

地震期间电离层扰动现象研究

蔡军涛, 赵国泽, 詹艳, 汤吉, 陈小斌

(中国地震局地质研究所, 北京 100029)

摘要 介绍了大量的关于地震电离层扰动现象研究的最新进展, 研究表明地震发生前的几天或者几个小时电离层扰动被观测到, 电离层前兆是确实存在. 但要使震前的电离层扰动作为地震短临预报的工具, 还有许多值得我们去深入研究和解决的问题. 应用空间技术开展大区域范围内电离层参数的实时观测, 如用地震电磁卫星、GPS 台网、并和地面电离层垂测仪观测相结合, 建立“电离层地震前兆监测系统”, 无疑会加速这项研究的进程.

关键词 地震前兆, 电离层扰动, 总电子含量(TEC), 突发 E_s 层, 等离子体参数

中图分类号 P315 **文献标识码** A **文章编号** 1004-2903(2007)03-0695-07

The study on ionospheric disturbances during earthquakes

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

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

Abstract This paper accumulates the recent advances in ionospheric disturbances of earthquake. The results brought out clearly that ionospheric disturbances appearing few days or hours prior to earthquakes can be observed. This means that ionospheric precursors do exist associated with earthquakes. However, if we take ionospheric variations as a tool for short-term predictions before earthquakes, we still have a long way to go. We should adopt space technologies in monitoring the spatial variations of plasma parameters and built the monitoring system of ionospheric precursors of earthquakes which consists of seismo-electromagnetic satellite, GPS network and ground-based ionosondes. These measures undoubtedly speed up the research of seismo-ionospheric precursors.

Keywords earthquake precursor, ionospheric disturbances, total electron content, sporadic-E, ionospheric plasma parameters

0 引言

地震是对人类造成了破坏性最大、危害最严重的突发性自然灾害, 当前全球正面临着新的地震活跃期, 2004 年 12 月印度洋 8.7 级地震和 2005 年 10 月的巴基斯坦 7.8 级地震的发生及给人类造成的巨大灾难, 再次给人们敲起了警钟. 为了减少地震造成的危害, 地震科学家们致力于地震前兆的研究, 以期能够准确预测和预报地震^[1~4], 其中地震孕育期电离层扰动以及地震电离层耦合的机制研究是地震前兆研究的一个热点问题. Barnes^[5](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, 这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. 最早将电离层参数变化作

为地震前兆的是 Antselevich^[6](1971)和 Datchenko^[7](1972), 他们分别研究了 1966 年 Tashkent 地震前的 E 层临界频率 f_{oE} 变化和电子浓度的变化. 对这种现象的系统研究开始于上世纪 80 年代^[8~9], Pulinets^[10]等 1991 年发表了第一篇从卫星上记录到电离层扰动的文章, 随后提出了利用卫星进行地震短临预报的可能性^[11]. 目前全世界有二十多个国家和地区进行地震电离层前兆研究, 已发表论文几百篇. 最近的研究^[12~15]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扰动. 本文主要介绍近年来国内外关于地震电离层扰动研究的最新进展, 也是对地震电离层扰动的分析和总结.

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)联合资助.

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)

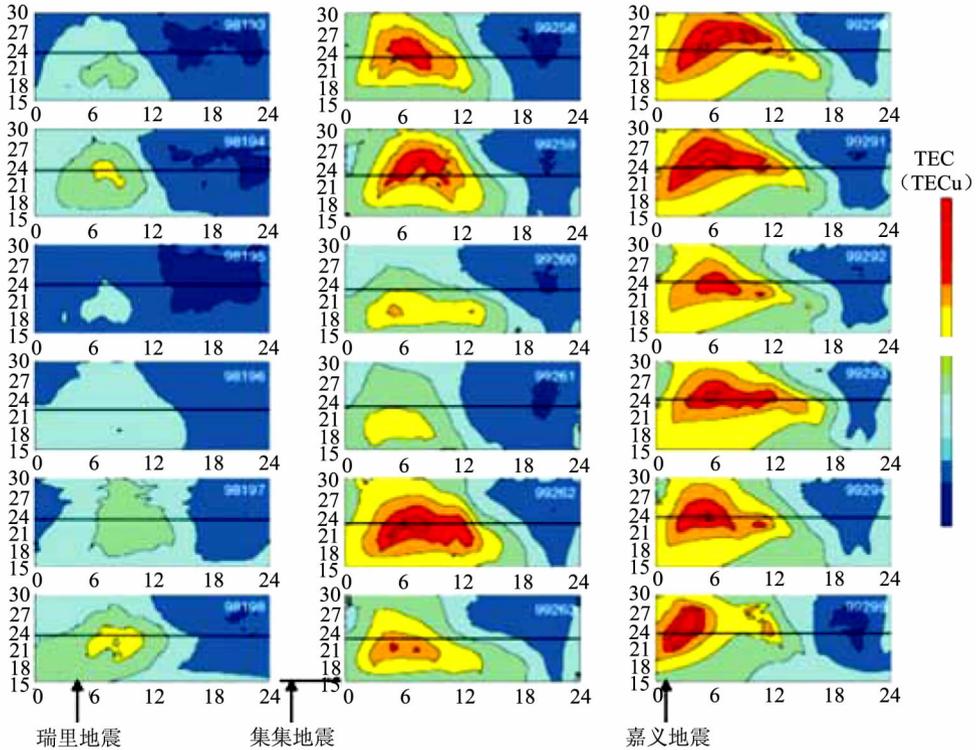


图1 瑞里地震、集集地震和嘉义地震期间台湾地区上空 TEC 随纬度和时间的变化。图中黑实线为震中所在纬度，箭头所指处为地震发生的时间(UT, Universal time);瑞里、集集和嘉义地震发生的时间分别是 198(1998. 7. 17)、262(1999. 9. 20)和 295(1999. 10. 22);红色表示 TEC 高值,蓝色表示 TEC 低值^[22]。

Fig.1 Latitude-time-TEC plots during Rei-Li, Chi-Chi and Chia-Yi earthquakes in Taiwan. Solid line — latitude of epicenters. Arrows indicate moments of earthquakes. The onset days for Rei-Li, Chi-Chi and Chia-Yi earthquakes are 198(1998. 7. 17), 262(1999. 9. 20) and 295 (1999. 10. 22). Red denotes high value and blue indicates low value of TEC, respectively.

1 地震前电离层扰动

目前研究地震引起的电离层扰动主要集中在以下几个方面: F_2 层临界频率 f_{oF2} 、电离层总电子含量 TEC(Total Electron Content)、电离层突发 E层、电离层等离子体参数,其中关于 F_2 层临界频率 f_{oF2} 研究已经在文献^[16]中详细的介绍,这里主要介绍其他三个方面的研究进展。

1.1 电离层总电子含量 TEC 的变化

电子含量 N_T 指电离层中单位面积柱体内所含电子数,

$$N_T = \int_{h_{e0}}^{h_T} N_e dh,$$

N_e 为电子浓度, h 为高度, h_{e0} 、 h_T 分别为电离层的下边界高度和柱体的上顶高度。若 h_T 为电离层的层顶高度,则 N_T 为电离层总电子含量,常用 TEC 表示^[17]。

目前电离层的 TEC 观测主要依靠分布在全球的 200 多个电离层探测仪,显然,面对偌大的地球,这种时空分辨率极低的探测手段难以承担全球地震电离层前兆的监测任务。而且电离层探测仪工作中低频率(1~20 MHz),易被短波干扰,导致数据缺失。相对而言,用于监测地壳形变的地面 GPS 站遍布全球,连续的和准连续的全球及地区 GPS 站总数已达几千个,利用 GPS(Global Positioning System, GPS)探测 TEC,将会使时空分辨率比前者大大提高。

Calais 和 Minster^[18](1995)采用 GPS 探测 1994 年 Northbridge 地震后电离层的 TEC 扰动。刘正彦等^[19](1996)利用 GPS 资料计算了电离层 TEC 经度和纬度二维分布,显示震前的 TEC 和 f_{oF2} 有相同的变化趋势。Zaslavski^[20](1998)采用统计方法研究了 TOPEX-POSEIDON 卫星的 TEC 数据,以检

验地震活动和电离层扰动之间的相关性。

刘正彦^[13,21](2000,2001)分析了台湾的 GPS 观测网观测的 TEC 数据,结果发现在集集地震前电离层的赤道异常峰值向地磁赤道方向移动,同时在震前的第一天、第三天和第四天,TEC 显著减小.通过对震前扰动和正常情况的比较,证实靠近震中的 TEC 在这几天下午的时候显著减小.

卓裕荣^[22](2002)根据卫星和 GPS 地面接收机的相互关系,计算了 TEC 随时间及纬度分布.图 1 是瑞里、集集和嘉义地震期间台湾地区上空 TEC 纬度和时间的变化,图中红色表示 TEC 高值,蓝色表示 TEC 低值.分析了瑞里、集集和嘉义地震前后资料,发现在这三个地震前一至四天内电离层赤道异常峰有向南移的趋势,且对应的 TEC 也大量减少.由多个 GPS 接收机组成电离层观测网,进行了 TEC 的经纬度二维成像.通过研究集集地震前四、三及一天的 12:00、14:00 及 16:00LT(local time, 地方时间)的电离层经纬度二维分布发现,在震中附近,TEC 显著减少,而且由 TEC 减少的空间分布形态可估计未来震中的位置.

刘正彦^[23](2004)分析了 1999~2002 年台湾 $M \geq 6.0$ 以上地震期间电离层电子含量的变化,发现地震前 1~5 天 TEC 也有显著的减少.

林玉翔^[24](2004)研究 1994~2003 年台湾 327 个 $M \geq 5.0$ 以上地震前后 7 天 TEC 变化,发现震前 5 天到震后 2 天,在 10:00~20:00LT 时段有明显的 TEC 浓度减少,最显著的发生在地震前第 5 天,其次为地震当天及地震后第 2 天.

2001 年 1 月 26 日 03:16 UT(08:46 LT)发生了印度 Bhuj 地震($M=7.6$),Trigunait^[25](2004)分析了地震前后的电离层的 TEC 变化,研究结果显示,从 TOPEX 卫星测量的电离层 TEC 在 1 月 21 日 10:00UT 左右是减少的,从 SPOT2 和 SPOT4 卫星上测量的 TEC 数据在 1 月 20 日白天是增加的,而在 1 月 24 日 06:30UT 左右是减小的.地面的 Bangalore GPS 站点测量的 TEC 在 1 月 21~25 日的中午至下午同样是减小的.

Pulinets^[26](2005)对墨西哥 Colima 地震($M=7.8$, 2003. 1. 21)前一周的 TEC 数据作了研究,数据是由分布在墨西哥的 5 个固定 GPS 站点得到.研究发现在地震前的 2~3 天 TEC 存在异常.对不同的两个 GPS 站点的 TEC 数据进行了互相关分析,发现日变互相关系数在地震前的 1 至 5 天减小(图 2). TEC 偏移量的空间分布图中,偏移量峰值点与

未来的地震震中在电离层的垂直投影点非常接近.

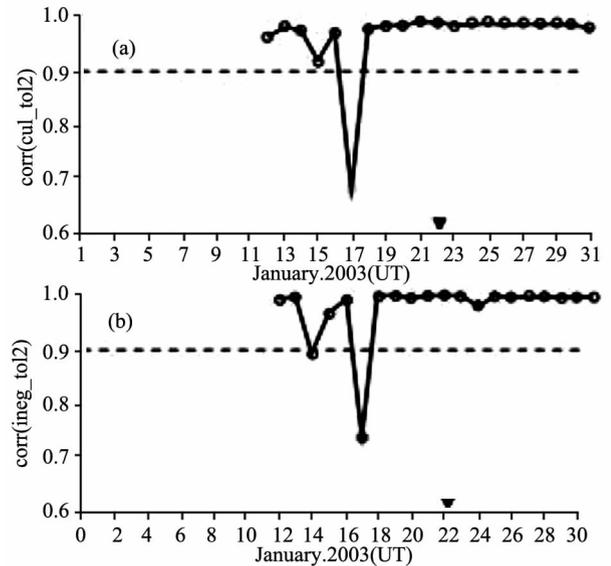


图 2 墨西哥 Colima 地震期间不同 GPS 站点的日变互相关系数变化,图中(a)是 Culiacan 和 Toluca 测点的日变互相关系数;(b)是 Aguascalientes 和 Toluca 测点的日变互相关系数,其中 Toluca 测点位于地震区, Culiacan 和 Aguascalientes 测点位于地震区外;三角形所指处为地震发生时间^[26]

Fig. 2 Daily cross correlation coefficients of TEC data calculated for the pairs of GPS receivers in Mexico Colima earthquake. (a) Culiacan and Toluca receiver. (b) Aguascalientes and Toluca receiver. Toluca is closer to the epicenter, Culiacan and Aguascalientes are out of the seismoactive zone. Triangle specifies the moment of earthquake.

吴云^[27](2005)利用地面 GPS 测量获得垂直电子总含量(VTEC, Vertical Total Electron Content)数据,采用统计分析方法,对亚洲 3 次大地震震前 VTEC 进行了检查.结果发现,在临震前 10 天之内,孕震区上空的 VTEC 均出现了明显的异常扰动,异常的增加一般出现在异常减少之前,但距发震时刻较远,认为该异常可能与太阳或地磁活动增强有关.异常的减少一般临近发震时刻,基本可以归结为地震引起的电离层效应.

无线电掩星技术(radio occultation technique)最早起源于天文学研究,20 世纪 60 年代美国将此技术用于行星大气和电离层探测等研究,随着 GPS 系统的建立,利用 GPS 掩星技术探测电离层就成为当前研究近地空间环境的又一新型手段^[28].地面

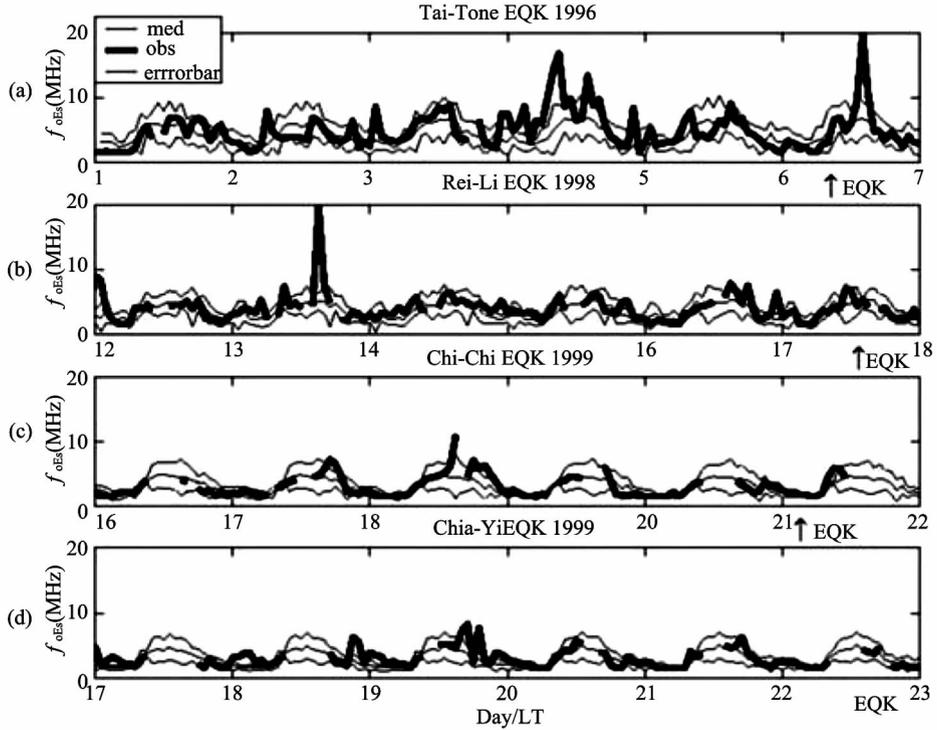


图3 台湾台东、瑞里、集集和嘉义地震期间 f_{0E_s} 的变化, (a) 1996 年台东地震发生前两天及地震当天 f_{0E_s} 突然增加至 20 MHz; (b) 1998 年瑞里地震在震前第四天 f_{0E_s} 增加至 20 MHz, 其它天则无显著地变化; (c) 1999 年集集地震在震前三天有 f_{0E_s} 异常增加现象; (d) 1999 年嘉义地震震前三天有 f_{0E_s} 异常增加的现象^[37].

Fig. 3 Variations of f_{0E_s} during Tai-Tone, Rei-Li, Chi-Chi and Chia-Yi earthquakes in Taiwan. (a) The f_{0E_s} reaches 20 MHz on one and two days before Tai-Tone earthquake (1996). (b) The f_{0E_s} reaches 20 MHz on four days before Rei-Li earthquake (1998), but on other days it does not change. (c) The f_{0E_s} anomaly increases on three days before Chi-Chi earthquake (1999). (d) The f_{0E_s} anomaly increases on three days before Chia-Yi earthquake (1999).

GPS 接收机因其分布的局限性,反演得到的电离层数据仅代表测站上空一定区域范围内的 TEC, 而低轨卫星(LEO)上的掩星接收机则可观测到全球范围内的电离层电子密度剖面,使有可能检测到由地震波激发而引起的电离层电子密度的扰动,为地震预报提供地震前兆信息. 利用无线电掩星技术检测和识别地震的电离层扰动,目前还存在许多问题和困难. 但是,这种空基探测的诸多优点,是地面观测难于实现的. 鉴于 GPS 掩星的高效性、实用性,相信这一技术必将得到广泛的发展与应用^[29].

1.2 电离层突发 E_s 层的变化

E_s (sporadic-E) 层为在 90~120 km 高度区域内出现的一种短暂而不规则的电离增强层,存在的时间一般为数小时,白天与夜间及高、中、低纬具有显著不同的特征形态^[30]. 其临界频率 f_{0E_s} 具有强烈

的时空变化,有时很低甚至完全不出现,有时很高可超过 F_2 层临界频率 f_{0F_2} , 达到 15~20 MHz^[31].

对地震期间 E_s 层的研究已经作了大量的工作,研究者^[32~34]发现地震发生前 f_{0E_s} 也会有异常的增加现象.

Ondoh 和 Hayagawa^[35] (1999) 研究 1995 年 1 月 17 日神户地震 ($M=7.2$), 也发现在 1 月 14 及 15 二日, f_{0E_s} 于日出及日落期间大于其月中位数参考值. 当时的地磁活动比较平静, 也没有太阳耀斑发生, 而且在北半球中低纬度地区, 1 月份很少出现 E_s 层, 因此他们认为异常 f_{0E_s} 的升高是地震电离层效应造成的.

1998 年 5 月 4 日的日本 Ishigaki-jima nantooki 地震 ($M=7.6$) 前, 在 Okinawa 和 Yamagawa 两个观测点, 从 4 月 28 日到 5 月 1 日的白天都观测到

$f_{0E_s} \geq 9$ MHz 的异常增大^[36].

台湾台东、瑞里、集集和嘉义四个地震的电离图中都显示地震发生前几天出现很强烈的 E_s 层,图 3 为四个地震发生前 f_{0E_s} 的变化,图 3a 为 1996 年台东地震期间 f_{0E_s} 的变化,可以看到在其他时间都无明显的异常增加,只有地震发生前第二天及地震当天 f_{0E_s} 突然地增加至 20 MHz;图 3b 为 1998 年瑞里地震,由图中可看见在地震前第四天 f_{0E_s} 增加至 20 MHz,其它天则无显著地变化;图 3c 为 1999 年集集地震期间 f_{0E_s} 的变化情况,可以看到在震前三天有异常增加现象;图 3d 为 1999 年嘉义地震期间 f_{0E_s} 的变化情况,同样可以看到震前三天有异常增加的现象.

对 1994~1999 六年内发生在台湾规模大于 6.0 以上的大地震发生前的变化情况,发现地震前 f_{0E_s} 在日出和日落期间会有很大的异常增加^[37].

在 E_s 层中还有一种扰动现象是扩展 E_s (spread- E_s),这方面的研究文献也比较多^[38~41]. 扩展 E_s 是指在垂测电离图上偶现 E_s 层的频率扩展或者距离扩展,目前认为扩展 E_s 是在 100 km 高度偶现 E_s 层中电离层扰动作用的结果. 有学者认为,扩展效应是由于声脉冲在大气中传播造成的^[38,39]. 也有的学者认为,扩展 E_s 现象的产生有可能是各种声波和声重力波扰动造成的. 在过去的十几年中,许多的研究者希望找到扩展 E_s 现象和地震孕育过程之间的联系^[42~44]. V. A. Liperovsky^[45] (2005) 通过统计研究发现在地震前 3 天观测到扩展 E_s 现象比震前 4~6 天要大. 对于 $M \geq 5.5$ 的强震,在距离震中 400 km 范围内的电离层探测点观测到扩展 E_s 现象的机率超过 95%. 但是对于 $4.0 \leq M \leq 5.5$ 的较小地震,在距离震中 200 km 范围内只能说观测到扩展 E_s 现象的机率是有的.

1.3 电离层等离子体参数的变化

对地震前电离层等离子体参数变化情况的研究目前开展的还不多, S. A. Pulinetz^[46] (2003) 发现在磁暴的主相期有显著的电离层加热,位于中纬度的电子和离子温度分别升高 1000 K 和 2000 K,但是在震前和震后都没有观测到显著的电离层加热,只是在震前观测到电子温度 T_e 和中子温度 T_n 的微小变化(大约升高 200 K). 这种震前的电子温度变化显示了一种随高度变化的似波特性的现象可能意味着一种声重力波的传播效应^[47].

电离层电场的微小变化都能够造成离子漂移,因此出现在孕震区上方电离层中的异常电场对观测

到的等离子体离子成分的变化有重要作用. 在震前不仅能够观测到在 F_2 层层峰高度的原子 O^+ 浓度的变化,而且能够记录到 F_2 层底部的分子离子 NO^+ 和 O_2^+ 的浓度变化. 通过对磁暴效应和地震效应的电离层离子成分的比较可以看到,在震前,不管电子浓度变化是增加的还是减小的, O^+ 、 NO^+ 和 O_2^+ 的浓度变化都是同相的. 而在磁暴发生时, F_2 层的 O^+ 浓度是减小的, NO^+ 和 O_2^+ 的浓度是增加的. 因此这种离子成分的变化特性可以用来区分地震效应和磁暴效应.

Boskova^[48] (1993) 研究发现,在地震活动区上方的电离层中,光离子浓度的增加意味着平均离子质量的减少. 同时测量电子和离子温度,并采用电离层高度的计算公式^[49],可以得到电离层高度的变化:

$$H_s = \frac{T_e + T_i}{M_+ / 0.85 + (h/R_0 + 1)^2 dT_e/dh}$$

式中 T_e 、 T_n 和 T_i 分别是电子、中子和离子温度, M_+ 是平均离子质量, R_0 是地球半径. 因为在地震造成电离层扰动期间,不管是电子温度或者离子温度都没有显著的变化,因此电离层高度变化的主要原因是平均离子质量的变化,这种高度的变化通过卫星垂测技术也可以得到相同的结论.

在磁暴期间和强震前的几天或者几个小时的时间段内电离层变化的主要差别是:在地震活动区的地震效应引起的电离层离子变化是同相的,而由磁暴引起的变化是相反的(O^+ 浓度减少而 NO^+ 和 O_2^+ 浓度增加);在地震活动区电离层高度变化的主要原因是平均离子质量的减小,而在磁暴期间的电离层高度的改变是由于电子和离子温度的增加造成的. 因此根据电离层等离子体参数的不同变化可以区分磁暴引起的电离层异常和地震引起的电离层异常.

2 结 论

地震发生前的几天或者几个小时电离层扰动确实存在,这为我们进行地震的短临预报提供了一个有用的工具. 但是还有许多值得我们去深入研究的问题,对地震电离层扰动现象,提出好的物理解释模型是今后的一个研究方向. 好的物理解释模型能够对物理试验的设计和试验结果的解释提供有价值的指导作用. 但是,到目前为止,在地震引起的电离层变化这个新的研究领域,尽管已经有许多值得关注的物理解释,但还没有提出合理的物理解释模型. 改进观测数据的分析方法是另外一个值得我们研究的

问题. 我们需要发展更加客观的分离地震电离层扰动和其他的人为噪声、天电、降雨等造成的电离层扰动的方法, 更加尖端新颖的数据观测和分析方法, 这些对于地震电离层扰动研究是非常重要的。

应用空间技术开展大区域范围内电离层参数的实时观测, 如用地震电磁卫星、GPS 台网、并和地面电离层垂测仪观测相结合, 建立“电离层地震前兆监测系统”, 无疑会加速这项研究的进程。

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] 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.
Liu G D. Review and prospect — 21st century solid geophysics[J]. Progress in Geophysics(in Chinese), 2002, 17(2): 191~197.
- [2] 陈颢, 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.
Chen Y, Li J. Advances of geophysics in 2001[J]. Progress in Geophysics(in Chinese), 2003, 18(1): 1~4.
- [3] 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.
Teng J W. Opportunity challenge and developing frontiers: geophysics in 21st century[J]. Progress in Geophysics(in Chinese), 2004, 19(2): 208~215.
- [4] 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.
Teng J W. Where is the contemporary geophysics of China going[J]. Progress in Geophysics(in Chinese), 2006, 21(2): 327~339.
- [5] Barnes R A, Leonard R S. Observations of ionospheric disturbances following the Alaska earthquake[J]. J. Geophys. Res., 1965, 70: 1250~1253.
- [6] Furumoto A S, Pröls 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.
- [7] Datchenko E A, Ulomov V I, Chernyshova C P. Electron density anomalies as the possible precursor of Tashkent earthquake[J]. Dokl. Uzbek. Acad. Sci., 1972, No. 12: 30~32.
- [8] Gokhberg M B, Pilipenko V A, Pokhotelov O A. On the seismic precursors within the ionosphere[J]. Izvestiya Acad. Sci. USSR, Series Physics of the Earth, 1983, No. 10: 17~21.
- [9] Fatkullin M N, Zelenova N I, Legenka A D. On the ionospheric effects of earthquakes[J]. Phys. Earth. Planet. Inter., 1989, 57: 82~85.
- [10] Pulnits S A, Legen'ka 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.
- [11] Pulnits S A, Legen'ka 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.
- [12] Pulnits S A, Strong earthquakes prediction possibility with the help of topside sounding from satellites[J]. Advances in Space Research, 1998, 21(3): 455~458.
- [13] Liu J Y, Chen Y I, Pulnits S A, *et al.* Seismo-ionospheric signatures prior to $M \geq 6.0$ Taiwan earthquakes[J]. Geophysical Research Letters, 2000, 27(19): 3113~3116.
- [14] 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.
- [15] Chuo Y J, Liu J Y, Kamogawa M, *et al.* The anomalies in the f₀Es prior to $M \geq 6.0$ Taiwan earthquakes[A]. Seismo Electromagnetic: Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere coupling[C]. TERRAPUB, 2002, pp309~312.
- [16] 蔡军涛, 陈小斌, 赵国泽, 等. 地震前兆: 电离层 F₂ 层异常. (待刊).
CAI Jun-tao, CHEN Xiao-bin, ZHAO Guo-ze, etc. Earthquake precursor: the anomalies in the ionospheric F₂ region. In press.
- [17] 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.
- [18] Calais E, M. GPS detection of ionospheric TEC perturbations following the January 17, 1994, Northridge Earthquake[J]. Geophys. Res. Lett., 1995, 22, 1045~1048.
- [19] Liu J Y, Tsai H F, Jung T K. Total electron content obtained by using the global positioning system[J]. Terr. Atmos. Oceanic Sci., 1996, 7: 107~117.
- [20] Zaslavski Y, Parrot M, Blanc E. Analysis of TEC Measurements Above Active Seismic Regions[J]. Phys. Earth Planet. Int., 1998, 105: 219~228.
- [21] Liu J Y, Chuo Y J, Chen Y I. Ionospheric GPS TEC perturbations prior to the 20 September 1999, Chi-Chi earthquake[J]. Geophys. Res. Lett., 2001, 7, 1383~1386.
- [22] 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.
- [23] Liu J Y, Chuo Y J, Shan S J, *et al.* Pre-earthquake ionospheric anomalies registered by continuous GPS TEC measurement[J]. Annales Geophysicae, 2004: 1585~1593.
- [24] 林玉翔. 利用全球定位系统观测电离层地震前兆[D]. 台湾: 国立中央大学太空科学所, 2004.
Lin Y H. Monitoring seismo-ionospheric precursor using the Global Positioning[D]. Taiwan: NCU Institute of Space Sci-

- ence, 2004.
- [25] Trigunait A, Parrot M, Pulinet S A, *et al.* Variations of the ionospheric electron density during the Bhuj seismic event [J]. *Annales Geophysicae*, 2004, 22:4123~4131.
- [26] Pulinet S A, Leyva Contreras, Bisiacchi-Giraldi, *et al.* Total electron content variations in the ionosphere before the olima, Mexico, earthquake of 21 January 2003[J]. *Geofisica Internacional*, 2005, 44(4):369~377.
- [27] 吴云,乔学军,周义炎. 利用地基 GPS 探测震前电离层 TEC 异常[J]. *大地测量与地球动力学*, 2005, 25(2):36~40.
Wu Y, Qiao X J, Zhou Y Y. Preseismic ionospheric TEC anomaly detected by ground-based GPS[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2005, 25(2):36~40.
- [28] Hajj George A, Larry J Romans. Ionospheric electron density profiles obtained with the Global Positioning System: Results from the GPS/MET experiment[J]. *Radio Science*, 1998, 33(1):175~190.
- [29] 周义炎,吴云,乔学军,等. GPS 掩星技术和电离层反演[J]. *大地测量与地球动力学*, 2005, 25(2):29~35.
Zhou Y Y, Wu Y, Qiao X J, *et al.* GPS occultation technique and ionospheric inversion[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2005, 25(2):29~35.
- [30] 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.
- [31] Davies K. Ionospheric Radio[M]. Pter Peregrinus Ltd, 1990.
- [32] Parrot M J, Achache J, Berthelier E, *et al.* High-frequency seismo-electromagnetic effects[J]. *Phys. Earth Planet. Inter*, 1993, 77:65~83.
- [33] Pulinet S A, Legen'ka A D, Alekseev V A. On the possible mechanism of the seismo-ionospheric coupling, in *Dusty and Dirty Plasmas, Noise and Chaos in Space and in the Laboratory*[M]. Plenum Press Publishing, New York, 1994, 545~557.
- [34] Ondoh T. Ionospheric disturbances associated with great earthquake of Hokkaido southwest coast, Japan of July 12, 1993[J]. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 1998, 105: 261~269.
- [35] Ondoh T, Hayakawa M. Anomalous occurrence of sporadic E-layers before the Hyogoken-Nambu earthquake, M 7.2 of January 17, 1995[A]. *Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes*[C]. Terra Scientific Publishing company, Tokyo, 1999, pp629~639.
- [36] Ondoh T, Hayakawa M. Seismo discharge model of anomalous sporadic E ionization before great earthquakes[A]. *Seismo Electromagnetic: Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere coupling*[C]. TERRAPUB, 2002, pp385~390.
- [37] Chuo Y J, Liu J Y, Kamogawa M, *et al.* The anomalies in the f0Es prior to M \geq 6.0 Taiwan earthquakes[A]. *Seismo Electromagnetic: Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere coupling*[C]. TERRAPUB, 2002, pp309~312.
- [38] Bowman G G. Some aspects of mid-latitude spread Es and its relationship with spread F[J]. *Planet. Space Sci.*, 1985, 33(9):1081~1089.
- [39] Whitehead J D. Recent work on mid-latitude and equatorial sporadic-E[J]. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1989, 51(5):401~424.
- [40] Barnes R I. An investigation into the horizontal structure of spread-Es[J]. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1992, 54(4):391~399.
- [41] Mathews J D. Sporadic E; current views and recent progress [J]. *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.*, 1998, 60(4):413~435.
- [42] Alimov O A, Gokhberg M B, Liperovskaya E V, *et al.* Anomalous characteristics of the middle latitude Es -layer before earthquakes[J]. *Phys. Earth and Planet. Inter*, 1989, 57:76~81.
- [43] Liperovsky V A, Pokhotelov O A, Liperovskaya E V, *et al.* Modification of sporadic E-layers caused by seismic activity [J]. *Surveys in Geophysics*, 2000, 21:449~486.
- [44] Silina A S, Liperovskaya E V, Liperovsky V A, *et al.* Ionospheric phenomena before strong earthquakes[J]. *Nat. Haz. Earth Sys. Sc.*, 2001, 1:1~6.
- [45] Liperovsky V A, Meister C V, Liperovskaya E V, *et al.* On spread-Es effects in the ionosphere before earthquakes[J]. *Nat. Haz. Earth Sys. Sc.*, 2005, 5:59~62.
- [46] Pulinet S A, Legen'ka A D, Gaivoronskaya TV, *et al.* Main phenomenological features of ionospheric precursors of strong earthquakes[J]. *J. Atm. Solar Terr. Phys.*, 2003, 65:1337~1347.
- [47] Hegai V V, Kim V P, Nikiforova L I. A possible mechanism of acoustic-gravity waves in the ionosphere[J]. *Journal of Earthquake Predictions Research*, 1997, 6:584~589.
- [48] BoSskovTa J, Smilauer J, JiSrTUScek F, *et al.* Is the ion composition of outer ionosphere related to seismic activity [J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1993, 55(13):1689~1695.
- [49] Smith P A, Kaiser B A. Estimates of ionospheric composition and temperature derived from topside sounder electron scale height data [J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1967, 29(11):1345~1353.