

文章编号: 1000-0550(2010)04-0783-07

# 近百年来东平湖沉积通量变化与环境<sup>①</sup>

陈影影<sup>1</sup> 陈诗越<sup>1</sup> 姚敏<sup>2</sup> 刘加珍<sup>1</sup> 张菊<sup>1</sup>

(1. 聊城大学环境与规划学院 山东聊城 252059; 2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所 南京 210008)

**摘要** 根据<sup>210</sup>Pb、<sup>137</sup>Cs法建立的东平湖现代沉积年代序列,结合沉积物粒度与烧失量变化特征以及黄河变迁与流域人类活动的特点,分析探讨了1889年以来东平湖沉积通量的变化。研究表明,百年来东平湖沉积环境不稳定,沉积通量变化较大:1889~1938年,沉积通量较高且基本稳定,1938~1965年,沉积通量逐年下降,1965~2000年,沉积通量整体较低且基本稳定,2000年以来,沉积通量呈逐年上升趋势。早期的高沉积通量与东平湖作为黄河自然滞蓄洪区有关,后期由于人类活动(湖区治理、黄河水利工程建设等)控制了黄河水的自然倒灌,导致了沉积通量的下降并趋于稳定,近期沉积通量的上升是湖区经济活动增强的反映。

**关键词** <sup>210</sup>Pb <sup>137</sup>Cs 沉积通量 沉积环境 东平湖

**第一作者简介** 陈影影 女 1984年出生 硕士研究生 湖泊沉积与环境演化 E-mail: chenyy1023@163.com

**通讯作者** 陈诗越 E-mail: chenshiyue@lcu.edu.cn

**中图分类号** P512.2 **文献标识码** A

## 0 引言

湖泊沉积物作为地表物质运移的主要宿体,连续、高分辨地记录了环境信息,是研究过去环境变化的重要档案馆<sup>[1]</sup>。由于湖泊沉积记录具有连续性,可以弥补历史记载的不足<sup>[2]</sup>。通过湖泊沉积物的研究,可以提取自然变化和人类活动的综合信息,对评价、预测区域环境质量,了解湖泊演化、环境变迁等具有重要意义<sup>[3-4]</sup>。沉积通量是单位时间内单位面积上形成的堆积物质量,它是判断沉积物来源变化最直接的指标之一,通过研究湖泊沉积通量的变化,能够帮助我们认识湖泊沉积环境演化过程及其稳定性<sup>[5-6]</sup>。

在现代沉积物的测年研究中,利用过剩的<sup>210</sup>Pb和人工核素<sup>137</sup>Cs测定近百年来沉积物地质年龄,已获得了广泛的应用<sup>[7-11]</sup>。在实际测年中,通常同时采用这两种方法来相互补充、相互印证,使沉积通量的研究更为准确。本文采用<sup>137</sup>Cs法和<sup>210</sup>Pb法对比研究东平湖近代沉积物的沉积通量,并对沉积物进行粒度与550℃烧失量的分析,结合东平湖的历史沿革,探讨了沉积通量的变化与自然因素和人类活动的关系,以期能揭示一百多年来东平湖沉积环境的演化历史,为东平湖的合理开发利用与保护提供基础资料。

## 1 研究区概况

东平湖(N35°43′~36°07′,E116°02′~116°18′)位于山东东平县境的西部(图1),是山东省第二大淡水湖泊,地质时期属于古大野泽的一部分。该湖为黄河下游滞洪湖,现湖面平均高程约38m,多年平均水深2~4m,总面积627km<sup>2</sup>,由老湖(一级湖)和新湖(二级湖)两部分组成,其中老湖区(属黄河流域)面积209km<sup>2</sup>,自然滞洪,常年有水。新湖区(属淮河流域)418km<sup>2</sup>,在一般水情年份,新湖区内从事垦殖。当黄河艾山站流量超过10000m<sup>3</sup>/s洪水,或下游堤防受到严重威胁时,使用新湖区开闸分洪。

湖水黄绿色,透明度0.2~1.46m,平均0.58m,多年平均水温13.9℃,年内5~9月月均水温18℃以上。集水面积9064.0km<sup>2</sup>,补给系数61.2,全湖总库容量达4.0×10<sup>9</sup>m<sup>3</sup>。湖水依赖地表径流与湖面降水补给,大清河(又名汶水)为主要入湖河流。出流经陈山口闸、清河门闸下泄黄河<sup>[12]</sup>。

本地区属暖温带半湿润季风气候,四季分明,年均气温13.3℃,1月平均气温-6.3℃,7月平均气温31.6℃。该区降水有显著的季节性,汛期降水占全年的70%以上,其中7~8月份降水量占汛期降水量的70%多,年均降水量640.5mm,最大年降水量1064.7mm(1964年),最小降水量261.6mm(1966

①国家自然科学基金项目(批准号:40772209),山东省社科规划项目(编号:07DJGZ08)资助。  
收稿日期:2009-08-17;收修稿日期:2009-10-22

年)<sup>[12]</sup>。东平湖作为汶河水系的客水汇集中心、黄河的滞洪水库,其主要作用是削减黄河洪峰,调蓄黄河、汶河洪水,同时它也是“南水北调”及山东省“西水东送”的枢纽工程<sup>[13]</sup>。

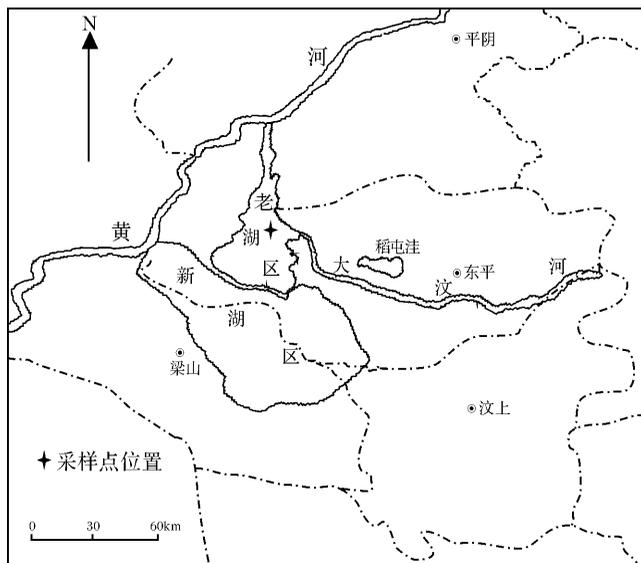


图1 东平湖地理位置示意图

Fig. 1 Schematic map showing location of the Dongping Lake

## 2 材料与方法

### 2.1 样品采集与实验室分析

2008年4月在湖泊(老湖区)中心部位(35°59′11.6″N, 116°11′35.3″E)水深3.85 m处,用水上平台钻取长156 cm的岩芯柱,用于常规实验;另用重力采样器采得60 cm短岩芯用于<sup>210</sup>Pb和<sup>137</sup>Cs测年。短岩芯野外现场进行分样:顶部20 cm每0.5 cm间隔、下部40 cm按1 cm间隔分样,装入专用的样品袋中,密封保存。平台所采岩芯带回实验室分样冷藏或避光保存以进行粒度、烧失量等指标分析。所采样品均送到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进行分析。

粒度样品以0.5 cm间隔连续采样后,取样品0.2~0.5 g,在烧杯中加入10 ml浓度为10%的H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>,在电热板上加热使其充分反应以有效除去样品中的有机质;再加入10 ml浓度为10%的HCl并煮沸以除去碳酸盐;将烧杯中注满蒸馏水并静置一夜,将上层清液抽去,在底层的浊液中加入10 ml浓度为0.05 mol/l的分散剂(Na<sub>6</sub>(PO<sub>3</sub>)),以使样品颗粒充分分散;将样品用超声波震荡仪振荡10 min后,将全部浊液移至英国Mastersizer 2000激光粒度仪的进样槽进行测量,仪器的测试范围为2 mm~0.02 μm,多次重

复测量误差一般<2%。测试完毕后,激光粒度仪自动给出样品中值粒径、各粒级百分含量等指标。

<sup>210</sup>Pb和<sup>137</sup>Cs测定是先将样品风干后选取适量(2~5 g),研磨至过100目孔筛,然后采用γ分析方法,分析用仪器为美国EG & GOrtec公司生产的高纯锗井型探测器和IBM微机构成的16K多道分析器。<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比对标。

在550℃温度下,对样品有机物进行烧失量(LOI)测定:将研磨至200目以下的土样放入烘箱中,在105℃条件下烘干5 h以上,将样品置于瓷坩锅中并精确称量其质量(精确至0.000 1 g),再放入马弗炉中在550℃下灼烧5 h,取出后立即置于干燥器中,待冷却至室温后称重,然后按照下式得出烧失量的百分含量:LOI = 100(1 - W<sub>550</sub>/W<sub>105</sub>),式中W<sub>105</sub>为干样重量,W<sub>550</sub>为550℃加热后的样品重量。依据烧失量结果作出剖面烧失量变化曲线图(图3a)。

### 2.2 沉积通量估算

<sup>137</sup>Cs是20世纪50年代初核爆炸产生的一种在全球范围内广泛分布的人工放射性元素,半衰期为30.17 a。<sup>137</sup>Cs可被明显检测到的最早年份大约是1954~1955年,至1963年左右达到明显的峰值,1963年<sup>137</sup>Cs蓄积峰是国内外公认的断代标志<sup>[1]</sup>;70年代初又进行了几次大气层核试验,所以在部分地区产生了一个可辨别的<sup>137</sup>Cs沉降峰,可作为一个辅助时标<sup>[14]</sup>;1986年又出现一次<sup>137</sup>Cs沉降峰,它是切尔诺贝利核电站泄漏的产物<sup>[15]</sup>。因此,利用沉积物柱芯中<sup>137</sup>Cs的3个蓄积峰位置(分别对应于1963年、1974年和1986年)作为计年时标,可以估算出自1963年以来东平湖各时期的平均沉积通量。

天然放射性铅同位素<sup>210</sup>Pb是<sup>238</sup>U系列中<sup>226</sup>Ra衰变的中间产物<sup>222</sup>Rn的α衰变子体,半衰期为22.3 a<sup>[7]</sup>。通常情况下,<sup>210</sup>Pb与其母体<sup>226</sup>Ra处于平衡状态,沉积物各层中<sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub>的计算可用<sup>210</sup>Pb的总量减去<sup>226</sup>Ra的含量得到<sup>[7]</sup>。通过沉积物柱芯中不同层节样品的<sup>210</sup>Pb比活度分析,可推算出某一层节的沉积年龄,进而计算出沉积通量。通过研究东平湖沉积岩芯<sup>210</sup>Pb随深度垂直分布变化(图2c)可以发现,<sup>210</sup>Pb波动幅度较大,不完全呈指数分布,不适宜用CIC模式计算<sup>[16-17]</sup>。

本文根据沉积柱芯各层节沉积年龄(年代数据参见文献[18])利用以下公式计算沉积物各层节的沉积通量:

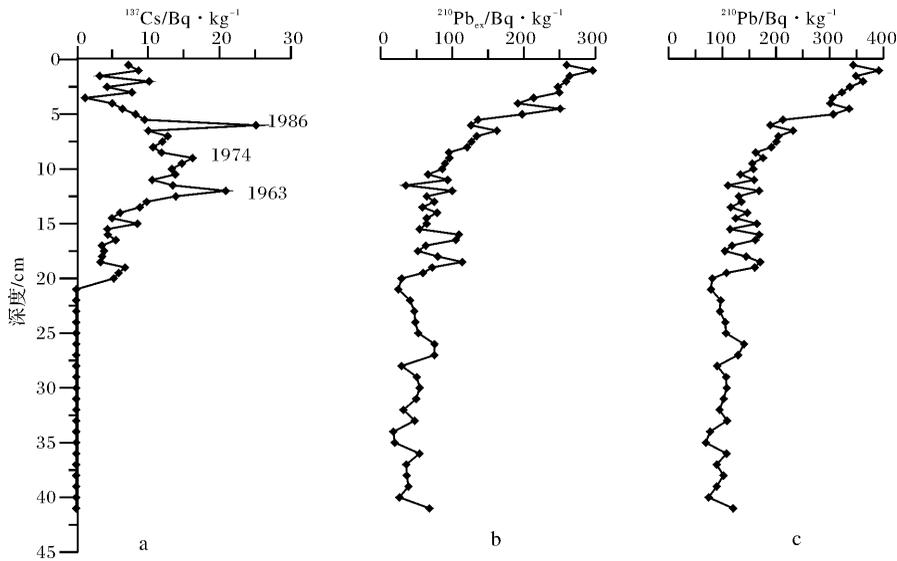


图2 东平湖沉积柱芯 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 和 $^{210}\text{Pb}$ 蓄积垂直分布

Fig. 2 Dating results of  $^{137}\text{Cs}$  (a),  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  (b) and  $^{210}\text{Pb}$  (c) of the sediment core from Dongping Lake

$$F = H\lambda / \ln(I_0/I_h) \times \rho_{\text{dry}}$$

式中  $F$  为沉积通量  $H$  为深度  $\rho$  为  $^{210}\text{Pb}$  的衰变常数  $I_0$  为沉积岩芯表层的  $^{210}\text{Pb}$  放射性比活度  $I_h$  为深度  $H$  处的  $^{210}\text{Pb}$  放射性比活度  $\rho_{\text{dry}}$  为沉积物干密度。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 $^{137}\text{Cs}$ 反映的沉积通量

东平湖沉积柱芯中  $^{137}\text{Cs}$  比活度随深度变化特征如图 2a 所示。从图 2a 可以看出  $^{137}\text{Cs}$  的活性在约 21 cm 处达到本底, 呈现出 3 个明显的蓄积峰, 根据  $^{137}\text{Cs}$  在北半球湖泊沉积剖面中的分布规律, 可初步断定 12 cm (20.88 Bq/kg) 处  $^{137}\text{Cs}$  比活度峰值对应于 1963 年全球  $^{137}\text{Cs}$  散落高峰, 9 cm (16.24 Bq/kg) 和 6 cm (25.11 Bq/kg) 处的  $^{137}\text{Cs}$  比活度蓄积峰可能分别对应于 1974 年的全球核散落和 1986 年前苏联切尔诺贝利核电站核泄漏。利用 1963 年  $^{137}\text{Cs}$  的蓄积峰位置作为计年时标, 计算出东平湖沉积物柱芯自 1963 年到 2007 年的平均沉积通量为  $0.145 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。此外, 在钻孔表层能检测到  $^{137}\text{Cs}$ , 这可能由于水平搬运的新沉积物中含有  $^{137}\text{Cs}$  所致。

#### 3.2 $^{210}\text{Pb}$ 反映的沉积通量

东平湖沉积柱芯中  $^{210}\text{Pb}$  测量结果显示,  $^{210}\text{Pb}$  含量高且变化幅度较大, 不完全呈指数分布, 在 41 cm 以下低于本底值 (图 2c)。沉积物的粒度特征是恢复古气候、古环境演化状况的良好指标, 粒度组成是反 (图 4) 分析可知, 在过去一百多年东平湖沉积通量变

映其沉积时的水动力条件和沉积介质环境的参数之一, 粒径的大小则直接反映了沉积水动力状况<sup>[19-21]</sup>。东平湖沉积物的主要来源有河流传输 (黄河、大汶河、农田径流等) 和湖岸侵蚀等, 粒度分析结果表明, 东平湖沉积物粒度组成主要是以黏粒 ( $< 4 \mu\text{m}$ )、细粉砂 ( $4 \sim 16 \mu\text{m}$ ) 和粗粉砂 ( $16 \sim 64 \mu\text{m}$ ) 为主, 其总含量达 98% 以上, 其中黏土含量占 25.12% ~ 51.17% (图 3c), 细粉砂占 43.86% ~ 55.26% (图 3d), 粗粉砂占 4.88% ~ 22.50% (图 3e), 砂含量极少, 一般不超过 2%; 剖面平均粒径为  $9.72 \mu\text{m}$ , 平均粒径随深度的变化情况见图 3b。烧失量 (LOI) 是对高温燃烧之后土壤有机质的损失量的测定, 它可以反映出过去气候和环境状况, 其数值波动对所对应的环境状况和气候特征具有明显的指示意义<sup>[22]</sup>。东平湖沉积物中  $550^\circ\text{C}$  烧失量特征显示, 其变化主要集中在 4.63% ~ 8.74% 之间, 随深度变化情况见图 3a。类似于大多数亲颗粒反应元素,  $^{210}\text{Pb}$  也主要吸附于细颗粒物, 如黏土、有机质等<sup>[23]</sup>, 该区高含量的黏土、有机质等, 与较高的  $^{210}\text{Pb}$  放射性比活度相对应。

#### 3.3 东平湖百年来的沉积环境

流域降水量 (洪涝)、水库修建、湖泊围垦、移民返迁等自然与人为因素对湖泊沉积通量的变化均有很大影响<sup>[24]</sup>。作为黄河下游滞洪湖, 东平湖现代沉积环境复杂, 受自然和人为干扰均较大, 结合东平湖的历史沿革, 根据  $^{210}\text{Pb}$ CRS 模式计算得出的沉积通量变化较大, 大致经历以下 4 个环境变化阶段:

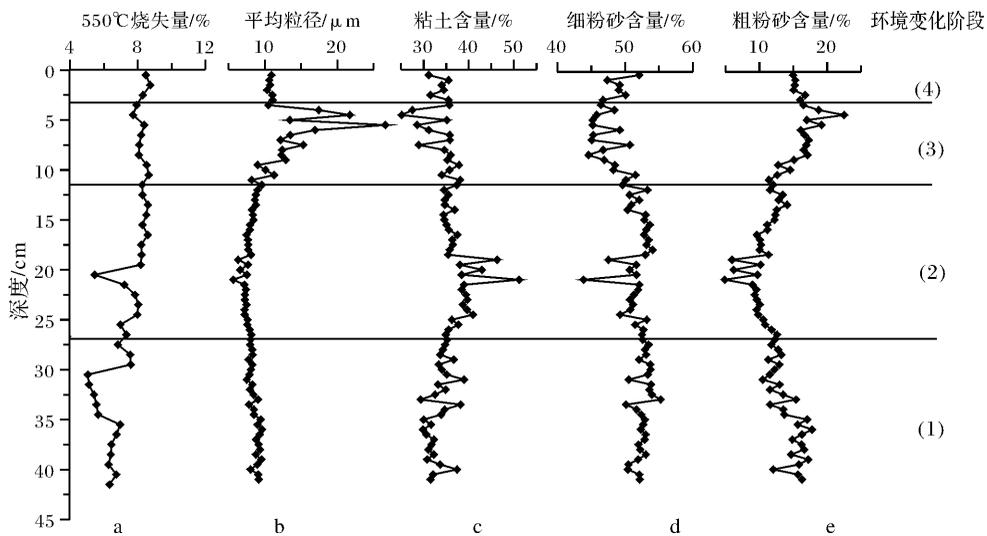


图3 东平湖沉积柱芯 550℃ 烧失量(a)、平均粒径(b)、黏土含量(c)、细粉砂含量(d)和粗粉砂含量(e)垂直分布

Fig. 3 Vertical variation of loss - on - ignition( at 550℃ ) ( a ) , average particle size( b ) , clay content( c ) , fine-silty content( d ) and coarse silt content( e )



图4 东平湖沉积柱芯 1889 年以来沉积通量的变化

Fig. 4 The sedimentary flux of the sediment core in the Dongping Lake since 1889

(1) 1889 ~ 1938 年(27 ~ 41 cm), 沉积通量持续较高且基本稳定(平均为  $0.292 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )。该阶段 LOI 平均值为 6.31%; 平均粒径为 7.75 ~ 9.61  $\mu\text{m}$ , 平均值为 8.57  $\mu\text{m}$ ; 黏土含量变化在 29.84% ~ 38.94%, 平均值为 33.35%; 细粉砂含量变化在 50.15% ~ 55.26%, 平均值为 52.59%。平均粒径和黏土、细粉砂含量变化均较小, 反映了该阶段东平湖水动力条件较弱, 沉积物来源非常稳定。据东平县志等资料记载<sup>[25]</sup>, 19 世纪末至 20 世纪 40 年代初, 东平县全县人口增长缓慢, 经济十分落后, 人类活动影响相对较弱, 东平湖主要以自然沉积为主。虽然该阶段东平湖水动力条件较弱, 但由于作为入湖径流

之一的黄河携有大量泥沙(以细粉砂为主), 沉积物来源比较丰富, 因此该阶段沉积通量整体较高且基本稳定。

(2) 1938 ~ 1965 年(11.5 ~ 27 cm), 沉积通量呈逐年下降之势, 平均约  $0.213 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。该阶段 LOI 平均值增加到 7.81%; 平均粒径为 5.64 ~ 9.57  $\mu\text{m}$ , 平均值为 7.76  $\mu\text{m}$ ; 黏土含量变化在 34.41% ~ 51.17%, 平均值为 37.70%; 细粉砂含量变化在 43.86% ~ 54.08%, 平均值为 51.60%。在 18 ~ 21 cm 处, 各粒度参数明显波动, 而在其它层位相对比较稳定, 表明此阶段沉积环境可能发生了变化。据有关资料记载<sup>[25 26]</sup>, 国民党军于 1938 年在花园口决黄河大堤, 黄河改道夺淮入海, 东平湖大部逐步干涸(尤其原新湖区部分全部干涸)。直到 1947 年堵塞花园口, 黄河复回故道入海, 东平湖重又蓄水。1938 ~ 1947 年没有了携有大量泥沙的黄河水的注入, 东平湖的沉积通量开始迅速下降。此外, 为了防止黄河泛滥, 保障湖区群众的人身财产安全, 于 20 世纪 50、60 年代修建了大量的水利设施, 如 1958 ~ 1967 年先后完成十里堡、徐庄、耿山口、国那里、石洼、林辛进湖闸和陈山口、清河门出湖闸等。这些水利设施的修建, 对洪水能起到一定的调蓄作用, 但同时对于入湖泥沙也有拦截作用, 能够降低入湖泥沙量, 从而减小了沉积通量。

(3) 1965 ~ 2000 年(3 ~ 11.5 cm), 沉积通量较低且基本稳定在  $0.141 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  左右, 与<sup>137</sup>Cs

测年分析显示该地区在 1965 ~ 2007 年之间的平均沉积物通量  $0.145 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  较一致。该阶段 LOI 平均值略有增大, 约 8.20%; 平均粒径为 8.18 ~ 26.60  $\mu\text{m}$ , 平均值为 13.57  $\mu\text{m}$ , 大于剖面平均值 9.72  $\mu\text{m}$ ; 黏土含量变化在 25.12% ~ 38.06%, 平均值为 33.77%; 细粉砂含量变化在 44.60% ~ 51.53%, 平均值为 47.47%。各粒度组成和参数发生明显变化, 黏土、细粉砂平均含量均减小, 平均粒径波动变化并明显增大, 反映出该阶段沉积环境的不稳定。该阶段沉积物平均粒径较大可能与来自黄河的沉积物源减少, 而来自大汶河和地表径流的沉积物源增加有关。据东平县志等有关资料记载, 东平湖水库自 1963 年改为防洪运用后, 汛期除黄河发生超过下游河段防洪能力的较大洪水需要有控制地分洪进湖外, 一般中、小洪水已不再进湖调蓄, 水库(老湖区)只接纳汶河流域的来水<sup>[25]</sup>。另外, 自 20 世纪 60 年代以来, 随着进湖闸、出湖闸等各种水利工程的竣工, 已经可以对东平湖蓄水泄水进行人工控制。20 世纪 70 年代以来降水偏少, 再加上水土保持显著生效以及上中游大量水库的运行所产生的拦沙作用等人类活动的影响, 使得黄河来水来沙呈减小趋势<sup>[27]</sup>。1986 ~ 1995 年, 黄河年径流量和输沙量仅为过去长期平均的 40% 左右; 1996 ~ 2000 年仅为过去长期平均的 19% 左右<sup>[28]</sup>。总体来看, 这段时期人类对东平湖沉积物通量的影响相对较大。

(4) 2000 年以来(0 ~ 3 cm), 沉积物通量迅速逐年上升, 平均值达到  $0.167 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。该阶段 LOI 平均值继续增加, 为 8.36%; 平均粒径为 10.30 ~ 11.05  $\mu\text{m}$ , 平均值为 10.78  $\mu\text{m}$ ; 黏土含量变化在 31.13% ~ 35.52%, 平均值为 33.69%; 细粉砂含量变化在 47.36% ~ 52.08%, 平均值为 49.08%。平均粒径变化较小, 黏土和细粉砂含量变化也不大, 表明该阶段沉积环境相对比较稳定。沉积物通量迅速上升主要与人为因素有关, 近年来, 由于流域内人口和经济的快速发展, 人地矛盾日益突出。毁林开荒和围湖造田等现象时有发生, 导致地表植被破坏, 加剧了水土流失<sup>[29]</sup>。此外, 随着东平湖上游工业经济的快速发展和人口的急剧增长, 大量未经处理的工业废水和生活污水经由大汶河排入东平湖, 并呈逐年增长之势<sup>[30]</sup>, 不仅严重污染水质, 也带来了丰富的沉积物。另外, 大量水利工程的建设及对东平湖湖沙开采力度的不断加大, 对沉积速率的增大也有很大影响。如 2002 年 4 月, 东平湖退水入黄工程开工; 2003 年对陈山

口、清河门两座出湖闸进行疏浚<sup>[31]</sup>。再加上近年来东平湖人工养殖活动蓬勃发展, 2002 年, 湖内水生经济植物面积 2 800  $\text{hm}^2$ , 人工养殖面积 1 666.6  $\text{hm}^2$ , 其中网围养殖面积 1 333.3  $\text{hm}^2$ <sup>[31]</sup>; 2004 年网围养殖面积已达 2 670  $\text{hm}^2$ <sup>[29]</sup>, 人工养殖不仅污染水体, 大量水草等植物残骸在湖底腐烂沉积, 也会导致沉积物通量逐年增长。

## 4 结论

沉积柱芯剖面上有明显的 1963、1974 和 1986 年<sup>137</sup>Cs 蓄积峰, 以 1963 年为时标, <sup>137</sup>Cs 法测得 1963 年以来平均沉积物通量为  $0.145 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。<sup>210</sup>Pb CRS 模式下得到一百多年来沉积物通量变化较大, 大致历经了 4 个阶段:

(1) 1889 ~ 1938 年, LOI 相对较小, 各粒度组成和参数变化不大, 沉积物来源较为稳定, 该阶段受黄河影响较大, 沉积物通量较高且基本稳定, 以自然沉积为主, 平均为  $0.292 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

(2) 1938 ~ 1965 年, 在 18 ~ 21 cm 处, LOI 和各粒度组成与参数明显波动, 而在其它层位相对比较稳定, 表明此阶段沉积环境可能发生了变化, 再加上黄河改道及各种水利工程的修建等原因, 沉积物通量逐年下降, 平均为  $0.213 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

(3) 1965 ~ 2000 年, 此阶段 LOI 略有增大, 各粒度组成和参数发生较明显变化, 反映出沉积环境的不稳定; 此外, 随着各种进、出湖闸的竣工及黄河年均径流量、输沙量的减小, 该阶段沉积物通量整体较低且基本稳定, 平均为  $0.141 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 与<sup>137</sup>Cs 法测得 1963 年以来平均沉积物通量  $0.145 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  较一致。

(4) 2000 年以来, LOI 整体继续呈增大趋势, 各粒度组成和参数变化相对较小, 表明沉积环境相对比较稳定; 另外, 随着东平湖上游工业经济快速发展及库区移民数量的急剧增加, 大量未经处理的工业废水和生活污水排入东平湖, 再加上近年来东平湖人工养殖活动蓬勃发展及对湖沙的开采力度不断加大, 沉积物通量又开始逐年上升, 平均为  $0.167 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。早期的高沉积物通量与东平湖作为黄河自然滞蓄洪区有关, 后期由于人类活动(湖区治理、黄河水利工程建设等)控制了黄河水的自然倒灌, 导致了沉积物通量的下降并趋于稳定, 近期沉积物通量的上升是湖区经济活动增强的反映。

致谢 感谢王苏民研究员对本文提出的建设性

修改意见,中国科学院南京地理与湖泊研究所羊向东研究员、吴艳宏研究员、张恩楼副研究员、潘红玺副研究员、王荣博士参加了野外采样工作,室内分析得到了夏威夷副研究员、刘恩峰博士等的帮助,特此感谢。

### 参考文献(References)

- 万国江. 环境质量的地球化学原理 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1998 [Wan Guojiang. Geochemical Principles of Environmental Quality [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1998]
- 王苏民, 张振克. 中国湖泊沉积与环境演变研究的新进展 [J]. 科学通报, 1999, 44(6): 579-587 [Wang Sumin, Zhang Zhenke. New research progress on lake sediments and environment evolution of China [J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 44(6): 579-587]
- 王小林, 姚书春, 薛滨. 江苏固城湖近代沉积<sup>210</sup>Pb、<sup>137</sup>Cs 计年及其意义 [J]. 海洋地质动态, 2007, 23(4): 21-25 [Wang Xiaolin, Yao Shuchun, Xue Bin. Modern sedimentary <sup>210</sup>Pb, <sup>137</sup>Cs dating and its significance of Gucheng Lake, Jiangsu Province [J]. Marine Geology Letters, 2007, 23(4): 21-25]
- 羊向东, 王苏民, 沈吉, 等. 近 0.3ka 来龙感湖流域人类活动的湖泊环境响应 [J]. 中国科学: D 辑, 2001, 30(12): 1031-1038 [Yang Xiangdong, Wang Sumin, Shen Ji, et al. Response to human activities of Longgan Lake during the last 0.3ka [J]. Science in China: Series D, 2001, 30(12): 1031-1038]
- Jordan G, Van Rompaey A, Szilassi P, et al. Historical land use changes and their impact on sediment fluxes in the Balaton basin (Hungary) [J]. Agric. Ecosyst. Environ., 2005, 108: 119-133
- 章伟艳, 张富元, 陈荣华, 等. 南海深水区晚更新世以来沉积速率、沉积通量与物质组成 [J]. 沉积学报, 2002, 20(4): 668-674 [Zhang Weiyang, Zhang Fuyuan, Chen Ronghua, et al. Constituents of matter and sedimentation fluxes and sedimentation rates of deep-water sedimentation during the Late Pleistocene in the south China sea [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2002, 20(4): 668-674]
- 万国江. 现代沉积的<sup>210</sup>Pb 计年 [J]. 第四纪研究, 1997, (3): 230-239 [Wan Guojiang. <sup>210</sup>Pb dating for recent sedimentation [J]. Quaternary Sciences, 1997, (3): 230-239]
- Appleby P G. Dating recent sediments by Pb: Problems and solutions [M]//Last W M, Smol J P. Dating of Sediments of Determination of Sedimentation Rate: Proceedings of STUK Symposium. Helsinki: STUK, 1998: 7-20.
- Yi Chaolu, Liu Huifang, Neil L Rose, et al. Sediment sources and the flood record from Wanghu lake, in the middle reaches of the Yangtze River [J]. Journal of Hydrology, 2006, 329: 568-576.
- 夏威夷, 薛滨. 吉林小龙湾沉积速率的<sup>210</sup>Pb 和<sup>137</sup>Cs 年代学方法测定 [J]. 第四纪研究, 2004, 24(1): 124-125. [Xia Weilan, Xue Bin. <sup>210</sup>Pb and <sup>137</sup>Cs chronological measurement on sedimentation rate of Xiaolongwan, Jilin [J]. Quaternary Sciences, 2004, 24(1): 124-125]
- 雷震, 金玉仁, 程建平, 等. 戈壁汇水区测年与沉积速率研究 [J]. 原子能科学技术, 2007, 41(5): 614-617 [Lei Zhen, Jin Yuren, Cheng Jianping, et al. Study on chronology establishment and sedimentation rate in Gobi Cathments [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2007, 41(5): 614-617]
- 王苏民, 窦鸿生. 中国湖泊志 [M]. 北京: 科学出版社, 1998 [Wang Sumin, Dou Hongsheng. Chinese Lakes [M]. Beijing: Science Press, 1998]
- 李洪书, 高峰, 杜瑞香, 等. 东平湖新湖分区运用的探讨 [J]. 山东国土资源, 2005, 21(10): 48-50 [Li Hongshu, Gao Feng, Du Ruixiang, et al. Study on new lake division utilization in Dongping Lake [J]. Land and Resources in Shandong Province, 2005, 21(10): 48-50]
- 项亮, 吴瑞金, 吉磊. <sup>137</sup>Cs 和<sup>241</sup>Am 在滇池、剑湖沉积孔柱中的蓄积分布及时标意义 [J]. 湖泊科学, 1996, 8(1): 27-34 [Xiang Liang, Wu Ruijin, Ji Lei. <sup>137</sup>Cs and <sup>241</sup>Am profiles and dating of sediments from two lakes in Yunnan Province, China [J]. Journals of Lake Sciences, 1996, 8(1): 27-34]
- 万国江, 白占国, 黄荣贵, 等. 湖泊现代沉积作用核素示踪研究新进展 [J]. 地质地球化学, 1996, (2): 9-13 [Wan Guojiang, Bai Zhanguo, Huang Ronggui, et al. New research progress on nuclein tracer of modern lake sedimentation [J]. Geology Geochemistry, 1996, (2): 9-13]
- Appleby P G, Oldfield F. The calculation of <sup>210</sup>Pb dates assuming a constant rate of supply of unsupported <sup>210</sup>Pb to the sediment [J]. Catena, 1978(5): 1-8
- William M L, John P S. Tracking Environmental Change Using Lake Sediment, Volume 1: basin analysis, coring, and chronological techniques [M]. Kluwer Academic Publishers, 2004: 186-188
- 陈诗越, 王苏民, 陈影影, 等. 东平湖沉积物<sup>210</sup>Pb、<sup>137</sup>Cs 垂直分布及年代学意义 [J]. 第四纪研究, 2009, 29(5): 981-987 [Chen Shiyue, Wang Sumin, Chen Yingying, et al. Vertical distribution and chronological implication of <sup>210</sup>Pb and <sup>137</sup>Cs in sediments of Dongping Lake, Shandong Province [J]. Quaternary Sciences, 2009, 29(5): 981-987]
- 陈诗越, 王苏民, 金章东, 等. 青藏高原中部湖泊沉积物中 Zr / Rb 值及其环境意义 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2003, 23(4): 35-38 [Chen Shiyue, Wang Sumin, Jin Zhangdong, et al. Variation of Zr/Rb ratios in lacustrine sediments of the central Tibetan Plateau and environment implications [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2003, 23(4): 35-38]
- 冯金良, 朱立平, 李玉香. 藏南沉错湖泊三角洲的沉积相及沉积环境 [J]. 地理研究, 2004, 23(5): 649-656 [Feng Jinliang, Zhu Liping, Li Yuxiang. Sedimentary environments and facies about Chen Co lacustrine delta, South Tibetan Plateau [J]. Geographical Research, 2004, 23(5): 649-656]
- 谢又予, 等. 沉积地貌分析 [M]. 北京: 海洋出版社, 2000: 03 [Xie Youyu, et al. Analysis of Sedimentary Landforms [M]. Beijing: Ocean Press, 2000: 03]
- 张佳华. 烧失量数值波动对北京地区过去气候与环境的特征响应 [J]. 生态学报, 1998, 18(4): 343-347 [Zhang Jiahua. The response of loss-on-ignition range to past climate and environment in Beijing [J]. Acta Ecologica Sinica, 1998, 18(4): 343-347]
- Jia J J, Gao S, Xue Y C. Sediment dynamic processes of the Yuehu

- inlet system, Shandong Peninsula, China [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2003, 57: 783-801
- 24 刘恩峰, 羊向东, 沈吉, 等. 近百年来湖北太湖水沉积通量变化与流域降水量和人类活动的关系 [J]. *湖泊科学*, 2007, 19(4): 407-412 [Liu Enfeng, Yang Xiangdong, Shen Ji, *et al.* Sedimentary flux of Lake Taibai, Hubei Province and correlations with precipitation and human activities in its catchment during the last century [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2007, 19(4): 407-412]
- 25 山东省东平县志编纂委员会. 东平县志 [M]. 济南: 山东人民出版社, 1989 [Compiling Team for Annals of Dongping County. *Annals of Dongping County* [M]. Jinan: People's Publishing House of Shandong, 1989]
- 26 东平湖志编纂委员会. 东平湖志 [M]. 济南: 山东大学出版社, 1993 [Compiling Team for Dongping Lake. *Annals of Dongping Lake* [M]. Jinan: Press of Shandong University, 1993]
- 27 许炯心. 黄河下游河道输沙功能的时间变化及其原因 [J]. *地理研究*, 2006, 25(2): 276-284 [Xu Jiongxin. Temporal variation in sediment transferring function of the Lower Yellow River and the formative causes [J]. *Geographical Research*, 2006, 25(2): 276-284]
- 28 任美镔. 黄河的输沙量: 过去、现在和将来——距今15万年以来黄河泥沙收支表 [J]. *地球科学进展*, 2006, 21(6): 551-563 [Ren Mei'e. Sediment discharge of the Yellow River, China: past, present and future: A synthesis [J]. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(6): 551-563]
- 29 郑昭佩, 张敏, 阮振宇, 等. 东平湖湿地资源开发与可持续利用研究 [J]. *资源环境与发展*, 2007, (4): 24-27 [Zheng Zhaopei, Zhang Min, Ruan Zhenyu, *et al.* Development and sustainable use about the wetland resources of Dongping Lake [J]. *Resources Environment and Development*, 2007, (4): 24-27]
- 30 陈诗越, 董杰, 张重阳. 东平湖生态环境现状及流域可持续发展对策研究 [J]. *安徽农业科学*, 2007, 35(5): 1436-1437 [Chen Shiyue, Dongjie, Zhang Chongyang. Countermeasure study on environmental status of Dongping Lake and sustainable development of its catchment [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2007, 35(5): 1436-1437]
- 31 山东省东平县地方志编纂委员会. 东平县志(1986-2003) [M]. 北京: 中华书局, 2006 [Compiling Team for Annals of Dongping County, Shandong Province. *Annals of Dongping County(1986-2003)* [M]. Beijing: Zhonghua Publishing House, 2006]

## Sedimentary Flux Variation and Environment of Dongping Lake During the Last Century

CHEN Ying-ying<sup>1</sup> CHEN Shi-yue<sup>1</sup> YAO Min<sup>2</sup> LIU Jia-zhen<sup>1</sup> ZHANG Ju<sup>1</sup>

(1. School of Environment and Planning, Liaocheng University, Liaocheng Shandong 252059;

2. Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

**Abstract** Dongping lake is located in the southwest of Shandong Province, it is the second lake in size in Shandong Province and is also an important flood control reservoir at the lower reaches of the Yellow River. Based on the modern sedimentary age sequence of the Dongping Lake which was established according to <sup>210</sup>Pb and <sup>137</sup>Cs methods, the sedimentary flux changes since 1889 were estimated and the reasons were analyzed and discussed. By using <sup>137</sup>Cs method, three obvious peaks were observed in the core and the sedimentary flux was 0.145 g · cm<sup>-2</sup> · a<sup>-1</sup> by <sup>137</sup>Cs time marker (1963). The CRS model of <sup>210</sup>Pb dating was used to calculate the sedimentary flux at different time intervals since 1989, the results showed that the sedimentary flux changed greatly, indicating that the sedimentary environment of Dongping Lake was unstable more than a century: from 1989 to 1938, the average sedimentary flux was high and stable, which was about 0.292 g · cm<sup>-2</sup> · a<sup>-1</sup>; decreased year by year during 1938 to 1965, with an average of 0.213 g · cm<sup>-2</sup> · a<sup>-1</sup>; was low and stable and showed a good agreement with the <sup>137</sup>Cs method from 1965 to 2000; and started increasing year by year since 2000, with an average of 0.167 g · cm<sup>-2</sup> · a<sup>-1</sup>. The early high deposition flux maybe relevant to the fact that Dongping Lake has acted as a natural flood storage basin of the Yellow River, and the latter as a result of human activities (lake governance, water conservancy construction of the Yellow River, and so on) which controlled the natural flooding of the Yellow River and led to a decline in sedimentary flux and tend to be stable, while the recent rise is a reflect of the increased economic activity. In this paper, the spatial distribution regularity of sedimentary flux and the relationship between the sedimentary flux and nature and human activities were explored so as to reveal the evolutionary history of the sedimentary environment of Dongping Lake more than a century and offer valuable basic information for protection and sustainable exploration of the Dongping Lake.

**Key words** <sup>210</sup>Pb; <sup>137</sup>Cs; sedimentary flux; sedimentary environment; Dongping Lake