

安徽宿州市沱河底泥中重金属元素地球化学特征

陈松^{1,2}, 黄淑玲^{1,2}, 孙林华^{1,2}, 张勇¹

(1. 宿州学院 地球科学与工程学院, 安徽 宿州 234000; 2. 安徽省煤矿勘探技术研究中心, 安徽 宿州 234000)

摘要:在系统采集宿州市沱河表层沉积物的基础上,对其重金属元素含量进行了 XRF 测试。结果表明:宿州市沱河沉积物中重金属元素的含量较高,Pb、As、Cr、Cu、Zn 平均含量分别为 40.8 $\mu\text{g/g}$ 、14.6 $\mu\text{g/g}$ 、58.8 $\mu\text{g/g}$ 、52.2 $\mu\text{g/g}$ 、143.3 $\mu\text{g/g}$ 。富集因子和地积累指数法对重金属污染程度的评价表明,Cr 无污染,Pb 和 As 为轻污染,Zn 和 Cu 为中度污染。基于主成分分析的重金属来源分析结果显示,As 主要受控于第一因子,Cu、Zn 受控于第二因子,而 Pb 则受到两种因素的控制。结合其他证据表明,化石燃料燃烧(发电)可能是造成 As 及 Pb 污染的主要因素,Zn 主要由电池和化学物质的排放引起,Cu 则与农业生产活动有关。

关键词:重金属污染;富集因子;地积累指数;主成分分析;沉积物;沱河

中图分类号:X522;P595 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-9250(2011)03-0331-07

近年来,随着重金属污染成为全球问题,河流底泥重金属元素地球化学特征研究正受到更多关注。河流沉积物是水环境的基本组成部分,它既能为河流中的各种生物提供营养物质,同时又是有毒有害物质的储存库^[1,2]。相对水体而言,重金属在河流底泥的赋存具有一定的持久性,富集规律反映出较长时间段内人为活动对河流环境影响的强度和特征。因此,河流底泥可作为评价河流和相关系统环境质量的重要内容之一。一般情况下,河流水体流动性强,水质变化大,易受到气候和人为因素的干扰,河流水体只能反映较短时期内的环境状况;而底泥具有相对稳定性,尤其是重金属元素较易在底泥中产生积累,可以反映河流环境质量的持续状况。

目前,不少学者利用富集因子、SQG、潜在生态风险指数、地积累方法等对国内外不少水体底泥进行过重金属元素特征及污染风险评价^[3-6]。随着城市化进程的发展及安徽在中部的崛起,安徽省宿州市环境质量直接影响到城市经济的发展及城区建设规划。为了对宿州市沱河流域环境质量问题进行了解,本次研究对沱河底泥进行了系统取样,对 Pb、As、Cr、Cu、Zn 等重金属元素和 Al、Si 等主量

元素进行分析,掌握宿州市沱河重金属分布特征,分析了其控制因素,为了解宿州市环境状况及环境治理工作提供参考。

1 自然地理概况

沱河又称交水,是淮河的一条主要支流,发源于河南省商丘市李堤口西,流经虞城、夏邑、永城,至王庄入安徽,流经濉溪、宿州、固镇至五河县西南入淮河,全长 275.13 km,流域面积 8500 km²,沿岸夏邑、永城、濉溪、宿州煤炭储量丰富。宿州市是一个以农业和煤炭工业为主导产业的城市,其农产品优质、多产,是华北农产品基地重要的组成部分。煤炭资源储量丰富,境内有淮北矿业集团公司和皖北煤电集团公司两个大型煤炭企业,区内煤质优良,煤种齐全,为发电工业及民用首选品种。

2 样品采集与测试

采样点主要布置两个位置,一在沱河与新汴河交岔口,宿州市三角洲公园附近;二在沱河东路桥至七里王家。为了能够使样品更具代表性,采样间距为 100 m 左右。其中三角洲公园附近样品标记为

收稿日期:2011-03-03;改回日期:2011-04-18

基金项目:安徽省教育厅自然科学基金重点项目(KJ2011A261)、安徽省教育厅自然科学基金项目(KJ2011B177)、宿州学院科研平台开放课题(2011YKF22、2010YKF28)。

第一作者简介:陈松(1983—),男,硕士,助教,主要从事环境地质、环境地球化学学科研究和教学。E-mail:szxychensong@163.com.

S1, S2, S3..., 汴河路附近样品标号为 D1, D2, D3..., 具体采样位置见图 1。采用自制筒式沉积物采样器(内径 5 cm)沿河流岸边等距离位置(距离水一岸边界约 3 m)进行采样, 仅采集表层 10 cm 内沉积物。取样后首先经自然风干, 手工剔除明显的动植物残片, 并在烘箱内(80℃)保温 24 h 后过 200 目筛。准确称取 4 g 然后利用 30t 压片机进行压片, 送 XRF 测试。测试在安徽省煤矿勘探工程技术研究中心完成, 仪器为 Explorer 9000SDD, 每测试 3 个样品后利用仪器自带标样进行校准, 重金属元素含量采用国家标准沉积物 GBW07307 进行监控, 误差控制在 10%。

3 结果与分析

测试结果见表 1, 可见宿州沱河底泥中重金属元素含量在一定范围变化, 两个不同采样点中 Zn, Cu, Cr, Pb 变化较大, As 基本稳定。其中两点 As 差异不大, 沱河东路桥点 Cr, Pb, Cu, Zn 值均较三角洲公园值大, 尤其 Cu 和 Zn 的值。

3.1 底泥中重金属分布特征

沱河底泥重金属元素与中国水系沉积物平均

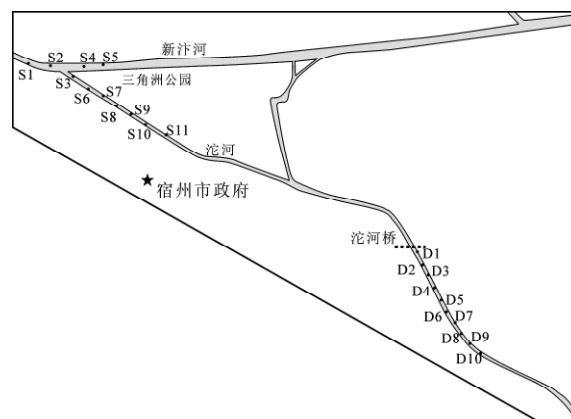


图 1 取样点位置

Fig. 1 Location of the sampling sites

值^[7](简称“全国平均值”)相比, 数值均较高, 其中 Pb 平均含量 40.8 $\mu\text{g/g}$, 是全国平均值(25 $\mu\text{g/g}$)的 1.6 倍; As 平均值 14.6 $\mu\text{g/g}$, 是全国平均值的(9.1 $\mu\text{g/g}$)1.6 倍; Cr 平均含量为 58.8 $\mu\text{g/g}$, 与全国平均值(58 $\mu\text{g/g}$)基本一致; Cu 平均含量为 52.2 $\mu\text{g/g}$, 是全国平均值的(21 $\mu\text{g/g}$)2.5 倍; Zn 平均含量为 143.3 $\mu\text{g/g}$, 是全国平均值(68 $\mu\text{g/g}$)的 2.1 倍。

表 1 宿州市沱河底泥沉积物中元素质量分数

Table 1 Element concentrations in the Tuohu River bottom sediments of Suzhou City

样品号	Al	Si	Ca	K	Zr	Pb	As	Cr	Cu	Zn
	(%)				(10^{-6})					
S1	2.95	68.55	16.56	2.03	159	44	14	43	43	68
S2	3.12	65.61	16.97	2.05	169	57	10	55	43	77
S3	2.99	63.95	20.46	2.01	173	31	23	41	33	66
S4	3.04	63.00	17.48	2.11	161	69	20	57	55	82
S5	3.03	64.27	17.85	2.16	154	73	20	56	56	88
S6	2.82	78.15	10.13	1.90	236	25	8	58	33	43
S7	3.18	82.42	6.66	1.88	287	21	14	51	37	49
S8	3.18	78.33	10.84	2.11	263	20	18	52	35	60
S9	3.29	74.88	12.83	2.11	204	26	11	79	36	59
S10	3.65	70.45	14.85	2.35	155	30	15	66	51	70
S11	3.02	73.55	11.02	2.03	210	24	11	54	41	67
平均值 S	3.12	71.20	14.15	2.07	197	38.2	14.9	55.6	42.1	66.3
D1	3.36	75.31	9.80	2.09	208	41	15	71	55	191
D2	3.39	71.73	10.09	2.04	182	45	17	57	73	273
D3	3.32	75.78	9.37	2.05	215	41	11	66	58	176
D4	3.50	72.02	9.72	1.95	218	44	14	59	63	238
D5	3.07	75.29	9.01	1.94	225	36	13	65	73	187
D	3.46	74.27	10.83	1.94	202	52	10	64	69	269
D7	3.15	78.80	8.71	1.99	211	33	13	56	39	130
D8	3.22	70.83	10.56	1.83	190	45	16	45	69	315
D9	3.27	72.82	10.36	1.84	235	47	20	58	66	240
D10	3.30	72.97	10.07	1.93	179	54	13	81	68	255
平均值 D	3.30	73.98	9.85	1.96	207	43.8	14.2	62.2	63.3	227.4
总平均值	3.21	72.53	12.09	2.02	202	40.8	14.6	58.8	52.2	143.3

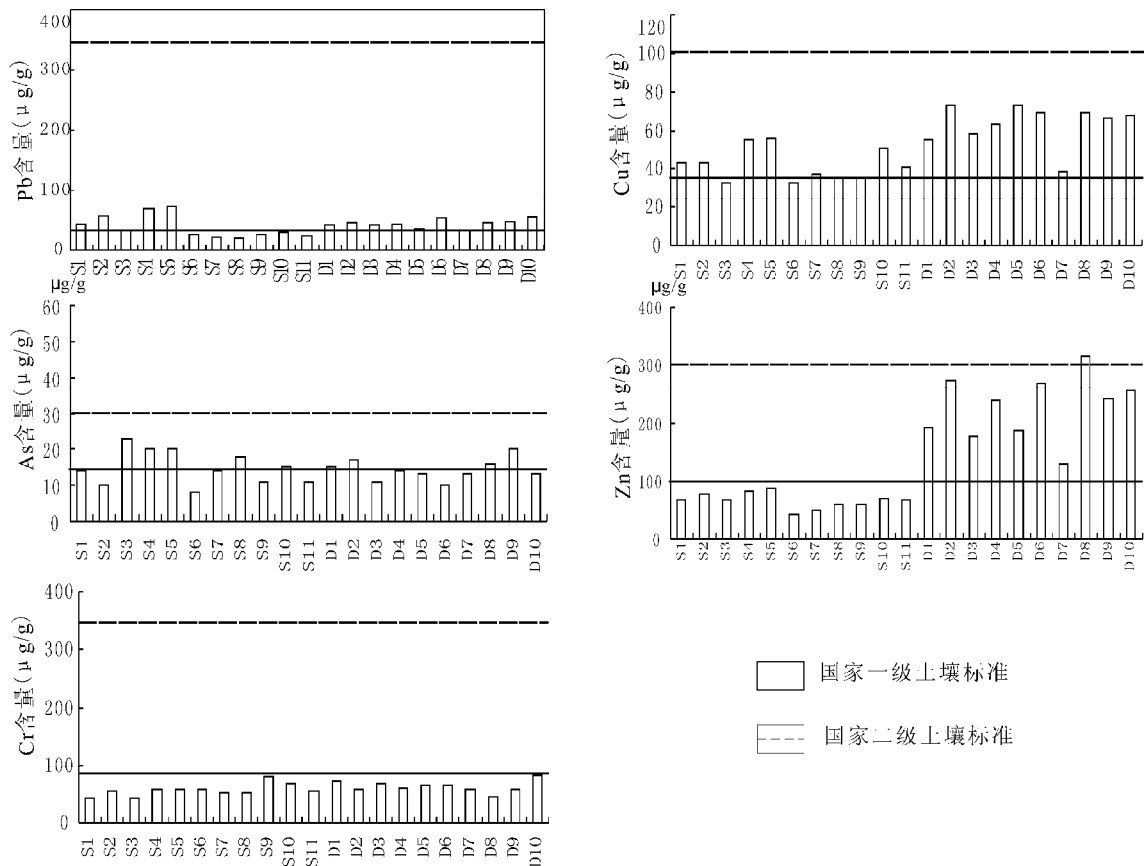


图2 宿州市沱河重金属的含量及参考标准

Fig. 2 Contents of heavy metals and standards in the Tuohe River of Suzhou City

为详细分析沱河底泥重金属污染特征,将沱河底泥重金属元素含量和国家一级土壤标准、二级土壤标准进行比较^[8],如图2所示,可以发现Cu、Zn两种元素污染较重,基本在国家一级土壤标准与二级标准之间;As、Pb污染较小,远低于国家二级土壤标准,在国家一级土壤标准左右,Cr基本无污染,完全符合国家一级土壤标准。

3.2 重金属污染程度评价

自然和人为环境影响的判别和分离是城市环境地球化学研究中的重要内容。人为环境影响的判别可通过地球化学基线并采用相应的地球化学指标来进行,常用的评价方法有富集因子、地累积指数,这两种方法均能有效的评价土壤、沉积物中重金属的人为污染程度。

富集因子(enrichment factor)是1974年Zoller等^[9]首次提出的用来研究大气颗粒物中化学元素来源的方法,后被很多学者用在环境地球化学重金属污染评价中得到广泛应用。富集因子是定量评价污染程度与污染来源的重要指标,它选择一定条件的元素作为参考元素(或称标准化元素),样品中污染

元素质量分数与参考元素质量分数的比值与背景区中二者质量分数比值的比率即为富集因子F,公式为:

$$F = \frac{[w(M)/w(M_r)]_s}{[w(M)/w(M_r)]_b}$$

式中: $w(M)$ 和 $w(M_r)$ 分别表示污染元素和参考元素的质量分数, s 和 b 分别代表样品和背景。

选择不同的参考元素可能会出现不同的评价结果,但是参考元素选择的标准却被大多数学者认同。根据参考元素选择的稳定性、缺少明显的人为源等标准,选择了Al作为参考元素。而由于Al与粘粒组分密切相关,能较好地平衡粒度效应,并缺少明显的人为源等特征,Al作为参考元素也被大多数学者所认同^[5]。背景值是指元素的自然质量分数,即元素在未受认为干扰的环境介质中的质量分数。传统上是地壳元素质量分数平均值或全球页岩元素质量分数平均值作为背景值。然而由于不同成因的岩石具有明显不同的化学组成,以此为母岩演化而成的土壤中元素的分布是不均匀的,同时元素的分布具有空间分异性,同一元素在不同岩石中的质量分

数可以达到不同的数量级。因此,目前大多数研究人员倾向于使用区域背景值或工业化前形成的沉积物中的质量分数作为背景值^[10-12]。本次研究选择安徽省土壤平均值作为背景值^[13]。目前,富集因子的判断标准尚不统一,本文采用 Sutherland^[14]的标准,将污染程度划分为 5 个级别(表 2)。经分析,宿州市沱河底泥中各重金属元素的富集因子见表 3。从表中可以看出,Cr 平均值 2.22,且值均在 2 左右变化,为无污染到弱污染;Pb 和 As 均值为 3.22 和 3.34,多数样品 F 值介于 2~5 之间,为中度污染;Cu 和 Zn 平均值为 5.10 和 5.03,部分样品 F 值大于 5,为中度~显著污染。

表 2 富集因子的污染判断标准

Table 2 Judgement standard of contamination degree by enrichment factor

级别	F 值	污染程度
1	<2	无污染—弱污染
2	2~5	中度污染
3	5~20	显著污染
4	20~40	高度污染
5	>40	极度污染

表 3 宿州市沱河底泥中重金属元素的富集因子值

Table 3 Enrichment factor (F) value of heavy metals in the Tuohe River bottom sediments of Suzhou City

样品号	Pb	As	Cr	Cu	Zn
S1	3.75	3.47	1.76	4.58	2.64
S2	4.60	2.34	2.14	4.34	2.83
S3	2.61	5.62	1.66	3.47	2.53
S4	5.71	4.80	2.27	5.69	3.09
S5	6.06	4.82	2.24	5.81	3.33
S6	2.23	2.07	2.49	3.68	1.75
S7	1.66	3.22	1.94	3.66	1.77
S8	1.58	4.14	1.98	3.46	2.16
S9	1.99	2.44	2.91	3.44	2.06
S10	2.07	3.00	2.19	4.40	2.20
S11	2.00	2.66	2.16	4.27	2.54
D1	3.07	3.26	2.56	5.15	6.52
D2	3.34	3.66	2.03	6.77	9.23
D3	3.07	2.42	2.41	5.50	6.08
D4	3.17	2.93	2.04	5.67	7.81
D5	2.95	3.09	2.56	7.47	6.98
D6	3.78	2.11	2.24	6.27	8.91
D7	2.64	3.02	2.15	3.90	4.74
D8	3.52	3.63	1.69	6.74	11.22
D9	3.62	4.47	2.15	6.35	8.41
D10	4.12	2.88	2.97	6.49	8.87
平均值	3.22	3.34	2.22	5.10	5.03

为了检验富集因子的计算结果,同时用地积累指标(geoaccumulation index, I_{geo})方法进行评价,它是 Muller^[15]于 1969 年提出来的定量评价重金属元素污染的参数,其计算公式为:

$$I_{geo} = \log_2 \frac{w(C_n)}{1.5w(B_n)}$$

式中: $w(C_n)$ 、 $w(B_n)$ 分别为样品中元素质量分数和该元素的背景值;1.5 是校正系数,用来消除元素质量分数的自然波动。1981 年, Muller^[16]将这一指标划分为 6 个等级(表 4)。

利用计算富集因子时的背景值,可得出宿州市沱河底泥中 Pb、As、Cr、Cu、Zn 等元素的地积累指标(表 5)。由表 5 可知,各元素的 I_{geo} 值差异较大。其中 Cr 元素 I_{geo} 值全部小于 0,均值为 -0.52,无污染;Pb 和 As 值在 0 左右变化较大,且全部小于 1,均值分别为 -0.06 和 0.03,为无污染到轻污染;Zn 和 Cu 的 I_{geo} 值基本都大于 0,均值为 0.42 和 0.65,为无污染到轻污染,污染程度高于 Pb 和 As,这与富集因子的判断结果一致。

表 4 地积累指标判断的污染判断标准

Table 4 Judgement standard of contamination degree by geo-accumulation index

级别	I_{geo} 值	污染状况
0	$I_{geo} \leq 0$	无污染
1	$0 < I_{geo} \leq 1$	无污染到轻污染
2	$1 < I_{geo} \leq 2$	轻污染
3	$2 < I_{geo} \leq 3$	轻污染到重污染
4	$3 < I_{geo} \leq 4$	重污染
5	$4 < I_{geo} \leq 5$	重污染到高度污染
6	$I_{geo} > 5$	高度污染

4 讨论

为了进一步揭示重金属元素之间及与其他主量元素的相互关系,对宿州市沱河底泥中各种元素利用 Minitab 软件进行统计分析,发现各指标的含量均符合正态分布,在此基础上分析了各指标间的相关关系,并计算出相应的 Pearson 相关系数,结果如表 6 所示,并进行多变量因子分析,得到元素间的主成分因子载荷图 3。

从表 6、图 3 可以看出,Si 和 Zr 相关性较好,且第一因子贡献率较高,因子变量在 Si 和 Zr 的浓度上有较高的正载荷,也就是第一因子反应了 Si 和 Zr 的富集程度;且 Si、Zr 均与 Ca 有较好的负相关关系,而因子变量 Ca 在第一因子反应了较高的负载

表 5 宿州市沱河底泥中重金属元素的地积累指标
Table 5 Geo-accumulation index(I_{geo}) of heavy metals
in the Tuohe River bottom sediments of Suzhou City

样品号	Pb	As	Cr	Cu	Zn
S1	0.14	0.02	-0.95	0.42	0.19
S2	0.51	-0.46	-0.60	0.42	0.24
S3	-0.37	0.74	-1.02	0.04	0.18
S4	0.78	0.54	-0.55	0.78	0.27
S5	0.87	0.54	-0.57	0.80	0.30
S6	-0.68	-0.79	-0.52	0.04	-0.01
S7	-0.93	0.02	-0.71	0.20	0.05
S8	-1.00	0.38	-0.68	0.12	0.14
S9	-0.62	-0.33	-0.08	0.17	0.13
S10	-0.42	0.12	-0.33	0.67	0.20
S11	-0.74	-0.33	-0.62	0.35	0.18
D1	0.03	0.12	-0.23	0.78	0.64
D2	0.17	0.30	-0.55	1.19	0.79
D3	0.02	-0.33	-0.33	0.85	0.60
D4	0.14	0.02	-0.50	0.97	0.73
D5	-0.15	-0.09	-0.36	1.19	0.63
D6	0.38	-0.46	-0.38	1.10	0.79
D7	-0.28	-0.09	-0.57	0.28	0.47
D8	0.17	0.21	-0.89	1.10	0.86
D9	0.23	0.54	-0.52	1.04	0.74
D10	0.43	-0.09	-0.04	1.08	0.76
平均值	-0.06	0.03	-0.52	0.65	0.42

荷。Si 和 Zr 较为稳定,为陆源砂的代表性元素,而 Ca 仅与 K、As 有较好的相关性,表明了三者受到相同的控制因素。Cu、Zn 相关性较好,且与 Al 有一定的相关性,表明了两者的主要受控于第二因子,在第二因子上浓度有较高的负荷。Pb 与 Ca 和 Cu 均表现为一定的相关性,且与 Si 和 Zr 表现为负相关,说明了 Pb 的含量受到两个因子的影响;而 Cr 在两个因子上均没有反应出较高的载荷,说明了这种元素可能受到其他因素的制约和影响。鉴于 Cr 在河

流底泥中含量较低,无污染,反应了 Cr 为正常的沉积来源,无其他来源,与 Al 的较高的相关性也体现了这一点。

不少研究表明^[17,18],人类活动污染河流的方式主要有工业污染、生活污染和农田径流排放污染。宿州市沱河底泥沉积物中 Cu 和 Zn 污染较为严重,再次为 As 和 Pb,Cr 元素无污染。根据工业过程中可能释放的化学元素^[19]可知,多数工业及生产活动都能引起 Cu 和 Zn 的污染。而仅有化石燃料燃烧(发电)、塑料、半导体、超导等几种工业过程中直接或间接排放物会造成 As 或 Pb 的污染,而不会产生 Cr,结合宿州市及上游永城、濉溪等均是化石能源为主导产业的城市,推测宿州市沱河 As 和 Pb 污染主要由煤炭的燃烧和发电引起。

对两个不同采样点的重金属污染进行比较发现,第一个采样点 Pb、As、Cr、Cu、Zn 的平均值分别为 38.2、14.9、55.6、42.1、66.3;第二个采样点 Pb、As、Cr、Cu、Zn 的平均值分别为 43.8、14.2、62.2、63.3、227.4;第二个采样点的污染明显比第一个采样点污染严重,考虑到采样点 1 位于沱河与新汴河交汇口,水流较强,不利于重金属物质的积聚外。两个点的 Cu 含量相差悬殊,超过了 50%,Zn 含量差别达三倍还要多。而对于 Cu 和 Zn 的排放较为严重的人类活动包括肥料、化学品、药品等,结合采样点 2 位于七里王家,为农业活动的频繁区。推测两点的 Cu 含量差异是由于农业活动引起,而两点间 Zn 含量的明显差异是由于电池及电化学物质、塑料物质排放引起的,因为这是较少的引起 Zn 富集而不会同时产生大量 Cu 元素的人类活动。

表 6 宿州市沱河沉积物中元素间的相关关系
Table 6 Correlation of elements in the Tuohe River bottom sediments of Suzhou City

元素	Al	Si	Ca	K	Cr	Cu	Zn	Zr	Pb	As
Al	1.000									
Si	0.153	1.000								
Ca	-0.307	-0.887	1.000							
K	0.255	-0.340	0.497	1.000						
Cr	0.487	0.268	-0.332	0.204	1.000					
Cu	0.480	-0.140	-0.269	-0.238	0.298	1.000				
Zn	0.512	0.052	-0.432	-0.471	0.223	0.879	1.000			
Zr	-0.030	0.846	-0.749	-0.492	0.005	-0.198	-0.030	1.000		
Pb	0.021	-0.687	0.417	0.055	0.069	0.546	0.350	-0.627	1.000	
As	-0.051	-0.502	0.455	0.151	-0.401	0.093	0.023	-0.222	0.272	1.000

注:显著性相关(样本数 $n=21$, $P=0.05$).

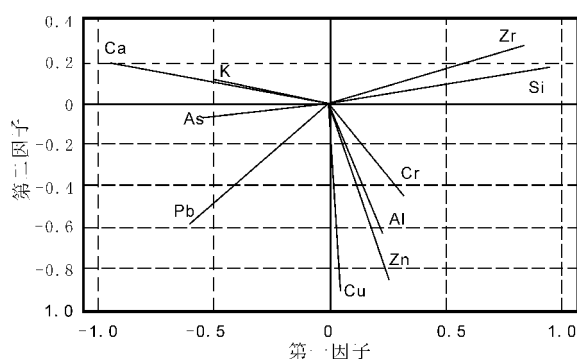


图 3 宿州市沱河各元素主成分因子载荷

Fig. 3 Loading plots of principal component factors in the Tuohe River of Suzhou City

5 结论

1) 宿州市沱河沉积物中重金属元素的含量较高,其中 Pb 平均含量 $40.8 \mu\text{g/g}$, As 平均值 $14.6 \mu\text{g/g}$, Cr 平均含量为 $58.8 \mu\text{g/g}$, Cu 平均含量为 $52.2 \mu\text{g/g}$, Zn 平均含量为 $143.3 \mu\text{g/g}$,其中 Cu、Zn 两种元素基本在国家一级土壤标准与二级标准之

间,污染较为严重;As、Pb 污染较小,远低于国家二级土壤标准,在国家一级土壤标准左右,Cr 完全符合国家一级土壤标准。

2) 利用富集因子及地积累方法对重金属含量进行评价,结果表明 Cr 无污染,Pb 和 As 为轻污染,Zn 和 Cu 为中度污染;应该重点防治 Zn、Cu 的重金属污染,采取一定的措施。对重金属元素及其他元素进行相关性统计,发现 As 元素和 Si、Al、Ca、K 等主量元素受控于第一因子;Cu、Zn 受控于第二因子,Pb 受到两种因素的控制。结合宿州市及沱河流域环境,并对两个采样点污染进行比较发现,化石燃料燃烧(发电)是造成 As、Pb 的污染的主要原因,Zn 污染主要由电池、化学物质等排放引起,Cu 污染主要由农业生产活动引起。

致谢:在样品的采集和测试过程中得到了宿州学院郑俊、孙超尚等同志的大力协助,在此表示衷心感谢!

参 考 文 献

- [1] 白晓慧,杨万东,陈华林,等. 城市内河沉积物对水体污染修复的影响研究[J]. 环境科学学报,2002,22(5):562—565.
- [2] Dexter K S, Ward N I. Mobility of heavy metals within freshwater sediments affected by motorway stormwater [J]. Science of the Total Environment, 2004, 334—335:271—277.
- [3] 马力,杨晓波,佟成治,等. 辽宁省浑河流域底质中重金属元素地球化学特征[J]. 岩矿测试,2008,27(3):184—188.
- [4] 李莲芳,曾希柏,李国学,等. 北京市温榆河沉积物的重金属污染风险评价[J]. 环境科学学报,2007,27(2):289—297.
- [5] 张秀芝,鲍征宇,唐俊红. 富集因子在环境地球化学重金属污染评价中的应用[J]. 地质科技情报,2006,25(1):65—72.
- [6] 祝云龙,姜加虎,孙占东,等. 洞庭湖沉积物中重金属污染特征与评价[J]. 湖泊科学,2008,20(4):477—485.
- [7] 鄢明才,迟清华. 中国东部地壳与岩石化学组成[M]. 北京:科学出版社,1997:193—194.
- [8] 国家环境保护局. GB15618—1995. 土壤环境质量标准[S]. 1995.
- [9] Zoller W H, Gladney E S, Duce R A. Atmospheric Concentrations and Sources of Trace Metals at the South Pole[J]. Science,1974,183:199—201.
- [10] Hernandez L, Probst A, Probst J L, et al. Heavy Metal Distribution in Some French Forest Soils: Evidence for Atmospheric Contamination[J]. The Science of the Total Environment,2003,312:195—219.
- [11] Tanin L, Micaela P, Malcolm C. Heavy Metal Distribution and Controlling Factors within Coastal Plain Sediments, Bells Creek Catchment, Southeast Queensland, Australia[J]. Environment International,2003,29:935—948.
- [12] Zwolsman J J G, Van Eck G T M, Berger G. Spatial and Temporal Distribution of Trace Metals in Sediments from the Scheldt Estuary, South—West Netherlands[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science,1996,43:55—79.
- [13] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京:中国环境科学出版社,1990:330—382.
- [14] Sutherland R A. Bed Sediment—Associated Trace Metals in an Urban Stream, Oahu, Hawaii[J]. Environ. Geol., 2000, 39:611—627.
- [15] Muller G. Index of Geoaccumulation in Sediments of the Rhine River[J]. Geojournal,1969,2:108—118.
- [16] Muller G. Die Schwermetallbelastung der Sedimente des Neckars und seiner Nebenflüsse[J]. Chemiker — zeitung, 1981,6:157—164.
- [17] 腾彦国,倪师军,林学钰,等. 城市环境地球化学研究综述[J]. 地质论评,2005,51(1):64—76.

- [18] 袁旭因,刘冰,陈颖,等. 污染河道的常量和微量元素特征及指示意义[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(2): 270—274.
- [19] Siegel F R. Environmental geochemistry of potential toxic metals[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2002.

Geochemical Characteristics of Heavy Metal Elements in Sediments of the Tuohe River in Suzhou City, Anhui Province

CHEN Song^{1,2}, HUANG Shu-ling^{1,2}, SUN L in-hua^{1,2}, ZHANG Yong¹

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Suzhou University, Anhui, Suzhou 234000, China;

2. Engineering Research Center of Coal Mining Exploration, Anhui Province, Anhui, Suzhou 234000, China))

Abstract: Based on systematic collection of the surface sediments of the Tuohe River in Suzhou City, the concentrations of heavy metals were measured by XRF. The results indicated that the concentrations of heavy metals in the Tuohe River are high as expressed by Pb, As, Cr, Cu and Zn, and their average concentrations are 40.8, 14.6, 58.8, 52.2 and 143.3 $\mu\text{g/g}$, respectively. The evaluation of pollution degree based on enrichment factor and geo-accumulation index showed that heavy metals of the sediments can be subdivided into three types: no-pollution (Cr), light-pollution (Pb and As), and moderate-pollution (Zn and Cu). Source discrimination of heavy metals by principle analysis indicated that As is controlled by the first factor, Cu and Zn are controlled by the second factor, and Pb is related to these two factors. In combination with other evidence, fossil fuel combustion (e. g. electricity generation) is considered to be the source of As and Pb, whereas the discharge of batteries and chemical materials, as well as agricultural activities, are related to the pollution of Zn and Cu, respectively.

Key words: heavy metal pollution; enrichment factor; geo-accumulation index; principle analysis; sediment; Tuohe River