沂河临沂段表层沉积物重金属污染特征与生态风险评价*

陈亦妍[1,2]，郭媛媛[1,2**]，吕政霖[1,2]

(1.临沂大学山东省水土保持与环境保育重点实验室，山东 临沂 276000；
2.临沂大学资源环境学院，山东 临沂 276000)

摘要:以沂河临沂河段为研究对象,采集15个河流表层沉积物样品,利用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测量并计算6种重金属元素(Cr、Ni、Cd、Zn、Cu、Pb)的质量分数,运用地积累指数法和潜在生态风险指数法评价表层沉积物中重金属的污染程度和潜在生态风险,并利用相关分析和主成分分析解析其来源.结果表明:(1)除Cr元素以外,其他5种元素质量分数均超过山东省土壤背景值;(2)地积累指数评价结果显示,6种重金属污染程度由高到低依次为Cd、Cu、Zn、Ni、Pb、Cr,即研究区中Cd的污染程度最高;(3)潜在生态风险评价结果显示,研究区综合生态风险级别为极高生态风险,Cd对综合生态风险系数的贡献比例最高,是最主要的生态风险来源;(4)Cr、Cu和Ni为自然和工业排废复合来源,Zn和Pb来源于工业燃煤和交通污染等人为影响.

关键词:沂河;重金属;地积累指数法;潜在生态风险评价

中图分类号:X55 **DOI**:10.19789/j.1004-9398.2021.02.010

0 引 言

河流状态与人类的生产生活息息相关,随着社会经济的快速发展,大量污染物直接或间接排入河流,使得沿河地区生态环境压力不断加大.其中,重金属是具有潜在危险的重要污染物之一[1-2].重金属来源广泛、不良作用大且具有极强的累积性和不可生物降解性,使其成为水体和表层沉积物中潜在的持久性污染物[3-4].研究表明水体环境中重金属主要汇集于水下沉积物中,即水体中的悬浮颗粒吸附着大量重金属被迁移搬运,当其负荷量超过搬运能力时,逐渐沉降并存于沉积物中[4-5].水体沉积物中的重金属污染物又会通过一系列物理、化学和生物过程被重新释放到水体,造成二次污染,对水生生物产生不良反应,最终富集到人体造成严重危害[6-7].因此,研究水体沉积物重金属污染特征及来源,不仅可以揭示重金属在水体中的迁移富集规律,而且对于水资源的开发利用与保护以及水体环境污染评价与防治都具有重要意义.

重金属在沉积物中的聚集,主要与周边地区的人类活动有关,近年来,随着社会经济及城镇化的不断发展,重金属污染日趋严重,亟须在重金属总量、赋存状态的基础之上,开展污染与潜在环境效应的评价工作[8].国内外提出了许多种沉积物重金属污染与生态风险评价方法,较为常见的有单因子质量指数法、地积累指数法、内梅罗综合污染指数法、潜在生态危害指数法和富集系数法等[9].可根据评价的目的和侧重点,选择最优的1种或多种方法.如:宋凤敏等[10]利用地累积指数法和污染负荷指数法,评价了汉江上游水体表层沉积物重金属污染特征;向语兮等[11]利用潜在生态风险指数法,评价了白洋淀表层沉积物重金属的生态风险;王青峰等[12]采用风险评估指数法和潜在生态风险指数法,评估了湘江河表层沉积物中汞的生态风险,认为该河属于轻度污染,但存在较大的潜在生态风险.

沂河作为临沂地区最大的河流,是沿岸农田主要的灌溉水源,沂河水体的水质状况与该区居民的日常饮食和畜牧业发展等关系密切.前人对沂河流域部分河段的沉积物进行过重金属元素的测定,如:李宝等[13]研究了小埠东橡胶坝对沂河临沂城

收稿日期:2020-06-17

* 国家自然科学基金项目(41701220);国家级大学生创新创业训练计划(201710452020)

** 通信作者:guoyuanyuan@lyu.edu.cn

区蓄水段沉积物重金属分布的影响;卓丽玲等[14]对沂河小埠东橡胶坝至汤头段表层底泥重金属污染状况进行了研究;赵兴云等[15]对沂河两岸树木中重金属元素质量分数与大气环境污染的关系做了探讨.但目前的研究多集中在临沂市区的部分河段或者小范围内重金属浓度的探讨上,对其来源分析和污染评价方面的研究仍然较为缺乏.

本文以临沂境内沂河干流为研究对象,对沂河水边线附近的沉积物进行取样和分析,揭示重金属元素质量分数和空间分布特征,运用地积累指数法和潜在生态风险指数法对重金属污染状态和潜在生态风险进行评价,并通过相关分析和主成分分析揭示重金属来源.以期为沂河生态保护和重金属污染防治提供依据.

1　研究区概况及样品采集

沂河,又名沂水,是淮河流域泗沂沭水系中较大的河流,位于山东省南部与江苏省北部,东与沭河分流.沂河发源于老松山北麓,在山东境内主要流经沂源、蒙阴、沂水、临沂市区和兰陵等县区,向南流经江苏境内注入黄海,沂河全长大约574.0 km,山东境内沂河长287.5 km,流域面积11 600 km^2.沂河是临沂地区最大的河流,被临沂人誉为"母亲河",沂河的环境质量与污染状况备受关注.沂河临沂市区段受到了上游县区及临沂市辖3区生活污水、工业废水及农业面源污染的严重影响,根据数据统计,该段河道日排入废水≥30万t,沿线日排废水达百吨以上的企业有60多家,超90万户居民的生活污水排进河道,造成了河道较为严重的污染[16].为此,临沂市政府实施了严格的流域污染源控制和河道治理工作.

2018年5月,对沂河临沂段干流表层(0~5 cm)沉积物进行样品采集,自北向南共采集15个样品,采样点位置分布如图1所示.将采集的样品用聚乙烯密封袋包装,记录样品信息,于-20 ℃保存.将沉积物样品经冷冻干燥,剔除砾石颗粒、塑料和动植物残体等杂物,研磨后过100目筛,装入自封袋内备用.

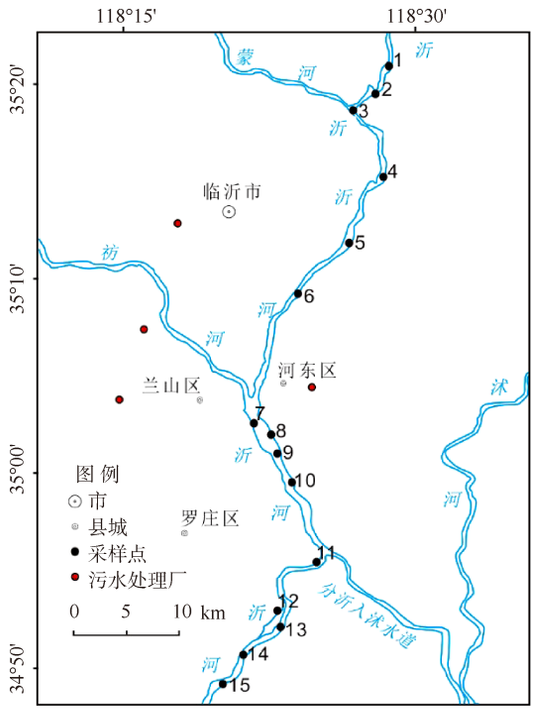


图1　沂河临沂段表层沉积物采样点位置

2　实验分析与污染评价方法

2.1　实验分析

选用电热板消解法进行样品预处理,具体消解过程参考文献[17].称取0.1 g(误差不超过0.5 μg)样品置于聚四氟乙烯烧杯中,加入30%的H_2O_2溶液去除有机质.加入10 mL浓硝酸和8 mL浓氢氟酸,将烧杯放置在通风橱内的电热板上中,温加热消解,视消解情况可再加入2 mL浓硝酸,重复上述消解过程,直至烧杯中液体呈白色或淡黄色,加入3~4滴3%硝酸溶液,防止样品被余温蒸干.待冷却后,转移至50 mL容量瓶,3%硝酸溶液定容备测.采用型号为iCAP Q电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定Cr、Ni、Cu、Zn、Cd和Pb这6种重金属元素的质量分数.实验中使用的H_2O_2溶液为分析纯,所用酸均为优级纯,实验用水为去离子水.

2.2　污染评价方法

2.2.1　地积累指数评价法

地积累指数又称Muller指数(I_{geo}),是20世纪60年代由德国学者Muller[18]从环境地球化学的角度出发,综合考虑了人为污染因素、环境地球化学背景值之后,提出的一种研究水环境沉积物中重金属污染的定量指标.该指标将自然成岩作用可能导致的背景值变动的因素(常数)纳入考虑范围,利用重金属元素质量分数与其地球化学背景值的关系,直观反映了外源重金属在沉积物中的富集程度,分级细致,能够更清楚地反映重金属污染程度[19].I_{geo}计算公式为

$$I_{geo} = \log_2 \frac{C^i}{K \times C_n^i}, \quad (1)$$

式中C^i是重金属元素i在表层沉积物样品中的实测质量分数,C_n^i表示重金属元素i的背景值,本研究以山东省土壤背景值作为参比值,K为考虑岩石差异会引起背景值变动而取的系数,在本研究中取值1.5. I_{geo}共分为7个级别,分级标准与污染程度的对应关系见表1.

表1 地积累指数(I_{geo})分级标准与污染程度对应关系

等级	范围	污染程度
0	$I_{geo}\leqslant 0$	无
1	$0<I_{geo}\leqslant 1$	轻度
2	$1<I_{geo}\leqslant 2$	偏中度
3	$2<I_{geo}\leqslant 3$	中度
4	$3<I_{geo}\leqslant 4$	偏重度
5	$4<I_{geo}\leqslant 5$	重度
6	$I_{geo}>5$	严重

2.2.2 潜在生态风险指数评价方法

瑞典科学家Hakanson[20]于1980年建立了潜在生态风险指数法,这是一套基于水环境沉积学理论所建立的一种生态风险评价方法.该方法综合考虑了表层沉积物中重金属质量分数、污染物种类数、污染物毒性水平和水体对重金属污染的敏感程度[21].目前该方法是水体沉积物重金属污染质量评价中被广泛采用的一种方法.潜在生态风险指数(potential ecological risk index,RI)的计算公式为:

$$C_f^i = C^i / C_n^i, \quad (2)$$

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i, \quad (3)$$

$$I_r = \sum_{i=1}^{6} E_r^i = \sum_{i=1}^{6} T_r^i \times C_f^i = \sum_{i=1}^{6} T_r^i \times C^i / C_n^i, \quad (4)$$

式中C_f^i为重金属i的污染指数,E_r^i为重金属i的潜在生态风险系数,T_r^i为重金属元素i的生物毒性响应因子,I_r为综合潜在生态风险指数.

计算I_r时,生物毒性响应因子和背景值的确定是关键.本文采用徐争启等[22]所使用的毒性系数作为生物毒性响应因子进行计算,重金属元素Cr、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb的毒性系数分别为2、5、5、1、30和5;重金属的参比值多采用当地土壤背景值,本文采用山东省土壤背景值作为计算的参照值[23]. Hakanson[20]提出E_r和I_r的分级标准是基于多氯联苯(PCB)、Hg、Cd、As、Pb、Cu、Zn和Cr共8种污染物得出的,而本研究所涉及的重金属仅有6种,因此,需要对其提出的分级标准进行调整.李一蒙等[24]研究认为,E_r分级的第一级上限值由非污染的污染系数(C=1)与参评污染物的最大毒性系数乘积得出,其余级别上限值分别用上一级的分级值乘以2.在本研究中,重金属Cd的毒性系数最大(30),因而本研究E_r分级的第一级分级标准为<30,其他分级标准依次乘以2.潜在风险指数的分级调整参考李一蒙等[24]进行调整,首先将Hakanson第一级分级界限值(I_r=150)除以污染物毒性系数之和,得到单位毒性系数分级值(1.13),然后乘以研究所涉及的污染物毒性系数总值(本研究为48),再取整得出I_r第一级界限值(I_r=55),其他级别分级值为上一级的分级值乘以2得出.Hakanson分级标准与调整后的分级标准见表2.

3 结果与讨论

3.1 重金属质量分数与空间分布特征

样品中Cr、Ni、Cu、Zn、Cd和Pb的质量分数、偏度及变异系数(coefficient of variation,CV)等统计结果如表3所示.重金属元素Cr、Ni、Cu、Zn、Cd和Pb的质量分数变化范围分别为20.57~52.61, 28.84~86.57, 15.26~98.99, 71.16~227.43, 0.254~3.02和16.05~202.44 mg/kg.重金属平均质量分数由大到小依次为Zn、Cu、Pb、Ni、Cr、Cd.与山东省土壤元素背景值相比[23],除Cr元素外,Ni、Cu、Zn、Cd和Pb的平均质量分数均超过山东省土壤元素背景值,分别

表2 潜在风险系数(E_r)和综合潜在风险指数(I_r)的分级标准与Hakanson[20]分级标准对照

生态风险级别	E_r		I_r	
	Hakanson研究	本研究	Hakanson研究	本研究
轻微	E_r<40	E_r<30	I_r<150	I_r<55
中等	$40\leqslant E_r<80$	$30\leqslant E_r<60$	$150\leqslant I_r<300$	$55\leqslant I_r<110$
较强	$80\leqslant E_r<160$	$60\leqslant E_r<120$	$300\leqslant I_r<600$	$110\leqslant I_r<220$
很强	$160\leqslant E_r<320$	$120\leqslant E_r<240$	$I_r\geqslant 600$	$I_r\geqslant 220$
极强	$E_r\geqslant 320$	$E_r\geqslant 240$	—	—

注:—表示无数据.

是背景值的1.96、2.66、2.34、6.38和1.95倍.在15个采样点中,Ni、Zn和Cd都高于背景值,Cu和Pb各有14和10个点位的质量分数超过背景值,所占百分比分别为93.3%和66.7%.与《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)的土壤污染风险筛选值相比,除Cd外,其余重金属元素的平均值均未超过风险筛选值,其中,Cr、Cu、Zn和Ni质量分数在所有采样地点中均未超过风险筛选值,而Cd和Pb质量分数超过风险筛选值的样点数所占比例分别为99.3%和13.3%.

表3　研究区表层沉积物重金属质量分数

指标	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
最大值(采样点)/(mg·kg^{-1})	52.61(9)	86.57(4)	98.99(9)	227.43(9)	3.02(1)	202.44(9)
最小值(采样点)/(mg·kg^{-1})	20.57(11)	28.84(11)	15.26(15)	71.16(15)	0.25(12)	16.50(11)
平均值/(mg·kg^{-1})	30.34	47.11	52.13	131.01	0.69	49.42
标准差	8.28	14.15	25.18	51.89	0.64	51.01
偏度	1.35	1.49	0.53	1.11	3.56	2.41
峰度	1.97	3.25	−0.76	1.08	13.30	5.25
变异系数	0.27	0.31	0.48	0.33	0.93	1.03
土壤元素背景值[23]/(mg·kg^{-1})	56.20	23.50	19.60	56.10	0.11	25.41
土壤污染风险筛选值/(mg·kg^{-1})	200.00	100.00	100.00	250.00	0.30	120.00

从空间分布上看,Cd和Ni质量分数表现出北高南低的特征,而Pb、Cr、Cu和Zn则在中部区域质量分数相对较高.为了揭示6种元素质量分数在整个研究区域的离散程度,对研究区样点沉积物的重金属元素质量分数计算变异系数.Wilding[25]将变异系数分为高度变异(C_V>0.36)、中等变异(0.16<C_V≤0.36)和低度变异(C_V≤0.16)3个级别.本研究中Cr、Zn和Ni的变异系数分别为0.27、0.33和0.31,属于中等变异;Cu、Cd和Pb的变异系数分别为0.48、0.93和1.03,属于高度变异.这说明表层沉积物中Cu、Cd和Pb受外界干扰比较显著,空间分异较大,存在点源污染现象.除此之外,6种重金属元素偏度值由大到小排序为Cd、Pb、Ni、Cr、Zn、Cu,峰度值由大到小排序依次为Cd、Pb、Ni、Cr、Zn、Cu,其中,Cd、Pb和Ni这3种元素的偏度和峰度参数值都较高.以上结果表明,Cd、Pb、Ni和Cu这4种元素的质量分数可能受人为因素影响较大,其中,Ni和Cu与其他2种元素相比受干扰程度相对小一些.

3.2　重金属污染风险评价结果

3.2.1　地积累指数法

以山东省土壤背景值作为参比值,利用式(1)计算表层沉积物6种重金属的I_{geo}值.结果表明(见图2),在所有采样点中,Cd的I_{geo}>0且在0.65~4.22内变动,其I_{geo}的平均值为1.80,是所有元素中,污染最为普遍,且污染程度最高的一种元素,其中,6.7%的采样点(样点1)处于重度污染,13.3%的采样点处于中度污染,73.3%的采样点处于偏中度污染.Cu的I_{geo}平均值为0.64,26.7%的采样点为偏中度污染,53.3%的采样点为轻度污染.Zn和Ni属于轻度污染,少数采样点为偏中度污染.Pb多数处于无污染和轻度污染的状态,少数采样点为偏中度污染和中度污染.Cr的I_{geo}为-2.04~-0.68,在所有采样点均属无污染.根据地积累指数评价,研究区表层沉积物中6种重金属的污染程度由高到低依次为Cd、Cu、Zn、Ni、Pb、Cr.

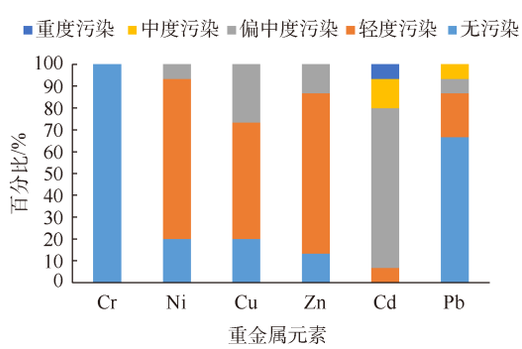


图2　基于地积累指数评价结果的不同污染级别样点所占百分比

3.2.2　潜在生态风险指数法

评价结果显示,表层沉积物各重金属元素的污染因子平均C_f的由大到小的顺序为Cd(6.38)、Cu(2.66)、Zn(2.34)、Ni(1.96)、Pb(1.95)、Cr(0.54),其中,Cr的污染程度为轻微,Cu、Zn、Ni和Pb的污染程度为中等,Cd的污染程度为极强,且有3个采样

点的C_f^{Cd}>6,需要引起注意.

E_r平均值由大到小依次为Cd(191.38)、Cu(13.30)、Ni(9.81)、Pb(9.73)、Zn(2.34)、Cr(1.08).所有样点的Cu、Ni、Zn和Cr均属于轻微生态风险,Pb达到轻微生态风险的样点数占样点总数的93.3%,生态风险相对较低.沉积物中重金属Cd的潜在生态风险程度极强(70.59<E_r^{Cd}<839.83),达到强、很强和极强生态风险的样点数分别占样点总数的26.67%、66.67%和6.66%,是最主要的生态风险因子.

整个研究区I_r值为92.44~884.45,平均值227.63,属于很强生态风险污染.其中:强生态风险水平有3处,分别是采样点1、2和9,占样点总数的20.00%,样点1的I_r达到了884.45,综合潜在生态风险最高;较强生态风险水平有11处,占样点总数的73.33%;中等生态风险水平只有1处.

沉积物中Cd的质量分数相对其他重金属元素质量分数较低,但Cd的生物毒性高,各采样点I_r中Cd的贡献比例最高,单项E_r^{Cd}对I_r的贡献达81.34%,是沂河临沂河段表层沉积物重金属的主要风险来源.

3.3 来源分析

3.3.1 相关性分析

对于一定区域而言,沉积物重金属元素质量分数及比值是相对稳定的,当沉积物来源相同或相似时,重金属元素之间呈现显著的相关性[26].利用SPSS25.0软件对沂河表层沉积物中的重金属元素进行Pearson相关分析,由结果(见表4)可知,Cr-Cu、Cr-Pb、Cu-Ni、Zn-Pb正相关(r=0.789、0.629、0.710、0.858, P<0.01),Cr-Ni、Pb-Cu正相关(r=0.565、0.536, P<0.05),以及Cr、Cu、Ni两两之间存在较强的相关性,说明这些元素可能具有相同的来源.Zn和Pb存在较强的相关性,可能具有相同的来源.Cd与其他5种元素无显著相关性.

表4 沂河临沂段表层沉积物重金属质量分数相关系数

重金属	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
Cr	1	0.565**	0.789**	0.397	0.390	0.629**
Ni	0.565*	1	0.710**	−0.069	0.186	0.177
Cu	0.789**	0.710**	1	0.327	0.423	0.536*
Zn	0.397	−0.069	0.327	1	−0.037	0.858**
Cd	0.390	0.186	0.423	−0.037	1	0.009
Pb	0.629**	0.177	0.536*	0.858**	0.009	1

注:*,** 分别表示在0.05和0.01水平上显著.

3.3.2 主成分分析

为进一步分析研究区表层沉积物中的重金属来源,采用主成分分析进行源解析.利用SPSS25.0软件对数据进行抽样适度测量值(kaiser-meyer-olkin, KMO)检验,得到的统计量值为0.642(>0.5);Bartlett球型检验相伴概率为0,小于显著性水平的0.05,表明各重金属元素之间相关性较强,标准化后的重金属质量分数数据适合做主成分分析.将表层沉积物重金属质量分数作为变量进行Varimax旋转后得到6个主成分.其中,前2个主成分累积方差贡献率为78.30%,说明前2个主成分基本能够代表数据所包含的大部分信息,剩余主成分贡献较小,以噪声为主.因而,对第1和第2主成分进行了具体分析.

主成分1的方差贡献率为52.40%,主要包括Cu、Ni和Cr.研究认为Cr和Ni为自然来源的元素,受成土母质等自然因素的影响[27-28].于元赫等[29]对黄河下游典型区域研究认为,Cr、Ni和Cu的质量分数受到自然背景的影响,但从本研究的结果看,Cr元素质量分数低于区域土壤背景值,而Ni和Cu质量分数平均值分别为该区域土壤背景值的1.96和2.66倍,表明Cr主要为自然源输入,不存在污染,Ni和Cu存在污染,且其来源不仅是自然源,可能还有人为源.Ni污染主要来源于砷镍矿、硫镍铁矿等镍矿石的精炼,以及含镍燃料燃烧过程中所排放的废弃物,自然和人为造成的镍污染物散发到大气中,会形成不同形式的含镍气溶胶,其经过大气的干沉降,进入到地表水体从而造成水体污染[30].Cu除了自然来源外,还来源于工业活动.Cu多应用于机械制造、电气、轻工和建筑工业等领域,尤其在电子、电气工业中应用最多[31].本研究的Cu和Ni的污染主要分布在河东区汤头镇、兰山区凤凰广场至小埠东橡胶坝区域,属于轻度至偏中度污染,这与北部汤头镇电池生产等污染企业的存在和西部工业园区污染物质随北涑河汇入沂河有很大关系.综上分析,主成分1代表了自然和工业排废复合来源.

主成分2的方差贡献率为25.91%,Zn和Pb的因子载荷分别为0.95和0.95.Pb的变异系数为103.22%(高度变异),说明受到人为干扰.本研究中Pb的污染主要分布中心城区,且污染程度相对较高.Pb是机动车污染源的标识元素,同时煤炭燃烧所产生的粉尘煤灰中也含有大量的Pb[32].Zn的污染在研究区较为普遍,属于轻度和偏中度污染;Zn是汽车轮胎的硬度添加剂,汽车轮胎磨损会产生大量Zn粉尘,此外,化肥农药的使用也是Zn污染的重要来源,农药化肥施用后,添加的Zn不被完全吸

收利用,也会对土壤造成污染,之后随着水土流失进入河流中沉淀下来,燃煤过程产生的粉尘、烟尘中也含有Zn及化合物[33].因此,主成分2代表了工业燃煤、农业和交通污染源等人为来源.

4 结　论

通过对沂河临沂段表层沉积物重金属元素质量分数的测定,揭示了重金属污染的空间分布特征,运用地积累指数法和潜在生态风险指数法评价了其污染程度和生态风险,并探讨了重金属的污染来源,得到了如下结论:

(1)沂河临沂河段表层重金属质量分数平均值由高到低顺序为Zn、Cu、Pb、Ni、Cr、Cd;除Cr元素以外,其余元素均超过山东省土壤背景值.统计特征表明Cd、Pb、Ni和Cu元素受人为因素干扰.

(2)I_{geo}评价结果表明,沂河临沂河段表层沉积物中,6种重金属存在不同程度的污染,其中,Cd污染程度最高,6.7%的采样点处于重度污染,13.3%的采样点处于中度污染,73.3%的采样点处于偏中度污染.6种重金属元素污染程度由高到低依次为Cd、Cu、Zn、Ni、Pb、Cr.潜在生态风险指数法评价结果表明,研究区综合I_r平均值227.63,为极强生态风险污染,Cd对综合生态系数的贡献比例最高,达到81.3%,是最主要的生态风险来源,需要引起关注.

(3)相关性和主成分分析表明,重金属元素Cr、Cu、Ni两两相关性强,Zn和Pb元素相关性强;研究区表层沉积物重金属元素来源不同,其中,Cr、Cu、Ni为自然和工业排废复合来源,Pb和Zn代表了工业燃煤、农业和交通污染源等人为来源.

参 考 文 献

[1] ZHANG Z,LI J,MAMAT Z,et al. Sources identification and pollution evaluation of heavy metals in the surface sediments of Bortala River,Northwest China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety,2016,126:94-101.

[2] FANG H,HUANG L,WANG J,et al. Environmental assessment of heavy metal transport and transformation in the Hangzhou Bay,China[J]. Journal of Hazardous Materials,2016,302:447-457.

[3] 方芳,季雨珊,李想,等.ICP-MS研究太湖过滤水和表层沉积物中重金属的含量水平及污染评价[J].光谱学与光谱分析,2018,38(4):1245-1250.

[4] 孔明,董增林,晁建颖,等.巢湖表层沉积物重金属生物有效性与生态风险评价[J].中国环境科学,2015,35(4):1223-1229.

[5] 孟翊,刘苍字,程江.长江口沉积物重金属元素地球化学特征及其底质环境评价[J].海洋地质与第四纪地质,2003,23(3):37-43.

[6] STEAD-DEXTER K,WARD N I. Mobility of heavy metals within freshwater sediments affected by motorway stormwater[J]. Science of the Total Environment,2004,334:271-277.

[7] 曾海鳌,吴敬禄.近50年来抚仙湖重金属污染的沉积记录[J].第四纪研究,2007,27(1):128-132.

[8] 江涛,林伟稳,曹英杰,等.梅江流域清凉山水库沉积物重金属污染、生态风险评价及来源解析[J].环境科学,2020,41(12):5410-5418.

[9] 范拴喜,甘卓亭,李美娟,等.土壤重金属污染评价方法进展[J].中国农学通报,2010,26(17):310-315.

[10] 宋凤敏,岳晓丽,刘智峰,等.汉江上游水体表层沉积物重金属污染特征评价[J].农业环境科学学报,2020,39(7):1576-1584.

[11] 向语兮,王晓,单保庆,等.白洋淀表层沉积物重金属形态分布特征及生态风险评价[J].环境科学学报,2020,40(6):2237-2246.

[12] 王青峰,樊磊磊,王丹,等.贵州典型城市河流表层沉积物汞生态风险研究[J].环境工程,2020,38(8):249-254.

[13] 李宝,孙春意,张智慧,等.小埠东橡胶坝对沂河临沂城区蓄水段沉积物重金属分布的影响[J].水土保持学报,2014,28(4):243-246+268.

[14] 卓丽玲,杜凡,尹玉亭,等.沂河表层底泥重金属污染及其风险性评价[J].枣庄学院学报,2016,33(2):82-86.

[15] 赵兴云,张卫国,尤玉东,等.临沂市大气环境中铅在银杏树木年轮中的记录[J].临沂大学学报,2014,36(6):54-58.

[16] 鲍桂婷,崔为海,赵焕雪.沂河临沂市区段河道治理工程社会环境效益分析[J].治淮,2013(6):58-59.

[17] 张芙蕖,蒋晶晶.三种土壤消解方法的对比研究[J].环境科学与管理,2008,33(3):132-134.

[18] MULLER G. Index of geoaccumulation in sediment of the Rhine River[J]. Geojournal,1969,2:108-118.

[19] 贾振邦,周华,赵智杰,等.应用地积累指数法评价太子河沉积物中重金属污染[J].北京大学学报(自然科学版),

2000,36(4):525-530.
[20] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control:a sedimentological approach[J]. Water Research,1980,14(8):975-1001.
[21] 马建华,韩昌序,姜玉玲.潜在生态风险指数法应用中的一些问题[J].地理研究,2020,39(6):1233-1241.
[22] 徐争启,倪师军,庹先国,等.潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J].环境科学与技术,2008(2):112-115.
[23] 庞绪贵,代杰瑞,胡雪平,等.山东省土壤地球化学背景值[J].山东国土资源,2018,34(1):39-43.
[24] 李一蒙,马建华,刘德新,等.开封城市土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J].环境科学,2015,36(3):1037-1044.
[25] WILDING L P. Spatial variability:its documentation,accommodation and implication to soil surveys[M]//NIELSEN D R,BOUMA J. Soil spatial variability. Wageningen:PUDOC Publishers,1985:166-194.
[26] 周斌,刘伟,刘有刚,等.渤海湾南部典型生态区表层沉积物重金属潜在生态风险分析[J].海洋环境科学,2013,32(4):533-537.
[27] 吕建树,张祖陆,刘洋,等.日照市土壤重金属来源解析及环境风险评价[J].地理学报,2012,67(7):971-984.
[28] 吕建树,何华春.江苏海岸带土壤重金属来源解析及空间分布[J].环境科学,2018,39(6):2853-2864.
[29] 于元赫,吕建树,王亚梦.黄河下游典型区域土壤重金属来源解析及空间分布[J].环境科学,2018,39(6):2865-2874.
[30] 李尉卿.大气气溶胶污染化学基础[M].郑州:黄河水利出版社,2010:89-90.
[31] 沈芳,毛龙江,邓晓茜,等.江苏海岸沉积物重金属空间分布与污染性评价再分析[J].首都师范大学学报(自然科学版),2018,39(5):62-71.
[32] 戴彬,吕建树,战金成,等.山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评价[J].环境科学,2015,36(2):507-515.
[33] 廖启林,任静华,姜丽,等.江苏典型地区河流沉积物重金属元素分布特征及其污染来源[J].地质学刊,2018,42(4):651-661.

Pollution characteristics and potential ecological risk of heavy metals in the surface sediments from the Linyi section of Yi River

CHEN Yiyan[1,2], GUO Yuanyuan[1,2], LYU Zhenglin[1,2]

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Water and Soil Conservation and Environmental Protection, Linyi University, Linyi Shandong 276000;
2. College of Resources and Environment, Linyi University, Linyi Shandong 276000)

Abstract: This study measured the mass fraction of 6 heavy metal elements (Cr, Ni, Cd, Zn, Cu, Pb) of 15 surface sediment samples using Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS), which were collected from the Linyi section of Yi River. The contamination degree and potential ecological risk of heavy metals were evaluated by the index of geoaccumulation and potential ecological risk index. Based on correlation analysis and principal component analysis, the sources of these heavy metal elements were determined. The results showed that: (1) the contents of these elements were higher than the background values of soil in Shandong Province except Cr. (2) According to the evaluation of I_{geo}, the contamination degree of Cd in the study area was the highest, followed by Cu, Zn, Ni, Pb and Cr. (3) The assessment of potential ecological risk index showed that, the comprehensive ecological risk level in the study area was extremely high, and Cd was the main source of ecological risk due to its highest contribution to the comprehensive ecological risk coefficient. (4) Cr, Cu and Ni were associated with the combination of parent material and industrial emissions, while Zn and Pb were controlled by anthropogenic inputs such as industrial coal combustion and urban traffic pollution.

Keywords: Yi River; heavy metal; index of geoaccumulation; potential ecological risk index

(责任编辑:李拓宇)