

张学民, 钱家栋, 王亚丽, 赵旭, 欧阳新艳, 赵庶凡. 2008. 地磁低点位移频谱特征及机理探讨. 地震学报, 30(5): 474-483.

Zhang Xuemin, Qian Jiadong, Wang Yali, Zhao Xu, Ouyang Xinyan, Zhao Shufan. 2008. Spectral features of geomagnetic low point displacement and discussion on its mechanism. *Acta Seismologica Sinica*, 30(5): 474-483.

地磁低点位移频谱特征及机理探讨^{*}

张学民^{1),*} 钱家栋¹⁾ 王亚丽²⁾ 赵旭²⁾
欧阳新艳¹⁾ 赵庶凡¹⁾

1) 中国北京 100036 中国地震局地震预测研究所

2) 中国北京 100036 中国地震台网中心

摘要 以河北省昌黎地震台为例, 使用该台地磁 Z 分量的分钟值数据, 分别对比了正常时段、磁暴发生时段、低点位移时段的主要频率谱值变化特征。通过多频点功率谱对数拟合, 发现在数据长度相等的情况下, 相对于正常时段而言磁暴时段各频率的能量明显增强, 特别是高频端尤其明显; 而当大范围低点位移发生时, 高频端的能量基本与正常时段持平, 但 4 个小时以上的周期功率谱大部分要低于正常段。通过对多日低点位移时段的 FFT 累加与正常时段对比后发现, 低点位移发生时, 8.5 小时和 13.7 小时周期的频谱值增加。通过与 DEMETER 卫星观测的电子密度数据空间图象进行对比, 发现地磁低点位移的发生与空间 N_e 的增加有很好的对应性。最后对这些变化特征及低点位移可能产生的机制进行了探讨。

关键词 地磁 Z 分量 低点位移 快速傅氏变换 DEMETER 卫星 电子密度

文章编号: 0253-3782(2008)05-0474-10 **中图分类号:** P318.2⁺4 **文献标识码:** A

Spectral features of geomagnetic low point displacement and discussion on its mechanism

Zhang Xuemin^{1),*} Qian Jiadong¹⁾ Wang Yali²⁾
Zhao Xu²⁾ Ouyang Xinyan¹⁾ Zhao Shufan¹⁾

1) Institute of Earthquake Sciences, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

2) China Earthquake Networks Center, Beijing 100036, China

Abstract: As an example, this paper analyzed Z component of the geomagnetic record at Changli station in Hebei province, to investigate the low point displacement characteristics. The minute data of geomagnetic Z component was used to analyze the spectral values of its main frequency components during normal time, geomagnetic storm time and low point displacement time, respectively. After fitting ten high spectral values with a logarithmic function, it is found

* 基金项目 国家科技支撑计划 (2006BAC011302-04-02) 和中国地震局地震预测研究所基本科研业务经费联合资助。

收稿日期 2007-12-13 收到初稿, 2008-07-08 决定采用修改稿。

† 通讯作者 e-mail: zhangxm96@126.com

that, with the same length of data, the spectral values at geomagnetic storm time increase apparently as compared with those at normal time, especially at high frequency part. When low point displacement occurred, the spectral values at high frequency approximate to those at normal time, but spectral values at periods above 4 hours are mostly lower than those at normal time. By accumulating some FFT results at low point displacement and normal time, it is shown that, spectral values at periods of 8.5 and 13.7 hour increase at low point displacement time relative to those at normal time. By comparing our result with the images of N_e observed at DEMETER satellite, we found that the occurrence of geomagnetic low point displacement well corresponds to the increase of N_e in ionosphere. Finally we discussed these spectral features and the mechanism of geomagnetic low point displacement.

Key words: geomagnetic Z component; low point displacement; FFT; DEMETER satellite; electron density

引言

国内利用地磁手段进行地震预报的研究工作开展已久, 研究方法亦是多种多样, 有地磁加卸载响应比法(史勇军等, 2002)、地磁转换函数法(李琪等, 2005)、地磁低点位移法(丁鉴海, 黄雪香, 1988)等。其中地磁低点位移法在日常预报工作中应用比较广泛, 并取得了较好的效果。研究人员利用日变低点位移的两条以上分界线交汇来研究其与地震之间的关系, 以此缩小预测范围(解用明, 乔子云, 2003; 丁鉴海等, 2006)。郭增建等(1977)认为“磁暴”后“倍九”的时间容易发生地震。吴小平等(2004)采用“地磁低点位移”与“磁暴”相结合的方法预测发震时间, 并对四川境内的低点位移现象作了详细研究(吴小平, 2003)。黄雪香和余素荣(2000)研究了地磁低点位移异常类型特征与地震活动的关系。李明光和梁秀兰(1989)认为以多台地磁划分出的低点方法在不同地区产生的效果不同, 对于低点异常频繁发生的西南地区效果较差, 但对于华北地区确有成效。

同时, 大地震前电离层异常现象已引起多方面关注。丁鉴海等分析了1997年11月8日玛尼7.5级与2001年11月14日昆仑山口西8.1级地震前磁场与电离层异常及特征, 发现两次大地震前磁场与电离层短临时空分布特征有较好的一致性, 震中周围出现地磁日变异常, 拉萨台出现 F_2 层零界频率明显异常, 且震前约1个月出现地磁低点位移, 其突变分界线通过震中地区(丁鉴海等, 2004, 2005)。自2004年6月DEMETER卫星观测以来, 日本本州西海岸2004年8月20日发生5.5级地震、2005年3月28日印尼苏门答腊发生8.5级地震, 两次地震前震中上方等离子体参数(包括电子密度、电子温度和离子密度、离子温度)均出现异常变化(Parrot *et al*, 2006)。Pulinets等(2000)对高纬地区(阿拉斯加)、中纬地区(意大利中部)和低纬地区(新西兰)的地震事件进行研究, 表明在主震发生前几天出现微弱的电离层扰动, 但是扰动区域不在未来震中上方, 而略微偏离, 随着地震的临近, 扰动覆盖的区域越来越大, 并且幅值也在增加; 地震发生后几小时扰动逐渐恢复; 在某些情况下, 扰动不仅在震中区域出现, 而且可能沿着磁力线传播到对面的半球。

许多地震学家对产生低点位移的原因也进行了一些相关的研究。赵洁等(2005)研究嘉峪关地磁垂直分量1993—1998年的资料认为, 地下深物质的对流能够引起地下电导率和

介质磁化率的变化，从而引起地磁场的变化；同时地下高温物质的运动还伴随地热流的异常，当地幔物质的这种相对垂直运动施加于地壳时，会引起和促使地壳构造变动而形成地磁低点位移的无震异常。

电磁场是联系天地观测的有效媒介之一，其在地震预报中的作用也日益受到关注。地磁低点位移是客观存在的现象，究竟它的产生是与空间电离层扰动有关，还是与地下介质的电性质改变有关？本文旨在通过对低点位移个例的分析，研究低点位移时的磁场频谱异常变化特征，并与卫星观测电离层数据进行对比，以探讨其产生的机理。

1 台站基本情况和数据处理方法

昌黎台位于河北省东部，是国内比较早的台站之一，属于国家地磁监测台。目前该台已经有连续 30 年以上的地磁观测资料。自 2000 年台站改造后数字地磁观测记录取代了原来的模拟记录，开始使用分钟值采样间隔。相比原来使用的时测值数据，其观测精度和数据量都得到了很大提高。

由于低点位移异常一般只出现在某一天的几个小时内，不会连续几天出现，整个异常持续时间比较短。为了分析其中的频谱特征，本文主要使用地磁场 Z 分量的分钟值数据，选取 3 天的时间为一个计算时段，利用快速傅氏变换(FFT)计算各频率振幅谱值(陆远忠等，2000)，并分别对其中谱值中比较突出的周期进行了分析讨论。

2 短周期地磁场频谱分布特征

地磁观测中最明显的干扰就是磁暴活动，为反映磁场活动不同时段的频谱变化，首先进行了磁暴活动时段与正常时段的对比。2004 年 11 月 8 日至 10 日期间，太阳活动剧烈，地面磁场观测到强烈磁暴活动，最大地磁 K 指数达到 9，而且这次地磁活动持续时间比较长，延续了整整 3 天的时间。图 1 是该时段昌黎台地磁 Z 分量的分钟值数据和地磁 Dst 指数的时测值曲线。其中 Dst 指数在国际地磁网站下载。可以看到 Dst 指数在 11 月 8 日下降到 -300 以下，反映磁暴活动非常剧烈。同样，在 2005 年 1 月 21 日和 5 月 15 日也各自记录到 1 次比较大的磁暴活动，但持续时间及活动强度都远小于 2004 年 11 月 8 日的磁暴活动。可以看出，在磁暴活动期间高频信息明显增多，而且明显影响日变形态。图 1 中还展示了一张正常时段的数据曲线，可以看到，其日变周期非常规则明显，与磁暴活动期间有显著区别。

利用 FFT 计算了磁暴活动期间与正常时段的功率谱，并选取了各计算时段中功率谱最大的 10 个频率值，结果见图 2。为反映各时段的总体特征，分别进行了曲线拟合。从原始数据及拟合曲线可以看到，在磁暴活动期间(图 2 中实线)多个频率的功率谱都比正常时段(图 2 中虚线)高，对数谱能量平均要高一个数量级左右。2005 年 1 月 21 日磁暴活动期的拟合线与正常时在长周期段有所交叉，这可能与磁暴的持续时间长短及能量强度有关，与其它两次磁暴活动进行对比后发现，无论是磁暴的持续时间长度还是强度都要弱一些。2004 年 11 月的磁暴持续时间最长，3 天内的日变曲线都受到扰动，Dst 指数最低值达到 -373，而 2005 年 5 月虽然持续时间不长，但 Dst 指数也下降到 -273，都比 2005 年 1 月 21 日的磁暴活动要强。

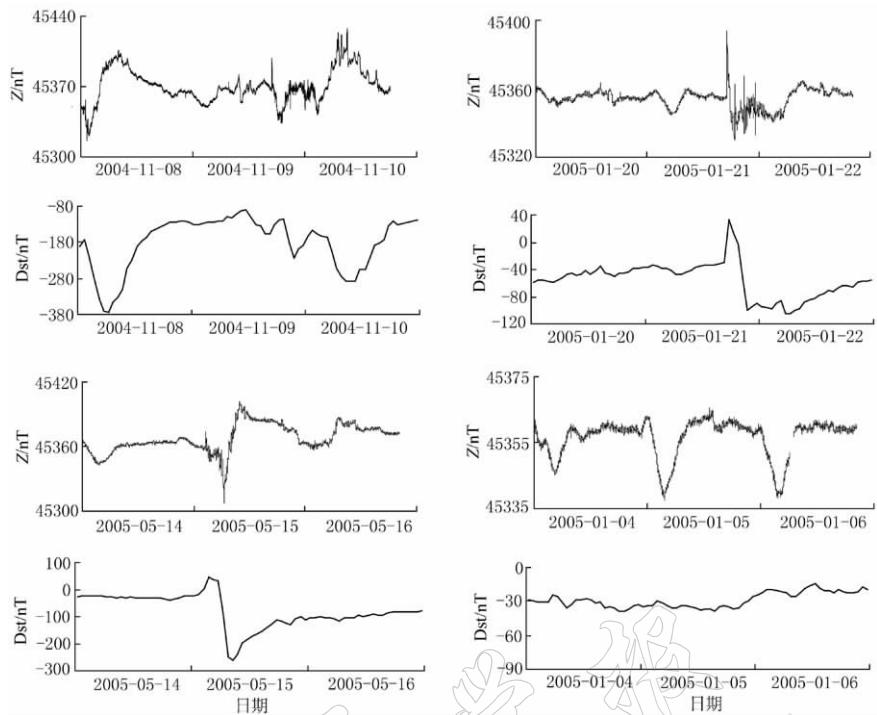


图 1 3 次磁暴活动期间与正常时段昌黎台地磁 Z 分量曲线(上)及 Dst 曲线图(下)(世界时, 下同)

Fig. 1 Recording curves of geomagnetic Z component(upper) and Dst (lower) during three magnetic storms and a normal period at Changli station (Universal Time, following the same)

2004 年 2 月 1 日和 2 月 6 日分别形成 1 条横切过中国中部的低点位移线, 将中国分成南北两部分, 昌黎台恰好位于低点位移线的北部, 并形成了当日正常低点时间后移的现象(图 3). 而根据当时 Dst 记录, 连续 3 天的观测时间内 Dst 没有低于 -50, 因此基本没有磁暴活动, 属于地磁平静时段. 同样计算了低点时段前后共 3 天内的各频段谱值, 将谱值最大的 10 个周期绘制在图 4 中(空白符号, 拟合线为实线). 结果显示了低点位移时段的周期谱能量在 1—3 小时范围内基本难以与正常时段相区分. 但随着周期的不断增长, 谱能量却在不断下降, 明显低于正常时期.

从以上的分析可以看出, 无论是磁暴时段还是低点位移时段, 其周期功率谱分布都与正常时有一定差别, 磁暴时整体能量增强, 尤其是高频段显著提升, 而低点位移时期整体能量有所下降, 在长周期段形成一定差

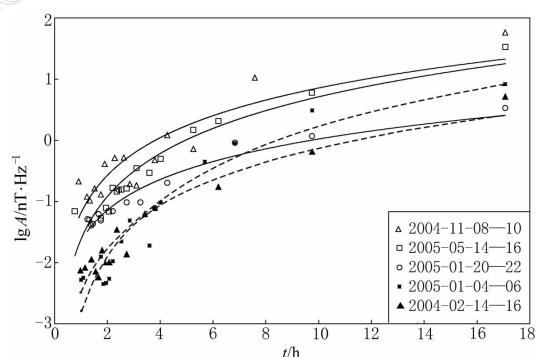


图 2 昌黎台地磁 Z 分量频谱拟合曲线对比图

实线表示磁暴时段; 虚线表示正常时段

Fig. 2 Comparison between the spectral fitting curves of geomagnetic Z component recorded at Changli station. Solid lines: geomagnetic storm period; Dashed lines: normal period

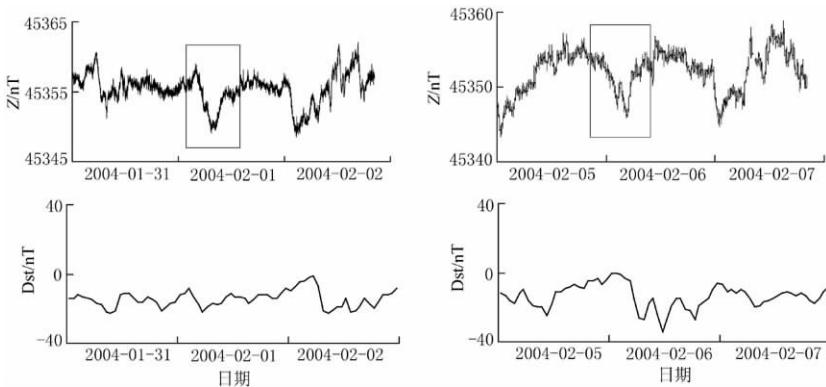


图3 低点位移时段昌黎台Z分量分钟值原始记录曲线(上)和地磁指数Dst时测值曲线(下)

Fig. 3 Minute original curves (upper) of geomagnetic Z component and hourly curves (lower) of geomagnetic index Dst during low point displacement periods at Changli station

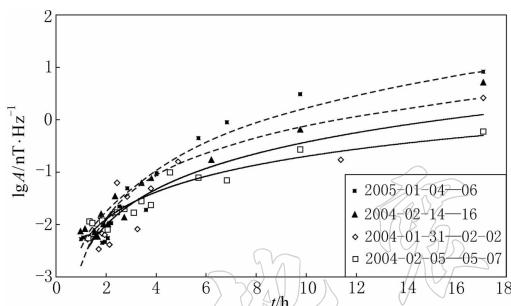


图4 低点位移时段与正常时段频谱对比图

实线表示低点位移时段;虚线表示正常时段

Fig. 4 Comparison between the spectral fitting curves during low point displacement and normal periods. Solid lines: low point displacement period; Dashed lines: normal period

影响了整个周期谱的能量分布,在此予以剔除,最后使用了昌黎台在地磁平静时期出现的10次低点位移事件的FFT计算结果对各频率谱值进行了累加平均。同样,选取了平静段正常变化的12次3日FFT变换结果进行了累计平均,平均谱值均显示在图5中。可以看到与前面分析的结果相一致,在几个比较高的谱值上,平均正常时段要高于低点位移的谱值。为突出高频部分能量谱的变化,将能量谱值化为对数坐标,结果示于图6。结果发现,0.05(相当于20分钟)、-0.5(相当于2分钟)频段低点位移的频谱曲

距,与正常变化区分开来。

3 低点位移时主要频谱特征和空间电磁响应

为了反映低点位移出现时的整体频谱特征,在此选取了2002年以来在昌黎台出现的所有低点位移出现前后1天共3天的数据,使用4096个分钟值数据进行了快速付氏变换,得到了各个频率的谱值。2002—2006年期间,在全国范围内形成明显低点位移分界线,并在昌黎台出现低点时间变化超过2小时以上的事件共有16次。因为其中有部分事件期间出现磁暴活动,所以

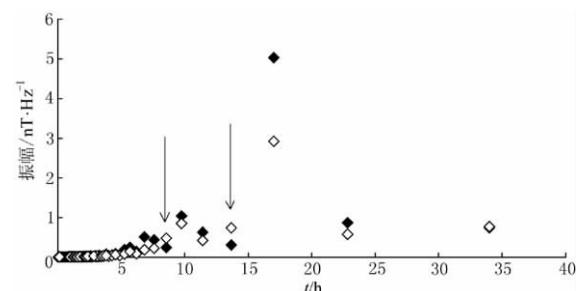


图5 正常与低点位移时段平均频谱(实心符号为正常时段,空心符号为低点位移时段)

Fig. 5 Averaged spectrum during normal and low point displacement periods. Solid circle: normal period; Blank circle: low point displacement period

线出现了多组高谱值, 而正常时段在高频区没有明显的突出谱值。由于频谱具有等间隔分布的特征, 所以考虑应为人为干扰因素所致。通过与原始观测数据进行对比后发现, 在原始观测中存在每隔 1 小时出现的周期在 2—7 分钟的脉冲信号。分析认为这是由于昌黎台电阻率和磁场同台观测, 而常规电阻率观测中每小时观测时需向地下供电所致。FFT 分析结果明显反映了一组干扰信号的频谱特性, 建议这类观测数据在台站预处理中应进行有效剔除。

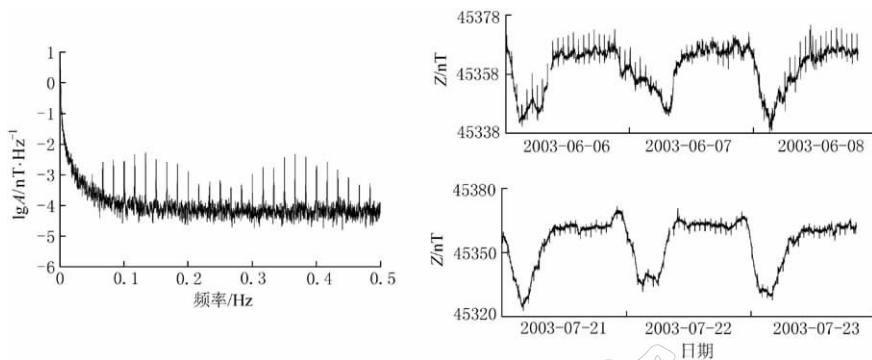


图 6 FFT 对数谱值及原始观测干扰曲线

Fig. 6 FFT logarithm spectrum and original disturbed curves

综合高低频段的特性, 在低点位移出现时没有形成特别突出的某出频谱, 反而整体有所降低。分析图 5 的结果, 在 10 个主频谱中只有 2 个频段谱值高于正常值, 即 8.5 小时和 13.7 小时的周期(图 5 中箭头所示)。根据电磁波的探测深度公式 $D = 1/\sqrt{\pi\mu\sigma f} = (1/\sqrt{2\pi})\sqrt{10\rho T}$, 假定岩石圈地壳电阻率为 $1000 \Omega \cdot m$, 则这两个周期的探测深度可达到 400 km 左右, 已经到达地幔软流圈。可以看到, 低点位移产生时段电磁波在地幔软流层产生了扰动效应, 因此说明低点位移是深达地幔软流圈的深部效应, 而不是岩石圈地壳的构造活动, 因此低点位移的源可能与深部地幔热物质的上涌有关。当然, 低点位移的出现是一个大区域的异常行为, 而不局限于某一点, 这是否与深部热介质的横向迁移有关, 还需要更多资料的积累和深入研究。

卫星观测为人们提供了大量的空间电磁信息, 也为分析岩石圈与大气层、电离层之间的电磁响应提供了便利。低点位移是一种区域活动事件, 其涉及范围通常达到几百万平方公里以上, 这样的异常是否能引起电离层的扰动? 或者是电离层的局部扰动导致了地磁低点时间的迁移, 这些都是电磁工作者关注的问题。在此以两次低点位移事件为例, 下载了相关时间内法国 DEMETER 卫星(Parrot *et al*, 2006; Lebreton *et al*, 2006)观测的电子密度数据, 并分析了异常时段的空间 N_e 变化特点。

2005 年 1 月 17 日在全国形成了一次明显的低点位移分界线(图 7a)。其中北部低点时间前移出现在北京时间 5 时—6 时(正常时间为地方时 12 时左右), 而南部区域低点时间后移出现在 15 时—17 时, 两部分的时间差达到 10 个小时左右。异常出现后 29 天于 2 月 15 日在该分界线的西部新疆乌什地区发生了一次 6.2 级地震($41.6^\circ N, 79.3^\circ E$)。为便于空间异常与低点位移的分析对比, 在此下载了法国 DEMETER 卫星在 1 月 16 日、17 日、18 日用 Langmuir 探针观测的电子密度数据, 共收集了穿过中国上空的 24 条半轨道的记录。

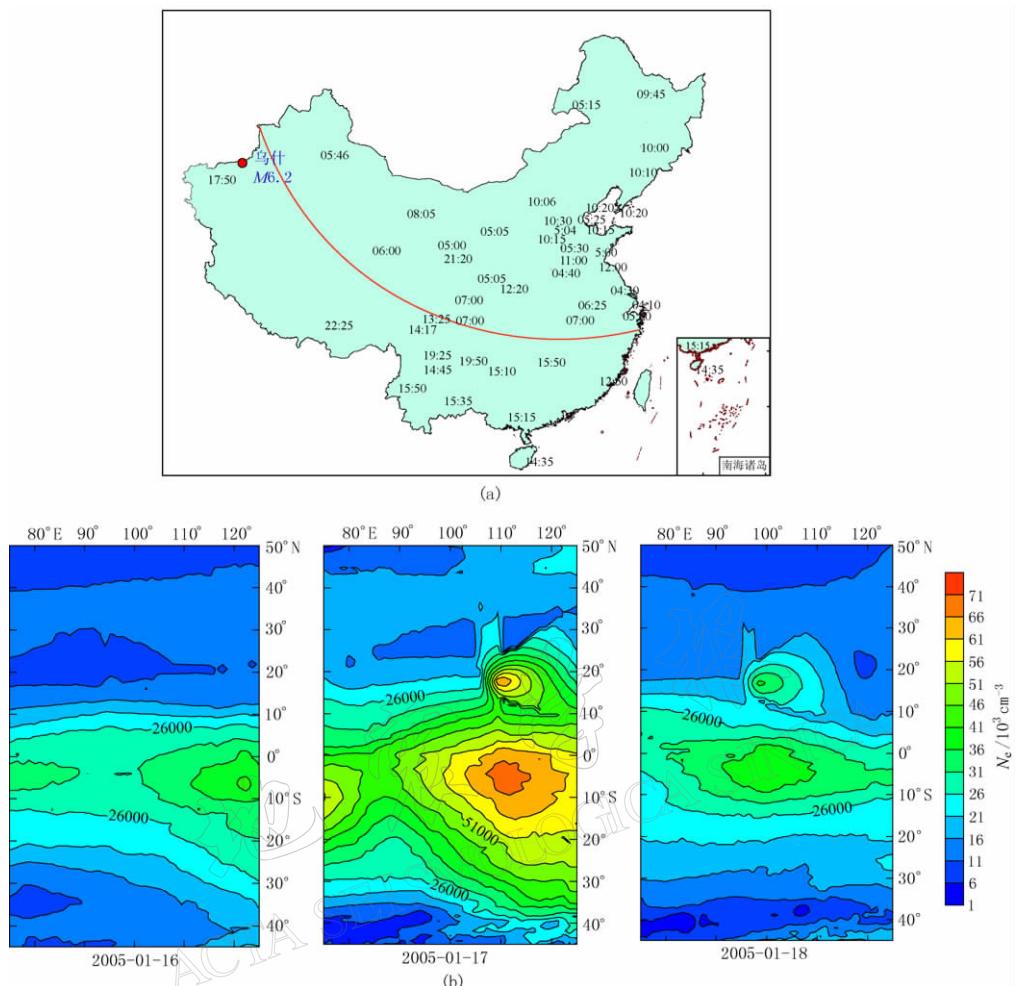


图 7 2005 年 1 月 17 日低点位移图(a)及 16 日—18 日空间(75°E — 120°E , 45°S — 50°N) N_{e} 变化图象(b). 图 a 中的数字 08:05 表示时:分

Fig. 7 Low point displacement image on Jan. 17, 2005(a), and spatial N_{e} variation images during 16 Jan. —18 Jan. (75°E — 120°E , 45°S — 50°N)(b)

3 天的数据等值线图(图 7b)使用了相同的数据限制(见图 7 色标). 图 7 中显示, 17 日的图象(图 7b 中图)与 16 日(图 7b 左图)和 18 日(图 7b 右图)存在明显差异, 赤道附近的电子密度 N_{e} 值快速上升, 形成密集的等值线分布, 而且高值的分布范围相对前一天的图象也显著扩张. 在 17 日的 N_{e} 最大值相比其它两天上升幅度接近 40%. 在 110°E 、 18°N 区域另外还出现局部高值, 18 日该局部高值区幅度减弱并向西迁移. 20°N — 50°N 范围内的 N_{e} 值相对其它两天也要高, 密度低于 11000 cm^{-3} (深蓝色)的区域较少. 在东部 120°E 、 40°N — 50°N 附近还出现相对高值区, 而其它两天在高纬地区是比较均匀的低值分布. 因此综合这 3 张图来看, 2005 年 1 月 17 日在 710 km 电离层高度确实发生了电子密度增加的现象, 反映了 17 日电离层确有扰动现象发生, 因此空间电磁变化与当日低点位移现象有很好的对应关系.

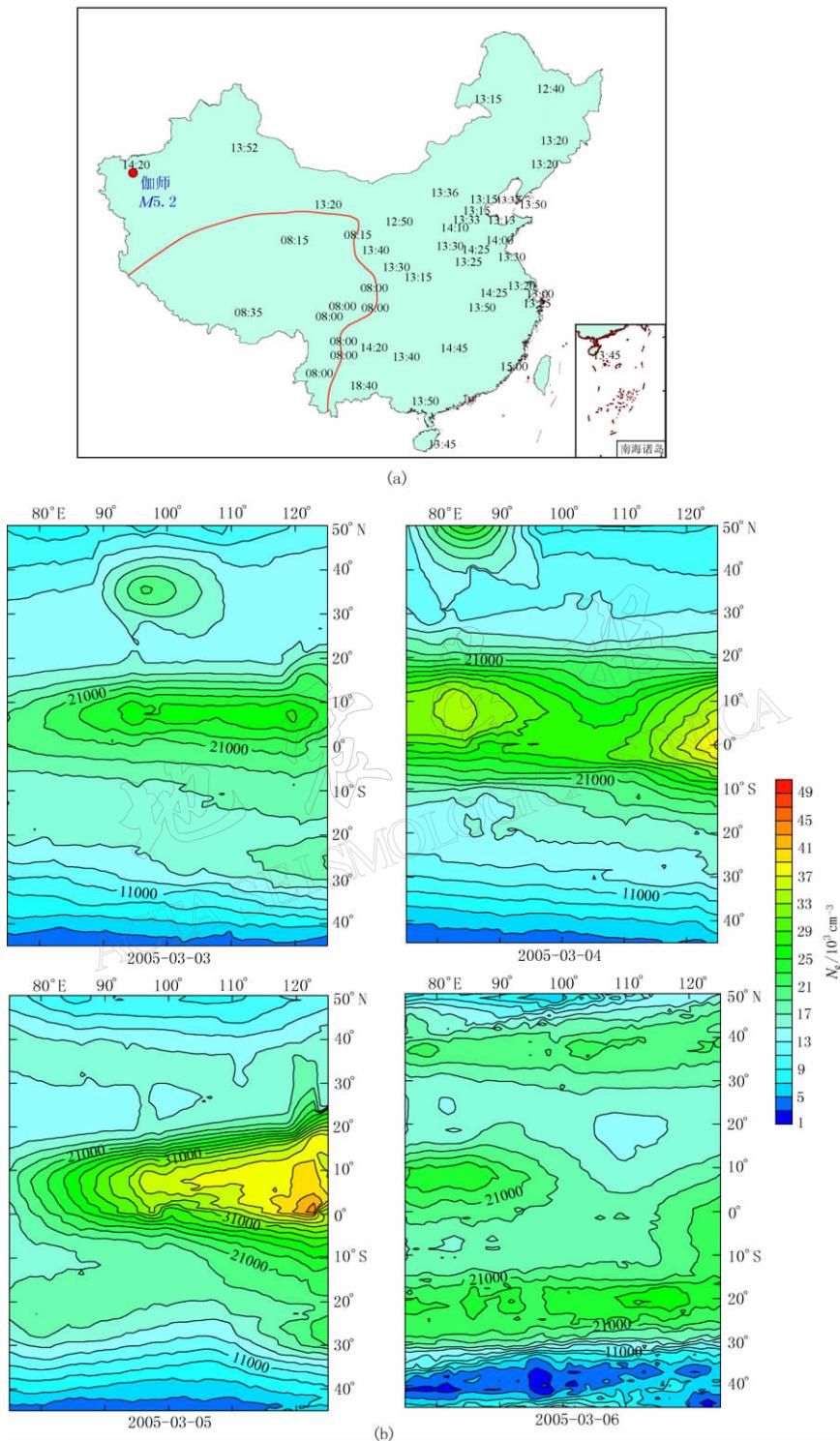


图 8 2005 年 3 月 5 日低点位移图(a)及 3 日—6 日空间(75°E — 120°E , 45°S — 50°N) N_e 变化图象(b). 图 a 中的数字 13:20 表示时:分

Fig. 8 Low point displacement image on Mar. 5, 2005(a), and spatial N_e variation images during 3 Mar. — 6 Mar. (75°E — 120°E , 45°S — 50°N)(b)

2005 年 3 月 5 日在中国西南部形成低点位移事件，位于中国西南部的台站每日低点都向前移动了 7—8 个小时，均出现在凌晨 6 时—7 时，异常分界线非常明显(图 8a)。这次事件后 3 月 24 日在中国新疆地区发生了 1 次 5 级左右地震，而同期该分界线向南的延长线上印尼在 3 月 28 日发生了 8.5 级强震。总结了这次事件前后共 4 天的数据(图 8b)，即 3 月 3 日—6 日期间中国上空的 N_e 数据。结果显示，3 月 3 日在赤道两侧 10°S — 20°N 之间出现峰值变化区域，峰值幅度在 22000 cm^{-3} 左右；3 月 4 日起赤道峰值范围有所扩大，而且最大峰值也增加到 39000 cm^{-3} ，而且北半球 N_e 也有所增加，但没有赤道附近明显；3 月 5 日 N_e 在峰值区增加幅度更大，最大峰值达到 45000 cm^{-3} 以上，相当于 3 月 3 日峰值密度的 2 倍，同时峰值区在南纬有扩张现象；3 月 6 日整个峰值区被打散，分别在南北半球和赤道附近，但峰值幅度恢复到 3 月 3 日的水平，与 3 月 4 日和 5 日明显不同。

两次低点位移事件虽然分界线分布位置不同，而且出现异常现象的台站也完全不同，但空间 N_e 的变化图象却呈现了非常好的相似性，即在低点位移的当日或相邻时间内空间 N_e 变化图象都在赤道峰值变化区呈现了显著的电子密度增加的现象，反映了空间电磁变化与地球磁场变化之间确实存在明显的关联。

纵观这两次低点位移期间的空间变化图象， N_e 表现的都是一个在整体空间升高的特性，赤道附近尤其突出。北部中国所属地区相比也是整体升高，但没有发现与低点分界线相对应的分区特征，而是一个更大区域的异常现象。可以说是电离层电子密度的增加引起了地面地磁观测数据的畸变，在深部介质越活跃的地区就可能激发了更强烈的电磁扰动，从而形成地磁垂直分量的低点位移现象，或者说低点位移是天地电磁场的联合作用，空间电磁背景场的变化在地下介质活跃区产生感应磁场，引起了地磁观测的日变信号畸变、低点时间迁移，从而形成大范围的低点位移现象，因此低点位移是一个空间与地球深部耦合形成的，不仅仅是地下介质活动的结果。

4 结论

通过对河北省昌黎台地磁 Z 分量的频谱分析，得出以下结论：

- 1) 磁暴时各频段地磁能量谱值普遍高于正常时段，增加幅度大约在 1 个量级左右，短周期段尤其明显，反映了磁扰比较强烈时磁场能量的增强效应。
- 2) 低点位移时各频段谱值整体低于正常时段，尤其在周期比较长的部分比较明显，减弱幅度在 0.5—1 个数量级。
- 3) 根据频谱值分布，可以明显区分磁暴活动、正常时段及低点位移异常，频谱分析也为辨识人为干扰提供了一种有效的手段。
- 4) 通过对多日低点位移时段的 FFT 累加与正常时段相对比发现，低点位移发生时，8.5 小时和 13.7 小时周期的频谱值增加，说明导致低点位移发生的源可能来自深部地幔介质。
- 5) 通过与空间电子密度的对比，发现与低点位移时间相对应，空间电离层均在赤道及其两侧出现了大范围的电子密度增加现象。其高值区分布与低点位移分界线没有空间上的对应关系，而且与地磁低点前移或后移也未发现明显的相关性。分析认为，地磁低点位移的产生与天地电离层-岩石圈的电磁耦合效应有关，大范围电离层电磁信息的增强可能在某些地下深部介质活跃的地区引起地磁观测信号畸变，形成地面地磁低点位移现象。天地

耦合机理尚需今后更加深入的工作。

本文使用的 DEMETER 数据由法国国家研究中心提供，在此表示诚挚谢意。

参 考 文 献

- 丁鉴海, 黄雪香. 1988. 地磁“低点位移”现象及其与地震的关系[J]. 地震学报, **10**(4): 552–561.
- 丁鉴海, 刘杰, 余素荣, 肖武军. 2004. 地磁日变化异常与强震的关系[J]. 地震学报, **26**(增刊): 79–87.
- 丁鉴海, 索玉成, 余素荣. 2005. 地磁场与电离层异常现象及其与地震的关系[J]. 空间科学学报, **25**(6): 536–542.
- 丁鉴海, 于素荣, 索玉成. 2006. 地球变化磁场观测资料在强地震短期预报中的应用[G]//中国地震局监测预报司编. GPS、卫星遥感及地球变化磁场地震短期预测方法研究. 北京: 地震出版社: 1–179.
- 郭增建, 秦保燕, 李海华. 1977. 磁暴、天气韵律与发震时间[J]. 地震战线, (3): 26–29.
- 黄雪香, 余素荣. 2000. 地磁低点位移异常类型特征与地震活动[J]. 地震, **20**(4): 39–44.
- 李琪, 杨冬梅, 张素琴, 赵永芬, 张建国. 2005. 地磁转换函数方法之典型震例及数模对比[J]. 地震, **25**(3): 85–90.
- 李明光, 梁秀兰. 1989. 利用地磁 Z 分量日变低点预报地震的新探索[J]. 四川地震, (4): 50–59.
- 陆远忠, 邓志辉, 李胜乐. 2000. 基于 GIS 的地震分析预报系统[M]. 成都: 成都地图出版社: 1–232.
- 史勇军, 孙燕萍, 朱燕, 范素琴, 热汗古·亦明克里木, 巴克·买买提. 2002. 伽师强震群活动过程中喀什台地磁加卸载响应比变化特征研究[J]. 内陆地震, **16**(1): 84–88.
- 吴小平. 2003. 利用地磁低点位移预测发震时间[J]. 四川地震, (1): 33–36.
- 吴小平, 辛华, 张永久. 2004. 地磁“低点位移”与“磁暴”相结合预测发震时间[J]. 四川地震, (2): 22–26.
- 解用明, 乔子云. 2003. 地磁交汇法在地震预报中的应用[J]. 山西地震, (1): 27–29.
- 赵洁, 朱振家, 张彩艳, 张俏丽. 2005. 嘉峪关地磁低点位移异常与干扰因素的讨论[J]. 地震地磁观测与研究, **26**(6): 42–45.
- Lebreton J P, Stverak S, Travnicek P, Maksimovic M, Klinge D, Merkallio S, Lagoutte D, Poirier B, Blelly P L, Koza-cek Z, Salaquarda M. 2006. The ISL Langmuir probe experiment procession onboard DEMETER: Scientific objectives, description and first results[J]. *Planet Space Sci.*, **54**(5): 472–486.
- Parrot M, Berthelier J J, Lebreton J P, Sauvad J A, Santolik O, Bleck J. 2006. Examples of unusual ionospheric observations made by the DEMETER satellite over seismic regions[J]. *Phys Chem Earth*, **31**: 486–495.
- Pulinets S A, Boyarchuk K A, Hegai V V, Kim V P, Lomonosov A M. 2000. Quasielectrostatic model of atmosphere-thermosphere-ionosphere coupling[J]. *Adv Space Res.*, **26**(8): 1209–1218.