

张振霞,李新乔,吴书贵等. 智利地震前 DEMETER 卫星对空间高能粒子的观测. 地球物理学报, 2012, 55(5):1581-1590, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.05.016.

Zhang Z X, Li X Q, Wu S G, et al. DEMETER satellite observations of energetic particle prior to Chile earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(5):1581-1590, doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.05.016.

智利地震前 DEMETER 卫星对空间高能粒子的观测

张振霞^{1,5}, 李新乔², 吴书贵¹, 马宇蓓², 申旭辉⁴,
陈化然³, 王 平², 游新兆¹, 袁亚红³

1 地壳运动监测工程研究中心, 北京 100036

2 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049

3 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

4 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036

5 中国科学院空间天气学国家重点实验室, 北京 100190

摘 要 在地震的孕育或发生期间, 地球内部岩石圈的活动可能会发出电磁辐射, 引起空间电磁扰动, 并通过波粒相互作用引起高能电子的投掷角散射, 导致高能电子的沉降. 本文基于法国 DEMETER 卫星的观测数据, 研究了智利周围区域在智利地震期间空间高能电子的通量、能谱的分布及演化, 发现在智利地震发生前第 11 天和 12 天, 在以震中为中心, 经度跨度 10° , 在 DEMETER 卫星轨道高度上 L 跨度 0.1 的区域内, 有超出背景 4 到 6 倍的高能带电粒子暴的出现, 期间在其北半球磁镜像区域也观测到了显著的电子通量涨高. 粒子暴对应的能谱与 2010 年前三个月的平均能谱存在较大差异. 同时观测到在出现粒子暴的两条轨道上 VLF (Very Low Frequency, 甚低频) 电场频谱分别在 300 Hz 以下以及 13~20 kHz 的频段存在显著增强, 此扰动在时间和地理位置上与高能粒子暴是一致的. 基于回旋共振耦合作用的准线性扩散理论, 本文对所观测事例的电子能量与电磁场扰动频率做了分析计算. 观测数据和理论计算有较好的一致性, 表明该粒子暴源自 ICE (Instrument Champ Electrique, 电磁探测器) 观测到的空间电磁扰动, 这是典型的空间波粒耦合事例. 进一步分析排除了可能引起粒子暴和 VLF 电场扰动的环境因素, 本文认为本次粒子暴和电场扰动的观测可能与智利地震的震前地壳活动存在一定关联.

关键词 DEMETER 卫星, 高能带电粒子暴, VLF 电场扰动, 智利地震, 波粒回旋共振耦合

doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.05.016

中图分类号 P315

收稿日期 2011-09-21, 2012-04-02 收修定稿

DEMETER satellite observations of energetic particle prior to Chile earthquake

ZHANG Zhen-Xia^{1,5}, LI Xin-Qiao², WU Shu-Gui¹, MA Yu-Qian², SHEN Xu-Hui⁴,
CHEN Hua-Ran³, WANG Ping², YOU Xin-Zhao¹, YUAN Ya-Hong³

1 National Earthquake Infrastructure Service, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

2 Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

4 Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

5 State Key Laboratory of Space Weather, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract The lithosphere activity during seismogenic process or occurrence of one earthquake

基金项目 中国地震局地震科技星火计划项目 (XH12066)、中国科学院空间天气学国家重点实验室专项基金资助项目、国家科技支撑计划 (2008BAC35B01, 2008BAC35B05) 资助。

作者简介 张振霞, 女, 1980 年生, 副研究员, 2008 年于北京大学物理学院获得博士学位, 2008 至 2010 年于中国科学院高能物理研究所做博士后, 现在从事空间高能粒子物理的地震相关研究工作. E-mail: zxzhang@neis.gov.cn

may emit electromagnetic waves which propagate to ionosphere and radiation belt, then induce disturbance of electric and magnetic field and the precipitation of high energy charged particles induced by pitch angle scattering from interaction of wave and particle. This paper, based on the data detected by DEMETER satellite, presents the high energy charged particle burst (PB) with 4 to 6 times enhancement over the average value observed about ten days before Chile earthquake in the center of epicenter within longitude 10 degrees and Mc Ilwain L 0.1. The obvious particle burst was also observed in the northern hemisphere mirror points conjugate of epicenter. The energy spectra of the PBs are different from average value within the first three months in 2010. At the same time, the disturbance of the VLF electric spectrum under 300 Hz and in 13~20 kHz frequency band in ionosphere over the epicenter detected by the DEMETER satellite are also observed in the same two orbits. Finally we calculated the coupling relation between the energy of PBs and frequency range of VLF electric spectrum disturbance by wave and particle cyclotron resonant interaction, then obtained the consistent result of observation and theoretical calculation. It is indicated that the PBs are indeed caused by VLF electromagnetic wave in ionosphere possibly transmitted from earth's surface or lithosphere, which is a typical wave and particle coupling event. Eliminating the possible origin of PBs including magnetic burst and solar activities, we think the PBs and VLF electric spectrum disturbance are likely to have a certain link with Chile earthquake.

Keywords DEMETER satellite, Energetic particle burst, VLF electric spectrum disturbance, Chile earthquake, Wave and particle cyclotron resonant interaction

1 引言

电离层扰动这一现象与地震活动的关系已经被研究了几十年,其中包括空间电磁场在水平和竖直方向的变化、粒子密度的变化、温度的变化以及高能粒子通量的改变等.1982年1月21日,Intercosmos-Bulgaria-1300卫星在震中上空赤道附近观测到甚低频电磁波扰动^[1].Parrot等人通过对GEOS-2卫星的数据分析发现,在距离卫星在经度 20° 范围内的极低频ELF电磁信号增强与4.7级以上地震相关系数为0.54^[2].Intercosmos 19卫星观测到了低频(0.1~16 kHz)无线电波发射信号强度的反常增强,这个增强和地震活动的相关系数大于0.8^[3].Moshe Merzer等人报道了秘鲁地震前12天观测到了大于10倍本底的ULF(Ultra Low Frequency,超低频)磁场扰动现象^[4].此外,还有很多卫星观测到电离层扰动和地震活动存在关联^[5-10].

文献[11]介绍了用天然石英岩块等进行的电磁波发射实验,提出岩层突然破裂和断层两侧岩石剧烈摩擦是产生地震电磁波的一种重要机制.并经过实验得出,岩石所发射的电磁波频率值从几千赫兹

到几百千赫兹.另外,文献[11]还指出了1978年9月16日伊朗发生的7.4级地震期间,在距震中1200 km的前苏联达吉斯坦观测站,三套不同波段上(频带是 10^4 到 10^5 Hz)的接收机,在震前55 min分别接收到27、385、1600 kHz的电磁波.由此可见,当夜间电离层吸收较弱时,地球岩石碰撞的电磁辐射可以传播到距离地面几百公里空间.

地震对空间电子和等离子体密度的扰动也有很多报道.Akhoondzadeh等发现DEMETER和GPS(Global Positioning System)分别观测到的电子和离子密度在四个大地震附近出现的异常扰动是一致的^[12].更早的,Gokhberg等报道了AE-C和ISIS-2卫星观测到震前当地的等离子体扰动^[13].另外2008年5月12日发生8.0级汶川地震以后,Shivalika Sarkar等报道了与汶川地震发生相联系的等离子体扰动和电场扰动异常^[14].

在带电粒子的观测方面,Voronov等^[15-16]第一次分析了MARIA实验的数据,并且报道了短期的近地空间的高能带电粒子暴与地震活动之间的关联.利用MARIA-2、GAMMA-1、ELECTRON和PET实验装置的新的实验结果,Aleksandrini等观测到了地震活动中的空间高能带电粒子暴,并证实了粒子暴与地震活动在时域和地域上的关联性^[17].

其观测分析结果表明,高能带电粒子暴所在的磁壳层位置和地震所在的磁壳层位置几乎是一样的.另外,李新乔等人通过分析 DEMETER 卫星数据发现,在汶川地震期间震中附近的 NWC(North West Cape)电子沉降带上,电子的通量和能谱上都出现显著增高,并伴随了在震中区域的 400 Hz 磁场的与电子演化相反趋势^[18].

回顾近年来的电离层扰动和地震活动的关联性研究,与地震活动相关的电磁场和等离子体扰动的报道较多,而高能粒子通量扰动则很少.有限几个事例表明,当地震活动伴随了电磁辐射并传播到空间,可以通过波粒作用引起空间高能带电粒子的通量变化.

DEMETER (Detection of Electro-Magnetic Emissions Transmitted from Earthquake Regions) 卫星的目的是对地震和火山活动引起的地球电离层扰动进行观测和研究.它携带有探测电场、磁场、等离子体以及高能电子的多种探测器^[19-21].其中,高能粒子探测器 IDP(the Instrument for the Detection of Particles)可以探测其所在位置的高能电子,给出通量和能谱信息,并给出大致的投掷角范围;电场分析仪 ICE(Electric Field Instrument)可以提供电离层中的不同频段的电场信息.

发生于当地时间 2010 年 2 月 27 日凌晨 3:34 的智利地震是至今历史上所记录到的十大地震之一,里氏震级达到 8.8 级,震中位于(36.1°S, 72.9°W),在 DEMETER 卫星高度对应的磁壳层参数 L 的值约为 1.32.本文对智利地震期间 DEMETER 卫星 IDP 探测器的观测数据进行了分析,发现在智利地

震发生前的第 11 和 12 天,高能电子通量存在显著涨高,对应能谱相对 3 个月同区域平均谱有 4 到 6 倍增强,增强的能区在这两天有明显差异.与之对应的,通过分析电场分析仪(ICE)数据,本文观测到相同两天的 VLF 电场存在对应的增强,并用波粒耦合理论研究了电子暴与电场增强之间的关系.

2 DEMETER 数据分析

2.1 数据选取

DEMETER 卫星的轨道是准太阳同步轨道.从北半球到南半球的半轨为降轨(downward),而从南半球到北半球的半轨则称为升轨(upward),降交点与升交点分别为 10:15 和 22:20^[18].本文选择升轨数据进行分析,对应当地时间的夜晚,此时电离层对 VLF 电磁波的吸收较小,来自地面的 VLF 电磁波可以穿透电离层到达辐射带.首先本文选取了 2010 年 1 至 3 月的 IDP 高能粒子探测器数据进行分析,按三个能段 90.7~600 keV、600~1000 keV 和 1000~2351 keV 对带电粒子平均计数率分别统计.分析区域为震中(36.1°S, 72.9°W),以 $L=1.32$ 为中心,经度上东西±5°和 L 值±0.05 的区域(本文称之为南半球分析区域).据统计,2010 年前三个月经过该区域的卫星升轨轨道共有 42 条,它们的飞行轨迹见图 1.

2.2 电子通量随时间的演化

卫星在每一个轨道飞过智利地震震中上空所选区域的时间约几分钟.2010 年前三个月,每天在智利地震震中上空的高能粒子平均计数率见图 2.从

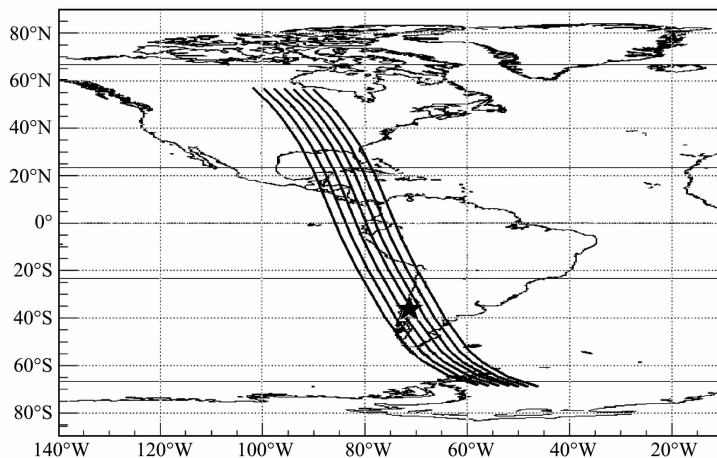


图 1 2010 年前三个月的经过智利震中上空的所有升轨轨道
黑色五角星是智利地震震中位置(36.1°S, 72.9°W).

Fig. 1 Orbits over epicenter region of Chile earthquake in the first three months of 2010
The black pentagram denotes the epicenter position of the quake (36.1°S, 72.9°W).

图中可以看到,三个能段上粒子计数率存在显著增高.这对应了连续两天观测到的粒子暴,图 2a 能区为 90.7~600 keV,2010 年 2 月 16 日的“峰”来自轨道号为 30109 的升轨数据;图 2b 和图 2c 分别对应 600~1000 keV 和 1000~2351 keV 能区,2 月 15 日的“峰”均来自轨道号为 30094 的升轨数据.图中表明,这三个能段上的涨高都超过平均值 4 到 6 倍.

在辐射带带电粒子在地球准偶极地磁场中的运动理论中,带电粒子有三种绝热运动:螺旋运动、弹跳运动和漂移运动^[22].本文认为,由于电子弹跳运动,在北半球的镜像区域也应测到粒子暴.因此,本文对经度和 L 值范围与南半球区域相同的北半球区域进行了分析,结果也观测到了明显的粒子计数

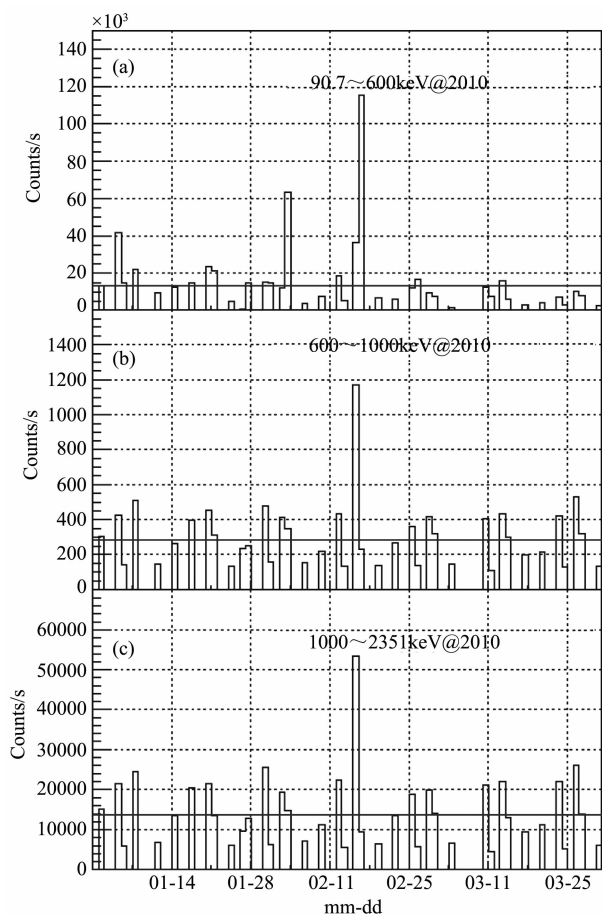


图 2 2010 年智利震中上空的三个不同能段的高能带电粒子计数率分布

实线表示三个月的平均计数率的值。(a)中的峰是发生在 2 月 16 日的 30109 轨道的粒子暴。(b)、(c)中的峰是发生在 2 月 15 日的 30094 轨道的粒子暴。

Fig. 2 The distribution of high energy charged particle counting rates in 2010 for three different energy regions. The solid line denotes the mean value of counting rates. The peak in (a) occurred on 16th February from orbit 30109 and the peaks in (b) (c) occurred on 15th February from orbit 30094.

率涨高的现象,见图 3.图 3a 表明,在 90.7~600 keV 能区存在超过了 6 倍平均值涨高,时间为 2 月 14 日,图 3c 表明在 1000~2351 keV 能区也存在明显涨高,对应轨道号 30079.

2.3 同轨道的 VLF 频段空间电场观测

在空间波粒耦合理论中,当传播到辐射带的 VLF 电磁波频率与辐射带高能带电粒子的回旋频率满足一定关系时,可以与辐射带高能带电粒子发生回旋共振相互作用,引起高能带电粒子的投掷角散射,形成粒子沉降.因此,本文高能带电粒子通量涨高可能伴随着 VLF 电场的扰动.

本文选择 30094 和 30109 轨道上 ICE 的升轨数据进行了时间演化分析,在智利地震震中上空位置

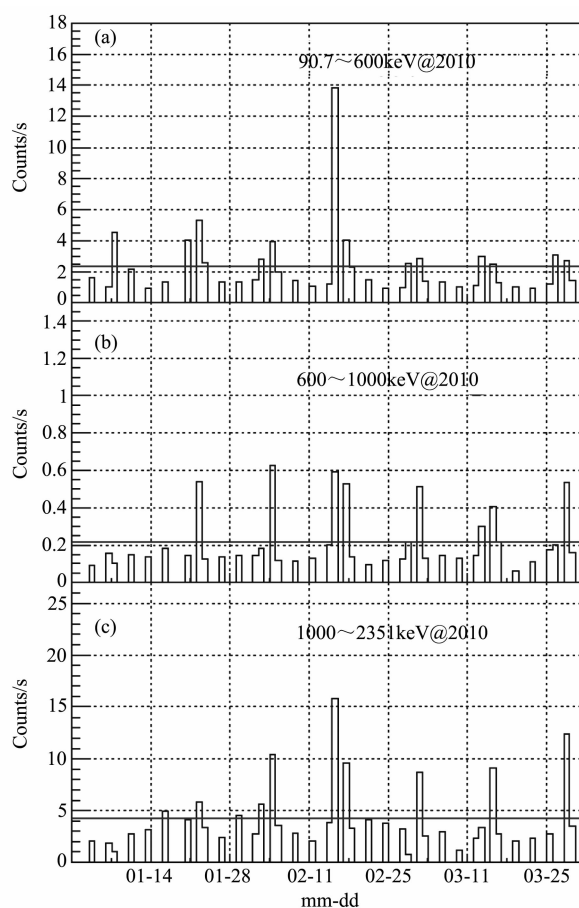


图 3 2010 年智利震中上空北半球镜像点的三个不同能段的高能带电粒子计数率的分布

实线表示三个月的平均计数率的值。(a)中的峰是发生在 2 月 14 日的 30079 轨道的粒子暴。

Fig. 3 The distribution of high energy charged particle counting rates of the northern hemisphere mirror points conjugate of Chile earthquake in 2010 for three different energy regions

The solid line denotes the mean value of counting rates. The peak in (a) occurred on 14th February from orbit 30079.

观测到了 VLF 电场增强的信号,见图 4. 图 4a 为 2 月 16 日 30109 轨道的电场频谱演化,增强频谱的频率范围为 13~20 kHz. 图 4b 为 2 月 15 日 30094 轨道的电场频谱演化,增强频谱的频率范围在 300 Hz 以下. 从频率-能量对应关系上定性来看,这一结果和空间波粒相互作用理论的预期是一致的,即相对高频电磁波与低能电子耦合,而相对低频电磁波与高能电子耦合. 必须要说明的是,本文还对经过震中上空的卫星其他轨道进行了逐条分析,其他轨道上在同区域并未观测到显著的电场扰动. 这两条轨道上的 VLF 电场增强具有唯一性,并且与高能粒子沉降存在强的时间相关性.

本文比较了高能粒子暴和 VLF 电场频谱扰动

的时间关系. 将粒子暴三个能段的平均计数率大于 2 倍本底平均值的部分做出其经纬度分布,并且标记了起止时间,如图 5 所示. 2010 年前三个月,在南半球分析区域内共有 42 条升轨轨道,本底计数率平均值由除去 30094 和 30109 两条轨道的另外 40 条轨道进行计算. 从图 5 中可以看出,在南半球,粒子暴出现的位置中心与智利震中的经度相同. 粒子暴以及电场增强的时间关系如表 1 所示.

从表 1 中可看出,粒子暴和 VLF 电磁扰动几乎是同时观测到的. 对于地面 VLF 源及空间粒子沉降的位置关系,国际上和国内都有过相应研究. Sauvaud 等人对 NWC 地面 VLF 人工站引发空间电子沉降带的研究中,通过 DEMETER 卫星 ICE

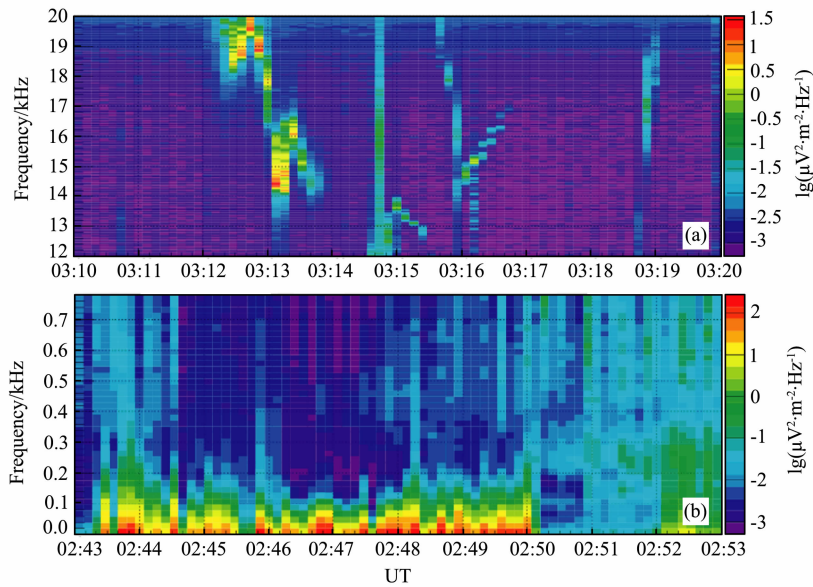


图 4 震中上空的 VLF 电场频谱分布

(a) 2 月 16 日,30109 轨道; (b) 2 月 15 日,30094 轨道.

Fig. 4 The disturbance of the VLF electric spectrum in ionosphere over the epicenter detected by the DEMETER satellite
(a) Orbit number 30109 on 16th February; (b) Orbit number 30094 on 15th February.

表 1 高能粒子暴与 VLF 电场增强的观测时间对比

Table 1 The observation time contrast between high energy particle burst and VLF electric enhancement

事件	能量(或频率)范围	2010 年 2 月 15 日(UT)	2010 年 2 月 16 日(UT)
高能粒子暴	90~600 keV		03:04:30— 03:15:30
	600~1000 keV	02:40:22— 02:49:42	
	>1000keV	02:40:46— 02:48:02	
VLF 电场增强	<300 Hz	02:43:42— 02:50:00	
	13~20 kHz		03:12:00— 03:14:00

探测器观测了 NWC(美国海军发射站)发射出的 VLF 电磁波信号^[23]. 李新乔等人对 NWC 地面人工站所引发的电子沉降带的性质和分布范围也有比较系统的研究^[24]. 基于上述文献,本文观测到的粒子暴和电磁扰动对应的位置关系符合之前的观测及理论. 因此,本文认为,ICE 观测到的电场扰动应该是前述粒子暴的起因.

2.4 对粒子暴其他可能起因的排除

由于异常区电子的正常状态下的形态不清楚,首先需要排除这些高能带电粒子通量的涨高属于统计涨落的可能. 为此,本文分析了 DEMETER 卫星在南半球分析区域内在 2007 年至 2009 年的 1 到 3

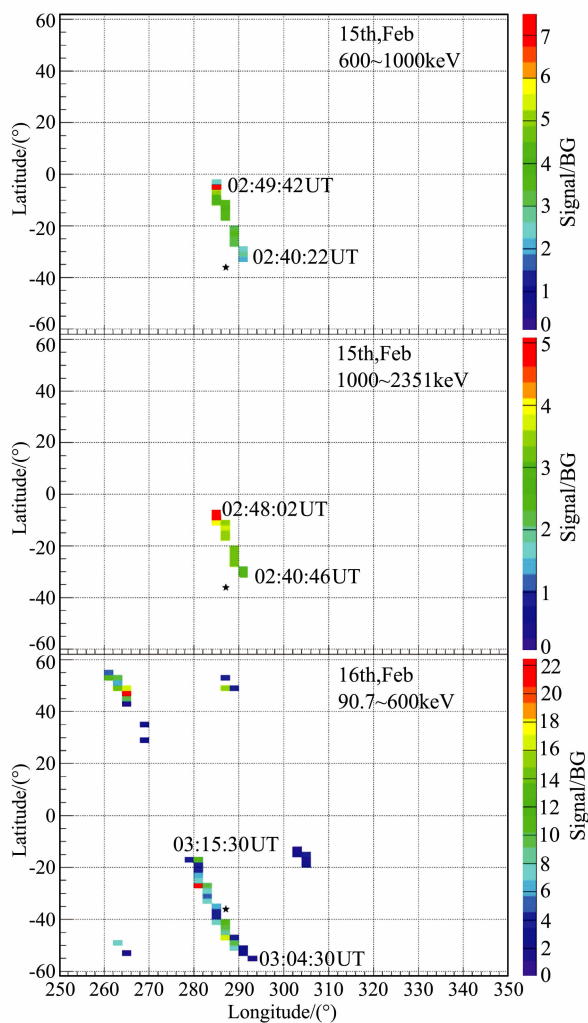


图5 粒子暴发生当天的各条轨道在不同位置的平均计数率(Signal)相对三个月内重访轨道平均值(BG)涨高倍数随轨道的变化及起止时间

选择条件: $\text{Signal}/\text{BG} \geq 2$, 从上到下三个图分别对应 15、16 日两天的不同能量段, 黑色五角星代表智利地震震中的地理位置。

Fig. 5 The distribution of position and the duration UT of the energetic particle burst in which the value of Signal over average background is equal or larger than 2 for three energy ranges respectively

The black star denotes the position of the epicenter of Chile earthquake.

月的高能粒子探测器所获取的数据。图 6 是这三年前的三个月内, 南半球分析区域的高能粒子平均计数率随时间的演化, 从左到右三栏依次对应 2007 年、2008 年和 2009 年的数据, 数据的能段划分与前面相同。从图中可见, 在这三年的前三个月中, 在此区域内不存在三个能区相匹配的高能粒子通量超过 3 倍以上的涨高的现象。

大的太阳活动和磁暴也可能会引起高能粒子暴的出现。一般情况下, Kp 数值不大于 4 表示只有很

小的扰动, 可以不考虑磁暴的影响。通过对 GOES 卫星数据(<http://www.swpc.noaa.gov/>)的查阅, 在 2010 年 2 月 15 日和 16 日的附近几天都没有出现磁情指数大于 4 的情况。同时, 本文还调研了智利地震之前半个月内的太阳活动, 包括高能电子通量、质子通量和太阳耀斑, 期间也没有能引起粒子暴的足够剧烈的太阳活动。所以, 本文观测到的这次粒子暴事件不是由磁暴或者太阳活动的影响引起。

3 波粒耦合理论计算

3.1 粒子暴的能谱特征

图 7 为 IDP(Instrument for Detection of Particles, 高能粒子探测器)观测得到的南半球分析区域的平均能谱。能谱已根据 IDP 的有效几何因子随能量变化曲线进行过修正, 是入射谱。图中黑色的“十”字线表示除去 30094 和 30109 轨道后的 2010 年前三个月升轨的平均谱, 这里将其作为背景谱; 红色的是 2 月 16 日轨道 30109 的升轨能谱, 由此可看出, 通量的涨高主要分布在 250 keV 以下的低能段, 并且相对背景谱在 200 keV 以下有 5 倍乃至超过 10 倍的增强; 绿色的是 2 月 15 日轨道 30094 的能谱, 粒子通量的涨高主要分布在 150 keV 以上, 一直延伸到 2.5 MeV 的较高能段。

3.2 波粒回旋共振耦合作用

在前面的分析中, 讨论了震前 10 天的两次粒子暴以及与之对应电磁信号增强。在空间波粒相互作用理论中, 当电磁波的频率与高能带电粒子的回旋频率、能量、磁壳层参数等满足一定关系时, 发生回旋共振耦合引起高能带电粒子的投掷角散射, 会引起高能带电粒子的沉降。本节将基于波粒回旋耦合作用的准线性扩散理论, 对本文中的高能粒子能量与电磁波耦合频率的关系进行计算。

文献[25-27]中介绍的准线性粒子扩散相对论理论给出了与任何模式、任何波谱分布的场向电磁波发生共振的粒子的准线性扩散系数表达式。文献[26]介绍了关于抛射角扩散系数的一般表达式来定量分析通过地基高频电波诱导 ELF/VLF 波使辐射带相对论电子发生沉降的效果。文献[28]也基于上面的理论做了一些简化性的假设计算了电子与高斯分布的 R 模式 ELF/VLF 哨声波回旋共振的当地抛射角扩散系数的表达式。文献[29]对该理论还有更详细的介绍。

本文要用到的等离子体扰动的准线性理论忽略

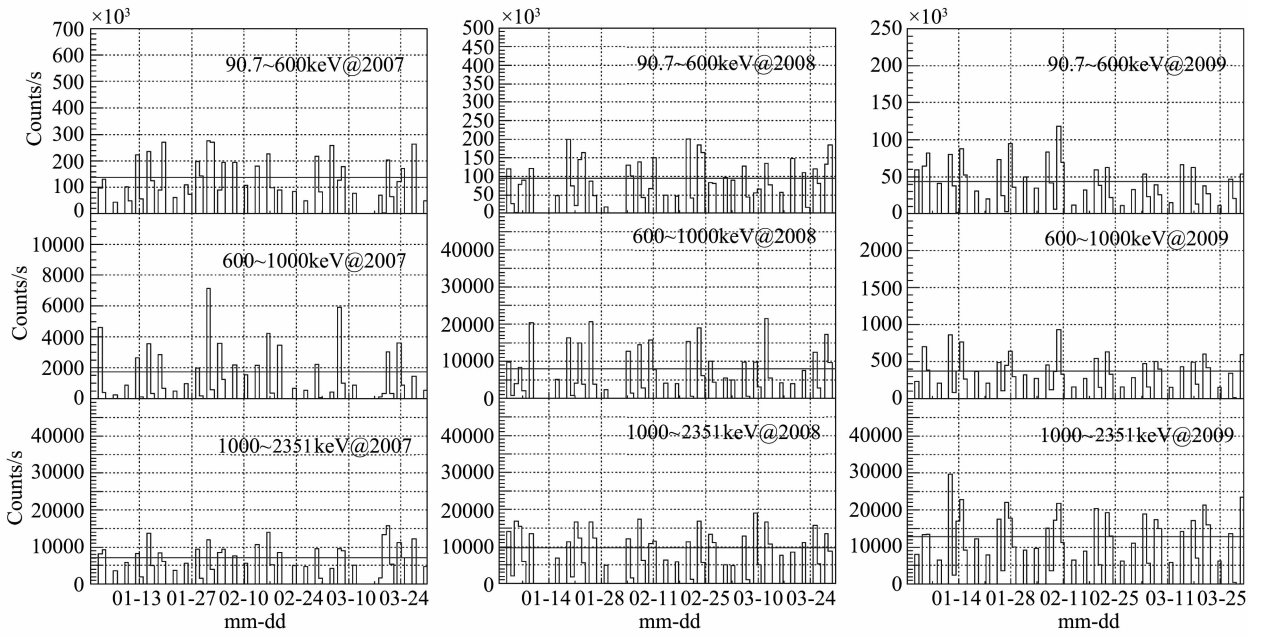


图 6 震中区域上空的高能带电粒子平均计数率的分布

从上到下分别对应三个能段的,实线表示计数率的平均值,从左到右分别对应 2007 年、2008 年和 2009 年的分布。

Fig. 6 The distribution of high energy charged particle counting rates in epicenter region for three different energy regions. The solid line denotes the mean value of counting rates. From left to right are the distributions for the year 2007, 2008 and 2009.

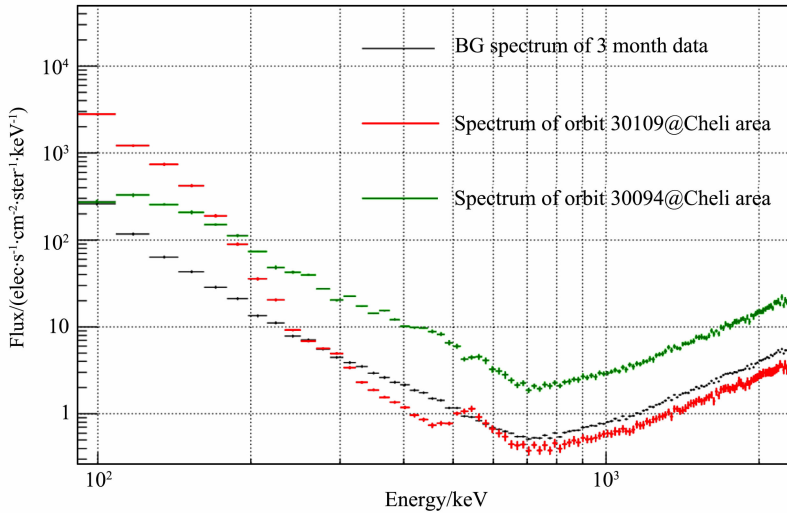


图 7 智利震中上空的两条异常轨道的能谱分布和平均能谱分布

黑色带误差棒的表示 2010 年前三个月的除去两条异常轨道的平均能谱,红色的表示 2 月 16 日的 30109 轨道的能谱分布,绿色的表示 2 月 15 日的 30094 轨道的能谱分布。

Fig. 7 Energy spectrum of high energy charged particle detected over epicenter region of Chile earthquake. The black profile graph with error bar denotes the average energy spectrum for the first three months of 2010 except that of 15th and 16th February, and the red one for that of 16th February, the green one for 15th February.

了等离子体之间的互相碰撞,并使每次散射时粒子的投掷角、能量改变都很小。假设参与相互作用的波相位之间没有关联,粒子可看作在相空间中无规行走,粒子分布函数的演化就可用扩散方程描述。在相空间中粒子流从高密度向低密度区域扩散,扩散率正比于波的功率。弱等离子体准线性扩散理论可以近

似地描述回旋共振波粒相互作用。

根据前面文献对基于回旋耦合作用的准线性扩散理论描述,电磁波与电子发生耦合改变其投掷角,继而发生沉降要满足回旋共振条件:

$$\omega - \nu \kappa \cos \alpha = n \frac{\Omega_e}{\gamma}, \quad (1)$$

其中, ω, κ 分别为波频率和波矢, v 为电子速度, α 是投掷角. Ω_e 为电子回旋频率, $\Omega_e = Be/m_e$, B 为当地的磁场, e 是电子电荷量, m_e 是电子质量. $\gamma = 1/\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ 是相对论因子. n 取整数为相互作用耦合阶数, 这里只考虑占主导作用的一阶耦合 $n=1$. 包含了波粒耦合作用的电子磁壳层位置 L 、动能 E 和投掷角 α 以及电磁波频率的回旋共振耦合理论需要满足上面耦合条件(1)及电子-质子等离子体中右旋 R 模式波的色散关系:

$$\left(\frac{ck}{\omega}\right)^2 = 1 - \frac{1 + \epsilon}{\alpha^* \left(\frac{\omega}{\Omega_e} - 1\right) \left(\frac{\omega}{\Omega_e} + \epsilon\right)}, \quad (2)$$

其中, $\epsilon = m_e/m_p$, 是电子和质子静质量之比. $\alpha^* = \Omega^2/\omega_{pe}^2$ 是等离子体参量, 这里 $\omega_{pe} = (N_0 e^2/\epsilon_0 m_e)^{1/2}$ 是等离子体振荡频率, ϵ_0 是真空介电常数, N_0 是等离子体密度, 是一个具有很大不确定性的值. 文献 [30] 给出在磁壳层 $L=2$ 时 $N_0 = 3000 \text{ cm}^{-3}$, L 不同时, 按幂率变化 $N_0 = 3000(L/2)^{-4} \text{ cm}^{-3}$, 没有考虑随纬度的变化. 智利位于南大西洋异常区附近, 粒子密度比相同 L 值的其他地区要高很多. 从 DEMETER 二级数据的观测结果发现, 智利地震前震中上空的电子浓度达到了 10^5 cm^{-3} 量级的水平. 另外, 等离子体密度随着季节等很多因素的变化都会有较大的改变. 所以这里我们用了文献 [30] 中的值增大 10 倍后的值 $N_0 = 30000(L/2)^{-4} \text{ cm}^{-3}$.

在具体计算中, 假设 VLF 电磁波沿与地磁场平行方向传播, 设投掷角 $\alpha=0^\circ$, 只考虑投掷角扩散发生在赤道面. 这里只考虑电子, 可以得到电磁波频率和与之发生回旋共振耦合进而引起沉降的高能电子

的最小能量之间的关系, 见图 8.

本文中所观测到的高能电子通量的增强能区分别位于大于 150 keV 直到兆电子伏量级的高能区和小于 250 keV 的低能区, 而观测到的电场频谱扰动的频率则分别位于 300 Hz 以下和 13~20 kHz. 从图 8 中可以看出, 电磁波频率在 13~20 kHz 时, 与之耦合发生沉降的高能电子的最小能量在几十千电子伏, 能量范围与图 7 的观测结果几十至 200 keV 相符; 电磁波频率在 300 Hz 以下时, 与之耦合发生沉降的高能电子的最小能量在 10^3 量级, 图 7 所显示的最小耦合能量分布在 10^2 keV 到 10^3 keV 的量级, 甚至到更高的能量, 在量级上也是符合的. 所以, 本文认为, 观测到的粒子沉降和 VLF 电场扰动现象与波粒回旋共振耦合作用的理论计算具有较好的一致性, 也验证了波粒回旋共振耦合作用这一理论模型的正确性.

4 结论与讨论

本文基于 DEMETER 卫星观测数据, 在对智利地震前后的智利上空辐射带高能粒子进行分析中发现, 在震前 12 天至 11 天在智利上空分析区域内, 观测到显著的带电粒子平均通量的涨高(即粒子暴), 同时在其北半球共轭区域也观测到此现象. 本文对粒子暴的起因做了统计分析, 并对此期间的空间环境进行了相关研究, 排除了统计因素、太阳活动和磁暴等因素. 基于波粒耦合的经验, 对粒子暴进行了空间电场的演化分析, 在与之对应的时段上观测到位于不同频段的电场强度增强. 从空间位置上来看, 粒

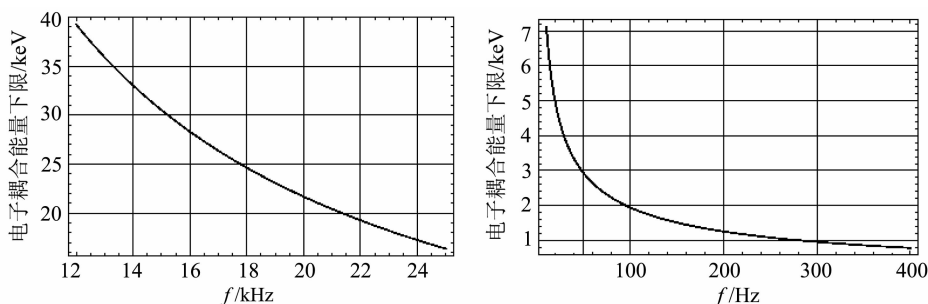


图 8 用准线性粒子扩散相对论理论计算的 R 模式右旋电磁波频率和与之耦合进而改变投掷角发生沉降的高能电子的能量下限之间的关系

两个图分别表示不同频率范围的耦合关系.

Fig. 8 The calculation result of quasi-linear theory of gyroresonant wave-particle interaction which describes the relation between the frequency of R-mode electromagnetic wave and minimum energy of particle precipitated due to pitch angle scattering induced by wave

These two plots express the different coupling range of frequency and energy, respectively.

子暴位置、震中和电场增强位置三者的关系与之前相关文献中的 VLF 波粒耦合观测结果一致. 通过波粒回旋共振耦合模型计算, 结果表明, 电场增强的频率对应的所观测区域磁壳层的高能电子能量恰好与本文对高能粒子探测器所观测的粒子暴能谱的增强能段吻合, 确认了本次粒子暴起源于所观测到的空间电磁扰动, 是一次典型的空间波粒耦合事例.

从时间上来看, 本次 DEMETER 卫星观测到空间粒子暴和电磁扰动出现在智利地震发生前的约十天. 文献[4]也曾报道过震前超过十天的包括地磁异常在内的数次观测结果. 排除了一些可能的引起此粒子暴的因素之后, 本文认为, 本次粒子暴和电场扰动的观测可能与智利地震的震前地壳活动存在一定关联.

致 谢 感谢法国 DEMETER 卫星数据中心提供数据下载服务. 感谢空间天气学国家重点实验室开放课题的支持. 感谢刘静博士对本工作给予的帮助.

参考文献 (References)

- [1] Chmyrev V M, Isaev N V, Bilichenko S V, et al. Observation by space-borne detectors of electric fields and hydromagnetic waves in the ionosphere over an earthquake centre. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 1989, 57(1-2): 110-114.
- [2] Parrot M, Lefeuvre F, Corcuff F Y, et al. Observations of emissions at the time of earthquakes in the Kerguelen 1985 Modelling the ionospheric disturbance caused by an explosion on the ground. *Ann. Geophys.*, 1985, 3: 695-704.
- [3] Larkina V I, Migulin V V, Molchanov O A, et al. Some statistical results on very low frequency radiowave emissions in the upper ionosphere over earthquake zones. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 1989, 57(1-2): 100-109.
- [4] Merzer M, Klempner S L. Modeling low-frequency magnetic-field precursors to the Loma Prieta earthquake with a precursory increase in fault-zone conductivity. *Pure and Geophysics*, 1997, 150(2): 217-248.
- [5] Parrot M, Mogilevsky M M. VLF emissions associated with earthquakes and observed in the ionosphere and the magnetosphere. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 1989, 57(1-2): 86-99.
- [6] Parrot M, Berthelier J J, Lebreton J P, et al. Examples of unusual ionospheric observations made by the DEMETER satellite over seismic regions. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2006, 31(4-9): 486-495, doi: 10.1016/j.pce.2006.02.011.
- [7] Parrot M. Anomalous seismic phenomena: View from space in Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes. Trivandrum: Transworld Research Network, 2009: 205-233.
- [8] Němec F, Santolik O, Parrot M, et al. Spacecraft observations of electromagnetic perturbations connected with seismic activity. *Geophys. Res. Lett.*, 2008, 35: L05109, doi: 10.1029/2007GL032517.
- [9] Němec F, Santolik O, Parrot M. Decrease of intensity of ELF/VLF waves observed in the upper ionosphere close to earthquakes: A statistical study. *J. Geophys. Res.*, 2009, 114: A04303, doi: 10.1029/2008JA013972.
- [10] Zhang X M, Qian J D, Ouyang X Y, et al. Ionospheric electro-magnetic disturbances prior to Yutian 7.2 earthquake in Xinjiang. *Chinese J. Space Sci.*, 2009, 29(2): 213-221.
- [11] 郑联达. 地震电磁波发射的一种机制. *地震学报*, 1990, 12(1): 78-86.
Zheng L D. The mechanism of electromagnetic wave radiation during an earthquake. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 1990, 12(1): 78-86.
- [12] Akhoondzadeh M, Parrot M, Saradjian M R. Electron and ion density variations before strong earthquakes ($M > 6.0$) using DEMETER and GPS data. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2010, 10(1): 7-18.
- [13] Gokhberg M B, Pilipernko V A, Pokhotelov O A. On seismic precursors in the ionosphere. *Izvestiya USSR Academy of Sciences. Phys. Earth Ser.*, 1983, 10: 17-21.
- [14] Sarkar S, Gwal A K. Satellite monitoring of anomalous effects in the ionosphere related to the great Wenchuan earthquake of May 12, 2008. *Natural Hazards*, 2010, 55(2): 321-332, doi: 10.1007/s11069-010-9530-9.
- [15] Voronov S A, Galper A M, Koldashov S V, et al. Registration of sporadic increase of high energy particle flux near Brazilian anomaly region. *Proc. of 20th ICRC*, 1987, 4: 451-452.
- [16] Voronov S A, Galper A M, Koldashov S V, et al. Observation of high energy charged particle flux increases in SAA region in 10 September 1985. *Cosmic Res.*, 1989, 27(4): 629-631.
- [17] Aleksandrim S Y, Galper A M, Grishantzeva L A, et al. High-energy charged particle bursts in the near-Earth space as earthquake precursors. *Ann. Geophys.*, 2003, 21(2): 597-602.
- [18] 李新乔, 马宇倩, 王焕玉等. 空间电磁卫星的粒子探测与汶川地震. *地球物理学报*, 2010, 53(10): 2337-2344, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.10.007.
Li X Q, Ma Y Q, Wang H Y, et al. Observation of particle on space electro-magnetic satellite during Wenchuan earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, 53(10): 2337-2344, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.10.007.
- [19] Cussac T, Clair M A, Ultré-Guerard P, et al. The DEMETER microsatellite and ground segment. *Planetary and Space Science*, 2006, 54(5): 413-427.
- [20] Lasoutte D, Brochot J Y, De Carvalho D, et al. The DEMETER science mission centre. *Planetary and Space Science*, 2006, 54(5): 428-440.
- [21] Sauvaud J A, Moreau T, Maggiolo R, et al. High-energy

- electron detection onboard DEMETER: The IDP spectrometer, description and first results on the inner belt. *Planetary and Space Science*, 2006, 54(5): 502-511.
- [22] Li X L, Temerin M A. The electron radiation belt. *Space Science Reviews*, 2001, 95(1-2): 569-580.
- [23] Sauvaud J A, Maggiolo R, Jacquey C, et al. Radiation belt electron precipitation due to VLF transmitters: satellite observations. *Geophys. Res. Lett.*, 2008, 35; L09101, doi: 10.1029/2008GL033194.
- [24] Li X Q, Ma Y Q, Wang P, et al. Study of the North West Cape electron belts observed by DEMETER satellite. *J. Geophys. Res.*, 2012, 117, A04201, doi:10.1029/2011JA017121.
- [25] Summers D, Thorne R M, Xiao F L. Relativistic theory of wave-particle resonant diffusion with application to electron acceleration in the magnetosphere. *J. Geophys. Res.*, 1998, 103(A9): 20487-20500.
- [26] Wanliss J A, Anh V V, Yu Z G, et al. Multifractal modeling of magnetic storms via symbolic dynamics analysis. *J. Geophys. Res.*, 2005, 110: A08214.
- [27] Summers D, Ni B, Meredith N P. Timescales for radiation belt electron acceleration and loss due to resonant wave-particle interactions: 1. Theory. *J. Geophys. Res.*, 2007, 112; A04206.
- [28] 顾旭东, 赵正予, 倪彬彬等. 地基高频加热激励 ELF/VLF 波对辐射带高能电子的准线性散射. *物理学报*, 2008, 57(10): 6673-6682.
- Gu X D, Zhao Z Y, Ni B B, et al. Quasi-linear diffusion of the radiation belt energetic electrons by ground-based HF heater-induced ELF/VLF emissions. *Acta Physica Sinica* (in Chinese), 2008, 57(10): 6673-6682.
- [29] 王平, 王焕玉, 马宇蓓等. 地基人工 VLF 电波对辐射带电子的调制. *物理学报*, 2011, 60(3): 039401.
- Wang P, Wang H Y, Ma Y Q, et al. Remediation of radiation belt electrons caused by ground based man-made VLF wave. *Acta Physica Sinica* (in Chinese), 2011, 60(3): 039401.
- [30] Imhof W L, Reagan J B, Voss H D, et al. Direct observation of radiation belt electrons precipitated by the controlled injection of VLF signals from a ground-based transmitter. *Geophys. Res. Lett.*, 1983, 10(4): 361-364.

(本文编辑 何 燕)