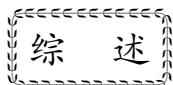


吴健, 徐彤, 胡艳莉. 2016. 基于国家电波观测站网电离层垂测数据的地震电离层异常研究进展. 地震学报, 38(3): 345-355. doi:10.11939/jass.2016.03.003.

Wu J, Xu T, Hu Y L. 2016. Recent progress in the study of ionospheric anomalies before strong earthquakes using ionosonde data of National Radio Observation Network in China. *Acta Seismologica Sinica*, 38(3): 345-355. doi:10.11939/jass.2016.03.003.



# 基于国家电波观测站网电离层垂测 数据的地震电离层异常研究进展<sup>\*</sup>

吴 健 徐 彤<sup>†</sup> 胡艳莉

(中国山东青岛 266107 中国电波传播研究所电波环境特性及模化技术重点实验室)

**摘要** 地震电离层异常现象已被大量观测所证实, 地震电离层异常的特征分析及其物理机理研究对开展地震监测意义重大。近年来, 中国电波传播研究所利用国家电波观测站网长期积累的电离层垂测数据, 开展了震例分析及其机理研究, 初步获得了震前电离层的异常特征, 并建立了岩石圈-大气层-电离层电场耦合物理模型。本文简要介绍了近年来我们在该领域的研究进展, 并对该领域的发展方向提出建议。

**关键词** 电离层异常 临界频率 异常电场 重力波

doi:10.11939/jass.2016.03.003 中图分类号: P352.3 文献标志码: A

## Recent progress in the study of ionospheric anomalies before strong earthquakes using ionosonde data of National Radio Observation Network in China

Wu Jian Xu Tong<sup>†</sup> Hu Yanli

(National Key Laboratory of Electromagnetic Environment, China Research Institute of Radiowave Propagation, Shandong Qingdao 266107, China)

**Abstract:** Ionospheric anomalies before strong earthquakes have been evidenced by many kinds of observations. Analyses of ionospheric anomalies characteristics and investigation of the corresponding physical mechanism are of great significance to monitoring seismic precursors. China Research Institute of Radiowave Propagation (CIRIP) has conducted a series of studies on the ionospheric anomalies before earthquakes and investigation of the corresponding physical mechanisms based on several decades of ionosonde data recorded by the National Radio Observation Network in China, and preliminarily obtained characteristics

\* 基金项目 国家自然科学基金(41004066)资助。

收稿日期 2015-11-09 收到初稿, 2016-02-29 决定采用修改稿。

† 通讯作者 e-mail: xutong1104@126.com



of ionospheric anomalies before earthquakes and established a comprehensive model of lithosphere-atmosphere-ionosphere electric coupling. This paper reviews the recent progress of the relevant studies, and gives tendentious emphasis for further study.

**Key words:** ionospheric anomaly; critical frequency; anomalous electric field; gravity wave

## 引言

强震前的电离层异常现象常常被称为地震电离层前兆(Pulinets, Boyarchuk, 2004),是地震前产生的一种地球物理现象,对该现象的研究始于20世纪60年代中期。Barnes和Leonard(1965)首次报道了1964年阿拉斯加大地震期间存在显著的电离层异常现象。从此,地震电离层异常成为地震、地质、地磁、地电、电离层和中高层大气等多个学科交叉的科学问题。由于地震电离层异常通常发生在地震前数天内,可作为地震预报的重要辅助信息,因此得到国内外研究人员的广泛重视。目前,俄罗斯、法国、美国、日本和中国台湾等地区对地震电离层异常开展了广泛的监测及其特征研究(Pulinets *et al*, 2003; Liu *et al*, 2009; Li, Parrot, 2013)。

目前,地震电离层异常研究主要基于地基电离层测量数据(如电离层测高仪数据、总电子含量、甚低频信号幅度等数据)及卫星数据(等离子体参数、电磁场强度等)。大量研究已表明,电离层测高仪自1925年发明以来,一直是监测电离层变化的有效技术手段(熊年禄等, 1999)。利用电离层测高仪数据,科研人员开展了大量的震例分析,试图找出地震电离层异常的规律。Chen等(1999)的统计结果表明:73%的M5地震在震前5天内记录到电离层异常;对于M6地震,其概率则超过90%。利用中坜站电离层F<sub>2</sub>层临界频率(f<sub>0</sub>F<sub>2</sub>)数据,Liu等(2000)针对1994—1999年M>5地震的统计分析结果表明,地震电离层异常具有局地性,且主要发生在当地时间12:00—18:00。尽管已有较多的电离层异常研究成果,但是由于电离层本身变化复杂,且统计样本较少,地震电离层异常的规律尚无定论。另一方面,地震电离层异常引起了地球物理界的关注,并尝试探求其物理成因。目前,主流的成因假说有两种,一是重力波假说(Shalimov, 1992),二是异常电场假说(Kim *et al*, 1994)。其中,重力波假说能够很好地解释电离层的同震效应(即地震发生后,短时间内的电离层波动现象),但其无法解释震前数天的电离层异常现象。随着卫星观测到震前异常电场的报道越来越多,异常电场假说成为接受度最高的理论,其相关研究进展可查阅Pulinets和Davidenko(2014)的综述。

20世纪30年代我国科研人员也开始了实验性的电离层观测和研究。二战期间,以服务短波通信为目的,在重庆建立的我国第一个常规电离层垂测站(现在的重庆电波观测站),1943年4月正式开始了我国常态化的电离层垂直探测,至今已积累了连续70多年的电离层观测资料,为开展震例研究提供了丰富的基础资料。经过数十年的电离层观测站网建设,我国已形成了具有宽地域覆盖、高空间分辨、全天候常规电离层观测能力的观测网络。我国基于电离层垂测数据的地震电离层异常研究则始于1976年的唐山大地震之后。20世纪80年代,中国电波传播研究所投入大量人力开展相关研究,并在2008年汶川地震前观测到震中附近f<sub>0</sub>F<sub>2</sub>呈异常变化。近年来,在国家有关部门的大力支持下,依托国家电波

观测站网和中国地震局地震台站观测网, 以首都圈为重点区域建成了电离层地基高分辨率观测网, 用电离层测高仪和电离层斜探测仪组网对电离层异常开展高分辨率观测, 并于2009年成立了电离层地基高分辨率观测数据中心, 实现了与中国地震局实时数据共享并为其提供信息服务. 同时, 中国电波传播研究所积极组织科研队伍, 利用电离层垂测、斜测、总电子含量等多种数据深入开展地震电离层异常特征及机理的研究(Xu *et al*, 2010a, b, 2011a, b, c, 2012, 2015a, b; Hu *et al*, 2013; 徐彤等, 2011, 2012, 2013), 本文将重点介绍近年来我们在这方面的研究进展.

## 1 汶川地震前电离层异常变化

2008年5月12日汶川大地震是目前研究最为深入的震例, 对于其震前电离层异常变化特征的认识也比较一致. Zhao等(2008)首次报道了汶川地震前的电离层异常现象, 分析了武汉站和厦门站的电离层垂测数据, 结果显示震前3天即5月9日午后, 电离层 $f_0F_2$ 异常增加. Liu等(2009)通过分析GPS总电子含量数据, 也得到了相似的结论.

我们利用重庆、海口、兰州、拉萨等多个台站的电离层垂测数据, 详细分析了汶川地震前的电离层异常变化特征(Xu *et al*, 2010a, b, 2011b). 图1a给出了2008年5月9日16时震中附近重庆站观测到的电离层电子密度扰动变化. 可以看出:  $F_2$ 层电子密度(对应 $f_0F_2$ )显著增加, 约为背景参考值的3倍多; 而其它高度, 如 $F_1$ 层和E层, 其电子密度变化相对不够明显. 图1b为电子密度扰动的三维分布, 可见扰动主要局限在震中的 $F_2$ 层. 图2给出了汶川地震前电离层 $f_0F_2$ 扰动增量在全国的二维分布, 可以看出, 震前电离层异常扰动主要集中在震中附近, 具有显著的局地性. 这就要求地震电离层异常监测的水平分辨率要高. 天基探测手段也捕捉到了该次地震的电离层异常信息, Liu等(2009)基于COSMIC掩星数据的研究结果也显示 $F_2$ 层电离层异常增加. 此外, 关于2010年1月12日 $M_w7.0$ 海地地震(Liu *et al*, 2011)和2011年3月11日 $M_w9.0$ 日本地震(Xu *et al*, 2011c)的研究也较为深入, 其结果也显示出类似的电离层异常特征.

通过上述分析可知, 汶川地震前数天, 震中附近电离层 $F_2$ 层的电子密度异常在午后时段显著, 而电离层其它区域(如 $F_1$ 层, E层)的电子密度(或 $f_0F_1$ ,  $f_0E$ )变化特征相对不够

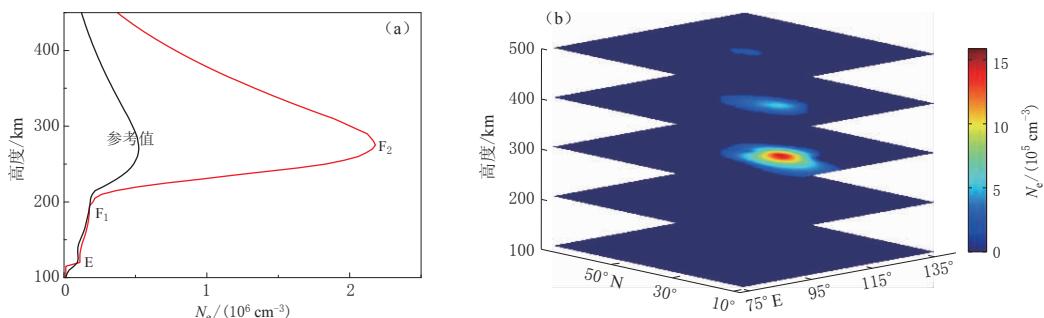


图1 汶川地震前(5月9日16时)重庆站观测到的电离层电子密度 $N_e$ 扰动分布  
(引自Xu *et al*, 2011b). (a) 一维; (b) 三维

Fig. 1 Disturbances in the electron density  $N_e$  observed at the station Chongqing

at 16:00 on May 9 before Wenchuan earthquake (after Xu *et al*, 2011b)

(a) One dimension; (b) Three dimension

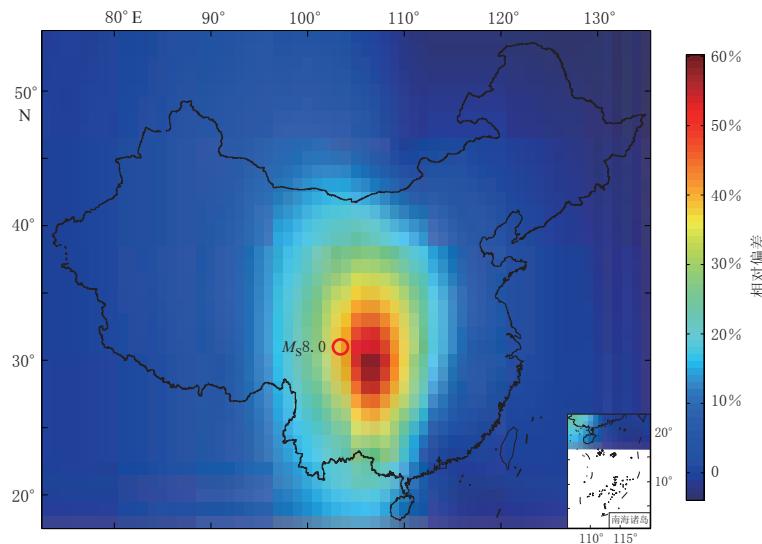


图 2 汶川地震前(2008 年 5 月 9 日 17 时)电离层临界频率  $f_0F_2$  扰动的二维分布(引自 Xu *et al*, 2010a)

Fig. 2 Two-dimensional distribution of disturbances in the ionospheric critical frequency  $f_0F_2$  at 17:00 on May 9, 2008 before the Wenchuan earthquake (after Xu *et al*, 2010a)

明显. 因此在电离层垂测参数中,  $f_0F_2$  对孕震过程的响应最为敏感.

## 2 地震电离层异常多震例分析

鉴于电离层  $f_0F_2$  对地震响应的高度敏感性, 本文利用四分位数法(Liu *et al*, 2000)对 1960—2008 年我国发生的 14 次  $M > 7.0$  地震前的电离层  $f_0F_2$  参数进行研究, 详细分析地震电离层异常  $f_0F_2$  扰动的时间、空间分布规律以及扰动形态特点(徐彤等, 2012; Xu *et al*, 2015a). 统计结果表明, 其中 12 次地震(85.7%)在震前出现电离层异常(主要为正扰动), 并且大部分异常发生在震前 7 天以内的当地时间 11:00—17:00(图 3, 4), 与 Liu *et al* (2000)的研究结果基本一致. 此外, 电离层  $f_0F_2$  扰动幅度与即将发生的地震震级、震中距

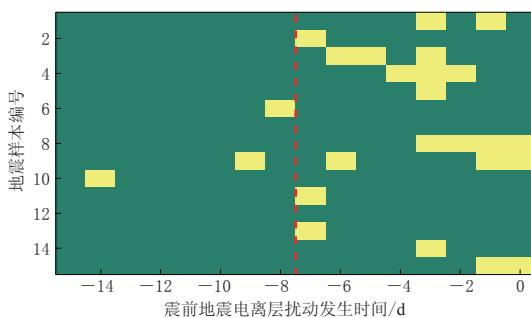


图 3 震前半个月地震电离层扰动发生次数的变化(引自徐彤等, 2012)

Fig. 3 Days of ionospheric disturbances before the selected earthquakes (after Xu *et al*, 2012)

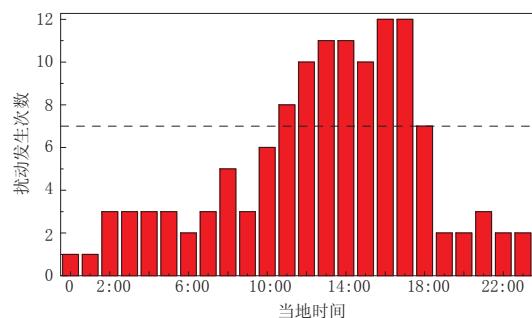


图 4 地震电离层扰动次数随当地时间的分布(引自徐彤等, 2012)

Fig. 4 Occurrence of abnormal disturbances in  $f_0F_2$  versus local time (after Xu *et al*, 2012)

有不同程度的相关性。随着震级的增大,电离层扰动量也增加,二者呈明显的正相关关系,如图 5 所示。地震电离层异常的扰动量,除了与震级有关外,还可能与震源深度、观测站相对于震中的距离及方位有关,这些因素可能共同决定着地震电离层异常的强度。此外,孕震过程对电离层的影响局限在一定的空间尺度范围内。忽略岩石密度和地质条件,地震释放到地表的能量将随距离平方而衰减。因此,对于同一震级的地震,震源深度不同,孕震过程释放到地球表面的能量会不同,可能会对电离层产生不同程度的影响。由于所选取的地震事件样本有限,而且这 14 次地震大多是浅表地震,所以本文未分析电离层扰动与震源深度之间的相关性。

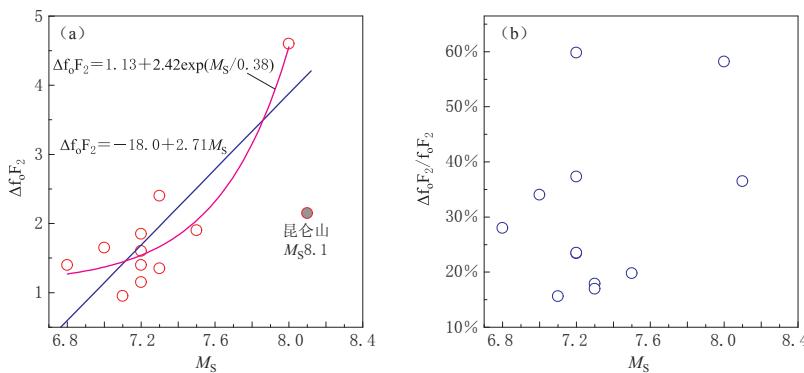


图 5 电离层  $f_0 F_2$  扰动量与地震震级之间的关系(引自徐彤等, 2012)

(a) 绝对扰动量; (b) 相对扰动量

Fig. 5 Disturbances in  $f_0 F_2$  versus the magnitude of earthquakes (after Xu *et al.*, 2012)  
(a) Absolute disturbances; (b) Relative disturbances

### 3 地震电离层异常与磁暴及磁静日电离层扰动区别

电离层  $f_0 F_2$  的变化极易受到太阳活动及地磁活动的影响,变化复杂。强太阳活动,如日冕物质抛射事件,向行星际空间喷射大量的等离子体云,等离子体云经 1.5—3 天到达地球,与地磁场作用产生强烈的地磁扰动,形成磁暴。磁暴期间,自磁层向下沉降的高能粒子对高纬度热层底部中性大气加热,并使之膨胀,导致全球范围内的电离层  $f_0 F_2$  产生剧烈扰动(增加或减少)。此外,即使在地磁活动平静期间,电离层  $f_0 F_2$  亦可能出现显著扰动(称为磁静日扰动)(Mikhailov *et al.*, 2004)。因此,判定电离层异常是否与地震有关,需开展电离层  $f_0 F_2$  震前变化特征与磁暴(磁静日)期间  $f_0 F_2$  变化的区别研究。

#### 3.1 与磁暴电离层扰动区别

关于汶川地震的分析已表明,震前电离层  $f_0 F_2$  扰动主要集中在震中附近,具有明显的局地性特征(Zhao *et al.*, 2008; Xu *et al.*, 2010a, b, 2011b)。而磁暴期间,电离层扰动具有全球尺度特征。图 6 给出了 2014 年 7 月 27 日磁暴期间电离层  $f_0 F_2$  扰动的分布。与图 2 相比,磁暴期间电离层扰动的空间尺度更大,扰动更复杂。

#### 3.2 与磁静日电离层扰动区别

我们利用我国电离层垂测站网在第 21—23 太阳周长达约 30 年的  $f_0 F_2$  数据,分析  $f_0 F_2$  在磁静日的扰动特征(Xu *et al.*, 2015b)。研究结果表明,磁静日电离层  $f_0 F_2$  正扰动主要发生在夜间,白天相对较少,如图 7 所示。而地震电离层异常的统计研究(Liu *et al.*, 2000)表

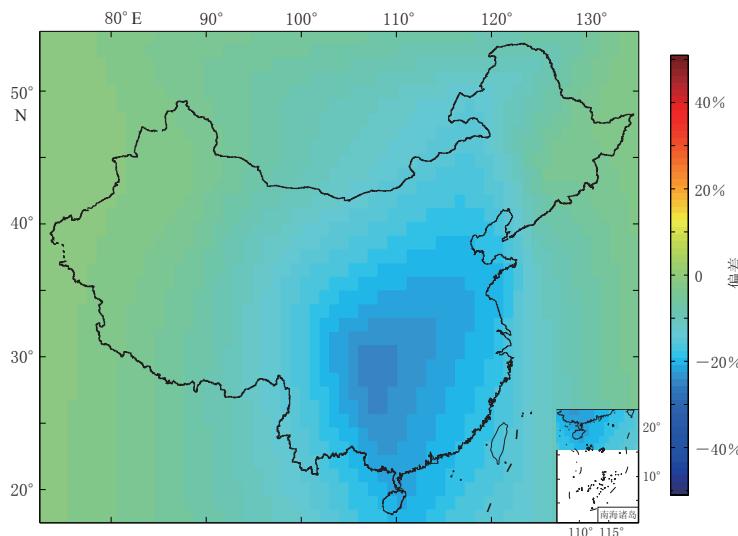


图 6 2014 年 7 月 27 日 5 时(地方时)磁暴期间电离层  $f_o F_2$  扰动二维分布

Fig. 6 Disturbances in  $f_o F_2$  during the geomagnetic storm at 05:00 LT on July 27, 2014

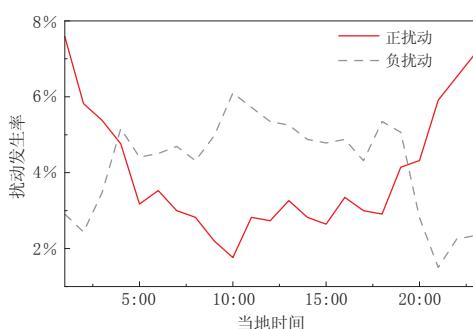


图 7 重庆站磁静日电离层  $f_o F_2$  正负扰动随地方时间的分布(引自 Xu *et al*, 2015b)

Fig. 7 Occurrence of positive and negative geomagnetic quiet time disturbances in  $f_o F_2$  versus local time at the station Chongqing (after Xu *et al*, 2015b)

电离层起决定性作用。除了受太阳活动控制外,  $F$  层还会受到各种动力学过程的影响, 如热层环流、 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  漂移等。因此, 可以用包含上述控制因素的等离子体连续性方程和动量方程来描述电离层的状态, 具体表达式为

$$\frac{\partial N_i}{\partial t} + \nabla \cdot (N_i \mathbf{V}_i) = q_i - \beta_i N_i, \quad (1)$$

$$- \nabla P_i + N_i m_i \mathbf{g} + N_i e (\mathbf{E} + \mathbf{V}_i \times \mathbf{B}) - N_i m_i \sum_n \mathbf{v}_{in} (\mathbf{V}_i - \mathbf{U}) = 0, \quad (2)$$

式中:  $N_i$  为离子浓度,  $P_i$  为离子压强,  $m_i$  为离子质量,  $\mathbf{v}_{in}$  为离子碰撞频率;  $q_i$  为离子的产生率, 与太阳辐射强度有关;  $\beta_i$  为离子的复合率, 取决于中性成分;  $\mathbf{E}$  为电场强度,  $\mathbf{B}$  为地磁场强度,  $\mathbf{V}_i$  为离子运动速度,  $\mathbf{U}$  为水平中性风。式(1)和式(2)表明, 可以认为太阳活动

明, 震前正异常主要发生在白天午后(图 4), 与磁静日电离层  $f_o F_2$  正扰动时间正好相反。因此, 在我国磁静日期间, 当白天电离层  $f_o F_2$  显著增加时, 应引起重视, 并结合其它诸如区域分布特征等信息来判断其是否为地震异常。

#### 4 物理机理

地震电离层异常的物理机理研究, 可以加深对现象的认识, 有利于建立可靠的预测模型。然而, 目前孕震过程所引起电离层异常的物理机理尚不确定。分析电离层异常扰动的成因, 需厘清控制电离层状态的基本物理过程。电离层  $F$  层的离化源主要是太阳紫外、极紫外辐射等, 所以太阳辐射所产生的光化学过程对

和地磁活动宁静期  $q_i$  和  $\beta_i$  基本不变, 电子密度的扰动主要是由式(1)左边的第二项  $\nabla \cdot (N_i \mathbf{V}_i)$  所表示的输运过程引起. 而引起速度  $\mathbf{V}_i$  显著改变的因素, 可能性较大的只有风场  $\mathbf{U}$  和电场  $\mathbf{E}$ , 前者对应“重力波”假说, 后者则对应“异常电场”假说.

#### 4.1 大气重力波假说检验

重力波假说最早由 Shalimov(1992)提出. 由于地壳的块状构造, 孕震过程所引起的重力振荡的幅度随距离地面高度的增加而增加, 震前这些振荡瞬间像“活塞”似的影响到大气层, 产生内重力波. 重力波(声重波)抵达电离层后, 引起电离层高度的中性风场  $\mathbf{U}$  的波动, 影响电离层输运过程, 电离层发生扰动. Pulinets 和 Boyarchuk(2004)对该理论表示质疑, 并指出重力波向上传输过程中由于受到中性风、热传导和其它扩散过程的影响而很难传到电离层高度. 此外, 强震发生时电离层受重力波的影响, 扰动幅度仅为 1–2 TECU, 因此无法解释震前数天显著的电离层异常.

以上均为对电离层异常的定性分析. 为了进行定量分析, 徐彤等(2011, 2013)利用大气运动方程, 结合地震能量激发因素, 开展了大气重力波引起电离层异常扰动的验证研究; 其结果表明, 重力波无法引起震前电离层的显著扰动. 此外, 徐彤等(2011, 2013)也检验了 Hegai 等(2006)提出的异常电场在电离层高度激发重力波的理论; 其模拟结果表明, 电子密度扰动甚微(图 8), 与我国实际观测相差甚远. 可见, 该理论同样无法解释地震电离层异常现象.

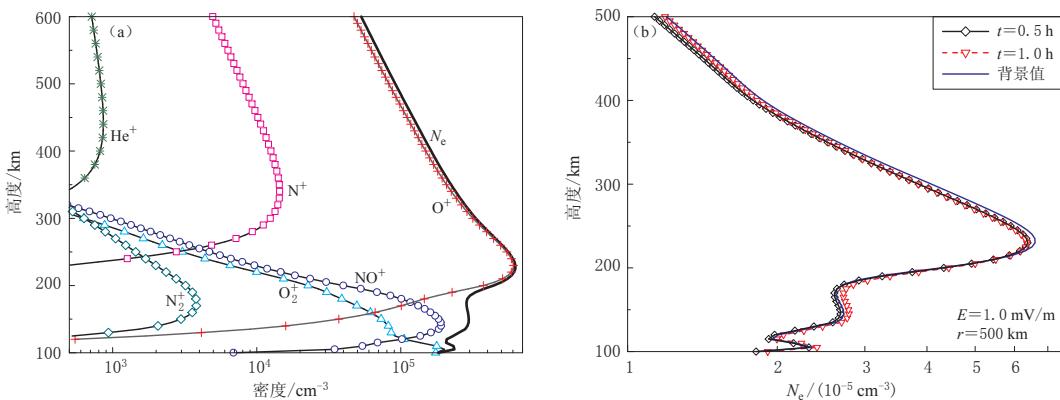


图 8 电子密度分布(引自徐彤等, 2013)

(a) 物理模型模拟的电子密度背景分布; (b) 声重波作用后的电子密度分布

Fig. 8 Distribution of the electric density obtained by physical model (a) and produced by gravity waves triggered by the anomalous electric field (b) (after Xu *et al*, 2013)

#### 4.2 异常电场提取与建模

异常电场假说由 Kim 等(1994)提出, 经不断完善, 成为目前认可度最高的一种假说. 在地震孕育过程中除了力学过程, 还伴随放射性化学过程, 如氡气辐射. 中性大气被地下逸出的氡气电离, 并与水分子集合形成中性离子团. 在地震孕育区上方接近地表的大气中富含这些中性离子团包裹的隐形离子. 地震孕育区的地壳释放气体主要为 CO<sub>2</sub>. 中性离子团被这些气体破坏, 以致于在很短的时间内, 地表大气中产生大量的离子, 最终形成一个异常电场  $E$  传输至电离层高度, 通过电动力学过程, 改变了电离层的状态.

#### 4.2.1 电场异常强度定量估算

国内外研究人员关于汶川地震前电离层异常的认识较为统一,因此,本文利用汶川地震前震中附近的5个站(海口、广州、昆明、拉萨、重庆)的电离层垂测数据,借助电离层电子密度与峰值高度、漂移速度的经验模型,定量估算电离层高度异常的电场强度为(Xu *et al*, 2011b)

$$\Delta E = \frac{B(7.5 \times 10^{-3} \Delta h_m + 0.578 \Delta \lg N_m)}{1.68 \times 10^{-2} \cos I}, \quad (3)$$

式中,  $E$  为电场强度,  $B$  为地磁场强度,  $h_m$  为最大电子密度高度,  $N_m$  为最大电子密度,  $I$  为磁倾角。

计算结果显示,异常电场强度约为 1.0 mV/m,且局限在震中附近(图 9a),其强度与零星的电磁卫星观测资料相符。此外,利用本文建立的一维电离层时变物理模型(图 8a),讨论不同外加电场条件下电离层电子密度的扰动响应。模拟结果表明, mV/m 量级的异常电场可以引起电离层 F 层电子密度的显著扰动(图 9b),与实际观测的数量级一致。

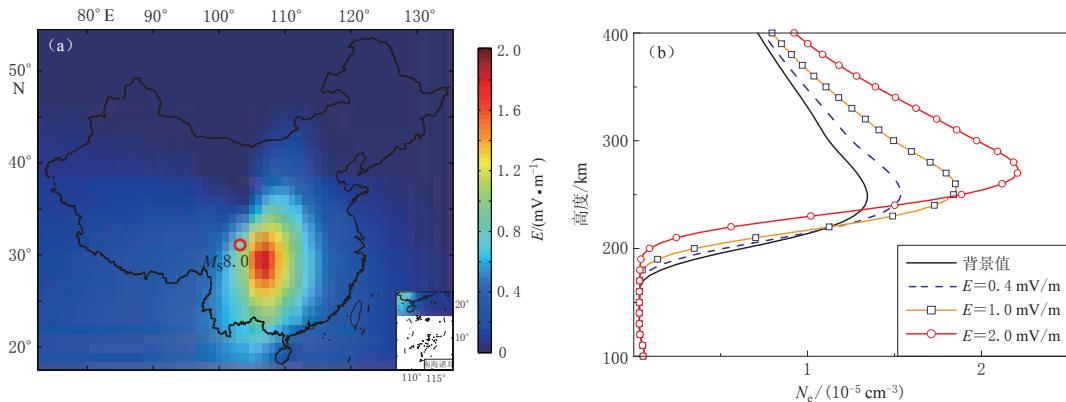


图 9 电离层高度的电场分布(a)及其对电子密度的响应(b)(引自 Xu *et al*, 2011b)

Fig. 9 The features of anomalous electric field (a) and its effects on the electron density (b) at the height of ionosphere (after Xu *et al*, 2011b)

#### 4.2.2 岩石圈-大气层-电离层电耦合建模

传统理论认为,震前放射性物质氡气的释放能显著改变近地面大气的电特性,形成异常电场渗透到电离层高度,从而引起电离层异常。然而,这些研究多是定性分析。虽然欧美部分研究人员的模拟结果显示电场穿透效率低,但遗憾的是这些模拟并未考虑到氡气异常的离化作用,因此经典的氡气释放激发电场渗透理论遭到质疑。上述电场穿透过程可用  $\nabla \cdot \mathbf{J} = 0$ ,  $\mathbf{J} = \sigma \cdot \mathbf{E}$  及  $\mathbf{E} = -\nabla \Phi$  等方程描述,考虑到中性大气的各向同性特征,可以得到

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = \sigma \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \sigma \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} + \frac{\partial \sigma}{\partial x} \frac{\partial \Phi}{\partial x} + \frac{\partial \sigma}{\partial z} \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0, \quad (4)$$

式中,  $\mathbf{E}$  为电场强度,  $\mathbf{J}$  为电流密度,  $\sigma$  为电导率标量,  $\Phi$  为电势。

将本文建立的氡气释放增强大气电导率的模型嵌入式(4)(Xu *et al*, 2015a)中,模拟结果表明,氡气异常释放时,近地表电导率可以显著增加 60%,电离层高度电场亦有相应程度的增加,但其量级仅为  $\mu$ V/m,故该理论也无法解释震前的电离层异常现象(图 10a)。此外,由于海水的导电性和流动性,氡气异常释放假说同样也难以解释海上强震前的电离层

异常。

另外一方面, Freund (2010) 试验表明, 震前由于岩石挤压可以形成强度为  $0.1\text{--}10\text{ }\mu\text{A/m}^2$  的地表电流。考虑地表电流因素后, 计算发现在电离层高度电场幅度达到  $\text{mV/m}$  量级时, 会引起电离层电子密度显著扰动(图 10b), 给建立地震电离层异常因果链带来了曙光。但是, 该强度的电流是否存在, 尚需进一步确认。

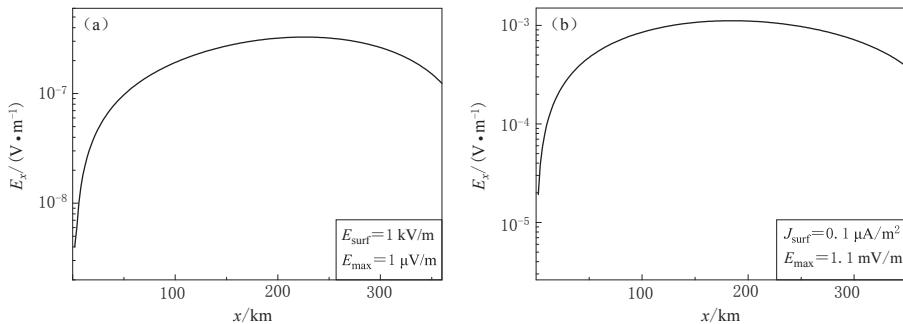


图 10 不同源导致的电离层高度电场幅度变化(引自 Xu *et al*, 2015a)

(a) 氡气产生的地面异常电场; (b) 岩石压力形成的地表电流

Fig. 10 Distribution of electric fields in the ionosphere resulted from different sources on the ground (after Xu *et al*, 2015a)

(a) Anomalous electric fields due to radon emanation; (b) Electric currents due to the stressed rock

## 5 讨论与结论

关于震前电离层异常现象的研究已经长达半个世纪之久, 特别是 2008 年汶川地震前电离层异常现象的报道, 使得地震电离层异常效应倍受关注。近年来, 中国电波传播研究所在国防科技工业技术基础及国家自然科学基金等项目的支持下, 利用国家电波观测站网电离层垂测数据深入地开展了汶川地震及 1960 年以来我国其它 14 次  $M > 7.0$  强震前的电离层异常变化分析。研究表明, 电离层垂测参数中,  $f_{\text{o}}\text{F}_2$  震前异常最为显著, 而其它层(如  $\text{F}_1$  层、 $\text{E}$  层)的参数变化不够显著。地震电离层异常一般发生在震前数天内的午后时段, 具有局地性特点, 具有区别于磁暴、磁静日电离层的扰动特征。另外, 我们检验了传统的“重力波”及“异常电场”假说, 并积极探索和发展地震电离层异常电场驱动理论, 初步建立了岩石圈-大气层-电离层电场耦合物理模型。相关研究表明: “重力波”假说能够很好地解释电离层同震时的波动现象, 而无法解释震前异常扰动现象; 而基于电场驱动的“异常电场”假说, 如氡气释放引起的电场穿透理论、岩石压力形成的电流传输理论, 优于重力波假说。孕震区岩石压力形成的电流会引起电离层电场异常的假说, 较氡气释放电离层电场导致异常的假说更具有优势, 但是岩石压力形成电流理论还需试验进一步证实。尽管对地震电离层异常的规律及其机理的认识在不断加深, 但是由于电离层自身特点的多样性及岩石圈与电离层耦合的复杂性, 地震电离层异常的特征及机理尚不确定。若将地震电离层异常作为地震前兆应用于实际的地震预报, 在电离层多手段监测、异常规律认识、信息识别和提取以及机理研究等方面还有许多工作亟需开展。今后的主要发展方向如下:

1) 发展天地基联合监测手段。地震电离层异常监测对监测手段的时间和空间分辨率要求很高。因此, 可以利用传统的地基(如垂测)和新发展的天基电离层探测手段, 对电离

层进行联合监测,相互补充,形成天地一体化的监测网络。天基观测可实现全球范围电波环境的连续观测,尤其是在海洋等难以大量地面建站的区域。我国目前的电离层地基观测站网,基本以服务电波传播应用研究的需要为出发点,覆盖我国主要空间区域。地震电离层异常具有显著的局地性特征,对电离层观测的水平分辨率要求高得多,现有电离层观测站网有待进一步优化、补充。建议在当前站网能力条件下,通过独立建站、合作建站、数据共享等多种方式,加强对地震多发地区的电离层观测。

2) 加强地震电离层异常规律及机理研究。虽然国内外对地震电离层异常的规律及物理机理进行了大量的研究,但是还处于初步探索阶段,需要投入大量人力,持续深入开展地震电离层异常数据统计及物理成因研究。对地震电离层异常规律的认识,尚存在诸多不一致甚至矛盾之处。在机理研究方面,虽然大气重力波假说遭到质疑,但也不能否认部分研究人员对该假说的支持。电场异常假说可以解释目前地震电离层异常的众多特征,但是地震孕育期间是否存在地表异常电场,尚存争议。由于卫星对某定点的连续监测能力低,电离层高度异常电场是否存在,还有待于电磁监测试验卫星直接测量和地面观测数据的证实。因此,建议在加强对电离层电场异常的天基直接观测的同时,加强对地面电场变化的监测。

3) 加强交流合作。开展地震电离层异常研究的团队较多,但力量和学科均很分散。除了与中国地震局牵头的国内多家单位的有限合作研究外,还应加强与外部的交流合作。台湾地区刘正彦研究团队的成果最具代表性。2006年,台湾地区“太空中心”与美国“大学大气研究联盟”联合研制的“福卫三号”卫星(COSMIC)成功发射,目前已经积累了数年的可用数据。该团队开展地震电离层异常研究较早,数据处理技术先进,并且最早提出电离层异常标准,积累了丰富的地震电离层异常提取经验。而大陆目前还没有发射类似的电离层监测卫星,电离层天基监测数据匮乏。此外,法国 DEMETER 卫星数据也是我国急需的数据,俄罗斯Pulinets教授团队是目前地震电离层异常机理研究最为深入、影响力最大的团队。我国电离层地基测量数据丰富,但是目前缺乏电离层天基测量数据,机理研究尚处于起步阶段。因此,加强合作,优势互补,联合攻关,进一步深化地震电离层异常研究,以推进地震电离层异常监测预警技术的发展。

## 参 考 文 献

- 徐彤,吴健,吴振森,胡艳丽,李春斌. 2011. 地震电离层异常机理初探: 大气重力波[J]. 电波科学学报, 26(增刊): 190-193.
- Xu T, Wu J, Wu Z S, Hu Y L, Li C B. 2011. Preliminary study on the mechanism for ionospheric precursors of earthquakes[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 26(Suppl): 190-193 (in Chinese).
- 徐彤,胡艳丽,吴健,李春斌,吴振森,索玉成,冯建. 2012. 中国大陆 14 次强震前电离层异常统计分析[J]. 电波科学学报, 27(3): 507-512.
- Xu T, Hu Y L, Wu J, Li C B, Wu Z S, Suo Y C, Feng J. 2012. Statistical analysis of seismo-ionospheric perturbation associated with 14  $M_s \geq 7.0$  earthquakes in Chinese Mainland[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 27(3): 507-512 (in Chinese).
- 徐彤,胡艳丽,王敏,吴健,吴振森,索玉成. 2013. 强震前异常电场激发声重波对电离层的影响[J]. 空间科学学报, 33(4): 436-440.
- Xu T, Hu Y L, Wang M, Wu J, Wu Z S, Suo Y C. 2013. Effect of acoustic gravity waves excited by anomalous electric field on ionosphere before strong earthquakes[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 33(4): 436-440 (in Chinese).
- 熊年禄,唐存琛,李行健. 1999. 电离层层物理概论[M]. 武汉: 武汉大学出版社: 2-3.

- Xiong N L, Tang C C, Li X J. 1999. *Introduction to Physics of the Ionosphere*[M]. Wuhan: Wuhan University Press: 2–3 (in Chinese).
- Barnes R A, Leonard R S. 1965. Observations of ionospheric disturbances following the Alaska earthquake[J]. *J Geophys Res*, **70**(5): 1250–1253.
- Chen Y I, Chuo Y J, Liu J Y. 1999. Statistical study of ionospheric precursors of strong earthquakes at Taiwan area[C]// *XXVI URSI General Assembly*. Toronto, 13–21 August 1999. Abstract 745.
- Freund F. 2010. Toward a unified solid state theory for pre-earthquake signals[J]. *Acta Geophys*, **58**(5): 719–766.
- Hegai V V, Kim V P, Liu J Y. 2006. The ionospheric effect of atmospheric gravity waves excited prior to strong earthquakes[J]. *Adv Space Res*, **37**(4): 653–659.
- Hu Y L, Xu T, Wu J. 2013. Removing solar radiation based on the Empirical Mode Decomposition Method for seismo-ionospheric anomaly before the M9.0 Tohoku earthquake[J]. *Chinese Journal of Space Science*, **33**(5): 518–524.
- Kim V P, Khegai V V, Illich-Svitych P V. 1994. On one possible ionospheric precursor of earthquake[J]. *Physics Solid Earth*, **30**(3): 223–226.
- Li M, Parrot M. 2013. Statistical analysis of an ionospheric parameter as a base for earthquake prediction[J]. *J Geophys Res*, **118**(6): 3731–3739. doi:10.1002/jgra.50313.
- Liu J Y, Chen Y I, Pulinets S A, Tsai Y B, Chuo Y J. 2000. Seismo-ionospheric signatures prior to  $M \geq 6.0$  Taiwan earthquakes[J]. *Geophys Res Lett*, **27**(19): 3113–3116.
- Liu J Y, Chen Y I, Chen C H, Liu C Y, Nishihashi N, Li J Z, Xia Y Q, Oyam K I, Hattori K, Lin C H. 2009. Seismo-ionospheric GPS total electron content anomalies observed before the 12 May 2008  $M_w 7.9$  Wenchuan earthquake[J]. *J Geophys Res*, **114**(A4): A04320. doi:10.1029/2008JA013698.
- Liu J Y, Le H, Chen Y I. 2011. Observations and simulations of seismo-ionospheric GPS total electron content anomalies before the 12 January 2010  $M_7.0$  Haiti earthquake[J]. *J Geophys Res*, **116**: A04302.
- Mikhailov A V, Depueva A H, Leschinskaya T Y. 2004. Morphology of quiet time  $F_2$ -layer disturbances: High and lower latitudes[J]. *Inter J Geomag Aeron*, **5**(1): GI1006. doi:10.1029/2003GI000058.
- Pulinets S A, Legen'ka A D, Gaivoronskaya T V, Depuev V K. 2003. Main phenomenological features of ionospheric precursors of strong earthquakes[J]. *J Atmos Solar-Terr Phys*, **65**(16/17/18): 1337–1347.
- Pulinets S A, Boyarchuk K A. 2004. *Ionospheric Precursors of Earthquakes*[M]. Berlin: Springer Verlag: 49–50.
- Pulinets S A, Davidenko D. 2014. Ionospheric precursors of earthquakes and Global Electric Circuit[J]. *Adv Space Res*, **53**(5): 709–723.
- Shalimov S L. 1992. Lithosphere-ionosphere relationship: A new way to predict earthquakes?[J]. *Episodes Inter Geophys Newsmag*, **15**(5): 252–254.
- Xu T, Hu Y L, Wu J, Wu Z S, Suo Y C, Feng J, Huang C J. 2010a. Abnormal perturbations in the ionospheric  $F_2$  region before Wenchuan earthquake on 12 May 2008[J]. *Science China Earth Sci*, **53**(11): 1671–1674.
- Xu T, Hu Y L, Wu J, Wu Z, Suo Y, Feng J. 2010b. Giant disturbance in the ionospheric  $F_2$  region prior to the  $M_8.0$  Wenchuan earthquake on 12 May 2008[J]. *Ann Geophys*, **28**(8): 1533–1538.
- Xu T, Wu J, Zhao Z, Liu Y, He S, Li J, Wu Z, Hu Y. 2011a. Communication on “Monitoring ionospheric variations before earthquakes using the network of vertical and oblique ionosondes over China”[J]. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, **11**(4): 1083–1089.
- Xu T, Hu Y L, Wu J, Wu Z S, Li C B, Xu Z W, Suo Y C. 2011b. Anomalous enhancement of electric field derived from ionosonde data before the great Wenchuan earthquake[J]. *Adv Space Res*, **47**(6): 1001–1005.
- Xu T, Chen Z, Li C B, Wu J, Hu Y L, Wu Z S. 2011c. GPS total electron content and surface latent heat flux variations before the 11 March 2011  $M_9.0$  Sendai earthquake[J]. *Adv Space Res*, **48**(8): 1311–1317.
- Xu T, Hu Y L, Zhang H L, Chen Z, Wu J, Xu Z W. 2012. Ionospheric disturbances on 8 September, 2010: Was it connected with the incoming moderated Chongqing earthquake?[J]. *Adv Space Res*, **50**(2): 205–210.
- Xu T, Hu Y L, Wang F F, Chen Z, Wu J. 2015a. Is there any difference in local time variation of ionospheric  $F_2$ -layer disturbances between the earthquake-induced and  $Q$ -disturbance events?[J]. *Ann Geophys*, **33**(6): 687–695.
- Xu T, Zhang H L, Hu Y L, Wu J. 2015b. Electric field penetration into the ionosphere in the presence of anomalous radon emanation[J]. *Adv Space Res*, **55**(12): 2883–2888.
- Zhao B Q, Wang M, Yu T, Wan W X, Lei J H, Liu L B, Ning B Q. 2008. Is an unusual large enhancement of ionospheric electron density linked with the great Wenchuan earthquake?[J]. *J Geophys Res*, **113**(A11): A11304. doi:10.1029/2008JA013613.