

基于 SSA 和 MGF 的海面变化长期预测及对比

袁林旺, 谢志仁, 俞肇元

(南京师范大学地理科学学院, 南京 210097)

摘要: 海面变化预测受到建模思路、方法选择、数据长度及数据质量等因素的影响, 导致了海面变化预测的不确定性。本文以国内 6 个验潮站自 20 世纪 50 年代以来的月平均潮位序列为基础, 采用奇异谱分析 (SSA) 与均值生成函数 (MGF) 模型相结合的方案, 以各站位最初 20 余年数据为基础建立预测模型, 以后续年份的实测数据进行了多方案对比验证及检验。预测试验显示 MGF 模型具有较高的预测精度, 并表现出较好的长期预测的稳定性特点。以 SSA 去噪序列为基础, 应用 MGF 模型预测了各站位至 2050 年的月尺度海面值, 年均值计算结果表明至 2050 年海面波动上升的幅度不超过 20cm, 海面变化速率同样表现出阶段性和波动性。与前人相关研究成果对比表明, 本文所采用的 SSA 与 MGF 相结合的预测结果具有可比性, 在方法原理和验证结果上看具有较好的长期预测潜力。

关键词: 海面变化; 预测; 奇异谱分析 (SSA); 均生函数预测模型 (MGF)

文章编号: 1000-0585(2008)02-0305-09

近 20 年来, 在全球变化框架下形成了以“预测—影响—对策”研究为标志的海面变化战略应用新方向。而海面变化预测始终受到不确定性和非线性的困扰。许多学者试图从海面变化的影响因素及其内在作用机制出发建立机理性的海面预测模型^[1~6], 此类模型依赖于较为明晰的海面上升机制及相关边界条件的正确选取^[7,8]。基于气候—海洋耦合模式的动力建模受到海面变化机制、模式分辨率以及边界条件三方面制约^[9~11]。另有不少学者试图从海面变化历史记录 (如验潮记录) 的分析来建立预测模型^[12~30], 但此类预测受制于数据序列的长度、质量、处理方法等因素。本文以中国东部不同海区的 6 个验潮站的验潮序列为基础, 综合运用奇异谱分析 (Singular Spectrum Analysis, SSA) 和均值生成函数 (Mean Generation Function, MGF) 模型, 应用 SSA 进行序列的去噪与重构, 进而应用 MGF 模型开展了至 2050 年海面变化预测, 结果表明, MGF 可以很好地把握时间序列的波动特征, 在趋势预测和细节预测上取得较好的平衡。未来海面变化呈现出阶段性和波动性。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

本文选取中国东部沿海不同海区的 6 个潮位站 (表 1) 的月均海面数据, 其中吴淞站验潮数据来源于上海海事局海测大队, 其余数据均引自 (PSMSL) 公布的修正的地方基准海面 (Revised Local Reference, RLR) 数据^[31] (图 1)。

收稿日期: 2007-07-17; 修订日期: 2007-11-15

基金项目: 973 计划前期研究专项课题 (2007CB416602); 江苏省普通高校自然科学基金项目 (06KJD170102) 资助

作者简介: 袁林旺 (1973-), 男, 江苏海安人, 博士, 副教授。主要从事海面变化研究。Email: yuanlinwang@njnu.edu.cn

表 1 站位基本信息

Tab. 1 Basic information of each tidal gauge station

站位	闸坡	厦门	坎门	吴淞	烟台	秦皇岛
纬度	21°35'N	24°27'N	28°05'N	31°24'N	37°32'N	39°54'N
经度	111°50'E	118°04'E	121°17'E	121°30'E	121°23'E	119°36'E
序列长度 (年)	1959~2002	1954~2002	1959~2002	1955~2002	1954~1994	1950~1994

1.2 研究方法

均值生成函数 (MGF) 模型是针对具有复杂波动特征数据多步、长期预测效果较差的问题发展起来的^[32], 该模型在建模序列处理、变量筛选以及预报关系建立等方面的进一步探索, 使其能较好地预测序列的各种周期的波动特征、极值变化和长期趋势变化, 且可以进行多步预测, 在多个预测领域得到运用^[32~34]。其基本思路如下:

对于时间序列 $x(t) = \{x(1), x(2), \dots, x(n)\}$, 定义均值生成函数为:

$$\bar{x}_l(i) = \frac{1}{n_l} \sum_{j=0}^{n_l-1} x(i+jl) \quad (1)$$

式中: $i=1, 2, \dots, l; l=1, 2, \dots, m$

$$n_l = INT(n/l), m = INT(n/2)$$

对 m 个均生函数作周期性延拓可得 $f_l^{(0)}(t) = \bar{x}_l(i), (t=1, 2, \dots, n)$, 从而构造出周期为 l 的

m 列周期函数。同理对原序列的一阶和二阶差分序列以及一阶差分的累加序列均可计算均生函数延拓序列 $f_l^{(1)}(t), f_l^{(2)}(t), f_l^{(3)}(t)$ 。利用从原序列中派生出 $4m$ 个自变量作为预测变量和原序列建立最优子集回归模型, 采用兼顾数量预报和趋势预报的 CSC 双评分准则确定自然周期、筛选变量和确定阶数^[34]。

奇异谱分析 (SSA) 不受线性 and 正弦波假定的约束, 对信号的识别和描述采用时域性的频域特征分析方式, 具有稳定的识别和强化周期信号功能^[35]。SSA 可有效滤除原始序列中的噪音, 其重构序列较之原始序列具有更好的可预测性。其基本思路如下:

对一维时间序列 $y(t)$ 作相空间拓展, 即将序列 $y(t) (t=1, \dots, N+m+1)$ 按给定时间滞后 m 进行重新排列, 构成一时滞排列矩阵

$$Y_T = \begin{bmatrix} Y_1 & Y_2 & \dots & Y_N \\ Y_2 & Y_3 & \dots & Y_{N+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_m & Y_{m+1} & \dots & Y_T \end{bmatrix} \quad (2)$$

对(2)作时滞经验正交展开(T-EOF), 得出的前几个特征向量(TEOF) 即表示序列振荡的主要周期模态, 可用来识别和描述序列中蕴含的各种线性或非线性振荡信号, 而相对对应的时间系数(TPC) 则表示了相应周期的长期变化特征^[36]。

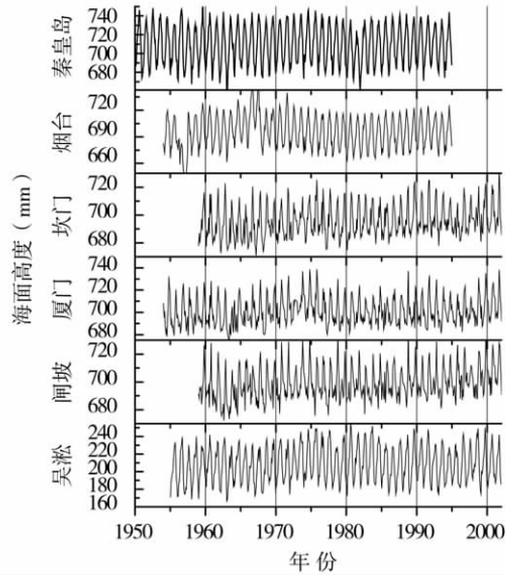


图 1 6 站位验潮序列

Fig. 1 Observed series of six stations

2 不同方案的长期预测试验与对比

2.1 单站点不同序列长度的预测试验

初值敏感性是长期预测的主要阻碍之一。为验证 MGF 模型长期预测的稳定性，以不同长度建模序列进行试验。截取坎门验潮站 1959~1970、1959~1975、1959~1980、1959~1985 和 1959~1990 年五个不同长度的月均海面序列，对 1991~2002 年共 12 年间的月均海面变化值进行预测试验，不同方案预测结果及残差的对比见图 2，残差的相关统计量见表 2。可以看出，不同序列长度预测的 1991~2002 年间序列和残差的结构均非常类似，表现出相当好的可比性。而建模序列长度的变化对预测残差的均值有稍许影响，而对标准差、最大、最小值以及极差影响甚微，表明 MGF 模型对序列长度具有较好的稳定性。

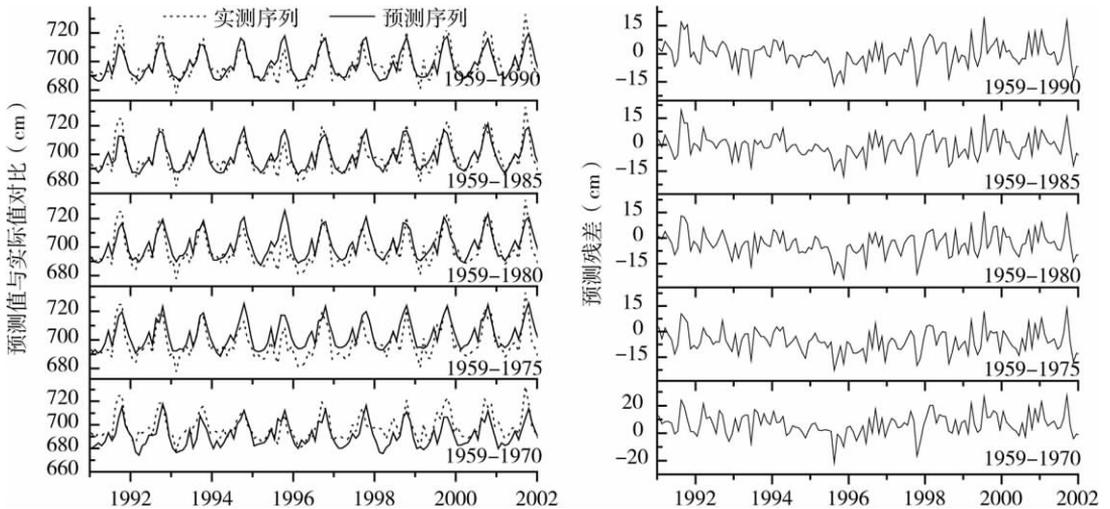


图 2 坎门站不同时长试验方案下的预测误差对比

Fig. 2 Comparison between prediction errors of scenarios with different series length

表 2 坎门站不同时长试验方案下的残差相关统计量 (单位: cm)

Tab. 2 Statistics of prediction errors of scenarios with different series lengths (unit: cm)

建模序列长度	残差均值	残差标准差	残差最大值	残差最小值	残差极差
1959~1970 年	6.36	8.31	27.59	-21.49	49.08
1959~1975 年	-5.67	7.23	13.86	-25	38.86
1959~1980 年	-3.71	7.36	15.65	-25.93	41.58
1959~1985 年	-0.8	6.91	19.53	-23.07	42.6
1959~1990 年	-0.08	7.11	19.58	-20.51	40.09

2.2 多站点 SSA 去噪的预测试验

对 6 个站位的验潮数据进行 SSA 中心化分解，嵌入维数为 100，主要分量及累积百分比见表 3，重建获得了各站位的 SSA 去噪序列。对各站点 1980 年前的原始序列和 SSA 去噪序列分别建立 MGF 预测模型，对 1981~2002 年月均海面变化进行预测(烟台和秦皇岛预测段是 1981~1994 年)。预测结果与实测序列和 SSA 去噪序列间表现出

表 3 SSA 分解主要分量及其累积百分比

Tab. 3 Principal components and cumulative percentage of SSA

站点	闸坡	厦门	坎门	吴淞	烟台	秦皇岛
SSA 分量	0-9	0-12	0-7	0-8	0-10	0-7
占原序列百分比	75.321	77.257	74.505	87.811	91.131	92.176

良好的可比性(图 3、图 4 和表 4)。总体上,各站位平均预测误差均不超过 10cm,预测的绝对误差大部分落在±15cm 之间,极端预测误差落在±30cm 左右。各站位预测误差的统计量也较为接近,误差较大的时段主要落在 1982~1983、1988~1989、1995~1996 和 1998~1999 年,这与近期 ENSO 出现的年份相吻合。同时基于 SSA 去噪序列的误差统计参数整体上优于直接基于验潮序列的分析结果,试验表明综合运用 SSA 和 MGF 方法有助于提高长期预测的稳定性和准确性,可以进行较长期的海面变化预测。

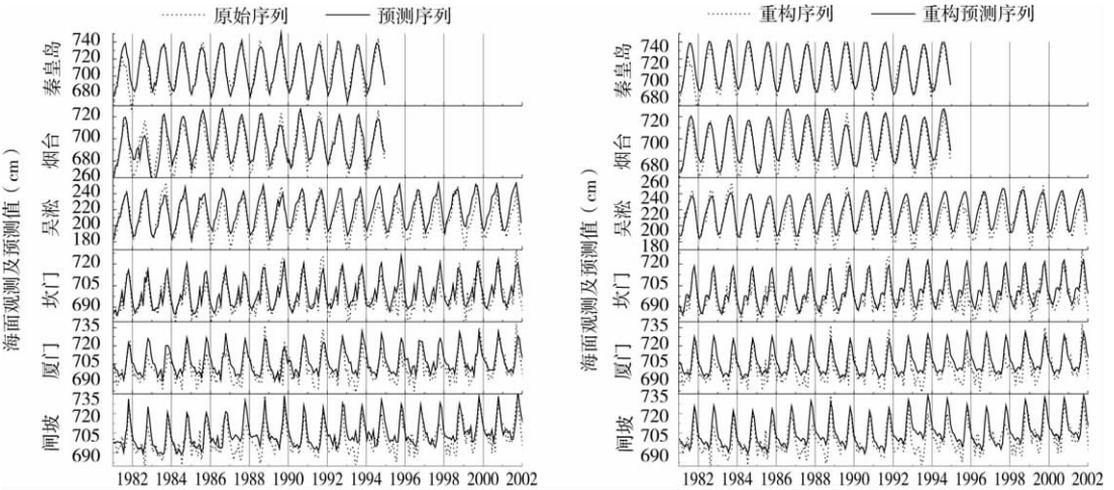


图 3 不同站位去噪试验预测效果的对比

Fig. 3 Comparison of prediction effects of each station with and without SSA denoise

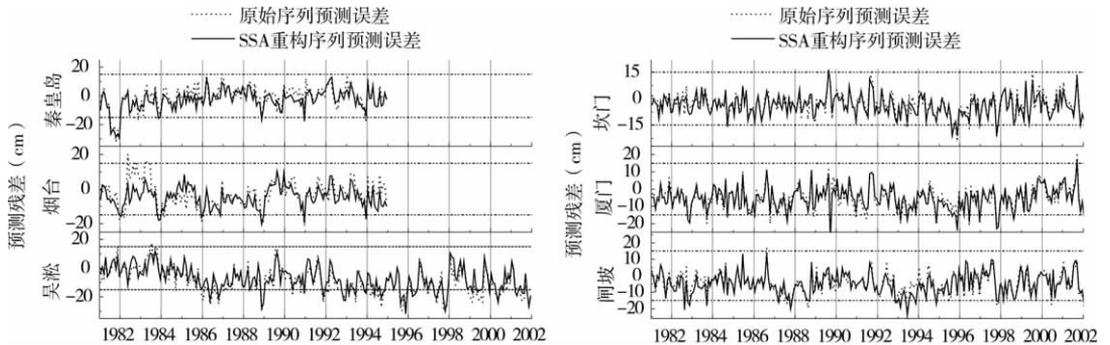


图 4 不同站位去噪试验预测残差的对比

Fig. 4 Comparison of prediction errors of each station with and without SSA denoise

表 4 原序列及 SSA 重构序列不同方案下月均预测误差的统计量分析 (cm)

Tab. 4 Statistics of monthly prediction errors of each station with and without SSA denoise

站 位	均值		标准差		最大值		最小值		极差	
	原序列	SSA	原序列	SSA	原序列	SSA	原序列	SSA	原序列	SSA
闸坡	-4.54	-5.17	6.60	6.55	16.79	13.37	-25.46	-23.94	42.25	37.31
厦门	-5.25	-5.44	7.02	6.79	19.78	16.48	-29.40	-30.43	49.17	46.91
坎门	-3.13	-4.08	6.46	6.21	16.62	16.55	-25.93	-28.31	42.55	44.87
吴淞	-9.22	-7.60	9.45	8.55	17.71	11.65	-30.57	-31.70	48.28	43.35
烟台	-2.83	-4.73	7.61	6.00	20.20	10.32	-21.27	-20.39	41.47	30.71
秦皇岛	-0.72	-2.76	7.90	7.23	14.20	13.06	-31.89	-29.33	46.08	42.39

3 未来海面变化的预测与对比

3.1 基于 MGF 的海面变化预测

以 1955~2001 年经 SSA 去噪后的月均验潮数据为基础，建立各站位均生函数预测模型，预测了至 2050 年海面变化月均值(图 5)。从总体上看，各站位预测的海面变化过程呈现明显的低频波动，较好地再现了海面波动的周期性。闸坡、厦门、坎门、吴淞四站表现为波动上升趋势，2001~2050 年段月均序列线性斜率分别为 0.198、0.101、0.200 和 0.249。秦皇岛站基本保持不变，线性斜率 0.008，而烟台站线性斜率为 -0.094，略呈下降趋势，该站位前期序列中出现了较短周期波动，同样表现在预测时段中。

海面变化是多圈层、多尺度的耦合作用过程，海面变化过程表现为波动性和振荡性。常用的基于全部或部分序列线性拟合

的未来海面变化预测方法存在相当的局限性。郑大伟等利用小波跳步时频方法研究中也指出海面变化过程存在周期和振幅不稳定的年际和十年尺度的起伏变化，且该类变化对上海海面上升的影响可达到 10cm 量级^[12]。因此，海面变化预测应从多尺度、非线性角度入手，在清晰理解过去海面变化过程的基础上预测未来。

3.2 海面变化幅度及对比

IPCC (政府间气候变化专门委员会) (2007) 预测的全球平均海面上升值至 2050 年为 9~29.5cm^[37]，(根据相关速率以 2000 年为基准折算)。关于中国未来海面变化研究在研究方法和时段上不尽相同，各结果的可对比性相对较差。赵明才等预测到 2050 年海面上升为 13.6~27cm^[13]，于道永^[14]认为到 2050 年前后平均上升幅度预计不超过 15cm，张锦文等^[15,16]对从辽宁到广西 8 个区域 2050 年上升幅度预测的平均值是 13~50cm，杜碧兰等^[17]估计中国沿岸海面上升 2050 年为 12~23cm。从本文结果看 (表 5)，到 2050 年，

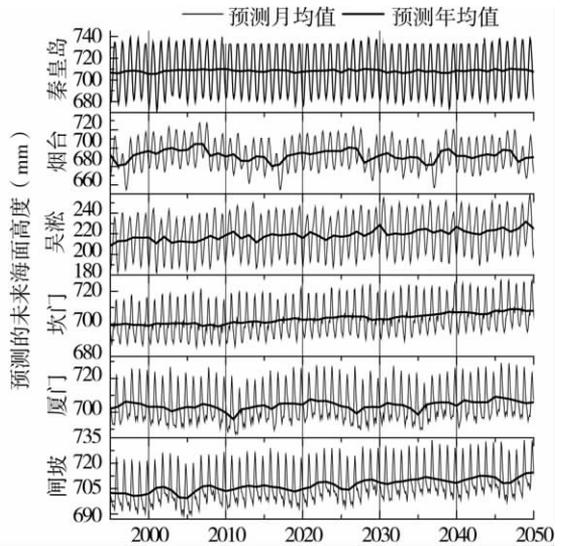


图 5 各站位未来海面变化预测
Fig. 5 Prediction of future sea level

表 5 各站位相对 2000 年海面升降值* (cm)

Fig. 5 Sea-level changes compared with that of the results in 2000 of each station (cm)

站位	1994 年观测值	2000 年观测值	差值	2010 年	2020 年	2030 年	2040 年	2050 年
闸坡	702.75	706.92	4.17	-3.32	-2.14	1.72	1.48	7.55
厦门	701.87	707.28	5.41	-7.56	-2.75	-4.25	-3.42	-1.41
坎门	698.05	700.26	2.21	-0.41	2.25	2.70	6.81	7.79
吴淞	205.75	209.17	3.42	9.07	6.15	18.97	17.01	15.61
烟台	696.53	-	-	-5.97	-1.65	-4.83	-5.16	-6.68
秦皇岛	710.52	-	-	4.66	1.98	3.59	3.03	1.99
6 站平均	-	-	-	-0.59	0.64	2.98	3.29	4.14

*：由于国内早期研究基准年份较早且多有不同，本文统一以 2000 年为基准，并给出 1994 年观测值供对比。

崧海面上升值最大，相对于 2000 年海面上升 16cm 左右，闸坡上升 8cm 左右，坎门和秦皇岛分别上升 8cm 和 2cm 左右，基本落在相关研究范围之内。而烟台站则下降约 7cm，与张锦文等^[16]的认识相近。

从区域性海面上升的绝对值对比看(图 6)，除烟台外其余站位均落在相关研究预测范围之内，且多接近相关研究预测的下限。这可能与 MGF 模型利用循环外推对均值生成函数进行延拓，较好地把握了蕴含在序列中的潜在的波动规律，而传统的基于线性拟合方法和基于基本函数及正交多项式的非线性拟合方法往往不适于进行长时段的外推预测，因而导致长时段的预测值偏离较大有关。

考虑到海面变化的波动性特征，本文基于年均序列计算了各站位预测时段内海面上升的最大值，获得了各站位研究时段内海面变化上升的最大幅度。闸坡、厦门、坎门、吴淞、烟台和秦皇岛 2001~2050 年间海面相对 2000 年上升的最大值分别是 8cm (2050 年)、2cm(2045 年)、9cm(2048 年)、23cm(2049 年)、8cm(2007 年)和 5cm(2047 年)左右。

3.3 海面变化速率及对比

国际上对于全球海面上升速率争论的焦点集中在对验潮数据预测的不确定性处理和对海面上升内在机制的探索上^[39,40]。关于中国海面上升速率预测，其平均速率范围在 1.4~3.0mm/a 之间^[13~29]，田素珍等^[30]对当时的相关成果进行比较分析后建议取 1.7±0.3mm/a 作为我国沿海近期“绝对”海面的上升速率。从海域来看，东海沿岸平均年变化速率在 2.5~2.7mm/a 左右，渤海沿岸平均年变化率在 2.0~2.5mm/a，南海为 2.1mm/a 左右，而黄海为 0.8~1.0mm/a 左右^[19,20]。不同研究间的差异可能与三方面有关：一、建模序列的长短，特别是对基于线性思路的预测影响更大；二、不同预测方法间的预测结果存在差异；三、由于海面变化的波动性客观存在，线性拟合平均速率存在误差。

对 2001~2050 年海面变化值进行了分五个时段拟合(表 7)，各站位在不同时段的平均海面变化速率表现出阶段性和波动性，在上升段和下降段差异显著，在空间上也表现出明显的变异。在 2001~2050 年间，闸坡、厦门、坎门和吴淞四个站的平均上升速率均接近于相关预测的中值，而秦皇岛站略大。各时段中 6 站位的平均海面变化上升速率在 1.60~3.61mm/a 之间，6 站位海面上升的平均速率为 1.1mm/a，略小于相关研究的取值。

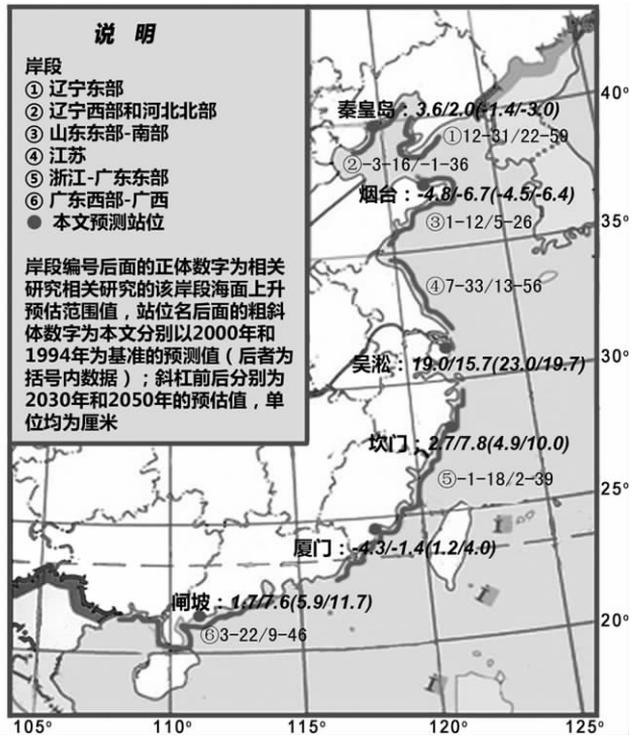


图 6 本文预测结果与相关研究对比(岸段划分和相应预估数据引自文献 [38])

Fig. 6 Comparison between our research findings and the others

表 7 各站位不同时段上升速率 (单位: mm/a)

Tab. 7 Sea-level rise velocity at different time intervals of each station (unit: mm/a)

站位	相关研究 ^[13,26~30]	2001~2050	2001~2010	2011~2020	2021~2030	2031~2040	2041~2050
闸坡	1.5~2.7	1.98	2.93	0.25	4.54	2.98	4.33
厦门	0.1~2.5	1.01	1.49	9.14	-4.04	2.67	1.67
坎门	1.7~2.4	2.00	1.19	4.89	2.82	3.29	4.72
吴淞	2.3~4.9	2.49	6.11	0.53	7.68	5.94	8.16
烟台	-3.0~4	-0.94	-2.54	5.66	-4.91	1.72	0.30
秦皇岛	-3.5~0	0.08	5.65	1.38	3.51	1.81	2.48
6 站平均	—	1.10	2.47	3.18	1.60	3.07	3.61

4 结论与讨论

本文采用奇异谱分析(SSA)与均生函数模型(MGF)相结合的方案,对中国东部沿海 6 个验潮站进行了长期预测试验,在海面变化长期预测中显示出相当的优势,预测精度较高。对 2001~2050 年海面预测结果显示 6 站位未来海面的波动变化趋势,至 2050 年海面上升的最大幅度不超过 16 cm,烟台和秦皇岛站表现为下降趋势。从最大上升值来看,在 2001~2050 年间海面相对 2000 年上升的峰值不超过 23cm,6 站位平均上升最大值仅为 9cm。海面变化速率同样表现出明显的阶段性和波动性,在上升段和下降段差异显著,在空间上也表现出明显的差异,2001~2050 年 6 站位平均海面上升速率仅有 1.1mm/a。由于海面变化的波动性和不规则性,基于线性方程的海面变化上升幅度及变化趋势的分析表现出一定的局限性,现有的海面预测平均速率和上升幅度可能存在一定的偏差。

海面变化预测结果的不确定性受海面变化自身的不确定性和预测方法两方面的影响。海面变化自身的不确定性主要是由海面变化影响因素及其内部作用机制的复杂性所导致。不同预测方法由于建模思路和数学背景各不相同,在海面预测中的适用性存在差别,时间序列方法受制于对长期趋势及准周期组分的预测,基于动力学模型的预测受到海面变化机制、模式分辨率以及边界条件三方面的制约。SSA 重建序列不基于正弦波的假定,直接根据序列特征提取典型向量,其合成序列等价于一种自适应滤波结果,滤除了高频噪音突出表现在时域上的变化特征;均生函数模型本质上基于统计—动力建模思路,兼顾了验潮序列的统计特性和蕴含在海面序列中海面上升的动力机制,从而避免了直接基于单一的统计或动力方法预测所带来的结果的不确定性。

由于 SSA 和 MGF 方法仍是基于时间序列分析思路,立足于从历史过程中提取规律进行预测。随着人类活动与自然要素驱动的共同作用,对海面变化的影响日益加剧,有必要对影响未来海面变化多种过程和要素进行综合分析,并对其不确定性进行评估。因此,海面变化预测应综合考虑多种要素,集多种方法之长,构建集成的海面变化预测方法体系,并在此基础上进行综合对比研究。

参考文献:

- [1] Munk W. Ocean freshening, sea level rising. *Science*,2003,300:2041~2043.
- [2] Cazenave A, Nerem R S. Present-day sea level change: Observation and causes. *Reviews of Geophysics*, 2004,42: 1~20.
- [3] Levitus S, Antonov J I, Boyer T P, *et al.* Warming of the world ocean. *Science*,2000 287,2225~2229.

- [4] Clark J, Primus J A. Sea-level change resulting from future retreat of ice sheets: An effect of CO₂ warming of the climate. In: Tootey M J, Shennan I (eds.); Sea-level Change. New York Basil Blackwell, 1987. 333~356.
- [5] Vaughan D G. How Does the Antarctic ice sheet affect sea level rise? *Science*, 2005, 308: 1877~1878.
- [6] Dowdeswell J A. The Greenland ice sheet and global sea-level rise. *Science*, 2006, 311: 963~964.
- [7] Van der Veen C J. Polar ice sheets and global sea level to: How well can we predict the future? *Global and Planetary Change*, 2002, 32 (2-3): 165~194.
- [8] Miller L, Douglas B C. Mass and volume contributions to twentieth-century global sea level rise. *Nature*, 2004, 428: 406~409.
- [9] Gregory J M, Oerlemans J. Simulated future sea level rise due to glacier melt based on regionally and seasonally resolved temperature changes. *Nature*, 1998, 391: 474~6.
- [10] Huybrechts P, Wolde D. The dynamic response of the Greenland and Antarctic ice sheets to multiple-century climatic warming. *Journal of Climate*, 1999, 12: 2169~2188.
- [11] Raper S C B, Braithwaite R J. Low sea level rise projections from mountain glaciers and icecaps under global warming. *Nature*, 2006, 439(7074): 311~313.
- [12] 郑大伟, 虞南华. 上海地区海平面上升趋势的长期预测研究. *中国科学院上海天文台年刊*, 1996, 17: 36~45.
- [13] 赵明才, 何嘉重. 中国近海海平面的上升及其预测. *测绘科学*, 1995, (1): 32~33.
- [14] 于道永. 中国沿岸现代海平面变化及未来趋势分析. *海洋预报*, 1996, 13(2): 43~49.
- [15] 张锦文, 王喜亭, 王惠. 未来中国沿海海平面上升趋势估计. *测绘通报*, 2001, (4): 4~5.
- [16] 张锦文, 杜碧兰. 中国黄海沿岸潮差的显著增大趋势. *海洋通报*, 2000, 19(1): 1~9.
- [17] 杜碧兰, 刘法孔, 张锦文. 威胁中国沿海脆弱区的海平面上升及预测. 见: 杜碧兰 主编. 海平面上升对中国沿海主要脆弱区的影响及对策. 北京: 海洋出版社, 1997.
- [18] 张锦文. 中国沿海海平面的上升预测模型. *海洋通报*, 1997, 16(4): 1~9.
- [19] 郑文振. 我国海平面年速率的分布和长周期大潮的变化. *海洋通报*, 1999, 18(4): 1~10.
- [20] 郑文振. 全球和我国近海验潮站及任意地点(区)的 21 世纪海平面预测. *海洋通报*, 1996, 15(6): 1~7.
- [21] 左军成, 陈宗镛, 周天华. 中国沿岸相对海面变化的本征分析和预测. *海洋与湖沼*, 1995, 26(3): 331~337.
- [22] 羊天柱, 应仁方, 张俊彪, 等. 浙江沿岸海平面研究和变化预测. *东海海洋*, 1999, 17 (4): 1~11.
- [23] 林继华, 刘序伊, 郭逢英, 等. 福建沿海的海面变化及其影响. *地壳形变与地震*, 1997, 17(4): 26~31.
- [24] 蒋国俊, 王宗涛. 浙江海面变化的灰色模型分析与预测. *海洋科学*, 1994, (3): 61~65.
- [25] 秦曾灏, 李永平. 上海海平面变化规律及其长期预测方法的初探. *海洋学报*, 1997, 19(1): 1~7.
- [26] 田晖, 周天华, 陈宗镛. 平均海平面变化的一种随机动态预测模型. *青岛海洋大学学报*, 1993, 23(1): 33~42.
- [27] 吴中鼎, 李占桥, 赵明才. 中国近海近 50 年海平面变化速度及预测. *海洋测绘*, 2003, 23(2): 17~19.
- [28] 马继瑞, 田素珍. 太平洋水位站相对海平面升降趋势分析. *海洋学报*, 1996, 18(5): 14~20.
- [29] 陈宗镛. 中国近海平均海面变化. 中国科学院院士咨询报告(总第 1 号). 北京: 科学出版社, 1994. 40~44.
- [30] 田素珍, 马继瑞. 海平面上升趋势数据的诊断及中国沿海海平面的上升趋势. *海洋通报*, 1995, 14(6): 13~18.
- [31] Spencer N E, Woodworth P L. Data holdings of the permanent service of mean sea level. *PSMSL Data Holdings*, 1993, 5: 1~81.
- [32] Cao Hongxing, Wei Fengying, Wang Yongzhong. Time series model of long-range prediction and its application. *Acta Met. Sic.*, 1990, 4(1): 120~127.
- [33] 刘长生, 曹鸿兴, 魏凤英. 隐含趋势气候序列的均生函数建模. *南京气象学院学报*, 1994, 17(3): 297~302.
- [34] 唐启义, 冯明光. DPS 数据处理系统——实验设计、统计分析及模型优化. 北京: 科学出版社, 2006. 880~882.
- [35] Ghil M, Allen M R, Dettinger M D, *et al.*, Advanced spectral methods for climatic time series. *Rev. Geophys.*, 2002, 40(1): 3. 1~3. 41.
- [36] Broomhead D S, King G P. Extracting qualitative dynamics from experimental data. *Phys. D*, 1986, 20: 217~236.
- [37] Solomon S, Qin D, Manning M, *et al.* (eds.). 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 (IPCC). Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007. 996.
- [38] 谢志仁. 中国海平面变化的预估. 见: 秦大河 主编. 中国气候与环境演变. 上卷: 气候与环境的演变及预测. 北京: 科学出版社, 2005. 536~542.

- [39] Cabanes C, Cazenave A, LeProvost C. Sea level rise during past 40 years determined from satellite and in situ observations. *Science*, 2001, 294: 840~842.
- [40] Church J A. How fast are sea levels rising? *Science*, 2001, 294: 802~803.

Long-term prediction and comparison of sea-level change based on the SSA and MGF model

YUAN Lin-wang, XIE Zhi-ren, YU Zhao-yuan

(Geo-Science School of Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China)

Abstract: Tide gauges and satellite altimetry are the two measurements techniques of present-day sea level change, and tide gauges provide sea-level variations with respect to the land on which they lie. The predictions of sea-level changes are affected by modeling, methods, data length, data quality and other factors, which cause the uncertainties of prediction. Based on the monthly average tidal records of six tidal gauge stations in East China since the 1950s, Mean Generation Function (MGF) and Singular Spectrum Analysis (SSA) are employed to discuss the stability of long-term prediction. MGF model is built with each station's initial data of over 20 years, and the subsequent data are used to undertake comparative multi-experiments and tests. As a result, these prediction experiments testify that MGF exhibits more favorable and steady long-term prediction. Therefore, based on SSA denoised series, the MGF model is used to predict the sea-level changes of each station on the monthly scale till the year 2050. All stations take on obvious fluctuated rising trend. The calculated annual mean series indicate that the upper limit of the fluctuated sea-level changes can be no more than 20 cm. The velocity of the sea-level changes show periodicity and fluctuant with prominent differences in the ascending and degressive segments accompanying with obviously spatial variation. Compared with the previous research findings, whose results are primarily done under linear hypothesis and may show limitation to some extent. Owing to the fluctuations and irregularities of sea-level changes, the prediction conclusion adopted by SSA and MGF methods are relatively comparable, and have favorable long-term prediction potential in terms of methodology and experimental results. Natural forcing, which is a combination with anthropogenic forcing plays an important role in the sea-level change, and there are still enormous uncertainties about sea-level change and its prediction. The integrated prediction system should be constructed with the consideration of multiple factors. Furthermore, comprehensive and comparative research is also needed.

Key words: sea-level change; prediction; singular spectrum analysis (SSA); mean generation function model (MGF)