

太湖流域西沭湖沉积岩芯中重金属污染及潜在生态风险*

孙照斌^{1,2}, 邴海健^{1,3}, 吴艳宏^{1**}, 姚书春¹, 刘恩峰¹, 李福春²

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

(2: 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

(3: 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 通过对太湖流域西沭湖沉积物岩芯 XJ2 中 Cu、Pb、Zn、Cd、Cr 等 5 种重金属元素总量的分析, 结合测年结果, 揭示了不同时间段重金属污染物的分布特征, 并利用 Hakanson 潜在生态风险评价法对沉积物岩芯的污染状况及潜在生态风险的历史变化进行了研究. 结果表明岩芯受 Cd 元素污染最重, 其它 4 种元素较 Cd 则轻得多, 因此 Cd 元素是影响该地区沉积物潜在生态风险的绝对主导因素. 从 20 世纪初叶开始, 沉积物中的重金属元素污染及其相应的潜在生态风险开始上升, 并且上升幅度不断加剧, 到 20 世纪 90 年代达到最大值, 沉积物污染及潜在生态风险级别均为“很高”, 随后便开始迅速下降, 然而直到 2004 年这两个参数仍然维持在“很高”级别.

关键词: 沉积物; 重金属污染; 生态风险; 历史; 西沭湖; 太湖流域

Contamination and potential ecological risk of heavy metals in lacustrine sediment core from Lake Xijiu, Taihu Basin

SUN Zhaobin^{1,2}, BING Haijian^{1,3}, WU Yanhong¹, YAO Shuchun¹, LIU Enfeng¹ & LI Fuchun²

(1: *Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R. China*)

(2: *College of Resource and Environmental Science, Nanjing Agriculture University, Nanjing 210095, P.R. China*)

(3: *Graduate University of the Chinese Academy of Science, Beijing 100049, P.R. China*)

Abstract: The heavy metal concentrations (Cu, Pb, Zn, Cd and Cr) in sediments from core XJ2 in Lake Xijiu, Taihu Basin were investigated, and the characters of their temporal distributions were studied on basis of geo-chronological results. Approach of the potential ecological risk assessment proposed by Hakanson was applied to investigate the history and the relative potential ecological risks of heavy metal contamination of lacustrine sediments. The results showed that the sediments were polluted by Cd element far more serious than the rest four elements, so that Cd element was the main factor in heavy metal contamination. From the early 1900s, the heavy metal contamination of sediments and the potential ecological risks increased remarkably. The most serious period, when the contamination of all the five heavy metals reached their “very high” level, was during the middle 1990s. The indexes of potential ecological risk dropped afterwards because a result from the adjustment of industrial structure and closing of some heavy contamination factories by local government, although the contamination conditions and the potential ecological risk were remaining at the “very high” level in 2004.

Keywords: Sediments; heavy metal contamination; ecological risk; history; Lake Xijiu; Taihu Basin

重金属元素对生物的毒害作用不言而喻, 其不仅可以在生物体内积累, 还会沿着食物链逐级放大^[1], 从而产生更大的危害. 沉积物是湖泊水体中重金属最重要的汇, 由于工业发展而产生的大量重金属污染

* 国家自然科学基金项目(40772203)和中国科学院知识创新工程方向性项目(KZCXZ-YW-319-3)联合资助. 2008-05-30 收稿; 2008-12-08 收修改稿. 孙照斌, 男, 1981 年生, 硕士研究生; E-mail: robinsunny@163.com.

** 通讯作者; E-mail: yhwu@niglas.ac.cn.

物进入水体后, 绝大部分都赋存于沉积物之中^[2]. 然而这种过程并不是单向不变的, 当水体环境发生改变或在水生生物等的作用下, 沉积物中的重金属元素很有可能被重新释放到水体中, 形成二次污染^[3-4], 从而对水体生态系统产生危害. 因此经过长时期的积累, 沉积物中记录了大量重金属污染的信息, 湖泊沉积物可以作为水体污染的指示剂^[5]. 在准确定年的基础上, 通过对各层沉积物样品的重金属含量的测定, 运用恰当的评价方法, 便可以了解流域内重金属污染历史的变化趋势. Hakanson提出的潜在生态风险指数法^[6]是一种评价沉积物污染程度及其水域潜在生态风险的一种相对快速、简便和标准的方法. 这种方法不仅可以反映单一污染物对环境的影响, 而且也可以反映出多种污染物对环境的综合影响, 该法利用这些有限的污染物含量进行定量的计算与分级, 以达到对沉积物污染状况及相应水域潜在生态风险评价的目的^[7-8]. 然而, 这种方法更多地是应用于对表层沉积物的评价上, 将其应用于对沉积物岩芯污染历史评价的研究则较为鲜见. 本文针对Cd、Cr、Cu、Pb和Zn等5种重金属元素的污染状况, 利用潜在生态风险指数法对上述元素进行了潜在生态风险的历史变化研究.

西沭湖与团沭湖、东沭湖(图1)同属江苏省宜兴市, 呈串珠状由西向东延伸, 俗称宜兴“三沭”. 西沭湖地处太湖之西、滆湖之南, 是太湖西部流经溧阳和宜兴两市的宜溧河水注入太湖前所必须流经的重要湖泊^[9]. 西沭湖面积12.4km², 最大水深5.8m, 平均水深1.85m^[10]. 近些年来, 流域内经济飞速发展, 大量的污染物质被排放到湖泊中, 成为太湖的重要污染源, 同时又是宜溧河流域的污染物进入太湖的缓冲器.

1 材料与方法

1.1 样品采集

2004年4月, 利用重力采样器在西沭湖(31°23'48.8"N, 119°43'33.8"E)采集了长65cm的XJ2柱状岩芯(图1). 将所得岩芯去掉靠近采样器壁样品后, 进行野外现场切片分样. 其中, 上层20cm的岩芯按0.5cm间隔取样, 20cm以下的岩芯按1cm间隔取样, 共获得85个样品, 在室内常温下晾干待用.

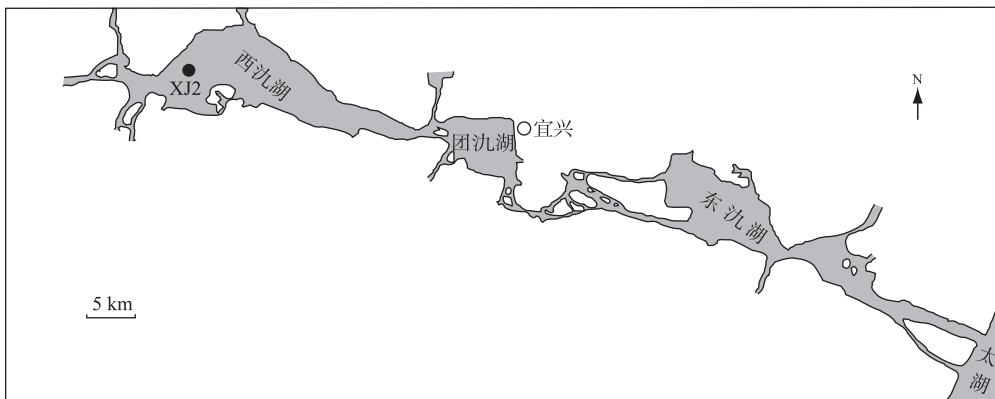


图1 西沭湖采样点位置

Fig.1 Sampling sites in Lake Xijiu

1.2 样品分析

将自然风干的样品充分研磨, 利用硝酸-氢氟酸-高氯酸混合酸在 Berghofmws-3 微波消解系统中进行消解后, 采用美国 LEEMAN LABS ROFILE 电感耦合等离子体原子发射光谱仪(ICP-AES)对 Cd、Cr、Cu、Pb 和 Zn 重金属元素进行测定. 为确定分析过程的可靠性, 将标准参考材料同样品一并测试, 分析结果与标准值相吻合.

1.3 年代学数据

本文所应用年代学数据均取自文献[10]. 具体年代-深度关系见图2.

1.4 Hakanson 潜在生态风险评价

1.4.1 单一污染元素的评价方法 单一污染元素污染参数 C_i^j 的计算公式为:

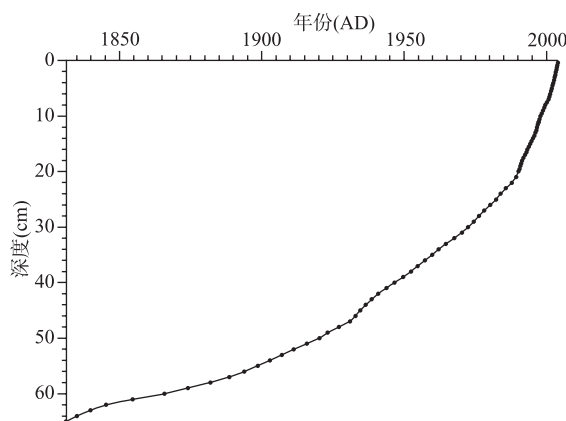


图 2 XJ2 沉积物岩芯年代-深度关系曲线
Fig.2 Age-depth correlations in sediment core XJ2

$$C_f^i = C^i / C_n^i \tag{1}$$

式中, C^i 为沉积物中污染元素的实测浓度(mg/kg); C_n^i 为沉积物中重金属元素的背景值含量. 在本研究中, 56cm 以下各元素的含量较低且基本都保持稳定(图 3), 结合测年结果可知, 由岩芯底部至 56cm 处对应的年代为 19 世纪初至 19 世纪末, 这段时间流域工业尚未起步或未得到发展, 因此, 该段可以认为未受到近代人类活动的影响, 从而取此段重金属含量的平均值作为背景值, Cd、Cr、Cu、Zn、Pb 分别取值 0.2、5.1、10.5、17.7、14.9mg/kg.

单一污染元素的潜在生态风险参数 E_r^i 计算公式为:

$$E_r^i = T_r^i C_f^i \tag{2}$$

式中, T_r^i 为单个污染元素的毒性响应参数. Cd、Pb、Cu、Cr 和 Zn 的毒性响应参数分别为 40, 5, 5, 2 和 1.

C_f^i 、 E_r^i 范围所对应的单个污染物污染程度及潜在生态风险见表 1.

表 1 单一污染元素的评价中 C_f^i 、 E_r^i 值相应的污染程度及潜在生态风险

Tab.1 Ranges of contamination factors (C_f^i) and potential ecological risk factors (E_r^i) and their relative levels

单个污染物污染参数 C_f^i 范围	单个污染物 污染程度	潜在生态风险参数 E_r^i 范围	单个污染物潜在 生态风险程度
$C_f^i < 1$	低	$E_r^i < 40$	低
$1 < C_f^i < 3$	中	$40 < E_r^i < 80$	中
$3 < C_f^i < 6$	较高	$80 < E_r^i < 160$	较高
$C_f^i > 6$	很高	$160 < E_r^i < 320$	高
		$E_r^i > 320$	很高

1.4.2 多种污染元素的综合评价方法 沉积物污染程度 C_d 计算公式为:

$$C_d = \sum_{i=1}^n C_f^i \tag{3}$$

潜在生态风险指数 RI 计算公式为:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i \tag{4}$$

因为本文研究的污染元素(Cd、Cr、Cu、Pb 和 Zn)少于 Hakanson 提出的 8 种, 所以需要对 C_d 表示的

综合污染程度和 RI 表示的潜在生态风险指数进行相应的调整^[7]. 表 2 列出了重新定义后的这 5 种重金属元素 C_d 范围所对应的沉积物总污染程度, 以及它们的毒性响应参数通过加权处理后的 RI 范围所对应的总潜在生态风险程度.

表 2 多种污染元素的综合评价中 C_d 、 RI 值相应的污染程度及潜在生态风险
Tab.2 Ranges of contamination degrees (C_d) and potential ecological risk indices (RI) and their relative levels

沉积物污染程度 C_d 范围	沉积物 污染程度	潜在生态风险指数 RI 范围	潜在生态 风险程度
$C_d < 5$	低	$RI < 50$	低
$5 < C_d < 10$	中	$50 < RI < 100$	中
$10 < C_d < 20$	较高	$100 < RI < 200$	较高
$C_d \geq 20$	很高	$RI > 200$	很高

2 结果与讨论

2.1 重金属重量测定结果

Cd、Cr、Cu、Zn 和 Pb 等 5 种重金属元素的总量分布(图 3)表明, Zn 的总量最大, Cr、Cu 和 Pb 次之, 而 Cd 的总量最小. 然而这种单一总量分布差异所反映的信息十分有限, 仅仅反映了各种重金属元素含量变化的一般趋势, 并不能真正表示沉积物的污染状况以及相应的潜在生态风险.

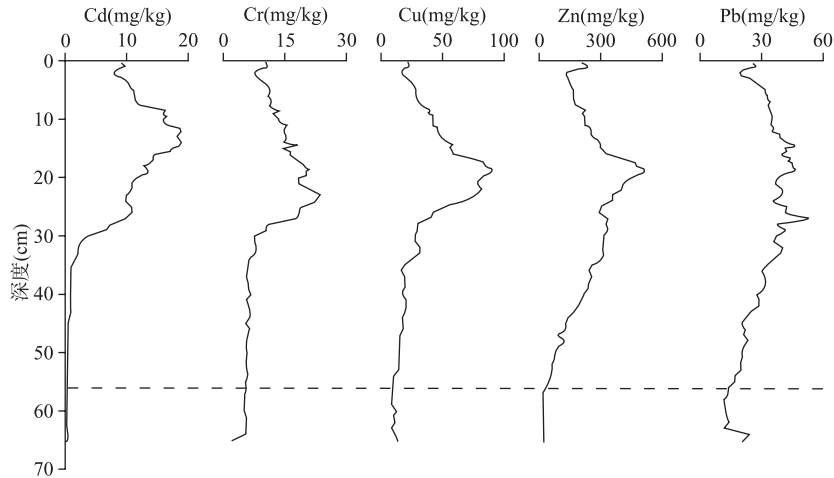


图 3 XJ2 沉积物岩芯中 Cd、Cr、Cu、Zn 和 Pb 的总量分布
Fig.3 Distribution of total concentrations of Cd, Cr, Cu, Zn, and Pb in core XJ2

2.2 单一污染元素评价

通过对单个污染参数的计算得到各元素的 C_f^i 及 E_r^i 值(图 4, 图 5). 其中 Cd 元素的 C_f^i 变化幅度最为明显, 在 1890s 末之前 C_f^{Cd} 一直处于 1 左右, 可以认为该段时间内沉积物没有或受到较轻的 Cd 污染; 而从 1890s 末开始, C_f^{Cd} 开始大幅度的上升; 1890s 末至 1930s 中期, $1 < C_f^{Cd} < 3$, 为“中等”Cd 污染状态; 1930s 末至 1950s 末, $3 < C_f^{Cd} < 6$, 为“较高”Cd 污染状态; 1960s 后, C_f^{Cd} 值超过了 6, 迅速的由“较高”Cd 污染状态上升到“很高”Cd 污染状态, 并且在之后的 30 余年间该值一直保持上升的趋势, 直到 1990s 中期上升到惊人的 95 后才出现下降, 但是, 直到 2004 年, C_f^{Cd} 仍然高达 46, 处于“很高”Cd 污染状态. 由于 Cd 的毒性参数较高(为 30), 在如此急剧的 C_f^{Cd} 上升背景下, E_r^{Cd} 不仅出现了相应的变化趋势, 而且其变化范围也较大. 1890s 末之前

为“低”潜在生态风险, 1890s末至1930s初为“中”潜在生态风险, 1930s初至1950s末为“较高”生态风险, 1950s末至1960s初为“高”潜在生态风险, 之后直到2004年 E_r^{Cd} 便一直处于“很高”潜在生态风险状态。

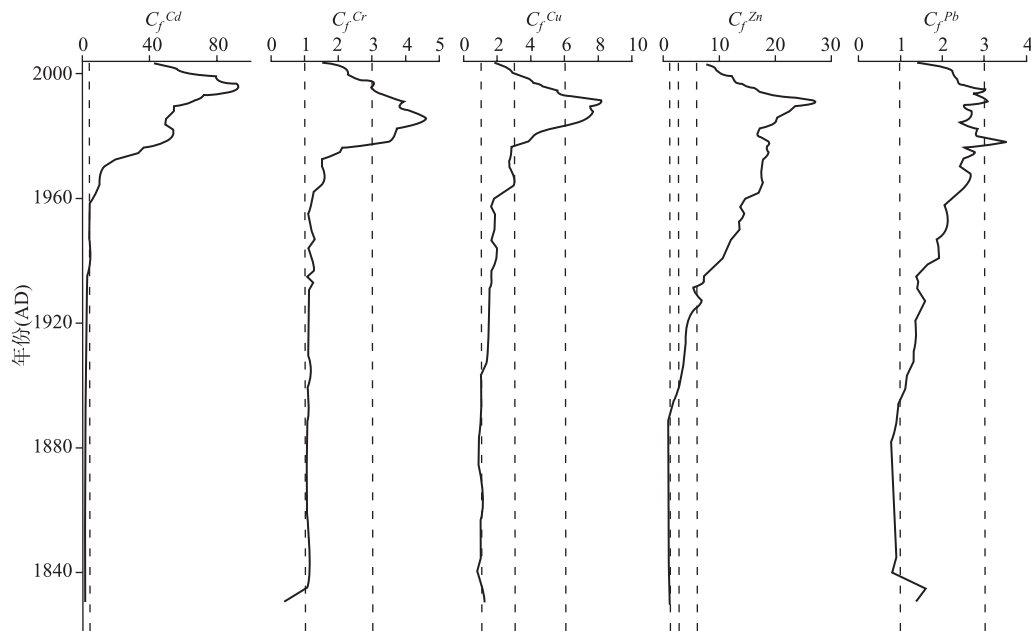


图 4 XJ2 沉积物岩芯中单一重金属污染参数 C_f^i 分布

Fig.4 Distributions of contamination factors (C_f^i) of single heavy metal element in core XJ2

Zn、Cu、Cr 和 Pb 的 C_f^i 并没有出现如 Cd 那样大的涨幅, 总体看来 $C_f^{Zn} > C_f^{Cu}$. 从 1890s 末开始, C_f^{Zn} 便超过 1, 并且不断快速上升; 在 1930s 初达到了 6 以上, 为“很高”Zn 污染状态; 虽然在 1990s 初 C_f^{Zn} 上升到 29 时开始回落, 但是到 2004 年该值仍然处于 6 以上, 处于“很高”Zn 污染状态. 1900s 初以前 $C_f^{Cu} < 1$; 其后直至 1970s 末, Cu 的污染参数基本处于 $1 < C_f^{Cu} < 3$ 区间, 为“中”Cu 污染状态; 而在 1970s 末至 1980s 初的短短几年间, C_f^{Cu} 便迅速的超过了 3, 达到“较高”Cu 污染状态; 1980s 初至 1990s 初, C_f^{Cu} 一度超过 6, 达到“较高”Cu 污染状态, 随后该值便出现了回落。

C_f^{Cr} 在 1960s 初以前以及 C_f^{Pb} 在 1900s 初以前基本处于 1 左右, 其余大部分时间二者均处于大于 1 且小于 3 区段, 为“中”污染状态. 其中, 在 1970s 末至 1990s 初的十余年间, Cr 的污染参数上升到了 $3 < C_f^{Cr} < 6$ 区间, 为“较高”Cr 污染状态, 随后便又回落至 3 以下. 类似地, 1970s 末至 1990s 初, Pb 的污染参数也一度超过了 3, 达到了“较高”Pb 污染状态, 但程度不如 Cr. 这表明沉积物在研究范围内虽受到了 Cr 和 Pb 污染, 但污染程度较其余三种元素轻微。

Zn、Cu、Cr 和 Pb 的 E_r^i 也出现了相应的变化趋势, 但是, 由于毒性参数存在差异, 使它们的 E_r^i 曲线相对于 C_f^i 曲线的变化程度发生了一定的改变. 由于 C_f^{Cu} 的基数较大且 Cu 的毒性参数略大(图 5), 其 E_r^{Cu} 值总体上超过了 E_r^{Zn} ; Pb(毒性参数为 5)的 E_r^{Pb} 值总体上超过了 E_r^{Cr} . 然而无论这种变化如何, 除 Cu 的 E_r^{Cu} 在 1990s 初的峰值略超过 40 外, 这四种元素的 E_r^i 均未超过 40, 为“低”潜在生态风险. 这表明在所研究的时间范围内, 沉积物中的这四种元素对水域的潜在生态风险均较小。

2.3 多种污染元素综合评价

由沉积物污染程度 C_d 值(图 6)可见, XJ2 岩芯沉积物的重金属污染始于 1900s 初, 在 1990s 中期之前, XJ2 沉积物的污染程度一直处于上升趋势中; 1890s 末以前, $C_d < 5$, 为“低”污染状态; 1890s 末至 1920s 初, $5 < C_d < 10$, 上升为“中”污染状态; 1920s 初至 1940s 初, $10 < C_d < 20$, 达到了“较高”污染状态; 其后 C_d 便一直处于超过 20 的“很高”污染状态, 直到 1990s 中期达到 122 后才出现下降. 但是, 到 2004 年, C_d 依然维持

在“较高”污染状态.

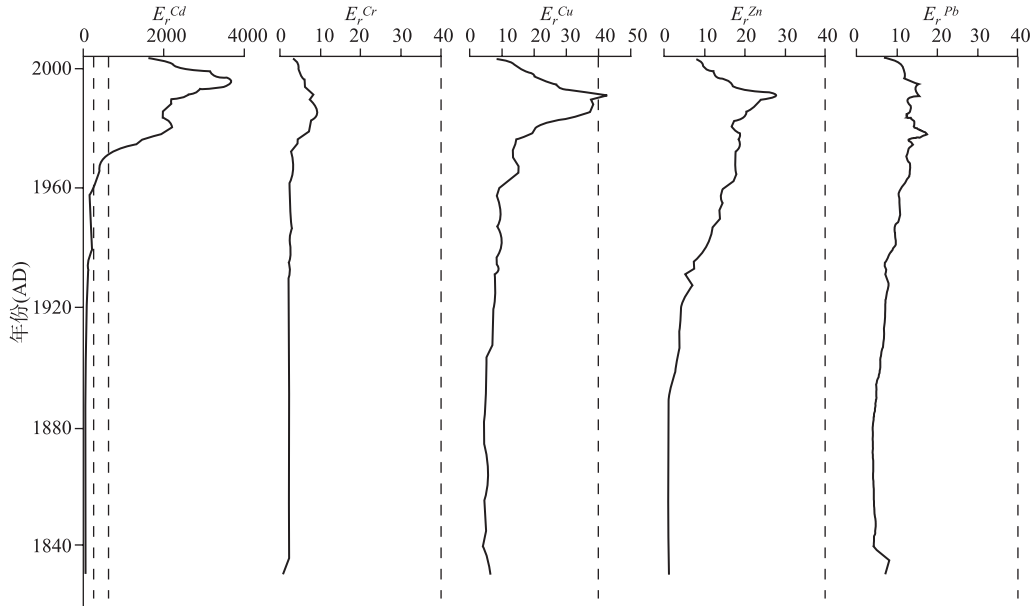


图 5 XJ2 沉积物岩芯中单一重金属潜在生态风险参数 E_r^i 分布

Fig.5 Distributions of potential ecological risk factors (E_r^i) of single heavy metal element in core XJ2

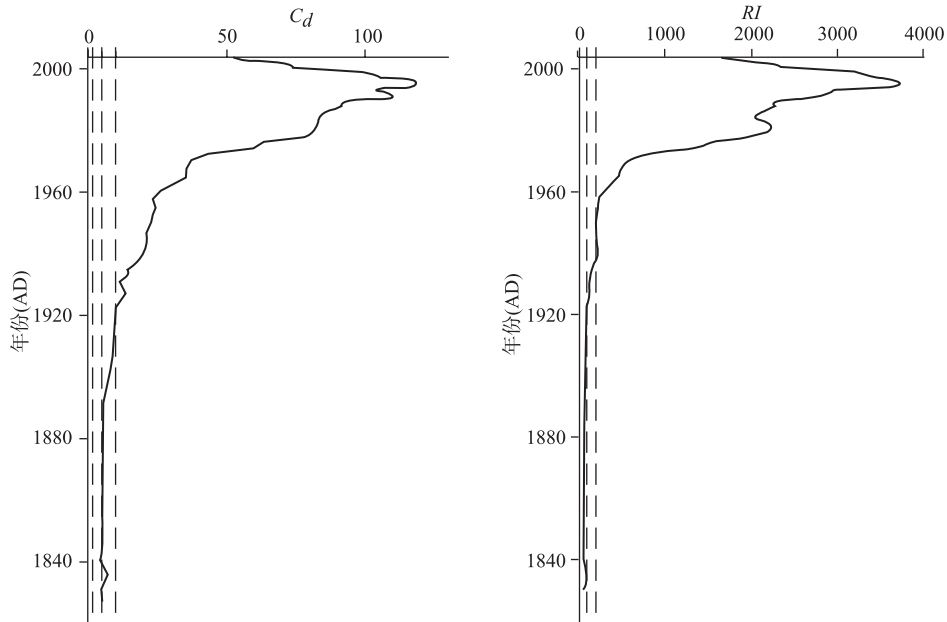


图 6 XJ2 沉积物岩芯的污染程度 C_d 及潜在生态风险指数 RI 分布

Fig.6 Distributions of contamination degrees (C_d) and potential ecological risk indices (RI) in core XJ2

RI 也表现出了相同的变化趋势(图 6), 并且对于进行加权调整过的评价取值范围而言, 潜在生态风险的变化十分剧烈. 在 1920s 初之前, XJ2 岩芯沉积物对相应水域的潜在生态风险基本处于 $50 < RI < 100$ 区间,

为“中”潜在生态风险; 1920s 末至 1950s 初, $100 < RI < 200$, 已经达到“较高”潜在生态风险水平; 而在 1950s 初之后, RI 便一直处于 200 之上, 维持在“很高”潜在生态风险状态, 该值最高甚至达到了 3836. 如此高值已经远超过我们的评价参考取值范围, 用“超高”来形容也不为过. 虽然在 1990s 中期 RI 开始下降, 但是直到 2004 年该值仍然为 1877, 潜在生态风险依然“超高”.

在所研究的范围内, 不论是各元素的总量、 C_f^i 和 E_r^i , 还是综合指标 C_d 和 RI , 随着时间的增加均呈现出“缓慢上升-加速上升-迅速下降”的变化趋势, 这样的结果与该地区的人类活动历史相吻合^[11-12]. 19 世纪初至 19 世纪末, 流域工业尚未起步或未得到发展, 沉积物并未受到污染, 其潜在生态风险也很小; 而 20 世纪初至 20 世纪中期, 流域内以及周边城市工业化的兴起导致了沉积物污染程度的上升, 然而此时上升幅度十分缓慢, 污染程度较轻并不能导致特别强的潜在生态风险; 进入 20 世纪中期后, 新中国的建立使流域内的工、农、交通等行业得到了较快的发展, 尤其是 70 年代末以来, 太湖流域经济水平快速提升, 其中无锡市 80 年代工业生产总产值年均增长达 30%^[13]. 然而这种发展是以牺牲环境为代价的, 大量高能耗、高污染的中小企业的迅速兴起, 导致了流域环境的不断恶化, 在本研究中体现在沉积物的重金属污染程度不断加重以及潜在生态风险迅速增强; 到 20 世纪 90 年代中期, C_d 和 RI 已经大大超过了“很高”等级线, 其值甚为骇人, 环境整治刻不容缓, 也恰是此时国家发布政策调整流域内工业结构, 加大环境保护力度, 关停了大批严重污染的小企业, 并大力推广使用无铅汽油等措施. 因此, 从 20 世纪 90 年代中期至 2004 年, C_d 和 RI 均出现了明显的下降, 在 2004 年基本回落到了 20 世纪 70 年代中后期的水平. 但是, 此时沉积物的污染程度和潜在生态风险仍然处于“很高”的范围, 对水体生态系统仍有不可忽视的影响.

3 结论

就总量而言, 虽然 Cu、Pb、Zn、Cd、Cr 五种重金属元素中 Cd 最小, 但是其背景值也较小, 而且毒性响应参数较大, 因此无论是 C_f^i 还是 E_r^i 均超过其它四种元素. 沉积物的污染程度 C_f^i 顺序为 $Cd >> Zn > Cu > Cr > Pb$, Cd 元素最重; 潜在生态风险 E_r^i 顺序为 $Cd >> Cu > Zn > Pb > Cr$, 同样是 Cd 元素最高. 这一点在运用多元素综合评价时, 反映在 C_d 和 RI 的变化趋势基本与 Cd 元素的 C_f^{Cd} 和 E_r^{Cd} 变化趋势相吻合, 表明 Cd 元素是本研究中造成重金属污染的主导因素.

总体而言, 沉积物的污染始于 1900s 前后, 之后呈不断加强的趋势. 在 1940s 初便达到了最强的“很高”等级, 而沉积物的潜在生态风险则是从 1920s 初开始出现大幅升高, 1950s 初也达到了最强的“很高”等级. 二者的这种上升趋势一直延续到 1990s 中期, 其后 C_d 和 RI 便开始出现大幅回落. 但是, 直至 2004 年二者仍然处于“很高”等级. 分析结果表明, 最近三十余年产生的重金属污染最为严重, 潜在生态风险最大. 以上变化与该地区的经济发展历史相吻合, 显示了沉积物的重金属污染与流域内的人类活动有着密不可分的关系.

4 参考文献

- [1] 干爱华, 于 斌, 刘 军等. 海河干流、大沽排污河沉积物中重金属污染及潜在生态风险评价. 安全与环境学报, 2006, 6(5): 39-41.
- [2] 陈静生. 沉积物金属污染研究中的若干问题. 环境科学丛刊, 1983, 4(8): 1-12.
- [3] 向 勇, 缪启龙, 丰江帆. 太湖底泥中重金属污染及潜在生态危害评价. 南京气象学院学报, 2006, 29(5): 700-705.
- [4] 杨丽原, 沈 吉, 张祖陆等. 南四湖表层底泥重金属污染及其风险性评价. 湖泊科学, 2003, 15(3): 252-256.
- [5] 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. 湖泊科学, 2002, 14(3): 235-241.
- [6] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach. *Water Res*, 1980, 14: 975-1001.
- [7] 刘 成, 王兆印, 何 耘等. 环渤海湾诸河口潜在生态风险评价. 环境科学研究, 2002, 15(5): 33-37.
- [8] 周秀艳, 李宇斌, 王恩德等. 辽东湾湿地重金属污染及潜在生态风险评价. 环境科学与技术, 2004, 27(5): 60-62.
- [9] 中国科学院南京地理研究所湖泊室. 江苏湖泊志. 江苏: 江苏科学技术出版社, 1982.
- [10] 吴艳宏, 蒋雪中, 刘恩峰等. 太湖流域东泆、西泆近百年汞的富集特征. 中国科学(D辑): 地球科学, 2008, 38(4): 471-476.
- [11] 韩霞辉. 宜兴县志. 上海: 上海人民出版社, 1990.
- [12] 宜兴市史志办公室. 宜兴年鉴 1989-2006. 江苏: 宜兴市地方志出版社, 2007.
- [13] 谢红彬, 陈 雯. 太湖流域制造业结构变化对水环境演变的影响分析——以苏锡常地区为例. 湖泊科学, 2002, 14(1): 53-59.