

doi:10.3799/dqkx.2014.025

钱塘江河口涌潮河段滩槽演替与沉积层序

涂俊彪, 范代读*, 尚 帅, 陈玲玲, 张 悦

同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092

摘要: 通过分析时间序列的卫片资料、4 m 高的露头剖面的沉积学和元素地球化学特征, 研究钱塘江涌潮河段的滩槽冲淤变化规律、涌潮沉积特征和沉积层序。涌潮河段河道宽浅, 受径流与潮流相互作用强烈, 冲淤频繁且剧烈, 滩槽演替存在约 20 a 的周期, 与流域年代际洪、枯期转变有关。在滩槽叠置的垂向层序中, 底部为河槽、低潮滩相的厚层块状砂质沉积, 发育各种变形沉积构造, 为典型的涌潮沉积; 顶部为高潮滩相的潮汐韵律沉积, 发育典型的潮汐成因的双黏土层、大小潮周期; 二者之间的中潮滩相呈渐变过渡。C-M 图和概率累计曲线可较好地地区分涌潮沉积与潮成砂、泥质沉积。涌潮沉积层 Si/Al、Zr/Al、Ti/Al 等元素比值较高, 而潮汐韵律层 Fe/Al、Mn/Al 等元素比值较高, 这与它们的赋存方式和水动力分异有关。Si、Zr 和 Ti 主要见于石英和重矿物中, 因此在强水动力沉积层中富集; 而 Fe、Mn 易被黏土矿物吸附, 在水动力较弱的中高潮滩富集。

关键词: 钱塘江; 涌潮沉积; 沉积物; 粒度分析; XRF 岩心无损探测; 地球化学。

中图分类号: P595

文章编号: 1000-2383(2014)03-0261-10

收稿日期: 2013-09-26

Evolution and Sedimentary Sequence of Tidal Channel-Flat System at Bore-Affected Reach of the Qiantang Estuary

Tu Junbiao, Fan Daidu*, Shang Shuai, Chen Lingling, Zhang Yue

State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China

Abstract: Sedimentary features of tidal-bore deposits, evolution and resultant sedimentary sequence of main channel and tidal flat in the Qiantang Estuary are studied in detail by analyses of time-series satellite photos, and sedimentological and geochemical characters of a 4 m high crop. The wide and shallow channel at the bore-affected reach shifts rapidly under intense interaction of tidal flow and river runoff. There is channel evolution cycle of ~20 years linked to the decadal alterations of dry and wet periods in the catchment. On the vertical facies association of tidal channel-flat system, the lower section is a typical tidal-bore deposit at the main channel and the lower tidal flat, characterized by thick massive sandy beds with well developed soft-sediment deformation structures. The upper section is tidal rhythmite at the higher tidal flat, typical of mud couplets and spring-neap tidal cycles of tidal origin. The middle tidal-flat facies bears both sedimentary features of tidal-bore deposits and tidal rhythmite. C-M diagram and probability cumulative curve are useful to differentiate tidal-bore deposits from tidal sandy/muddy deposits. There is a general trend of higher ratios of Si/Al, Zr/Al and Ti/Al in tidal-bore deposits, and Fe/Al and Mn/Al in tidal rhythmites, which is mainly related to elemental behavior and selected sorting of hydrodynamic. Elements of Si, Zr and Ti majorly present in quartz and heavy minerals are therefore abundant in the higher energy depositional environment, while Fe, Mn elements which can be easily adsorbed by clay minerals are consequently enriched in the lower energy sedimentary environment.

Key words: Qiantang River; tidal-bore deposit; sediments; grain-size analysis; XRF nondestructive core scanning; geochemistry.

涌潮是当强潮流进入喇叭形的河口后形成的一种行进式水跃, 其所蕴藏的巨大能量, 能够对河口环

境、生态和工程等造成重大影响, 因此备受工程界和学术界的关注。近二十几年来, 涌潮水力学(Chan-

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 41076016, 41276045); 中国地质调查局海保工程专项(No. GZH201100203); 中央高校基本科研业务费专项资金。

作者简介: 涂俊彪(1989-), 男, 硕士研究生, 海洋地质学专业。E-mail: jbtu_mail@126.com

* 通讯作者: 范代读, E-mail: ddfan@tongji.edu.cn

son, 2009; Chanson *et al.*, 2010) 和沉积作用 (Greb and Archer, 2007; Fan *et al.*, 2012) 等方面的研究不断取得新进展。如阿拉斯加因频繁受到地震影响, 在 Turnagain Arm 河口边滩沉积中广为发育的软沉积变形构造(包卷层理、火焰状构造、碟状构造等)一直被认为是地震成因形成的, 后经现场详细考察, 确认大部分是涌潮或地下水潜流造成的 (Greb and Archer, 2007)。与涌潮作用有关的软沉积变形构造同样见于钱塘江河口湾 (Fan *et al.*, 2012) 和 Mont-Saint-Michael 湾 (Tessier and Terwindt, 1994)。但在强潮型河口湾的沉积层序和沉积相模式中 (Zhang and Li, 1996; 潘峰等, 2011; Dalrymple *et al.*, 2012), 却很少提及涌潮作用所形成的特征沉积构造。在地质历史时期, 尤其是若干高海面时期强潮河口湾更加发育, 涌潮沉积也可能比现在分布更广泛, 但由于缺少现代沉积学证据, 古代涌潮沉积往往可能被误解或错判 (Martinius and Gowland, 2011), 因此有必要加强现代涌潮沉积相研究。

钱塘江尖山岸段河道受径流与潮流相互作用强烈, 自然状态下河宽水浅, 冲淤频繁且剧烈, 主槽游荡严重 (林炳尧, 2008)。通过对不同时期的滩面地形态测量结果以及测深资料的对比, 可以从一定程度上认识河床冲淤演变的规律 (冯应俊等, 1990)。在河床摆动、滩槽演替过程中, 形成河槽与边滩沉积相叠置的层序, 在一些侵蚀陡坎上可以清晰呈现。本次研究选择尖山岸段, 于 2011 年夏季特大洪水之后, 在北岸寻找侵蚀陡坎进行详细的野外观测, 取柱状沉积物样进行室内研究, 深入探讨涌潮河段的沉积特征与沉积相序组合。

1 研究区概况

钱塘江流入杭州湾, 后者呈喇叭形, 湾口宽度达 100 km, 而在相距 86 km 的湾顶澉浦断面宽度骤减至 21 km, 再向上游至十堡一带, 河宽仅 4 km 余。受该地形的影响, 潮波在杭州湾向内传播的过程中, 潮差不断增大, 平均潮差从湾口附近的约 2.0 m 增大到澉浦附近的约 5.6 m (图 1a)。钱塘江河口存在一个巨大沙坎, 河床自乍浦开始缓慢抬升, 澉浦至盐官河段坡度加大 (图 1b), 导致潮波剧烈变形, 大潮时在尖山附近开始形成涌潮。沙坎的发育与涌潮是相互依存的 (陈吉余等, 1964; 钱宁等, 1964; Yu *et al.*, 2012)。

钱塘江河口属强潮型, 潮位变化可达富春江电站下游, 该处以下统称为河口区, 全长约 280 km。综合潮流与地形地貌变化, 可大致以闻堰、澉浦为界进一步分为近口段、河口段和口外段 (图 1)。河口段根据河道纵向起伏和宽窄变化, 大致以八堡为界划分为上、下两段。上段包括沙坎后坡、顶部, 在近几十年围涂工程之后, 河道已经缩窄规整; 尖山河段处在沙坎前坡, 河道仍然宽浅, 冲淤频繁, 摆动剧烈, 发育大面积的潮滩和河间沙坝。

2 材料与方法

近几年钱塘江流域较干旱, 径流小致使涌潮河段淤积较明显, 尖山一带潮滩发育, 2011 年 5 月笔者野外地质考察时见数百米至 2.5 km 宽的潮滩, 是当时河口段内最宽的潮间带。随后钱塘江流域进入多年少见的强降雨的梅雨季节, 洪水造成河道强烈冲刷。2011 年 8 月再次前往尖山岸段, 原来宽浅的潮滩已被冲蚀殆尽, 只有受安澜塔导堤保护的近岸高滩部分得到保存, 滩前形成高达 4 m 多的陡崖 (图 2a)。沿侵蚀陡坎由上而下, 依次将 1 m 长的 PVC 管锤入沉积物内再挖出。上部 2 m 地层较松软, 在锤击取样时分别有 5 cm 和 7 cm 的压实, 该过程通常认为是线性压缩, 并依此进行柱状样长度的校正 (王爱军等, 2006)。底部 2 m 地层比较密实, 沉积物未发生压实, 但因 PVC 管在锤击过程中顶部发生碎裂, 实际 JS11-3 和 JS11-4 取心长度为 88 cm 和 92 cm。两端填封密实后运回实验室进行沉积学分析。

沉积物短柱样在实验室对半剖开后, 一半用保鲜膜等包装好后放在岩心库低温保存, 另一半先进行沉积物表面的平整与清理, 使层理更加清晰, 然后进行沉积物特性和沉积构造描述、拍照等。之后, 采用 Avaatech XRF 岩心扫描仪进行连续拍照和元素分析, 后者测试单元间隔为 1 cm, 依次在 10 kV、500 mA 和 30 kV、1 000 mA 工作条件下, 获取元素周期表中从 Al 到 Ba 各元素的相对含量。

岩心经 XRF 扫描后再分别对砂、泥质纹层取样, 进行沉积物粒度分析, 厚的砂层则按 2 cm 间距进行取样, 单个样品的取样范围一般限于 $2 \times 2 \sim 3 \times 3 \text{ mm}^2$, 以更好地揭示单个沉积动力过程。4 个短柱共取了 192 个粒度分析样, 一般泥质层取 0.25~0.35 g, 砂质层取 0.45~0.55 g, 具体取样层位详见图 2b。沉积物粒度分析先进行预处理, 分别加浓度 30% 的双氧水和浓度 10% 的稀盐酸去除有机质和

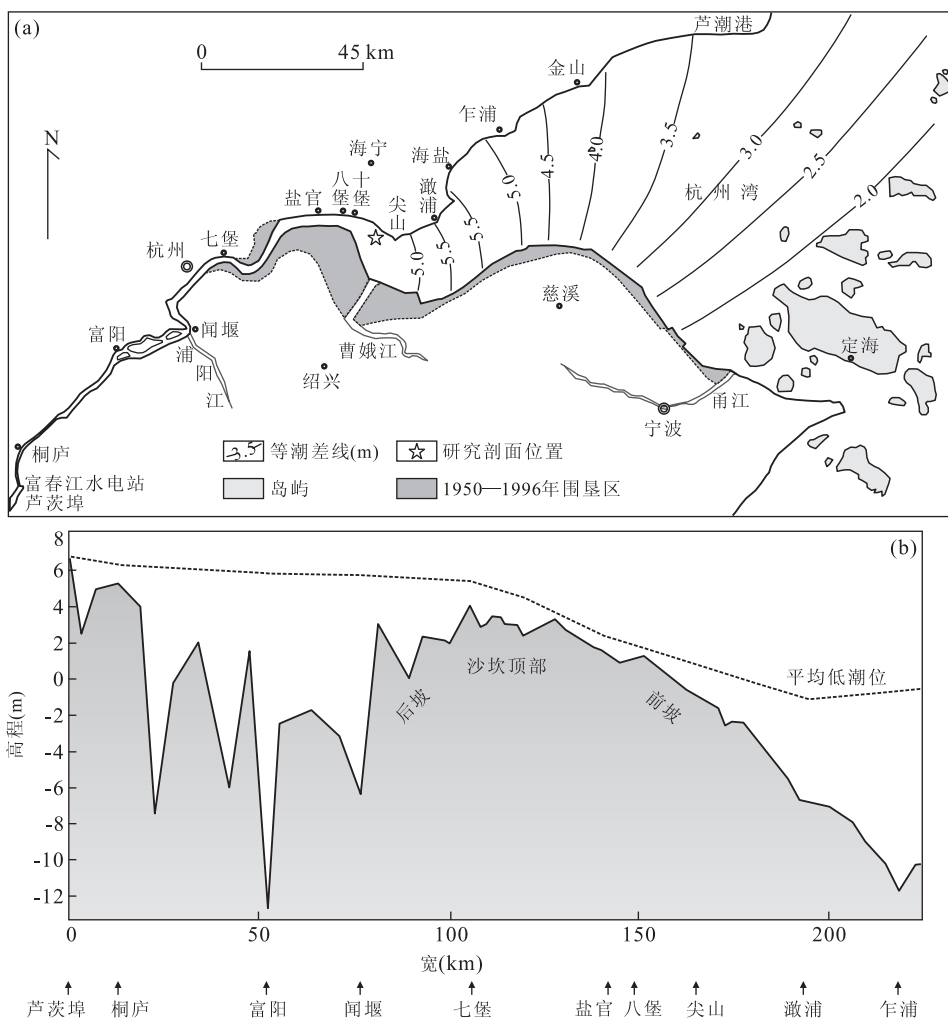


图 1 钱塘江河口—杭州湾概略图和研究剖面位置(a)与钱塘江河口沙坎形态(b)(改自林炳尧, 2008)

Fig. 1 Map of Qiantangjiang estuary and Hangzhou Bay and sample position for grain size analysis of core JS11 (a) and eroded sediment cliff (b)

碳酸盐(郭艳霞等, 2004). 加入 1 000 mL 去离子水静置 24 h, 待沉积物充分沉淀后, 将上层水抽出, 保留少量悬浮液, 再将沉积物悬浮液进行超声分散, 转移至 Beckman Coulter LS230 型激光粒度仪中进行粒度测试, 该仪器测量范围为 0. 375~2 000 μm . 粒度参数的计算采用矩值法, 使用 Matlab 软件三次多项式插值法得到累积概率 1% 和 50% 的值, 即 C 值与 M 值.

卫片数据从美国地质调查局(USGS)网站下载, 为消除不利因素对潮滩识别产生的影响, 本研究筛选了良好天气、云雾较少、中低潮位下的卫片进行分析. 最终获得了 1995—2011 年间的卫片 4 幅, 经大气校正后, 对不同波段影像进行对比、筛选、融合, 以获得最佳影像效果, 随后进行水边线的提取, 描绘出潮滩大致分布形态, 卫片取景范围介于八堡和激浦之间的河道(图 1).

3 结果与讨论

3.1 沉积构造

JS11 剖面发育多种类型的沉积构造(图 2), 顶部 100 cm 发育泥质纹层、双黏土层、大小潮韵律层和波状层理等常见的潮汐成因的原生沉积构造. 埋深 110~200 cm 段除砂、泥互层层理外, 发育扰动褶曲构造, 可能是锤击取样或侵蚀陡坎滑塌所致, 也可能是松软沉积物在上覆层压力或是涌潮形成的压力作用下变形所致. 其中受涌潮影响导致松软沉积物发生液化, 形成的各种变形构造也常见于其他涌潮河口, 如阿拉斯加的 Turnagain Arm (Greb and Archer, 2007) 和法国的 Mont-Saint-Michael 湾 (Tessier and Terwindt, 1994). 埋深 200~240 cm 层段为厚的砂质层夹薄的泥质纹层, 判断为强潮成因形成的. 埋深 265~380 cm 层段发育块状层理、不

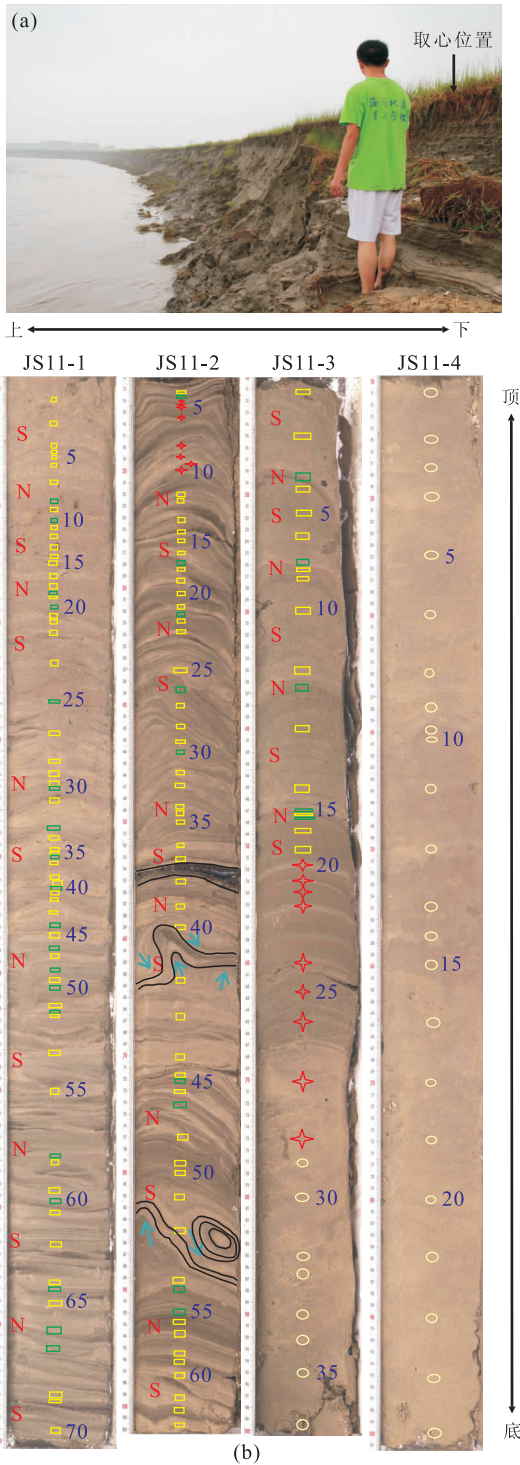


图 2 研究断面为一侵蚀陡崖(a)和约 4 m 长的岩心照片(b)
 Fig. 2 The study transect of an erosion cliff near Jianshan
 (a) and core strata with sample positions (b)
 图中人高约 1.7 m, 岩心照片上的方框、椭圆等标示取样层位, S、N 分别代表大潮(spring tide)和小潮(neap tide)

规则的砂团、泄水构造、表面起伏的侵蚀构造等, 判断为涌潮沉积. 结合其他潮滩断面的沉积特征分析认为, 典型的涌潮沉积单元包括: (1)底部平坦或起

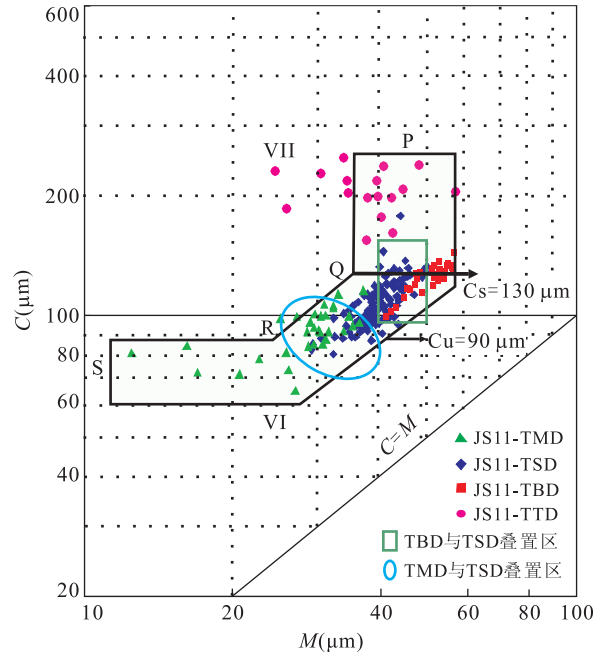


图 3 JS11 剖面沉积物 C-M 图
 Fig. 3 C-M pattern of sediments in core JS11

伏的侵蚀面; (2)上覆块状砂层; (3)平行砂质层理或砂泥互层; (4)沉积层通常发育各种变动构造, 如包卷层理、负载—火焰状构造、泄水构造等 (Fan *et al.*, 2012).

3.2 粒度分析

3.2.1 C-M 图解 C-M 图常用来区别不同沉积环境 (Passega, 1964), 这里用来判断不同动力过程的沉积物. JS11 剖面沉积物 C-M 图的总体分布特征与河流相 C-M 图的 S-R-Q-P 段类似 (图 3). 其中, 潮成泥质沉积 (TMD) 在 C-M 图上的点较分散, 但主体分布在 SR 段, 其特征是平行于横坐标 (M 值), 被认为是均匀悬浮沉积. 潮成砂质沉积 (TSD) 集中分布在 RQ 段的中下部, 涌潮沉积 (TBD) 主要分布于 QR 段的上部, 部分落在 PQ 段上. RQ 段以平行于 $C=M$ 为特征, 为递变悬浮沉积; PQ 段以平行于纵坐标 (C 值) 为特征, 以悬浮沉积为主, 含少量滚动搬运组分. 由此可见, 钱塘江涌潮河段的沉积物总体缺少滚动搬运组分, 以悬浮沉积为主. 此外, C-M 图上 TBD 与 TSD、TSD 与 TMD 均有一定的叠置区, 反映不同沉积过程是渐变过渡的. 均匀悬浮和递变悬浮搬运的最大沉积物粒径 (C_u 与 C_s) 分别为 $90 \mu\text{m}$ 、 $130 \mu\text{m}$, 与河流相的对应值相比均偏小, 可能与研究区沉积物较细有关 (陈吉余等, 1964).

值得注意的是, 埋深 100~110 cm 段和 240~265 cm 段沉积物与相邻层段比较, 具较大的 C 值,

因此在 $C-M$ 图上这 2 个层段的点落在相邻层段的上方(图 3)。 C 值增大是局部水动力增强的反映还是沉积物颗粒形态差异造成的,为了回答该问题,笔者对不同层位粗颗粒矿物组成与形态特征进行了初步分析。分别选取上述 2 个层段、典型涌潮沉积和潮成砂质沉积层进行取样,低温烘干后各称取 100 g,用 230 目的筛子筛去 $63\ \mu\text{m}$ 以下的细颗粒,粗颗粒样品在反射光显微镜下放大 40 倍进行观察并拍照(图 4)。对比发现,涌潮沉积见较多的近似等轴状的重矿物,而 2 个 C 值异常增大层段沉积物见较多的板状、块状轻矿物。由此可见, $C-M$ 图上 C 值增大的异常点主要是沉积物颗粒形态和密度差异造成的,将其命名为过渡型潮汐沉积(TTD),发育层位介于涌潮沉积、潮成砂质沉积为主和泥质沉积为主的 3 个不同层段之间,是涌潮河口不同水动力作用边界的体现。

3.2.2 概率累积曲线 概率累积曲线可以较好地反映搬运方式(Visher, 1969),而搬运方式又与水动力和沉积环境相关。涌潮河段沉积物概率累积曲线大体表现为 2 段式,缺乏滚动组分(图 5),这与 $C-M$ 图分析结果一致,是研究河段沉积物较细、涌潮过程强烈紊动流共同造成的。涌潮沉积的跳跃组分含量为 $65\% \sim 85\%$,潮成砂、泥质沉积的跳跃组分分别为 $50\% \sim 80\%$ 和 $40\% \sim 85\%$,总体表现为平均值下降而变幅增加的趋势;涌潮沉积的跳跃与悬浮次总体截点在 5ϕ 左右(粒级标准采用等比粒径中的 ϕ 标准, $\phi = -\log_2 d$, d 为直径 mm),潮成砂、泥质沉积的跳跃与悬浮次总体截点分别为 $5 \sim 6\phi$ 和 $5 \sim 7\phi$,同样指示截点对应的沉积物粒径变细,且变幅增大。这与水动力由受涌潮剧烈作用的河道向两侧

边滩逐渐减弱的趋势性变化是一致的。

值得注意的是,过渡型潮汐沉积的概率累积曲线表现为 3 段式,底部出现“滚动次总体”含量约 5% (图 5)。上一节分析认为,这些层位中的少量粗颗粒组分并非真的呈滚动方式搬运,而是受到颗粒形态和密度等的影响,在潮滩剖面局部层位相对富集,如果剔除这部分影响,其概率累积曲线可能与潮成砂质沉积相接近(图 5)。

3.3 元素地球化学组成特征

XRF 岩心扫描仪测试结果以相对强度表达,相对强度越高,则表示所对应的元素含量越高。本次研究选择相对强度大于 1 000 的元素比值进行讨论,其中 Si/Al 、 Zr/Al 、 Ti/Al 比值与粒径(μm)具有较好的正相关(图 6), Fe/Al 、 Mn/Al 比值与粒径具较好的负相关。JS11 剖面底部 265~380 cm 层段 Si/Al 值较高, Zr/Al 值、 Ti/Al 值比平均值稍大, Fe/Al 、 Mn/Al 值比平均值稍小,这与该层段水动力强、沉积物较粗、发育均一的块状层理等特征一致;110~265 cm 层段各元素比值波动较大,并在一些层位出现峰值,对应较厚的泥质层;顶部 30~110 cm 层段各元素比值均表现为较大振幅,对应频繁出现的砂泥互层。

在河口环境中,无机化学组成常受到水动力对矿物的分选作用的控制(Bertrand *et al.*, 2012)。碎屑沉积物中的 Si、Zr、Ti 分别对应沉积物中的石英、含锆或钛的重矿物,这些矿物主要富集在细砂、粗粉砂中(Schnetger *et al.*, 2000; Sun *et al.*, 2008; Martinez *et al.*, 2009; Bertrand *et al.*, 2012)。在涌潮强烈的水动力差异分选过程中,石英及含锆或

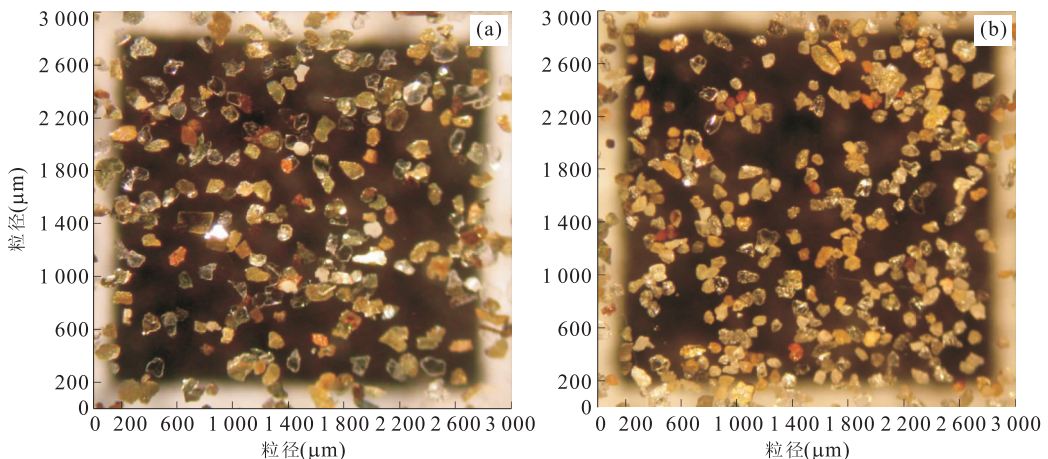


图 4 过渡型潮汐沉积(a)和涌潮沉积(b)中粗颗粒沉积物的矿物组成与形态对比分析

Fig. 4 Coarse particle sediment composition and shape analysis for tidal transitional deposits (a) and tidal-bore deposits (b) of core JS11

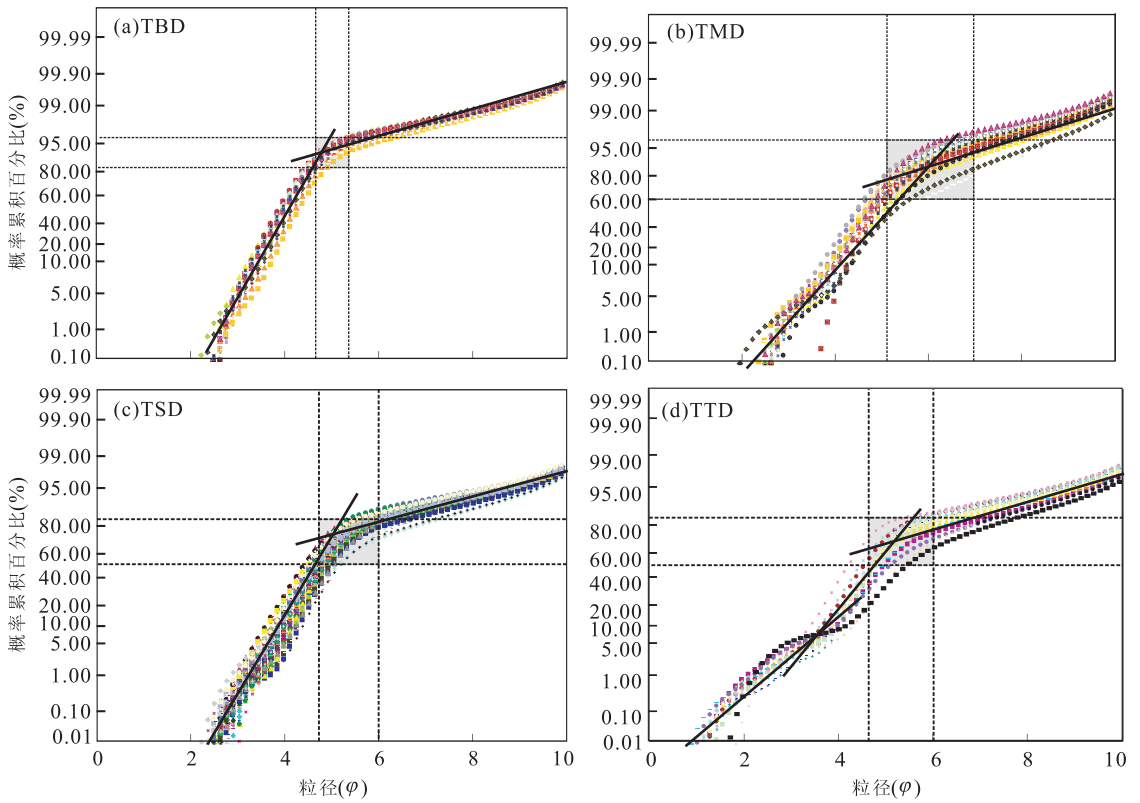


图 5 JS11 剖面沉积物概率累积曲线

Fig. 5 Probability cumulative curve of sediments in core JS11

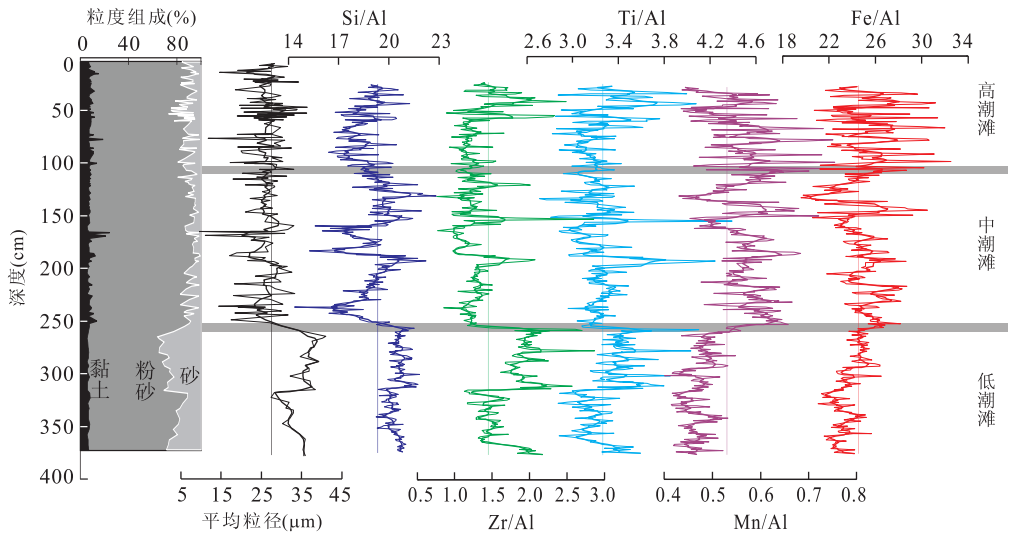


图 6 JS11 钻孔粒度组成及元素比值随深度变化

Fig. 6 Downhole variations in grain sizes and element ratios in core JS11

细线为原始数据;粗线为 5 点滑动平均数据;其中平均粒径底部 150 cm 为 3 点滑动平均

钛的重矿物、等近似等轴状矿物由于颗粒和比重均较大,更多集中在水动力较强的河道及其附近,而在潮滩中这些矿物的含量有所减少,并随着砂泥互层的变化而变化。Fe/Al、Mn/Al 比值向上增加且出现大幅波动,这主要与砂、泥层厚度变化有关,因为

河口环境中通过粘土矿物的吸附作用,使 Fe、Mn 元素在细粒沉积物中相对富集 (Millwarda *et al.*, 1999; Carrey and Taillefert, 2005; Kolditz *et al.*, 2012)。JS11 柱状样总体底部泥质沉积物含量较低,中部砂泥互层厚度变化较大,时而出现较厚的泥质

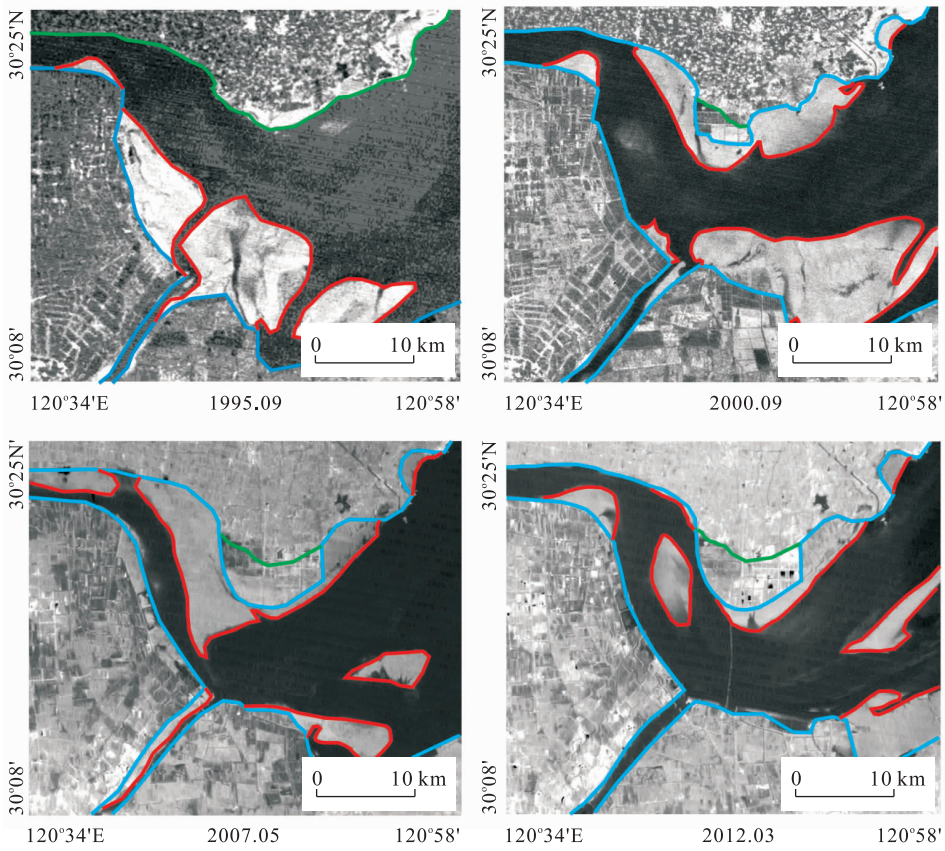


图 7 尖山河段历年遥感图像对比

Fig. 7 Time-series analysis of satellite photos of Jianshan river section
绿色实线;蓝色实线和红色实线分别代表围垦前岸线;围垦后岸线和潮滩水边线

层,上部为较均一的砂泥互层,这与 Fe/Al、Mn/Al 比值随钻孔深度变化的趋势是一致的。

3.4 岸滩演变

潮滩变迁的野外观测在时间和空间上存在较大的局限性,近十几年来遥感卫片被广泛地应用于潮滩的地貌变迁研究(Phinn *et al.*, 2000; Ryu *et al.*, 2002; Murray *et al.*, 2012),并取得了较好的效果.研究表明,Landsat 遥感卫片数据中热红外波段在提取水边线时,效果较其他波段好,但由于该波段影像分辨率较低,故需与其他波段综合判断潮滩水边线(Ryu *et al.*, 2002). 本文使用该方法进行卫片潮滩信息的提取,以较好地认识潮滩—主河槽的演化规律和涌潮对沉积地貌的塑造。

位于钱塘江河口段的尖山河段由于受到径流和潮流的共同作用,自然条件下河道摆动剧烈. 1996 年后的沿江围涂在一定程度上使这种状况得到控制,但未能从根本上改变滩槽演替的规律. 1995 年尖山北岸为冲刷河槽;2000 年发育一定规模的潮滩;2007 年潮滩继续扩大;2012 年北边滩已被洪水冲蚀(图 7). 研究表明,钱塘江涌潮河段河槽演替主

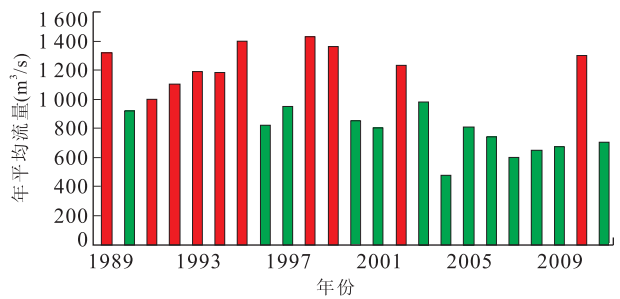


图 8 钱塘江流域径流年际变化(数据来自 <http://www.zjsw.cn>)

Fig. 8 Facies model of tidal channel-flat system in the bore-affected reach of the Qiantang estuary

要受径流控制(林炳尧,2008;曾剑等,2010),1990—1999 年总体上为丰水期(图 8),北岸处于冲刷状态;随后进入长达 11 年的枯水期(2000—2010 年),北岸边滩慢慢淤涨,主槽南迁;2011 年夏季后,北岸再次被冲刷. 这是由于在丰水年或丰水期,北边河槽受到径流和落潮流的双重冲刷,吸引涨潮流傍北,南边河槽萎缩淤塞,形成较大面积的边滩. 反之,在枯水年或枯水期,则北岸发育高潮滩。

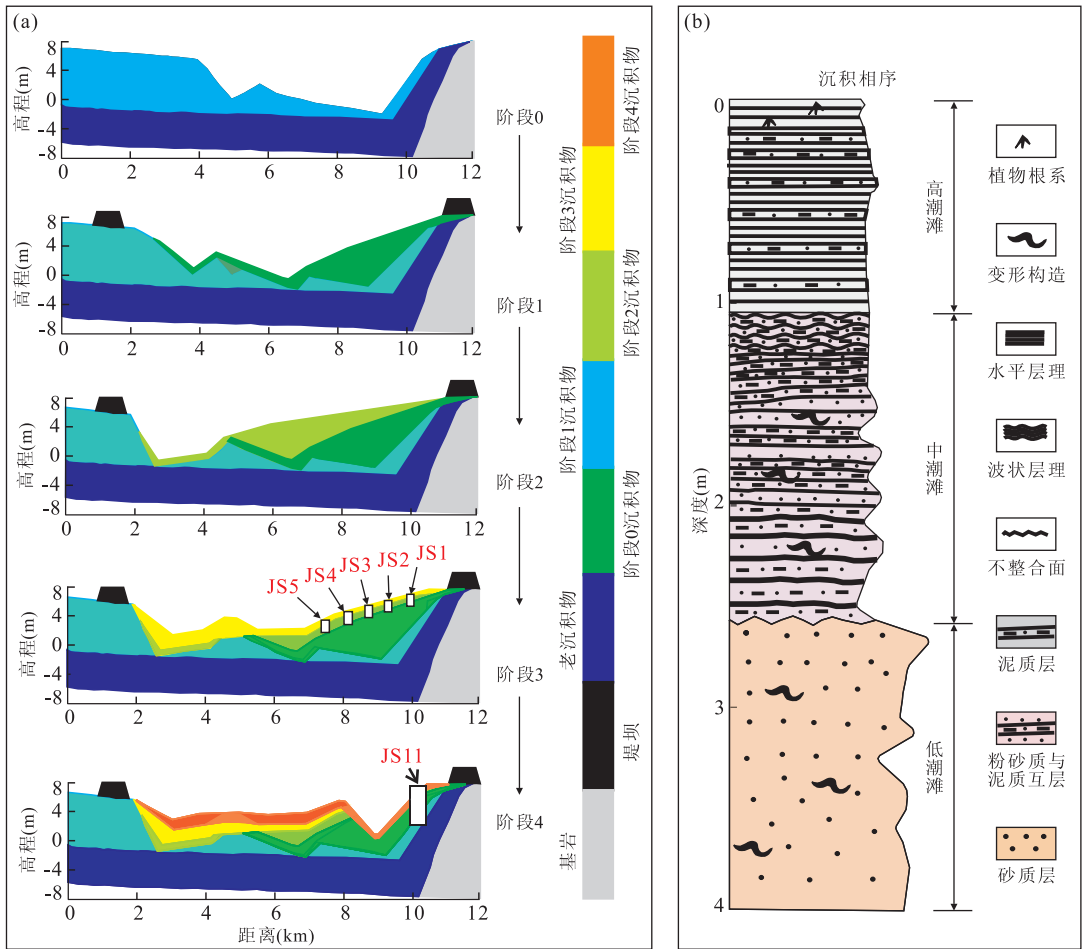


图 9 钱塘江涌潮河段滩槽演替模式与沉积相序组合

Fig. 9 Facies model of tidal channel-flat system in the bore-affected reach of the Qiantang estuary

3.5 涌潮河段滩槽沉积相序及成因探讨

钱塘江涌潮河段滩槽演替受到径流的控制, 1999 年为前一丰水期结束, 当时北岸处于冲刷, 可能类似于 1995 年卫片所示的情况, 主槽紧邻北侧河堤, 涌潮直达堤前(图 9a, 阶段 0); 随后进入长达 11 年(2000—2010 年)的枯水期, 北岸逐渐淤积, 主槽南迁, 2007 年卫片显示当时与北岸相连的潮滩已非常接近南岸, 2010 年 5 月沿尖山断面取 5 根短柱状样 JS1~JS5 进行沉积学研究(图 9a, 阶段 3), 发现靠近河槽的 JS5 孔沉积物颗粒较粗, 发育块状层理、变形构造为主的涌潮沉积, 向岸逐步过渡为细粒的泥质沉积, JS1 孔发育砂泥薄互层, 粉砂质纹层厚度呈规律性变化, 是大小潮周期的记录(Fan *et al.*, 2012)。

2010 年夏季开始进入新的丰水期, 径流增强导致北侧岸滩不断冲刷, 原来宽达 2.5 km 的潮滩至 2011 年 8 月已基本被冲刷殆尽(图 9a, 阶段 4)。沿侵蚀陡坎取柱状样 JS11 进行沉积学和地球化学分析,

发现上部发育砂泥薄互层和大小潮周期, 类似于高潮滩 JS1 孔的沉积特征; 中部为较厚的砂质层与砂泥韵律层交互, 类似于中潮滩 JS3 孔的沉积特征; 底部为块状砂质层, 发育变形构造, 较致密, 与低潮滩 JS5 孔的沉积特征类似(Fan *et al.*, 2012)。可见, JS11 约 4 m 的沉积剖面正好揭示了涌潮河段滩槽叠置形成的沉积层序, 典型相序组合特征是底部为河槽、低潮滩环境的涌潮沉积相, 顶部为高潮滩、盐沼环境的潮汐韵律沉积相, 二者之间呈渐变过渡(图 9b)。

4 结论

钱塘江涌潮河段冲淤剧烈、河槽摆动频繁, 该过程受到径流的控制: 在丰水期北岸为河槽; 枯水期则发育潮滩。滩槽演替周期一般为 10~20 a, 在进积岸段可形成完整的垂直相序, 包括底部的涌潮沉积相、顶部的潮汐韵律沉积相和两者之间的过渡相。涌潮沉积具有强紊流、快速沉积的特征, 包括底部的冲刷

面、上覆块状砂质层和平行砂质纹层等,沉积层易液化而发育各种变形构造,因此较容易区别于常规潮汐沉积形成的砂泥韵律层。涌潮沉积物粒度、矿物与元素组成也均有别于常规潮汐沉积。粒度分析表明,涌潮河段沉积物以悬浮组分为主,缺乏滚动组分,涌潮沉积(TBD)、潮成砂质沉积(TSD)、潮成泥质沉积(TMD)和过渡层沉积(TTD)等在C-M图与概率累积曲线上具有不同的分布特征,可以作为不同动力沉积的判别方法,其中涌潮沉积以其在C-M图中落在QR上段和PQ下段、概率累积曲线中跳跃组分含量较高为特征,指示强水动力沉积环境。Fe/Al、Mn/Al等元素比值在顶部砂泥薄互层波动频繁,在底部涌潮沉积较低,表明Fe、Mn等元素主要富集在细颗粒沉积物中,指示较弱水动力。Si/Al、Zr/Al、Ti/Al等元素比值在涌潮沉积层中较高,可能对应于石英、含锆或钛的重矿物在此相对富集,指示涌潮行进过程中强紊流对河口沉积物的再悬浮和混合作用,以及涌潮一急流过后对不同比重和粗细颗粒的差异分选,使得粒径、比重较大的颗粒先在河道发生沉积,粒径、比重较小的颗粒则被带至岸边沉积。

References

Bertrand, S., Huguen, K. A., Sepulveda, J., et al., 2012. Geochemistry of Surface Sediments from the Fjords of Northern Chilean Patagonia (44–47): Spatial Variability and Implications for Paleoclimate Reconstructions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 76: 125–146. doi: 10.1016/j.gca.2011.10.028

Carrey, E., Taillefert, M., 2005. The Role of Soluble Fe (III) in the Cycling of Iron and Sulfur in the Coastal Marine Sediments. *Limnology and Oceanography*, 50 (4): 1129–1141.

Chanson, H., 2009. Current Knowledge in Hydraulic Jumps and Related Phenomena: A Survey of Experimental Results. *European Journal of Mechanics B/Fluids*, 28(2): 191–210. doi:10.1016/j.euromechflu.2008.06.004

Chanson, H., Lubin, P., Simon, B., et al., 2010. Turbulence and Sediment Processes in the Tidal Bore of the Garonne River: First Observation. School of Civil Engineering, The University of Queensland, Brisbane.

Chen, J. Y., Luo, Z. D., Chen, D. C., et al., 1964. Formation and Evolution History of the Big Sand Bar within Qiantangjiang Estuary. *Acta Geographica Sinica*, 30 (2): 109–123 (in Chinese with Russian abstract).

Dalrymple, R. W., Mackay, D. A., Ichaso, A. A., et al., 2012. Processes, Morphodynamics, and Facies of Tide-

Dominated Estuaries. In: Davis, R. A. J., Dalrymple, R. W., eds., *Principles of Tidal Sedimentology*. Springer, London, 79–107.

Fan, D. D., Cai, G. F., Shang, S., et al., 2012. Sedimentation Processes and Sedimentary Characteristics of Tidal Bores along the North Bank of the Qiantang Estuary. *Chinese Science Bulletin*, 57(13): 1578–1589. doi: 10.1007/s11434-012-4993-6

Feng, Y. J., Li, Y., Xie, Q. C., et al., 1990. Activity of Geomorphology and Deposit Interface in Hangzhou Bay. *Acta Oceanologica Sinica*, 12(2): 213–223 (in Chinese).

Greb, S. F., Archer, A. W., 2007. Soft-Sediment Deformation Produced by Tides in a Meizoseismic Area, Turnagain Arm, Alaska. *Geology*, 35(5): 435–438. doi: 10.1130/G23209A.1

Guo, Y. X., Fan, D. D., Zhao, J., 2004. Grain-Size Characteristics and Their Applications to the Intertidal Subfacies Division: A Case Study from Andong Tidal Flats in the Hangzhou Bay. *Marine Geology Letters*, 20(5): 9–14 (in Chinese with English abstract).

Kolditz, K., Dellwig, O., Barkowski, J., et al., 2012. Geochemistry of Holocene Salt Marsh and Tidal Flat Sediments on a Barrier Island in the Southern North Sea (Langeoog, North-West Germany). *Sedimentology*, 59(2): 337–355. doi: 10.1111/j.1365-3091.2011.01252.x

Lin, B. Y., 2008. Characteristics of the Tidal Bore in Qiantangjiang Estuary. Chinese Ocean Press, Beijing (in Chinese).

Martinez, N. C., Murray, R. W., Dickens, G. R., et al., 2009. Discrimination of Sources of Terrigenous Sediments Deposited in the Central Arctic Ocean during the Cenozoic. *Paleoceanography*, 24(1): PA1210. doi: 10.1029/2007PA001567

Martinius, A. W., Gowland, S., 2011. Tide-Influenced Fluvial Bedforms and Tidal Bore Deposits (Late Jurassic Lourinhã Formation, Lusitanian Basin, Western Portugal). *Sedimentology*, 58(1): 285–324. doi: 10.1111/j.1365-3091.2010.01185.x

Millward, G. E., Rowley, C., Sandsa, T. K., et al., 1999. Metals in the Sediments and Mussels of the Chupa Estuary (White Sea) Russia. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 48(1): 13–25. doi: 10.1006/ecss.1999.0400

Murray, N. J., Phinn, S. R., Clemens, R. S., et al., 2012. Continental Scale Mapping of Tidal Flats across East Asia Using the Landsat Archive. *Remote Sensing*, 4(11): 3417–3426. doi: 10.3390/rs4113417

Pan, F., Lin, C. M., Li, Y. L., et al., 2011. Sediments Grain-

- Size Characteristics and Environmental Evolution of Core SE2 in Southern Bank of Qiantang River since the Late Quaternary. *Journal of Palaeogeography*, 13(2): 236—244 (in Chinese with English abstract).
- Passega, R., 1964. Grain Size Representation by CM Patterns as a Geologic Tool. *Journal of Sedimentary Research*, 34(4): 830—847.
- Phinn, S. R., Menges, C., Hill, G. J. E., et al., 2000. Optimizing Remotely Sensed Solutions for Monitoring, Modeling, and Managing Coastal Environments. *Remote Sens. Environ.*, 73(2): 117—132. doi:org/10.1016/S0034-4257(00)00087-0
- Qian, N., Xie, H. X., Zhou, Z. D., et al., 1964. The Fluvial Processes of the Big Sand Bar inside the Chien Tary Chiry Estuary. *Acta Geographica Sinica*, 30(2): 124—142 (in Chinese with English abstract).
- Ryu, J., Won, J., Min, K. D., 2002. Waterline Extraction from Landsat TM Data in a Tidal Flat; A Case Study in Gomso Bay, Korea. *Remote Sensing of Environment*, 83(3): 442—456. doi:org/10.1016/S0034-4257(02)00059-7
- Schnetger, B., Brumsack, H. J., Schale, H., et al., 2000. Geochemical Characteristics of Deep-Sea Sediments from the Arabian Sea; A High-Resolution Study. *Deep-Sea Research Part II—Topical Studies in Oceanography*, 47(14): 2735—2768. doi:org/10.1016/S0967-0645(00)00047-3
- Sun, Y. B., Wu, F., Clemens, S. C., et al., 2008. Processes Controlling the Geochemical Composition of the South China Sea Sediments during the Last Climatic Cycle. *Chemical Geology*, 257(3—4): 240—246. doi:org/10.1016/j.chemgeo.2008.10.002
- Tessier, B., Terwindt, J. H. H., 1994. An Example of Soft-Sediment Deformations in an Intertidal Environment; The Effect of Tidal Bore. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 319: 217—223 (in French with English abstract).
- Visher, G. S., 1969. Grain Size Distributions and Depositional Processes. *Journal of Sedimentary Research*, 39(3): 1075—1106. doi:10.1306/74D71D9D-2B21-11D7-8648000102C1865D
- Wang, A. J., Gao, S., Jia, J. J., 2006. Calibration for Intertidal Flat Sediment Core Shortening; A Case Study from Wanggang, Jiangsu Coast. *Acta Sedimentologica Sinica*, 24(4): 555—561 (in Chinese with English abstract).
- Yu, Q., Wang, Y. W., Gao, S., et al., 2012. Modeling the Formation of a Sand Bar within a Large Funnel-Shaped, Tide-Dominated Estuary; Qiantangjiang Estuary, China. *Marine Geology*, 299—302: 63—76. doi:org/10.1016/j.margeo.2011.12.008
- Zeng, J., Sun, Z. L., Pan, C. H., et al., 2010. Long-Periodic Feature of Runoff and Its Effect on Riverbed in Qiantang Estuary. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 44(8): 1584—1588 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. J., Li, C. X., 1996. The Fills and Stratigraphic Sequences in the Qiantangjiang Incised Paleovalley, China. *Journal of Sedimentary Research*, 66(2): 406—414. doi:10.1306/D426835B-2B26-11D7-8648000102C1865D

附中文参考文献

- 陈吉余, 罗祖德, 陈德昌, 等, 1964. 钱塘江河口沙坎的形成及其历史演变. *地理学报*, 30(2): 109—123.
- 冯应俊, 李炎, 谢钦春, 等, 1990. 杭州湾地貌及沉积界面的活动性. *海洋学报(中文版)*, 12(2): 213—223.
- 郭艳霞, 范代读, 赵娟, 2004. 潮坪层序的粒度特征与沉积相划分——以杭州湾庵东浅滩为例. *海洋地质动态*, 20(5): 9—14.
- 林炳尧, 2008. 钱塘江涌潮的特性. 北京: 海洋出版社.
- 潘峰, 林春明, 李艳丽, 等, 2011. 钱塘江南岸 SE2 孔晚第四纪以来沉积物粒度特征及环境演化. *古地理学报*, 13(2): 236—244.
- 钱宁, 谢汉祥, 周志德, 等, 1964. 钱塘江河口沙坎的近代过程. *地理学报*, 30(2): 124—142.
- 王爱军, 高抒, 贾建军, 2006. 江苏王港潮间带柱状样的压缩和校正. *沉积学报*, 24(4): 555—561.
- 曾剑, 孙志林, 潘存鸿, 等, 2010. 钱塘江河口径流长周期特性及其对河床的影响. *浙江大学报(工学版)*, 44(8): 1584—1588.