

太阳活动对中国近东西向断层 8 级大地震的可能触发^{*}

韩延本^{①**} 郭增建^{①②} 吴瑾冰^{①②} 马利华^①

(① 中国科学院国家天文台, 北京 100012; ② 中国地震局兰州地震研究所, 兰州 730000)

摘要 研究了发生在中国及蒙古国西部地区 $M_s \geq 8$ 的大地震与太阳活动的关系, 发现在东西向和近东西向断层上的地震, 发生时间多处太阳活动的峰年附近, 而其他方向断层上的大地震多数不在太阳活动的峰期附近. 作者认为产生这种现象的原因可能是因为太阳活动峰年附近出现较多磁暴, 引起的地磁场异常变化在近东西向孕震断层面上产生涡电流对岩石加热, 降低了岩石的耐剪强度和静摩擦极限, 从而使已孕育的大地震容易发生.

关键词 地震 太阳活动 磁暴 涡电流

2001 年 11 月 14 日昆仑山口西部发生的 $M_s=8.1$ 级大地震, 是近 50 年来中国大陆最大的一次地震, 也是自 1951 年西藏当雄 8 级大震以来在中国大陆惟一的一次 8 级以上特大地震. 它引起了地震界、地质界以及天文地球动力学界的广泛关注. 特大地震发生规律的研究一直是人们特别重视的, 人们在不断寻找可能影响和触发大地震的因素. 我们注意到, 此次大震发生在太阳活动第 23 周峰值出现后不久, 尤其在该周的次峰刚刚过后(主峰和次峰分别在 2000 年 7 月和 2001 年 9 月), 这引起我们的兴趣.

一些国家的学者对太阳活动与大地震的关系作过许多有价值的研究. 早在 20 世纪 30 年代, 日本学者 Takayama 等人研究认为, 太阳活动引起的气象变化可能触发地震^[1]. 苏联学者 Sytinsky 的研究表明, 太阳活动引起的全球大气环流扰动和质量的重新分配, 可能影响地球的自转运动, 并从而对大地震产生影响^[2]. Simpson 认为, 太阳活动在地壳内产生的感应电流可能是触发地震的原因之一^[3]. 刘德富等人发现某些地区的大地震与太阳活动磁周期的变化有一定的相关^[4]. Mazzarella 等人研究认为意大利的地震活动与太阳活动有关, 并认为地磁异常可能会触发地震^[5]. 有学者认为磁暴观测资料有可能为地震短期预报提供信息^[6]. 杜品仁和徐道一曾总结过 1970 年前国内外许多学者关于太阳活动与地震关系的研究结果, 许多结果表明太阳活动对地震是有影响的, 虽然结论可能还欠明确, 不同结果中也存在差异^[7]. 俄罗斯学者对这方面的研究很有兴趣, 并注意到太阳风和粒子射线与地震活动的关系^[8, 9].

地震与许多现象的关系是一个典型的具有复杂性的问题. 作者注意到, 由于发生地震的断层的特征有差异, 在研究如太阳活动等外部因素对地震的影响时, 似应结合地震断层的特

2003-04-25 收稿, 2003-10-22 收修改稿

^{*} 国家自然科学基金资助项目(批准号: 10373017)

^{**} E-mail: hyb@bao.ac.cn

征进行研究. 本文拟结合发震断层的走向, 通过分析中国和蒙古的一些大地震, 从震源物理的角度来讨论太阳活动对特大地震可能的影响和触发作用.

1 大地震及太阳活动的资料统计分析

中国历史上曾发生过多 次 8 级和 8 级以上的大地震, 在蒙古国西部也曾发生过几次 8 级以上的大震. 与 2001 年昆仑山 8.1 级大震类似, 1905 年的蒙古大震和 1906 年的新疆大震也发生在太阳峰年附近. 而 1931 年的新疆 8 级大震和 1951 年的西藏当雄 8 级大震却分别在太阳活动峰年后约 3 年和 4 年的降段上, 看来它们的关系比较复杂. 但是我们注意到, 几次处于太阳活动峰年附近的地震, 其所在的断层是东西向或近东西向的, 而不在峰年的地震所在的断层则不属于近东西向. 我们将主要讨论发生在中国和蒙古国西部的大地震, 因为我们对该地区的断层构造比较了解. 为讨论与太阳活动的关系, 我们选用的主要是 17 世纪后的地震. 太阳活动、地震及断层的参数被统计在表 1 中.

表 1 太阳活动、地震及断层的参数

序号	年	月	日	ϕ	λ	地点	断层走向	震级	太阳活动*
1	1556	1	23	34.50	109.70	陕西华县	东西向	$8\frac{1}{4}$	峰段(1558±1a)
2	1654	7	21	34.30	105.50	甘肃礼县	北北东	8	谷段(1655)
3	1668	7	25	35.30	118.60	山东郯城	北北东	$8\frac{1}{2}$	谷段(1666)
4	1679	9	2	40.00	117.00	河北三河	北北东	8	谷段(1679.5)
5	1739	1	3	38.80	106.50	宁夏北部	北东	8	峰段 +1a
6	1812	3	8	43.70	83.50	新疆新源	近东西	8	谷段 +1.5a
7	1833	9	6	25.20	103.00	云南昆明东北	南北向	8	谷段 +0a
8	1879	7	1	33.20	104.70	甘肃武都	近南北	8	谷段 +0.7a
9	1902	8	22	39.88	76.20	新疆阿图什北	北东东	8.25	谷段 +0.7a
10	1905	7	9	49.00	99.00	蒙古车车尔勒格	北东	8.2	峰段 +0.1a
11	1905	7	23	49.00	98.00	蒙古车车尔勒格	东西向	8.2	峰段 +0.1a
12	1906	12	23	43.50	85.00	新疆沙湾南	近东西	8.0	峰段 +1.5a
13	1920	6	5	23.50	122.70	台湾东部海中	不明	8.0	降段 (+2.8a)
14	1920	12	16	36.70	104.90	宁夏海原	混合	8.5	降段 (+3.3a)
15	1927	5	23	37.70	102.20	甘肃古浪	近东西	8.0	峰段 -0.9a
16	1931	8	11	47.10	89.80	新疆富蕴	近南北	8.0	降段 (+3.4a)
17	1950	8	15	28.40	96.70	西藏墨脱	北东向	8.6	降段 (+3.2a)
18	1951	11	18	31.10	91.40	西藏当雄	北西向	8.0	降段 (+4.5a)
19	1957	12	4	45.20	99.00	蒙古戈壁阿尔泰	近东西	8.3	峰段 -0.1a
20	1972	1	25	22.60	122.30	台湾绿岛	南北向	8.0	降段 (+3.3a)
21	1976	7	28	39.40	118.00	河北唐山	北北东	7.9	谷段 +0a
22	2001	11	14	36.20	90.90	昆仑山口西	近东西	8.1	峰段 +1.5a

*“+”和“-”号及数字分别表示地震处在太阳活动峰年后和前的年数(a 表示年). 对于处太阳活动降段的地震, 在括号中给出了距离峰年的时间间隔.

1900 年以前的地震的参数取自《中国历史强震目录》^[10], 1900 年以后的取自《中国强地震目录》^[11], 被中国定为 7.8 级的 1976 年唐山地震, 被美国的地震目录定为 7.9 级¹⁾, 有的定为 8 级²⁾. 此次地震震中区的烈度很高, 所以它也被列入表 1 中. 16 世纪时太阳黑子数还不确

1) <http://quake.geo.berkely.edu/cnss>.
2) NOAA in cooperation with U.S. Geological Survey 1973-1977, Superintendent of Documents U.S. Government printing office, Washington, D.C

切, 据文献[12]的资料, 1558 ± 1 年为峰年, 黑子数年均值约为 160. 另据中国天文史料, 有 1556 年“日中有黑子, 大如鸡子”的记载, 因此 1556 年大震应是位于太阳活动的峰年或附近. 在表 1 的太阳活动一栏中, 给出了地震距离峰或谷年的时间长度, 而对早期的 4 个地震, 只在括号中给出了相应的峰、谷年的时间.

这些地震的震中位置和断层的走向被标在图 1 中. 其中带小短线的实线表示地震的断层为东西向或近东西向, 且时间处在太阳活动峰年附近短期内; 不带小短线的实线表示断层为其他走向, 且地震不在太阳活动峰年附近; 点线为例外的震例. 将太阳黑子月均值曲线以及这些大震标在图 2 中, 以更清楚地显示地震与太阳活动的关系. 1739 年前的震例没有相应的黑子月均值数据, 其后的一个地震在 1812 年, 故图中的黑子曲线起始于 1810 年.

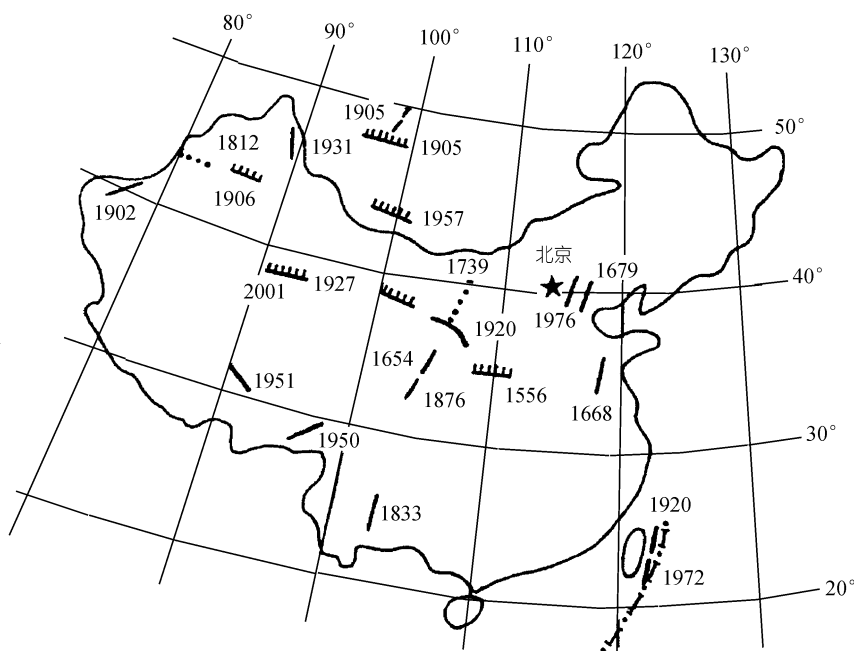


图 1 中国大陆和蒙古国西部 8 级大地震的震中位置及太阳活动状况(地图仅为示意图)

由表 1 和图 1, 2 可以看出, 22 次 $M \geq 8$ 的大震中的 7 次发生在东西向或近东西向断层上, 除 1812 年 3 月 8 日的新疆 8 级大震外, 有 6 次均发生在太阳活动的峰年附近, 并多在峰值之后. 对 1749 年后的地震, 利用太阳黑子月值资料, 我们容易确切知道地震发生时间与太阳活动的峰的偏离, 偏离略大的有 1906, 1927 和 2001 年的地震. 我们注意到

(i) 1905 年太阳活动主峰在 2 月, 但 7 月时曾出现较大的次峰, 并在 1907 年 2 月再次出现较大的次峰, 1906 年 12 月的大震与它们很接近;

(ii) 1927 年 5 月的甘肃大震在 1928 年 4 月的主峰前($R=78.1$), 但 1927 年 1 月, 即在这个地震前, 就出现过几乎与主峰相等的较大的前峰($R=71.9$);

(iii) 2001 年 11 月的大震, 如前述它很接近当年 9 月的较大次峰.

从另一方面统计, 发生在太阳活动峰段附近的共 8 次大地震, 有 6 次地震的断层为东西向

或近东西向. 这个统计结果具有明显的优势. 而其他方向断层上的 15 次大地震的时间几乎都不接近太阳活动的峰年, 距离超过 3 年或 4 年, 有的接近谷年, 只有 1 次在太阳活动的峰年附近. 这个统计结果的优势也是明显的.

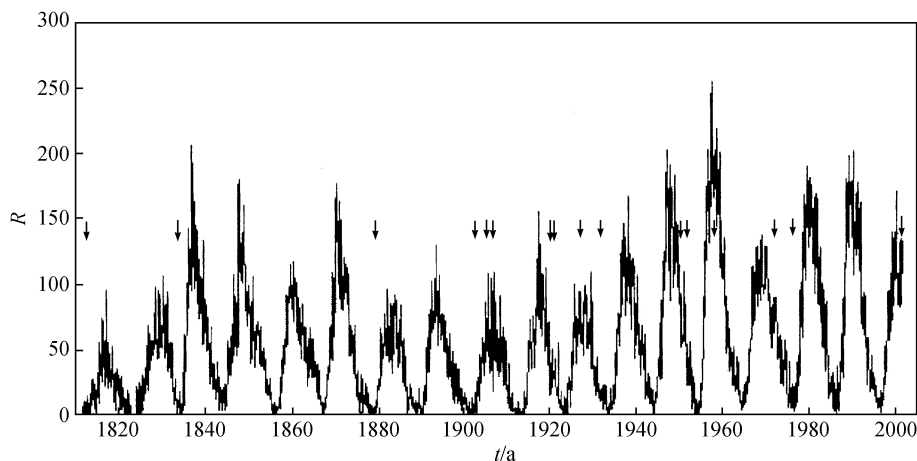


图 2 中国和蒙古国西部 8 级大地震与太阳黑子相对数月均值曲线

另外, 我们也初步调查了发生在日本和土耳其的 3 个 $M_s \geq 8$ 的大地震, 得出了类似于中国地震与太阳活动的关系. 得到断层走向的日本陆地上的 8 级大震只有 1891 年浓-尾大震, 其断层为北北西向, 它不在太阳活动的峰年附近. 土耳其 1939 年 12 月艾津兼 8 级大震(Erzincan, $\phi=39.5^\circ \text{ N}$, $\lambda=38.5^\circ \text{ E}$)的断层走向为近东西向, 1999 年 8 月伊兹米特 8 级地震(Izmit, $\phi=40.7^\circ \text{ N}$, $\lambda=29.9^\circ \text{ E}$)的断层为东西向, 它们均在太阳活动峰年附近. 目前难以讨论其他国家更多的大震, 因对那里的断层了解较少.

2 太阳活动对近东西向断层大地震的可能触发

由上面的结果可以看出, 发生在东西向或近东西向断层上的大地震与强太阳活动有着密切的关系. 作者分析认为, 这种现象可能与太阳活动的峰段时多发的大磁暴引起的强烈地磁场扰动有关.

在大地震发生前, 震源断层面上有预位移发生, 据美国学者 Scholz 等人的实验^[13], 预位移的幅度一般约为地震发生后实际位移幅度的 2% ~ 5%, 利用位移幅度与震级的关系^[14], 震级(M_s)与预位移幅度 S (以 cm 为单位)的关系可表示为

$$S = (0.02 \sim 0.05) \times 10^{0.52M_s - 1.25}. \quad (1)$$

当断层产生预位移时, 摩擦作用在断层上产生的热量 Q 可表示为

$$Q = \frac{2}{J} F \cdot S, \quad (2)$$

式中 J 为热功当量, F 为断层面的摩擦力.

由上述公式可知, 地震的震级愈大, 震前的预位移也愈大, 当然在震源断层面上产生的摩擦热 Q 也愈大. 由于岩石的导热性很差, 这种摩擦热将主要用于提高断层面上介质的温度. 断层

为花岗岩所组成, 其造岩矿物为离子键晶格, 故结构可视为离子晶体. 离子晶体的电导率 σ 与绝对温度 T 的关系可表示为^[15]

$$\sigma = \sigma_0 e^{-E/KT}, \quad (3)$$

式中 E 为活化能, 单位为电子伏特, $K=1.38 \times 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{C}$, 为 Boltzmann 常数, σ_0 为常数. 可见, 离子晶体的温度升高时, 其导电性能也被提高. 在未产生预位移前, 包括震源断层面在内的大范围内介质的电导率的状态可被称为背景状态. 当孕震断层面上出现预位移并产生摩擦热使岩石的导电性提高时, 就相当于在背景状态上出现了一个高导层. 磁暴对地磁场的扰动使得通过该高导层的磁通量有较大变化, 遂在高导层中产生涡电流. 对于电阻为 R 的导电层, 涡电流的强度 I 与磁通量 ϕ 的关系可表示为

$$I = -\frac{1}{R} \frac{d\phi}{dt}. \quad (4)$$

涡电流产生的热量 h 与电流的强度 I 的平方有正变关系 ($h \propto I^2$). 因此, 临震前的大磁暴可在震源断层面上产生加热作用, 从而降低断层面上岩石的耐剪强度或降低静摩擦极限^[16]. 如果反复发生多次大的磁暴, 则对岩石的这种影响会更明显.

在太阳活动的峰段, 磁暴的强度和次数均明显增加, 从而引起强烈的地磁场扰动, 并主要表现为地磁场的水平向的强度发生较大变化. 由于我国大陆的磁偏角不大, 所以水平向磁场强度的变化主要表现为南北分量的变化较大^[17]. 因此, 对东西向和近东西向断层, 穿越临近大震前由预位移形成的导电层的磁通量变化大, 感应的涡电流强, 产生的热量也大, 从而有利于预位移的发展. 并且孕育的地震越大, 其预位移越大, 由此产生的热量也越大, 因而导电层的导电性相对较高. 频繁发生的大磁暴不断作用到东西向和近东西向的断层上, 这样磁暴时的涡电流产生的热量进一步增加, 可能形成正反馈. 我们知道, 临震前震源地方已处于剪应力与耐剪强度的临界不稳定平衡状态, 孕育到晚期的大地震更容易被某些因素触发. 这可能是东西向和近东西向断层上震级越大的地震与太阳活动关系越密切的主要原因. 而其他走向的断层, 因其导电层与地磁场的南北水平分量方向的夹角较小, 所以其涡电流及加热作用均相对较小, 即使有一定的触发作用, 滞后时间可能稍长, 发震时间与太阳活动的峰段有较大的偏离, 如前面统计的那 14 次大震. 除了上述摩擦生热形成导电层外, 按照美国学者 Nur 等提出的“膨胀扩散”模式, 大地震前震源区岩石会产生大量膨胀裂缝, 地壳中的水会扩散到微裂缝丛集的岩层中, 也会形成导电层^[18].

2001 年 11 月 14 日昆仑山口西 8.1 级大地震是一个很好的例子. 根据陈文彬等的考察研究^[19], 该地震的震源深度约为 20 km, 长约 350 km 的近东西方向的断裂带, 是中国大陆地区有记载以来最长的地震断裂带. 断层错动以左旋走滑为主, 断层相对最大水平错距约 6 m, 兼有垂直错动.

据美国国家地球物理数据库公布的资料, 第 23 太阳周的太阳黑子相对数月均值的极大值 (170.1) 出现在 2000 年 7 月, 后该周进入下降段. 但在下降过程中的 2001 年下半年, 黑子月均值出现了较大的起伏, 从 8 月的 106.8 突变为 9 月的 150.7, 之后又开始下降, 形成了该活动周的次峰, 昆仑山口西 8.1 级大震的发生时间滞后于该次峰约 2 个月 (见图 2). 据兰州观象台的地磁资料, 2001 年 9 月 23 日~2001 年 11 月 24 日, 磁暴频繁发生, 其中 $K=7$ 的磁暴有 4 次, $K=8$ 的特大磁暴有 2 次, 有一次 $K=8$ 的磁暴发生在 11 月 5 日, 即此次大震前约 9 天. 中国境内有

大磁暴后的第 9, 18 和 27 d 等附近易出现气温增高和气压降低的现象, 气压降低对走滑型和逆断层型地震是有一定触发作用的^[20], 这次大震是否有气压的变化参与触发也值得研究, 类似的例子还有 1927 年的古浪 8 级大震和 1950 年的墨脱 8.5 级大震.

由于地壳内实测资料的缺乏, 目前还难以定量地描述地震的触发过程及触发作用滞后的时间长度. 但我们知道, 8 级左右的特大地震孕育到晚期时, 震源处已处于非线性状态, 微小外因的触发作用可能被放大, 就可能对大地震的发生产生重要影响.

3 结语与讨论

对过去 400 多年间中国境内和蒙古国西部的 8 级大地震发生时间、所在断层走向与太阳活动关系的分析结果表明, 东西向和近东西向断层上的大地震多发生在太阳活动的峰年附近的短时间内, 即与太阳活动的变化存在高相关性. 我们似可以给出这样一个模式:

(i) 对地震活动区: 孕育到晚期的大地震产生预位移和微裂缝——电导率提高(因摩擦发热和水等流体进入裂缝);

(ii) 对太阳活动: 峰时段活动增强——强磁暴频发——地球磁场南北方向的水平分量出现较大变化——在近东西向断层上产生相对较强的涡电流;

(iii) 断层被进一步加热——断层岩石的耐剪强度或静摩擦极限被降低——对孕育到晚期的大地震产生一定的触发.

由于我们难以得到其他国家的详细的地质构造资料, 本文的初步结论主要是由对中国大地震的分析得到的, 这个结论还需要更多研究工作的验证和补充. 不管怎样, 太阳活动对地震的影响是存在的. 太阳活动的研究和预报一直是天文学家关心的问题, 预报的水平也在不断提高^[21], 如果通过不断深入的研究能更好地认识大地震与太阳活动的关系, 对改善地震预报的水平将是有益的.

参 考 文 献

- 1 Takayama T, Suzuki T. On the relation between the sunspot number and the destructive earthquakes in Japan. Bull. Earthquake research Institute of Tokyo Imperial University, 1930, 8(3): 373 ~ 374
- 2 Sytinskij A D. Connection of the earth seismicity with solar activity and atmospheric processes. Gidrometeoizdat, Leningrad, 1987 (in Russian)
- 3 Simpson J F. Solar activity as a triggering mechanism for earthquake earth and plan. Scien Letter, 1968, 3: 417
- 4 刘德富, 黎令仪. 太阳活动影响地震的证据. 地震科学研究, 1982, 1: 38 ~ 44
- 5 Mazzarella A, Palumbo A. Solar, geomagnetic and seismic activity. Nuovo Cimento C, Serie 1, 1988, 11: 353 ~ 364
- 6 解用明, 高登平, 胡建国, 等. 山西大同-阳高 5.6 级地震前的地磁异常及预报. 山西地震, 2001, 1: 17 ~ 19
- 7 杜品仁, 徐道一. 天文地震学引论. 北京: 地震出版社, 1989
- 8 Jasnov L V. About connection of the earth seismicity with solar activity. Fizika Zemli, 1993, 11:77 ~ 78 (in Russian)
- 9 Sobolev G A, Shestopalov I P, Kharin E P. Geoeffective solar flashes and seismic activity of the Earth. Fizika Zemli, 1998, 7:85 ~ 90 (in Russian)
- 10 国家地震局震害防御司. 中国历史强震目录. 北京: 地震出版社, 1995
- 11 顾功叙. 中国强地震目录. 北京: 地震出版社, 1983
- 12 张家诚. 地学基本数据手册. 北京: 海洋出版社, 1986
- 13 Scholz C, Molnar P, Johson J. Detailed studies of frictional sliding of granite and implication for the earthquake mechanism.

JGR, 1972, 32: 6392 ~ 6406

- 14 郭增建, 秦保燕, 徐文耀, 等. 震源孕育模式的初步讨论. 地球物理学报, 1973, 16: 38~43
- 15 钱家栋, 陈有发, 金安忠. 电阻率法在地震预报中的应用. 北京: 地震出版社, 1985
- 16 Stesky R M, Brace W F, Riley D K, et al. Friction in faulted at high temperature and pressure. Tectonophysics, 1974, 23(1/2): 177~203
- 17 付承义主编. 中国大百科全书, 固体地球物理学、测绘学、空间科学卷. 北京: 中国大百科全书出版社, 1985. 79
- 18 Nur A. Dilatancy, pore fluids and premonitory variation of ts/tp travel times. Bull of the Seismological Society of America. 1972, 62(5):1217 ~ 1222
- 19 陈文彬, 徐锡伟, 张志坚, 等. 2001 年 11 月 14 日青新交界 $M_s8.1$ 级地震地表断裂带的初步调查. 西北地震学报. 2001, 23(4): 313 ~ 317
- 20 郭增建, 秦保燕, 李海华, 等. 磁暴、天气韵律与发震时间. 地震战线, 1973, 3: 26 ~ 29
- 21 Wang J L, Gong J C, Liu S Q, et al. Verification of a similar cycle prediction for the ascending and peak phases of solar cycle 23. Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics, 2002, 2(5): 396~398