

温州鳌江流域表层底泥及河岸土壤重金属空间分布 与生态风险评价

金文奖, 侯平, 张伟, 梁立成, 俞飞

(浙江农林大学 林业与生物技术学院, 浙江 杭州 311300)

摘要: 为揭示温州鳌江流域重金属污染情况, 分别采集该河流的表层底泥与河岸土壤, 合计 31 组, 共 62 个样品。样品经处理后使用光谱仪 X-MET 7000 测量重金属质量分数, 使用土壤背景值、差异性分析、相关性分析和潜在生态评价法分析其中的重金属铬、铜、锌、镍和铅质量分数空间分布及潜在生态风险。结果表明: ①从整体上看, 除铅外, 河岸土壤与表层底泥中的其他 4 种重金属质量分数均显著高于温州市土壤重金属背景值($P < 0.05$), 呈现富集现象; 底泥与土壤中铬、铜、锌和铅的质量分数差异不显著($P > 0.05$), 海口涌潮河水回流是主要原因, 而底泥中镍质量分数显著高于岸边土壤($P < 0.05$)。②相关性分析表明, 表层底泥与河岸土壤中铬、铜、锌之间均存在极显著正相关($P < 0.01$), 表层底泥中铜和镍存在显著相关($P < 0.05$), 污染主要来源于制革印染和电镀业; 铅和其他元素无显著性相关($P > 0.05$)。③元素质量分数空间分布分析表明, 在生活垃圾堆放、工业废水排放等人为干扰严重河段底泥和土壤的重金属富集程度较高; 流域的 5 种重金属的单因子潜在生态风险与流域整体的综合潜在生态危害分别低于 40 与 150, 均属轻微污染。应加强流域周边的产业管理。图 2 表 5 参 34

关键词: 生态学; 表层底泥; 河岸土壤; 重金属; 生态风险; 鳌江流域

中图分类号: S7-05; X502

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2017)06-0963-09

Spatial distributions and ecological risks of heavy metals in surface sediments and riparian soils of the Aojiang River Basin, Wenzhou

JIN Wenjiang, HOU Ping, ZHANG Wei, LIANG Licheng, YU Fei

(School of Forestry and Biotechnology, Zhejiang A & F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China)

Abstract: To reveal heavy metal pollution of the Aojiang River Basin in Wenzhou, surface sediment and riparian soil were acquired from the river totaling 62 samples in 31 groups. Heavy metal content of chromium (Cr), copper (Cu), zinc (Zn), nickel (Ni), and lead (Pb) were measured with a handheld X-ray fluorescence spectrometer (X-MET 7000). Soil background values, variance analysis, correlation analysis, and evaluation methods for potential ecological problems were used to analyze spatial distribution and potential ecological risks of heavy metals. Results showed that 1) in general, the contents of four metals other than Pb in the riparian soil and surface sediment were significantly higher than background values of heavy metals in the soil of the Wenzhou Region ($P < 0.05$) representing an enrichment phenomenon. Also, content of Cr, Cu, Zn, and Pb in the sediment and soil had no significant differences ($P > 0.05$), mainly because of the tidal water reflux at the seaport, but Ni content of sediment was significantly higher than riparian soil ($P < 0.05$). 2) The correlation analysis showed highly significant, positive correlations for Cr—Cu ($r_{\text{surface sediments}} = 0.666$, $r_{\text{riparian soils}} = 0.841$, $P < 0.01$), Cu—Zn ($r_{\text{surface sediments}} = 0.781$, $r_{\text{riparian soils}} = 0.688$, $P < 0.01$) and Cu—Zn ($r_{\text{surface sediments}} = 0.831$, $r_{\text{riparian soils}} = 0.800$, $P < 0.01$) between surface sediments and riparian soils and significant correlations ($r_{\text{surface sediments}} = 0.433$, $P < 0.05$)

收稿日期: 2016-10-31; 修回日期: 2017-01-12

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目(LQ17C160004)

作者简介: 金文奖, 从事生态环境监测研究。E-mail: 595974406@qq.com。通信作者: 侯平, 教授, 博士, 从事生态环境监测研究。E-mail: houpingg@263.net

between Cu and Ni in surface sediments. However, Pb was not significantly correlated to the other elements ($P > 0.05$). 3) The spatial distribution analysis of elemental contents showed a highly enrichment degree of heavy metals in the sediment and soil along the river reaches. In this river basin the potential single-factor ecological risks (E_i^i) of these five heavy metals was below 40 and the comprehensive potential ecological hazards (I_R) was below 150. There was slight pollution from tanning, printing, and electroplating industries as well as from severe human disturbances, such as domestic garbage dumping and industrial sewage drainage, so that industrial management and human disturbances around this river basin should be lessened. [Ch, 2 fig. 5 tab. 34 ref.]

Key words: ecology; surface sediment; riparian soil; heavy metal; ecological risk; Aojiang River Basin

河流的重金属含量是河流的重要参考指标, 与河流健康密切相关^[1-2]。自然情况下, 河流的重金属含量通常很低。工业排放的重金属会严重污染河流岸边土壤及河床表层底泥, 威胁河流环境健康^[3]。与其他的污染不同, 重金属作为一类非降解性有毒有害物质, 容易在水环境的沉积物中吸附和积累^[4]。同时, 排放到水环境中的重金属又很容易通过物质循环进入食物链, 最终进入人体造成严重危害^[5]。20世纪50年代日本发生的水俣病和骨痛病等公害病, 20世纪70年代中国陕西发现的华县癌症村, 均因重金属污染引起^[6-8]。早在20世纪70年代, 欧美等发达国家就开始对河流重金属污染开展研究, 如塞纳河^[9]、多瑙河^[10]、莱茵河^[11]等, 迄今为止几乎包括了所有重要河流。其中CASTILLO等^[12]对西班牙Andalucia地区水体及底泥中的重金属生物有效性进行了分析, 发现20世纪以来工业发展对该地区水体及底泥造成严重污染, 尤其是铜、镍、铅污染最为严重。近年来, 国内学者对河流、湖泊及水库的河岸土壤及表层底泥重金属污染展开大量研究^[13-17]。其中, 周立旻等^[18]对苏州河上海段底泥重金属污染特征进行了分析, 发现元素铜、铅、锌、铬等是主要产生生态危害的重金属元素, 底泥重金属富集程度与沿岸的工业化发展进程密切相关。在浙江沿海的温州鳌江流域, 工业生产和社会经济迅速发展, 河流水环境重金属污染不断加重, 给生态环境和人体健康带来了极大威胁^[19-20]。2015年浙江省制定《浙江省重金属污染综合防治方案》, 温州市平阳县被列为国家级重金属重点防控区, 但截至目前尚未有人对该区鳌江流域的重金属开展研究。本研究拟以鳌江北港段为对象, 研究河流表层底泥与河岸土壤中的重金属分布, 并对潜在生态风险进行评价, 以期在水环境治理和管理提供科学依据。

1 研究区域与方法

1.1 区域概况

鳌江流域是浙江省八大水系之一, 位于浙江省温州市境内, 是全国三大涌潮江之一, 干流全长82.47 km。研究区域为流经平阳县内的鳌江干流和闹村溪、带溪、凤卧溪等3条支流。制革印染是当地主要产业, 也是亚洲最大的加工地。制革大量使用含铬鞣剂和含高浓度三价铬盐^[21]; 皮革染色常用铜盐(酒石酸铜钠、硫酸铜、醋酸铜)和铬盐作为染色的固色剂^[22]。制革印染产生的废水约占全县废水总量的70%, 污染物排放总量约为 $84\ 500\ \text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[19]; 2015年温州市环境质量公报显示, 鳌江流域为中度污染, 已对该流域附近的居民生产生活用水产生极大影响^[23]。

1.2 样品采集与分析

底泥样本采集于2016年3月, 在干流和3条支流的拐弯处、堤坝、桥梁、河(溪)口等河道底泥淤积严重的断面设置采样点31个^[24], 共采集断面表层底泥和河岸土壤样品31组(图1)。用重力式柱状沉积物采样器采集水下0~20 cm处底泥, 样品采集后装入聚四氟乙烯自封袋中; 用ETC-300A手动土壤采样器采集河岸0.3~2.0 m处0~20 cm土壤, 样品采集后同样装入聚四氟乙烯自封袋中^[25]。记录取样点位置、编号和周围环境等信息(表1)。风干采集样品, 去除植物残体和石砾, 用玛瑙棒研压, 过100目尼龙筛后备用; 使用X-MET 7000射线荧光光谱仪(精度为 $1\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[26]测量铬、镍、铜、锌、铅的质量分数。采用国家标准物质《土壤成分分析标准物质——暗棕壤》(GSS-1)和《水系沉积物标准物质》(GSD-12)进行控制。测量结果表明: GSS-1和GSD-12标准样品中重金属元素实测值与参考值的相对标准偏差(R_{SD})均小于10%。

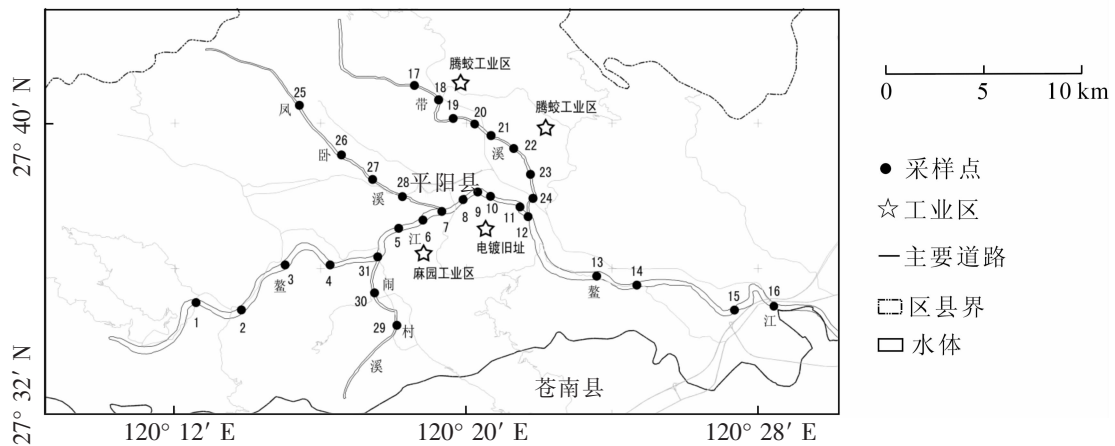


图 1 鳌江表层底泥及河岸土壤采样点

Figure 1 Sampling location of surface sediments and riparian soil in Aojiang River

表 1 采样点位置及周边环境

Table 1 Location of sampling sites and the surroundings

编号	河段	采样点	主要污染源	编号	河段	采样点	主要污染源
1	鳌江北港	顺溪镇	无明显污染源	17	带溪	湖窠村	无明显污染源
2		前山村	无明显污染源	18		腾龙路	河口淤积大量污泥，周围有生活垃圾倾倒
3		溪南山路	无明显污染源	19		铜牌厂	电镀，制革印染综合厂区的污水排放
4		雁荡山景区	无明显污染源	20		工业一区	制革印染综合厂区的污水排放
5		浦潭村水坝	生活垃圾堆放严重	21		工业二区	制革印染综合厂区的污水排放
6		龙涵村桥	制革印染综合厂区的污水排放，生活垃圾倾倒严重	22		腾蛟桥	制革印染综合厂区的污水排放
7		麻园桥	制革印染综合厂区的污水排放，生活垃圾倾倒严重	23		溪尾大桥	河口淤积大量污泥，周围有大量生活垃圾倾倒
8		麻园村	制革印染综合厂区的污水排放，生活垃圾倾倒严重	24		高桥村	河口淤积大量污泥，周围有大量生活垃圾倾倒
9		清溪村	制革印染综合厂区的污水排放，生活垃圾倾倒严重	25	凤卧溪	凤卧镇	无明显污染源
10		下小南村	废旧电镀厂附近，生活垃圾倾倒严重	26		凤安村	无明显污染源
11		青岙村	废旧电镀厂附近，生活垃圾倾倒严重	27		工业区	制革印染综合厂区的污水排放
12		显桥	河口淤积大量污泥	28		凤卧废弃桥	桥梁处淤积大量污泥
13		下堡村	河口淤积大量污泥	29	闹村溪	中村	无明显污染源
14		麻布桥	河口淤积大量污泥	30		闹村乡	无明显污染源
15		桃源大桥	河口淤积大量污泥	31		闹村溪口	车流量大
16		岱口大桥	河口淤积大量污泥				

1.3 数据分析与处理

用 SPSS 19.0 及 GraphPad Prism 5.0 进行数据分析，采样点分布图在 Arc GIS 10.2 软件中处理与输出。重金属质量分数与背景值的差异性分析采用单样本 *T* 检验法；不同介质的重金属质量分数差异性采用独立样本 *t* 检验法；数据正态分布检验采用 K-S 检验 ($P > 0.05$ ，样本呈正态分布)，对符合正态分布的数据进行相关分析和 Hakanson 潜在生态风险评价^[27]。具体公式如下：

$$I_R = \sum_{i=1}^n E_i^i = \sum_{i=1}^n T_i^i C_i^i = \sum_{i=1}^n T_i^i \frac{C_i^i}{C_n^i}$$

式中： C_i^i 为某污染因子； C^i 为表层沉积物中某重金属的实测值； C_n^i 为计算所需的参比值； T_i^i 为沉积物中某污染物的毒性响应系数，5种重金属铬、铜、锌、镍、铅的毒性响应系数分别为2, 5, 1, 5, 5^[20]。 E_i^i 为某单个污染物的潜在生态风险指数。对应的污染级别可分为： $E_i^i < 40$ 属于轻微生态危害； $40 \leq E_i^i < 80$ 属于中等生态危害； $80 \leq E_i^i < 160$ 属于强生态危害； $160 \leq E_i^i < 320$ 属于很强生态危害； $E_i^i \geq 320$ 属于极强生态危害。 I_R 为多种重金属综合潜在生态风险指数。对应的污染级别可分为 $I_R < 150$ 属于轻微生态风险； $150 \leq I_R < 300$ 属于中等生态风险； $300 \leq I_R < 600$ 属于强生态风险； $600 \leq I_R < 1200$ 属于很强生态风险； $I_R \geq 1200$ 属于极强生态风险。

2 结果与分析

2.1 表层底泥与河岸土壤重金属特征

如表2所示：表层底泥和河岸土壤中的铬、镍、铜、锌质量分数均显著高于温州市土壤重金属背景值^[28]，而铅基本持平。实地调查资料显示(表1)：河流表层底泥污染来自于河水污染沉淀，岸边土壤污染则是因为涌潮及河水回流抬升产生的“二次污染”^[29]，因此，表层底泥与河岸土壤中重金属质量分数差异极小。

表2 表层底泥和河岸土壤重金属累积量

Table 2 Concentration of heavy metals in surface sediments and riparian soil

介质	$w_{\text{重金属}}/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$				
	铬	镍	铜	锌	铅
表层底泥	233 ± 38 a*	32 ± 2 a*	36 ± 4 a*	159 ± 11 a*	43 ± 2 a
河岸土壤	274 ± 54 a*	26 ± 1 b*	33 ± 4 a*	157 ± 15 a*	41 ± 3 a
温州市土壤重金属背景值 ^[23]	52	22	20	111	41

说明：* 表示表层底泥或河岸土壤中的重金属质量分数显著高于温州市土壤重金属背景值。不同小写字母表示表层底泥与河岸土壤之间差异显著($P < 0.05$)，相同字母表示差异不显著($P > 0.05$)。

2.2 重金属元素的相关性分析

对鳌江北港段表层底泥5种重金属离子相关性分析表明(表3)，表层底泥铬—铜、铬—锌、铜—锌的相关系数均达到极显著水平($P < 0.01$)，铜—镍的相关系数达到显著水平($P < 0.05$)，铅与其他元素间为无明显关系或负相关。河岸土壤中铬—铜、铬—锌、铜—锌的相关系数也均达到极显著水平($P < 0.01$)，铅与其他各元素之间无明显相关性。底泥表层与岸边土壤中的重金属离子的相关性特征一致，表征两者的污染过程和强度基本一同。

富集程度较高的样点主要分布在鳌江北港段和带溪，有574.37万 $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$ 制革印染污水排放，占全县废水总量的52.63%^[19]。这与付传城等^[30]对南京市柘塘镇土壤重金属研究结果相同，重金属污染主要来自当地工业排放。表层底泥中铜和镍的相关性主要来自电镀企业^[31-32]。铅平均质量分数与背景值差异不显著，主要来源成土母质。

表3 表层底泥及河岸土壤重金属元素相关系数矩阵

Table 3 Correlation matrix of heavy metals in surface sediments and riparian soil

重金属	表层底泥					河岸土壤				
	铬	镍	铜	锌	铅	铬	镍	铜	锌	铅
铬	1					1				
镍	-0.016	1				0.129	1			
铜	0.666**	0.433*	1			0.841**	0.251	1		
锌	0.781**	0.104	0.831**	1		0.688**	0.340	0.800**	1	
铅	-0.122	-0.183	-0.102	0.020	1	0.132	-0.165	0.212	0.345	1

说明：**和* 分别表示 $P < 0.01$ 极显著和 $P < 0.05$ 显著。土壤样本数 $n=31$ ；沉积物样本数 $n=31$ 。

2.3 表层底泥和河岸土壤重金属质量分数空间分布与潜在生态风险评价

2.3.1 表层底泥和河岸土壤重金属质量分数空间分布 如图2所示：铬在整个流域范围内鳌江北港7~12号和带溪19~22, 24号采样点呈现高值区；镍只在鳌江北港9~16号的底泥呈现高值区；铜在鳌江北港5, 9~12号和带溪19~22, 24号采样点呈现高值区；锌在鳌江北港9~12号和带溪19~22, 24号采样点呈现高值区；铅除17号点外，其他样点质量分数变化不明显。总的来看，这5种重金属质量分数较大值主要出现在鳌江北港段的9~12, 16号和带溪的19~22, 24号采样点。此外，发现流域2种介质中铬、铜、锌变化趋势基本一致，鳌江北港段表层底泥的镍与铜变化趋势较为一致，2组变化趋势的一致性与上文的相关性分析结果对应。

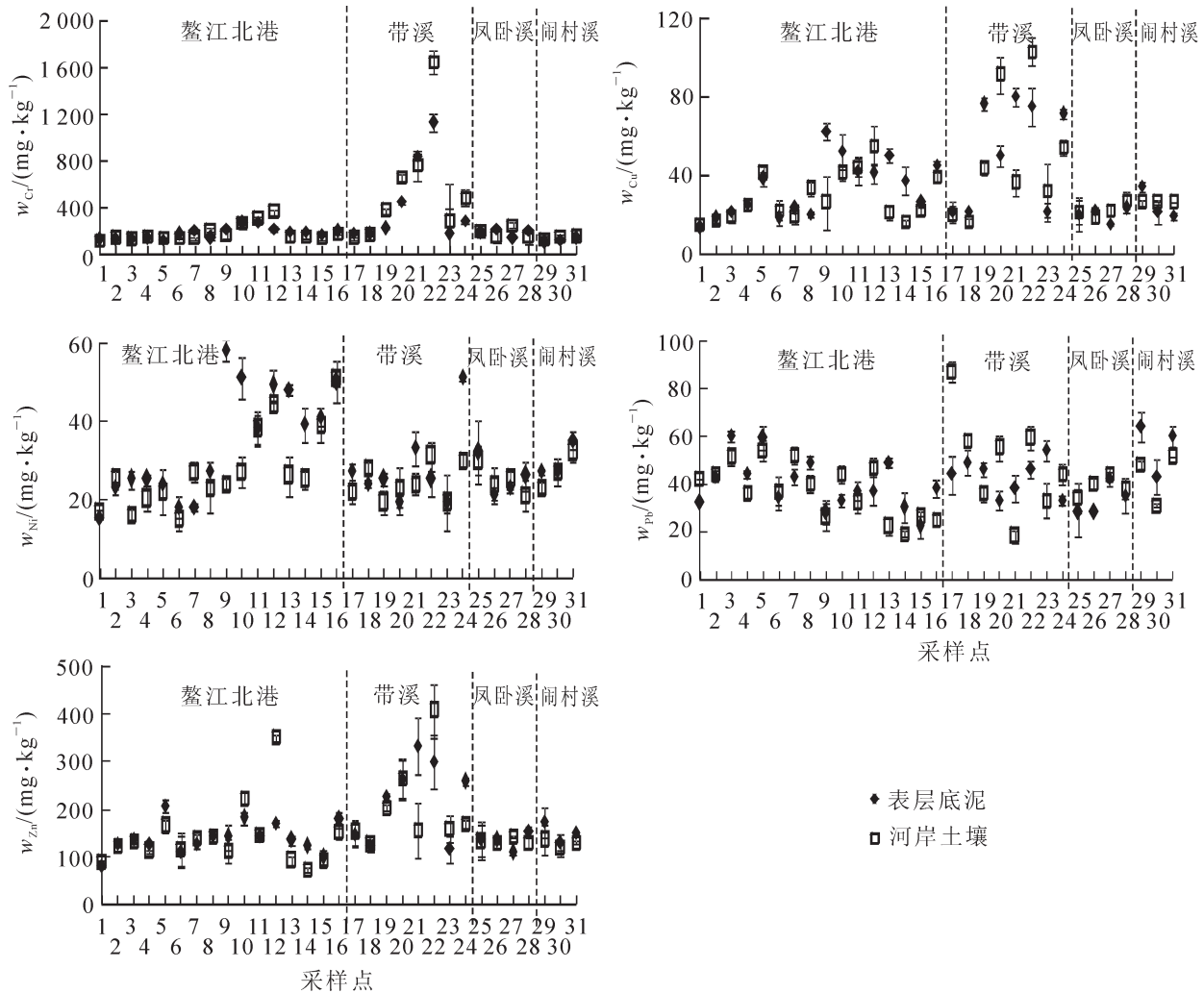


图2 表层底泥和河岸土壤重金属质量分数空间变化

Figure 2 Spatial variation of heavy metals concentration in surface sediments and riparian soil

部分采样点表层底泥和河岸土壤重金属富集程度较高，可能是生活垃圾堆放和工业排放等人为干扰因素造成的。尚小娟等^[33]研究表明：垃圾中重金属因自由降水的淋溶，溶解释放到河岸土壤和河底底泥中，会导致其中的铬、镍和铜富集。根据表1实际情况看，鳌江北港的5~12号采样点生活垃圾堆放是铬、镍和铜富集程度较高主要原因之一。FAHIM等^[34]研究表明：铬主要来源于制革印染工业区大量排放的废水。根据表1记录，鳌江北港的6~9号，带溪的20~22号采样点的周围是麻园工业区和腾蛟工业区，该工业区以制革印染业为主，解释了这些样点铬富集程度较高的原因。李萍等^[22]对制革印染工业流程的研究表明：铜和锌来源于制革、印染企业生产过程中使用的染料和助剂，镍并非来自企业生产环节，而是一些印染企业废水处理过程中使用废酸所致，有些废酸源于电镀、镀锌等企业，里面含有包括铜、锌和镍在内的多种重金属杂质。因此鳌江北港段的大部分采样点铜、锌和镍富集程度较高，主要是

制革印染业排放引起的。带溪 17 号采样点的河岸土壤铅质量分数较高, 可能原因是该地的地壳和岩石铅本底值较高, 采样周围未发现污染源。

2.3.2 表层底泥重金属潜在生态风险评价 采用 Hakanson 潜在生态风险评价法, 以温州市土壤背景值为参照值对鳌江流域表层底泥中重金属的潜在生态危害进行评估, 结果见表 4。从单一重金属来看, 鳌江流域表层底泥的重金属铬、镍、铜、锌和铅的各河段的生态风险指数(E_r^i)均小于 40, 属轻微污染; 从多种重金属综合情况来看, 各河段的表层底泥中多种重金属的综合潜在生态风险指数(I_R)均小于 150, 属轻微污染。总的来看, 表层底泥 5 种重金属潜在生态风险指数(E_r^i)从大到小依次为铬>铜>铅>镍>锌; 各河段底泥重金属综合潜在生态风险系数(I_R)从大到小依次为带溪>鳌江北>闹村溪>凤卧溪。

表 4 鳌江流域表层底泥潜在生态风险指数(E_r^i)和综合潜在生态风险指数(I_R)

Table 4 Potential ecological risk coefficient (E_r^i) and potential ecology risk index (I_R) of heavy metals in surface sediments from the the Aojiang river

河段	E_r^i					I_R
	铬	镍	铜	锌	铅	
鳌江北港段	6.21	7.51	7.34	1.65	5.77	28.47
带溪	15.19	5.83	11.48	2.63	6.29	41.42
凤卧溪	6.35	5.33	4.42	1.58	4.66	22.34
闹村溪	5.43	7.74	5.97	1.78	6.54	27.46
平均值	8.30	6.60	7.30	1.91	5.82	29.92

2.3.3 河岸土壤重金属潜在生态风险评价 采用 Hakanson 潜在生态风险评价法, 以温州市土壤背景值为参照值对鳌江流域河岸土壤中重金属的潜在生态风险进行评估, 结果见表 5。从单一重金属潜在生态风险指数(E_r^i)来看, 鳌江流域河岸土壤的重金属铬、镍、铜、锌和铅的各河段 E_r^i 也均小于 40, 属轻微污染; 从多种重金属综合潜在生态风险指数(I_R)来看, 各河段的河岸 I_R 均小于 150, 属轻微污染。总的来看, 河岸土壤中 5 种重金属潜在生态风险指数(E_r^i)从大到小依次为铬>铜>镍>铅>锌; 各河段底泥重金属综合潜在生态风险指数(I_R)从大到小依次为带溪>鳌江北港段>闹村溪>凤卧溪。

表 5 鳌江流域河岸土壤潜在生态风险指数(E_r^i)和综合潜在生态风险系数(I_R)

Table 5 Potential ecological risk coefficient (E_r^i) and potential ecology risk index (I_R) of heavy metals in riparian soil from the of the Aojiang river

河段	E_r^i					I_R
	铬	镍	铜	锌	铅	
鳌江北港段	6.34	5.74	6.29	1.76	5.23	25.36
带溪	19.97	5.13	10.92	2.44	6.83	45.29
凤卧溪	6.64	5.23	4.87	1.59	5.46	23.79
闹村溪	7.74	7.18	7.89	2.78	6.02	31.62
平均值	10.17	5.82	7.49	2.14	5.89	31.52

3 结论

统计特征分析表明: 除铅外, 其他重金属质量分数均显著高于温州市土壤背景值, 表层底泥中镍的质量分数显著高于河岸土壤。鳌江流域表层底泥与河岸土壤铬、铜和 锌质量分数表现极显著相关性, 主要受制革印染业影响, 涌潮河水回流抬升对岸边土壤产生二次污染; 表层底泥镍与铜具有较强的相关性, 主要受电镀业影响; 铅与其他元素均无显著相关性, 主要来自成土母质。流域铬、铜和锌重金属主要富集在鳌江北港段和带溪段, 镍的富集主要在鳌江北港段, 富集现象主要由于人为干扰; 流域整体表层底泥及河岸土壤 5 种重金属单一潜在生态风险指数(E_r^i)均小于 40, 属轻微污染; 2 处的 5 种重金属综合潜在生态风险指数(I_R)均小于 150, 也属轻度污染。其中铬的潜在生态风险最大, 带溪的重金属综合潜在生态风险指数(I_R)最大, 应当开展针对性清理。

4 参考文献

- [1] GAO Xuelu, ZHOU Fengxia, CHEN C T A. Pollution status of the Bohai Sea: an overview of the environmental quality assessment related trace metals [J]. *Environ Int*, 2014, **62**(4): 12 – 30.
- [2] 雷鸣, 曾敏, 胡立琼, 等. 不同含磷物质对重金属污染土壤-水稻系统中重金属迁移的影响[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(6): 1527 – 1533.
LEI Ming, ZENG Min, HU Liqiong, *et al.* Effects of different phosphorus-containing substances on heavy metals migration in soil-rice system [J]. *Acta Sci Circumst*, 2014, **34**(6): 1527 – 1533.
- [3] 简敏菲, 李玲玉, 徐鹏飞, 等. 鄱阳湖-乐安河湿地水土环境中重金属污染的时空分布特征[J]. 环境科学, 2014, **5**(5): 1759 – 1765.
JIAN Minfei, LI Lingyu, XU Pengfei, *et al.* Spatiotemporal varian characteristics of heavy metals pollution in the water, soil and sediments environment of the Lean River -Poyang Lake Wetland [J]. *Environ Sci*, 2014, **5**(5): 1759 – 1765.
- [4] MA Zongwei, CHEN Kai, YUAN Zengwei, *et al.* Ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of six major Chinese freshwater lakes [J]. *J Environ Qual*, 2013, **4**(2): 341 – 350.
- [5] 李海燕, 黄延, 王崇臣. 北京西城区雨水管道沉积物中重金属污染风险评价[J]. 环境污染与防治, 2013, **32**(3): 28 – 33.
LI Haiyan, HUANG Yan, WANG Chongchen. Assessment on the pollution risk of heavy metal in the storm sewer sediments in Xicheng District [J]. *Environ Poll Control*, 2013, **32**(3): 28 – 33.
- [6] 方企圣. 环境汞污染的危害——水俣病[J]. 江苏医药, 1979(7): 42 – 45.
FANG Qisheng. Hazards of environmental mercury pollution-minamata disease [J]. *Jiangsu Med J*, 1979(7): 42 – 45.
- [7] 少桦. 日本的骨痛病[J]. 地理译报, 1984(1): 64.
SHAO Hua. Japan's bone pain [J]. *Geogr Transl Rep*, 1984(1): 64.
- [8] 王绍芳, 林景星, 史世云, 等. 生态环境地质病: 陕西一癌症村实例分析[J]. 环境保护, 2001(5): 42 – 43, 46.
WANG Shaofang, LIN Jingxing, SHI Shiyun, *et al.* Geological disease caused by ecological environment: an example of cancer village in Shanxi Province [J]. *Environ Prot*, 2001(5): 42 – 43, 46.
- [9] MEYBECK M, LESTEL L, BONTE P, *et al.* Historical perspective of heavy metals contamination (Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn) in the Seine River basin (France) following a DPSIR approach (1950–2005) [J]. *Sci Total Environ*, 2007, **375**(1/3): 204 – 231.
- [10] WOITKE P, WELLMITZ J, HELM D, *et al.* Analysis and assessment of heavy metal pollution in suspended solids and sediments of the river Danube [J]. *Chemosphere*, 2013, **51**(8): 633 – 642.
- [11] MULLER G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River [J]. *Geol J*, 1969, **2**(3): 108 – 118.
- [12] CASTILLO M A, TRUJILLO I S, ALONSO E V, *et al.* Bioavailability of heavy metals in water and sediments from a typical Mediterranean Bay (Málaga Bay, Region of Andalucía, Southern Spain) [J]. *Mar Poll Bull*, 2013, **76**(1/2): 427 – 434.
- [13] 张智慧, 李宝, 梁仁君. 南四湖南阳湖区河口与湖心沉积物重金属形态对比研究[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(5): 1408 – 1416.
ZHANG Zhihui, LI Bao, LIANG Renjun. Comparison of sediment heavy metal fractions at estuary and center of Nanyang zone from Nansi Lake, China [J]. *Acta Sci Circumst*, 2015, **35**(5): 1408 – 1416.
- [14] 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.
LI Lianfang, ZENG Xibai, LI Guoxue, *et al.* Institute of environment and sustainable development for agriculture [J]. *Acta Sci Circumst*, 2007, **27**(2): 289 – 297.
- [15] 张芬, 杨长明, 潘睿捷. 青山水库表层沉积物重金属污染特征及生态风险评价[J]. 应用生态学报, 2013, **24**(9): 2625 – 2630.
ZHANG Fen, YANG Changming, PAN Ruijie. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of Qingshan Reservoir in Lin'an City, Zhejiang Province of East China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2013, **24**(9): 2625 – 2630.

- [16] 李如忠, 徐晶晶, 姜艳敏, 等. 铜陵市惠溪河滨岸带土壤重金属形态分布及风险评估[J]. 环境科学研究, 2013, **26**(1): 88 – 96.
LI Ruzhong, XU Jingjing, JIANG Yanmin, *et al.* Fraction distribution and ecological risk assessment of soil heavy metals in the riparian zone of Huixi stream in Tongling City [J]. *Res Environ Sci*, 2013, **26**(1): 88 – 96.
- [17] 何文鸣, 吴峰, 张昌盛, 等. 河岸带土壤重金属元素的污染及危害评价[J]. 生态学杂志, 2011, **30**(9): 1993 – 2001.
HE Wenming, WU Feng, ZHANG Changsheng, *et al.* Heavy metal pollution and its ecological risk assessment of riparian soils [J]. *Chin J Ecol*, 2011, **30**(9): 1993 – 2001.
- [18] 周立旻, 郑祥民, 殷效玲. 苏州河上海段底泥重金属的污染特征[J]. 城市环境与城市生态, 2008, **21**(2): 1 – 5.
ZHOU Limin, ZHENG Xiangmin, YAN Xiaoling. Heavy metal accumulation in sediments of Suzhouhe River in Shanghai [J]. *Urban Environ Urban Ecol*, 2008, **21**(2): 1 – 5.
- [19] 张爱军. 平阳县制革业的废水治理对策探讨[J]. 环境科学与技术, 2005, **28**(增刊 1): 94 – 96.
ZHANG Aijun. Discussion on countermeasures of waste water treatment in leather industry of Pingyang County [J]. *Environ Sci Technol*, 2005, **28**(suppl 1): 94 – 96.
- [20] 徐越, 司言武, 肖也佳, 等. 农村点源水污染成因及其治理研究: 以温州市平阳县鳌江为例[J]. 特区经济, 2014, **1**(4): 158 – 161.
XU Yue, SI Yanwu, XIAO Yejia, *et al.* Study on the cause and control of rural point source water pollution: a case study of Aojiang in Pingyang County, Wenzhou City [J]. *Spec Zone Econ*, 2014, **1**(4): 158 – 161.
- [21] 刘卫国, 张新申, 刘明华. 制革工业中铬污染及防治[J]. 皮革科学与工程, 2001, **11**(3): 1 – 6.
LIU Weiguo, ZHANG Xinshen, LIU Minghua. Chromium pollution and control in the leather-making industry [J]. *Leather Sci Eng*, 2001, **11**(3): 1 – 6.
- [22] 李萍, 范举红, 刘锐, 等. 制革印染工业园区污水厂重金属污染特性及去除效果研究[J]. 环境工程, 2012, **30**(增刊 1): 101 – 104.
LI Ping, FAN Juhong, LIU Rui, *et al.* A study on pollution characteristics and removal performance of heavy metals in a tannery and textile dyeing industrial park waste water treatment plant [J]. *Environ Eng*, 2012, **30**(suppl 1): 101 – 104.
- [23] 温州市环境监测站. 温州市 2015 年度环境质量公报[EB/OL]. 温州市政府[2016-06-02]. <http://www.wenzhou.gov.cn/>.
- [24] 张伟, 陈蜀蓉, 侯平. 浦阳江流域疏浚前后底泥重金属污染及其潜在生态风险评价[J]. 浙江农林大学学报, 2016, **33**(1): 33 – 41.
ZHANG Wei, CHEN Shurong, HOU Ping. Heavy metal contamination and potential ecological risk for sediments in the Puyang River Basin prior to and post dredging [J]. *J Zhejiang A & F Univ*, 2016, **33**(1): 33 – 41.
- [25] 张兆永, 吉力力·阿不都外力, 姜逢清. 博尔塔拉河河水、表层底泥及河岸土壤重金属的污染和潜在危害评价[J]. 环境科学, 2015, **36**(7): 2422 – 2429.
ZHANG Zhaoyong, Jilili Abudouwaili, JIANG Fengqing. Pollution and potential ecology risk evaluation of heavy metals in river water, top sediments on bed and soils along banks of Bortala River, Northwest China [J]. *Environ Sci*, 2015, **36**(7): 2422 – 2429.
- [26] 王立前, 向峰. 便携式 X 荧光光谱仪的实测比对与应用[J]. 环境科学导刊, 2012, **31**(5): 97 – 101.
WANG Liqian, XIANG Feng. Comparison and application of portable X-Ray fluorescence spectrometer [J]. *Environ Sci Surv*, 2012, **31**(5): 97 – 101.
- [27] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach [J]. *Water Res*, 1980, **14**(8): 975 – 1001.
- [28] 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, 1991.
- [29] 张菊, 陈诗越, 邓焕广, 等. 山东省部分水岸带土壤重金属含量及污染评价[J]. 生态学报, 2012, **32**(10): 3144 – 3153.
ZHANG Ju, CHEN Shiyue, DENG Huanguang, *et al.* Heavy metal concentrations and pollution assessment of riparian soils in Shandong Province [J]. *Acta Ecol Sin*, 2012, **32**(10): 3144 – 3153.

- [30] 付传城, 王文勇, 潘剑君, 等. 城乡结合带土壤重金属时空变异特征与源解析: 以南京市柘塘镇为例[J]. 土壤学报, 2014, **51**(5): 1066 – 1077.
FU Chuancheng, WANG Wenyong, PAN Jianjun, *et al.* Spatial-temporal variation and source apportionment of soil heavy metals in peri-urban: a case study of Zhetang Town, Nanjing [J]. *Acta Pedol Sin*, 2014, **51**(5): 1066 – 1077.
- [31] PANAYOTOVA T, DIMOVA-TODOROVA M, DOBREVSKY I. Purification and reuse of heavy metals containing wastewaters from electroplating plants [J]. *Desalination*, 2007, **206**(1): 135 – 140.
- [32] CHANG I, KIM B H. Effect of sulfate reduction activity on biological treatment of hexavalent Chromium [Cr(VI)] contaminated electroplating wastewater under sulfate-rich condition [J]. *Chemosphere*, 2007, **68**(2): 218 – 226.
- [33] 尚小娟, 赵树兰, 多立安. 施用垃圾堆肥土壤重金属在不同温度和酸雨条件下的淋溶特征[J]. 环境工程学报, 2012, **6**(3): 995 – 999.
SHANG Xiaojuan, ZHAO Shulan, DUO Li'an. Leaching characteristics of MSW compost heavy metals in soil under different temperatures and simulated acid rain [J]. *Tech Equip Environ Poll Control*, 2012, **6**(3): 995 – 999.
- [34] FAHIM N E, BARSOUM B N, EID A E, *et al.* Removal of Chromium (III) from tannery wastewater using activated carbon from sugar industrial waste [J]. *J Hazard Mater*, 2006, **136**(2): 303 – 309.