

研究简报

中国沿岸相对海面变化的本征分析和预测*

左军成 陈宗镛 周天华

(青岛海洋大学海洋学系, 青岛 266003)

提要 利用经验正交函数的方法, 将平均海面分解为正交时、空函数积的代数和。采用起主导作用的正交函数进行组合, 得到修正的海平面变化值, 它消除了某些随机的影响。去掉平均海面主要时间本征函数中的主要周期部分, 求得剩余部分的变化率, 乘以空间本征函数可得各站平均海面的变化速率。对未来的时间本征函数作出预报, 便可得到未来的平均海面预报值。

关键词 相对平均海面 平均海面变化率 时间本征函数 空间本征函数

早在本世纪三四十年代国际上就有关于海平面的系统研究。Barnett (1984), Douglas (1991) 等人都曾就海平面变化问题进行过较深入的分析。在我国, 对海平面的系统研究仅仅是近十几年的事。尤芳湖等(1979)及于道永(1985)分别对不同的资料用线性方法对中国沿岸海面变化及成因作过研究。本文拟利用另一种方法——本征法研究中国沿岸海平面的变化。

1 海平面的分析原理

1.1 平均海面的求法 海平面的计算采用每小时潮位平均的方法, 因而年均海面包含了周期大于1年的分潮的绝大部分影响, 以及周期小于1年的某些分潮的部分影响。如 M_m 分潮的 1.7%, 交点分潮 99.5% 和近点分潮 97.9% 的影响等等。

1.2 本征分析原理 设 $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_p)'$ 代表 p 站平均海面的一 p 维随机变量。则 \mathbf{X} 的协方差阵 \mathbf{A} 为: $\mathbf{A} = E(\mathbf{X}\mathbf{X}')$ (1)

采用 Jacobi 方法求对称矩阵 \mathbf{A} 的特征根和特征向量。在求出各主成份后, 便可由主成份的定义: $\mathbf{Y} = \mathbf{L}'\mathbf{X}$, 得出海平面向量: $\mathbf{X} = \mathbf{L}\mathbf{Y}$ (2)

若前面 m 个主成份的贡献已满足给定的精度 (文中取 95%), 则可得 \mathbf{X} 对前 m 个主成份 Y_1, Y_2, \dots, Y_m 的回归方程:

$$\begin{cases} X_1 = a_{11}Y_1 + a_{12}Y_2 + \dots + a_{1m}Y_m \\ X_2 = a_{21}Y_1 + a_{22}Y_2 + \dots + a_{2m}Y_m \\ \dots \\ X_p = a_{p1}Y_1 + a_{p2}Y_2 + \dots + a_{pm}Y_m \end{cases} \quad (3)$$

* 国家自然科学基金资助项目, 9488007 号和中国科学院资助项目, 87—45—03 号。左军成, 男, 出生于 1965 年 7 月 3 日, 副教授, 博士。

收稿日期: 1993 年 7 月 26 日, 接受日期: 1994 年 9 月 1 日。

由于 Y_1, Y_2, \dots, Y_m 互不相关, 故而当主成份标准化时, 有: $a_{ij} = r(Y_j, X_i) = \sqrt{\lambda_j} L_{ji}$

$$\begin{cases} i = 1, 2, \dots, p \\ j = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (4)$$

其中, λ_j 是 X 协方差 A 的第 j 个特征根(由大到小排列), 而 L_{ji} 是对应于 λ_j 的特征向量(列向量)中的第 i 个元素。当主成份不是标准化时, 则有: $a_{ij} = L_{ji}$ 。

由于在短时间内空间本征函数 L 可认为不变, 因而只要预报了未来时刻的时间本征函数, 就可利用(3)式得到未来时刻海平面的预报值。

1.3 时间本征函数的预报 对某一时间本征函数 $Y_i = Y_i(t)$ (记为 $Y(t)$), 可分解为周期项 $P(t)$, 趋势项 $f(t)$ 和平稳随机项 $Y'(t)$:

$$Y(t) = P(t) + f(t) + Y'(t)$$

趋势项 $f(t)$ 用线性拟合, 即: $f(t) = a + bt$ (5)

去掉趋势项后, 对剩余部分进行功率谱分析, 求得主要周期 $T_k (k = 1, 2, \dots, m)$, 建立如下预报方程:

$$P(t) = a_0 + \sum_{k=1}^m \left[a_k \cos\left(\frac{2\pi t}{T_k}\right) + b_k \sin\left(\frac{2\pi t}{T_k}\right) \right] \quad (6)$$

由最小二乘法得出 a_0, a_k, b_k , 从而有下面预报方程:

$$Y(t) = f(t) + P(t) = a + bt + a_0 + \sum_{k=1}^m \left[a_k \cos\left(\frac{2\pi t}{T_k}\right) + b_k \sin\left(\frac{2\pi t}{T_k}\right) \right] \quad (7)$$

将时间本征函数的预报值代入方程(3)便可得到各站相对海平面的预报值。

2 结果和讨论

本文分析了多种不同的时段资料, 并着重对中国沿岸 12 个验潮站的 23 年实测同步资料¹⁾进行了本征分析。

2.1 由各站年均海平面的距平值(图 1)可知:

(1) 按相对海面的升降, 中国沿岸近海可划分为两大海区: 第一海区在北纬 36° 以北; 第二海区在北纬 36° 以南。当然这种区域的划分, 显著地受到区域性地壳升降的影响。

(2) 年均海平面近似呈同步变化。各站资料距平值的变化曲线均呈现 4 次明显的同步升降, 1954, 1960, 1964, 1975 年均出现极大值, 而在 1958, 1963, 1968, 1980 年均出现极小值。这说明, 尽管局地周围环境千差万别, 但中国沿岸相对海平面变化有其内在的主导的共同机制和起因。这些升降运动与同期中国沿海年降水量的变化有着一致性。表明降水对中国海平均海面变化起着不可忽视的作用。

2.2 本征分析的结果

(1) 12 个站资料的本征分析结果表明, 第一个时间本征函数呈锯齿状逐年上升(图 2), 将此本征函数的线性时间趋势乘上对应的空间本征函数便得到此本征值对应的年均海平面的线性趋势, 平均增率为 0.162cm/a , 此本征函数占总变化的 41%; 第二个时间本征函数呈锯齿状下降, 对应的平均线性增率为 -0.115cm/a , 占总变化的 35.7%。第三个

1) 根据国家海洋信息中心的潮位资料。

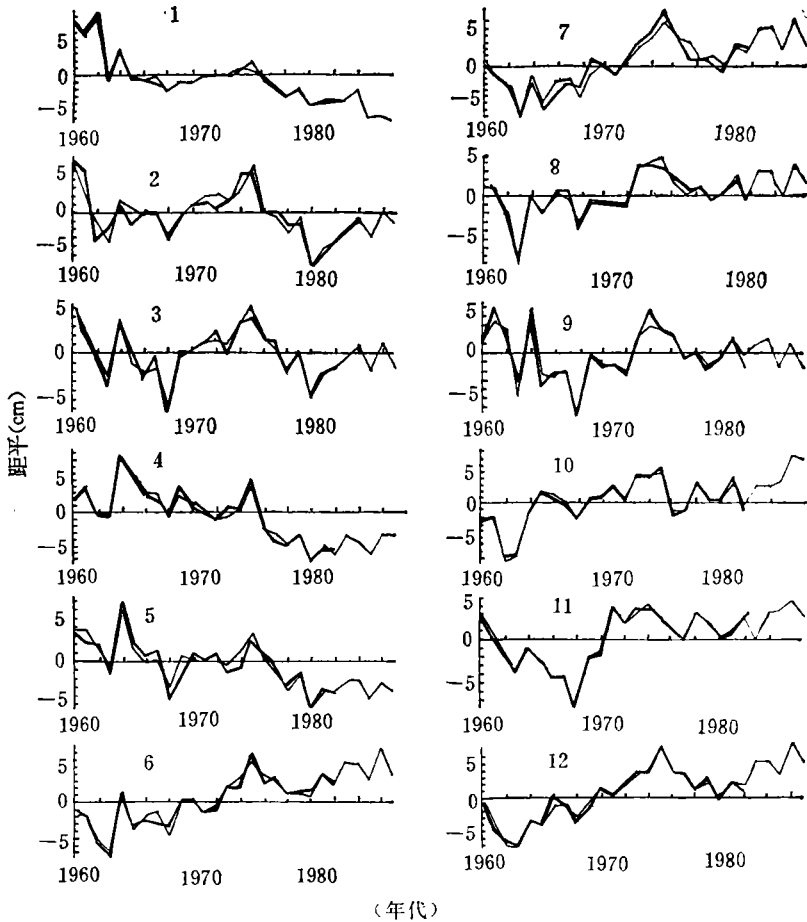


图 1 中国沿岸 12 个站年均海面距平值及预报值图

Fig. 1 The anomaly and predicted values of annual mean sea level at 12 gauge stations along the China coast

1. 葫芦岛; 2. 秦皇岛; 3. 龙口; 4. 烟台; 5. 青岛; 6. 连云港; 7. 长涂; 8. 坎门; 9. 厦门;
 10. 东山; 11. 闸坡; 12. 榆林。同图 3。粗线: 平均海面; 细线: 预报值。

本征函数没有明显的平均趋势。将起主导作用的前 6 个本征函数(占总贡献的 95%)对应的线性趋势迭加起来便得到各站年均海面的变化率,见表 1 和图 2。

(2) 从空间本征函数的数值看(图 3), 对应第一个本征函数的空间本征函数基本取正值,仅葫芦岛、烟台为很小的负值;第二个本征函数也基本取正,榆林、连云港和东山站略小于零。而这两个本征函数对应的变化占总变化的 76.7%。

(3) 对各时间本征函数作出预报,得到年均海平面的预报值(图 1)。可以看出,各测站从预报的第一年 1983 年起就一直处于回升阶段,在 1985 年存在一个低海面,到 1986 年仍在上升,这与实测资料是一致的。

(4) 基于 23 年的时间本征函数包含着某些共同的周期变化。除了一个具有资料长度的长周期变化外,一个主要的周期大约为 10 年,其次还有 5.5, 5.0, 3.5 年, 和 2.5 年不等。这些周期除天文潮影响外,还与大气、海洋的气候周期,以及某些天文因素(如地球自

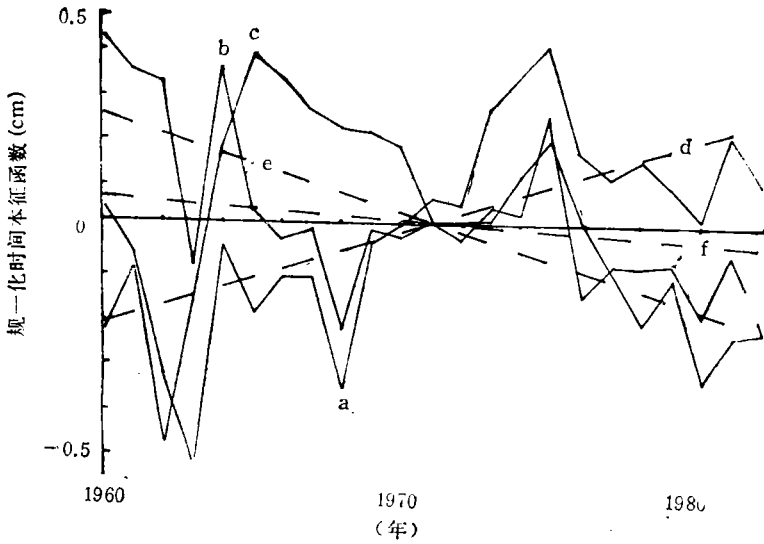


图 2 时间本征函数

Fig. 2 The temporal eigenfunction

a. 第一时间本征函数; b. 第二时间本函数; c. 第三时间本函数; d. 第一时间本征函数的线性拟合线; e. 第二时间本征函数的线性拟合线; f. 第三时间本征函数的线性拟合线。

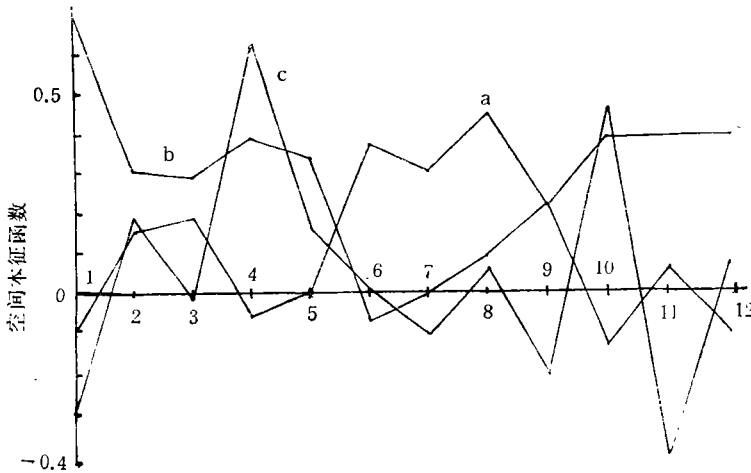


图 3 空间本征函数

Fig. 3 The spatial eigenfunction

a. 第一个空间本征函数; b. 第二个空间本征函数; c. 第三个空间本征函数。

转速率、太阳黑子等)有关。

3 年均海平面长期变化原因分析

从物质平衡的观点看,海平面是海水体积和洋盆容积的统一。大陆冰川消长、海水密度效应、径流等在几十年的时间尺度内,影响海水体积的变化。人为原因造成的局部地面升降是短期影响海盆容积的主要因素。另外,还有气象学、水文学和海洋学要素引起的“动力海面”变化,以及天体引潮力引起的“潮汐海面”变化。

表 1 各站年均相对海面变化率 (cm/a)

Tab. 1 Rates of relative sea level change of annual mean at 12 gauge stations along the China coast (cm/a)

线性增率	本 征 值 序 号							
	第一	第二	第三	第四	第五	第六	迭加	
测 站 名	葫芦岛	-0.065 0	-0.268 0	0.036 7	0.001 7	0.001 4	-0.019 0	-0.312
	秦皇岛	0.107 2	-0.249 0	-0.022 0	-0.007 0	0.003 8	-0.007 0	-0.173
	龙 口	0.134 0	-0.237 0	0.002 2	-0.004 0	0.002 4	0.011 4	-0.091
	烟 台	-0.046 0	-0.320 0	-0.076 0	0.000 6	-0.002 0	0.010 2	-0.433
	青 岛	0.001 7	-0.274 0	-0.019 0	-0.001 0	0.000 3	0.013 4	-0.278
	连云港	0.268 5	0.062 2	-0.000 0	0.003 9	0.003 8	0.015 8	0.354
	长 涂	0.216 5	0.005 2	0.013 5	0.001 8	0.005 4	0.002 1	0.245
	坎 门	0.326 2	-0.076 0	-0.007 0	0.008 3	-0.001 0	-0.016 0	0.235
	厦 门	0.152 1	-0.184 0	0.025 4	0.007 7	-0.006 0	0.014 7	0.011
	东 山	0.282 5	0.116 0	-0.155 0	-0.002 0	-0.007 0	-0.014 0	0.320
	闸 坡	0.281 0	-0.046 0	0.050 4	-0.009 0	-0.008 0	0.004 5	0.273
	榆 林	0.287 6	0.077 3	-0.008 0	-0.003 0	0.009 0	-0.002 0	0.361

本文仅就年均大气压力 (P)、年均气温 (T)、年降水量 (L)、年径流量 (R)、地球自转速率 ($\Delta\omega/\omega_0$) 和太阳黑子 (S) 等因子,对长江口吴淞站 1948—1972 年间的实测资料进行分析。

3.1 六因子与年均海平面的交叉谱分析(表 2) 地球自转速率与年均海平面的相干谱在地球自转速率变化的主周期 22.0 年附近接近 0.9; 位相谱在各频率上约为 180° 。太阳黑子与海平面的相干谱在太阳黑子变化的主周期 11.0 年附近较大(0.5), 其他频率上较小; 而相位谱在 11.0 年附近为 90° 。年均气压与年均海面的相干谱在年均气压的主变化周期 5.5 年和 2.2 年附近较大(>0.5); 相位谱在 5.5 年和 2.2 年附近接近 180° 。年均气温与年均海平面的相干谱在周期 5 年附近较大(0.5); 而其位相谱在年均气温的主周期 7.33 年附近接近 0° 。年降水量与年均海平面的相干谱在周期 11.0, 4.4 和 2.44 年附近较大(0.4); 相位谱在一切频率上为 0° 。年径流量与年均海平面的相干谱在周期 7.33 年附近小外,其它一切频率上都较大(0.8); 相位谱为 0° 。

表 2 年均海面及六个因子变化的主周期 (a)

Tab.2 the principal periods of annual mean sea level and six factors (a)

周期	海平面	大气压力	大气温度	降水量	径流量	地转速率	太阳黑子
第一	22.0	5.5	7.3	2.8	11.0	22.0	11.0
第二	5.5	3.1	2.4	7.3	2.2		
第三	2.4	2.2			3.1		

3.2 六因子与海平面的回归 对六个因子与海平面进行相关分析,除气压呈反相关外,其它皆为正相关(见表 3)。最大者是降水量,其余依次是径流量、大气压力、大气温度,和地球自转速率。

取显著水平 $\alpha = 0.05$, 对回归系数进行显著性检验,得到如下的回归关系式:

表 3 各因子与年均海面的相关系数

Tab. 3 the coefficients between six factors and annual mean sea level

相关系数	因 素 名 称					
	大气压力	大气温度	降水量	径流量	地转速率	太阳黑子
ν	-0.517	0.334	0.587	0.578	0.248	0.0664

$$SL = 5.603T + 0.013L + 0.0023R - 0.054(\Delta w/w_0)$$

从上式得出,线性相关程度大的因子未必在回归方程中出现,这还取决于因子的变化幅度。

4 结论

4.1 近 20 年来, 中国沿海各海区年均相对海平面的变化具有相似的近似呈同步的波动式变化。按年均相对海平面的变化性质, 就本文所选验潮站而言, 整个中国海区可划分为南北二海区, 分界点在北纬 36° 附近。北海区年均相对海面的平均上升速率为 -0.258cm/a ; 南海区平均增率为 0.257cm/a 。

4.2 海平面变化趋势的性质和大小与时间区域有着直接的关系。对同一地点, 不同时间段的升降性质会有较大的差别。

4.3 从预报结果看, 各海区的相对海面从预报的第一年 1983 年起就一直处于回升阶段, 在 1985 年出现一个低海面, 到 1986 年回升结束, 尔后开始下降, 这与观测资料基本一致。

4.4 影响海平面变化的因子众多。由吴淞站资料¹⁾的分析结果看, 降水量、径流量、气温, 以及地球自转速率等是影响海平面变化的重要因子。地球自转速率和海平面的变化互为因果关系, 互相制约。

参 考 文 献

- 尤芳湖、宋政修, 1979, 我国沿岸平均海平面的变动问题, 海洋湖沼通讯, 2: 18—21。
 于道永, 1985, 近二十年来中国海面变化趋势初步分析, 中国海平面变化, 海洋出版社, (北京) pp. 226—236。
 Barnett, T.P., 1984, The Estimation of Global Sea level Change, Problem of Uniqueness, *J. Geophys. Res.*, 89(Cr): 7980—7988。
 Douglas, B. C., 1991, Global sea level rise, *J. Geophys. Res.*, 96(c4):6981—6992。

1) 根据上海航道局的潮位资料

EIGENANALYSIS AND PREDICTION OF RELATIVE SEALEVEL CHANGES ALONG THE CHINA COAST

Zuo Juncheng, Chen Zongyong, Zhou Tianhua

(Oceanography Department, Ocean University of Qingdao, Qingdao 266003)

ABSTRACT

The empirical orthogonal function method is used to decompose the annual mean relative sea level into the algebraic sum of the product of the spatial orthogonal functions and the temporal eigenfunctions. The revised value of the sea level value can be obtained by recomposing the principal eigenfunctions, i.e.,

$$\begin{cases} X_1 = a_{11}Y_1 + a_{12}Y_2 + \cdots + a_{1m}Y_m \\ X_2 = a_{21}Y_1 + a_{22}Y_2 + \cdots + a_{2m}Y_m, \\ \cdots \\ X_p = a_{p1}Y_1 + a_{p2}Y_2 + \cdots + a_{pm}Y_m \end{cases}$$

during which some random effects are removed. Every temporal eigenfunction can be decomposed into the algebraic sum of the linear variation part and the periodic variation part:

$$Y(t) = f(t) + P(t) = a + bt + a_0 + \sum_{k=1}^m \left[a_k \cos\left(\frac{2\pi t}{T_k}\right) + b_k \sin\left(\frac{2\pi t}{T_k}\right) \right].$$

After removing the principal periodic part from the principal temporal eigenfunctions, the residual part variation rates can be obtained for multiplication with every principal spatial function to the variation rates of relative sea level. The future sea level can be predicted.

Key words Relative mean sea level Rates of mean sea level Temporal eigenfunction Spatial eigenfunction