

王慧, 郑志超, Hermann Luehr. 2019. 基于 SWARM 双星观测的场向电流的经度变化. 地球物理学报, 62(2):447-461, doi: 10.6038/cjg2019M0182.

Wang H, Zheng Z C, Luehr H. 2019. SWARM dual satellite observations of longitudinal variations in field-aligned currents. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 62(2):447-461, doi:10.6038/cjg2019M0182.

# 基于 SWARM 双星观测的场向电流的经度变化

王慧<sup>1</sup>, 郑志超<sup>1</sup>, Hermann Luehr<sup>2</sup>

1 武汉大学电子信息学院空间物理系, 武汉 430072

2 GFZ German Research Center for Geosciences, Potsdam, Germany

**摘要** 本文利用 SWARM A 和 C 双星高精度的矢量磁场数据研究了不同季节高纬地区场向电流(FACs)随地磁经度和地方时的变化情况. 研究发现:在南北半球, FACs 存在明显的经度变化, 南半球 FACs 的变化强度大约是北半球的 1.2~3.2 倍. 利用潮汐谱分析法我们发现 FACs 中占主导的非迁移潮汐分量为 DW2 和 D0. 在春秋和夏季半球, DW2 波更为明显. D0 波可用太阳光照的经度变化来解释, 向阳侧靠近磁极的经度带比远离磁极的经度带有更强的太阳光照射. DW2 波则与地磁场强度和地磁倾角等因素有关. 全球电离层与热层模型计算的 FACs 中 D0 波占主导, 且中性风和对流电场对 D0 波的贡献几乎相当.

**关键词** 场向电流; 太阳光照; 地磁倾角

doi:10.6038/cjg2019M0182

中图分类号 P352

收稿日期 2018-03-23, 2018-05-31 收修定稿

## SWARM dual satellite observations of longitudinal variations in field-aligned currents

WANG Hui<sup>1</sup>, ZHENG ZhiChao<sup>1</sup>, LUEHR Hermann<sup>2</sup>

1 Department of Space Physics, School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China

2 GFZ German Research Center for Geosciences, Potsdam, Germany

**Abstract** In this study we investigate the longitudinal variations in the mean densities of field-aligned currents (FACs) at high latitudes in different seasons, by using high resolution magnetic field data from SWARM A and C satellites. Longitudinal variations are about a factor of 1.2~3.2 larger in the Southern Hemisphere than in the Northern Hemisphere. A tidal analysis is applied to FACs. D0 and DW2 are the dominant non-migrating components. DW2 is larger than D0 in summer and equinox. The longitudinal variations in solar illumination can explain D0 wave in FACs, with more solar illumination at near pole longitudes than at far-from-pole longitude. Factors like the geomagnetic field strength and dipole tilt angle might contribute to the observed DW2 features in FACs. The FACs simulated by the global ionosphere and thermosphere model only show D0 wave. The theoretical study reveals that the role of neutral wind is comparable to that of the electric field in the formation of D0 wave.

**Keywords** Field-aligned currents; Solar illumination; Dipole tilt

## 0 引言

场向电流(Field-Aligned Currents, FACs)沿磁力线从磁层流向电离层,是磁层-电离层区域关键的电动力学耦合过程,也是空间电磁环境的重要组成部分.场向电流的研究对于理解太阳风-磁层-电离层耦合有着非常重要的作用,是空间天气学研究的一个重要课题(Wiltberger et al., 2017).自从1903年Birkeland假设FACs的存在以及50多年前Zmuda等(1966)通过卫星观测证实其存在以来,FACs的研究一直备受各国科学家的重视.科学家们利用地面地磁台站、探空火箭和卫星当地测量的磁场数据,以及理论和经验数值模型对FACs开展了大量的科学研究,详尽描述了FACs的时空分布特征(如Iijima and Potemra, 1976; Iijima et al., 1984; Friis-Christensen et al., 1985; Potemra et al., 1987; Lu et al., 1995; Lühr et al., 1996; 沈长寿等, 1999; Weimer, 2001; Stauning, 2002; Papitashvili et al., 2002; Ridley et al., 2004; Wang et al., 2005, 2008, 2014; Lühr et al., 2015a, b).

以往研究主要发现了四种类型的FACs(如Iijima and Potemra, 1976; Wilhjelm et al., 1978; Iijima et al., 1984; Wang et al., 2014).区域1(简称R1)FACs在晨侧流入电离层,在昏侧流出电离层.区域2(简称R2)FACs位于较低磁纬,且流向与R1相反.在正午地方时扇区,FACs的流向主要取决于行星际磁场(Interplanetary Magnetic Field, IMF)  $B_y$  分量,这种由IMF  $B_y$  控制的FACs称作DPY FACs(如Iijima and Potemra, 1976; Wilhjelm et al., 1978; Clauer and Friis-Christensen, 1988).当IMF  $B_y$  为昏向时,北半球DPY FACs的靠极侧分量流出电离层,靠赤道侧分量流入电离层,南半球的情形与北半球相反,晨向IMF  $B_y$  时期FACs的极性与昏向IMF  $B_y$  相反(Iijima et al., 1984).北向IMF时FACs(即NBZ FACs)主要位于极盖区,并且与R1 FACs极性相反,NBZ FACs主要与夜侧磁尾瓣磁重联过程有关(Vennerstrom et al., 2005; Wang et al., 2008).Wang等(2014)发现一种与IMF  $B_x$  分量有关的新型FACs电流元,正午时分FACs靠极侧分量向下流入电离层,靠赤道侧分量向上流出电离层.

以往研究表明,对于大尺度场向电流来说,其磁层源区主要表现为电压源属性,即场向电流的强度

与电离层电导率有关(如Lysak, 1985; Vickrey et al., 1986).早期的研究证实场向电流的强度和位置受控于电离层电导率.与无太阳光照相比,有太阳光照时FACs强度增加了两倍,其中心位置向极侧移动了约 $2^\circ$ 磁纬(Christiansen et al., 2002; Wang et al., 2005).Ridley等(2004)利用磁层-电离层模型模拟研究了电离层电导率对场向电流的影响,他们发现太阳辐射产生的电离层电导率迫使场向电流在有太阳光照的区域与电离层水平电流形成闭合回路.Wiltberger等(2009)发现模拟的FACs存在很强的季节性变化,无论夏季还是冬季,有光照半球的FACs强度均强于无光照半球.使用南半球Polar卫星晨昏两侧观测数据,Russel和Fleishman(2002)研究了FACs对行星际电场(Interplanetary Electric Field, IEF)的依赖性,他们发现有光照时FACs对IEF的依赖是无光照时的两倍,这与有光照时电离层Pederson电导率更高有关.在北半球早晨和下午时段,向阳侧R1场向电流和太阳风-磁层耦合参数的相关性较强,背阳侧两者相关性较弱(Cattell et al., 2003).Coxon等(2016)利用Active Magnetosphere and Planetary Electrodynamics Response Experiment (AMPERE)卫星磁场数据研究了FACs半球平均强度的日变化特征,发现其与太阳天顶角的日变化特征比较一致,他们进一步研究发现夏季和春秋流入北半球的FACs强度高于南半球,并认为主要归因于地球磁场强度的南北半球不对称性.Ohtani等(2014)统计学研究了FACs的强度和位置对太阳活动 $F_{10.7}$ 指数的依赖性,发现在夜侧太阳活动愈强,FACs愈强,其中心位置向赤道侧移动.

上述研究为我们了解FACs与电离层电导率的关系提供了很多有趣的信息,然而迄今为止,大尺度FACs随经度的变化仍缺乏详细的研究,以往的研究多关注FACs随地磁纬度和地方时的分布,而忽略了其经度或世界时(Universal Time, UT)变化.近来有研究表明极光椭圆区电离层E区和F区的电子密度存在明显的经度变化,并认为与中性风、太阳光照、粒子沉降、地磁场强度以及低层大气潮汐波有关(如Zhang et al., 2012; Xiong et al., 2014; Wang et al., 2015; Luan et al., 2015; Wang and Lühr, 2016; Wang et al., 2017).张静等(2017)研究了极区霍尔电流在不同太阳活动、季节、磁经度和地方时等条件下的变化特征,发现南北半球有显著的一波经度结构.此外,中性风也能影响磁层、电离层和热层的耦合过程(Forbes and Harel, 1989; Lu et

al., 1995; Ridley et al., 2003). Lu 等(1995)研究了 1992 年 3 月 28—29 日期间热层中性风对电离层焦耳加热和 FACs 的影响,他们发现亚暴期间热层中性风驱动的 FACs 大约占磁层产生的 FACs 的 27%. Wang 和 Lühr(2016)研究表明由于太阳辐射引起的压强梯度导致的热层中性风存在明显的经度变化. 电离层电导率和中性风的经度变化表明 FACs 亦存在经度变化,这将是本文的研究重点. 本文的研究结果将有助于理解电离层和热层对磁层能量耗散过程的影响.

## 1 卫星数据和数值模型

### 1.1 SWARM 卫星

欧空局 SWARM 卫星为近地极轨卫星,轨道倾角为  $87.5^\circ$ , 2014 年 4 月 15 日形成最终轨道分布, A 和 C 星在 460 km 高度并排飞行,地理经度间隔为  $1.4^\circ$ , 而 SWARM B 星在较高高度飞行,高度大约为 520 km.

我们利用 SWARM A 和 C 星的磁场数据,通过安培环路定理求解 FACs(如 Ritter and Lühr, 2006), 该方法是对单颗卫星反演方法的较大改进,后者通常需要假设 FACs 为静态和无限长电流片(Wang et al., 2005). SWARM 双星反演 FACs 的方法详见 Ritter 等(2013)和 Lühr 等(2015b), 本文只做简单论述. 为了确定 FACs,我们需要使用高精度的矢量磁场数据,其中地球主磁场、岩石圈磁场以及磁层环电流所产生的扰动磁场均被去除. 为了得到大尺度 FACs 结构,磁场数据进行了 20 s 平均处理.

根据安培环路定理, FACs 可以用磁场的环路积分来表示:  $j = \frac{1}{\mu_0 A} \oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l}$ , 这里  $\mu_0$  是真空磁导率,  $\mathbf{B}$  为消除外界磁场后的剩余场,闭合积分路径为包括 SWARM A 和 C 星运行轨道在内的四边形,  $d\mathbf{l}$  为沿着积分路径的线元,  $A$  为闭合区域面积. 求解得到的电流密度被定义为积分区域中心的 FACs 密度.

本文采用了 2014—2017 年期间 SWARM A 和 C 双星的场向电流数据. 以往研究表明重联电场是表征太阳风-磁层能量耦合的参数之一(Kan and Lee, 1979), 本文的研究主要考虑重联电场小于  $2 \text{ mV} \cdot \text{m}^{-1}$  的平静时期(如 Ritter et al., 2004; Wang et al., 2005). 我们将 FACs 按磁地方时(MLT)和磁经度(MLon)进行分区, 每个区间内挑选出向上

( $j_{\text{up}}$ ) 流出和向下( $j_{\text{down}}$ ) 流入电离层的 FACs 的峰值进行平均, 即:  $j_m = 1/2(|j_{\text{up}}| + |j_{\text{down}}|)$ . Wang 等(2005)研究了南半球场向电流对重联电场和电离层电导率的依赖性,也是使用向上和向下 FACs 峰值的平均值作为其平均强度的代表. FACs 的峰值大多位于  $80^\circ$  磁纬以下, 高于  $80^\circ$  磁纬的事件少于 10%, 在本文研究中剔除了近磁极点(大于  $80^\circ$  磁纬)的数据. 在近地理极点附近, 由于 SWARM 双星靠得比较近, 积分路径可能会造成一定的误差. 在本文中, 发生在南北半球近极点(大于  $80^\circ$  地理纬度)的事件分别占总事件的 40% 和 20%. 进一步分析表明, 去除近地理极点的数据和保留近极点的数据得到的结果比较相似, 因此本文仍然保留近地理极点的数据.

Lühr 等(2016)对比分析了 Swarm 单星和双星反演场向电流的结果, 发现两种方法差异较大的事件通常发生在北向行星际磁场期间, 其中大部分事件发生在极盖夜侧区域, 可能与磁尾的波扰动过程有关. Superdual auroral radar network(SuperDARN) 雷达为研究高纬场向电流提供了新机会(Sofko et al., 1995). 雷达测量等离子体对流速度, 从中可以计算等离子体对流旋度, 如果不考虑电离层电导率的梯度(例如白天时段), 等离子体对流旋度和电离层电导率的高度积分值的积就可以代表场向电流密度(详见 Sofko et al., 1995). 由于很难获得电离层电导率的高度分布, 以往的研究通常使用大尺度电离层电导率的统计学模型, 因此很难代表真实的小尺度变化电离层电导率分布. 在白天时段地磁平静期间该方法比较有效. 例如 Kustov 等(2000)利用该方法发现在较弱 IMF  $B_z$  和  $B_y$  期间, 高纬地区仍然存在 R0 FACs, 可能源于黏滞过程. 如果要与卫星观测数据进行对比, 电离层电导率梯度导致的场向电流部分必须被考虑进去, 尤其是亚暴和地磁扰动期间粒子沉降很强时期.

### 1.2 GITM 模型

利用全球电离层模型(Global Ionosphere and Thermosphere Model, GITM)的电离层和热层输出结果可以理论求解 FACs, 模拟结果可以与 SWARM 卫星观测结果进行对比. 全球电离层与热层模型是由密歇根大学开发的对电离层和热层动力学过程进行模拟的三维模型(参见 Ridley et al., 2006). GITM 模型求解连续性方程、动量和能量方程, 其中动量方程考虑了压强梯度、离子拖曳力、黏滞力和科里奥利力等. GITM 模型的驱动包括高纬电场(Weimer,

2005)、极光粒子沉降(Fuller-Rowell and Evans, 1987)、太阳远紫外辐射和低层大气潮汐波的影响(Hagan et al., 1999). 模型的初始化使用了质谱仪-非相干散射模型(MSIS)(Hedin, 1991)和国际参考电离层模型(IRI)(Bilitza, 2001)的离子和中性密度和温度数据. 地磁场构型由国际参考地磁场模型(International Geomagnetic Reference Field, IGRF)描述(Maus et al., 2005), 本文的结果在 IGRF Apex 地磁坐标系中给出(Richmond, 1995).

## 2 SWARM 卫星观测结果

### 2.1 FACs 的经度变化

为了研究 FACs 的经度变化, 场向电流按地磁经度(经度间隔为  $30^\circ$ )和磁地方时(时间间隔为 1 h)进行分区平均, 每个地方时扇区 FACs 的经度平均值均被去除. 图 1 给出南北半球不同季节场向电流的经度变化值( $\Delta j_m$ )随 MLT 和 MLon 的分布. 由于 3 年数据量有限, FAC 的分布呈片状结构, 然而主要特征仍清晰可见. 在北半球春秋分和夏至季节,  $120^\circ$ MLon 以西出现明显增强的 FACs, 在  $60^\circ$ MLon、 $08:00$ MLT 与  $-120^\circ$ MLon、 $20:00$ MLT 处同时出现增强的 FACs. 南半球最明显的特征是在接近  $0^\circ$ MLon 处出现 FACs 的最小值, 最大值位于  $0^\circ$ MLon 两侧. 春秋分和夏季 FACs 结构较为相似, 冬季夜间明显不同. 我们计算出各个地方时扇区场向电流的最大与最小经度值, 作为该地方时扇区  $\Delta j_m$  的经度变化值, 再分别挑选出向阳侧和背阳侧的经度变化峰值, 列于表 1 中. 从表 1 中可以看出南半球的峰值变化大约比北半球高 1.2~3.2 倍, 北半球向阳侧峰值夏-冬季节比大约为 1.7, 而在南半

球则为 2.5.

表 1 2014—2017 年, SWARM 卫星向阳侧和背阳侧场向电流峰值经度差

Table 1 Peak west-east differences of field-aligned currents observed by SWARM for both daytime and nighttime during years of 2014 and 2017

	北半球		南半球	
	向阳侧 ( $\mu\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$ )	背阳侧 ( $\mu\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$ )	向阳侧 ( $\mu\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$ )	背阳侧 ( $\mu\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$ )
春秋分	1.25	0.61	1.83	0.93
夏至	1.73	0.47	0.87	0.85
冬至	0.67	0.53	2.29	1.25

### 2.2 潮汐谱分析

为了进一步分析 FACs 的经度变化特征, 我们利用潮汐谱分析方法得到 FACs 中主要非迁移潮汐分量, 列于表 2 中, 这些非迁移潮汐分量中, 首字母 D 代表日变化周期, 第二个字母 W 或者 E 代表西向或者东向传播, 最后的数字代表东西向波数, D0 代表周日波, 且在所有经度同时增加和减少. 在南北半球, DW2 是主要的潮汐分量, 在北半球尤为明显(图 1), 它们在北半球的相位大约在  $09:00$ MLT, 南半球的相位为  $23:00$ MLT. 另一个占主导地位的非迁移潮汐分量为 D0 分量(东向传播), 在北半球冬季很容易分辨, 在南半球除了冬季它与 DW2 分量几乎相当. 除了这些非迁移潮汐分量之外, SPW1 在南北半球均很明显, 并且与 DW2 分量幅度相当. 在春秋分和夏至季节 SPW1 的极大值出现在  $-43^\circ$ MLon 处. 在南半球, SPW2 分量也很重要. 在 SPW1 和 SPW2 潮汐分量共同作用下, FACs 在  $10^\circ$ MLon 左右处形成最小值(图 1), 在  $120^\circ$ 和  $-95^\circ$ MLon 处形成两个极大值.

表 2 2014—2017 年, 非迁移潮汐分量 D0 和 DW2 的幅度和相位, 以及 400km 处纬向风的行星际波分量 SPW1 和 SPW2 的幅度和相位表. 幅度的单位是  $\text{nA} \cdot \text{m}^{-2}$ , 潮汐相位的单位是小时(h), 行星际波相位的单位是度( $^\circ$ ).

Table 2 The amplitudes and phases of diurnal tidal components D0 and DW2, and planetary wave components SPW1 and SPW2 of zonal winds at 400 km altitude during years of 2014 and 2017. The amplitudes are in units of  $\text{nA} \cdot \text{m}^{-2}$ . The phases of the diurnal tidal components are in units of hour, and those of the planetary wave are in units of degree.

	北半球				南半球			
	D0	DW2	SPW1	SPW2	D0	DW2	SPW1	SPW2
	Amp. (Phase)	Amp. (Phase)	Amp. (Phase)	Amp. (Phase)	Amp. (Phase)	Amp. (Phase)	Amp. (Phase)	Amp. (Phase)
春秋分	40(12.0)	100(8.3)	110(-44.2)	-40(-18.7)	120(1.94)	120(22.8)	-130(-8.9)	140(10.0)
夏至	20(4.3)	100(9.8)	100(-44.9)	-50(-10.2)	100(3.1)	70(23.4)	-40(12.0)	-80(2.3)
冬至	60(13.8)	70(9.1)	-10(71.1)	-20(21.9)	90(2.3)	160(22.7)	-100(14.1)	-190(6.1)

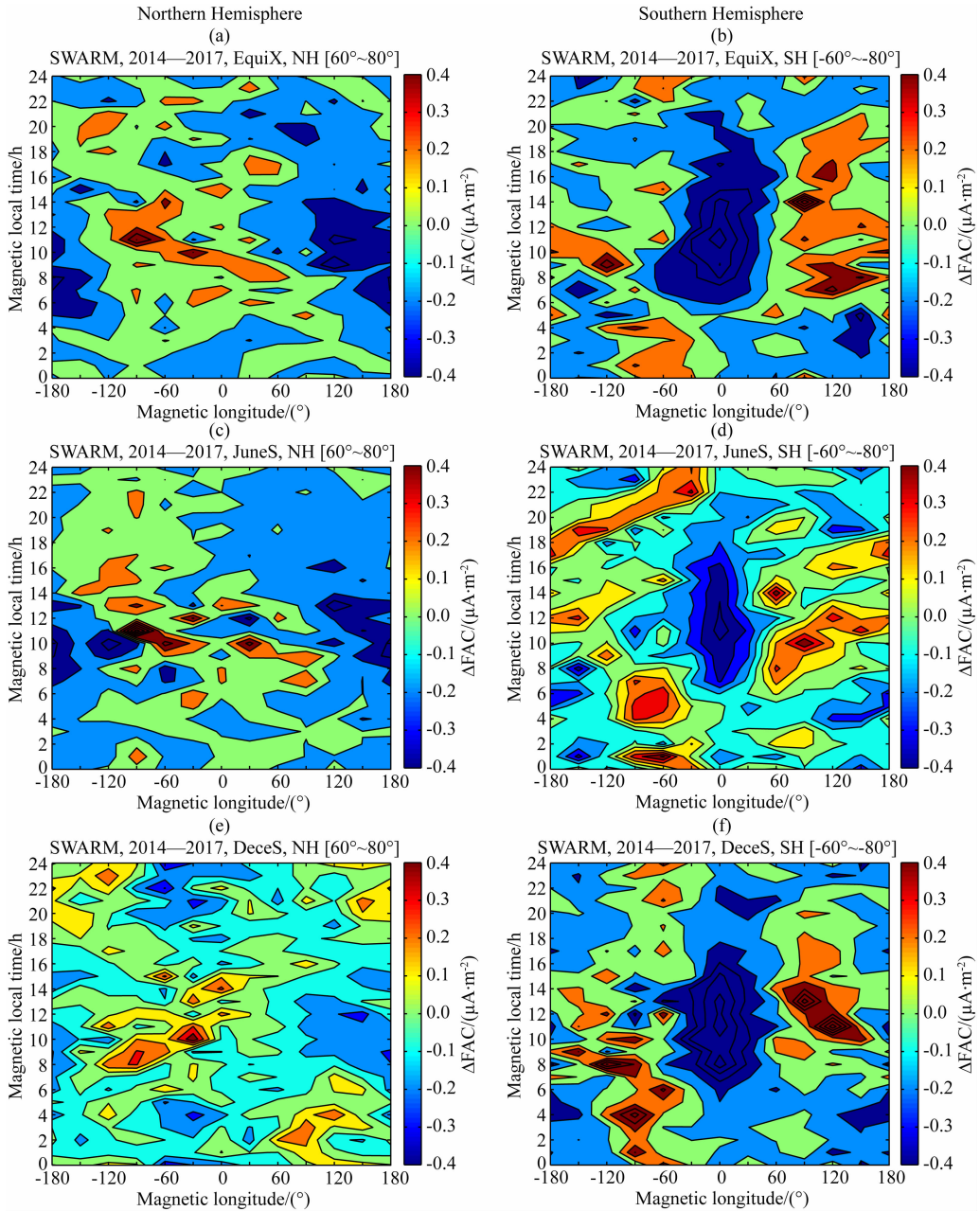


图 1 2014—2017 年, SWARM 双星 A 星和 C 星 FACs 随磁经度和磁地方时的变化  
 从上至下分别是春秋分、夏至和冬至图, 电流单位为  $\mu\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

Fig. 1 The magnetic local time and longitudinal variation of FACs densities ( $\Delta j_m$ )  
 from SWARM dual satellites A and C during years of 2014 and 2017

From top to bottom are seasons of Equinox, June Solstice, and December Solstice. The amplitudes are in units of  $\mu\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$ .

## 3 讨论

### 3.1 太阳光照的影响

正如引言中所提及, FACs 的强度与电离层电导率有关, 因此 FACs 的经度变化可能来自于电离层电导率的经度变化。电离层电导率由太阳远紫外辐射和极光粒子沉降共同决定, 太阳光照导致的电

离层电导率与太阳天顶角(SZA)有关, 远紫外线辐射的水平可用  $F_{10.7}$  指数近似, 前人通过非相干散射雷达数据研究过  $F_{10.7}$  指数和 SZA 对电导率的影响(如 Robinson, 1984; Schlegel, 1988; Moen and Brekke, 1993)。

由于 SWARM 卫星测量的是 F 区电子密度(400 km 高度), 不是 E 区电子密度, 我们采用  $\cos^{0.5}$  (SZA) 代表太阳光照电离导致的电离层电导率。图

2 给出不同季节  $\cos^{0.5}(\text{SZA})$  随地磁经度和磁地方时的分布图, 从图中可以看出太阳光照呈明显的一波结构, 这是由于地磁坐标系和地理坐标系的不重合导致的. 图 3 给出地理坐标系 (黑线) 和基于 Apex 的地磁坐标系 (红线) 的分布图 (Richmond, 1995), 磁南北极分别位于  $120^\circ\text{E}$  和  $90^\circ\text{W}$ . 在靠近磁极点的经度带, 极光椭圆所对应的地理纬度要低于远离磁极点的经度带, 例如: 在北半球, 近磁极点经度带 ( $90^\circ\text{W}$ )  $70^\circ$  磁纬所对应的地理纬度为  $60^\circ$ , 而在远离磁极点经度带 ( $90^\circ\text{E}$ ) 所对应的地理纬度为  $74^\circ$ . 在

南半球, 在近磁极点经度带 ( $120^\circ\text{E}$ )  $-70^\circ$  磁纬对应的地理纬度为  $-55^\circ$ , 而在远离极点经度区域 ( $60^\circ\text{W}$ ) 对应的地理纬度为  $-84^\circ$ . 因此, 向阳侧靠近磁极点经度的地区将会比远离磁极点地区有更强的太阳光照, 因此  $\cos^{0.5}(\text{SZA})$  有明显的经度变化. 由于南半球地磁轴与地理轴的偏离大于北半球, 南半球  $\cos^{0.5}(\text{SZA})$  的经度差异比北半球更明显, 因此南半球 FACs 的经度变化明显强于北半球. 冬季夜间 FACs 的经度变化则可能来自粒子沉降. Luan 等 (2015) 在研究夜间电离层 E 层电子密度的经度变

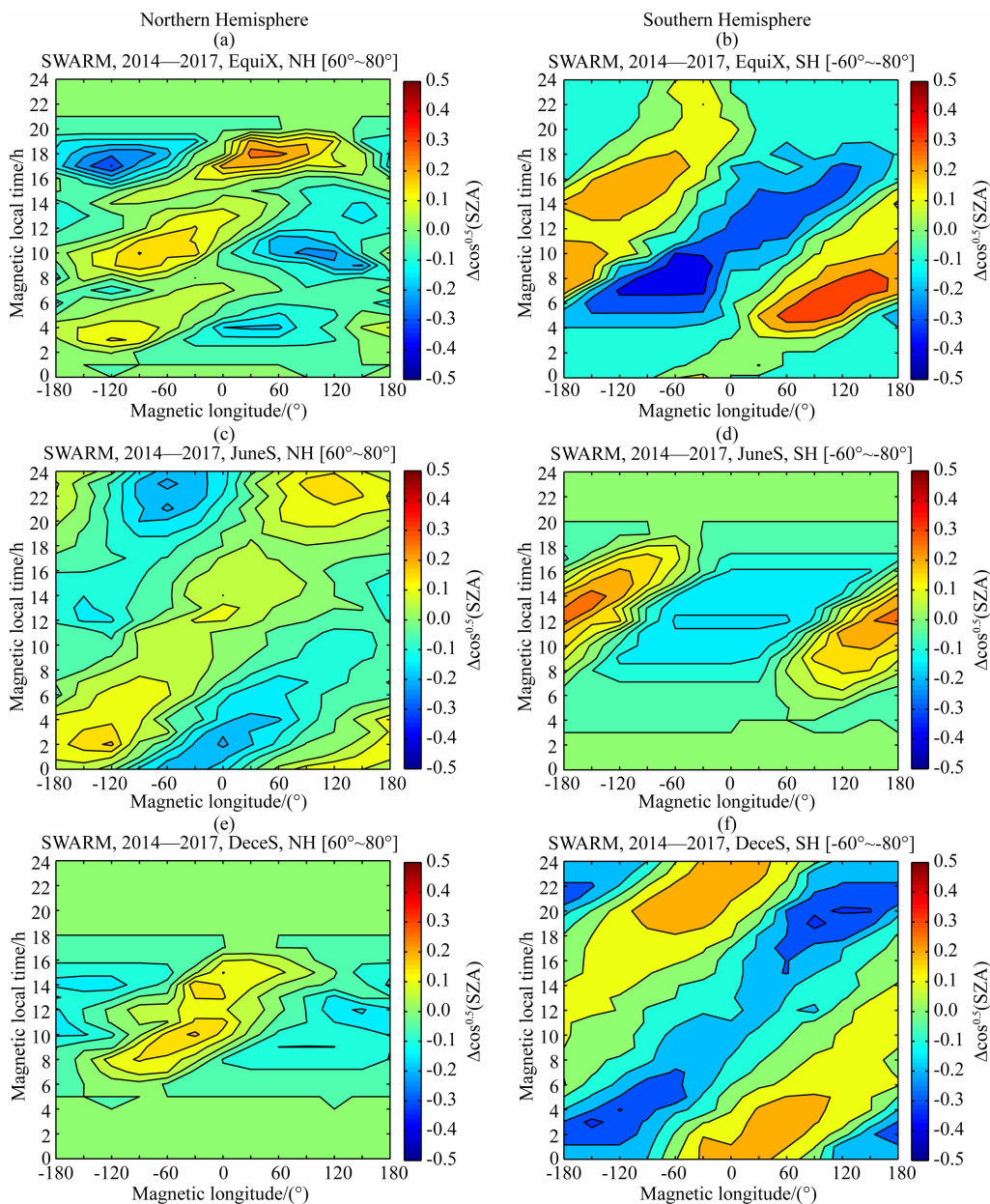


图 2 2014—2017 年, SWARM A 星和 C 星  $\cos^{0.5}(\text{SZA})$  随磁经度和磁地方时的变化  
从上至下分别是春秋分、夏至和冬至图, SZA 为天顶角.

Fig. 2 The same format as Fig. 1, but for  $\cos^{0.5}(\text{SZA})$  during years of 2014 and 2017  
SZA denotes solar zenith angle.

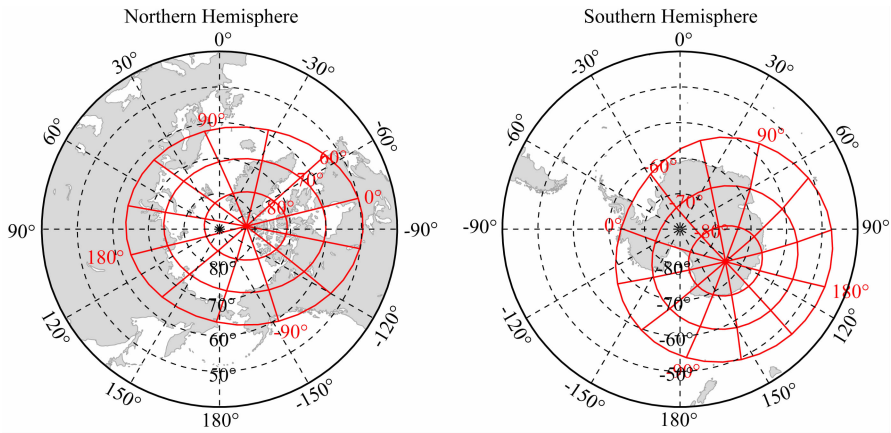


图3 南北半球极区地理经纬图(黑线)

其中灰色表示大陆轮廓,红线表示地磁经纬度。

Fig. 3 The geographic coordinates at the north and south poles, which are shown in black lines

The continental contours are shown on geographic grid in grey color.

The magnetic latitude and longitude are overlapped in red lines.

化时发现在冬季北半球磁经度  $120^{\circ}\sim 180^{\circ}$  和  $-180^{\circ}\sim -50^{\circ}$  电子密度会更高,而在南半球磁经度  $-180^{\circ}\sim 0^{\circ}$  区域会更高,这与我们在冬季夜间的观测结果比较一致。

同一地方时扇区不同经度带 FACs 的强弱不同,表明 FACs 有世界时(UT)变化.图 4 给出 FACs 强度和  $\cos^{0.5}(SZA)$  随 UT 和 MLT 的变化(均为 3 h 时间间隔),季节分为冬季和非冬季,我们将夏季和春秋分合并,因为这两个季节较为相似.在非冬季,南北半球 FACs 的峰值强度出现在  $8\sim 16$  MLT,太阳光照也在此时段最强.在冬季,白天时段较强的 FACs 可归因于太阳光照,而在夜晚时段则与粒子沉降有关.在北半球,白天时段 FACs 的峰值主要出现在  $16\sim 20$  UT,谷值出现在  $02\sim 04$  UT.在南半球,白天时段 FACs 的最大值出现在  $00\sim 06$  UT,而最小值出现在  $12\sim 16$  UT. Coxon 等(2016)利用 AMPERE 卫星观测数据发现北半球 FACs 平均强度随 UT 变化的峰值出现在  $16\sim 17$  UT,南半球峰值出现在  $05\sim 06$  UT,这与本文的结果比较一致.对比 FACs 和  $\cos^{0.5}(SZA)$ ,可以看到两者的相关性较好,这进一步说明了太阳光照在 FACs 随 UT/经度的变化中起到的重要作用.仔细观察还可以发现冬季  $\cos^{0.5}(SZA)$  与 FACs 的相似性优于非冬季,这说明在非冬季还有其他物理因素影响 FACs 的经度/UT 变化。

$\cos^{0.5}(SZA)$  的潮汐谱主要分量是 D0,北半球 D0 的相位为  $13:00$  MLT,南半球为  $23:00$  MLT,从表 1 可以看到这些相位分布与 FACs 的 D0 分量相

位比较符合. FACs 中存在明显的 DW2 分量,这是  $\cos^{0.5}(SZA)$  中不存在的,这表明除了太阳光照外还存在其他物理过程影响着 FACs 的经度分布。

### 3.2 地磁场强度和地磁倾角的影响

正如 3.1 节所讨论,场向电流的经度变化中的一部分可以用太阳光照导致的电导率解释,尤其是在冬季季节.当利用潮汐分析法时,FACs 和  $\cos^{0.5}(SZA)$  中都可以看到 D0 分量,这表明 FACs 中的非迁移潮汐分量 D0 可以归因于太阳光照.但在春秋分和夏季(图 1 中),FACs 中有很明显的 DW2 分量,该分量导致北半球晨侧东经  $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ ,太阳照射相对较弱的地方,FACs 的强度却相对较强.以上特征都需要进一步的物理解释。

我们认为磁场强度的经度变化可能是影响因素之一,电离层电导率与磁场强度成反比(Cnossen et al., 2011).图 5a 和 5b 给出磁场强度随地磁经度和磁地方时的变化图,从图中可以看出地磁场强度在东经  $30^{\circ}\sim 120^{\circ}$  处较弱,这导致在这些区域电离层电导率较高、FACs 较强。

另一个影响因素可能是太阳风-磁层的能量耦合效率. Cnossen 和 Richmond(2012)模拟研究了不同季节和 UT 时刻地磁倾角的变化对太阳风-磁层耦合效率的影响,研究结果表明太阳风向磁层能量的输入效率有很强的地磁倾角依赖性,地磁倾角是地磁偶极轴与 GSM 坐标系 Z 轴的夹角.重联率可以用电场沿重联路径的积分来估算, Russel 等(2003)发现当地磁倾角为  $0^{\circ}$  时,重联线跨经度范围为  $170^{\circ}$ ,当地磁倾角为  $15^{\circ}$  时则为  $27^{\circ}$ ,当地磁倾角

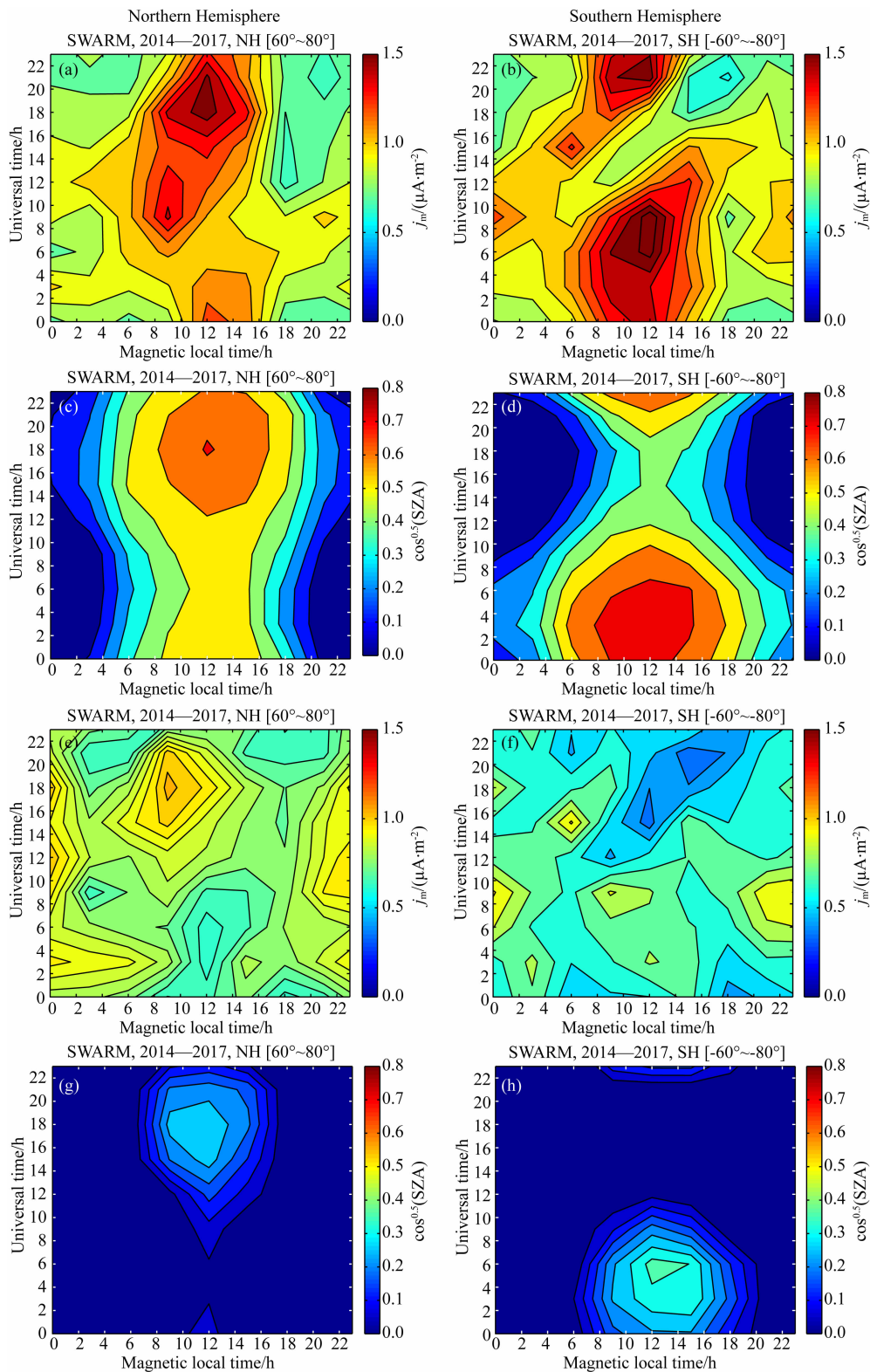


图4 2014—2017年, FAC密度(a、b、e、f)和 $\cos^{0.5}(\text{SZA})$ (c、d、g、h)随磁地方时和世界时的变化图  
上半部分四张子图为非冬季, 下半部分四张子图为冬季. 左半部分四张子图为北半球,  
右半部分四张子图为南半球. FAC的单位为 $\mu\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$ .

Fig. 4 The magnetic local time and universal time variation of average peak FAC densities (a, b, e, f) and  $\cos^{0.5}(\text{SZA})$  (c, d, g, h) during years of 2014 and 2017

Top four panels are for no winter, and bottom four panels for local winter. The current amplitudes are in units of  $\mu\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$ . Left is in the Northern Hemisphere, and right in the Southern Hemisphere.



为  $30^\circ$  时减少到  $6^\circ$ . Cnossen 和 Richmond(2012) 发现当地磁倾角的绝对值最小时, 太阳风-磁层重联率和电离层跨极盖电势均达到最大. 为了研究太阳风-磁层能量输入效率的地方时和经度变化特征, 图 6 给出北半球夏季和冬季时期与 FACs 相对应的地磁倾角随 MLon 和 MLT 的变化. 在夏季正值代表地磁轴倾向太阳, 在冬季负值代表远离太阳. 显然, 地磁倾角存在明显的经度和日变化. 与图 2 中  $\cos^{0.5}$  (SZA) 相比, 在夏季地磁倾角绝对值越大对应越多的太阳照射, 在冬季则对应越少的太阳照射. 由于太阳风-磁层耦合效率与地磁倾角的绝对值成反比, 我们因此可以得出以下结论: 在夏季能量耦合效率与电离层电导率对 FACs 的影响几乎反相, 所以夏季 FACs 与  $\cos^{0.5}$  (SZA) 的差别较大, FACs 中 DW2 波更为显著; 而在冬季能量耦合效率与电离层电导率

的作用几乎同相, 因此冬季 FACs 的经度分布与  $\cos^{0.5}$  (SZA) 更为相似.

### 3.3 与 GITM 结果对比

根据电流连续性原理 (Lu et al., 1995), 我们尝试在理论上模拟出场向电流强度的经度变化, 公式如下:

$$j = -\frac{1}{\sin I} \nabla \cdot (\Sigma_P \mathbf{E} + \Sigma_H \mathbf{b} \times \mathbf{E}) - \frac{1}{\sin I} \nabla \cdot (\Sigma_P \mathbf{U} \times \mathbf{B} + \Sigma_H \mathbf{b} \times \mathbf{U} \times \mathbf{B}), \quad (1)$$

这里  $I$  为周围磁场  $\mathbf{B}$  处磁倾角,  $\Sigma_P$  和  $\Sigma_H$  为高度积分的 Pederson 电导率和 Hall 电导率,  $\mathbf{E}$  为对流电场,  $\mathbf{b}$  为  $\mathbf{B}$  的单位向量,  $\mathbf{U}$  为中性风速度.

Lu 等 (1995) 利用电离层和热层模型 (TIEGCM) 输出的结果研究热层风对 FACs 和焦耳热的影响, 我们利用 GITM 的结果来研究中性风对 FACs 经

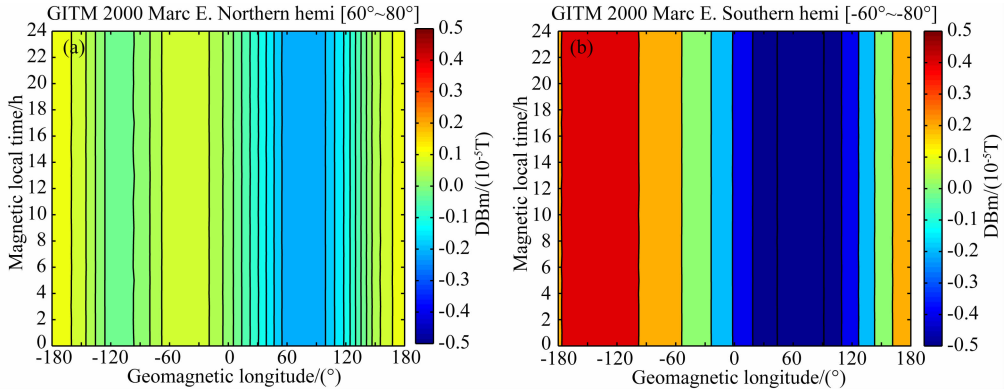


图 5 GITM 模拟的磁场强度的经度差异值 (DBm) 随磁经度和磁地方时的变化图

其中每个地方时扇区的经度平均值被去除. 左边为北半球, 右边为南半球.

Fig. 5 The magnetic local time and longitudinal variation of average magnetic field strength from GITM. Longitudinal means have been subtracted in each local time sector. Left is in the Northern Hemisphere, and right in the Southern Hemisphere.

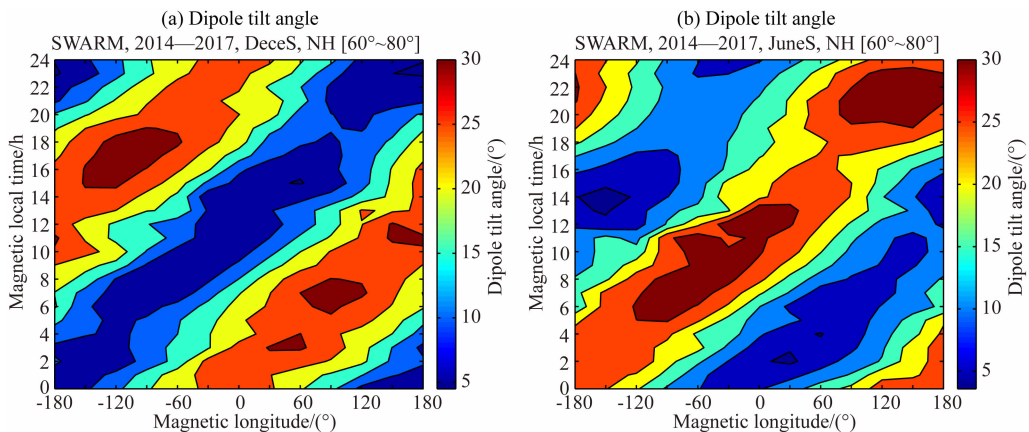


图 6 北半球夏季和冬季磁倾角随磁经度和磁地方时的变化图

Fig. 6 The magnetic local time and longitudinal variation of average magnetic field dipole tilt angle at summer and winter in the Northern Hemisphere

度变化的影响. GITM 模型没有考虑中性风对磁层电场的反馈,显然,利用磁层-电离层-热层模型以一种自洽的方式研究中性风对 FACs 的影响更为恰当. 然而现有的磁层-电离层-热层模型(如 Space weather modeling framework)并不能模拟出所观测的场向电流的经度变化特征(图形没有给出),这表明磁层-电离层-热层模型低估了电离层电导率对 FACs 的影响,这也是模型亟需改进的地方. 所以本文暂时采用 Lu 等(1995)的方法,利用电离层-热层模型输出结果来开展理论研究.

在此次研究中, GITM 的纬度分辨率是  $5^\circ$ , 经度分辨率是  $10^\circ$ , 垂直尺度分辨率为  $1/3$  标高. 模型会在运行 48 h 后达到准稳态,之后继续运行 24 h 为春季. 在平静期,模型的输入参数为太阳风  $F_{10.7}$  指数为 100 sfu,半球功率(Hemispheric power)为 20 GW. 我们没有考虑来自低层大气的潮汐波效应,因为主要关注电离层-热层当地物理过程的贡献.

公式(1)右边的第一个微分项表示的是等离子体对流对 FACs 的贡献,第二个微分项是中性风对 FACs 的贡献,两项中都包含电离层电导率,这两项可以被进一步展开成如下公式:

$$\nabla \cdot (\Sigma_P \mathbf{E} + \Sigma_H \mathbf{b} \times \mathbf{E}) = \Sigma_P \nabla \cdot \mathbf{E} + \nabla \Sigma_P \cdot \mathbf{E} + \Sigma_H \nabla \cdot (\mathbf{b} \times \mathbf{E}) + \nabla \Sigma_H \cdot (\mathbf{b} \times \mathbf{E}), \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (\Sigma_P \mathbf{U} \times \mathbf{B} + \Sigma_H \mathbf{b} \times \mathbf{U} \times \mathbf{B}) = \Sigma_P \nabla \cdot (\mathbf{U} \times \mathbf{B}) + \nabla \Sigma_P \cdot (\mathbf{U} \times \mathbf{B}) + \Sigma_H \nabla \cdot (\mathbf{b} \times \mathbf{U} \times \mathbf{B}) + \nabla \Sigma_H \cdot (\mathbf{b} \times \mathbf{U} \times \mathbf{B}), \quad (3)$$

公式(2)和(3)有四项和电导率有关,分别是公式(2)中的  $\Sigma_P \nabla \cdot \mathbf{E}$ 、 $\Sigma_H \nabla \cdot (\mathbf{b} \times \mathbf{E})$  和公式(3)中的  $\Sigma_P \nabla \cdot (\mathbf{U} \times \mathbf{B})$ 、 $\Sigma_H \nabla \cdot (\mathbf{b} \times \mathbf{U} \times \mathbf{B})$ . 另外四项和电导率梯度有关,分别是公式(2)中的  $\nabla \Sigma_P \cdot \mathbf{E}$ 、 $\nabla \Sigma_H \cdot (\mathbf{b} \times \mathbf{E})$  和公式(3)中的  $\nabla \Sigma_P \cdot (\mathbf{U} \times \mathbf{B})$ 、 $\nabla \Sigma_H \cdot (\mathbf{b} \times \mathbf{U} \times \mathbf{B})$ .

图 7 和图 8 给出计算得到的 FACs 随 MLon 和 MLT 的分布图,从图中可以看到包含电离层电导率的项(a、b、e、f 子图)计算得到的 FACs 强度比含有电导率梯度项(c、d、g、h 子图)要高得多. 在南北半球,电离层电导率产生的 FACs 随经度的变化都存在一波结构,与  $\cos^{0.5}(SZA)$ (图 2)类似. 从模拟结果可以看出, FACs 除了对流电场驱动外(图 7),中性风也能对 FACs 的经度变化产生影响,其影响与对流电场几乎相当甚至更强(图 8). 在表 3 中,我们利用潮汐分析法对公式(2)和公式(3)右边的八项 FACs 贡献项进行处理. 与电导率相关的几项中 D0 分量占主导,这表明 GITM 模型中电离层电导率的经度变化主要来自太阳光照的影响. 模拟的 FACs

不包含 DW2 潮汐波,表明模型低估了地磁场对电离层电导率的贡献和地磁倾角对太阳风-磁层耦合效率的影响.

表 3 由公式(2)和(3)中八项计算得到的 D0 和 DW2 潮汐分量的幅度和相位表. 幅度的单位是  $nA \cdot m^{-2}$ , 相位的单位是小时(h).

Table 3 The amplitudes and phases of diurnal tidal components D0 and DW2 of FACs calculated from eight terms as shown in Equations (2) and (3).

The amplitudes are in units of  $nA \cdot m^{-2}$ , and the phases are in units of hour.

	北半球		南半球	
	D0	DW2	D0	DW2
	Amp. (Phase)	Amp. (Phase)	Amp. (Phase)	Amp. (Phase)
$\Sigma_P \nabla \cdot \mathbf{E}$	32(12.6)	14(22.0)	19(21.8)	8(12.6)
$\nabla \Sigma_P \cdot \mathbf{E}$	1(8.4)	1(13.8)	5(22.3)	3(15.1)
$\Sigma_H \nabla \cdot (\mathbf{b} \times \mathbf{E})$	4(11.1)	5(18.9)	13(23.7)	3(13.5)
$\nabla \Sigma_H \cdot (\mathbf{b} \times \mathbf{E})$	1.4(11.2)	3(2.1)	3(1.5)	2(1.6)
$\Sigma_P \nabla \cdot (\mathbf{U} \times \mathbf{B})$	30(12.2)	10(15.8)	20(0.23)	7.2(13.9)
$\nabla \Sigma_P \cdot (\mathbf{U} \times \mathbf{B})$	1(10.4)	1(21.2)	2(23.7)	1(12.1)
$\Sigma_H \nabla \cdot (\mathbf{b} \times \mathbf{U} \times \mathbf{B})$	41(12.2)	9(11.0)	26(1.8)	11(16.0)
$\nabla \Sigma_H \cdot (\mathbf{b} \times \mathbf{U} \times \mathbf{B})$	0.4(10.2)	0.3(21.9)	1(20.9)	2(13.7)

## 4 结论

本文基于 SWARM 卫星 A 和 C 星的高精度磁场数据,分析了 2014—2017 年春秋分和冬夏至场向电流(FACs)随经度和地方时的变化特征,并解释了可能的物理机制. 利用全球电离层与热层模型(GITM)的输出结果我们模拟了 FACs 的经度分布,并与 SWARM 卫星观测结果进行了对比. 得到如下结论:

(1) 南北半球 FACs 均存在明显的经度变化,南半球的 FACs 的经度变化比北半球大 1.2~2.3 倍. 北半球白天时段 FACs 峰值经度变化夏-冬季节比约为 1.7,而南半球夏-冬季节比约为 2.5. FACs 包含主要非迁移潮汐谱分量为 D0 和 DW2,夏季 DW2 分量显著高于 D0 分量.

(2) FACs 中包含的 D0 分量可以来源于太阳光照. 太阳光照有明显的经度和日变化,与远离磁极的经度带相比,向阳侧靠近磁极经度带(北半球为  $90^\circ W$ ,南半球为  $120^\circ E$ )的太阳光照更强, FACs 密度也更强. FACs 中 DW2 分量的来源可能是地磁场

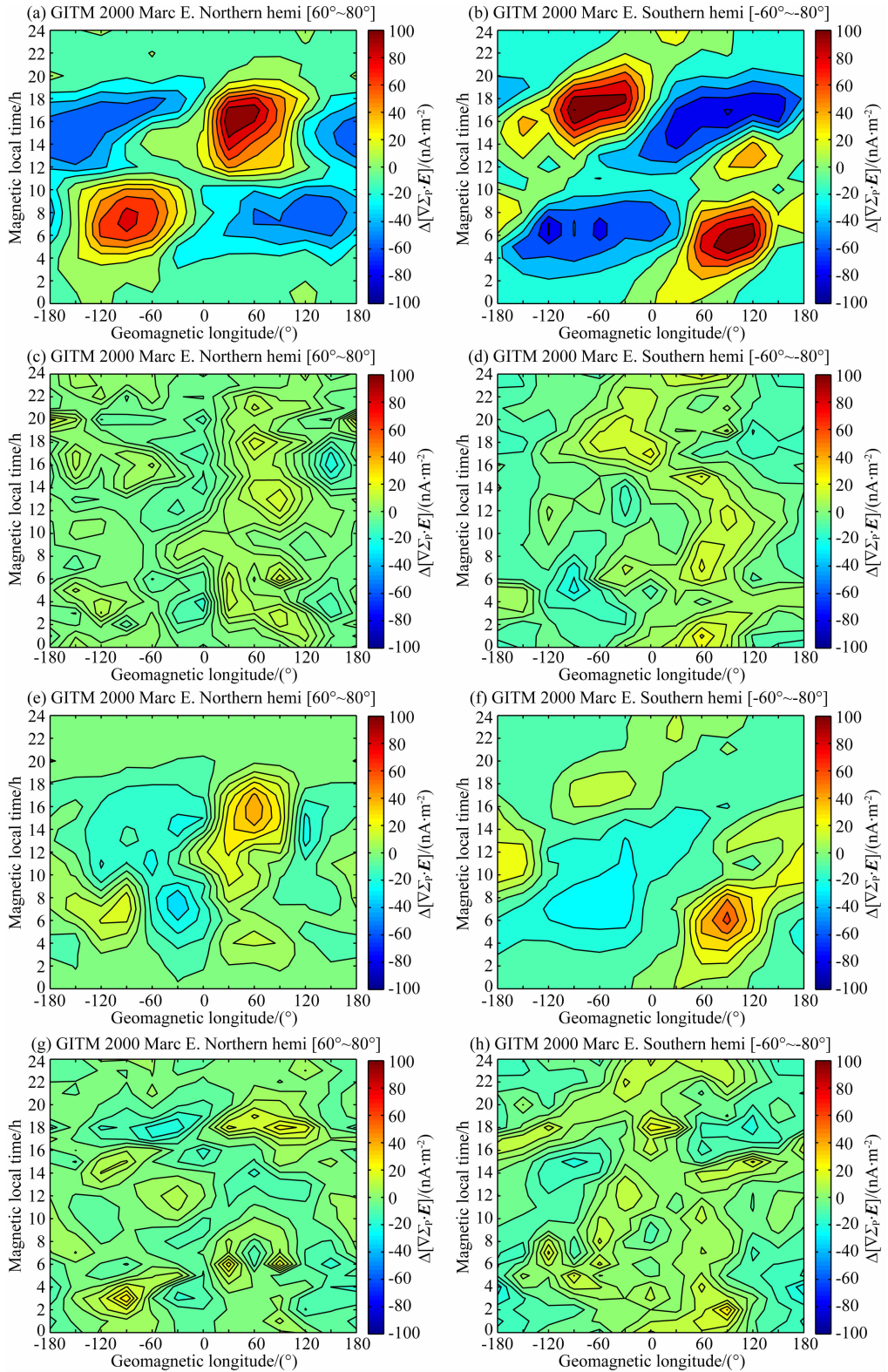


图 7 2014—2017 年,由电场驱动产生的 FACs( $\Delta j_m$ )随磁经度和磁地方时变化图

FACs 分别由  $\Sigma_P \nabla \cdot \mathbf{E}$  (a, b)、 $\nabla \Sigma_P \cdot \mathbf{E}$  (c, d)、 $\Sigma_H \nabla \cdot (\mathbf{b} \times \mathbf{E})$  (e, f) 和  $\nabla \Sigma_H \cdot (\mathbf{b} \times \mathbf{E})$  (g, h) 计算得到,单位为  $\text{nA} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

Fig. 7 The magnetic local time and longitudinal variation of modelled electric field driven FACs ( $\Delta j_m$ ) during years of 2014 and 2017

The amplitudes are given in units of  $\text{nA} \cdot \text{m}^{-2}$ . FACs are calculated from  $\Sigma_P \nabla \cdot \mathbf{E}$  (a, b) and  $\nabla \Sigma_P \cdot \mathbf{E}$  (c, d),  $\Sigma_H \nabla \cdot (\mathbf{b} \times \mathbf{E})$  (e, f) and  $\nabla \Sigma_H \cdot (\mathbf{b} \times \mathbf{E})$  (g, h).

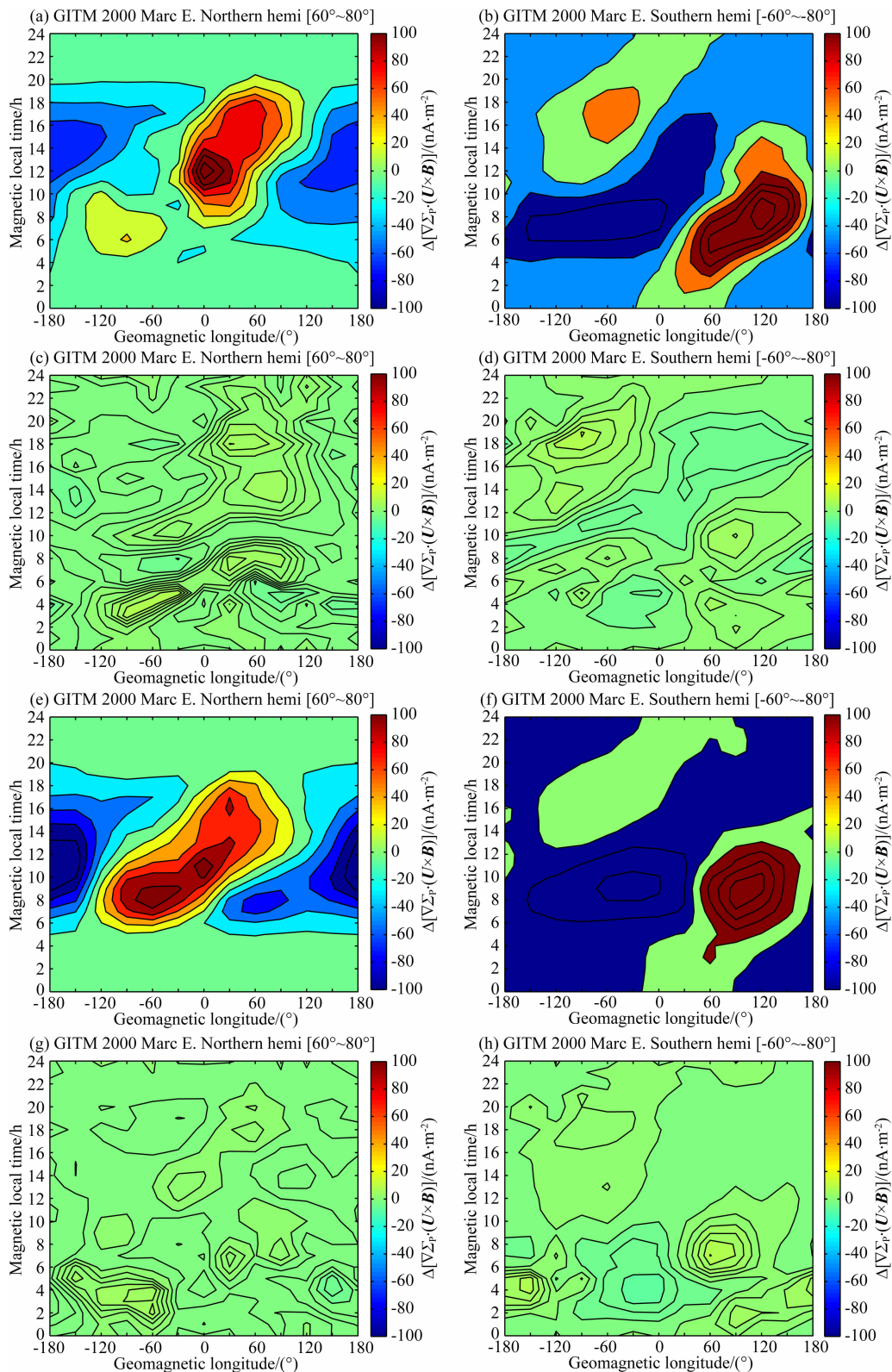


图 8 2014—2017 年由中性风驱动产生的 FACs( $\Delta j_m$ ) 随磁经度和磁地方时变化图

FACs 分别由  $\Sigma_P \nabla \cdot (\mathbf{U} \times \mathbf{B})$  (a, b)、 $\nabla \Sigma_P \cdot (\mathbf{U} \times \mathbf{B})$  (c, d)、 $\Sigma_H \nabla \cdot \mathbf{b} \times (\mathbf{U} \times \mathbf{B})$  (e, f) 和  $\Sigma_H \nabla \cdot (\mathbf{b} \times (\mathbf{U} \times \mathbf{B}))$  (g, h) 计算得到, 单位为  $\text{nA} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

Fig. 8 The magnetic local time and longitudinal variation of modelled neutral wind-driven FACs ( $\Delta j_m$ ) in both hemispheres during years of 2014 and 2017

The amplitudes are given in units of  $\text{nA} \cdot \text{m}^{-2}$ . FACs are calculated from  $\Sigma_P \nabla \cdot (\mathbf{U} \times \mathbf{B})$  (a, b) and  $\nabla \Sigma_P \cdot (\mathbf{U} \times \mathbf{B})$  (c, d),  $\Sigma_H \nabla \cdot \mathbf{b} \times (\mathbf{U} \times \mathbf{B})$  (e, f) and  $\Sigma_H \nabla \cdot (\mathbf{b} \times (\mathbf{U} \times \mathbf{B}))$  (g, h).

强度和地磁倾角的经度变化。

(3) GITM 模型输出的 FACs 经度变化结果验证了太阳光照的重要作用,也揭示了中性风对 FACs 的经度变化所起到的重要作用。然而模型没有模拟出 FACs 的 DW2 潮汐波特征,表明模型低估了地磁场对电离层电导率的贡献以及地磁倾角对太阳风-磁层耦合效率的影响。

FACs 强度的经度变化会影响电离层的回路电流。张静等(2017)研究了电离层霍尔电流的经度变化,发现也存在类似 FACs 的经度变化结构。由于霍尔电流与 Pedersen 电流强度成一定比例关系,电离层 Pedersen 电流强度也有经度变化。FACs 和电离层水平电流的经度变化会导致高纬焦耳热的经度分布差异,因此也将导致热层大气和中性风的地区性差异,电离层电子密度的分布也将受到影响。场向电流强度的经度变化反馈到磁层区域,会影响磁层电场和电势的空间分布。以往研究表明电离层电导率不仅仅影响场向电流的强度,还将影响场向电流的位置(Wang et al., 2005)。虽然本文没有讨论场向电流位置的经度变化,但其经度差异会存在。场向电流的位置可以代表极光椭圆的平均位置(Xiong et al., 2014),因此可以预期极盖区边界也有经度分布差异。以上分析结果需要进一步利用更多的卫星数据和更先进的磁层-电离层-热层耦合模型来验证。

**致谢** 感谢欧空局提供 SWARM 卫星数据,SWARM 卫星 Level-2 数据可以从 <https://earth.esa.int/web/guest/SWARM/data-access> 网站获取,同时感谢密歇根大学提供的全球电离层热层耦合模型。

## References

Bilitza D. 2001. International reference ionosphere 2000. *Radio Science*, 36(2): 261-275, doi: 10.1029/2000RS002432.

Cattell C, Dombeck J, Peria W, et al. 2003. Fast auroral snapshot observations of the dependence of dayside auroral field-aligned currents on solar wind parameters and solar illumination. *Journal of Geophysical Research*, 108(A3): 1112, doi: 10.1029/2001JA000321.

Christiansen F, Papitashvili V O, Neubert T. 2002. Seasonal variations of high-latitude field-aligned currents inferred from Ørsted and Magsat observations. *Journal of Geophysical Research*, 102(A2): 1029, doi: 10.1029/2001JA900104.

Clauer C R, Friis-Christensen E. 1988. High-latitude dayside electric fields and currents during strong northward interplanetary magnetic field; Observations and model simulation. *Journal of Geophysical Research*, 93(A4): 2749-2757, doi: 10.1029/JA093iA04p02749.

Cnossen I, Richmond A D, Wiltberger M, et al. 2011. The response of the coupled magnetosphere-ionosphere-thermosphere system to a 25% reduction in the dipole moment of the Earth's magnetic field. *Journal of Geophysical Research*, 116(A12): A12304, doi: 10.1029/2011JA017063.

Cnossen I, Richmond A D. 2012. How changes in the tilt angle of the geomagnetic dipole affect the coupled magnetosphere-ionosphere-thermosphere system?. *Journal of Geophysical Research*, 117(A10): A10317, doi: 10.1029/2012JA018056.

Coxon J C, Milan S E, Carter J A, et al. 2016. Seasonal and diurnal variations in AMPERE observations of the Birkeland currents compared to modeled results. *Journal of Geophysical Research*, 121(5): 4027-4040, doi: 10.1002/2015JA022050.

Forbes J M, Harel M. 1989. Magnetosphere-thermosphere coupling: An experiment in interactive modeling. *Journal of Geophysical Research*, 94(A3): 2631-2644, doi: 10.1029/JA094iA03p02631.

Friis-Christensen E, Kamide Y, Richmond A D, et al. 1985. Interplanetary magnetic field control of high-latitude electric fields and currents determined from Greenland magnetometer data. *Journal of Geophysical Research*, 90(A2): 1325-1338, doi: 10.1029/JA090iA02p01325.

Fuller-Rowell T J, Evans D S. 1987. Height-integrated Pedersen and Hall conductivity patterns inferred from the TIROS-NOAA satellite data. *Journal of Geophysical Research*, 92(A7): 7606-7618, doi: 10.1029/JA092iA07p07606.

Hagan M E, Burrage M D, Forbes J M, et al. 1999. GSWM-98: Results for migrating solar tides. *Journal of Geophysical Research*, 104(A4): 6813-6828, doi: 10.1029/1998JA900125.

Hedin A E. 1991. Extension of the MSIS thermosphere model into the middle and lower atmosphere. *Journal of Geophysical Research*, 96(A2): 1159-1172, doi: 10.1029/90JA02125.

Iijima I, Potemra T A. 1976. Field-aligned currents in the dayside cusp observed by Triad. *Journal of Geophysical Research*, 81(34): 5971-5979, doi: 10.1029/JA081i034p0597.

Iijima T, Potemra T A, Zanetti L J, et al. 1984. Large-scale Birkeland currents in the dayside polar region during strongly northward IMF: A new Birkeland current system. *Journal of Geophysical Research*, 89(A9): 7441-7452, doi: 10.1029/JA089iA09p0744.

Kan J R, Lee L C. 1979. Energy coupling function and solar wind-magnetosphere dynamo. *Geophysical Research Letters*, 6(7): 577-580, doi: 10.1029/GL006i007p00577.

Kustov A V, Lyatsky W B, Sofko G J, et al. 2000. Field-aligned currents in the polar cap at small IMF  $B_z$  and  $B_y$  inferred from SuperDARN radar observations. *Journal of Geophysical Research*, 105(A1): 205-214.

Lu G, Richmond A D, Emery B A, et al. 1995. Magnetosphere-ionosphere-thermosphere coupling: Effect of neutral winds on energy transfer and field-aligned current. *Journal of Geophysical Research*, 100(A10): 19643-19659, doi: 10.1029/95JA00766.

Luan X L, Wang W B, Dou X K, et al. 2015. Longitudinal variations of the nighttime E layer electron density in the auroral zone. *Journal of Geophysical Research*, 120(1): 825-833, doi:

- 10.1002/2014JA020610.
- Lühr H, Warnecke J F, Rother M K A. 1996. An algorithm for estimating field-aligned currents from single spacecraft magnetic field measurements: a diagnostic tool applied to Freja satellite data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34(6): 1369-1376, doi: 10.1109/36.544560.
- Lühr H, Park J, Gjerloev J W, et al. 2015a. Field-aligned currents' scale analysis performed with the SWARM constellation. *Geophysical Research Letters*, 42(1): 1-8, doi: 10.1002/2014GL062453.
- Lühr H, Kervalishvili G, Michaelis I, et al. 2015b. The interhemispheric and F region dynamo currents revisited with the SWARM constellation. *Geophysical Research Letters*, 42(9): 3069-3075, doi: 10.1002/2015GL063662.
- Lühr H, Huang T, Wing S, et al. 2016. Filamentary field-aligned currents at the polar cap region during northward interplanetary magnetic field derived with the Swarm constellation. *Annales Geophysicae*, 34(10): 901-915.
- Lysak R L. 1985. Auroral electrodynamics with current and voltage generators. *Journal of Geophysical Research*, 90(A5): 4178-4190, doi: 10.1029/JA090iA05p04178.
- Maus S, Macmillan S, Chernova T, et al. 2005. The 10th generation international geomagnetic reference field. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 151(3-4): 320-322, doi: 10.1016/j.pepi.2005.03.006.
- Moen J, Brekke A. 1993. The solar flux influence on quiet time conductances in the auroral ionosphere. *Geophysical Research Letters*, 20(10): 971-974, doi: 10.1029/92GL02109.
- Ohtani S, Wing S, Merkin V G, et al. 2014. Solar cycle dependence of nightside field-aligned currents: Effects of dayside ionospheric conductivity on the solar wind-magnetosphere-ionosphere coupling. *Journal of Geophysical Research*, 119(1): 322-334, doi: 10.1002/2013JA019410.
- Papitashvili V O, Christiansen F, Neubert T. 2002. A new model of field-aligned currents derived from high-precision satellite magnetic field data. *Geophysical Research Letters*, 29(14): 28-1-28-4, doi: 10.1029/2001GL014207.
- Potemra T A, Zanetti L J, Erlandson R E, et al. 1987. Observations of large-scale Birkeland currents with Viking. *Geophysical Research Letters*, 14(4): 419-422, doi: 10.1029/GL014i004p00419.
- Richmond A D. 1995. Ionospheric electrodynamics using magnetic apex coordinates. *Journal of Geomagnetism and Geolectricity*, 47(2): 191-212, doi: 10.5636/jgg.47.191.
- Ridley A J, Richmond A D, Gombosi T I, et al. 2003. Ionospheric control of the magnetospheric configuration: Thermospheric neutral winds. *Journal of Geophysical Research*, 108(A8): 1328, doi: 10.1029/2002JA009464.
- Ridley A J, Gombosi T, DeZeeuw D L. 2004. Ionospheric control of the magnetosphere: conductance. *Annales Geophysicae*, 22: 567-584, doi: 10.5194/angeo-22-567-2004.
- Ridley A J, Deng Y, Tóth G. 2006. The global ionosphere-thermosphere model. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 68(8): 839-864, doi: 10.1016/j.jastp.2006.01.008.
- Ritter P, Lühr H, Viljanen A, et al. 2004. Ionospheric currents estimated simultaneously from CHAMP satellite and IMAGE ground-based magnetic field measurements: A statistical study at auroral latitudes. *Annales Geophysicae*, 22: 417-430, doi: 10.5194/angeo-22-417-2004.
- Ritter P, Lühr H. 2006. Curl-B technique applied to SWARM constellation for determining field-aligned currents. *Earth, Planets and Space*, 58(1): 463-476, doi: 10.1186/BF03351942.
- Ritter P, Lühr H, Rauberg J. 2013. Determining field-aligned currents with the SWARM constellation mission. *Earth, Planets and Space*, 65(1): 1285-1294, doi: 10.5047/eps.2013.09.006.
- Robinson R M. 1984. Kp dependence of auroral zone field-aligned current intensity. *Journal of Geophysical Research*, 89(A3): 1743-1748, doi: 10.1029/JA089iA03p01743.
- Russell C T, Fleishman M. 2002. Joint control of region-2 field-aligned currents by the east-west component of the interplanetary electric field and polar cap illumination. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 64(17): 1803-1808, doi: 10.1016/S1364-6826(02)00189-X.
- Russell C T, Wang Y L, Raeder J. 2003. Possible dipole tilt dependence of dayside magnetopause reconnection. *Geophysical Research Letters*, 30(18): 1937, doi: 10.1029/2003GL017725.
- Schlegel K. 1988. Auroral zone E-region conductivities during solar minimum derived from EISCAT data. *Annales Geophysicae*, 6: 129-137.
- Shen C S, Zi M Y, Gao Y F, et al. 1999. Geomagnetic responses to the convection field, field-aligned current and auroral electrojet. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 42(6): 725-731.
- Sofko G J, Greenwald R, Bristow W. 1995. Direct determination of large-scale magnetospheric field-aligned currents with SuperDARN. *Geophysical Research Letters*, 22(15): 2041-2044.
- Stauning P. 2002. Field-aligned ionospheric current systems observed from Magsat and Oersted satellites during northward IMF. *Geophysical Research Letters*, 29(15): 8005, doi: 10.1029/2001GL013961.
- Vennerstrom S, Moretto T, Rastätter L, et al. 2005. Field-aligned currents during northward interplanetary magnetic field: Morphology and causes. *Journal of Geophysical Research*, 110(A6): A06205, doi: 10.1029/2004JA010802.
- Vickrey J F, Livingston R C, Walker N B, et al. 1986. On the current-voltage relationship of the magnetospheric generator at intermediate spatial scales. *Geophysical Research Letters*, 13(6): 495-498, doi: 10.1029/GL013i006p00495.
- Wang H, Lühr H, Ma S Y. 2005. Solar zenith angle and merging electric field control of field-aligned currents: A statistical study of the Southern Hemisphere. *Journal of Geophysical Research*, 110(A3): A03306, doi: 10.1029/2004JA010530.
- Wang H, Lühr H, Ridley A, et al. 2008. Storm time dynamics of auroral electrojets: CHAMP observation and the Space Weather Modeling Framework comparison. *Annales Geophysicae*, 26: 555-570, doi: 10.5194/angeo-26-555-2008.

- Wang H, Lühr H, Shue J H, et al. 2014. Strong ionospheric field-aligned currents for radial interplanetary magnetic fields. *Journal of Geophysical Research*, 119(5): 3979-3995, doi: 10.1002/2014JA019951.
- Wang H, Ridley A J, Zhu J. 2015. Theoretical study of zonal differences of electron density at midlatitudes with GITM simulation. *Journal of Geophysical Research*, 120(4): 2951-2966, doi: 10.1002/2014JA020790.
- Wang H, Lühr H. 2016. Longitudinal variation in zonal winds at subauroral regions: Possible mechanisms. *Journal of Geophysical Research*, 121(1): 745-763, doi: 10.1002/2015JA022086.
- Wang H, Zhang J, Lühr H, et al. 2017. Longitudinal modulation of electron and mass densities at middle and auroral latitudes: Effect of geomagnetic field strength. *Journal of Geophysical Research*, 122(6): 6595-6610, doi: 10.1002/2016JA023829.
- Weimer D R. 2001. Maps of ionospheric field-aligned currents as a function of the interplanetary magnetic field derived from Dynamics Explorer 2 data. *Journal of Geophysical Research*, 106(A7): 12889-12902, doi: 10.1029/2000JA000295.
- Weimer D R. 2005. Improved ionospheric electrodynamic models and application to calculating Joule heating rates. *Journal of Geophysical Research*, 110(A5): A05306, doi: 10.1029/2004JA010884.
- Wilhelm J, Friis-Christensen E, Potemra T A. 1978. The relationship between ionospheric and field-aligned currents in the dayside cusp. *Journal of Geophysical Research*, 83(A12): 5586-5592, doi: 10.1029/JA083iA12p05586.
- Wiltberger M, Weigel R S, Lotko W, et al. 2009. Modeling seasonal variations of auroral particle precipitation in a global-scale magnetosphere-ionosphere simulation. *Journal of Geophysical Research*, 114(A1): A01204, doi: 10.1029/2008JA013108.
- Wiltberger M, Rigler E J, Merkin V, et al. 2017. Structure of high latitude currents in magnetosphere-ionosphere models. *Space Science Reviews*, 206(1-4): 575-598, doi: 10.1007/s11214-016-0271-2.
- Xiong C, Lühr H, Wang H, et al. 2014. Determining the boundaries of the auroral oval from CHAMP field-aligned current signatures - Part 1. *Annales Geophysicae*, 32(6): 609-622, doi: 10.5194/angeo-32-609-2014.
- Zhang J, Wang H, Zhang K D, et al. 2017. Statistical study of longitudinal variations of Hall currents at high latitudes: CHAMP observation. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 60(10): 3707-3717, doi: 10.6038/cjg20171002.
- Zhang S R, Foster J C, Holt J M, et al. 2012. Magnetic declination and zonal wind effects on longitudinal differences of ionospheric electron density at midlatitudes. *Journal of Geophysical Research*, 117(A8): A08329, doi: 10.1029/2012JA017954.
- Zmuda A J, Martin J H, Heuring F T. 1966. Transverse magnetic disturbances at 1100 kilometers in the auroral region. *Journal of Geophysical Research*, 71(21): 5033-5045, doi: 10.1029/JZ071i021p05033.

## 附中文参考文献

- 沈长寿, 资民筠, 高玉芬等. 1999. 对流电场、场向电流和极光区电流集流变化的地磁响应. *地球物理学报*, 42(6): 725-731.
- 张静, 王慧, 张科灯等. 2017. 极区 Hall 电流经度差异特征的统计学研究: CHAMP 卫星观测. *地球物理学报*, 60(10): 3707-3717, doi: 10.6038/cjg20171002.

(本文编辑 何燕)