

文章编号: 1000-0550(2008) 06-1043-09

强潮海湾近岸表层沉积物时空分布特征 及水动力响应¹ ——以杭州湾北岸为例

赵建春 戴志军 李九发 李为华

(华东师范大学河口海岸学国家重点实验室 上海 200062)

摘要 沉积物粒度参数是表征其分布和输运特征的重要信息。根据 2005 年 7 月和 2006 年 12 月采集的 167 个表层沉积物样品以及收集到的实测水文资料,以杭州湾北岸为例,分析研究强潮海湾近岸表层沉积物的时空变异特征,同时在应用 GSTA 模型对沉积物进行输运趋势分析的基础上探讨该区域的泥沙来源,并通过掀沙计算分析表层沉积物对高能水动力环境的响应过程。结果表明:(1)杭州湾北岸表层沉积物普遍较细,以粉砂质粘土为主,在南汇、金山岸段存在两个砂质密集区,并且随动力条件的不同在由岸向海方向呈现出逐渐变细的粒度趋势;(2)表层沉积物粒度特征在洪、枯季亦存有差异,枯季较洪季存在普遍粗化现象;(3)GSTA 模型结果显示该区域泥沙主要来源于上游岸段来沙和湾口海域来沙,此外局部区域之间的泥沙交换过程也是区域内泥沙平衡协调的重要途径;(4)潮流掀沙作用主要以南汇和奉贤水域为主,波浪掀沙作用范围基本覆盖研究区域的整个岸段,且波高为 1.5 m ($P = 94\%$) 以下的波浪掀沙作用对浅水区域的影响最为显著。

关键词 杭州湾 表层沉积物 时空变化 水动力

第一作者简介 赵建春 男 1985 年出生 硕士研究生 港口工程及河口海岸泥沙

通讯作者 戴志军 E-mail: zjla@sklec.ecnu.edu.cn

中图分类号 P736.21 P512.2 **文献标识码** A

近岸海床或河口表层沉积物的基本特征在很大程度上反映了局部区域动力驱动作用以及地貌反馈的相互耦合机制。因而,通过分析沉积物的粒度特征来探讨区域河口海岸沉积动力、沉积物来源和沉积物输移趋势等环境信息,一直是近半个世纪来众多海岸沉积学家研究的主要问题之一^[1-5]。许多学者已分别就河口海岸地区表层沉积物的粒度特征、沉积物输移以及沉积环境演化等进行了较多的研究^[6-8]。然而,这些研究一般是基于河口或海岸地区的沉积环境在中、长时间尺度(100~10 000 a)趋于稳定的基础上,局限于对某一次的大面积采样进行分析,即主要探讨沉积物的空间分布和所反映的动力环境,较少注意到沉积物季节性的变化特征。上海市杭州湾北岸为强潮粉砂淤泥质海岸,该岸段的变化主要受控于杭州湾强劲的潮流作用、近岸的波浪以及长江入海泥沙的影响。目前的不少研究主要集中在对杭州湾北岸的冲淤、深槽变化以及沉积柱状物所反映的沉积动力过程进行分析^[9-11]。因而,本文利用近期在该区域

不同季节时段采集的大面积沉积物 and 不同季节的水文资料探讨杭州湾北岸近岸表层沉积物的时空分异特征,这不仅可促进强潮作用下的河口湾边岸沉积动力过程的研究,而且能为长江入海水沙近年急剧减少下的杭州湾北岸冲淤趋势变化分析构建基本数据库。

1 区域概况

杭州湾属漏斗状强潮海湾,至湾口向内逐渐狭窄。杭州湾的形成与长江三角洲的伸展密切相关。泥沙以海域来沙为主,并且长江来沙对杭州湾的形成起着重要作用,该部分泥沙通过落潮科氏力的作用带入杭州湾后,随着涨潮流沿杭州湾北岸自东向西输移^[12]。杭州湾北岸地处长江三角洲南缘,包括上海岸段和浙江岸段。上海岸段自汇角(芦潮港)——金丝娘桥全长约 70 km,该岸段面临开阔的杭州湾,在强劲的潮流、波浪以及丰富的泥沙供给等条件影响下,发育了宽阔的粉砂淤泥质潮滩。近年来上海经济发展战略南移,在杭州湾北岸陆续建造了一系列大型

¹ 上海市科技启明星项目(06QA14016)和国家海洋局 908 海岸带调查项目(HAD2),河口海岸国家重点实验室科研业务费(2008kyQN03)资助。
收稿日期:2007-11-02 收修改稿日期:2008-04-08

工业区, 围海造陆使得该岸段的高潮滩正在逐渐地减少; 此外, 长江来沙条件的变化以及南汇嘴各期圈围工程的实施, 也使得长江口进入杭州湾北岸的泥沙因受到拦截而减少。从而导致该区域潮滩发育过程发生了相应变化, 沉积特征也随之改变。

2 资料来源与研究方法

在上海市杭州湾北岸(南汇、奉贤和金山区岸段)近岸水域采用蚌式采样器进行表层沉积物采集, 其中 2005 年 7 月(洪季)采集 58 个、2006 年 12 月(枯季)采集 109 个表层沉积物样品(图 1), 布点范围基本覆盖了杭州湾北岸的整个上海段近岸海床。所采样品经由实验室处理之后, 利用美国 Coulter 公司生产的 LS100 激光粒度分析仪进行粒度分析, 然后根据国家海洋调查技术规范^[13]计算出平均粒径(M_z)、分选系数(σ)、偏度(Sk)等粒度参数, 并划分粒级标准和进行沉积物命名。

海岸动力环境中, 沿岸潮流和近岸波浪是引起近岸泥沙输移的重要因素, 为进一步理解沉积物在动力条件下的分布变化及两者间的相互响应机制, 同时分析了该区域 D1、D2、D3、D4(枯季)和 W1、W2、W3(洪季)共 7 个站点的实测潮流资料, 以及滩浒岛水文站的波浪资料, 其中潮流资料分别利用如下公式计算得到优势流 A 、余流 U :

$$A = \frac{Q_e}{Q_f + Q_e} \times 100\% \quad (1)$$

$$U = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} u(t) dt \quad (2)$$

其中: Q_e 为落潮流量, Q_f 为涨潮流量, $A > 50\%$ 为落潮优势流, $A < 50\%$ 为涨潮优势流; T_0 为潮周期, $u(t)$ 为 t 时刻流速。同时本文还对滩浒岛水文站(图 1)所测波浪资料的主要波向、波高进行了统计。

表 1 潮流特征值统计表

Table 1 Statistics of the tidal current characteristics

潮汛 (大潮)	站名	近底层										垂向单宽				
		涨潮				落潮				余流		涨潮历时	落潮历时	优势流	悬沙浓度	
		平均		最大		平均		最大		流速	流向					
		流速	流向	流速	流向	流速	流向	流速	流向	流速	流向	/h	/h	/%	/ $kg \cdot m^{-3}$	
枯季	2004.12	D1	0.63	253	0.97	238	0.42	93	0.73	94	0.10	202	6.2	6.3	36	1.60
	2007.4	D2	0.62	260	1.28	266	0.69	74	1.20	72	0.05	37	6.1	6.4	47	1.88
	2005.5	D3	0.60	246	1.11	245	0.39	58	0.63	55	0.09	259	6.0	6.5	33	0.64
	2007.4	D4	0.63	327	1.17	320	0.51	110	0.94	143	0.19	20	6.1	6.3	46	1.35
洪季	2006.8	W1	1.50	276	3.59	265	0.84	92	1.49	94	0.10	299	5.5	6.8	45	1.18
	2006.8	W2	0.83	253	1.50	255	0.57	67	0.79	67	0.13	268	5.8	6.5	46	1.12
	2006.8	W3	0.87	187	1.09	176	0.54	359	1.38	348	0.06	138	5.7	6.6	55	0.88

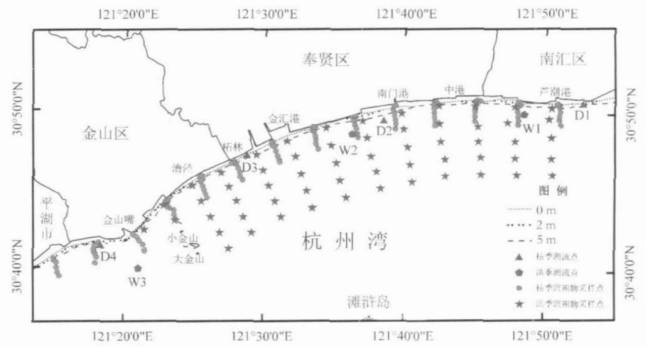


图 1 研究区域及沉积物采样点位置

Fig. 1 The study area and sediment sample sites

3 结果与分析

3.1 水动力环境特征

杭州湾北岸水域属于非正规浅海半日潮, 至湾口向内潮差逐渐增大, 芦潮港平均潮差 3.18 m, 金山嘴为 3.90 m。近岸水域潮流椭圆长轴基本与岸边等深线平行, 一般呈东—西向往复流。由实测水沙资料可知(表 1): 该区域枯季的涨、落潮历时相当, 洪季的涨潮历时长于落潮历时 1 h 左右; 除 W3 之外, 洪、枯季均以涨潮流占优势, 由于该区域内的泥沙主要来自于由涨潮流挟带而入的海域来沙, 因此悬沙浓度总体上东高西低, 并且受海洋水文要素制约, 存在明显季节性差异, 枯季悬沙浓度略大于洪季浓度。近底层余流是影响海岸沉积物输运的重要因素, 由表 1 可以看出: 研究区域内实测近底层余流流速大小不一, 最大达 $0.19 m \cdot s^{-1}$ 、最小只有 $0.05 m \cdot s^{-1}$, 但受地形因素限制, 方向大致均为 NE—SW 向。此外, 洪季的近底层涨、落潮平均流速均大于枯季, 并且涨潮流速之间的差异更为显著。

除潮流之外近岸波浪也是引起岸滩变化的主控因子之一。杭州湾内波浪主要以风浪为主, 占 97% 以上, 涌浪仅占 3% 左右。该区域地处季风气候区, 故风浪浪向季节变化十分明显, 对岸滩沉积物的作用也不同。波高 ($H_{1/10}$) 的统计结果显示 (表 2) 区域内, 冬半年以离岸浪为主, 平均波高为 0.4 m, 周期 2.0 s, 最大波高为 2.2 m, 常浪向为 NW—N; 夏半年为向岸浪, 平均波高为 0.5 m, 周期 2.1 s, 最大波高 4.0 m, 常浪向为 SE—S。另外, 台风造成的增水和暴风浪也是该区域的重要环境影响因素。

表 2 滩浒站波浪资料统计表

Table 2 Statistics of wave characteristics of Tanhu station

波高 /m	0.0~0.5	0.6~1.5	1.6~3.0	>3.0
频率 /%	53.7	41.2	1.4	0.03

3.2 岸滩冲淤态势及沉积物颗粒组成

杭州湾北岸上海辖区自东向西分别由南汇、奉贤及金山三大岸段构成。历史观测资料 (1958、1975 和 1981 年) 显示, 芦潮港—中港岸段潮滩多年来一直处于侵蚀期, 而中港—漕泾、漕泾以西则分别为堆积和稳定岸段^[14]。20 世纪 90 年代以来, 南汇嘴人工半岛、南汇东滩促淤等一系列圈围工程使得南汇东滩岸线大规模外推, 造成进入杭州湾北岸的供沙量显著下降。同时, 在人工半岛屏障作用的影响下, 南汇南滩潮流顶冲点逐渐西移至南奉贤 (南汇—奉贤) 中港附近 (图 2), 致使人工半岛以西芦潮港—中港岸段低滩出现逐渐淤高态势, 但在供沙量有所减少的背景下, 该区域淤积强度不大, 多属轻淤。奉贤岸段属弧形岸段, 目前受人工半岛工程影响, 奉贤岸滩正进行适应性调整, 并逐步转为弱侵蚀期。金山岸段位于杭州湾北岸上海辖区的最西端, 金山嘴以西上海石化岸段的变化态势主要受制于岸外金山深槽, 虽然大、小金山岛间峡道效应作用下深槽底床长期处于冲刷状态, 然而由于长期以来深槽位置摆动较小, 深槽北边坡近岸滩涂一直保持稳定状态; 岬角以东漕泾工业区岸段则主要受涨潮输沙制约, 加之人工岬角可以拦截奉贤岸滩侵蚀后向西输移的部分泥沙, 因而总体上金山岸段仍属于稳定型海岸。

上述各岸段冲淤态势以及水动力作用时空的不同, 导致底床表层沉积物的粒径组成结构在时空分布上存有明显差异。由图 3 所示可知, 杭州湾北岸的表层沉积物普遍较细, 且洪、枯季均以粘土质粉砂 (YT)

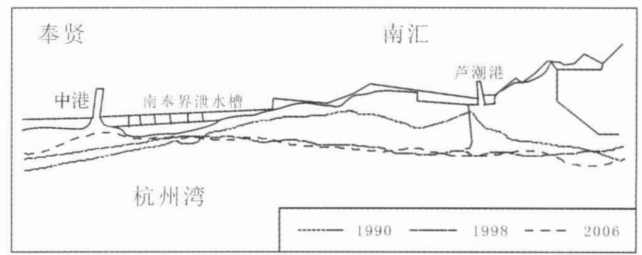


图 2 南汇南滩 2 m 等深线变化图

Fig 2 Change of the 2 m depth contour along the south tidal flat of Nanhu

为主要类型, 其分布范围遍及整个研究区域, 少量细砂 (FS)、粉砂 (T)、粉砂质砂 (TS) 及砂质粉砂 (ST) 等类型沉积物呈斑块状分布于南汇、奉贤以及金山岸段的近岸水域。分别受潮流顶托和峡道水流的长期冲刷作用, 芦潮港西部和大、小金山涨潮冲刷槽成为砂质沉积物的主要分布区域。由于枯季近岸水域离岸波浪作用明显, 涨潮流速亦有所减小, 更多近岸浅水区域内的细颗粒物被带走, 造成沉积物颗粒发生明显粗化, 与其它测站相比 D3 站的水体中的细颗粒泥沙含量最小, 因而 D3 附近金奉贤 (金山—奉贤) 的柘林近岸水域沉积物粗化最为明显 (图 3)。

杭州湾北岸潮滩表层沉积物自岸向海亦存有明显的横向分异特征: (1) 洪季, 断面 iv 中表层细砂主要集中在大、小金山深槽附近, 且沉积物中的粘土含量向外围随水深的减小而逐渐增大; 断面 ③ 细砂则主要分布在近岸, 且向海方向砂的含量逐渐变小, 粘土含量逐渐增加; (2) 枯季, 潮流作用较洪季有所减弱, 断面 iv 所在区域沉积物中的细颗粒组分明显增多, 颗粒组成以粘土质粉砂为主, 并且砂质范围也向左下方扩移, 与 W3 水文测点的近底层余流方向一致; 断面 ③ 的砂质范围有所减小, 粉砂范围明显增加, 表明在较强离岸流的驱动下区域内部发生了大范围的底沙交换; 此外, 位于柘林附近的断面 ④ 其近岸浅水区沉积物被涨潮流掀动之后随落潮流及冬季离岸浪的作用向岸外输移从而导致底质发生明显粗化, 同时由于断面 ④ 大致位于金山 - 10 m 等深线外围, 水深较大, 近岸泥沙被搬运到深水区后发生停积, 因而在由岸向海方向上呈现出“粗—细—粗”的变化趋势。

3.3 粒度参数分布特征

沉积物的粒度参数是反映水动力和沉积环境变迁的重要指标。其中, 衡量沉积物颗粒大小的中值粒径 (D_{50}) 在一定程度上可以指示动力环境的平均强

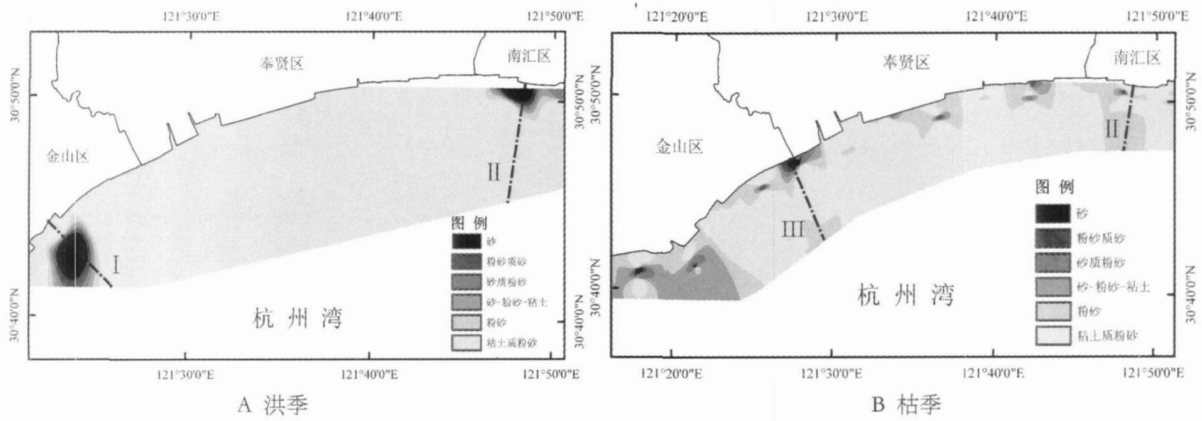


图 3 杭州湾北岸表层沉积物类型分布示意图

Fig. 3 Diagram of the surface sediment types along the north bank of Hangzhou bay

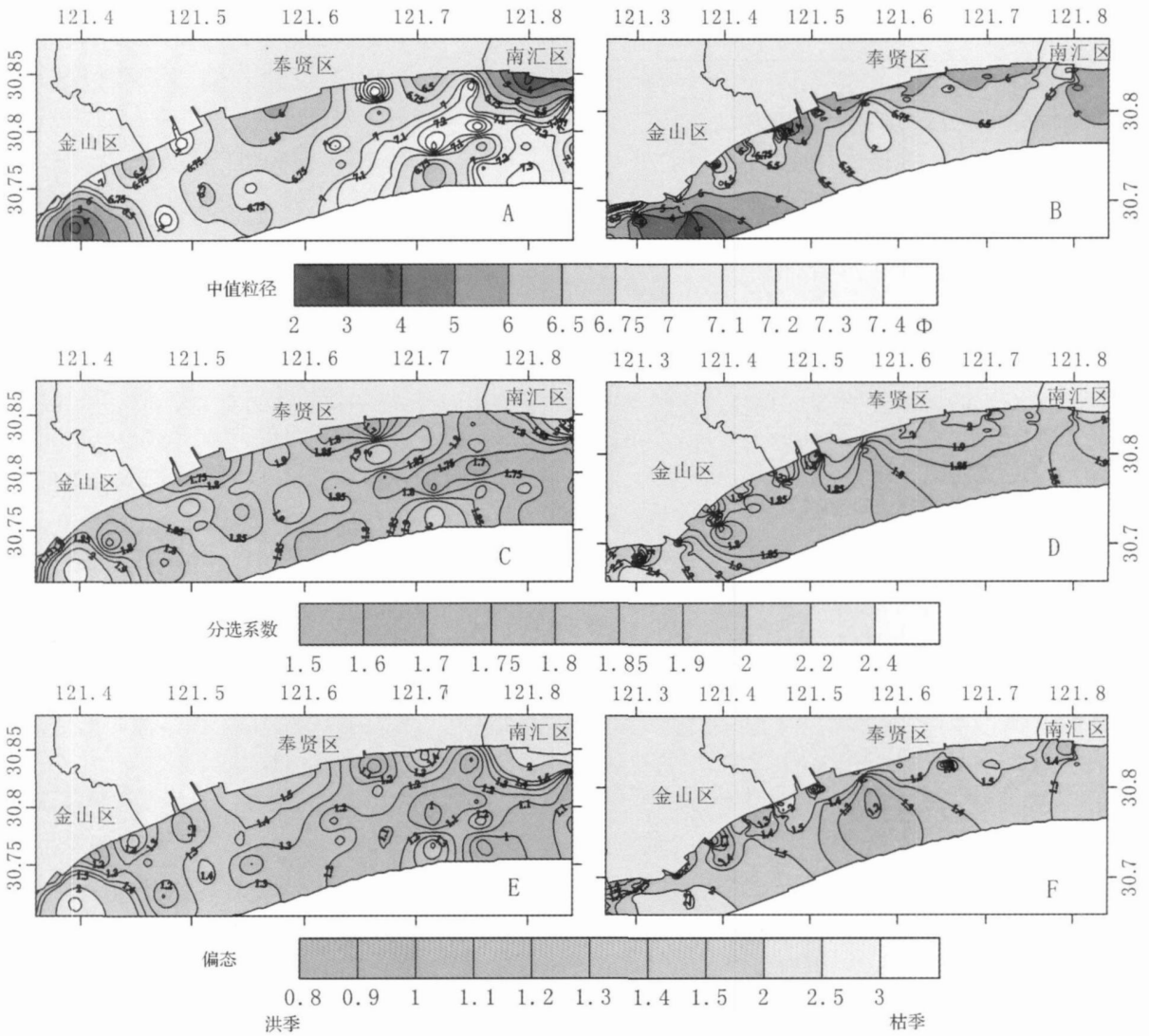


图 4 杭州湾北岸表层沉积物粒度参数分布季节变化示意图

Fig. 4 Seasonal changes of the grain-size parameters of surface sediments along the north bank of Hangzhou bay

度, 随环境动力条件的强、弱不同而发生粗、细变化; 分选系数 (σ) 即标准偏差, 表征沉积物粒度分布均匀程度, 显示沉积物动力环境对沉积物的筛选能力, 该值越小说明沉积物分选越好、越均匀; 偏度 (Sk) 则用来衡量沉积物粒径分布曲线的对称程度, 若沉积物偏粗即为正偏, 反之亦然。简言之, 通过分析沉积物的颗粒组成及其粒度参数 (图 4) 可以对研究区域内底质沉积过程中的动力影响要素进行良好验证。

3.3.1 洪季特征

洪季研究区海床的表层沉积物中值粒径的分布存在一定的规律性。其中, $< 4\phi$ 等值线主要分布在南汇芦潮港西部及金山区大、小金山岛, 且 ϕ 值向外呈环状递增。这主要因为芦潮港一带多年来一直是受潮流顶冲最强烈的部位, 深水逼岸, 0 m 以上潮滩基本缺失, 故底质较粗。而大、小金山岛之间存有涨潮冲刷槽, 槽深流急, 较强的潮流作用带走了床沙中的细颗粒组分。金汇港及奉贤水域的大部分区域中值粒径主要集中在 7ϕ 左右, 相对较细, 且等值线方向大多为 NE-SW 方向, 与实测近底层余流方向相吻合 (表 1); 另外, 在自岸向海方向上随着动力条件的变化, 沉积物的粒度参数也存在着明显的不同, 由于潮流和波浪的共同作用浅水区域动力较强, 而进入深水后波浪的底掀沙作用逐渐减弱, 因而沉积物粒径呈现出离岸逐渐变细的一定趋势 (图 4A)。绝大部分区域内, 中值粒径仍处于 $6 \sim 7.3\phi$ 之间, 且 $> 7\phi$ 区域覆盖奉贤南门港以东整个岸段。另外, 分选系数的分布特征与中值粒径关系也比较密切, 由图 4C 可知整个研究区域内表层沉积物的分选系数均在 2 左右, 分选很差, 且粒径越粗的区域其沉积物分选性越差。图 4E 显示杭州湾北岸大部分区域表层沉积物的偏态系数介于 $1 \sim 1.5$ 之间, 属于“极正偏”状态, 表明沉积物中相对于平均粒径的较粗组分含量较多, 这和长江三角洲潮滩沉积物大多呈正偏态的粒度特征是一致的^[15]。

总而言之, 南汇段和金山岸段潮滩的表层沉积物的粒度参数空间变化比较明显; 并且绝大部分区域在由陆向海方向上呈现出中值粒径逐渐变细、分选性逐渐变差的特征。

3.3.2 枯季特征

在枯季杭州湾北岸表层沉积物的中值粒径 ϕ 值有所减小, $> 7\phi$ 粒径区域明显缺失, 大部分区域中值粒径处于 $6 \sim 6.75\phi$ 之间。沉积物中值粒径与沉积物类型分布对应很好, 砂质沉积物集中区域中值粒径

ϕ 值明显偏小, 大都位于 4ϕ 等值线以内。芦潮港西部 - 5 m 等深线以浅近岸水域的沉积物粒径明显变细, 中值粒径 ϕ 值由洪季 4ϕ 增至枯季 7ϕ , 偏态系数由 2 降至 1.4。将图 4 洪、枯季沉积物的粒度参数等值线进行对比分析还可发现, 大、小金山附近的粗颗粒泥沙集中区位置在枯季发生明显左偏移, 且范围有所扩大, 并且沉积物粒径的分选系数也有所增大, 粒径分布曲线愈加不对称, 呈现出区域内动力条件季节性调整后的地貌响应特征。

3.3.3 粒度演变特征

我国曾于 20 世纪 80 年代进行了第一次全国海岸带和海涂资源综合调查, 该项目所得成果说明杭州湾北岸上海辖区的潮滩沉积物存在较为明显的年周期变化, 表 3 资料显示, 洪季潮滩沉积物粒径普遍粗于枯季, 尤其高潮滩以下区域粗化非常明显, 低滩沉积物中的砂质含量增加将近 25%。然而, 长江入海水沙在近几年持续降低, 特别是 2006 年长江流域发生百年不遇的特枯水情, 大通各月径流量和输沙量均较多年平均值 (1985~2000) 发生显著下降, 尤其是 7~11 月输沙量减少幅度均超过 80%^[16, 17]。长江河口来沙是杭州湾北岸区域的重要沙源, 可能受减少的长江来水来沙情况影响, 进入杭州湾的泥沙亦存在量和质上的差异, 悬沙量在减少, 同时进入杭州湾的悬沙更趋于变细, 致使杭州湾北岸的表层沉积物粒度在年周期变化特征上发生微妙变化。就整个杭州湾北岸而言, 枯季进入杭州湾的悬沙量在减少, 但潮流及波浪等动力作用基本不变, 致使本次枯季采集的沉积物在较大范围内存在粗化现象, 尤其是粒径 $> 7\phi$ 的极细粉砂在枯季明显缺失。此外, 洪枯两季的分选系数、偏态系数的各自差值也较小, 表明由于进入杭州湾的悬沙在季节上的差异减少, 导致沉积物的年周期变化差异亦在减小。当然, 这仍有待于基于其它更为可靠的途径加以深入论证。

表 3 杭州湾北岸潮滩沉积物季节变化历史资料^[18]

Table 3 Historical season-change information of surface sediments along the north bank of Hangzhou bay

潮滩亚带	洪 季			枯 季		
	中值粒径 ϕ	含泥量 %	含沙量 %	中值粒径 ϕ	含泥量 %	含沙量 %
高潮滩	5.74	17.8	0.3	6.01	22.6	1.4
中潮滩	4.28	3.4	27.3	5.38	15.7	14.3
低潮滩	3.83	1.9	70.9	4.17	13.1	46.1

4 讨论

4.1 沉积物输移及来源

M cLaren 和 Bowles^[19]在研究泥沙输移对粒度分布的影响时指出通过平均粒径 (M_z), 分选系数 (σ) 和偏度 (Sk) 三个参数可以分析沉积物的搬运方向, 而且沉积物粒度参数的分布不受具体的搬运过程和沉积环境的影响。Gao 和 Collins 在此基础上提出了二维粒径趋势分析模型 (GSTA 模型)^[20]。将杭州湾北岸沉积物的粒度参数带入 GSTA 模型后即可得到该区域各采样点表层沉积物的输移矢量及方向, 剔除边界矢量后将其绘制成如图 5 所示的粒径运移趋势图。

图示信息说明杭州湾北岸表层沉积物主要有如下输移趋势: 由于潮致余流及波生离岸流的作用近岸地区沉积物主要做离岸输移 (图 5A、5B); 由于研究区域从湾内至湾口是逐渐放宽的, 扩散水流的作用下岸外大部区域内沉积物向东北方向输移, 且总体上呈向岸运移的趋势。沿岸方向, 湾口处的表层沉积物有向湾内输移的趋势, 而湾内金山深槽表层沉积物有向口外输移趋势。另外, 由于湾口上游钱塘江河口下泄径流量的季节性变化较大, 据统计, 多年平均情况下 10 月至翌年 1 月水量仅为全年的 15.6%, 因此柘林以西岸段的潮滩沉积物在枯季呈现出向湾内输移的明显趋势 (图 5B)。

沉积物的粒径输移趋势在一定程度上也指明了杭州湾北岸区域内沉积物的主要供应途径: 第一部分来自上游岸段输沙, 由图 5 箭头所指示方向可以看出该部分沙源在枯季对本区域泥沙补给的作用较洪季更不明显。第二部分为随涨潮流进入杭州湾的的口外海域来沙。该部分又主要由两部分组成: 首先为长江河口的下泄径流挟带的悬浮泥沙, 该部分泥沙粒径

普遍较细, 研究区域内表层沉积物的中值粒径 ϕ 值呈现东高西低的趋势恰好在某种程度上说明了这一点, 由于长江河口下泄径流挟带的悬沙通量相当可观, 很大一部分泥沙会随着涨潮流而进入, 通过重矿物组分进行比对分析可以证明该部分泥沙是杭州湾北岸区域的主要沙源^[21]; 其次, 长江口外水下三角洲的堆积床沙被掀动后也会随潮流进入湾内, 从沉积物粒度的偏态系数分布图上可以看出, 枯季沙样中的偏粗组分所占比例较洪季有所增大。当然, 高、低滩等局部区域之间的泥沙交换也是研究区域内泥沙达到协调平衡的重要途径之一。然而, 20 世纪 90 年代以来, 由于受芦潮港人工半岛和东、西临港促淤等工程影响, 长江口西进杭州湾的泥沙有所减少, 研究区域内的潮流动力条件也发生局部调整, 导致岸滩冲淤变化呈现南汇淤涨、奉贤冲刷、金山相对稳定的总体格局。因此, 如何合理开发布局、有效利用杭州湾北岸地区丰富的海岸带资源, 是今后实际生产实践中需要注意的核心问题。

4.2 掀沙动力作用

关于沉积物对环境水动力作用的响应过程, 国内一些学者已做过相应研究。李向阳^[22]等在探讨黄河三角洲孤东海域沉积物及环境水动力时发现, 岸边丁坝的修建使得近岸流场发生了很大变化, 并且区域内潮流流速普遍较小 (实测最大流速 $0.31 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 潮流作用不足以造成底床泥沙颗粒的起动。与上述地区情况不同, 杭州湾属漏斗状海湾, 其北岸地区潮差及潮流速度大小均比较显著, 另外区域内底床沉积物以粘土质粉砂为主, 粒径相对较细, 因此强劲的潮流作用是引起该区域表层沉积物输移的重要原因。本文根据适用于粘性细颗粒泥沙的窦国仁起动流速公式^[23]计算各采样点表层沉积物的起动流速:

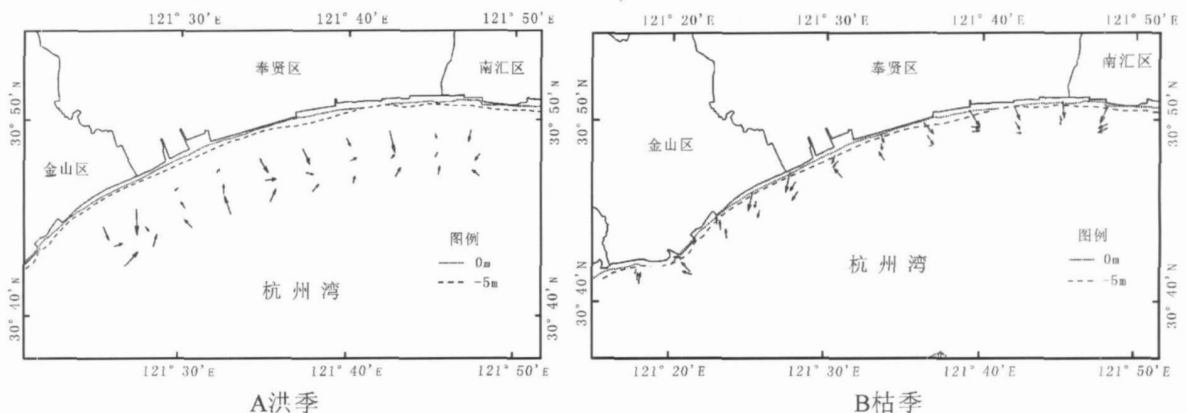


图 5 杭州湾北岸表层沉积物运移趋势图

Fig 5 Transport tendency of surface sediment along the north bank of Hangzhou bay

$$U_c = 0.74 \lg(11 \frac{h}{\Delta}) \left[\frac{\rho_s - \rho}{\rho} g d + 0.19 \left(\frac{g h \delta + \epsilon_k}{d} \right) \right]^{1/2} \quad (3)$$

式中, $\delta = 0.213 \times 10^{-4} \text{ m}$, $\epsilon_k = 2.56 \text{ cm}^3 / \text{s}^2$, h 为水柱高度表示的大气压力, ρ ρ_s 分别为水和泥沙的容重, $\Delta = 0.5 \text{ mm}$; 对实测潮流资料进行调和获取区域内各测点的潮流可能最大流速。当某点沉积物的起动流速小于潮流最大流速时, 即认为该点潮流流速大小足以使泥沙颗粒起动, 存在潮流掀沙作用。图 6 为计算所得研究区域内潮流掀沙作用的空间分布情况, 由图可知: 目前, 南汇、奉贤两区的潮流掀沙作用范围主要分布在 5 m 水深线以外的近岸水域, 且芦潮港西部、奉贤区中部由于处于湾口及凹形岸段中部, 受潮流顶冲故掀沙作用更强、展布范围更广; 而金山岸段由于北岸深槽的存在, 水深较大, 潮流掀沙作用明显减弱, 掀沙范围仅出现于深槽近岸侧的浅水边坡区。

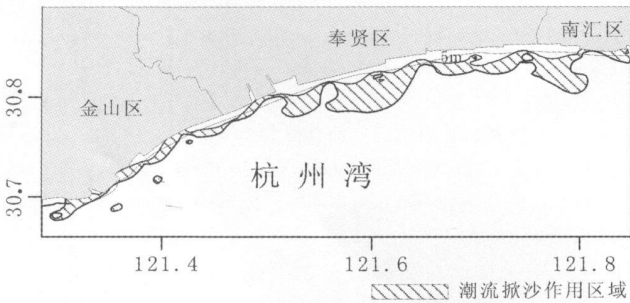


图 6 杭州湾北岸潮流掀沙作用区域

Fig 6 Sediment-stirring current agency coverage of tidal current along the north bank of Hangzhou bay

此外, 由于该区域表层沉积物粒径较细、起动流速较小, 波浪的冲刷作用亦不容忽视。波浪的掀沙作用主要与波浪要素、当地水深以及沉积物的分布特征有关。尤其是水深变浅所引起的近岸波浪破碎变形对沉积物运动有着深远影响。适当讨论各波浪要素下的波浪掀沙范围亦显得非常必要, 本文通过公式 (4) [24] 来计算泥沙颗粒的起动水深 h_b :

$$h_b = \frac{L}{4\pi} \operatorname{arcsinh} \left[M^2 L \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} g D + \beta \frac{\epsilon_k}{D} \right) \right] \quad (4)$$

式中, $M = \begin{cases} 0.12 \left(\frac{L}{D} \right)^{1/3} & \frac{L}{D} < 2 \times 10^5 \\ 5.85 & \frac{L}{D} > 2 \times 10^5 \end{cases}$

$$L = \begin{cases} \frac{gT^2}{2\pi} & L < 2d \\ \frac{gT^2}{2\pi} \operatorname{th} \frac{2\pi d}{L} & L > 2d \end{cases}$$

H 为波高, ρ 为泥沙密度, ρ 为水体密度, D 为泥沙颗粒粒径, β 为常数 0.039, ϵ_k 取值 $2.56 \text{ cm}^3 / \text{s}^2$ 。若取样点泥沙颗粒的起动水深大于实际水深, 则认为存在波浪掀沙作用, 将对比结果绘于图 7 即可出该区域波浪掀沙作用的空间分布情况。

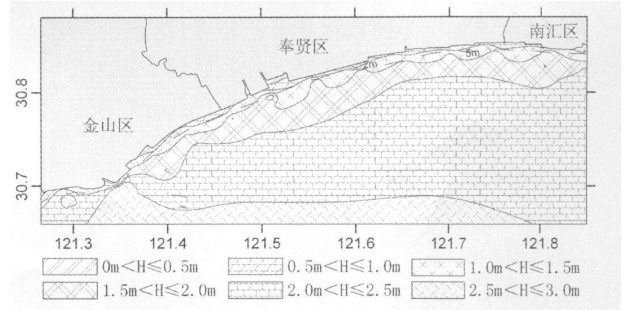


图 7 杭州湾北岸波浪掀沙作用分布情况

Fig 7 Sediment-stirring current agency coverage of wave along the north bank of Hangzhou bay

由图 7 所示可知: (1) 0.5 m、1.0 m 波级常浪掀沙范围基本位于 2 m 水深以浅; (2) 1.5 m 波级波浪掀沙范围沿岸线向外延伸, 外边界较不规则, 但已覆盖整个近岸破波带; (3) 2.0 m 波级波浪掀沙作用覆盖范围明显增大, 外边界离岸距离 6 km 左右, 且与岸线基本保持平行; (4) 2.5 m 波级波浪掀沙作用范围较广, 基本覆盖整个研究区域; (5) 金山嘴附近水域则由于底质较粗、水深较大, 因此该区域基本保持稳定状态, 需要 3.0 m 波级大浪作用方可掀动底沙。

综上所述, 杭州湾北岸属于强动力作用区, 水动力作用特征具体如下: 波高 1.5 m ($P = 94.9\%$) 以下波级波浪的掀沙作用对浅水区域的影响最大; 潮流掀沙作用范围则主要分布在 5 m 水深线以外的近岸水域, 且覆盖研究区域的整个岸段; 由于潮流顶冲作用明显, 加之南汇圈围工程的截断作用造成长江口西进杭州湾的泥沙减少, 使得芦潮港西部及奉贤区域的大部水域都会受潮流掀沙作用的影响; 金山嘴一带水域属于基本稳定区, 这是由于岬角能拦截奉贤岸滩侵蚀后向西输移的部分泥沙, 以及和连岸围堤掩护下的双重拦沙作用导致该岸段处于基本稳定期。另外, 岸外深水区潮流脊上所发育的藻类以及沉积物的长期固结作用, 也起到了一定的抗冲作用 [14]。

5 结论

基于 2005 年 6 月和 2006 年 12 月在杭州湾北岸采集的 167 个表层沉积物资料和相关潮流、波浪资料, 结果表明:

(1) 杭州湾北岸潮滩表层沉积物以粘土质粉砂为主要类型, 沉积物中值粒径普遍较细, 分选较差, 属正偏态。

(2) 表层沉积物时空分布上均存在一定差异: 芦潮港、金山嘴两处的沉积物粒径较大, 细砂含量明显较高; 沉积物由岸向外方向上粒径逐渐变细; 研究区内表层沉积物分布特征在洪、枯季存在一定差异, 枯季沉积物粒径除芦潮港西部水域明显变细之外, 其它大部分区域均较洪季有变粗趋势。

(3) GSTA 模型结果显示该区域泥沙来源, 一部分为上游岸段来沙, 另一部分为海域来沙。长江口来沙作为杭州湾北岸的一个重要沙源, 其入海沙量的变化对杭州湾北岸岸滩侵蚀变化存在着重要影响。

(4) 该区域存在较强的潮流掀沙作用, 且作用范围以南汇和奉贤区为主, 波浪对潮滩表层沉积物冲刷作用主要以波高 1.5 m ($P = 94.9\%$) 以下波级的掀沙作用对浅水区域的影响最为显著, 波浪掀沙作用范围基本覆盖研究区域的整个岸段。

参考文献 (References)

- 1 Tapas Kumar Mallik. Shelf sediments of the Ganges delta with special emphasis on the mineralogy of the western part Bay of Bengal Indian Ocean [J]. *Marine Geology*, 1976, 22(1): 1-32
- 2 Roberto Zonta, Luca Zaggia, Emanuele Argese. Heavy metal and grain-size distributions in estuarine shallow water sediments of the Cona Marsh (Venice Lagoon, Italy) [J]. *The Science of the Total Environment*, 1994, 151(1): 19-28
- 3 张乔民, 郑德延, 李绍宁, 等. 湛江港潮汐汉道落潮三角洲沉积动力过程 [J]. *地理学报*, 1995, 50(5): 421-429 [Zhang Qiaomin, Zheng Deyan, Li Shaoning, et al. A study on the sediment dynamics of ebb-tidal delta of Zhanjiang Harbor Tidal Inlet [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1995, 50(5): 421-429]
- 4 程鹏, 高抒. 北黄海西部海底沉积物粒度特征和净输送趋势 [J]. *海洋与湖沼*, 2000, 31(6): 604-615 [Cheng Peng, Gao Shu. Net sediment transport patterns over the north western Yellow Sea based upon grain size trend analysis [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2000, 31(6): 604-615]
- 5 彭晓彤, 周怀阳, 叶瑛, 等. 珠江河口沉积物粒度特征及其底层水动力环境的指示 [J]. *沉积学报*, 2004, 22(3): 487-493 [Peng Xiaotong, Zhou Huaiyang, Ye Ying, et al. Characteristics of sediment grain size and their implications for bottom hydrodynamic environment in the Pearl

- 6 River Estuary [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004, 22(3): 487-493]
- 6 戴志军, 陈吉余, 程和琴, 等. 南汇边滩的沉积特征和沉积物输运趋势 [J]. *长江流域资源与环境*, 2005, 14(6): 735-739 [Dai Zhijun, Chen Jiyu, Cheng Heqin, et al. Sediment characteristics and transport patterns in Nanhui Joint Area [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2005, 14(6): 735-739]
- 7 梁娟, 李春初, 王世俊. 珠江磨刀门河口底质沉积特征及其泥沙运移趋势 [J]. *海洋通报*, 2006, 25(5): 57-63 [Liang Juan, Li Chunchu, Wang Shijun. Analysis on the sedimentary characteristics and sediment transport patterns of Modaomen Estuary of the Pearl River [J]. *Marine Science Bulletin*, 2006, 25(5): 57-63]
- 8 张晓东, 翟世奎, 许淑梅. 长江口外近海表层沉积物粒度的级配特性及其意义 [J]. *中国海洋大学学报*, 2007, 37(2): 328-334 [Zhang Xiaodong, Zhai Shikui, Xu Shumei. The grain size fractions distribution characteristics and their significance of the surface sediments on the adjacent sea area of the Changjiang Estuary [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2007, 37(2): 328-334]
- 9 熊绍隆, 陶圭棣, 卢祥兴, 等. 杭州湾北岸深槽冲淤变化试验研究 [J]. *水利学报*, 1994, (10): 69-76 [Xiong Shaolong, Tao Guiling, Lu Xiangxing, et al. Experimental research on erosion and siltation of northern deep channel in Hangzhou Bay [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1994, (10): 69-76]
- 10 夏小明, 杨辉, 李炎, 等. 长江口—杭州湾毗连海区的现代沉积速率 [J]. *沉积学报*, 2004, 22(1): 130-135 [Xia Xiaoming, Yang Hui, Li Yan, et al. Modern sedimentation rates in the contiguous sea area of Changjiang Estuary and Hangzhou Bay [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004, 22(1): 130-135]
- 11 周晓静, 高抒. 底质粒度信息的空间分异与代表性: 以杭州湾舟山岛—金山卫断面为例 [J]. *科学通报*, 2004, 49(21): 2228-2232 [Zhou Xiaojing, Gao Shu. The spatial difference and representative of grain size information of bottom sediment—a case of Hangzhou Bay from Zhoushan Island to Jinshanwei [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(21): 2228-2232]
- 12 曹沛奎, 谷国传, 董永发, 等. 杭州湾泥沙运移的基本特征 [C] // 中国海岸发育过程和演变规律. 上海: 上海科学技术出版社, 1989: 108-119 [Cao Peikui, Gu Guozhuan, Dong Yongfa, et al. The basic properties of sediment migration in Hangzhou Bay [C] // Development and Evolution of China's Coast. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1989: 108-119]
- 13 国家技术监督局. 海洋调查规范—海洋地质地球物理调查 [S]. GB/T13909-92 [General Administration of Quality Supervision Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Specification for Oceanographic Survey: Marine Geology and Geophysics Investigation [S]. GB/T13909-92]
- 14 曹沛奎, 董永发, 严肃庄, 等. 杭州湾北岸高能潮滩的基本特征 [J]. *海洋与湖沼*, 1989, 20(5): 412-421 [Cao Peikui, Dong Yongfa, Yan Suzhuang, et al. Basic characteristics of the tidal flat on the north coast of Hangzhou Bay [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1989, 20(5): 412-421]
- 15 杨世伦, 徐海根. 长江口长兴、横沙岛潮滩沉积特征及其影响机制

- [J]. 地理学报, 1994, 49(5): 449-456 [Yang Shilun, Xu Haigen. Tidal flat sediment and sedimentation on the Changxing and Hengsha Island at the Mouth of Changjiang River [J]. Acta Geographica Sinica 1994, 49(5): 449-456]
- 16 刘红, 何青, 徐俊杰, 等. 枯水情对长江中下游悬浮泥沙的影响 [J]. 地理学报, 2008, 63(1): 50-64 [Liu Hong, He Qing, Xu Junjie *et al.* The effect of the exceptionally low water discharge on sediment characteristics of the middle and lower Yangtze River [J]. Acta Geographica Sinica 2008, 63(1): 50-64]
- 17 Dai Zhijun, Du Jinzhou, Li Jinfu *et al.* Runoff characteristics of the Changjiang River during 2006: effect of extreme drought and impounding of the Three Gorges Dam [J]. Geophysical Research Letters 2008, doi: 10.1029/2008GL033456
- 18 陈吉余主编. 上海市海岸带和海涂资源综合调查 (内部发行) [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1988: 74-92 [Chen Jiyu. Comprehensive Investigation of the Coastal Zone Resources in Shanghai (inner issuance) [M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers 1988: 74-92]
- 19 McLaren P, Bowles D. The effects of sediment transport on grain-size distribution [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1985, 55(40): 457-470
- 20 Gao S, Collins M. Net sediment transport patterns inferred from grain-size trends based upon definition of "transport vectors" [J]. Sedimentary Geology, 1992, 81(3/4): 47-60
- 21 董永发. 杭州湾底质的粒度特征和泥沙来源 [J]. 上海地质, 1991(3): 44-51 [Dong Yongfa. Grain size features of bed material and sedimentary source in the Hangzhou Bay [J]. Shanghai Geology, 1991(3): 44-51]
- 22 李向阳, 陈沈良, 胡静, 等. 黄河三角洲孤东海域沉积物及水动力 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2008, 28(1): 43-49 [Li Xiangyang, Chen Shenliang, Hu Jing *et al.* Sediment characteristics and hydrodynamics of nearshore Gudong in the Yellow River Delta [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2008, 28(1): 43-49]
- 23 窦国仁. 论泥沙起动流速 [J]. 水利学报, 1960(4): 44-60 [Dou Guoren. Incipient motion of coarse and fine sediment [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1960, (4): 44-60]
- 24 严恺, 梁其荀. 海岸工程 [M]. 北京: 海洋出版社, 2002 [Yan Kai, Liang Qixun. Coastal Engineering [M]. Beijing: Ocean Press 2002]

Study on the Characteristics of Temporal and Spatial Changes in Properties of Surface Sediment on Near-Shore Seabed of Strong-Tide Bay

a case from the north bank of Hangzhou Bay in Shanghai

ZHAO Jian-chun DAI Zhijun LI Jinfu LIW eihua

(State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062)

Abstract Grain size parameter is the most important information of sediment, which can point out the characteristics of distribution and transportation. Based on analysis data of 167 samples which were collected from the north coast of Hangzhou Bay in June 2005 and December 2006, a study on the rules of temporal and spatial changes in properties of seabed surface sediment in strong-tide bay is conducted. As well as, through the Grain Size Transport Analysis model, a conveying trend analysis of sediment in this basin has been studied, in the base of which a research of sand sources is primarily discussed. Finally, the response process of tidal flat sediment to the high-energy hydrodynamic environment is also analyzed. The results indicate that: (1) The grain size of tidal flat sediment in north coast of Hangzhou Bay is generally small, and silty clay is the main sediment types in this basin; (2) The vertical difference of grain size characteristics is more obvious than the transversal, and also there is some seasonal variation between flood season and withered season; (3) The results of GSTA-model show that the sediment of this basin is mainly from the upstream and the sea waters. As well as, the inter-regional sediment exchange is another important method to get the balance of sediment supply in this basin; (4) Agency coverage where tide current can stir surface sediment is mostly the Nanhui and Fengxian water area, while the wave stirring agency coverage almost covers the whole section of the research basin, on which the wave height below 1.5m effect most significantly.

Key words Hangzhou Bay, surface sediment, temporal and spatial variation, hydrodynamics