

# 略论引潮力的交变应力效应 及其地球动力学意义

吴 珍 汉

(中国地质科学院地质力学研究所)

**摘 要** 地球在日、月引潮力作用下,产生周期性引潮力与西向引潮力。周期性引潮力所致构造应力达到  $10^4$  Pa 左右的量级,属对称循环交变应力,对应于  $10^5$  Pa 量级的静态构造应力,对地震等构造过程能起显著的触发作用。西向引潮力所致西向剪应力达到  $10^6$  Pa 左右的量级,属脉动循环交变应力,对应于  $10^6$  Pa 量级的静态构造应力,对岩石圈、软流圈水平运动有显著的驱动意义,是构造运动基本驱动力之一。

**关键词** 交变应力效应 引潮力 构造运动 地球动力学

## 0 引言

交变应力是工程力学中的重要概念,交变应力效应是与材料力学强度、疲劳极限等概念密切相关的工程力学现象<sup>[1]</sup>,但交变应力与交变应力效应在地学界仍是陌生的术语,至今绝大部分地质与地球物理学家都未曾注意它在地球动力学中的意义。然而,地球自形成以来,便受到太阳引潮力所致交变应力的作用,至少在近 3000Ma 的历史中,长期受到日、月引潮力所致交变应力的作用。这些构造应力的交变应力效应在地球动力学过程中长期发挥着重要的触发或驱动作用。考虑到引潮力的交变应力效应后,将引导学者们从新的角度去思索一些长期悬而未决的重大地球科学问题,如日-地-月位置与地震的关系及其动力学成因问题<sup>[2-8]</sup>、全球构造和地球圈层运动与地球旋转的相关性及其动力学机制问题<sup>[3]</sup>、地球构造演化阶段与天文周期相关性及其产生机理问题<sup>[4]</sup>、构造运动的驱动力与驱动机制问题<sup>[5]</sup>等。

本文将在介绍交变应力与交变应力效应的基础上,讨论周期性引潮力与西向引潮力及其交变应力效应,进而探讨它们的地球动力学意义。

## 1 交变应力与交变应力效应

工程力学上,称随时间作周期性改变的载荷叫交变载荷,把随时间作周期性变化的应力称为交变应力,其特征如图 1 所示。交变应力每重复变化一次的过程称为一个应力循环。应力循环中,最小应力  $e_{\min}$  与最大应力  $e_{\max}$  之比,称为交变应力循环特征值,用  $V$  表示,即

$$\gamma = \sigma_{min} / \sigma_{max} \quad (1)$$

式中,当  $e_{max} = -e_{min}$ , 即  $V = -1$  时, 交变应力称为对称循环交变应力, 如车轴弯曲正应力即为对称循环交变应力。当  $e_{min} = 0, e_{max} > 0$  时,  $V = 0$ , 此时的交变应力称为脉动循环交变应力, 如齿轮齿根处的弯曲正应力即属此类。图 1a、b 分别示对称循环交变应力与脉动循环交变应力的特征。当应力循环中,  $e_{max}$  与  $e_{min}$  均为固定值时, 则这类交变应力称为稳定交变应力, 否则为不稳定交变应力。

交变应力长期循环作用会使材料的力学强度大大降低, 这已为大量的工程实验所证实<sup>[1]</sup>。通常将交变应力长期作用使材料的力学强度明显降低的现象称为交变应力效应。图 2 示低碳钢试件最大弯曲正应力  $e$  与断裂前所需应力循环

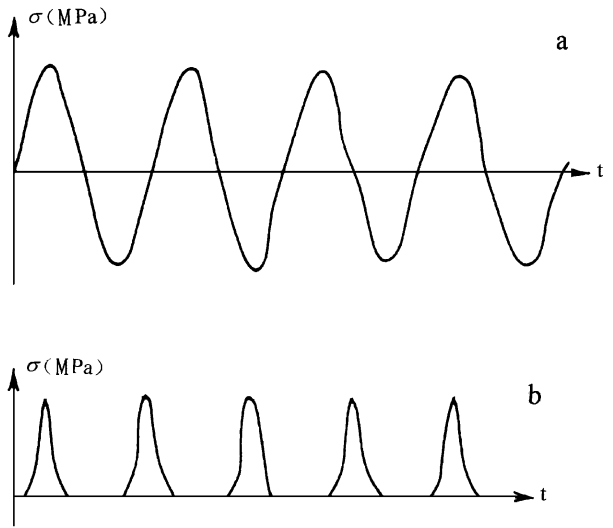


图 1 常见两类交变应力示意图

Fig. 1 Diagrams illustrating the two types of periodic alternating stress

(a) 对称循环交变应力 ( $|e_{max}| = |e_{min}| \neq 0$ );

(b) 脉动循环交变应力 ( $e_{max} > 0; e_{min} = 0$ )

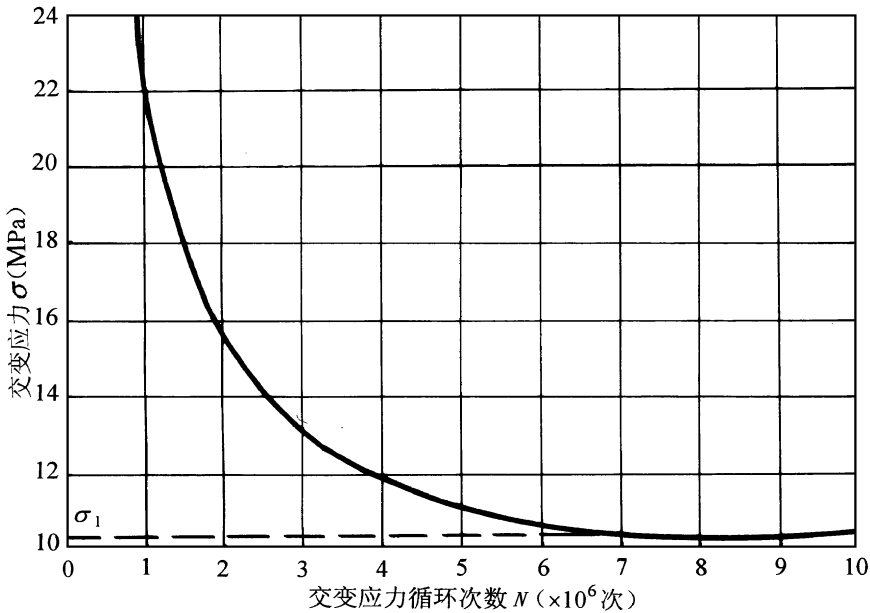


图 2 低碳钢断裂前交变应力 ( $e$ ) 与应力循环次数 ( $N$ ) 关系图

(据工程力学<sup>[1]</sup>实验资料编绘)

Fig. 2 Curve of stress before fractured ( $e$ ) vs. number of periods ( $N$ ) of steel of low carbon according to the engineering experiment results

次数  $N$  的关系。其中,  $e_1$  示该钢材的弯曲对称循环疲劳极限。从图中可以看出, 低碳钢的力学强度随应力循环次数的增多显著地降低。一些材料, 如铅、镁合金等, 即使  $e_{max}$  很低, 经一定数

量的循环应力作用后,也会出现破裂,因此其疲劳极限  $\sigma_s$  趋于 0

交变应力效应在日常生活中经常被自觉或不自觉地加以利用。如将一根较粗的铁丝用手或工具施加一个较小的弯力矩,一次较小力只能产生一定的弯曲,而不会产生断裂;但用同样大小而方向作周期性变化的力(脉动循环交变应力)反复作用十几次几十次,最终将使铁丝断为 2 段,即产生破坏。再如野外地质工作中,当我们用铁锤反复敲击坚硬岩石的同一部位,即对岩石施加脉动循环交变应力。这些岩石的抗压强度常达到  $10^5$  MPa 量级,铁锤敲击所施加于岩石表面的力一般小于 10 MPa,所以,敲击一次一般很难使岩石产生破坏,但若几十次反复敲打该坚硬岩石的同一部位,最终将使岩石产生破坏。这些都是交变应力效应的典型实例。

材料在一定条件下受交变应力的长期作用后,力学强度(抗压强度、抗拉强度、抗剪强度)可降低十数倍至上百倍,导致非常显著的交变应力效应,这已为工程力学实验所证明。工程实验揭示,在应力集中、表面粗糙、材料受交变应力作用面积增大、材料内部存在缺陷、温度升高、材料有一定含水性等条件下,交变应力效应会成倍地增加;将这些因素综合到一起,总体交变应力效应将达到十倍以上。所谓“水滴石穿”便是在一定条件下,微小交变应力长期作用产生巨大动力学效应的良好实例。如从 5 m 左右高度(如屋檐)滴下的小水滴,滴至地面时,自重加上冲击力在内一般不会超过  $10^5$  Pa。这样小的力若长期静止作用于岩石表面,即便作用时间达到千年或万年,也不会在岩石表面留下永久性变形痕迹(压坑);然而,同样大小的交变应力,即下雨时滴水反复撞击岩石表面所致周期性应力,仅作用 20 年左右,便可在较为坚硬的岩石表面产生半径达 0.5—1.5 cm、深度达 0.25—1.0 cm 大小不等的滴水槽。若用恒定(静态)应力作用一次,要产生同样大小的变形坑(滴水坑),至少需要  $10^6$ — $10^7$  Pa 量级的恒定应力。可见,滴水所致交变应力效应大约使岩石的力学强度降低了 1—2 个数量级。

## 2 引潮力及其所致构造应力

地球在日、月引力场内受到日、月引潮力的作用,产生海洋潮汐、固体潮汐与大气潮汐 3 种不同类型的潮汐应变成象。本文主要讨论固体地球所受到的周期性引潮力与西向引潮力及其交变应力效应的地球动力学意义。

地球在天体  $m$  引力的作用下,将在地球表层产生引潮位  $U_2$  与周期性引潮力  $F$ ,且存在如下关系式<sup>[14]</sup>:

$$U_2 = \frac{3}{4} G \times m \frac{a^2}{R^3} \left[ 3 \left( \frac{1}{3} - \sin^2 h \right) \left( \frac{1}{3} - \sin^2 W \right) + \sin 2h \sin 2W \cos T + \cos^2 h \cos^2 W \cos 2T \right] \quad (2)$$

$$F_r = - \frac{3}{2} G \times m \frac{a}{R^3} \left[ 3 \left( \frac{1}{3} - \sin^2 h \right) \left( - \frac{1}{3} - \sin^2 W \right) + \sin 2h \sin 2W \cos T + \cos^2 h \cos^2 W \cos 2T \right] \quad (3)$$

$$F_h = - \frac{3}{4} G \times m \frac{a}{R^3} \left[ - 3 \sin 2h \left( \frac{1}{3} - \sin^2 W \right) + 2 \cos 2h \sin 2W \cos T - \sin 2h \cos^2 W \cos 2T \right] \quad (4)$$

$$F_h = \frac{3}{4} G \times m \frac{a}{R^3} \left[ 2 \sin^2 h \sin 2W \sin T + \sin 2h \cos^2 W \sin 2T \right] \quad (5)$$

其中,  $F_r$ 、 $F_h$ 、 $F_h$  分别表示径向、经向、纬向引潮力分量,量纲与重力  $g$  相同;  $a$  为地球半径,  $R$  为地心至天体中心的距离,  $h$  为地理纬度,  $W$  为天体的赤纬,  $T$  为天体的时角,  $G$  为万有引力常数,

$m$  为天体质量

据这些公式,选择一定的模型与边界条件,即可从理论上计算出任一时刻日、月引潮力所致全球构造应力场。王仁、丁中一<sup>[6,7]</sup>对此做过详细的研究工作,丁中一等<sup>[8]</sup>尚剖析了周期性潮汐引力触发地震的可能性。根据他们的理论计算分析结果,周期性引潮力所致构造应力可达到  $10^2 - 10^4$  Pa量级。另外,日、月引潮力所致固体地球的潮汐应变一般为  $10^{-7} - 10^{-8}$ 量级<sup>[9]</sup>;而据王仁等<sup>[6]</sup>资料,大陆地壳在 2-22 km 深度的平均弹性系数为  $86.25 \times 10^9$  Pa,根据虎克定律,对应的周期性潮汐应力为  $10^4$  Pa左右的量级。

固体地球并非完全弹性,所以在引潮力作用下会显示出一定的滞后效应,对应于潮汐滞后角  $X$ ,从而引起地球形状的不对称性,产生西向引潮力(图 3); Moore(1973)与 Bostrom等(1974)称之为 westward tidal lag 或 westward tidal drag,即西向潮汐拖曳力。

兹将西向引潮力用  $g_w$  表示,且:

$$g_w = - \frac{\partial U_2}{r \cdot \cosh \lambda} \quad (6)$$

其中,  $r$  为观察点至地心的距离。将(2)式代入(6)式,得西向引潮力表达式如下:

$$g_w = K \cdot r \cdot g (\sinh \sin 2W \sin T + \cosh \cos^2 W \sin 2T) \quad (7)$$

$$K = \frac{3}{2} \frac{G \cdot m}{R^3} \frac{1}{g} \quad (8)$$

对于月球,  $K = 8.4 \times 10^{-8}$ ; 对于太阳,  $K = 3.88 \times 10^{-8}$ 。

西向引潮力所致西向剪应力  $f_w$  可表示为:

$$f_w = 1.425 \times 10^7 \frac{r}{a} \cos^3 h \sin 2X \quad (9)$$

据(9)式可估算出地球岩石圈、软流圈、下地幔所受到的西向剪应力,如表 1所示。从表 1可看出,西向引潮力产生的西向剪应力在不同圈层不尽相等。岩石圈西向剪应力为 0.04-0.17 MPa,软流圈为 0.1-0.26 MPa,下部地幔约为 0.001 MPa;可见,岩石圈与软流圈西向剪应力达到  $10^5$  Pa 的量级,下部地幔仅为  $10^3$  Pa 的量级,岩石圈、软流圈所受到的西向剪应力远大于下地幔。另外,据月-地角动量转换关系与天文观测所得月球角动量变化资料估算,固体地球所受西向剪应力达到  $10^4 - 10^5$  Pa 的量级<sup>[14]</sup>,与以上计算结果相近。

### 3 引潮力交变应力效应的地球动力学意义

#### 3.1 驱动构造运动所需应力的大小

究竟多大的应力能驱动构造运动? 对这个问题至今仍存在多种不同的认识。由多种不同方法积累的构造应力实测资料客观地揭示了驱动构造运动所需应力的大小及其空间展布规律。统计分析表明,现今不同类型构造单元,包括构造活动区在内,构造应力绝大部分都以近水平方向的压应力为主<sup>[10]</sup>。估算出的大地震(7级以上)伴随的应力降一般为 0.2-5.0 MPa 之

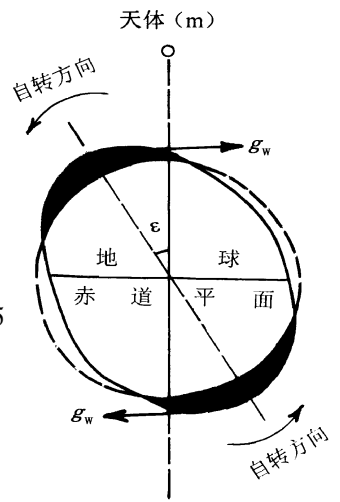


图 3 潮汐滞后与西向引潮力示意图

Fig. 3 Map illustrating the westward tidal drag

表 1 西向引潮力引起的最大剪应力一览表

Table 1 Maximum shear stress of different layers of the Earth caused by the westward tidal drag

地球圈层	滞后角 $X^\circ$	重力 $g(\text{cm}/\text{s}^2)$	密度 $d(\text{g}/\text{cm}^3)$	剪应力 $f(\text{MPa})$
岩	0.6			0.0418
石	1.0	981	3.32	0.0688
圈	1.5			0.105
	2.5			0.172
软	1.43			0.106
流	2.29	998	3.51	0.162
圈	3.5			0.261
下地幔	0.13	1008	4.6	0.0013

间。实测地表构造应力,包括最大主应力、最小主应力、最大剪应力在内,一般仅为  $10^6$  Pa 即 MPa 的量级;实测上地壳最大主应力一般为 10-30 MPa,最小主应力一般为 2-20 MPa,最大差应力一般为 2-25 MPa,对应的最大剪应力变化大部分在 1-12.5 MPa 之间(图 4)。岩石圈底部构造应力一般为  $10^5$ - $10^6$  Pa 的量级。岩石圈表部的构造应力随深度的增加而加大<sup>[11]</sup>(图 4),而岩石圈深部的构造应力随深度的增加反而减小<sup>[12]</sup>。

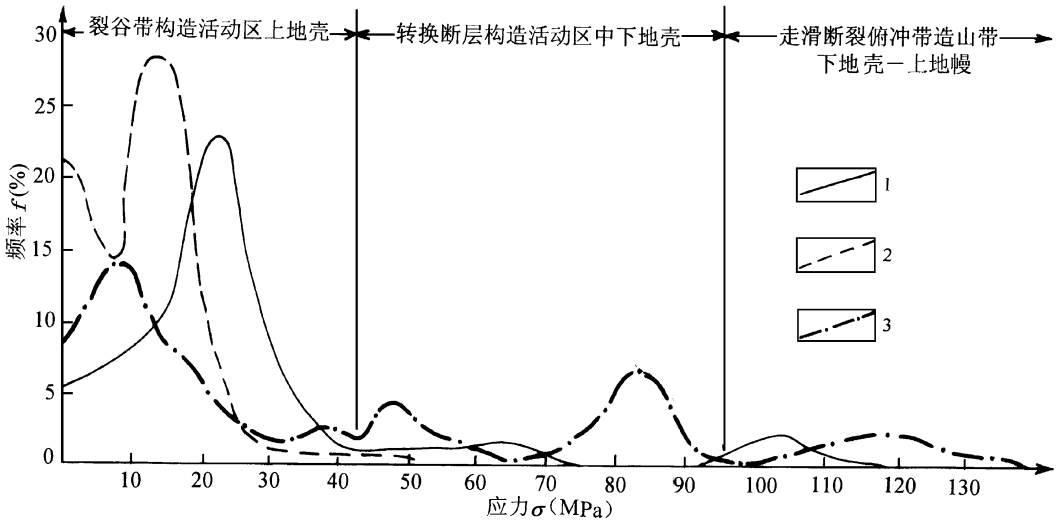


图 4 现今地球表层不同构造单元构造应力的统计分布图  
(据 203 个测点的资料)

Fig. 4 Statistic distribution of present tectonic stresses of the Earth's surface layers  
1. 最大主应力  $\sigma_1$ ; 2. 最小主应力  $\sigma_3$ ; 3. 差应力  $\sigma_1 - \sigma_3$

根据以上资料,无论哪种动力,只有当其对应的构造应力达到或超过  $10^6$  Pa 或 MPa 的量级时,才有可能作为固体地球构造运动的基本驱动力。

### 3.2 引潮力的交变应力效应及其地球动力学意义

周期性引潮力与西向引潮力引起的构造应力都属于交变应力。前者的应力大小与方向随时间作周期性变化(图 5b),属对称循环交变应力;后者仅应力大小随时间作周期性变化(图 5a),而应力方向始终向西,属脉动循环交变应力。考虑到交变应力具有降低岩石力学强度的交变应力效应,且日、月引潮力引起的构造应力每天循环次数均达 2 次左右。在数亿年的地质历史时期中,循环次数可达到  $10^8$  次以上的量级。在受到这么多次交变应力的反复作用下,岩石的力学强度必定显著降低;作较为保守的估计,设在引潮力反复作用下,岩石力学强度可降低 10 倍。这相当于上述两种引潮力的实际动力学效应增加 10 倍,即对应的静态构造应力达到  $10^5 - 10^6$  Pa 的量级。与前述实测构造应力相比,如此大的交变应力足以具有重要的构造意义。

周期性引潮力产生的构造应力达到  $10^4$  Pa 左右的量级,考虑到交变应力效应,相当于  $10^5$  Pa 的静态构造应力,接近于大地震时的应力降低值;但由于其大小与方向均作周期性变化(图 5b),所以仅能对构造过程(如地震等)起触发作用,而对驱动岩石圈块体的运动不会有显著的贡献

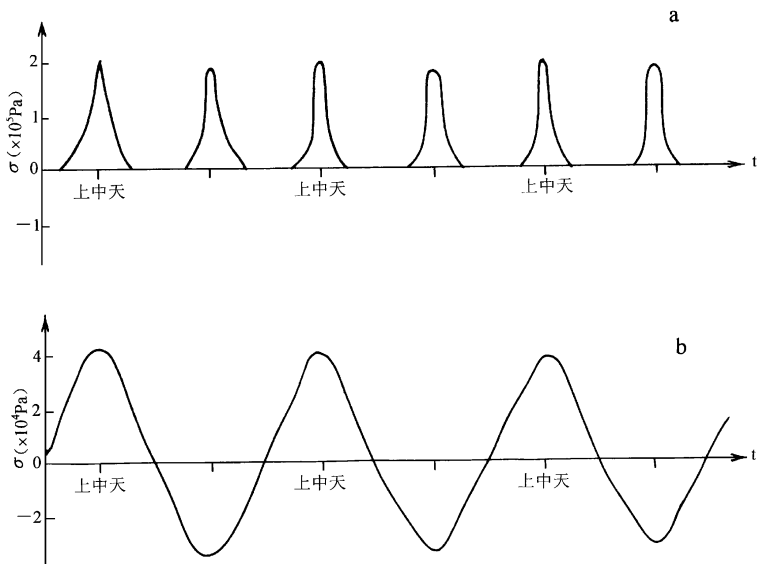


图 5 引潮力引起的构造应力特征图(周期取决于日-地-月关系)

Fig. 5 Diagram illustrating the tectonic stresses caused by the tidal forces  
(a)西向引潮力产生的西向剪应力;(b)周期性潮汐应力

西向引潮力产生的西向剪应力达到  $10^5$  Pa 的量级,考虑到其交变应力效应,相当于  $10^6$  Pa 的静态构造应力,与地表所测不同单元构造应力量级相同,略大于岩石圈底部构造应力。由于该应力的大小作周期性变化,方向基本不变,始终以西向为主,所以对驱动构造运动有重要意义。西向引潮力在不同圈层产生不同大小的西向剪应力,导致岩石圈、软流圈、下地幔等不同圈层的不等速西向运动是全球构造运动的基本驱动力之一<sup>[3]</sup>。

另外,潮汐摩擦与西向引潮力的西向力矩,还是导致地球自转速度长期变慢的重要动力学原因,这已被大量天文观测资料与古生物钟资料所证实<sup>[13]</sup>,为多数天文学家和地质、地球物理学家所公认。

## 4 结论与讨论

### 4.1 基本结论

通过以上分析,得出下列基本结论:

(1) 交变应力的长期作用可显著降低材料的力学强度。

(2) 引潮力引起的构造应力是长期作用于地球的交变应力。周期性引潮力产生对称循环交变应力,而西向引潮力产生脉动循环交变应力。

(3) 周期性引潮力及其交变应力效应对构造过程能够产生一定的触发作用,而西向引潮力及其交变应力效应对地球不同圈层的不等速西向运动具有驱动意义。

### 4.2 问题讨论

材料力学实验结果表明<sup>[1]</sup>,只有当交变应力大于材料的疲劳极限时,才能产生显著的交变应力效应。对塑性、粘塑性与粘性材料,当所处温度高于一定的临界值时,其疲劳极限趋于零。在这种条件下,即便交变应力低于材料强度 1-2 个数量级,也能产生显著的交变应力效应。对地球而言,10-20 km 表壳以下的岩石处于 600°C 以上的高温环境,其中介质的疲劳极限很低,所以,较小的引潮力应能够产生显著的交变应力效应;但不同温压条件下的岩石在不同大小的交变应力作用下,其强度变化、疲劳极限及其与应力循环次数的定量关系,尚有待于进一步的实验研究。

## 参 考 文 献

- 1 北京钢铁学院,东北工学院编.工程力学.北京:高等教育出版社,1979
- 2 高伟,刘蒲雄,等.地震与太阳、月亮位置的关系.地震学报,1996,18(1)
- 3 吴珍汉.全球构造运动与地球自转相关性的新证据.地质力学学报,1995,1(3)
- 4 徐道一,等.天文地质学概论.北京:地质出版社,1983
- 5 马宗晋,杜品仁.现今地壳运动问题.北京:地质出版社,1995
- 6 王仁,丁中一.轴对称情况下地球自转速率变化及引潮力引起全球应力场.天文地球动力学文集,上海:上海天文台编辑出版,1979
- 7 王仁,丁中一.轴对称情况下地球速率变化及引潮力引起全球应力场.地质力学论丛,第6号,北京:科学出版社,1982
- 8 丁中一,贾晋康,王仁.潮汐应力对地震的触发作用.地震学报,1983,5(2)
- 9 方俊编.固体潮.北京:科学出版社,1984
- 10 Zoback M. L. First-and second-order pattern of shear stress in the lithosphere: the World Stress Map Project. Jour Geophys Res, 1992, 97(B8): 11703-11728
- 11 王连捷,潘立宙,等.地应力测量及其在工程中的应用.北京:地质出版社,1991
- 12 马科斯·怀斯编.地球的应力.马瑾等译.北京:科学出版社,1984
- 13 Lambeck K 著.地球自转的变化.李志安等译.北京:地震出版社,1988
- 14 吴珍汉.旋转地球动力学.北京:地质出版社,1997

# ON THE EFFECT OF ALTERNATING STRESS RESULTING FROM THE TIDAL FORCE AND ITS BEARING ON GEODYNAMICS

Wu Zhenhan

(*Institute of Geomechanics, CAGS*)

**Abstract** Under the action of tidal force of the Sun and Moon a periodic tidal force and the westward tidal drag occur in the Earth, the former belonging to a symmetric cyclic alternating stress results in the tectonic stress which is the order of magnitude of  $10^4$  Pa roughly equal to static tectonic stress of  $10^5$  Pa and plays a prominent role in the triggering of earthquake; the later causes the westward shear stress belonging to pulsating cyclic alternating stress which is the order of magnitude of  $10^5$  Pa roughly equal to static tectonic stress of  $10^6$  Pa and makes an important contribution to the horizontal movement of lithosphere and asthenosphere and is a fundamental dynamical factor resulting in the tectonic movement.

**Key words** effect of alternating stress, tidal force, tectonic movement, geodynamics

## 作者简介

吴珍汉,男,1965年生,博士,研究员。1985年毕业于中国地质大学(武汉),主要从事区域构造、活动断裂与新构造、成矿作用及地球动力学研究工作。通讯地址:北京市海淀区民族学院南路11号地质力学研究所。邮政编码:1000081