

# 利用 TIE-GCM 模式计算电离层 电流及夜间电离层磁场<sup>\*</sup>

刘学旺<sup>1,2</sup> 李磊<sup>1</sup> 张艺腾<sup>1</sup> 薛洪波<sup>1</sup>

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** 电离层电流产生的磁场是地磁场卫星测绘时需要剔除的干扰源. 利用电离层热层模式 TIE-GCM 计算电离层中的中性风、重力驱动和压强梯度等形成的电离层电流的全球分布, 分析电流在特定位置产生的磁场及磁场三分量随纬度的变化规律. 结果表明, E 层尤其是磁赤道和极区的电流密度较大, 可达  $10^3 \text{ nA}\cdot\text{m}^{-2}$  量级, F 层电流密度量级约为  $10 \text{ nA}\cdot\text{m}^{-2}$ . 在磁静日 ( $Kp \leq 1$ ) 夜间 22:00 LT—04:00 LT, 电离层电流在中低纬度 (南北纬  $50^\circ$  之间) 产生的磁场量级为几个 nT, 且磁场的南北向分量和径向分量基本大于东西向分量. 通过与 CHAMP 卫星磁测数据分析比较, 发现 TIE-GCM 模式计算电离层干扰磁场在中低纬度可以取得较好的结果, 但在高纬度地区的效果不理想, 还需进一步改进模式以提高计算精度.

**关键词** TIE-GCM, 电离层, 电流, 磁场, CHAMP

**中图分类号** P 352

## Ionospheric Currents and Nightside Ionospheric Magnetic Fields Calculated by TIE-GCM

LIU Xuewang<sup>1,2</sup> LI Lei<sup>1</sup> ZHANG Yiteng<sup>1</sup> XUE Hongbo<sup>1</sup>

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** In geomagnetic field mapping, the magnetic fields generated by the ionospheric currents are sources of interference that should be removed. In this paper, the ionospheric currents generated by neutral wind, gravity drift and pressure gradient are calculated by Thermosphere-Ionosphere-Electrodynamics General Circulation Model (TIE-GCM). The global current distribution is used to examine the magnetic field generated by the ionospheric currents at a specific location. The variation of the three components of the magnetic field with latitude has been analyzed. The results show that the current densities in the E layer, especially in the magnetic equator and polar regions, are as high

\* 国家自然科学基金青年科学基金项目 (41404146) 和国家重点研发计划项目 (2016YFB0501503) 共同资助

2017-02-14 收到原稿, 2017-06-11 收到修定稿

E-mail: liuxwrm@163.com

as about  $10^3 \text{ nA}\cdot\text{m}^{-2}$ , while the current densities in the F layer are about  $10 \text{ nA}\cdot\text{m}^{-2}$ . The magnetic field between  $50^\circ\text{N}$  and  $50^\circ\text{S}$  induced by ionospheric currents is about several nT from 22:00LT to 04:00LT in the magnetic quiet day ( $Kp \leq 1$ ), and the north-south and radial components of the ionospheric magnetic field are substantially larger than the east-west component. By comparing with CHAMP observation data, it is proven that the TIE-GCM has good performance in calculating ionospheric currents and magnetic fields at low and middle latitudes. However, the results are not very good at high latitudes and TIE-GCM should be improved in order to increase the calculating accuracy.

**Key words** TIE-GCM, Ionosphere, current, Magnetic field, CHAMP

## 0 引言

卫星磁场测绘能够提供高质量、全球覆盖的地磁场测量数据,并具有全天候、不间断、高精度等优点,在地磁场测量中发挥着越来越重要的作用<sup>[2]</sup>.磁测卫星一般运行在高度 300~1000km 的电离层中,观测结果为外源场与内源场的叠加.为了建立高精度的地磁场模型,需要从卫星磁测数据中剔除电离层电流产生的磁场(以下简称电离层磁场).

电离层电子和离子在力的驱动下向不同方向运动产生电流<sup>[3]</sup>.Lühr 等<sup>[4]</sup>利用 CHAMP 卫星轨道每三天回归一次的特点,根据磁场数据估算了 F 层电流的大小及分布特点,给出前半夜 F 层电流密度的高度积分值在  $5 \text{ mA}\cdot\text{m}^{-1}$  左右.中低纬度电离层中主要的驱动力来自中性风与带电粒子的碰撞、重力以及压强梯度,所以主要电流形式为中性风电流、重力驱动电流和压强梯度电流(抗磁电流).

计算电离层电流产生的磁场,一种方式是通过简化找到磁场与电离层参量之间的对应关系.根据等离子体磁压和热压平衡的假定,Lühr 等<sup>[5]</sup>给出了压强梯度电流产生的磁场与当地电离层状态参量的关系:

$$B_d = nk(T_i + T_e) \frac{\mu_0}{B}. \quad (1)$$

利用 CHAMP 卫星的电子密度数据,估算出电离层赤道异常区由于压强梯度产生的磁场在前半夜可达几个 nT.

由于电离层电流产生磁场是一种全球效应,由全球电离层电流分布直接计算电离层磁场更精确.Maus 等<sup>[6]</sup>利用国际参考电离层模型(IRI)计算电离层状态参量,得到包含二级电流的重力驱动电流,然后通过积分得到其磁场.Mozzoni 等<sup>[7]</sup>利用 TIE-

GCM 模式给出了 110km 截面上等效电流体系,进而计算了卫星位置处的磁场,结果表明采用此方法可以在一定程度上从卫星磁测数据中分离电离层磁场.Lühr<sup>[8]</sup>利用 CTIP 模式计算了重力驱动电流和压强梯度电流的全球分布,然后按照毕奥萨伐尔定律积分得到其中低纬夜间的磁场在几个 nT 左右.Lühr 的结果与文献[6]相近.Alken<sup>[9]</sup>利用 IRI 的电离层状态参量,结合 TIE-GCM 的电动力学模式,给出了包含二级电流的重力驱动电流和压强梯度电流分布,进而利用电离层电流和磁场的无散性,由螺极分解求得压强梯度磁场,与式(1)的结果进行比较发现,二者存在微小差异,这可能是由于电离层的压力梯度不仅取决于磁压与热压的平衡,还与磁张力有关.

综上所述,已有若干由电离层模式计算二维电离层电流分布或单独某种电流体系(重力驱动电流、压强梯度电流)计算电离层磁场的研究结果,但三维全球电离层电流产生的磁场尚无文献报道.本文利用 TIE-GCM 模式给出 2009 年夏季(6 月 22 日)的三维全球电离层电流密度,计算其在卫星位置处的磁场,并与 CHAMP 卫星当日的观测数据进行比较,验证利用此方法计算电离层磁场的可行性.

## 1 利用 TIE-GCM 模式计算电离层电流产生的磁场

### 1.1 电离层电流密度分布

电离层电流可以表示为

$$\mathbf{J} = \bar{\sigma}(\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B}) + \mathbf{J}_g + \mathbf{J}_p. \quad (2)$$

其中,  $\bar{\sigma}$  为电导率张量,  $\mathbf{E}$  为背景电场,  $\mathbf{u}$  为中性风

速度,  $B$  是背景磁场,  $J_p$  和  $J_g$  可表达为

$$J_g = nm_i g \times B. \quad (3)$$

$$J_p = -k \nabla [n(T_i + T_e)] \times B / B^2. \quad (4)$$

式 (3) 及 (4) 中,  $n$  为电子密度,  $m_i$  为离子质量,  $g$  为重力加速度,  $k$  为玻尔兹曼常量,  $T_i$  为离子温度,  $T_e$  为电子温度. 这些参数称为电离层状态参量. 已知状态参量, 可计算得到电离层电流密度.

式 (2) 右边第一项中  $u \times B$  为中性风拖曳带电粒子切割磁力线产生的中性风电流,  $J_g$  为带电粒子在重力作用下产生的重力驱动电流,  $J_p$  为压强梯度驱动的电离层中的电流. 电离层中的电流满足无散度条件, 重力驱动、压强梯度等电流 (一级电流) 均产生二级电场, 这些二级电场包含在第一项的  $E$  中, 对应的电流为二级电流. 在 E 层,  $J_g$  和  $J_p$  较小, 一般只需考虑第一项, 通常称之为发电机电流.

TIE-GCM 模式是美国大气研究中心 (NCAR) 开发的自洽物理模型. 该模型采用有限差分法求解电离层和热层的动力学方程、热力学方程和连续方程, 并考虑极区粒子沉降、高纬电场和来自低层大气的

潮汐作用, 通过输入控制  $F_{10.7}$ ,  $Kp$  等参数, 可计算约 90~700 km 高度范围内全球电离层电子密度及温度、离子温度、中性气体温度以及各组分含量等参数<sup>[10]</sup>.

TIE-GCM 中电流密度为<sup>[11]</sup>

$$J = \sigma_p (E + u \times B) + \sigma_H b \times (E + u \times B) + J_g + J_p + J_{\parallel} + J_M. \quad (5)$$

其中,  $\sigma_p$  和  $\sigma_H$  分别为裴德森电导率和霍尔电导率,  $J_{\parallel}$ ,  $J_M$  分别为高纬度地区的场向电流和磁层电流.

利用 TIE-GCM 模式计算 2009 年 6 月 22 日 04:00 UT 电离层电流密度三维分布, 高纬对流模型采用 HEELIS 模型<sup>[12]</sup>, 底边界潮汐采用 GSWM (Global Scale Wave Model) 模式<sup>[13]</sup>. 计算范围为纬度 ( $-88.75^\circ, 88.75^\circ$ ), 经度 ( $-180^\circ, 177.5^\circ$ ). 经纬度的网格间隔为  $2.5^\circ$ , 时间步长为 60 s. 垂直方向按高度的负指数关系分层, 高度越低, 垂直分辨率越高, 提高了计算效率. 当天的  $Kp$  指数均不大于 1, 地磁活动较为平静.

### 1.1.1 F 层电流

假设磁测卫星运行高度 450 km. 图 1 给出了卫

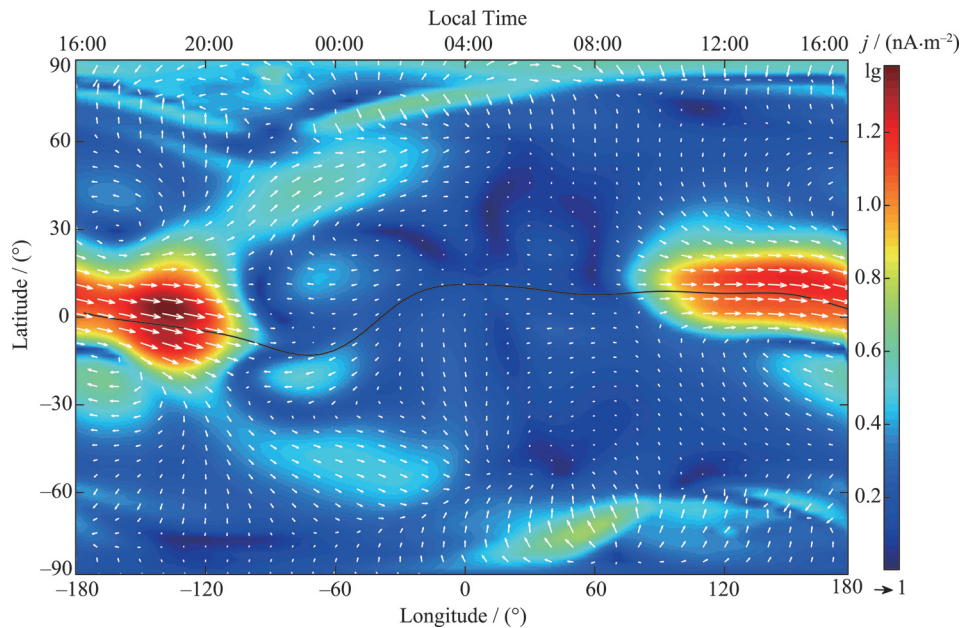


图 1 2009 年 6 月 22 日 04:00 UT 450 km 截面上电流密度及水平分量. 箭头方向为电流密度在水平面内的方向, 箭头长度表示电流密度水平分量的大小, 背景颜色代表总电流密度, 黑色实线代表磁赤道

Fig. 1 Current density and horizontal component for  $H = 450$  km at 04:00 UT on June 22, 2009. The arrow direction is the direction of current density in the horizontal plane, and the arrow length represents horizontal current density magnitude. The background color represents the total current density.

The black line represents the magnetic equator

星高度上的电流密度强度分布及其水平分量取对数后的结果. 由图 1 可以看出, 总电流密度主要来自于水平分量的贡献, 径向电流比水平电流小一个量级以上. 水平电流在低纬度主要为东向, 白天时段稍偏南, 其值从中纬度 ( $40^\circ$ ) 向低纬度 ( $0^\circ-20^\circ$ ) 逐渐增大. 电流密度在低纬度的白天时段达到最大值, 约为  $22 \text{ nA}\cdot\text{m}^{-2}$ ; 电流密度在夜间时段较小, 量级在  $10^{-1}\sim 10^1 \text{ nA}\cdot\text{m}^{-2}$  之间. 在经度  $-140^\circ$  处, 纬度  $[-10^\circ, 10^\circ]$  范围内有两个双峰, 但双峰不是特别明显.

### 1.1.2 E 层电流

E 层 (高度 105 km) 低纬度的总电流密度最大值约为  $4000 \text{ nA}\cdot\text{m}^{-2}$ , 而极区总电流密度最大值约为  $5000 \text{ nA}\cdot\text{m}^{-2}$  (见图 2).

在低纬度有一个纬度方向宽约几度, 基本沿磁赤道方向的狭窄电流带. 带内电流增大, 对应于赤道电急流. 在 11:00 LT–12:00 LT, 南北纬  $40^\circ$  附近存在两个电流密度极值点, 对应于  $S_q$  电流系. 由图 2 可

以看出, 中纬度地区电流密度除具有较大的东向分量外, 南北向分量也较大. 高纬度存在很强的电流带, 对应于包含场向电流的极区电流系. 对比图 1 与图 2 可以看出, 高度不同时电流分布特点不同. 由图 2 中沿磁赤道的赤道电急流及与中纬度白天对应的  $S_q$  焦点可知, TIE-GCM 模型可以反映电离层电流的基本特征.

### 1.2 电离层磁场计算

已知电流分布, 由毕奥萨伐定律积分可以得到电离层磁场, 即

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{\mathbf{j}(\mathbf{r}') \times (\mathbf{r} - \mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3} dV'. \quad (6)$$

其中,  $\mathbf{r}$  为待求点位置,  $\mathbf{r}'$  为场源点位置,  $\mathbf{j}(\mathbf{r}')$  为场源点电流矢量,  $dV'$  为场源点离散体积分元,  $\mu_0$  为磁导率. 在球坐标系下进行计算, 有

$$dV' = r'^2 \sin \theta' dr d\theta d\varphi,$$

$$d\theta = 2.5^\circ, d\varphi = 2.5^\circ, dr = 5 \text{ km}.$$

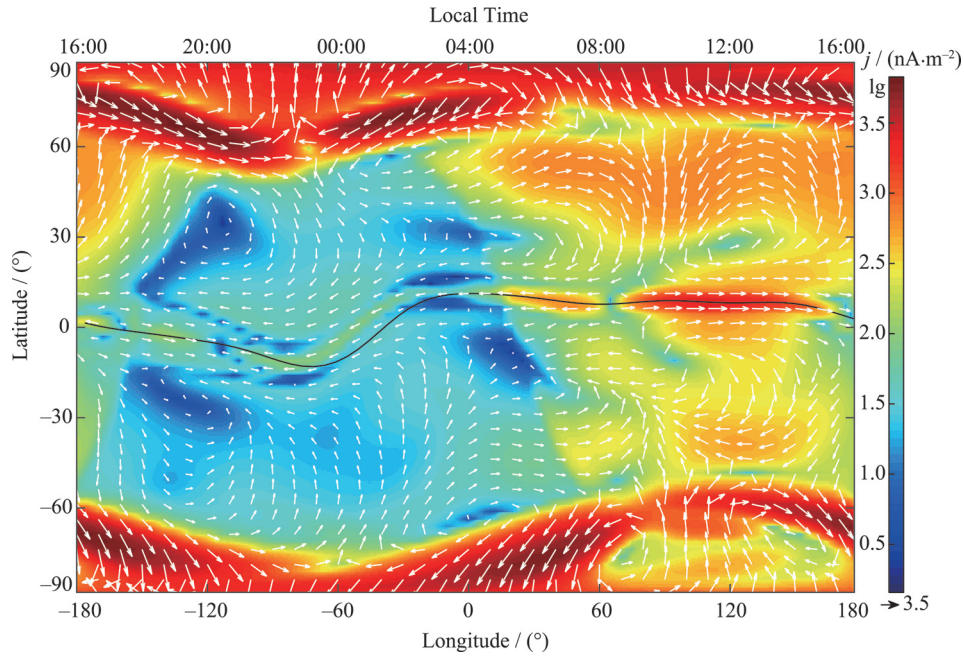


图 2  $H = 105 \text{ km}$  截面上 2009 年 6 月 22 日 04:00 UT 电流密度及水平分量. 箭头方向为电流密度在水平面内的方向, 箭头长度表示电流密度水平分量的大小, 背景颜色代表总电流密度, 黑色实线代表磁赤道

Fig. 2 Current density and horizontal component for  $H = 105 \text{ km}$  at 04:00 UT on June 22, 2009. The arrow direction is the direction of current density in the horizontal plane, and the arrow length represents horizontal current density magnitude. The background color represents the total current density.

The black line represents the magnetic equator

积分域为

$$6371.2 + 95 < H < 6371.2 + 650,$$

$$0^\circ < \theta < 180^\circ, \quad 0^\circ < \varphi < 360^\circ.$$

## 2 计算结果及分析

### 2.1 电离层磁场计算结果

由 TIE-GCM 计算得 2009 年 6 月 22 日 04:00 UT 全球电离层电流分布, 进而由式 (4) 得到  $H = 450 \text{ km}$  截面上电离层磁场三分量, 如图 3 所示. 由图 3 可见, 全球电离层电流整体分布规律为白天大而夜间小, 极区大而中低纬度小.  $B_r$ ,  $B_\theta$ ,  $B_\varphi$  都在极区取得极值, 约为  $60 \text{ nT}$ . 中低纬度电离层磁场的  $B_r$  分量在南半球基本为负值, 北半球为正值, 赤道附近为 0.  $B_r$  在正午时段纬度磁赤道两侧存在两个极值点, 可能与  $S_q$  电流系有关.  $B_\theta$  分量在正午时段从中纬度向低纬度逐渐增大.  $B_\varphi$  分量整体上小于其他两个分量. 因此, 电离层磁场与经纬度的关系相当复杂, 白天和夜间随纬度的变化趋势也完全不同.

### 2.2 计算结果与观测数据对比

#### 2.2.1 电离层电流磁场

POMME-7 是利用 CHAMP 卫星和 Ørsted 卫星磁场数据建立的地磁场模型, 其包含 15 阶主磁场, 133 阶地壳场, 2 阶磁层磁场及其感应场. 建模过程中采用文献 [6] 中的方法剔除电离层磁场 [14]. 选取 2009 年 6 月 22 日 ( $Kp \leq 1$ ) CHAMP 卫星的一段观测数据, 减去 POMME 模式结果之后作为电离层磁场的观测值, 如图 5 中实线所示. 数据时间为 2009 年 6 月 22 日 04:22:22 UT–05:06:33 UT, 卫星由南极向北极运行, 卫星在中低纬度的地方时为 02:30 LT–02:54 LT, 高度约为  $320 \sim 330 \text{ km}$ , 其具体位置及地方时如图 4 所示. 为使地方时连续变化, 图 4 中将子夜 24:00 LT 前的地方时表示为负值.

根据该时段 TIE-GCM 电离层三维电流分布, 利用式 (4) 计算 CHAMP 卫星所在位置的模拟电离层磁场, 其三分量 ( $B_r$ ,  $B_\theta$ ,  $B_\varphi$ ) 如图 5 所示. 为更好地展示中低纬度的电离层电流磁场, 图 5 中单独给出了中低纬度  $[-50^\circ, 50^\circ]$  的电离层电流磁场. 由图 5 可以得到以下结论.

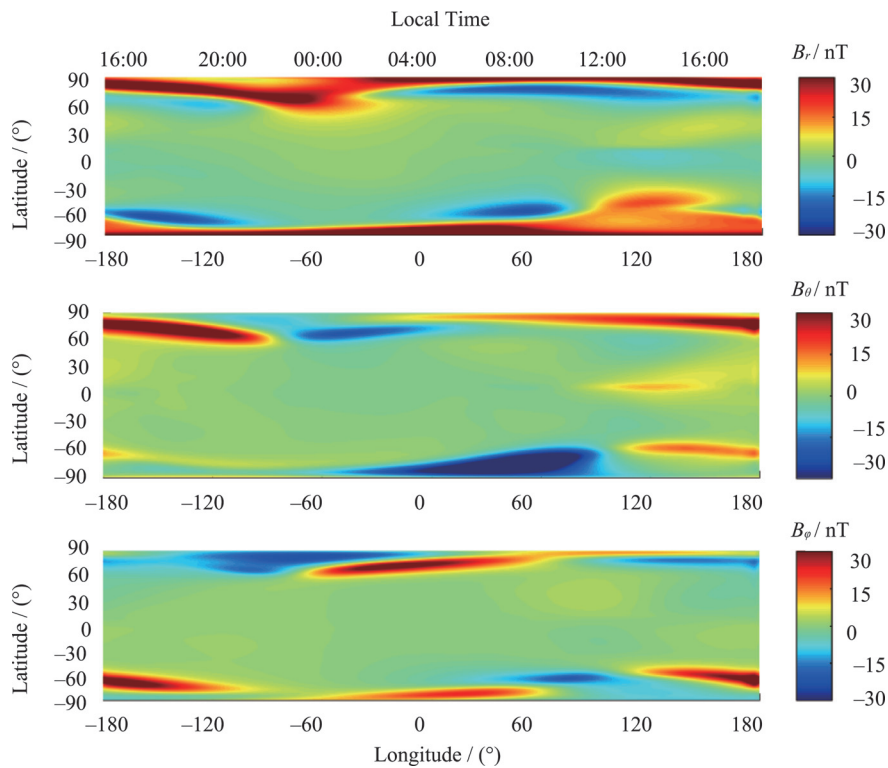


图 3  $H = 450 \text{ km}$  截面上 2009 年 6 月 22 日 04:00 UT 的电离层磁场三分量  $B_r$ ,  $B_\theta$ ,  $B_\varphi$

Fig. 3 Three component of ionospheric magnetic field  $B_r$ ,  $B_\theta$ ,  $B_\varphi$  for  $H = 450 \text{ km}$  at 04:00 UT on June 22, 2009

(1) 磁平静时期, 夜间中低纬电离层磁场的量级为几 nT, 高纬度尤其是极区能达到几十 nT. 中低纬观测与模式电离层磁场变化趋势一致, 而在高纬度尤其是极区二者差别较大.

(2) 模式电离层磁场随纬度的变化比较平滑, 而观测电离层磁场变化剧烈. 造成这种现象的原因之一是 TIE-GCM 模式经纬度分辨率只有 2.5°, 不能反映电离层中的小尺度电流. 另一个原因是卫星观测数据减去 POMME 模式磁场值并未完全剔除磁层电流的影响.

为衡量模式的效果, 定义平均误差

$$\sigma = \frac{\sum |b_{mo} - b_{ob}|}{n} \quad (7)$$

总磁场的误差百分比

$$\delta = \left| \frac{b_{mo} - b_{ob}}{b_{ob}} \right| / n \quad (8)$$

其中,  $n$  为此区间内的观测点数. 不同纬度区间内的磁场三分量、总磁场的平均误差及总磁场的误差百分比列于表 1.

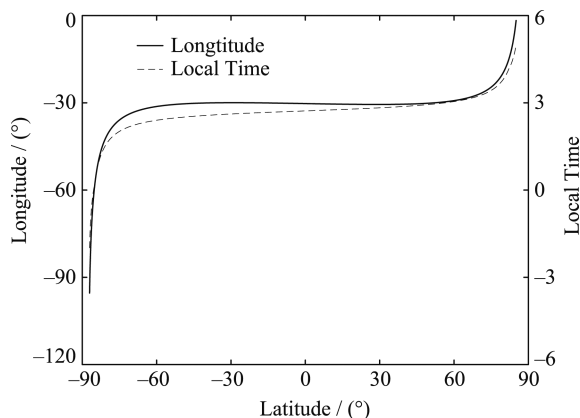


图 4 CHAMP 卫星某段轨道所在位置及地方时变化  
Fig. 4 Location and local time variation of CHAMP satellite

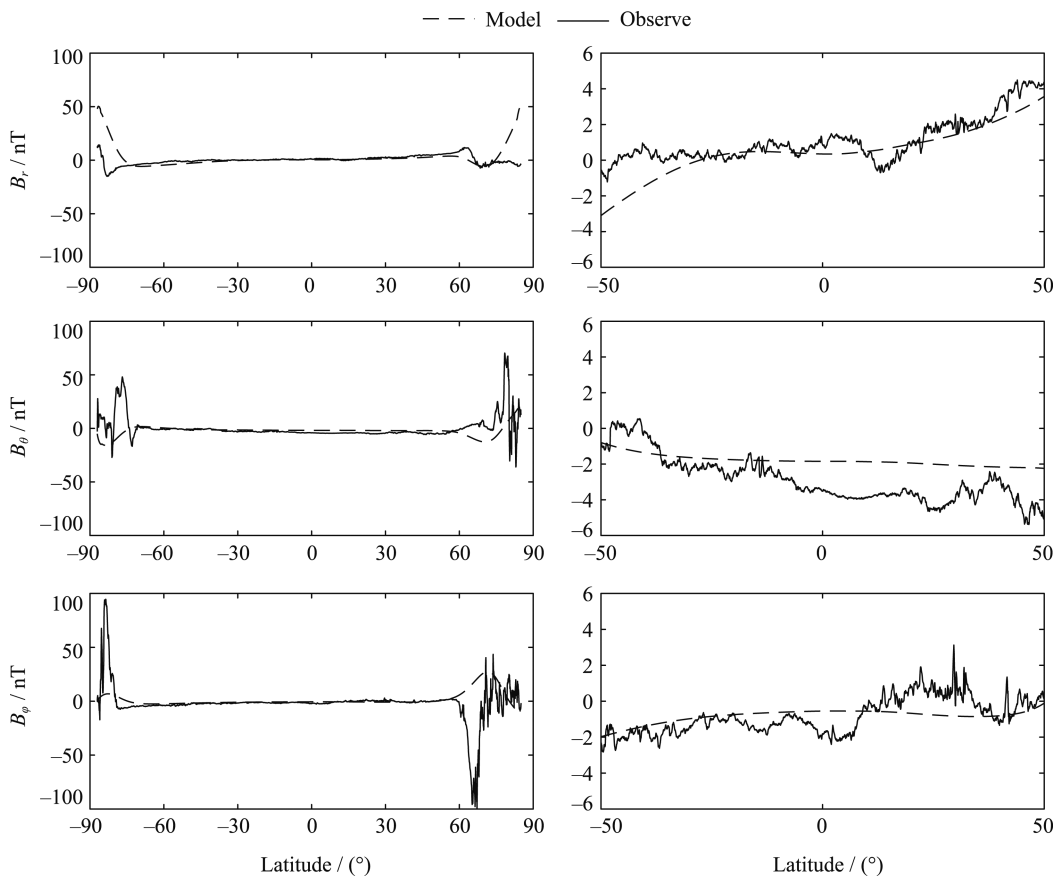


图 5 2009 年 6 月 22 日 04:22:22 UT—05:06:33 UT 模式与观测电离层磁场的对比  
Fig. 5 Comparison of ionospheric magnetic field obtained by simulation and observation at 04:22:22 UT—05:06:33 UT on 22 June 2009



表 1 不同纬度区间的平均误差

Table 1 Mean error of different latitude interval

纬度/(°)	< 50	50—60	60—70	70—80	> 80
$\sigma_r/\text{nT}$	0.74	2.64	3.99	6.31	37.63
$\sigma_\theta/\text{nT}$	1.28	1.24	6.51	24.16	19.60
$\sigma_\varphi/\text{nT}$	0.70	1.34	29.52	11.56	24.53
$\sigma/\text{nT}$	1.36	1.55	15.32	17.58	22.77
$\delta/(\%)$	32	24	43	97	113

从表 1 可以看出, 南北纬 50° 之间的平均误差较小, 仅为 1 nT 左右. 随着纬度增高, 平均误差逐渐增大, 南北纬大于 80° 的区间内,  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$  及  $\sigma_\varphi$  均达到或超过了 20 nT,  $\sigma_r$  甚至达到 37.6 nT. 三分量误差最大值所在区间不同, 其中  $\sigma_r$  误差最大值位于大于 80° 的纬度区间,  $\sigma_\theta$  误差最大值位于 (70°, 80°) 的纬度区间, 而  $\sigma_\varphi$  误差最大值位于 (60°, 70°) 的纬度区间, 达到 29.5 nT. 南北纬 60° 之间的总磁场误差百分比均小于 35%, (60°, 70°) 纬度区间的总磁场误差百分比为 43%, (70°, 90°) 高纬度区间的总磁场误差与观测值相当. 误差百分比与背景平均值的大小密切相关, 计算分析效果时需综合考虑平均误差和误差百分比.

因此, 利用 TIE-GCM 模式能够较好地分离夜间中低纬度电离层磁场, 但在高纬度的效果较差. 高纬度地区误差较大的原因如下. 一是 POMME 模式在高纬度地区效果不如中低纬地区<sup>[15]</sup>. 高纬存在较强的极光电流和极盖区电流, 建立 POMME 模型时, 地方时子夜扇区的电离层干扰场可能并未完全剔除, 因此 POMME 模型在极区的精度较低. 高纬度地区进行卫星数据筛选时应更加严格, 例如选取描述极光带地磁扰动的 AE 指数和描述极盖区地磁活动的 PC 指数较为平静的时段. 二是极区电流体系较复杂, TIE-GCM 模式计算高纬地区的电流分布如场向电流等时可能与实际状态差异较大.

### 2.2.2 时间差的影响

卫星在南北纬 87° 之间的飞行时间约为 44 min, 电离层电流分布在此期间产生变化. 为减少计算量, 这里只计算了 04:45 UT 一个时刻的电流分布. 图 5 中的模式磁场按 04:45 UT 电离层电流分布计算得到. 设从  $t_{\min}$  到  $t_{\max}$  卫星从南纬 87° 运行到北纬 85°, 平均时间 (约等于卫星飞行到赤道的时间)

为  $t_{\text{mid}} = (t_{\min} + t_{\max})/2$ . 图 5 中的结果对应平均时间  $t_{\text{mid}}$ . 图 6 给出了根据  $t = t_{\min}$ ,  $t_{\text{mid}}$ ,  $t_{\max}$  时刻电离层电流分布计算得到的电离层磁场径向分量随纬度的变化.

由图 6 可以看出, 用平均时间代替轨道运行时间不可避免地存在误差. 南纬 88° 附近  $t = t_{\min}$  与  $t = t_{\text{mid}}$  的  $B_r$  约有 4 nT 的差别. 北纬 88° 附近  $t = t_{\max}$  与  $t = t_{\text{mid}}$  的  $B_r$  约有 2 nT 的差别,  $B_\theta$ ,  $B_\varphi$  分量的误差约为 1 nT. 中低纬度采用平均时间计算造成的误差更小. 总之, 时间误差较小, 一般情况下可不考虑其影响. 若要进一步减小时间造成的误差, 可将时间分段, 计算每一段平均时间的电离层电流分布.

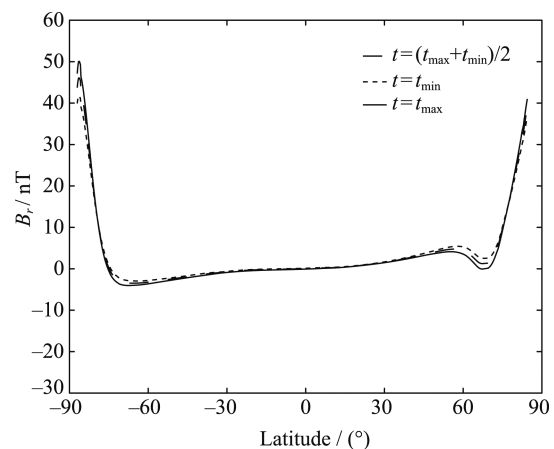


图 6 根据 2009 年 6 月 22 日 04:22 UT, 04:44 UT, 05:06 UT 的电离层电流分布计算得到的 CHAMP 卫星某段时间所在位置的离子层模式电离层磁场  $B_r$  分量  
Fig. 6  $B_r$  component of ionospheric magnetic field of CHAMP satellite sites at 04:22 UT, 04:44 UT, 05:06 UT on June 22, 2009 obtained through the ionosphere current distribution

### 3 结论

利用 TIE-GCM 模式计算了电离层电流分布, 并由此得到电离层磁场. 结果表明, 磁平静时期中低纬地区夜间电离层磁场的量级为几个 nT, 高纬度地区可达几十 nT. 利用磁测卫星建立地磁场模型时, 需要从观测数据中消除这部分磁场的干扰. 此外, 利用现有模式 (TIE-GCM) 可以较好地剔除中低纬度的电离层磁场, 但在高纬度地区效果较差. 下一步将利用电离层的同步测量结果 (温度及密度等), 通过数据融合同化电离层状态参量, 得到更准确电离层电流, 进而计算近实时的电离层磁场.

### 参考文献

- [1] XU Wenyao. Physics of Electromagnetic Phenomena of the Earth [M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 2009: 16-21 (徐文耀. 地球电磁现象物理学 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009: 16-21)
- [2] FENG Yan, AN Zhenchang, SUN Han, *et al.* Geomagnetic survey satellites [J]. *Progr. Geophys.*, 2010, **25**(6): 1947-1958 (冯彦, 安振昌, 孙涵, 等. 地磁测量卫星 [J]. 地球物理学进展, 2010, **25**(6): 1947-1958)
- [3] KELLEY M C. The Earth's Ionosphere, Volume 96: Plasma Physics and Electrodynamics, Second Edition [M]. New York: Academic Press, 2009: 39-47
- [4] LÜHR H, MAUS S, ROTHER M, *et al.* First in-situ observation of night-time F region currents with the CHAMP satellite [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2002, **29**(10): 127-1-127-4
- [5] 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]. *Geophys. Res. Lett.*, 2003, **30**(17): 1906
- [6] MAUS S, LÜHR H. A gravity-driven electric current in the Earth's ionosphere identified in CHAMP satellite magnetic measurements [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2006, **33**(2): L02812
- [7] MOZZONI D T, MANDEA M, CAIN J. Magnetic perturbations seen by CHAMP and evaluated using the TIE-GCM [J]. *Ann. Geophys.*, 2007, **25**(7): 1543-1554
- [8] LÜHR H, AYLWARD A, *et al.* Ionospheric Current Quantification and Modelling for Improved Magnetic and Electric Field Analyses for Swarm [R]. ESTEC Contract No. 20943/07/NL/JA, 2008: 62-76
- [9] ALKEN P, MAUS S, RICHMOND A D, *et al.* The ionospheric gravity and diamagnetic current systems [J]. *J. Geophys. Res.*, 2011, **116**: A12316
- [10] RICHMOND A D, RIDLEY E C, ROBLE R G. A thermosphere/ionosphere general circulation model with coupled electrodynamics [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1992, **19**(6): 601-604
- [11] RICHMOND A D. Ionospheric electrodynamics using magnetic apex coordinates [J]. *J. Geomag. Geoelectr.*, 1995, **47**(2): 191-212
- [12] HEELIS R A, LOWELL J K, SPIRO R W. A model of the high-latitude ionospheric convection pattern [J]. *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, 1982, **87**(A8): 6339-6345
- [13] HAGAN M E, FORBES J M, VIAL F. On modeling migrating solar tides [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2013, **22**(8): 893-896
- [14] MAUS S, ROTHER M, STOLLE C, *et al.* Third generation of the Potsdam Magnetic Model of the Earth (POMME) [J]. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2006, **7**(7): Q07008
- [15] MAUS S, MANOJ C, RAUBERG J, *et al.* NOAA/NGDC candidate models for the 11th generation International Geomagnetic Reference Field and the concurrent release of the 6th generation Pomme magnetic model [J]. *Earth Planets Space*, 2010, **62**(10): 729-735