

文章编号:1001-5361(2001)03-0001-05

地 球 的 潮 汐 力

The Earth Tide Force

刘全稳¹, 陈景山¹, 赵金洲¹, 严宇珍¹, 曹淑丽²

(1. 西南石油学院 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 南充 637001;

2. 新疆油田公司勘探开发研究院 地球物理研究所, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要:在理论推理和数理分析的基础上, 获得了地球产生周期性涨落变形的潮汐力表达式. 由潮汐力导致的潮汐, 其波长和振幅随地球离黄道面的远近不同而变化. 随着距离增加, 波长与振幅逐渐减小, 但同一环线上振幅各点一致. 周期约 12h. 地球的胀缩特性和沿轨道径向的变化速度, 是影响地球潮汐能量的决定因素之一, 地球公转轨道的 268°15' 处为潮汐能量最大处. 地球的潮汐力是由椭圆轨道运动产生的, 由于月球的轨道运动是以地球为焦点, 所以在月球上可以产生受地球影响的潮汐, 而不可以产生相反的潮汐. 因为海水或岩浆没有以月球为焦点的轨道运动.

关键词:地球物理, 潮汐力, 穿切黄道面, 椭圆轨道, 潮汐能

中图分类号:P312.4 **文献标识码:**A

自从人类认识了潮汐, 探索潮汐力的进程就从未停止过. 如今, 取得比较公认的月球引潮观点, 占据着较为重要的地位. 这种观点认为, 地球上所有产生周期性涨落变形的现象, 均是由于月球与地心单位质点的引力和月球与目标单位质点的引力差(即所称引潮力)造成, 如海水潮汐, 大气潮汐, 固体潮汐等. 由于一直没有新的更据理性和说服力的论点问世, 长期以来, 由万有引力发展起来的月球等天体对地球物体的引潮力得以流行, 以致于引潮力明显存在的一些缺陷也被人们忽略, 这些缺陷包括: 大气潮汐所具有的规则半日潮, 与月球活动没有影响; 太阳—地球—月球处于一线的相同状态有春分和秋分时节, 但两时段的海潮却完全不能相比等.

为了研究解释地球穿切黄道面带海水的运动规律, 参考文献[1]成功地建立起导致海水运动的理论公式^[1], 在参考文献[2]中, 这些公式被定义成强西力、强中纬力、强子午力、穿黄低纬东聚力等^[2]. 本文将在文献[1]所建立的分析系统基础上, 讨论地球的潮汐力问题.

1 潮汐力的理论公式

参见文献[1]式(21), 令:

$$F_1 = m \frac{1}{\sqrt{u}} (l - L \cos \theta) \ddot{l} \quad (1)$$

$$F_2 = m \frac{1}{\sqrt{u}} (L - l \cos \theta) \ddot{L} \quad (2)$$

那么, F_1, F_2 或者 $F_1 - F_2$ 即为地球的潮汐力. 具体分析如下:

1.1 关于作用力 F_1

根据文献[1]式(19), 化简, 有:

$$\begin{aligned} F_1 &= m \cos \alpha \cos \beta \ddot{l} \\ &= \frac{1}{2} m [\cos(\alpha + \beta) + \cos(\alpha - \beta)] \ddot{l} \quad (3) \end{aligned}$$

显然, 由式(3)我们获知作用力 F_1 是由两个力组成, 即:

$$F_{11} = \frac{1}{2} m \cos(\alpha + \beta) \ddot{l} \quad (4)$$

收稿日期: 2001-02-27

基金项目: 国家重点实验室开放课题资助(PLN0108)

作者简介: 刘全稳(1962-), 男, 湖北仙桃人, 博士, 现主要从事地质动力方面的研究.

$$F_{12} = \frac{1}{2} m \cos(\alpha - \beta) \ddot{l} \quad (5)$$

$$F_1 = F_{11} + F_{12} \quad (6)$$

满足式(3)的条件:由于 F_1 的大小与 $\ddot{l}$ 成正比,为余弦函数关系,所以,惯性力 F_1 的方向在地球公转轨道的法线方向。

加速度 $\ddot{l}$ 是受椭圆轨道控制的非对称性周期函数^[4],在不考虑其自身变化的前提下,我们先讨论作用力与 α, β 的关系:

由式(4)

当 $\alpha + \beta = 0$ 时,有最大值,此时 $\alpha = -\beta$ 。

由于 $\alpha \in [-90^\circ, 90^\circ]$,所以,产生最大值的地球黄经范围为 $\beta \in [-90^\circ, 90^\circ]$ (图1a)。这也就是说,夏半球的白天为产生最大值的时间。

当 $\alpha + \beta = 90^\circ$ 或 270° 时,作用力等于零,此时 $\beta = 90^\circ - \alpha$ 或 $\beta = 270^\circ - \alpha$ (图1b)。

当 $\alpha + \beta = 180^\circ$ 时,有负的最大值,此时 $\beta = 180^\circ - \alpha$ (图1c)。

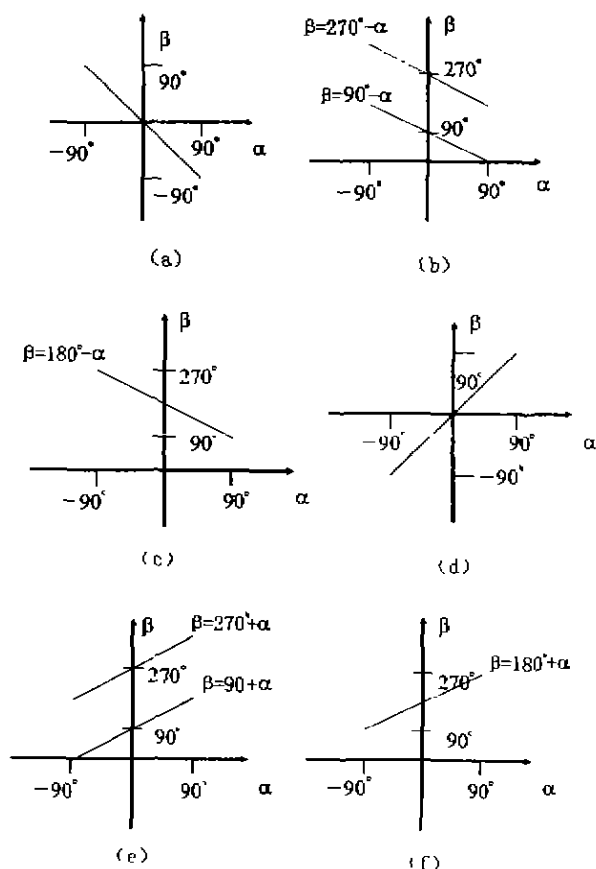


图1 作用力 F_1 分析

由式(5)

当 $\alpha - \beta = 0$ 时,作用力有最大值,此时 $\alpha = \beta$ 。

由于 $\alpha \in [-90^\circ, 90^\circ]$,所以,产生最大值的地

球黄经范围为 $\beta \in [-90^\circ, 90^\circ]$ (图1d)。

当 $\alpha - \beta = 90^\circ$ 或 270° 时,作用力等于零,此时 $\beta = 90^\circ + \alpha$ 或 $\beta = 270^\circ + \alpha$ (图1e)。

当 $\alpha - \beta = 180^\circ$ 时,作用力有负的最大值,此时 $\beta = 180^\circ + \alpha$ (图1f)。

由图1可知,只有当:

$\alpha = 0^\circ, \beta = 0^\circ$ 时,作用力 F_1 有最大值。

$\alpha = 0^\circ, \beta = 90^\circ$ 时,或者 $\alpha = 0^\circ, \beta = 270^\circ$ 时,作用力 F_1 等于零。

$\alpha = 0^\circ, \beta = 180^\circ$ 时,作用力 F_1 有负的最大值。

此3种情况说明,在地球的穿切黄道面带,作用力 F_1 可以产生极值,其变化曲线如图2a。

当 $\alpha = 90^\circ$ 时,作用力 $F_1 = 0$,此时不受其他黄经变化影响, F_1 与 α 的变化关系曲线如图2b所示。

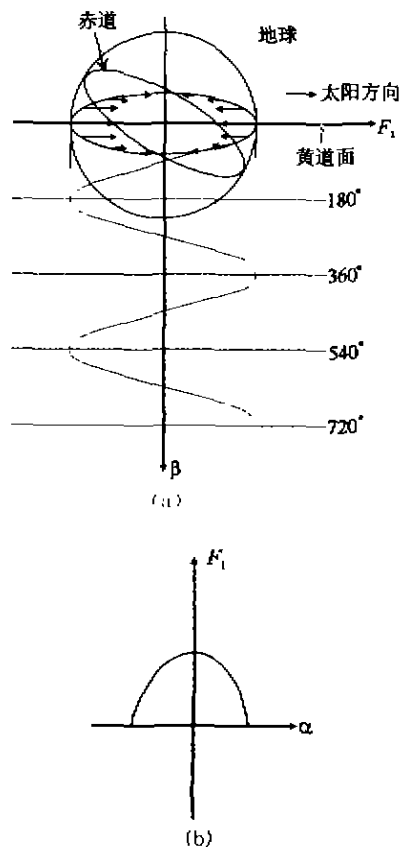


图2 地球受 F_1 作用分析

1.2 关于作用力 F_2

将 $\alpha = L^2 + l^2 - 2Ll \cos \theta$ 代入式(2),考虑文献[1]式(19)条件,由于 $L \approx l$,取 $L = l$,化简,有:

$$F_2 \approx m \cos \alpha \cos \beta \ddot{L} \quad (7)$$

比较式(3)和式(7),不难发现,除加速度外,两式右端的其他函数符号一致,因此, F_1 与 F_2 应属于一类力。

1.3 作用力 F_1 与 F_2 的比较及其合力分析

F_1 与 F_2 为一对近纬向的作用力, 设 F_1 与 F_2 交角为 Φ .

经过变换可得:

$$F_1 + F_2 \approx \frac{1}{2} m \cos \alpha \cos \beta \frac{1}{\cos \Phi} \sqrt{8 - 2\cos^2 \Phi - (\sin 2\Phi)^2} \ddot{l} \quad (8)$$

$\Phi \approx 0$, 在取 $\Phi = 0$ 的情况下

$$F_1 + F_2 \approx \frac{\sqrt{6}}{2} m \cos \alpha \cos \beta \ddot{l} \quad (9)$$

合力方向在极径的 η 角度方向, η 角度由下式计算:

$$\eta = \arctg \frac{\sin 2\Phi}{2 \sqrt{8 - 2\cos^2 \Phi - (\sin 2\Phi)^2}} \quad (10)$$

因 $\eta \approx 0$, 所以合力方向在近乎极径连线上变化.

2 潮汐力的特性

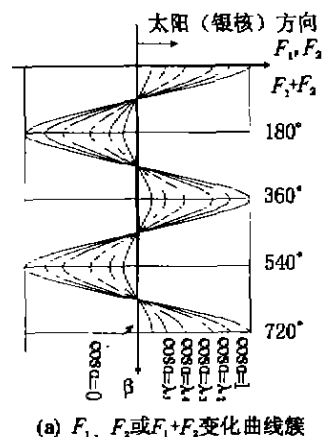
比较式(3)、式(7)和式(9)可见, 它们具有相同因子 $\cos \alpha \cos \beta$, 为了描述方便, 我们将这三式先笼统地称为潮汐力. 由图2可知, 不同的 β 值所对应的的作用力组合起来是一簇节点、频率、周期一致, 振幅不同的余弦曲线(如图3a), 潮汐力的大小随 α, β 变化, 其在地球上的作用力大小和方向分布如图3b所示.

由于取值范围的不同, 潮汐力在方向上的变化受 β 控制, 大小的变化受 α 和 β 联合控制. 当潮汐力为正值时, 方向由太阳(或银核)指向地球, 当潮汐力为负值时, 方向由地球指向太阳(或银核). 针对太阳和地球海水, 潮汐力“正”表示面向太阳一方的地球海水受力方向是地球垂直方向上由表及里, 此时 $\beta \in -90^\circ \sim 90^\circ$, 潮汐力“负”表示背向太阳一方的地球海水受力方向在地球垂直方向上由表及里, 此时 $\beta \in 90^\circ \sim 270^\circ$ (图3b). 潮汐力的大小变化表现为: 黄道面处最大, 越远离黄道面, 作用力越小, 直至为零(图3).

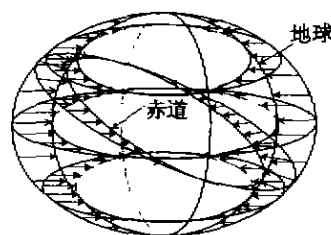
潮汐力的大小除与平行黄道面的 α 有关外, 还与垂直黄道面的 β 有关, 随着 β 的变化, 作用力大小呈周期性变化.

潮汐力的大小与 β 的关系曲线及其对应的位移与时间的关系曲线可表示成图4.

图4显示的曲线显然是一条周期性变化曲线, 所以, 潮汐力是一种周期波.



(a) F_1 , F_2 或 F_1+F_2 变化曲线簇



(b) F_1 , F_2 或 F_1+F_2 的全球施力原理图

图3 潮汐力的曲线簇形态及对地球的施力原理

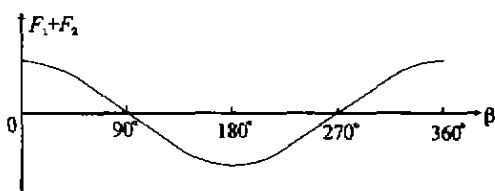


图4 潮汐力的分布与潮汐波的形成示意图

设海水初始位移为零, 海水水质点质量为 m , 在潮汐力作用下位移量为 ζ , 根据牛顿第二定律和运动方程与式(9), 建立海水的运动方程:

$$\begin{cases} F = ma \\ \zeta = \frac{1}{2} at^2 \\ F = \frac{\sqrt{6}}{2} m \ddot{l} \cos \alpha \cos \beta \end{cases} \quad (11)$$

可得由潮汐力导致的海水的振动方程:

$$\zeta = \frac{\sqrt{6}}{4} l \beta^2 \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^2 \cos \alpha \cos \beta \quad (12)$$

式中, ω_1 是地球公转角速度, ω_2 是地球自转角速度.

典型的驻波表达式形式如下:

$$\zeta = A \cos kx \cos \left(\frac{\pi}{2} - \omega t \right) \quad (13)$$

对比式(12)和式(13)可知, 由潮汐力产生的潮汐波是一种驻波, 它的振幅在一定条件下是常量, 等

于 $\frac{\sqrt{6}}{2}(\frac{\omega_1}{\omega_2})^2 l \beta^2 \cos \alpha$, 并以余弦 $\cos \beta$ 方式作简谐变化。当 α 一定, 地球上的所有处于离黄道面 α 角度的环线上的点, 其潮汐波的振幅大小只与地球的黄经有关。

由前面的取值分析和图 3b 可知, 地球上处于 $\beta = 90^\circ, 270^\circ$ 的点, 潮汐波的振幅为零, 此时潮汐显“落”; 而处于 $\beta = 0^\circ, 180^\circ$ 的点, 潮汐波的振幅为极大, 此时潮汐显“涨”。

建立式(12)的 $\zeta - \beta$ 关系曲线, 可得海水的位移-角度振动图形(图 5), 显然这种振动的周期为 12h, 也就是说海水潮汐表现为一日两次涨落。由于驻波的特点是波的轮廓反复的扩张和收缩, 既不向前进也不向后退, 只在原地“涨”和“落”, 所以海水潮汐波原理上不存在横向的运移, 但地壳是固态的, 海水是液态的, 海水的流动性使潮汐波上涨形成的空间由下落区海水充填, 因而, 潮汐波实际上又不完全呈驻波特点。

按照力与运动的关系, 站在黄道面看地球上的潮汐波, 总是以一种形态面对观察者, 即“涨”的地方好像一直是“涨”, “落”的区域则一直是“落”, 这种涨落关系与一天的时间变化无关, 只与一年中太阳正对地球的方位有关。

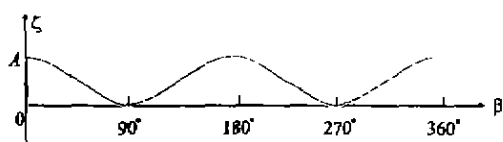


图 5 海水的位移曲线示意图

由于波动的固有特性是可以产生干涉、衍射现象, 所以, 由潮汐力导致的潮汐波具有干涉、衍射特征。

3 潮汐力在地球上的表现

3.1 海水潮汐

地球上的潮汐现象最明显地发生在海洋, 全球性的半日海潮连年日复日地涨落, 是海水受太阳潮汐力作用的写照。受海岸形态、海岛间结构及海岛与海岸组合形态的影响, 海潮可以发生干涉和衍射, 形成潮汐振幅加强或减弱、潮汐频次降低等现象。如钱塘江大潮的“自既望以至十八为最甚”现象是海潮的干涉作用形成; 而发生在北部湾的规则全日潮, 则是因为巴士海峡与琼州海峡和北部湾组成了较为标准的杨氏实验装置, 使海潮发生衍射作用而形成(限

于篇幅, 不作详细展开)。

3.2 大气潮汐

地球上的潮汐现象幅度最大的是发生在大气。从牛顿 1687 年提出大气潮汐到现在, 越来越多的观测资料和认识提供了大气发生周期性涨落的事实。在地球的对流层、平流层、中层和电离层中都有大气潮汐现象, 表现总是在地球的面向或背向太阳的一面出现涨潮或高潮, 而中间地带出现落潮或低潮, 大气潮汐的振幅在赤道带最大, 向极区减小。在大气潮汐现象中, 几乎觉察不到月球的影响, 也没有除半日潮以外的其他衍射现象发生^[5]。

显然, 大气潮汐比较完美地映射了本文潮汐力的作用。

3.3 地幔潮汐

地球上的潮汐现象最隐蔽的是发生在地幔中。与海洋潮汐和大气潮汐不同, 地幔潮汐在周期上存在着非常巨大的差别, 以半个银河年计, 因而表现出地幔受银核作用的特征。

板块受地幔潮动的影响是被动的。由于流体具有不可压缩性, 当地幔物质受力产生潮汐, 形成潮汐波峰和波谷时, 覆盖在其表面的岩石圈不可能因其重量将这种波峰和波谷压平。当地幔波峰形成的振幅大到一定值, 而岩石圈因超重, 不能匹配地幔潮的位移速度时, 发生地幔物质向岩石圈板块的侵入则不可阻挡, 地幔的波动是成片的, 所以岩浆的侵入表现也是成片的。由于山根和海沟的存在, 地幔潮汐波也会产生干涉和衍射。

3.4 关于月球引潮

中国人是最早发现并研究潮汐的, 仅从“潮汐”二字所表现出的时间、频率性即可说明。后来, 又发现了潮汐与月相的变化有关, 有了“大潮”和“小潮”及钱江潮的记载等。当万有引力被发现后, 人类研究潮汐理性认识前进了一大步, 并有了引潮力的概念。

谁也不能否认月球对海水潮汐具有一定的影响, 但必须承认它与太阳和银核对地球的潮汐作用完全是两回事, 我们将其区别列于表 1。

月球对潮汐的影响, 只能改变幅度, 不能改变周期。当月球与地球和太阳处于一条线上时, 月球的引力作用与太阳对地球海水潮汐力作用的夹角最小, 产生的极大值重合, 使潮汐振幅最大。

在月球与海水间不存在太阳与海水、银核与海水的运动轨道关系, 所以不可能产生月球对地球海水的潮汐力 $F_1 + F_2$, 相反, 在月球上则存在地球、太阳、银核的潮汐力作用, 这是轨道关系决定的。

表 1 潮汐力 $F_1 + F_2$ 和引潮力 F 有关项目比较

项目	潮汐力 $F_1 + F_2$	引潮力 F
表达式	$F_1 + F_2 \approx \frac{\sqrt{6}}{2} m \cos \alpha \cos \beta \ddot{l}$	$F = 2.80 \times 10^{-8} g (6 \cos 2\delta + 10)^{0.3}$
主要影响因素	日地距离 l 、质点与垂直于黄道面的阳光直射面的角度 β 及与黄道面的 α 角度	质点所处纬度的换算值 δ (要求正对月球的地球投影面)
源自天体	太阳或银核	月球
作用力方向	总是平行于黄道面由表层指向内部	总是由地球表面指向月球
作用方式	受轨道影响,海水质点发生位移而产生潮汐	因对地球表层海水的吸引而产生影响
沿地表分布形式	正对部分和背对部分对称分布	正对部分和背对部分非对称分布
潮汐的周期性	一日之内两次出现高潮和低潮,并且出现时间间隔均匀,周期性好	周期性以月为单位明显

4 速度、地球胀缩与潮汐

春分和秋分具有相近的轨道特征,为什么只处于秋分点附近时的潮汐表现出了大潮特点,而处于春分点附近的潮汐没有这一表现?按照月球引潮理论是无法圆满解释的。

这里,我们将着重讨论影响春潮和秋潮能量的速度、地球胀缩问题。

在参考文献[4]分析地球的椭圆方程时,我们获得式(2)^[4]和式(3)^[4]以及有关特征点和地球胀缩特性等认识,由此进行以下分析:

设 $v_1 = \frac{dr}{dt} = \frac{pe\omega \sin f}{(1+e \cos f)}$, $v_2 = \omega(r+dr)$,

有:地球的合速度, $v = \sqrt{v_1^2 + v_2^2}$, 即:

$$v = \frac{pe\omega}{(1+e \cos f)^2} \sqrt{1+e^2+2e \cos f} \quad (11)$$

式中:

$p = a(1-e^2)$, a 为公转轨道的长半轴长度,等于 149 597 870 km, e 为椭圆离心率,等于 0.016 7.

$\omega = 2\pi/365 \times 24 \times 60 \times 60 = 1.99 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$.

式(14)可转化为:

$$v = 29.76 \times \frac{\sqrt{1+e^2+2e \cos f}}{(1+e \cos f)^2} \quad (\text{km/s}) \quad (15)$$

建立与式(15)对应的数据表(表2),分析合速度随轨道不同角度的变化。

表 2 地球公转合速度变化分析

$f/(^\circ)$	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360
$\cos f$	1.000	0.866	0.500	0.000	-0.500	-0.866	-1.000	-0.866	-0.500	0.000	0.500	0.866	1.000
$e \cos f$	0.0167	0.0145	0.0084	0.000	-0.0084	-0.0115	-0.0167	-0.0145	-0.0084	0.000	0.0084	0.0145	0.0167
$v/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	29.18	29.25	29.42	29.67	29.92	30.11	30.17	30.11	29.92	29.67	29.42	29.25	29.18

从表2可见,地球绕太阳运动的合速度最大点在极角为 180° 处,此时地球运行的最大合速度达 30.17 km/s. 可见海水质点所拥有的能量之大(在计算时,我们取每年 365 d, 每天 24 h, 每小时 3 600 s, 是一个一般值,并非完全的恒星值,若想获得更精确的数据,可以分别将恒星年周期和恒星日周期代入计算)。

然而,地球公转的径向速度的最大点却不在合速度的最大点,我们已经知道,潮汐的力是在径向上作用于海水,所以,只有径向变化速度最大点,才是

潮汐的最大能量点。

将地球公转轨道离心率 $e = 0.016 7$ 代入文献[4]的式(5)^[4],我们可获得地球径向加速度等于零的两个特征点所对应的主值角度:

$$f_1 = 91^\circ 55' \quad f_2 = 268^\circ 05'$$

结合文献[4]中有关加速度的取值分析,不难看出, f_1 所对应的轨道角度,才是径向速度的最大处,在此,加速度变化为零,径向速度不再增加。而 f_2 所对应的轨道角度,是径向速度的最小处,这里,虽然加速度变化为零,但却是速度不 (下转第 11 页)

粒在外加电场作用下明显聚结变粗,其变化规律是阳极<中部<阴极;

(4)外加电场作用下,使储层岩石润湿性由亲油向亲水方向转化;

(5)外加电场与水动力场相结合可以大大提高水驱油效率和采收率,降低油井含水率和产水量。因此可以说,外加直流电场导流驱油是提高低渗油田(特别是粘土含量较高的低渗储层)采收率和产油量最有发展前景的一种方法。

参考文献:

- [1] 瓦希托夫 Г.Г. 利用物理场从地层中开采石油[M]. 北京:石油工业出版社,1993.
- [2] Кукруза В.Д. Новые электродинамические методы интенсификации добычи нефти и прогнозирования нефтегазонасыщенности[M]. Нефть хв, 1995, 6(5):29-32.
- [3] Aleksy Socuta. Enhanced oil recovery using electrical means [P]. U.S. 4228854, 1980.
- [4] Chilingar G V, El-Nassir A, Stevens R G. Effect of direct electrical current on Permeability of sandstone

cores [J]. J P T, 1970, 22(7):830-836.

- [5] Aggour M A. Investigate of waterflooding under the effect of electrical potential gradient [J]. J P Sci & Eng, 1992, 9(3-4):319-327.
- [6] Aggour M A. Effect of direct electroosmosis on relative permeability of sandstone [J]. J P Sci & Eng, 1994, 11(2):91-102.
- [7] Lancelot F H. Experimental results of the influence of electric fields on the migration of oil, ionic species and water in porous media[J]. J P Sci & Eng, 1990, 4(1):67-74.
- [8] Навкин А.Я. Новые направления технологии разрывных и проницаемых пластов. Нефть хв, 1993, 4(3):11-17.
- [9] Anderson William G. Wettability literature survey-part 2: Wettability measurement[J]. 1986, 38(11):1246-1259.
- [10] 蒋子铎,樊西惊. 胶体与界面化学原理及其应用[M]. 武汉:湖北科学技术出版社,1994.

编辑:权艳梅

(上接第5页)再减少。

因此,由轨道位置的不同引起的潮汐的最大能量处是在椭圆轨道的 $268^{\circ}05'$ 处,这一点是我们理论划分的秋分点(与几何划分的秋分点有区别),当地球运行到此时此刻,即使没有月球的存在,潮汐依然具有最大的能量(如果认为潮汐只是月球作用结果,将无法解释春分与秋分时潮汐的差别)。

综上所述,在地球绕太阳运行的一周中,角度 $91^{\circ}55'$ (春分点附近)和角度 $268^{\circ}05'$ (秋分点附近)所对应的轨道半径相等。地球由秋分点运行到春分点过程为半径减小的运动,即:后一次半径总是比前一次小,径向变化速度越来越小,所对应的地球变化状态为收缩状态^[4],角度 $91^{\circ}55'$ 对应的轨道点即径向速度最小点。相应地,角度 $268^{\circ}05'$ 所对应的轨道点即径向速度最大点,地球变化状态为膨胀状态。潮汐的能量最大点对应着膨胀状态结束时的径向速度最大点,潮汐的能量最小点对应着收缩状态结束时的径向速度的最小点。所以,当地球运转到达秋分点附近时,潮汐的幅度最大,因为这时处在轨道的 $268^{\circ}05'$ 处;当地球到达春分点附近时则是潮汐幅度最小的时候。

5 结 论

(1)潮汐力是由地球的轨道运动产生的,因地球

各圈层物质都具有这种轨道运动,所以,它们都可以产生潮汐;

(2)由于月球的轨道运动是以地球为焦点,所以在月球上可以产生受地球影响的潮汐,而不可以产生相反的潮汐,因为海水或岩浆没有以月球为焦点的轨道运动;

(3)潮汐力可以很好地解释地球的潮汐现象,特别是大气潮汐的特征与潮汐力的特性具有相当程度的对应;

(4)地球的胀缩特性和沿轨道径向的变化速度,是影响地球潮汐幅度或能量的决定因素。

参考文献:

- [1] 刘全稳,陈景山,沈守文. 大气海洋油气质点受力分析[J]. 成都理工学院学报, 2000, 27(3):268-275.
- [2] 刘全稳,陈景山,沈守文,等. 海流的形成演化与作用力定义[J]. 成都理工学院学报, 2000, 27(4):352-358.
- [3] 刘全稳,陈景山,严宁珍,等. 地球的强中纬力[J]. 新疆石油地质, 2000, 22(2).
- [4] 刘全稳,陈景山,沈守文,等. 初论地质气候与地球胀缩[J]. 新疆石油地质, 2000, 21(5):424-427.
- [5] 中国大百科全书编辑委员会. 中国大百科全书(大气科学,海洋科学,水文科学)[M]. 北京、上海:中国大百科全书出版社,1987.

编辑:张新宝