

极移效应与地球自转参数潮汐效应计算

与地球自转相关的离心力位使地球发生形变。地球瞬时旋转矢量的任何变化都伴随着相关离心力位的变化，而离心力位的变化又引起固体地球形变，进一步产生附加位。地球瞬时旋转向量的变化可分解为瞬时旋转矢量的自转速率变化和瞬时极点位置变化，前者为自转速率变化，后者为极移。相对于由极移引起的固体地球形变，由自转速率变化引起的地球形变要小得多。空间大地测量观测，在移去固体潮、海潮和大气潮负荷潮效应后，可用于精确测定地球自转形变。因此，一般情况下，地球自转形变产品并不包含地球潮汐效应，主要性质是非潮汐地球形变。

地球重力场模型中的 2 阶 1 次位系数 \bar{C}_{21} 和 \bar{S}_{21} 代表了地球自转形状轴的位置。地球形状轴的多年平均值应与地极的同期平均位置重合，其差异可能来源于大气、海洋或流体地核的长期运动 (Wahr, 1987; 1990)。

8.2.1 地球外部全要素大地测量极移效应

地球极移主要由瞬时极点的位置相对于平均自转极点 (通常为天球中间极) 的两个谐波变化构成，即以年为周期的椭圆运动和以 14 个月为周期的几乎圆周运动。这些极移的谐波变化引起的形变与由日月引潮位引起的形变以相同的方式确定。14 个月变化是地球的一种自由模态，简称钱德勒摆动，振幅随时间变化，其激发源主要来源于大气和海洋过程。与同固体潮形变是天体引潮位经勒夫数作用后的固体地球形变一样，固体地球中的极移形变通过将经典的勒夫数理论应用于极移离心力位得到。

8.2.1.1 地球自转参数与极移离心力位

在地球上定义一个地固旋转坐标系，使得平均自转轴与坐标系的 Z 轴初始对准。在该地固坐标系中，初始平均自转矢量 ω_0 的形式为：

$$\omega_0 = [0 \quad 0 \quad \omega_0] \quad (2.1)$$

式中： ω_0 是地球的平均自转速率。

$$\text{令瞬时自转矢量 } \omega(t) = \omega[m_1(t) \quad m_2(t) \quad 1 + m_3(t)] \quad (2.2)$$

其中，参数 $m_i(t) \ll 1$ 均为小的时变量。参数 $m_1(t)$ 和 $m_2(t)$ 用于描述地球极移，分别瞬时自转矢量在 X 轴和 Y 轴方向上相对于 Z 轴的角度偏移量； $m_3(t)$ 用于表示地球自转速率变化； (m_1, m_2, m_3) 称为地球自转参数 (ERP)。

任意点处 $r(x, y, z)$ 的瞬时离心力位 $V_c(x, y, z)$ 可表示为

$$V_c(x, y, z) = \frac{1}{2} [\omega^2 r^2 - (\omega \cdot r)^2] = \frac{\omega^2}{2} [(1 + 2m_3)(x^2 + y^2) - 2z(xm_1 + ym_2)] \quad (2.3)$$

将瞬时离心力位分解为对应于初始平均自转矢量的离心力位 $V_{0,c}(x, y, z)$ 和瞬时自转旋转向量相对于初始平均旋转向量的瞬时离心力位变化量 $V(x, y, z, t)$ 。

$$V_{0,c}(x, y, z) = \frac{\omega^2}{2} (x^2 + y^2), \quad V_c(x, y, z, t) = \omega^2 [m_3(x^2 + y^2) - z(xm_1 + ym_2)] \quad (2.4)$$

自转速率 m_3 的变化导致径向形变一般低于毫米级，比极移(m_1, m_2)的径向形变效应要小两个数量级。因此， $m_3(t)$ 对离心力位变化量 $V_c(x, y, z, t)$ 的贡献可以忽略，这样， $V_c(x, y, z, t)$ 仅是极移(m_1, m_2)的函数。离心力位变化量 $V_c(x, y, z, t)$ 也称为极移离心力位。在球坐标系中表示 (2.4) 式，则任意点(r, θ, λ)处极移离心力位为：

$$V_c(r, \theta, \lambda, t) = \left(\frac{8\pi}{15}\right)^{\frac{1}{2}} \omega^2 a^2 \text{Re}[m^*(t) \bar{P}_{21}(\cos\theta) e^{i\lambda}] = -\frac{\omega^2 r^2}{2} \sin 2\theta \text{Re}(m^* e^{i\lambda}) \quad (2.5)$$

式中： $m = m_1 + im_2$ 是用复数表示的地球极移参数， $m^* = m_1 - im_2$ 为 m 的复共轭； $\left(\frac{8\pi}{15}\right)^{1/2}$ 来源于对勒让德函数 P_{21} 归一化系数， $\bar{P}_{21}(\cos\theta) = -\frac{1}{2} \left(\frac{15}{8\pi}\right)^{1/2} \sin 2\theta$ ； $e^{i\lambda} = \cos\lambda + i\sin\lambda$ ； $\text{Re}(\cdot)$ 表示取实部。

8.2.1.2 地球外部要素的极移效应算法

地球重力场模型中的 2 阶 1 次位系数 \bar{C}_{21} 和 \bar{S}_{21} 代表了地球自转形状轴的位置。地球形状轴的多年平均值应与地极的同期平均位置重合，其差异可能来源于大气、海洋或流体地核的长期运动 (Wahr, 1987; 1990)。

极移离心力位引起固体地球形变，产生附加位，即极移对重力位的间接影响，用 2 阶位勒夫数 k_2 表征为：

$$V_c^a(r, \theta, \lambda, t) = k_2 V_c(r, \theta, \lambda, t) = -\frac{\omega^2 r^2}{2} k_2 \sin 2\theta \text{Re}(m^*(t) e^{i\lambda}) \quad (2.6)$$

地球外部重力位的极移效应，等于极移对地球外部重力位的总影响，即极移离心力位的直接影响与间接影响之和：

$$V_p(r, \theta, \lambda, t) = (1 + k_2) V_c = -\frac{\omega^2 r^2}{2} (1 + k_2) \sin 2\theta \text{Re}(m^*(t) e^{i\lambda}) \quad (2.7)$$

类似于体潮效应算法，由 2 阶体潮勒夫数 k_2, h_2, l_2 和极移离心力位 $V_c(r, \theta, \lambda, t)$ ，可导出地面及固体地球外部各种大地测量要素的极移效应算法。

若顾及地幔的粘滞性，则离心力位产生的极移效应会出现一个小的相位延迟，体潮勒夫数变成复数形式。在年周期和 Chandler 摆动周期，地幔滞弹性会使径向体极潮效应放大 4~6%，并导致 0.6°~0.7°的相位滞后 (15°=1h)。

地面或固体地球外部高程异常 (大地水准面) 极移效应表达式为：

$$\zeta_p(r, \theta, \lambda, t) = \frac{1+k_2}{\gamma} V_c = -\frac{\omega^2 r^2}{2\gamma} (1 + k_2) \sin 2\theta \text{Re}(m^* e^{i\lambda}) \quad (2.8)$$

地面重力极移效应表达式⊙

$$g_p(r, \theta, \lambda, t) = -\left(1 + h_2 - \frac{3}{2} k_2\right) \frac{\partial V_c}{\partial r} = \left(1 + h_2 - \frac{3}{2} k_2\right) \omega^2 r \sin 2\theta \text{Re}(m^* e^{i\lambda}) \quad (2.9)$$

扰动重力的极移效应

$$\delta g_p(r, \theta, \lambda, t) = -(1 + k_2) \frac{\partial V_c}{\partial r} = (1 + k_2) \omega^2 r \sin 2\theta \text{Re}(m^* e^{i\lambda}) \quad (2.10)$$

地倾斜南方向的极移效应

$$\xi_p^s(r, \theta, \lambda, t) = (1 + k_2 - h_2) \frac{\partial V_c}{\gamma r \partial \theta} = -\frac{\omega^2 r}{\gamma} (1 + k_2 - h_2) \cos 2\theta \operatorname{Re}(m^* e^{i\lambda}) \quad (2.11)$$

地倾斜西方向的极移效应

$$\begin{aligned} \eta_p^s(r, \theta, \lambda, t) &= -(1 + k_2 - h_2) \frac{\partial V_c}{\gamma r \sin \theta \partial \lambda} \\ &= -\frac{\omega^2 r}{\gamma} (1 + k_2 - h_2) \cos \theta \operatorname{Re}\left(m^* e^{i(\lambda - \frac{\pi}{2})}\right) \end{aligned} \quad (2.12)$$

垂线偏差南方向的极移效应

$$\xi_p(r, \theta, \lambda, t) = (1 + k_2) \frac{\partial V_c}{\gamma r \partial \theta} = -\frac{\omega^2 r}{\gamma} (1 + k_2) \cos 2\theta \operatorname{Re}(m^* e^{i\lambda}) \quad (2.13)$$

垂线偏差西方向的极移效应

$$\eta_p(r, \theta, \lambda, t) = -(1 + k_2) \frac{\partial V_c}{\gamma r \sin \theta \partial \lambda} = \frac{\omega^2 r}{\gamma} \cos \theta \operatorname{Re}\left((1 + k_2) m^* e^{i(\frac{\pi}{2} - \lambda)}\right) \quad (2.14)$$

地面水平东方向的极移效应⊙

$$E_p(r, \theta, \lambda, t) = \frac{l_2 \partial V_c}{\gamma \sin \theta \partial \lambda} = -\frac{\omega^2 r^2}{\gamma} \cos \theta \operatorname{Re}\left(l_2 m^* e^{i(\frac{\pi}{2} - \lambda)}\right) \quad (2.15)$$

地面水平北方向的极移效应⊙

$$N_p(r, \theta, \lambda, t) = -\frac{l_2 \partial V_c}{\gamma \partial \theta} = -\frac{\omega^2 r^2}{\gamma} \cos 2\theta \operatorname{Re}(l_2 m^* e^{i\lambda}) \quad (2.16)$$

地面径向位移的极移效应⊙

$$r_p(r, \theta, \lambda, t) = \frac{h_2 V_c}{\gamma} = -\frac{\omega^2 r^2}{2\gamma} \sin 2\theta \operatorname{Re}(h_2 m^* e^{i\lambda}) \quad (2.17)$$

扰动重力梯度的极移效应（径向）

$$T_{rr,p} = \frac{(1+k_2)\partial^2 V_c}{\partial r^2} = -\omega^2 \sin 2\theta \operatorname{Re}[(1 + k_2) m^* e^{i\lambda}] \quad (2.18)$$

水平重力梯度北方向的极移效应

$$T_{NN,p} = T_{\varphi\varphi} = -\omega^2 \sin 2\theta [(1 + k_2) m^* e^{i\lambda}] \quad (2.19)$$

水平重力梯度西方向的极移效应

$$T_{WW,p} = -\frac{(1+k_2)\partial^2 V_c}{r^2 \sin^2 \theta \partial \lambda^2} = -\omega^2 \operatorname{ctg} \theta \operatorname{Re}[(1 + k_2) m^* e^{i\lambda}] \quad (2.20)$$

与固体潮效应算法一样，上述标注⊙的大地测量要素（观测量或参数），只有其点位与地球固连情况下有效，其余观测量或参数适合地面及固体地球外部空间。

8.2.1.3 大地测量极移效应的计算分析

本节采用 IERS 地球定向参数产品 EOPC04，计算地面点 $P_1(105^\circ E, 32^\circ N, h720m)$ 处各种大地测量要素的非潮汐极移效应时间序列。时间跨度 2018 年 1 月 1 日至 2022 年 12 月 31 日（4 年），时间间隔 6 小时。极移效应是非潮汐的，表示非潮汐效应需要指定

参考历元时刻，本例选择参考历元时刻为 2018 年 1 月 1 日 0 时。

计算极移效应时采用的体潮勒夫数值分别为： $k_2 = 0.3077 + 0.0036i$ ， $h_2 = 0.6207$ ， $l_2 = 0.0836$ 。

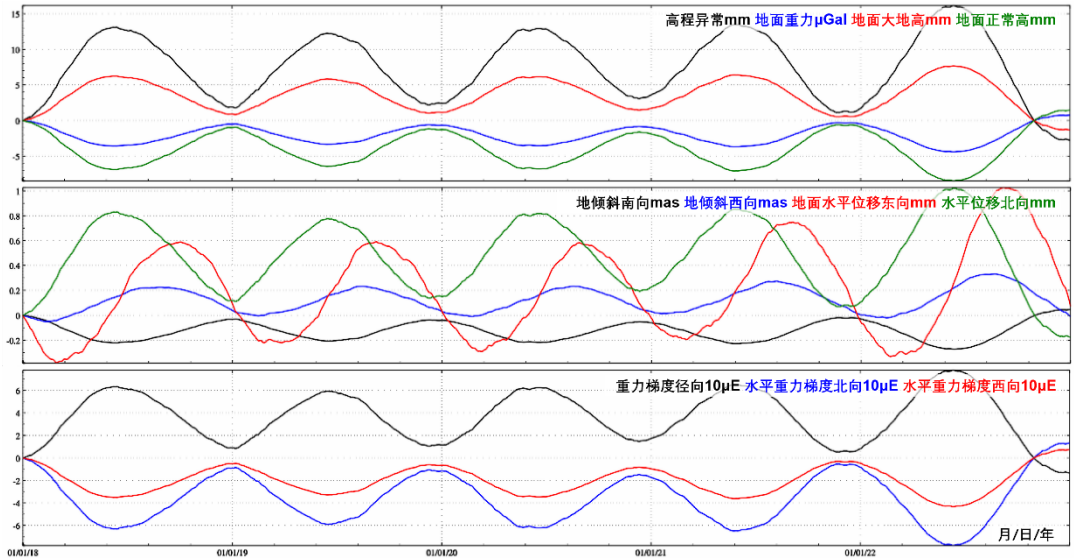


图 2.1 地面 P_1 点各种大地测量非潮汐极移效应时间序列

对于 1cm 精度水平的地面大地测量，应顾及各种几何物理大地测量要素的极移效应。

8.2.2 各种大地测量要素的海洋极潮效应

海洋极潮是极移离心力在海洋上的表现形式，其主要周期成分是 433 天钱德勒摆动和年变化。在这些长周期上，海洋极潮负荷被期望有均衡响应，即期望海洋表面的位移与外力的等位面相均衡。移去季节性、逆气压效应和固体潮后的海面高 2 阶 1 次球谐分量，其能量（方差）的 70% 为极潮效应。假设海洋极潮的长波分量在钱德勒摆动周期上具有平衡响应，那么卫星测高可以用来估计该周期处位勒夫数 k_2 。类似于极移效应，海洋极潮可以通过将海潮理论推广到极移离心力位得到。

8.2.2.1 海面高的极移效应与海洋极潮生成位

将地面径向位移的极移效应 (2.17) 式改写成如下形式：

$$r_p(\theta, \lambda, t) = \frac{h_2 V_c}{g_0} = H_p \operatorname{Re}(m^*(t) h_2 \bar{P}_{21}(\cos\theta) e^{i\lambda}) \quad (2.21)$$

$$H_p = \left(\frac{8\pi}{15}\right)^{1/2} \frac{\omega^2 a^4}{GM} = \left(\frac{8\pi}{15}\right)^{1/2} \frac{\omega^2 a^2}{g_0} \quad (2.22)$$

式中： H_p 为径向位移极移效应的尺度因子； $g_0 = GM/a^2$ 为海面平均重力。当极移 m 以角秒 (as) 为单位时， $H_p = 0.1385\text{m}$ 。

类似于海洋潮高的表达方式，采用海洋空间导纳函数 $Z(\theta, \lambda)$ ，可将海面高的极移效应

$h_o(\theta, \lambda, t)$ 表示为:

$$h_o(\theta, \lambda, t) = H_p \text{Re}[m^*(t)Z(\theta, \lambda)] \quad (2.23)$$

引入径向位移极移效应尺度因子 H_p 后, 海洋导纳函数 $Z(\theta, \lambda)$ 就变成了无量纲的空间谐函数, 可将其分解为 n 阶球谐级数形式:

$$Z(\theta, \lambda) = \sum_{n=0}^{\infty} Z_n(\theta, \lambda) \quad (2.24)$$

海面高的极移效应 $h_o(\theta, \lambda, t)$ 会导致海洋质量重新调整, 使得重力位发生变化, 这是海面高极移效应对地球重力位的直接影响, 可表示为:

$$U(\theta, \lambda, t) = \sum_{n=0}^{\infty} U_n(\theta, \lambda, t) = H_p g_0 \text{Re}[m^*(t) \sum_{n=0}^{\infty} \alpha_n Z_n(\theta, \lambda)] \quad (2.25)$$

式中: $\alpha_n = \frac{3}{2n+1} \frac{\rho_w}{\rho_e}$ 。

海面高极移效应对地球重力位的直接影响 U_n , 通过位负荷勒夫数 k'_n 作用, 产生附加位:

$$U_o^a(\theta, \lambda, t) = \sum_{n=0}^{\infty} k'_n U_n(\theta, \lambda, t) = H_p g_0 \text{Re}[m^*(t) \sum_{n=0}^{\infty} k'_n \alpha_n Z_n(\theta, \lambda)] \quad (2.26)$$

外部重力位的海洋极潮效应, 也称为海洋极潮生成位, 等于海面高极移效应对重力位的直接影响与附加位之和:

$$\begin{aligned} U_o(\theta, \lambda, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} (1 + k'_n) U_n(\theta, \lambda, t) \\ &= H_p g_0 \text{Re}[m^*(t) \sum_{n=0}^{\infty} (1 + k'_n) \alpha_n Z_n(\theta, \lambda)] \end{aligned} \quad (2.27)$$

8.2.2.2 重力位系数的自洽平衡海洋极潮效应

在固体潮两个最大长周期分量(周期 14 天和 28 天)上, 海洋很可能具有与平衡响应相对应的长波长响应。随着周期增大, 这种响应偏离平衡态的程度越小。极移离心力位具有更长的周期, 分别为 365 天和 433 天, 因此海洋极潮应有一个平衡响应。平衡海洋极潮效应假设瞬时海洋表面为重力等位面, 即瞬时海洋表面与等位面处于平衡状态, 进而通过从海面等位面减去体极潮来确定海洋表面相对于海底的平衡位移。

经典的平衡海洋极潮导纳函数 \bar{Z}^c 与地倾斜潮汐因子(海面高体潮因子) $\gamma_2 = 1 + k_2 - h_2$ 呈正比, 可表示为与体潮勒夫数无关的归一化平衡导纳函数 \bar{E}^c 和地倾斜潮汐因子 γ_2 的乘积:

$$\bar{Z}^c(\theta, \lambda) = \gamma_2 \bar{E}^c(\theta, \lambda) \quad (2.28)$$

$$\bar{E}^c(\theta, \lambda) = \sum_{n=0}^{\infty} \bar{E}_n^c(\theta, \lambda) = \mathcal{O}(\theta, \lambda) [\bar{P}_{21}(\cos\theta) e^{i\lambda} + K^c] \quad (2.29)$$

式中: $\mathcal{O}(\theta, \lambda)$ 为海洋函数, (θ, λ) 位于海洋区域时 $\mathcal{O}(\theta, \lambda) = 1$, (θ, λ) 位于陆地时 $\mathcal{O}(\theta, \lambda) = 0$ 。

式(2.29)引入复常数 K^c , 以维持经典平衡海洋极潮质量守恒。假设海洋具有常数密度, 则海洋极潮的零阶球谐分量应等于零, $\bar{Z}_0^c = \bar{E}_0^c = 0$ 。

考虑极移离心力位及其附加位后的自洽平衡海洋极潮响应函数 $\bar{Z}^s(\theta, \lambda)$, 也与地倾斜潮汐因子 $\gamma_2 = 1 + k_2 - h_2$ 呈正比, 可用归一化自洽平衡导纳函数 \bar{E}^s 表示为:

$$\bar{Z}^s(\theta, \lambda) = \gamma_2 \bar{E}^s(\theta, \lambda) \quad (2.30)$$

$$\bar{E}^s(\theta, \lambda) = \sum_{n=0}^{\infty} \bar{E}_n^s = \mathcal{O}(\theta, \lambda) [\bar{P}_{21}(\cos\theta)e^{i\lambda} + \sum_{n=0}^{\infty} \gamma'_n \alpha_n \bar{E}_n^s + K^s] \quad (2.31)$$

式中: K^s 为复常数, 用于维持自洽平衡海洋极潮质量守恒。 $\gamma'_n = 1 + k'_n - h'_n$ 为 n 阶地倾斜负荷形变因子。

归一化导纳函数 \bar{E}_n^c 和 \bar{E}_n^s 的球谐分量由系数 $(\bar{A}_{nm} + i\bar{B}_{nm})$ 按如下球谐级数形式定义:

$$\bar{E}(\theta, \lambda) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n \bar{P}_{|n|m}(\cos\theta) (\bar{A}_{nm} + i\bar{B}_{nm}) e^{i\lambda} \quad (2.32)$$

方程 (2.31) 的第一项和第二项可以认为是自洽平衡极潮的第一项和第二项, 因此这个归一化导纳可以通过在第一次迭代中使用 $\bar{E}_n^s = \bar{E}_n^c$ 的迭代格式来计算。

令 $\bar{A}_{nm} = \bar{A}_{nm}^R + i\bar{A}_{nm}^I, \bar{B}_{nm} = \bar{B}_{nm}^R + i\bar{B}_{nm}^I$ 为自洽平衡态的 n 阶 m 次海洋极潮负荷系数, 则海洋极潮负荷对规格化位系数的直接影响可用极移参数 (m_1, m_2) 表示 (Desai, 2002) 为:

$$\begin{bmatrix} \Delta \bar{C}_{nm} \\ \Delta \bar{S}_{nm} \end{bmatrix} = R_n \left\{ \begin{bmatrix} \bar{A}_{nm}^R \\ \bar{B}_{nm}^R \end{bmatrix} (m_1 \gamma_2^R + m_2 \gamma_2^I) + \begin{bmatrix} \bar{A}_{nm}^I \\ \bar{B}_{nm}^I \end{bmatrix} (m_2 \gamma_2^R - m_1 \gamma_2^I) \right\} \quad (2.33)$$

$$R_n = \frac{\omega^2 a^4}{GM} \frac{4\pi G \rho_w}{g_0(2n+1)}, \quad \gamma_2 = \gamma_2^R + i\gamma_2^I \quad (2.34)$$

其中, 2 阶田谐位系数变化包含了近 90% 的海洋极潮影响。

8.2.2.3 全要素海洋极潮效应统一计算与分析

已知海洋极潮对重力位系数的直接影响 $(\Delta \bar{C}_{nm}, \Delta \bar{S}_{nm})$, 就能按照海潮负荷效应表达式的推导过程, 由负荷勒夫数, 直接给出地面或固体地球外部各种大地测量要素的海洋极潮效应计算公式。

地面或固体地球外部高程异常 (大地水准面) 海洋极潮效应表达式为:

$$\begin{aligned} \zeta(r, \theta, \lambda) &= \frac{GM}{\gamma r} \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{a}{r}\right)^n (1 + k'_n) \\ &\quad \sum_{m=0}^n (\Delta \bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \Delta \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\cos\theta) \end{aligned} \quad (2.35)$$

地面或固体地球外部扰动重力海洋极潮效应表达式为

$$\begin{aligned} \delta \dot{g}(r, \theta, \lambda) &= \dot{g} = \frac{GM}{r^2} \sum_{n=2}^{\infty} (n+1) \left(\frac{a}{r}\right)^n (1 + k'_n) \\ &\quad \sum_{m=0}^n (\Delta \bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \Delta \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\cos\theta) \end{aligned} \quad (2.37)$$

地面或固体地球外部垂线偏差海洋极潮效应表达式

$$\begin{aligned} \text{南向: } \xi(r, \theta, \lambda) &= \frac{GM}{\gamma r^2} \sin\theta \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{a}{r}\right)^n (1 + k'_n) \\ &\quad \sum_{m=0}^n (\Delta \bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \Delta \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \frac{\partial}{\partial \theta} \bar{P}_{nm}(\cos\theta) \end{aligned} \quad (2.36)$$

$$\begin{aligned} \text{西向: } \eta(r, \theta, \lambda) &= \frac{GM}{\gamma r^2 \sin\theta} \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{a}{r}\right)^n (1 + k'_n) \\ &\quad \sum_{m=1}^n m (\Delta \bar{C}_{nm} \sin m\lambda - \Delta \bar{S}_{nm} \cos m\lambda) \bar{P}_{nm}(\cos\theta) \end{aligned} \quad (2.37)$$

地面或固体地球外部扰动重力梯度海洋极潮效应（径向）表达式

$$\begin{aligned} \dot{T}_{rr}(r, \theta, \lambda) &= \frac{GM}{r^3} \sum_{n=2}^{\infty} (n+1)(n+2) \left(\frac{a}{r}\right)^n (1+k'_n) \\ &\quad \sum_{m=0}^n (\Delta \bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \Delta \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\cos\theta) \end{aligned} \quad (2.38)$$

地面或固体地球外部水平重力梯度海洋极潮效应表达式

$$\begin{aligned} \text{北向: } \dot{T}_{NN}(r, \theta, \lambda) &= -\frac{GM}{r^3} \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{a}{r}\right)^n (1+k'_n) \\ &\quad \sum_{m=0}^n (\Delta \bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \Delta \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \bar{P}_{nm}(\cos\theta) \end{aligned} \quad (2.39)$$

$$\begin{aligned} \text{西向: } \dot{T}_{WW}(r, \theta, \lambda) &= \frac{GM}{r^3 \cos^2 \varphi} \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{a}{r}\right)^n (1+k'_n) \\ &\quad \sum_{m=1}^n m^2 (\Delta \bar{C}_{nm} \sin m\lambda + \Delta \bar{S}_{nm} \cos m\lambda) \bar{P}_{nm}(\cos\theta) \end{aligned} \quad (2.40)$$

与固体地球固连的地面站点，其位移海洋极潮效应表达式 \odot

$$\begin{aligned} \text{东方向: } e(r, \theta, \lambda) &= -\frac{GM}{\gamma r^2 \sin \theta} \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{a}{r}\right)^n l_n \\ &\quad \sum_{m=1}^n m (\Delta \bar{C}_{nm} \sin m\lambda - \Delta \bar{S}_{nm} \cos m\lambda) \bar{P}_{nm}(\cos\theta) \end{aligned} \quad (2.41)$$

$$\begin{aligned} \text{北方向: } n(r, \theta, \lambda) &= -\frac{GM}{\gamma r^2} \sin \theta \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{a}{r}\right)^n l_n \\ &\quad \sum_{m=0}^n (\Delta \bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \Delta \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \frac{\partial}{\partial \theta} \bar{P}_{nm}(\cos\theta) \end{aligned} \quad (2.42)$$

$$\begin{aligned} \text{径向: } r(r, \theta, \lambda) &= \frac{GM}{\gamma r} \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{a}{r}\right)^n h'_n \\ &\quad \sum_{m=0}^n (\Delta \bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \Delta \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\cos\theta) \end{aligned} \quad (2.43)$$

与固体地球固连的地面站点，其地面重力海洋极潮效应表达式为 \odot

$$\begin{aligned} \dot{g}^s(r, \varphi, \lambda) &= \frac{GM}{r^2} \sum_{n=2}^{\infty} (n+1) \left(\frac{a}{r}\right)^n \left(1 + \frac{2}{n} h'_n - \frac{n+1}{n} k'_n\right) \\ &\quad \sum_{m=0}^n (\Delta \bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \Delta \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\cos\theta) \end{aligned} \quad (2.44)$$

与固体地球固连的地面站点，其地倾斜海洋极潮效应表达式 \odot

$$\begin{aligned} \text{南向: } \xi^s(r, \theta, \lambda) &= \frac{GM}{\gamma r^2} \sin \theta \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{a}{r}\right)^n (1+k'_n - h'_n) \\ &\quad \sum_{m=0}^n (\Delta \bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \Delta \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \frac{\partial}{\partial \theta} \bar{P}_{nm}(\cos\theta) \end{aligned} \quad (2.45)$$

$$\begin{aligned} \text{西向: } \eta^s(r, \theta, \lambda) &= \frac{GM}{\gamma r^2 \sin \theta} \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{a}{r}\right)^n (1+k'_n - h'_n) \\ &\quad \sum_{m=1}^n m (\Delta \bar{C}_{nm} \sin m\lambda - \Delta \bar{S}_{nm} \cos m\lambda) \bar{P}_{nm}(\cos\theta) \end{aligned} \quad (2.47)$$

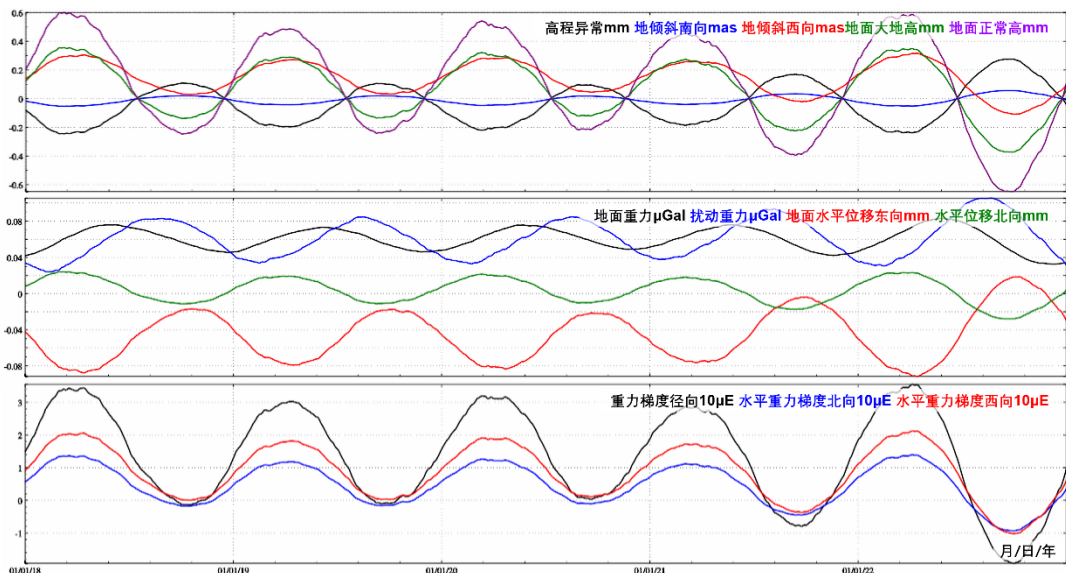


图 2.2 海岸 P_2 点各种大地测量非潮汐海洋极潮效应时间序列

下面采用 IERS 地球定向参数产品 EOPC04 和 IERS2010 提供的 360 阶自洽平衡态海洋极潮负荷系数模型 (Desai, 2002), 取体潮因子 $\gamma_2 = 0.687 + i0.0036$, 计算位于海岸带区域的 $P_2(121.3^\circ E, 28.8^\circ N, h11m)$ 点处, 各种大地测量要素的非潮汐海洋极潮效应时间序列。时间跨度 2018 年 1 月 1 日至 2022 年 12 月 31 日 (4 年), 时间间隔 6 小时。类似极移效应, 海洋极潮效应也是非潮汐地球形变, 表示非潮汐效应需要指定参考历元时刻, 本例直接采用与地球定向产品 EOPC04 相同的参考历元 (ITRF2014 参考框架)。

海洋极潮效应量级较小 (小于 1cm), 对于区域性大地测量目的, 一般可以忽略。

8.2.3 地球自转的潮汐形变效应及其计算

地球自转运动 (自转速率变化和地极运动) 表征着地球的整体运动状态以及固体地球与大气、海洋在各种时空尺度上的相互作用过程, 它们在没有外力作用条件下维持总角动量守恒, 构成了复杂的地球动力学系统。地球的自转运动可以用地球自转参数 (ERP, 包括极移和自转角速度) 来描述。地球自转运动的时变性通常用日长 LOD 、世界时 $UT1$ 、秒长或自转角速度 ω 随时间的变化量来描述。对日长的激发研究包括几十年的长期变化、10 年左右的波动、年际变化、季节性变化、几十天到周日半日的短周期变化。在极移激发方面, 随着资料积累和观测精度的提高, 人们开始从局限于周年极移和钱德勒摆动的研究扩展到亚季节性、年际乃至几十年时间尺度上的极移研究。

8.2.3.1 日长及自转速率的带谐潮汐效应

地球自转速率的周期性变化主要包括几十年的长周期变化、10 年左右的波动、年际变化、季节性变化以及几十天的短周期变化, 可通过日长变化 ΔLOD 或相对于原子时标准 TAI 的世界时 $UT1$ 的变化 $\Delta UT1$ 来观测:

$$\Delta LOD = \frac{(UT1-TAI)_t - (UT1-TAI)_{t-\Delta t}}{\Delta t} \quad (2.46)$$

地球自转速率的周期变化与天文、地球物理和气象等许多因素有关，固体潮效应是导致周月和半月自转速率变化的主要原因，地球液核效应和海洋负荷潮汐又改变了这些周期变化的振幅。Woodlard (1959) 以弹性地球的惯量张量对固体潮响应的简单模型，导出了带谐潮的理论振幅。Yoder 等 (1981) 首先推导了由极惯性矩的潮汐形变引起的 $UT1$ 的周期性变化，包括具有解耦核、弹性地幔和平衡海洋的带谐潮汐形变效应，给出了尺度因子 k/c_m 的理论值为 $k/c_m = 0.944$ ，其中 k 是耦合地幔及海洋的地极旋转惯量中的体潮勒夫数， c_m 为无量纲地极旋转惯量。

固体地球对带谐引潮位的响应引起主惯性矩的周期性变化，按动量守恒原则导致自转速率的周期性变化，即日长变化 ΔLOD 或自转速率变化 $\Delta\omega$ 。利用勒让德多项式，可以将地面 $P(\theta, \lambda)$ 点的天体引潮位 V_G 展开为球谐函数级数形式：

$$V_G(P) = GM \sum_{n=2}^{\infty} \frac{a^n}{r^{n+1}} P_n(\cos\psi) \quad (2.47)$$

式中： ψ 为地固坐标中地面点 $P(\theta, \lambda)$ 与引潮天体 (r, θ, Λ) 的球面角距， (r, θ, Λ) 为引潮天体的球坐标。将其中二阶引潮位 ($n = 2$) 分解为 3 族球谐函数形式：

$$V_{G,20}(P) = GM \frac{a^2}{r^3} P_{20}(\cos\theta) P_{20}(\cos\theta) \quad (2.48)$$

$$V_{G,21}(P) = \frac{1}{3} GM \frac{a^2}{r^3} P_{21}(\cos\theta) P_{21}(\cos\theta) \cos(\Lambda - \lambda) \quad (2.49)$$

$$V_{G,22}(P) = \frac{1}{12} GM \frac{a^2}{r^3} P_{22}(\cos\theta) P_{22}(\cos\theta) \cos 2(\Lambda - \lambda) \quad (2.50)$$

式 (2.49) 和 (2.50) 分别包含扇谐函数和田谐函数，用于描述半日变化和周日变化的短周期潮汐，而式 (2.48) 包含带谐函数，仅依赖于引潮天体地心纬度 θ 的缓慢变化，因而用于描述中长周期潮汐。月球带谐引潮位的主要周期是 14 天 M_f 和 28 天 M_m ，太阳带谐引潮位的主要周期是半年 S_{sa} 和周年 S_a ，这些带谐潮汐形变是引起 LOD 变化的最大项。

取尺度因子 $k/c_m = 0.94$ ，顾及地幔粘滞性长周期勒夫数 $k_{20}(\sigma)$ 的频率相关性 (1.26) 式，周期为 5 天至 18.6 年的地球自转长周期潮汐变化改正算法 (IERS2010)：

$$\delta UT1 = - \sum_{i=1}^{62} (A_i \sin\phi_i - B_i \cos\phi_i) \quad (2.51)$$

$$\delta LOD = \sum_{i=1}^{62} (A'_i \cos\phi_i - B'_i \sin\phi_i) \quad (2.52)$$

$$\delta\omega = \sum_{i=1}^{62} (A''_i \cos\phi_i - B''_i \sin\phi_i) \quad (2.53)$$

式中： A_i 、 B_i 、 A'_i 、 B'_i 、 A''_i 、 B''_i 分别为频率 σ_i 长周期分潮的同相幅值（余弦项系数）和异相幅值（正弦项系数），如表 5.17 的第 7~12 列； ϕ_i 为长周期分潮 σ_i 的天文辐角，由 Delaunay 变量（表中第 1~5 列）或 Doodson 数计算。

表 2.1 日长及自转速率的带谐潮汐效应校正

Delatunay 变量					周期(天)	$\delta UT1$		δLOD		$\delta \omega$	
l	l'	F	D	Ω		A_i	B_i	A'_i	B'_i	A''_i	B''_i
1	0	2	2	2	5.64	-0.0235	0.0000	0.2617	0.0000	-0.2209	0.0000
2	0	2	0	1	6.85	-0.0404	0.0000	0.3706	0.0000	-0.3128	0.0000
2	0	2	0	2	6.86	-0.0987	0.0000	0.9041	0.0000	-0.7630	0.0000
0	0	2	2	1	7.09	-0.0508	0.0000	0.4499	0.0000	-0.3797	0.0000
0	0	2	2	2	7.10	-0.1231	0.0000	1.0904	0.0000	-0.9203	0.0000
1	0	2	0	0	9.11	-0.0385	0.0000	0.2659	0.0000	-0.2244	0.0000
1	0	2	0	1	9.12	-0.4108	0.0000	2.8298	0.0000	-2.3884	0.0000
1	0	2	0	2	9.13	-0.9926	0.0000	6.8291	0.0000	-5.7637	0.0000
3	0	0	0	0	9.18	-0.0179	0.0000	0.1222	0.0000	-0.1031	0.0000
-1	0	2	2	1	9.54	-0.0818	0.0000	0.5384	0.0000	-0.4544	0.0000
-1	0	2	2	2	9.56	-0.1974	0.0000	1.2978	0.0000	-1.0953	0.0000
1	0	0	2	0	9.61	-0.0761	0.0000	0.4976	0.0000	-0.4200	0.0000
2	0	2	-2	2	12.81	0.0216	0.0000	-0.1060	0.0000	0.0895	0.0000
0	1	2	0	2	13.17	0.0254	0.0000	-0.1211	0.0000	0.1022	0.0000
0	0	2	0	0	13.61	-0.2989	0.0000	1.3804	0.0000	-1.1650	0.0000
0	0	2	0	1	13.63	-3.1873	0.2010	14.6890	0.9266	-12.3974	-0.7820
0	0	2	0	2	13.66	-7.8468	0.5320	36.0910	2.4469	-30.4606	-2.0652
2	0	0	0	-1	13.75	0.0216	0.0000	-0.0988	0.0000	0.0834	0.0000
2	0	0	0	0	13.78	-0.3384	0.0000	1.5433	0.0000	-1.3025	0.0000
2	0	0	0	1	13.81	0.0179	0.0000	-0.0813	0.0000	0.0686	0.0000
0	-1	2	0	2	14.19	-0.0244	0.0000	0.1082	0.0000	-0.0913	0.0000
0	0	0	2	-1	14.73	0.0470	0.0000	-0.2004	0.0000	0.1692	0.0000
0	0	0	2	0	14.77	-0.7341	0.0000	3.1240	0.0000	-2.6367	0.0000
0	0	0	2	1	14.80	-0.0526	0.0000	0.2235	0.0000	-0.1886	0.0000
0	-1	0	2	0	15.39	-0.0508	0.0000	0.2073	0.0000	-0.1749	0.0000
1	0	2	-2	1	23.86	0.0498	0.0000	-0.1312	0.0000	0.1107	0.0000
1	0	2	-2	2	23.94	0.1006	0.0000	-0.2640	0.0000	0.2228	0.0000
1	1	0	0	0	25.62	0.0395	0.0000	-0.0968	0.0000	0.0817	0.0000
-1	0	2	0	0	26.88	0.0470	0.0000	-0.1099	0.0000	0.0927	0.0000
-1	0	2	0	1	26.98	0.1767	0.0000	-0.4115	0.0000	0.3473	0.0000
-1	0	2	0	2	27.09	0.4352	0.0000	-1.0093	0.0000	0.8519	0.0000
1	0	0	0	-1	27.44	0.5339	0.0000	-1.2224	0.0000	1.0317	0.0000
1	0	0	0	0	27.56	-8.4046	0.2500	19.1647	0.5701	-16.1749	-0.4811
1	0	0	0	1	27.67	0.5443	0.0000	-1.2360	0.0000	1.0432	0.0000
0	0	0	1	0	29.53	0.0470	0.0000	-0.1000	0.0000	0.0844	0.0000

1	-1	0	0	0	29.80	-0.0555	0.0000	0.1169	0.0000	-0.0987	0.0000
-1	0	0	2	-1	31.66	0.1175	0.0000	-0.2332	0.0000	0.1968	0.0000
-1	0	0	2	0	31.81	-1.8236	0.0000	3.6018	0.0000	-3.0399	0.0000
-1	0	0	2	1	31.96	0.1316	0.0000	-0.2587	0.0000	0.2183	0.0000
1	0	-2	2	-1	32.61	0.0179	0.0000	-0.0344	0.0000	0.0290	0.0000
-1	-1	0	2	0	34.85	-0.0855	0.0000	0.1542	0.0000	-0.1302	0.0000
0	2	2	-2	2	91.31	-0.0573	0.0000	0.0395	0.0000	-0.0333	0.0000
0	1	2	-2	1	119.61	0.0329	0.0000	-0.0173	0.0000	0.0146	0.0000
0	1	2	-2	2	121.75	-1.8847	0.0000	0.9726	0.0000	-0.8209	0.0000
0	0	2	-2	0	173.31	0.2510	0.0000	-0.0910	0.0000	0.0768	0.0000
0	0	2	-2	1	177.84	1.1703	0.0000	-0.4135	0.0000	0.3490	0.0000
0	0	2	-2	2	182.62	-49.7174	0.4330	17.1056	0.1490	-14.4370	-0.1257
0	2	0	0	0	182.63	-0.1936	0.0000	0.0666	0.0000	-0.0562	0.0000
2	0	0	-2	-1	199.84	0.0489	0.0000	-0.0154	0.0000	0.0130	0.0000
2	0	0	-2	0	205.89	-0.5471	0.0000	0.1670	0.0000	-0.1409	0.0000
2	0	0	-2	1	212.32	0.0367	0.0000	-0.0108	0.0000	0.0092	0.0000
0	-1	2	-2	1	346.60	-0.0451	0.0000	0.0082	0.0000	-0.0069	0.0000
0	1	0	0	-1	346.64	0.0921	0.0000	-0.0167	0.0000	0.0141	0.0000
0	-1	2	-2	2	365.22	0.8281	0.0000	-0.1425	0.0000	0.1202	0.0000
0	1	0	0	0	365.26	-15.8887	0.1530	2.7332	0.0263	-2.3068	-0.0222
0	1	0	0	1	386.00	-0.1382	0.0000	0.0225	0.0000	-0.0190	0.0000
1	0	0	-1	0	411.78	0.0348	0.0000	-0.0053	0.0000	0.0045	0.0000
2	0	-2	0	0	-1095.18	-0.1372	0.0000	-0.0079	0.0000	0.0066	0.0000
-2	0	2	0	1	1305.48	0.4211	0.0000	-0.0203	0.0000	0.0171	0.0000
-1	1	0	1	0	3232.86	-0.0404	0.0000	0.0008	0.0000	-0.0007	0.0000
0	0	0	0	2	-3399.19	7.8998	0.0000	0.1460	0.0000	-0.1232	0.0000
0	0	0	0	1	-6798.38	-1617.2681	0.0000	-14.9471	0.0000	12.6153	0.0000

8.2.3.2 极移及其激发的长周期海潮效应

极移运动主要表现为速率 3.5mas/年的长期漂移、振幅 (约 100~200mas) 随时间变化的 Chandler 摆动 (CW) 和振幅 (约 100mas) 随时间有微小变化的周年摆动 (AW) (Gross, 2000; Su 等, 2014), 极移运动包含一些长周期项, 半 Chandler 摆动、半周年项、季节性周期、1 月周期、半月周期等, 以及准两年周期及 300 天周期项。长期极移的可能激发因素主要包括地壳反弹、冰期后融化和水储量的累积变化; 10 年尺度极移的可能激发源包括冰期后融化、水储量变化、大气和海洋等; Chandler 摆动可能由包括海洋和核幔耦合以及大气、水文激发; 季节性极移则主要由海洋和大气激发。

以通过极移轨迹中心与地球表面相切的平面来表示地极的瞬时位置的坐标系统, 称

为地极坐标系。相应的切点为坐标系的原点，以通过原点指向格林威治子午线的方向为x轴的正向，指向格林威治以西 90°的子午线的方向为y轴的正向。地极坐标系中固体地球自转变化的刘维方程为：

$$\boldsymbol{\chi}(t) = \mathbf{p}(t) + \frac{i}{\sigma_0} \frac{d\mathbf{p}(t)}{dt}, \quad \chi_z(t) = \frac{\Delta LOD(t)}{LOD_0} \quad (2.55)$$

$$\text{其中, } \boldsymbol{\chi}(t) = \chi_x(t) + i\chi_y(t), \quad \mathbf{p}(t) = p_x(t) - ip_y(t) \quad (2.56)$$

$$\begin{cases} \chi_x(t) = \frac{1.608}{(C-A)\omega} [h_x(t) + 0.684\omega I_{xz}(t)] \\ \chi_y(t) = \frac{1.608}{(C-A)\omega} [h_y(t) + 0.684\omega I_{yz}(t)] \\ \chi_z(t) = \frac{0.997}{C\omega} [h_z(t) + 0.750\omega I_{zz}(t)] \end{cases} \quad (2.57)$$

式中： $\mathbf{p}(t)$ 是天球中间极（CIP）， σ_0 是 Chandler 摆动的复值频率， LOD_0 是日长的平均值 86400s； C 和 A 为地球的主惯量矩， ω 为平均自转角速度。

式 (2.55) 第一式表示地极移动的两个分量，即极移；第二式表示是自转角速度变化，即日长变化；式 (2.56) 中的 $\chi(t)$ 是激发函数，例如由于大气和海洋环流引起的惯量矩 I_{ij} 和角动量 h_i 的变化 ($i, j = x, y$ 或 z)，由离心力位与引潮位引起的地球弹性形变，以及伴随地幔对流的大规模质量重新分布以及核幔的电磁耦合等。

激发函数主要包括两部分的作用：地球内部物质分布变化引起的转动惯量变化 ΔI ，以及物质运动速度引起的相对角动量变化 Δh 。式 (2.56) 中引入的系数表征了地球自转弹性形变效应、内核运动和平衡态海洋影响，以及表面负荷效应等。

为了获得不受潮汐影响的极移和极移激发变化量，需要对其进行长周期海潮效应改正。周期为 9 天至 18.6 年的极移和极移激发潮汐改正算法 (IERS2010)：

$$\mathbf{p}(t) = p_x(t) - ip_y(t) = A_p e^{i[\phi(t)+\varphi_p]} + A_r e^{i[-\phi(t)+\varphi_r]} \quad (2.58)$$

$$\boldsymbol{\chi}(t) = \chi_x(t) + i\chi_y(t) = A_p e^{i[\phi(t)+\varphi_p]} + A_r e^{i[-\phi(t)+\varphi_r]} \quad (2.59)$$

式中： $p_y(t)$ 约定指向格林威治以西 90°子午线的方向， $\chi_y(t)$ 约定指向格林威治以东 90°子午线的方向， $\phi(t)$ 为天文辐角； A_p 、 φ_p 分别为极移或极移激发长周期海潮效应的正向前行调和振幅和相位； A_r 、 φ_r 分别为极移或极移激发长周期海潮效应的逆向后退调和振幅和相位。

表 2.2 极移及其激发的长周期海潮效应校正

	Delaunay 变量					周期(天)	极移改正项 \mathbf{p}				极移激发改正项 $\boldsymbol{\chi}$			
	l	l'	F	D	Ω		$A_p \mu\text{as}$	φ_p°	$A_r \mu\text{as}$	φ_r°	$A_p \mu\text{as}$	φ_p°	$A_r \mu\text{as}$	φ_r°
m_{tm}	1	0	2	0	1	9.12	4.43	-112.62	5.57	21.33	205.83	67.21	269.95	21.17
M_{tm}	1	0	2	0	2	9.13	10.72	-112.56	13.48	21.3	497.59	67.27	652.59	21.14
m_f	0	0	2	0	1	13.63	27.35	-91.42	30.59	13.31	841.32	88.42	1002.12	13.15

M_f	0	0	2	0	2	13.66	66.09	-91.31	73.86	13.27	2028.73	88.53	2414.94	13.11
M_{sf}	0	0	0	2	0	14.77	5.94	-87.13	6.42	11.75	168.13	92.7	194.74	11.6
M_m	1	0	0	0	0	27.56	43.74	-56.7	31.12	-0.91	643.61	123.13	520.16	-1.06
M_{sm}	-1	0	0	2	0	31.81	8.85	-51.11	5.42	-4.21	111.62	128.72	79.23	-4.36
S_{sa}	0	0	2	-2	2	182.62	86.48	-20.3	99.77	175.57	118.56	159.42	336.32	175.46
S_a	0	1	0	0	0	365.26	17.96	-17.38	152.15	170.6	3.33	161.6	332.53	170.51
M_n	0	0	0	0	1	-6798.38	208.17	166.89	186.98	166.67	221.43	166.88	175.07	166.68

图 2.3 按 (2.51) ~ (2.53)、(2.58) 和 (2.59) 式, 预报 2026 年 1 月 1 日至 2028 年 12 月 31 日 (3 年) 地球自转运动的长周期潮汐效应时间序列, 时序采样间隔 4h。

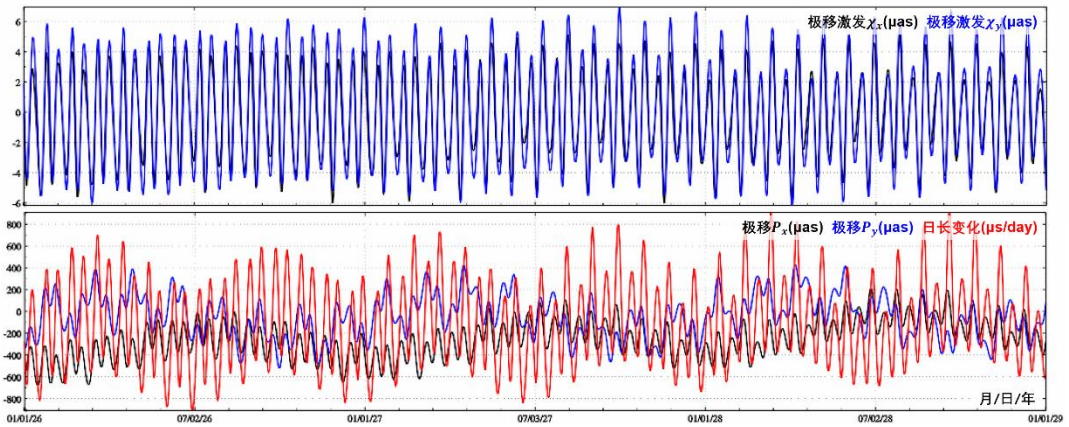


图 2.3 地球自转运动的长周期潮汐效应预报时间序列

8.2.3.3 地球自转参数周日半日海潮效应

随着 GPS、VLBI、SLR 等观测技术和分析精度的提高, 目前已能用几小时甚至 1~2h 的观测数据求解地球自转参数 (极移和自转速率变化), 并从中检测到明显的周日、半日自转变化。与海潮模型所预测的结果进行比较, 在主要的周日、半日潮波频率上, 两者的振幅和相位符合得较好, 特别是对 UT1, 符合度为 90% 左右, 极移为 60% 左右。目前, 仍有 30% 的极移周日、半日激发因素没有确定。

周日和半日的高频力矩主要来自三轴地球的主惯量差 $B - A$ 项。地球重力位二阶球谐系数 C_{22} 、 S_{22} 与二阶惯性张量关系为:

$$C_{22} = -\frac{1}{4}MR^2(I_{11} - I_{22}), \quad S_{22} = -\frac{1}{2}MR^2I_{12} \quad (2.60)$$

三轴地球主惯量轴与坐标轴不重合, 赤道面主惯量差 $B - A$ 与 C_{22} 、 S_{22} 关系为:

$$B - A = 4MR^2\sqrt{C_{22}^2 + S_{22}^2} \quad (2.61)$$

由此导致极移和 $UT1$ 变化为:

$$m(t) = -\frac{0.36GM}{\omega^2 R^3} \frac{B-A}{A} \sin 2\theta e^{-i(\Lambda-2\lambda)} \quad (2.62)$$

$$UT1(t) = -\frac{0.3GM}{8\omega^2 R^3} \frac{B-A}{C_m} \sin^2 \theta \sin 2(\Lambda - 2\lambda) \quad (2.63)$$

式中: θ, Λ 分别为引潮天体的余纬和经度。

由 (2.61) ~ (2.63) 式可以看出, C_{22} 、 S_{22} 激发了周期为半日的地球自转变化, Chao 等人的理论计算表明其量级为 0.06mas 左右。液核地球和核幔边界微椭使得旋转地球产生一个自转逆向简正模, 呈现近周日自由摆动。孙和平等人采用武汉和全球地球动力学计划 (GGP) 18 台超导重力仪观测资料, 在有效消除海洋、大气和台站周围环境因素干扰的基础上, 研究了液核的共振放大现象, 解算了地球自由核章动共振参数。

随着 GNSS 和 VLBI 等多种空间观测技术的发展, 从高精度以及高分辨率的地球自转参数 (极移和 $UT1$) 中检测到明显的周日、半日变化。与海潮模型预测结果比较, 在主要的周日、半日潮波频率上, 两者的振幅和相位符合得较好, 尤其是 $UT1$ 。据此认为, 地球自转周日、半日变化主要是固体地球对海洋潮汐洋流作用的响应, 这也是目前关于周日、半日地球自转激发因素的主流观点。

完全类似于极移参数长周期潮波效应校正算法表达方式, 如式 (2.51) 和 (2.58), 由海洋潮汐洋流引起的地球自转周日、半日变化可以用多谐波函数表示为:

$$\delta p_x = \sum_{i=1}^n (-A_i^c \cos \phi_i + A_i^s \sin \phi_i) \quad (2.64)$$

$$\delta p_y = \sum_{i=1}^n (A_i^c \sin \phi_i + A_i^s \cos \phi_i) \quad (2.65)$$

$$\delta UT1 = \sum_{i=1}^n (B_i^c \cos \phi_i + B_i^s \sin \phi_i) \quad (2.66)$$

目前应用比较广泛的是 IERS2010 中收录的 Eanes2000 模型和 interp.f 实现代码, 该算法基于 Ray1994 模型发展而来, 由 41 个周日潮波和 30 个半日潮波组成, 包括 3 个主要周日、半日潮波改正项, 以及 41 个边瓣潮波改正。极移和 $UT1$ 的周日、半日潮汐变化较正精度分别达到 $100\mu\text{as}$ 和 $10\mu\text{s}$ 。

图 2.4 按 (2.64) ~ (2.66) 式, 预报 2026 年 3 月 1 日至 2026 年 4 月 30 日 (2 个月) 地球自转参数的周日/半日潮汐效应时间序列, 时序采样间隔 15 分钟。

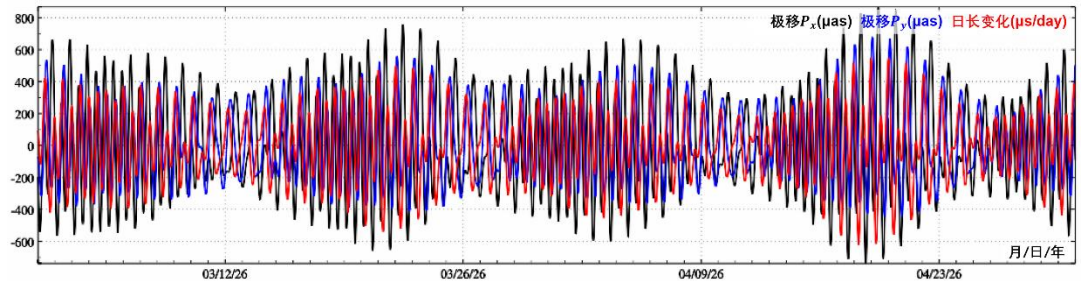


图 2.4 地球自转参数的周日/半日潮汐效应预报时间序列

极移参数(m_1, m_2)可利用空间大地测量方法精密测定。在现代大地测量中,极移参数用移去固体潮和负荷潮效应后的 2 阶田谐位系数非潮汐变化($\Delta\bar{C}_{21}, \Delta\bar{S}_{21}$), 即($nm = 21$)来表示。