

# 全球水分布对极移的激发 ——综述与基本理论

陈 剑 利

(中国科学院上海天文台, 上海 200030)

## 提 要

本文回顾了国内外对水分布激发的估算, 介绍了水分布变化的激发理论。对于水分布的周年激发, 目前存在两种相反的看法; 对其钱德勒(Chandler)激发, 需要进行进一步的定量估算。本文分析了水文模型对水分布激发的影响, 提出了改进水文模型的一些设想。

## 一、国内外研究概况[1,4,7,8,14]

天文观测表明地球瞬时旋转轴是随时间不断变化的。在太阳月球及行星的引力作用下地球旋转轴在惯性参考系内的摆动, 称之为岁差和章动, 也称受迫章动。在地固坐标系内, 地球瞬时旋转轴相对于地球表面或历元平极的运动, 称之为极移, 也称自由章动。1765年 Euler 根据刚体运动学从理论上计算出地球自转轴相对于地壳可能存在周期为 305 天的摆动。直到 1891 年, Chandler 在寻求纬度观测中 305 天周期项时发现了周期为 434 天的摆动, 即 Chandler 摆动。理论与实测的这一差异已由弹性地球模型所解释。作为自由运动, Chandler 摆动应是一个逐渐衰减的过程, 但一百多年的观测表明其振幅虽有变化, 但无任

何长期衰减的迹象。就是说一定存在某些激发因素在克服阻尼而维持这种运动。

实测极移的功率谱表明在周期 12 月和 14 月处分别存在两个谱峰(见图 1)<sup>[22]</sup>, 即周年极移和 Chandler 极移。周年极移显然是由大气、海洋及全球水的运动和质量分布的季节变化所激发的受迫运动。Chandler 极移作为自由运动, 其激发根源经天文学界和地球物理学界近一百年的探索, 至今尚无定论。从极移的功率谱上可以看出, Chandler 极移的谱线很宽, 介于 0.8—0.9 周/年之间。这说明地球内部存在阻尼耗散过程。从理论上考虑, 作为自由运动的 Chandler 极移, 其激发的能量来源不可能

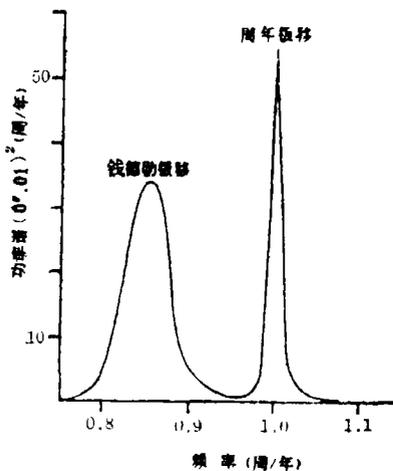


图 1 极移的功率谱<sup>[22]</sup>

是外在的保守力。这排除了太阳、月球及行星的引力和电磁力的影响。从非保守过程考虑, Chandler 极移的能量来源可能是太阳辐射(热辐射及各种波段的电磁辐射), 以及由此激发的各种气象过程, 大气、海洋和水的运动及质量分布等等, 也可能是地球内部热能和弹性能的释放, 以及由此激发的地震、火山爆发等地球物理现象。

### 1. 周年极移的激发

早在 1901 年, Spitaler 就注意到大气质量的季节变化对周年极移的影响很大。随后 Jeffreys, Rosenhead, Munk and Hassan 和 Sidorenkov 的工作进一步证实了 Spitaler 的结果, 但这还仅仅是定性的符合。van Hylckama<sup>[10]</sup> 计算了地面水分布的激发函数, 发现水分布对周年极移有一定影响, 但相对大气的激发函数要小得多。Wilson 和 Haubrich<sup>[13]</sup> 重新论述了这个问题, 并综合考虑了大气、山脉力矩和水贮量的影响, 其中水贮量的激发函数是采用 van Hylckama (1970) 的结果。结果表明, 考虑了山脉力矩和水贮量的影响以后求得的激发函数与实测周年极移的激发函数符合得要好一些, 但还无法解释周年极移的全部。Wilson 认为这一差异可能由于对大气质量、山脉力矩和水贮量激发函数的估算不够准确, 或是存在尚未确认的激发源<sup>[13,15]</sup>。

Wahr<sup>[11,12]</sup> 利用大气压力+压力驱动海洋模型重新计算了大气和海洋的激发函数。认为周年激发的主要因素是大气压力和压力驱动的海洋, 其中大气压力的作用最主要, 通过比较表明水贮量对周年激发有一定影响, 约占所需激发能量的 1/5<sup>[12]</sup>。Hinnov 和 Wilson 重新计算了全球水贮量的周年激发(由陆地和海洋两部分构成, 忽略了蒸发量的影响。结果进一步表明了水贮量对周年激发有一定影响, 综合大气和水贮量的激发可以较好地解释周年极移运动<sup>[5]</sup>。雷小平和高布锡考虑了蒸发和径流的影响, 计算了水贮量的周年激发。结果与 van

Hylckama, Hinnov 的结果基本一致<sup>[16,17]</sup>。

关于水贮量对周年极移的激发影响, 目前还存在另一种观点。Chao 和 O'Connor<sup>[2,3]</sup> 根据卫星遥测数据的分析认为: 以往对亚洲地区降雪量的估计不足。Chao 分别计算了降雨(包括蒸发)和雪负荷这两部分激发函数, 发现两者所包括的水质量接近, 而相位相反。因而得出结论: 水贮量对周年极移的激发作用比以往的估算要小得多。J. Kuehne 和 C.R. Wilson 利用流域积分方法重新计算了地面水贮量对极移的激发影响, 结论与 Chao(1988) 的基本一致, 即水贮量的重新分布对周年极移的激发影响很小(见图 2)<sup>[6]</sup>。从大气与水分布的综合激发与极移实际所需的激发的偏差看, 一定存在某些未知的激发源。

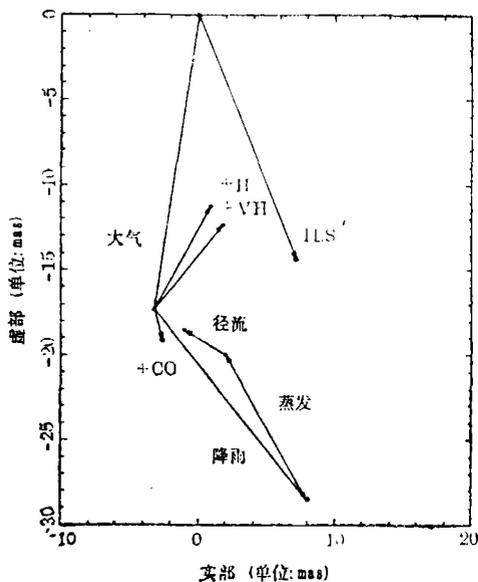


图 2 正向周年激发矢量分布图。H, VH 和 CO 分别代表 Hinnov 和 Wilson, van Hylckama, Chao 和 O'Connor 的结果

### 2. Chandler 极移的激发

大气质量和水贮量的变化可能不具备严格

的周期性，因而可能激发 Chandler 极移。Munk 和 Hassan 计算了大气的 Chandler 激发，得出结论，大气质量的重分布对 Chandler 极移的影响很小。Wilson 的结果提出了另一种看法，大气质量分布的 Chandler 激发占实测激发能量的 1/4。如综合考虑水贮量和山脉力矩的影响，激发能量占所需能量的一半以上，即气象激发是维持 Chandler 极移的一个重要因素。Wahr 计算了大气和海洋对 Chandler 极移的影响，认为大气海洋的 Chandler 激发只占所需能量的 1/4—1/5，显然还存在更重要的激发源。

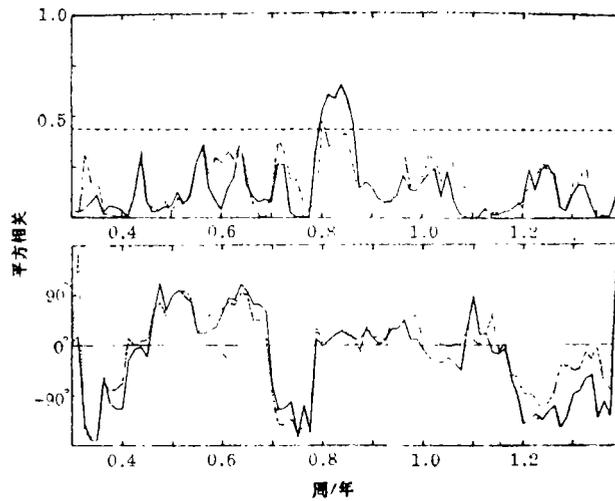


图 3 实算激发(未考虑水分布)与 ILS 激发的平方相关和交叉相位谱，虚线代表  $\delta=10\%$ ，实线代表  $\delta=100\%$ <sup>[5]</sup>

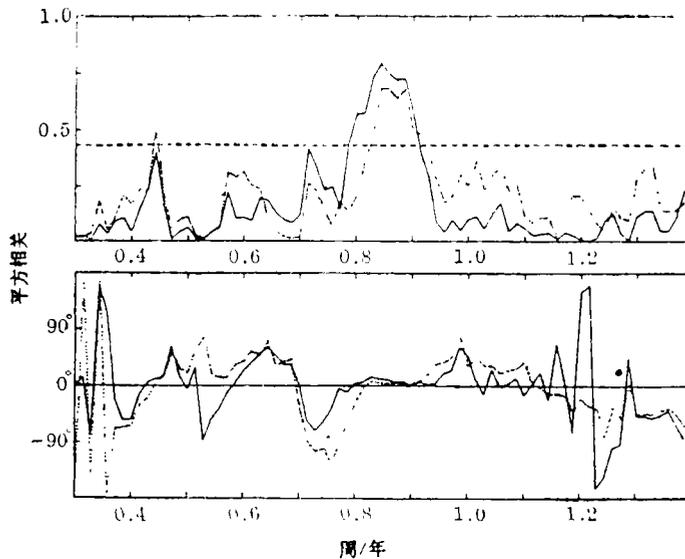


图 4 考虑水分布后的实算激发与 ILS 激发的平方相关和交叉相位谱，虚线代表  $\delta=10\%$ ，实线代表  $\delta=100\%$ <sup>[5]</sup>

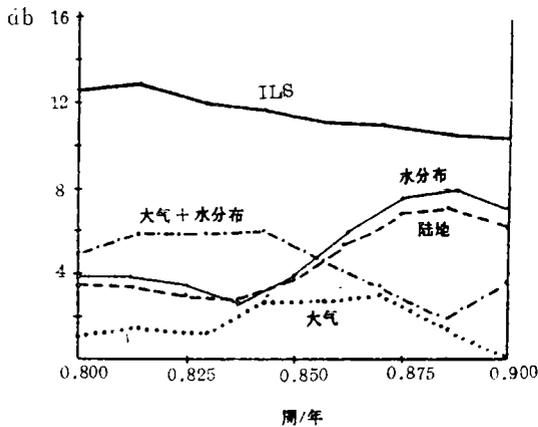


图 5 Chandler 激发的平均功率<sup>[5]</sup>

由于水贮量对周年极移的激发作用相对较小, 在研究 Chandler 极移的激发根源时, 人们对水贮量的影响在一段时期内没有给予足够的重视. Hinnov 计算了水贮量和大气 Chandler 激发。结果表明在考虑了水贮量的影响以后, 计算得到的激发函数与实测激发的相关性明显加强了(见图 3, 图 4)<sup>[6]</sup>。水贮量和大气综合激发功率占 ILS 功率的 1/2 以上(见图 5)<sup>[5]</sup>。这表明水贮量的变化对 Chandler 极移的激发起着重要作用。Kuehne 计算的大气和水分布的综合激发占所需激发的 1/3。进一步的定量研究受两方面的限制: 一是 ILS 数据噪声比较大, 只在 Chandler 频率附近有较高的信噪比, 进行比较时频带太狭; 另一方面是目前的水文模型过于粗糙, 主要是由于数据样本不均匀也不充分。

从前面的介绍可以看出, 对水贮量的周年激发存在两种相反的观点。一种是肯定 [van Hylckama, Wilson, Hinnov, 雷小平], 另一种持否定态度 [Chao, Kuehne]。对水贮量的 Chandler 激发, 目前的主要分歧是如何给出可靠的定性结果。下面将从基本的水文模型出发, 提出建立更可靠的水文模型的一些想法。

## 二、水文模型对水分布激发的影响

### 1. 基本理论

如果我们不考虑外力矩的作用, 激发函数  $\psi(t)$  应包括两部分: (1) 物质重新分布的激发  $\psi_{\text{matter}}(t)$ ; (2) 物质相对运动的激发  $\psi_{\text{motion}}(t)$ 。我们面临的问题是如何利用准确的模型和数据使实际求得的  $\psi_{\text{matter}}(t) + \psi_{\text{motion}}(t)$  与理论上的  $\psi(t)$  尽可能地相符。我们可以忽略固体地球内部质量分布变化和运动的影响, 只考虑大气、海洋和地面水分布的变化。利用表面负荷  $L(\theta, \lambda, t)$  表示固体地球上任一点  $(\theta, \lambda)$  在  $t$  时刻由大气、海洋和水分布产生的压力负荷, 则:

$$\psi_{\text{matter}}(t) = -\frac{R^2}{C-A} \int [L(\theta, \lambda, t) - \bar{L}(\theta, \lambda, t)] \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \cdot e^{i\lambda} ds \quad (1)$$

式中  $R$  为地球平均半径,  $C, A$  为地球的二个主惯量矩,  $\bar{L}(\theta, \lambda, t)$  为对  $t$  的平均。  $ds = R^2 \cdot \sin \theta \cdot d\theta d\lambda$ 。

物质运动的激发函数  $\psi_{\text{motion}}$  主要指风和洋流的影响, 根据 Wilson 和 Wahr 的分析, 这一部分只占激发能量的 1/10。物质分布中, 对大气、海洋的激发影响现已基本取得一致的结论。本文重点分析全球水分布的影响。

### 2. 水文模型的影响<sup>[9,18,19,20,21]</sup>

水分布的变化取决于三个因素: 降雨量  $P$ , 蒸发量  $E$  和径流量  $R$ 。其中,  $P$  是实测值。

$E$ 和 $R$ 无实测资料, 只能利用模型来计算。从图2中可以看出, 蒸发量 $E$ 对激发的影响很大。给出可靠的 $E$ 是计算水分布激发函数的前提。对蒸发量 $E$ 的处理方法一般可分为三类:

- (1) 忽略水分蒸发的影响<sup>[5]</sup>;
- (2) 采用近似公式<sup>[16]</sup>;
- (3) 利用国际教科文组织 (UNESCO) 给出的个别台站的蒸发量<sup>[6]</sup>。

其中(1), (3)显然不可取。建立可靠的水文模型, 利用近似公式计算各点的 $E$ 应该比较适当的。以往计算 $E$ 是利用区域及全球的水质量守恒, 由 UNESCO 给出的世界各大流域的径流系数 $r$ 反推蒸发量 $E$ 。对很大区域(例如中国大陆)采用同一径流系数, 本身就不可靠, 由此推导出的蒸发量 $E$ , 也是不可靠的。

傅抱璞<sup>[20]</sup>(1986)给出了计算陆面蒸发量的近似公式,

$$E = E_0 \left\{ 1 + \frac{P}{E_0} - \left[ 1 + \left( \frac{P}{E_0} \right)^m \right]^{1/m} \right\} \quad (2)$$

式中 $E_0$ 为最大可能蒸发量,  $m$ 为可调因子 $1 \rightarrow \infty$ , 由下垫面的特性决定。 $E_0$ 可由Thorntwaite公式计算:

$$\begin{aligned} E_0 &= 1.6(10T/I)^\alpha \\ I &= \sum_1^{12} (T/5)^{1.514} \\ \alpha &= 0.49239 \end{aligned} \quad (3)$$

$I$ 为全年的热量指数,  $T$ 为月平均气温。这样由两个观测量 $P$ 和 $T$ , 再加上调节因子 $m$ , 我们可以估算出地面某点的蒸发量 $E$ 。

### 三、讨 论

1. 蒸发量的确定对计算水分布的激发有很大影响, 由径流量 $R$ 反推蒸发量 $E$ 会带入较大误差。

2. 采用傅抱璞<sup>[20]</sup>的模型, 我们可以由 $P$ ,  $T$ 两个观测量求出蒸发量 $E$ , 并可充分考虑地区间蒸发下垫面和气象因素差异。利用这一蒸发量 $E$ 可以对 UNESCO 给出的径流系数 $r$ 作一定修正。

3. 海洋、大气中水分布的变化应加以考虑。极区水分布的变化也不应忽略。

本项工作分为两部分。本文为第一部分: 综述与基本理论。计算分析部分待完成后另文发表, 金文敬和高布锡两位老师以及 Dr. B. Chao 对本工作提供了许多资料和帮助, 特此致谢。

### 参 考 文 献

- [1] Barnett, T. P., *J. G. R.*, 89 (1984), C5, 7980.
- [2] Chao, B. and O'Connor, *Geophys. J.*, 94 (1988), 263.
- [3] Chao, B. and Andrew, Y. A., *J. G. R.*, 96 (1991), B4, 6577.
- [4] Dickman, S., *J. G. R.*, 93 (1988), 14941.
- [5] Hinnov, L. and Wilson, C., *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 88 (1987), 437.

- [ 6 ] Kuehue, J. and Wilson, C., *J. G. R.*, 96 (1991), B3, 4337.  
 [ 7 ] Lambeck, K. and Hopgood, P., *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 64 (1981), 67.  
 [ 8 ] Merriam, J. B., *Geophys. J. R., Astron. Soc.*, 70 (1982), 41.  
 [ 9 ] Penman, H. L., in *Vegetation and Hydrology*, p. 40 Commonwealth Agricultural Bureaux, England, (1963).  
 [10] van Hylckama, T. E. A., Water balance and earth unbalance, in *Symposium on World Water Balance*, (1970).  
 [11] Wahr, J. M., *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 70(1982), 349.  
 [12] Wahr, J. M., *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 74(1983), 451.  
 [13] Wilson, C. R. and Haubrich, R. A., *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 46 (1976), 707.  
 [14] Wilson, C. R., IERS Report of Meeting No. 9, (1991), p. 1.  
 [15] Wilson, C. R. and Haubrich, R. A., *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 46 (1976), 745.  
 [16] 雷小平, 高布锡, *天文学报*, 33 (1992), 61.  
 [17] 高布锡, 孙永庠, *天文学报*, 28(1987), 46.  
 [18] 陈力, *气象学报*, 40 (1982), 219.  
 [19] 高国栋等, *地理学报*, 33 (1978), 102.  
 [20] 傅抱璞, *大气科学*, 5(1981), 23.  
 [21] 彭公炳等, *气象学报*, 40(1982), 209.  
 [22] K. 兰伯克, 地球自转的变化, 李志安等译, 单心福编, 50, 地震出版社, 北京, (1988).

(责任编辑 舒似竹)

## The Excitation Effects of Water Distribution on Polar Motion—Review and Theory

Chen Jianli

(Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030)

### Abstract

In the first part of this paper, we give a review of the estimations of water distribution contribution to the excitation of polar motion. There are two contrary opinions of its contribution to the annual excitation and much discrepancies to the Chandler excitation. In the second part, we give an introduction to the theory of the water distribution excitation and analysis the influences of hydrological model on the excitation. We also propose some suggestions in order to set up a new hydrological model and to give a reliable estimate of the annual and Chandler excitation of water storage distribution.