

# 1959年来珠江三角洲地区的海平面变化与趋势

何 蕾<sup>1,2</sup>, 李国胜<sup>1</sup>, 李 阔<sup>3</sup>, 崔林林<sup>1,2</sup>, 任惠茹<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;  
3. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081)

**摘要:** 验潮站资料的低空间分辨率与卫星数据的短时序是区域海平面变化研究存在的关键难题。本文结合卫星高度计海平面高度距平资料及验潮站数据, 基于EOF和最小二乘法重建过去53年(1959-2011年)珠江三角洲海平面变化时空序列, 并利用主成分分析方法建立区域统一海平面变化时间序列。结果显示, 基于EOF和最小二乘法的海平面高度场重建方法能很好地解决卫星高度计资料时间序列不长和验潮站分布稀疏时间不连续等问题, 对于海平面变化研究, 尤其是关于过去长期的变化过程及特征研究适用性良好。对统一海平面变化时间序列线性拟合显示, 近53年珠江三角洲区域海平面平均变化速率为4.08 mm/yr, 且存在近期加速上升趋势。与单站研究相比, 该方法较好地表达了区域海平面主要变化特征并剔除可能存在的噪音。径流及厄尔尼诺现象也对珠江三角洲海平面空间变化产生影响。

**关键词:** 海平面变化; 珠江三角洲; 趋势

DOI: 10.11821/dlyj201405016

## 1 引言

海平面变化是地球响应气候变化的重要参数之一<sup>[1]</sup>, 研究表明, 由于同时受大气圈、水圈、岩石圈以及人类活动等多要素的综合作用, 海平面变化过程具有鲜明的区域特征, 在空间上表现出显著的高程不均一性, 变化幅度及速率具有全球非一致性<sup>[2]</sup>。海平面变化研究的历史很长, 以往用于研究的数据资料大多来自沿岸验潮站观测。虽然长时间序列的验潮数据是区域海平面变化研究的重要支持手段<sup>[3-5]</sup>, 但由于各验潮站资料时间序列长短不一、空间分辨率低<sup>[6]</sup>, 单个(或数个)验潮站点的验潮数据能够代表多大范围的海平面变化特征(幅度及速率)不得而知。卫星高度计可获取时空同步且分辨率较高的区域海平面实时变化状况<sup>[7-10]</sup>, 但数据时间较短, 最长记录的海平面卫星测高数据Topex/Poseidon自1992年至今仅21年<sup>[11]</sup>, 无法反映海平面长期变化特征。因此, 结合验潮站资料与卫星遥感测高数据建立高时空分辨率的海平面变化资料, 是国际海平面变化研究面临的重要基础理论问题<sup>[12,13]</sup>。近10年来国内外研究者就此方向进行了不断尝试并取得了一定进展<sup>[14-18]</sup>, 但受限于验潮站空间表征范围不明确等因素, 仍存在如全球及区域尺度转换、各潮站权重确定等许多问题, 重建精度有待进一步提高。

珠江三角洲是世界上水系最复杂的三角洲之一<sup>[19]</sup>, 区域内海平面变化在外海海平面、径流、潮汐及地形地貌等多因素共同影响下表现出相当的复杂性和不确定性<sup>[20,21]</sup>, 国

收稿日期: 2013-07-23; 修订日期: 2013-12-03

基金项目: 国家重点基础研究发展计划“973”项目(2012CB95570002)

作者简介: 何蕾(1986-), 女, 江西南昌人, 博士研究生, 主要研究方向为海岸带变化。E-mail: hlei1986@163.com

通讯作者: 李国胜(1963-), 男, 江苏常州人, 研究员, 博士生导师。主要研究方向为海岸带及海岸海洋环境遥感、海岸带全球变化影响、海岸海洋数值模式等。E-mail: ligs@igsnr.ac.cn

内外已开展大量研究并取得一定成果<sup>[22-26]</sup>。然而因采用的资料类型、测算方法及研究尺度等不同, 研究所得结果也不尽一致, 关于珠江三角洲海平面变化尚无统一论<sup>[8,27-29]</sup>。珠江三角洲海平面变化研究的难点在于验潮站空间分布不均, 时间序列缺失、不连续<sup>[27]</sup>, 而可利用的卫星高度计资料时间较短。过去的研究大多单一利用验潮站数据或者卫星高度计资料, 或基于二者进行比较分析, 将两类数据耦合建立长时间序列、高空间分辨率的海平面高度场研究尚属少见。本文根据 He 等<sup>[30]</sup>提出的海平面高度场重建方法, 将验潮站数据和卫星高度计资料结合建立珠江三角洲近 53 年的区域统一海平面高度距平序列 (Consistent Regional Sea Level Anomalies, CRSLA), 在此基础上估算珠江三角洲区域海平面变化速率, 并与前人在该区域的相关研究分析比较, 一方面探究海平面高度场重建方法的适用性, 一方面揭示珠江三角洲近 53 年海平面变化特征, 以期为珠江三角洲乃至其他地区区域海平面变化研究及管理提供参考<sup>[31]</sup>。

## 2 数据和方法

### 2.1 研究区域和站点

珠江三角洲位于广东省中南部, 南临南海, 东、西、北三面环山。东、西部山区与珠江三角洲平原地区地面沉降变化差异较大, 结合海平面变化资料的可获取性, 选取 20°-25°N, 110°-118°E 作为研究区。本文收集区内 17 个验潮站的月均潮位资料和分辨率为 1/3°×1/3°的经纬网格卫星高度计资料。时间序列最长 (53 年) 的闸坡站资料来自国际海平面永久服务处 (Permanent Service of Mean Sea Level, PSMSL), 其余 16 个站点资料由珠江水利委员会提供。因建站时间不同及历史变迁等缘由, 各站点资料时间序列长短不一, 相关时序如表 1 所示, 验潮站位置分布见图 1。所有验潮站数据均已统一换算至以 1985 年国家高程为基准。

表 1 珠江三角洲验潮站资料统计

Tab. 1 Statistics of tide gauge data in the Pearl River Delta

序号	站名	纬度	经度	资料年限	资料长度 (年)	变化速率 (mm/yr)
1	黄埔	23°06'N	113°28'E	1959-1988 2006-2011	36	1.92
2	南沙	22°44'N	113°34'E	1963-1988 2001-2005 2007-2011	36	2.28
3	横门	22°35'N	113°31'E	1959-1988 2001-2005 2007-2011	40	1.20
4	西炮台	22°13'N	113°18'E	1959-1965 1974-1988	32	1.92
5	灯笼山	22°14'N	113°24'E	1961-1988 2001-2005 2007-2011	38	0.17
6	万顷沙西	22°39'N	113°33'E	1961-1988 2001-2005 2007-2011	38	1.20
7	黄金	22°08'N	113°17'E	1965-1988 2001-2005 2007-2011	34	3.48
8	黄冲	22°18'N	113°04'E	1961-1988	28	1.92
9	大横琴	22°05'N	113°29'E	1979-1988 2001-2005 2007-2011	20	5.58
10	妈屿	23°20'N	116°45'E	1966-1988 2006-2011	29	-0.24
11	北津港	21°48'N	112°01'E	1965-1988 2006-2011	30	3.60
12	赤湾	22°28'N	113°53'E	1966-1988 2006-2011	29	3.84
13	港口	22°34'N	114°54'E	1974-1987 2006-2011	19	1.12
14	南渡	20°52'N	110°10'E	1964-1987 2006-2011	29	-0.36
15	海门	23°12'N	116°37'E	1965-1987 2006-2011	28	0.68
16	三灶	22°02'N	113°24'E	1967-1986 2001-2005 2007-2011	31	2.46
17	闸坡	21°35'N	111°50'E	1959-2011	53	2.03



映区域海平面的变化情况。

珠江三角洲区域内的验潮站受区域内水文条件、地形等因素的影响而表现出不同的区域特性<sup>[28]</sup>。形成受径流影响为主的河口型验潮站, 以及受海洋影响为主的沿海型验潮站两种类型<sup>[32]</sup>, 本文据此通过径流影响分析对区内验潮站进行了类型划分(表2中编号1-9为河口型验潮站, 编号10-17为海洋型验潮站)。由表2可以看出, 同类型站点间的相关系数明显高于不同类型站点间的相关系数, 即因受径流影响, 珠江三角洲海平面呈现两种变化特征。为减小地形、水文等区域要素的影响, 验潮站通常应选在开阔外海, 上游无较大河流汇入处, 然而往往因地形条件等制约, 验潮站选址条件难以完全满足, 绝对不受区域因素干扰的验潮站非常稀缺。因此, 为尽可能多地利用站点资料以全面覆盖研究区, 将潮位数据中地形和水文条件的影响剔除, 还原各站点记录的海平面变化的真实情况非常必要。本文首先对验潮站数据进行区域影响校正, 依据各验潮站水位变化特征建立径流与潮站数据的回归关系, 剔除水位变化中径流的影响。然后为消除由验潮站点地理位置、海拔高度不同等问题引起的海平面观测数值差异, 采用各验潮站点的海平面高度距平资料(Sea Level Anomaly, SLA), 即各站点均减去多年平均值(本文所指海平面变化或海平面高度均指相对变化值, 而非绝对高程值)。因篇幅有限, 有关径流影响问题将另文阐明, 在此不再详述。

### 2.3 区域统一海平面高度距平序列 CRSLA 重建

珠江三角洲区域统一海平面高度场重建包括海平面高度时空变化数据集 RSLA(Regional Sea level Anomalies)建立及区域统一海平面高度距平序列 CRSLA 表达两个步骤<sup>[30]</sup>。

第一步, 以具有空间同步性的卫星高度计资料和具有时间延展性的多站点验潮站资料为基础, 采用经验正交函数(EOF)方法<sup>[33]</sup>, 将1993-2011年的卫星高度计海平面高度距平资料分解成相互独立的空间向量(也作空间模态, EOFs)和其对应的幅值系数的时间序列(其中空间向量刻画珠江三角洲海平面多年变化的主要特征)。通过将卫星高度计资料分解所得空间向量与基于最小二乘法求得的某时刻具空间对应关系的验潮站资料所决定的时间序列相乘, 逐月重建各时刻卫星格网点的SLA, 直至完成1959-2011年所有格网点SLA重建, 从而建立起空间上同步、时间上连续的多年海平面时空变化数据集RSLA。

第二步, 在上述基础上, 采用主成分分析方法<sup>[34]</sup>, 对多年海平面时空变化数据集RSLA进行空间关系重构, 建立具有区域统一(空间一致)性质的海平面高度场时间变化序列CRSLA。

### 2.4 重建方法验证

珠江三角洲区域统一海平面高度场重建方法的重点在于确定各个时刻在空间对应下验潮站资料与卫星高度计资料的关系, 即求解重建序列中各时刻的时间系数, 对此采用最小二乘法优化实现, 即在每一次重建过程中, 所有重建后格网点的海平面高度距平与其对应的验潮站的海平面高度距平误差之和最小。

因此, 重建过程采用平均误差(Mean Error, ME)、均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)以及确定性系数(Coefficient of Determination,  $R^2$ )验证海平面时空变化数据集建立方法的精度<sup>[15]</sup>。

## 3 结果与讨论

### 3.1 EOF分解

对珠江三角洲区域1993-2011年卫星高度计资料进行EOF分解, 生成的主要空间向

量和对应的时间序列如下图2所示。由于重建选用的空间向量的数量直接影响到重建精度, EOFs 过少会导致海平面变化空间特征的不完全表达, EOFs 过多则会产生过量噪音干扰海平面变化的有效信息, 对此 Calafat 等人<sup>[15]</sup>研究认为选取3-4个 EOF 时重建精度最佳。结合本研究 EOF 分解效果: 分解的收敛速度较快, 前3个特征模向量的累积方差贡献率达到原始场的90%, 能够很好地表现区域海平面变化的主要特征, 本文选取前3个经验模态进行珠江三角洲海平面高度场重建。其中, 第一模态 EOF1 (图2a) 占79.9%, 且值全为正, 说明单一方向的一致性变化(上升或下降)为该区域海平面变化的主要特征。第一模态也显示海平面距海岸由远及近呈带状变化, 与陈晓宏等<sup>[35]</sup>关于珠江水位空间变异性研究一致。通过分析 EOF1 对应的幅值系数(图2d)得出1993-2011年该区域海平面主要呈上升变化趋势, 应用线性回归拟合其上升速率约为4.5 mm/yr, 与荣增瑞等<sup>[36]</sup>估算的南海海平面1993-2002年上升速率( $4.8 \pm 1.2$  mm/yr)相近。第二模态 EOF2 (图2b) 显示东北方向与西南方向有两个极值中心, 均为正, 而珠江口门为负, 表明大陆沿岸东北方向和西南方向与口门海平面变化相位不同。EOF2 主要代表径流入海及河口壅水等季节性影响要素对海平面变化的影响, 即东北与西南两方向海平面几乎不受径流等影响, 而河口海平面高度受径流及壅水影响变化较剧烈。第三模态 EOF3 (图2c) 反映的是珠江三角洲海平面变化对厄尔尼诺事件的响应<sup>[37]</sup>, 从对应的幅值系数时间序列(图2f)可清晰看出, 在1997-1998年厄尔尼诺事件期间, 海平面高度变化受其影响有明显异常波动。3个模态均反映海平面变化自大陆近岸向开阔海域呈现带状变化特征。

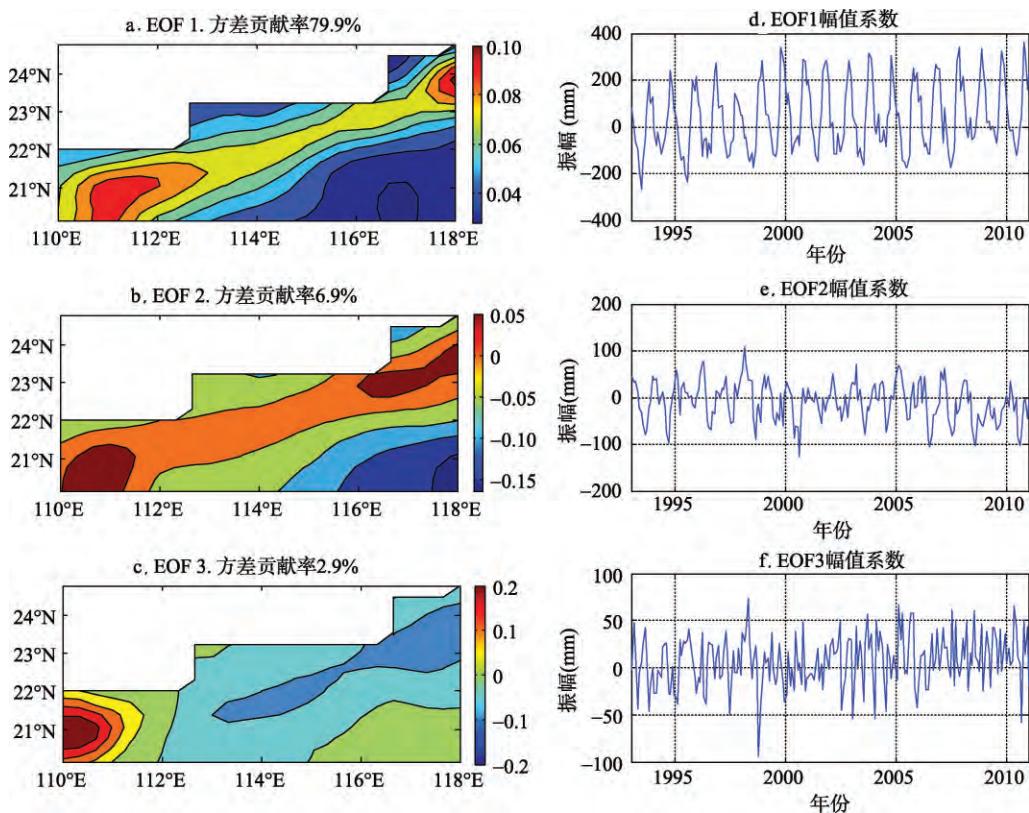


图2 卫星高度计资料 EOF 分解第一、二、三模态及相应时间序列

Fig. 2 The first three EOFs of satellite altimetry data and the corresponding time series

### 3.2 CRSLA 重建

根据 EOF 分解和最小二乘法, 重建珠江三角洲全部卫星格网点 1959-2011 年逐月海平面高度距平场 RSLA。图 3 为 1993 年 1 月-2011 年 12 月重建 RSLA 与卫星高度计资料的海平面平均高度示意图。

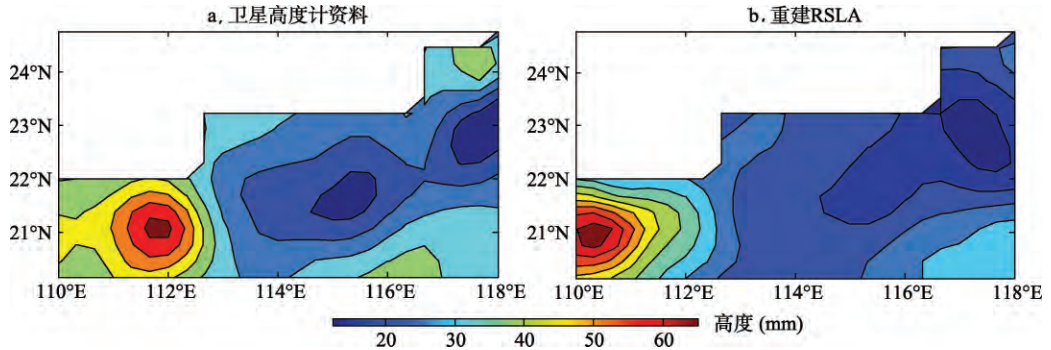


图3 1993-2011年重建RSLA与卫星高度计资料的平均高度场示意图

Fig.3 Comparison of SLA between reconstruction and satellite altimetry data during 1993-2011

为明确描述珠江三角洲海平面变化情况, 采用主成分分析方法进行数据降维, 以格网点的线性组合方式表达区域海平面高度时间变化过程。主成分分析结果如表 3 所示。前 3 个主成分累积方差贡献率已达 99.99%, 说明用前 3 个主成分已能高度表达原重建资料的信息。对 3 个主成分加权平均, 得到珠江三角洲区域海平面变化序列 CRSLA 如图 4 所示。

表 3 重建海平面高度数据的主成分分析

Tab.3 Results of PCA of RSLA

主成分	特征值	方差贡献率(%)	累积方差贡献率(%)
1	165.289	62.609	62.609
2	75.2	27.462	90.071
3	26.211	9.929	99.99
4	1.20E-13	4.55E-14	99.99

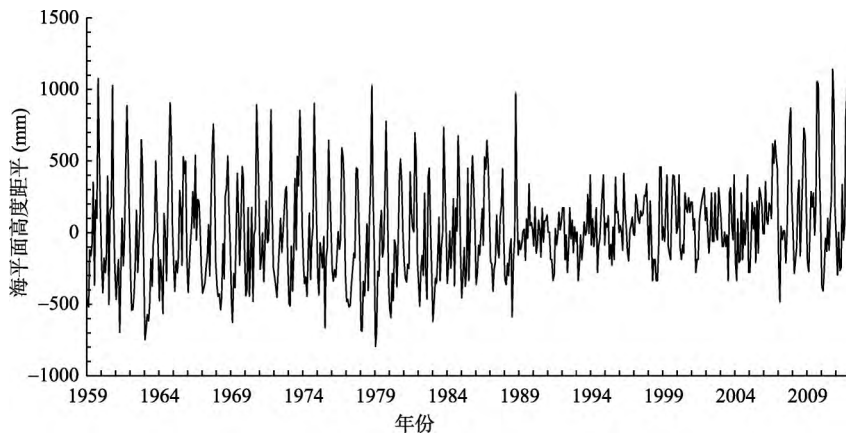


图4 主成分分析法重建的珠江三角洲 CRSLA

Fig. 4 CRSLA reconstructed by PCA of the Pearl River Delta

### 3.3 RSLA 重建方法验证

为检验 RLSA 重建方法的精度, 选取若干卫星格网点的重建值与距其最近的验潮站观测值进行对比验证。经统计共 11 个格网点分别与闸坡、南渡等站对应, 分别统计其平均误差、均方根误差及决定系数, 结果如下表 4 所示。各格网点的重建平均误差较低, 均在 0.002 m 左右, 其中误差最大为三灶与大横琴站, 约 0.0033 m, 平均误差最小为黄冲站, 仅为 0.0008 m, 重建精度较高。从重建数据的均方根误差来看, 各组数据间均方根误差波动较大, 误差最大为港口站约 0.0573 m, 误差最小为南渡站为 0.0159 m。对比 Cheng 等<sup>[18]</sup>应用多参数回归方法结合验潮数据与卫星测高数据重建海平面高度, 最小误差为 0.0499 m, 本文具有较高重建精度。11 组重建数据的决定系数  $R^2$  较高, 均在 0.75 以上, 南渡站高达 0.9924。从整体上看, 所有重建的 4116 个月序列资料, 平均误差和均方根误差均较小, 平均误差为 0.0003 m, 均方根误差为 0.0423 m, 同时  $R^2$  较高为 0.8781, 三项指标均说明利用 EOF 分解和最小二乘法重建 RSLA 精度较高, 重建方法效果较好。图 5 为闸坡站资料与距其最近的格网点的重建序列对比, 从图中可直观地看出, 重建值与验潮站实测值高度吻合, 重建资料真实可信。

表 4 RSLA 误差统计表

Tab. 4 Error statistics of reconstructed RSLA

卫星格网点编号	验潮站点	时序长度 (月)	平均误差 (ME)	均方根误差 (RMSE)	决定系数 ( $R^2$ )
1	闸坡	636	0.0031	0.0279	0.9470
2	南渡	360	-0.0016	0.0159	0.9924
3	黄埔	384	-0.0019	0.0312	0.9291
4	海门/妈屿	360	-0.0022	0.0489	0.8373
5	港口	240	-0.0015	0.0573	0.7581
6	赤湾	348	-0.0021	0.0433	0.8477
7	北津港	360	-0.0015	0.0562	0.7968
8	黄冲	300	0.0008	0.0225	0.7604
9	万顷沙西/横门/南沙	384	-0.0019	0.0291	0.9306
10	灯笼山/西炮台	384	-0.0021	0.0358	0.9140
11	三灶/大横琴/黄金	360	0.0033	0.0527	0.7970
总		4116	0.0003	0.0423	0.8781

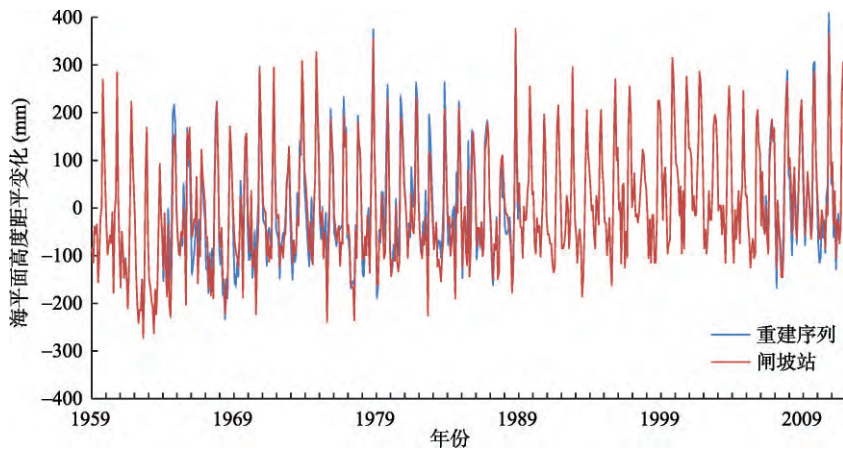


图 5 重建序列与闸坡站验潮记录 1959-2011 年月均海平面高度距平对比

Fig.5 Comparison of SLA between Zhapo station and the nearest reconstruction over 1959-2011

从表 4 中还可看出, 虽然用于重建的样本数不相同, 序列最长的闸坡站样本最多为 636 个, 港口站样本最小仅 240 个, 其余 9 组样本数均在 300 个左右, 但重建样本数量的差异并没有对重建精度产生十分显著的影响。样本数最大的闸坡站三项评价指标平均误差、均方根误差和决定系数的表现在所有站点中处于普通水平, 而重建精度最高的南渡站 ( $ME=-0.0016$  m,  $RMSE=0.0159$  m) 样本点个数为 360 个, 处于中等水平。由此可知, 重建精度与已有验潮站资料的时间序列长度并无直接相关。说明该重建方法对于原始验潮站资料要求不高, 对于缺测站点以及短时间序列的站点亦能适用。

### 3.4 珠江三角洲海平面变化分析

区域海平面变化受不同空间尺度 (如冰川融化等全球尺度以及地面沉降、径流等区域尺度) 要素影响, 表现出显著的时空差异性。对于相同研究区, 采用不同研究方法, 以单个或多个验潮站、或卫星资料等为数据来源, 所得海平面变化结果均不相同 (表 5)。充分考虑区域特征, 建立一套合理适用的方法对于准确刻画区域海平面变化非常必要。本文依据 EOF 及主成分分析方法重建 CRSLA, 对其年均序列线性拟合得出珠江三角洲近 53 年海平面呈上升趋势 (图 6a), 区域上升速率为  $3.72$  mm/yr。杨清书等研究认为 1959-1988 年珠江三角洲区域平均海平面上升速度为  $3.1$  mm/yr<sup>[38]</sup>, 与本文研究结果相近。IPCC 第四次报告指出, 1961-2003 年全球平均海平面上升速率为  $1.8\pm 0.5$  mm/yr, 其中 1993-2003 年速率为  $3.1\pm 0.7$  mm/yr<sup>[39]</sup>。同一时期中国平均海平面变化趋势与全球大体同步, 《第二次气候变化国家评估报告》显示最近 30 年 (1977-2008 年) 中国沿海海平面平均上升速率为  $2.6$  mm/yr, 广东沿海约为  $1.8$  mm/yr<sup>[40]</sup>。《2010 年中国海平面公报》认为 1981-2010 年广东沿海海平面以  $2.5$  mm/yr 速率上升<sup>[41]</sup>。《中国海平面公报》等研究结果低于本文估测值主要是由于前者以闸坡站单站为标准确定珠江三角洲或广东沿海海平面变化, 与本文所指区域海平面变化有所区别。考虑到海平面变化的长期趋势, 其冰期均衡调整 (GIA) 不容忽视, 根据冰期均衡调整模型 ICE5-G(VM2)<sup>[42]</sup>, 珠江三角洲地区的 GIA 校正为  $-0.36$  mm/yr, 因此, 确定 1959-2011 年该区域的海平面上升速率为  $4.08$  mm/yr。

进一步对 CRSLA 及闸坡站资料的年均序列进行线性拟合比较分析, 可以看出 CRSLA 表征的区域海平面 1959-2011 年上升速率 ( $3.72$  mm/yr) 高于闸坡站附近海平面上升速率 ( $2.03$  mm/yr, 图 6c)。本文表 1 亦显示, 研究区内各验潮站测得的海平面变化速率并不一致, 相距不足 10 km 的两站点 (如南沙站与万顷沙西站) 分别测得的海平面变化速率差异也相当明显, 区域海平面空间变化呈现不均一性。因此仅用某一站点观测结果

表 5 不同研究测得珠江三角洲海平面变化趋势

Tab. 5 Trends of sea level change in the PRD measured by different studies

序号	资料类型	研究尺度	时序	速率 (mm/yr)
1	潮站资料	香港区域	1954-1999	1.9 <sup>[43]</sup>
2	潮站资料	亚洲东部	1959-2011	2.2 <sup>[44]</sup>
3	潮站资料	珠江三角洲	1925-1996	1.8 <sup>[45]</sup>
4	潮站资料	中国沿海	1959-1989	0.7-3.3 <sup>[46]</sup>
5	卫星测高	中国南海	1993-2000	11.3 <sup>[47]</sup>
			2001-2005	-11.8
6	卫星测高	中国南海	1993-2009	5.5 <sup>[48]</sup>
7	卫星测高	中国南海	1993-1999	10.0 <sup>[49]</sup>
8	模型模拟	中国沿海	2000-2050	4.0-6.0 <sup>[50]</sup>
9	模型模拟	太平洋	1993-2009	3.0 <sup>[51]</sup>
10	模型模拟	全球	2000-2050	1.5-3.0 <sup>[52]</sup>



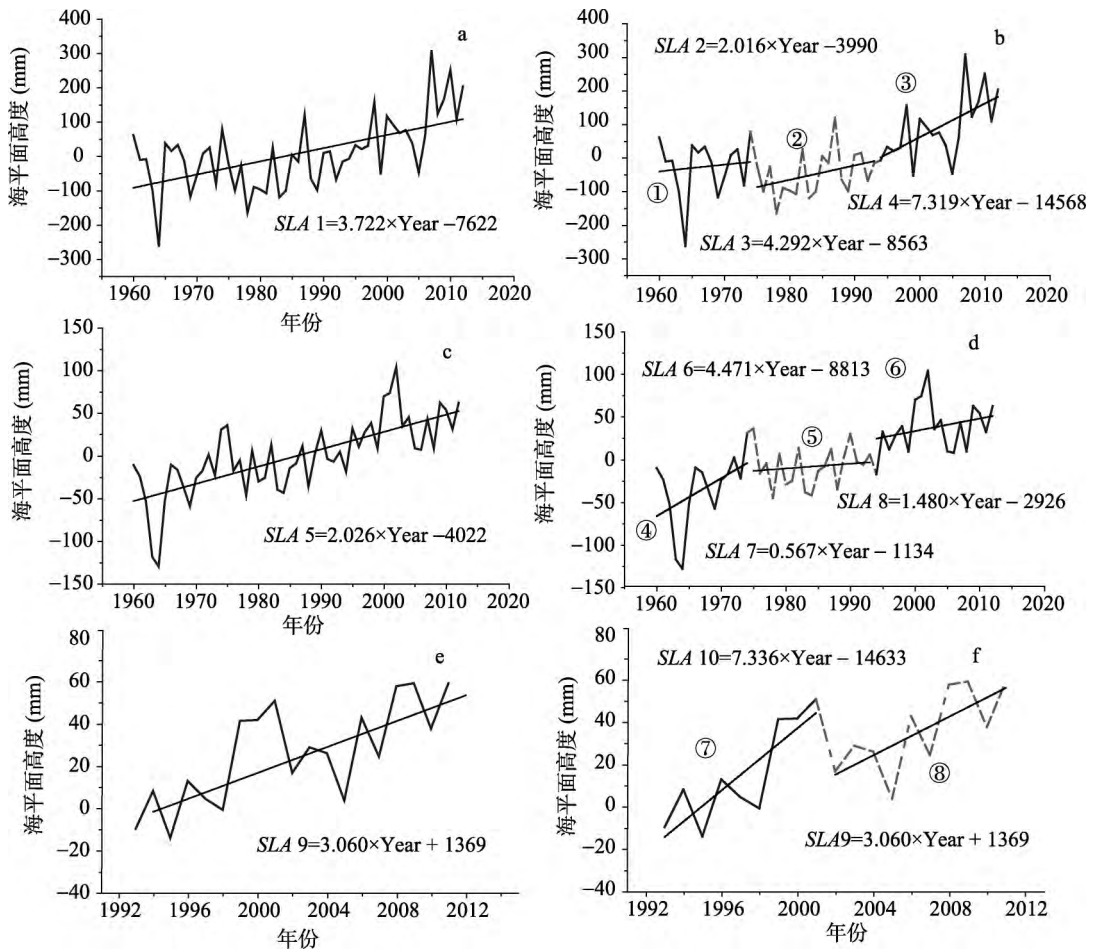


图6 CRSLA、闸坡站序列及卫星资料不同时段海平面变化示意图 (图a、c、e表示CRSLA、闸坡站、卫星资料长期趋势, 图b、d、f表示CRSLA、闸坡站、卫星资料阶段变化)

Fig.6 Comparison of sea level changes in different stages from CRSLA (a, b), Zhapo station (c, d) and satellite altimetry data (e, f)

代表区域海平面变化可能存在较大不确定性。同时, 与表1中各站点观测结果对比也显示, 珠江三角洲区域海平面上升速率高于大多数站点观测值, 其中与赤湾站观测结果(3.84 mm/yr)较一致。赤湾站位于开放海域的孤岛上, 远离大陆, 受沿岸径流等区域要素影响较小, 能相对准确地反映海平面真实变化。CRSLA测得海平面变化速率与赤湾站观测结果一致, 说明本文重建方法可行, 估测结果真实可信。CRSLA结合了卫星资料的高空间分辨率及验潮站资料的长时间序列等优点, 能较完整地表达区域海平面变化特征, 更适用于区域海平面长期变化趋势研究。

根据CRSLA、闸坡站序列及卫星资料分时段对珠江三角洲近53年不同时期海平面变化进行比较分析, 三种类型数据在不同时期显示了海平面的不同变化特征。其中CRSLA序列显示近53年区域海平面经历了一个加速上升过程(图6b), 与前人研究结果较一致<sup>[53,54]</sup>, 上升速率由1959-1973年的2.02 mm/yr增加到1974-1992年的4.29 mm/yr, 1993-2011年上升速率增至7.32 mm/yr。闸坡站序列显示附近海平面呈现波动上升变化(图6d), 1959-1973年上升速率最大, 达到4.47 mm/yr, 1974-1992年减速至0.57 mm/yr,

1993-2011 年上升速率增加到 1.58 mm/yr。由此可知, 闸坡站附近海平面与珠江三角洲区域海平面变化过程存在显著差异, 仅用单站观测结果评价区域海平面变化存在一定局限性。图 6 还显示, CRSLA 及闸坡站序列均在 1966 年出现近 53 年的最低值, 且远远低于常年平均水平, 该年珠江流域经历了 50 年一遇的大旱灾, 流域年雨量较常年偏小 20% 左右<sup>[54]</sup>, 因此, 有理由认为水文等地理要素对区域范围海平面变化产生重要影响。卫星资料由于时间序列较短, 无法用于研究区域海平面长期变化过程。对卫星资料线性拟合显示区域海平面 1993-2011 年上升速率为 3.06 mm/yr, 阶段上升速率由 1993-2002 年的 7.34 mm/yr 降低至 2003-2011 年的 4.56 mm/yr (图 6f)。对比 1993-2011 年三类数据拟合结果, CRSLA 所得区域海平面变化速率最高, 其中一方面是由于珠江口地形地貌及水文条件复杂, 区域海平面变化较单个站点变化剧烈, 另一方面可能是由于线性回归拟合对于短时期序列中的极值较为敏感, CRSLA 可能存在锐化极值情况。

## 4 结论

本文结合珠江三角洲验潮站及卫星高度计资料, 采用 EOF 方法及主成分分析方法建立具有空间统一性质的 CRSLA 对 1959-2011 年珠江三角洲区域海平面变化集成表达分析, 并将海平面变化估测结果与单个验潮站资料及卫星数据所得结果进行对比分析, 结果表明:

(1) 基于 EOF 及最小二乘法的 RSLA 重建方法科学可行, 能很好地结合卫星资料的高空间分辨率及验潮站资料的长时间序列的优势, 对于验潮站数据断续等问题不敏感; 重建结果与验潮站实测值拟合较好, 方法适用于区域范围海平面高度场重建。

(2) 卫星高度计资料显示空间上的一致上升变化是珠江三角洲海平面主要变化趋势, 内陆径流及厄尔尼诺现象对该区域海平面高度变化产生重要影响。海平面高度由近岸向深海呈现带状变化特征。

(3) 海平面空间变化特征显示, 珠江三角洲口门位置与大陆沿岸东北方向和西南方向海平面变化的影响因素不同, 径流入海及河口壅水对口门区海平面变化影响剧烈, 而大陆沿岸海平面几乎不受影响;

(4) 单一站点观测结果不适宜表征区域海平面变化, 卫星数据尚难于海平面长期变化趋势, CRSLA 资料克服二者缺点, 研究区域长期海平面变化具有优势。CRSLA 线性拟合结果经 GIA 校正, 显示 1959-2011 年珠江三角洲区域海平面上升速率为 4.08 mm/yr, 且近年有加快上升趋势。

(5) 主成分分析根据区域内海平面变化的主要特征对 RSLA 集成表达, 一方面比较全面完整地解释了区域海平面主要变化信息, 另一方面有效剔除了数据中的噪音影响, 是区域海平面变化研究的有效尝试。但可能存在锐化极值的现象, 应用于长期海平面变化趋势研究时无影响, 应用于短时期如年际变化时可考虑先去除高频扰动影响以保证数据稳定性。

## 参考文献(References)

- [1] Nerem R S, Leuliette, Cazenave A. Present-day sea-level change: A review. *Comptes Rendus Geoscience*, 2006, 338: 1077-1083.
- [2] 俞肇元, 袁林旺, 闫国年, 等. 西北太平洋边缘海区海面变化多尺度解析及空间分异. *地理研究*, 2009, 28(6): 1644-1655. [Yu Zhaoyuan, Yuan Linwang, Lv Guonian, et al. Multiscale analysis of sea level change and its spatial characteristics in northwest Pacific Ocean marginal seas. *Geographical Research*, 2009, 28(6): 1644-1655.]

- [3] Woodworth P L, Player R. The permanent service for mean sea level: An update to the 21st century. *Journal of Coastal Research*, 2003, 19(2): 287-295.
- [4] 黄镇国, 张伟强. 南海现代海平面变化研究的进展. 台湾海峡, 2004, 23(4): 530-535. [Huang Zhenguo, Zhang Weiqiang. Advance of research on recent sea level changes in South China Sea. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2004, 23(4): 530-535.]
- [5] Parker A. Sea level trends at locations of the United States with more than 100 years of recording. *Natural Hazards*, 2013, 65(1): 1011-1021.
- [6] Becker M, Meyssignac B, Letetrel C, et al. Sea level variations at tropical Pacific islands since 1950. *Global and Planetary Change*, 2012, 80-81: 85-98.
- [7] Stanev E V, Peneva E L. Regional sea level response to global climatic change: Black Sea examples. *Global and Planetary Change*, 2001, 32(1): 33-47.
- [8] 李立, 许金电, 蔡榕硕. 20世纪90年代南海海平面的上升趋势: 卫星高度计观测结果. 科学通报, 2002, 47(1): 59-62. [Li Li, Xu Jindian, Cai Rongshuo. Upward trend of sea level in South China Sea in 1990s: Results from satellite altimeter. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(1): 59-62.]
- [9] 李建成, 金涛勇. 卫星测高技术及应用若干进展. 测绘地理信息, 2013, 38(4): 1-8. [Li Jiancheng, Jin Taoyong. On the main progress of satellite altimetry and its applications. *Journal of Geomatics*, 2013, 38(4): 1-8.]
- [10] 李大炜, 李建成, 金涛勇, 等. 利用多代卫星测高资料监测1993-2011年全球海平面变化. 武汉大学学报(信息科学版), 2012, 37(12): 1421-1424. [Li Dawei, Li Jiancheng, Jin Taoyong, et al. Monitoring global sea level change from 1993 to 2011 using TOPEX and Jason Altimeter missions. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(12): 1421-1424.]
- [11] Acuna G, Bosch W. Absolute comparison of satellite altimetry and tide gauge registrations in Venezuela. *Satellite Altimetry for Geodesy, Geophysics and Oceanography, Proceedings*, 2004, 126: 261-269.
- [12] Church J A, White N J, Hunter J R. Sea-level rise at tropical Pacific and Indian Ocean islands. *Global and Planetary Change*, 2006, 53(3): 155-168.
- [13] Calafat F M, Gomis D, Marcos M. Comparison of Mediterranean sea level fields for the period 1961-2000 as given by a data reconstruction and a 3D model. *Global and Planetary Change*, 2009, 68(3): 175-184.
- [14] Church J A, White N J, Coleman R, et al. Estimates of the regional distribution of sea level rise over the 1950-2000 period. *Journal of Climate*, 2004, 17(13): 2609-2625.
- [15] Calafat F M, Jorda G. A Mediterranean sea level reconstruction (1950-2008) with error budget estimates. *Global and Planetary Change*, 2011, 79(1-2): 118-133.
- [16] Meyssignac B, Calafat F M, Somot S, et al. Two-dimensional reconstruction of the Mediterranean sea level over 1970-2006 from tide gage data and regional ocean circulation model outputs. *Global and Planetary Change*, 2011, 77(1-2): 49-61.
- [17] Hamlington B D, Leben R R, Wright L A, et al. Regional sea level reconstruction in the Pacific Ocean. *Marine Geodesy*, 2012, 35: 98-117.
- [18] Cheng Y C, Andersen O B, Knudsen P. Integrating non-tidal sea level data from altimetry and tide gauges for coastal sea level prediction. *Advances in Space Research*, 2012, 50(8): 1099-1106.
- [19] 陈晓宏, 陈永勤. 珠江三角洲网河区水文与地貌特征变异及其成因. 地理学报, 2002, 57(4): 429-436. [Chen Xiaohong, Chen Yongqin. Hydrological change and its causes in the river network of the Pearl River Delta. *Acta Geographica Sinica*, 2002, 57(4): 429-436.]
- [20] 时翠, 陈晓宏, 张强. 近几十年来珠江三角洲1月和7月水位变异分析. 热带地理, 2012, 32(3): 233-240. [Shi Cui, Chen Xiaohong, Zhang Qiang. Change-points of water levels in the Pearl River Delta in January and July for the last decades. *Tropical Geography*, 2012, 32(3): 233-240.]
- [21] 孔兰, 陈晓宏, 张强, 等. 海平面上升对珠江口水位影响的分析. 生态环境学报, 2010, 19(2): 390-393. [Kong Lan, Chen Xiaohong, Zhangqiang et al. Impacts of rising sea level on water level changes along the Pearl River Estuary, China. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(2): 390-393.]
- [22] 杨清书, 陈特固, 廖芸栋. 近几十年来韩江三角洲水位变化趋势研究. 海洋通报, 1997, 16(1): 10-14. [Yang Qingshu, Chen Tegu, Liao Yundong. The research on the tendency of sea level change of Hanjiang Delta in the last decades. *Marine Science Bulletin*, 1997, 16(1): 10-14.]
- [23] 杨清书. 珠江三角洲的水位变化趋势及其本征模型. 海洋科学, 1998, (1): 47-51. [Yang Qingshu. The EOF model of water level variability of the Pearl River Delta. *Marine Science*, 1998, (1): 47-51.]
- [24] 张蕾, 陈晓宏. 珠江三角洲网河区水位空间插值的kriging方法. 中山大学学报(自然科学版), 2004, 43(5): 112-114. [Zhang Lei, Chen Xiaohong. Spatial interpolation of water level with Kriging approach in river net of the Pearl River Delta. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2004, 43(5): 112-114.]
- [25] 时小军, 陈特固, 余克服. 近40年来珠江口的海平面变化. 海洋地质与第四纪地质, 2008, 28(1): 127-134. [Shi Xiaojun, Chen Tegu, Yu Kefu. Sea level changes in Zhujiang estuary over last 40 years. *Marine Geology & Quaternary Geol-*

- ogy, 2008, 28(1): 127-134.]
- [26] 沈东芳, 陈特固, 吴晓星, 等. IPCC-AR4 以来华南沿海海平面变化研究若干进展. 热带地理, 2012, 32(3): 223-227+251. [Shen Dongfang, Chen Tegu, Wu Xiaoxing et al. Progress in the research of sea-level changes along the coast of south China since IPCC-AR4. Tropical Geography, 2012, 32(3): 223-227+251.]
- [27] 黄镇国, 张伟强, 陈特固. 香港/澳门近 72 年海平面变化曲线. 地理科学, 1999, 19(3): 91-94. [Huang Zhenguo, Zhang Weiqiang, Chen Tegu. Sea level change curve in recent 72 years in Hong Kong and Macau. Scientia Geographica Sinica, 1999, 19(3): 91-94.]
- [28] 蒋陈娟, 杨清书, 戴志军, 等. 近几十年来珠江三角洲网河水位时空变化及原因初探. 海洋学报(中文版), 2012, 34(1): 46-56. [Jiang Chenjuan, Yang Qingshu, Dai Zhijun et al. Spatial and temporal characteristics of water level change and its causes in the Zhujiang Delta in recent decades. Acta Oceanologica Sinica, 2012, 34(1): 46-56.]
- [29] 沈东芳, 龚政, 程泽梅, 等. 1970-2009 年粤东(汕尾)沿海海平面变化研究. 热带地理, 2010, 30(5): 461-465. [Shen Dongfang, Gong Zheng, Cheng Zemei, et al. Sea level change in coastal eastern Guangdong (Shanwei) in 1970-2009. Tropical Geography. 2010, 30(5): 461-465.]
- [30] He L, Li G, Li K, et al. Estimation of regional sea level change in the Pearl River Delta from tide gauge and satellite altimetry data. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2014, 141: 69-77.
- [31] 栾维新, 崔红艳. 基于 GIS 的辽河三角洲潜在海平面上升淹没损失评估. 地理研究, 2004, 23(6): 805-814, 880. [Luan Weixin, Cui Hongyan. Submerged loss assessment of potential sea level rise of Liao River Delta Region based on GIS. Geographical Research, 2004, 23(6): 805-814, 880.]
- [32] 陈特固. 近数十年珠江口海平面变化的地区差异. 南海研究与开发, 1994, (3): 7-12. [Chen Tegu. Regional difference of sea level change in the the Pearl River Estuary in the last decades. Research & Development of South China Sea, 1994, (3): 7-12.]
- [33] Smith T M, Reynolds R W, Livezey R E, et al. Reconstruction of historical sea surface temperatures using empirical orthogonal functions. Journal of Climate, 1996, 9(6): 1403-1420.
- [34] 谢志仁, 袁林旺, 閻国年, 等. 海面-地面系统变化: 重建·监测·预估. 北京: 科学出版社, 2012: 314. [Xie Zhiren, Yuan Linwang, Lv Guonian et al. Sea-land System Change: Reconstruction, Monitoring and Prediction. Beijing: Science Press, 2012: 314.]
- [35] 陈晓宏, 张蕾, 时钟. 珠江三角洲河网区水位特征空间变异性研究. 水利学报, 2004, (10): 36-42. [Chen Xiaohong, Zhang Lei, Shi Zhong. Study on spatial variability of water levels in river net of Pearl River Delta. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, (10): 36-42.]
- [36] 荣增瑞, 刘玉光, 陈满春, 等. 全球和南海海平面变化及其与厄尔尼诺的关系. 海洋通报, 2008, 27(1): 1-8. [Rong Zengrui, Liu Yuguang, Chen Manchun et al. Mean sea level change in the global ocean and the South China Sea and its response to ENSO. Marine Science Bulletin, 2008, 27(1): 1-8.]
- [37] Ho C R, Kuo N J, Zheng Q N, et al. Dynamically active areas in the South China Sea detected from TOPEX/POSEIDON satellite altimeter data. Remote Sensing of Environment, 2000, 71(3): 320-328.
- [38] 杨清书, 罗章仁, 张修杰. 珠江三角洲近几十年水位变化趋势研究. 热带海洋, 1998, 17(2): 9-14. [Yang Qingshu, Luo Zhangren, Zhang Xiujie. Secular trend of water level change in Zhujiang River Delta in recent decades. Tropic Oceanology, 1998, 17(2): 9-14.]
- [39] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [40] 《第二次气候变化国家评估报告》编写委员会. 第二次气候变化国家评估报告. 北京: 科学出版社, 2011: 113-114. [Editorial Committee of National Assessment Report of Climate Change. Second National Assessment Report of Climate Change. Beijing: Science Press, 2011: 113-114.]
- [41] 国家海洋局. 2010 年中国海平面公报. [2011-0402]. [http://www.soa.gov.cn/zwgk/hygb/zghpmgb/2010nzhpmgb/201212/t20121217\\_22808.html](http://www.soa.gov.cn/zwgk/hygb/zghpmgb/2010nzhpmgb/201212/t20121217_22808.html) [State Oceanic Administration People's Republic Of China. 2010 report on china's sea level. [2011-0402]. [http://www.soa.gov.cn/zwgk/hygb/zghpmgb/2010nzhpmgb/201212/t20121217\\_22808.html](http://www.soa.gov.cn/zwgk/hygb/zghpmgb/2010nzhpmgb/201212/t20121217_22808.html)]
- [42] Peltier W R. Global glacial isostasy and the surface of the ice-age earth: The ice-5G (VM2) 552 model and grace. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2004, 32: 111-149.
- [43] Ding X, Zheng D, Chen Y, et al. Sea level change in Hong Kong from tide gauge measurements of 1954-1999. Journal of Geodesy, 2001, 74(10): 683-689.
- [44] Zhou X Y, Zheng J H, Dong D J, et al. Sea level rise along the East Asia and Chinese coasts and its role on the morphodynamic response of the Yangtze River Estuary. Ocean Engineering, 2013, 71: 40-50.
- [45] Huang Z G, Zong Y Q, Zhang W Q. Coastal inundation due to sea level rise in the Pearl River Delta, China. Natural Hazards, 2004, 33(2): 247-264.
- [46] Ren M E. Relative sea-level changes in China over the last 80 years. Journal of Coastal Research, 1993, 9(1): 229-241.
- [47] Cheng X H, Qi Y Q. Trends of sea level variations in the South China Sea from merged altimetry data. Global and Planetary Change, 2007, 57(3-4): 371-382.

- [48] Feng W, Zhong M, Xu H Z. Sea level variations in the South China Sea inferred from satellite gravity, altimetry, and oceanographic data. *Science China-Earth Sciences*, 2012, 55(10): 1696-1701.
- [49] Li L, Xu J D, Cai R S. Trends of sea level rise in the South China Sea during the 1990s: An altimetry result. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(7): 582-585.
- [50] Zuo J C, Yang Y Q, Zhang J L, et al. Prediction of China's submerged coastal areas by sea level rise due to climate change. *Journal of Ocean University of China*, 2013, 12(3): 327-334.
- [51] Zhang X B, Church J A. Sea level trends, interannual and decadal variability in the Pacific Ocean. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39: L21701.
- [52] Ericson J P, Vorosmarty C J, Dingman S L, et al. Effective sea-level rise and deltas: Causes of change and human dimension implications. *Global and Planetary Change*, 2006, 50(1-2): 63-82.
- [53] 汤超莲, 游大伟, 陈特固, 等. 1986-2008年广东沿海海平面变化趋势. *热带地理*, 2009, 29(5): 423-428. [Tang Chao-lian, You Dawei, Chen Tegu, et al. Sea-level changes along the coast of Guangdong province during 1986-2008. *Tropical Geography*, 2009, 29(5): 423-428.]
- [54] 游大伟, 汤超莲, 陈特固, 等. 近百年广东沿海海平面变化趋势. *热带地理*, 2012, 32(1): 1-5. [You Dawei, Tang Chao-lian, Chen Tegu et al. Sea level changes along Guangdong coast over the Last Century. *Tropical Geography*, 2012, 32(1): 1-5.]
- [55] 赵春明, 刘雅鸣, 张金良, 等. 20世纪中国水旱灾害警示录. 郑州: 黄河水利出版社, 2002. [Zhao Chunming, Liu Yaming, Zhang Jinliang, et al. *Lessons from Chinese Flood and Drought during the 20th Century*. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Commission Press, 2002.]

## Changes and trends of sea level in the Pearl River Delta in the last 50 years

HE Lei<sup>1,2</sup>, LI Guosheng<sup>1</sup>, LI Kuo<sup>3</sup>, CUI Linlin<sup>1,2</sup>, REN Huiru<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, CAAS, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Low spatial resolution of tide gauge records and shortness of satellite altimetry data are the main obstacles in studying regional long sea level change. The present study proposes a reconstruction of consistent regional sea level anomalies (CRSLA) in the Pearl River Delta over the period 1959-2011 by combining satellite altimetry dataset with tide gauge records using empirical orthogonal function (EOF) and principle components analysis method. The results indicate that the reconstruction method addresses issues such as the relative shortage of satellite altimetry data and the sparse and discontinuous nature of tide gauge records, demonstrating the applicability of this technique in investigation of long-term sea level change. Moreover, the rate of regional sea level rise obtained based on CRSLA (4.08 mm/yr) indicates acceleration over recent decades. Compared with the estimation from single tide gauge, the reconstruction explains the leading characteristics of regional sea level change with a low noise level. Both river flow and El Niño-Southern Oscillation events have considerable impacts on sea level variability in the Pearl River Delta.

**Key words:** sea level changes; the Pearl River Delta; trends