

何宇飞,杨冬梅,和少鹏,2020. 基于地震电离层现象研究结果的分析与总结. 中国地震,36(2):244~257.

基于地震电离层现象研究结果的分析与总结

何宇飞¹⁾ 杨冬梅¹⁾ 和少鹏²⁾

1) 中国地震局地球物理研究所,北京 100081

2) 河北省地震局红山基准台,河北邢台 054000

摘要 地震电离层现象作为地震事件在电离层中的物理表象,随着观测资料的积累不断地被发现和报道。大量研究表明,地震电离层现象复杂多样,难以捕捉和确认。本文针对主要的地震电离层现象进行简要介绍,并依据研究参量、地震事件的震级、异常出现的时间、异常的空间方位以及异常的正负等要素,对以往的地震电离层现象进行分类总结,尝试从现有研究结果中挖掘地震电离层异常出现在震前的天数与震级的关系、异常空间分布方位及频次、正负异常的震中距与震级的关系,探索地震电离层异常现象在时间上的变化特征和空间上的分布特征。

关键词: 地震电离层现象 地震 电离层异常 电磁卫星

[文章编号] 1001-4683(2020)02-0244-14 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

地震是十分复杂的非线性动力学过程,在这个过程中应力应变得到积累,地下介质由弹性形变向非弹性形变转变,通常还伴随着岩石孔隙的膨胀和破裂、地下流体的变化、断层的摩擦等动力学过程,从而产生了一系列复杂的地球物理、地球化学、压磁、压电、热磁、动电等效应(丁鉴海等,2006),形成了多种可观测到的外在变化表象。因此,在地震研究中,除了直接利用地震波数据研究地震活动性外,还可以通过监测与地震活动相关的地球电场、磁场、形变、地下流体、电磁波、倾斜、水氡等多种参量的变化,全方位地认识和了解地震的孕育和发生过程。

电离层是日地空间观测环境中的一个重要组成部分,地震孕育和发生过程也会引起孕震区上空电离层特征参量的异常变化,称为地震电离层现象。它是地震在电离层中的一种表象,是岩石圈-大气层-电离层通过某种途径耦合的结果,被认为是捕捉地震短临信息较有前景的手段之一。自 Moore(1964)和 Davies 等(1965)报道了与1964年美国阿拉斯加地震

[收稿日期] 2019-10-28; [修定日期] 2020-04-16

[项目类别] 中国地震局地球物理研究所基本科研业务专项(DQJB19B11)、“十三五”国家重点研发计划“重大自然灾害监测预警与防范”重点专项(2018YFC1503505)和国家自然科学基金面上项目(41774085)共同资助

[作者简介] 何宇飞,男,1981年生,副研究员,主要从事地磁数据及电磁卫星数据的分析与应用研究。

E-mail:heyufei_bj@163.com

杨冬梅,通讯作者,女,1966年生,正研级高级工程师,主要从事中国地磁台网技术管理和地磁学基础研究。

E-mail:yangdm@cea-igp.ac.cn

相关的电离层异常扰动现象后,关于地震电离层现象的研究便揭开了序幕。随着观测资料的丰富和积累,地震电离层现象不断被发现、报道和证实(Parrot et al,2015)。如今地震电离层现象已经越来越受到关注,成为地震学与空间电离层物理学交叉的热门学科。进入 21 世纪以来,随着空间卫星观测技术的发展,许多发达国家都陆续发射了专用于监测空间环境变化及地震火山等自然灾害活动的卫星,如美国 QuakeSat、乌克兰 SICH-1M、俄罗斯 COMPASS-2、欧洲航天局 SWARM 等卫星,尤其是法国在综合参考国际卫星观测资料的基础上,成功发射了世界上第一颗专门服务于地震和火山监测的 DEMETER 卫星,开创了地震电离层现象研究的新局面。在借鉴 DEMETER 卫星的研究经验基础上,中国于 2018 年 2 月 2 日成功发射了第一颗用于防震减灾研究的张衡一号(ZH-1)卫星,相关的研究工作也正在有序地开展。

如今,有关地震电离层现象的研究工作仍在不断进行,地震电离层现象也在不断地被报道。回顾以往地震电离层现象的研究可以看到,研究工作大体分为两类:震例研究和统计研究,主要研究内容是分析地震发生前与地震孕育过程相关的电离层扰动现象,目的是探索地震的前兆信息,为地震的预测预报提供相关依据。而从已报道的地震电离层现象研究中可以看到,由于研究地震对象的差异性、地震本身的复杂性、研究数据的多源性、分析方法的多样性等,使得地震电离层现象在不同的研究中表现出极为复杂的特征。本文将主要关注已报道的地震电离层现象,对其中一些主要的震例研究和统计研究进行简要介绍,并对已报道的一些异常现象进行分类总结,尝试探索地震电离层现象与地震参数之间的内在关系。

1 震例研究

在地震电离层现象的研究中,大量的工作都是基于震例的研究。研究中使用了多种电离层观测参量,根据地震电离层现象研究中主要使用的参量,对以往的震例研究进行简要介绍。

1.1 地基电离层探测参量

地震电离层现象研究中常用的基于地基探测的电离层特征参量有电离层 D、E、Es、F2 等层的临界频率、虚高及最大电子密度等。通常认为在大地震发生前,地震孕育区会通过某种耦合方式与电离层发生作用,致使电离层底部产生沉降,D 层电子密度增加,从而改变传播路径和经过该区域的无线电信号的传播特性。Hayakawa(2004)利用发射站和接收站之间传递的连续信号(10.2kHz),对发生在两站之间的 Kobe 地震进行研究,发现传播信号在晨昏交替时间的相位在震前有明显变化,而地震前后各 4 个月的其他时间内未发现此现象。Yoshida 等(2008)通过建模模拟,进一步证实了电波传播路径上的电离层底部 D 层高度降低能导致相位和幅度的变化,但不同频段的电磁波震前的特征不尽相同(Hayakawa, 2004、2009;Rozhnoi et al,2007)。

地震的孕育还会引起未来震中上空电离层 E 层临界频率的扰动变化(Antsilevich, 1971)。Ondoh 等(2002)发现震前 7 天和震前 3 天地震孕育区上空出现强烈的突发 Es 层,在白天临界频率(f_oE_s)异常增大。Liperovsky 等(2005)发现在震前孕震区探测到 Es 现象的频次明显增多。

F2 层作为电离层中最活跃的一层,相关地震电离层现象的报道也较多。通常 F2 层主要研究的参量有电离层的虚高($h'F$)、临界频率(f_oF2)偏移量以及最大电子密度(N_mF2)等

的变化,但不同的震例研究结果之间存在较大的差别。Ondoh 等(1999)对日本 Okushiri 地震分析发现,F 层夜间的虚高 $h'F$ 在震前 3 天高于月中值,在震后 3 天低于月中值,并且震前 3 天的 F2 层临界频率(f_oF2)小于月中值。张学民等(2014)对玉树地震研究发现,震前 1 天的 F2 层临界频率(f_oF2)相对滑动均值增大 40%,并且异常存在漂移特性。徐彤等(2012)基于临界频率(f_oF2)数据的分析结果表明,震前电离层 f_oF2 的扰动幅度会随震中距的增加而减小。Kim 等(1999)和 Pulinets 等(2003)分别通过理论计算,给出了孕震区上空电子浓度的空间水平分布图,同时还指出最大异常区域在地面投影点与未来震中位置有偏离,并且在其磁共轭区有时也可以观测到异常扰动。震前临界频率或电子密度增强、减弱的变化,可能与强震前电子浓度空间的分布有关,增强和减弱通常分别位于震源区的两侧,因此,当研究的区域不同时,得到的结果就会有所不同(Pulinets, 1998a; 杜品仁等, 1998; Chuo et al, 2001、2002a; 余素荣等, 2004; 熊晶等, 2008; Ondoh, 2009)。蔡军涛等(2007)对以往的电离层 F2 层中的异常进行总结,认为地震电离层异常形态具有多样性。

利用地面接收站接收 GPS 卫星信号可以计算出电子密度总含量(TEC),基于该数据的地震电离层现象研究也得到广泛开展。Liu 等(2001)利用 TEC 数据对 1999 年中国台湾集集地震进行分析,发现震前 1 天、3 天、4 天的 TEC 降低。李施佳等(2012)对 2011 年 3 月 11 日的日本宫城县以东太平洋海域 9.0 级地震进行研究,发现震前当天 TEC 明显增加,超出其他日期相同时段的平均值,并延续到震后数日。周长志等(2017)对 2016 年 3 月 2 日苏门答腊 7.8 级地震进行分析,发现震前 8 天 TEC 减弱的异常变化。吴云等(2011)利用 TEC 数据对 2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 级地震分析,发现震前 13 天至震前 2 天内出现多次减弱和增强的异常变化。刘莹等(2013)对 2012 年 4 月 11 日苏门答腊 8.6 级地震进行分析,发现震前 6 天至震前 5 天 TEC 异常扰动,表现出先减小再增大又减小的特征,并且震前 6 天在震区的共轭位置也观测到了异常变化。此外,对同一个震例用不同方法进行分析,所得到的异常出现在震前的天数也有所不同,如对 2010 年 4 月 14 日玉树 7.1 级地震的研究,熊晶等(2010)发现震前 1 天存在 TEC 增强的异常,而李旺等(2014)对该地震分析发现震前 13 天和震前 26 天出现 TEC 增强现象,姚璐等(2014)对该地震分析发现震前 5 天至震前 4 天和震前 1 天出现 TEC 增强的现象,张学民等(2014)对该地震分析发现震前 1 天出现 TEC 增强的现象。从近年来更多基于 TEC 的地震电离层现象的震例研究中(黄林峰等, 2012; 刘莹等, 2013; Zhao et al, 2015; 王泽民等, 2016; Tao et al, 2017; 张明敏等, 2018),也可以看到这些异常的多样性。

1.2 星基电离层观测参量

自 Gokhberg 等(1982)首次报道卫星电磁信号数据时发现了地震前存在的异常后,基于空间卫星观测的电离层数据便广泛地应用于地震电离层现象的研究中。在以往的研究中不断发现和报道了许多可能与地震有关的电离层异常现象,常用的电离层观测参量有电(磁)场、电(离)子密度、电(离)子温度、高能粒子等。

Larkina 等(1983)对经过地震区域的 Intercosmos-19 卫星记录的数据进行分析,发现震前和震后几十分钟至数小时内 VLF 电磁信号增强。Chmyrev 等(1989)对 Intercosmos-1300 卫星数据分析,发现在震前约 15min 时,频率为 1Hz 的磁场在震中上空出现幅度约为 3nT 的扰动。张学民等(2009c)对 2008 年汶川 8.0 级地震分析时,发现震前 1 周内 DEMETER 卫星

记录到电场能量显著增强的现象,其变化幅度达到 3σ , 频率集中在 $2\sim 6\text{kHz}$ 。Molchanov 等 (2006) 利用 DEMETER 卫星接收到地面发射站信号,对发射站附近的地震研究,发现地震发生前 1 个月的时间段内,震中上空区域信号的信噪比降低。关于震前电场和磁场异常变化的研究还有很多 (Parrot et al, 1989; Serebryakova et al, 1992; Parrot et al, 1993、2006a; 董建等, 2009; 张学民等, 2011; 姚丽等, 2013), 电场和磁场存在异常的波段几乎涵盖了从 DC 到 HF 整个电磁波频段。赵国泽等 (2007) 和 Hayakawa (2009) 对卫星观测的空间电磁异常现象的主要特征做了总结和展望。

许多空间探测卫星还搭载了电离层等离子体探测设备,能够测量电离层电(离)子密度和温度等参量,因此基于电离层等离子体参量的地震电离层研究也较为丰富。Bošková 等 (1994) 基于 Intercosmos-24 卫星数据,分析发现震前 12~16h 电离层等离子体成分出现异常, H^+ 和 He^+ 密度明显增加。焦其松等 (2011) 对 2010 年 1 月 12 日海地 7.1 级地震进行分析,发现震前 8 天 O^+ 密度出现异常变化。张学民等 (2009a) 通过对 2008 年 3 月 21 日新疆于田 7.2 级地震分析,发现震前 1 个月 H^+ 密度相对其他年份同期的观测数值有明显增加。Tao 等 (2017) 通过对 2006 年 7 月 17 日 Java 地震分析,发现震前 O^+ 和 H^+ 密度有显著增加,而 He^+ 密度在地震前后相对稳定无明显变化。泽仁志玛等 (2010) 利用卫星数据对 2006 年 5 月 3 日汤加 7.9 级地震分析,发现震前 5 天至震前 2 天电子密度连续降低,并对 2006 年 12 月 16 日中国台湾南部 7.1 级地震分析,发现在地震当天及后续 3 天出现电子温度降低的现象。刘静等 (2011) 通过对 2010 年 2 月 27 日智利 8.8 级地震分析,发现随着地震的到来电子密度发生多次变化,震前 7 天电子密度升高,震前 3 天电子密度降低,震前 1 天电子密度再次高出背景值。基于等离子体参量地震电离层现象的震例研究通常分析其震前相对于参考背景的变化或自身变化,从更多相关的研究中可以看到 (Pulinets et al, 2003; Parrot et al, 2006b; Sarkar et al, 2007; 朱荣等, 2008; 欧阳新艳等, 2008、2011; 刘静等, 2009、2013; Liu et al, 2004、2006、2010、2011), 研究几乎涉及了所有等离子体参量,变化特征也较复杂。

Voronov 等 (1987) 首次报道了高能粒子暴与地震活动的关联性,随后许多关于空间高能带电粒子暴与地震活动关系的研究便陆续开展。黄建平等 (2010) 通过对 2010 年 2 月 27 日智利 8.8 级地震分析,发现震前 1 天白天高能粒子通量增强、夜间降低,并在震后恢复正常水平。李新乔等 (2010) 发现 2008 年汶川 8.0 级地震当天,震中上空北部区域 DEMETER 卫星记录的高能粒子数据在 $90\sim 600\text{keV}$ 能谱段出现异常扰动,其能谱通量显著低于震前和震后的能谱通量。另外,一些研究利用高能粒子辐射和地震事件在时间和空间位置的相关性来证实二者之间可能存在的关联 (Aleksandrin et al, 2003; Sgrigna et al, 2005; Fidani et al, 2010、2012)。

1.3 星地基联合的多参量

从上述基于地基或空基探测的某单一参量的震例研究中可以看到,所得到的结果较为复杂,异常的识别和确认存在一定的困难。为了得到更为可靠的地震电离层现象,基于多参量综合分析的研究工作也在不断开展。Molchanov 等 (2006) 利用 DEMETER 卫星接收到法国 FTU (18.3kHz)、德国 DFY (16.56kHz)、日本 JP (17.8kHz) 和澳大利亚 NWC (19.8kHz) 等 4 个 VLF 发射站信号,分别对发生在发射站附近的地震进行研究,发现在地震发生前的 1 个月内,震中上空区域 4 个频率信号的信噪比降低。张学民等 (2009b) 通过对 2007 年 11 月 14

日智利 7.9 级地震分析,发现震前离子密度、温度、电磁场等多参量均出现扰动变化,随后对 2010 年 4 月 14 日玉树 7.1 级地震进行分析,发现 TEC、foF2、Ni、O⁺等多参量在震前 1 天均出现增大的异常变化(张学民等,2014)。De Santis 等(2017)基于 SWARM 卫星多参量数据分析了 2015 年 4 月 25 日尼泊尔 7.8 级地震,发现磁场、电子密度等多参量在震前出现多次异常变化。Akhoondzadeh 等(2017)基于 SWARM 卫星电子密度、离子密度、磁场数据以及地表温度、气溶胶光学深度等数据,对 2016 年 4 月 16 日的厄瓜多尔 7.8 级地震进行多参量综合分析,发现在震前 23 天至震前 7 天,有多天存在多参量的同步异常变化。由此可见,通过对星地联合或多参量联合观测的数据进行分析,多参量之间可得到相互校验,有助于异常的确认和提取。

2 统计研究

为寻找地震电离层现象中可能存在的共性特征,在震例研究的同时,统计研究工作也在同步开展,并得到了一系列能反映出地震电离层现象特征的结果。一些统计工作分析了电离层异常与地震事件的相关性,并证实了二者之间确实存在着具有统计显著性的相关关系。Parrot 等(1985)分析了 GEOS-1 和 GEOS-2 卫星观测的甚低频电磁信号 VLF(0.3~10kHz)数据,将信号中异常增加的现象与震级大于 4.7 级的地震进行相关性分析,得到二者的相关系数为 54%。Larkina 等(1983)利用 Intercosmos-19 卫星观测数据对 39 个震级大于 5.5 级、震源深度小于 60km 的地震进行统计分析,发现低频电磁波(0.1~16kHz)在震前存在辐射增强现象,与地震事件相关。Zaslavski 等(1998)对 Topex-Poseidon 卫星的 TEC 数据进行了统计,验证了地震活动与电离层扰动之间的关联性。Hayakawa 等(2000)利用 Intercosmos-24 卫星的 3000 多个轨道数据,对等离子体密度变化与地震活动的相关性进行统计分析,得出在地方时 10:00~16:00 和高度 500~700km 的磁平静条件下,二者存在明显的相关性。Chuo 等(2001)对中国台湾地区的电离层扰动与震级大于 5 级的地震进行相关性统计,统计结果显示 73% 的地震在震前 5 天内均发现了电离层异常现象,并对震级大于 6 级的地震进行分析,其相关性可达 100%。Pulinets 等(2018a)利用日本 Wakkanai 电离层垂测站磁静日期间的数据,对其附近发生的 6 级以上地震统计分析,发现电离层的临界频率大约在震前 0.5~2.25 天存在异常变化,变化平均持续时间约 2h,最大变化幅度达 22%。

部分研究对地震电离层现象在震前出现的时间、空间分布位置、异常的变化等特征进行了统计分析。Liu 等(2000)基于 TEC 观测数据,对 1999~2002 年发生在中国台湾地区的 20 个 6 级以上地震进行分析,发现震前 1~5 天 TEC 显著减少,得出地震前 5 天出现电离层异常的概率为 80%。Molchanov 等(2002)基于 IK-24 卫星数据对位于赤道附近的 50 个大于 6 级的地震进行统计分析,发现地震能引起电离层赤道异常驼峰附近的等离子体密度发生异常变化。Chuo 等(2002b)对 1994~1999 年发生在中国台湾的 6 级以上地震进行分析,发现 foEs 在震前的日出、日落期间会出现显著的增强异常;对 5.5 级以上地震的统计结果显示,在震中距小于 400km 范围内,有 95% 的地震在震前均能观测到突发 Es 现象。林玉翔(2004)对 1994~2003 年 327 个 5 级以上地震进行研究,分析地震前后 7 日内 TEC 的变化,发现从震前 2 天至震后 5 天,在地方时 10:00~20:00 时段内 TEC 有明显减弱的异常变化,尤其在地震前第 5 天和地震当天异常变化最为显著。Němec 等(2008)利用 DEMETER 卫星

2.5 年的 VLF 电场观测数据,对全球震级大于 4.8 级的地震进行统计,发现在震前 0~4h、距震中 350km 范围内,频率接近 2kHz 的电场强度存在降低的异常变化,在震后数小时内又出现增强的现象。Kon 等(2011)联合空间卫星和地面 TEC 观测数据,对 1998~2010 年发生在日本附近震级大于等于 6 级的地震进行统计,发现在震前 1~5 天有显著的正异常变化。Le 等(2011)对 2002~2010 年全球 736 个 6 级以上地震进行统计分析,发现 TEC 出现异常的概率在震前几天内明显增加,且异常概率与震级和震源深度有一定关联。Heki(2011)和Cahyadi 等(2013)的研究结果表明,震级大于 7 级的地震在震前电离层电子密度变化显著。闫相等(2014)基于法国 DEMETER 卫星 ISL 探测器的升轨数据,对 2005~2009 年全球 37 个震级大于等于 7.0 级地震进行分析,发现有 19 个(51%)地震在震前观测到了较为明显的电子浓度异常扰动现象,其中大部分表现为增强的异常扰动。

还有一些研究对地震电离层异常变化进行了量化的评估。Pulinets(1998b)对全球 54 个地震的电离层异常进行定量估计,得出地震电离层异常相对于正常背景的最大变化幅度可达 $\pm 30\%$ 。Pulinets 等(2004)结合地基观测和卫星观测数据对数百个 5 级以上地震进行分析,给出震前电离层异常的变化幅度通常在 15%~25%之间,但也有个别事件变化幅度会超过 100%。Sharma(2006)则利用 SROSS-C2 卫星 RPA 载荷数据,对 1995~1996 年 6 次地震前后的电离层离子温度变化情况进行分析,结果显示在地震发生期间离子温度平均增高 1.2 倍。泽仁志玛等(2012)对 2005~2009 年北半球 7 级以上地震前后的空间磁场扰动进行统计研究,发现 26 个强震中有 42%的地震在震前出现磁场扰动幅度逐渐上升的现象,并且变化最终超出 3 倍标准差,而随后扰动幅度又下降,并在下降的过程中发生地震;有 35%的强震在地震前 10 天内最大扰动幅度超过 3 倍标准差,在扰动幅度处于最高值期间发震,震后磁场扰动幅度逐渐回落。钱庚等(2016)利用电磁场数据对 2005~2009 年 45 次 7.0 级以上强震进行分析,发现有 35 次强震在地震发生前后均出现磁场的扰动,最大扰动幅度超过 2.2 倍标准差;39 次强震前出现电场扰动,其最大扰动幅度超过 2 倍标准差,最大的电磁扰动主要出现在震中 $\pm 4^\circ \sim \pm 10^\circ$ 范围内。

3 地震电离层现象总结

根据上述介绍可知,在震例研究中,地震电离层现象涉及到了多种电离层观测参量,并且所观测到的地震电离层现象出现的时间、持续存在的时间、异常的变化幅度及异常的正负均会有所不同,表现出极为复杂的变化特征;而在统计研究中,虽然地震事件与电离层异常现象的关联性得到了验证,但不同参量或同一参量的统计结果既有相似之处,又存在截然不同的差异,再次说明了地震电离层现象的复杂性。为对以往的地震电离层现象研究结果有更系统的认知,探索这些利用不同探测方式、不同分析方法、不同研究参量获得的异常现象是否遵循共同的变化规律,基于上述介绍的一些主要的地震电离层现象研究结果,依据研究中地震事件的震级、观测参量、异常空间方位、异常出现时间以及异常正负等特征进行了分类,并基于该分类结果对地震电离层现象在时、空间上的变化特征进行分析,给出了地震电离层异常出现在震前的天数与震级的关系、异常空间分布方位及频次、正负异常震中距与震级的关系。

图 1 给出了地震电离层异常出现在震前的天数与震级的关系,图中不同颜色的符号表

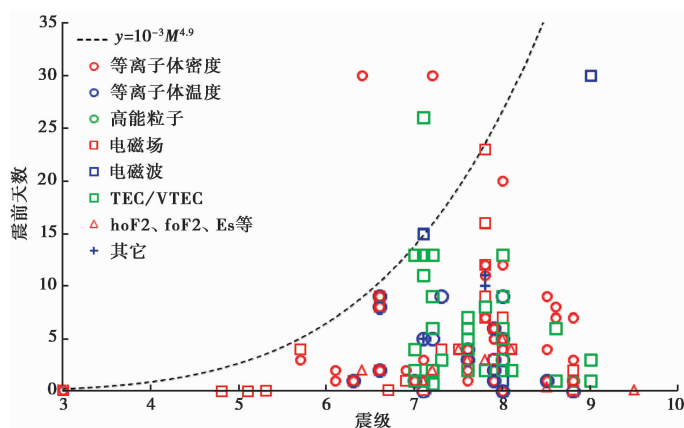


图1 地震电离层扰动出现时间与震级的关系

示不同的研究参量。从图1可以看出,在前人的研究中各种参量的异常大多出现在震前30天以内,异常在震前出现的时间范围随着震级的增大而变大,即对于震级较大的地震能在震前更多的天数里发现电离层的异常变化。从图中还可以看到,异常分布区域似乎存在明显的边界,图中的黑色虚线为通过边界拟合给出的异常分布边界线,绝大多数的地震异常事件分布在边界线右侧;对于6级的地震,异常出现的时间范围为震前0~6.5天,该计算结果与Liu等(2000)和Kon等(2011)基于TEC观测数据,对大于等于6级地震统计分析得到的震前1~5天内TEC有显著异常变化的结果基本一致。

值得注意的是,地震电离层异常出现的时间还会受研究时段的限制。为了能更好地理解异常的分布,对研究时段进行统计,统计的结果如图2所示,图中橙色圆表示研究时段的震前开始时间,灰色圆表示研究时段的结束时间。由图2统计结果可以看到,大部分研究选择的研究时段主要集中在震前10天至震后3天左右的范围,对于10天以上的异常统计样本并不丰富。因此,图1中对10天以上的异常出现时间与地震震级关系拟合结果的准确性值得考虑,同时由图2还可以看到,震前研究时段的分布随震级的增加而增加,再次说明震前研究时段与异常出现天数可能存有一定的关联,尤其是大于10天的异常天数的分布更多

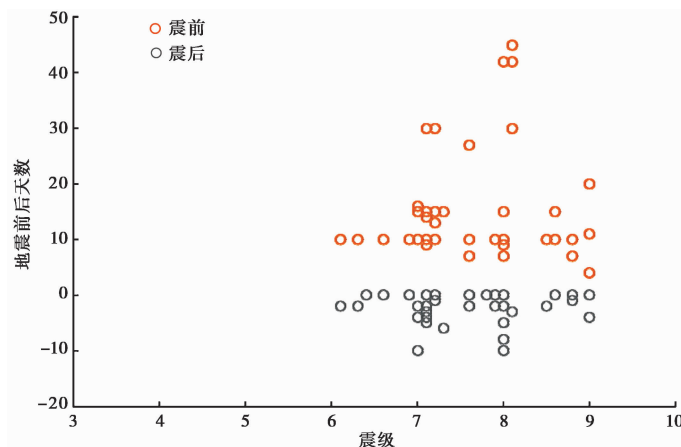


图2 地震电离层研究时段随震级的分布

反映的是研究时段的变化。

图 3 给出了异常在空间的分布及不同方位上异常出现的频次。由于前人的研究很多未给出异常的具体方位和震中距,还有一些异常存在范围较大(数千平方千米),因此,在异常方位的统计中,有时仅能根据异常的中心位置进行大体的判断,故本文也仅粗略地从北、东北、东、东南、南、西南、西和西北 8 个方位进行统计,空间方位的分辨较低。由图 3 可以看出,50%以上的异常分布在震中的南、北 2 个方向上,而此结论与震例及统计研究中给出的异常受地磁场的影响在震中南、北两侧更容易发现异常变化的结论基本一致。

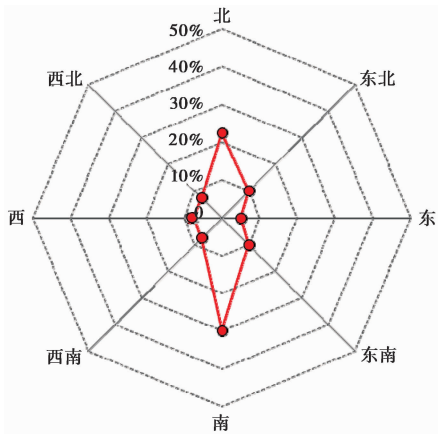


图 3 地震电离层扰动空间分布方位百分比

图 4 为异常的震中距与震级的关系,图中不同颜色的圆圈代表正或负的异常变化,黑色虚线是利用 Dobrovolsky 等(1979)给出的地震孕育区半径 ρ 与震级 M 的经验公式($\rho=10^{0.43M}$ km)计算绘制的曲线。由图 4 可以看到,异常的分布大体遵循该公式的计算结果,基本位于地震孕育区范围内。此外,从图中还可以看到,正、负异常及扰动异常交织在一起,在不同的震中距上既有正的异常,也有负的异常,还有扰动的异常,变化比较复杂,没有显著的随震中距和震级的分布特征。

综上所述,本文得到的地震电离层现象的主要特征如下:①地震电离层现象在多种电离

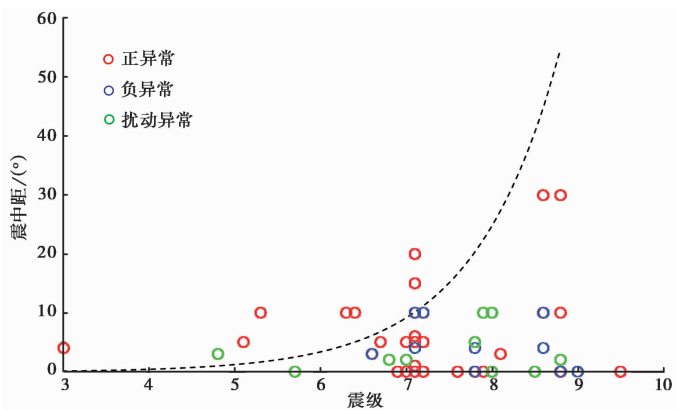


图 4 地震电离层扰动的震中距与震级的关系

层参量中均能被观测到;②地震电离层现象在震前出现的时间范围随震级增大而变大,可能与研究时段有一定的关联;③50%以上的异常大体分布在震中南、北方向,可能因受地磁场方向的影响,在震中南、北两侧更容易被观测到;④地震电离层异常出现的区域随震级增加而扩大,基本位于 Dobrovolsky 等(1979)给出的孕震区半径公式所计算的范围内;⑤在不同震中距上的地震电离层异常可能为正异常,也可能为负异常,未观测到显著的分布特征。

4 结论与讨论

通过总结以往震例及统计的研究结果可以看到,地震电离层现象与震级、震中距等均存在一定的关联,在时、空间分布上大体遵循着一定的变化规律,并具有明显的短临特性,这对以往的地震电离层现象研究有了更直观的认识,能为地震电离层现象的研究提供一些参考。但针对本文所得到的结论,还需有以下3个方面的认知:首先,在地震电离层扰动出现时间与震级关系的总结分析中,参与统计的为已报道的、具有地震电离层现象的震例,还有很多震前未观测到电离层异常的震例不在统计范围内,因此,并非所有地震事件均符合该变化规律;其次,在以往的地震电离层现象研究工作中,由于一些震例研究只分析震前较短的时间段,所以,在分析结果中震前较短时间范围内的异常分布较多,较长时间段内的震例分析样本较少,对地震电离层扰动出现时间边界包络线拟合有一定的影响;最后,在地震电离层扰动空间分布方位的统计结果中,由于在一些研究中未给出精确的异常方位,本文也仅从8个方向统计,统计结果方位分辨较低,只能说明异常在南、北方向上分布较多。

从震例研究和统计研究的介绍中可以看到,地震电离层现象表现出极为复杂的变化特征。造成这种复杂的原因较多,例如:电离层对不同地震的响应范围随着震级增加而扩大,且在不同的震中距上响应幅度也会有所不同;不同的震源机制会使电离层在不同方位上的响应产生差异;不同时间分辨率的电离层观测数据的变化,反映地震过程中的不同组成部分,“天”以上的单位反映的是地震震源的演化过程,而“时”以下的单位则是反映了地震区域电场演化和电离层演化的结合;卫星飞越地震活动区上空的时间以及其相对未来地震震中的位置的不确定性;电离层自身变化的高动态性及易受到多种条件影响的不稳定性,等等。正是在上述众多因素的影响和控制下,电离层异常现象变得十分复杂和难以捕捉。

如今不同探测方式获得的多种参量被应用到地震电离层现象研究中,有基于地基的观测,有基于空基的观测,还有基于空地基的联合观测。基于这些观测数据的震例研究和统计研究工作均得到了大量开展,新的地震电离层现象被不断报道,与地震事件的关联性得到验证,地震电离层异常特征也愈加明显。但受多种因素的影响,异常特征仍具有复杂性,依然很难应用到地震预测预报实践中。近年来,随着卫星观测技术的发展,多颗卫星联合组成星座的观测方式,将成为未来空间探测的新途径。相比单一卫星观测,该方式大幅提高了时、空间分辨力,能完成更高效的探测,通过结合地基的天地一体化立体、多途径监测,将有助于提升异常的识别和判别能力。

此外,不同卫星、载荷、观测参量之间的相关性分析在国内外的研究程度明显不足,其背后的理论支撑亟需加快发展(张学民等,2016)。基于大量震例研究的基础,学者们针对岩石圈-大气层-电离层耦合提出了多种耦合机制模型,而针对各种耦合机制也很难形成统一的认识,依然存在较大争论(Pulinets et al,2018b)。因此,针对地震电离层现象的研究,仍然需要

增加震例研究,尤其是多参量相互校验的震例研究,寻找更多的证据支撑,积累研究经验和检测样本;此外,仍需开展更细化的统计分析工作,结合不同的震源机制探索地震电离层现象的普遍特征,揭示地震与电离层现象的内在规律;最后,仍需探索和实践异常的判别和提取方法。这对认识和了解地震的孕育和发生过程、解释地震电离层的耦合关系以及未来在防震减灾工作中的应用均具有重要的意义。

致谢: 论文得到了吴忠良研究员的指导,在此表示衷心的感谢。

参考文献

- 蔡军涛,陈小斌,赵国泽,等,2007. 地震前兆:电离层 F_2 层异常. 地球物理学进展, **22**(3):720~728.
- 丁鉴海,申旭辉,潘威炎,等,2006. 地震电磁前兆研究进展. 电波科学学报, **21**(5):791~801.
- 董建,颜蕊,张景发,等,2009. 基于 DEMETER 卫星观测数据的电离层地震前兆分析:以汶川地震、东海地震为例. 地震, **29**(B10):67~75.
- 杜品仁,蒋和荣,郭兼善,1998. 电离层异常能否作为地震前兆的研究. 地震, **18**(2):119~126.
- 黄建平,刘静,欧阳新艳,等,2010. 智利 8.8 级地震前后高能粒子数据变化分析. 地震地质, **32**(3):417~423.
- 黄林峰,黄江,曹静,等,2012. 2011 年 3 月 24 日缅甸地震期间电离层 TEC 异常分析. 华南地震, **32**(1):11~18.
- 焦其松,颜蕊,张景发,2011. Demeter 卫星监测到的海地地震前电离层扰动. 地震, **31**(2):68~78.
- 李施佳,蔡昌盛,付凯斌,2012. 用 GPS 观测数据探测日本 9.0 级地震的电离层异常. 大地测量与地球动力学, **32**(3):36~40.
- 李旺,郭金运,于学敏,等,2014. 由 GPS 探测的大地震前 TEC 异常扰动. 全球定位系统, **39**(2):18~25.
- 李新乔,马宇倩,王焕玉,等,2010. 空间电磁卫星的粒子探测与汶川地震. 地球物理学报, **53**(10):2337~2344.
- 林钰翔,2004. 利用全球定位系统观测电离层地震前兆. 硕士学位论文. 台湾,中国:国立中央大学太空科学所.
- 刘静,张学民,申旭辉,等,2009. 九江地震前 DEMETER 卫星观测到的电离层异常. 地震, **29**(增刊 I):60~66.
- 刘静,万卫星,黄建平,等,2011. 智利 8.8 级地震的震前电子浓度扰动. 地球物理学报, **54**(11):2716~2725.
- 刘静,黄建平,张学民,等,2013. 基于 DEMETER 卫星原位等离子体参量的震前异常提取方法研究及震例分析. 地震学报, **35**(1):72~83.
- 刘莹,戴吾蛟,章文毅,等,2013. 2012 年 4 月苏门答腊岛地震电离层电子密度异常研究. 大地测量与地球动力学, **33**(3):30~33.
- 欧阳新艳,张学民,申旭辉,等,2008. 普洱地震前电离层电子密度扰动变化研究. 地震学报, **30**(4):424~436.
- 欧阳新艳,张学民,申旭辉,等,2011. DEMETER 卫星探测到的强震前 O^+ 浓度变化. 空间科学学报, **31**(5):607~617.
- 钱庚,泽仁志玛,张学民,等,2016. 强震前后空间电磁场时空演化特征. 地震学报, **38**(2):259~271.
- 王泽民,孙伟,安家春,2016. 2015-04-25 尼泊尔 $M_s 8.1$ 地震前后电离层 VTEC 异常变化分析. 大地测量与地球动力学, **36**(2):133~137.
- 吴云,付宁波,林剑,等,2011. 用卡尔曼滤波法分析汶川 $M_s 8.0$ 地震 TEC 异常. 大地测量与地球动力学, **31**(2):23~27.
- 熊晶,吴云,祝芙英,等,2008. 汶川地震前电离层 NmF2 异常扰动. 大地测量与地球动力学, **28**(6):22~26.
- 熊晶,周义炎,吴云,2010. 玉树 $M_s 7.1$ 地震前电离层 VTEC 异常. 大地测量与地球动力学, **30**(5):24~27.
- 徐彤,胡艳莉,吴健,等,2012. 中国大陆 14 次强震前电离层异常统计分析. 电波科学学报, **27**(3):507~512.
- 闫相相,单新建,曹晋滨,等,2014. 利用 DEMETER 卫星数据统计分析全球 $M_w \geq 7.0$ 地震的电离层电子浓度异常. 地球物理学报, **57**(2):364~376.
- 姚丽,陈化然,何宇飞,2013. 玉树地震前电离层 VLF 信号信噪比变化. 地震学报, **35**(3):390~399.
- 姚璐,申旭辉,张学民,2014. 玉树 $M_s 7.1$ 地震前电离层异常扰动分析. 地震, **34**(3):74~85.
- 余素荣,丁鉴海,索玉成,2004. 玛尼 7.5 级地震前磁场与电离层异常特征研究. 地震, **24**(增刊 I):77~83.
- 泽仁志玛,张学民,刘静,等,2010. 利用 DEMETER 卫星 LANGMIUR 探针观测数据研究强震前的电离层扰动. 地震地质, **32**(3):424~433.

- 泽仁志玛,申旭辉,曹晋滨,等,2012. 强震前 ELF/VLF 磁场的扰动特征统计研究. 地球物理学报, **55**(11):3699~3708.
- 张明敏,刘智敏,刘盼,等,2018. 九寨沟 7.0 级地震前电离层 TEC 异常分析. 测绘工程, **27**(12):24~30.
- 张学民,钱家栋,欧阳新艳,等,2009a. 新疆于田 7.2 级地震前的电离层电磁扰动. 空间科学学报, **29**(2):213~221.
- 张学民,钱家栋,欧阳新艳,等,2009b. DEMETER 卫星观测到的智利 7.9 级地震前的电离层电磁扰动. 地球物理学进展, **24**(4):1196~1203.
- 张学民,申旭辉,欧阳新艳,等,2009c. 汶川 8 级地震前空间电离层 VLF 电场异常现象. 电波科学学报, **24**(6):1024~1032.
- 张学民,泽仁志玛,申旭辉,等,2011. 地震前后电离层截止频率处电场频谱强度变化分析——以 2006 年汤加 M_w 8.0 地震为例. 地震学报, **33**(4):451~460.
- 张学民,刘静,赵必强,等,2014. 玉树地震前的电离层异常现象分析. 空间科学学报, **34**(6):822~829.
- 张学民,申旭辉,赵庶凡,等,2016. 地震电离层探测技术及其应用研究进展. 地震学报, **38**(3):356~375.
- 赵国泽,陈小斌,蔡军涛,2007. 电磁卫星和地震预测. 地球物理学进展, **22**(3):667~673.
- 周长志,张珂,张海平,等,2017. 由 GPS 探测的 Sumatra 地震前电离层异常研究. 山东理工大学学报(自然科学版), **31**(4):71~75.
- 朱荣,杨冬梅,荆凤,等,2008. DEMETER 卫星观测到的云南普洱地震前的电离层扰动. 地震学报, **30**(1):76~81.
- Akhoondzadeh M, De Santis A, Marchetti D, et al, 2017. Multi precursors analysis associated with the powerful ecuador ($M_w = 7.8$) earthquake of 16 april 2016 using swarm satellites data in conjunction with other multi-platform satellite and ground data. Adv Space Res, **61**(1):248~263.
- Aleksandrin S Y, Galper A M, Grishantzeva L A, et al, 2003. High-energy charged particle bursts in the near-Earth space as earthquake precursors. Ann Geophys, **21**(2):597~602.
- Antsilevich M G, 1971. The influence of Tashkent earthquake on the Earth's magnetic field and the ionosphere. Tashkent earthquake 26 April 1966. Tashkent:FAN, 187~188.
- Bošková J, Šmilauer J, Trřska P, et al, 1994. Anomalous behaviour of plasma parameters as observed by the intercosmos 24 satellite prior to the Iranian earthquake of 20 June 1990. Stud Geophys Geod, **38**(2):213~220.
- Cahyadi M N, Heki K, 2013. Ionospheric disturbances of the 2007 Bengkulu and the 2005 Nias earthquakes, Sumatra, observed with a regional GPS network. J Geophys Res Space Phys, **118**(4):1777~1787.
- Chmyrev V M, Isaev N V, Bilichenko S V, et al, 1989. Observation by space-borne detectors of electric fields and hydromagnetic waves in the ionosphere over an earthquake centre. Phys Earth Planet Inter, **57**(1~2):110~114.
- Chuo Y J, Chen Y I, Liu J Y, et al, 2001. Ionospheric foF2 variations prior to strong earthquakes in Taiwan area. Adv Space Res, **27**(6~7):1305~1310.
- Chuo Y J, Liu J Y, Kamogawa M, et al, 2002b. The anomalies in the foEs prior to $M \geq 6.0$ Taiwan earthquakes. In: Seismo Electromagnetic: Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling, TERRA PUB, Tokyo, 309~312.
- Chuo Y J, Liu J Y, Pulinets S A, et al, 2002a. The ionospheric perturbations prior to the Chi-Chi and Chia-Yi earthquakes. J Geodyn, **33**(4~5):509~517.
- Davies K, Baker D M, 1965. Ionospheric effects observed around the time of the Alaskan earthquake of March 28, 1964. J Geophys Res, **70**(9):2251~2253.
- De Santis A, Balasis G, Pavón-Carrasco F J, et al, 2017. Potential earthquake precursory pattern from space: the 2015 Nepal event as seen by magnetic Swarm satellites. Earth Planet Sci Lett, **461**:119~126.
- Dobrovolsky I P, Zubkov S I, Miachkin V I, 1979. Estimation of the size of earthquake preparation zones. Pure Appl Geophys, **117**(5):1025~1044.
- Fidani C, Battiston R, Burger W J, 2010. A study of the correlation between earthquakes and NOAA satellite energetic particle bursts. Remote Sens, **2**(9):2170~2184.
- Fidani C, Battiston C, Burger W J, et al, 2012. A study of NOAA particle flux sensitivity to solar activity and strategies to search for correlations among satellite data and earthquake phenomena. Int J Remote Sens, **33**(15):4796~4814.
- Gokhberg M B, Morgounov V A, Yoshino T, et al, 1982. Experimental measurement of electromagnetic emissions possibly related to earthquakes in Japan. J Geophys Res Solid Earth, **87**(B9):7824~7828.

- Hayakawa M, 2004. Electromagnetic phenomena associated with earthquakes: A frontier in terrestrial electromagnetic noise environment. *Recent Res Devel Geophys*, **6**:81~112.
- Hayakawa M, 2009. Lower ionospheric perturbations associated with earthquakes, as detected by subionospheric VLF/LF radio waves. In: Hayakawa H. *Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes*. Trivandrum: Transworld Research Network, 137~185.
- Hayakawa M, Molchanov O A, Kodama T, et al, 2000. Plasma density variations observed on a satellite possibly related to seismicity. *Adv Space Res*, **26**(8):1277~1280.
- Heki K, 2011. Ionospheric electron enhancement preceding the 2011 Tohoku-Oki earthquake. *Geophys Res Lett*, **38**(17):L17312.
- Kim V P, Hegai V V, 1999. A possible presage of strong earthquake in the night-time mid-latitude F2 region ionosphere. In: *Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes*. Tokyo: Terra Scientific Publishing Company, 619~627.
- Kon S, Nishihashi M, Hattori K, 2011. Ionospheric anomalies possibly associated with $M \geq 6.0$ earthquakes in the Japan area during 1998~2010: case studies and statistical study. *J Asian Earth Sci*, **41**(4~5):410~420.
- Larkina V I, Nalivayko A V, Gershenzon N I, et al, 1983. Observations of VLF emission, related with seismic activity, on the Interkosmos-19 satellite. *Geomagn Aeron*, **23**(5):684~687.
- Le H, Liu J Y, Liu L, 2011. A statistical analysis of ionospheric anomalies before 736 $M6.0+$ earthquakes during 2002~2010. *J Geophys Res Space Phys*, **116**(A2):A02303.
- Liperovsky V A, Meister C V, Liperovskaya E V, et al, 2005. On spread- E_s effects in the ionosphere before earthquakes. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, **5**(1):59~62.
- Liu J Y, Chen Y I, Chuo Y J, et al, 2001. Variations of ionospheric total electron content during the Chi-Chi Earthquake. *Geophys Res Lett*, **28**(7):1383~1386.
- Liu J Y, Chen Y I, Pulnits S A, et al, 2000. Seismo-ionospheric signatures prior to $M \geq 6.0$ Taiwan earthquakes. *Geophys Res Lett*, **27**(19):3113~3116.
- Liu J Y, Chou Y J, Shan S J, et al, 2004. Pre-earthquake ionospheric anomalies registered by continuous GPS TEC measurements. *Ann Geophys*, **22**(5):1585~1593.
- Liu J Y, Le H, Chen Y I, et al, 2011. Observations and simulations of seismoionospheric GPS total electron content anomalies before the 12 January 2010 $M7$ Haiti earthquake. *J Geophys Res Space Phys*, **116**(A4):A04302.
- Liu J Y, Tsai H F, Lin C H, et al, 2010. Coseismic ionospheric disturbances triggered by the Chi-Chi earthquake. *J Geophys Res Space Phys*, **115**(A8):A08303.
- Liu J Y, Tsai Y B, Chen S W, et al, 2006. Giant ionospheric disturbances excited by the $M9.3$ Sumatra earthquake of 26 December 2004. *Geophys Res Lett*, **33**(2):L02103.
- Moore G W, 1964. Magnetic disturbances preceding the 1964 Alaska earthquake. *Nature*, **203**(4944):508~509.
- Molchanov O A, Hayakawa M, Afonin V V, et al, 2002. Possible influence of seismicity by gravity waves on ionospheric equatorial anomaly from data of IK-24 satellite 1. Search for idea of seismo-ionosphere coupling. Tokyo: TERRAPUB, 275~285.
- Molchanov O A, Rozhnov A, Solovieva M, et al, 2006. Global diagnostics of the ionospheric perturbations related to the seismic activity using the VLF radio signals collected on the DEMETER satellite. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, **6**(5):745~753.
- Němec F, Santolík O, Parrot M, et al, 2008. Spacecraft observations of electromagnetic perturbations connected with seismic activity. *Geophys Res Lett*, **35**(5):L05109.
- Onдох T, 2009. Investigation of precursory phenomena in the ionosphere, atmosphere and groundwater before large earthquakes of $M > 6.5$. *Adv Space Res*, **43**(2):214~223.
- Onдох T, Hayakawa M, 1999. Anomalous occurrence of sporadic E-layers before the Hyogoken-Nanbu earthquake, $M7.2$ of January 17, 1995. In: Hayakawa M. *Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes*. Tokyo: Terra Scientific Publishing Company, 629~639.
- Onдох T, Hayakawa M, 2002. Seismo discharge model of anomalous sporadic E ionization before great earthquakes. In: *SeismoElectromagnetic: Lithosphere Atmosphere Ionosphere Coupling*. TERRAPUB, Tokyo, 385~390.

- Parrot M, Achache J, Berthelier J J, et al, 1993. High-frequency seismo-electromagnetic effects. *Phys Earth Planet Inter*, **77**(1~2): 65~83.
- Parrot M, Benoist D, Berthelier J J, et al, 2006a. The magnetic field experiment IMSC and its data processing onboard DEMETER: Scientific objectives, description and first results. *Planet Space Sci*, **54**(5): 441~455.
- Parrot M, Berthelier J J, Lebreton J P, et al, 2006b. Examples of unusual ionospheric observations made by the DEMETER satellite over seismic regions. *Phys Chem Earth Parts A/B/C*, **31**(4~9): 486~495.
- Parrot M, Lefeuvre F, 1985. Correlation between GEOS VLF emissions and earthquakes. *Ann Geophys*, **3**(6): 737~747.
- Parrot M, Li M, 2015. Demeter results related to seismic activity. *URSI Radio Sci Bull*, **2015**(355): 18~25.
- Parrot M, Mogilevsky M M, 1989. VLF emissions associated with earthquakes and observed in the ionosphere and the magnetosphere. *Phys Earth Planet Inter*, **57**(1~2): 86~99.
- Pulinets S A, 1998a. Strong earthquake prediction possibility with the help of topside sounding from satellites. *Adv Space Res*, **21**(3): 455~458.
- Pulinets S A, 1998b. Seismic activity as a source of the ionospheric variability. *Adv Space Res*, **22**(6): 903~906.
- Pulinets S A, Boyarchuk K, 2004. *Ionospheric Precursors of Earthquakes*. Berlin, Germany: Springer, 75~81.
- Pulinets S A, Legen'ka A D, Hegai V V, et al, 2018a. Ionosphere disturbances preceding earthquakes according to the data of ground based station of the vertical ionospheric sounding Wakkanai. *Geomagn Aeronomy*, **58**(5): 686~692.
- Pulinets S A, Legen'ka A D, 2003. Spatial-temporal characteristics of large scale disturbances of electron density observed in the ionospheric f-region before strong earthquakes. *Cosmic Res*, **41**(3): 221~230.
- Pulinets S A, Ouzounov D, Karelin A, et al, 2018b. Lithosphere-atmosphere-ionosphere-magnetosphere coupling-a concept for pre-earthquake signals generation. In: Ouzounov D, Pulinets S, Hattori K, et al. *Pre-Earthquake Processes: A Multidisciplinary Approach to Earthquake Prediction Studies*. Washington: AGU, 79~98.
- Rozhnoi A, Molchanov O, Solovieva M, et al, 2007. Possible seismo-ionosphere perturbations revealed by VLF signals collected on ground and on a satellite. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, **7**(5): 617~624.
- Sarkar S, Gwal A K, Parrot M, 2007. Ionospheric variations observed by the DEMETER satellite in the mid-latitude region during strong earthquakes. *J Atmos Solar-Terr Phys*, **69**(13): 1524~1540.
- Serebryakova O N, Bilichenko S V, Chmyrev V M, et al, 1992. Electromagnetic ELF radiation from earthquake regions as observed by low-altitude satellites. *Geophys Res Lett*, **19**(2): 91~94.
- Sgrigna V, Carota L, Conti L, et al, 2005. Correlations between earthquakes and anomalous particle bursts from SAMPEX/PET satellite observations. *J Atmos Sol-Terr Phys*, **67**(15): 1448~1462.
- Sharma D K, Israil M, Chand R, et al, 2006. Signature of seismic activities in the F2 region ionospheric electron temperature. *J Atmos Solar-Terr Phys*, **68**(6): 691~696.
- Tao D, Cao J B, Battiston R, et al, 2017. Seismo-ionospheric anomalies in ionospheric TEC and plasma density before the 17 July 2006 *M* 7.7 south of Java earthquake. *Ann Geophys*, **35**(3): 589~598.
- Voronov S A, Galper A M, Koldashov S V, et al, 1987. Registration of sporadic increase of high energy particle flux near the Brazilian anomaly region. *Proceedings of the 20th International Cosmic Ray Conference*. Moscow, **4**: 451~452.
- Yoshida M, Yamauchi T, Horie T, et al, 2008. On the generation mechanism of terminator times in subionospheric VLF/LF propagation and its possible application to seismogenic effects. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, **8**(1): 129~134.
- Zaslavski Y, Parrot M, Blanc E, 1998. Analysis of TEC measurements above active seismic regions. *Phys Earth Planet Inter*, **105**(3~4): 219~228.
- Zhao B Q, Hao Y Q, 2015. Ionospheric and geomagnetic disturbances caused by the 2008 Wenchuan earthquake: A revisit. *J Geophys Res Space Phys*, **120**(7): 5758~5777.

Preliminary Studies on Seismo-ionospheric Phenomena

*He Yufei*¹⁾ *Yang Dongmei*¹⁾ *He Shaopeng*²⁾

1) Institute of geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

2) Hongshan Seismic Station, Hebei Earthquake Agency, Xingtai 054000, Hebei, China

Abstract The seismo-ionospheric phenomena, as one of the physical phenomena related with earthquake events, have been reported continuously with the accumulation of observation data and the related earthquake case studies. At present, the lithosphere-ionosphere coupling has become an interdisciplinary subject of seismology and space ionospheric physics, and has become a research hotspot. A great deal of research work on seismo-ionospheric phenomenon suggested that the ionospheric anomalies are very complex. In this paper, we briefly reviewed the main research achievements of some major seismo-ionospheric phenomena in recent years. The main research results are firstly classified according to research parameters, earthquake magnitude, occurrence time, anomaly location, positive or negative changes, then the relation between the occurrence time and earthquake magnitude, the spatial distribution characteristic of the anomaly, the relation between the epicentre distance and the earthquake magnitude are obtained. The results of our work are expected to provide some references for the future studies on seismo-ionospheric phenomena.

Keywords: Seismo-ionospheric phenomena; Seismic; Ionospheric anomaly; Electromagnetic satellite