

基于污染负荷指数法评价淮河(安徽段) 底泥中重金属污染研究

王 婕, 刘桂建, 方 婷, 袁自娇

(中国科学技术大学地球与空间科学学院, 安徽合肥 230026)

摘要:采用电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-AES)对淮河(安徽段)27个底泥样品中的重金属元素进行测试,分析了Cu, Pb, Zn, Cr, Co, V, Mn共7种元素的含量分布特征,并基于Tomlinson提出的污染负荷指数(PLI)法对重金属进行了污染评价.结果表明,淮河(安徽段)整体上受到的污染较轻微,其中只有凤台到淮南段的PLI值为1.28,属中等污染.各重金属污染程度排序为 $Cr > Co > Mn = Cu > Pb > Zn > V$,其中Cr的含量是背景值的6.72倍,是淮河水体(安徽段)的主要污染物,其原因可能与该地区煤矿开采和电厂的污染排放有关.

关键词:淮河;底泥;重金属;污染负荷指数

中图分类号:X522 **文献标识码:**A doi:10.3969/j.issn.0253-2778.2013.02.002

引用格式: Wang Jie, Liu Guijian, Fang Ting, et al. Assessment of pollution characteristics of heavy metals in the sediments of Huaihe River (Anhui Section) by pollution load index[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2013, 43(2):97-103.

王婕,刘桂建,方婷,等.基于污染负荷指数法评价淮河(安徽段)底泥中重金属污染研究[J].中国科学技术大学学报,2013,43(2):97-103.

Assessment of pollution characteristics of heavy metals in the sediments of Huaihe River (Anhui Section) by pollution load index

WANG Jie, LIU Guijian, FANG Ting, YUAN Zijiao

(School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: 27 sediment samples of Huaihe River (Anhui Section) were collected and the contents of 7 heavy metal elements (Cu, Pb, Zn, Cr, Co, V, Mn) in the sediments were analyzed by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP-AES). The pollution degree of heavy metals was evaluated by the method of pollution load index (PLI) proposed by Tomlinson. The results show that the Anhui Section of Huaihe River is slightly polluted on the whole, with only the stretch from Fengtai to Huainan reaching a level of moderate pollution at the PLI value of 1.28. The degree of heavy metal pollution is in the descent order of $Cr > Co > Mn = Cu > Pb > Zn > V$. Among the 7 kinds of heavy metal elements, Cr is the main pollutant of Huaihe River (Anhui Section) whose concentration is 6.72 times higher than the

收稿日期:2012-11-13;修回日期:2012-12-12

基金项目:国家自然科学基金(41173032),国家科技支撑计划项目(1012BAC10B02),淮南矿业集团科技创新项目资助.

作者简介:王婕,女,1989年生,硕士生.研究方向:环境科学. E-mail: wjy0925@mail.ustc.edu.cn

通讯作者:刘桂建,教授. E-mail: lgj@ustc.edu.cn

background value. This may be due to coal mining and pollutants from the emissions of power plants in the region.

Key words: Huaihe River; sediment; heavy metal; pollution load index

0 引言

淮河流域位于我国东部,是重要的能源基地和商品粮基地,淮河水质的好坏,直接影响着两岸的经济发展及居民的生活水平.随着工业化进程的加快及人口的快速增长,重金属的应用越来越广,由此造成的重金属污染也日益严重.重金属在环境中不易被降解^[1],能通过生物富集和各级食物链的生物放大作用在环境和生物体内逐渐积累,如果超出环境背景值,就会造成环境污染^[2].经各种途径进入水体的重金属,会逐渐转移至沉积物中^[3-5].一般认为沉积物是水体污染的指示剂^[6],可较好地反映水体受污染状况^[7-8].

本研究基于 Tomlinson 提出的污染负荷指数法^[9]研究了淮河(安徽段)4个区段:颍上到凤台段,凤台到淮南段,淮南到怀远段,怀远到蚌埠段(图1)底泥中7种重金属元素 Cu, Pb, Zn, Mn, Co, Cr, V 的污染特征,并对其污染状况作了初步分析评价.

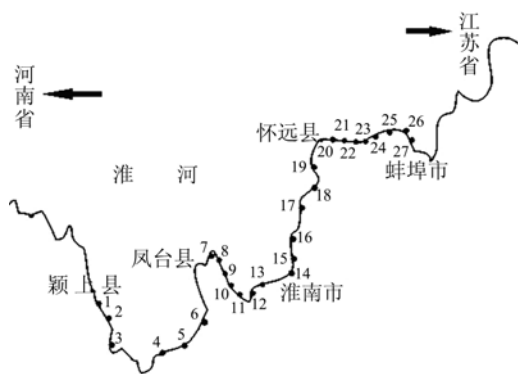


图 1 采样点分布图

Fig. 1 Distribution of sampling sites

1 样品采集与分析

1.1 样品采集

根据淮河采样区段内的污染源分布情况,选择河道比较平直、流速相对缓慢^[10]的区段,用抓斗式采集器采集表层底泥样品.颍上到凤台段和淮南到怀远段分别布设6个采样点,凤台到淮南段以及怀远到蚌埠段分别布设7个和8个采样点,每个采样

点采集1个样品,共采集27个底泥样品(采样位置见图1).将采集好的样品装入聚乙烯塑料袋中,并附上编写好样品号的标签,送往实验室待测.所有采样位置均用GPS定位仪精确定位(表1),如采样点1的地理位置为北纬 $32^{\circ}38'51.0''$,东经 $116^{\circ}16'33.6''$.

表 1 各采样点经纬度

Tab. 1 The latitude and longitude of each sampling site

采样点	纬度(N)	经度(E)
1	$32^{\circ}38'51.0''$	$116^{\circ}16'33.6''$
2	$32^{\circ}32'07.9''$	$116^{\circ}27'00.0''$
3	$32^{\circ}30'21.2''$	$116^{\circ}31'08.6''$
4	$32^{\circ}30'17.5''$	$116^{\circ}31'05.2''$
5	$32^{\circ}41'58.8''$	$116^{\circ}41'42.3''$
6	$32^{\circ}42'12.3''$	$116^{\circ}42'34.6''$
7	$32^{\circ}42'55.0''$	$116^{\circ}43'54.1''$
8	$32^{\circ}42'53.2''$	$116^{\circ}46'56.6''$
9	$32^{\circ}41'31.5''$	$116^{\circ}50'37.3''$
10	$32^{\circ}40'33.3''$	$116^{\circ}52'27.2''$
11	$32^{\circ}40'35.1''$	$116^{\circ}56'22.9''$
12	$32^{\circ}38'27.5''$	$116^{\circ}52'55.6''$
13	$32^{\circ}38'53.7''$	$116^{\circ}52'14.3''$
14	$32^{\circ}41'33.0''$	$117^{\circ}03'59.0''$
15	$32^{\circ}41'33.5''$	$117^{\circ}04'02.6''$
16	$32^{\circ}41'33.4''$	$117^{\circ}04'01.3''$
17	$32^{\circ}43'32.3''$	$117^{\circ}08'25.3''$
18	$32^{\circ}43'30.3''$	$117^{\circ}08'28.4''$
19	$32^{\circ}43'11.6''$	$117^{\circ}09'02.7''$
20	$32^{\circ}56'23.4''$	$117^{\circ}09'55.3''$
21	$32^{\circ}55'42.5''$	$117^{\circ}10'03.0''$
22	$32^{\circ}55'32.3''$	$117^{\circ}10'13.9''$
23	$32^{\circ}55'52.4''$	$117^{\circ}10'17.7''$
24	$32^{\circ}57'40.5''$	$117^{\circ}12'49.7''$
25	$32^{\circ}57'33.2''$	$117^{\circ}14'32.7''$
26	$32^{\circ}57'28.7''$	$117^{\circ}15'33.7''$
27	$32^{\circ}57'00.0''$	$117^{\circ}16'33.8''$

1.2 样品的处理与分析

样品在室温条件下自然风干、研磨并过筛之后,置于棕色玻璃瓶中待测.本研究采用电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-AES)分析重金属含量.测试方法如下:

准确称取样品0.500 0 g于50 mL聚四氟乙烯消解罐中,用少量水润湿后加入10 mL盐酸,于通风橱内的电热板上低温(150 ℃)加热1 h,待样品初步分解,即残液约为2~3 mL时,往里添加5 mL硝酸和3 mL高氯酸,保持中温(250 ℃)加热消解至产生大量浓白烟,赶尽白烟,此时残渣呈灰白色黏稠糊状,取下冷却后,加入1% HNO₃ 25 mL,煮沸溶解残渣,移至50~100 mL容量瓶中,以去离子水定容至标线,摇匀之后待测,同时制作分析空白。在测定过程中,所有样品均由空白样、二次平行样和加标回

收进行质量控制。

2 结果与讨论

2.1 沉积物中重金属的含量

由表2,各采样点重金属元素的含量变化范围比较大,其中Cr元素的标准差为1 385.57,变化幅度最大,其含量范围为53.12~6 768.34 mg/kg,最大值是最小值的127.42倍,其次变化幅度较大的是Mn元素,标准差为298.67,而Co元素的变化幅度最小,其含量范围为9.78~51.92 mg/kg,最大值是

表2 淮河(安徽段)沉积物中重金属含量(mg/kg)

Tab.2 Concentrations of heavy metals in sediments for each sampling site

采样点	Co	Cr	Cu	Mn	Pb	V	Zn	总量	均值
1	17.99	88.47	32.98	992.90	41.06	71.94	71.94	1 317.28	188.18
2	13.60	160.70	36.16	743.92	13.74	56.28	45.38	1 069.78	152.83
3	15.91	423.15	31.41	519.30	15.56	46.85	42.47	1 094.64	156.38
4	16.14	109.66	25.53	836.55	18.73	75.79	58.33	1 140.73	162.96
5	19.45	864.66	38.20	625.14	4.72	56.56	39.00	1 647.74	235.39
6	12.93	983.73	63.09	471.10	12.74	53.46	39.90	1 636.95	233.85
7	23.52	283.62	48.08	1 266.00	27.96	102.45	101.93	1 853.56	264.79
8	36.73	3 310.80	81.32	1 065.91	17.85	90.41	61.10	4 664.14	666.31
9	18.41	133.84	31.91	956.96	17.92	90.46	68.76	1 318.25	188.32
10	25.47	135.06	31.19	1 098.99	18.14	107.79	72.30	1 488.93	212.70
11	51.92	6 768.34	247.67	1 484.17	24.39	113.10	76.63	8 766.22	1252.3
12	24.89	161.68	28.02	1 103.33	19.53	87.61	75.31	1 500.37	214.34
13	20.62	101.12	27.60	1 038.68	21.29	74.17	71.21	1 354.70	193.53
14	21.10	125.56	36.92	573.72	25.19	102.30	87.59	972.37	138.91
15	12.52	570.84	30.93	428.76	2.47	41.12	21.20	1 107.84	158.26
16	9.78	493.94	30.43	471.74	9.15	41.00	19.74	1 075.79	153.68
17	21.79	96.13	39.24	1 025.09	20.32	75.29	62.83	1 340.70	191.53
18	12.60	102.50	28.49	495.02	14.78	67.83	47.11	768.33	109.76
19	19.77	80.62	35.98	1 170.32	23.40	93.83	74.45	1 498.37	214.05
20	26.91	361.26	52.37	1 123.06	22.29	128.95	104.16	1 819.01	259.86
21	18.80	127.08	43.55	837.06	22.86	96.56	79.51	1 225.41	175.06
22	17.52	148.90	34.33	855.17	18.91	83.37	61.42	1 219.62	174.23
23	16.13	96.10	28.74	679.25	13.15	66.64	65.39	965.40	137.91
24	12.23	53.12	14.32	425.73	3.79	44.89	31.66	585.73	83.68
25	18.67	334.97	36.30	970.53	22.51	100.52	79.10	1 562.59	223.23
26	23.63	141.32	41.34	968.56	29.53	102.08	84.16	1 390.62	198.66
27	10.05	76.14	16.15	375.93	NA	40.34	27.68	546.28	91.05
总量	539.06	16 333.3	1 192.3	22 602.9	481.99	2 111.59	1 670.22		
平均值	19.97	604.94	44.16	837.14	18.54	78.21	61.86		
标准差	8.68	1 385.57	42.81	298.67	8.35	24.85	22.76		
最小值	9.78	53.12	14.32	375.93	2.47	40.34	19.74		
最大值	51.92	6 768.34	247.67	1 484.17	41.06	128.95	104.16		

最小值的 5.31 倍. 重金属元素在各采样点变化幅度较大的原因可能与污染源的分布有关, 在含量高的采样点污染源较多, 导致重金属的排放较多, 在含量低的采样点污染源较少, 重金属的排放也相对较少.

结合表 2 和图 2, Mn 和 V^[12], Pb 和 Zn, 以及 Co, Cu 和 Cr^[13] 的变化趋势比较相似, 而且重金属 Cr, Mn, Cu 以及 Co 的含量在采样点 8 和采样点 11 均较高, 其中采样点 11 的重金属总量最高, 为 8 766.22 mg/kg, 是重金属总量最小值 (546.28

mg/kg) 的 16.05 倍, 其余各点的重金属总量较为接近, 大部分都在 1 000~1 600 mg/kg. 造成采样点 8 和采样点 11 污染较严重的元素主要是 Cr, 其原因可能是由于此处存在电厂, 而电厂在燃煤过程中产生的炉灰废渣等被直接排入河流, 而 Cr 元素主要留在炉灰中^[11], 因此导致河流中 Cr 含量较高.

2.2 污染评价方法

本文采用 Tomlinson 等人提出的污染负荷指数 (pollution load index, PLI) 法对重金属污染进行评价. 该指数由评价区域所包含的多种重金属成分

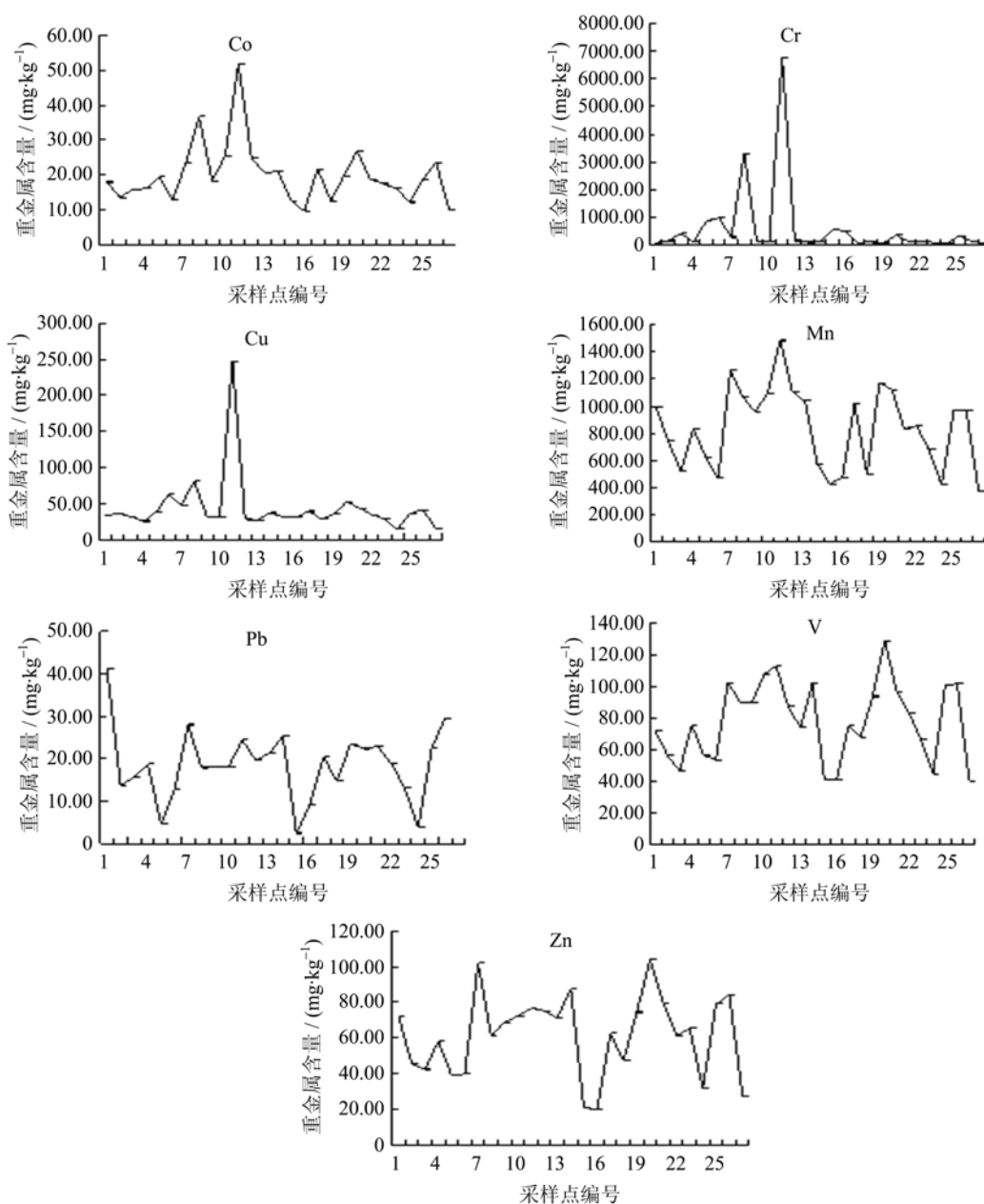


图 2 Co, Cr, Cu, Mn, Pb, V, Zn 在各采样点的含量分布

Fig. 2 The content distribution of Co, Cr, Cu, Mn, Pb, V, Zn in each sampling site

共同构成,它能直观地反映出多种重金属对环境污染的贡献以及它们在时间、空间上的变化趋势^[14]。

(I) 某一点的 PLI 值求法

首先根据底泥中重金属的实测浓度和该重金属的背景值求出最高污染系数,简称 CF,然后据此求出污染负荷指数 PLI。

$$CF_i = \frac{C_i}{C_{0i}}$$

式中,CF_i 为重金属 i 的最高污染系数;C_i 为沉积物中重金属 i 的实测值;C_{0i} 为重金属 i 的背景值。

$$PLI = \sqrt[n]{CF_1 \times CF_2 \times CF_3 \times \dots \times CF_n}$$

式中,PLI 为某点的污染负荷指数;n 为参加评价的重金属种类数。

(II) 某一带,某一流域的 PLI 值求法

$$PLI_{(zone/area)} = \sqrt[n]{PLI_1 \times PLI_2 \times PLI_3 \times \dots \times PLI_n}$$

式中,PLI_{zone} 为某一污染带的污染负荷指数;n 为该污染带所包含的采样点数目;PLI_{area} 为某一流域的污染负荷指数;n 为该流域所包含的污染带数目。

污染负荷指数法一般分为 4 个等级(表 3)。

表 3 污染负荷指数等级划分

Tab. 3 The rank partition of pollution load index

PLI 值	<1	1~2	2~3	≥3
污染等级	0	I	II	III
污染程度	无污染	中等污染	强污染	极强污染

本文采用全球页岩平均值作为沉积物中重金属元素背景值(表 4)。

表 4 重金属元素背景值(全球页岩平均值*)

Tab. 4 The background values of heavy metal elements (mg/kg)

元素	Co	Cr	Cu	Mn	Pb	V	Zn
背景值	19	90	45	850	20	130	95

【注】* 据 Fostner U, Wittmann G T W(1987)

2.3 评价结果

基于污染负荷指数法,通过计算得各重金属最高污染系数及污染负荷指数见表 5。

由表 5,淮河流域(安徽段)的 PLI 值为 0.90,说明淮河(安徽段)整体上受到的污染较轻微,在 4 个区段中,凤台到淮南段受到的污染程度最大,PLI 值为 1.28,受到中等污染,其余区段 PLI 值均小于 1,分析其原因可能是由于凤台到淮南段存在电厂、造船厂、煤堆、煤矿以及排灌站等,与其他采样段相比,此处污染源明显较多。根据 PLI_{zone} 可以判断 4 个采

样区段的污染程度为:凤台到淮南>颖上到凤台>怀远到蚌埠>淮南到怀远。在 27 个采样点中,有 1 个受到强污染,7 个中等污染,还有 19 个未受到污染,其中出现在凤台到淮南段的采样点 11 的 PLI 值最大,为 2.89,是最小值的 7.41 倍。根据各重金属的 CF 均值可以得出其污染顺序为 Cr>Co>Mn=Cu>Pb>Zn>V,其中除 Cr,Co 外,其余 5 种重金属的 CF 值均小于 1,说明这 5 种重金属的含量均小于背景值,未造成污染。Cr 的 CF 值为 6.72,是沉积物背景值的 6.72 倍,其中在采样点 11,Cr 的 CF 值为 75.20,远远超过背景值。说明淮河水体(安徽段)主要受到 Cr 污染,原因可能是由于凤台到淮南段存在大量煤矸石,而 Cr 在淮南煤矸石中发生相对富集,其含量范围为 10.19~103.79 mg/kg,平均含量为 50.66 mg/kg^[15],要比淮南煤高,淮南煤中 Cr 含量范围为 3.24~92.7mg/kg,平均含量为 34.54 mg/kg。长期堆积的大量煤矸石,经地表表的潮热、冷冻和风吹日晒等自然淋滤^[16],矸石中的 Cr 元素流失较严重并通过地表水流入河流所致。各采样点的污染负荷指数沿程变化如图 3 所示。

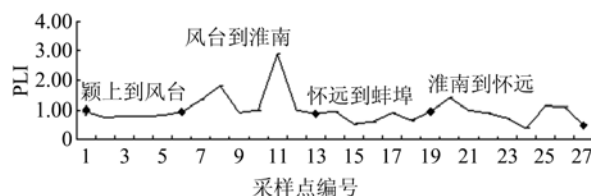


图 3 各采样点的污染负荷指数沿程变化图(自西向东)
Fig. 3 The variation of pollution Load Index along the sampling sites

由图 3,在采样区域内(自西向东)PLI 值共有 6 个峰值,其中靠近凤台县、淮南市的采样点 8 和采样点 11 的 PLI 值较其他点突出,说明这两个采样点受到的污染较严重,而且可以看出淮河(安徽段)西部受污染的程度整体上要高于东部,分析其原因可能是与凤台县、淮南市的工业布局有关,凤台县和淮南市有许多电厂、煤矸石堆、煤矿,如谢家集煤矿、李嘴孜排灌站等,它们将废水排到河流中,经过不断积累造成一定的污染。

3 结论

(I) 淮河(安徽段)底泥中各重金属污染程度为Cr>Co>Mn=Cu>Pb>Zn>V,其中Cr元素

表 5 各重金属最高污染系数及污染负荷指数
 Tab. 5 Contamination coefficients and Pollution Load Indices of heavy metals

采样点	Co	Cr	Cu	Mn	Pb	V	Zn	PLI (point)	污染 等级	污染程度	PLI (zone)	PLI (area)
	CF											
1	0.95	0.98	0.73	1.17	2.05	0.55	0.76	0.95	0	无污染		
2	0.72	1.79	0.80	0.88	0.69	0.43	0.48	0.75	0	无污染		
3	0.84	4.70	0.70	0.61	0.78	0.36	0.45	0.80	0	无污染		
4	0.85	1.22	0.57	0.98	0.94	0.58	0.61	0.79	0	无污染	0.84	
5	1.02	9.61	0.85	0.74	0.24	0.44	0.41	0.83	0	无污染		
6	0.68	10.93	1.40	0.55	0.64	0.41	0.42	0.94	0	无污染		
7	1.24	3.15	1.07	1.49	1.40	0.79	1.07	1.33	I	中等污染		
8	1.93	36.79	1.81	1.25	0.89	0.70	0.64	1.81	I	中等污染		
9	0.97	1.49	0.71	1.13	0.90	0.70	0.72	0.91	0	无污染		
10	1.34	1.50	0.69	1.29	0.91	0.83	0.76	1.00	I	中等污染	1.28	
11	2.73	75.20	5.50	1.75	1.22	0.87	0.81	2.89	II	强污染		
12	1.31	1.80	0.62	1.30	0.98	0.67	0.79	1.00	I	中等污染		
13	1.09	1.12	0.61	1.22	1.06	0.57	0.75	0.88	0	无污染		
14	1.11	1.40	0.82	0.67	1.26	0.79	0.92	0.97	0	无污染		0.90
15	0.66	6.34	0.69	0.50	0.12	0.32	0.22	0.53	0	无污染		
16	0.51	5.49	0.68	0.55	0.46	0.32	0.21	0.61	0	无污染		
17	1.15	1.07	0.87	1.21	1.02	0.58	0.66	0.91	0	无污染	0.75	
18	0.66	1.14	0.63	0.58	0.74	0.52	0.50	0.66	0	无污染		
19	1.04	0.90	0.80	1.38	1.17	0.72	0.78	0.95	0	无污染		
20	1.42	4.01	1.16	1.32	1.11	0.99	1.10	1.40	I	中等污染		
21	0.99	1.41	0.97	0.98	1.14	0.74	0.84	0.99	0	无污染		
22	0.92	1.65	0.76	1.01	0.95	0.64	0.65	0.90	0	无污染		
23	0.85	1.07	0.64	0.80	0.66	0.51	0.69	0.73	0	无污染		
24	0.64	0.59	0.32	0.50	0.19	0.35	0.33	0.39	0	无污染	0.83	
25	0.98	3.72	0.81	1.14	1.13	0.77	0.83	1.14	I	中等污染		
26	1.24	1.57	0.92	1.14	1.48	0.79	0.89	1.11	I	中等污染		
27	0.53	0.85	0.36	0.44		0.31	0.29	0.49	0	无污染		
均值	1.05	6.72	0.98	0.98	0.93	0.60	0.65					

的含量远远高于背景值,Co 元素的含量略高于背景值,而 Cu, Mn, Pb, V, Zn 的含量均低于背景值,说明 Cr 是淮河水体(安徽段)的主要污染物。

(II) 淮河(安徽段)各区段底泥中重金属污染程度为:风台到淮南>颍上到风台>怀远到蚌埠>淮南到怀远,其中风台到淮南段受到中等污染,可能主要是由风台到淮南段的污染源较多所致,其余区段基本上未受到污染。

(III) 淮河(安徽段)整体上受到的污染较轻微,但是西部受污染程度要高于东部,原因可能主要与凤台县、淮南市的工业布局有关。

参考文献 (References)

- [1] Niu Hongyi, Deng Wenjing, Wu Qunhe, et al. Potential toxic risk of heavy metals from sediment of the Pearl River in South China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, 21(8): 1 053-1 058.
- [2] Fan Chengxin, Zhu Yuxin, Ji Zhijun, et al. Characteristics of the Pollution of Heavy Metals in the Sediments of Yilihe River, Taihu Basin [J]. Journal of Lake Sciences, 2002, 14(3): 235-241.
范成新, 朱育新, 吉志军, 等. 太湖宜溧河水系沉积物的重金属污染特征 [J]. 湖泊科学, 2002, 14(3): 235-241.
- [3] Jia Zhengbang, Huo Wenyi, Zhao Zhijie, et al.

- Secondary phase enrichment factor for evaluation of heavy metal pollution of sediment in the Chai River[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2000,36(6):808-812.
- 贾振邦,霍文毅,赵智杰,等.应用次生相富集系数评价柴河沉积物重金属污染[J]. *北京大学学报(自然科学版)*,2000,36(6):808-812.
- [4] Qi Yan, Cheng Yingxiang, Liu Zhan, et al. Pollution and potential ecological risk assessment of heavy metals in river sediments [J]. *Sichuan Environment*, 2011, 30(6):104-107.
- 漆燕,成应向,刘湛,等.河流底泥重金属污染及潜在生态风险评价[J]. *四川环境*, 2011,30(6):104-107.
- [5] Huang Xianfei, Hu Jiwei, Deng Jiajun, et al. Pollution and potential ecological risk of heavy metals in bottom sediments from Aha Lake[C]// APCChE Congress. Dalian,China; 2008:263-268.
- [6] Chen Xiaoyang, Huang He, Sang Hongqing. The application of the index of geoaccumulation to evaluate heavy metal pollution in sediments in the Huainan Section of the Huaihe River [J]. *Journal of Anhui Science and Technology University*, 2006, 20(2): 35-38.
- 陈孝扬,黄河,桑洪庆.应用地积累指数法评价淮河南段沉积物中重金属污染[J]. *安徽科技学院学报*, 2006,20(2):35-38.
- [7] Li Liang, Zhou Beihai, Hu Xiaozhen, et al. Assessment on heavy metal contamination degree and potential ecological risk in Lake Dianchi [C]//Stuttgart University of Applied Sciences. Proceedings of 2009 Beijing International Environmental Technology Conference. Beijing: Water & Wastewater Engineer Magazine, 2009:125-131.
- [8] Chen Jingsheng. *Water Environmental Chemistry*[M]. Beijing: Higher Education Press, 1987.
- 陈静生. *水环境化学* [M]. 北京: 高等教育出版社,1987.
- [9] Xu Zhengqi, Ni Shijun, Zhang Chengjiang, et al. Assessment on heavy metals in the sediments of Jinsha River in Panzhihua Area by pollution load index[J]. *Sichuan Environment*, 2004,23(3):64-67.
- 徐争启,倪师军,张成江,等.应用污染负荷指数法评价攀枝花地区金沙江水系沉积物中的重金属[J]. *四川环境*,2004,23(3):64-67.
- [10] Jia Zhenbang, Wang An, Wu Ping, et al. Use the faces graph to evaluate heavy metal pollution in sediment at Benxi Section of Taizi River [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 1993,29(6):736-744.
- 贾振邦,汪安,吴平,等.用脸谱图对太子河本溪市河段河流沉积物中重金属污染进行评价的研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*,1993,29(6):736-744.
- [11] Chen Bingru, Yang Shaojin, Qian Qinfang, et al. The concentration distribution of As, Se, Cr, U, Th in China's coal mine [J]. *Environmental Science*, 1989, 10(6):23-27.
- 陈冰如,杨绍晋,钱琴芳,等.中国煤矿样中砷、硒、铬、铀、钍元素的含量分布 [J]. *环境科学*,1989,10(6): 23-27.
- [12] Zhao Yongxin, Xu Zhengqi, Teng Yanguo, et al. Geochemical characteristics of heavy metal in smelting waste residue produced by Panzhihua Steelworks and its enviromental effect [J]. *Guangdong Trace Elements Science*, 2011,18(7):63-70.
- 赵永鑫,徐争启,滕彦国,等.攀钢冶炼废渣中重金属地球化学特征及其环境效应[J]. *广东微量元素科学*, 2011,18(7):63-70.
- [13] Zhao Jing, Fan Biwei, Wu Shizhong. Characteristics and assessment of soil contamination by heavy metals in the industrial zone of Panzhihua Iron & Steel Group Co [J]. *Sichuan Environment*, 2007,26(3):67-70.
- 赵晶,范必威,武仕忠.攀枝花市攀钢工业区土壤重金属污染特征及评价[J]. *四川环境*,2007,26(3):67-70.
- [14] Lv Da, Zheng Xiangmin, ZhouLi, et al. Magnetic diagnosis of heavy metal pollution in sediments of Chongming Wetland [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2007,20(6):38-43.
- 吕达,郑祥民,周立,等.崇明东滩湿地沉积物重金属污染的磁诊断[J]. *环境科学研究*, 2007,20(6):38-43.
- [15] Cai Feng, Liu Zegong, Lin Boquan, et al. Study on trace elements in gangue in Huainan mining area [J]. *Journal of China Coal Society*, 2008,33(8):892-897.
- 蔡峰,刘泽功,林柏泉,等.淮南矿区煤矸石中微量元素的研究[J]. *煤炭学报*,2008,33(8):892-897.
- [16] Cui Longpeng, Bai Jianfeng, Huang Wenhui, et al. Environmental trace elements in coal mining wastes in Huainan coal field [J]. *Geochemical*, 2004, 33(5): 535-540.
- 崔龙鹏,白建峰,黄文辉,等.淮南煤田煤矸石中环境意义微量元素的丰度 [J]. *地球化学*, 2004, 33(5): 535-540.