

电磁卫星和地震预测

赵国泽, 陈小斌, 蔡军涛

(中国地震局地质研究所, 北京 100029)

摘要 地震前几周、几天、几小时甚至几分钟,电磁场的强度、相位或者谱密度等将发生异常变化,电离层的电子、离子浓度和温度等会发生异常扰动,这些现象的出现向人们发出地震即将来临的信号.这些现象不仅在地面可观测到,在卫星上也能观测到,它们在确定异常现象发生的地点和时间等方面具有各自的优势,把两种观测相结合,对异常信号进行立体监测,是实现地震预测预报的发展趋势.至今,对地面观测已经进行了大量的研究和实践,利用卫星进行观测近几年刚刚开始,但已经显示了它监测地震异常的独特能力,引起各方面的高度重视,成为各国建立立体预警系统不可缺少的组成部分.本文重点介绍利用卫星等观测空间电磁异常现象的研究结果.

关键词 地震,电磁,卫星,监测,预警

中图分类号 P315

文献标识码 A

文章编号 1004-2903(2007)03-0667-07

Electromagnetic observation by satellite and earthquake prediction

ZHAO Guo-ze, CHEN Xiao-bin, CAI Jun-tao

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

Abstract Anomalous amplitude, phase and power spectrum of electromagnetic field can occur during a few weeks, days, hours and/or minutes before earthquakes. The disturbance of density and temperature for both of electron and ion in the ionosphere can also exist in these time periods. These phenomena can be observed not only on the earth surface but also by satellite. The different advantages on determination of place and time of earthquake occurrence are appeared by using the data observed on the earth surface and by satellite respectively. The combination of these two kinds of data and establishment of cubic monitoring system is a tendency. The great lot of study on the data obtained on earth surface has been carried out. The observation by satellite has been just started recent years but its potential ability has been appeared which is going to become a necessary part of monitoring prime of warning signal transmitted by earthquake preparing. This paper will outline the research results on the electromagnetic anomalies observed by satellite.

Keywords earthquake, electromagnetics, satellite, monitoring, warning signal

0 引 言

地震灾害是人类面临的最严重的自然灾害之一,地震预测预报是当今世界最重要的科学难题之一.长期以来,人类对于地震预报研究投入了巨大的精力,给与极大关注^[1~2].自 20 世纪中期以来,世界许多相关学科领域的专家,针对灾难性地震预报问题开展了多方面的大量研究,特别是 20 世纪 70、80

年代以来,随着现代技术和空间技术的发展,证实地震之前的前兆现象是确实存在的,并预言地震预测最终是能够实现的^[3~4].

大量观测资料表明,地质学、地球物理学和地球化学等的许多现象中,电磁异常是对短临地震反映最敏感的前兆现象^[5~7].采用地面观测和空间观测相结合的综合观测研究,建立立体观测体系,是突破地震预测难题的必经之路.

收稿日期 2007-01-26; 修回日期 2007-03-16.

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 赵国泽,男,1946 年生,河北石家庄人,中国地震局地质研究所研究员,博士生导师,地球电磁探测研究中心主任,2004~2006 任所学位评定委员会主任,中国地球物理学会地球电磁专业委员会主任,主要从事地球电磁法及其应用研究.(E-mail: zhaogz@ies. ac. cn)

空间电磁观测包括电场和磁场观测、电离层的电子、离子和高能粒子以及电离层结构扰动观测等^[7~12]。地面观测和空间观测具有各自的优势,地面观测对观测站附近发生的地震有较清楚的反应^[13~14],但由于受地域和环境如地形、气候等的影响,地面观测站分布很不均匀,特别是在一些地震多发地区,难以布置地面台站,减少了对地震研究和预报的机会。

利用卫星技术等进行的空间观测,具有对地球全覆盖、时间可连续的优势^[15~16],在较大区域对地震发生的时间反映较好。而且由于地球一大气层~电离层之间的耦合作用,使地面出现的一些地震前兆异常信号在向空间传播过程中被放大,因此在空间能较容易观测^[17]。

近些年来,人们对卫星等空间飞行器上观测的电磁资料进行了大量深入研究,发射了专门用于监测地震的电磁卫星^[18~21],取得了可喜的成果。

本文将简述利用卫星等观测到的地震前出现的空间电磁异常现象,以及地面—空间立体地震监测系统的建设,并与以下的 8 篇文章分别阐述相关空间观测的最新研究发展动态。

1 地震前兆空间电磁现象

Barnes^[22](1965)最早发现在阿拉斯加大地震时,存在电离层的扰动现象,并提出电离层的扰动与地震的发生之间存在一定的关系。尔后,Antselevich^[23](1971)和 Datchenko^[24](1972)分别研究发现,1966 年 Tashkent 地震前的 E 层临界频率和电子浓度的异常变化。

自上世纪 80 年代,特别是近十年来,人们对地震引起的电离层扰动和空间电磁场异常进行了有针对性地集中研究。较早发现空间电磁场异常与地震关系的是,前苏联 OGO-06 卫星在 1970. 3. 30 某地震前飞过震中附近上空时,记录到 100 Hz、216 Hz 和 467 Hz 等频率清晰的磁场脉动异常(图 1)^[25]。

在大量研究的基础上,1997 年 10 月俄罗斯科学院举行了大型专题科学讨论会“地面—宇宙无线电物理方法对灾难性地震的短期预报”,会后决议明确提出,实施卫星“矩阵”计划进行地震短临预报研究^[26]。日本和俄罗斯科学家还联合提出利用空间和地面主动源和被动源电磁场监测地震异常的前沿综合探测计划 RIKEN 和 NASDA 项目^[27]。

2003 年 6 月美国 QuakeFinder 机构等率先发射了 QuakeSat 概念型电磁微小卫星,主要监测美

国西部地震带的磁场异常变化。2004 年 6 月 29 日,由法国牵头的多国机构发射了世界上第一个真正专门用于监测地震电磁辐射的太阳同步卫星 DEMETER (Detection of ElectroMagnetic Emission Transmitted from Earthquake Region),卫星载荷包括测量 3 分量电场、3 分量磁场、电子密度和浓度、离子密度和浓度以及高能粒子谱的仪器,卫星飞行高度小于 800 km^[18]。

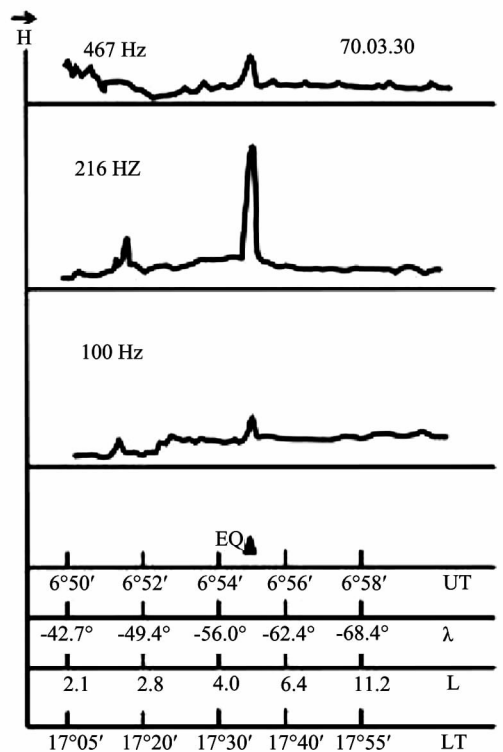


图 1 1970. 3. 30 某地震震中附近上空,OGO-06 卫星记录到的 100 Hz、216 Hz 和 467 Hz 频率的磁场随时间和空间的变化,发现磁场增大的脉动异常。其中:UT-世界时,λ-经度,L-纬度,LT-地方时^[25]

Fig. 1 Anomalous pulses of magnetic field recorded by satellite OGO-06

2004 年底乌克兰发射了 SICH-1M 地震电磁卫星,并计划在 2009 年发射 IONOSATS 地震探测星座^[28]。2005 年意大利利用 LAZIO-SIRAD 空间站资料,分析了地震引起的电离层扰动^[29]。2005 年美国 Quakefinder 和斯坦福大学等专家提出,用 10~12 年建成空间电磁探测和地面电磁测量相结合的地震预警信号监测系统^[6]。2006 年 5 月 26 日俄罗斯又发射了另一颗监测地震征兆的电磁卫星 COM-PASS-2 (Complex Orbital Magneto-Plasma Auton-

omous Small Satellite-2),携带的磁场仪频带范围是 1 Hz~20 kHz^[30].

DEMETER 地震电磁卫星发射升空虽然仅两年多的时间,但已探测到世界上一些大地震发生区上空超低频(SLF)等频带范围电磁场的异常和电离层扰动现象.例如,2004 年 9 月 5 日在日本发生 6.9 和 7.4 级地震前,记录到小于 500Hz 频段的电磁波截止频率突然增强的现象.在 2004 年 9 月 15 日菲律宾 6.0 地震前 2 天(13 日),当卫星经过震中上空附近时,SLF 频段电场功率谱密度谱比正常的谱增大了约 1 个量级,同时也记录到电子浓度、电子温度和离子浓度的明显增大(图 2)^[31].

图中自上至下分别表示:电场谱、电子密度、电子温度、离子密度、卫星高度. UT/LT-世界时/地方时, Lat-磁纬度, Long-经度, Inv. Lat-纬度. 图中显示,卫星经过震中上空附近时,SLF 频段电场功率谱密度谱比正常的谱增大了约 1 个量级,同时也显示电子浓度、电子温度和离子浓度的脉动增大^[31].

此外,日本科学家利用在日本西海岸 Tsushima 发射的 VLF 导航信号,在东海岸的 Inubo 台站接收,记录到距电波路径约 70 km 神户 M=7.2 地震(1995 年 1 月 17 日)前晨昏界限时时差增大的异常,增大值达到月平均值偏差的 2 倍以上(图 3).他们利用该技术,对比了 9 次异常和地震发生之间的关系,发现其中 5 次异常对应了地震的发生,1 次不确

定,3 次未发生地震^[32].利用 VLF 导航信号也发现,1990 年 6 月 20 日伊朗西部大地震(M=7.5)前出现相位异常^[33].

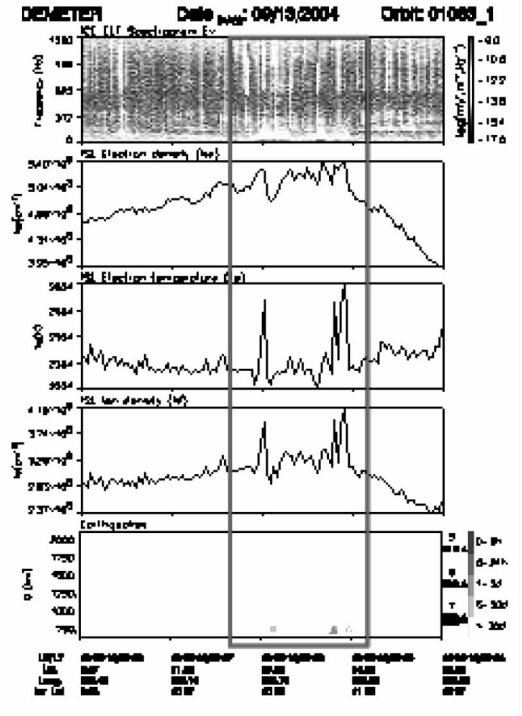


图 2 2004.9.15 菲律宾一次地震前 DEMETER 卫星记录到的电场、粒子扰动异常
Fig. 2 Electric spectrum and particle disturbances observed by Satellite DEMETER

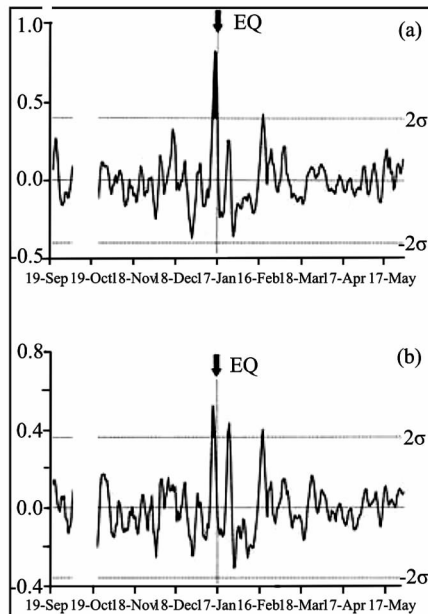
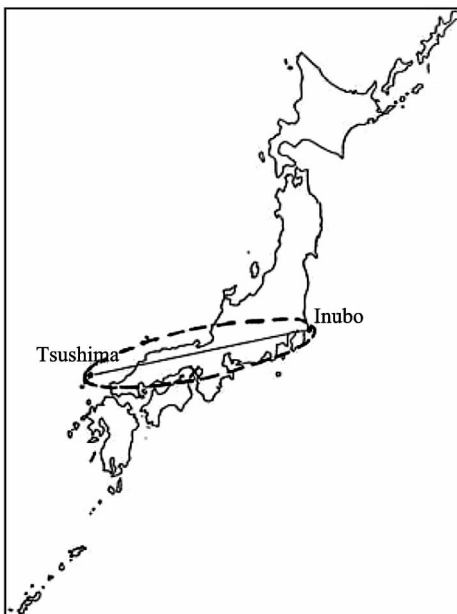


图 3 用 VLF 观测到神户地震(1995.1.17, M=7.2)前月亮晨昏界限时时差,是月平均值标准偏差的 2 倍以上(右图);发射点:Tsushima,接收点:Inubo(左图)^[32]

Fig. 3 Anomalous large disturbance of Terminator Time (TT) recorded before Kobe earthquake

除电磁场本身的前兆现象外,也发现了大量其它空间地震前兆电磁现象,例如电离层临界频率、电子、离子、粒子、热、光等前兆异常现象^[34~35].

S. A. Pulinets 等^[19](2006)统计了在地震前出现的各种电磁地震前兆现象已经公开发表的论文数量(表 1). 可以看到,地震前电磁异常现象不仅是不容置疑的,而且是多样的. 至于表中不同电磁现象数量的排序,由于对它们研究的起始时间或者连续性不同,不一定完全反映实际前兆数量的顺序,但这些异常现象的存在是确定的.

表 1 地震前兆电磁现象发表论文数量

Table 1 The paper number where the electromagnetic precursory are indicated

地震前兆	论文发表数
电离层前兆(临界频率变化)	>100
VLF 电磁辐射	~50
热前兆	~30
粒子沉降	~15
光辐射	~10
平均离子质量变化	~10
ELF 电磁辐射	~10
小尺度异常	~5

大量统计资料还表明,地震前电磁异常出现的时间一般在震前几天到几小时直至几分钟,这一特点对地震短临预测很有意义. 俄罗斯专家给出了各种电磁异常现象的特征、观测高度和震前时间的统计结果^[36].

表 2 空间地震电磁现象

Table 2 The anomalous electromagnetic and ionosphere phenomena

方法	参数	物理特征	高度/km	震前异常时间
卫星观测	电磁场频带	振幅增大	600 以上	几天到几小时
		1~10 kHz 达 20 分贝		
F2 垂直测量	f0F2 均值	f0F2 增大	300~400	1~3 昼夜
测光	I6900 光强度	增大 15~40%	300	几昼夜
		相对极小		几小时
超长波透射	信号相位	相移 15%	60~90	几昼夜
多普勒测量	多普勒相移 Δf	离散度增大 $\Delta f(t)$	200~300	几分钟~几小时
夜间 Es 层探测	fbEs 均值	fbEs 减少	100~300	几小时~几昼夜
夜间 Es 层探测	两台站的相关系数(K)	K 值减少	100~130	1~3 昼夜
X 射线	相位信号	相移达 15%	60~90	几昼夜

另外,20 世纪 90 年代,一种新的电磁观测技术—人工源超低频/极低频(SLF/ELF)电磁技术正在被应用于地震监测研究中. 该技术是在某一个固定地点发射大功率的电磁场信号,经过地面和电离层之间的“波导”向空间传播达数千、上万公里以上,在信号覆盖范围的任何台站或测点同时测量这种信号,其既研究大气层、电离层等电磁场异常变化,也研究地下电阻率结构的异常变化^[37].

俄罗斯专家采用该技术,用人工爆破模拟小“地震”的发生,测量到“地震”引起的电磁场和电阻率的变化^[38]. 1999 年中、俄研究人员合作,在我国首都圈宝坻地震观测台等测量约 6500km 外俄罗斯斯科拉半岛发射台发射的超低频信号进行地震监测试验. 试验表明,观测的人工场源数据的信噪比一般都达到 1 个数量级以上. 特别是,在宝坻地震观测台连续 10 天(5 月 4~14 日)的试验中,巧遇到 5 月 12 日距地震台约 100 公里处发生了 4.2 级地震. 在地震前 2 天即 5 月 10 日,电、磁场开始出现较大幅度的波动,波动幅度是平均波动幅度的 3~4 倍左右,震后逐渐恢复,这期间视电阻率和阻抗相位也变化了约 20% (图 4)^[39].

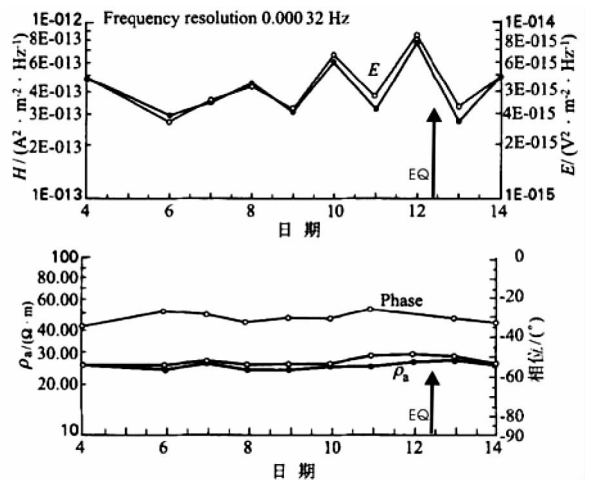


图 4 1999 年 5 月 4 日到 14 日在宝坻地震台观测的 SLF 电、磁场功率谱密度及其变化(上图),视电阻率和阻抗相位的变化(下图). 图中显示,在地震前 2 天电磁场变化幅度为其它时间波动的几倍以上,同时视电阻率变动达到约 20% 左右^[38].

Fig. 4 Anomalies in electric and magnetic spectrum and apparent resistivity before an earthquake

经过几十年的研究,人们逐步认识到,对电磁现象进行观测研究是突破地震预报不可或缺的重要方

面,如果能够说明这些异常现象和地壳内物理过程的关系,就能对地震作出预报^[5,40]。

目前,对于地震前出现电磁异常的机制还处于研究阶段,初步研究结果认为,在地震孕育过程中地壳应力、应变条件的变化,使岩石或裂隙(或孔隙)发生运动或变形,从而发生压电、压磁效应、摩擦生电、生磁效应等,激发地壳内环境电磁场发生异常变化,这些异常在地壳和周围空间传播或辐射,在地球表面或卫星上可观测到^[41~44]。

如果地壳岩石的孔隙或裂隙内存在流体,岩石变形会使流体发生电离,使电子逃离,并产生正电穴。研究表明,这时正电穴向地表移动,而电子则流向热的地幔,于是在地球表面出现了正电荷。在近地表面可以观测到它引起的空气电位差的增大,正、负电荷的相对运动,形成电流回路,则能够发生感应和辐射作用,产生异常磁场和电场^[6,45~46]。

空间物理学研究认为,地面出现的异常电磁场,在向高空传播过程中,由于声重力波等作用,而被逐渐放大,因此引起电离层电磁场和粒子的明显扰动^[47]。

总之,地震前出现的异常电磁现象的空间效应是清楚的,利用卫星技术不仅可以观测到这些异常,而且可能比地面观测更容易实现,这也是近几年世界各国专家非常重视利用卫星等空间观测技术监测地震的原因所在。

2 地面-空间立体监测和预警系统建设

地震研究的最终目的是能够对灾难性地震做出准确预报,并发出预警信号。如果在地震前几分钟发出预警信号,人们就可躲避到安全地方,或逃离危险建筑物;在震前几小时发出预警信号,人们就可以关闭水、气管线,危险作业区的人可以关闭设备、备份关键数据,政府可以发出通告;如果有提前几天的预警,人们就可以带上必要的生活必需品,移居到安全场所,政府可启用救援队伍和战略设备,保护桥梁和隧道等。

现在各国专家正在致力于研究和设计由地面和空间探测技术组成的地震电磁前兆的立体监测体系,并进而建设地震预警系统,这已成为地震多发国家政府和专业人员未来几年到十几年努力的目标。在这些建设方案中,较为完善的是2005年美国一些机构提出的建议,其立体监测体系或地震预警信号监测系统,包括空间和地面综合电磁测量,测量的物理现象也是多方面的,包括宽频带的电、磁场异常变

化、电离层的扰动、红外光、空气电导率变化和传统的力学现象以及使用GPS技术观测电离层结构异常和地壳运动等,该建议计划用10~12年左右时间完成^[6]。

为实现上述目标,人们正在做多方面的研究和准备,包括:研究卫星的载荷和飞行轨道、高度以及重访时间等技术问题,继续深入研究地震短临前兆异常出现的规律、观测和识别方法以及异常产生的机理,立体监测系统中实施卫星星座的最佳技术方案等。

3 讨论和展望

卫星等空间观测技术的发展和用已经成为科学和社会发展需求不可缺少的组成部分,它已经并将继续在环境监测和研究、灾害预防和预测、资源探测、信息服务以及军事应用等各个领域发挥重要作用^[48~51]。

地震电磁卫星作为卫星家族中的新成员,由于其观测的电磁现象的普遍性和对地震等灾害反映的特殊灵敏性,在地震预测和其它多领域具有广泛的应用前景和发展潜力,正在受到世界各国专家和有关部门的重视,并制定或陆续实施发射计划。

地震预测作为世界性难题,要取得地震预报的突破性进展,需要研究的内容还很多,地震和相关学科的研究任务还很艰巨。当今,如下领域的研究正在受到关注并不断取得新进展。例如,地震孕育过程中电磁异常产生的物理过程、电磁辐射的物理基础、由地下电磁现象到电离层的耦合和传播机制、卫星载荷的最佳配置方案等。可喜的是,我国有关部门的专家已经并正在对利用卫星技术监测地震活动、突破地震预测难题开展大量的有成效的前期研究。

由于该领域研究发展很快,已经发表了大量的科学论文,本文以及如下几篇文章仅仅是对国际上地震电磁卫星及相关研究领域最新进展的初步概括,期望起到抛砖引玉的作用,推进我国地震电磁卫星科学和技术的发展。

致 谢 本文在编写过程中,得到马宗晋院士的启发和帮助,与法国 DEMETER 卫星首席科学家 M. Parrot 博士进行了有益的讨论,在此表示感谢。

参 考 文 献 (References):

- [1] 陈运泰,滕吉文,张中杰. 地球物理学的回顾与展望[J]. 地球科学进展,2001,16(5):634~642.

- [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.
- [3] 马宗晋. 地震短临前兆和地光[J]. 地震战线,1974,1期.
- [4] Rikitake T. Prediction and precursors of major earthquake, Terra Scientific Publishing Company[J], Tokyo,2001.
- [5] JSA15. Electromagnetic Methods For Monitoring Earthquakes and Volcanic Eruptions[J]. IUGG 99,1999,Birmingham.
- [6] Bleier T, Freund F. Impending earthquake have been sending us warning signals and people are starting to listen[J]. IEEE, Spectrum Int, 2005,12:17~21.
- [7] 王继军,赵国泽,詹艳,等. 中国地震电磁现象的岩石实验分析[J]. 大地测量与地球动力学,2005a,25(2):22~28.
- [8] 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.
- [9] Bleier T, Dunson C. ELF Magnetic Field Monitoring of the San Simeon M6.4 quake from both QuakeSat and a Ground Network[J]. presented at the International Workshop on Seismo Electromagnetics, Tokyo, Japan. 2005.
- [10] Liu J Y, Chen Y L, Pulinets S A, *et al.* Seismoionospheric signatures prior to Ms6.0 Taiwan earthquakes[J]. Geophys. Res. Lett.,2000,27:3113~3116.
- [11] Ondoh T, Hayakawa M. Seismo discharge model of anomalous sporadic E ionization before great earthquakes. Seismo Electromagnetics lithosphere-atmosphere-ionosphere coupling, ed[J]. by Hayakawa, M., and O. A. Molchanov, Tokyo, 2002,385~390.
- [12] Serebryakova O N, *et al.* Electromagnetic ELF Radiation from Earthquake Regions as Observed from Low-Altitude Satellites[J]. Geophysical Research Letters, 1992,19(2):91~94.
- [13] 张继红,乔惠珍. 地磁前兆异常的动态从属函数[J]. 地球物理学进展,2005,20(1):142~146.
- [14] Fraser-Smith A C, Bernardy A, McGill P R, *et al.* Low frequency magnetic field measurement near the epicenter of the Loma-Prieta earthquake[J]. Geophys. Res. Lett., 1990,17:1465~1468.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Gokhberg M B, Gufeld I L, Rozhnoy A A, *et al.* Study of seismic influence on the ionosphere by super long-wave probing of the Earth-ionosphere waveguide[J]. Phys. Earth. Planet. Inter.,1989,57(1-2):64~67.
- [18] Parrot M. The micro-satellite DEMETER[J]. Journal of Geodynamics, 2002,33:535~541.
- [19] Pulinets S A. Space technologies for short-term earthquake warning[J]. Advances in Space Research, 2006, 37:643~652.
- [20] 王继军,赵国泽,詹艳,等. 中国地震电磁现象的观测与研究:地震预测中的电磁卫星[J]. 大地测量与地球动力学,2005b,25(2):11~21.
- [21] 卓贤军,赵国泽,王继军,等. 地震预测中的电磁卫星[J]. 大地测量与地球动力学,2005,25(2):1~5.
- [22] Barnes R A, Leonard R S. Observations of ionospheric disturbances following the Alaska earthquake[J]. J. Geophys. Res.,1965,70:1250~1253.
- [23] 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.
- [24] 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, 12:30~32.
- [25] Gokhberg M B, Pilipenko V A, Pokhotelov O A. Seismic precursors in the ionosphere[J]. Izvestiya Earth Physics, 1983,19:762~765.
- [26] ОИФЗРАН. РЕШЕНИЕ КОНФЕРЕНЦИИ. Краткосрочный прогноз катастрофических землетрясений с помощью радиофизических наземно - космических методов [J]. Москва,1997,30~31.
- [27] Uyeda S, Hayakawa M, Nagao T, *et al.* Electric and Magnetic Phenomena Observed before the Volcano-Seismic Activity in 2000 in the Izu Island Region, Japan[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2002, 99(11): 7352~7355.
- [28] Ivchenko M V, Kozak L V, Venedyktov Y I, *et al.* Ukrainian Youth Satellite: Complex of Scientific Apparati, Scientific Missions. WDS'05 Proceedings of Contributed Papers[J]. Part II, 2005,268~272.
- [29] Casolino M. Sileye-3/LAZIO collaborations. Status and results of the LAZIO-SIRAD and Sileye3/Alteino experiments board the ISS. 10th WRMISS Workshop on Radiation Monitoring for the international space station, Spetember,2005,Japan.
- [30] COMPASS-2 (Complex Orbital Magneto-Plasma Autonomous Small Satellite-2), <http://compass.izmiran.ru>,2006
- [31] First scientific results, 05/10/2004, <http://smc.cnes.fr/DEMETER>,2006
- [32] Molchanov O A, Hayakawa M, Ondoh T, *et al.* Precursory effects in the subionospheric VLF signals for the Kobe earthquake[J]. Phys. Earth Planet. Inter.,1998,105:239~248.
- [33] Bošková J, Šmilauer J, Triska P, Kudela K. Anomalous behaviour of plasma parameters as observed by the Intercosmos 24 satellite prior to the Iranian earthquake of 20 June 1990 [J]. Studia Geoph. Et Geod.,1994,38:213~220.
- [34] 邓志辉,陈梅花,王煜. 卫星热遥感技术在地震预测中应用研究进展[J]. 大地测量与地球动力学,2005,25(2):46~51.
- [35] 单新建,屈春燕,马瑾. 卫星热红外观测与发震断层不同段落交替活动特征分析[J]. 大地测量与地球动力学,2005,25(2):58~62.
- [36] Гусев Г А, Гуфепьб И Л, Литеровский. СДВ РАДИОВОЛНОВОЙ МОНИТОРИНГ КРАТКОСРОЧНОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ.

- Краткосрочный прогноз катастрофических землетрясений с помощью радиофизических наземно - космических методов [J]. Москва,1997,10~11.
- [37] 赵国泽,陆建勋. 利用人工源超低频电磁波监测地震的试验与分析[J]. 中国工程科学,2003a,5(10):27~32.
- [38] 赵国泽,汤吉,邓前辉,等. 人工源超低频电磁波技术及在首都圈地区的测量研究[J]. 地学前缘,2003b,10(Suppl):248~257.
- [39] Saraev A K, Pertel M I, Parfent'ev P A, *et al.* Experiment study of the electromagnetic field from a VLF radio set for the purposes of monitoring seismic activity in the North Caucasus[J]. Izvestiya Physics of the Solid Earth, 1999,35(2):101~108.
- [40] 刘国栋,赵国泽. 大地电磁法新进展[J]. 地球科学进展,1994,9(4):97~100.
- [41] Warwick J W, Stoker C, Meyer T R. Radio emission associated with rock fracture; Possible application to the great Chilean earthquake of May 22 1960[J]. J. Geophys. Res.,1982,87,2851~2859.
- [42] Ogawa T,Oike K,Miura T. Electromagnetic radiation from rocks[J]. J. Geophys. Res.,1985,90:6245~6249.
- [43] Cress G O, Brady B T, Rowell G A. Sources of electromagnetic radiation from fracture of rock samples in laboratory [J]. Geophys. Res. Lett.,1987,14:331~334.
- [44] Enomoto Y, Hashimoto H. Emission of charged particles from indentation fracture of rocks[J]. Nature, 1990,346,641~643.
- [45] Freund F. Time-resolved study of charge generation and propagation in igneous rocks[J]. J. Geophys. Res., 2000,105:11001~11020.
- [46] Freund F T. Rocks that crackle and sparkle and glow; strange pre-earthquake phenomena[J]. Journal of Scientific Exploration,2003,17(1):37~71.
- [47] 萧佐. 50 年来的中国电离层物理研究[J]. 物理,1999,28(4):661~667.
- [48] 刘光鼎,刘代志. 试论军事地球物理学[J]. 地球物理学进展,2003,18(4):576~582.
- [49] 孙成权,曲建升. 国际地球科学发展态势[J]. 地球科学进展,2002,17(3):344~347.
- [50] 杨林章,申旭辉. 空间观测技术在地震监测中的应用[J]. 地震,2005,25(3):129~133.
- [51] 徐文耀,国连杰. 空间电磁环境研究在军事上的应用[J]. 地球物理学进展,2007,22(2):335~344.