

# 长江流域 600 年来古洪水: 水下三角洲沉积与历史记录对比

王敏杰<sup>①②</sup>, 郑洪波<sup>②\*</sup>, 谢昕<sup>①</sup>, 范代读<sup>①</sup>, 杨守业<sup>①</sup>, 赵泉鸿<sup>①</sup>, 王可<sup>①</sup>

① 同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092;

② 南京大学地球科学与工程学院, 南京 210093

\* 联系人, E-mail: zhenghb@nju.edu.cn

2010-04-07 收稿, 2010-09-25 接受

国家自然科学基金重点项目(40830107)

**摘要** 对长江水下三角洲 YD0901 孔进行粒度分析和高分辨率元素扫描, 选取 Zr/Rb 值作为长江洪水指标, 以此建立的 600 年来长江流域洪水记录与历史文献记录对比良好. Zr 主要赋存于含 Zr 的粗粒矿物, Rb 主要分散在细粒矿物中. 洪水期, 长江径流量增大, 携带大量粗粒入海, 沉积在水下三角洲的粗粒组分相对于细粒组分明显增多, Zr/Rb 值增大. 因此, Zr/Rb 峰值段对应洪水沉积, 峰值越高, 沉积物粒度越粗, 跳跃组分越多. 尤其是 1870 年左右 Zr/Rb 值表现为 600 年以来最高值, 符合 1870 年长江中上游“极值大洪水事件”. 进一步对 Zr/Rb 值进行频谱分析, 佐证了长江洪水与 ENSO 可能存在某种关联. 该研究为恢复长江流域全新世以来更长时期尺度的高分辨率古洪水记录提供了新方法和新材料.

## 关键词

长江古洪水  
水下三角洲  
Zr/Rb 值

以全球变暖为主要特征的全球气候环境变化问题日益突出, 成为人类可持续发展最严峻的挑战之一. 全球变暖通过低层环流的作用影响全球降水分配, 进而影响大河流域旱涝的发生. 长江是我国第一大河, 在我国社会经济发展中具有举足轻重的地位, 但是频繁发生的洪水灾害严重影响了经济发展和人民生活. 长江中下游地区在 20 世纪 90 年代已呈现出明显增温趋势, 同时降水在长江流域中下游地区也明显增加<sup>[1]</sup>, 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和影响机制, 预测未来发生的趋势就成为我国全球变化研究的重要内容.

古洪水研究是近十几年来全球变化研究的一个热点, 通常采用两种方法: 文献资料法和地质记录法. 有关长江流域水灾的最早记述迄今已有 2000 余年的历史, 但早期(宋代以前)的记载非常简略, 且由于王朝的更替多同水旱灾害和战乱交织, 灾害记述在时间上缺乏连续性, 区域上缺乏系统性<sup>[2]</sup>. 地质记录采

用地貌学、沉积学、考古学等多种方法, 可以提供更长时间尺度的记录. 地质学上最常用的方法是利用洪水遗留下的沉积记录, 恢复古洪水的发生频率和强度<sup>[3-7]</sup>, 但由于洪水遗迹易受后期冲刷侵蚀, 只有特大古洪水事件才可能留下沉积证据, 因此古洪水的陆上记录不够连续, 难以实现高分辨率洪水历史研究. 与陆地古洪水沉积记录相比, 水下三角洲沉积具有独特的优势, 表现在: 沉积环境相对稳定, 沉积连续, 沉积速率较高, 因此有望获得高分辨率、连续的记录. 另外, 水下三角洲一般保存有良好的测年材料(例如贝壳、有孔虫壳体等), 易于用 AMS <sup>14</sup>C 方法获得准确的年代序列. 作为末次冰消期高海平面以来长江流域入海物质的主要沉积区之一, 长江水下三角洲有可能完整地记录了全新世整个长江流域的气候变化信息, 尤其是极端洪水事件. 本文报道对长江水下三角洲高质量连续岩芯的研究结果, 通过粒度、地球化学等多指标综合分析, 并与历史记录对比,

提取水下三角洲洪水记录的地球化学与粒度指标, 探讨长江流域 600 年来高分辨率古洪水记录, 以期重建全新世以来更长时间尺度的古洪水序列。

### 1 材料与方方法

末次冰盛期时, 东海陆架大部分裸露成陆, 长江主干道可能在冲绳海槽西缘入海。随着冰消期的到来, 海面快速上升, 长江入海口逐渐向前推进。直到 7 ka BP 左右海侵达到最大, 形成以镇江、扬州为顶

点的巨大河口湾。此后, 由于长江入海泥沙堆积速率超过海面上升速率, 河口湾开始填充, 海水后退, 岸线向海推进, 逐渐形成现代长江三角洲<sup>[8]</sup>(图 1(a))。现代长江三角洲沉积体系由两部分组成, 即陆上三角洲平原和水下三角洲。另外, 长江入海泥沙经过洋流二次搬运在内陆架形成了闽浙泥质区。大量钻探工作对长江三角洲和闽浙泥质沉积的年代和地层有了比较深入的了解<sup>[9-14]</sup>。例如根据数百个钻孔资料对三角洲的岩性地层、年代地层和沉积相进行了详细的

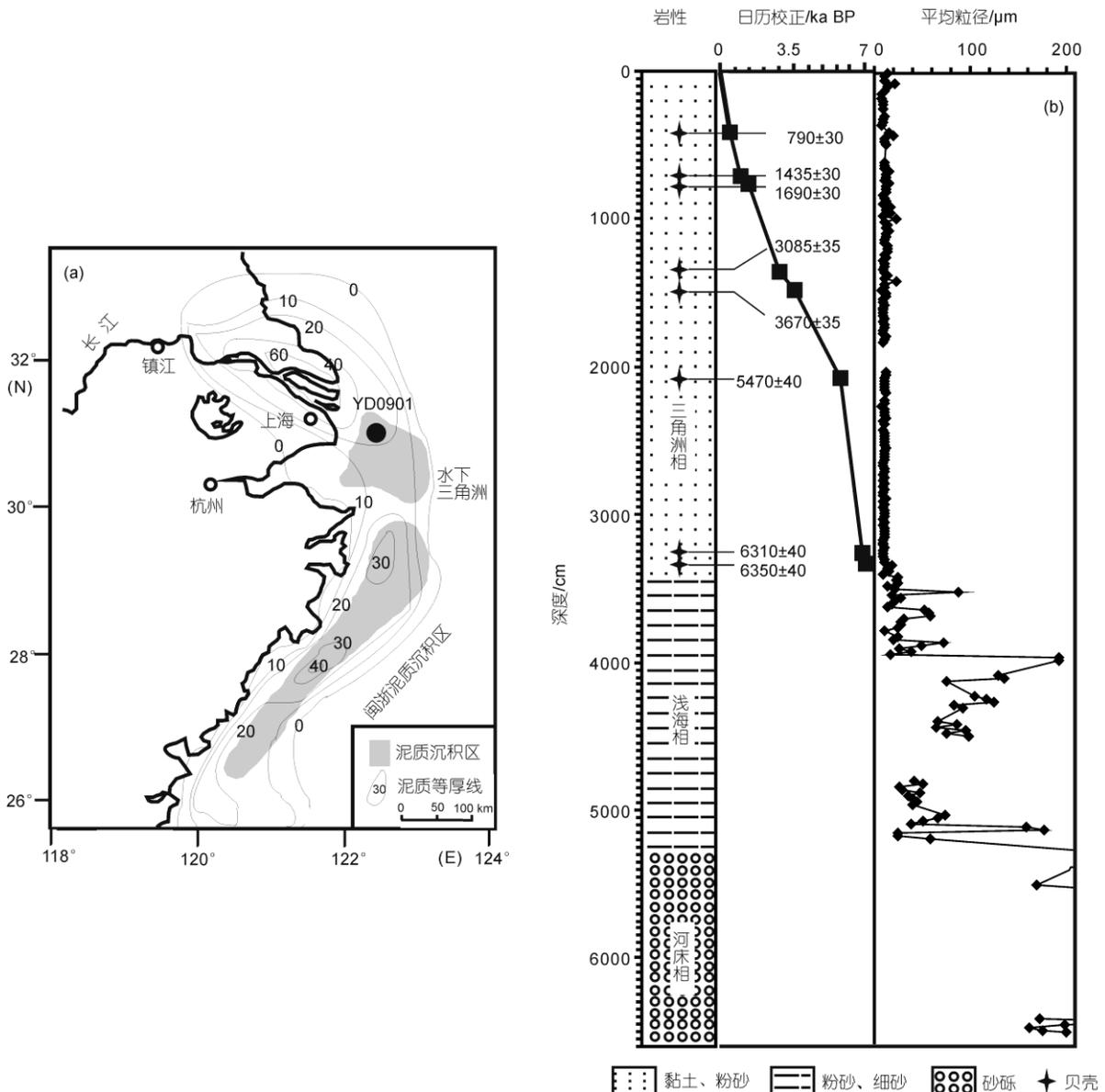


图 1 研究区域与钻孔岩性图

(a) 长江三角洲、水下三角洲和闽浙沿岸泥质沉积分布和等厚图(修改自文献[18]); (b) 长江水下三角洲 YD 0901 孔岩性及 AMS <sup>14</sup>C 年龄控制点

划分,建立了三角洲三维地层框架,将长江三角洲平原分为三角洲主体及南北两翼等3个基本的地层分区<sup>[15]</sup>,并对全新世三角洲的沉积总量和沉积速率进行了估算<sup>[18]</sup>.东海内陆架闽浙沿岸的泥质沉积是长江三角洲沉积物向海区的延伸,形成于全新世高海平面以来,是在东海沿岸流和台湾暖流共同作用下,长江沉积物的二次搬运与沉积.近年来,针对东海内陆架泥质沉积展开了比较系统的地质学研究.Chen和Liu等人<sup>[16-18]</sup>利用地层资料和浅层地震方法对闽浙泥质体的年代和沉积总量进行了估算(图1(a)).王可等人<sup>[11]</sup>利用中法合作航次获得的高质量重力岩芯,对闽浙沿岸泥质沉积进行了系统的地质学、年代学和沉积环境研究,发现全新世以来该区的沉积环境主要经历了3次变化:近滨环境、浅海陆架-近滨过渡带和海侵结束后的浅海环境.相比之下,对长江水下三角洲沉积的研究就薄弱很多.已经获得的钻孔深度较浅,年龄框架不精确,分辨率不高<sup>[19-21]</sup>,更多的研究主要针对表层沉积物.鉴于此,2009年5月由同济大学海洋学院和浙江省地质勘查局合作,在现代长江水下三角洲 YD0901 孔钻探(31°11'01.768"N, 122°30'00.655"E,水深21 m),取得长65.23 m的岩芯(图1(b)).

(i) 岩性与沉积相划分. YD0901孔全长65.23 m,岩性可分为3段.(1) 51.88~65.23 m:河床相.主要以中细砂为主,偶见砾石,含大量植物碎屑,颜色呈黄褐色.末次盛冰期以来,东海陆架大部分裸露,水动力以河流切割为主,陆架上发育多条古河道以及巨型下切河谷<sup>[22]</sup>.随着末次冰消期到来,海平面逐渐回升,海水沿下切河谷快速向岸推进,下切河谷开始充填河床相沉积<sup>[14]</sup>.(2) 34.22~51.88 m:河口湾-浅海相(海侵期).以粉砂和细砂为主,砂泥质单交互层,局部见贝壳碎片和木屑.此段沉积动力为潮流和河流共同作用,为浅海相沉积.34.22 m附近为最高海平面时期.此时,海侵达到最大<sup>[23]</sup>,形成以镇江、扬州为顶点巨大古河口湾<sup>[8]</sup>.(3) 0~34.22 m:水下三角洲相.以粉砂和黏土等细粒泥质为主,偶见贝壳,含有孔虫等.整体呈灰色,内部成分、结构、颜色均一,顶部2.5 m以上含水量较高.大约7 ka BP左右,海平面达到最高,为长江泥沙在河口区的堆积提供了空间,现代三角洲开始发育,古长江河口从镇江-扬州一带逐渐向海推进至现代河口区.

(ii) 年代框架. YD0901孔的年代框架基于8

个贝壳的 AMS <sup>14</sup>C 测年.在无生物钻孔、无扰动的岩芯层位挑选出较完整的贝壳,经中国科学院广州地球化学研究所制靶后,在北京大学核物理与核技术国家重点实验室完成年代测试.利用 Calib 5.0 软件中的 marine 04 程序进行校正,构成了本次研究的年代框架(图1(b)).分析表明,8个贝壳样品质量优良,所获得的年龄可靠,整个岩芯的年龄框架通过内插和外插法获得.岩芯顶部5 m以上的沉积(大致对应明清时期),主要由粉砂(75%~89%)和黏土(10%~25%)构成,砂质少见(0~3.9%).由于5 m以上部分平均粒径变化不大(图1(b)),主要为泥质沉积,所以近似认为该部分为均匀沉积,从而根据4.01 m处的 AMS <sup>14</sup>C 年龄((790±30) a BP),采用内插、外插法建立了600年以来 YD0901 孔的年代框架(沉积速率为0.92 cm/a).

(iii) 实验测试.对 YD0901 孔5 m以上的岩芯,以1 cm为间隔,利用 XRF 岩芯扫描仪(XRF Core Scanner)进行岩芯原位扫描,获得了 Al-U 等多元素在岩芯中的分布.XRF 岩芯扫描仪预处理简单,扫描过程不破坏岩芯,且分辨率高(扫描间隔1 cm),元素检测值低.

对整个岩芯按10 cm间隔取样,获得粒度样品,进行粒度测试.预处理步骤如下:取样品0.15 g,加入10 mL 30%的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>,将有机质去除;然后加入15 mL 25%的醋酸煮沸1 min,移入1000 mL 高型烧杯,加满去离子水,放置24 h后移去清液,以去除碳酸盐.最后加入300 mg (NaPO<sub>3</sub>)<sub>6</sub>分散剂,超声振荡3 min后,使用同济大学海洋地质国家重点实验室 Beckman Coulter LS230 型全自动激光粒度仪对样品进行测试,仪器的测量范围为0.04~2000 μm,重复测量的相对误差≤1%.

## 2 结果

### 2.1 Zr/Rb 作为古洪水代用指标

在土壤和沉积物中,Zr主要赋存于锆石中<sup>[24]</sup>,在风化搬运过程中,赋存Zr的锆石,由于其抗风化能力强,基本保持原来形态,与石英等稳定矿物一起在粗颗粒中富集.研究表明<sup>[25,26]</sup>,中国第四纪黄土沉积物和湖泊沉积物中的Zr主要集中在>20 μm的粗粒级.Rb是典型的分散元素,在自然界中主要以类质同像的形式分布于各类造岩矿物中,很少形成各自的独立矿物<sup>[27,28]</sup>.由于Rb与K具有相近的粒子半径、电

位等地球化学参数,因此在各类岩石中 Rb 主要分散在含 K 的矿物中,如黑云母、白云母、钾长石、伊利石等.在风化过程中,Rb 趋向于在黏土矿物等细颗粒中富集.因此,Zr/Rb 值大小实际上反映了粗粒级矿物与黏粒级矿物的相对含量,在第四纪黄土研究中 Zr/Rb 值常用作冬季风替代性指标<sup>[25]</sup>.

现代水下三角洲沉积物主要是经过长距离搬运/混合和分选的长江流域风化物.其中的 Zr 主要赋存于含 Zr 的粗粒矿物,Rb 主要分散在细粒矿物中,所以如同黄土及湖泊沉积物一样,长江流域风化物的 Zr/Rb 值同样可以反映粗、细颗粒相对含量,Zr/Rb 值越大,说明粗粒矿物越多.洪水发生时,长江径流量迅猛增加,输沙量增大.大通站监测数据表明,1998 年发生的长江全流域大洪水,当年入海沙量和径流量分别是正常年份的 1.8 倍和 1.5 倍左右<sup>[29]</sup>.所以洪水期,在较大水动力环境下,陆地上大量粗粒风化物随长江入海,由于受到海水顶托,跳跃组分主要在河口处或近岸沉积(滚动组分一般就近沉积,难以随洪流抵达水下三角洲),而细粒矿物主要呈悬浮状,沉积距离相对于跳跃组分远,主要沉积在前三角洲区甚至更远.这样就导致位于三角洲前缘的 YD0901 孔在洪水期粗粒矿物增加,细粒矿物减少,粗粒相对于细粒显著增加,Zr/Rb 值增大,粒度整体偏粗.由于元素扫描间隔为 1 cm,Zr/Rb 值可作为水下三角洲高分辨率洪水代用指标,这是迄今为止分辨率最高、最为连续的长江流域洪水代用指标.

图 2 给出了 YD0901 孔 600 年以来 Zr/Rb 值的变化曲线.可以看出,Zr/Rb 值主体分布于 1.8~2.0 之间,但有的时段出现齿状峰值,Zr/Rb 值可以达到 3 或 4 甚至更大.总体看,Zr/Rb 峰值与施雅风等人<sup>[30]</sup>整理的 1840 年来长江流域大洪水历史记录对应很好.例如,1870 年左右 Zr/Rb 值表现出明清以来的最高值,与 1870 年的长江上中游“极值大洪水事件”相一致<sup>[30]</sup>.按历史洪水调查与实测洪水记录,公元 1870 年长江大洪水是有史以来最大的,可作为近现代特大洪水的典型代表<sup>[31]</sup>.而 1350~1840 年间缺乏连续、详细的洪水年份记录,只能从文献和其他陆地证据获得<sup>[30,32-39]</sup>.不难发现,明清以来洪水发生频繁,符合明清多洪水的特点(明清时代平均 4 a 左右发生一次水灾<sup>[40]</sup>).此外,Zr/Rb 显著高值年份与历史洪水记录对应良好,说明陆地上或者历史文献仅仅记录了较大的洪水事件,对于小规模洪水事件,其陆上证据易

被后期侵蚀冲刷而难以保存下来.

## 2.2 正常沉积与洪水沉积的粒度特征

如前所述,Zr/Rb 峰值段对应洪水期,那么其粒度分布也应符合洪水期特征.一般而言,洪水期,水动力强劲,长江携带大量粗砂入海,导致水下三角洲粗粒显著增多<sup>[41]</sup>,同时少量洪水进入湖泊后,同样会导致湖泊沉积物平均粒径增大<sup>[42]</sup>.所以粒度分布特征是洪水最直观的指标.通过选取多个 Zr/Rb 峰值段和正常值段样品进行粒度测试,发现二者粒度参数明显不同(表 1).其中 Zr/Rb 峰值段平均粒径和中值粒径显著变粗,说明水动力强,符合洪水期水下三角洲沉积物多粗粒的特征,而 Zr/Rb 值正常时段粒度整体偏细,对应非洪期.

粒度频率曲线显示(图 3(a)),洪水期与非洪期沉积均为单峰,说明物源单一,均为广阔的长江流域风化物.洪水期频率曲线高而窄,且中值粒径和平均粒径大;非洪期频率曲线低而宽,中值粒径和平均粒径小.说明洪水期,中值粒径变粗,水动力显著增强,长江携带大量粗粒沉积物入海.

概率累积曲线可以反映沉积物的搬运方式,而搬运方式与沉积环境相关.从图 3(b)可以看出,洪水期表现为明显四段或五段式累积曲线形态,缺失滚动组分,跳跃组分存在冲刷-回流分界点(约 3~4 $\Phi$ ),跳跃组分约占 30%~70%,指示水动力强,反映出主要受短距离急促洪流搬运的特征.洪水期,滚动组分大部分沉积在陆地和近岸,进入水下三角洲的滚动组分非常少,而水下三角洲和闽浙泥质区的砂质组分主要由风暴潮和波浪带来<sup>[12]</sup>;非洪期的概率累积曲线表现为典型河流相沉积的三段式曲线特征(图 3(c)),缺失滚动组分,悬移组分占 90%以上,反映了沉积物经历了稳定的较长距离悬移质低水能沉积环境.因此,水下三角洲跳跃组分含量的多少是区分洪水期和非洪期的标志,跳跃组分越多,水动力强,代表洪水发生,更多地粗粉砂随洪流在水下三角洲沉积.

## 3 讨论

洪水发生时,长江径流量和流速增大,携带大量陆源风化物入海,导致水下三角洲沉积粗粒含量增多,细粒组分在洪流带动下在离岸更远处沉积,造成 YD0901 孔粗粒相对于细粒含量明显增多,由于分选作用导致 Zr/Rb 值增大.进一步对 Zr/Rb 峰值段和正

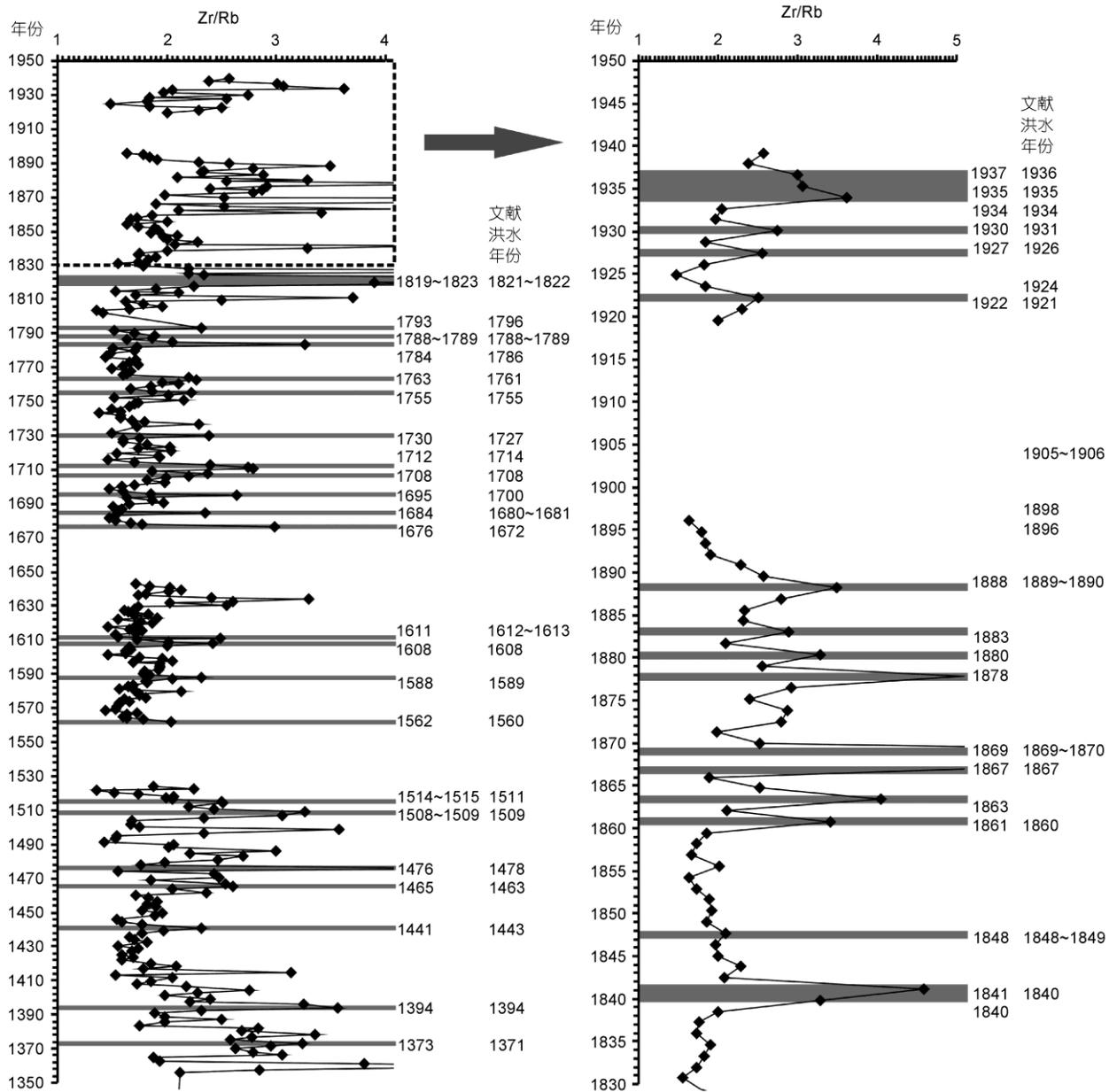


图2 YD0901孔记录的1350~1950 AD古洪水事件与历史文献洪水年份<sup>[30,32-39]</sup>对比

表1 YD0901孔洪水期和非洪水期粒度参数对比

|      | 深度/m | 平均粒径/ $\mu\text{m}$ | 中值粒径/ $\mu\text{m}$ | $\sigma$ | $S$   | $K$  |
|------|------|---------------------|---------------------|----------|-------|------|
| 洪水期  | 0.71 | 22.10               | 19.13               | 1.90     | -0.60 | 1.81 |
|      | 4.05 | 14.96               | 12.94               | 1.59     | 0.01  | 2.28 |
|      | 4.25 | 19.95               | 16.06               | 1.81     | -0.48 | 2.03 |
| 非洪水期 | 1.19 | 10.24               | 6.78                | 1.61     | 0.78  | 2.61 |
|      | 1.67 | 8.27                | 5.63                | 1.59     | 1.12  | 2.78 |
|      | 2.38 | 9.70                | 6.52                | 1.59     | 0.87  | 2.70 |

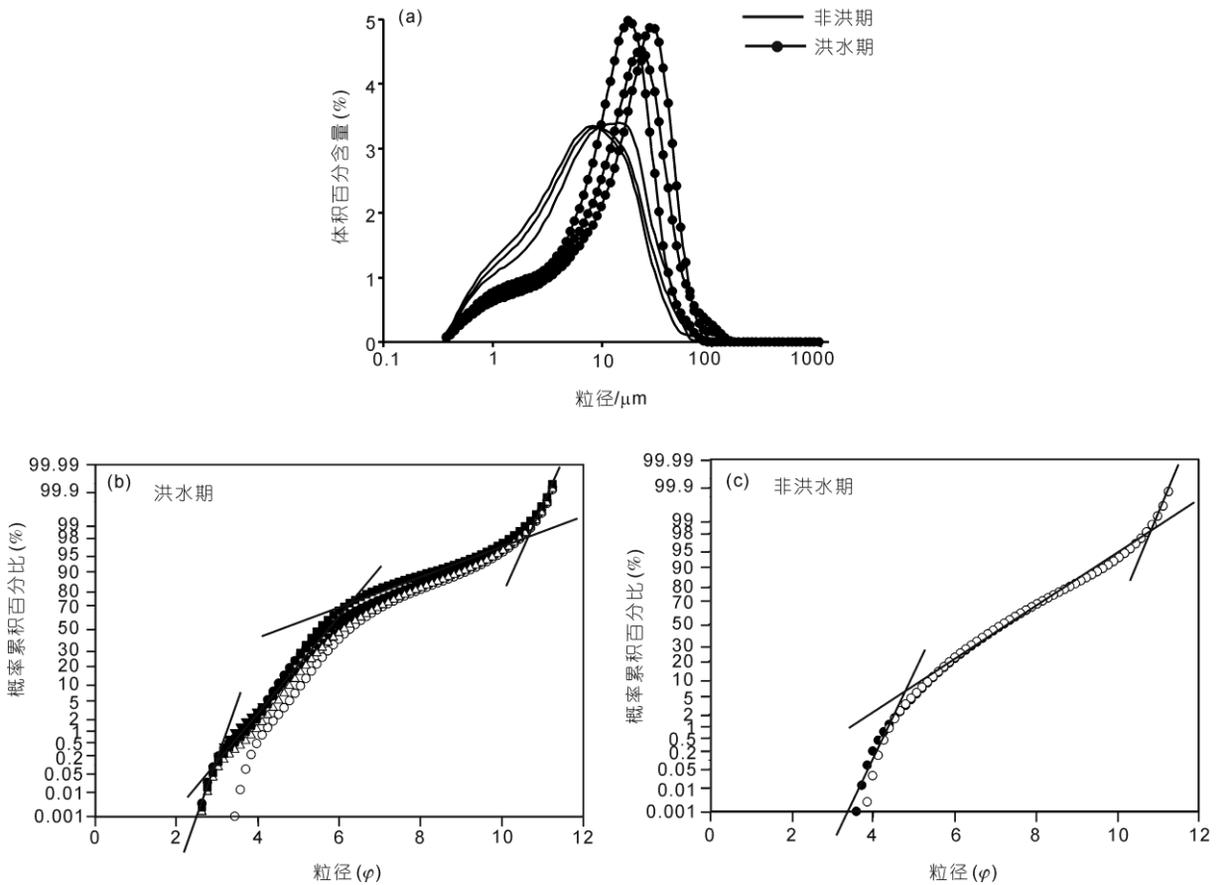


图3 YD0901孔洪水期与非洪水期的粒度频率曲线(a)和正态概率累积曲线(b), (c)对比

常值段进行粒度测试发现,洪水期的水下三角洲沉积多跳跃组分。

1840年以来,前人整理的流域洪水年份系统、详细<sup>[30]</sup>,与YD0901孔记录的Zr/Rb峰值对应良好(图2)。不难看出,自1840年来长江流域洪水事件较为频繁,每10年就发生2~3次。顶部Zr/Rb高值沉积年龄分别约为1937,1935,1934,1930,1927和1922年,很好地对应于历史文献记录的长江流域1936,1935,1934,1931,1926和1921年的几次大洪水事件<sup>[30]</sup>。1895~1920年间由于实验条件所限未能完成元素扫描。下段Zr/Rb峰值与文献记录洪水年份对应良好的有1888,1869,1867,1861,1848和1841年,彼此相差不到1年。尤其是1870年Zr/Rb值为600年来的最高值,对应长江上中游“极值大洪水事件”<sup>[30]</sup>。1878~1883年间显示出3个Zr/Rb峰值,没有历史洪水年份与之对应。可能的原因是历史文献记载的洪水年份有所遗漏;抑或仅长江流域局部发生较强的洪水事件,最终因为洪灾影响范围小而未为文献收录。而

1350~1840年间,由于缺乏连续、详细的洪水文献记录和陆地洪水遗迹,只能参考个别有文献记载的洪水年份<sup>[30,32~39]</sup>。从图2看出,同样对应良好。

总之,1350~1840年长江流域历史洪水记录年份与Zr/Rb“显著高值”年份一一对应,充分证明了陆地上或者历史文献仅仅保留了特大古洪水记录,那些长江支流小规模洪水事件,其陆地遗留证据易被后期侵蚀。而作为流域陆源风化物最终沉积中心的水下三角洲,连续、完整地记载了整个长江流域自全新世以来一定规模内的洪水事件,这是陆地或者文献洪水记录不可能具备的。

对于洪水发生的气象因素,很多学者认为<sup>[43~46]</sup>,在短尺度上洪水与ENSO存在某种联系,ENSO会带来大量降水从而引发洪水。对600年以来YD0901孔高分辨率Zr/Rb值(分辨率约为1a),利用Redfit35<sup>[47]</sup>进行频谱分析(图4)。结果显示,经95%置信度水平检验存在以下周期:6.9,5.2,4.7,4.5和3.9a,与现代ENSO大约3~8a的变化周期相吻合<sup>[48]</sup>,暗示了长江

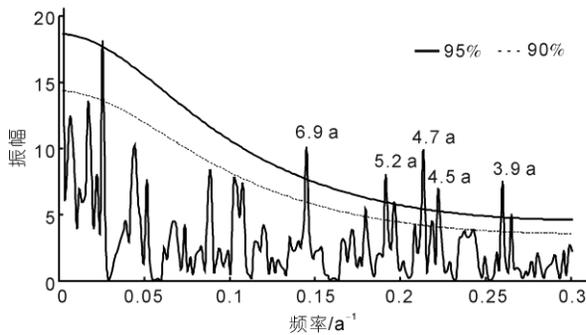


图4 YD0901孔600年来的Zr/Rb值频谱分析

流域洪水事件可能确实与低纬海洋-大气活动之间存在关联。

#### 4 结论

通过对长江水下三角洲 YD0901 孔粒度和高分

辨率元素扫描发现, 选取 Zr/Rb 值作为粗、细颗粒相对含量地化指标, 可以指示洪水事件, 并可与 600 年以来历史记录的洪水年份对应。由于 Zr 和 Rb 分别主要赋存于粗粒和细粒组分, 洪水期, 长江水动力增强, 沉积在水下三角洲的粗粒相对于细粒增多, Zr/Rb 值增大。因此, Zr/Rb 峰值越高, 代表流域洪水越强。1870 年左右 Zr/Rb 值表现为 600 年以来最高值, 符合 1870 年长江中上游“极值大洪水事件”。对高分辨率 Zr/Rb 值进行频谱分析, 证明了长江流域的洪水可能与 ENSO 存在某种关联。相比于陆地上的洪水沉积与地貌记录, 水下三角洲所记录的流域洪水事件更加连续、完整, 并且年代序列更可靠。600 年以来水下三角洲记录的洪水事件与历史文献洪水年份对应良好, 为恢复长江流域更长时期的高分辨率古洪水事件带来新的突破。

#### 参考文献

- 1 姜彤, 施雅风. 全球变暖、长江水灾与可能损失. 地球科学进展, 2003, 18: 277—284
- 2 黄忠恕. 长江流域历史水旱灾害分析. 人民长江, 2003, 34: 1—3
- 3 杨达源, 谢悦波. 古洪水平流沉积. 沉积学报, 1997, 15: 29—32
- 4 白九江, 邹后曦, 朱诚. 玉溪遗址古洪水遗存的考古发现和初步研究, 科学通报(增刊 I), 2008, 53: 17—25
- 5 朱诚, 郑朝贵, 马春梅, 等. 长江三峡库区中坝遗址地层古洪水沉积判别研究. 科学通报, 2005, 50: 2240—2250
- 6 张玉芬, 李长安, 陈亮, 等. 基于磁组构特征的江汉平原全新世古洪水事件. 地球科学, 2009, 34: 985—992
- 7 赵景波, 周晓红, 孙贵贞. 咸阳渭河高漫滩沉积洪水变化研究. 沉积学报, 2007, 25: 597—602
- 8 李保华, 李从先, 沈焕庭. 冰后期长江三角洲沉积通量的初步研究. 科学通报, 2002, 32: 776—782
- 9 Li C X, Chen Q Q, Zhang J Q, et al. Stratigraphy and paleoenvironmental changes in the Yangtze Delta during the Late Quaternary. J Asian Earth Sci, 2000, 18: 453—469
- 10 Li C X, Wang P, Sun H P, et al. Late Quaternary incised-valley fill of the Yangtze delta (China): Its stratigraphic framework and evolution. Sediment Geol, 2002, 152: 133—158
- 11 王可, 郑洪波, Maarten P, 等. 东海内陆架泥质沉积反映的古环境演化. 海洋地质与第四纪地质, 2008, 28: 1—10
- 12 肖尚斌, 李安春, 蒋富清, 等. 近 2 ka 来东海内陆架的泥质沉积记录及其气候意义. 科学通报, 2004, 49: 2233—2238
- 13 肖尚斌, 李安春, 陈木宏, 等. 近 8 ka 东亚冬季风变化的东海内陆架泥质沉积记录. 地球科学, 2005, 30: 574—581
- 14 李从先, 范代读. 全新世长江三角洲的发育及其对相邻海岸沉积体系的影响. 古地理学报, 2009, 11: 115—122
- 15 李从先, 范代读, 张家强. 长江三角洲地区晚第四纪地层及潜在环境问题. 海洋地质与第四纪地质, 2000, 20: 1—7
- 16 Chen Z Y, Saito Y, Kanai Y, et al. Low heavy metal concentration in the Yangtze estuarine sediment, China: a diluting setting. Estuar Coast Shelf Sci, 2004, 60: 91—100
- 17 Chen Z Y, Stanley D J. Yangtze delta, eastern China: 2. Late Quaternary subsidence and deformation. Mar Geol, 1993, 112: 13—21
- 18 Liu J P, Xu K H, Li A C, et al. Flux and fate of Yangtze River sediment delivered to the East China Sea. Geomorphology, 2007, 85: 208—224
- 19 唐保根, 笄一平. 长江水下三角洲浅孔岩芯的地层划分. 海洋地质与第四纪地质, 1986, 6: 41—52
- 20 秦蕴珊, 赵一阳, 陈丽蓉, 等. 东海地质. 北京: 科学出版社, 1987. 100—136
- 21 Wang Z Y, Saito Y, Hori K, et al. Yangtze offshore, China: Highly laminated sediments from the transition zone between subaqueous delta and the continental shelf. Estuar Coast Shelf Sci, 2005, 62: 161—168
- 22 李从先, 范代读, 杨守业, 等. 中国河口三角洲地区晚第四纪下切河谷层序特征和形成. 古地理学报, 2008, 10: 87—97
- 23 李从先, 汪品先. 长江晚第四纪河口地层学研究. 北京: 科学出版社, 1998. 114—172

- 24 Chen J, An Z S, John H. Variation of Rb/Sr ratios in the loess-paleosol sequences of central China during the last 130000 years and their implications for monsoon paleoclimatology. *Quat Res*, 1999, 51: 215—219
- 25 刘连文, 陈骏, 陈旻, 等. 最近 130 ka 以来黄土中 Zr/Rb 值变化及其对冬季风的指示意义. *科学通报*, 2002, 47: 702—706
- 26 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. *海洋地质与第四纪地质*, 2003, 23: 35—38
- 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. *科技导报*, 2007, 25: 22—27
- 28 陈骏, 仇纲, 鹿化煜, 等. 最近 130 ka 黄土高原夏季风变迁的 Rb 和 Sr 地球化学证据. *科学通报*, 1996, 41: 1963—1966
- 29 范德江, 齐红艳, 孙晓霞, 等. 长江水下三角洲现代沉积速率厘定的新途径: 季节性 Bio-Si 记录. *中国海洋大学学报*, 2009, 39: 1025—1028
- 30 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. *湖泊科学*, 2004, 16: 289—297
- 31 葛兆帅, 杨达源, 李徐生, 等. 晚更新世晚期以来的长江上游古洪水记录. *第四纪研究*, 2004, 24: 555—560
- 32 朱诚, 于世永, 卢春成. 长江三峡及江汉平原地区全新世环境考古与异常洪涝灾害研究. *地理学报*, 1997, 52: 268—278
- 33 乔盛西, 陈正洪. 历史时期川江石刻洪水资料的分析. *湖北气象*, 1991, 1: 4—7
- 34 田晓四, 朱诚, 尹茜, 等. 长江三峡库区中坝遗址地层洪水沉积粒度特征及其沉积环境. *沉积学报*, 2007, 25: 261—266
- 35 吴庆龙, 张培震, 张会平, 等. 黄河上游积石峡古地震堰塞溃决事件与喇家遗址异常古洪水灾害. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2009, 39: 1148—1159
- 36 赵会霞, 郑景云, 葛全胜. 1755、1849 年苏皖地区重大洪涝事件复原分析. *气象科学*, 2004, 24: 460—467
- 37 Yi C L, Liu H F, Rose N L, et al. Sediment sources and the flood record from Wanghu Lake, in the middle reaches of the Yangtze River. *J Hydrol*, 2006, 329: 568—576
- 38 何华春, 王颖, 李书恒. 长江南京段历史洪水水位追溯. *地理学报*, 2004, 59: 938—947
- 39 谢远云, 李长安, 王秋良, 等. 江汉平原近 3000 年来古洪水事件的沉积记录. *地理科学*, 2007, 27: 81—84
- 40 刘沛林. 长江流域历史洪水的周期地理学研究. *地球科学进展*, 2000, 15: 503—508
- 41 Brown S L, Bierman P R, Andrea L, et al. 10000 yr record of extreme hydrologic events. *Geology*, 2000, 28: 335—338
- 42 史小丽, 秦伯强. 近百年来长江中游网湖沉积物粒度特征及其环境意义. *海洋地质与第四纪地质*, 2009, 29: 117—122
- 43 唐佑民, 郭岚. 我国旱涝影响因子探讨. *地理科学*, 1990, 1: 77—84
- 44 张利平, 夏军. 厄尔尼诺事件及其对西太平洋副高和长江中下游洪水影响的初步研究. *大自然探索*, 1999, 18: 86—90
- 45 Jiang T, Zhang Q, Zhu D M, et al. Yangtze floods and droughts (China) and teleconnections with ENSO activities (1470—2003). *Quat Int*, 2006, 144: 29—37
- 46 Yu F L, Chen Z Y, Ren X Y, et al. Analysis of historical floods on the Yangtze River, China: Characteristics and explanations. *Geomorphology*, 2009, 113: 210—216
- 47 Schul Z M, Mudelseem M. REDFIT: Estimating red-noise spectra directly from unevenly spaced paleoclimatic time series. *Comput Geosci*, 2002, 28: 421—426
- 48 Peng Z, Chen T, Nie B, et al. Coral  $\delta^{18}\text{O}$  records as an indicator of winter monsoon intensity in the South China Sea. *Quat Res*, 2003, 59: 285—292