

# 杭州湾北岸多年水沙特性变化及原因探讨

吴雪枫 何青 郭磊城 王宪业 张迨<sup>1</sup>

(华东师范大学 河口海岸国家重点实验室, 上海 200241)

**【摘要】:** 强潮作用下杭州湾北岸受到围垦等人类活动的影响。基于 1982 和 2017 年实测数据对比分析了 35 年来杭州湾北岸的潮流、含沙量、盐度和地形变化。研究表明: 与 1982 年相比, 区域内的潮流场结构整体不变, 各测点均呈往复流态势, 多年来涨潮流速大于落潮流速; 研究区域内多年垂向平均含沙量下降 22%, 底部高浓度集中, 表底层浓度梯度增大, 含沙量高值区在空间上的分布由芦潮港向湾内移动, 金山深槽区的含沙量增长了 79%。综合岸线和水下地形变化与长江减沙、地貌冲淤和局地人类活动密切相关, 杭州湾北岸仍将面临侵蚀的风险威胁。

**【关键词】:** 杭州湾北岸 潮动力 泥沙 盐度 地形

**【中图分类号】:** P951 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)04-0839-10

杭州湾是世界著名的喇叭型强潮海湾。在东南向入射潮波和潮流作用下, 杭州湾南岸淤涨, 北岸则以侵蚀为主。杭州上游的钱塘江径流和来沙量相对较小, 湾内泥沙主要来源于长江口下泄泥沙, 杭州湾北岸水体含沙量普遍较高, 断面含沙量变化自湾口向湾内逐步减小。湾内盐度主要受到长江冲淡水、外海潮汐的影响, 表底层盐度差值小, 混合均匀, 呈东高西低的态势<sup>[1~4]</sup>。长江入海泥沙作为杭州湾泥沙的主要来源, 受长江入海泥沙减少以及周边人类活动加剧的影响, 长江口进入杭州湾北岸的泥沙有所下降, 这对于杭州湾的泥沙供给势必产生一定影响。自三峡工程蓄水以来, 长江入海泥沙减少的速率进一步加快。杭州湾北岸作为长江入海的连接区, 相较于湾内其他区域, 其输沙量和地貌演变等会受到长江入海泥沙减少带来的直接影响<sup>[5~7]</sup>。近年来杭州湾北岸也受到滩涂围垦和岸线高密度开发利用等人类活动的影响, 在岸线固化和沙源减小的影响下, 区域水沙动力过程势必受到影响。

已有研究通过实测数据、地形资料和数值模拟, 对杭州湾北岸的流场特征、岸滩稳定和地貌演变有了一定的研究, 多年来杭州湾北岸受外界条件影响, 区域内含沙量和水动力情况产生了变化。围垦工程和长江输沙量减少等对湾内的水动力、含沙量和地貌演变产生了不同程度的影响<sup>[8~11]</sup>, 在减沙影响下杭州湾北岸海床冲淤出现了由淤转冲的态势。然而新的水沙环境和人类活动影响下杭州湾北岸长时间跨度的动力场变化研究相对较少。杭州湾北岸作为侵蚀岸段, 把握区域内动力场变化的情况, 对于分析其岸滩冲淤和动力地貌演变趋势具有重要意义。本文以 1982 和 2017 年实测水沙盐数据为基础, 将地形资料和遥感手段相结合, 重点探究了 35 年来杭州湾北岸潮动力、泥沙和盐度场的变化情况。并针对长江入海泥沙减少、区域地貌演变和人类活动的影响, 分析了变化原因及关系, 弥补了对杭州湾北岸多年动力场变化量化认识的不足。

## 1 研究区域与数据方法

杭州湾位于浙江省东北部, 钱塘江口外, 形状呈漏斗状, 湾口宽约 100km, 从湾口向内逐渐喇叭型缩窄, 湾内以不规则半日潮为主, 潮差较大, 湾顶处最大潮差可达 8.9m, 常出现涌潮和风暴潮。湾内床面泥沙较细, 主要以粉沙和泥质粉沙为主<sup>[1]</sup>。杭州

<sup>1</sup>作者简介: 吴雪枫(1995~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为河口泥沙输运。E-mail:52193904011@stu.ecnu.edu.cn

何青 E-mail:qinghe@sklec.ecnu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51739005); 科技部政府间(中荷)国际科技创新合作重点项目(2016YFE0133700); 上海市科委重点基金项目(17DZ1204800, 18DZ1206400)

湾北岸位于上海市南翼与长江口相邻，东起南汇嘴，西至漉浦一带。北岸沿线潮波显示出驻波性质，潮流基本为往复流，方向为东西向，常与岸线平行<sup>[12]</sup>。杭州湾涨潮自东南向西北沿程流速递增直冲北岸海塘方向，南岸是落潮流的扩散隐蔽区，且落潮流速随江面放宽，流速也逐渐减缓，决定了杭州湾北冲南淤的格局<sup>[13]</sup>。最大流速出现在南汇嘴前沿，在纵向分布上从口门向内流速逐渐减小<sup>[2]</sup>。作为长江泥沙扩散的南侧，杭州湾北岸含沙量一般较高，底层可达  $2.5\sim 3.0\text{kg/m}^3$ ，北岸含沙量高于南岸，其泥沙的来源主要是由长江径流通过南汇嘴进入北岸和流入口外的泥沙在潮流的作用下流入杭州湾北岸<sup>[14]</sup>。

本文选取杭州湾北岸大潮期间 1982 年 7 月 21 至 23 日 11 个测点和 2017 年 9 月 6 日至 8 日 8 个测点，并收集了 2002 年 6 月 11 日大潮期间芦潮港外的 2 个测点一并进行对比(图 1)，其中 1982 和 2017 年的 8 个对比点位分别为 C1/2606/L1、C2/2607/L2、D1/2704、D2/2804、E1/2702、E2/2802、F1/2701、F2/2801。将杭州湾北岸按照流场和潮流作用的强弱划分为 3 个区域进行研究，分别为东海大桥西侧的芦潮港外区(I)、奉贤岸段区(II)、金山深槽区(III)。

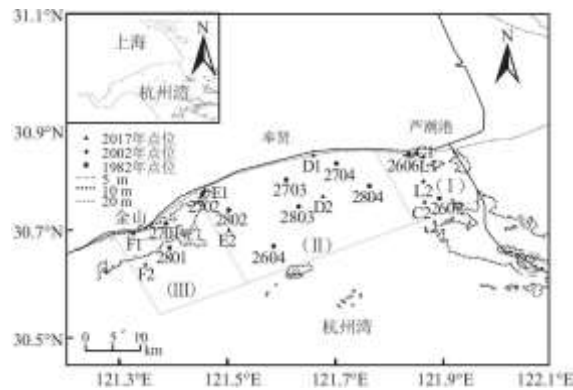


图 1 杭州湾北岸 1982 年 7 月、2002 年 6 月和 2017 年 9 月定点观测站位图

1982 年 7 月数据资料来源于全国海岸带调查的上海市海岸带海洋水文调查，含沙量和盐度值是通过采集各层的水样后通过室内分析测得，流速流向为直读式海流计测得。2017 年 9 月为最新实测数据，各测点数据使用光学后向散射浊度仪 OBS 对一个潮周期内的每个小时整点时刻按 6 点法拉垂线，得到各层的浊度和盐度。含沙量水样的采集为每两小时一次，同样采用六点法取样。流速方面使用声学多普勒流速剖面仪 ADCP 观测得到一个潮周期内的流速、流向。采用分层系数<sup>[15]</sup>来衡量水体盐度的垂向

混合情况： $N = \frac{S_s - S_b}{S}$ ，其中  $S_b$ 、 $S_s$  分别表示水体表层与底床的盐度， $S$  表示整个水体的垂线平均盐度。

对比 1982 年 7 月和 2017 年 9 月的边界条件，首先考虑长江径流的影响，由于大通流入杭州湾北岸的长江径流需要约一个月<sup>[16]</sup>，故查取了 1982 年 6 月和 2017 年 8 月的大通径流量，分别为  $50000$  和  $41700\text{m}^3/\text{s}$ ，存在一定的差异。其次考虑局地潮差，芦潮港 1982 年 7 月 22 日和 2017 年 9 月 6 日潮差分别为  $4.59$  和  $4.55\text{m}$ ，表明局地潮汐强度具有一定可比性。1982~2017 年间杭州湾湾口形态未有明显改变，湾口宽约  $110\text{km}$ 。对 2017 年不同型号 OBS 测得的浊度、盐度数据与室内试验获得数据进行标定处理，并对 ADCP 测得的流速流向进行分解。绘制 1982 和 2017 年各临近点位在一个潮周期内的流速、含沙量和盐度剖面图，由此可对比和分析大潮期间各区域及不同测点动力场的变化。

## 2 水沙变化特征

### 2.1 潮动力变化

根据 1982 和 2017 年大潮期间的流速数据，绘制各测点潮周期内的垂向平均流速流向矢量图。发现 35 年来杭州湾北岸的潮

流场格局没有发生明显变化，各测点均呈现往复流的态势，往复流的主轴方向大致与岸线平行(图 2)。1982 年 7 月的测点垂向平均流速要略大于 2017 年 9 月。其中芦潮港外区近岸点(2606/C1)流向受地形等因素影响由北向南转变，涨落潮平均流向由 1982 年的 289° 和 77° 转变为 2017 年的 258° 和 101°。2002 年 6 月 11 日大潮期间芦潮港外呈涨潮流速略大于落潮，流向依旧呈现往复流，涨落潮流向主轴方向为 273° 和 96°。1982~2017 年间芦潮港外区涨落潮流向逐渐向南偏转。

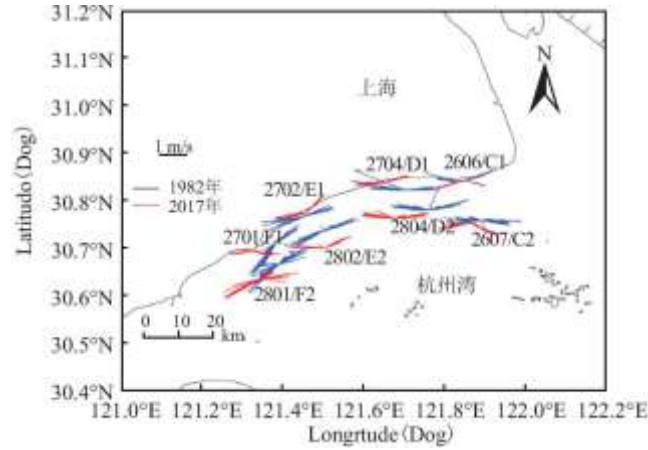


图 2 杭州湾北岸 1982 和 2017 年垂向平均流速矢量分布图

通过 1982~2017 年芦潮港多年潮位资料，对 1982、1992、2002、2012 和 2017 逐年 7 月潮位分析发现(表 1)，杭州湾北岸湾口潮差整体多年来呈现增大态势，涨潮历时小于落潮历时。落潮历时 1982~2012 年间变化较小，2012~2017 年落潮历时增长；涨潮历时多年无明显变化。1982 和 2017 年观测期间区域内也呈现涨潮流速大于落潮流速，落潮历时大于涨潮历时的特点。1982 年大潮涨潮垂线平均流速介于 0.78~1.38m/s，平均为 1.10m/s；落潮流速介于 0.78~1.20m/s，平均流速为 1.02m/s。2017 年大潮涨潮流速介于 0.71~1.41m/s，平均流速为 1.07m/s；落潮流速介于 0.61~1.13m/s，平均流速为 0.84m/s。涨潮流速 2017 年较 1982 年减少了 3%，落潮流速 2017 年较 1982 年减少了 17%。芦潮港外区涨潮流速略有增长，奉贤岸段区的涨落潮流速最大，35 年来的减少幅度也最大，涨落潮流速分别减少 9%和 19%(图 3)。1982 年区域内表中底层流速均要大于 2017 年，且垂向流速梯度较大。多年来大潮期间最大流速出现在涨落急时刻表层水域，流速可达 1.5m/s 以上，涨急表层流速要大于落急(图 4)。

表 1 1982~2017 年 7 月芦潮港潮差及涨落潮历时对比

	1982 年	1992 年	2002 年	2012 年	2017 年
潮差 (m)	3.03	3.08	2.95	3.36	3.44
落潮 (h)	6.8	6.8	6.8	6.8	7.2
涨潮 (h)	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6

## 2.2 含沙量场对比

通过统计区域内各测点大潮期间含沙量变化，1982 年杭州湾北岸平均含沙量为 1.70kg/m<sup>3</sup>，2017 年为 1.33kg/m<sup>3</sup>，多年来含沙量整体下降了 22%。芦潮港外区分别为 2.17 和 0.94kg/m<sup>3</sup>；奉贤岸段区分别为 1.79 和 1.46kg/m<sup>3</sup>；金山深槽区分别为 0.82 和 1.47kg/m<sup>3</sup>(表 2)。1982 年芦潮港外和奉贤岸段区域含沙量明显大于金山深槽区，含沙量区域分布呈自东向西减小；2017 年芦潮

港外区含沙量则小于金山深槽区和奉贤岸段区, 呈现自东向西增加。35 年来高含沙量区域发生了转移, 由原来的芦潮港外向北岸湾内区域移动。金山深槽区含沙量明显增高, 2017 年较 1982 年增长了 79%, 而奉贤岸段区含沙量下降了 18%, 芦潮港外区下降了 57%。区域内的最大含沙量 1982 和 2017 年均位于奉贤岸段区的底层(2804/D2), 分别为 9.38 和 7.93kg/m<sup>3</sup>。

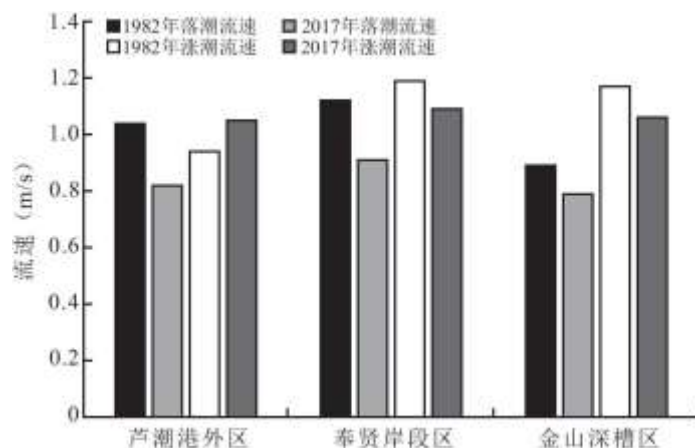


图 3 1982 和 2017 年杭州湾北岸分区涨落潮平均流速对比

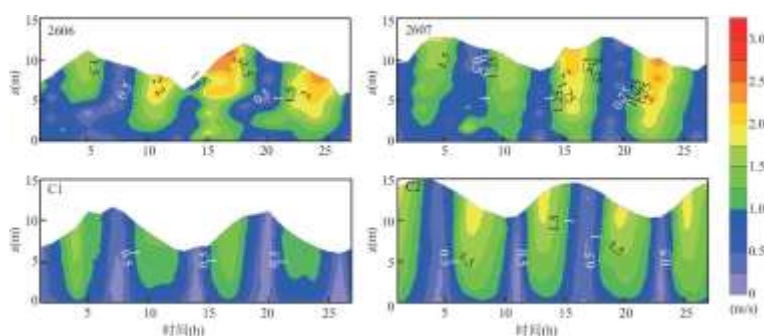


图 4 芦潮港外区 1982 和 2017 年流速剖面变化

表 2 杭州湾北岸 1982 年和 2017 年垂向平均含沙量(kg/m<sup>3</sup>)对比

区域	1982 年 涨潮	1982 年 落潮	1982 年 潮平均	2017 年 涨潮	2017 年 落潮	2017 年 潮平均
区域总平均	1.75	1.57	1.70	1.37	1.32	1.33
芦潮港外区	2.52	1.94	2.17	1.00	0.91	0.94
奉贤岸段区	1.79	1.70	1.79	1.43	1.48	1.46
金山深槽区	0.84	0.79	0.82	1.61	1.42	1.47

杭州湾北岸内各测点含沙量随时间和空间变化呈现一定规律, 对比涨落潮内各特征时刻含沙量的变化发现: 1982 年芦潮港外测点潮周期内含沙量要大于 2017 年, 且近岸点(C1、2606)在潮周期内含沙量均要大于远岸点(C2、2607), 含沙量呈离岸减少

趋势。1982 年垂向含沙量变化梯度较大，在涨、落急后底层水体均呈现高含沙量，底部含沙量可达  $6\sim 7.5\text{kg}/\text{m}^3$ 。相比下 2017 年含沙量在潮周期内变化较小，整体呈现较低含沙量值，仅在落急后底层含沙量会有所提升，底层含沙量在  $3\sim 4\text{kg}/\text{m}^3$  (图 5)。2002 年芦潮港外测点发现，2002 年 6 月 11 日大潮期间，含沙量近远岸点潮周期内含沙量分别为  $1.31$  和  $1.29\text{kg}/\text{m}^3$ ，介于 1982 和 2017 年芦潮港外大潮平均含沙量，底层含沙量在涨落急时刻含沙量可达  $4\sim 5\text{kg}/\text{m}^3$ ，多年来呈逐步减小态势。奉贤岸段区含沙量远岸点大于近岸点，垂向梯度小，中层水体含沙量可达  $1\text{kg}/\text{m}^3$  以上，涨落急时刻表层水体含沙量显著增大。1982 年涨潮水体垂向平均含沙量要大于落潮，2017 年涨潮水体垂向平均含沙量小于落潮 (图 6)。金山深槽区含沙量呈离岸增加趋势，1982 年含沙量呈涨潮期增大、落潮减小趋势，涨急时刻含沙量在垂向上明显提高，高含沙区多集中在涨急后的底层水域，最大含沙量在  $3\sim 5\text{kg}/\text{m}^3$ 。2017 年含沙量值明显提升，远岸点 F2 含沙量在整个潮周期的增长明显，涨落急时刻均表现出较高含沙量，在  $6\sim 7\text{kg}/\text{m}^3$ 。潮周期内涨落潮流速流向的变化与含沙量存在相应规律。1982 年杭州湾北岸区域内涨潮含沙量均大于落潮含沙量；2017 年涨潮含沙量仍大于落潮，但是差距有所减小。

多年来潮动力的变化影响着湾内各点垂向含沙量分布。芦潮港外区 35 年来含沙量浓度梯度减小，浓度混合更加均匀，而奉贤岸段区和金山深槽区的含沙量浓度梯度整体呈增加趋势，区域内测点呈底部高浓度集中，表底层浓度差值增大 (图 7)。1982 年芦潮港外区垂向平均含沙量伴随着流速的变化且略有滞后，最大含沙量出现在涨落急后一小时内 (图 8)。此期间含沙量在相对较大的流速情况下使底部泥沙悬浮，含沙量垂向分布相比其他时刻更加均匀。其 2017 年区域内潮动力条件的减弱使得在其余时刻中层以下流速相对较小，底部呈现出较高浓度。湾内其他测点也表现出相同特性。

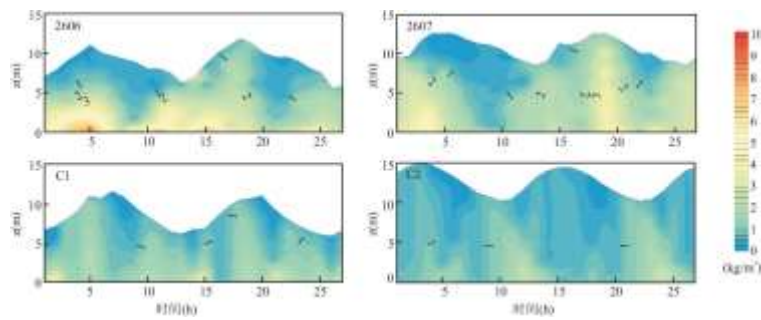


图 5 芦潮港外区 (2606/2607、C1/C2) 1982 和 2017 年含沙量剖面变化

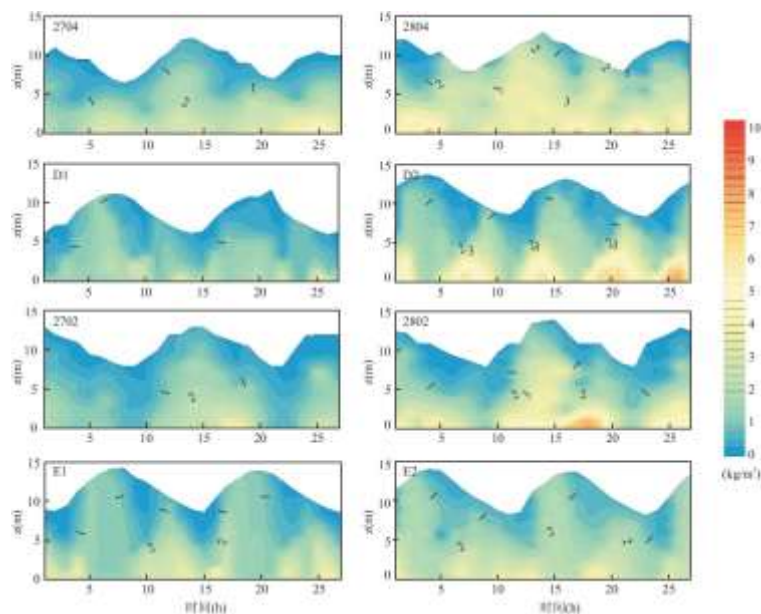


图 6 奉贤岸段区 (2702/2074/2802/2804、D1/D2/E1/E2) 1982 和 2017 年含沙量剖面变化

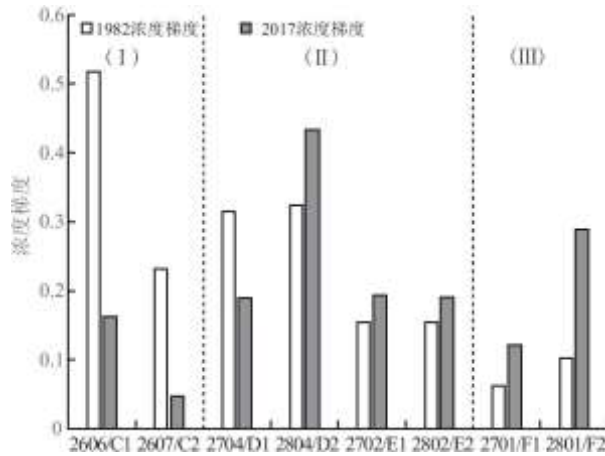


图 7 杭州湾北岸分区含沙量浓度梯度变化

### 2.3 盐度场变化

受两次观测期间长江径流量变化影响，导致 1982 年区域内盐度较 2017 年偏低，1982 和 2017 年区域内平均盐度分别为 7.5 和 10.2。空间上盐度自湾口向内呈先减小后增大、远岸点大于近岸点的特点。芦潮港外区远岸点在 1982 年和 2017 年均在大潮期间有着较高的盐度，分别为 9.63 和 12.07，要整体高于区域内其他测点，奉贤岸段区 D1-D2 (2704~2804) 断面盐度均小于周围点位，与长江口与杭州湾北岸之间的淡水交换及地形岸线有关。芦潮港外区 1982 年和 2017 年得平均盐度值分别为 8.1 和 10.4；奉贤岸段区分别为 7.0 和 9.8；金山深槽区分别为 8.1 和 10.6 (表 3)，各测点多年盐度值增大范围在 2.3~2.8。区域内各测点大潮期间盐度在涨落憩时刻前后垂向盐度增大，水体垂向混合强烈 (图 9)。

杭州湾北岸水体属强混合型，各测点在潮周期内盐度混合均匀，自湾口向内混合强度逐渐增强。35 年来芦潮港外区因受长江口径流与杭州湾北岸交换影响，分层系数在 0.01~0.08 属于缓混合型，但 1982 年区域内混合强度要小于 2017 年，分别为 0.06 和 0.02，盐度垂向梯度变小。由于受长江径流影响，芦潮港外区受长江口径流与杭州湾北岸交换影响混合强度有所减弱。奉贤岸段和金山岸段区则混合强度大，远岸点分层系数均要小于 0.01。两个区域内均呈现远岸点混合强度大于近岸点、底层盐度大于表层的现象。

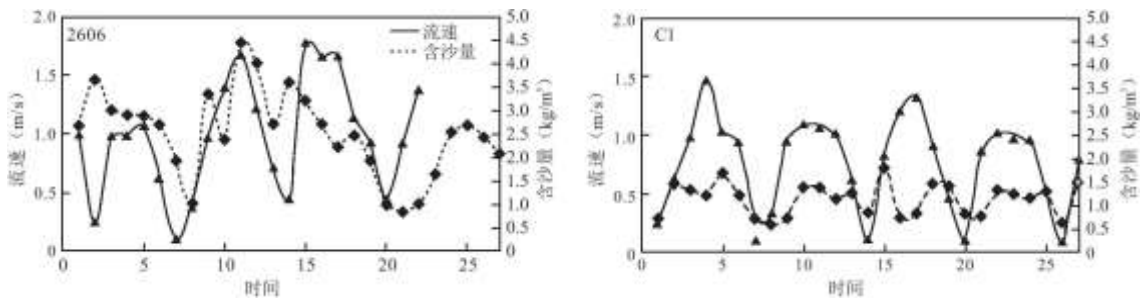


图 8 芦潮港区 (2606、C1) 垂线平均含沙量-流速关系

表 3 杭州湾北岸 1982 年和 2017 年垂向平均盐度 (PSU) 对比

区域	1982年	2017年
区域内总平均	7.52	10.15
芦潮港外区	8.10	10.38
奉贤岸段区	6.99	9.83
金山深槽区	8.07	10.56

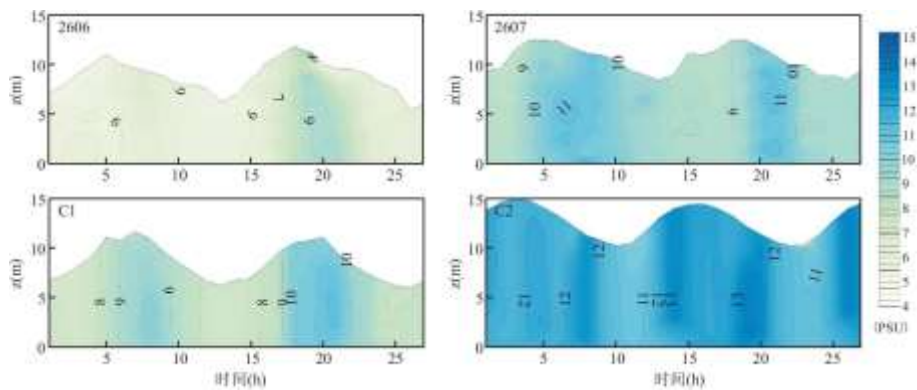


图9 芦潮港外区(2606/2607、C1/C2) 1982和2017年盐度剖面变化

### 3 变化原因分析

杭州湾作为强潮河口，潮动力、含沙量和盐度场变化，近年来除受潮流影响外，还受到输沙量减少，地貌变化和人类工程影响的共同作用。多年来杭州湾北岸动力格局基本不变，但局部有微幅变化；盐度受两次观测期间长江径流量的大小影响，有所增加，但空间分布基本不变。本节将通过局地人类活动、长江流域减沙和多年来地貌演变影响这几个方面去讨论杭州湾北岸多年来的水沙变化情况进行讨论，并着重对含沙量场变化进行分析。

#### 3.1 局地人类活动影响

人类活动的加剧对于杭州湾北岸输沙和地貌已产生巨大影响。自20世纪以来在人类工程影响下杭州湾北岸岸线不断的外扩(图10)，20世纪70年代以来，研究区域进行了3次较大规模的圈围造地工程：1972年的金山石化总厂围堤工程、1994年起的南汇咀人工半岛工程和2002年的芦潮港西侧圈围工程<sup>[17,18]</sup>。杭州湾北岸岸线已逐步由侵蚀状态转变为动态平衡状态<sup>[19]</sup>。而岸线的外扩对于区域内的水动力和泥沙输运等势必产生一定的影响<sup>[7,20]</sup>。例如杭州湾北岸弧形岸段凹岸段水流作用较弱，导致区域内水沙输运相对较弱，有别于凸岸段。可能造成凹岸段水体盐度偏小并有利于该区域内泥沙的落淤<sup>[21]</sup>。杭州湾内南北岸围垦工程造成澈浦断面附近流速减小，和湾顶部分区域流速增大<sup>[10]</sup>，南汇咀围垦导致南汇附近的水流动力减弱<sup>[11]</sup>。而南汇边滩工程导致的岸线的东扩，使得由南汇咀进入杭州湾北岸的泥沙受到阻碍，输沙路径发生改变、输沙量进一步减少，同时大规模促淤圈围工程也使得大量泥沙被圈闭无法进入外海。

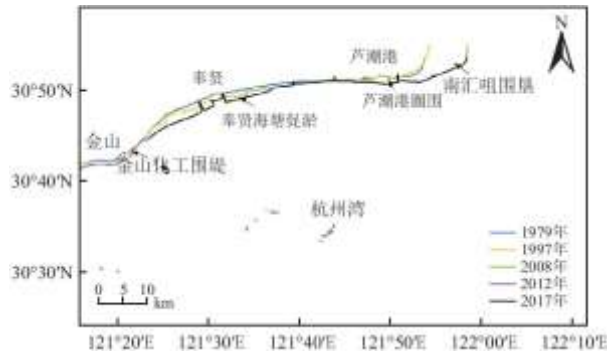


图 10 长江口-杭州湾 1979~2017 年岸线变化

### 3.2 长江减沙对杭州湾北岸的影响

近年来，由于长江上游三峡等大型水利工程建成蓄水以及植树造林等人类活动的实施拦截了大量泥沙，致使长江流域在径流量未出现大幅下降的情况下，输沙量表现出明显的下降趋势。考虑到长江来沙约有 40%淤积在杭州湾及近海，在涨潮作用下输入杭州湾。这是杭州湾泥沙供给的主要来源<sup>[22,23]</sup>。2003~2016 年三峡水库蓄水后的 14 年中，长江年平均输沙量为 1.4 亿 t，比三峡蓄水前平均值下降 67% (图 11)。1982~2017 年间，长江输沙量减少 78%，杭州湾北岸减少 22%，芦潮港和奉贤岸段区分别减少 57%和 18% (表 4)。发现距离长江口越近的芦潮港区含沙量减少越大，因此推测长江入海泥沙的减少直接导致了自南汇咀输入进入杭州湾北岸泥沙量的减少，由此成为杭州湾北岸多年来杭州湾北岸含沙量下降的一个主要原因。

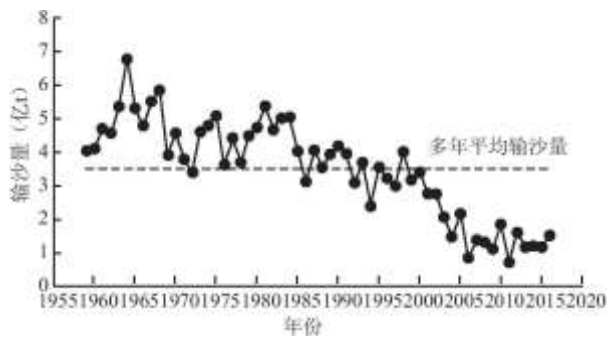


图 11 长江大通站逐年输沙量变化

表 4 1982~2017 年长江口输沙量和杭州湾北岸含沙量减少

	1982~2017
长江输沙量减少	78%
杭州湾北岸含沙量减少	22%
芦潮港外区含沙量减少	57%
奉贤岸段区含沙量减少	18%

### 3.3 地貌冲淤变化

杭州湾北岸滩冲淤变化频繁，受潮流、风浪、人类活动等多种因素的影响，多年来地形发生很大变化<sup>[24]</sup>。通过对 1979、1997、2012 和 2017 年杭州湾北岸地形资料的岸线、等深线与水深分析(图 12)。1979~1997 年间杭州湾北岸沿岸主要呈淤积趋势，奉贤岸段区离岸 1km 外有一条明显的冲刷带，沿岸线冲刷，金山深槽区局部有大冲大淤的现象。除芦潮港外区离岸冲刷外，奉贤岸段区和金山深槽区离岸 5km 外处于淤积趋势。计算得到整个研究区域内淤积达 2.52 亿 m<sup>3</sup>。

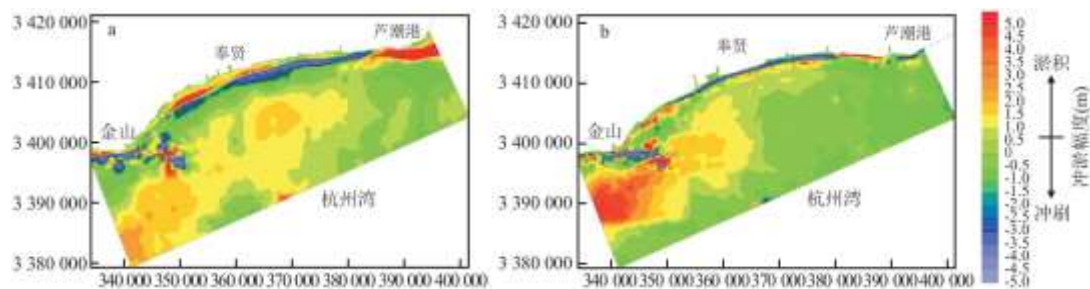


图 12 1979~1997 (a) 和 1997~2012 (b) 年杭州湾北岸冲淤分布图

在涨潮流占优以及区域含沙量空间分布变化的共同影响下区域内泥沙向湾内输运，形成了杭州湾北岸西淤东冲的冲淤地貌格局。且 35 年来冲刷区域向湾内延伸，冲刷幅度加大。1997~2012 年间沿岸区域除芦潮港西侧和金山部分岸线外，全线受到冲刷。芦潮港外和金山深槽区近岸冲刷幅度主要集中在 0~2m 水深区域，奉贤岸段外区近岸 300m 外冲刷严重，冲刷幅度普遍在 5m 左右。远岸区呈现以奉贤中部为界，西淤东冲的趋势。其中芦潮港外区离岸整体呈现冲刷态势；金山深槽区冲淤幅度较大，区域西侧呈现大面积淤积，淤积幅度在 1.5~3.0m 之间。计算得到整个研究区域内淤积了 0.69 亿 m<sup>3</sup>。对比发现 1997~2012 年间区域淤积体积相比 1979~1997 年间减少了 73%。此外作者对更大范围区域计算发现杭州湾北岸已由 1979~1997 年的淤积转变为冲刷(1997~2012 年)。2012~2017 年间区域整体范围内整体呈现微冲态势(图 13)，且冲刷面积进一步扩大，芦潮港外及奉贤以西均呈现冲刷态势，冲刷范围在 0~1m，靠近湾口处冲刷较为严重。芦潮港以西的近岸区域和奉贤以东呈现出淤积态势，主要淤积范围在 0~0.5m。金山深槽依旧呈现出冲淤强烈的特点。杭州湾北岸正由淤积逐渐转变为冲刷，间接证明了区域供沙不足和区域内含沙量的降低，近 35 年来含沙量减少是对杭州湾地貌演变的反馈。

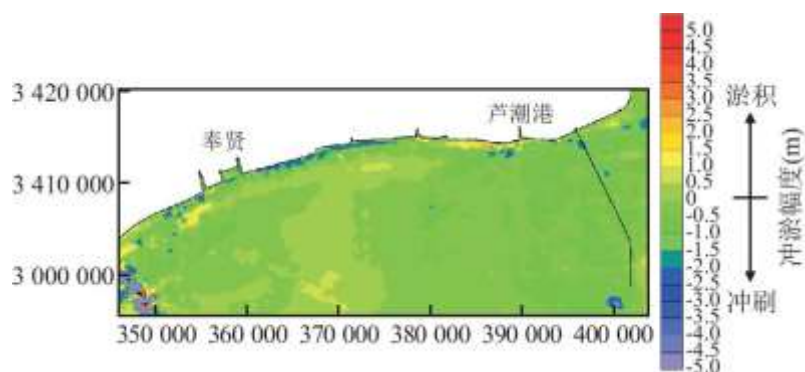


图 13 2012~2017 年杭州湾北岸冲淤分布图

## 4 结论

利用杭州湾北岸 2017 年洪季实测数据与 1982 年洪季数据进行对比，结合多年水下地形图，分析了 35 年来杭州湾北岸动力

场变化情况，讨论了在长江减沙、围垦工程和冲淤变化情况。研究结果表明：

(1) 35年来杭州湾北岸流场格局未有明显改变，仍以往复流为主；涨潮流速大于落潮流速，涨潮历时小于落潮历时。

(2) 在长江口供沙减少及局地人类活动综合影响下，研究区域内平均含沙量有明显下降。含沙量值由1982年 $1.70\text{kg}/\text{m}^3$ 下降到了2017年的 $1.33\text{kg}/\text{m}^3$ ，含沙量区域分布由1982年的东高西低转变为西高东低，高含沙量区从芦潮港岸段区向金山深槽区转移。1982和2017年芦潮港外区均呈现含沙量离岸较小，奉贤岸段区和金山深槽区离岸增加的特点。多年来芦潮港外区持续冲刷，这会导致该区域内泥沙逐渐向湾内移动；而奉贤岸段多年来呈现淤积，泥沙在涨落急时刻悬扬产生较高的含沙量。

(3) 受观测期间长江入海径流较1982年减小的影响，研究区域内的盐度均呈现上涨，研究区域内各测点35年来均呈现盐度自西向东先减小后增大，即“中间小、两边大”的态势。2017年盐水混合强度要明显大于1982年，盐度垂向梯度减小。

(4) 长江入海泥沙减少是杭州湾北岸冲淤格局变化的控制因素。人类活动的加剧对区域内地形和动力场环境等均会产生一定影响，是考虑多年来动力场变化的重要因素。杭州湾北岸多年来动力变化是受人类活动影响下外部输沙及动力场改变及内部地貌演变共同作用下导致的。

下一步还需要结合模型工具更好的量化长江口与杭州湾之间的泥沙交换，以及杭州湾北岸区域的围垦等人类活动的影响，以更好的评估杭州湾北岸的岸线侵蚀风险和灾害。

#### 参考文献：

- [1] 曹沛奎, 谷国传, 董永发, 等. 杭州湾泥沙运移的基本特征[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 1985(3):75-84.
- [2] 谷国传, 李身铎, 胡方西. 杭州湾北部近岸水域水文泥沙特性[J]. 东海海洋, 1987(4):15-24.
- [3] 李九发. 长江河口南汇潮滩泥沙输移规律探讨[J]. 海洋学报(中文版), 1990(1):75-82.
- [4] 李身铎, 胡辉. 杭州湾流场的研究[J]. 海洋与湖沼, 1987, 18(1):28-38.
- [5] DAI Z, LIU J T, XIE H, et al. Sedimentation in the outer Hangzhou Bay, China: The influence of Changjiang sediment load[J]. Journal of Coastal Research, 2014, 30(6):1218-1225.
- [6] XIE D, PAN C, WU X, et al. The variations of sediment transport patterns in the outer Changjiang Estuary and Hangzhou Bay over the last 30 years[J]. Journal of Geophysical Research-Oceans, 2017, 122(4):2999-3020.
- [7] 谢东风, 潘存鸿, 曹颖, 等. 近50a来杭州湾冲淤变化规律与机制研究[J]. 海洋学报(中文版), 2013(4):121-128.
- [8] 何超. 近二十年长江口邻近海域悬沙分布比较研究[D]. 华东师范大学, 2007.
- [9] XIE D, PAN C, WU X, et al. Local human activities overwhelm decreased sediment supply from the Changjiang River: Continued rapid accumulation in the Hangzhou Bay-Qiantang Estuary system[J]. Marine Geology, 2017, 392:66-77.
- [10] 邵明明. 围垦工程对杭州湾潮波动力过程的影响研究[D]. 浙江大学, 2016.

- 
- [11]CAO D, SHEN Y, SU M, et al. Numerical simulation of hydrodynamic environment effects of the reclamation project of Nanhui tidal flat in Yangtze Estuary[J]. Journal of Hydrodynamics, 2019, 31(3):603-613.
- [12]曹佳, 茅志昌, 沈焕庭. 杭州湾北岸岸滩冲淤演变浅析[J]. 海洋学研究, 2009(4):1-9.
- [13]韩曾萃, 潘存鸿. 钱塘江河口保护与治理研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2017.
- [14]刘光生. 杭州湾水沙运动特性分析[J]. 浙江水利科技, 2013(2):56-60.
- [15]PRANDLE D. On salinity regimes and the vertical structure of residual flows in narrow tidal estuaries[J]. Estuarine Coastal & Shelf Science, 1985, 20(5):615-635.
- [16]王亚, 何青, 沈健. 长江河口水流输运时间研究[J]. 海洋学报, 2014, 1(36):48-55.
- [17]虞志英, 茅志昌, 李申铎, 等. 杭州湾北岸冲淤演变[R]. 华东师范大学, 2009:2-5..
- [18]虞志英, 周家庆, 吴永兴, 等. 上海市杭州湾北岸滩涂的开发利用[J]. 海洋与海岸带开发, 1991(2):15-19.
- [19]刘建佳. 杭州湾岸线演化及稳定性研究[D]. 浙江大学, 2013.
- [20]恽才兴, 许卫东. 杭州湾北岸围堤促淤工程实例分析[C]. 第九届全国海岸工程学术讨论会, 南京, 1999.
- [21]茅志昌, 郭建强, 赵常青. 杭州湾北岸金汇潮滩冲淤分析[J]. 海洋湖沼通报, (4):11-18.
- [22]刘红. 长江河口泥沙混合和交换过程研究[D]. 华东师范大学, 2009.
- [23]孔俊. 长江口、杭州湾水沙交换特性初步研究[D]. 河海大学, 2005.
- [24]刘苍宇, 虞志英. 杭州湾北岸的侵蚀/淤积波及其形成机制[J]. 福建地理, 2000(3):12-15.