0254-6124/2022/42(2)-0232-08 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

LI Bo, LI Lei, GOU Xiaochen, ZHOU Bin. Magnetic Signatures and Identification of Equatorial Plasma Bubbles (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2022, **42**(2): 232–239. DOI:10.11728/cjss2022.02.210323033

电离层等离子体泡的磁场扰动特征与识别*

李 博[1,2] 李 磊[1] 苟晓晨[1] 周 斌[1]

1(中国科学院国家空间科学中心 空间天气学国家重点实验室 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 等离子体泡是赤道区电离层常见的密度耗空结构，同时伴随着背景磁场的增强和垂直背景磁场方向上的扰动，这些扰动具有阿尔芬波的特征。本文利用 Swarm 卫星的标量、矢量磁场以及等离子体观测数据，考察了等离子体泡产生的磁场扰动信号特征，发现磁场强度和平均场向分量的增强均与等离子体泡密度下降有较强的负相关性，说明磁场标量和矢量（平均场向分量）数据都可以用来识别等离子体泡。由于 Swarm 卫星的标量磁场数据噪声明显低于矢量磁场数据，利用标量磁场数据可以提高等离子体泡的识别率，识别更多波动较小的等离子体泡。

关键词 电离层，等离子体泡，磁场扰动，标量磁场，矢量磁场

中图分类号 P352

Magnetic Signatures and Identification of Equatorial Plasma Bubbles

LI Bo[1,2] LI Lei[1] GOU Xiaochen[1] ZHOU Bin[1]

1(*State Key Laboratory of Space Weather*, *National Space Science Center*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100190)

2(*University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049)

Abstract Equatorial Plasma Bubbles (EPBs) are density depleted structures in the equatorial ionosphere, accompanied by the enhanced magnetic field strength, and fluctuations in the directions transverse to the main field, which have Alfvenic wave signatures. Utilizing the scalar, vector magnetic field, and plasma data from the Swarm mission, the magnetic signatures related with EPB are investigated. It is found that the changes both in the magnetic field strength and the component parallel with the main field are anti-correlated with the density changes inside EPBs, suggesting both the scalar and vector magnetic field data could be used to identify EPSs. Comparing the results of EPB identification using Swarm satellite scalar and vector magnetic field data products respectively, it is confirmed using the scalar data can increase the chance to identify EPBs, especially to find EPBs with

* 国家自然科学基金项目（41904147）和国家重点研发计划项目（2018YFC1503503）共同资助

2021-03-23 收到原稿，2021-12-31 收到修定稿

E-mail：lil@nssc.ac.cn

relatively lower field fluctuations, since the noise level of the Swarm scalar magnetometer is about one order of magnitude lower than that of the vector magnetometer.

Key words　Ionosphere, Equatorial plasma bubble, Magnetic field fluctuation, Scalar magnetic field, Vector magnetic field

0　引言

日落后, 电离层 F 层底部带电粒子的复合率高于顶部, 在 F 层底部和顶部之间出现了较大的密度梯度。这个密度梯度使得瑞利–泰勒不稳定性从底部开始增长。不稳定的低密度等离子体还受到电离层东向电场的作用, 同时向上漂移, 在密度较高的 F 层顶部形成密度较低的等离子体空腔结构。磁赤道附近的这种空腔结构在抬升到 F 层顶部后, 沿着磁力线向南、北扩展到中低纬度区域, 形成了空间尺度不一的等离子体耗空区域, 称之为电离层等离子体泡(Equatorial Plasma Bubble, EPB)[1,2], 有时也称之为扩展 F(Equatorial Spread-F, ESF)[1]。

等离子体泡的分布具有明显的时空特征。在南北磁纬度 10°±5°的范围内出现等离子体泡的概率远大于其他纬度[2,3]。在地磁平静时期(Kp<3), 等离子体泡主要出现在黄昏后, 20:00－24:00 LT 最多, 而午夜过后则较少[2,4]。地磁活动剧烈时, 黄昏等离子体泡的生成受到抑制, 而夜间等离子体泡的生成则有所增强[5,6]。Kp 与子夜前 EPB 的发生率负相关, 而与子夜后的发生率正相关[7,8]。在季节上, 秋季等离子体泡的发生率(平均 18.5%)略高于春季(平均 13.2%), 而冬季等离子体泡的发生率则明显大于夏季, 尤其在大西洋高达 60%, 夏季该区域基本没有等离子体泡出现[2]。

磁化等离子体中带电粒子运动产生的磁矩与背景磁场方向相反, 磁矩的大小取决于粒子温度和背景磁场的比值。因此, 当等离子体泡内部等离子体密度下降, 磁场会有明显的增强, 而在等离子体泡的壁上则会形成抗磁电流$\boldsymbol{j}=k_B\nabla\left[n\left(T_i+T_e\right)\right]\times\boldsymbol{B}$[9], 这里$n$为电子密度, $\boldsymbol{B}$为背景磁场, k_B为玻尔兹曼常数, T_i和T_e分别为离子和电子温度。抗磁电流由压力梯度驱动, 沿着等离子体泡的壁(密度梯度最大的地方)流动。电流产生的磁场与背景磁场的方向相同时, 会增强等离子体泡内部的磁场, 增量有时高达 1.5 nT 以上[2]。这一特征可用来识别等离子体泡[2]。对于等离子体泡, 除了抗磁效应引起的背景磁场方向增强外, 在垂直于背景磁场方向也会有横向扰动[10,11], 这些扰动具有阿尔芬波的特征, 但横向扰动的产生机制目前尚不很明确。

本文从 Swarm 卫星的观测数据中寻找等离子体泡, 考察其磁场扰动特征, 并探讨根据磁场特征识别等离子体泡的方法。

1　等离子体泡的磁场特征

等离子体泡最基本的特征是其密度低于周边环境。当等离子体泡上升到顶部电离层后, 沿着地磁场的磁力线向南、北扩展, 形成场向结构。对沿着磁力线分布的等离子体泡来说, 静态磁流体力学动量方程为

$$\nabla\left(\boldsymbol{P}+\frac{\boldsymbol{B}^2}{2\mu_0}\right)=\frac{1}{\mu_0}(\boldsymbol{B}\cdot\nabla)\boldsymbol{B}. \tag{1}$$

其中, $\boldsymbol{P}$ 为压强, μ_0为真空磁导率。式(1)右边为磁张力项。在磁赤道附近, 电离层地磁场的磁力线可以近似看作直线, 磁张力项可以忽略不计, 作用于等离子体上的力是垂直于场向的磁压梯度力。将理想气体状态方程代入 $\boldsymbol{P}$, 于是在等离子体泡和周围环境的分界面上有

$$\Delta\left(\frac{\boldsymbol{B}^2}{2\mu_0}\right)+k_B\Delta\left[n_\mathrm{e}\left(T_\mathrm{e}+T_\mathrm{i}\right)\right]=0. \tag{2}$$

因为地磁场远大于等离子体泡产生的磁场, 式(2)的一级近似为

$$\frac{\boldsymbol{B}\cdot\Delta\boldsymbol{B}}{\mu_0}\approx-k_B\Delta\left[n_\mathrm{e}\left(T_\mathrm{e}+T_\mathrm{i}\right)\right]. \tag{3}$$

因为等离子体泡内外温度的差异显著小于密度的差异, 有

$$\begin{aligned}\Delta\boldsymbol{B}\approx&-\frac{\mu_0k_B}{\boldsymbol{B}}\Delta\left[n_\mathrm{e}\left(T_\mathrm{e}+T_\mathrm{i}\right)\right]\approx\\&-\frac{\mu_0k_B}{\boldsymbol{B}}\left(\Delta n_\mathrm{e}\right)\left(T_\mathrm{e}+T_\mathrm{i}\right).\end{aligned} \tag{4}$$

由式 (4) 可见, 当等离子体泡边界两侧的密度变化明

显大于温度变化时，抗磁效应产生的磁场变化近似与等离子体密度差异成正比。午夜前低纬度地区电离层内 B=30000 nT, T_e+T_i=2000 K。如果 Δn=2×10^{11} m^{-3}，计算可得ΔB=0.23 nT。因此，当环境等离子体的密度较低时，例如电离层赤道异常的电子低密度区域，等离子体泡产生的磁场扰动很小，通常可以忽略。

除背景磁场方向的磁场增强外，等离子体泡还能产生垂直于背景磁场方向的横向扰动[2,10,11]。通常认为，磁场的横向扰动是由场向电流产生的，具有阿尔芬波的特征。按照瑞利–泰勒不稳定性理论，电离层内东向的重力漂移电流遇到密度不均匀区时，会出现电荷局部堆积，产生扰动电场和磁场波动，并且磁场波动以阿尔芬波的形式沿着磁力线向极区、赤道方向传播。本文将根据 Swarm 卫星的观测数据，考察等离子体泡产生的磁场扰动信号的特征。

2 Swarm 卫星观测结果

2.1 数据来源

Swarm 卫星是欧空局在 2013 年发射的三颗近地轨道卫星（Swarm-Alpha, Swarm-Bravo, Swarm-Charlie），其主要目的是利用星载先进仪器进行地球磁场测量。其中相对较低的两颗卫星（Swarm-A 和 Swarm-C）以 462 km 的初始高度和 87.35°的轨道倾角飞行，东西向的地理经度相差 1.5°，Swarm-B 飞行高度约 520 km，轨道倾角 87.75°。每颗卫星都搭载了相同的载荷，其中包括磁通门矢量磁力仪、氦光泵标量磁力仪和朗缪尔探针。磁通门矢量磁力仪在 1 Hz 点处的噪声功率谱密度优于 11 pT·$Hz^{-0.5}$，分辨率优于 0.1 nT，采样频率 50 Hz。氦光泵标量磁力仪在 1 Hz 点处的噪声功率谱密度优于 1 pT·$Hz^{-0.5}$，分辨率优于 0.01 nT，按 1 Hz 的频率测量磁场总场强[12,13]。朗缪尔探针测量电子密度和温度。

本文采用欧空局*发布的 Swarm-A 卫星 1 Hz 的矢量磁场、标量磁场及等离子体密度数据。

2.2 等离子体泡引起的磁场扰动

选择 2015 年全年磁平静时期（Kp<3）夜间（19:00－06:00 LT）低纬地区（磁纬±30°之间）的数据。Swarm 卫星发布的磁场数据是基于北东地 (NEC) 地理坐标系，而本文讨论的波动在背景磁场方向或者垂直背景磁场方向上，所以需要将 NEC 坐标系下的磁场数据转换到平均场向坐标系中（Mean-Field-Aligned, MFA, 如图 1 所示[14]）。卫星测量的磁场主要包含关于时间缓慢变化的大尺度背景磁场、快速变化的小尺度磁场波动以及一些噪声，磁场的测量值可以认为是这三部分的叠加，即

$$\boldsymbol{B}(t)=\boldsymbol{B}_0(t)+\boldsymbol{b}(t)+\boldsymbol{n}(t). \tag{5}$$

其中，$\boldsymbol{B}_0(t)$为缓慢变化的大尺度磁场，$\boldsymbol{b}(t)$为高频的磁场信号，$\boldsymbol{n}(t)$为随机噪声。磁场平均场向的单位矢量定义为

$$\boldsymbol{\mu}(t)=\boldsymbol{B}_0/|\boldsymbol{B}_0(t)|. \tag{6}$$

垂直平均场向的西向单位矢量定义为

$$\boldsymbol{\phi}(t)=\boldsymbol{r}(t)\times\boldsymbol{B}_0(t)/|\boldsymbol{r}(t)\times\boldsymbol{B}_0(t)|. \tag{7}$$

其中，$\boldsymbol{r}(t)$为卫星的位置矢量。径向的单位矢量为

$$\boldsymbol{\nu}(t)=\boldsymbol{\mu}(t)\times\boldsymbol{\phi}(t). \tag{8}$$

低通滤波可以将高频的磁场信号消除掉，只留下大尺度的背景磁场$\boldsymbol{B}_0$，而$\boldsymbol{B}_0$的方向就是平均场向。假设卫星的速度是 7.5 km·s^{-1}，考虑等离子体泡的尺度一般都小于 200 km，进行截止频率 0.01 Hz 的低通滤波，留下波长>700 km 左右的磁场作为平均背景场$\boldsymbol{B}_0$，根据$\boldsymbol{B}_0$就可以将 NEC 坐标系下的磁场转换到 MFA 坐标系。

首先使用矢量磁场数据来考察等离子体泡产生

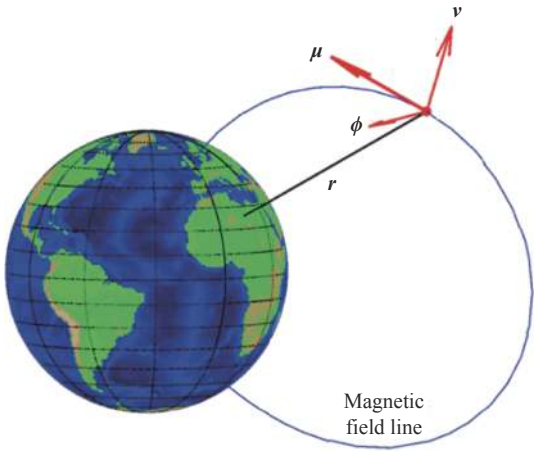

图 1 平均场向坐标系

Fig. 1 Schematic diagram of the Mean-Field-Aligned coordinate system

* https://swarm-diss.eo.esa.int/

的磁场扰动。图 2 和图 3 给出的是 2015 年 2 月 5 日 00:05 UT(23:03 LT)的一个事件。根据图 3(c) 所示的等离子体密度数据可以判断, 在磁纬 24°N 附近, 卫星观测到了等离子体泡。按照文献 [1] 的数据处理方法, 先将磁场数据转换到 MFA 坐标系。为了凸显等离子体泡的磁场波动, 在 MFA 坐标系下, 将观测数据减去国际地磁参考场(IGRF-13)的磁场三分量(见图 2), 并对二者之差进行 0.04 Hz 高通滤波如图 3 (a) 所示, 波动周期大于 25 s 的波动都会被过滤掉, 只保留波长在 188 km 以内的波动[1]。然后对滤波后的磁场进行整流, 如图 3(b) 所示, 可以看到在磁纬 24°N 的地方有明显的波动, 磁场平均场向分量的最大扰动幅值在 0.4 nT 以上。

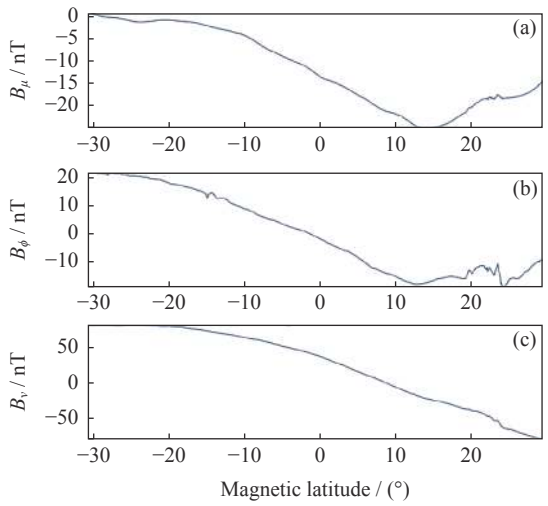

图 2　2015 年 2 月 5 日 Swarm 磁场观测数据

Fig. 2　Swarm observation data on 5 February 2015

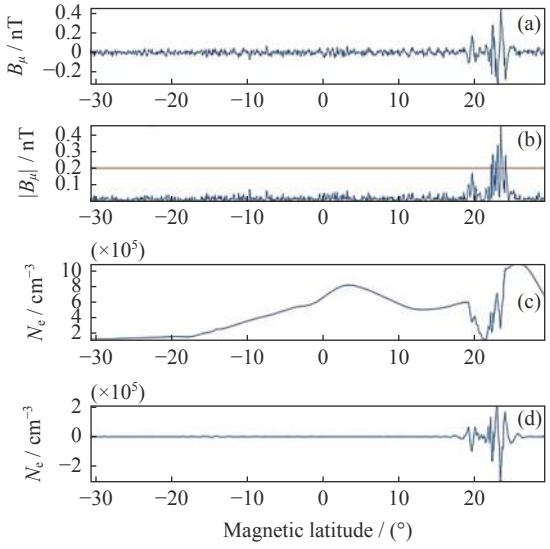

图 3　2015 年 2 月 5 日等离子体泡。(a) 高通滤波后的图 2(a) 磁场平均场向分量, (b) 磁场平均场向分量的幅值, (c) Swarm 观测的电子密度, (d) 高通滤波后的电子密度

Fig. 3　Plasma bubble on 5 February 2015. (a) High pass filtered main field aligned component in Fig.2(a), (b) amplitude of the component, (c) electron density observed by Swarm, (d) high pass filtered electron density

对于等离子体泡而言, 平均场向上磁场波动主要由抗磁电流引起, 磁场场向分量的变化$\Delta \boldsymbol{B}$与泡内外密度之差Δn近似满足式 (4)。图 4 给出了高通滤波后磁场波动与等离子体密度 (见图 3 d) 的关系, 从结果上看, 两者之间存在明显的负相关性, 计算得到的相关系数为 R=–0.76, 可见平均场向的磁场扰动是由等离子体密度的变化引起的。

对于等离子体泡, 除了平均场向以外, 磁场的其他分量和磁场总强度也会产生波动, 如图 5 所示。观察图 5 中各分量可以看出, 各分量的变化具有较高的相关性。图 6 给出了 2015 年 2 月 5 日等离子体泡滤波后磁场各分量间的相关性。图 6 中的结果给出了西向分量($\boldsymbol{\phi}$方向)、径向分量($\boldsymbol{\nu}$方向)与场向分量的相关性, 且可以看出磁场强度与场向分量和等离子体密度为线性相关。计算得到西向分量、径向分量及磁

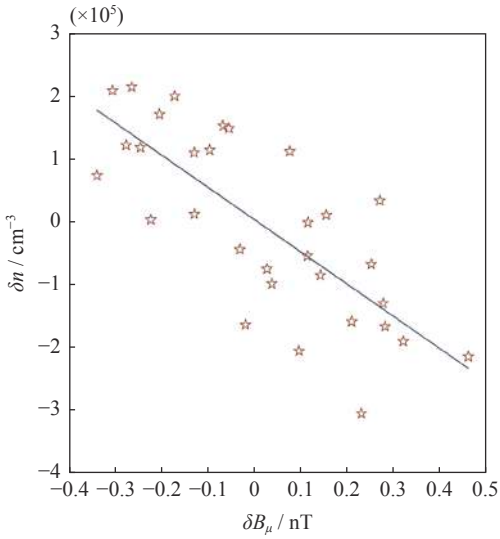

图 4　2015 年 2 月 5 日等离子体泡滤波后的磁场平均场分量与滤波后电子密度的相关性

Fig. 4　Correlation between the filtered parallel field component and the filtered plasma density of the plasma bubble on 5 February 2015

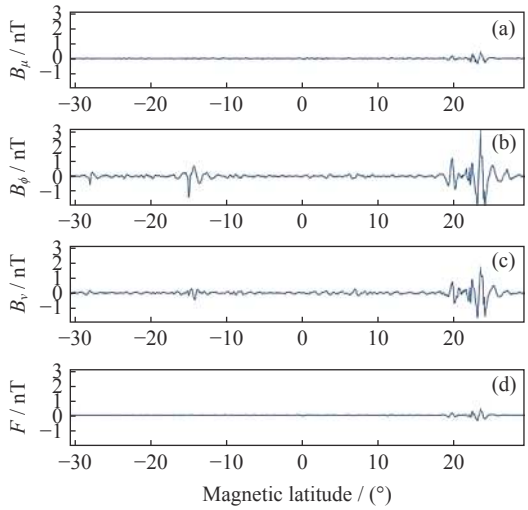

图 5 等离子体泡对应的磁场三分量和标量。(a)(b)(c) 依次对应图 2 的$\mu\phi\nu$方向，(d) 为磁场强度

Fig. 5 Three components in MFA coordinates and strength of the magnetic field corresponding to the plasma bubble on 5 February 2015. (a)(b)(c) corresponds to the $\mu\phi\nu$ components in Fig.2, (d) is magnetic field strength

场强度与场向分量的相关系数分别为$r_1 = 0.90$, $r_2 = 0.94$, $r_3 = 0.97$, 可以看出三者之间有很强的相关性。按照文献 [14] 的统计, 大约 1/3 的等离子体泡的三分量之间有较高的相关性, 但目前该机制尚不明确。而图 6 中, 磁场强度与等离子体密度的相关系数为$r_4 = -0.83$, 与平均场向分量与密度的相关系数相当。

3 利用磁场数据识别等离子体泡

磁场强度和等离子体密度的负相关性并非偶然。阿尔芬波的波动垂直于背景磁场, 在扰动场线性近似条件下, 波动不改变背景磁场的大小。电离层中的阿尔芬波满足线性近似条件, 因此横向分量的波动基本不引起磁场强度的变化。磁场强度主要因等离子体的抗磁效应而增强。因此, 与矢量磁场的场向分量一样, 磁场强度也可以用来识别等离子体泡。磁场强度可由标量磁力仪直接测量。

针对 Swarm-A 2015 年全年的等离子体数据, 挑选出 372 个电离层密度较高时发生的等离子体泡事例, 然后利用磁场数据, 计算每个事件平均场向磁场和标量磁场的扰动量, 当ΔB>0.2 nT 时, 则认为是等离子体泡, 结果列于表 1。

分别使用平均场向磁场和标量磁场进行识别, 事件总数为 372 个, 其中利用平均场向磁场和标量磁场都识别出来的事件共 264 个, 只有平均场向磁场识别出来的事件有 63 个, 只有标量磁场识别出来的事件有 45 个, 利用平均场向磁场识别出来的事件数量略高于标量磁场。

利用平均场向磁场可识别而标量磁场不能识别的例子如图 7 所示。在 2015 年 7 月 1 日 08:30 UT (21:57 LT)的事件中, 滤波后的平均场向磁场振幅大于 0.2 nT, 但是滤波后的标量磁场却没有达到 0.2 nT, 这就导致了从标量磁场数据中未能识别, 而从平均场向磁场数据中却能识别出来。

利用标量磁场可识别而平均场向磁场不能识别的事件有 45 个, 原因是滤波后的标量磁场振幅超过了 0.2 nT, 而平均场向磁场没有达 0.2 nT, 如图 8 所示。2015 年 2 月 7 日 05:22 UT(22:49 LT) 在磁纬 10°S－0°S 的等离子体泡, 滤波后的标量磁场达到了 0.2 nT, 但是滤波后的平均场向磁场没有达到 0.2 nT, 所以标量磁场数据成功识别出来这个等离子体泡, 而平均场向磁场数据没有识别出来。

总体来说, 利用平均场向磁场和标量磁场两种数据识别成功率基本相当, 这说明利用标量磁场数据进行等离子体泡的识别是可行的。

4 讨论与分析

4.1 噪声对识别的影响

通过图 7 和图 8 的对比可以发现, 对于同一个等离子体泡, 平均场向磁场和标量磁场扰动略有差别。两者的差别, 可能有以下几个原因。(1) 矢量磁力仪噪声的影响。从图 7 和图 8 可以看到, 矢量磁力仪噪声频率较高, 峰峰值 0.05～0.1 nT, 数据处理采用的 0.04 Hz 高通滤波不能滤除噪声, 噪声叠加到目标信号上, 有可能加大(见图 7)或减小信号(见图 8)的幅值。(2) 平均场向的计算误差。目前对不同尺度的等离子体泡采用单一参数计算平均场向, 平均场向若偏差 1°, 则 1 nT 的西向扰动量在平均场向上的投影为 $1 \times \cos(89°)$=0.02 nT。

由于标量磁力仪的噪声低, 分辨率高, 实际应用的时候不应该与矢量磁力仪采用同一个阈值, 例如, 对于图 7 和图 8 所示的事件, 采用 0.1 nT 的阈值时标量信号仍有很高的信噪比。因此, 将标量的阈值设

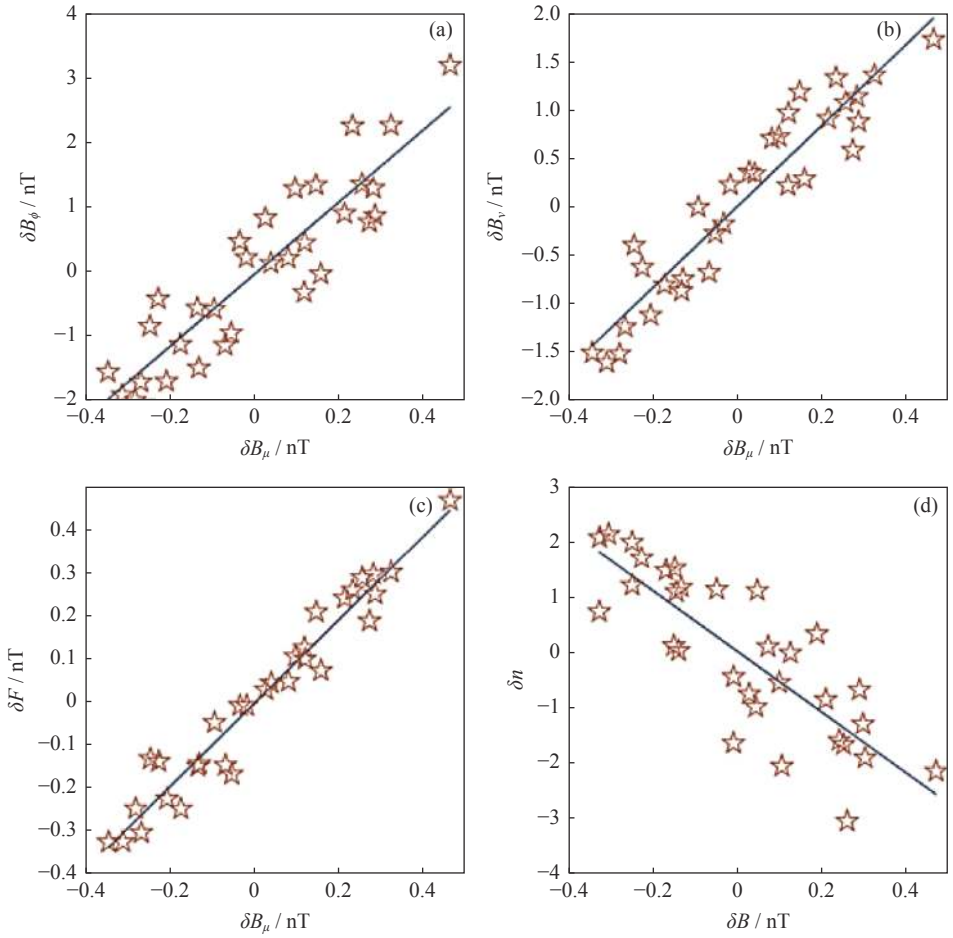

图 6　2015 年 2 月 5 日等离子体泡滤波后磁场各分量之间的相关性。(a) 平均场向与西向分量，(b) 平均场向与径向分量，(c) 平均场向与磁场强度，(d) 磁场强度与等离子体密度

Fig. 6　Correlation between the filtered components of the magnetic field in MFA coordinates of the plasma bubble on 5 February 2015. (a) Parallel and zonal component, (b) parallel and radial component, (c) parallel component and magnetic field strength, (d) magnetic field strength and plasma density

表 1　利用两种数据识别等离子体泡的结果

Table 1　Results of the plasma bubble identification using two sets of data

识别用数据	识别成功	识别失败	事件总数
平均场向磁场	327	45	372
标量磁场	309	63	372

置为 0.1 nT 后，重新识别第 3 节中的 372 个事件，成功识别出 372 个，即全部都可以识别出来。

4.2　可能干扰等离子体泡识别的其他现象

电离层中其他引起磁场波动的现象有地磁脉动、等离子体团、小尺度的电离层行扰等。等离子体团(plasma blob)是一种与等离子体泡磁场变化相反的物理现象，在等离子体团的位置磁场会减小，而等离子体密度增大，因此不会与等离子体泡发生混淆。小尺度的电离层行扰通常出现在电离层顶部，并且这种小尺度磁场波动不伴随等离子体密度的扰动，而且磁场扰动通常只发生于背景磁场的垂直方向，主要为东西方向[15-17]。磁场强度基本不发生变化，不影响对等离子体泡的识别。但是，与地磁脉动相关的 ULF 波以快波、阿尔芬波的形式传播，可能引起磁场强度的

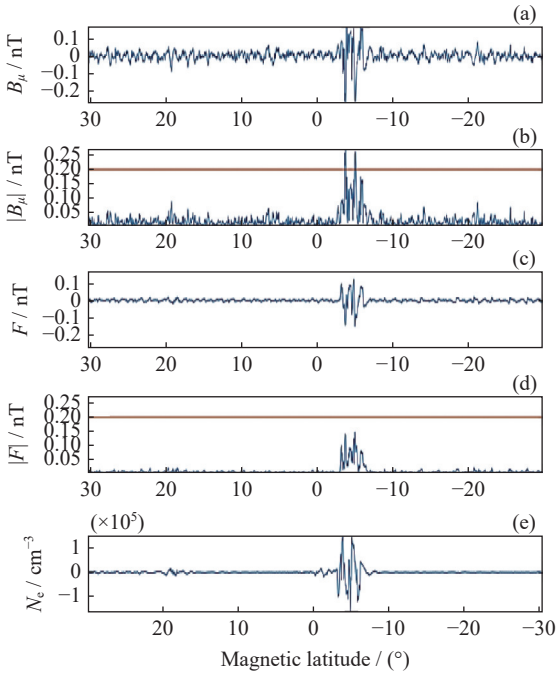

图 7 2015 年 7 月 1 日的等离子体泡。(a) 滤波后的平均场向磁场分量，(b) 滤波后的平均场向磁场分量的幅值，(c) 滤波后的标量磁场，(d) 滤波后标量磁场的幅值，(e) 滤波后的等离子体密度

Fig. 7 Plasma bubble on 1 July 2015. (a) Parallel magnetic field filtered in MFA coordinates, (b) amplitude of (a), (c) scalar magnetic field filtered, (d) amplitude of (c), (e) plasma density filtered

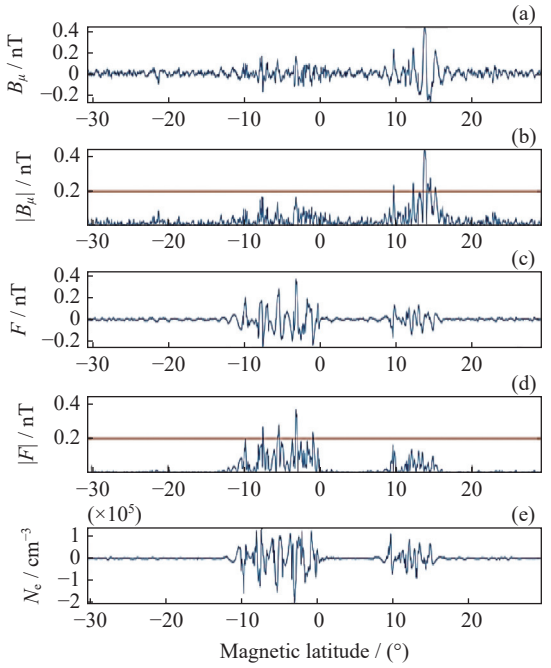

图 8 2015 年 2 月 7 日的等离子体泡。(a) 滤波后的平均场向磁场，(b) 对图 (a) 的结果整流，(c) 滤波后的标量磁场，(d) 对图 (c) 的结果整流，(e) 滤波后的等离子体密度

Fig. 8 Plasma bubble on 7 February 2015. (a) Parallel magnetic field component filtered in MFA coordinate, (b) rectified result of (a), (c) scalar magnetic field filtered, (d) rectified result of (c), (e) plasma density filtered

变化，因此，需要结合等离子体密度才能进一步判断扰动的性质。

5 结论

等离子体泡在发生发展过程中，不仅形成电离层密度不规则体，而且还伴随着平行和垂直背景磁场方向的扰动。本文利用 2015 年全年的 Swarm-A 卫星的磁场数据和等离子体密度数据，分析了等离子体泡产生的磁场扰动特征，采用标量磁场观测数据进行了等离子体泡的识别，并与矢量磁场数据的识别结果进行了对比，得到如下结论。

（1）磁场的平均场向分量和磁场强度的扰动与等离子体密度的变化都有较高的负相关性，因此平均场向分量和磁场标量都可用于识别等离子体泡。

（2）等离子体泡产生的磁场扰动有时较弱，因此数据的高频噪声会影响等离子体泡磁场信号的识别。Swarm 卫星标量磁力仪的噪声明显低于矢量磁力仪，利用标量磁场数据能分辨更小的磁场变化，识别等离子体泡时更有优势。

（3）在识别等离子体泡时，根据数据的噪声设置不同的阈值，有利于提高识别率。

利用磁场信号识别等离子体泡也存在一些不足。当环境等离子体密度本身比较小时，磁场变化小，磁力仪无法分辨，这种等离子体泡便无法识别。

地磁场测绘卫星通常运行在高度几百公里的顶部电离层内，经常会与等离子体泡相遇。地磁场建模需要利用磁平静时期夜间（22:00－05:00 LT）的磁场数据[18]，而平静期 20:00－24:00 LT 是等离子体泡高发时间。虽然等离子体泡产生的干扰磁场较小，但还是会在低纬度地区产生特定方向的磁场偏差，例如背景场向增强会造成地磁数据的系统偏差。因此，地磁场建模时需要考虑剔除受到等离子体泡影响的数据[19,20]。

致谢　所用数据由欧空局 Swarm 卫星数据处理团队提供, 数据获取网址(https://swarm-diss.eo.esa.int/#)。感谢国家自然科学基金项目(41904147)和国家重点研发计划(2018YFC1503503)资助。

参考文献

[1] PARK J, NOJA M, STOLLE C, *et al*. The Ionospheric Bubble Index deduced from magnetic field and plasma observations onboard *Swarm*[J]. *Earth, Planets and Space*, 2013, **65**(11): 1333-1344

[2] STOLLE C, LÜHR H, ROTHER M, *et al*. Magnetic signatures of equatorial spread *F* as observed by the CHAMP satellite[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2006, **111**(A2): A02304

[3] LÜHR H, ROTHER M, MAUS S, *et al*. The diamagnetic effect of the equatorial appleton anomaly: its characteristics and impact on geomagnetic field modeling[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, **30**(17): 1906

[4] BURKE W J, GENTILE L C, HUANG C Y, *et al*. Longitudinal variability of equatorial plasma bubbles observed by DMSP and ROCSAT-1[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2004, **109**(A12): A12301

[5] LI G, NING B, LIU L, *et al*. Effect of magnetic activity on plasma bubbles over equatorial and low-latitude regions in East Asia[J]. *Annales Geophysicae*, 2009, **27**(1): 303-312

[6] HUANG C M, RICHMOND A D, CHEN M Q. Theoretical effects of geomagnetic activity on low-latitude ionospheric electric fields[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2005, **110**(A5): A05312

[7] LÜHR H, MAUS S, ROTHER M, *et al*. First in-situ observation of night-time F region currents with the CHAMP satellite[J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, **29**(10): 1489

[8] PALMROTH M, LAAKSO H, FEJER B G, *et al*. DE 2 observations of morningside and eveningside plasma density depletions in the equatorial ionosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2000, **105**(A8): 18429-18442

[9] KELLEY M C. The Earth's Ionosphere[M]. San Diego: Academic Press, 1989

[10] LUHR H, PARK J, XIONG C, *et al*. Alfven wave characteristics of equatorial plasma irregularities in the ionosphere derived from CHAMP observations[J]. *Frontiers in Physics*, 2014, **2**: 47

[11] FRATTER I, LÉGER J M, BERTRAND F, *et al*. Swarm absolute scalar magnetometers first in-orbit results[J]. *Acta Astronautica*, 2016, **121**: 76-87

[12] FRIIS-CHRISTENSEN E, LÜHR H, HULOT G. *Swarm*: a constellation to study the Earth's magnetic field[J]. *Earth, Planets and Space*, 2006, **58**(4): 351-358

[13] REGI M, CORPO A D, LAURETIS M D. The use of the empirical mode decomposition for the identification of mean field aligned reference frames[J]. *Annals of Geophysics*, 2017, **59**(6): G0651-G0667

[14] PARK J, LÜHR H, STOLLE C, *et al*. The characteristics of field-aligned currents associated with equatorial plasma bubbles as observed by the CHAMP satellite[J]. *Annales Geophysicae*, 2009, **27**(7): 2685-2697

[15] WANG Ling, YIN Fan. Distinguish small-scale traveling ionospheric disturbances and equatorial plasma bubbles by clustering algorithm[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2020, **40**(6): 1014-1023 (汪领, 尹凡. 利用聚类算法区分小尺度电离层行扰事件与赤道等离子体泡事件[J]. 空间科学学报, 2020, **40**(6): 1014-1023)

[16] YIN F, LÜHR H, PARK J, *et al*. Comprehensive analysis of the magnetic signatures of small-scale traveling ionospheric disturbances, as observed by Swarm[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, **124**(12): 10794-10815

[17] KIL H, PAXTON L J. Global distribution of nighttime medium-scale traveling ionospheric disturbances seen by swarm satellites[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, **44**(18): 9176-9182

[18] MANDEA M M, KORTE M. Geomagnetic Observations and Models[M]. New York: Kiruna, 2011

[19] MAUS S, LÜHR H, ROTHER M, *et al*. Fifth-generation lithospheric magnetic field model from CHAMP satellite measurements[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2007, **8**(5): Q05013

[20] OLSEN N, LÜHR H, FINLAY C C, *et al*. The CHAOS-4 geomagnetic field model[J]. *Geophysical Journal International*, 2014, **197**(2): 815-827

(责任编辑: 孙伟英)