

太湖竺山湾湿地表层沉积物重金属的分布特征及其污染评价

黄玉洁¹ 张银龙^{1*} 李文朝² 方颖³ 杨均科¹ 孙雅辉¹

(1. 南京林业大学 森林资源与环境学院, 江苏 南京 210037; 2. 中国科学院 南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008; 3. 环境保护部 南京环境科学研究所, 江苏 南京 210042)

摘要:为研究太湖竺山湾湿地沉积物重金属的污染状况, 采样分析表层沉积物中 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 7 种重金属的含量, 并运用地累积指数法和潜在生态风险指数法对其污染程度和潜在生态危害进行评价, 结果表明: As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 的平均值分别为 123.32、2.61、160.24、176.78、183.09、30.12 和 269.61 mg/kg, 都明显高于各自的背景值; 地累积指数法评价结果显示, As、Cd 的污染程度比较严重, Zn 的污染基本上为中等程度, Cr、Pb 基本上为轻微污染, 研究区不同程度地受到 Cu 和 Ni 的污染; 潜在生态风险指数法评价显示, 研究区大约 80% 的区域处于强与很强的危害程度, 对潜在生态风险指数贡献最大的是 Cd, 其次是 As, 说明造成研究区重金属潜在危害的主要元素是 As 和 Cd。

关键词:表层沉积物; 重金属; 分布特征; 污染评价; 太湖竺山湾

中图分类号: X524 文献标志码: A 文章编号: 1000-2286(2011)03-0608-08

Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in the Surface Sediments in Zhushan Bay

HUANG Yu-jie¹, ZHANG Yin-long^{1*}, LI Wen-chao²,
FANG Ying³, YANG Jun-ke¹, SUN Ya-hui¹

(1. College of Forest Resources and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2. Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Nanjing 210042, China)

Abstract: For studying the pollution condition of heavy metals of the wetland sediments in Zhushan Bay of Taihu lake, the contents of As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn in the surface sediments were measured and the pollution degree and the potential ecological harm of heavy metals were analyzed and assessed by using the methods of Geo-accumulation index and potential ecological risk index. The results showed: The average contents of As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn were 123.32, 2.61, 160.24, 176.78, 183.09, 30.12 and 269.61 mg/kg respectively, which were all higher than their background values. The Geo-accumulation index method indicated that As and Cd reached the serious pollution level, Zn was at the moderate pollution level,

收稿日期: 2011-01-13 修回日期: 2011-02-28

基金项目: 林业公益性科研专项(200904001-3)、江苏省环保科研项目(2008013)和江苏省高校自然科学研究重大项目(09KJA180002)

作者简介: 黄玉洁(1982—), 女, 博士生, 主要从事湿地生态及环境评价研究, E-mail: yujie2004_h@yahoo.com.cn;

* 通讯作者: 张银龙, 教授, E-mail: yinlongzhang@yahoo.com.cn。

Cr and Pb reached the lower pollution level, Cu and Ni pollution had different pollution levels in the studied area. The ecological risk index method indicated that about 80% of the studied area reached severe and very severe harm degree and Cd was the main element of potential harm, the follower was As in the studied area.

Key words: surface sediments; heavy metal; distribution characteristics; pollution assessment; Zhushan Bay of Taihu Lake

湿地在物质循环、调节气候、降解污染物、净化水质方面具有其他生态系统不可替代的作用,被誉为“地球之肾”^[1-2],但随着现代工业的迅速发展,工业污水和农田废水大量进入湖泊,使湖泊湿地的污染形势日益严重^[3]。在多种污染物当中,重金属由于具有持久性,并通过生物富集和放大作用,能对生态系统构成直接和间接的威胁^[4],一直受国内外环境学家的广泛关注^[5-8]。沉积物是重金属重要蓄积场所,也是潜在的污染源^[9-10],经多种途径进入水体中的重金属最终被沉积在沉积物中,当环境条件改变时,重金属又可能重新释放出来产生潜在的生物毒性风险,对水生生态系统和人类健康构成潜在的威胁^[11]。因此,沉积物是水生态系统中重金属污染程度的“指示剂”,对生态环境的影响具有重要的现实意义。

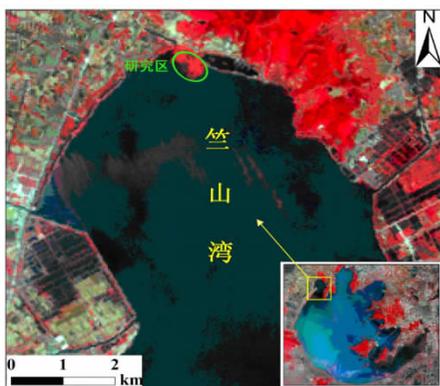
沉积物重金属的污染评价方法比较常用的主要包括对比度和阈值法、元素富集系数法、地质积累指数法和潜在生态风险指数法^[12]。本文以太湖竺山湾湿地表层沉积物为研究对象,运用地累积指数法和潜在生态风险指数法,并结合地统计学方法,研究沉积物中As、Cr、Cd、Cu、Ni、Pb、Zn 7种重金属的含量及分布情况,并对其污染状况进行评价,以期期为水污染控制和湿地环境保护与修复提供科学依据。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域

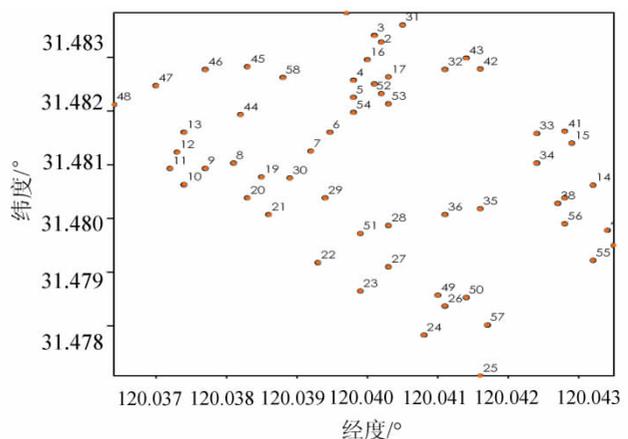
太湖为我国第三大淡水湖,位于长江下游地区(33°55′42″~31°33′50″N, 119°53′45″~120°36′15″E),全流域面积36 900 km²。太湖流域属亚热带季风气候区,四季分明,雨水丰沛,热量充裕,年平均气温15~17℃,自北向南递增,年平均降水量1 177 mm,自西南向东北逐渐递减^[13]。

研究区位于太湖竺山湾,竺山湾东临无锡马山,南濒太湖,西接宜兴分水,是太湖西北角上唯一的河港,其周边城区和乡镇工厂遍布(图1a),大量工业废水、生活污水排入其中,经监测上游河道武宜运河、太滂运河和漕桥河均属于劣V类水质^[14]。其携带的含重金属污染物在研究区大量沉积下来,成为影响水质的潜在污染源。



a. 研究区区位

a. The location of the studied area



b. 采样点分布

b. The map of sampling sites

图1 研究区区位及采样点分布

Fig. 1 The location of the studied area and the map of sampling sites

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集 根据研究区湿地面积大小、形状特征及水面分布等情况,于2009年7月,采用GPS定位,共设58个代表性采样点(图1b),用直径10 cm的PVC塑料管采集湿地表层10 cm的沉积物,放

入聚乙烯塑料袋中密封,运回实验室,用于测定重金属 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 的含量以及沉积物的粒度。

1.2.2 样品分析 重金属采用酸溶法($\text{HNO}_3 - \text{HClO}_4$)加热消解,使用美国 PE 公司的电感耦合等离子仪(Inductively Coupled Plasma)测定含量;粒度采用英国 Mastersizer2000 型激光粒度仪进行测定。

1.2.3 评价方法 (1)地累积指数法。地累积指数法是德国科学家 Muller 于 1979 年提出的,是利用重金属浓度与背景值的关系来确定的重金属污染程度的参数^[15]。其计算公式为:

$$I_{geo} = \log_2 C_n / (1.5 \times B_n) \quad (1)$$

(1) 式中的 C_n 是沉积物中重金属元素 n 的含量, B_n 为该元素 n 的地球化学背景值,通常地累积指数计算选用工业化前全球沉积物中重金属的平均背景值,由于太湖沉积物受周围下蜀黄土类的沉积物影响较大,因此本文采用下蜀黄土的重金属的本底值作为背景值^[16-17]。

(2)潜在生态风险指数法。潜在生态风险指数法是由瑞典科学家 Hakanson 提出的研究沉积物中重金属对环境影响评价的方法,它不仅能反映某一重金属对环境的影响,而且也能反映多种重金属的综合影响,并且可定量划分出潜在生态危害程度。其计算公式如下:

$$C_r^i = C_D^i / C_R^i \quad (2)$$

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

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

(2)~(4) 式中 E_r^i 为单一金属潜在生态风险因子, RI 为重金属综合潜在生态风险指数, C_D^i 代表测定值, C_R^i 代表背景值, T_r^i 是生物毒性系数。本文设定的 Cu、Zn、Ni、Pb、Cd、Cr、As 生物毒性系数分别为: 5、1.5、5、30、2、10^[18]。

(3)地统计学方法。地统计学是法国地质学家 Matheron 于 1962 年创立,它最早发展应用于地质学领域,是研究在空间分布上既有随机性又有结构性,或空间相关性和依赖性的自然现象的科学^[19-20]。本文运用地统计分析模块中 Kriging 法进行空间内插,得到各重金属元素地累积指数和综合潜在生态风险指数插值图。

2 结果与分析

2.1 表层沉积物中重金属的含量分析

研究区表层沉积物中 7 种重金属的含量变化范围为(表 1): As 3.94~246.43 mg/kg, Cd 0.88~4.76 mg/kg, Cr 49.43~376.67 mg/kg, Cu 62.71~507.98 mg/kg, Ni 38.87~532.72 mg/kg, Pb 3.74~83.29 mg/kg, Zn 95.33~470.85 mg/kg, 其最大值分别是最小值的 62.54、5.41、7.62、8.07、13.71、22.27 和 4.94 倍,可见各重金属含量变幅较大,说明重金属富集程度在不同地点存在显著差异。As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 的平均值分别为: 123.32 mg/kg、2.61 mg/kg、160.24 mg/kg、176.78 mg/kg、183.09 mg/kg、30.12 mg/kg 和 269.61 mg/kg,都明显高于各自的背景值,根据超出背景值的倍数,得出重金属含量顺序为:

表 1 表层沉积物中重金属含量统计

	Tab.1 The content of the heavy metals in surface sediments						mg/kg
	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
最小值 Min	3.94	0.88	49.43	62.71	38.87	3.74	95.33
最大值 Max	246.43	4.76	376.67	507.98	532.72	83.29	470.85
平均值 Mean	123.32	2.61	160.24	176.78	183.09	30.12	269.61
中值 Median	124.92	2.75	153.90	135.15	113.66	31.57	264.67
标准差 SE.	53.95	0.96	56.44	110.47	144.24	14.09	79.30
变异系数/% CV	43.75	36.72	35.22	62.49	78.78	46.78	29.41
背景值 Background value	9.4	0.27	79.3	18.9	15.7	19.5	59.2

As(13. 12) > Ni(11. 66) > Cd(9. 67) > Cu(9. 35) > Zn(4. 55) > Cr(2. 02) > Pb(1. 54) ,可见研究区受到不同程度的重金属污染。中值和平均值接近 ,说明重金属分布比较均匀 ,未受到特异值影响。按照变异系数的划分等级:弱变异性 , $CV < 10\%$;中等变异性 , $CV = 10\% \sim 100\%$;强变异性 , $CV > 100\%$ [21];各重金属均表现为中等程度的变异性。

2.2 表层沉积物中重金属污染评价

2.2.1 地累积指数法评价 地累积指数能定量反映沉积物中各重金属的富集程度 ,根据 I_{geo} 值将重金属污染程度划分为 7 个等级 [21] ,其优点是能给出很直观的重金属污染级别(表 2)。

表 2 重金属污染级别与 I_{geo} 的相互关系

Tab.2 Relationship between pollution level of heavy metal and I_{geo}

I_{geo}	<0	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	>5
分级 Level	0	1	2	3	4	5	6
污染程度 Pollution degree	无	无-中	中	中-强	强	强-极强	极强

各采样点 As 的地累积指数最高值位于 7 号采样点(4. 13) ,最低值位于 10 号采样点(-1. 84) ,平均值为 2. 86。采样点中 $I_{geo} < 0$ 的有 2 个 ,占全部采样点的 3. 4% ,处于无污染的程度; $0 < I_{geo} < 1$ 的有 1 个 ,占全部采样点的 1. 7% ,处于无-中的污染程度; $1 < I_{geo} < 2$ 的有 5 个 ,占全部采样点的 8. 6% ,处于中污染程度; $2 < I_{geo} < 3$ 的有 14 个 ,占全部采样点的 24. 1% ,处于中-强污染程度; $3 < I_{geo} < 4$ 的有 34 个 ,占全部采样点的 58. 6% ,处于强污染程度; $4 < I_{geo} < 5$ 的有 2 个 ,占全部采样点的 3. 4% ,处于强-极强污染程度。从 As 的地累积指数空间等值线分布图可以看出(图 2) ,研究区表层沉积物中 As 分布是中间高、周边低 ,并形成了 2 个明显的岛状高值区 ,以 4、5、6、7、30 号采样点和 23、24、27 号采样点周边区域最高 ,低值区出现在西部 ,分布在 10、11、12 号采样点周边区域。不管从单个采样点分析还是从等值线分布图来分析 ,As 的整体污染程度还是比较严重的。

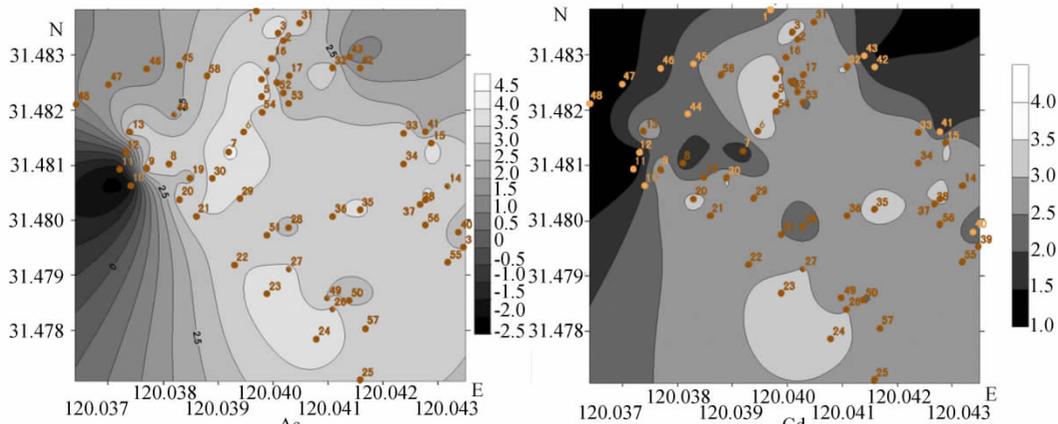


图 2 As、Cd 的 I_{geo} 空间等值线分布

Fig.2 Spacial contour map of I_{geo} of As and Cd

各采样点 Cd 的地累积指数最高值位于 5 号采样点(3. 56) ,最低值位于 11 号采样点(1. 13) ,平均值为 2. 57。采样点中 $1 < I_{geo} < 2$ 的有 12 个 ,占全部采样点的 20. 9% ,处于中污染程度; $2 < I_{geo} < 3$ 的有 31 个 ,占全部采样点的 53. 4% ,处于中-强污染程度; $3 < I_{geo} < 4$ 的有 15 个 ,占全部采样点的 25. 9% ,处于强污染程度。从 Cd 的地累积指数空间等值线分布图可以看出(图 2) ,主要以 4、5、6 号和 23、24 号采样点周围区域最高 ,低值区分布在西北部和东北部。从整体来看 ,研究区表层沉积物中 Cd 基本处于中高污染程度。

各采样点 Cr 的地累积指数最高值位于 52 号采样点(1. 66) ,最低值位于 48 号采样点(-1. 27) ,平均值为 0. 34。采样点中 $I_{geo} < 0$ 的有 11 个 ,占全部采样点的 19% ,处于无污染程度; $0 < I_{geo} < 1$ 的有 42 个 ,占全部采样点的 72. 4% ,处于无-中的污染程度; $1 < I_{geo} < 2$ 的有 5 个 ,占全部采样点的 8. 6% ,处于中污染程度。从 Cr 的地累积指数空间等值线分布图可以看出(图 3) ,Cr 分布情况是东部高、西部低 ,以 7、8、9、45、58 号采样点和 2、5、14、15、24、27、32、33、34、37、38、39、40、41、52、53、54、56 号采样点周边区

域相对较高。从整体来看,研究区表层沉积物中 Cr 基本处于轻微污染程度。

各采样点 Cu 的地累积指数最高值位于 57 号采样点(4.16),最低值位于 13 号采样点(1.15),平均值为 2.41。采样点中 $1 < I_{geo} < 2$ 的有 18 个,占全部采样点的 31%,处于中等污染程度; $2 < I_{geo} < 3$ 的有 25 个,占全部采样点的 43.1%,处于中-强污染程度; $3 < I_{geo} < 4$ 的有 14 个,占全部采样点的 24.1%,处于强污染程度; $4 < I_{geo} < 5$ 的有 1 个,占全部的 1.7%,达到强-极强污染程度。从 Cu 的地累积指数空间等值线分布图可以看出(图 3),Cu 分布情况是东部、西北部高,西南部低,以 45、46 号采样点和 33、37、56、57 号采样点周边区域为最高。从整体来看,研究区表层沉积物都不同程度的受到 Cu 的污染。

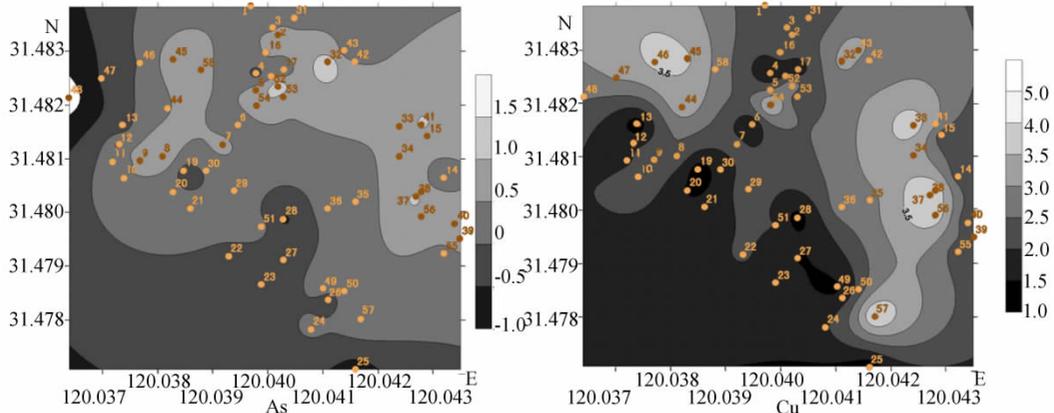


图 3 Cr、Cu 的 I_{geo} 空间等值线分布

Fig. 3 Spacial contour map of I_{geo} of Cr and Cu

各采样点 Ni 的地累积指数最高值位于 46 号采样点(4.50),最低值位于 19 号采样点(0.72),平均值为 2.51。采样点中 $0 < I_{geo} < 1$ 的有 3 个,占全部采样点的 5.2%,处于无-中的污染程度; $1 < I_{geo} < 2$ 的有 22 个,占全部采样点的 37.9%,处于中污染程度; $2 < I_{geo} < 3$ 的有 11 个,占全部采样点的 19.0%,处于中-强污染程度; $3 < I_{geo} < 4$ 的有 14 个,占全部采样点的 24.1%,处于强污染程度; $4 < I_{geo} < 5$ 的有 8 个,占全部采样点的 13.8%,处于强-极强污染程度。从 Ni 的地累积指数空间等值线分布图可以看出(图 4),Ni 分布情况是东部、西北部高,西南部低,以 45、46 号采样点和 34、35、37、38 号采样点周边区域为最高。从整体来看,研究区表层沉积物都不同程度的受到 Ni 的污染。

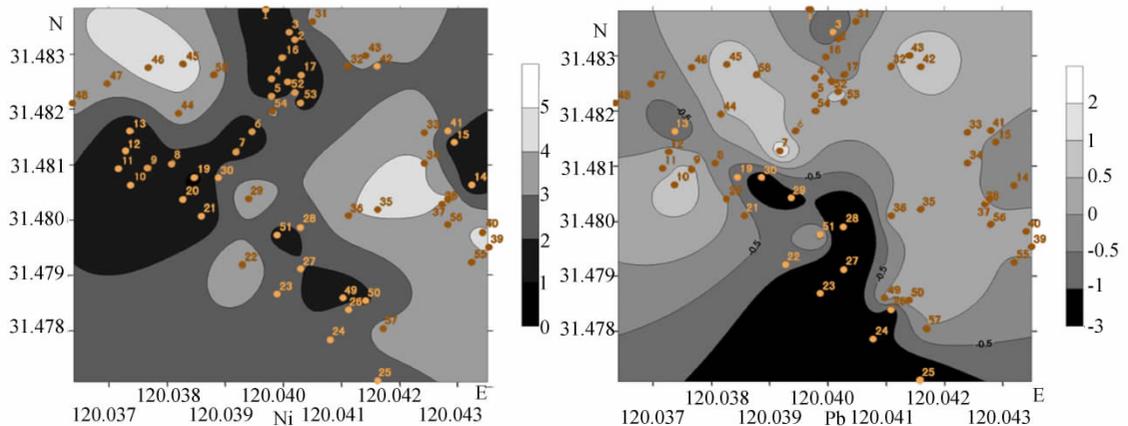


图 4 Ni、Pb 的 I_{geo} 空间等值线分布

Fig. 4 Spacial contour map of I_{geo} of Ni and Pb

各采样点 Pb 的地累积指数最高值位于 7 号采样点(1.51),最低值位于 28 号采样点(-2.97),平均值为 -0.15。采样点中 $I_{geo} < 0$ 的有 28 个,占全部采样点的 48.3%,处于无污染程度; $0 < I_{geo} < 1$ 的有 49 个,占全部采样点的 50%,处于无-中污染程度; $1 < I_{geo} < 2$ 的有 1 个,占全部采样点的 1.72%,处于中污染程度。从 Pb 的地累积指数空间等值线分布图可以看出(图 4),Pb 分布情况是南部高、北部低,以 29、30 号采样点和 23、24、25、27、28 号采样点周边区域为最低。从整体来看,研究区表层沉积物基本不受 Pb 的污染。

各采样点 Zn 的地累积指数最高值位于 7 号采样点 (2.41), 最低值位于 48 号采样点 (0.10), 平均值为 1.54。采样点中 $0 < I_{geo} < 1$ 的有 6 个, 占全部采样点的 10.3%, 处于无-中的污染程度; $1 < I_{geo} < 2$ 的有 45 个, 占全部采样点的 77.6%, 处于中污染程度; $2 < I_{geo} < 3$ 的有 7 个, 占全部采样点的 12.1%, 处于中-强污染程度; 从 Zn 的地累积指数空间等值线分布图可以看出(图 5), Zn 分布情况基本是北高南低, 在分布区东南部形成一个相对高值区。从整体来看, 研究区表层沉积物中 Zn 基本上为中等污染程度。

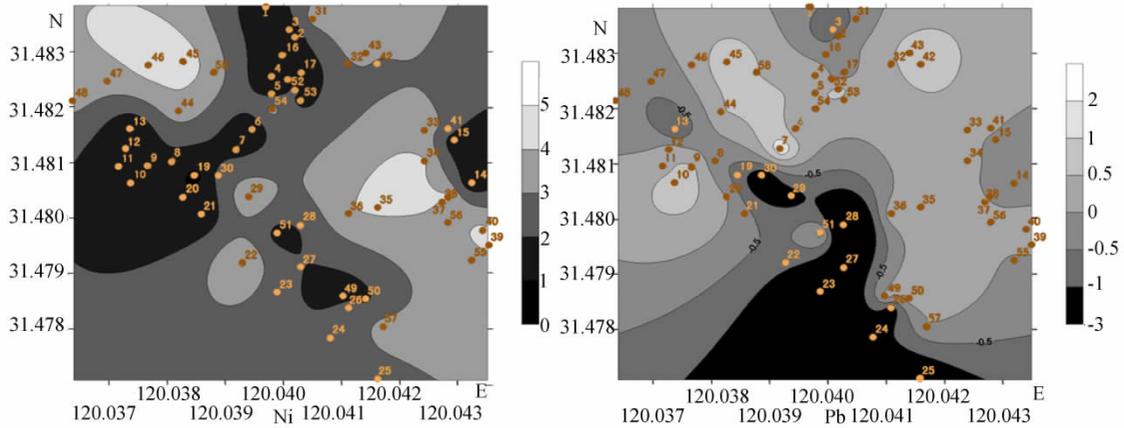


图 5 Zn 的 I_{geo} 和 RI 空间等值线分布

Fig. 5 Spatial contour map of I_{geo} of Zn and RI

2.2.2 潜在生态风险指数评价 地累积指数法常用来反映沉积物中某单一重金属污染富集程度, 但其未引入重金属相对贡献比例, 而潜在生态风险指数法则引入了生物毒性系数, 能综合反映重金属对生态环境的影响。RI 值的分级标准为: $RI < 150$ 、 $150 \sim 300$ 、 $300 \sim 600$ 、 ≥ 600 , 所对应的危害程度分别是轻微、中等、强、很强^[22]。从各采样点的 RI 值来看, 以 5 号采样点最高, RI 值为 864.71, 达到很强危害程度, 最低值位于 11 号采样点, RI 值为 166, 也达到中等危害程度, 所有采样点的 RI 平均值为 542.80, 处于强危害程度。采样点中处于中等危害程度的有 5 个, 占全部采样点的 8.6%; 处于强危害程度的有 27 个, 占全部采样点的 46.6%; 处于很强危害程度的有 26 个, 占全部采样点的 44.8%。从 RI 值的空间等值线分布图来看(图 5), 高值区主要集中在 3 个比较明显的岛状区域, 其 RI 值都处于 $600 \sim 900$, 处于很强危害程度, 研究区大约 80% 的区域 RI 值都大于 300, 处于强与很强的危害程度。因此, 研究区沉积物中重金属的污染状况必须引起环境监测和 environmental 治理部门的高度关注。具体到单个重金属来看, 对 RI 值贡献最大的元素是 Cd, 其次是 As, 两者与其他重金属相比, 不仅富集程度总体相对较高, 且生物毒性系数也明显大于其他元素。

通过运用地累积指数法和潜在生态风险指数法, 分别对 7 种重金属的污染程度和研究区潜在生态风险作了分析, 可以看出, 地累积指数法侧重单一重金属, 未引入生物有效性和相对贡献比例, 为了使区域环境质量评价更具代表性和可比性, 潜在生态风险指数法则从重金属的生物毒性角度出发, 引入生物毒性系数进行评价, 生物毒性系数反映了毒性水平和生物重金属污染的敏感程度, 提示了重金属对人体和水生态系统的危害, 如 Zn 在研究区基本为中等程度的污染状况, 但其生物毒性系数在 7 种重金属中最小, 仅为 1, 致使其对综合潜在生态风险影响较小, 当然, 生物毒性系数也带有一点的主观性, 因此需要 2 种方法的互相补充和借鉴。

2.3 表层沉积物中重金属之间及其与粒度的相关性分析

沉积物的粒度是控制重金属分布特征的一个重要参数^[23], 粒度能反映沉积物矿物组成、表面物理化学性质、比表面积和表面自由能的差异^[24], 粒度越小, 其表面自由能越大, 吸附的重金属的能力往往就越强。从相关性表中可以看出(表 3), As、Cd、Cr 与粘粒在 0.05 水平上显著正相关, 相关系数分别为 0.264、0.219、0.227, As、Cd 与粉粒在 0.05 水平上显著正相关, 相关系数分别为 0.276 和 0.221, As、Cd 与砂粒在 0.05 水平上显著负相关, 相关系数分别为 -0.285 和 -0.229, 这都表明 As、Cd、Cr 随粒度的减小呈现增加的趋势, 其与戴塔根和 Ramesh 等人的研究具有一定的一致性, 戴塔根研究证实 Cd、As 含量会随着沉积物粒度增加而减少, Cr 在 $1.1 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 粒径范围内有一峰值, 但仍表现为含量在细颗粒

中高、在粗颗粒中低的特点^[25] ,Ramesh 等亦提出微粒粒级和沉积物中高粘土矿质含量可能是重金属在沉积物中积累的主要因素^[26]。Ni 与粘粒在 0.05 水平上显著负相关 相关系数为 -0.239 与粉粒、砂粒在 0.01 水平上显著相关 相关系数为 -0.408 和 0.400 这表明 Ni 含量随着沉积物粒度的增大而增加 ,刘俐等也发现渤海湾沉积物中重金属含量总体上与粒径成反比的情况^[10]。Cu、Pb、Zn 与粘粒、粉粒、砂粒都不存在显著相关性。通过以上分析说明 重金属元素 As、Cd、Cr 可能具有相似的输入源或受沉积作用影响而呈现较为相似的分布特征。

就重金属之间的相关性分析来看 ,As 与 Cd 在 0.01 水平上显著正相关 相关系数为 0.784 ,但与其它重金属不存在显著的相关关系; Cr、Cu、Pb 和 Zn 彼此之间显著正相关; Ni 与 Cu 显著正相关 相关性系数分别为 0.604。说明竺山湾表层沉积物中 Cr、Cu、Pb 和 Zn 可能具有相似的来源。

表 3 重金属之间及其与粒度的相关性

Tab.3 The relevance of the different heavy metals and grain size

	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	粘粒 Clay	粉粒 Silt	砂粒 Sand
As	1									
Cd	0.784**	1								
Cr	-0.029	0.012	1							
Cu	-0.132	-0.064	0.468**	1						
Ni	-0.145	-0.103	0.105	0.604**	1					
Pb	-0.206	-0.293*	0.524*	0.335**	0.163	1				
Zn	0.130	0.093	0.759**	0.357**	0.064	0.607**	1			
粘粒 Clay	0.264*	0.219*	0.227*	0.019	-0.239*	0.073	0.197	1		
粉粒 Silt	0.276*	0.221*	0.173	-0.157	-0.408**	0.033	0.173	0.700**	1	
砂粒 Sand	-0.285*	-0.229*	-0.187	0.138	0.400**	-0.040	-0.183	-0.768**	-0.995**	1

** 表示在 0.01 水平上显著相关; * 表示在 0.05 水平上显著相关; n = 58。

** significant correlation in 0.01 level; * significant correlation in 0.05 level; n = 58.

3 结 论

(1) 根据 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的平均值与下蜀黄土的重金属的本底值比较 得出各重金属含量的倍数顺序为 As (13.12) > Ni (11.66) > Cd(9.67) > Cu (9.35) > Zn (4.55) > Cr(2.02) > Pb (1.54) ,可见都明显高于各自的背景值。

(2) 运用地质累积指数法对重金属进行评价来看 ,7 种重金属污染状况从整体大致可以分为四类: As、Cd 污染程度比较严重; Zn 为中等污染程度; Cr、Pb 处于轻微污染程度; Cu、Ni 的污染状况存在一定的差异性 在研究区都不同程度受其污染。

(3) 运用潜在生态风险指数法对重金属进行综合评价来看 ,研究区大约 80% 区域的 RI 值都大于 300 ,处于强与很强的危害程度 ,对 RI 值贡献最大的元素是 Cd ,其次是 As ,这与重金属含量和背景值的倍数大小关系比较中得出的结论基本一致。

(4) As、Cd、Cr 含量随着沉积物粒度的减小呈现增加的趋势; Ni 随沉积物粒度的增大而增加; Cu、Pb、Zn 与粘粒、粉粒、砂粒则都不存在显著相关性; 这主要是因为不同重金属元素分布特征受物质来源、输运和沉积作用等多种因素的影响。

参考文献:

[1] 万晓红, 周怀东, 刘玲花, 等. 白洋淀湖泊湿地中氮素分布的初步研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(2): 166-169.
 [2] Van Hees P A W, Jones D L, Nyberg L, et al. Modelling low molecular weight organic acid dynamics in forest soils[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2005, 37(3): 517-531.
 [3] 中国标准出版社编委会. 中国环境保护标准汇编(水质分析方法) [M]. 北京: 中国标准出版社, 2001: 192-195.
 [4] 杨卓, 李贵宝, 王殿武, 等. 白洋淀底泥重金属的污染及其潜在生态风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(5):

- 945-951.
- [5]汪浩,马武生. Fuzzy 综合评价模型在京杭大运河扬州段水质评价中的应用[J]. 淮海工学院学报:自然科学版, 2008, 17(4):57-60.
- [6]兰文辉. 灰色聚类法在大气环境评价中的应用及与其它方法的比较[J]. 干旱环境监测, 1995, 9(3):147-150.
- [7]孟春红,赵冰. 三峡水库蓄水后的富营养化趋势分析[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(3):863-867.
- [8]金相灿,刘鸿亮,屠清瑛,等. 中国湖泊富营养化[M]. 北京:中国环境科学出版社, 1990:151-170.
- [9]Milendovic N, Damijanovic M, Ristic M. Study of heavy metal pollution in sediments from iron gate (Danube River) , serbia and montenegro [J]. Polish Journal of Environmental Studies ,2005 ,14(6) : 781-787.
- [10]刘俐,宋存义,熊代群,等. 渤海湾表层沉积物重金属在不同粒级有机-矿质复合体中的分布[J]. 环境科学研究, 2006, 19(1):75-79.
- [11]Adams W J, Kimerle R A, Barnett J J W. Sediment quality and aquatic life assessment. Environmental Science & Technology, 1992, 26(10):1864-1875.
- [12]丁喜桂,叶思源,高宗军. 近海沉积物重金属污染评价方法[J]. 海洋地质动态, 2005, 21(8):31-36.
- [13]顾征帆,吴蔚. 太湖底泥中重金属污染现状调查及评价[J]. 甘肃科技, 2005, 21(12):21-23.
- [14]孙卫红,张利民,刘伟京,等. 漕桥河区域水环境质量现状分析[J]. 环境科学与管理, 2009, 34(1):48-51.
- [15]魏荣菲,庄舜尧,杨浩,等. 苏州河网区河道沉积物重金属的污染特征[J]. 湖泊科学, 2010, 22(4):527-537.
- [16]中国科学院南京土壤研究所. 环境中若干元素的自然背景值及其研究方法[M]. 北京:科学出版社, 1982:95-132.
- [17]孙顺才,黄漪平. 太湖[M]. 北京:海洋出版社, 1993:231-235.
- [18]Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, 14(8):975-1001.
- [19]王建,白世彪,陈晔. Surfer 8 地理信息制图[M]. 北京:中国地图出版社, 2004:223-229.
- [20]侯景儒. 中国地质统计学(空间信息统计学)发展的回顾与前景[J]. 地质与勘探, 1997, 33(1):53-58.
- [21]李海东,张波,沈渭寿. 苏南山丘区小流域土壤养分特性空间分布[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(9):831-835.
- [22]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.
- [23]宋宪强,雷恒毅,余光伟,等. 重污染感潮河道底泥重金属污染评价及释放规律研究[J]. 环境科学学报, 2008, 28(11):2258-2268.
- [24]Bilali L E I, Rasmussen P E, Hall G E M, et al. Role of sediment composition in trace metal distribution in lake sediments [J]. Applied Geochemistry, 2002, 17(9):1171-1181.
- [25]Chen J S, Wang F Y, Li X D, et al. Geographical variations of trace elements of the major rivers in eastern China [J]. Environmental Geology, 2000, 39(12):1334-1344.
- [26]戴塔根,罗莹华,梁凯. 重金属在不同粒径 PM10 中的含量与动态[J]. 地球科学与环境学报, 2006, 28(4):87-91.
- [27]Ramesh R, Ramanathan A L, Ramesh S, et al. Distribution of rare earth elements and heavy metals in the surficial sediments of the Himalayan river system [J]. Geochemical Journal, 2000, 34:295-319.