进食率:IR <sub>f</sub>	Kg · a <sup>-1</sup>	10.877
浓缩因子 <sup>[14]</sup> BF		Cu:0.12;Zn:0.22;Pb:0.39;As:0.10;Cr* :0.10
重金属 i 的参考剂量 R <sub>f</sub> D <sup>[15]</sup>	mg · (kg · d) <sup>-1</sup>	Cu:0.005;Zn:0.3;Pb:0.0014;As:0.0003;Cr:0.005
重金属 i 的致癌强度系数 Q <sub>e</sub> <sup>[14]</sup>	mg · (kg · d) <sup>-1</sup>	As:15;Cr:41

\* :Cr 根据文献<sup>[17]</sup> 计算后其浓缩因子为 0.01,从偏安全角度考虑,本文选择浓缩因子为 0.10.

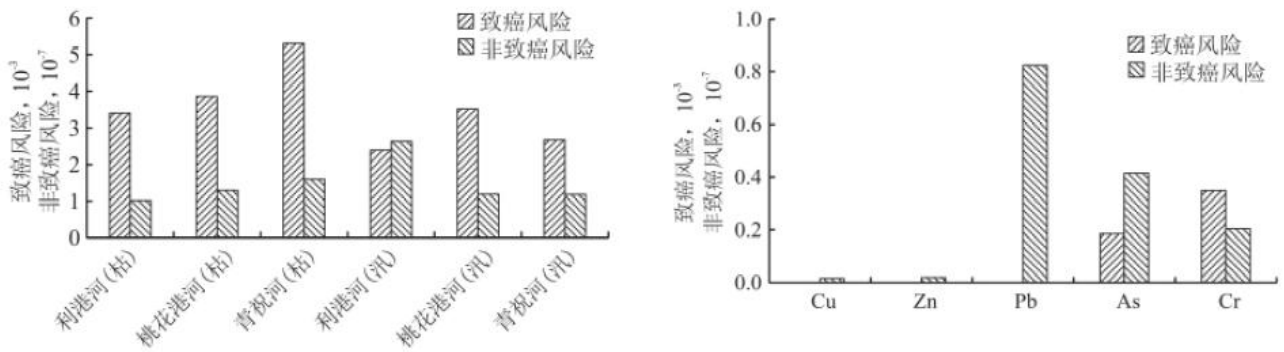


图5 江阴市河流沉积物人体健康风险图

Fig. 5 Human Health Risk of River Sediments in Jiangyin

对比潜在生态风险指数和人体健康风险，潜在生态风险汛期高，人体健康风险则非汛期高，这是致癌风险和潜在生态风险贡献因子的不同而产生，致癌风险贡献率大的 As、Cr 受企业排污影响大，而潜在生态风险贡献率以 Pb、Cu 为主，主要来自城市污染径流。

$$\begin{aligned}
 R_i^c &= [1 - \exp(-Q_{ig} \cdot D_{ig})] / L \\
 D_{ig} &= BF \cdot C_i \cdot IR_f / BW \\
 R_i^f &= 10^{-6} D_{ig} / (R_f D \cdot L) \quad (4) \\
 ZR_i^c &= \frac{\sum_{i=1}^5 ZR_i^c}{m} \quad ZR_i^f = \frac{\sum_{i=1}^5 ZR_i^f}{m} \\
 RC &= \sum R_i^c \quad RF = \sum R_i^f \quad (5)
 \end{aligned}$$

式中： $Q_i$  为  $i$  种金属污染参数； $E_{r,i}$  为单一金属潜在生态风险参数； $T_{r,i}$  为单个污染物的毒性响应参数 (Cu、Zn、Pb、As、Cr 分别为 5、1、5、10、2)； $RI$  为多种金属潜在生态风险指数； $Q_{ig}$  为  $i$  种金属致癌强度系数； $D_{ig}$  为鱼类进食含  $i$  种金属水产品途径暴露剂量率； $L$  为人类平均寿命； $BF$  为  $C_m/C_{\text{ave}}$  比值，浓缩因子； $IR_f$  为鱼类等水产品的进食率； $BW$  为人体重；

$R_i^c$  为  $i$  种金属参考剂量； $R_i^c$  为  $i$  种金属致癌物个人致癌年风险； $R_i^f$  为  $i$  种金属非致癌物所致健康危害风险； $ZR_i^c$  为  $i$  种金属个人致癌年风险； $ZR_i^f$  为  $i$  种金属非致癌物所致健康危害风险； $R$  为水环境的健康危害风险； $RC$  为汛期/非汛期致癌物个人致癌年风险； $RF$  为汛期/非汛期非致癌物所致健康危害风险。

## 4 结论

(1) 江阴市典型河流沉积物除了 Cu、As 含量与太湖相当外，其它重金属含量均高于太湖；受临港产业区、新材料、涂料机械等重金属污染企业影响，江阴市部分监测断面重金属污染严重。沉积物的源分析表明，河流沉积物中 Zn、Pb、Cu 峰值出现



在汛期，受城市污染径流影响大；As 和 Cr 峰值出现在非汛期，受企业排水影响大。

(2) 污染负荷指数法汛期以中度、重度污染为主；非汛期重度污染断面降低，出现轻度污染断面；地累积指数非汛期、汛期均为轻度污染，非汛期优于汛期，两种方法评价结果近似，地累积指数法引入背景波动参数而使其评价结果较污染负荷指数法乐观。

(3) 典型河流汛期和非汛期重金属潜在生态风险都为轻微风险级别，汛期风险度高于非汛期；Pb、Cu、As 是危害水生态系统的主要贡献因子。重金属致癌风险处于  $10^{-3}$  数量级，非汛期  $>$  汛期，远超最大可接受水平  $10^{-4} \sim 10^{-6}$  标准；非致癌风险数量级为  $10^{-7}$ ，不会产生明显的非致癌健康危害；致癌风险为人体健康风险主要承担者。潜在生态风险汛期高，人体健康风险非汛期高，这可能是致癌风险贡献率高 As、Cr 和生态风险贡献率高 Pb、Cu 来源不同所致。

#### 参考文献:

[1] 战玉柱, 姜霞, 陈春霄, 等. 太湖西南部沉积物重金属的空间分布特征和污染评价 [J]. 环境科学研究, 2011, 24(4) : 363-370.

【ZHAN Y Z , JIANG X , CHEN C X, et al. Spatial Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in Sediments from the Southwestern Part of Taihu Lake [J] . Research of Environmental Sciences, 2011, 24( 4) : 363-370. 】

[2] 陈明, 蔡青云, 徐慧, 等. 水体沉积物重金属污染风险评价研究进展 [J] . 生态环境学报, 2015, 24 (6) :1069-1074.

【CHEN M, CAI Q Y, XU H, et al. Research Progress of Risk Assessment of Heavy Metals Pollution in Water Body Sediments [J] . Ecology and Environment Sciences, 2015, (6) : 1069-1074. 】

[3] 徐秋军, 鲁宝权, 孙靖. 江阴市部分乡镇工业集中区土壤重金属环境质量评价 [J] . 环境科学导刊, 2012, 31(5) : 86-92.

【XU Q J, LU B Q, SUN J. Environmental quality assessment of heavy metal in soil in the township industrial parks of Jiangyin Municipality [J] . Environmental Science Survey, 2012, 31(5) : 86-92. 】

[4] 张洁, 宋晓兰, 陈渊, 等. 江阴市河流底栖动物中重金属含量及评价研究 [J] . 环境科学与管理, 2014, 39(10) : 150-154.

【ZHANG J, SONG X L, CHEN Y, et al. Concentrations and Assessment of Heavy Metals in Benthos in Main Rivers of Jiangyin City Environmental Science and Management, 2014, 39(10) . 】

[5] HAKANSON L. An Ecological Risk Index for Aquatic Pollution Control. A Sedimentological Approach[J]. Water research, 1980, 14(8) : 975-1001.

[6] 陈国光, 梁晓红, 周国华, 等. 土壤元素污染等级划分方法及其应用 [J] . 中国地质, 2011, 38( 6) : 1631-1639.

---

【CHEN G G, LIANG X H, ZHOU G H, et al. Grade division method for soil geochemical contamination and its application Geology in China. 】

[7] NEMR A E, KHALED A, SIKAILY A E. Distribution and Statistical Analysis of Leachable and Total Heavy Metals in the Sediments of the Suez Gulf [J]. Environmental monitoring and assessment, 2006, 118( 1-3) : 89-112.

[8] 张于平, 瞿文川, 等. 太湖沉积物中重金属的测定及环境意义 [J]. 岩矿测试, 2001, 20(1) : 34-36.

【ZHANG Y P, QU W C. Determination of heavy metal contents in the cediments from Taihu Lake and its Environmental significance [J]. Rock and Mineral Analysis, 2001, 20( 1) . 】

[9] 沈敏, 于红霞, 陈校辉. 长江江苏段沉积物中重金属与底栖动物调查及生态风险评价 [J]. 农业环境科学学报, 2006, 25( 6) : 1616-161.

【SHEN M, YU H X, CHEN X H. Investigation of heavy metals metals and zoobenthos in Jiangsu Section of the Yangtze River and ecological risk Assessment [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25( 6) : 1616-1619. 】

[10] 韩玉丽, 邱尔发, 王亚飞, 等. 北京市土壤和 TSP 中重金属分布特征及相关性研究 [J]. 生态环境学报, 2015, 24(1) : 146-155.

【HAN Y L, QIU E F, WANG Y F, et al. Study on Heavy Metals Distribution and Correlation in Soil and TSP of Beijing [J]. Ecology and Environment Sciences 2015, 24(1) : 146-155. 】

[11] 马迎群, 时瑶, 秦延文, 等. 浑河上游( 清原段) 水环境中重金属时空分布及污染评价 [J]. 环境科学, 2014, 35(1) : 108-116.

【MA Y Q, SHI Y, QIN Y W, et al. Temporal-spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in the Upper Reaches of Hunhe River (Qingyuan Section) [J]. Northeast China Environmental Science, 2014, 35( 1) : 108-116. 】

[12] 许景, 袁锦富, 赵毅. 江阴市工业布局调整研究 [J]. 规划师, 2013, 29( 4) : 53-57.

【XU J, YUAN J F, ZHAO Y. Jiangyin Industrial Development and Layout Improvement [J]. Planners, 2013, 29( 4) : 53-57. 】

[13] 毛志刚, 谷孝鸿, 陆小明, 等. 太湖东部不同类型湖区疏浚后沉积物重金属污染及潜在生态风险评价 [J]. 环境科学, 2014, 35(1) : 8.

【MAO Z G, GU X H, LU X M, et al. Pollution Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments from the Different Eastern Dredging Regions of Lake Taihu [J]. Environmental Science, 2014,

---

35( 1) : 8. 】

[14] 唐阵武, 程家丽, 张化永, 等. 长江武汉段水体有机污染的健康风险评价 [J]. 水利学报, 2009, 40(9) : 1064—1069.

【TANG Z W, CHEN J L, ZHANG H Y, et al. Health risk assessment of organic pollutants in water of Wuhan reach of Yangtze River [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(9) : 1064—1069. 】

[15] HJ /T 25 — 1999, 工业企业土壤环境质量风险评价基准 [S]. 北京: 国家环境保护总局, 1999.

【HJ/T 25—1999, Environmental quality risk assessment criteria for soil at manufacturing facilities[S]. Beijing, Ministry of Environmental Protection of the People' s Republic of China, 1999. 】

[16] 范清华, 黎刚, 王备新, 等. 太湖饮用水源地水环境健康风险评价 [J]. 中国环境监测, 2012, 28(1) : 6—9.

【FAN Q H, LI G, WANG B X, et al. Environmental Health Risk Assessment of Drinking Water Source of Taihu Lake [J]. Environmental Monitoring in China, 2012, 28(1) : 6—9. 】

[17] 徐衡, 黄娇, 郑智溢, 等. 乐清湾围塘中重金属在贝类中的富集分布 [J]. 河北渔业, 2016, ( 4) : 14—18.

【XU H, HUANG J, ZHENG Z Y, et al. Research on enrichment of heavy metal in shellfish in Yueqing Bay [J]. Hebei Fisheries, 2016, (4) : 14—18. 】