

文章编号: 1000-0550(2012)01-0158-08

# 东太湖钻孔揭示的重金属污染历史<sup>①</sup>

姚书春 薛滨

(中国科学院南京地理与湖泊研究所 湖泊与环境国家重点实验室 南京 210008)

**摘要** 2009年在东太湖运用重力采样器采集得到岩芯钻孔(DJZ和DQG)。运用核素<sup>210</sup>Pb和<sup>137</sup>Cs对沉积物钻孔进行定年,同时分析了沉积物金属元素,并研究近代东太湖重金属污染以及人类活动对其的影响。本文运用Fe元素作为粒度的代用指标对重金属进行标准化,并获取了重金属富集系数和人为污染的重金属通量。研究表明,除了钻孔的表层样以外,东太湖DQG和DJZ钻孔的Pb、Zn、Cu、Cr和Ni的富集系数都不超过2,并且Cr、Ni的富集系数接近1。结果表明最近几十年来的重金属铅、铜、锌在不断富集,尤其是在20世纪70年代以来。20世纪70年代至90年代,东太湖来源于人为污染的Pb、Zn、Cu的通量维持在一定的水平,90年代以来,东太湖来源于人为污染的Pb、Zn、Cu的通量在不断增加,这与区域污染工业类型及经济发展阶段相吻合。东太湖2000s初以来Pb通量特别是人为污染的Pb的通量出现下降,这可能部分与含铅汽油的禁用有关,另外也与该阶段流域工业结构的调整有关。

**关键词** 东太湖 沉积物 重金属 污染

**第一作者简介** 姚书春 男 1975年出生 副研究员 博士 环境地球化学 E-mail: shchyaoy@niglas.ac.cn

**中图分类号** X141 P512.2 **文献标识码** A

自工业革命以来,人类活动已造成大量的金属释放到环境中<sup>[1-3]</sup>。通过河流及大气搬运,金属能够迁移到水体中并最终沉积下来,沉积物被认为是这些金属重要的归宿<sup>[4]</sup>。沉积物中金属元素的浓度比上覆水体中相应金属的含量要高到几个数量级。随着环境中重金属污染问题的日益严重,沉积物已经被广泛用来了解历史时期金属污染并评价人类活动的影响<sup>[5-7]</sup>。

长江中下游地区是我国浅水湖泊集中分布的地区。许多湖泊是当地居民的重要水源地<sup>[8,9]</sup>,但由于沿湖地区工农业生产的不断发展和人口的增长,污染物入湖量不断增多,湖泊水体和底泥中重金属污染物不断积累,已直接影响到人民生活用水安全<sup>[10-12]</sup>。太湖是长江下游的重要淡水湖泊。由于长三角地区经济发展快速,太湖水体污染严重。1980—1981年太湖环境质量调查研究结果表明部分河口及梅梁湾地区有轻微的重金属污染,99%的湖区为清洁和较清洁<sup>[13]</sup>。1988年对太湖沉积物的重金属污染进行了调查,确定了无锡、苏州和长兴沿岸是重金属的主要污染区<sup>[14]</sup>。此后的相关研究表明太湖的重金属污染呈现北部湖区重于其他湖区,河口区重于非河口区<sup>[15-18]</sup>。另外,已有不少研究者在太湖进行了重金

属污染历史的研究。如Rose等对太湖北部<sup>[19]</sup>,刘建军等人在太湖大浦湖区<sup>[20]</sup>,刘恩峰等人西太湖北部马迹山附近<sup>[21]</sup>,朱广伟等人在梅梁湾、胥口湾<sup>[22]</sup>,姚书春等人在太湖南部<sup>[23]</sup>等开展了相关研究。东太湖作为苏州重要的水源地,也是上海、嘉兴等下游地区水源,具有重要的生态和社会意义,但该湖区污染历史以及人为活动对其的影响的研究还比较缺乏。而且东太湖作为沼泽化比较严重的湖泊,沉积速率非常高,在这样一个区域重金属的赋存有什么样的特点也有待研究。

## 1 研究区概况及研究方法

### 1.1 研究区概况

太湖位于长江三角洲南翼坦荡的太湖平原上,湖泊面积2 427.8 km<sup>2</sup>,是仅次于鄱阳湖和洞庭湖的全国第三大淡水湖泊。目前平均水深1.89 m,最大水深2.60 m<sup>[8]</sup>。吴县的东山半岛伸入太湖湖心,把偌大一个太湖一分为二,东山半岛的西部太湖水面称为西太湖,东部太湖水面称为东太湖。东太湖的形成至今只有180年的历史,是长江中下游地区较典型的草型湖泊<sup>[24]</sup>。目前东太湖的范围包括北自钻鱼口开始,南至东茭咀及西溪庙港之间的太湖水域,位于北

<sup>①</sup>国家水体污染控制与治理科技重大专项(编号:2008zx071012012) 国家自然科学基金项目(批准号:40902048,41072133,41011140341),江苏省基金项目(BK2009331)资助。

收稿日期:2011-02-23;收修改稿日期:2011-03-29

纬 30.584 9° 至 31.124 5°, 东经 120.244 8° 至 120.382 9° 之间。东太湖总长度 27.5 km, 最大宽度 9.0 km, 总面积 131 km<sup>2</sup>, 平均水深 0.9 m, 最大水深 1.3 m。东太湖作为太湖主要出水通道, 承纳大量来自太湖的泥沙和营养物质。对东太湖的围垦一直持续到上世纪 70 年代末期, 1949 年以来围垦面积达 112 km<sup>2</sup>, 是现有湖面的 0.85 倍<sup>[25]</sup>。东太湖网围养殖起始于 1984 年, 1993 年网围养殖已经遍及整个沿岸带<sup>[26]</sup>。

## 1.2 样品采集

2009 年在东太湖运用重力采样器采集了短钻孔—东茭咀 (DJZ) 孔和大缺港 (DQG) 钻孔, 采样位置见图 1。进行现场切割, 间距为 1 cm, 冷藏保存。钻孔中可见水草残体。

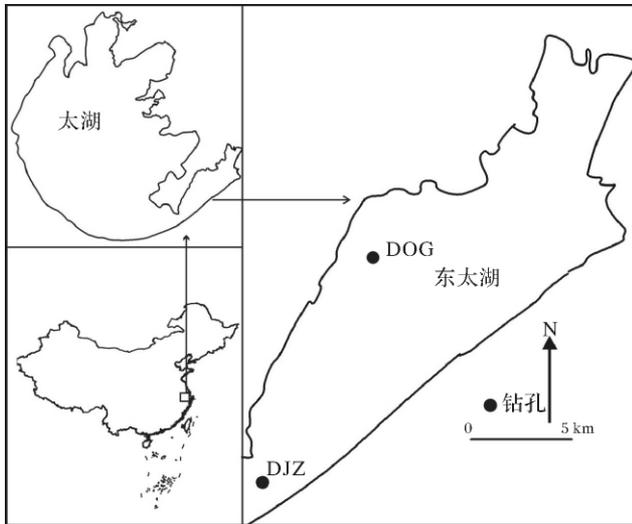


图 1 东太湖及采样点示意图

Fig. 1 East Taihu Lake and sampling sites

## 1.3 分析方法

年代测定用<sup>210</sup>Pb 或者<sup>137</sup>Cs 法。具体为用  $\gamma$  分析

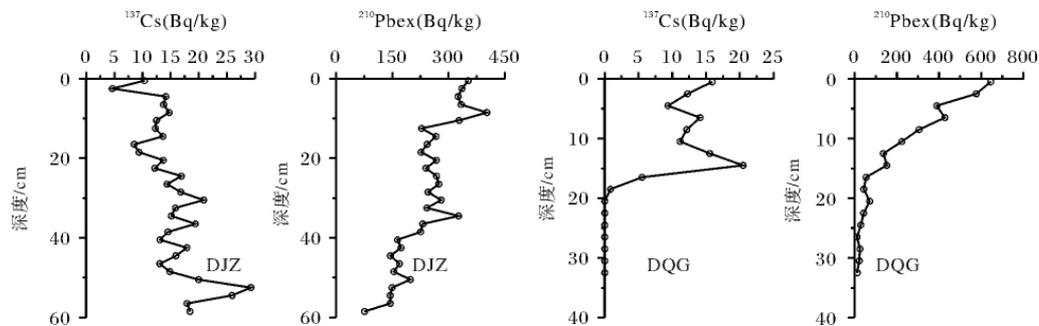


图 2 东茭咀 (DJZ)、大缺港 (DQG) 钻孔核素垂直分布

Fig. 2 Vertical profiles of <sup>137</sup>Cs and <sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub> of DJZ and DQG cores at East Taihu Lake

方法对样品进行无损坏的多种核素同时直接测量。分析样品为一定量的研磨至过 100 目孔筛的干沉积物样品。用美国 EG&GOrtec 公司生产的由高纯锗井型探测器 (OrtecHPGeGWL) 与 Ortec919 型谱控制器和 IBM 微机构成的 16 k 道多道分析器所组成的 (谱分析系统进行核素测定。<sup>137</sup>Cs 和<sup>226</sup>Ra 标准样品由中国原子能研究院提供;<sup>210</sup>Pb 标准样品由英国利物浦大学做对比标准。

将采集好的样品放于室温阴凉处自然风干, 研磨过 100 目筛, 称取样品 0.100 ~ 0.150 g 采用 HCl—HNO<sub>3</sub>—HF 消解 (EPA3052)。用 ICP (Leeman Labs Profile) (USEPA 1995) (标准物质 SRM 1646a) 测定元素的含量。测定的元素包括 Fe、Ti、Al、Cr、Cu、Pb、Zn、Ni 等。每 10 个样品做一次平行分析。平行分析的相对误差控制在 10% 范围内。

## 2 结果与讨论

### 2.1 年代和沉积速率

<sup>210</sup>Pb 计年一般采用 CIC (稳定初始放射性通量) 和 CRS (稳恒沉积通量) 两种模式<sup>[27]</sup>。CIC 模式中沉积物主要来源于表层侵蚀产物, 并且在湖水中滞留时间较短。<sup>210</sup>Pb 含量明显受物源影响, 即沉积物的增加能同时导致相应的<sup>210</sup>Pb 的增加。CRS 模式中沉积物的<sup>210</sup>Pb 主要来源于湖面上大气的沉降, 原来由物源区携带而来的<sup>210</sup>Pb 对其总量不产生影响。即当<sup>210</sup>Pb 输入通量 F 保持恒定, 而沉积物堆积速率可能随时间变化的条件下计算沉积物平均堆积速率。另外, 当大气<sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub> 输入通量发生变化, 利用 CRS 模式得到的结果就会出现被偏差。当初始<sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub> 浓度不再一成不变时, 利用 CIC 模式同样结果不够理想, 可以利用独立时标来比较结果的偏差, 称之为混合模式 (Composition model)<sup>[28]</sup>。

东太湖大缺港钻孔核素的垂直变化见图2。我国湖泊沉积中一般有三个时标,分别是1954、1963、1986年,有些湖泊中也有1974年<sup>[29]</sup>。东太湖大缺港钻孔14.5 cm处(7.12 g/cm<sup>2</sup>) <sup>137</sup>Cs出现峰值,对应于上个世纪60年代初(1963—1964)。依此作为时标,得到的堆积速率为0.15 g/cm<sup>2</sup>/a。另外,可以看出过剩<sup>210</sup>Pb随着深度(质量深度)呈指数下降。 $\ln(\text{过剩}^{210}\text{Pb}) = -0.13 \times \text{质量深度} + 6.01$  ( $R^2 = 0.90$ ,  $n = 17$ ),平均堆积速率为0.24 g/cm<sup>2</sup>/a,该结果与<sup>137</sup>Cs相比,存在较大的偏差。因此本文运用混合模型,采用<sup>137</sup>Cs/1963年峰校准<sup>210</sup>Pb的结果进行定年,并在此基础上获取沉积物的堆积速率(图3)。

东太湖东茭咀钻孔核素的垂直变化见图2。该钻孔长达59 cm,但<sup>137</sup>Cs并未达到本底,可见59 cm的钻孔,其年代不老于1950s。钻孔最底部过剩<sup>210</sup>Pb高达75.73 Bq/kg,未达到平衡。通过过剩<sup>210</sup>Pb随着深度的变化结合<sup>210</sup>Pb半衰期,大致可以判断<sup>137</sup>Cs蓄积峰(52.5 cm)埋藏时间在20个世纪80年代。1986年前苏联切尔诺贝利核泄漏导致了全球自然环境中<sup>137</sup>Cs总蓄积量增加了约5%<sup>[30]</sup>。在欧洲的部分地区达到23 000 Bq/m<sup>2</sup>,在北美个别地区仅可达到检测水平,但对东亚地区的影响是明显的,如1986年5月在香港地区土壤中蓄积的160 Bq/m<sup>2</sup>中有近18%来自该事故。该事故散落的<sup>137</sup>Cs在我国自然环境中明显蓄积<sup>[31]</sup>。因此该峰(52.5 cm)有可能对应20世纪80年代中期(1986年)发生的核泄漏事件。如果该假设成立,就可以运用混合模型,运用<sup>137</sup>Cs/1986年峰校准<sup>210</sup>Pb的结果进行定年,并在此基础上获取沉积物的堆积速率(图3)。

沉积物堆积速率及其变化反映了在区域自然因素和人类活动影响下,入湖泥沙量和排出量之间的动态平衡被破坏和新平衡建立的复杂过程。从图3中可以看出在过去近50年里,在大缺港附近湖区沉积物堆积速率经历了一个由慢到快再变慢的过程。而在东茭咀附近其沉积物的堆积速率远大于大缺港附近湖区,并且20世纪90年代东茭咀一带堆积速率更高,这可能与太浦河水利工程兴建有关。有资料表明,当太浦河水利工程兴建之后,夹带着泥沙的浑浊湖水进入东太湖后经由太浦河下泄,进入太浦河以北湖区的泥沙量减少,淤积速度因此而减小;但太浦河口至东茭咀一带成了泥沙沉积的主要场所,淤积速度明显加快。对比分析1991年1月和1998年2月的实际测量资料,太浦河口至东茭咀一带在7年中新增

淤积深度30 cm<sup>[32]</sup>。这同时表明,从假设推导得到的东茭咀钻孔堆积速率具有一定的可靠性。

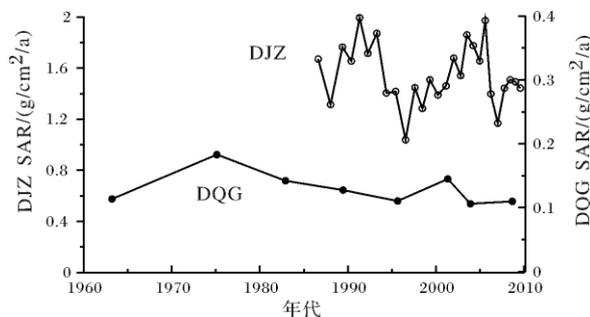


图3 东茭咀(DJZ)、大缺港(DQG)钻孔沉积物堆积速率变化

Fig. 3 Sediment accumulation rates of DJZ and DQG cores at East Taihu Lake

## 2.2 东太湖重金属含量垂向变化

总体上,东太湖DQG钻孔重金属随着深度的减少呈现先减少再增加的趋势,发生转折的深度在9 cm(图4)。0~9 cm, Cu、Pb、Zn、Cr、Ni的均值是22.34、50.83、98.35、66.19、26.74 mg/kg; 9~33 cm, Cu、Pb、Zn、Cr、Ni的均值是13.18、26.25、46.33、58.95、20.45 mg/kg; 增加幅度最大的是Zn,增加了52.02 mg/kg,最小的是Ni,增加了6.29 mg/kg; 增加倍数最小的是Cr(0.12倍),其次是Ni(0.30倍),Cu(0.69倍)、Pb(0.94倍)、Zn(1.12倍)。可见Cu、Pb、Zn在0~9 cm深度显著高于9~33 cm深度沉积物相应元素的含量。东太湖DJZ钻孔重金属随着深度的减少呈现先减少再快速增加,继而保持平稳或者增加的趋势,底部-50 cm,各元素先减少再增加,但幅度较小; 50~30 cm,各元素增长明显; 30~0 cm, Pb、Cr、Ni保持相对稳定, Cu、Zn含量增长明显。除了Pb以外, DJZ钻孔和DQG钻孔的最表层沉积物Cu、Zn、Cr、Ni含量接近。Fe剖面的变化与Zn类似。

## 2.3 东太湖重金属富集系数垂向变化

湖泊沉积物物质来源发生改变时常使得其组分的含量产生变化。为消除物源的影响,区别自然和人类来源的物质,一个通常的识别方法是采用参考元素,如Ti、Al和Fe等<sup>[33-35]</sup>。Al、Fe和Ti被认为主要来自土壤母质或基岩的铝硅酸盐<sup>[36]</sup>,这些物质在沉积物中的含量与矿物组成有显著的关联,且受人为活动影响较小,其变化受控于自然物质来源的差异。通过与未受污染的沉积物中相应元素的背景浓度比较,可以鉴别表层现代沉积物重金属富集程度,从而获取

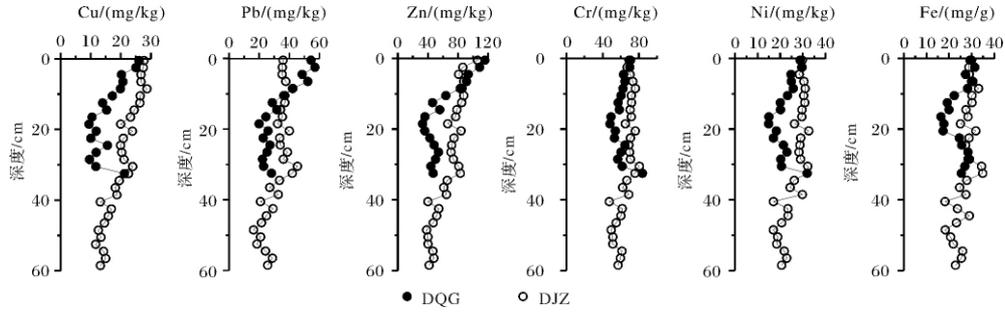


图 4 东菱咀(DJZ)、大缺港(DQG) 钻孔沉积物重金属垂直变化

Fig. 4 Vertical distribution of heavy metals from sediment of DJZ and DQG cores at East Taihu Lake

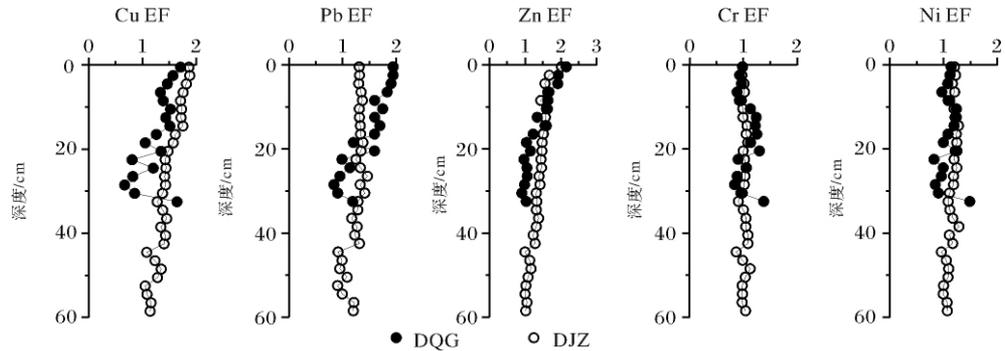


图 5 东菱咀(DJZ)、大缺港(DQG) 钻孔沉积物重金属富集系数的垂向变化

Fig. 5 Vertical profiles of heavy metals enrichment factors of DJZ and DQG cores sediment at East Taihu Lake

沉积物中重金属的自然和人为来源的相对贡献率。富集系数(EF)可以用来反映沉积物重金属污染程度<sup>[37]</sup>。Rose 等人在太湖北部钻孔进行了 Ti 和 Zr 的对比,发现 Zr 作为参考元素与球碳粒趋势一致<sup>[19]</sup>;刘恩峰等人运用 Al 作为参考元素,发现与粒度校正的结果相似<sup>[38]</sup>。本研究经过对比发现 相对于 Al 使用 Fe 元素作为粒度的代用指标对较好地重金属进行标准化,以消除粒度的影响。计算公式如下:

$$EF = (\text{Met}/\text{Fe})_{\text{样品}} / (\text{Met}/\text{Fe})_{\text{背景}}$$

上式中, Met 是指重金属的浓度。东太湖 DQG 钻孔 20 cm 以下深度,根据定年资料,已是 1950s 之前的沉积物,可以认为是未受人污染或者污染较少的,可以作为相对背景值。而在东太湖 DJZ 钻孔,其钻孔年代较近,本文同样选择东太湖 DQG 钻孔 20 cm 以下深度沉积物元素含量作为东太湖 DJZ 钻孔计算富集系数时的背景值。

可以看出东太湖 DQG 和 DJZ 钻孔的 Cr、Ni 富集系数在 1 左右,人为污染带来的 Cr、Ni 不明显(图 5)。东太湖 DQG 钻孔的 Pb、Cu、Zn 富集系数在 20~0 cm 之间总体呈现增加的趋势;东太湖 DJZ 钻孔的 Cu、Zn 富集系数在 42~0 cm 之间总体呈现增加的趋势;DJZ 钻孔的 Pb 富集系数在底部 -42 cm 接近 1,

在 42~0 cm 保持相对稳定,平均为 1.32。值得注意的是 20~0 cm,东太湖 DQG 钻孔 Pb 富集系数高于 DJZ 钻孔的 Pb 富集系数,尤其是在 10~0 cm 阶段。

#### 2.4 东太湖重金属通量变化

前面已经提到,东太湖 DQG 和 DJZ 钻孔人为污染带来的 Cr、Ni 不明显。因此图 6 中仅给出了总的 Cu、Pb、Zn 的通量以及人为活动带来的重金属的通量(A: anthropogenic flux)。采用沉积物重金属通量(T: total flux)扣除自然来源的重金属通量的方法得到人为活动带来的重金属的通量。具体计算公式是:

$$T = C \times SAR$$

$$A = T - T/EF$$

其中: C 是钻孔中某一层位的某种重金属的含量; SAR: 钻孔中相对应的沉积物堆积速率; EF: 相对应的重金属富集系数。

从图 6 中可以看出,东太湖 DJZ 钻孔 Cu、Pb、Zn 的通量远高于东太湖 DQG 钻孔,这和东太湖 DJZ 钻孔非常高的沉积通量有关。总体上,东太湖 DJZ 钻孔总的 Cu、Zn 的通量,以及人为活动带来的重金属 Cu、Zn 的通量随着时间变老而减少。对于 Pb 通量来说,在东太湖 DJZ 钻孔 90 年代中晚期以来出现下降。东太湖 DQG 钻孔的 Zn、Cu,总体上 60 年代以来,无

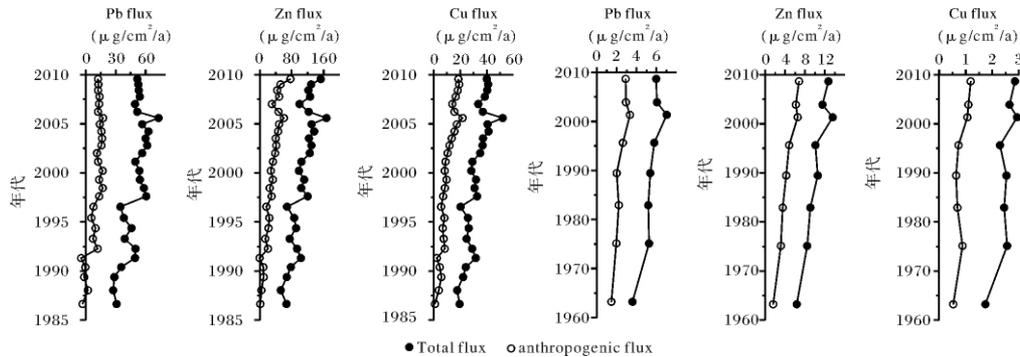


图6 东茭咀(DJZ)、大缺港(DQG)钻孔沉积物中重金属通量的变化

Fig. 6 Changes of heavy metals accumulation flux of DJZ and DQG cores at East Taihu Lake

论是总的通量还是人为活动带来的通量都是在增加。对于Pb通量来说,2002年以来,在东太湖两个钻孔都出现下降。

### 2.5 东太湖钻孔重金属的变化与人类活动的关系

除了东太湖,已有不少研究者在太湖的其他区域进行了重金属的研究。如Rose等利用元素Zr作为参考元素对太湖北部沉积物进行研究,表明人类活动引起元素铅、铜、锌、镉开始累积的时间处于上世纪70年代<sup>[19]</sup>。刘建军等人在太湖大浦湖区发现Cu、Pb在上世纪50年代末开始增加,70年代明显富集<sup>[20]</sup>。刘恩峰等人西太湖北部马迹山附近岩芯发现,70年代末期以前Pb、Zn主要为自然沉积,70年代末期以来Pb、Zn含量逐渐增加<sup>[21]</sup>。朱广伟等人在梅梁湾的研究揭示1978年至2000年,重金属元素包括Cu、Pb、Zn、Cd等都呈现逐渐增加的趋势<sup>[22]</sup>。与这些研究者的结果类似的是,东太湖DQG钻孔也揭示最近几十年来的重金属铅、铜、锌的不断富集,尤其是在1970s以来。但也存在差异,如东太湖DJZ钻孔,由于异常高的沉积速率使得沉积物中重金属浓度得到稀释,造成重金属包括Cu、Pb、Zn的富集系数相对较低。东太湖作为典型草型湖泊,湖泊沉积物中有机质含量较高。由于Cu是生物所必需的营养元素,具有生物累积效应,而且Cu具有很强的有机结合能力,这也可能是造成东太湖沉积物表层Cu污染的原因之一<sup>[39]</sup>。

除了钻孔的表层样以外,东太湖DQG和DJZ钻孔的Pb、Zn、Cu、Cr和Ni的富集系数都不超过2,并且Cr、Ni的富集系数较小(图5)。结合年代可以看出,东太湖DJZ钻孔2002年以来Cu富集系数超过1.5,2004年以来Zn富集系数超过1.5,东太湖DQG钻孔2003年以来Cu富集系数超过1.5,Pb富集系数

最早出现超过1.5的在20.5cm处(对应时间约1940年代中期),再次出现超过1.5的在16.5cm处(对应时间约1950年代晚期),1963年以来Zn富集系数超过1.5。据研究,EF值超过1.5的可以认为人为来源的重金属占了显著比例<sup>[40]</sup>。以此为标准,自2000年初以来流域内人类活动对东太湖DJZ钻孔沉积物造成了显著的重金属污染,在东太湖DQG钻孔则要早得多。DJZ钻孔高的沉积物堆积速率对人为污染造成的赋存在沉积物中的重金属起到了稀释作用,使得富集系数超过1.5的时间偏晚。

我国从20世纪90年代开始逐步淘汰含铅汽油,1997年在重点城市实施汽油无铅化,2000年全国实现汽油无铅化<sup>[41]</sup>。在东太湖DQG和DJZ钻孔约2000s初以来可以看出Pb通量以及人为污染的铅的通量出现下降(图6),这可能部分与含铅汽油的禁用有关。湖泊沉积物中的铅包括自然来源的以及人为来源的。在出现铅污染之前,湖泊沉积物中大气来源的铅相对于流域来的要少得多<sup>[42]</sup>。工业革命之后,伴随着汽车的出现和加铅汽油的使用以及工业的发展,使近代大气中的铅污染趋向高峰。有资料表明,20世纪70—80年代由于人类活动造成的释放到大气中的铅与自然释放到大气中的铅的比值为33。现代全球铅循环中约有95%的来自于人类活动造成的铅污染<sup>[43,44]</sup>。自1970s以来我国汽车数量开始大幅增加<sup>[45]</sup>,加铅汽油的使用使得排放到大气中的铅开始快速增加。另外煤的使用也呈现不断增加的态势<sup>[46]</sup>。工业快速发展,使得释放到环境中的铅不断增加,这与东太湖DQG钻孔的人为污染铅的通量研究结果具有较好的一致性。Cu、Zn元素及其通量的增加,可能主要与太湖流域工业排放如电镀工业排放有关<sup>[17]</sup>。20世纪90年代中期DJZ钻孔揭示的人为

来源重金属通量的减少,可能与1996年流域内工业结构的调整有关<sup>[47]</sup>。1996年后流域内重污染工业压缩规模,一批小化工企业被强制关停,工业废水排放量减少,沉积物中重金属累积量减少。另外,1996年也是我国用煤量减少的时段<sup>[46]</sup>,同样会导致入湖重金属减少。在东太湖DQG钻孔没有显示出这一变化可能是因为样品分析间隔较大所致。

### 3 结论

运用核素<sup>210</sup>Pb和<sup>137</sup>Cs定年,结合东太湖短柱钻孔(DQG和DJZ)的重金属分析,研究近代东太湖重金属污染以及人类活动对其的影响。研究发现近几十年尤其是上个世纪70年代以来,东太湖明显受到受到人类活动的影响,从而造成沉积物中重金属如Pb、Zn、Cu不仅仅来源于自然的作用。

核素<sup>210</sup>Pb和<sup>137</sup>Cs的研究结果显示,过去近50年里,在大缺港附近湖区沉积物堆积速率经历了一个由慢到快再变慢的过程,而在东茭咀附近其沉积物的堆积速率远大于大缺港附近湖区。20世纪90年代东茭咀一带淤积速度明显加快,可能与太浦河水利工程兴建有关。自2000s初以来流域内人类活动对东太湖DJZ钻孔沉积物造成了显著的重金属污染,在东太湖DQG钻孔则要早得多。DJZ钻孔高的沉积物堆积速率对人为污染造成的赋存在沉积物中的重金属起到了稀释作用。20世纪70年代至90年代,东太湖DQG钻孔的来源于人为污染的Pb、Zn、Cu的通量维持在一定的水平,70年代以来为太湖流域经济发展时期,乡镇企业在太湖流域工业产值中占较大比重,而乡镇企业技术较落后,产生的大量工业废水通过河道排入太湖,是湖泊重金属的主要污染源。上个世纪90年代以来,东太湖DQG和DJZ钻孔的来源于人为污染的Pb、Zn、Cu的通量在不断增加,这与区域污染工业类型及经济发展阶段相吻合。20世纪90年代以来太湖流域工业化和城市化迅速发展,大量工业、生活污水排放入湖加剧了湖泊重金属污染。东太湖2000s初以来Pb通量以及人为污染的Pb的通量出现下降,可能与含铅汽油的禁用以及流域内工业调整有关。

### 参考文献(References)

1 Renberg I, Persson M W, Emteryd O. Pre-industrial atmospheric lead contamination detected in Swedish lake sediments[J]. *Nature*, 1994, 368: 323-326.

2 Ndzangou S O, Richer-Lafleche M, Houle D. Sources and evolution of anthropogenic lead in dated sediments from Lake Clair, Quebec, Canada[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2005, 34(3): 1016-1025

3 Hong S, Candelone J P, Patterson C C, et al. Greenland ice evidence of hemispheric lead pollution two millennia ago by Greek and Roman civilizations[J]. *Science*. 1994, 265(5180): 1841-1843

4 Mihelčič G, Šurija B, Juračić M, et al. History of the accumulation of trace metals in sediments of the saline Rogoznica Lake (Croatia) [J]. *Science of the Total Environment*. 1996, 182(1-3): 105-115

5 Boyle J F, Rose N L, Appleby P G, et al. Recent environmental change and human impact on Svalbard: the lake-sediment geochemical record[J]. *Journal of Paleolimnology*, 2004, 31(4): 515-530

6 Siver P A, Wizniak J A. Lead analysis of sediment cores from seven Connecticut lakes[J]. *Journal of Paleolimnology*, 2001, 26(1): 1-10

7 Outridge P M, Stern G A, Hamilton P B, et al. Trace metal profiles in the varved sediment of an Arctic lake[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, 69(20): 4881-4894

8 王苏民, 龚鸿身. 中国湖泊志[M]. 北京: 科学出版社, 1998 [Wang Shuming, Dou Hongsheng. *Chinese Lakes* [M]. Beijing: Science Press, 1998]

9 曹建廷. 长江中下游地区湖泊资源可持续利用[J]. *人民长江*, 2000, 31(7): 41-43 [Cao Jianting. Sustainable utilization of lake resources in the middle and lower reaches of Yangtze River basin [J]. *Yangtze River*, 2000, 31(7): 41-43]

10 于忠华, 黄文钰, 舒金华. 南京市主要湖库水环境现状与演变趋势分析[J]. *国土与自然资源研究*, 2005, 4: 37-39 [Yu Zhonghua, Huang Wenyu, Shu Jinhua. Water environment condition and evolution tendency analysis of the main lakes and reservoirs in Nanjing [J]. *Territory and Natural Resources Study*, 2005, 4: 37-39]

11 谷孝鸿, 范成新, 胡本龙, 等. 固城湖生物资源现状及近20年间的变化趋势[J]. *农村生态环境*, 2005, 21(1): 7-11, 16 [Gu Xiaohong, Fan Chengxin, Hu Benlong, et al. Status and the succession of the biological resources in Lake Gucheng [J]. *Rural Eco-environment*, 2005, 21(1): 7-11, 16]

12 范成新, 羊向东, 史龙新, 等. 江苏湖泊富营养化特征、成因及解决途径[J]. *长江流域资源与环境*. 2005, 14(2): 218-220 [Fan Chengxin, Yang Xiangdong, Shi Longxin, et al. Characteristics and cause of lake eutrophication in Jiangsu Province with suggestions on its control measures [J]. *Resources and Environmental in the Yangtze Basin*, 2005, 14(2): 218-220]

13 上海师院环境保护研究室, 江苏省无锡市环境保护局. 太湖环境质量调查研究[J]. *上海师范学院学报: 自然科学版环境保护专刊*, 1983: 95-115 [Environmental Protection Research Department of Shanghai Teachers University, Environmental Protection Administration of Wuxi City, Jiangsu Province. Investigation of environmental quality of Lake Taihu [J]. *Journal of Shanghai Teachers University: Special Issue of Environmental Protection*, 1983: 95-115]

14 孙顺才, 黄漪平. 太湖[M]. 北京: 海洋出版社, 1993: 219-244 [Sun Shunca, Huang Yiping. *Taihu* [M]. Beijing: Ocean Press, 1993: 219-244]

15 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[J]. 湖泊科学, 2002, 14(3): 235-241 [Fan Chengxin, Zhu Yuxin, Ji Zhijun, et al. Characteristics of the pollution of heavy metals in the sediments of Yilihe River, Taihu basin [J]. Journal of Lake Sciences, 2002, 14(3): 235-241]
- 16 戴秀丽, 孙成. 太湖沉积物中重金属污染状况及分布特征探讨[J]. 上海环境科学, 2001, 20(2): 71-74 [Dai Xiuli, Sun Cheng. The Characteristics of heavy metals distribution and pollution in sediment from Lake Taihu [J]. Shanghai Environmental Sciences, 2001, 20(2): 71-74]
- 17 张于平, 瞿文川. 太湖沉积物中重金属的测定及环境意义[J]. 岩矿测试, 2001, 20(1): 34-36 [Zhang Yuping, Qu Wenchuan. Determination of heavy metal contents in the sediments from Taihu Lake and its environmental significance [J]. Rock and Mineral Analysis, 2001, 20(1): 34-36]
- 18 石浚哲, 刘光玉. 太湖沉积物重金属污染及生态风险性评价[J]. 环境监测管理与技术, 2001, 13(3): 24-26 [Shi Junzhe, Liu Guangyu. Heavy metal pollution and ecological risk assessment [J]. Environmental Monitoring Management and Technology, 2001, 13(3): 24-26]
- 19 Rose N L, Boyle J F, Du Y, et al. Sedimentary evidence for changes in the pollution status of Taihu in the Jiangsu region of eastern China [J]. Journal of Paleolimnology, 2004, 32(1): 41-51
- 20 刘建军, 吴敬禄. 太湖大浦湖区近百年来湖泊记录的环境信息[J]. 古地理学报, 2006, 8(4): 559-564 [Liu Jianjun, Wu Jinglu. Environmental information of recent 100 years recorded sediments of Dapu area in Taihu Lake [J]. Journal of Paleogeography, 2006, 8(4): 559-564]
- 21 刘恩峰, 沈吉, 朱育新, 等. 太湖表层沉积物重金属元素的来源分析[J]. 湖泊科学, 2004, 16(2): 113-119 [Liu Enfeng, Shen Ji, Zhu Yuxin, et al. Source analysis of heavy metal in surface sediment of Lake Taihu [J]. Journal of Lake Sciences, 2004, 16(2): 113-119]
- 22 朱广伟, 秦伯强, 高光, 等. 太湖近代沉积物中重金属元素的累积[J]. 湖泊科学, 2005, 17(2): 143-150 [Zhu Guangwei, Qin Boqiang, Gao Guang, et al. Accumulation characteristics of heavy metals in the sediments of Lake Taihu, China [J]. Journal of Lake Sciences, 2005, 17(2): 143-150]
- 23 姚书春, 李世杰, 薛滨, 等. 南太湖沉积岩芯中金属和营养元素的垂向分布特征及其意义[J]. 生态环境, 2005, 14(2): 178-181 [Yao Shuchun, Li Shijie, Xue Bin, et al. Sedimentary records of metals and nutrients from southern Taihu lake [J]. Ecology and Environment, 2005, 14(2): 178-181]
- 24 陈月秋, 唐远云. 东太湖的由来及其演变趋势[J]. 长江流域资源与环境, 1993, 2(2): 111-118 [Chen Yueqiu, Tang Yuanyun. The origin and evolution trend of the East Taihu lake [J]. Resources and Environmental in the Yangtze Basin, 1993, 2(2): 111-118]
- 25 高俊峰, 韩昌来. 太湖地区的圩及其对洪涝的影响[J]. 湖泊科学, 1999, 11(2): 105-109 [Gao Junfeng, Han Cahnglai. Polders in Taihu Lake Region and its effects on floods [J]. Journal of Lake Sciences, 1999, 11(2): 105-109]
- 26 杨清心, 李文朝. 东太湖围网养鱼后生态环境的演变[J]. 中国环境科学, 1996, 16(2): 101-106 [Yang Qinxin, Li Wenchao. Environmental changes since foundation of pen-fish-farming in East Taihu Lake [J]. China Environmental Science, 1996, 16(2): 101-106]
- 27 杨洪, 易朝路, 邢平等.  $^{210}\text{Pb}$ 法和 $^{137}\text{Cs}$ 法对比研究武汉东湖现代沉积速率[J]. 华中师范大学学报: 自然科学版, 2004, 38(1): 109-113. [Yang Hong, Yi Chaolu, Xing Ping, et al. A comparative study on recent sedimentation rates in Lake Donghu, Wuhan with  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{137}\text{Cs}$  dating techniques [J]. Journal of central China Normal University: Natural science, 2004, 38(1): 109-113]
- 28 Appleby P G. Chronostratigraphic techniques in recent sediments [M] // Last W M, Smol J P, eds. Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. Basin Analysis, Coring, and Chronological Techniques. vol. 1. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001: 187-190
- 29 曾理, 吴丰昌, 万国江, 等. 中国地区湖泊沉积物中 $^{137}\text{Cs}$ 分布特征和环境意义[J]. 湖泊科学, 2009, 21(1): 1-9 [Zeng Li, Wu Fengchang, Wan Guojiang, et al. The distribution characteristic and environmental significance of Cesium-137 deposit profile in Chinese lacustrine sediment [J]. Journal of Lake Science, 2009, 21(1): 1-9]
- 30 Cambrey R S, Cawse P A, Garland J A et al. Observations on radioactivity from the Chernobyl accident [J]. Nuclear Energy. 1987, 26(2): 77-101
- 31 姚书春, 薛滨, 李世杰, 等. 长江中下游湖泊沉积速率的测定及环境意义——以洪湖、巢湖、太湖为例[J]. 长江流域资源与环境, 2006, 15(5): 569-573. [Yao Shuchun, Xue Bin, Li Shijie, et al. Sedimentation rates in Honghu, Chaohu and Taihu lakes in the middle and lower Yangtze river [J]. Resources and Environmental in the Yangtze Basin, 2006, 15(5): 569-573]
- 32 谷孝鸿, 张圣照, 白秀玲, 等. 东太湖水生植物群落结构的演变及其沼泽化[J]. 生态学报, 2005, 25(7): 1541-1548 [Gu Xiaohong, Zhang Shenzhao, Bai Xiuling, et al. Evolution of community structure of aquatic macrophytes in East Taihu Lake and its wetlands [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(7): 1541-1548]
- 33 Silva M A L, Rezende C E. Behavior of selected micro and trace elements and organic matter in sediments of a freshwater system in south-east Brazil [J]. The Science of the Total Environment, 2002, 292(1): 121-128
- 34 Palanques A, Sanchez-Cabeza J A, Masqu P, et al. Historical record of heavy metals in a highly contaminated Mediterranean deposit: The Bes s prodelta [J]. Marine Chemistry, 1998, 61(3): 209-217
- 35 Roach A C. Assessment of metals in sediments from lake Macquarie, New South Wales, Australia, using normalisation models and sediment quality guidelines [J]. Marine Environmental Research, 2005, 59(5): 453-472
- 36 Soto-Jimenez P, ez-Osuna F, Ruiz-Fernandez A C. Geochemical evidences of the anthropogenic alteration of trace metal composition of the sediments of Chiricahueto marsh (SE Gulf of California) [J]. Environment Pollution, 2003, 125(3): 423-432
- 37 Covelli S, Fontolan G. Application of a normalization procedure in determining regional geochemical baselines [J]. Environmental Geology,

- 1997, 30(1): 34-45
- 38 刘恩峰, 沈吉, 朱育新. 粒度沉积物金属元素变化的粒度效应——以太湖沉积岩芯为例 [J]. 湖泊科学, 2006, 18(4): 363-368 [Liu Enfeng, Shen Ji, Zhu Yuxing. The influence of grain size composition on metal content in the sediment: the case of core sediment in Lake [J]. Journal of Lake Sciences, 2006, 18(4): 363-368]
- 39 Li Xiangdong, Shen Zhenguo, Wai W H O, *et al.* Chemical forms of Pb, Zn and Cu in the sediment profile of the Pearl River, Estuary [J]. Marine Pollution Bulletin, 2001, 42(3): 215-223
- 40 Zhang J, Liu C L. Riverine composition and estuarine geochemistry of particulate metals in China—Weathering features, anthropogenic impact and chemical fluxes [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2002, 54(5): 1051-1070
- 41 王婉, 刘咸德, 赵立蔚, 等. 用同位素方法评估天津市汽油无铅化进程 [J]. 中国环境科学研究, 2003, 23(6): 627-630 [Wang Wan, Liu Xiande, Zhao Liwei, *et al.* Assessment of the phase-out of leaded gasoline in Tianjin, China using isotope technique [J]. China Environmental Science, 2003, 23(6): 627-630]
- 42 Bindler R, Renberg I, Brannvall M L, *et al.* A whole-basin study of sediment accumulation using stable lead isotopes and flyash particles in an acidified lake, Sweden [J]. Limnology and Oceanography, 2001, 46(1): 178-188
- 43 Settle D M, Patterson C C. Lead in albacore: guide to lead pollution in Americans [J]. Science, 1980, 207(4436): 1167-1176
- 44 Callender E. Heavy metals in the environment—historical trends [C]// Barbara Sherwood Lollar, eds. Treatise on Geochemistry. Elsevier, 2003: 68-69
- 45 毕建平, 王新莉, 邵凤翔, 等. 中国民用汽车拥有量时间序列动态模型研究 [J]. 河南科学, 2004, 6: 847-840 [Bi Jianping, Wang Xingli, Shao Fengxiang, *et al.* The computer trends imitation research of China Private owned automobile quantity chronically [J]. Henan Science, 2004, 6: 847-840]
- 46 Hao Yunchao, Guo Zhigang, Yang Zuosheng, *et al.* Tracking historical lead pollution in the coastal area adjacent to the Yangtze River Estuary using lead isotopic compositions [J]. Environmental Pollution, 2008, 156(3): 1325-1331
- 47 谢红彬, 陈雯. 太湖流域制造业结构变化对水环境演变影响分析——以苏锡常地区为例 [J]. 湖泊科学, 2002, 14(1): 53-59 [Xie Hongbin, Chen Wen. Impacts of change of industrial structure on the water environmental in Taihu basin: A case study of Suzhou-Wuxi-Changzhou district [J]. Journal of Lake Sciences, 2002, 14(1): 53-59]

## Heavy Metal Pollution History Inferred from East Taihu Lake Cores Sediment

YAO Shu-chun XUE Bin

(State Key Lab of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

**Abstract:** Taihu Lake is the third largest freshwater lake in China. East Taihu Lake with an area of 131 km<sup>2</sup> and water depth of 0.9 m, dominated by macrophyte, is important drinking water source of Suzhou and Shanghai City. Sedimentary cores named DJZ and DQG were collected from East Taihu Lake in 2009 using gravity corer. The length of DJZ and DQG is 59 and 33 cm, respectively. Radio nuclides including <sup>210</sup>Pb and <sup>137</sup>Cs were also analyzed for dating the sediments at both cores. Sediment accumulation rate (SAR) of DQG was averaged to be 0.15 g/cm<sup>2</sup>/a based on 1963 dating marker of <sup>137</sup>Cs. At DJZ core, SAR was higher relative to DQG core showing variation between 1.0 ~ 2.0 g/cm<sup>2</sup>/a. Elements including copper, lead, zinc, chromium, nickel, ferrum and others were analyzed for the purpose of understanding metal accumulation and human impact at East Taihu Lake combined with dating results. Between bottom to 30 cm, Cu, Pb, Zn, Cr and Ni in DJZ core showed increase trend. In the upper 30 cm sediments of DJZ core, the profiles of Pb, Cr and Ni showed relatively constant value while Cu and Zn demonstrated upward increase in these sections. The average contents of Cu, Pb, Zn, Cr and Ni in DQG core were 22.34, 50.83, 98.35, 66.19, 26.74 mg/kg respectively for sediments between 0 and 9 cm, while 13.18, 26.25, 46.33, 58.95, 20.45 mg/kg for 9 ~ 33 cm sediments. In this paper Fe element as a proxy of grain size was selected for normalization and calculation of metal enrichment factor (EF) and anthropogenic heavy metal fluxes. The results showed that, except the cores surface sediment, Pb, Zn, Cu, Cr and Ni enrichment factors did not exceed 2, and EF of Cr and Ni was nearly 1. It was revealed that the heavy metals including lead, copper, zinc were continuously enriched in recent decades, especially since the 1970s at East Taihu Lake. From 1970s to 1990s anthropogenic fluxes of Pb, Zn, Cu changed slightly, and then increased corresponding to development of industry in catchment. Since early 2000s, the total and anthropogenic Pb fluxes declined, which may be due to forbidden use of leaded petrol in China and adjustment of industrial structure in basin in the period.

**Key words:** East Taihu Lake; sediment; heavy metal; pollution