

我国沿海若干验潮站的 19 年潮汐分析

黄祖珂^① 陈宗镛^① 司鸿业^① 叶琳^②

(^①青岛海洋大学, 青岛 266003; ^②国家海洋环境预报中心, 北京 100081)

摘要 对我国沿海葫芦岛、秦皇岛、坎门 3 个验潮站进行了 19 年潮汐总体分析, 计算了分辨率 $\Delta\sigma \geq 0.0022^\circ/\text{h}$ 的 472 个分潮的振幅和位相; 依据得到的交点潮、近点潮和极潮对平均海面的超长周期性变化进行了预测; 还对以上 3 站及塘沽、龙口等站进行了 19 年的逐年潮汐分析, 从天文因素、非线性效应及海底地形变迁等方面的影响探讨逐年潮汐分析的稳定性.

关键词 潮汐分析 19 年潮汐分析 平均海面.

月、日引潮势是天文变量 τ, S, h, P, N' 和 P_1 的周期函数. Doodson^[1] 依据 Brown 的轨道参数对引潮势进行了调和展开, Cartwright 等^[2,3] 对引潮势作了谱展开. 通常 1 年潮汐资料的调和分析是将引潮势展开中 τ, S, h 相同的若干分潮合并成 1 个分潮. 若将引潮势展开中所有的分潮从实际资料中都分析出来, 需要 19 年的资料. 然而由于这一工作的计算量太大, 至今国际上仅对几个港口进行了分析计算. Amin^[4] 考虑到进行 18.61 年逐时资料总体分析的困难性, 他首先将 Southend 站(英国)19 年的资料通过滤波分成各族, 再依每族的潮位值分析各族所属的分潮. Foreman 等人^[5] 对 Victoria 站(加拿大)长时间序列的潮汐资料进行了分析.

1 19 年潮汐总体分析

19 年是月球和太阳的冲合周期, 19 个回归年是 6 939.60 d, 235 个朔望月是 6 939.69 d, 254 个回归月是 6 939.71 d, 而且 19 年又接近月球升交点西退 1 周 18.61 年的周期, 因而取连续 19 年(6 940 d)的逐时潮汐资料进行分析, 不仅分辨率高, 而且分析的结果稳定正确.

分析的 472 个分潮包括 Doodson 展开中绝大部分分潮, 以及 100 多个浅水分潮和若干天文-气象分潮, 还有太阳辐射分潮. 以最小二乘法分析^[6].

资料的取样间隔 $\Delta t = 1 \text{ h}$, $t \in [-N, N]$, $N = 83\,280$, 分辨率 $\Delta\sigma \geq 0.0022^\circ/\text{h}$. 求解的迭代精度为 0.01 cm.

对葫芦岛、秦皇岛和坎门 3 站 1960~1978 共 19 年的逐时资料进行总体分析, 表 1 列出了葫芦岛和坎门站 5 个长周期分潮和日族及半日族各 4 个分潮群的分潮的调和常数. 表 1 日族中具有 B 值的分潮是具有 $(\bar{D}/D)^3$ 项的引潮势展开的分潮, 具有 A 值的分潮是具有 $(\bar{D}/D)^4$ 项的引潮势展开的分潮, 它们的 A, B 值显示出平衡潮分潮的大小. 半日族 A, B 值的含意与

日族相反。计算表明:(1)在1年分析中的1个分潮在19年分析中可以分析出一群分潮,而其中有许多次要分潮具有相当大的振幅。(2)在1年分析中有些天文分潮受到与其频率相同或相近的浅水分潮的影响而不能分离,在19年分析中可以将它们严格地分离开,以便研究非线性效应的影响。例如天文分潮 $2N_2$ (235.755) 与浅水分潮 O_2 (235.555) 的角速度差为 $0.0093^\circ/\text{h}$, 19年的分析表明,两者具有同一量级的振幅。(3)在1年分析中计算 f, u 时,不考虑具有 $(\bar{D}/D)^4$ 项的引潮势展开分潮的影响,而通过19年的分析可以计算 $(\bar{D}/D)^4$ 项各分潮的量值并使之参与计算 f, u , 使得1年分析的结果稳定正确,特别是对于 L_2 等分潮更显得重要。(4)在同一分潮群内振幅较大各分潮的迟角(g)相接近,例如坎门 K_1 分潮群内,分潮 (165.565) 的 $H=29.99\text{ cm}$, (165.565) 的 $H=4.02\text{ cm}$, 两者的迟角差仅为 0.67° 。 O_1 分潮群内, (145.545) 与 (145.555) 的迟角差为 0.85° 。(5)各主要分潮19年中每年 H, g 的算术平均值等于19年总体分析的结果。

2 平均海面的长周期变化

平均海面不仅具有年周期变化,还具有更长周期的变化,以及由于大气温室效应引起的平均海面缓慢地增长趋势,还有由于地壳升降对平均海面变化的反映。本文着重探讨平均海面的长周期变化规律。

引潮势展开中,大于1年的长周期分潮有周期为18.61年的交点潮(055.565), 9.31年的半交点潮(055.575), 8.85年的近点潮(055.655), 以及由于地轴扰动引起的周期为430d的极潮(056.45X)。由于半交点潮和近点潮的角速度差仅为 $0.00023^\circ/\text{h}$, 即便是19年的分析也不能将两者分离开。考虑到近点潮的平衡潮振幅 $(0.00026 \times 1.11803 G \sin \varphi (3 - 5 \sin^2 \varphi))$ 大于半交点潮的振幅 $(0.00064 \times 0.5 G (1 - 3 \sin^2 \varphi))$, 因而取近点潮进行分析。分析的结果见表1, 葫芦岛的交点潮振幅为4.51 cm, 坎门为3.38 cm, 说明月球升交点在18.61年西退1周过程中所引起的葫芦岛平均海面的变化为9 cm, 坎门将近有7 cm。这是一个不容忽视的量值, 在探讨平均海面的增高趋势时, 应消除掉平均海面的长周期变化部分。表1还表明近点潮的振幅小于交点潮的振幅。葫芦岛、坎门极潮的振幅分别为1.44 cm 和 1.58 cm, 它们对平均海面的长周期的变化也有一定的影响。表1还显示坎门的交点潮、近点潮、极潮以及年周期的 S_a 分潮(056.554) 的迟角大于葫芦岛相应分潮的迟角, 这一现象表明在中国海存在着长周期和超长周期的潮波。

本文依据交点潮、近点潮预测了平均海面的长周期变化, 从1960~1978年实测与预测的平均海面来看, 两者拟合是相当好的。需要说明的是, 本文仅仅是对平均海面周期性变化部分的预测, 实际的平均海面还受到大气增温引起的平均海面的增高, 地壳升降对平均海面的反映, 以及实际观测中人为因素造成水尺零点的变动。因而对平均海面变化的预报是1件更为困难的工作, 这正是世界各国努力探求的1个问题。

表 1 19 年分析的部分分潮的调和常数

幅角数	A	B	葫芦岛		坎门	
			H/cm	g/(°)	H/cm	g/(°)
055.565	- 6 556		4.51	276.36	3.38	288.98
055.655		26	1.89	82.97	0.60	109.98
056.45X	-		1.44	214.27	1.58	268.90
056.554	1 156		31.39	199.27	12.51	259.15
057.355	7 281		2.17	334.54	4.20	50.57
135.435		- 28	0.14	242.92	0.02	196.10
135.545	- 84		0.18	216.68	0.08	320.93
135.555	- 211		0.03	5.70	0.07	2.43
135.645		1 360	1.05	19.77	0.87	162.49
135.655		7 216	5.09	27.40	4.43	160.58
135.755	- 13		0.16	327.65	0.04	248.69
135.855		- 20	0.07	143.83	0.06	182.84
145.535		- 218	0.33	45.90	0.11	172.33
145.545		7 106	5.64	58.76	4.36	182.15
145.555		37 694	27.63	55.20	22.93	181.30
145.645	16		0.30	285.34	0.10	259.25
145.655	- 108		0.22	87.46	0.08	73.51
145.665	14		0.17	30.15	0.03	258.55
145.755		- 243	0.40	89.21	0.21	213.96
145.765		- 39	0.27	269.15	0.07	132.39
163.535		14	0.08	120.71	0.04	60.68
163.545		- 197	0.30	85.57	0.25	196.96
163.555		17 543	9.83	94.90	9.24	215.99
163.755		- 26	0.35	168.26	0.02	105.76
165.455	- 36		0.26	95.52	0.04	358.50
165.545		1 050	0.41	59.59	0.60	231.32
165.555		- 53 011	37.21	104.77	29.99	219.17
165.565		- 7 186	4.96	98.04	4.02	218.50
165.575		155	0.11	354.71	0.12	236.67
245.435	- 67		0.11	40.10	0.22	190.55
245.545		- 97	0.04	344.45	0.20	124.11
245.555		- 569	0.68	37.69	1.09	141.07
245.645	- 649		0.42	114.34	1.10	228.09
245.655	17 387		17.44	113.88	34.76	233.82
245.755		11	0.11	36.07	0.12	326.00
255.535	47		0.71	6.53	0.69	254.45
255.545	- 3 390		2.82	143.41	6.65	249.22
255.555	90 809		95.58	149.96	187.21	255.62
255.655		86	0.64	102.16	0.45	269.11
255.665		16	0.32	216.82	0.29	147.18
255.755	53		0.51	48.39	0.32	335.02
255.765	19		0.65	278.12	0.44	65.34
273.545	95		0.61	233.55	0.43	347.99
273.555	42 248		25.97	209.28	67.72	295.73
275.455		29	0.14	63.65	0.03	279.61
275.545	- 147		0.20	194.19	0.38	255.24
275.555	11 498		8.33	215.29	18.73	292.63
275.565	3 426		2.45	209.58	5.82	291.52
275.575	372		0.26	214.14	0.61	298.22

3 1年潮汐资料分析的稳定性

为了探讨潮汐1年资料分析的稳定性,对葫芦岛、秦皇岛、塘沽、龙口和坎门1960~1978年逐年的潮汐进行了分析,求得各站每年的170个分潮的调和常数. 分析的分辨率 $\Delta\sigma \geq 0.041^\circ/\text{h}$. 图1给出了葫芦岛8个主要分潮调和常数的逐年变化图. 分析表明 K_1, O_1, S_2 等分潮的调和常数相当稳定,而 $Q_1, S_1, 2Q_1, L_2, N_2, M_2, 2N_2$ 等分潮不稳定. 本文从天文因素、非线性效应和海底地形的变迁等方面探讨造成不稳定的原因.

3.1 天文因子的影响

月球引潮势

$$V = G \sum_{n=2}^{\infty} \frac{4}{3} \left(\frac{a}{\bar{D}} \right)^{n-2} \left(\frac{\bar{D}}{D} \right)^{n+1} P_n(\cos\Theta)$$

对 Legendre 多项式作球函数展开

$$P_n(\cos\Theta) = \frac{4\pi}{2N+1} K \sum_{m=0}^n [U_n^m(Z, L) U_n^m(\theta, \lambda) + V_n^m(Z, L) V_n^m(\theta, \lambda)],$$

$$m=0, K=1; m \neq 0, K=2,$$

式中, θ, λ 是观测点余纬度和陆地东径; Z, L 是月球的余赤纬和陆地东径. 以观测点子午线作为月球经度的起算点, 那么

$$P_n(\cos\Theta) = \frac{4\pi}{2N+1} K \sum_{m=0}^n [U_n^m(Z, -T_1) U_n^m(\theta, 0) + V_n^m(Z, -T_1) V_n^m(\theta, 0)] =$$

$$K \sum_{m=0}^n \frac{(n-m)!}{(n+m)!} P_n^m(\cos Z) P_n^m(\cos\theta) \cos m T_1$$

式中 T_1 为月球时角, $P_n^m()$ 为带合 Legendre 函数. $n=2$ 和 $n=3$ 的月球引潮势为

$$V_2 = G \frac{4}{3} \left(\frac{\bar{D}}{D} \right)^3 K \sum_{m=0}^2 \frac{(2-m)!}{(2+m)!} P_2^m(\cos Z) P_2^m(\sin\varphi) \cos m T_1, \quad (1)$$

$$V_3 = G \left(\frac{\bar{D}}{D} \right)^4 \left(\frac{a}{\bar{D}} \right) K \sum_{m=0}^3 \frac{(3-m)!}{(3+m)!} P_3^m(\cos Z) P_3^m(\sin\varphi) \cos m T_1, \quad (2)$$

对引潮势展开的结果可以归纳为

$$V = \sum_{m=0,2} [G_2^m(\varphi) \sum_i A_2^i \cos\theta_i + G_3^m(\varphi) \sum_j B_3^j \sin\theta_j] +$$

$$\sum_{m=1,3} [G_2^m(\varphi) \sum_i B_2^i \sin\theta_i + G_3^m(\varphi) \sum_j A_3^j \cos\theta_j]. \quad (3)$$

式中 A_2, B_2 为 V_2 引潮势展开后各分潮平衡潮系数; A_3, B_3 为 V_3 各分潮的平衡潮系数; $\theta = n_0\tau + n_1s + n_2h + n_3p + n_4N' + n_5p_1 + \Delta$ 是各分潮的位相.

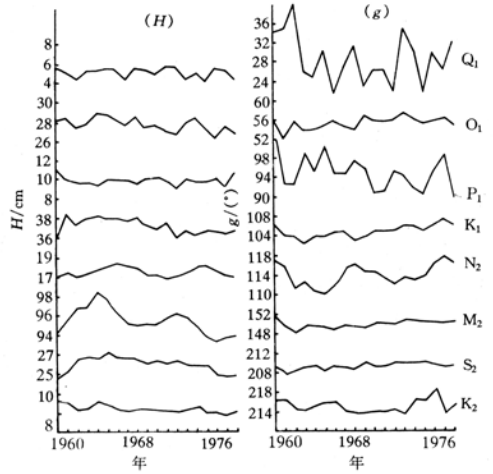


图1 葫芦岛的 H, g 逐年变化图

1 年潮汐分析应满足分辨率 $\Delta\sigma \geq 0.041^\circ/\text{h}$, 需将 τ, s, h 相同的各个分潮合并为 1 个分潮, 以半日分潮为例, 合并的公式为

$$\cos(v - g) + \sum_i A_2^i \cos(v + \theta_i - g_i) + \sum_j \frac{G_3^2(\varphi)}{G_2^2(\varphi)} B_3^j \sin(v + \theta_j - g_j) = f \cos(v + u - g)$$

Doodson 假定在各个分潮中地理因子相同的各分潮的迟角相等, 不同地理因子的分潮迟角不相等, 因而以往在计算各分潮的 f, u 时, 去掉了 V_3 各分潮的影响, 即略去了上式等号左边第 3 项并假定前 2 项各分潮的迟角相等. 文献[7]依此导出了各分潮的 j, v 值(即 f, u). 从 19 年潮汐总体分析的结果来看, 虽然各群分潮中角速度相接近的主要分潮的迟角相差很小, 但并不相等, 而且有些分潮群中 V_3 分潮具有不可忽视的影响, 略掉它们就会带来一定的误差. 从葫芦岛至海南岛 $G_3^2(\varphi)/G_2^2(\varphi)$ 之值由 1.70 变化至 0.76, $G_3^1(\varphi)/G_2^1(\varphi)$ 由 -0.64 变到 0.71. 日族中大多数 V_3 分潮的 A_3^1 值远小于 V_2 分潮的 B_2^1 值, 只有 M_1, θ_1 的 A 值较大, 因而 $A_3^1 G_3^1(\varphi)/G_2^1(\varphi)$ 之值普遍很小, 略掉 V_3 分潮的影响对于计算日分潮的 f, u 造成的误差很小. 对日族中大部分分潮, 只要不再受到其他因素的影响, 它们的调和常数是稳定的, 实际计算结果证实了这一点. 然而半日族中, V_3 对有的分潮的影响较大, 特别是 L_2 分潮, 对于坎门站 L_2 群中 V_3 的(265.555)分潮与 V_2 的(265.455)分潮平衡潮振幅之比 $\frac{B_3^2 G_3^2(\varphi)}{A_2^2 G_2^2(\varphi)} = 0.25$, 说明 V_3 对 L_2 分潮具有 25% 左右的影响, 由此造成了 L_2 分潮的调和常数不稳定. 坎门站按以往去掉 V_3 的影响计算的 L_2 分潮的调和常数, 显示出调和常数很不稳定. 若考虑到 V_3 的影响并代入 19 年总体分析得到的 L_2 群各分潮的迟角, 再以实际的 H 值代替平衡潮的系数, 得到的 L_2 分潮调和常数就相当稳定了. V_3 对 M_2 等分潮的影响很小可以忽略不计, 它之所以不稳定是由其他因素引起的. $\chi_1, \pi_1, P_1, S_1, \Psi_1, \varphi_1, SO_1, KQ_1, \lambda_2, T_2, S_2, R_2, K_2$ 等分潮不受 V_3 的影响, 因而这些分潮的调和常数是稳定的.

3.2 非线性效应的影响

由于浅水非线性效应产生一系列浅水分潮, 其中部分浅水分潮的频率与天文分潮相同或接近, 但其振幅和位相不同. 在 1 年潮汐分析中, 不能将 $\Delta\sigma < 0.041^\circ/\text{h}$ 的分潮分离开, 这将造成每年计算的调和常数不稳定, 特别是那些天文分潮较小而影响它的浅水分潮较大的情况就更为严重. $2Q_1$ 与 $2OK_1, \rho_1$ 与 NP_1, M_1 与 $2OQ_1, 2N_2$ 与 O_2 及 $2MK_2$ 的角速度差为 $0.00928^\circ/\text{h}$, 在 1 年分析中, 若取天文分潮 $2Q_1, \rho_1, M_1, 2N_2$ 作为分析的分潮, 那么浅水分潮 $2OK_1, NP_1, 2OQ_1, O_2$ 及 $2MK_2$ 将对相应的天文分潮产生干扰, 使得 $2Q_1, \rho_1, M_1, 2N_2$ 的迟角 g 具有 4.42 年的周期性变化. 图 2 绘出了坎门和葫芦岛两站 $2Q_1$ 分潮迟角 g 的逐年变化图. 葫芦岛地处辽东湾的顶端, 非线性效应明显, 因而造成了 $2Q_1$ 分潮 g 具有明显的 4.42 年

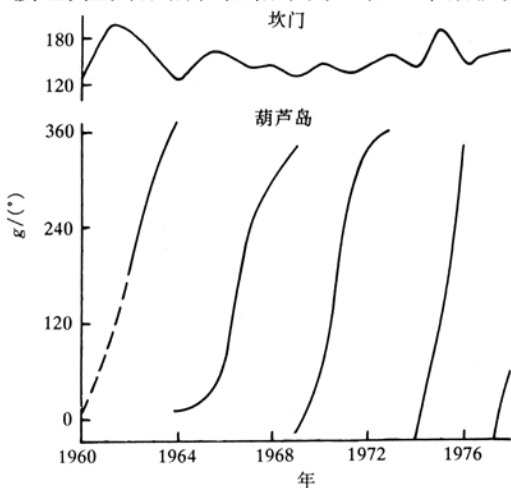


图 2 $2Q_1$ 迟角(g)的逐年变化图

的周期性变化,在19年中变化了4个多周期。而坎门地处浙江沿岸,浅水效应相对小些,因而 $2Q_1$ 的迟角 g 相对稳定。葫芦岛 $M_1, 2N_2$ 的 g 也有4.42年的周期变化。 ρ_1 的周期性变化较不明显,这是由于影响它的浅水分潮 NP_1 的量值较小的缘故。以上各分潮在19年分析中均能严格地分离开。 M_2 分潮不稳定的原因是由于与 M_2 频率相同的 KO_2 浅水分潮对其影响所造成的。

3.3 海底地形变迁的影响

图3显示,龙口、秦皇岛 M_2 的迟角 g 具有明显的趋势项变化。龙口的 M_2 迟角除了具有19年的周期性变化外,还每年大约增加0.7度, S_2 等半日分潮的迟角也有相同的变化情况。秦皇岛 M_2, S_2 的迟角从1964年以来也具有明显的趋势项变化。文献[8]讨论了黄河三角洲外延使得渤海南部的半日潮波发生的变化。从30年代和现代的潮波图来看,渤海南部 M_2, S_2 的振幅变化较小,但同潮时线的分布发生了很大的变化。龙口半日分潮迟角的缓慢变化证实了黄河三角洲的扩展对莱州湾潮波的影响。黄河三角洲外延对日分潮的潮波影响较小,因而逐年分析的 K_1, O_1 的迟角变化不大。渤海潮波图还显示,秦皇岛外的 M_2 无潮点有沿着海岸向南移动的趋势,秦皇岛靠近无潮点,它的南移使得秦皇岛 M_2, S_2 分潮的迟角呈现逐年增加的趋势。

除了以上诸因素能够影响潮汐分析的稳定性外,气象因素也有一定的影响。图3中秦皇岛的虚线表示在逐年分析时,对于逐时的回报差值大于40 cm者,以回报值代替实测值再行分析的结果。图中显示虽然气象因素对稳定性有一定的影响,但影响不大。

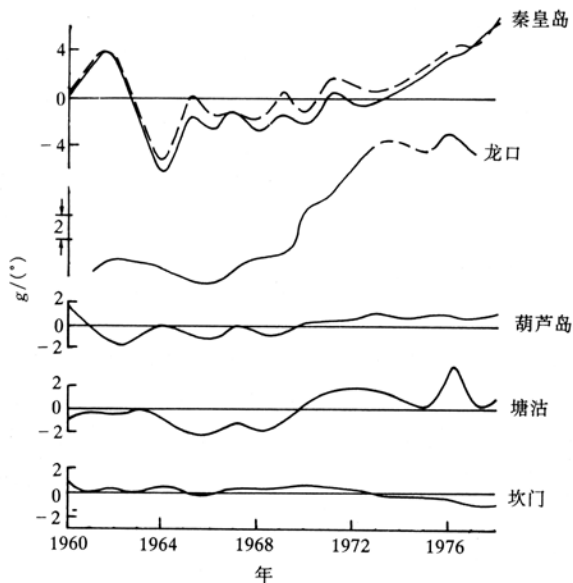


图3 M_2 分潮迟角(g)的逐年变化图

参 考 文 献

- 1 Doodson A T. The harmonic development of the tide-generating potential. Proc Roy Soc, London, 1921, Series A 100:305~329; Intern Hydrogr Rev, 1954, 31 (1): 37~61
- 2 Cartwright D E, Tyler R J. New computations of the tide-generating potential. Geophys J R astr Soc, 1971, 23: 45~74
- 3 Cartwright D E, Edden A C. Corrected tables of tidal harmonics. Geophys J R astr Soc, 1973, 33: 253~264
- 4 Amin M. The fine resolution of tidal harmonics. Geophys J R astr Soc, 1976, 44: 293~310
- 5 Foreman M G G, Neufeld E T. Harmonic tidal analyses of long time series. Intern Hydrogr Rev, 1991, LXVIII (1): 85~108
- 6 Van Ette A C M, Schoemaker H J. Harmonic analyses of tides-essential features and disturbing influences. Proceedings of the Symposium on Tides Organized by the International Hydrographic Bureau, Monaco, 28~29 April, 1967. 79~107
- 7 Chen Zongyong, Huang Zuke, Zhou Tianhua, et al. A j, v model for the analysis and prediction of tides. Acta Oceanologica Sinica, 1990, 9(4): 175~186
- 8 黄祖珂. 渤海的潮波系统及其变迁. 青岛海洋大学学报, 1991, 21(2): 2~12