

车继鲁, 余树全, 张鑫, 等. 瓯江下游流域河流沉积物重金属污染特征、来源及潜在生态风险评价[J]. 生态科学, 2017, 36(4): 176–184.

CHE Jilu, YU Shuquan, ZHANG Xin, et al. Pollution characteristics, sources and potential ecological risk of heavy metals in surface sediment from the Lower Ou River[J]. Ecological Science, 2017, 36(4): 176–184.

瓯江下游流域河流沉积物重金属污染特征、来源及潜在生态风险评价

车继鲁, 余树全*, 张鑫, 齐鹏, 梁立成, 俞佳骏

浙江农林大学林业与生物技术学院, 临安 311300

【摘要】 为了解瓯江下游流域及沿岸城郊入江河流沉积物中重金属的污染特征, 对瓯江流域下游及温州城区河流 43 个表层沉积物中 Cr、Co、Ni、Cu、Zn、As 和 Pb 共 7 种重金属元素的含量特征进行分析, 比较了城郊与城区、城区入江口与城区内部之间河流沉积物重金属含量的特征及差异并探讨其污染来源。结果表明: 沉积物中 7 种重金属元素的含量由高到低依次为: Zn>Cr>Cu>Ni>Pb>Co>As, 与浙江省土壤背景值相比, 7 种重金属的平均含量超标 1.5—4.9 倍, 各种重金属的污染程度依次为: Co>Ni>Cr>Zn>As>Cu>Pb, 综合污染程度已达到警戒线等级。来源分析表明, 重金属元素 Cu、Zn、Pb 和 Cr 主要来自于工业污水排放及船舶交通等人类活动, Co 和 As 主要来自于工业及农业生产活动, Ni 主要来自于以工业为主的排污污染。潜在生态风险系数 E_r^i 评价结果显示, 7 种重金属潜在生态风险大小为: Co>As>Cu>Ni>Pb>Cr>Zn, Co 元素处于较强生态风险等级; 潜在生态风险指数 RI 介于 72.05—107.80 之间, 其中 55.5% 的样点处于较强生态风险水平, 44.4% 为中等生态风险水平, 研究区整体处于较强生态风险水平。

关键词: 瓯江下游; 重金属; 沉积物; 来源; 潜在生态风险

doi:10.14108/j.cnki.1008-8873.2017.04.024 中图分类号: X522; X131.2 文献标识码: A 文章编号: 1008-8873(2017)04-176-09

Pollution characteristics, sources and potential ecological risk of heavy metals in surface sediment from the Lower Ou River

CHE Jilu, YU Shuquan*, ZHANG Xin, ZHANG Chao, QI Peng, LIANG Licheng, YU Jiajun

School of Forestry and Biotechnology, Zhejiang Agricultural & Forestry University, Lin'an 311300, China

Abstract: In order to understand the pollution characteristics of heavy metals in surface sediment of the Lower Ou River and coastal urban river, we analyzed the concentrations of 7 heavy metals including Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As and Pb in 43 sediment samples, compared the characteristics and differences between suburban with urban areas, estuary with internal of urban river and then explored the underlying source of heavy metals. The study results showed that 7 heavy metal contents of surface sediments followed the order: Zn>Cr>Cu>Ni>Pb>Co>As, and all heavy metals were 1.5 to 4.9 times higher than those of Zhejiang natural soils background values. The pollution extent of heavy metals in surface sediments by Nemerow pollution index followed the order: Co>Ni>Cr>Zn>As>Cu>Pb, and the comprehensive pollution class was in alert level. Analysis of heavy metals source revealed that Cu, Zn, Pb and Cr were dominated by both drainage of industrial wastewater and vessel traffic. Co and As were dominated by both industrial and agricultural production activities. Ni was affected by industrial sewage pollution. The potential ecological risk of 7 heavy metals in sediments by the potential ecological risk factors E_r^i was

收稿日期: 2016-06-27; 修订日期: 2016-07-06

基金项目: 浙江省重点科技创新团队项目(2011R50027)

作者简介: 车继鲁(1991—), 男, 宁夏银川人, 硕士研究生在读, 主要从事污染生态学研究, E-mail: chejilu@126.com

*通信作者: 余树全, 男, 博士, 教授, 主要从事生态学研究, E-mail: yushuq@zafu.edu.cn

in the following order: $\text{Co} > \text{As} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Pb} > \text{Cr} > \text{Zn}$, and Co was at high ecological risk level. The potential ecological risk indexes RI of 7 heavy metals at all sampling sites were between 72.05 and 107.80, and 55.5% of the samples suffered from high ecological risks and 44.4% had moderate risks. Assessment on ecological risk indicated that the study area was at the high ecological risk level.

Key words: lower Ou River; heavy metal; sediments; sources; potential ecological risk

1 前言

沉积物是水环境中污染物重要的源和汇,经过工农业废水排放、大气沉降和地表径流等途径进入水体的污染物,尤其是重金属或憎水性有机污染物,会优先吸附到颗粒物上,在水动力作用下,随着颗粒物进入沉积物,而沉积物中的污染物在一定的物化条件下会被释放进入水体,如此反复,对底栖生物构成威胁,通过食物链还会影响人类健康^[1]。随着工业化和城市化进程的加快,城市河流污废水排放加剧,导致河流沉积物重金属污染问题日益凸显^[2]。重金属元素是水环境中的重要污染物,可以通过其与污染物的含量状况衡量水体的污染状况;同时重金属不同于其它可生物降解的有机污染物,显著的生物毒性以及污染的持久性使其在水生生物中被富集放大^[3]。

近年来,许多学者对流域沉积物重金属污染状况进行了研究,采用不同方法评价重金属污染程度,运用多元统计方法分析污染来源^[4-7]。郇钧璋^[8]等在2011分析了瓯江口海域表层沉积物重金属污染含量分布特征,并采用单因子指数评价法和潜在生态风险指数法对其环境质量进行了评价,结果表明沉积物对水域具有低潜在生态风险。流域中的沉积物在空间上的分布会随污染物迁移能力与距离呈现不同变化,同时水体自净作用通常会对水体沉积物质量产生影响。刘文新^[9]等对乐安江沉积物的研究表明,流域内金属污染的空间分布呈现由上游背景低值点至中游的污染峰值区,然后随空间距离逐渐衰减的趋势,且在不同功能区段中金属毒性的贡献比较差异明显。柴小平^[10]基于杭州湾及其邻近海域的调查资料,探讨表层沉积物中重金属的时空分布特征及其影响机理,并表明陆源碎屑颗粒的输送对研究区域表层沉积物中重金属的组成和分布具有决定性的意义,不同介质间的转换机制及海水养殖污染对沉积物重金属来源具有一定贡献。

重金属污染物是陆源污染物进入近岸海域的重

要污染物^[8],随着温州市经济的快速发展,输入瓯江的污染物总量逐年上升,直接影响沿江流域及下游近岸海域的环境质量。温州市作为我国现代中小企业发源地与最发达地区,皮革及制品、机械制造与五金、电镀、印染、化学制品等工业活动所产生的污染物,有的未经处理直接排入河网水系,有的经雨水冲刷随着地表径流进入河道造成污染^[11];同时,城镇化进程中,居民的生活废污水排放也成为城区内部河道水环境污染的重要影响因素。近年来,诸多学者^[8, 11-13]对瓯江入海口海域、温州市区河网、温瑞塘河水网体系及其上游调瓯江水进城区水网河段的重金属污染状况进行研究,这些流域的污染特性与瓯江下游干流流域的水环境健康密不可分,但目前为止,尚未有见针对瓯江下游干流流域重金属污染状况及生态安全状况进行的研究。因此,本研究针对温州市城市发展进程中对河道流域水系的重金属污染问题进行研究,按照河流流域的空间分布特征进行分区采样,运用单因子指数法、内梅罗综合污染指数法、多元统计分析和潜在生态风险评价的方法,分析流域水系的重金属含量分布特征、不同类型人为活动影响下重金属的污染来源以及流域水环境的潜在生态风险,以期对瓯江下游流域水环境实施治理、优化等措施提供科学依据。

2 材料与方法

2.1 研究区概况

瓯江位于浙江省南部,是浙江省第二大河,总长度 388 km,流域面积 18028 km²,属于山溪型河流,全流域平均降水量为 1745.8 mm,年平均径流量 202.7 亿 m³。瓯江下游流域位于温州市境内,感潮河段长 76 km,水系途经永嘉县、瓯海区、鹿城区和龙湾区。温州市地处浙江东南部,江南水网地带,东濒东海,南毗福建,西及西北部与丽水市相连,北和东北部与台州市接壤。地理坐标介于北纬 27°03′—28°36′,东经 119°37′—121°18′之间。境内水系发达,河道纵横,全市共有大小河道 1104 条,河网长度达

5652.34 km, 其中瓯江、飞云江、鳌江列全省八大水系之中^[14]。温州经济产业主要以电气机械及器材制造业、皮革毛皮羽毛(绒)及其制品业、电力热力的生产和供应业、通用设备制造业、纺织服装服饰业以及橡胶塑料制品业为主。

2.2 样品采集

本研究样品于 2014 年 12 月在瓯江下游流域采集, 根据河流的空间分布特征, 结合资料分析, 现场勘探, 分别在城郊入江口、城区入江口和城区内部河流选取 3 个研究区域, 其中城郊入江口主要以农业活动为主, 城区入江口和城区内部主要以工业活动为主。利用 ETC-300A 手动土壤采样器, 采集 0—20 cm 深河流表层沉积物样品共 43 份, 样品用聚乙烯塑料袋盛装, 封口、编号、贴好标签运回室内, 同时记录取样位置的经纬度信息以及周边环境, 采样点位分布如图 1 所示。

2.3 测定方法

河流沉积物样品置于阴凉处荫干, 人工剔除根须、石块等杂物, 粉碎研磨过 100 目筛, 将样品装进密封袋中, 贴上标签, 用于分析。X 射线荧光光谱检测技术相较于原子吸收(AAS)、石墨炉原子吸收法(GF-AAS)、等离子体光谱(ICP-OES)或等离子质谱(ICP-MS)等方法具有分析速度快、检测元素范围广、前处理简便、快速检测等优点^[15, 16], 沉积物中重金属元素 Cr、Co、Ni、Cu、Zn、As、Pb 的测定采用由德国牛津仪器生产的 X-MET7000 型手持 X 射线荧光(EDXRF)光谱仪, 元素测试误差小于 3%。测试完成于浙江农林大学生态学实验室。

2.4 评价方法

2.4.1 单因子指数法

单因子指数法^[17]是国内外普遍采用的方法之一,

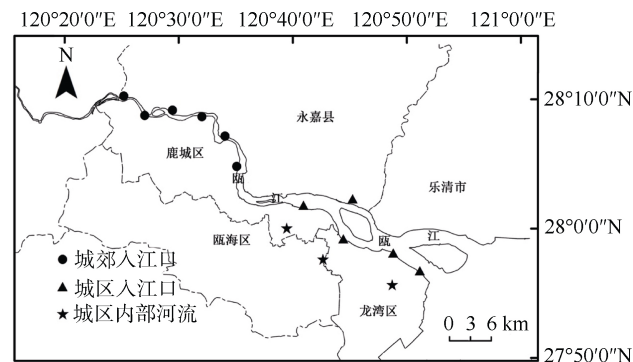


图 1 调查区域及采样站位

Fig. 1 Surveyed area and sampling locations

是对土壤中的某一污染物的污染程度进行评价。其计算公式为:

$$P_i = C_i / S_i \quad (1)$$

式中, P_i 为土壤中污染物 i 的环境质量指数; C_i 为污染物 i 的实测浓度($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); S_i 为污染物 i 的背景值或对照值($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 选用浙江省土壤中重金属元素的背景值^[18]。

2.4.2 内梅罗综合污染指数法

内梅罗综合污染指数法^[17]可全面反映土壤中各污染物的平均污染水平, 也突出了污染最严重的污染物给环境造成的危害。内梅罗污染指数 P_N 计算方法为:

$$P_N = \sqrt{\frac{P_{\max}^2 + \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i\right)^2}{2}} \quad (2)$$

式中, P_N 为沉积物综合污染指数, P_{\max} 为沉积物重金属元素中污染指数最大值。

2.4.3 潜在生态风险评价

潜在生态风险指数法是瑞典学者 Hakanson^[19] 1980 年建立的一套从沉积学角度, 根据重金属性质及环境行为特点, 评价重金属污染以及生态风险性的方法。单个重金属潜在生态风险因子 E_r^i 的计算公式如下:

$$E_r^i = T_r^i \times \frac{C^i}{C_n^i} \quad (3)$$

式中, C^i 为重金属 i 的实测含量; C_n^i 重金属 i 为参考值, 本研究采用浙江省土壤元素背景值^[18]。 T_r^i 为某重金属的毒性响应系数, 反映重金属的毒性水平及土壤对重金属污染的敏感性。参考相关研究^[19-21], As、Co、Cu、Pb、Ni、Cr 和 Zn 的毒性响应系数分别为 10、5、5、5、5、2 和 1。

重金属的综合潜在生态危害指数 RI 可以表示为各个重金属的 E_r^i 之和:

$$RI = \sum_{i=1}^m E_r^i \quad (4)$$

Hakanson^[19] 提出的潜在生态风险指数法是基于 8 种污染物, 即 PCB、Hg、Cd、As、Pb、Cu、Cr 和 Zn, 其中: PCB 为多氯联苯, 属持久性有机污染物。本文针对 As、Co、Cu、Pb、Ni、Cr 和 Zn 共 7 种重金属进行分析, 结合目前国内对重金属潜在生态风险评价的类似研究^[22], 对分级标准进行调整, 调整后的具体数值及分级如表 1 所示。

表 1 潜在风险评价指标和污染程度
Tab. 1 Index and pollution degree of potential ecological risk assessment

E _r ⁱ		RI		生态风险级别
Hakanson	本研究	Hakanson	本研究	
<40	<10	<150	<40	轻微生态风险
40-80	10-20	150-300	40-80	中等生态风险
80-160	20-40	300-600	80-160	较强生态风险
160-320	40-80	≥600	≥160	很强生态风险
≥320	≥80	-	-	极强生态风险

2.5 统计分析

采用 SPSS18.0 软件对相关数据进行处理和统计分析, 运用相关性分析和主成分分析法对重金属的可能来源进行解析。

表 2 研究区表层沉积物重金属含量的统计结果
Tab. 2 Statistics of heavy metal contents in sediments of the study area

样区	样品数		重金属含量/(mg·kg ⁻¹)						
			Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Pb
城郊 入江口	18	平均值	193.0	49.1	52.3	66.3	177.3	9.6	58.7
		最大值	397.3	58.4	72.4	95.2	222.9	13.7	80.4
		最小值	121.9	41.6	29.6	24.4	115.4	2.6	48.1
		标准差	78.83	5.00	12.03	19.57	29.80	3.13	7.37
		变异系数/%	40.86	10.19	22.99	29.50	16.80	32.51	12.55
城区 入江口	15	平均值	167.3	52.4	65.7	61.8	173.8	12.9	47.3
		最大值	222.6	65.6	125.3	136.1	265.5	19.6	60.7
		最小值	147.0	35.4	37.3	31.4	117.1	5.2	36.9
		标准差	19.24	8.31	26.34	24.80	39.56	3.96	8.87
		变异系数/%	11.50	15.87	40.08	40.16	22.76	30.80	18.77
城区 内部	10	平均值	166.7	52.9	79.2	65.2	255.5	10.8	52.4
		最大值	212.7	61.0	280.8	182.7	781.8	15.6	88.9
		最小值	126.4	41.7	44.5	16.6	94.9	3.7	22.4
		标准差	24.63	7.07	71.97	52.85	215.37	3.33	18.13
		变异系数/%	14.78	13.38	90.86	81.10	84.31	30.77	34.58
研究区		平均值	177.9	51.1	63.2	64.5	194.3	11.0	53.3
		最大值	397.3	65.6	280.8	182.7	781.8	19.6	88.9
		最小值	121.9	35.4	29.6	16.6	94.9	2.6	22.4
		标准差	54.19	6.85	38.90	31.03	109.47	3.69	12.02
		变异系数/%	30.46	13.41	61.51	48.13	56.35	33.48	22.56
土壤背景值		浙江省 ^[18]	55.99	10.4	23.93	22.63	83.06	6.88	35.7
		全国 ^[23]	65	13	26	24	68	10	23
		长江水系 ^[24]	89.54	18.53	37.40	82.00	174.00	25.40	60.00
其它流域		闽江中下游 ^[25]	41.31	6.46	16.45	-	104.59	-	60.27
		珠江下游 ^[26]	86.62	18.18	54.10	80.20	543.60	119.55	104.58

注: “-”表示文献中无此指标的监测值

3 结果和讨论

3.1 重金属元素的含量特征

由表 2 可知, 研究区重金属元素 Cr、Co、Ni、Cu、Zn、As 和 Pb 含量的平均值分别为 177.9、51.1、63.2、64.5、194.3、11.0 和 53.3 mg·kg⁻¹, 均已不同程度超过浙江省土壤背景值^[18], 其中 Co 的平均含量超过了浙江省土壤背景值的 4.9 倍, Cr、Cu、Ni 和 Zn 分别超过了 3.2、2.8、2.6 和 2.3 倍, 而 As 和 Pb 则超过了 1.6 和 1.5 倍。从超过背景值的样点所占比例来看, Cr、Co、Ni 和 Zn 四种重金属元素在全部样点中超过背景值比例达 100%, 污染范围较大; Cu、Pb 和 As 超过背景值的比例分别为 97.67%、95.35%和 83.72%。相较我国其它入海河流表层沉积物的重金属含量, Cr、Co 和 Ni 均高于长江水系、闽

江中下游和珠江下游,而 Cu、As 和 Pb 均低于以上流域;此外, Zn 的含量高于长江水系、闽江中下游,但低于珠江下游。可见,瓯江下游部分重金属元素含量已高于上述受人类活动影响较大的流域。变异系数可以反映不同样点间的变异程度,根据所有样点的数据分析可知,7 种重金属元素在各样点间均呈现中等变异。其中, Ni、Zn 和 Cu 变异系数较大,分别为 61.51%、56.35%和 48.13%,这 3 种重金属元素的空间分布差异较大,部分样点污染较为严重,可能存在点源输入;重金属元素 Co 的变异系数较小,变异系数为 13.41%,说明存在一定程度的面源污染。

城郊入江口表层沉积物重金属中 Cr、Cu 和 Pb 的平均含量超过了研究区平均水平,城区入江口与城区内部分别为 Co、Ni、As 三种元素和 Co、Ni、Cu、Zn 四种元素超过研究区平均水平。以上超过研究区平均含量的重金属种类中,Co 和 Ni 的累积程度在城区入江口与城区内部河流区域有一定的相似性。研究区内重金属元素的最大值在三个样区均有分布,城郊入江口中出现的最大值元素为 Cr,其含量为 $397.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,超过浙江省土壤背景值 7.1 倍;城区入江口中出现的最大值元素为 Co 和 As,其含量分别为 65.6 和 $19.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,分别超过浙江省土壤背景值 6.3 和 2.8 倍;城区内部出现的最大值元素为 Ni、Cu、Zn 和 Pb,其含量分别为 280.8、182.7、781.8 和 $88.9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,分别超过浙江省土壤背景值 11.7、8.1、9.4 和 2.5 倍。由此可见,城郊与城区范围内超过研究区平均含量水平的重金属元素种类略有差异,不同区域重金属元素的含量出现最大值的种类差异明显,这可能与受到不同污染源影响的差异有关。

3.2 重金属污染评价

研究区重金属污染评价见表 3。单因子污染指数评价结果表明,不同重金属元素的污染程度大小为 $\text{Co} > \text{Ni} > \text{Cr} > \text{Zn} > \text{As} > \text{Cu} > \text{Pb}$,研究区内重金属元素

Cr、Ni、Cu、Zn、As 和 Pb 均处于安全等级,重金属元素 Co 处于轻污染等级。内梅罗综合污染指数评价结果表明,不同样区污染程度大小为城区内部 > 城区入江口 > 城郊入江口,三个样区综合污染程度均处于警戒线等级。

通过对 Cr、Co、Ni、Cu、Zn、As 和 Pb 共 7 种重金属的污染评价数据可以看出,研究区内 Co 的污染程度最高,需要引起重视。Co 的平均 P_i 为 1.03,大部分样点存在污染,其中 48.84%为警戒线等级,51.26%的采样点处于轻度污染。其次是污染相对较轻的 Ni、Zn 和 Cr 3 种重金属元素, P_i 的平均值分别为 0.44、0.44 和 0.41。Ni 有 93.02%的样点处于无污染的安全等级,剩余样点中 4.65%为警戒线等级,2.33%为轻污染;Zn 有 97.67%的样点无污染,2.33%为轻污染;Cr 有 95.35%的样点无污染,4.65%为警戒线等级。As、Cu 和 Pb 3 种重金属元素在研究区域内污染程度最轻,其全部样点均处于无污染等级。

由污染指数评价可知,瓯江下游流域河流开始受到重金属 Co 的污染,研究区内重金属元素除 Co 外, Cr、Ni、Cu、Zn、As 和 Pb 单因子指数均小于 0.7。城区内部受到工业活动的影响强度高于城郊地区,导致其重金属对河流的综合污染程度大于城郊入江口的农业用地区域,城区内部、城区入江口及城郊入江口的重金属综合污染程度呈明显的梯度变化。

3.3 重金属来源分析

3.3.1 相关分析

城市生活污水和工、农业废水的排放,以及雨水对地表污染物冲刷形成的径流等人为源和自然源,一定程度的直接影响城市河道内重金属元素的含量。通常,重金属元素之间存在显著或极显著的相关性,可以表明这些重金属元素具有相同的污染源的可能性大;否则,其污染源可能不止一个^[4,27,28]。

表 3 重金属污染评价指数

Tab. 3 Pollution appraisal indexes of heavy metal

样区	单因子指数(P_i)							综合污染指数
	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Pb	(P_N)
城郊入江口	0.48	0.98	0.35	0.22	0.36	0.19	0.20	0.75
城区入江口	0.41	1.05	0.42	0.20	0.35	0.25	0.16	0.80
城区内部	0.42	1.05	0.55	0.23	0.53	0.22	0.17	0.81
平均值	0.44	1.03	0.44	0.22	0.41	0.22	0.18	

为探讨研究区沉积物中重金属的主要来源, 本研究利用 SPSS18.0 软件对沉积物中各重金属含量作了 Pearson 相关系数分析。由表 4 可知, Cu、Zn 和 Pb 之间存在极显著的相关性, Cu 与 Zn、Cu 与 Pb、Zn 与 Pb 三种元素两两之间的相关系数分别为 0.828、0.588、和 0.633(P 值均小于等于 0.01), 说明这三种元素来自相同污染源的可能性大。Cu、Zn 和 Pb 同属于亲硫元素, 具有相近的构型和性质, 沉积环境较相似, 具有沉积同源性^[29]。Co 与 As 的相关性较好, 存在极显著的相关性, 相关系数为 0.652(P 值均小于等于 0.01), 与其它重金属元素相关性较差。Ni 与 Cu、Zn 相关性明显, 相关系数分别为 0.313 和 0.309(P 值均小于等于 0.05)。

3.3.2 主成分分析

重金属在沉积物中的富集既有人为原因, 又有自然作用。对重金属来源进行鉴别, 微观上可以对重金属在沉积物中的化学行为及其与环境的关系等

方面的机理提供重要的证据, 宏观上则是对环境质量现状、污染程度进行正确评价和对污染源进行准确、有效治理的前提^[30]。沉积物重金属主要源于成土母质与人类活动, 通过主成分分析可以有效辨别重金属元素的污染来源^[20,31,32]。利用 SPSS18.0 软件对数据进行 KMO 检验, 得到的统计量值为 0.623, Bartlett 球度检验相伴概率为 0.000, 因此, 本研究中的数据可以做因子分析。

运用正交旋转方法对重金属元素进行主成分分析, 结果表明, 前 3 个主成分的累积贡献率达 75.9%, 基本可以解释原始数据的绝大多数信息(表 5)。第一个主成分的贡献率为 39.5%, Cr、Cu、Zn 和 Pb 在第一主成分上有较高的正载荷, 分别为 0.593、0.901、0.857 和 0.798。第二主成分的贡献率为 23.7%, Co 和 As 在该主成分上有较高的正载荷, 分别为 0.880 和 0.915。第三个主成分的贡献率为 12.7%, Ni 在该主成分上的载荷为 0.810。

表 4 研究区沉积物重金属两两之间的相关系数
Tab. 4 Correlation coefficient of heavy metals in sediments

	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Pb
Cr							
Co	0.129						
Ni	0.125	0.113					
Cu	0.427**	0.078	0.313*				
Zn	0.256	0.144	0.309*	0.828**			
As	0.137	0.652**	0.090	0.156	0.136		
Pb	0.259	0.015	0.210	0.588**	0.633**	-0.152	

*在 0.05 水平上显著相关 ** 在 0.01 水平上显著相关

表 5 主成分分析旋转后的因子负荷矩阵
Tab. 5 Rotated component matrix of principal component analysis

元素	主成份		
	1	2	3
Cr	0.593	0.221	-0.467
Co	0.044	0.880	0.059
Ni	0.292	0.128	0.810
Cu	0.901	0.108	0.109
Zn	0.857	0.104	0.239
As	0.016	0.915	0.014
Pb	0.798	-0.181	0.111
方差贡献率/%	39.5	23.7	12.7
累计方差贡献率/%	39.5	63.2	75.9

3.3.3 来源分析

由主成分分析结果可知, 第一主成分中 Cu、Zn、Pb 和 Cr 有较高的正载荷。Cu 主要来源于工业污染物^[33], Zn 主要源自人类对含锌矿石的开采和冶炼以及工业加工中产生的残渣^[34], 有研究指出, Cu 和 Zn 主要来自垃圾的焚烧和工业排放, 部分也来自燃煤的排放^[35]。Pb 的污染源一般被认为主要来源于煤燃烧、含铅矿石的工业利用、原油和含铅汽油的燃烧、机动车尾气排放, 研究区域地处瓯江流域, 各种客、货船等交通工具在航行过程中直接向海洋排放油污废水可能造成 Pb 污染^[34,35]。Cr 可来源于冶金、电镀、制革、机械制造等行业, 主要用于金属表面处理和印染行业等, 能够经过矿山开采和工

业污染物等随河流输入海洋^[29,33,36]。温州龙湾区采样点附近在五公里范围内分布着数十家鞋厂和钢厂,少量皮具厂、塑胶厂和造纸厂等中小型生产企业,其工业废水的排放对沉积物中 Cr 的含量有一定影响。由此推断,第一主成分主要代表了工业污水排放及船舶交通的污染。

第二主成分中 Co 和 As 有较高正载荷。重金属元素 As 在自然环境中存在极少,是化肥和农药的重要成分,也是煤渣倾倒区的主要污染物^[37],化肥中品位较差的过磷酸钙和磷矿粉中含有微量的 As^[38]。研究区域主要为瓯江流域沿岸以及温州城区入江河流,水系发达,农业活动强度高,农业生产过程中使用的农药、化肥以及农化产业等污染源进入河流、流域对沉积物中重金属的来源有一定贡献。Co 可用作化学分析试剂,用于电子、焊接、冶金和电池工业,以及饲料工业^[36],鉴于研究区内分布较多钢厂和少量农化制造产业,在生产过程中使用的化学分析试剂,不可避免对流域水体沉积物中 Co 的含量产生影响。由此推断,第二主成分主要代表了农业生产活动中农药及化肥残留与工业活动的污染。

第三主成分中 Ni 有较高的正载荷。重金属元素 Ni 主要用于电镀行业或作为催化剂在工业中使用^[36]。研究区分布有皮革、印染、五金、石化等产业,工业生产对重金属 Ni 有一定贡献,且在相关性分析中, Ni 与 Cu、Zn 表现出显著地正相关,由此推断第三主成分主要代表了工业排污的污染。

3.6 潜在生态风险评价

对研究区进行潜在生态风险评价,评价结果见表 6。由表 6 可知,瓯江流域下游及温州城区河流沉

积物重金属 Cr、Co、Ni、Cu、Zn、As 和 Pb 的单项生态风险因子平均值分别为 6.25、24.73、13.75、14.27、2.47、15.95 和 7.42,由高到低依次为 Co>As>Cu>Ni>Pb>Cr>Zn; Co 处于较强生态风险等级,As、Cu 和 Ni 处于中等生态风险等级,其余元素均处于轻微生态风险等级。评价结果显示,综合潜在生态风险指数的平均值为 84.85,说明研究区整体上处于较强生态风险水平;其中 44.4%的样点处于中等生态风险水平,其余的样点均处于较强生态风险水平。研究区综合潜在生态风险指数的最小值和最大值分别为 72.05 和 107.80,在综合潜在生态风险评价中分别处于中等生态风险水平和较强生态风险水平;研究区综合潜在生态风险指数最小值出现的样点位于温州城郊的农业用地范围内,最大值出现的样点位于温州城区内部河道的工业用地范围内,该区域有较强的生态风险水平,应该引起警惕。

4 结论

(1)研究区 7 种重金属平均含量均高于浙江省土壤背景值,存在一定程度的重金属累积;各重金属元素含量超过背景值的程度由大到小为: Co>Cr>Cu>Ni>Zn>As>Pb,其中元素 Co、Cr 和 Ni 超标程度明显高于其它元素,Co 污染范围最广。

(2)单因子指数评价结果表明,重金属元素的污染程度大小为: Co>Ni>Cr>Zn>As>Cu>Pb,开始受到重金属 Co 的污染,其它重金属元素均处于安全等级;内梅罗综合污染指数评价结果表明,研究区综合污染程度已达到警戒线等级。城区内部、城区入江口及城郊入江口的重金属综合污染程度随工业活动的强弱呈明显的梯度变化。

表 6 沉积物重金属单项生态风险因子和综合生态风险指数

Tab. 6 Single potential ecological risk coefficient and potential ecological risk index of heavy metal in sediments

元素	单项生态风险因子(E_r)			综合生态风险指数(RI)		
	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
Cr	5.27	9.68	6.25	72.05	107.80	84.85
Co	21.79	26.93	24.73			
Ni	9.83	27.17	13.75			
Cu	8.84	26.29	14.27			
Zn	1.94	5.71	2.47			
As	11.28	21.22	15.95			
Pb	5.64	9.08	7.42			

(3)沉积物中重金属来源可分为3类: Cu、Zn、Pb 和 Cr 主要受到工业污水排放及船舶交通等人类活动的影响, Co 和 As 主要受到工业及农业生产活动的影响, Ni 主要来源于工业污水排放。

(4)潜在生态风险评价结果显示, 研究区整体处于较强生态风险水平。重金属元素 Co 处于较强生态风险等级, 应列为优先控制污染元素; As、Cu 和 Ni 处于中等生态风险等级, 其余元素均处于轻微生态风险等级。城区内部河流有较强的生态风险水平, 应该引起警惕。

参考文献

- [1] 贾英, 方明, 吴友军, 等. 上海河流沉积物重金属的污染特征与潜在生态风险[J]. 中国环境科学, 2013, 33(1): 147–153.
- [2] 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.
- [3] SRINIVASA R M, SHAIK B, SRAVAN K, et al. Distribution, enrichment and accumulation of heavy metals in coastal sediments of Alang-Sosiya ship scrapping yard, India[J]. Marine Pollution Bulletin, 2004, 48(11–12): 1055–1059.
- [4] 裴廷权, 王里奥, 包亮, 等. 三峡库区小江流域土壤重金属的分布特征与评价分析[J]. 土壤通报, 2010, 41(1): 206–211.
- [5] 唐文忠, 王立硕, 单保庆, 等. 大清水系河流表层沉积物重金属污染特征[J]. 环境科学学报, 2015, 35(11): 3620–3627.
- [6] 胡宁静, 刘季花, 黄朋, 等. 渤海莱州湾表层沉积物中金属元素分布及环境质量[J]. 海洋学报, 2012, 34(2): 92–100.
- [7] 方明, 吴友军, 刘红, 等. 长江口沉积物重金属的分布、来源及潜在生态风险评价[J]. 环境科学学报, 2013, 33(2): 563–569.
- [8] 郇钧璋, 张树刚, 邱进坤, 等. 瓯江口海域表层沉积物重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 海洋湖沼通报, 2011, (4): 158–163.
- [9] 刘文新, 栾兆坤, 汤鸿霄. 乐安江沉积物中金属污染的潜在生态风险评价[J]. 生态学报, 1999, 19(2): 206–211.
- [10] 柴小平, 胡宝兰, 魏娜, 等. 杭州湾及邻近海域表层沉积物重金属的分布、来源及评价[J]. 环境科学学报, 2015, 35(12): 3906–3916.
- [11] 宋力, 顾敦罡, 黄民生, 等. 温州河网沉积物中重金属分布特征与污染评价[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(9): 2540–2545.
- [12] 顾君, 郑祥民, 周立旻, 等. 温瑞塘河温州市区典型河段底泥重金属污染特征[J]. 城市环境与城市生态, 2012, 25(1): 31–34.
- [13] 高悦, 郑祥民, 周立旻. 温州温瑞塘上游调水河段底泥重金属分布及污染评价[J]. 城市环境与城市生态, 2014, 27(4): 1–5.
- [14] 刘捷, 贾海勇. 温州市河道水环境污染状况与防治对策[J]. 浙江水利科技, 2007, 152(4): 73–74, 77.
- [15] 陆安祥, 王纪华, 潘立刚. 便携式 X 射线荧光光谱测定土壤中 Cr, Cu, Zn, Pb 和 As 的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(10): 2848–2852.
- [16] 齐鹏, 余树全, 张超, 等. 城市地表水表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评估: 以永康市为例[J]. 环境科学, 2015, 36(12): 4486–4493.
- [17] 郭伟, 孙文惠, 赵仁鑫, 等. 呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染特征及评价[J]. 环境科学, 2013, 34(4): 1561–1567.
- [18] 范允慧, 王艳青. 浙江省四大平原区土壤元素背景值特征[J]. 物探与化探, 2009, 33(2): 132–134.
- [19] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control: I A sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, 14: 975–1001.
- [20] 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.
- [21] 徐争启, 倪师军, 庾先国, 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, 31(2): 112–115.
- [22] 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.
- [23] 国家环境保护局. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [24] 王岚, 王亚平, 许春雪, 等. 长江水系表层沉积物重金属污染特征及生态风险性评价[J]. 环境科学, 2012, 33(8): 2599–2606.
- [25] 陈秀玲, 卓明清, 贾丽敏, 等. 闽江表层沉积物重金属污染分布特征及其来源分析[J]. 环境污染与防治, 2014, 36(5): 43–48.
- [26] 谢文平, 王少冰, 朱新平, 等. 珠江下游河段沉积物中重金属含量及污染评价[J]. 环境科学, 2012, 33(6):

- 1808–1815.
- [27] 朱兰保, 盛蒂, 戚晓明, 等. 蚌埠龙子湖底泥重金属污染及生态风险评估[J]. 安全与环境学报, 2013, 13(5): 107–111.
- [28] 巫和听, 胡雪峰, 张国莹, 等. 上海市宝山区土壤重金属含量及其分异特征[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2004, 10(4): 400–405.
- [29] 陈景辉, 卢新卫, 翟萌. 西安城市路边土壤重金属来源与潜在风险[J]. 应用生态学报, 2011, 22(7): 1810–1816.
- [30] 张彦, 卢学强, 刘红磊, 等. 渤海湾天津段表层沉积物重金属分布特征及其来源解析[J]. 环境科学研究, 2014, 27(6): 608–614.
- [31] FACCHINELLI A, SAECHI E, MALLEN L. Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils[J]. Environmental Pollution, 2001, 114(3): 313–324.
- [32] LV Jianshu, LIU Yang, ZHANG Zulu, et al. Identifying the origins and spatial distributions of heavy metals in soils of Ju country (Eastern China) using multivariate and geostatistical approach[J]. Journal of Soils and Sediments, 2015, 15 (1): 163–178.
- [33] 徐艳东, 魏潇, 夏斌, 等. 莱州湾东部海域表层沉积物重金属潜在生态风险评价[J]. 海洋科学进展, 2015, 33(4): 520–528.
- [34] 叶然, 江再昌, 郭清荣. 洋山深水港区海域秋、冬季沉积物中重金属来源分析及生态风险评价[J]. 海洋通报, 2015, 34(1): 76–82.
- [35] 唐阵武, 程家丽, 岳勇, 等. 武汉典型湖泊沉积物中重金属累积特征及其环境风险[J]. 湖泊科学, 2009, 21(1): 61–68.
- [36] 张倩, 陈宗娟, 彭昌盛, 等. 大港工业区土壤重金属污染及生态风险评价[J]. 环境科学, 2015, 36(11): 4232–4240.
- [37] 李玉, 刘付程, 吴建新. 连云港西大堤海域水环境污染特征分析[J]. 海洋科学, 2014, 38(11): 84–89.
- [38] 邵学新, 吴明, 蒋科毅. 土壤重金属污染来源及其解析研究进展[J]. 广东微量元素科学, 2007, 14(4): 1–6.

(上接第 175 页)

- [22] 国家林业局. 森林生态系统服务功能评估规范[M]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [23] 崔丽娟. 鄱阳湖湿地生态系统服务功能价值评估研究[J]. 生态学杂志, 2004, 23(4): 47–51.
- [24] 邵学新, 李文华, 吴明, 等. 杭州湾潮滩湿地 3 种优势植物碳氮磷储量特征研究[J]. 环境科学, 2013, 34(9): 3451–3457.
- [25] IPCC. 2007. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press.
- [26] 张文敏, 姜小三, 吴明, 等. 杭州湾南岸土壤有机碳空间异质性研究[J]. 土壤学报, 2014, 51(5): 1087–1095.
- [27] 庞丙亮. 扎龙湿地生态系统固碳服务价值评价[J]. 生态学杂志, 2014, 33(8): 2078–2083.
- [28] 任国玉, 郭军. 中国水面蒸发量的变化[J]. 自然资源学报, 2006, 21(1): 31–44.
- [29] 周葆华, 操璟璟, 朱超平, 等. 安庆沿江湖泊湿地生态系统服务功能价值评估[J]. 地理研究, 2011, 30(12): 2296–2304.
- [30] 王蒙, 吴明, 邵学新, 等. 杭州湾滨海湿地 CH₄ 排放通量的研究[J]. 土壤, 2014, 46(6): 1003–1009.
- [31] 郑伟, 石洪华, 徐宗军, 张绪良. 滨海湿地生态系统服务及其价值评估——以胶州湾为例[J]. 生态经济(学术版), 2012, (1): 179–182.
- [32] 龙娟, 宫兆宁, 赵文吉, 等. 北京市湿地珍稀鸟类特征与价值评估[J]. 资源科学, 2011, 33(7): 1278–1283.
- [33] 严承高, 张明祥, 王建春. 湿地生物多样性价值评价指标及方法研究[J]. 林业资源管理, 2000, 12(1): 41–46.
- [34] 谢高地, 鲁春霞, 成升魁. 全球生态系统服务功能研究进展[J]. 资源科学, 2001, 23(6): 8–11.
- [35] 王其翔. 黄海海洋生态系统服务评估[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
- [36] 江波, 欧阳志云, 苗鸿, 等. 海河流域湿地生态系统服务功能价值评价[J]. 生态学报, 2011, 31(8): 2236–2244.
- [37] 崔丽娟, 庞丙亮, 李伟. 扎龙湿地生态系统服务价值评价[J]. 生态学报, 2016, 36(3): 1–10.
- [38] 吉丽娜, 温艳萍. 崇明东滩湿地生态系统服务功能价值评估[J]. 中国农学通报, 2013, 29(5): 160–166.