

天文潮汐与地震

吴小平^{1,2} 冒蔚² 黄雍³

(1 云南大学地球科学系 昆明 650091)

(2 中国科学院云南天文台 昆明 650011)

(3 云南省地震局 昆明 650041)

摘 要

从三个方面综述了天文潮汐与地震关系的研究,内容包括,日、月、地球的相对位置与地震;天文潮汐的周期、相位与地震;天文潮汐应力与地震。日、月、地球的相对位置与地震和天文潮汐周期与地震的研究均属于从体积力的角度考虑问题,主要是从宏观角度揭示地震发生时的日月位置分布有何规律性,揭示地震发生时间丛集在潮汐周期变化过程中的相位或时段以及地震活动的潮汐周期。天文潮汐应力与地震的研究从引潮力在地球内部震源处产生的潮汐应力角度出发,着重研究不同类型性质的发震断层与潮汐应力触发的关系,从物理意义上讲,该研究较深层次地切入了问题的实质。分析了采用某些方法和样本研究结果不一致性的原因,并提出了进一步研究的方向。

关键词 天文潮汐 — 地震 — 潮汐周期 — 潮汐应力 — 发震断层

分类号 P183.5

1 引 言

地震是地球内部运动的一种力学过程,然而地球并不是一个孤立的天体,它受宇宙环境中各种因素的影响,天文潮汐就是一种力学因素。天文潮汐主要指太阳月亮对地球的引潮力,太阳系的其它行星对地球也有引潮力,但是,它们非常小,即使九个行星排列成一行时对地球的引潮力也只有日月引潮力的 $1/26000$ ^[1]。天文潮汐不仅从天文学和地球物理学的角度对整个地球的运动产生影响,也从地质学的角度对局部地壳运动产生影响。虽然地震的力源来自地球内部,但是,当震源系统岩石中的应力达到临界状态时,外界因素的影响在一定条件下会引起系统的突变而发生地震。基于这样的物理思想,国内外天文地震研究者们对天文潮汐与地震关系的问题一直兴趣不减。然而由于地震过程和地震发生本身是一个复杂问题,关于天文潮汐与地震关系研究,不同作者从不同角度用不同方法或不同地震样本,所得结论不尽相同,存在较大的争议。争议的焦点早期主

要在地震的发生时间是否受天文潮汐的影响, 后来多集中于地震与天文潮汐究竟存在什么样的关系。

从已有的研究看, 天文潮汐与地震关系的研究大致包括以下三个方面, (1) 日、月、地球的相对位置与地震的关系, 这方面的研究主要包括月相、月黄经、日月高度、日月时角等位置参数分布与地震发生时间及频度之间的关系; (2) 天文潮汐的周期与地震, 这类研究往往先计算日月引潮力的某一周期分量的时间函数曲线, 然后统计发震时间所对应的优势相位, 或者直接从地震序列中提取潮汐周期成份; (3) 天文潮汐应力与地震, 主要研究日月引潮力在地球内部产生的潮汐应力对地震的触发作用, 此方面研究主要针对大地震。本文试图通过对 30 多年来国内外关于天文潮汐与地震关系研究的综述与分析, 总结一些规律和联系, 找出存在的问题, 为进一步深入探讨天文潮汐与地震尤其是与大地震的关系提供有意义的参考。

2 日、月、地球的相对位置与地震

由于引潮力的大小是日、月、地球相对位置的函数, 因此考虑发震时刻的月相、月地距离、日月黄经及时角等位置参数是很自然的, 较早时期的研究主要是进行现象上的统计。表 1 列出了国外统计研究日月位置参数分布与地震发生时间或发生频度关系的一些主要结论。

表 1 国外关于日月位置与地震关系研究的结果^[2~6]

统计对象	主要结论	研究范围和地震样本	参考文献号
地方时, 月相.	大地震丛集发生在地方时上午 6 时和下午 6 时(日出日落)左右, 同时也丛集在新月满月时附近.	局部地区 (Southern California), $M \geq 6.0$, 13 个	[2]
月黄经.	地震和月震时的月黄经有类似的优势分布区间 ($270^\circ \sim 300^\circ, 30^\circ \sim 60^\circ$) 和 ($270^\circ \sim 360^\circ$). $P_R = 0.0036$	全球范围, 1971~1976, 28 个月震 ($M \geq 3.2$) 和 26 个地震 ($M \geq 7.3$)	[3]
日、月黄经, 日、月时角, 月相位角.	(1)S.C. 区: 月相位在 171.2° 有优势分布 ($P_R = 0.064$), 日月黄经, 日月时角分布规律不明显. (2)A-A 群岛: 月黄经在 64.4° 有优势分布 ($P_R = 0.012$), 其它参数分布规律不明显.	局部地区 (1)Southern California, 1800~1986, $M \geq 6.0$, 48 个 (2) Alaska-Aleutian Islands, 1788~1986, $M \geq 7.4$, 25 个	[4]
日赤纬、月相	当日赤纬在 $17^\circ\text{N} \sim 17^\circ\text{S}$ 之间时, 朔望震发生频度明显增大.	美国东部, 1737~1980, $M \geq 5.0$, 114 个	[5]
月球地平高度, 太阳地平高度.	当太阳或月亮位于地平以上 $30 \sim 50^\circ$ 高度时, 地震次数比偶然情况下要多	全球范围 1897~1985, $M \geq 7.5$, 541 个.	[6]

注: 表中 M 为震级; P_R 是 Schuster Test 中用来检验统计结果是否具有统计意义的量, 其定义为 $P_R = \exp(-R^2/N)$, ($N \geq 10$). 将地震看作单位二维向量 $(1, \phi_i)$, ϕ_i 表示地震的相位 (指地震发生时刻对应的月黄经等), 其变化范围为 $0 \sim 360^\circ$. R 是 N 个地震样本的向量和, 对一定数量的样本, R 越大, 表示某优势相位分布区间越明显. 据 P_R 的定义, R 越大, P_R 越小, 即震例分布于某优势相位区间是偶然出现的随机概率越小, 越具有统计意义。

文献 [7] 强调了月地距离的作用, 从理论上指出, 朔望前后月亮接近地点的机会大大超过上下弦前后, 同样过近地点, 月亮在朔望前后比上下弦前后更接近地球, 因此朔望前后引潮力增加不仅仅是因为日月各自的引潮力叠加在一起, 另外一个重要的原因是日地平均距离较小。关于月地距离与地震的关系在统计研究方面至今尚无定论。

Kilston 等人 [2] 对南加州大地震丛集发生在日出日落和新月满月前后的现象进行分析, 东西向的潮汐张应力在月升月落时最大, 在日升日落时也最大, 而新月满月时恰好月亮和太阳升降时间互相接近。令人难以理解的是为什么月升月落时没有表现出规律。

月赤纬是潮汐计算中用到的多种参数之一。在一个交点月中, 月球两次穿越赤道(赤纬为零), 两次达到赤纬绝对值最大, 由于白道和赤道之间的夹角存在一个变化的范围($18^{\circ}18' \sim 28^{\circ}36'$), 月球赤纬的最大值并不固定 [8]。最近的研究 [9] 表明, 20 世纪 71% 的大地震发生于赤白交角从极大变为极小时期, 1999 年 9 月 21 日的花莲地震发生在月过赤纬极小 (-19°) 时 [10]。

月黄经也是潮汐计算中用到的参数之一, 月震和地震时月黄经非随机的丛集现象可能说明月震和地震的发生有着共同相互的外力因素——引潮力的影响 [3]。但并不是对所研究的每个局部地区, 都存在地震时月黄经的优势分布 [4]。

Lopes [6] 指出如果月球的引潮力是触发地震的主要原因, 则可以认为这种作用取决于从地震时震中观测到的月球高度。Lopes 所统计的高度是地平高度, 他没有考虑月球的方位。事实上, 对地球上同一点, 月球在相同高度而不同方位上所产生的引潮力作用是不同的, 尤其是当考虑到地震断层有其特定的取向时, 该引潮力所起的作用差异更为明显。

我国从 20 世纪 80 年代起对日月位置与地震关系也有不少研究, 但多数仅局限于月相统计 [11~13]。有人对不同地区的地震作了统计, 发现有的地区的地震与朔望关系明显, 有的与下弦关系明显, 认为不同地区、不同震源机制的地震可有不同的月相效应, 进行月相统计应注意划分不同区域和地震带。近来的研究表明, 太阳、月亮的地方时角对强震序列的发震时刻也有影响 [14,15]。

上述研究大多都将所得到的日月位置与地震的关系归因于潮汐对地震的触发作用, 从潮汐理论看, 虽然引潮力与日月位置有关, 但是简单地从月相、日月黄经或时角等位置参数来研究潮汐与地震的关系, 而不作引潮力的计算, 严格说来是不合适的。然而, 很多研究却显示出日月位置统计比通过复杂的引潮力计算的研究效果更为明显。

3 天文潮汐周期、相位与地震

研究潮汐周期、相位与地震的关系通常采用两种方法: 一是先计算某一潮汐分量如半日潮、日潮、双周潮的时间函数曲线, 然后将地震发生时刻与之比较, 统计地震是否有丛集发生在某一优势相位处的趋势, 若存在优势相位, 则表明地震发生时间与这一周期的潮汐分量有关; 另一种方法是将地震序列作频谱分析, 提取地震活动中的潮汐周期成分。

Shlien [16] 早期统计了全球范围的地震, 他将计算出的半日潮时间函数曲线的最大最

小值之间划分 100 等分的时间间隔, 统计每个间隔内的地震个数, 得到发震时刻的潮汐相位分布图像, 试图从中寻找地震发生时的优势相位, 结果没有发现发震时间与潮汐相位有明显关系。

自从月震证据表明月震确实与地球在月球上产生的引潮力有密切关系后, 地震与天文潮汐关系的研究得到了推动。Lammlein 等人^[17]的研究表明, 月震活动高峰有一个非常明显的周期, 这个周期是 27.2d, 这正是地球在月球上产生潮汐的交点月周期, 说明引潮力能引起或触发月震。Sadeh^[18]试图用频谱分析的方法找到地震活动的类似周期, 他对 42000 个地震的时间序列进行快速傅里叶变换, 其功率谱显示出 13.65d 的周期主峰。

与全球性地震样本研究结果相反, 当地震目录中选取震群序列(在同一地震断层带上或某一有限区域内丛集发生的地震序列, 如余震序列、前震序列和火山震群)作为统计对象时, 却发现它们与半日潮有明显的相关性^[19]。其它有关震群序列的研究大都得到了肯定的结果。例如, 火山震群与双周潮有较好的相关关系^[20]; 余震序列中较大丛集的发生与半日潮潮汐作用有关^[21]。但也有研究^[22]故意从地震样本中去掉一些地震丛集(如余震), 得到相关性较弱但有统计意义的双周潮关系。对较深震源的火山地震没有发现与半日潮周期的关系^[23]。

Palumbo^[24]的研究证实了地震和天文潮汐相位的关系具有区域性, 他对全球范围 9157 个地震的统计研究没有显示出有意义的结果, 而对意大利范围内沿 Appennine 山脉发生的地震研究却发现, 无论是主震还是余震, 其频度当半日潮东西分量达最大时都明显增加, 主震和余震分别增至平均值的 2.7 倍和 1.8 倍, 认为存在区域性的潮汐触发特点。韩延本等人^[25]的研究也认为日月引潮力对地震的触发作用存在地区性特点或与地质构造有关, 故将地震样本按所处断裂构造带分区, 结果表明不同构造带上地震发生时刻与引潮力的东西向水平分量的不同变化时段有相关性, 例如, 在鲜水河地震带和松潘地震活动区, 88% 的 $M \geq 5.8$ 强震发生在东西水平分量正次峰附近的 7d 中, 而在龙陵、澜沧地震活动区, 70% 的 $M \geq 5.8$ 强震发生在该分量负次峰附近的 7d 中。

近年来有人分别对夏威夷和意大利群震每小时地震个数组成的时间序列进行谱分析, 以提取潮汐的周期成份, 得出了相同的结果, 群震序列的发生时间有明显的日潮和半日潮周期, 且以日潮周期为主^[26,27]。在利用统计优势相位的方法来研究地震与天文潮汐周期的关系时, 人们多数习惯于事先定好采用某一种周期的天文潮汐(如半日潮)时间函数曲线来统计, 如果得到肯定的结果, 也就不再考虑其它的周期, 所以这类研究大多得到的仅是地震发生时间与某一种周期的潮汐有关的结论。而对地震序列作频谱分析提取潮汐周期成份的方法一般不受主观因素的影响, 但对地震样本的要求相应也较高, 当一个地震序列的时间长度短于某一潮汐周期时, 就不利于分析相应的周期。文献^[28]认为, 由于朔望潮是双周潮幅度最大时段再迭加半日潮和全日潮, 所以它作用在震源系统上的效应较大, 用朔望潮比单纯用半日潮来研究震源过程的不稳定性更好。18.6yr 周期是月球运动轨道的黄白交点西移周期, 一些研究还证明了地震活动的大尺度时间分布含有 18.6yr 周期^[29,30]。

从上述研究看出, 对一个很大的地理范围取很大的地震样本尤其是非序列型地震、不分区域笼统地统计天文潮汐的优势相位往往不易成功, 而对一定区域内发生的某种地

震序列却可能得到有意义的结果, 其原因是, 对某个小区域、某种特定的地震类型、特定的地震断层构造条件, 本来可能存在的关系和规律会被大量随机地震样本的平均效应所掩盖。另外, 不同构造上的地震序列可能显示相同的潮汐调制周期, 但不一定有相同的优势潮汐相位, 这可能是由于同一潮汐相位的引潮力在不同区域、不同方位取向和不同运动性质的地震断层构造所产生的作用效果不同造成的。

4 天文潮汐应力与地震

地壳中的应力是地壳构造应力与天文潮汐应力的迭加^[31], 而天文潮汐应力是指日月引潮力在地球内部产生的潮汐应力。当一个地震断层带中的构造应力积累到临界状态时, 如果受到适当方向上的天文潮汐应力, 就会对地震产生一个促进或触发的作用。关

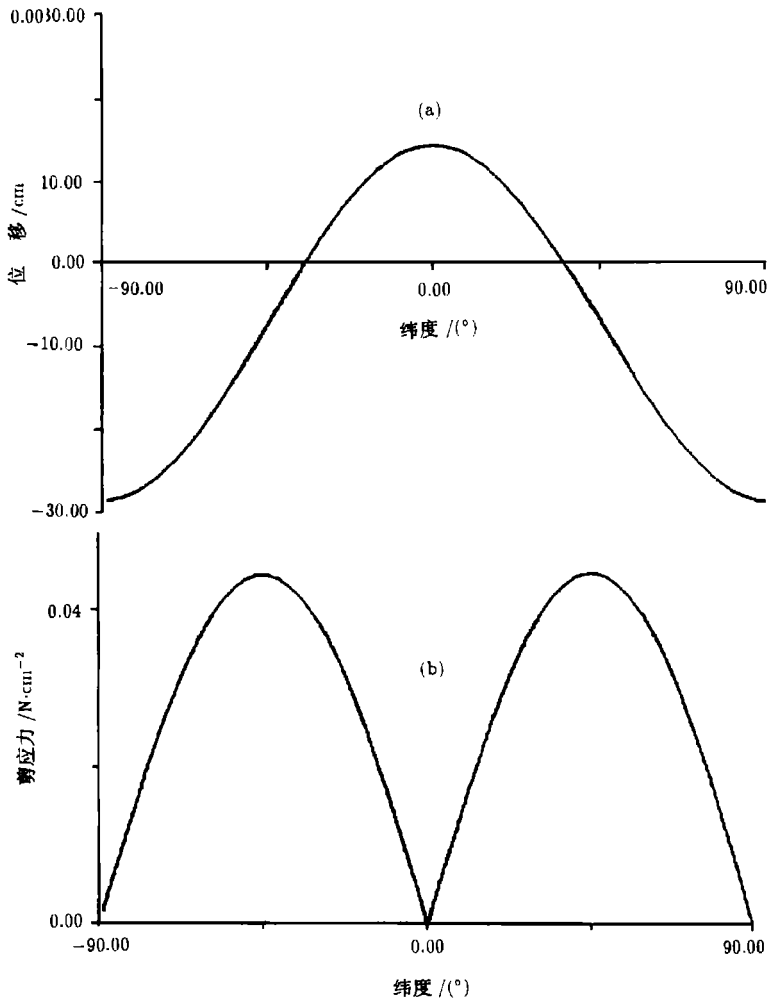


图 1 (a) 长周期潮产生的地表位移 (b) 潮汐剪应力 $\sigma_{r\theta}$ 随纬度的分布^[32]

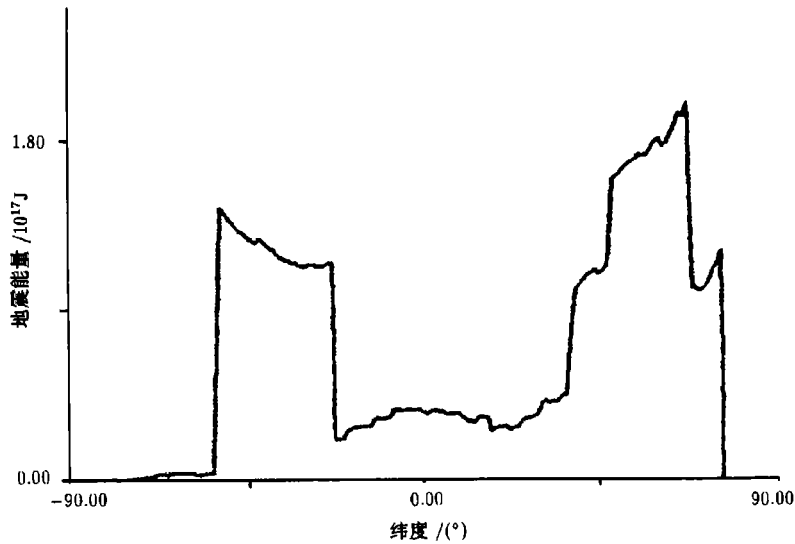


图 2 地震能量随纬度的分布^[32]

震源深度 $h < 70\text{km}$, 1897~1980

于潮汐应力及其变化率和构造应力变化率的量级, 文献[31]给出了粗略的估算, 根据固体潮形变, 整个地球内部的平均潮汐应力的量级为 10^3Pa , 由于地球介质的不均匀性, 潮汐应力在地球内部的分布也是不均匀的, 地壳中的实际潮汐应力值往往大于平均值, 如果大一个量级、为 10^4Pa , 则半日波(周期约 12h)的潮汐应力变化率量级为 $10^4\text{Pa}/6\text{h}$, (潮汐应力值在半个半日潮周期内的变化为 $0 \sim 10^4\text{Pa}$)。而构造应力的变化率为 $10^2\text{Pa}/6\text{h}$, 也就是说, 潮汐应力的积累速度比构造应力大两个数量级, 当构造应力处于临界状态时, 迭加上这样快速的脉冲应力, 从力学观点来看是完全有可能加速破裂过程而触发地震的。

也有人^[32]从长周期潮汐应变能可能转化为震源应变能的观点出发, 将地震能量的纬度分布与长周期潮在地球内部产生的潮汐剪应力分布作了比较, 发现两者有明显的相似之处(图 1、2)。图 1b 中的潮汐剪应力为球坐标下的剪应力分量 $\sigma_{r\theta}$ ($\sigma_{r\phi} = 0$, $\sigma_{\theta\phi} = 0$), $\sigma_{r\theta}$ 的计算公式为^[32]:

$$\sigma_{r\theta} = \sum B_n \frac{\partial Y_n}{\partial \theta}$$

其中 Y_n 为起潮力位的 n 阶球谐函数, 将 Y_n 的拉普拉斯展开中的长周期项代入计算可得剪应力 $\sigma_{r\theta}$, 系数 B_n 为关于地球内一点 P 至地心距离 r 的函数, 由 Love 数构成; θ 为月亮或太阳对 P 点的地心天顶距。

研究天文潮汐应力对大地震的触发作用, 往往需要计算发震断层面滑动方向上的潮汐剪切应力, 然而很多地震断层参数资料不包含滑动角, 使得依赖计算断层面滑动方向上的潮汐剪应力来统计大地震与潮汐关系因样本数不足而受到限制。Heaton^[31]首先在这方面做了探讨, 对全球 107 个浅源地震计算了发震断层滑动方向上的潮汐剪应力时间

函数, 取发震时刻前后的两个最大应力峰之间的相位差为 2π , 将发震时刻所对应的相位按区间标在相位分布图上, 由此可显示出不同相位区间的地震数目, 如果存在某个优势分布的相位, 则认为地震发生时间与潮汐应力触发相关。其研究表明, 震级大于 5 级的浅源倾滑或斜滑型地震的发震时间与断层滑动方向的潮汐剪应力密切相关。而走滑型地震无明显关系。Heaton^[33] 后来又用相同方法对另外 220 个 $M \geq 5$ 地震的研究并没有证实前面的结论。文献 [34]、[35] 分别用不同的地球模型计算发震断层上的潮汐剪应力, 分析了中国大陆 70 多个有断层面解的强震, 所用统计方法不同, 得到了不尽相同的结论。虽然它们都指出沿断层错动方向的潮汐剪应力对地震有触发作用, 但前者认为潮汐剪应力对浅源斜滑型地震有更明显的触发作用, 后者则认为潮汐剪应力的触发作用对浅源走滑型地震更明显。文献 [36] 计算了潮汐体积应力分量, 统计 $M \geq 6$ 地震的潮汐相位分布, 认为正断层型地震与潮汐体积应力分量有较好的相位相关性。

关于余震序列和火山震群序列与潮汐应力关系的研究仍然显示出比较肯定的结论。例如阿拉斯加的 Parlof 火山震群在火山爆发前后与潮汐应力的变化率有关。爆发前的地震从集多发生在潮汐压应力增加时, 爆发后的地震从集多发生在潮汐张应力增加时^[37]; 余震序列活动在某个时段上与潮汐应力有确定的相关关系^[38]; 大震前的中小震序列随潮汐体应力作用的变化特征也比较明显^[39]。对非序列型大地震的研究结果看起来似乎自相矛盾, 使得人们一度认为潮汐与地震的关系主要只是对地震序列而言。

Varga^[40] 从理论上估算潮汐应力对不同方位、倾角和地理位置的地震断层的影响, 指出潮汐应力对地震能量释放的触发作用依赖于发震断层的取向和倾角, 另外还与震源的地理位置有关; 潮汐应力并不能在相同程度上影响每一个地震的发生。Dionysion 等人^[41] 的研究认为, 有统计意义的地震与潮汐应力关系存在于某些小地震带上的一定震级范围、一定类型的地震。

作者^[42] 通过对地震震源处沿主压应力 P 轴和主张应力 T 轴方向的附加潮汐应力分量的计算, 在岩石力学莫尔—库仑准则的基础上研究了附加潮汐应力对发震断层的作用方式, 研究表明, 对发震断层有促滑作用的附加潮汐应力作用方式分增压型和减压型两类, 增压型潮汐应力增大断层面上的正压力和剪应力, 促使断层达到破裂滑动条件, 减压型潮汐应力在一定条件下能降低断层面上的破裂滑动强度, 同样能促使断层的滑动。

在此研究的基础上, 作者^[43] 又对中国及邻区 1069 个地震震源处沿主压应力 P 轴和主张应力 T 轴方向的潮汐应力分量进行了计算和分析, 按纬度区域统计了与潮汐应力促滑作用有关的发震断层类型以及它们与潮汐应力作用方式的关系, 得到了如下结果:

①在整个研究区域, 受潮汐促滑作用的发震断层比例平均为 53%, 在低纬度区 $20 \sim 29^\circ$ 内, 比例上升为 63%; ②各区间受潮汐应力促滑作用的发震断层数比例随纬度升高有明显下降的整体趋势, 这说明潮汐应力对地震断层的促滑作用随纬度升高而减小; ③走滑型地震断层的比例在低纬区间较大、中高纬区间较小, 而倾滑斜滑型地震断层比例在低纬区间较小、中高纬区间较大; ④随区间纬度升高, 与增压型促滑作用有关的发震断层数比例略有增大的整体趋势, 与减压型促滑作用有关的发震断层数比例略有减小的整体趋势, 总体上, 与增压型潮汐应力促滑作用有关的发震断层数的比例大于与减压型潮汐应力促滑作用有关的发震断层数比例; ⑤受增压型潮汐应力促滑作用的走滑型地震断层

在中高纬度区域比例较大、低纬区域比例较小，而受减压型潮汐应力促滑作用的走滑型发震断层情况则相反，说明走滑型地震断层在中高纬度区域较易受到增压型潮汐应力的促滑作用、在低纬区域较易受到减压型潮汐应力的促滑作用；⑥在整个区域中的每个纬度区间，受增压型促滑作用的倾滑斜滑型断层数比例都大于受减压型促滑作用的倾滑斜滑型断层数比例，表明倾滑斜滑型断层与增压型潮汐应力促滑作用的关系较密切。

将文献 [43] 的结果与文献 [31] 对比，文献 [31] 的结果是，所研究的 107 个地震中的 34 个震级大于 5 的浅源倾滑斜滑型地震显示出与潮汐应力密切相关，28 个浅源走滑型地震未显示出明显相关性。我们注意到，这 34 个倾滑斜滑型地震有 32 个在 $34 \sim 50^\circ$ 纬度范围内，此范围恰好是文献 [43] 结果显示出的倾滑斜滑型发震断层较易受到潮汐促滑作用的纬度范围；28 个走滑型地震中有 25 个在 $33 \sim 50^\circ$ 纬度范围内，此范围又正是文献 [43] 结果显示出的受潮汐促滑作用的走滑型发震断层的低比例区。对比结果再次说明，地震与天文潮汐关系的密切程度是有区域性和发震断层类型之分的。

5 讨论与展望

从上述日、月、地球的相对位置与地震、天文潮汐周期与地震、天文潮汐应力与地震这三方面的研究可以看出，地震与天文潮汐的关系不像月震那么简单，很难得出绝对一致的结论，这与月球上的潮汐比地球上要大得多有关，也与地球的复杂构造有关。然而，上述大量研究结果表明地震与潮汐关系确实存在，只是这种关系以不同形式和不同程度表现出来而已。

从上述情况我们可明确目前天文潮汐与地震研究的初步结果、存在的某些问题以及进一步研究的方向：

(1) 对地震与天文潮汐的关系不能一概而论，因为这种关系的强弱程度是依赖于震源位置、发震断层类型和潮汐应力作用类型的。例如，潮汐应力对临震状态下发震断层的促滑作用随区域纬度的升高有总体减小的趋势，但对不同类型的发震断层而言却并不完全如此，不同的潮汐应力作用类型所促滑的不同发震断层类型也有不同的纬度区域分布特征。对这种关系的研究往往会由于所选震例的类型、地理范围的不同而显示出不同的结果，有时会因为所取地理范围过大而产生的平均效应掩盖了相关性的存在。考虑到这些因素，可以对目前研究中存在某些结论的不一致性有所解释。在今后的研究中，应该注意划分区域，不仅是地理区域、构造应力区域，还应注意区分发震断层类型。

(2) 研究单个大地震与天文潮汐的关系比研究序列型地震要复杂得多，沿用对群震序列的优势相位统计方法来统计大地震是不合适的，因为大地震作为统计对象与群震有很大的区别，一个群震序列包含数百甚至数千中小地震，这些地震均发生于同一个断层系统，受潮汐触发的条件存在共同点（如潮汐的某一优势相位），而一组作为统计对象的大地震却是由发生于各个不同断层系统的地震组成，由于各断层的运动性质、取向和地理位置有别，其发震时刻所对应的潮汐应力相位一般情况下并不相同或接近。这可能是造成对单个大地震的某些统计研究结果不一致性和不确定性的主要原因。

(3) 关于潮汐应力对大地震触发的力学机制研究目前还缺乏细致的物理模型描述，

多数研究采用潮汐应力优势相位统计的方法来研究大地震, 以是否存在优势相位来判断大地震的发生是否具有潮汐触发性。如果能建立一种物理模型, 来分析天文潮汐应力对地震断层的力学作用, 并在此基础上提出一种大地震的潮汐应力触发判别方法, 这将有助于天文潮汐与大地震关系研究更深层次的开展。在这个问题上, 文献 [42] 的研究作了初步尝试, 其基本思路是, 构造应力场的大小主应力方向与震源机制的 P 轴、 T 轴方向一致, 计算出 P 、 T 轴方向的潮汐应力分量 σ_P 和 σ_T , 将其分别迭加于临震状态的构造主应力 σ_1 和 σ_2 , 则可根据岩石力学的某些准则, 分析潮汐应力对发震断层是否有促进破裂滑动的作用。根据文献 [42] 所提出的附加潮汐应力的增压型和减压型力学模型, 可以说明地震与潮汐之间存在某些相关现象的内在物理实质。另外, 通过对地震主应力方向附加潮汐应力的计算和判断其对发震断层的作用, 可对大量震例进行统计分析, 以了解不同区域、不同震源机制的地震受潮汐应力作用的特征, 此方面的课题有待进一步研究。

(4) 人们对太阳月亮 (尤其是月亮) 相对地球位置与地震的关系已有不少现象统计方面的研究, 其中, 大多数统计研究是针对单一的位置参数。实际上, 地球在某一时刻受到的引潮力不仅与某一个位置参数有关, 而是同时与多个参数有关, 仅对单一位置参数作统计, 所得到的结果只能从一个侧面反映天文潮汐与地震关系, 因此, 同时考虑与天文潮汐有关的多种位置参数进行统计分析, 对得到整体全面的统计图像是必要的。

参 考 文 献

- 1 李瑞浩, 魏望生. 地壳形变与地震, 1982, (1): 92
- 2 Kilston S, Knopoff L. Nature, 1983, 304: 21
- 3 Shirly J H. Earth. Planet. Sci. Lett., 1985, 76: 241
- 4 Shirly J H. Geophys. Journal, 1988, 92: 403
- 5 Lopes R M C, Malin S R C et al. Phys. Earth. Planet. Inter., 1990, 59: 127
- 6 Weems R E, Perry W H. Geology, 1989, 17: 661
- 7 褚志宏等. 地震研究, 1983, 6(1): 77
- 8 吴智勇. 地球物理进展, 1996, 11(4): 101
- 9 李晓明, 胡辉. 地球物理学报, 1999, 41(6): 780
- 10 李晓明, 胡辉. 云南天文台台刊, 2000, (1): 54
- 11 任振球. 地震研究, 1985, 8: 575
- 12 丁鉴海, 黄雪香等. 地震, 1994, 14(4): 7
- 13 吕琪琦, 丁鉴海. 地震, 1998, 18(1): 57
- 14 高伟, 许绍燮, 刘蒲雄等. 地震学报, 1996, 18(1): 70
- 15 高伟, 刘蒲雄, 许绍燮等. 地震学报, 1996, 18(3): 333
- 16 Shlien S. Geophys. J. R. Astr. Soc., 1972, 28: 27
- 17 Lammlein D et al. Rev. Geophy. Space. Phys., 1974, 12: 1
- 18 Sadeh D, Meidav M. J. Geophys. Res., 1973, 78: 7709
- 19 Klein F W. Geophys. J. R. Astr. Soc., 1976, 45: 245
- 20 Patane G et al. Phys. Earth. Planet. Inter., 1994, 87: 123
- 21 Ryall A, Ryall F. Bull. Seism. Soc. Am., 1981, 71: 747
- 22 Hartzell S, Heaton T. Bull. Seism. Soc. Am., 1990, 80: 504
- 23 Ambeh W B, Fairhead J D. Geophys. J. Int., 1991, 106: 287
- 24 Palumbo A. Geophys. J. R. Astr. Soc., 1986, 1: 93

- 25 韩延本,李志安,田静. 地球物理进展, 1996, 11(2): 114
26 Rydelek P A, Davis P M et al. J. Geophys. Res., 1988, 93(B5): 4401
27 Berrino G. J. Volcanology Geotherm. Res., 1991, 48: 93
28 秦保燕,郭增建. 国际地震动态, 1999, (1):1
29 杜品仁. 地球物理学报, 1994, 37(3): 362
30 杜品仁. 地球物理学报, 1996, 39(3): 327
31 Heaton T H. Geophys. J. R. Astr. Soc., 1975, 43: 307
32 Sun W K. Phys. Earth. Planet. Inter., 1992, 71: 205
33 Heaton T H. Bull. Seism. Soc. Am., 1982, 6: 2181
34 高锡铭,殷志山等. 地震学报, 1981, 3(3): 264
35 Ding Z Y, Jia J K, Wang R. Tectonophysics, 1983, 93: 319
36 Tsuruoka H, Masakazu O, Haruo S. Geophys. J. Int., 1995, 122: 183
37 Mcnutt S R, Beavan R J. Nature, 1981, 294: 615
38 Souriau M et al. Bull. Seism. Soc. Am., 1982, 72: 165
39 吴小平, 龚玉兰等. 云南大学学报, 2000, 22(2): 116
40 Varga P. Phys. Earth. Planet. Inter., 1996, 93: 285
41 Dionysion D D, Saeais E E et al. Earth, Moon, Planets, 1993, 60: 127
42 吴小平, 黄 雍等. 地震研究, 2001, 24(1): 53
43 吴小平, 冒 蔚等. 地球物理学报, 1999, 42 (增刊): 65

Astronomical Tides and Earthquakes

Wu Xiaoping^{1,2} Mao Wei² Huang Yong³

(1 Earth Science Department, Yunnan University, Kunming 650091)

(2 Yunnan Observatory, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011)

((3 Seismological Bureau of Yunnan Province, Kunming 650041)

Abstract

A review on the studies of correlation between astronomical tides and earthquakes is given in three categories, including (1) earthquakes and the relative locations of the sun, the moon and the earth, (2) earthquakes and the periods and phases of tides and (3) earthquakes and the tidal stress. The first two categories mainly investigate whether or not there exist any dominant pattern of the relative locations of the sun, the moon and the earth during earthquakes, whether or not the occurrences of earthquakes are clustered in any special phase during a tidal period, whether or not there exists any tidal periodic phenomenon in seismic activities. By emphasizing the tidal stress in seismic focus, the third category investigates the relationship between various seismic faults and the triggering effects of tidal stress, which reaches the crux of the issue. Possible reasons to various inconsistent investigation results by using various methods and samples are analyzed and further investigations are proposed.

Key words astronomical tides—earthquakes—tidal periods—tidal stress—seismic faults.