

刘裔文, 徐继生, 徐良等. 2015. 电离层中纬槽极小的位置变化及其控制因素研究. 地球物理学报, 58(1):12-19, doi:10. 6038/cjg20150102.

Liu Y W, Xu J S, Xu L, et al. 2015. A study on the position variation of mid-latitude ionospheric trough minimum and its controlling factors. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58(1):12-19, doi:10. 6038/cjg20150102.

电离层中纬槽极小的位置变化及其控制因素研究

刘裔文, 徐继生*, 徐良, 尹凡

武汉大学电子信息学院, 武汉 430072

摘要 本文利用 2000 年至 2009 年 CHAMP 卫星朗缪尔探针实地测量的电子密度数据, 分析了电离层中纬槽的位置变化及其控制因素. 研究结果表明: (1) 地磁平静期电离层中纬槽的位置随磁地方时和经度变化; (2) 电离层中纬槽的位置对地理经度的依赖表现为西半球槽的位置高于东半球; (3) AE 指数和 SYM-H 指数与槽的位置变化显著相关, 表明极光电集流和环电流是中纬槽位置变化的重要控制因素; (4) 太阳风电场晨-昏分量的量值变化显著影响中纬槽位置, 而其极性变化的影响相对较弱. 研究结果对中纬槽建模有一定的参考价值.

关键词 电离层中纬槽; 磁暴; 中纬槽位置变化; 控制因素; CHAMP 卫星

doi:10. 6038/cjg20150102

中图分类号 P352

收稿日期 2014-06-25, 2014-11-23 收修定稿

A study on the position variation of mid-latitude ionospheric trough minimum and its controlling factors

LIU Yi-Wen, XU Ji-Sheng*, XU Liang, YIN Fan

School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China

Abstract Based on in-situ electron density measurements from CHAMP Planar Langmuir Probe (PLP), the position variation of mid-latitude ionospheric trough (MIT) minimum and its controlling factors is investigated. The CHAMP PLP data were collected from 2000 to 2009. The gradient of electron density was used to recognize the MIT structure. Then the method of statistical analysis was used to investigate the dependence of the position of MIT minimum to the magnetic local time and geographic longitude during geomagnetic quiet time. And then the relations of the MIT minimum position with geomagnetic indexes and solar wind parameters are analyzed respectively.

The results show that: (1) In the geomagnetic quiet period, the position of the trough minimum primarily varies with magnetic local time and geographic longitude. (2) The geographic longitude dependence of the trough minimum position shows that the latitudes of the MIT in the western hemisphere are higher than those in the eastern hemisphere as a whole. (3) The position variation of the MIT has significant correlations with SYM-H and AE, which indicates that SYM-H and AE are important controlling factors of the trough position. (4) The magnitude of dawn-dark component of solar wind electric field can significantly influence the position of the trough, but the influence of its polarity is relatively weaker. The magnetic local time and

基金项目 国家自然科学基金项目(41274160)资助.

作者简介 刘裔文, 男, 1986 年生, 博士, 2014 年毕业于武汉大学, 现就职于中国电波传播研究所, 主要从事电离层和电波传播研究.

E-mail: crirp_lyw@163.com

* **通信作者** 徐继生, 男, 武汉大学电子信息学院教授, 主要从事电离层和电波传播研究. E-mail: jsxu@whu.edu.cn

geomagnetic activity were regarded as the mainly factors controlling the movement of MIT. However, this paper indicates that the geographic longitude and the magnitude of dawn-dark component of solar wind electric field can also significantly influence the position of MIT. These factors should be considered in both theoretical and modeling researches in the future.

Keywords Mid-latitude ionospheric trough; Geomagnetic storm; Position variation; Controlling factor; CHAMP

1 引言

电离层中纬槽特指亚极光区电离层等离子体浓度的耗尽结构,出现在几乎所有的经度但纬度很窄的区域(Moffett and Quegan,1983;Rodger et al.,1992).这一结构最早由 Muldrew 和 Sharp 报道(Muldrew,1965;Sharp,1966).中纬槽基本上是一种夜间现象(Moffett and Quegan,1983),但也有许多昼侧中纬槽的观测证据(Kersley et al.,1997;Whalen,1989;Voiculescu et al.,2006).一般认为,电离层中纬槽的形成和维持是磁层等离子体对流的结果(Knudsen,1974;Knudsen et al.,1977).另外, H^+ 上行、氮分子浓度增加或中性风压低 F 层导致的复合速率增加,对电离层中纬槽的形成也有一定贡献(Schunk and Banks,1975;Schunk et al.,1976).还有研究表明,亚极光区快速离子流(SAID)与中纬槽的形成也存在关联(Rodger et al.,1992;Mishin et al.,2004;Voiculescu and Roth,2008).

由于地球空间环境条件的变化,中纬槽位置经常处于运动变化状态.在地磁平静期,中纬槽位置的变化与磁地方时、经度和季节等因素有关.磁扰动期间,中纬槽经常出现赤道向运动.此前,已有许多研究者利用来自多种技术手段的观测数据,研究了中纬槽位置的变化及其影响因素.大量的研究关注中纬槽的运动与地磁活动的关系.表征地磁活动最常用的指标是 Kp 指数,很多作者研究了 Kp 指数与中纬槽极小位置变化的联系,给出了各种中纬槽极小位置与 Kp 指数变化的经验关系式(Köhnlein and Raitt,1977;Spiro et al.,1978;Dudeney et al.,1983;Collis and Höggström,1988).不过,Werner 和 Prölss 认为,用 AE6 指数来表征暴时中纬槽的运动更合适(Werner and Prölss,1997).此外,也有研究者认为,DR 指数(Deminov et al.,1996)和 AL 指数(Zou et al.,2011)更适用于表征暴时中纬槽运动特征.鉴于中纬槽与高纬电离层对流图像存在密切联系,而对流图像主要受太阳风电场和行星际磁场的

控制,Voiculescu 等曾详细地研究过中纬槽发生率与 IMF- B_z 和 IMF- B_y 极性之间的关系(Voiculescu et al.,2006;Voiculescu and Nygrén,2007).He 等(2011)利用 COSMIC $N_m F_2$ 和 $h_m F_2$ 观测数据发现,夜间中纬槽出现的纬度存在一个 9 天的波动周期,且与太阳风速度存在明显的对应关系,他们认为太阳风速度可能更适合用来预测中纬槽出现的位置.还有一些作者研究了暴时中纬槽的运动与磁暴暴相的联系.利用 EISCAT 雷达观测数据,Collis 和 Höggström (1991)得到 1987 年 3 月 25 日磁暴期间中纬槽在磁暴急始后的两小时内往低纬移动超过 10° .Deminov 等(1992,1996)分析 1978—1979 年间的 14 个磁暴,发现中纬槽在初相未结束时就开始往赤道运动.利用 CIT 技术,Bust 等(1997)对 1993 年 11 月磁暴主相极大期间与磁暴前一天(磁静日)近似相同时段中纬槽所在位置进行了比较,发现在暴时中纬槽显著往赤道方向移动.

本文利用 2000 年至 2010 年近 10 年间 CHAMP 卫星朗缪尔探针实地测量的电子密度数据,首先分析了地磁平静期中纬槽位置的变化对磁地方时和地理经度的依赖.然后,通过统计分析,考察了中纬槽的运动与磁情指数和太阳风速度以及太阳风电场的关联.本文的研究结果对中纬槽建模有重要的参考价值.

2 数据和中纬槽识别方法

2.1 数据

本文用于分析电离层中纬槽特征的数据来自 CHAMP 卫星载朗缪尔探针(Planar Langmuir Probe,简称 PLP)的电子密度测量.CHAMP 卫星于 2000 年 7 月 15 日发射升空,于 2010 年 9 月 19 日停止飞行,轨道倾角为 87.3° ,轨道运行周期约为 1.57 h,轨道初始高度为 454 km.CHAMP 卫星 PLP 电子密度测量的范围为 $10^8 \sim 10^{12} \text{ m}^{-3}$,时间分辨率为 15 s.CHAMP 卫星载 PLP 电子密度测量数据已经过验证,表明测量数据是可靠的(McNamara et al.,2007).

为了研究暴时中纬槽运动的控制因素,本文用到太阳风和行星际磁场数据,这些数据由 ACE (Advanced Composition Explorer) 卫星测量得到. ACE 卫星于 1997 年 8 月 25 日发射升空,轨道中心位于日地之间的拉格朗日点 L1,距离地球约 $235.5 R_E$,轨道运行周期约 6 个月. 本文所用的数据主要包括磁场测量仪 MAG 提供的行星际磁场数据,和太阳风电子、质子、 α 粒子监测仪 SWEPAM 提供的太阳风速度和密度数据. MAG 和 SWEPAM 采集数据的时间分辨率分别为 16 s 和 64 s. 按照 Weimer 等 (2003) 给出的方法,太阳风和行星际磁场数据经过了适当的时延处理. 时延后,太阳风和行星际磁场数据都近似地投影到 X_{GSE} 轴上距地球 $10R_E$ 处的地球磁层顶的位置.

2.2 中纬槽识别方法

为了从 CHAMP 卫星载 PLP 的海量测量数据中自动识别中纬槽,我们基于槽的基本特征,编写了一个中纬槽自动识别程序. 首先把每条完整轨道分成 4 段,每段均从赤道到极区或从极区到赤道. 从赤道到极区,电离层经常存在三种典型的大尺度结构,即电离赤道异常、中纬槽和高纬槽. 我们假定中纬槽的低纬边界最低在不变量磁纬 40° 以上,这样,在绝大多数情况下,可以有效地区分电离赤道异常和中纬槽. 在很多情况下,中纬槽和高纬槽同时被检测到,并且其位置的可变性很大,很难完全区分. 为了尽量区分两者,我们假定中纬槽的极侧边界最高在不变量磁纬 75° 以下,且当两个槽状结构同时出现时,我们选赤道侧的槽作为中纬槽.

利用中纬槽自动识别程序,处理了 2000 年至 2010 年 CHAMP 卫星载 PLP 测量数据,总共识别出 33695 个中纬槽,其中北半球共 20554 个,南半球共 13141 个. 对每个识别出的中纬槽结构,分别确定槽的赤道侧边界、槽的极小和槽的极侧边界的位置以及对应的电子密度值. 基于这些中纬槽数据,分析地磁平静期和扰动期中纬槽位置的变化及其控制因素.

图 1 是静日夜间典型的中纬槽示例. 如图 1 所示,槽的基本特征是在中纬和高纬之间一个较窄的纬度带上,电离密度显著低于其两侧的背景电子密度,即出现电离密度耗尽 (depletion). 图 1 中,南半球中纬槽区位于不变量纬度约 57°S — 67°S 之间,北半球中纬槽区位于不变量纬度约 55°N — 65°N 之间. 在槽的赤道侧边界和极侧边界之外,电离密度随纬度的变化相对平缓,在两者之内的纬度带,电子密度

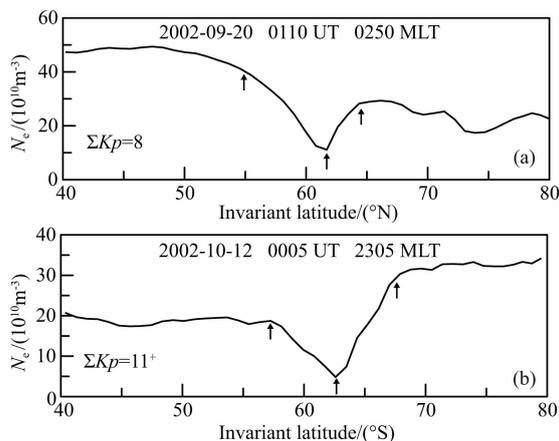


图 1 静日夜间南半球 (a) 和北半球 (b) 中纬槽示例. 图中箭头所指分别是槽的赤道侧边界、极小位置和极侧边界
Fig. 1 Examples of mid-latitude trough at midnight in (a) southern hemisphere and (b) northern hemisphere during quiet time. The arrows point out the equator-side boundary, the minimum, and the polar-side boundary of mid-latitude trough respectively

出现很陡的正梯度和负梯度. 在大多数情况下,可以较准确地识别槽极小的位置,而槽的极侧边界和赤道侧边界有时不容易准确识别. 因此,本文主要用中纬槽极小来表征中纬槽的位置.

3 地磁平静期中纬槽位置随磁地方时和地理经度的变化

图 2 是 2000 年至 2009 年近 10 年间地磁平静

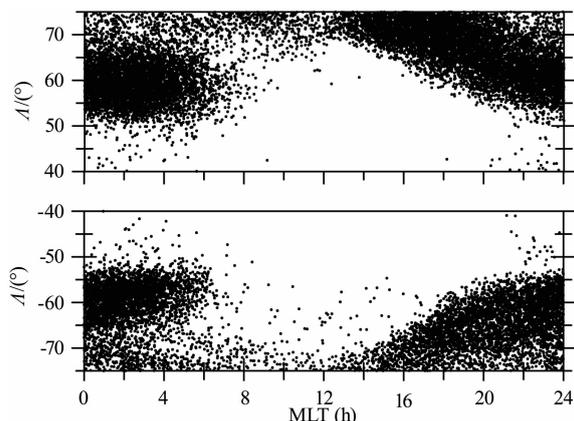


图 2 由 CHAMP 卫星载 PLP 测量数据识别的中纬槽极小位置的磁地方时分布. 上图为北半球, 下图为南半球
Fig. 2 Scatter plot of mid-latitude trough minimum position with magnetic local time based on CHAMP PLP measurements. The upper plot represents northern hemisphere, and the lower plot represents southern hemisphere

期($Kp < 3$)中纬槽极小对应的不变量磁纬的地方时分布.由图 2 可以看到,电离层中纬槽基本上是一种夜间现象,从磁地方时较早的黄昏开始频繁出现,直至黎明前,白天出现较少.从黄昏到午夜前,电离层中纬槽对应的纬度逐渐降低,午夜前至黎明前,槽极小所在的纬度最低,但随磁地方时的变化较小.南北半球槽的位置随磁地方时变化的特征基本相同.早晨至午后,槽出现较少,主要集中在较高的纬度上,更像是高纬槽.

为了定量地分析中纬槽位置对磁地方时的依赖关系,我们以 30 min 间隔把一天内中纬槽位置分成 48 份,然后求每个时间间隔内中纬槽位置的平均值.在此基础上,利用多项式拟合技术,得到南北半球平均中纬槽位置随磁地方时变化的拟合关系式分别为

$$\begin{aligned} \Lambda(^{\circ}\text{N}) &= 7.97 \times 10^{-4} \times t^4 - 4.178 \times 10^{-2} \times t^3 \\ &\quad + 0.6294 \times t^2 - 2.056 \times t + 61.56, \\ \Lambda(^{\circ}\text{S}) &= 8.778 \times 10^{-4} \times t^4 - 4.477 \times 10^{-2} \times t^3 \\ &\quad + 0.6718 \times t^2 - 2.471 \times t + 63.23, \end{aligned}$$

式中 t 代表磁地方时, N 和 S 分别表示北半球和南半球.

图 3 是 2000 年至 2009 年地磁平静期平均中纬槽位置随磁地方时变化及其多项式拟合曲线.图中散点是每 30 min 间隔内平均的中纬槽位置,短竖线表示其标准差.如图所示,中午前后中纬槽位置对应的纬度最高,在南北半球,不变量磁纬均达到 70° 附

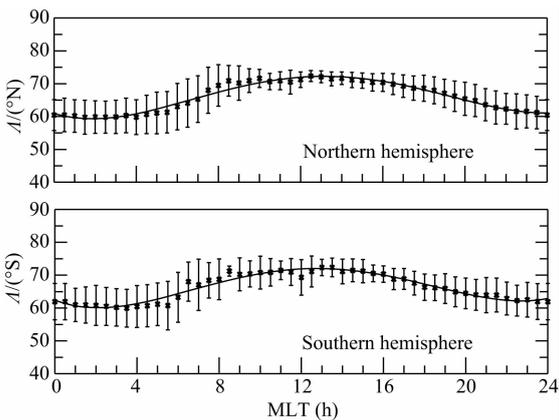


图 3 地磁平静期中纬槽位置随磁地方时的变化.实线是多项式拟合曲线,散点和短竖线分别是对应时刻的平均中纬槽位置和标准差

Fig. 3 Variation of mid-latitude trough minimum position with magnetic local time during geomagnetic quiet time. The solid curve is obtained by polynomial fitting. The scatter and short vertical line show average position and standard deviation respectively

近,而在午夜前后,中纬槽位置对应的纬度最低,在南北半球,均位于不变量磁纬 60° 附近,南半球比北半球平均约高 1.7° .此外,还可以看到,南北半球中纬槽位置随磁地方时变化具有很好的对称性.此前,利用早期的 AE-C 等卫星观测数据以及地基台站观测数据,科学家们对中纬槽位置随磁地方时的变化做了大量研究(Moffett and Quegan, 1983; Köhnlein and Raitt, 1977; Spiro et al., 1978),本文的结果与前人的研究结果基本一致.

图 4 是 2000 年至 2009 年地磁平静期午夜前后(2300—0100 MLT),平均中纬槽位置随地理经度的变化.图 4 中的虚线表示经度平均的中纬槽位置,其中北半球平均中纬槽位置位于不变量磁纬约 60.4°N ,南半球位于不变量磁纬约 60.9°S .如图 4 所示,南北两个半球中纬槽位置随地理经度呈现大致相同的变化趋势,即整体上西半球中纬槽所处纬度高于东半球.在北半球 30°W 附近,中纬槽位置达到约 65°N , 120°E 附近中纬槽位置降低至约 55°N ,最大相差约 10° .在南半球约 60°W 附近中纬槽位置达到 64°S 左右,在 140°E 附近降低至约 58°S ,最大相差约 6° .

通过多项式拟合,得到南北半球平均中纬槽位置随经度变化的拟合关系式分别为

$$\begin{aligned} \Lambda(^{\circ}\text{N}) &= 1.818 \times 10^{-8} \times t^4 + 1.471 \times 10^{-6} \times t^3 \\ &\quad - 6.127 \times 10^{-4} \times t^2 - 4.204 \times 10^{-2} \times t + 63.23, \\ \Lambda(^{\circ}\text{S}) &= 1.244 \times 10^{-6} \times t^3 - 1.064 \times 10^{-4} \times t^2 \\ &\quad - 3.386 \times 10^{-2} \times t + 62.03, \end{aligned}$$

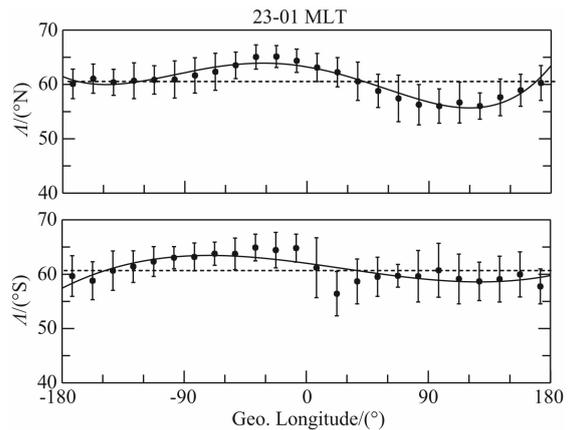


图 4 地磁平静期 2300—0100 MLT 中纬槽位置随经度的变化.实线是多项式拟合曲线,散点和短竖线分别是对应时刻的平均中纬槽位置和标准差

Fig. 4 Variation of mid-latitude trough minimum position with geographic longitude between 23 MLT and 01 MLT during geomagnetic quiet time. The solid curve is obtained by polynomial fitting. The scatter and short vertical line show average position and standard deviation respectively

需要指出,中纬槽位置随磁地方时和地理经度变化是 2000 年至 2009 年近 10 年观测数据的统计结果,季节和太阳活动周期对中纬槽位置变化可能有潜在的影响.为此,我们统计分析了中纬槽位置随月份的变化和逐年变化.图 5 给出 2000 年至 2009 年地磁平静期中纬槽位置随月份的变化.从图 5 可以看出,在两分点月份中纬槽位置稍高于两至点月份.不过,两分点月份和两至点月份中纬槽位置变化幅度很小,最大变幅不超过 1.5° .图 6 给出 2000 年至 2009 年地磁平静期中纬槽位置的逐年变化.从图 6 可以看出,从太阳活动高年到太阳活动低年,中纬槽位置所在纬度稍微升高,但升高幅度很小,基本不超过 1° .由于季节和太阳活动周期对中纬槽位置的影响很小,本文忽略季节和太阳活动周期的影响.

4 中纬槽运动的控制因素

大量研究表明,磁扰动条件下,中纬槽经常显著地朝赤道方向运动.下面,我们将利用 2000—2009 年近 10 年夜间 (21—06 MLT) 中纬槽极小位置数据、

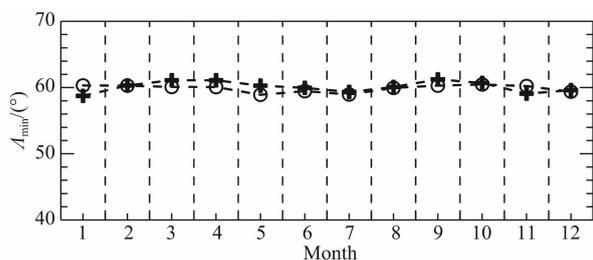


图 5 地磁平静期中纬槽位置随月份变化,空心圆圈代表北半球,实心十字代表南半球

Fig. 5 Variation of mid-latitude trough minimum position with month during geomagnetic quiet time. The hollow circle represents northern hemisphere, and the solid cross represents southern hemisphere

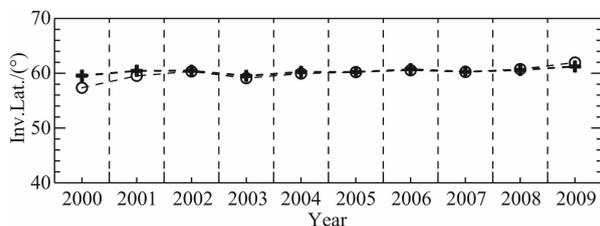


图 6 地磁平静期中纬槽位置逐年变化,空心圆圈代表北半球,实心十字代表南半球

Fig. 6 Variation of mid-latitude trough minimum position with month during geomagnetic quiet time. The hollow circle represents northern hemisphere, and the solid cross represents southern hemisphere

地磁数据以及 ACE 卫星的行星际磁场和太阳风测量数据,通过统计分析,探讨中纬槽运动的控制因素.

4.1 中纬槽运动与 AE 和 SYM-H 指数的联系

此前,已经有许多研究者考察了中纬槽与地磁扰动的联系 (Köhnlein and Raitt, 1977; Spiro et al., 1978; Dudeney et al., 1983; Collis and Häggström, 1988; Werner and Pröls, 1997; Deminov et al., 1996; Zou et al., 2011). 大部分研究都用 Kp 指数表征地磁扰动水平,得到中纬槽极小位置随 Kp 指数变化的经验关系式. AE 指数和 SYM-H 指数也是表征地磁活动性的常用指数,其中,AE 指数表征极光电集流活动性,反映极区磁亚暴的强度;SYM-H 指数反映磁层中赤道环电流强度,一般用于表征磁暴的强度.本文以极光电集流指数 AE 和环电流指数 SYM-H 作为地磁扰动的指标,统计分析 AE 指数和 SYM-H 指数与中纬槽极小位置变化的联系.

图 7 是 2000 年至 2009 年平均中纬槽极小对应的不变量磁纬 Δ 随环电流指数 SYM-H 变化的散点图.图中散点代表在给定 SYM-H 间隔内中纬槽极小位置的平均值,最右边的散点代表 SYM-H 指数大于等于 150 nT 统计得到的所有平均中纬槽极小位置,垂直竖短线表示标准差的范围,实线是对散点的线性拟合.

如图 7 所示,随着 SYM-H 指数减小,中纬槽极小明显向更低纬度移动,平均中纬槽极小对应的不变量磁纬 Δ 与 SYM-H 之间存在显著线性相关.线性回归式为

$$\Delta(^{\circ}\text{N}) = 0.04 \times \text{SYM-H} + 59.70,$$

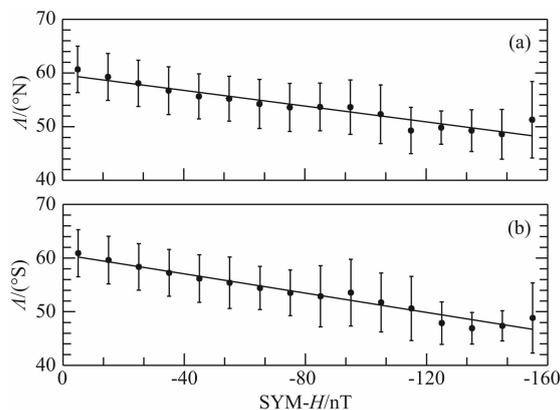


图 7 中纬槽极小位置随 SYM-H 指数变化散点图.

(a) 北半球; (b) 南半球

Fig. 7 Variation of mid-latitude trough minimum position with SYM-H index.

(a) Northern hemisphere; (b) Southern hemisphere

$$\Delta(^{\circ}\text{S}) = 0.09 \times \text{SYM-H} + 60.66,$$

SYM-H 指数单位为 nT.

SYM-H 指数表征赤道环电流的变化. 图 7 的统计结果表明, 中纬槽极小的位置与赤道环电流的变化密切相关. 增强的磁扰动导致增强的等离子体离子注入, 增强的离子注入使赤道环电流增强, 并可能使赤道环电流位置更靠近地表, 进而引起中纬槽向更低纬度移动.

图 8 是 2000 年至 2009 年平均中纬槽极小对应的不变量磁纬 Δ 随 AE 指数变化的散点图. 图中每个散点代表在给定 AE 间隔内中纬槽极小位置的平均值, 最右边的散点代表 AE 指数大于等于 1200 nT 统计得到的全部平均中纬槽极小位置, 垂直竖短线表示标准差的范围, 实线是对散点的线性拟合.

如图 8 所示, 在地磁相对平静期, AE 指数很低, 南北半球平均中纬槽极小的位置在不变量磁纬 61° 上下. 随着 AE 指数增加, 平均中纬槽极小的位置向更低纬度移动. 整体上, 南北半球中纬槽极小从 61° 左右移动到 52° 左右. 平均中纬槽极小对应的不变量磁纬与 AE 指数之间也存在很好的线性相关. 线性拟合得到

$$\Delta(^{\circ}\text{N}) = -0.007 \times \text{AE} + 60.51,$$

$$\Delta(^{\circ}\text{S}) = -0.008 \times \text{AE} + 61.09,$$

AE 指数单位为 nT.

AE 指数表征极光集流的强度. 随地磁扰动增强, 极光椭圆和极光集流都向较低的纬度移动, 极光卵的赤道侧边界也随之向更低的纬度移动, 挤压中纬槽向更低纬度移动.

此前, 已有许多研究者尝试利用磁情指数来预

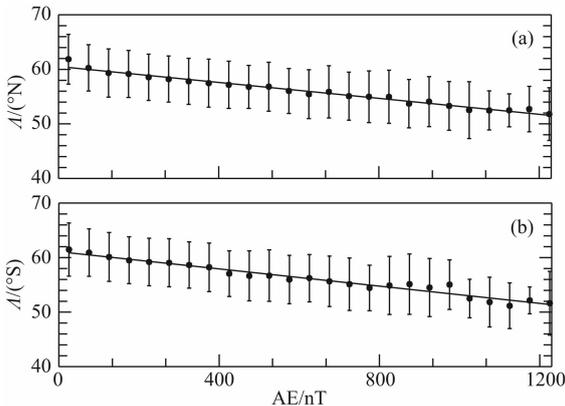


图 8 中纬槽极小位置随 AE 指数变化散点图.

(a) 北半球; (b) 南半球

Fig. 8 Variation of mid-latitude trough minimum position with AE index.

(a) Northern hemisphere; (b) Southern hemisphere

测中纬槽位置. 早期的研究者普遍采用 Kp 指数, 例如, Collis 和 Häggström 利用 1986 年 4 月至 1987 年 4 月 EISCAT 雷达的观测数据, 建立了中纬槽位置随 Kp 指数的经验关系式 (Collis and Häggström, 1988). 不过, Rodger 等认为, Kp 指数不适合用于预测中纬槽位置 (Rodger et al., 1986). Werner 和 Prölss 定义了一个修正的 AE 指数, 称作 AE6. 他们利用 1981 年 8 月至 1983 年 2 月 DE-2 卫星 700 km 以下的电子密度观测数据进行统计分析, 指出 AE6 指数可能更适合用来预测电离层槽出现位置 (Werner and Prölss, 1997). 不过, 中纬槽位置与 SYM-H 指数的统计分析此前还未见报道. 本文的统计结果表明, 中纬槽位置与 SYM-H 指数存在密切联系, 也可以用来预测中纬槽位置.

4.2 中纬槽运动与太阳风速度和电场变化的联系

如上所述, 中纬槽极小对应的不变量磁纬的变化与 AE 指数和 SYM-H 指数的变化呈显著线性相关. 不过, AE 指数和 SYM-H 指数的变化与行星际磁场和太阳风的变化有关, 是太阳风能量、动量和粒子进入地球空间的结果. 下面进一步分析太阳风速度 V_x 分量和太阳风电场 E_y 分量的变化与中纬槽运动的联系.

图 9 给出统计得到的 2000 年至 2009 年平均中纬槽极小位置随太阳风速度 V_x 分量变化的散点图. 图中, 当 V_x 较小时是以 $20 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 间隔对中纬槽极小位置进行统计平均, 而当 V_x 量值较大时, 由于样本点较少, 因此采取不均匀间距进行统计平均, 南北半球最右侧散点代表 $V_x > 1000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 对应的统计平均值. 从图 9 可以看出, 随着太阳风速度

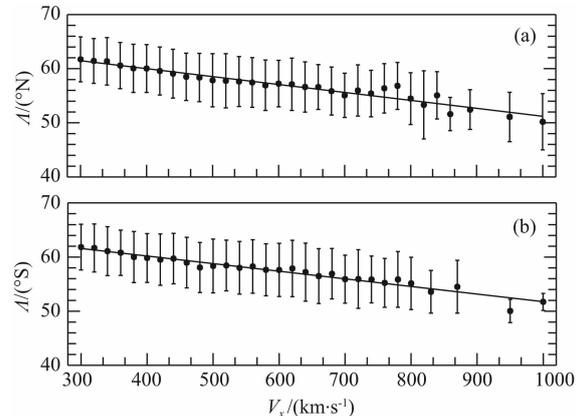


图 9 北半球 (a) 和南半球 (b) 平均中纬槽极小位置随 V_x 变化散点图

Fig. 9 Variation of mid-latitude trough minimum position with x component of solar wind velocity (V_x). (a) Northern hemisphere, (b) Southern hemisphere

V_x 从 $300 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 增加至 $1000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 南北半球中纬槽极小均从 62° 左右移动到 51° 左右. 且从统计平均角度看, 南北半球中纬槽极小位置与太阳风速度 V_x 分量都呈显著相关. 关于中纬槽极小的位置与太阳风的联系, 此前 He 等(2011)的研究发现, 伴随太阳风速度的 9 天周期性变化, 夜间中纬槽极小所在磁纬也存在一个 9 天的周期性变化, 其变化幅度约为 $1^\circ \sim 1.5^\circ$. 本文利用近 10 年的观测数据进行统计分析, 证实太阳风能量对中纬槽位置存在显著的控制作用.

由于太阳风是无碰撞等离子体, 太阳风电场可以理解成太阳风速度和行星际磁场的矢积. 忽略 V_z 和 B_x , 太阳风电场晨-昏分量 $E_y \approx V_x \times B_z$. 可见, E_y 的大小主要依赖 V_x 和 B_z 乘积的大小, 其极性主要依赖 B_z 的极性. 图 10 是 2000 年至 2009 年平均中纬槽极小的位置随太阳风电场 E_y 分量变化的散点图. 同样地, 当 E_y 绝对值较小时 ($|E_y| < 6$ 时) 取均匀间隔 (0.5 mV/m) 进行统计平均, 而当 E_y 绝对值较大时采取不均匀间距进行统计平均, 图中最左侧和最右侧的散点代表 $|E_y| > 12$ 对应的平均中纬槽极小位置.

从图 10 可以看出, 太阳风电场 E_y 分量无论是晨-昏向(正值)还是昏-晨向(负值), 随着 E_y 绝对值增加, 中纬槽均明显倾向于出现在更低的纬度. $E_y = 0$ 时, 南北半球中纬槽极小均位于不变量磁纬 60° 左右. 在北半球, $E_y \geq 12$ 时中纬槽极小移动到 49° 左右, $E_y \leq -12$ 时, 中纬槽极小移动到 51° 左右, 在南半球, $E_y \geq 12$ 时中纬槽极小移动到 47° 左右, $E_y \leq$

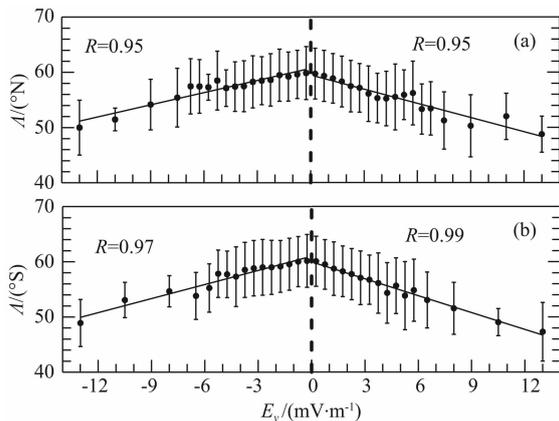


图 10 平均中纬槽极小位置随太阳风电场 E_y 变化散点图. (a) 北半球, (b) 南半球结果

Fig. 10 Variation of mid-latitude trough minimum position with dawn-dark component of solar wind electric field (E_y). (a) Northern hemisphere, (b) Southern hemisphere

-12 时, 中纬槽极小移动到 50° 左右. 这意味着晨-昏向 E_y 对中纬槽极小位置的影响似乎比昏-晨向 E_y 稍强. 统计分析表明, 南北半球中纬槽极小位置与 $|E_y|$ 呈显著线性相关. 线性拟合得到

$$\Delta(^{\circ}\text{N}) = -0.85 \times E_y (> 0) + 59.49,$$

$$\Delta(^{\circ}\text{N}) = 0.74 \times E_y (< 0) + 60.73;$$

$$\Delta(^{\circ}\text{S}) = -1.02 \times E_y (> 0) + 59.95,$$

$$\Delta(^{\circ}\text{S}) = 0.85 \times E_y (< 0) + 60.98.$$

此前, 关于中纬槽极小的位置随太阳风电场变化的研究结果很少. 有研究指出, Dst 小于 -100 nT 的强磁暴与持续 3 h 以上的 IMF- B_z 南向存在很好的一一对应关系(Rodger et al., 1986), 这暗示太阳风电场的极性对中纬槽极小的位置变化有某种程度的控制作用. 与 Rodger 等(1986)的研究结果稍有不同, 本文的统计结果表明, 对中纬槽极小的位置变化起主要控制作用的不是太阳风电场的极性, 而是太阳风电场的大小. 这说明控制中纬槽运动的因素可能很复杂, 也许晨-昏向 E_y 会导致中纬槽在磁暴主相期间显著往赤道方向运动, 而昏-晨向 E_y 则可能在磁暴恢复相等条件下对中纬槽出现位置起控制作用. 对此还有待进一步研究.

5 总结

本文利用 2000 年至 2009 年近 10 年间 CHAMP 卫星朗缪尔探针实地测量的电子密度数据, 分析了中纬槽的位置变化以及引起中纬槽的位置变化的控制因素, 首次考察了中纬槽的位置对地理经度的依赖和太阳风晨昏电场对中纬槽位置变化的控制作用. 研究表明, 在地磁平静期, 磁地方时和地理经度是引起中纬槽位置变化的主要因素, 磁地方时的控制作用在南北半球基本对称, 而中纬槽位置变化的经度效应表现为, 整体上西半球槽的位置高于东半球. 统计分析表明, AE 指数和 SYM-H 指数与中纬槽位置的变化显著相关, 表明极光电流和环电流是中纬槽位置变化的重要控制因素. 太阳风晨昏电场与中纬槽位置变化的统计分析发现, 中纬槽位置的变化主要受太阳风晨昏电场的量值变化的影响, 而其极性的影响相对较弱.

本文分析结果表明太阳风晨昏电场的极性对中纬槽位置变化没有明显的控制作用, 这是一个与此前的研究不同的结果, 其相关物理过程需要进一步的研究.

References

- Bust G S, Gaussiran T L II, Coco D S. 1997. Ionospheric observations of the November 1993 storm. *J. Geophys. Res.*, 102(A7): 14293-14304.
- Collis P N, Häggström I. 1988. Plasma convection and auroral precipitation processes associated with the main ionospheric trough at high latitudes. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 50(4-5): 389-404.
- Collis P N, Häggström I. 1991. High-latitude ionospheric response to a geomagnetic sudden commencement. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 53(3-4): 241-248.
- Deminov M G, Karpachev A T, Afonin V V, et al. 1992. Variations of the main ionospheric trough position depending on longitude and geomagnetic activity. *Geomagn. Aeron.*, 32(5): 185.
- Deminov M G, Karpachev A T, Annakuliyev S K, et al. 1996. Dynamics of the midlatitude ionospheric trough during a magnetic storm: Main phase. *Geomagnetism and Aeronomy, English Translation*, 35(6): 781-786.
- Dudney J R, Rodger A S, Jarvis M J. 1983. Radio studies of the main F region trough in Antarctica. *Radio Sci.*, 18(6): 927-936.
- He M S, Liu L B, Wan W X, et al. 2011. A study on the nighttime midlatitude ionospheric trough. *J. Geophys. Res.*, 116(A5): A05315, doi: 10.1029/2010JA016252.
- Kersley L, Pryse S E, Walker I K, et al. 1997. Imaging of electron density troughs by tomographic techniques. *Radio Sci.*, 32(4): 1607-1621.
- Knudsen W C. 1974. Magnetospheric convection and the high-latitude F2 ionosphere. *J. Geophys. Res.*, 79(7): 1046-1055.
- Knudsen W C, Banks P M, Winningham J D, et al. 1977. Numerical model of the convecting F2 ionosphere at high latitudes. *J. Geophys. Res.*, 82(29): 4784-4792.
- Köhnlein W, Raitt W J. 1977. Position of the mid-latitude trough in the topside ionosphere as deduced from ESRO 4 observations. *Planetary and Space Science*, 25(6): 600-602.
- McNamara L F, Cooke D L, Valladares C E, et al. 2007. Comparison of CHAMP and Digisonde plasma frequencies at Jicamarca, Peru. *Radio Sci.*, 42(2): RS2005, doi: 10.1029/2006RS003491.
- Mishin E V, Burke W J, Viggiano A A. 2004. Stormtime subauroral density troughs: Ion-molecule kinetics effects. *J. Geophys. Res.*, 109(A10), A10301, doi: 10.1029/2004JA010438.
- Moffett R J, Quegan S. 1983. The mid-latitude trough in the electron concentration of the ionospheric F-layer: a review of observations and modelling. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 45(5): 315-343.
- Muldrew D B. 1965. F-layer ionization troughs deduced from Alouette Data. *J. Geophys. Res.*, 70(11): 2635-2650.
- Rodger A S, Brace L H, Hoegy W R, et al. 1986. The poleward edge of the mid-latitude trough—its formation, orientation and dynamics. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 48(8): 715-719, 721-728.
- Rodger A S, Moffett R J, Quegan S. 1992. The role of ion drift in the formation of ionisation troughs in the mid-latitude ionosphere—a review. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 54(1): 1-30.
- Schunk R W, Banks P M. 1975. Auroral N₂ vibrational excitation and the electron density trough. *Geophys. Res. Lett.*, 2(6): 239-242.
- Schunk R W, Banks P M, Raitt W J. 1976. Effects of electric fields and other processes upon the nighttime high-latitude F layer. *J. Geophys. Res.*, 81(19): 3271-3282.
- Sharp G W. 1966. Midlatitude trough in the night ionosphere. *J. Geophys. Res.*, 71(5): 1345-1356.
- Spiro R W, Heelis R A, Hanson W B. 1978. Ion convection and the formation of the mid-latitude F-region ionization trough. *J. Geophys. Res.*, 83(A9): 4255-4264.
- Voiculescu M, Virtanen I, Nygrén T. 2006. The F-region trough: seasonal morphology and relation to interplanetary magnetic field. *Ann. Geophys.*, 24: 173-185.
- Voiculescu M, Nygrén T. 2007. IMF effect on ionospheric trough occurrence at equinoxes. *Adv. Space Res.*, 40(12): 1935-1940.
- Voiculescu M, Roth M. 2008. Eastward sub-auroral ion drifts or ASAIID. *Ann. Geophys.*, 26: 1955-1963.
- Weimer D R, Ober D M, Maynard N C, et al. 2003. Predicting interplanetary magnetic field (IMF) propagation delay times using the minimum variance technique. *J. Geophys. Res.*, 108(A1), doi: 10.1029/2002JA009405.
- Werner S, Pröls G W. 1997. The position of the ionospheric trough as a function of local time and magnetic activity. *Adv. Space Res.*, 20(9): 1717-1722.
- Whalen J A. 1989. The daytime F layer trough and its relation to ionospheric-magnetospheric convection. *J. Geophys. Res.*, 94(A12): 17169-17184.
- Zou S S, Moldwin M B, Coster A, et al. 2011. GPS TEC observations of dynamics of the mid-latitude trough during substorms. *Geophys. Res. Lett.*, 38(14), L14109, doi: 10.1029/2011GL048178.