

长江口泥质区 24Z 孔沉积物粒度特征及对洪水事件的沉积响应

盛琛^{1,2}, 陈彬^{2,3}, 安郁辉⁴, 张欣^{5,6}, 陈立雷², 刘健^{2,3}

(1. 中国地质大学(北京) 海洋学院, 北京 100089; 2. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 山东 青岛 266071; 3. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东 青岛 266071; 4. 山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590; 5. 中国地质大学(武汉) 地球科学学院, 湖北 武汉 430074; 6. 中国地质科学院, 北京 100032)

摘要: 对长江口泥质区 24Z 孔的沉积物柱状样进行了粒度和元素分析, 根据沉积物的粒度特征可将岩芯从下到上分为 3 个阶段: A 阶段(1931—1964 年)粒度参数的波动较小, 各层位平均粒度 ϕ 在 5.58~7.65; B 阶段(1964—1983 年)粒度参数波动范围比 A 阶段更小, 整个阶段没有出现明显峰值, ϕ 在 6.51~7.37; C 阶段(1983—2003 年)粒度参数波动范围明显增大, 出现多个峰值, ϕ 在 5.59~7.46。元素 Zr 和 Rb 质量比(m_{Zr}/m_{Rb})的大小实际上反映了粗粒级矿物与黏土粒级矿物的相对含量的高低, 24Z 孔的沉积物中 m_{Zr}/m_{Rb} 波动范围在 1.02~3.59, 出现了多个明显的峰值。利用 24Z 孔沉积物平均粒度和 m_{Zr}/m_{Rb} 识别出多个突变层位, 结合长江中下游洪水水文记录, 发现突变层位年代与 20 世纪 80 年代后的水文洪水年份有着较好的对应, 这可能与长江主泓的变化有关。对比突变层位与正常层位的粒度特征, 突变层位沉积物的粒度频率曲线呈负偏态且峰高而尖, 正常层位粒度频率曲线呈正偏态且峰低而宽, 同时, 概率累积曲线也指示突变层位沉积物在沉积过程中受到了更强的水动力作用。研究长江口泥质区南部 24Z 孔的沉积物粒度特征和对洪水事件的沉积响应, 可以更好地了解长江洪水所携带的粗颗粒物在长江口泥质区的分布范围, 有助于重建长江流域古洪水从而更好的认识长江流域洪水发生的规律。

关键词: 粒度; 长江口泥质区; 洪水事件; Zr 和 Rb 质量比(m_{Zr}/m_{Rb})

中图分类号: P736.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2020)03-0074-11

DOI: 10.11759/hyxx20190513002

长江口泥质区海陆相互作用强烈, 沉积物记录了丰富的地质环境演化信息, 沉积物的粒度指标是反应沉积变化的重要指标。肖尚斌等^[1]对浙闽沿岸长江泥质区千年尺度的沉积物粒度进行了研究, 杨作升等^[2]对长江口泥质区沉积物粒度变化的影响因素进行了探讨, 认为影响长江泥质区粒度变化的主要原因是长江入海主泓的变迁。但是到目前为止, 对于长江口泥质区年际粒度变化的影响因素仍有一些争议^[3-6]。

长江洪水灾害是我国频率高、为患严重的自然灾害之一^[7], 近百年来, 长江洪水频发严重危害了社会经济发展和人民生活。已有研究表明, 全球变暖可能进一步影响大河流域的旱涝变化^[8], 从而增加了洪水发生的概率。因此研究长江流域洪水发生的规律, 成为了我国全球变化研究的重要内容。大洪水期间, 沉积物的粒度和化学特征往往发生明显改变。与陆地环境中沉积物暴露在空气中并受到侵蚀相比, 海洋沉积物的事件沉积序列通常保存较好^[9]。因此,

近十几年来, 很多学者选择在长江口附近的水下区域进行洪水重建的研究^[9-14]。但是前人在重建长江洪水时选择的站位一般局限在长江口门附近及长江口水下三角洲北部区域^[9-11], 目前对于长江口泥质区南部重建古洪水的情况尚不清楚。

因此, 本研究对 24Z 孔开展了粒度和元素的分析工作, 分析长江口泥质区的南端沉积物的粒度特征, 并尝试利用平均粒度、元素 Zr 和 Rb 质量比(m_{Zr}/m_{Rb}), 在百年尺度上研究长江口泥质区南端对长江中下游洪水的响应情况。

收稿日期: 2019-05-13; 修回日期: 2019-09-02

基金项目: 中国地质调查资助项目(DD20190237); 青岛海洋科学与技术试点国家实验室鳌山科技创新计划项目(2016ASK13)

[Foundation: The China Geological Survey Project, No.DD20190237; The Scientific and Technological Innovation Project Financially of Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology(Qingdao), No.2016ASKJ13]

作者简介: 盛琛(1994-), 男, 山东济宁人, 硕士研究生, 主要从事海洋沉积和地质灾害方面的研究, 电话: 15264753886, E-mail: 1179852460@qq.com

1 区域背景

长江口泥质区空间上位于长江水下三角洲前缘斜坡的下端^[2], 该区域附近流系主由长江冲淡水、台湾暖流、黄海沿岸流、东海沿岸流组成(图 1)。长江入海泥沙在长江冲淡水的推动下, 约有 40%堆积在南北港的口门附近, 约有 30%堆积在长江口泥质区^[15]。长江口泥质区的沉积物组成以黏土质粉砂为主, 近百年来平均沉积速率 3.5 cm/a, 沉积速率最高可达

5.4 cm/a^[2, 16-19]。大通水文站距长江河口近 680 km, 位于长江感潮河段最上段, 为长江径流量的总控制站, 控制流域面积占长江总流域面积的 95%, 是长江入海水沙的参考站^[20]。大通站入海流量和泥沙量的数据^[21-23]显示(图 2), 1930—2003 年长江入海径流量没有明显的降低, 而是在一定范围内波动, 1930—2003 年平均入海径流量 921.32 km³/a。1955—2003 年长江入海泥沙量持续减小, 1964 年最大为 674.70×10⁹ kg/a, 2003 年最小为 147.66×10⁹ kg/a。

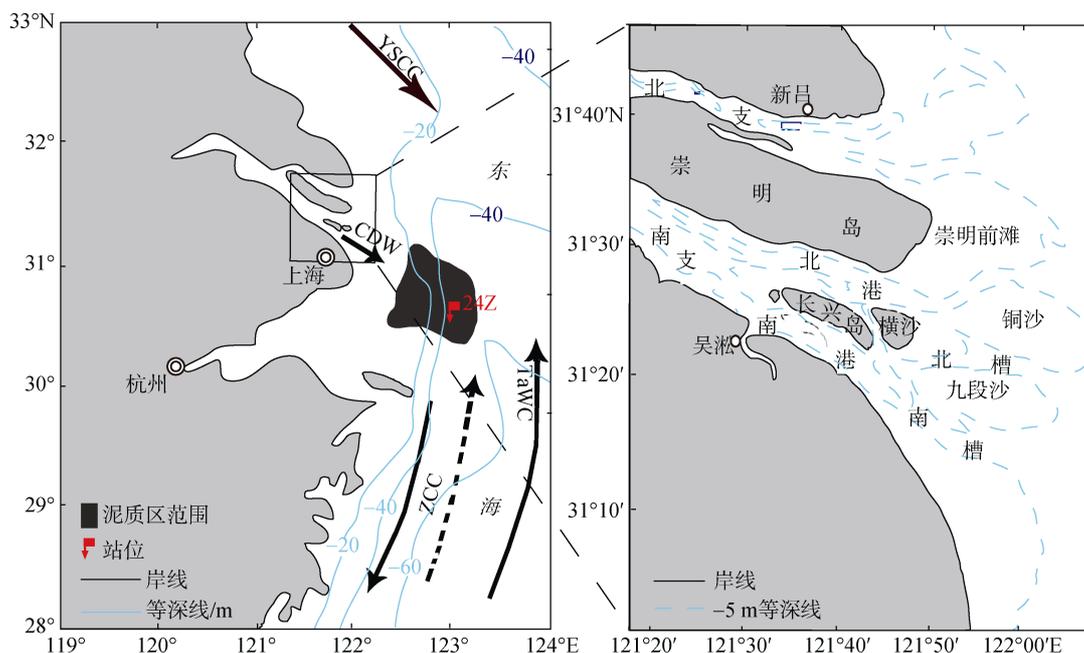


图 1 站位位置图和长江河口河汉形势图^[2, 24]

Fig. 1 Maps of the sampling site and river branches in the Yangtze Estuary^[2, 24]

YSCC: 黄海沿岸流; CDW: 长江冲淡水; ZCC: 浙闽沿岸流, 实线代表冬季, 虚线代表夏季; TaWC: 台湾暖流

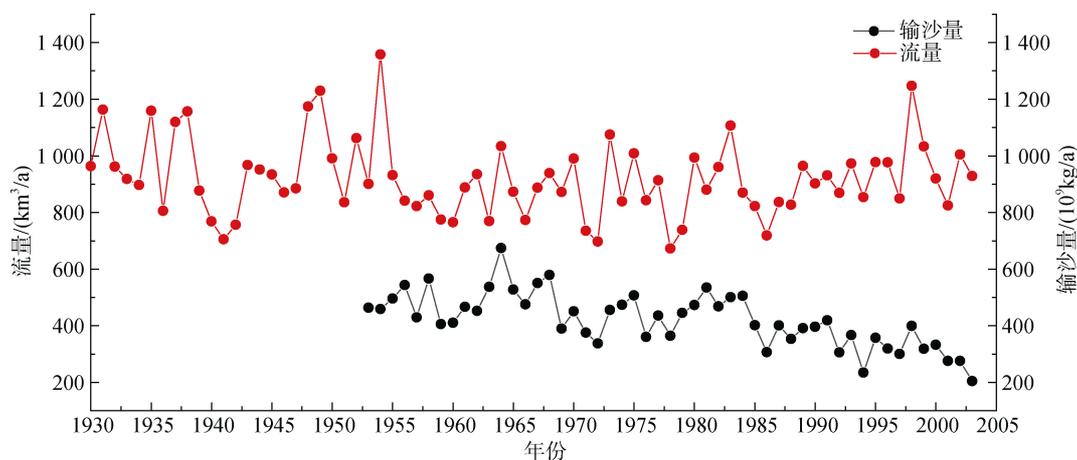


图 2 长江入海径流量及泥沙量变化(据文献[21-23]改绘)

Fig. 2 Variation of runoff and sediment in the Yangtze River (altered form [21-23])

长江河口复杂的地形地貌及其演变对长江入海泥沙在河口局部空间的分布有很大的影响^[2]。长江河口在平面上呈现三级分汊, 四口分流的格局^[24](图 1)。第一级分汊被崇明岛分为南北两支, 第二分汊是南支在吴淞口以下被长兴岛和横沙岛被分为南港和北港, 第三级分汊是南港被九段沙分隔为南槽和北槽。长江河口流路的分汊和对应入海主泓位置的演变直接影响到入海水沙与长江口泥质区距离的远近, 继而影响入海泥沙不同粗细的组份到达泥质区的距离^[2]。

2 材料与方法

2.1 样品情况

24Z 孔(122°44'22.2"N、30°30'2.6"E)岩芯是由中国海洋大学“东方红 2 号”科考船于 2003 年 4 月在长江口泥质区取得, 取样方式为重力取样, 该站水深约 41.3 m(图 1)。24Z 孔岩芯全长 247 cm, 上下两端无缺失, 主体呈青灰色, 成分均一, 以黏土质粉砂为主, 夹有细砂质、砂质粉砂薄层。所夹薄层主要出现在 0~90 cm 段, 颜色为灰黄色, 厚度在 2~10 mm, 呈层状分布。

24Z 站位在进行多环芳烃沉积通量的研究中已经进行了年代测定, 采用 CIC 模式(恒定通量—恒定沉积速率模式)来测得该区域的沉积速率为 3.38 cm/a, 对应沉积年代为 1930—2003 年(图 3)^[16]。

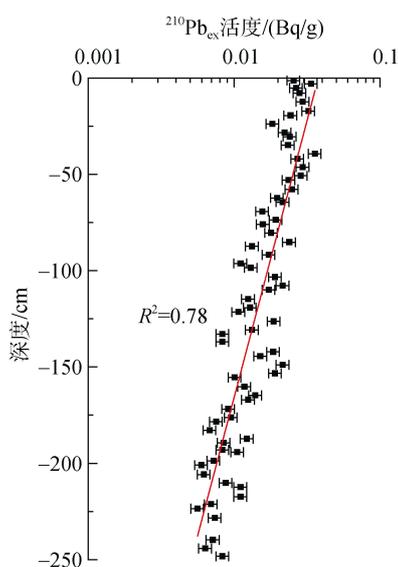


图 3 24Z 孔 ^{210}Pb 测年(据文献[16]改绘)

Fig. 3 ^{210}Pb dating of hole 24Z (altered form [16])

2.2 样品处理和测试

岩芯沉积物的粒度分析测试在中国海洋大学海底

科学与探测技术教育部重点实验室完成。粒度分析利用的是英国马尔文公司(Malvern)生产的 Mastersize2000 型激光粒度分布测量仪, 岩芯取样间隔为 1 cm。样品首先经过浓度为 30% 的双氧水和 1 mol/L 的盐酸浸泡处理, 去除有机质和碳酸盐, 然后用 0.5 mol/L 六偏磷酸钠作为分散剂制成悬浊液, 静置 24 h 后上机分析, 激光粒度仪测量范围为 0.02~2 000 μm , 重复测量的误差小于 3%。

岩芯沉积物的元素分析测试也是在中国海洋大学海底科学与探测技术教育部重点实验室完成。元素分析利用的是能量色散型台式偏振 X 荧光光谱仪(XRF), 岩芯在 0~170 cm 处取样间隔为 1 cm, 在 170~247 cm 处取样间隔为 3 cm。首先取 4 g 左右的样品进行烘干研磨, 然后将样品装入半径为 16 mm 的聚乙烯塑料上机杯内, 将杯中样品压实, 并保证底部薄膜和样品的平整, 最后上机进行元素含量的测定, 每分析 10 个样品中保证加一个标样, 测试的相对误差小于 2%。元素分析主要测试了常量元素 Si、Fe、Mn、Mg、Ca、Na、Ti、P、K、Cl、S 和微量元素 V、Cu、Ni、Pb、Zn、As、Sr、Ga、Rb、Zr、Nb、Y 的含量, 在本次研究仅使用到了与粒度密切相关的 Fe、Ti、Sr、Zr 和 Rb 的含量。

3 结果

3.1 粒度特征

该岩芯沉积物类型均为黏土质粉砂(图 4)。粉砂的组分百分比波动较大, 在 60.31%~89.91%; 黏土的组分百分比在 9.75%~39.52%; 砂的组分百分比在 0.09%~17.43%。

根据岩芯沉积物组分百分比的变化和粒度参数的波动情况将其分为 3 个层段(图 4)。A 段(136~247 cm, 1931—1964 年), 各个层位平均粒度 Φ 波动范围在 5.58~7.65, 偏态波动范围在 0.05~0.48, 分选系数介于 1.24~2.10, 峰态波动范围在 0.86~1.56, 粒度参数的波动较小; B 段(70~136 cm, 1964—1983 年), Φ 在 6.51~7.37, 偏态波动范围在 0.03~0.17, 分选系数介于 1.43~1.80, 峰态波动范围在 0.89~1.07, 该段相较于 A 段粒度参数波动范围更小, 整段没有出现明显峰值; C 段(0~70 cm, 1983—2003 年), Φ 在 5.59~7.46, 偏态波动范围在 0.04~0.43, 分选系数介于 1.45~1.96, 峰态波动范围在 0.88~1.25, 该段粒度参数的波动范围明显增大。A 段 Φ 平均为 7.32, B 段 Φ 平均为 7.14, C 段 Φ 平均为 6.65, 粒度从下到上逐渐变粗。

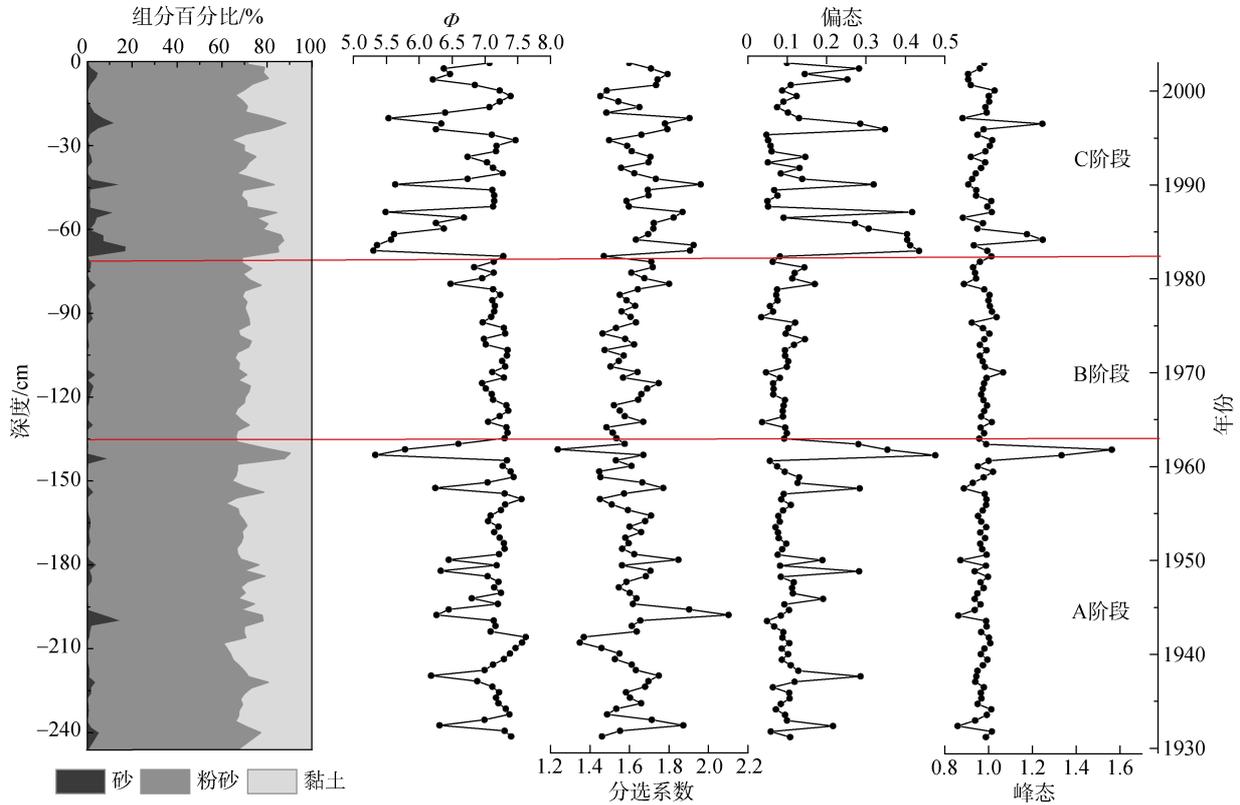


图 4 岩芯粒度组成和粒度参数变化

Fig. 4 Core particle size composition and grain-size parameter variations of hole 24Z

3.2 元素特征

本研究选取了 Sr、Ti、Zr、Rb、Fe 这些和粒度密切相关的元素(图 5)。元素 Sr、Zr、Rb 的波动变化情况和粒度波动情况相似,在 C 段 0~70 cm 处,元素含量波动大,在 B 段 70~136 cm 处,元素含量较为稳定,在 A 段 136~247 cm 处,元素含量存在波动,但是波动范围较小。此外,Zr 和 Rb 的含量具有较好的反相关。元素 Fe 和 Ti 的含量具有相似的变化趋势,在 0~185 cm 处波动不大,在 185 cm 处以下随着深度增加含量增加,Fe 在 23 cm、67 cm 处出现两处峰值,Ti 在 23 cm、57 cm 和 141 cm 处出现三处峰值。

Zr 元素的独立矿物是锆石和斜锆石,由于锆石抗风化能力强,与石英等稳定矿物一起在粗颗粒中富集^[25-26]。沉积物中 Zr 的质量比变化较大,波动范围在 151.61~323.96 mg/kg,标准差 39.41 mg/kg,标准差较大说明了各层位沉积物 Zr 含量的离散程度较大。元素 Rb 属于典型的分散元素,在风化过程中,Rb 趋向于在黏土矿物等细颗粒中富集^[27-28]。沉积物中 Rb 的质量比波动范围在 90.22~154.73 mg/kg,标准差 13.34 mg/kg,说明了 Rb 含量的波动范围小。

m_{Zr}/m_{Rb} 的大小实际上反映了粗粒级矿物与黏土粒级矿物的相对含量的高低^[25, 29]。沉积物中 m_{Zr}/m_{Rb} 波动范围在 1.02~3.59,平均为 1.59,标准差 0.51。

4 讨论

4.1 突变层位与洪水事件的对照

长江流域地处亚热带季风气候,雨量充沛,洪水事件较多^[30-31]。根据施雅风等统计^[32-33],在 1930—2003 年期间,共发生了 16 次大洪水。长江洪水可以按照覆盖范围分为全流域性洪水和区域性洪水两种^[34]。本次研究考虑长江流域洪水对下游的影响,选取了 1930—2003 年期间的全流域洪水和中下游洪水,共计 9 次(表 1)。在本次研究选取的 9 次洪水中,全流域洪水 3 次,分别发生在 1931、1954 和 1998 年,其中 1954 年洪水的洪峰流量(大通站)高达 92 600 m³/s。

洪水期间水动力作用增强,导致沉积物粒度变粗、粗粒级矿物含量升高。综合分析沉积物粒度、 m_{Zr}/m_{Rb} ,可以明显地识别出 24Z 岩芯的几个突变的层位(图 6)。

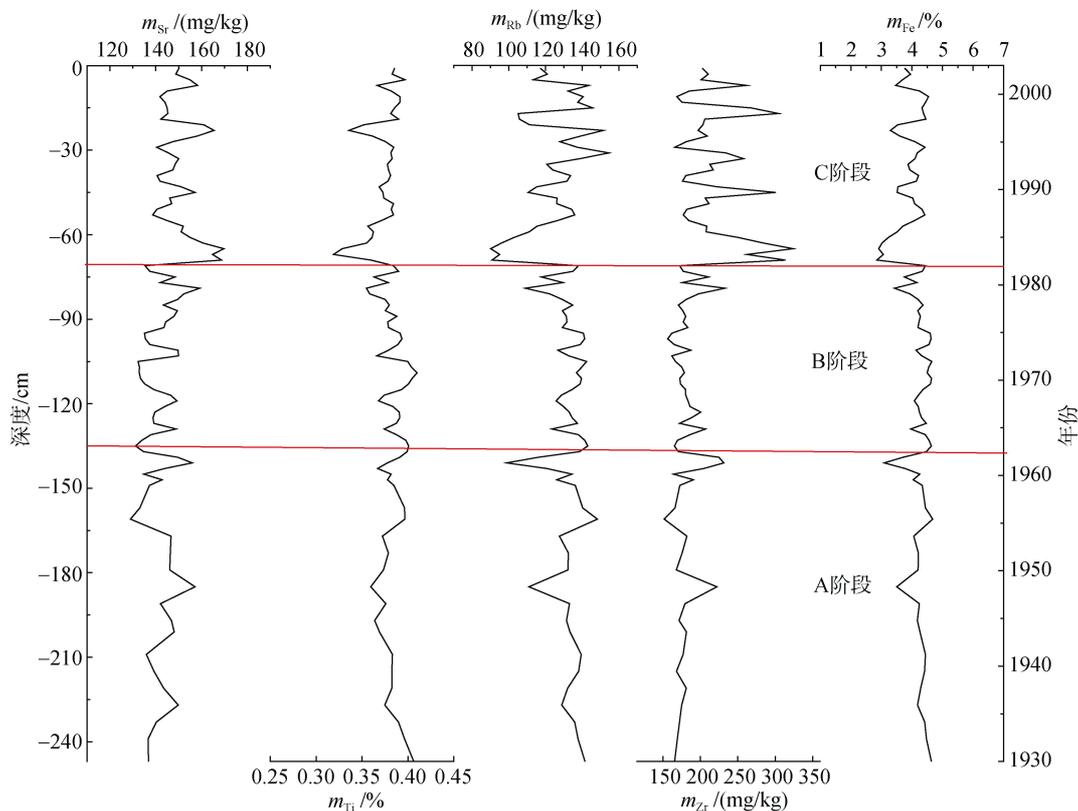


图5 24Z 站元素含量随深度变化情况

Fig. 5 Variation of element content with depth in hole 24Z core sediments

表 1 1930—2003 年间全流域洪水和中下游洪水(据文献 [33], 有修改)

Tab. 1 Floods in the whole basin and downstream from 1930 to 2003 (altered form [33])

年份	区域	洪峰流量/(m ³ /s)	
		大通站	汉口站
1931	全流域特大洪水	—	—
1949	中下游大洪水	—	9 400*
1954	全流域大洪水	92 600	76 100
1969	中下游特大洪水	—	62 400
1980	中下游特大洪水	—	—
1991	下游特大洪水	—	66 700
1995	中下游特大洪水	74 500	59 900
1998	全流域特大洪水	81 700	—
1999	中下游区域特大洪水	84 500	—

注：“—”表示无数据；“*”为6—9月流量距平。

在定年 1997—1998 年位置, 平均粒度和 m_{Zr}/m_{Rb} 为峰值, 推测对应于 1998 年和 1999 年洪水。依次对应, 沉积突变层 1993、1990 年对应 1995、1991 年两次洪水。沉积突变层测年 1980 年对应 1980 年洪水, 沉积物突变层 1949 年对应了 1949 年洪水。部分层

位的对应年龄和洪水年份偏差 1~2 a, 这可能是由于假定沉积速率恒定与实际沉积速率的差别导致的。

1983 年沉积突变层峰高而宽, 且在该年份没有全流域洪水及中下游洪水发生, 这可能是由于 1983 年汉江及长江中游发生洪水, 洪水切割江亚南边滩形成江亚南槽^[24], 在江亚南边滩形成过程中大量泥沙输入, 岩芯沉积物粒度和 m_{Zr}/m_{Rb} 发生突变。1983 年后, 南槽分流分沙比分别达到 50%和 60%左右^[24], 岩芯沉积物平均粒度变粗、粒度参数的波动性变大(图 6), 这与杨作升等^[2]认为 20 世纪 80 年代后南北槽分流分沙比变化导致了长江口泥质区粒度变粗、粒度参数的波动性变大是一致的。

突变层测年 2002 年和 1962 年没有对应洪水事件, 但是 2002 年和 1962 年大通站洪峰流量都超过了 60 000 m³/s, 是正常径流量的 2~3 倍, 因此长江入海过程中可能携带更多的粗颗粒物, 导致 2002 年和 1962 年的峰值。1954 年、1969 年洪水对应年份的粒度和 m_{Zr}/m_{Rb} 都没有出现峰值, 这两次洪水在该站没有留下沉积记录。1931 年、1938 年和 1945 年前后的粒度峰值明显, 而 m_{Zr}/m_{Rb} 曲线相对较为平直,

这可能与元素测试的分样间隔变大有关，因此，综合分析沉积物粒度、 m_{Zr}/m_{Rb} 并不能确定 1931 年洪水是否该站位留下了沉积记录。

4.2 突变层位与正常层位的粒度特征

一般而言洪水期的水动力作用强劲，这会导致

洪水期和非洪水期的沉积物粒度特征存在差异。我们选取了突变层位(20、45、69、184 cm)和正常层位(90、172、230 cm)进行对比(图 7)。

根据沉积物的粒度频率曲线图(图 7a)，突变层位和正常层位的粒度频率曲线都是单峰，这说明了

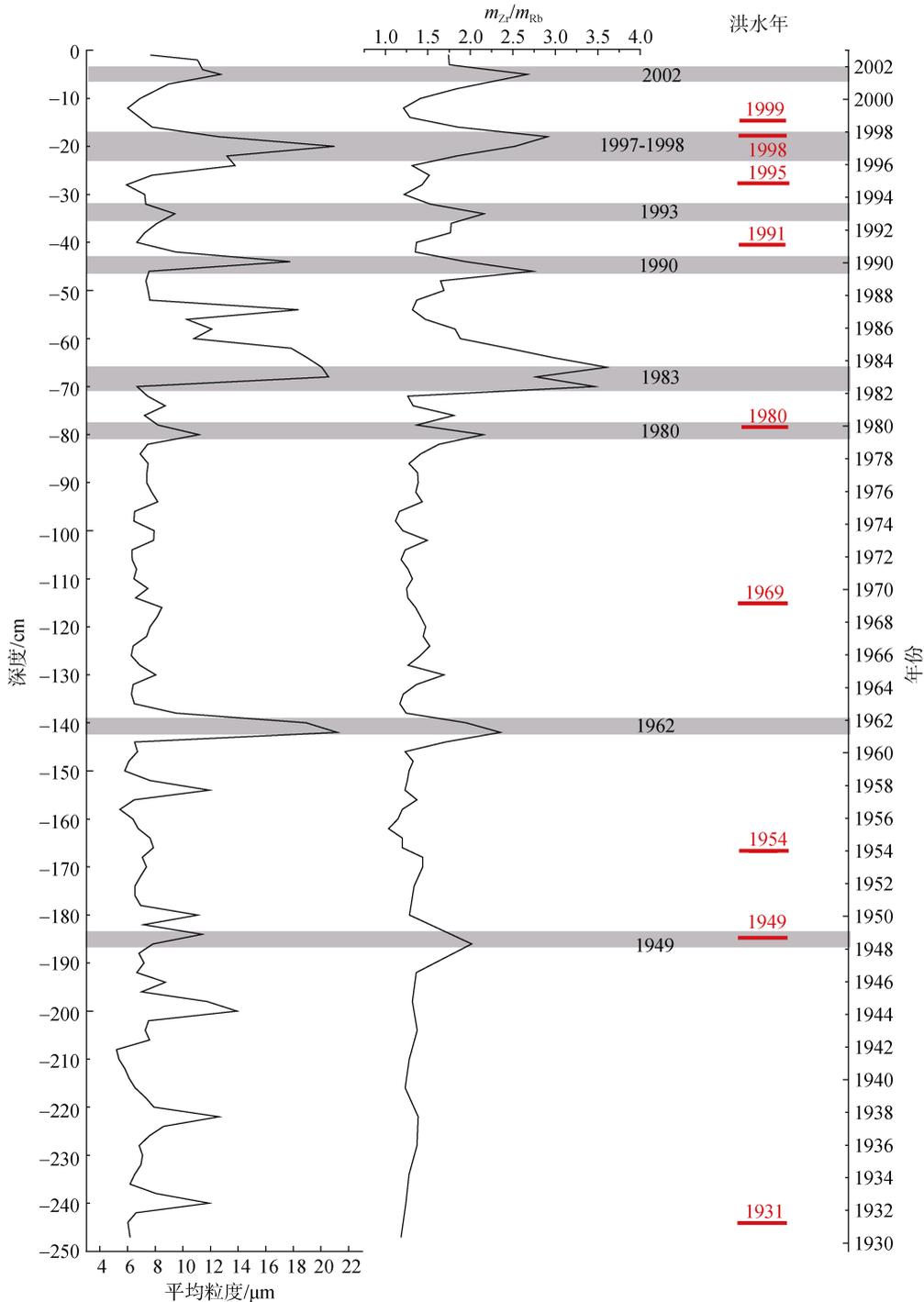


图 6 24Z 孔突变层位与水文记录洪水年份对比

Fig. 6 Comparisons of flood events recorded by sediments in hole 24Z and flood years recorded in hydrology

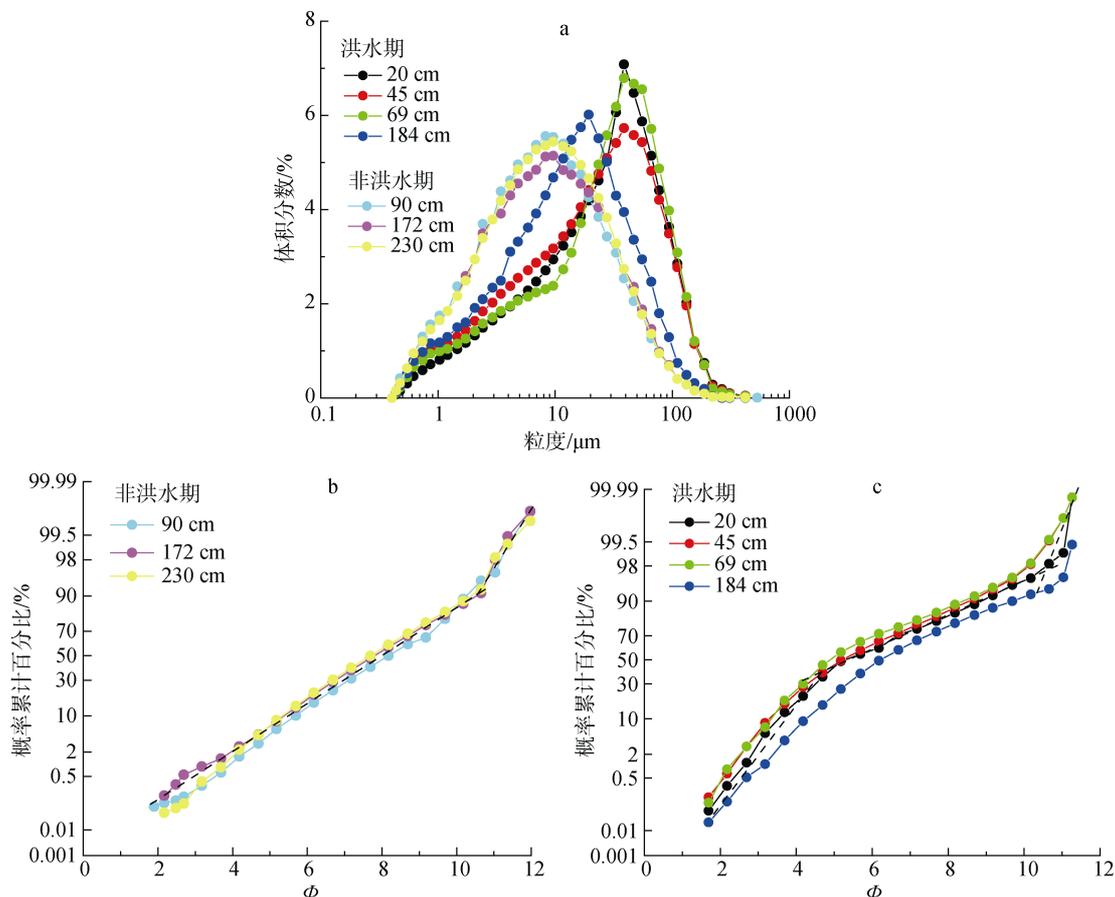


图 7 突变层位与正常层位粒度频率曲线(a)、正常层位(b)和突变层位(c)正态概率累积曲线

Fig. 7 Grain-size frequency curves during flood and non-flood periods (a), cumulative normal-probability curve during non-flood period (b) and cumulative normal-probability curve during flood period (c)

该位置沉积物的物源来源单一。正常层位的曲线峰低而宽，主峰在 8 μm 左右，中值粒度和平均粒度小；突变层位曲线峰高而尖，184 cm 层位主峰在 20 μm 左右，20、45、69 cm 层位的主峰都在 40 μm 左右，可以看出在突变层位中值粒度和平均粒度变粗，代表了水动力作用的增强。

概率累积曲线图(图 7b, 图 7c)中，突变层位的概率累积曲线和正常层位的概率累积曲线存在着明显差异。正常层位概率累积曲线为两段式，在非洪水期间沉积物主要搬运方式为悬浮搬运，曲线较为平缓，说明沉积物以细颗粒物质为主，分选性较好。突变层位累积概率曲线为三段式，沉积物主要搬运方式也是悬浮搬运，但是在突变层位的概率累积曲线中可以明显看出两种不同水动力状态的影响，较陡一段主要指示强的水动力条件，较缓一段主要指示相对弱的水动力条件。对比突变层位和非洪水期岩芯平均概率曲线，显示突变层位的沉积物分选性差且受到了较强的水动力作用。

4.3 洪水事件的沉积响应

1954 年、1969 年两次洪水事件都没有在沉积物中留下记录，尤其是在 1954 年洪峰流量(大通站)高达 92 600 m^3/s ，但粒度和 m_{Zr}/m_{Rb} 都没有出现峰值。1949 年洪水虽然在沉积层中得到了响应，但是较 1980 年之后的突变层位，该层位平均粒度和 m_{Zr}/m_{Rb} 都较小，粒度频率曲线和概率累积曲线也都显示 1949 年层位水动力环境较弱。整体来看，1980 年前沉积物记录不能和长江流域大洪水很好的对应。而在 1980 年后，沉积物的突变层很好的记录了多次洪水事件，且洪水层位的平均粒度和 m_{Zr}/m_{Rb} 较高，粒度频率曲线和概率累积曲线也都显示出沉积过程中较强的水动力条件。

造成上述结果的原因可能比较复杂。在以往的研究中，杨作升等^[2]发现百年来长江口泥质区沉积物粒度变化主要与同时期长江水沙入海主泓通道的位置以及主泓道的分沙比三阶段演变相对应，主泓

入海位置与泥质区距离的远近是影响泥质区粗、细粒级含量变化的主要原因。一般而言,洪水期水动力强劲,长江携带大量粗颗粒物入海,导致泥质区沉积物粒度变粗,因此粒度分布特征是洪水最直观指标^[10]。长江流域主泓的改变是影响长江口泥质区沉积物粒度特征的主要原因,也进一步影响了洪水事件的沉积记录,我们认为长江主泓的变化可能是影响该位置洪水记录的主要原因之一。1978—1980年南港分沙超过北港,1983年后南槽分流分沙比达到50%和60%左右,这可能使得该位置能够更好地接受长江流域沉积物的洪水讯号,导致在1980年后沉积物的平均粒度变粗,且突变层很好地记录了多次洪水事件。同时,不可忽略的是改革开放后大量的人类活动会导致水土的流失,这为长江入海沉积物提供了大量的物质,在一定程度上也可能使得长江在洪水期入海粗颗粒物得到增强。

5 结论

1) 根据24Z孔沉积物的粒度特征将岩芯从下到上可分为3个阶段: A段136~247 cm处,对应年代为1931年至1964年,粒度参数的波动较小,整段 Φ 平均为7.32; B段70~136 cm处,对应年代为1964—1983年,整段各参数没有出现明显峰值,整段 Φ 平均为7.14; C段0~70 cm处,对应年代为1983—2003年,各参数出现多个峰值, Φ 平均为6.65。粒度从下到上逐渐变粗。

2) 1983年左右沉积物粒度出现了一处明显峰值,且之后沉积物平均粒度变粗、粒度参数的波动性变大。这可能是由于1983年汉江及长江中游发生洪水,洪水切割江亚南边滩形成江亚南槽^[24],在江亚南边滩形成过程中大量泥沙输入,这一事件导致此后长江南槽分流分沙比提高,岩芯沉积物平均粒度粗化。

3) 在1980年后,沉积物的突变层较好的记录了多次洪水事件。我们认为长江主泓的变化可能是影响该位置洪水记录的主要原因之一。同时,改革开放后大量的人类活动导致了水土的流失,这为长江入海沉积物提供了大量的物质,在一定程度上也可能使得长江在洪水期入海粗颗粒物得到增强。

致谢: 感谢复旦大学环境科学与工程系郭志刚教授和上海海洋大学林田教授对实验数据整理分析方面的帮助。

参考文献:

[1] 肖尚斌, 李安春. 东海内陆架泥区沉积物的环境敏感

粒度组分[J]. 沉积学报, 2005, 23(1): 122-129.

Xiao Shangbin, Li Anchun. A study on environmentally sensitive grain-size population inner shelf of the east China Sea[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2005, 23(1): 122-129.

[2] 杨作升, 陈晓辉. 百年来长江口泥质区高分辨率沉积粒度变化及影响因素探讨[J]. 第四纪研究, 2007, 27(5): 690-699.

Yang Zuosheng, Chen Xiaohui. Centurial high resolution records of sediment grain-size variation in the mud area off the Changjiang (Yangtze River) estuary and its influential factors[J]. Quaternary Sciences, 2007, 27(5): 690-699.

[3] 罗向欣, 杨世伦, 张文祥, 等. 近期长江口—杭州湾邻近海域沉积物粒径的时空变化及其影响因素[J]. 沉积学报, 2012, 30(1): 137-147.

Luo Xiangxin, Yang Shilun, Zhang Wenxiang, et al. Recent spatial pattern and temporal variation in sediment grain size in the inshore area adjacent to the Yangtze Estuary and Hangzhou Bay[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2012, 30(1): 137-147.

[4] 陈静, 赵宝成, 战庆. 长江口水下三角洲北部近百年沉积物粒度组成及其对水动力环境的响应[J]. 沉积学报, 2014, 32(4): 692-699.

Chen Jing, Zhao Baocheng, Zhan Qing. Grain-size of recent sediments in the North of Changjiang Subaqueous Delta and its implication of estuarine hydrodynamics[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2014, 32(4): 692-699.

[5] 张瑞, 汪亚平, 高建华, 等. 长江口水下三角洲泥质区近期沉积物粒度变化特征及其影响因素[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2011, 31(5): 9-16.

Zhang Rui, Wang Yaping, Gao Jianhua, et al. Recent variation in sediment grain-size in the mud area of Changjiang Subaqueous Delta and its influence factors[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2011, 31(5): 9-16.

[6] 战庆, 王张华, 陈勇, 等. 长江口水下三角洲沉积物粒度组成及其在减沙背景下的响应[J]. 地质通报, 2016, 35(10): 1715-1723.

Zhan Qing, Wang Zhanghua, Chen Yong, et al. Grain size of recent sediments in Yangtze River subaqueous delta and its response to sediments supply decline[J]. Geological Bulletin of China, 2016, 35(10): 1715-1723.

[7] 史培军, 王季薇, 张钢锋, 等. 透视中国自然灾害区域分异规律与区划研究[J]. 地理研究, 2017, 36(8): 1401-1414.

Shi Peijun, Wang Jiwei, Zhang Gangfeng, et al. Research review and prospects of natural disasters regionalization in China[J]. Geographical Research, 2017, 36(8): 1401-1414.

[8] Skakun S, Kussul N, Shelestov A, et al. Flood hazard

- and flood risk assessment using a time series of satellite images: A case study in Namibia[J]. *Risk Analysis*, 2014, 34(8): 1521-1537.
- [9] Hu Gang, Li Anchun, Liu Jian, et al. High resolution records of flood deposition in the mud area off the Changjiang River mouth during the past century[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2014, 32(4): 909-920.
- [10] Wang Minjie, Zheng Hongbo, Xie Xin, et al. A 600-year flood history in the Yangtze River drainage: Comparison between a subaqueous delta and historical records[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(2): 188-195.
- [11] 田元. 近百年来东海内陆架泥质区事件沉积的识别和重建[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
Tian Yuan. Recognition and reconstruction of even deposits from the mud area in the inner shelf of the East China Sea in the past 100 years[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015.
- [12] Zhan Wang, Yang Shouye, Liu Xiaoli, et al. Reconstruction of flood events over the last 150 years in the lower reaches of the Changjiang River[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(21): 2268-2274.
- [13] 刘明. 长江水下三角洲高分辨沉积记录及其对气候环境事件的响应[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
Liu Ming. High-resolution sedimentary records in the subaqueous Yangtze Rive Delta and their responses to climate and environment changes[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009.
- [14] Meng Jia, Yao Peng, Bianchi T S, et al. Detrital phosphorus as a proxy of flooding events in the Changjiang River Basin[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 517: 22-30.
- [15] Milliman J D, Shen Huangting, Yang Zhuosheng, et al. Transport and deposition of river sediment in the Changjiang estuary and adjacent continental shelf[J]. *Continental Shelf Research*, 1985, 4(1-2): 37-45.
- [16] Guo Zhigang, Lin Tian, Zhang Gan, et al. The sedimentary fluxes of polycyclic aromatic hydrocarbons in the Yangtze River Estuary coastal sea for the past century[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, 386(1): 33-41.
- [17] 张瑞, 潘少明, 汪亚平, 等. 长江河口水下三角洲 210 Pb 分布特征及其沉积速率[J]. *沉积学报*, 2009, 27(4): 704-713.
Zhang Rui, Pan Shaoming, Wang Yaping, et al. Sedimentation rates and characteristics of radionuclide 210Pb at the subaqueous delta in Changjiang Estuary[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(4): 704-713.
- [18] 刘升发, 王昆山, 刘焱光, 等. 长江口泥质区沉积物颜色反射率指示的近百年来东亚季风变迁[J]. *沉积学报*, 2013, 31(2): 331-339.
Liu Shengfa, Wang Kunshan, Liu Yanguang, et al. Color reflectance record of the Yangtze River mud area sediments during the Past 100yr and its implications for East Asian monsoon variation[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(2): 331-339.
- [19] 刘莹, 翟世奎, 李军. 长江口与闽浙沿岸泥质区现代沉积记录及其影响因素[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2010, 30(5): 1-10.
Liu Ying, Zhai Shikui, Li Jun. Depositional records in the mud areas of Changjiang Estuary and off Min-Zhe coast and their influence factors[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2010, 30(5): 1-10.
- [20] 付桂. 长江口近期来水来沙量及输沙粒径的变化[J]. *水运工程*, 2018 (2): 105-110.
Fu Gui. Recent changes of runoff, sediment discharge and suspended sediment particle size in the Yangtze estuary[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2018 (2): 105-110.
- [21] 万智巍, 连丽聪, 贾玉连, 等. 近 150 年来长江入海流量变化的趋势、阶段与多尺度周期[J]. *水土保持通报*, 2018, 38(2): 14-18.
Wan Zhiwei, Lian Licong, Jia Yulian, et al. Trend phases and periodic changes of discharges from Yangtze River in past 150 years[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, 38(2): 14-18.
- [22] 彭涛, 田慧, 秦振雄, 等. 气候变化和人类活动对长江径流泥沙的影响研究[J]. *泥沙研究*, 2018, 43(6): 54-60.
Peng Tao, Tian Hui, Qin Zhenxiong, et al. Impacts of climate change and human activities on flow discharge and sediment load in the Yangtze River[J]. *Journal of Sediment Research*, 2018, 43(6): 54-60.
- [23] Yang S L, Xu K H, Milliman J D, et al. Decline of Yangtze River water and sediment discharge: Impact from natural and anthropogenic changes[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 12581.
- [24] 恽才兴. 长江河口近期演变基本规律[M]. 北京: 海洋出版社, 2004.
Yun Caixing. Recent Developments of the Changjiang Estuary[M]. Beijing: China Ocean Press, 2004.
- [25] 刘连文, 陈骏, 陈旸, 等. 最近 130ka 以来黄土中 Zr/Rb 值变化及其对冬季风的指示意义[J]. *科学通报*, 2002, 47(9): 702-706.
Liu Lianwen, Chen Jun, Chen Yang, et al. Variation of Zr/Rb ratios on the loess plateau of central China during the last 130ka and its implications for winter monsoon[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(9): 702-706.
- [26] Chen Jun, An Zhisheng, John Head. Variation of Rb/Sr ratios in the loess-paleosol sequences of central China during the last 130000 years and their implications for monsoon paleoclimatology[J]. *Quaternary Research*,

- 1999, 51(3): 215-219.
- [27] 王顺华, 张国栋, 张纪双, 等. 东海内陆架泥质沉积 Rb 和 Sr 的地球化学及其古气候意义[J]. 科技导报, 2007, 25(3): 22-27.
Wang Shunhua, Zhang Gguodong, Zhang Jishuang, et al. Geochemical studies on Rb and Sr in the mud on the inner shelf of the East China Sea and their palaeoclimate significance[J]. Science and Technology Review, 2007, 25(3): 22-27.
- [28] Kristian V, Atle N, Eivind N S, et al. A Holocene record of snow-avalanche and flood activity reconstructed from a lacustrine sedimentary sequence in Oldevatnet, western Norway[J]. The Holocene, 2011, 21(4): 597-614.
- [29] 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 its environment implications[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2003, 23(4): 35-38.
- [30] 刘伟, 翟媛, 杨丽英. 七大流域水文特性分析[J]. 水文, 2018, 38(5): 79-84.
Liu Wei, Zhai Yuan, Yang Liying. Analysis of hydrologic characteristics in the seven major basins[J]. Journal of China Hydrology, 2018, 38(5): 79-84.
- [31] 徐明. 长江流域气候变化脆弱性与适应性研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
Xu Ming. Research on Climate Change Vulnerability and Adaptability in Yangtze River Basin[M]. Beijing: China Water Power Press, 2009.
- [32] 张强, 姜彤, 施雅风, 等. 6000aBP 以来长江下游地区古洪水与气候变化关系初步研究[J]. 冰川冻土, 2003, 25(4): 368-374.
Zhang Qiang, Jiang Tong, Shi Yafeng, et al. Relationship between climate changes and the flood occurrences since 6 000 a BP in the Yangtze River Delta[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(4): 368-374.
- [33] 施雅风, 姜彤, 苏布达, 等. 1840 年以来长江大洪水演变与气候变化关系初探[J]. 湖泊科学, 2004, 16(4): 289-297.
Shi Yafeng, Jiang Tong, Su Buda, et al. Preliminary analysis on the relation between the evolution of heavy floods in the Yangtze River catchment and the climate changes since 1840[J]. Journal of Lake Sciences, 2004, 16(4): 289-297.
- [34] 程海云, 葛守西. 长江洪水分类指标体系研究[J]. 人民长江, 2008, 39(8): 1-2.
Cheng Haiyun, Ge Shouxi. Research for the flood classification index system in the Yangtze River[J]. Yangtze River, 2008, 39(8): 1-2.

Grain-size characteristics of sediments and sedimentary response to flood events from hole 24Z in muddy areas of the Yangtze Estuary

SHENG Chen^{1, 2}, CHEN Bin^{2, 3}, AN Yu-hui⁴, ZHANG Xin^{5, 6},
CHEN Li-lei², LIU Jian^{2, 3}

(1. School of Ocean Science, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100089, China; 2. Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266071, China; 3. Laboratory for Marine Mineral Resources, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266071, China; 4. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 5. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 6. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100032, China)

Received: May 13, 2019

Key words: grain size; muddy area of the Yangtze Estuary; flood events; mass ratio of elements Zr and Rb (m_{Zr}/m_{Rb})

Abstract: In this study, grain size and element content were analyzed in a columnar sediment sample of a hole 24Z core in an argillaceous area of the Yangtze Estuary. According to the grain size characteristics of the sediments, the core can be divided into three stages from bottom to top. In stage A (1931—1964), the fluctuation in the particle size was small, and the range in the average-particle-size (Φ) fluctuation ranged from 5.58 to 7.65. In stage B (1964—1983), the fluctuation range of particle size was smaller than that in stage A, there was no obvious peak value in the whole stage, and the Φ fluctuation ranged from 6.51 to 7.37. In stage C (1983—2003), the fluctuation range of the particle size increased significantly, showed multiple peaks, and the Φ fluctuation ranged from 5.59 to 7.46. The mass ratio of elements Zr and Rb (m_{Zr}/m_{Rb}) actually reflected the relative content of coarse-grained and clay-grained minerals. The value of m_{Zr}/m_{Rb} in the 24Z pore sediments fluctuated from 1.02 to 3.59, and had many obvious peaks. Flood disasters due to the Yangtze River are some of the most frequent and serious natural disasters in China. This study represents the first attempt to reconstruct flood events at the southern end of the muddy area of the Yangtze Estuary based on the average sediment size and m_{Zr}/m_{Rb} . Compared with hydrological flood records, the timing of identified flood events have been well recorded since the 1980s. This may be related to the change in the main channel of the Yangtze River. A comparison of the grain-size characteristics of flood and non-flood layers shows that the grain-size-frequency curves of flood sediments are characterized by negative skewness with high and sharp peaks, whereas the grain-size-frequency curves of non-flood layers show positive skewness and low and wide peaks. The cumulative probability curves also show that the sediments of flood layers have been subjected to stronger hydrodynamic effects during the deposition process.

(本文编辑: 刘珊珊)