

地震前兆:电离层 F₂ 层异常

蔡军涛, 陈小斌, 赵国泽, 詹艳, 汤吉

(中国地震局地质研究所,北京 100029)

摘要 本文简述了目前提出的地震引起电离层异常扰动的物理机理,重点介绍了近几年国内外对震前 F₂ 层异常扰动的研究进展.大量的研究结果显示地震活动引起的电离层扰动不仅确实存在,而且在震级大于 5 级的地震发生前的几天到几个小时会发生电离层扰动.由于地震引起的电离层 F₂ 层变化具有独一无二的特性,这就意味着我们可以利用强震前的 F₂ 层异常变化作为地震短临预报的工具.

关键词 地震前兆,电离层异常,临界频率,短临预报

中图分类号 P315

文献标识码 A

文章编号 1004-2903(2007)03-0720-09

Earthquake precursor: the anomalies in the ionospheric F₂ region

CAI Jun-tao, CHEN Xiao-bin, ZHAO Guo-ze, ZHAN Yan, TANG Ji

(Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029)

Abstract The physical mechanisms of the anomalies in the ionosphere associated with earthquakes are presented in the paper. This article is aimed at describing the development of the anomalies in the ionospheric F₂ region before earthquakes recent years. Many results brought out clearly that ionospheric variations do exist associated with seismic activity and appearing few days or hours before the seismic shocks of large intensity ($M \geq 5.0$). We can conclude that seismically induced ionospheric F₂ region variability shows unique feature that permit us to exploit ionospheric variations before strong earthquakes as a tool for short-term predictions.

Keywords earthquake precursor, ionospheric anomalies, critical frequency, short-term prediction

0 引言

由于人们至今对于地震发生的机制还不完全了解,地震物理预测理论也还未建立,因此对于地震发生前的一些异常现象,科学家只能竭尽所能地去了解并期望找出一个可行的方法来进行地震预测.于是有许多尝试性的地震预测研究方法,研究范围也很广,比如地形、地貌的微小变化,地下水位、温度的变化、岩石中氢气的异常喷发,乃至动物的行为异常.一般常见的研究方法有以下几种:地壳变形的连续观测、地震活动、地震波速度、地磁及地电流、活断层及褶皱、岩石破坏实验、地下流体和地壳热流量的测定及其它的方法.一些位于地震活动带的国家也在一些大地震之后开始着手这方面的研究,以期待可以如气象预报般地来预报地震即将发生的地区及

规模与时间^[1~6].

经过最近几年的研究,愈来愈多的科学家发现地震电、磁场效应和电磁前兆现象较为显著,显示地震的过程并不只是局限于地球的岩石圈也会通过电磁场的作用反映于大气层、电离层乃至磁层^[7]. Barnes^[8](1965)在 1964 年阿拉斯加大地震时,发现电离层有扰动现象的发生,而此次的观测分析似乎是第一次发现电离层的扰动与地震的发生两者之间存在某种关联性.之后 Furumoto^[9](1971)也发现 1969 年发生的 Kurile 岛地震,电离层也出现类似的扰动现象.另外大量的观测数据显示在地震发生前后,地震活动区上方的电离层可能存在某些异常现象^[10]. Antsilevich^[11](1971)分析比较 1966 年 Tashkent 地震时在 Tashkent 和 Alma-Ata 两个测站的电离层参数资料,发现在震中上空的电离层

收稿日期 2007-03-10; 修回日期 2007-05-20.

基金项目 国家自然科学基金重点项目(40534023)和 863 课题:中国地震科学卫星计划的预研与制定(2003AA134060)资助.

作者简介 蔡军涛,男,1977 年生,湖北武汉人,中国地震局地质研究所博士研究生,从事地球电磁法及其应用研究.

(E-mail: cjuntao@126.com)

电子浓度有增加的现象. 这些现象引起了电离层物理学家的兴趣, 并试着由此着手去找出岩石圈(lithosphere)与电离层(ionosphere)间的关系.

最近的研究表明由地震活动引起的电离层变化不仅确实存在, 而且在震级大于 5 级的地震发生前的几天到几个小时会发生电离层的扰动^[12~15].

1 地震电离层前兆的物理解释

关于地震引起的电离层扰动的物理解释目前众说纷纭, 主要有两种假说: 一是地震区产生的内重力波对电离层的影响, 二是地震区的异常垂直电场进入电离层, 引起电离层扰动.

1.1 基于内重力波的假说

由于地壳的块状构造, 在地震活动区地震引起的重力振荡的幅值随着离开地面的高度增加而增大, 这些振荡在地震之前瞬间像“活塞”似的影响到大气层, 这样就产生了内重力波(IGW). 内重力波具有较大的垂向群速度分量, 使得内重力波抵达电离层依然具有较高的能量. 特殊的电离层扰动是以电离层等离子体中性成份的变化为条件, 这些扰动可能是由内重力波进入电离层所造成^[16,17].

1.2 基于异常垂直电场的假说

在地震孕育区除了力学过程, 还有放射性地球化学过程, 其中包括氦气辐射和其他几种气体成分的辐射, 例如惰性气体和温室气体. Garavaglia^[18] (2000) 发现观测到的地震形变和氦气辐射有很好的相关性. 由于地壳中的形变和裂隙造成氦气浓度的变化, 因此在地震孕育区能够观测到这种现象. 由地下逸出的氦气在地壳表层的空气中电离, 水分子附加到它上面, 最终形成离子团. Pulinets 和 Boyarchuk^[19] (2004) 详细描述了地表附近各层的离子团的形成过程, 由于正负离子团之间的库仑引力, 形成了中性离子团. 在地震孕育区上方接近地表的大气层中富含被已经形成的中性离子团包裹的隐性离子^[20].

地震孕育区的地壳会发生强烈的气体释放(主要是 CO₂)^[21], 这些释放的气体起着双重的作用, 由于空气的运动, 它们引起的不稳定性足以激励声重力波的产生. 由于库仑作用力的微弱性, 这些强烈的气体运动将破坏中性离子团, 结果在很短的时间内, 近地表大气层中产生大量的离子(估计浓度是 10⁵~10⁶ cm⁻³). 电荷分离过程^[22] 最终导致形成了一个与正常情况相比很强的垂向电场异常^[23~27]. 理论计算^[12] 表明当存在异常电场的地面区域直径超过

200 km 时, 垂直地面电场就会进入电离层, 引起电离层的扰动^[28~30]. 这些地面区域可以被认为是地震孕育区^[31] 或者地震活动前兆区^[32]. 采用 Dobrovolsky 公式 $R=10^{0.43M}$ 计算能观测到地震电离层异常的地震震级, 这里 R 是地震孕育区的半径, M 是地震震级, 取 $R=100$ km 得到震级 $M=4.6$.

Chen^[33] (1999) 的统计研究表明, 地面电场的异常区域直径为 100~200 km 的范围是电场和电离层发生反应的过渡区. 对于震级为 5 级的地震, 73% 的概率能在震前 5 d 内记录到电离层前兆, 而对于震级为 6 级的地震, 其概率能达到 100%. 因此认为只有在 5 级以上的地震, 才算能够引起电离层的异常变化.

2 与地震有关的电离层 F₂ 层临界频率 f_{0F_2} 的变化

表征电离层特性的主要特征参数是电子浓度, 按照电离层中电子浓度极值区的高度, 可将电离层分为 D 层、E 层、F 层, 如图 1 所示. F 层按高度又分为较低 F₁ 层和较高的 F₂ 层. F₂ 层最高, 电子浓度最大, 与其他各层相比特别厚, 因此 F₂ 层往往是表征整个电离层基本特征的重要区域.

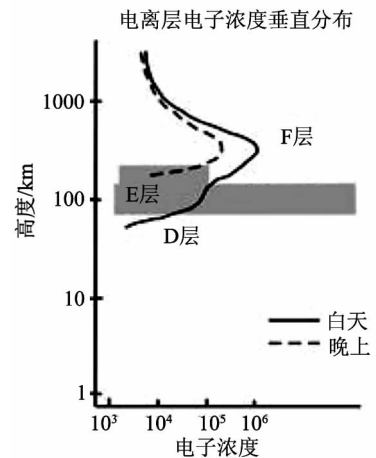


图 1 电离层电子浓度垂直分布

Fig. 1 Vertical distribution of ionospheric electron concentration

电离层的电子浓度 N_e 与电离层等离子体的频率 f_N 有如下的关系:

$$f_N = 9\sqrt{N_e} (\text{KHz}),$$

与电离层各层最大电子浓度 (N_{emE} , N_{emF1} , N_{emF2}) 相对应的等离子体频率称为该层的临界频率, 分别记

为 f_{0E} , f_{0F1} 和 f_{0F2} . 在电离层垂直探测的记录中最直观和最确切的是各层的临界频率, 各层临界频率的变化直接反映了各层最大电子浓度的变化, 因此测量临界频率的变化就可以知道电子浓度的变化^[34,35].

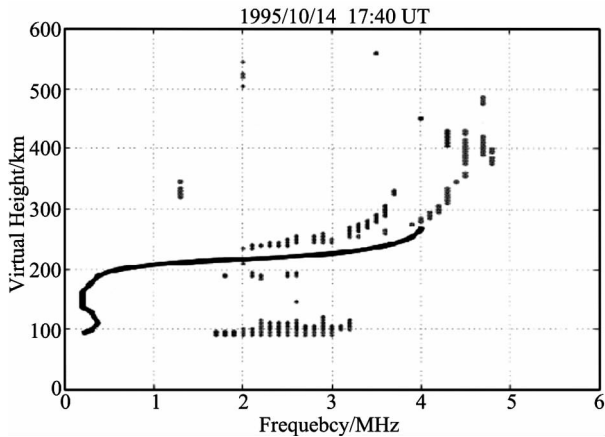


图2 电离图(频高图)

Fig. 2 Ionogram (Frequency-height diagram)

目前广泛使用的探测电离层电子浓度分布的技术是脉冲垂直探测法, 所用的设备是电离层垂直探测仪. 其探测原理是: 发射机垂直向上发射高频脉冲信号, 根据电波在电离层的传播理论, 垂直入射信号的频率 f 等于某高度电子浓度 N_e 对应的等离子体频率 f_N 时, 电波会从该高度反射折回地面, 接收机接收返回信号后, 测出信号从发射到返回的时延, 可计算出该信号的反射高度. 垂直探测仪的记录资料称为电离图, 又称频高图(图2). 一般入射频率越高, 入射电离层的高度越大.

2.1 电离层 F_2 层临界频率 f_{0F2} 时间变化

Pulinets^[36](1991)用电离层探测仪分析电离层 F_2 层的临界频率 f_{0F2} 、最大电子浓度 N_{emF2} 和 F_2 层虚高 $h'F_2$ 的日变化, 发现在 1979~1981 年发生的几个强震前, 这些电离层参数有扰动存在. 其中, f_{0F2} 和 N_{emF2} 会异常减小, $h'F_2$ 会异常增大. Pulinets^[37](1998)分析了 50 个 $M \geq 5.0$ 的地震上空的电离层变化, 指出 f_{0F2} 在地震前有明显降低的现象.

图3是发生在意大利的一系列地震期间 F_2 层的临界频率 f_{0F2} 随经度变化的剖面图^[38], 实线1是平均变化曲线, 曲线2是震前两天的变化曲线, 曲线3是震前1d的变化曲线, 可以发现震前 f_{0F2} 存在异常扰动.

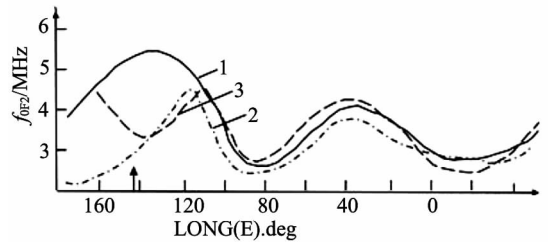


图3 意大利一系列地震期间 F_2 层临界频率 f_{0F2} 随经度变化情况(14.07.80~15.07.80), 图中实线1是平均变化曲线(作为正常背景值), 点划线2是震前两天的变化曲线, 虚线3是震前一天的变化曲线, 箭头所指为地震发生位置^[38].

Fig. 3 Longitudinal variations of critical frequency in F_2 region during a series of earthquakes in Italy from 14.07.80 to 15.07.80. Real line — averaged distribution obtained for quiet conditions. Dash-dot line—two days before earthquake. Dashed line—one day before earthquake. Arrow at the bottom axis indicates the location of earthquakes.

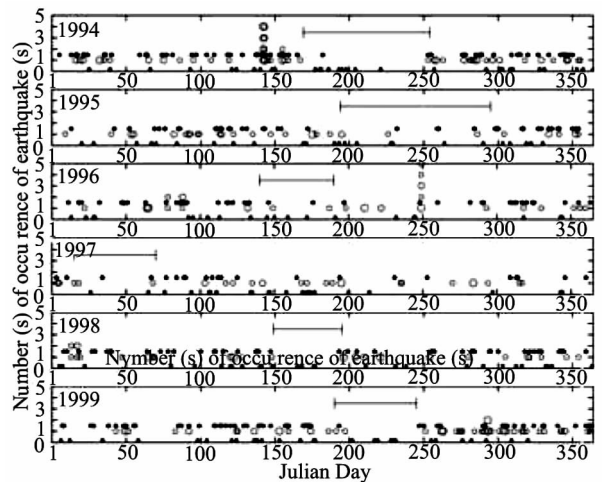


图4 1994~1999年台湾发生的 $M \geq 5.0$ 地震和电离层 f_{0F2} 异常, 图中星号表示的是 1994~1999 年在台湾发生的 416 次 f_{0F2} 异常(其中灰色星号是 109 次与磁暴有关的异常, 黑色星号是 307 次与地震有关的异常), 红圈代表的是 184 次 $M \geq 5.0$ 地震. 由图中可以看到在地震发生时, 一般会伴随出现电离层 f_{0F2} 异常^[39].

Fig. 4 Ionospheric anomalies and $M \geq 5.0$ earthquakes occurred in Taiwan during 1994~1999. The asterisks denote the 416 f_{0F2} -anomalous days (gray asterisk shows the 109 storm-related anomalies; black asterisk shows the 307 seismorelated anomalies), and red circles represent the 184 $M \geq 5.0$ earthquakes. It illustrates that the f_{0F2} anomalies seem to appear frequently related to earthquakes.

刘正彦等^[39](2006)对台湾地区 1994~1999 年间 184 个发生于 170 d 内的 $M \geq 5.0$ 的地震用统计方法进行了分析(图 4),图中星号表示的是 1994~1999 年在台湾发生的 416 次 f_{0F_2} 异常(其中灰色星号是 109 次与磁暴有关的异常,黑色星号是 307 次与地震有关的异常),红圈代表的是 184 次 $M \geq 5.0$ 地震. 由图中可以看到地震发生时,一般会伴随出现 f_{0F_2} 异常,而在地震少发时段(图中蓝线表示的时间区段)出现 f_{0F_2} 异常的几率也比较低,结果显示地震发生和 f_{0F_2} 异常出现有相关性,他们还发现在地震前一至五天,地方时 12~18 点间出现前兆的机会很高.

图 5 是发生在意大利的连续三次地震的 F_2 层临界频率偏移量 Δf_{0F_2} 随时间变化的经度剖面图^[40],这张图是通过分布在北纬 40° 附近,经度范围在东经 $0 \sim 25^\circ$ 的欧洲电离层地面观测站的数据进行插值得到的,地震的相关参数见表 1.

表 1 意大利地震的震源参数

Table 1 Parameters of the seismic events in Italy

地震名称	日期	时间(UT)	经度	纬度	震源深度(km)	震级
Abruzzo	84.05.07	17:50	13.9E	41.8N	16	5.8
Abruzzo	84.05.11	10:42	13.9E	41.8N	15	5.4
Balkans NW	84.05.13	12:45	17.8E	43.0N	34	5.1

对于发生在 1984 年 5 月 7 号的地震在震前 5 天能够看到第一次比较强的正扰动(即临界频率的增大),这表明地震的电离层前兆现象的存在. 通过对两个测量点的互相关分析证实了这一点^[41],进行互相关分析的一个测量点位于地震活动区,另外一个在相同地磁纬度但在经度上向东或者向西偏离 $5 \sim 7^\circ$. 没有地震的时候,两点的互相关系数是非常高的(≥ 0.9),但在地震前互相关系数减小到接近 0.6,这是由于地震活动引起的电离层异常区的空间尺度的限制,在离开地震活动区的那一点不能够很好地监测到地震电离层耦合. 互相关系数的第一次最小值通常在震前的 5 d 记录到,对台湾地震活动区 10 年连续观测的电离层数据的统计处理也得到了相同的结论^[42].

杜品仁^[43](1998)根据国际地球物理年(IGY)期间(1957~1959 年)全球 21 个电离层垂测站资料,对在此期间全球发生的 55 次 $M \geq 6.0$ 地震与 F_2 层临界频率 f_{0F_2} 的关系进行了统计分析,发现在孕震期间 F_2 层参数 $\Delta f_{0F_2}/f_{0F_2}$ 变异的统计特征是正扰动.

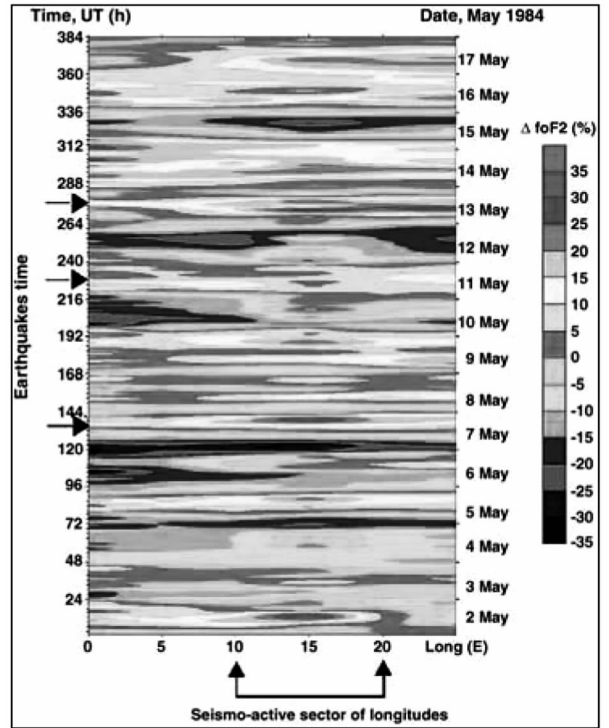


图 5 1984 年意大利地震期间临界频率偏移量 Δf_{0F_2} 随时间变化的经度剖面图,图中纵轴箭头所指为地震发生时间,横轴箭头所指为地震发生的经度. 发生在 1984.5.17 日的地震在震前 5 天出现一次比较强的 Δf_{0F_2} 正扰动异常,这表明地震电离层前兆的存在^[40].

Fig. 5 Deviation of the critical frequency Δf_{0F_2} in the longitude sector as a function of time for a period of seismic activity in Italy. Arrows on the left axis indicate the moments of earthquakes. Arrows on the bottom axis indicate the longitude of the earthquakes. The first strong positive deviation within this sector appears 5 days before the shock on 7 of May 1984. This demonstrates that ionospheric precursors really exist.

刘正彦等^[44](2000)采用中位数(中位数,指位于统计数列中央的数值,低于或高于此中位数的数值各占一半,若资料中有异常值,只要异常值不超过一半,中位数就不受影响)的统计方法对 1994~1999 年间发生在台湾的 6 级以上地震震前的电离层信号进行了研究,他们发现在强震前 F_2 层临界频率 f_{0F_2} 在地方时的 12~17 点的时间段内会有显著的变化.

卓裕荣等^[45](2001)采用平均数和中位数两种统计方法对 1998 年的瑞里地震($M=6.2$)、1999 年的集集地震($M=7.3$)和嘉义地震($M=6.4$)前的临界频率 f_{0F_2} 进行分析,结果显示在这三次地震前

f_{0F_2} 都显著的减小。

1993年7月发生在日本 Okushiri 的 $M=7.8$ 级大地震, Ondoh^[46] (1999) 发现在震前的3个晚上和震后的3个晚上, F_2 层的临界频率 f_{0F_2} 都小于其月中值. F 层虚高 $h'F$ 在震前的3个晚上高于其月中值, 而在震后的三个晚上低于其月中值. 他们认为伴随 f_{0F_2} 的减小而发生的 $h'F$ 的增大或减小可能分别是由于向上的等离子体漂移或者向下漂移的电子和电离层离子在低纬度的重新组合造成的. 刘正彦等^[44] (2000) 也发现台湾地区 1994~1999 年 $M \geq 6.0$ 的地震有类似的 f_{0F_2} 异常现象存在.

卓裕荣^[47] 等(2002)分析了台湾地区 1994—1999 年规模 6.0 以上的地震, 发现地震前 F_2 层临界频率 f_{0F_2} 在地方时的 12:00~17:00 间会发生异常减少的现象, 且多数的异常都发生于地震前一天. 利用互相关分析, 研究了六年内台湾 $M \geq 5.0$ 的地震震前每日及震前一天的 f_{0F_2} 资料, 结果与前述的 $M \geq 6.0$ 地震的统计结果相互吻合. 为排除磁暴效应的影响, 他们采用叠加和互相关分析方法, 结果显示台湾地区电离层 f_{0F_2} 的磁暴效应可影响磁暴发生后 1~2 d. 以此作为剔除磁暴影响的依据, 排除磁暴发生的异常后, 可以确定地震电离层前兆会于地震之前五天内发生. 有些时段少有地震发生时也鲜有电离层 f_{0F_2} 异常发生, 表明地震和电离层 f_{0F_2} 异常具有某种程度的关联性. 他们经过统计研究, 发现六年内地震前出现地震电离层异常扰动的比率为 74.1%.

2.2 电离层 F_2 层临界频率 f_{0F_2} 空间变化

从震前 F_2 层临界频率随时间的变化我们可以看到, 震前的 f_{0F_2} 变化是十分复杂的, 既有正扰动也有负扰动存在, 为何会存在这种情况? Kim^[48] (1999) 通过理论计算得到了强震前中纬度地区 F_2 层电子浓度的水平分布图, 他们发现在分布图上存在两个明显的区域: 一个区域电子浓度在增大(正扰动区), 而另一个区域电子浓度在减小(负扰动区), 它们分别位于震源区的两侧, 而且在 F_2 层的不同高度处, 正负扰动区的位置会发生翻转. 图 6 是 Pulinets^[49] (2003) 计算的在 250 km 高度处 F_2 层的电子浓度分布图, 图中的黑星是震源区异常电场源的垂直投影. 由图 6 我们可以看到, 在不同的地面观测点, 相同高度的电离层分布会得到完全不同的观测结果, 这就是由于相对震中的观测点位置不同而造成观测到不同形态的电离层变化.

Pulinets^[40] (1998) 研究发现 F_2 层电离层异常区的与震源区的位置是对应的, 但是异常的峰值点

与震中的投影点的并不是重合的, 发生扰动的异常区的直径大概是 $20 \sim 30^\circ$ 量级, 而且有时异常扰动区在相对应另一个半球的磁共轭区也可以观测到.

Pulinets^[49] (2003) 通过理论计算提出假设: 对同样形成机理的震源, 固定震源和观测点的相对位置, 在相同的震中位置或者临近的地方重新触发地震, 观测到的电离层前兆异常应该是相同的(或者相似的). 基于这个假设, 他提出了“电离层前兆模板”用于识别地震电离层前兆.

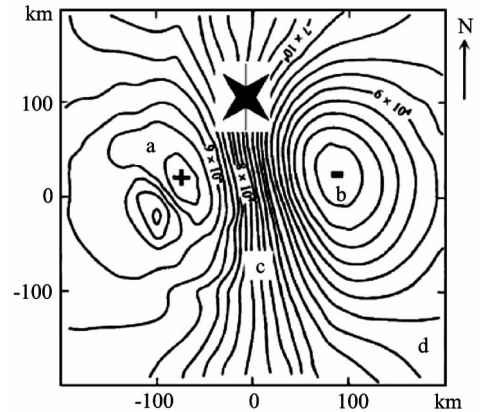


图 6 250 km 高度 F_2 层电子浓度分布, 图中黑星号是震源区异常电场源在 F_2 层的垂直投影点, 正号表示区域电子浓度增大, 负号表示区域电子浓度减小^[49]

Fig. 6 Distribution of the electron concentration in F_2 region at the altitude 250 km. Black asterisk — the vertical projection of the anomalous electric field source. Positive sign — increase of the electron concentration. Negative sign — decrease of the electron concentration.

卓裕荣^[47] (2002) 分析 f_{0F_2} 的偏离量发现, 偏离量随着地震规模增大而增加的趋势不是很明显. 而与其与震中距离关系是, 随着震中距愈远相对的偏离量也有愈小的现象. 除此之外, 震源深度对 f_{0F_2} 偏离量的影响, 由于台湾的地震多属集中于 100 km 内的浅层地震, 所以震源深度与偏离量的关系并不明显, 只发现随着震源愈深检测成功的次数也愈少.

因为震前 F_2 层临界频率 f_{0F_2} 的变化十分复杂, 研究也显示在地面不同的观测点可能观测到完全相反临界频率 f_{0F_2} 的变化, 这就要求我们不能完全依靠地面的电离层观测点, 必须采用卫星在空间进行全方位连续观测, 因此利用卫星成像技术来研究

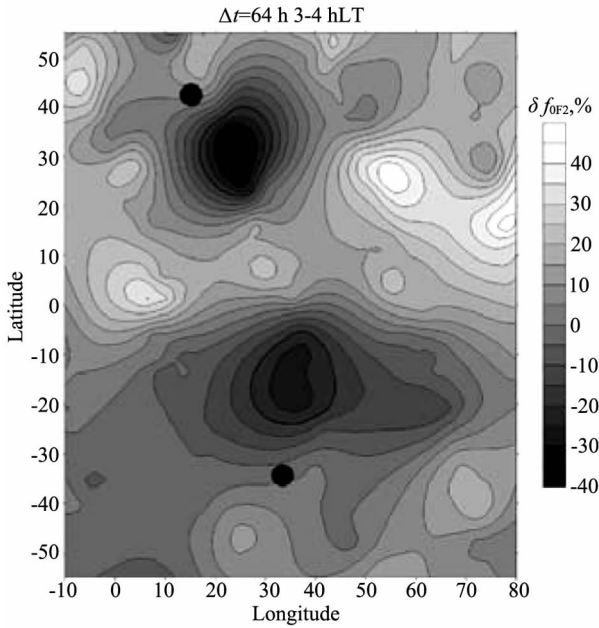


图 7 1980 年意大利 Irpinia 地震震前 40 小时记录的 Δf_{0F2} 的二维分布图,图中黑点表示震中在 F₂ 层的投影点^[50]

Fig. 7 Critical frequency deviation 2D distribution recorded 40h in 1984 before the Irpinia earthquake in Italy. Solid dot — the vertical projection of the epicenter in F₂ region.

地震电离层变化的空间分布是目前地震电离层异常研究新的发展方向. Pulinets and Legen' ka^[50] (2003)详细介绍了卫星数据处理技术和卫星成像的结果.通过卫星成像发现了两个新的现象:①在某种特殊条件下(当南北半球都是夜晚)会观测到共轭效应,即某个地震活动区上方的电离层异常会通过磁力线映射到相对应的另一个半球的磁共轭区.图 7 是在 Irpinia 地震前观测到的电离层异常的磁共轭现象.②当地震震中位于电离层赤道异常(赤道异常是指日间电离层 F₂ 层电子浓度分布在南北地磁纬度约 10°之间各出现一个最大的峰值,而在赤道形成一个极小值的特殊异常现象)的峰值区之间的时候,电离层的异常峰值会向地磁赤道方向移动.

2.3 地震和磁暴引起的 f_{0F2} 变化的区分

电离层 f_{0F2} 的变化极易受到太阳、地球磁场扰动的影响而改变,而最主要影响地球磁场变化的太阳活动就是太阳磁暴.为避免磁暴所造成的电离层异常影响对地震前兆讯号的判定,就必须区分磁暴所造成的电离层异常和与地震有关的电离层异常.

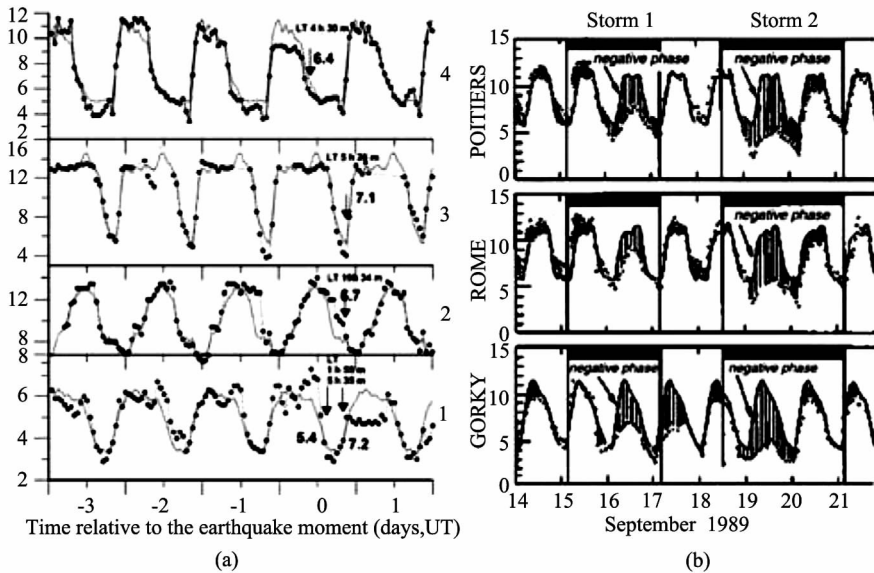


图 8 地震期间和磁暴期的电离层扰动对比,图中(a) 是四次地震震前 3 d 和震后 1 d f_{0F2} 的变化,点线表示 f_{0F2} 的日变值,虚线表示的是 f_{0F2} 的月中值(作为背景值).图(b)是连续两次磁暴期间的 f_{0F2} 变化,点线表示 f_{0F2} 的日变值,虚线表示的是无磁暴情况下 f_{0F2} 的正常日变值^[49].

Fig. 8 Comparison of ionospheric variations related to seismic activity and magnetic storm. (a) daily variations f_{0F2} (points) and their monthly median values(dashes), three days before and one day after four earthquakes. Arrows specify the moments of earthquakes. (b) daily variations f_{0F2} (points) and the diurnal quiet f_{0F2} (dashes) formed by the average quiet days without magnetic storm during two consecutive magnetic storms.

图8是地震引起的电离层异常和磁暴引起的电离层异常的对比,图8a是四次地震震前3d和震后1d f_{0F_2} 的变化,点线表示 f_{0F_2} 的日变值,虚线表示的是 f_{0F_2} 的月中值(作为背景值).图8b中表示的是连续两次磁暴期间 f_{0F_2} 的变化,点线表示 f_{0F_2} 的日变值,虚线表示的是无磁暴情况下 f_{0F_2} 的正常日变值.从图中可以发现地震震前的 F_2 层临界频率 f_{0F_2} 的变化不如在磁暴期间明显,而且其持续的时间也不长,通常的一个相的变化率持续时间不会超过4~6个小时,只有对于特别大的强震(1964年的阿拉斯加大地震),其异常变化的持续时间才能达到12个小时^[49].

但是对于磁暴引起的 f_{0F_2} 异常是长时间的负扰动异常,持续时间一般在12个小时以上,Davies^[51] (1990)发现磁暴对于电离层的影响可以达到72小时,而且没有地震引起的 F_2 层临界频率变化率 Δf_{0F_2} 在震前几个小时存在振荡的现象.磁暴引起的异常扰动比地震引起的异常更加明显,而且其幅度通常是其的2~3倍.Pulinets等^[40]通过对全球54个地震的电离层异常分析,估计出地震电离层前兆的最大变化率是±30%(相对于正常日变).

磁暴引起的电离层异常是一个全球性的概念,它在全球的范围内都能够记录到,而地震电离层异常只有在观测点靠近震中的地方(距离小于2000km)才能够记录到^[49].

3 结论

我们可以认为地震引起的电离层变化具有独一无二的特性,这就意味着我们可以利用强震前的 F_2 层变化,作为地震短临预报的工具.但是,由于震前岩石圈和电离层耦合的复杂性和电离层异常形态的多样性,若将电离层异常作为地震前兆用于实际地震预报中,在机制和前兆信息的识别与提取等方面还有许多工作要做.

致谢 本文在资料收集过程中得到中国地震局地质研究所地球电磁探测研究中心多位同事的帮助,在此一并表示感谢.

参 考 文 献 (References):

- [1] Gokhberg M B, Morgounov V A, Pokhotelov O A. Earthquake Prediction: seismo-Electromagnetic Phenomena [M]. Russia: Gordon and Breach Publishers, 1995.
- [2] 刘光鼎. 20世纪地球科学的发展[J]. 地球物理学进展, 2000, 15(2):1~6.
- [3] Liu G D. The progress of earth sciences in 20th century[J]. Progress in Geophysics(in Chinese), 2000, 15(2):1~6.
- [4] 刘光鼎. 回顾与展望——21世纪的固体地球物理[J]. 地球物理学进展, 2002, 17(2):191~197.
- [5] Liu G D. Review and prospect——21st century solid geophysics[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2002, 17(2):191~197.
- [6] 陈颀, 李娟. 2001年地球物理学的一些进展[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(1):1~4.
- [7] Chen Y, Li J. Advances of geophysics in 2001[J]. Progress in Geophysics(in Chinese), 2003, 18(1):1~4.
- [8] 滕吉文. 21世纪地球物理学的机遇和挑战[J]. 地球物理学进展, 2004, 19(2):208~215.
- [9] Teng J W. Opportunity challenge and developing frontiers: geophysics in 21st century[J]. Progress in Geophysics(in Chinese), 2004, 19(2):208~215.
- [10] 滕吉文. 当代中国地球物理学向何处去[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(2):327~339.
- [11] Teng J W. Where is the contemporary geophysics of China going[J]. Progress in Geophysics(in Chinese), 2006, 21(2):327~339.
- [12] Hayakawa M. Atmospheric and ionospheric electromagnetic phenomena associated with earthquakes[M]. Tokyo: TERRAPUB, 1999.
- [13] Barnes R A, Leonard R S. Observations of ionospheric disturbances following the Alaska earthquake[J]. J. Geophys. Res., 1965, 70:1250~1253.
- [14] Furumoto A S, Pr' lss G W, Weaver P F, et al. Acoustic coupling into the ionosphere from seismic waves of the earthquake at Kurile Islands on August 11, 1969 [J]. Nature, 1971, 226:1239~1241.
- [15] Blanc E. Observations in the upper atmosphere of infrasonic waves from natural or artificial sources; a summary[J]. Ann. Geophys., 1985, 3:673~688.
- [16] Antsilevich M G. The influence of Tashkent earthquake on the Earth's magnetic field and the ionosphere, Tashkent earthquake 26 April 1966[J]. Tashkent, FAN, 1971, 187~188.
- [17] Pulinets S A. Strong earthquakes prediction possibility with the help of topside sounding from satellites[J]. Advances in Space Research, 1998, 21 (3): 455~458.
- [18] Liu J Y, Chen Y I, Pulinets S A, et al. Seismo-ionospheric signatures prior to $M \geq 6.0$ Taiwan earthquakes[J]. Geophysical Research Letters, 2000, 27(19):3113~3116.
- [19] Silina A S, Liperovskaya E V, Liperovsky V A, et al. Ionospheric phenomena before strong earthquakes[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2001, 1:113~118.
- [20] Chuo Y J, Liu J Y, Kamogawa M, et al. The anomalies in the f_0E_s prior to $M \geq 6.0$ Taiwan earthquakes[A]. Seismo Electromagnetic: Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere coupling[C]. TERRAPUB, 2002, pp, 309~312.
- [21] Shalimov S L, Gokhberg M B. Lithosphere-ionosphere cou-

- pling mechanism and its application to the earthquake in Iran on June 20, 1990; A review of ionosphere measurements and basic assumptions[J]. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 1998, 105:211~218.
- [17] Shalimov S L, Gokhberg M B. Lithosphere-ionosphere coupling mechanism and its application in the case of the June 20, 1990 earthquake in Iran: Interpretation of its ionosphere effects[J]. *J. Earthquake Pre Res.*, 1998, 7:98~111.
- [18] Garavaglia M, Dal Moro G, Zadro M. Radon and tilt measurements in a seismic area: temperature effects[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2000, 25 (3):233~237.
- [19] Pulnits S A, Boyarchuk K A. *Ionospheric Precursors of Earthquakes*[M]. Springer Verlag Pub, 2004.
- [20] Pulnits S A, Boyarchuk K A, Hegai V V, *et al.* Conception and model of seismo-ionosphere-magnetosphere coupling[A]. In: Hayakawa M, and O. A. Molchanov (Eds.), *Seismo-Electromagnetics: Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling*[C], TERRAPUB, Tokyo, 2002, 353~361.
- [21] Voitov G I, Dobrovolsky I P. Chemical and isotopic-carbon instabilities of the native gas flows in seismically active regions[J]. *Izvestiya Earth Science*, 1994, 3:20~31.
- [22] Pulnits S A, Boyarchuk K A, Khagai V V, *et al.* Quasielectrostatic model of atmosphere-thermosphere-ionosphere coupling[J]. *Adv. Space Res.*, 2000, 26: 1209~1218.
- [23] Jianguo H. Near earth surface anomalies of the atmospheric electric field and earthquakes[J]. *Acta Seismol. Sin.*, 1989, 2: 289~298.
- [24] Nikiforova N N, Michnowski S. Atmospheric electric field anomalies analysis during great Carpatian Earthquake at Polish Observatory Swider[A]. *IUGG XXI General Assem. Abst.*, Boulder, Colo. [C], VA11D-16, 1995.
- [25] Vershinin E F, Buzevich A V, Yumoto K, *et al.* Correlations of seismic activity with electromagnetic emissions and variations in Kamchatka region [A]. In: Hayakawa M. (Ed.), *Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes*[C], TERRAPUB, Tokyo, 1999, pp513~517.
- [26] Hao J, Tang T, Li D. Progress in the research of atmospheric electric field anomaly as an index for short-impending prediction of earthquakes[J]. *J. Earthquake Pred. Res.*, 2000, 8:241~255.
- [27] Rulenko O P, Operative precursors of earthquakes in the near-ground atmosphere electricity[J]. *Vulcanology and Seismology*, 2000, 4:57~68.
- [28] Park C G, Dejnakintra M. Penetration of thundercloud electric fields into the ionosphere and magnetosphere. 1. Middle and auroral latitudes[J]. *J. Geophys. Res.*, 1973, 84: 960~964.
- [29] Kim V P, Khagai V V. The Effect of an Electric Field on the Nightside E Region of the Midlatitude Ionosphere[J]. *Geomagnetism and Aeronomy*, (English Edition Published by AGU), 1985, 25(5): 717~718.
- [30] Hegai V V, Kim V P. The formation of a cavity in the nighttime midlatitude ionospheric E-region above a thundercloud [J]. *Planet. Space Sci.*, 1990, 38(6):703~707.
- [31] Dobrovolsky I R, Zubkov S I, Myachkin V I. Estimation of the size of earthquake preparation zones[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 1979, 117:1025~1044.
- [32] Bowman D D, Ouilon G, Sammis C G, *et al.* An observation test of the critical earthquake concept[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103, 24359~24372.
- [33] Chen Y I, Chuo Y J, Liu J Y, *et al.* Statistical study of ionospheric precursors of strong earthquakes at Taiwan area[A]. XXVI URSI General Assembly[C], Toronto, 13 - 21 August 1999, Abstracts 745.
- [34] 黄捷. 电波大气折射误差修正[M]. 北京:国防工业出版社, 1999.
- Huang J. Correction for atmospheric refractive error of radio wave[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1999.
- [35] 熊皓. 电磁波传播与空间环境[M]. 北京:电子工业出版社, 2004.
- Xiong H. *Electromagnetic wave dissemination and spatial environment* [M]. Beijing: Electronics Industry Publishing House, 2004.
- [36] Pulnits S A, Legenka A D, Karpachev A T, *et al.* The earthquakes prediction possibility on the base of topside sounding data [J], *IZMIRAN preprint N 34a(981)*, 1991, 25.
- [37] Pulnits S A, Legenka A D, Zelenova T I. Dependence of the seismo-ionospheric variations in the F-layer maximum on the local time[J]. *Geomagnetism and Aeronomy*, 1998, 38 (3):188~193.
- [38] Biryukov A S, Grigoryan O R, Kuznetsov S N, *et al.* Space Physics and Ecology: Effects from the Earthquakes on the Ionospheric Heights[J]. *Engineering Ecology*, 1996, 5:92.
- [39] Liu J Y, Chen Y I, Chuo Y J. A statistical investigation of pre-earthquake-ionospheric anomaly [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2006, 111, A05304.
- [40] Pulnits S A. Seismic activity as a source of the ionospheric variability[J]. *Advances in Space Research*, 1998, 22 (6): 903~906.
- [41] Gaivoronskaya T V, Pulnits S A. Analysis of the F2 layer variability over the areas of seismic activity [J]. *Preprint IZMIRAN No. 2(1145)*, IZMIRAN, Russian Academy of Science, 2002, 20pp.
- [42] Liu J Y, Chen Y I, Pulnits S A, *et al.* A statistical study of ionospheric precursors of $M \geq 5.0$ earthquakes in Taiwan area [A]. *Eos Transactions AGU 81(48)*[C], Fall Meeting Supplement, 2000, Abstract S11B-07.
- [43] 杜品仁,蒋和荣,郭兼善. 电离层异常能否作为地震前兆研究 [J]. *地震*, 1998, 18(2):119~126.
- Du P R, Jiang H R, Guo J S. Research on possibility of ionospheric anomalies as an earthquake precursor[J]. *Earthquake (in Chinese)*, 1998, 18(2):119~126.
- [44] Liu J Y, Chen Y I, Pulnits S A, *et al.* Seismo-ionospheric

- signatures prior to $M \geq 6.0$ Taiwan earthquakes[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2000, 27:3113~3116.
- [45] Chuo Y J, Chen Y I, Liu J Y, *et al.* Ionospheric f0F2 variations prior to strong earthquakes in TaiWan area[J]. *Adv. Space Res.*, 2001, 27:1305~1310.
- [46] Ondoh T. Seismo-ionospheric effects[A]. *Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes*[C]. Terra Scientific Publishing company, Tokyo, 1999, pp789~803.
- [47] 卓裕荣. 电离层地震前兆之研究[D]. 台湾:国立中央大学太空科学所,2002.
Chuo Y J. A study of seismo-ionospheric precursor[D]. Taiwan: NCU Institute of Space Science, 2002.
- [48] Kim V P, Hegai V V. A possible presage of strong earthquakes in the night-time mid-latitude region ionosphere[A]. *Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes*[C]. Terra Scientific Publishing company, Tokyo, 1999, pp619~627.
- [49] Pulnits S A, Legen'ka A D, Gaivoronskaya T V, *et al.* Main phenomenological features of ionospheric precursors of strong earthquake[J]. *Journal of Atmosphere and Solar-Terrestrial Physics*, 2003, 65:1337~1347.
- [50] Pulnits S A, Legen'ka A D. Spatial-temporal characteristics of large scale distributions of electron density observed in the ionospheric F-region before strong earthquakes[J]. *Cosmic Research*, 2003, 41 (3):221~229.
- [51] Davies K. *Ionospheric Radio*[M]. Pter Peregrinus Ltd., 1990.

《地球物理学进展》2007 年征订启事

各期刊订户:

2007 年《地球物理学进展》由季刊改为双月刊,每年 6 期,每期定价不变,仍为 35 元,全年定价变为:210 元。特此通知。

订刊联系方式

(1) 本刊编辑部(邮局汇款与单位电汇均可)

汇款地址 100029 北京市 9825 信箱《地球物理学进展》编辑部

电话传真 010-62369620,010-62007696

联系人 刘少华,赵雷

电子邮件 shliu@cgs.org.cn, geophys@163.com

开户行 中国农业银行北京建德支行 账号 190901040000456

收款单位 中国科学院地质与地球物理研究所

(务必在注释行写上:购《地球物理学进展》款,同时写上您的姓名和联系地址)

(2) 天津全国非邮发联合证订服务部

邮编地址 300385 天津市大寺泉集北里别墅 17 号

电话传真 022-23973378,022-23962479

网 址 <http://www.LHZD.com>

E - mail LHZD@public.tpt.tj.cn