

Doi :10.11840/j.issn.1001-6392.2017.03.006

杭州湾金山深槽冲淤演变及其趋势预测

刘毅飞^{1,2}, 陈沈良¹, 蔡廷禄², 贾建军^{1,2}, 夏小明²

(1. 华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062; 2. 国家海洋局第二海洋研究所
国家海岛开发与管理研究中心, 浙江 杭州 310012)

摘 要: 潮流冲刷槽是河口海岸地区重要的地貌单元, 其演变动态直接影响周边涉海工程的安全。基于 1972–2011 年间共 16 期水深地形图, 建立统一的数字高程模型 (DEM), 采用经验正交函数方法 (EOF), 分析了金山深槽总体的演变特征。EOF 分析得到的前 3 个特征函数反映的冲淤变化区主要位于水深 15 m (吴淞基面) 以下的深槽区域, 演变特征以深槽的南北拓宽及向西延伸为主; 典型断面代表的中部深槽、局部深潭以及深槽延伸前缘呈现不同的时空演变特征。采用 EOF 结合三次样条平滑方法, 对金山深槽区域的演变趋势进行预测, 认为预测的 2020 年地形特征与 2011 年相比, 将会延续之前的演变趋势: 中部深槽区域拓宽、西部深潭冲淤交替以及深槽前缘继续向西延伸。

关键词: 金山深槽; 冲淤演变; EOF; 趋势预测

中图分类号: P737.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-6932(2017)03-0284-09

Morphological evolution and forecast of Jinshan Trough in the Hangzhou Bay of China

LIU Yi-fei^{1,2}, CHEN Shen-liang¹, CAI Ting-lu², JIA Jian-jun^{1,2}, XIA Xiao-ming²

(1. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China; 2. State Research Center for Island Exploitation and Management, Second Institute of Oceanography, SOA, Hangzhou 310012, China)

Abstract: Sixteen pieces of charts of Jinshan Trough were processed in GIS from 1972 to 2011. In this paper, digital elevation model (DEM) with a resolution of 100 × 100 m is established for each chart using the Kriging interpolation method. Empirical Orthogonal Function (EOF) is used to decompose elevation matrix of transverse section and the spatiotemporal changes of Jinshan Trough are analyzed. Prediction of evolutionary trend in Jinshan Trough is made by using EOF and cubic spline interpolation. The results show that changes mainly happen in the trough under 15 m contour (Wusong Datum), which is reflected by the first three eigenfunctions. In general, erosion is of the main evolution characteristics, which is embodied in southward extension of the trough. Specifically in the middle section (P1) and advancing section (P3) of the trough, thalweg of the trough migrates southwards and its width increases; while in the western scouring hole (P2), there is an alternation of erosion and deposition every 3–5 years. The evolutionary trend of typical sections from 2011 to 2020 is consistent roughly with previous evolution characteristics, which means that the trough has not reached the equilibrium state.

Keywords: Jinshan Trough; erosion and deposition; EOF; trend forecast

河口湾潮流冲刷槽是河口海岸地区重要的地貌单元, 其发育过程、演变规律及趋势研究, 在理论上可以丰富动力地貌学的研究内容; 在实践应用

上, 可以为深槽周边涉海工程 (如港口、码头、航道、海底管道等) 的选址、安全维护及海岸与近岸海底的开发管理提供科学依据。

收稿日期: 2016-04-01; 修订日期: 2016-06-14

基金项目: 国家自然科学基金 (41576095; 41376068); 河口海岸学国家重点实验室开放基金 (SKLEC-KF201503)。

作者简介: 刘毅飞 (1979-), 在职博士生, 助理研究员, 主要从事河口海岸学研究。电子邮箱: sd_106108@sio.org.cn。

通讯作者: 陈沈良, 博士, 教授。电子邮箱: slchen@sklec.ecnu.edu.cn。

<http://hytb.nmdis.org.cn>

从空间尺度来看,河口湾潮流冲刷槽属于中尺度的地貌单元 (Hibma et al, 2004)。不同时间尺度的演变过程研究可以采用相应不同的研究方法。以往的研究方法有两种:一是以数值模拟为基础的“bottom-up”机理模型,包括水动力、泥沙输运以及地貌演变三大模块;二是以实测历史数据分析为基础的“top-down”统计模型 (Karunaratna et al, 2008)。“bottom-up”模型可以较好地揭示短期且局部的地貌演变机制 (Blott et al, 2006),但在长期演变 (10 年以上) 模拟方面存在局限性 (Prandle, 2004; Townend, 2005; Wang et al, 2008)。“top-down”模型通过对比或统计方法分析地貌演变特征,更适用于长期地貌演变规律的分析、影响因素探讨以及演变趋势预测 (Blott et al, 2006; 刘毅飞等, 2007; Karunaratna et al, 2008; Van der Wal et al, 2003; Reeve et al, 2008; 倪云林等, 2012; Dai et al, 2013; Wang et al, 2013; 倪文斐等, 2013)。

金山深槽紧贴杭州湾北岸金山卫沿岸,该岸段建设了多座石化码头,海底铺设了输油(气)管道。因此其地貌演变规律的研究对于海岸、码头及海底管道的安全具有重要意义。金山深槽动力地貌研究始于 20 世纪 80 年代,早期研究着重于深槽的形成过程、地貌形态特征及分类、冲淤演变特征及控制因素分析等 (陈卫跃, 1984; 袁忠浩等, 1987; 曹沛奎等, 1989; 刘阿成, 1992; 余祈文等, 1994; 熊绍隆等, 1994)。近年来,随着新技术与方法的应用,研究重点为深槽的演变机理及精细化的微地貌研究 (谢东风等, 2006; 杨旻等, 2008; Xie et al, 2009; 赵宝成, 2011)。对金山深槽长期地貌演变规律及其演变趋势的研究较少。

本文以 1972-2011 年间多期水深地形数据为基础,采用统计方法分析金山深槽长期演变特征,并预测其演变趋势。

1 研究区域概况

杭州湾是典型的强潮河口湾,平面向东张开的喇叭口形态及海底由湾口向湾顶逐渐抬升的地形剖面特点,造就了杭州湾强劲的潮动力特征。在科氏力影响下,涨落潮流路分离,涨潮流偏北而落潮流

偏南。底床松散沉积物在潮流作用下运移、沉积,塑造了三大特征地貌区:湾口浅滩区,湾中潮流槽脊区和湾顶河口沙坝区 (中国海湾志编纂委员会, 1992)。在潮流槽脊区紧贴杭州湾北岸发育北岸深槽系统,自东向西依次为金山、全公亭、海盐深槽以及乍浦、秦山深潭 (王颖, 2012)。金山深槽为杭州湾北岸深槽的东部起点,为涨潮冲刷槽 (陈吉余等, 1961)。

金山深槽东部始于金山三岛,大致呈 ENE-WSW 向延伸,平面形态由东向西逐渐缩窄。深槽北边坡陡而南边坡缓,15 m 等深线 (吴淞基面以下) 包络的深槽区大约 11 km 长,2 km 宽。深槽内部主泓区发育有水深超过 30 m 的深潭,最大水深超过 50 m (图 1)。

2 材料与方法

2.1 地形数据

上海金山石化总厂建厂伊始,对金山深槽进行了持续的地形测量。本文收集了 15 期该系列水深图,测量时间分别为 1972、1976、1980、1981、1982、1983、1985、1987、1988、1990、1992、1994、1996、1998、2000 年。此系列水深图具有一致的坐标系 (北京 54)、投影 (高斯-克吕格)、深度基准 (吴淞基面) 以及测量比例尺 (1:10 000)。此外,收集了 1 期海图,测量时间为 2011。图件信息:2000 国家大地坐标系,墨卡托投影,深度基准为理论最低潮面,测量比例尺为 1:25 000。

2.2 分析方法

利用 ArcGIS 软件对地形图和海图进行数字化;将坐标系、投影及深度基准分别统一为北京 54 坐标系、高斯-克吕格投影及吴淞基面;采用克里金插值方法对地形数据进行插值,生成数字高程模型 (DEM),网格大小为 100 × 100 m;选取 3 条地形横断面 (图 1),通过典型断面与整个研究区域两种维度上的对比与经验正交函数分解方法 (EOF),分析金山深槽主要冲淤演变特征。

EOF 是一种针对长时间序列数据的统计方法,是一种从多个变量化为少数变量的统计方法,类似于主成分分析方法 (PCA)。应用于地形分析,将水深数据正交分解为时间特征函数与空间特征函数,地形高程场可以看作是一系列正交的时间函数

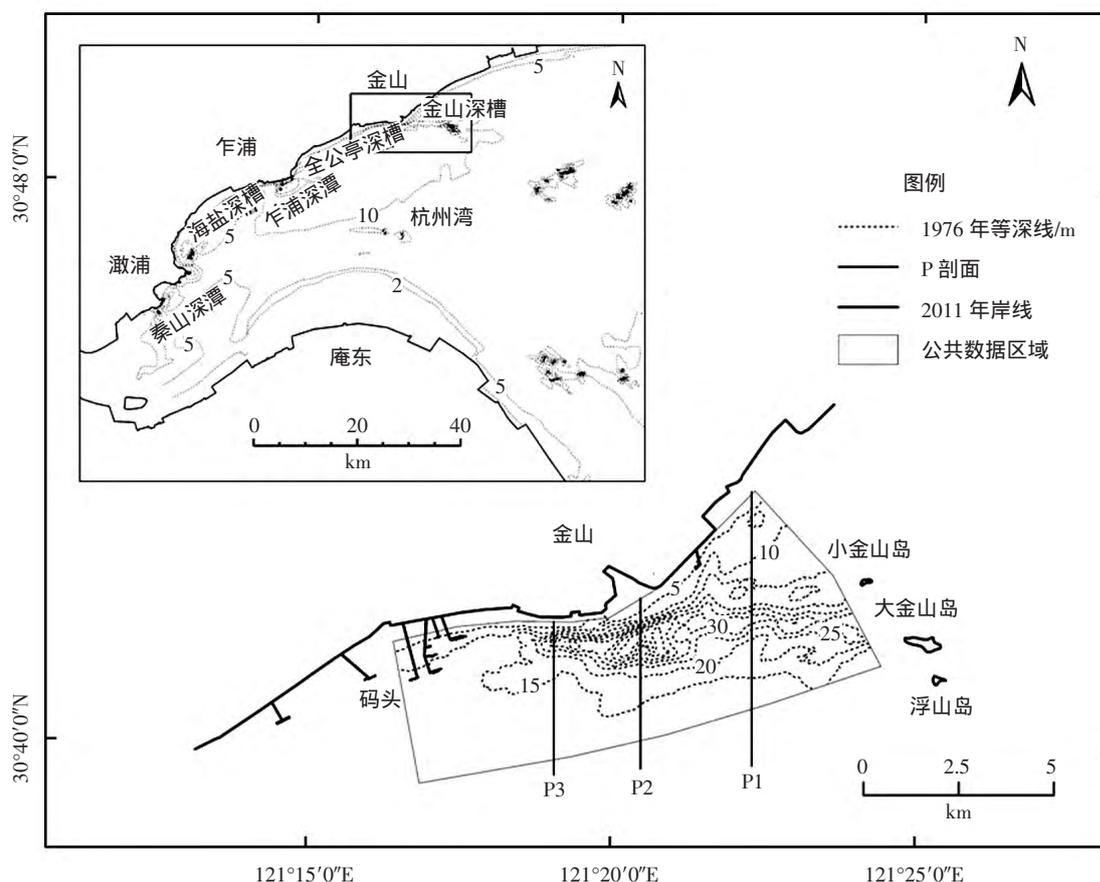


图1 金山深槽位置地形与断面位置

(水深为吴淞高程基准, 多边形区域为 16 期水深数据覆盖区)

与空间函数乘积之和, 同时按方差贡献大小排序。贡献率较大的前几个特征函数可以代表地形高程场的主要时空变化特征。具体的计算方法参见工具书 (Jackson, 2003)。

EOF 分析判断地形冲淤变化的具体方法为: 当水地形取为正值时, 空间函数为正值的部分, 在时间函数递增阶段冲刷, 递减阶段淤积; 空间函数为负值的部分, 冲淤变化与此相反 (沈健等, 1992; 向卫华等, 2003)。

常用的统计预测方法包括逐步回归、最优子集回归、EOF 降维逐步回归、神经网络等 (邓海光等, 2006)。本文基于分析方法的一致性, 采用 EOF 方法对地形演变趋势进行预测。该方法本身不能作预报, 首先假定特征函数空间向量场不随时间变化且在预测的时刻也相对稳定, 继而用其他方法 (一般为回归分析) 做出预测时刻特征函数时间主分量的预报值, 将它与对应空间主分量相乘, 计算整个地形高程场的预报估计 (王金栋, 2005; 应

铭, 2007)。本文采用三次样条平滑的方法, 对时间主分量作拟合及预测 (覃爽, 2012)。

3 结果与讨论

3.1 金山深槽冲淤演变特征

首先分析金山深槽区域近 40 年的总体演变特征; 选取 3 条典型断面, 分析深槽不同位置约 10 年尺度的断面演变特征; 然后, 采用 EOF 方法, 对 3 条断面的时空演变特征进行分析。

在 1972–2011 年间, 金山深槽冲淤变化区域特征明显 (图 2)。深槽主泓 (30 m 等深线包围区域) 以淤积为主; 主泓两侧及深槽向西的延伸区域以冲刷为主。深槽总体演变趋势为: 主体北部边坡在北岸人工护岸的限制下变陡; 南部边坡冲刷并向南延展, 造成深槽南北宽度的增加; 人工岬角西侧的深槽延伸区域, 由于岬角的挑流作用, 原先的主槽部位淤积, 主槽南移拓宽并继续向西延伸。

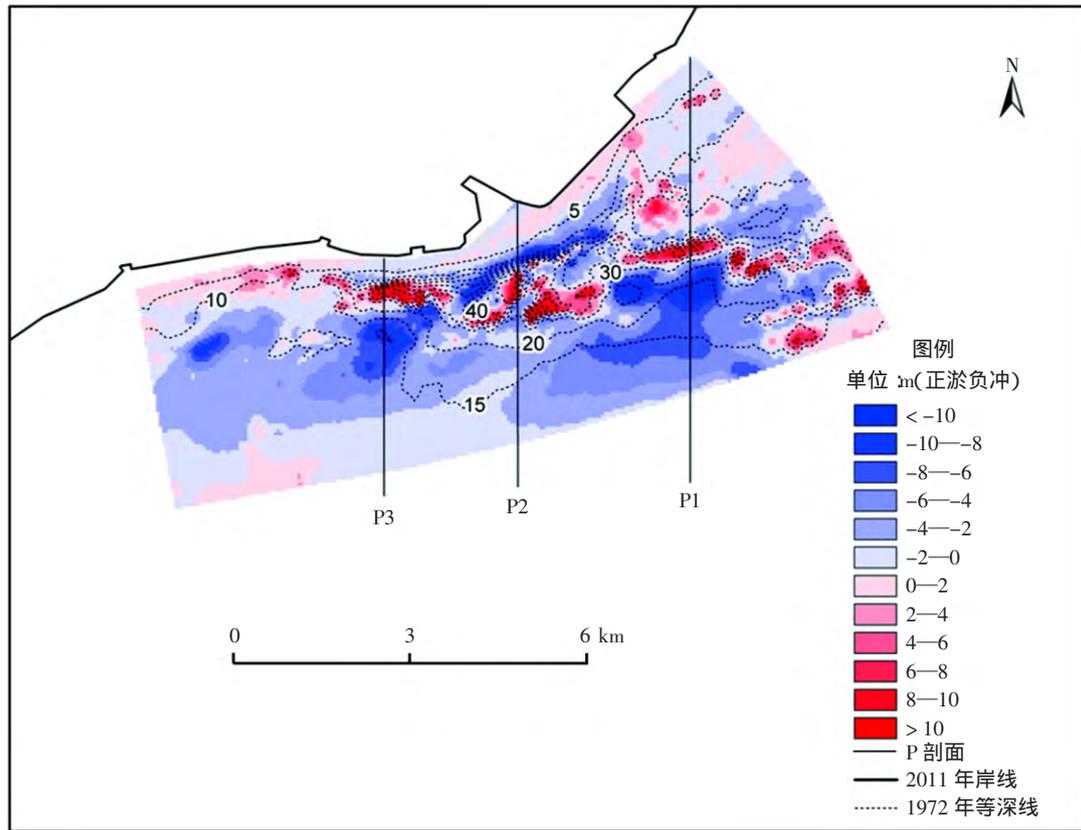


图2 1972-2011 年金山深槽冲淤变化

图3所示，P1断面穿过深槽中部，在1972-2011年间，深槽淤浅，南边坡持续冲刷，北部岸坡及深槽北部边坡相对变化不大。说明中部深槽平面宽度增加，主要为向南的延展，且最深处体现了向南迁移的趋势。P2断面穿过金山深槽西部深潭，该深潭水深较大，北边坡坡度大于南边坡。深潭区主要变化为水深超过25m区域的冲淤波动，幅度超过5m；南、北边坡侵蚀，幅度相对不大。P3断面穿过深槽西部的延伸方向前缘，主要变化为贴岸深槽的淤积，幅度超过10m，伴随着南边坡的侵蚀，幅度亦超过10m，说明深槽的向南延展拓宽。

EOF分析结果，取各断面特征值最大的前3个特征函数，其对应的特征值与贡献率列于表1。由表1可知，第一特征函数的贡献率最大，一般在40%~60%；第二特征函数贡献率降低为10%~25%；第三特征函数贡献率较小，一般低于20%。各断面前3个特征函数累计贡献率都在75%以上。因此，断面的冲淤变化可以用前3个特征函数来描述。第一特征函数反映了断面变化的总体趋势，第

表1 断面特征函数特征值与贡献率

剖面号	第一特征函数		第二特征函数		第三特征函数		累计贡献率/%
	特征值	贡献率/%	特征值	贡献率/%	特征值	贡献率/%	
P1	1482.5	59.54	276.9	11.12	200.5	8.06	78.72
P2	1025.8	42.40	557.3	23.04	404.2	16.71	82.15
P3	1221.4	54.33	442.4	19.68	292.2	13.00	87.01

二、三特征函数反映了断面形态的局部变化。

各断面由于所处位置的不同，不同部位的冲淤演变特征各不相同。根据时间特征函数曲线，第一特征函数(EOF1)体现一定的规律性，而第二、三特征函数(EOF2、EOF3)曲线波动频繁，结合空间特征函数曲线，可以有效分析各断面总体变化趋势，同时可以看出断面局部的短期冲淤波动(图4)。

P1断面，第一时间特征函数大致呈单调递减趋势；第一空间特征函数存在两个正峰值，其中较大峰值位于深槽主泓北边坡，小峰值位于岸坡一小深坑处，其他部位均为负值，负值较大处位于深槽主泓南边坡。表明该断面总体演变趋势为深槽北部

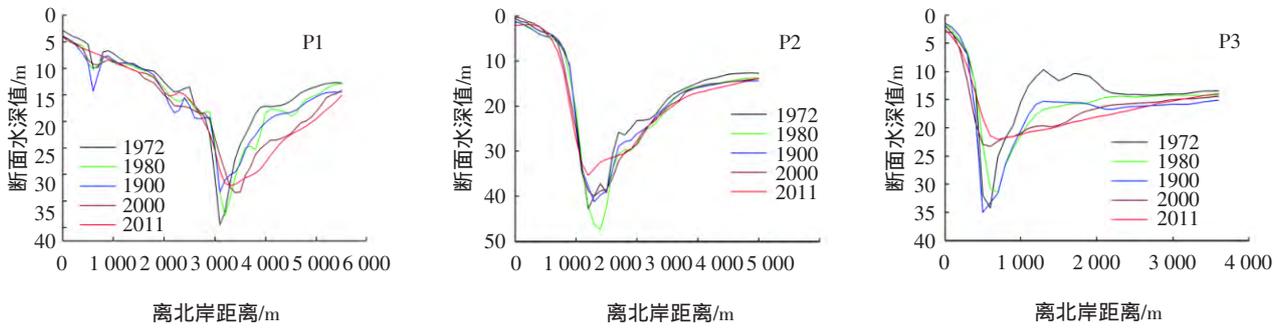


图3 典型断面实测水深对比

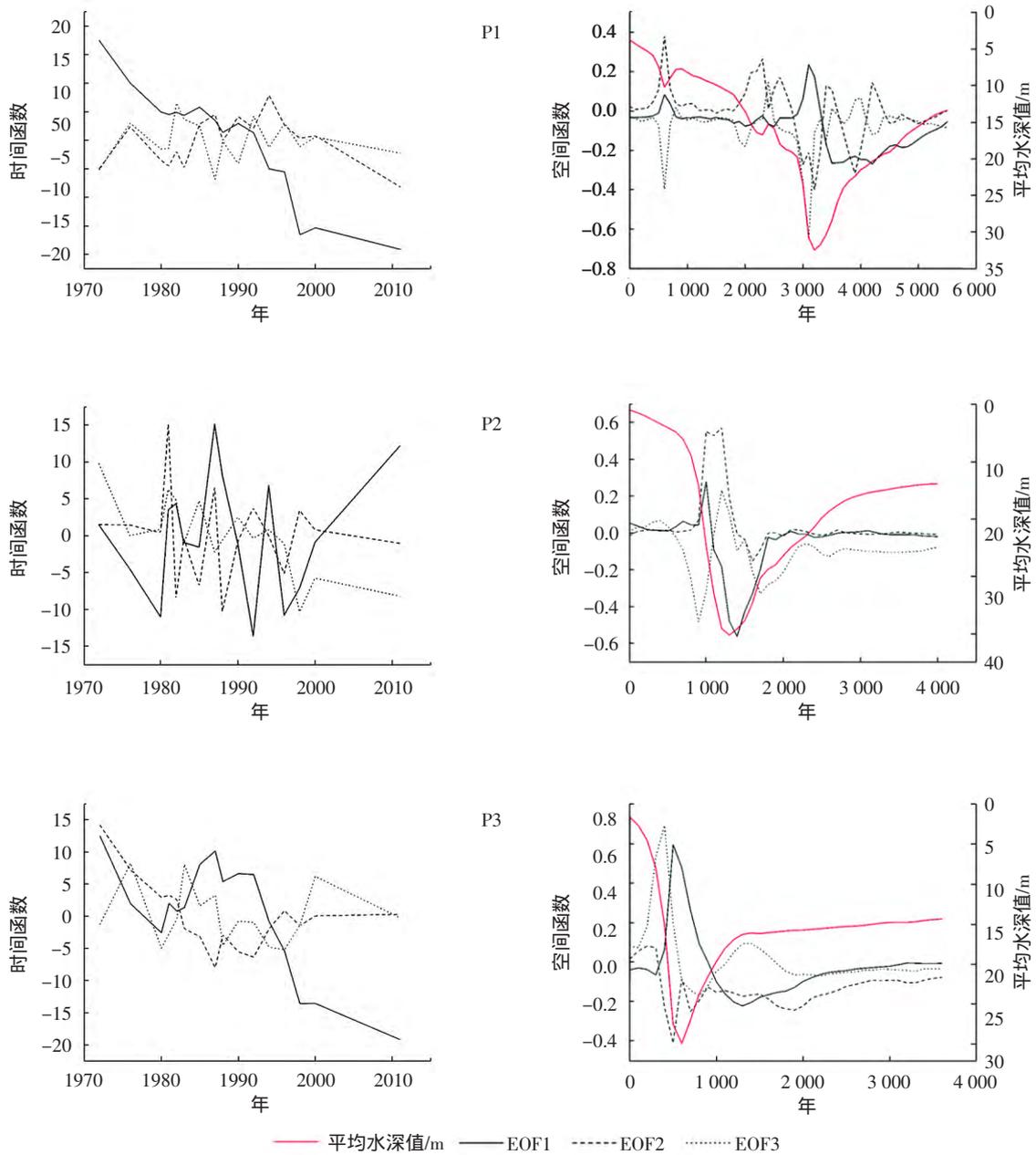


图4 断面前3个特征函数曲线与平均地形曲线图

边坡及岸坡小深坑淤积，而其余部位冲刷，其中深槽南部边坡冲刷明显。第二、三特征函数反映了年际尺度的局部冲淤波动，由于贡献率低，不会对总体演变趋势产生较大影响。因此，该断面反映了深槽中部向南宽度增加，北部边坡向南淤积。

P2 断面，第一时间特征函数呈年际周期的增减波动；第一空间特征函数在水深值为 15~20 m 左右的北边坡存在正值峰，在其南侧直至南边坡水深值 30 m 左右的深槽主体区域存在负值峰，负值峰明显大于正值峰；该断面的其余部位第一空间特征函数值大致为零。表明该断面主要的冲淤变化发生在北边坡 15 m 与南边坡 30 m 之间深槽区域，虽然北边坡上部 (15~20 m) 区域与深槽主体区域之间存在冲刷与淤积相对的特征，但深槽主体区域的冲刷 (淤积) 幅度明显要大于北边坡上部的淤积 (冲刷) 幅度。第二特征函数反映的冲淤变化与第一特征函数相似。

P3 断面，第一时间特征函数在 1972-1980 年间递减，1980-1986 年间递增，1986-2011 年间递减；第一空间特征函数深槽 20 m 以深的区域存在正峰值，其余部位为负值。表明深槽主体总体上以淤积为主 (1980-1986 年间冲刷)，其余部位以冲刷为主。第二时间特征函数在 1972-1986 年间递减，1986-1996 年间波动递增且幅度较小，1996-2011 年间大致为零；第二空间特征函数以负值为主，尤以北边坡为大。第二特征函数反映了深槽以冲刷为主的特征。

综上所述，通过研究区域总体对比、典型断面对比及 EOF 分析，得到金山深槽近期的冲淤演变特征。在 1972-2011 年间，金山深槽覆盖区域扩大，主要体现在南北拓宽及向西的延伸。第一特征函数反映的冲淤变化峰值大致位于 20 m 以深的深槽区域，15~20 m 的深槽南边坡冲淤幅度次之。第二、三特征函数反映的冲淤变化波动频繁，主要区域为 15 m 以下的深槽区域。前 3 个特征函数反映的断面总体演变特征以深槽的向南拓宽为主，但断面所处位置的不同，其冲淤变化亦体现了不同的时空特征。金山深槽中部 (P1 断面) 主要为南扩的演变特征；金山人工岬角南侧 (P2 断面) 主要表现为深潭区域 3-5 年周期的冲淤交替；深槽西部延伸前缘 (P3 断面) 主要演变特征为，人工岬角西侧后方贴岸深槽的淤积以及深槽向南的拓宽，表

明了深槽向西延伸的趋势。

EOF 分析得到的地形变化的主要特征函数可以与主要的动力因素联系起来，如果有相同时间尺度的动力数据，可以探讨地形演变的动力机制或影响因素。本文关注的是地形演变特征及预测。

3.2 金山深槽演变趋势预测

3.2.1 演变趋势预测检验

对研究区域 1972-1998 年间高程场矩阵作 EOF 分解，选取前 3 个时间特征函数，采用三次样条平滑方法，预测 2000 年时间特征函数值 (图 5)。由图可知，曲线的拟合较好，1998-2000 年的预测变化大致延续了 1996-1998 年间的变化趋势。

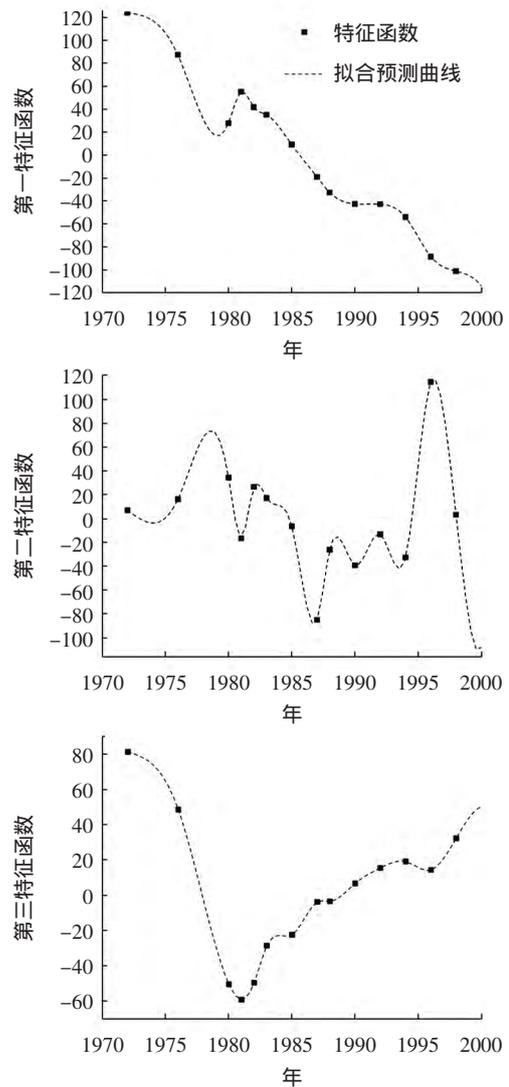


图 5 时间特征函数拟合预测

将前 3 个时间特征函数预测值与对应的空间特征函数相乘，还原 2000 年地形，并与实测地形进

行对比 (图 6)。预测误差总体在 0~2 m, 但随着水深增加, 尤其是在人工岬角外侧及西侧的局部深潭, 预测误差增大。由于还原预测过程选取了前 3 个时间特征函数, 其累计方差贡献率 65%, 同时假定空间特征函数不变, 这种处理方法势必会产生预测误差。此外, 统计方法不涉及深槽的演变机制

或影响因素分析, 只是依据历史数据的规律性来做预测, 如在预测阶段有突发事件的影响, 会对预测结果产生影响; 预测年份选取的不同, 也会对预测误差的大小产生影响。因此, 金山深槽的演变预测, 关注的是深槽总体的演变趋势, 而非具体某一位置的地形水深值变化。

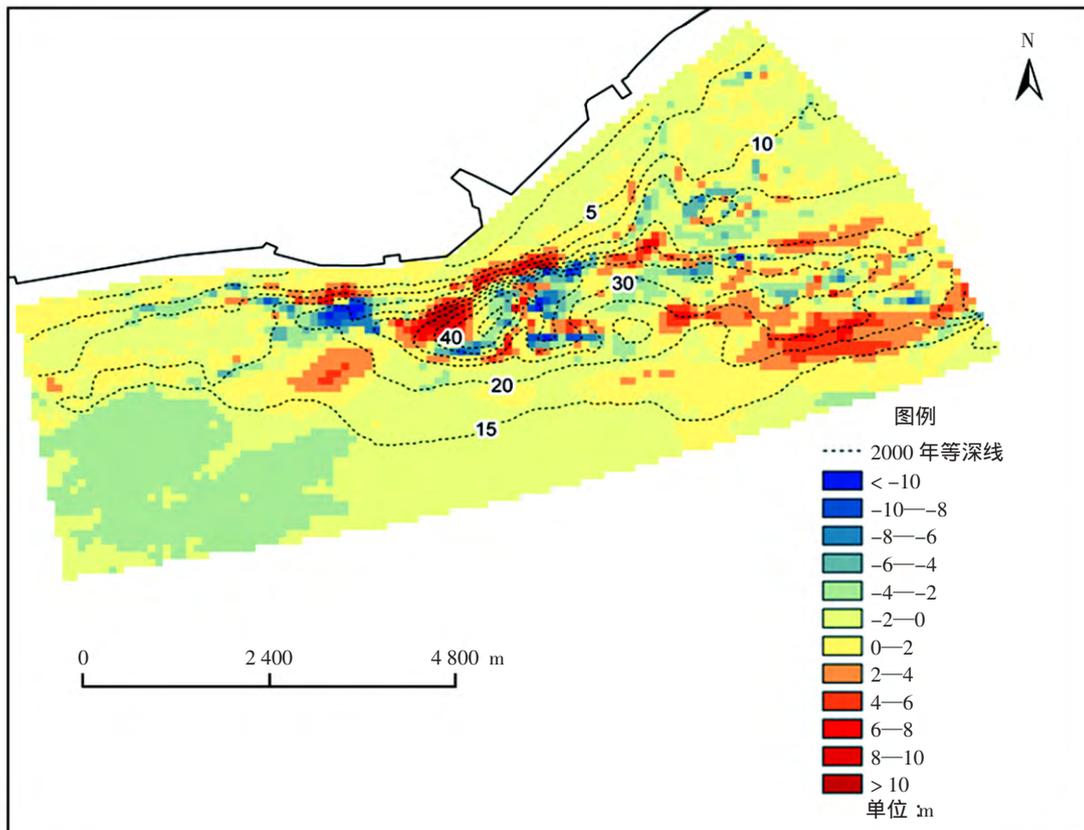


图 6 2000 年金山深槽实测水深与预测水深对比 (正值代表预测水深值小于实测水深值, 负值反之)

3.2.2 演变趋势预测

对 1972–2011 年间的地形水深矩阵做 EOF 分解, 并预测 2011–2020 年间金山深槽的演变趋势。选取各典型断面前 3 个时间特征函数, 经三次样条平滑拟合后, 第一时间特征函数表现出金山深槽的趋势性变动, 第二时间特征函数表现出年际波动, 第三时间特征函数表现出年际波动 (图 7)。相邻地形数据的时间间隔大致为 2–4 年, 反映了多年尺度的冲淤变化规律, 其中, 最长时间间隔为 11 年 (2000–2011 年), 且预测的时间段 (2011–2020 年) 恰随其后。因此, 从时间特征函数选取的典型性与预测的时间跨度来说, 预测深槽总体演变趋势

是可信的。

深槽在 2011–2020 年的演变趋势如图 8 所示。研究区域 20 m 等深线以浅区域有冲有淤, 冲刷区域分布在东部和北部, 而淤积区域位于西南部, 冲淤幅度不大, 为 0~2 m。20 m 等深线以深的区域, 在 P1 断面以东以冲刷为主; P1 断面以西冲淤幅度较大的区域位于人工岬角周围, 即 P2 断面代表的西部深潭及 P3 断面所处的深槽延伸前缘。西部深潭的冲刷, 一方面可能是周期性冲淤波动的延续, 另一方面由于人工岬角的挑流作用, 深潭是涨潮流能量的汇聚处, 造成此处的大幅度冲刷; 深槽延伸前缘岬角西侧的贴岸深槽, 延续了之前的淤积趋势。

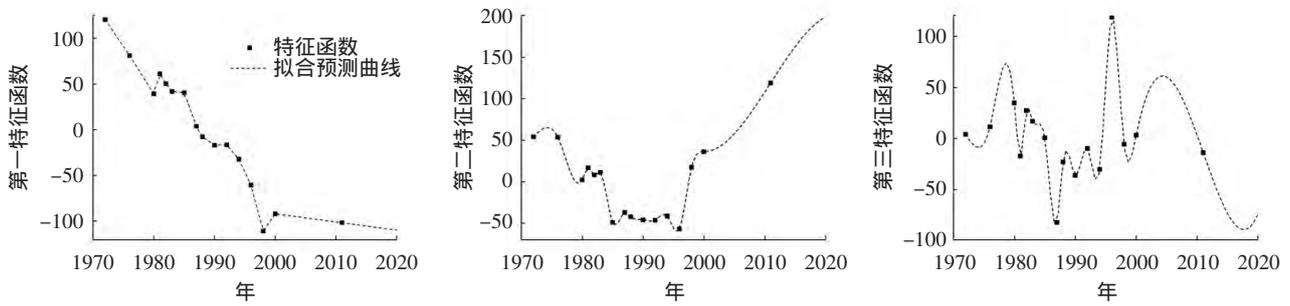


图7 时间特征函数拟合预测

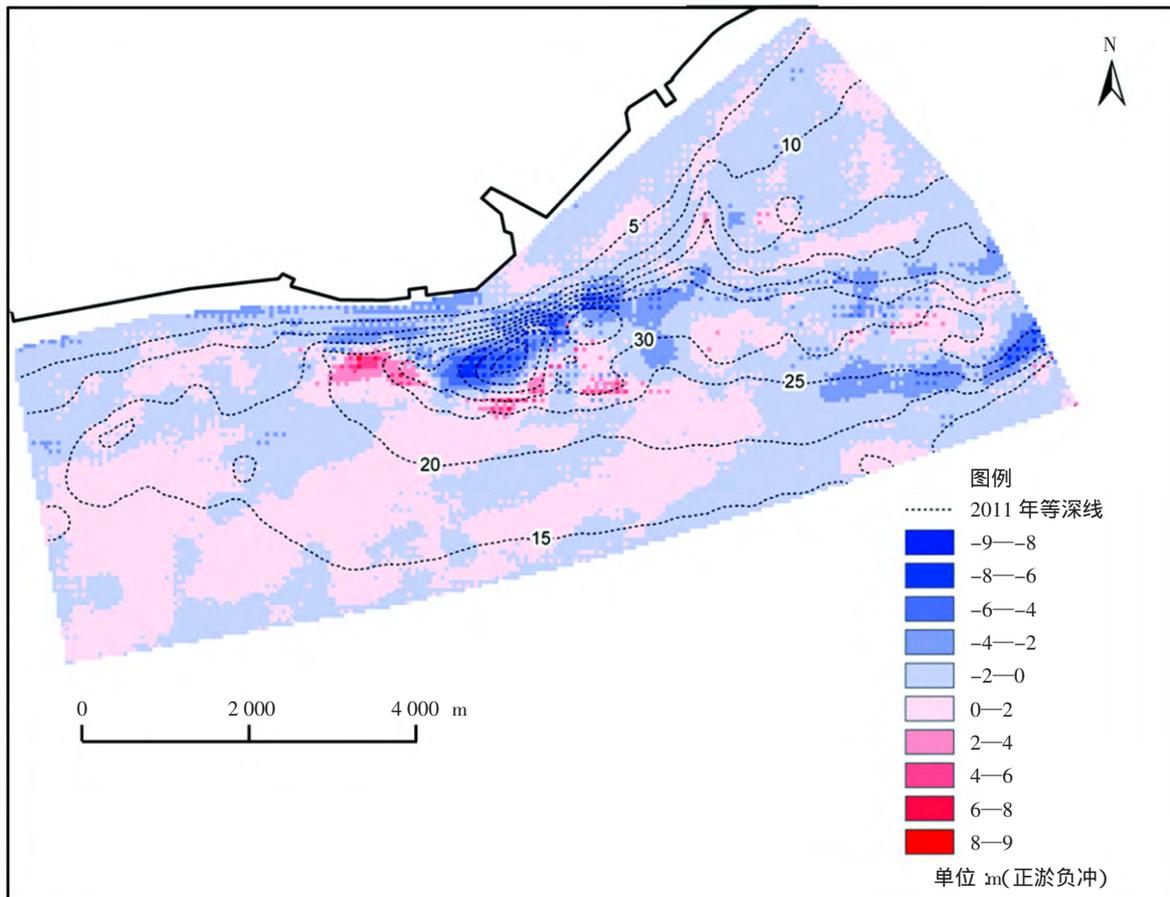


图8 2011年实测形态与2020年预测形态对比

4 结论

在 1972-2011 年间，金山深槽总体演变特征为覆盖区域明显扩大，体现在南北宽度的增加及向西的延伸。EOF 分析结果，第一特征函数反映的冲淤变化峰值大致位于水深值 20 m 以深的深槽区域，15~20 m 的深槽南边坡冲淤幅度次之。第二、三特征函数反映的冲淤变化波动频繁，主要区域为水深 15 m 以下的深槽区域。前 3 个特征函数反映

的断面总体演变特征以深槽的向南拓宽为主，而 15 m 向岸的岸坡冲淤变化不大。

断面位置不同反映了深槽不同位置的冲淤演变特征。深槽中部主体 (P1 断面)，海岸至 15 m 等深线之间的岸坡稳定，15 m 以深的区域向南拓宽，同时深度变浅。金山人工岬角南侧的深潭区域 (P2 断面)，15 m 以浅的北岸坡及 25 m 以浅的南边坡稳定；15~20 m 的北边坡与深槽主体 (25 m 以深区域) 之间存在相反的冲淤变化，但冲淤幅度相差较大，以深槽主体的冲淤为主；深潭区冲淤波动频

繁, 周期为 3-5 年。深槽西部延伸前缘 (P3 断面), 由于受到人工岬角挑流作用影响, 岬角后方贴岸深槽淤积, 同时深槽主体南移且拓宽增深, 表明了深槽向西延伸的趋势。

采用 EOF 结合三次样条平滑方法, 预测了金山深槽在 2020 年的形态特征, 探讨了金山深槽在 2011-2020 年间的演变趋势。预计金山深槽将延续之前的演变趋势, 中部主体区域拓宽、西部深潭冲淤交替以及深槽继续向西延伸。

致谢: 杨阳、赵旭峰在国家海洋局第二海洋研究所攻读硕士学位期间在水深图数字化方面提供帮助, 谨致谢忱!

参 考 文 献

Blott S J, Pye K, van der Wal D., Neal A, 2006. Long-term morphological change and its causes in the Mersey Estuary, NW England. *Geomorphology*, 81: 185-206.

Dai Z J, Liu J T, Fu G., Xie H L, 2013. A thirteen-year record of bathymetric changes in the North Passage, Changjiang (Yangtze) estuary. *Geomorphology*, 187: 101-107.

Hibma A, Stive M J F, Wang Z B, 2004. Estuarine morphodynamics. *Coastal Engineering*, 51: 765-778.

Jackson J E, 2003. *A User's Guide to Principal Components*. New York: Wiley InterScience.

Karunaratna H, Reeve D, Spivack M, 2008. Long-term morphodynamic evolution of estuaries: An inverse problem. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 77: 385-395.

Prandle D, 2004. How tides and river flows determine estuarine bathymetries. *Progress in Oceanography*, 61: 1-26.

Reeve D E, Horrillo-Caraballo J M, Magar V, 2008. Statistical analysis and forecasts of long-term sandbank evolution at Great Yarmouth, UK. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 79: 387-399.

Townend I, 2005. An examination of empirical stability relationships for UK estuaries. *Journal of Coastal Research*, 21(5): 1042-1053.

Van der Wal D, Pye K, 2003. The use of historical bathymetric charts in a GIS to assess morphological change in estuaries. *The Geographical Journal*, 169(1): 21-31.

Wang Y H, Dong P, Oguchi T, Chen S L, Shen H T, 2013. Long-term (1842-2006) morphological change and equilibrium state of the Changjiang (Yangtze) Estuary, China. *Continental Shelf Research*, 56: 71-81.

Wang Y H, Ridd P V, Wu H L, Wu J X, Shen H T, 2008. Long-term morphodynamic evolution and the equilibrium mechanism of a flood channel in the Yangtze Estuary (China). *Geomorphology*, 99: 130-

138.

Xie D F, Wang Z B, Gao S, et al, 2009. Modeling the tidal channel morphodynamics in a macro-tidal embayment, Hangzhou Bay, China. *Continental Shelf Research*, 29: 1757-1767.

曹沛奎, 董永发, 周月琴, 1989. 杭州湾北部潮流冲刷槽演变分析. *地理学报*, 44 (2): 157-166.

陈吉余, 王宝灿, 虞志英, 等, 1989. 中国海岸发育过程和演变规律. 上海: 上海科学技术出版社.

陈卫跃, 1984. 杭州湾金山卫深槽的形成与演变. 上海: 华东师范大学.

邓海光, 曾小团, 2006. 统计预测方法的试验比较. *贵州气象*, 30 (1): 26-28.

刘阿成, 1992. 杭州湾金山深槽的地貌特征及其控制因素. *海洋通报*, 11 (5): 71-77.

刘毅飞, 夏小明, 贾建军, 2007. 舟山外钓山海岸边坡泥沙动力与冲淤演变特征. *海洋通报*, 26 (6): 53-60.

倪文斐, 汪亚平, 邹欣庆, 等, 2013. 南黄海辐射沙脊群苦水洋海域的沉积动力特征及稳定性研究. *海洋通报*, 32 (6): 668-677.

倪云林, 李伯根, 詹明旭, 2012. 金塘水道冲淤变化分析. *海洋通报*, 31 (2): 146-153.

沈健, 朱慧芳, 1992. 经验正交函数在长江河口南支河段河槽演变分析中的应用. *泥沙研究*, 2: 35-41.

覃爽, 2012. 基于 R 统计软件的三次样条平滑数据拟合及预测. *黑龙江科技信息*, 30: 59.

王金栋, 2005. 基于数值模型和统计模型的黄河三角洲的冲淤时空变化分析及形态发育趋势探讨. 青岛: 中国海洋大学.

王颖, 2012. *中国区域海洋学-海洋地貌学*. 北京: 海洋出版社.

向卫华, 李九发, 徐海根, 等, 2003. 上海市南汇南滩近期演变特征分析. *华东师范大学学报 (自然科学版)*, 3: 49-55.

谢东风, 高抒, 2006. 淤泥质潮流深槽最大冲刷深度的一个概念模型. *海洋学研究*, 24 (3): 11-20.

熊绍隆, 陶圭棱, 卢祥兴, 等, 1994. 杭州湾北岸深槽冲淤变化试验研究. *水利学报*, 10: 69-89.

杨旻, 高抒, 汪亚平, 2008. 杭州湾北部潮流深槽区细颗粒物物质输运与再悬浮过程. *海洋学报*, 30 (2): 92-101.

应铭, 2007. 废弃亚三角洲岸滩泥沙运动与剖面塑造过程-以黄河三角洲北部为例. 上海: 华东师范大学.

余祈文, 符宁平, 1994. 杭州湾北岸深槽形成及演变特性研究. *海洋学报*, 16 (3): 74-85.

袁忠浩, 宋伟建, 1987. 杭州湾金山卫深槽地区地貌发育与演变探讨. *海洋地质与第四纪地质*, 7 (3): 43-55.

赵宝成, 2011. 杭州湾北岸水下岸坡微地貌特征及其海床侵蚀指示意义. *上海国土资源*, 32 (3): 27-34.

中国海湾志编纂委员会, 1992. *《中国海湾志》第五分册*. 北京: 海洋出版社.

(本文编辑 袁泽轶)