

张钊, 张典钧, 刘文龙. 2025. 地球内磁层低纬大尺度电场研究进展[J]. 地球与行星物理论评 (中英文), 56(4): 372-387. doi: 10.19975/j.dqyxx.2024-061.

Zhang Z, Zhang D J, Liu W L. 2025. State studies of the large-scale electric fields in the low-latitude region of Earth's inner magnetosphere[J]. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 56(4): 372-387 (in Chinese). doi:10.19975/j.dqyxx.2024-061.

地球内磁层低纬大尺度电场研究进展

张 钊^{1,2}, 张典钧^{1,2*}, 刘文龙^{1,2}

1 北京航空航天大学 空间与地球科学学院, 北京 102206

2 北京航空航天大学 空间环境监测与信息处理工信部重点实验室, 北京 102206

摘要: 地球内磁层的大尺度电场由太阳风与地球磁场的相互作用产生. 在高纬区域, 平行电场起着更为重要的作用, 而在低纬地区, 电场则主要表现为共转电场、对流电场和脉冲电场. 本文着重讨论低纬区域大尺度电场的特征及其在内磁层中的作用, 这些电场共同作用于内磁层中的多种动力学过程. 共转电场和对流电场驱动的电场漂移分别引起地球磁层等离子体的共转运动和对流运动, 从而决定了等离子体层的形态及其动态演化; 而脉冲电场能加速内磁层的带电粒子, 并且导致高能粒子的向内注入. 近年来, 基于卫星观测的研究表明, 大尺度电场的分布受到地磁活动和太阳风条件的显著影响. 对流电场整体呈晨昏向, 但其在内磁层中的空间分布并不均匀. 在距离地球约 5 个地球半径 (R_E) 范围内, 对流电场受到明显屏蔽, 其屏蔽边界会随着 K_p 指数的增加逐渐向地球方向移动. 此外, 亚极光区极化流在距地球约 $4 R_E$ 的区域引起了强径向电场, 显著影响了磁地方时黄昏到午夜区域对流电场的分布. 磁暴主相期间以及行星际磁场南转后, 对流电场会显著增强, 但不同区域的电场增强幅度或响应时间存在差异. 共转电场基于等离子体层 24 小时的共转周期进行计算. 然而, 观测研究表明, 等离子体层存在共转滞后现象, 这意味着共转电场强度可能被高估. 在行星际激波事件中, 增强的动压会压缩磁层并激发脉冲电场. 脉冲电场在内磁层中的传播速度与快磁声波及行星际激波的传播速度密切相关, 其中快磁声波的速度决定了脉冲电场的初始响应时间, 而行星际激波的速度则与脉冲电场的峰值到达时间相对应. 本文回顾了近年来对流电场、共转电场和脉冲电场的研究进展, 并展望了内磁层大尺度电场研究中亟待解决的科学问题.

关键词: 内磁层; 大尺度电场; 共转电场; 对流电场; 脉冲电场

doi: 10.19975/j.dqyxx.2024-061

中图分类号: P353

文献标识码: A

State studies of the large-scale electric fields in the low-latitude region of Earth's inner magnetosphere

Zhang Zhao^{1,2}, Zhang Dianjun^{1,2*}, Liu Wenlong^{1,2}

1 School of Space and Earth Sciences, Beihang University, Beijing 102206, China

2 Key Laboratory of Space Environment Monitoring and Information Processing of MIIT, Beihang University, Beijing 102206, China

Abstract: The large-scale electric fields in Earth's inner magnetosphere are generated by the interaction between the solar wind and Earth's magnetic field. In high-latitude regions, parallel electric fields are dominant, while in low-latitude regions, the convection, corotation, and impulsive electric fields play a crucial role in the dynamics of the inner magnetosphere. This review examines the characteristics of large-scale electric fields in low-latitude regions and their effects on magnetospheric processes. The convection and corotation electric field, driving the plasma drift, determine the topology of the plasmasphere. The impulsive electric field, accelerating charged particles quickly, leads to the inward injection of energetic particles. Convection electric fields, driven by dayside

收稿日期: 2024-12-19; 录用日期: 2025-01-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (42304175, 42350710793)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 42304175, 42350710793)

第一作者: 张钊 (1995-), 男, 在读博士研究生, 主要从事内磁层大尺度电场的研究. E-mail: zhangzhao@buaa.edu.cn

*通信作者: 张典钧 (1994-), 男, 助理教授, 主要从事内磁层动力学的研究. E-mail: diandian@buaa.edu.cn



plasma flows from the magnetotail, exhibit a non-uniform spatial distribution. Recent satellite observations reveal that their distribution is influenced by geomagnetic and solar activity. Shielding effects limit the dawn-to-dusk electric field within approximately 5 Earth radii (R_E) during low geomagnetic activity (e.g., $K_p=1$), with the shielding boundary shifting inward as geomagnetic activity intensifies. Subauroral polarization streams are associated with intense radial electric fields at approximately $4 R_E$, significantly affecting the distribution of the convection electric field from dusk to midnight. Recent studies also show that the convection electric field distribution varies during different phases of magnetic storms, with electric fields penetrating deeper into the inner magnetosphere during the main phase, and shielding effects dominating during the recovery phase. During the magnetic storm's main phase, or after a southward turning of the interplanetary magnetic field, the dawn-to-dusk electric field is enhanced, with the amplitude and response time varying across different regions. Corotation electric fields arise from the plasma's rotational motion with Earth. However, observations indicate that the plasmasphere experiences a corotation lag, suggesting that corotation electric fields may be overestimated when based on the 24-hour corotation period of the plasmasphere. Recent studies have shown that this corotation lag may be linked to energy and momentum transfer processes in the ionosphere or thermosphere. The ionospheric dynamo mechanism, driving neutral winds toward the equator, plays a critical role in this corotation lag. Impulsive electric fields are transient phenomena triggered by interplanetary shocks or substorms. They play a crucial role in accelerating charged particles, leading to inward injections of energetic particles. SWMF simulations have provided insights into the spatiotemporal evolution of impulsive electric fields during interplanetary shock events. The propagation speed of impulsive electric fields is closely related to the propagation speeds of fast-mode waves and interplanetary shocks, which determine their initial response and peak arrival times. Despite significant advancements, challenges persist in accurately modeling shielding and penetration electric fields, understanding their global and synchronous response to interplanetary magnetic field variations, and distinguishing between different types of electric fields. Addressing these challenges is essential for advancing our understanding of the magnetosphere's dynamics and its interaction with the solar wind. This review summarizes recent advances in the study of convection, corotation, and impulsive electric fields, highlighting unresolved scientific questions and the need for further investigations in the inner magnetosphere.

Keywords: the inner magnetosphere; large-scale electric field; convection electric field; corotation electric field; impulse electric field

0 引 言

内磁层低纬的大尺度电场主要表现为对流电场、共转电场和脉冲电场. 对流电场源于从磁尾向太阳的等离子体对流, 其整体呈晨昏向 (由黎明指向黄昏), 典型强度为 $0\sim 1$ mV/m, 且随着 K_p 值的增加而增强 (Califf et al., 2014; Rowland and Wygant, 1998; Vasyliūnas, 2001). 共转电场源于电离层中等离子体随地球的共转, 在磁层中其驱动的电场漂移引起了等离子体层随地球共转. 在磁赤道平面上, 共转电场指向地心, 并且强度与距地球距离的平方成反比. 脉冲电场是地球磁场被压缩时感生的西向电场扰动, 多发生于行星际激波或亚暴时期, 强度可达数十毫伏每米 (Blake et al., 1992; Dai et al., 2015; Zhang et al., 2018).

这些大尺度电场的分布和演化受太阳风条件或

地磁活动的影响, 进而在控制等离子体层 (Goldstein et al., 2003, 2004; Stern, 1975; Thaller et al., 2015)、环电流 (Du et al., 2024; Thaller et al., 2015; Wygant et al., 1998; Zhuang et al., 2023) 和辐射带 (Califf et al., 2017; Li et al., 2024; Mei et al., 2023; Selesnick et al., 2016, 2019) 的动力学过程中起到重要作用. 对流电场与共转电场驱动的电场漂移分别引起了磁层等离子体向太阳的对流运动与绕地球的共转运动, 并决定了等离子体层的形态及其动态演化 (Goldstein et al., 2003, 2004). 随着距地球距离的增加, 共转电场强度逐渐减弱, 晨昏向对流电场驱动的对流运动逐步占据主导地位. 在共转与对流运动的分界线之外, 等离子体从日侧磁层顶流出, 密度较低; 而在分界线以内, 等离子体绕地球共转, 密度较高, 构成等离子体层. 当地磁活动增强时, 增强的对流电场会导致等离子体层向低 L

值 (L 为漂移壳参数) 区域收缩或侵蚀 (Borovsky and Denton, 2008; Goldstein et al., 2003; Li et al., 2022). 在磁暴时, 晨昏两侧会出现增强的晨昏向电场 (Nishimura et al., 2006), 并对这些区域的能量粒子的输运与加速起重要作用 (Ebihara et al., 2009; Thaller et al., 2015; Zhao et al., 2017). 脉冲电场由于幅度较大, 可以在短时间内加速高能粒子, 进而改变其局部阿尔文层的形态, 使原本处于开放漂移路径上的粒子向内注入至内磁层的封闭漂移轨道上 (Gabrielse et al., 2012, 2016), 并通过波粒相互作用进一步改变能量 (Li et al., 2005, 2020; 李莉等, 2022; Liu et al., 2013, 2016; Su et al., 2011; Thorne, 2010; Tong et al., 2024; Yan et al., 2023). 被注入到内磁层的高能电子可能会对空间中航天器的安全运行产生威胁, 因此, 为保障人类的各类空间活动的安全, 也为了更好地理解内磁层的动力学过程, 对内磁层大尺度电场的研究显得至关重要.

为了研究内磁层大尺度电场, 研究人员已利用卫星对磁层中的电场进行了多年的探测. 目前常用的空间电场探测技术是双探针式和电子漂移式. 双探针式电场仪在探测器旋臂末端安装有两个探针, 通过测量一对探针之间的电势差来计算沿探针连线方向的当地电场 (Bonnell et al., 2008; Gustafsson et al., 1997; Huang et al., 2018; Lindqvist et al., 2016; Wygant et al., 1992, 2013). 电子漂移式电场仪则通过测量在电磁场作用下粒子的漂移轨迹来反演电场 (Paschmann et al., 1997, 1998; Torbert et al., 2016). 双探针式和电子漂移式电场仪使用时都有一定的局限性 (Eriksson et al., 2006). 前者可能受航天器周围等离子体效应的影响, 如尾流效应 (André et al., 2021) 和光电子效应 (Pedersen et al., 1998), 后者不受航天器-等离子体相互作用的干扰, 但仅限于测量垂直于背景磁场方向的电场. 鉴于上述缺陷, 以及卫星平台的覆盖范围有限, 为辅助探测数据分析, 人们也建立了多个模拟太阳风、磁层和电离层动力学过程的模型 (Colella and Woodward, 1984; Hu et al., 2007; Jordanova et al., 2023; Matsui et al., 2008, 2013; Tóth et al., 2005; Yu and Ridley, 2009; Yu et al., 2017), 并用于大尺度电场演化研究 (Dai et al., 2024; Zhang et al., 2022; Zhu et al., 2024).

基于卫星探测与模型模拟的数据, 大量研究揭示了内磁层大尺度电场的分布和演化特征. 本文将内磁层大尺度电场划分为三类: 对流电场、共转电

场和脉冲电场, 分别回顾了每类电场的研究成果和重要进展. 最后, 展望了地球内磁层大尺度电场研究的未来方向.

1 对流电场

太阳风-磁层发电机机制使磁层顶晨侧的电势比昏侧高约几十千伏, 从而在磁层顶与极盖区电离层之间形成电流. 由于沿磁力线的等离子体电导率近似为无穷大, 晨昏两侧磁层顶的电位差主要负载于极盖区电离层, 在极区电离层中产生晨昏方向的电场. 该电场对应于磁层中从磁尾向地球的等离子体对流, 也被称为对流电场 (涂传诒等, 2022). 太阳风和磁层活动均会影响磁层对流, 并改变对流电场的大小和分布.

1.1 大尺度晨昏向电场的分布统计

通过对卫星观测数据的统计分析, 研究人员对大尺度晨昏向电场的空间分布特性进行了探讨. 由于对流电场主要呈晨昏向分布, 这些研究对理解对流电场的特性具有重要意义. 在利用卫星探测数据研究对流电场时, 首先需要去除共转电场的影响. 共转电场通常通过结合当地磁场测量值、位置和地球自转速率进行估计. 关于共转电场的估计方法, 第 2 节将进行详细讨论. 图 1a-1c 展示了联合释放和辐射效应卫星 (CRRES) 在 1991 年 1 月至 10 月期间, 不同地磁活动水平 (K_p 分别为 0 至 3-, 3 至 6-和 6 至 9-) 下观测到的去除了共转电场影响后的晨昏向电场的空间分布 (Rowland and Wygant, 1998). 电场探测数据的 L 值范围为 $L=2.5$ 至 $L=8.5$, 磁地方时 (MLT) 范围为 $MLT=12$ 到 $MLT=4$. 统计结果显示, 随着 K_p 指数从 0 升至 9-, 晨昏向电场的强度由 0.05 mV/m 增至 1.5 mV/m , 且由于受到屏蔽效应影响 (Jaggi and Wolf, 1973), 电场强度在地球周围一定范围内被削弱. 该屏蔽范围的边界约从 $L=5.0$ 开始, 并随着 K_p 的增加向地球方向移动. 此外, 在中高地磁活动水平 ($K_p \geq 3$) 下, 电场强度并未随着 L 减小而呈单调下降的趋势. 如图 1b、1c 所示, 位于昏侧的电场在 $L=3.5$ 至 $L=6$ 之间出现极大值, 且随地磁活动更剧烈, 电场强度不断增强. Califf 等 (2014) 使用亚暴事件历史及宏观相互作用卫星 (THEMIS) 在 2009 年至 2012 年间的测量数据, 首次得到了覆盖内磁层全部磁地方时的晨昏向电场分布 (已去除共转电

场), 如图 1d-1f 所示. THEMIS 在昏侧的电场分布结果与 CRRES 高度一致: 在中等地磁活动水平 ($3 \leq K_p < 6$) 下, $L=4$ 附近存在一个电场的极大值; 而在地磁活动剧烈 ($K_p \geq 6$) 时, 电场极大值的位置则向 $L=3$ 以内移动. 此外, 在晨侧 $L=4$ 附近, 电场也存在一个极大值, 但其强度仅约为昏侧的一

半. CRRES 和 THEMIS 的观测结果与 Volland-Stern (VS) 模型 (Stern, 1977; Volland, 1973) 描述的对流电场有所不同, 后者描述的晨昏向电场在地球附近被部分屏蔽, 并且在 $L=4$ 附近没有局部的电场增强.

对卫星探测数据的统计研究揭示了大尺度晨昏

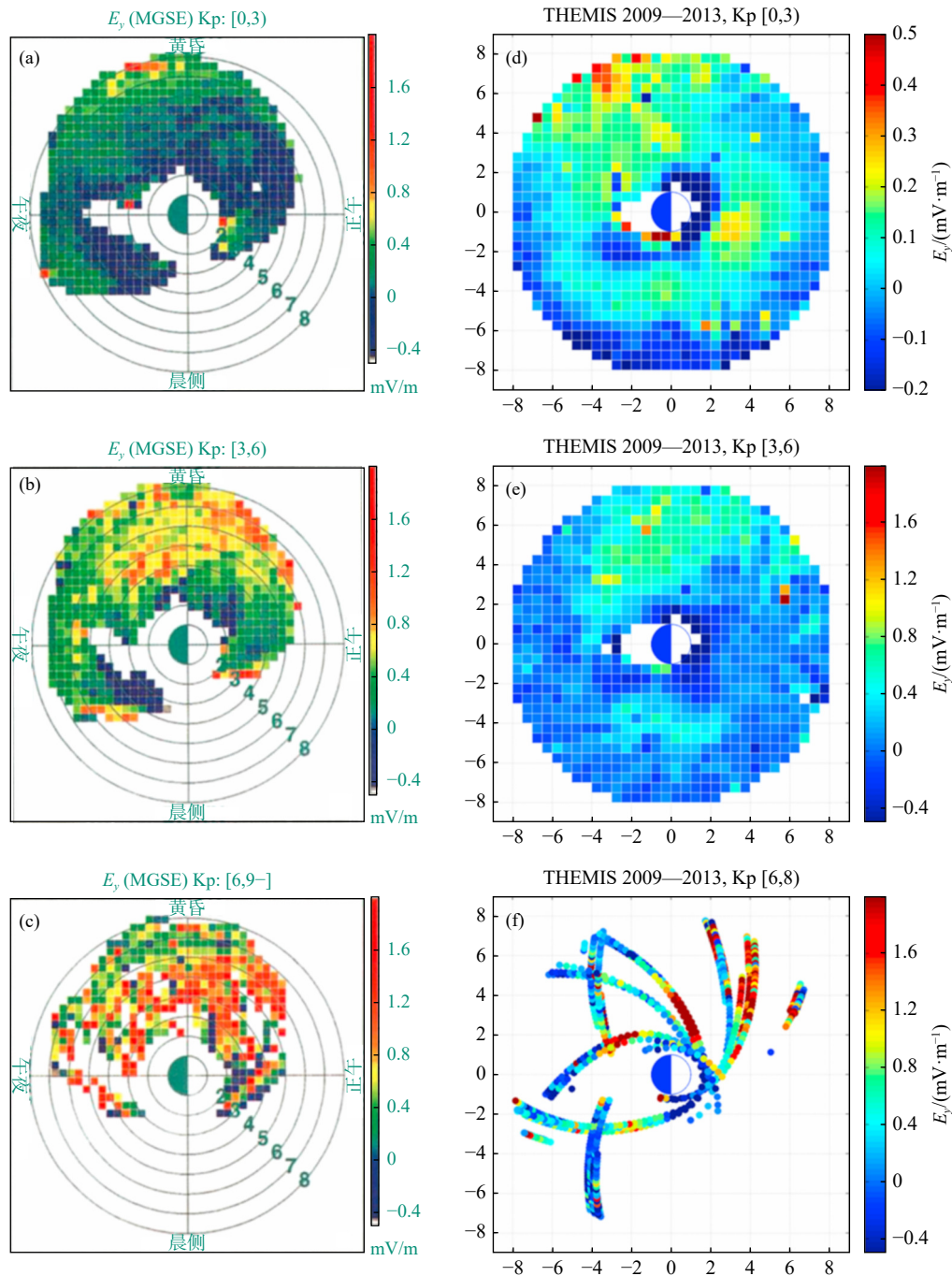


图 1 在不同地磁活动水平下旋转坐标系中的晨昏向电场 (E_y) 分布。(a-c) 图数据来源于 CRRES (Rowland and Wygant, 1998); (d-f) 图数据来源于 THEMIS (Califf et al., 2014)。右图与左图的 MLT 方位一致, 太阳位于图像的右侧, 昏侧位于图像的上方, 横纵坐标的单位为 R_E (引自 Califf et al., 2014)

Fig. 1 Synoptic maps of the dawn-dusk electric field (E_y) in the frame corotating with Earth observed by (a-c) CRRES (Rowland and Wygant, 1998) and (d-f) THEMIS (Califf et al., 2014) for varying levels of geomagnetic activity. The right panel has the same MLT orientation as the left panel, with the Sun on the right side, the dusk side at the top, and the units of the axes in R_E (from Califf et al., 2014)

向电场的分布特征. 在地磁活动水平较低时, 内磁层的晨昏向电场在屏蔽效应作用下被削弱; 在地磁活动较为活跃时, 电场强度更高, 且会在距地球 3 至 6 个地球半径的区域表现出极大值. 这些大尺度电场分布特征基本反映了对流电场的空间分布特性, 但也同时表明除了屏蔽机制外, 还存在其他物理机制影响内磁层的电场分布. Califf 等 (2014) 指出, 黄昏到午夜地方时区域的电场分布可能与亚极光区极化流 (SAPS) 有关 (Foster and Burke, 2002). 关于屏蔽机制和 SAPS 的相关研究将在接下来的 1.2 和 1.3 节中进行详细讨论.

1.2 电场屏蔽

电场屏蔽是一种由等离子体片内边界电荷积累引起的效应, 其主要表现为对内磁层中对流电场晨昏向分量的削弱. 当等离子体片中的热等离子体向地球进行对流运动时, 由地球非均匀磁场引起的梯度漂移逐渐占据主导地位, 从而导致质子与电子分别向昏侧和晨侧漂移. 在梯度漂移与电场漂移的共同作用下, 这些热质子和电子将沿着两种漂移路径移动, 分别是环绕地球的闭合路径和从磁尾至日侧磁层顶的开放路径. 这两种漂移路径的分界面被称为阿尔文层. 如图 2 所示, 在背景为叠加均匀对流电场、共转电场的偶极子磁场时, 6 keV 的质子与 2 keV 的电子的漂移路径分别用细红线和细蓝线表示; 粗红线和粗蓝线分别表示质子与电子的阿尔文层; 天蓝色与粉红色区域分别表示由于电荷分离导致的负粒子与正粒子聚集的区域. 这样的电荷分布形成了一个昏晨向 (由黄昏指向黎明) 的屏蔽电场 (Wolf et al., 2007), 该电场与对流电场方向相反, 使得内磁层中的电场被屏蔽 (Jaggi and Wolf, 1973).

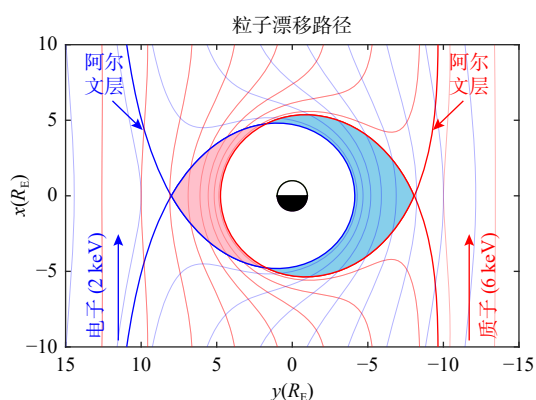


图 2 从北半球观察的阿尔文层形成示意图 (引自 Gao et al., 2024)

Fig. 2 Illustration of the formation of the Alfvén layer viewed from the Northern Hemisphere (from Gao et al., 2024)

直到 MMS 卫星升空以前, 几乎没有手段可以对内磁层中的电荷密度进行原位探测, 从而验证屏蔽机制. Gao 等 (2024) 利用高斯定律和 MMS 在地球内磁层的四点电场测量数据, 获取了空间电荷密度在磁层中的分布. MMS 在 2015—2018 年测量的数据表明, 内磁层中的正 (负) 电荷分别聚集在昏 (晨) 侧, 且电荷量随 L 值的增加而减少. 同时, 阿尔文层中的电荷分布表现出明显的晨昏不对称性, 昏侧的正电荷密度远大于晨侧的负电荷密度. 这项研究通过卫星观测到的电荷和电场分布, 确认了阿尔文层内电荷分离现象的存在, 并验证了屏蔽机制的发生.

由于电荷积累需要时间, 对流电场与屏蔽电场不能时刻保持平衡. 变化的地磁条件使得内磁层中的电场很难被完全屏蔽 (Wei et al., 2010). 当对流电场大于屏蔽电场时, 称为“欠屏蔽”状态; 反之, 则为“过屏蔽”状态. Nishida (1968) 通过比较地面台站监测到的磁扰动与行星际磁场 (IMF) 南北分量的变化, 发现行星际电场可以穿透到磁层并深入到赤道电离层. 这种“欠屏蔽”的电场被称为穿透电场, 可能会使高能电子注入到低 L 值区域 (Su et al., 2016). Kelley 等 (1979) 发现, 当 IMF 从稳定的南向突然转为北向时, 内磁层通常会出现昏晨向电场, 这一状态对应于“过屏蔽”状态. Wygant 等 (1998) 借助 CRRES 探测数据, 首次得到了磁暴恢复相期间环电流内边界地球侧对流电场被系统性屏蔽的观测证据, 并多次于午夜侧 $L=2$ 至 $L=4$ 的区域观测到对应于“过屏蔽”状态的昏晨向电场. 他们将“过屏蔽”的原因解释为, 当晨昏向对流电场迅速减小时, 由极化电荷积累而产生的屏蔽电场变化较慢, 在两个电场达到平衡之前, 屏蔽电场的强度大于对流电场, 因而表现为昏晨向电场. Wei 等 (2015) 提供了穿透与屏蔽电场观测和特征的全面概述, 并总结了之前研究的结果.

1.3 亚极光区极化流

亚极光区极化流 (SAPS) 作为电离层-磁层耦合过程中的重要现象之一, 是电离层里纬度分布范围狭窄 ($<5^\circ$) 的快速西向等离子体漂移带, 其漂移速度在电离层中可达上千米每秒 (Foster and Burke, 2002). SAPS 与 2 区 (Region 2, R2) 场向电流密切相关 (Anderson et al., 2001). 在亚暴和磁暴期间, 等离子体片内边界区域的粒子压力梯度产生了从黄昏 (黎明) 流入 (流出) 电离层的 R2 场

向电流. 在午夜前, 质子沉降区位于电子沉降区的赤道侧, 而 R2 场向电流流入电离层的位置与质子沉降区一致. 这使得 R2 场向电流通过 Pedersen 电流与更高纬度流出电离层的 1 区 (Region 1, R1) 场向电流闭合时, 需要流经电子沉降区赤道侧电导率较低的区域, 从而产生强极向电场, 并驱动等离子体的快速向西漂移. 该电场通过磁力线映射至磁层赤道面, 形成强径向电场, 并影响内磁层中粒子的动力学过程. Califf 等 (2016) 通过分析 2013 年 6 月 29 日磁暴期间的观测数据, 发现在磁层赤道面中强径向电场分布区域的内外边界分别与质子和电子的等离子体片内边界位置相对应, 从而证实该电场与 SAPS 的耦合关系, 并为上述 SAPS 的产生机制提供了观测证据.

研究人员对 SAPS 的分布已经进行了多年的研究. Foster 和 Vo (2002) 基于 Millstone Hill 非相干散射雷达数据, 对 1979—2000 年间的 SAPS 事件进行了统计分析. 统计结果显示, SAPS 主要发生在 $K_p > 4$ 时的夜侧区域, 且在相同地磁活动水平范围内, 随着磁地方时从黎明逐渐向黄昏侧移动, SAPS 更倾向于发生在不变纬度更高的区域. Kunduri 等 (2017) 利用 SuperDARN 雷达 2011—2014 年间的观测数据对 SAPS 事件进行了进一步的统计. 统计结果显示, 在地磁活动水平较低时 ($-10 \text{ nT} < \text{Dst} < 10 \text{ nT}$), SAPS 的发生概率为 15%, 且通常发生在午夜时分、磁纬度高于 60° 的区域; 在中等磁扰动的条件下 ($-75 \text{ nT} < \text{Dst} < -50 \text{ nT}$), SAPS 的发生概率为 87%, 并倾向于发生在 $\text{MLT}=20$ 、磁纬度低于 60° 的区域. 基于对 SAPS 的观测研究和统计分析, 研究者们已经建立了多个 SAPS 模型, 用于研究内磁层动力学过程 (Goldstein et al., 2005; Kunduri et al., 2018; Yu et al., 2015).

在磁层赤道面上与 SAPS 耦合的强径向电场, 显著影响了内磁层粒子的动力学特性. Lejosne 和 Mozer (2017) 利用范艾伦探测器 (VAP) 的数据, 对数百个 SAPS 事件中等离子体的电场漂移速度进行了统计分析. 如图 3 所示, 叉和方块分别表示由 VAP-A 和 VPA-B 在赤道平面测得的数据计算的漂移速度, 正值代表向东, 负值代表向西, 点的不同颜色代表其所处的不同 L 值. 从图 3 中可以看到, 在 SAPS 期间, 方位角方向向西的电场漂移速度可达数十公里每秒. 由于该速度与在 $L=4$ 处 100 s keV 粒子漂移速度相近, 这意味着 SAPS 引起的磁层强电场可能对这些能量粒子的漂移轨迹产生一定的影

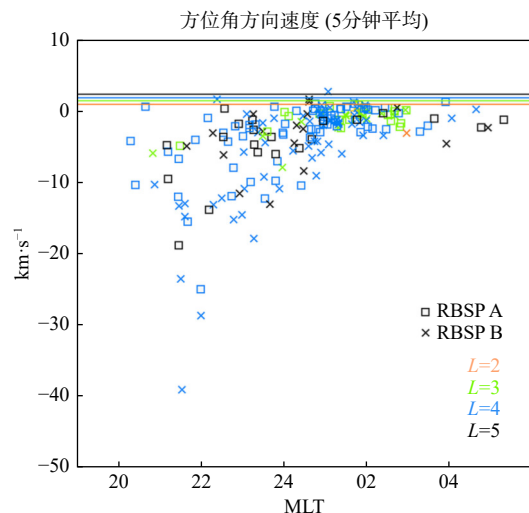


图 3 在 SAPS 事件期间, 在不同磁地方时 (MLT) 的电场漂移速度方位角分量的 5 分钟平均值 (引自 Lejosne and Mozer, 2017)

Fig. 3 The 5 min average of the azimuthal component of the electric drift during the SAPS events as a function of magnetic local time (MLT) (from Lejosne and Mozer, 2017)

响. Califf 等 (2022) 在三个中等或强烈地磁活动事件中发现, 100 s keV 的电子会在 SAPS 区域附近径向向内注入, 并在低 L 值 ($L < 4$) 区域被捕获; 而 50~100 keV 的质子也会被短暂地向内输运, 但无法在低 L 值区域持续存在. 在叠加 SAPS 电场模型 (Goldstein et al., 2005) 与 VS 对流电场模型后, 模拟出的电子与质子漂移路径与观测结果相一致. Goyal 等 (2024) 对 2015 年 9 月 7 日磁暴期间观测到的 10~100 keV 电子注入内磁层 $L^* < 4$ 区域的事件进行了进一步的研究. 他们对 SAPS 电场模型 (Goldstein et al., 2005) 进行了改进, 并叠加了 VS 对流电场模型, 成功模拟了 10~20 MeV/G 电子在 2.5 小时内输运到了 L^* 约为 2.7 的区域的过程. Califf 等 (2022) 与 Goyal 等 (2024) 的研究验证了 SAPS 电场对内磁层中 100 s keV 粒子动力学的作用.

在对内磁层能量粒子的动力学过程进行模拟时, 研究人员也注意到内磁层电场模型尚不完善. Goyal 等 (2024) 的研究未能完全再现 30 MeV/G 电子的向内注入, 这可能是由于 VS 对流电场模型在该区域估计的电场偏小所致. Su 等 (2016) 在模拟一个电子注入事件时发现, 借助现有的内磁层电场模型, 如 E5D (McIlwain, 1986)、VS (Gussenhoven et al., 1981, 1983; Maynard and Chen, 1975) 和 IMEF (Matsui et al., 2008, 2013) 无法复现观测结果. 为使电子能够注入到实际观测区域, 还需在

低 L 值区域设置一个强穿透电场. 然而, 由于穿透或屏蔽电场在屏蔽效应下动态变化, 现有的电场模型很难对其准确估计. 为了完善现有电场模型并更好地解释内磁层中粒子的动力学过程, 进一步研究内磁层大尺度电场对磁层活动及太阳风的响应至关重要.

1.4 对流电场对磁层活动及太阳风的响应

太阳风作为驱动磁层对流的能量输入源, 其变化会扰动磁层, 诱发磁暴、亚暴等磁层活动, 并影响对流电场的强度和分布. Lv 和 Liu (2018) 利用 MMS 观测数据研究了内磁层对流电场的特性, 并探讨了其与地磁指数及太阳风参数的关系. 其数据覆盖了 2015 年 9 月 1 日至 2016 年 10 月 31 日的时间段, L 值范围从 5 到 8, 并几乎涵盖了所有地方时. 图 4a-4c 分别展示了统计的对流电场与 AE、Kp 和 SYM-H 的相关性. 观测结果表明, 在数据覆盖范围内, 对流电场的变化范围在 $-0.4 \sim 0.8$ mV/m 之间, 并与 AE、Kp、太阳风电场以及 IMF B_z 分

量呈强相关性. 值得注意的是在 SYM-H < 0 时, 对流电场与该参数呈负相关性, 这意味着磁暴越剧烈时对流电场的强度越大.

在磁暴不同阶段, 内磁层大尺度电场会展现不同的分布特征. Wygant 等 (1998) 利用 CRRES 卫星对 1991 年 3 月 24 日磁暴事件中的大尺度对流电场进行了研究. 研究发现, 在磁暴的主相阶段, 对流电场会穿透到更靠近地球的区域, 并在 $L=2$ 至 $L=4$ 之间强度达到峰值 (约 6 mV/m); 在磁暴恢复相期间, 环电流内边界地球侧的对流电场经常被屏蔽, 有时甚至会出现反向 (昏晨向) 电场. Nishimura 等 (2006) 对 1989—1995 年间磁暴不同阶段的内磁层电场的分布进行了统计. 在磁暴主相阶段, 大尺度电场强度会在晨侧和昏侧的 $L=2$ 到 $L=6$ 之间增强到 $2 \sim 4$ mV/m, 强度峰值出现在昏侧 $L=3$ 的位置, 并且该位置随着 SYM-H 指数的降低而向地球靠近. 在磁暴恢复相, 强电场区域向远离地球的方向移动了约 1 个 R_E , 且电场强度减弱到 $1 \sim 1.5$ mV/m 之间, 而这与 CRRES (Rowland and Wygant, 1998) 和 THEMIS (Califf et al., 2014) 在中等地磁活动水平下的统计结果一致. 该研究表明, 尽管在相近的 SYM-H 水平 (SYM-H < -40 nT), 在磁暴主相与恢复相期间内磁层中电场的分布也存在较大差异. 虽然研究已经表明在磁暴主相对流电场会在局部区域显著增强, 但是由于磁暴发生时常伴随着行星际磁场的变化, 所以需要进一步分析行星际磁场的变化是否对对流电场的增强起到作用.

许多研究已经表明, 行星际磁场会对太阳风到磁层的能量传输效率以及对流电场的演化产生影响 (Burke et al., 1999; Liemohn et al., 2002). Dungey (1961) 描述了一个通过日侧磁层顶和磁尾的磁重联将太阳风的能量和等离子体输运至地球磁层的过程 (Burch and Phan, 2016; Cao et al., 2008, 2013; Fu et al., 2013, 2019; Vasyliūnas, 2001). 对流电场由进行对流运动的等离子体流产生, 其对行星际磁场的响应是研究太阳风与地球磁层间能量与动量输运过程的重要媒介. Nishimura 等 (2009) 利用 CRRES 和 Akebono 卫星的电场测量数据, 对 1991 年 161 次行星际磁场变化事件中对流电场的响应情况进行了统计研究. 统计结果如图 5a 所示, 当 IMF 南转或北转后, 在 80% 的事件中电子等离子体片内边界地球侧的对流电场会在 5 min 内做出响应. Dai 等 (2024) 模拟了 2013 年 3 月 11 日的强太阳风事件中磁层对流的响应过程. 研究中, 他们发现磁层对

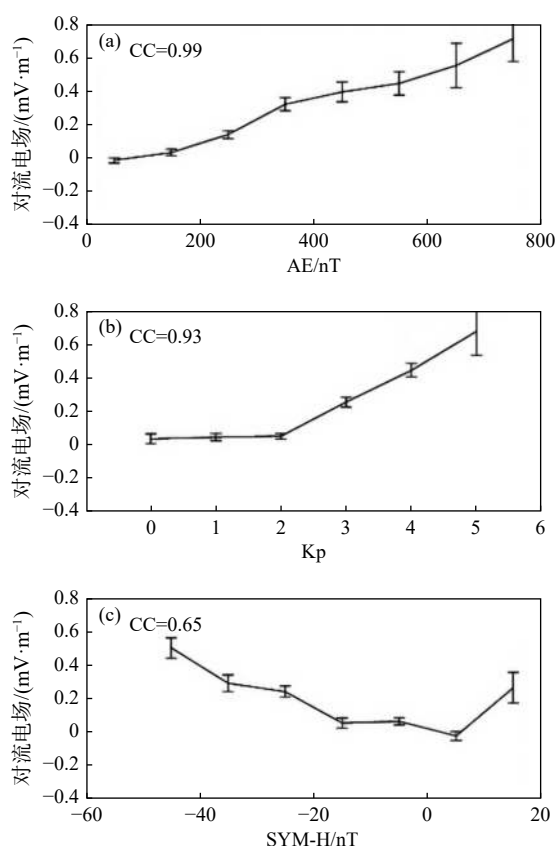


图 4 对流电场和地磁指数 AE、Kp 以及 SYM-H 的相关性 (引自 Lv and Liu, 2018)

Fig. 4 Correlation between the convection electric field and geomagnetic indices. (a) AE; (b) Kp; (c) SYM-H (from Lv and Liu, 2018)

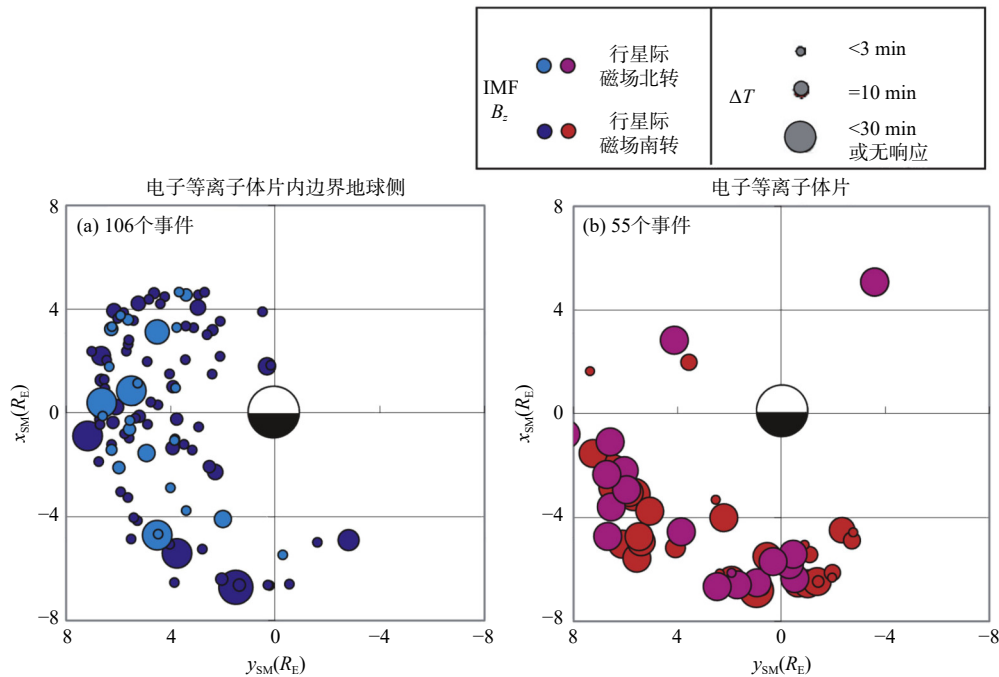


图 5 在磁层中的不同位置, 对流电场对行星际磁场变化的响应时间. (a) 位于电子等离子体片的地球侧; (b) 位于电子等离子体片中. 圆圈的半径与响应时间成正比. 南向和北向转向的情况通过不同的颜色表示 (引自 Nishimura et al., 2009)

Fig. 5 The response time of convection electric fields to interplanetary magnetic field variations at different locations in the magnetosphere. (a) Earthward of the electron plasma sheet, and (b) within the electron plasma sheet. The radii of the circles are proportional to the response time. Cases of southward and northward turning are shown in different colors (from Nishimura et al., 2009)

流、R1 和 R2 场向电流在行星际磁场南转后增强, 并在 10~20 min 内从地球的日侧发展至夜侧. 相比 Dungey 循环约 3 小时的时间尺度 (王勇等, 2023; Zhang et al., 2015), 上述研究中磁层对流对行星际磁场南转的响应时间更短, 可能由发生于日侧磁层顶的磁重联直接驱动.

关于磁层对太阳风或地磁活动的响应, 仍然存在一些科学问题值得进一步探讨. 通常在研究中使用的太阳风参数源于 L1 点的测量, 然而这些参数从 L1 点传播至近地空间时是否发生变化还需要进一步研究 (Dai et al., 2023; Zhang et al., 2022). 此外, 电离层对太阳风或地磁活动响应的研究已经取得了显著的成果 (Dods et al., 2017; Fiori et al., 2012; Lu et al., 2002). 然而, 关于在行星际磁场南转后, 电离层中对流响应是否全球同步仍存在争议 (Lockwood and Cowley, 1999; Ridley et al., 1998). 这一争议为磁层中对流电场响应的研究提供了方向和动力. Nishimura 等 (2009) 发现在 80% 的行星际磁场转向事件中电子等离子体片内边界地球侧的对流电场会在 5 min 内进行响应, 这意味着磁层对流的增强可能是对行星际磁场变化的全球同步响应. 然而, 由于 CREES 轨道的限制, 所统计的事件

大多数位于子午线的黄昏一侧. 昏侧的局地电场 (例如 SAPS 引起的电场) 是否会对响应时间的统计结果产生影响仍需进一步研究.

2 共转电场

大气中的中性粒子由于黏性作用与地球共转, 并将动量传递给电离层中的等离子体 (Maus, 2017). 由于这些等离子体的速度方向与磁场垂直, 因此在相对太阳静止的地球惯性参考系中, 可以观测到一个由高纬度指向低纬度的电场, 该电场即为共转电场 (E_{coro}), 其计算公式为 $E_{\text{coro}} = -\mathbf{V} \times \mathbf{B}$. 共转电场通过磁力线映射至磁层, 并驱动等离子体层中的冷等离子体自西向东漂移. 在假设地球磁场为偶极子磁场、磁力线是等电势线, 且磁轴与地球自转轴重合的情况下, 共转电场可用公式 $E_{\text{coro}} = -\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r} \times \mathbf{B}$ 来计算, 其中 $\boldsymbol{\omega}$ 是角速度向量, $\mathbf{B}$ 是位置 $\mathbf{r}$ 处的磁场向量 (Hones and Bergeson, 1965).

通常认为, 等离子层以 $7.27 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$ 的角速度随地球旋转, 即旋转周期为 24 小时, 然而许多研究表明等离子体层的旋转速度慢于地球的自转速度 (Breneman et al., 2022; Burch et al., 2004; Galvan

et al., 2010; Hill, 1979; Huang et al., 2011; Lejosne and Mozer, 2016, 2018; Lejosne et al., 2021; Marchaudon and Blelly, 2020; Sandel et al., 2003). 这意味着, 在使用 24 小时的等离子体层旋转周期来计算共转电场时, 可能会高估共转电场的强度. 通过借助磁层顶-极光全球探测成像卫星 (IMAGE) 的极紫外成像仪 (EUV) 提供的等离子体层中 He^+ 分布的全球图像, Sandel 等 (2001) 发现等离子体层内存在低密度区域 (后被称为等离子体槽), 这些区域随等离子体层一起旋转. Sandel 等 (2003) 通过追踪等离子体槽的位置变化, 测量了等离子体的旋转速度. 研究表明, 在 $L=2$ 到 $L=4$ 区域, 等离子体层的旋转速度通常为地球自转速度的 85% 到 90%. Burch 等 (2004) 通过 EUV 成像技术追踪了一个持续时间超过 55 小时的等离子体槽 (2001 年 4 月 6 日至 8 日), 并对比了等离子体槽的移动速度与相同经度上电离层中等离子体漂移速度. 结果显示, 等离子体槽的速度与电离层中等离子体的速度相近, 且比地球自转速度慢约 10%. 基于 VAP 和 Arecibo 非相干散射雷达的测量, Lejosne 和 Mozer (2016) 计算了 $L=1.43$ 磁力线上的等离子体漂移速度, 并同样发现等离子体在方位角方向的漂移速度相较于地球自转速度滞后约 10%.

等离子体层的旋转速度将会根据地磁活动以及其所处的 MLT 与 L 值等因素发生变化. Galvan 等 (2010) 对等离子体层旋转速度与多种地磁和极光指数进行相关性分析. 结果表明, 在 $L=2.5$ 处, 等离子体的旋转速度与地磁和极光指数之间存在显著的相关性, 其中较低的旋转速度对应于较高的地磁和极光活动. 然而, 他们也指出, 在 $L=3.5$ 处, 这种相关性并不明显. 此外, 研究还发现, 等离子体层在不同 L 值处的平均速度为地球自转速度的 88% 到 95% 不等, 且在昏侧的旋转速度较晨侧慢, 这一效应在 $L=3.5$ 处比在 $L=2.5$ 处更明显. Huang 等 (2011) 报告了一起发生于 2001 年 6 月 22 日持续时间超过 20 小时的大型等离子体槽事件, 其中等离子体槽的径向尺寸超过了 $1.5 R_E$, 因此他们能够追踪在不同 L 值处等离子体层相对地球自转的速度. 观测结果显示, 在黄昏侧, 随着 L 值从 2.25 增加到 3.0, 共转系数 (即等离子体层与地球的旋转速度之比) 从 0.88 下降到 0.72; 而在黎明侧, 随着 L 值增加, 共转系数从 0.96 增加到 1.05. Lejosne 和 Mozer (2018) 利用 VAP 卫星超过两年的电场和磁场数据, 研究了地磁活动对 $L<3$ 区域内等离子

体漂移速度的影响. 他们发现等离子体在方位角方向的漂移速度有以下几个特征: (1) K_p 的增加将会导致漂移速度减小; (2) 随 L 值从 1.2 增加到 3.0, 漂移速度随 K_p 增强而减小的幅度逐渐增大; (3) 漂移速度随 K_p 增强而减速最明显区域的 MLT 随 L 的增加逐渐向昏侧移动. Zhang Z 等 (2024) 从 VAP 卫星 2012—2018 年的 EFW 电场数据中提取出共转电场, 并计算了共转系数. 由于共转电场在磁赤道平面内指向地心, 其晨昏向分量的大小沿 MLT 的变化可以用正弦函数来表示. 因此, 用随 MLT 正弦变化的函数对地球惯性参考系下的晨昏向电场的统计测量值进行拟合, 便可提取出正弦分量, 即共转电场分量. 如图 6a-6c 所示, 红线代表他们提取出的共转电场, 蓝线代表以 24 小时自转周期计算的共转电场 ($E_{\text{cor}_24\text{h}}$). 通过对比这两种共转电场 ($E_c/E_{\text{cor}_24\text{h}}$), 他们得到了不同 K_p 值下的共转系数. 图 6d-6f 中, 红线代表随 L 值变化的共转系数, 黑线表示 $L=2$ 至 $L=4$ 范围内共转系数的平均值. 当 K_p 从 0 增加到 4 时, 共转系数的平均值逐渐下降, 这意味着离子体层旋转速度逐渐减慢.

等离子体层与地球自转速度的差异可能与电离层或热层中能量与动量传输过程相关. Burch 等 (2004) 基于 Blanc 和 Richmond (1980) 提出的电离层发电机机制, 解释了等离子体层旋转滞后现象. 磁层或太阳风通过粒子沉降和焦耳加热向极光区电离层输入能量, 驱动热层中向赤道方向的风. 当中性分子与等离子体被带入旋转半径逐渐增大的低纬度区域时, 这些粒子仍保留高纬度地区较低的线速度. 类似于科里奥利力对赤道向风的作用, 这一过程导致电离层中等离子体的旋转速度滞后于地球自转速度. Lejosne 和 Mozer (2018) 发现 $L<3$ 区域中等离子体漂移速度的分布与 Xiong 等 (2015) 研究的热层扰动风的分布存在相似性. Xiong 等 (2015) 基于 2001—2005 年的 CHAMP 观测数据, 分析了磁扰动期间热层扰动风的全球特性, 发现热层扰动风峰值所在的 MLT 位置随纬度降低逐渐向昏侧移动. 这一现象与等离子体层共转滞后效应最显著区域的 L 值随 MLT 向昏侧移动而减小的趋势一致 (Lejosne and Mozer, 2018). 然而, 电离层发电机机制可能并非导致等离子体层共转滞后的唯一原因. Galvan 等 (2010) 发现共转滞后系数, 与 K_p 和 Dst 指数存在相关性, 这意味着磁层电势在晨昏方向的分布可能是等离子体层旋转速度变化的

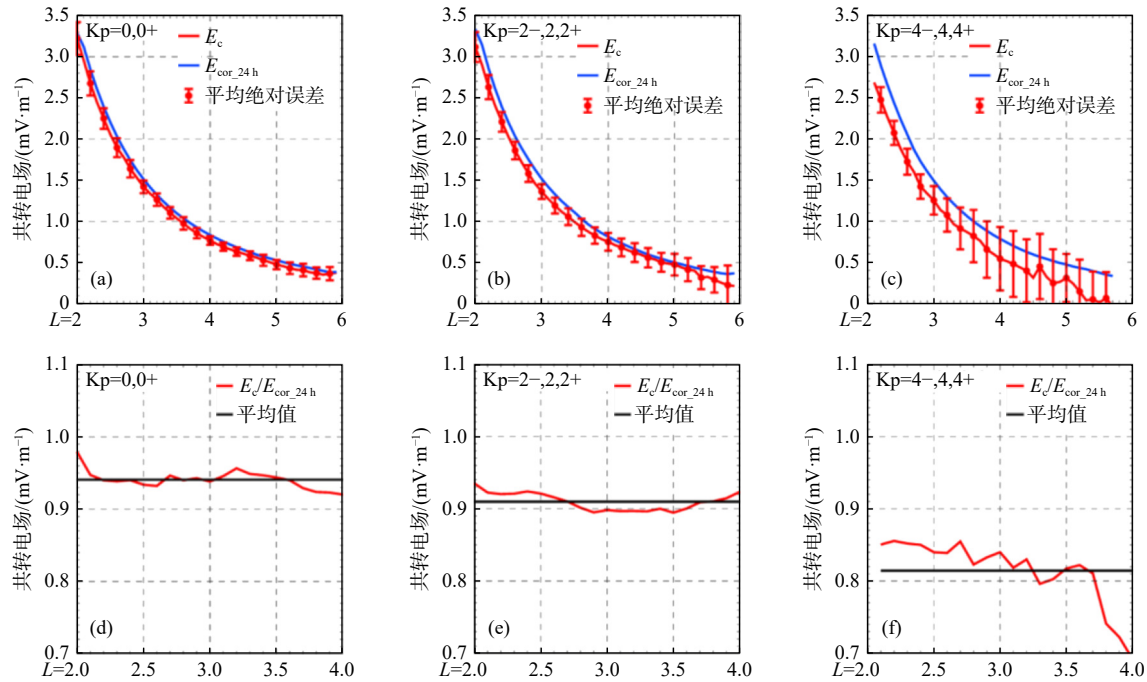


图 6 (a-c) 分别绘制了在不同 Kp 时, 拟合出的共转电场 (红线) 与用 24 小时周期计算的共转电场 (蓝线) 随 L 的变化. (d-f) 分别绘制了在不同 Kp 时, 旋转系数随 L 的变化 (红线), 以及其平均值 (黑线) (引自 Zhang Z et al., 2024)

Fig. 6 (a-c) The profile of the corotation electric fields (red lines) versus L plotted for different Kp from 0 to 4, respectively. The blue lines are the corotation electric fields calculated with 24 h corotation period. (d-f) The corotation factors plotted versus L as the red lines for Kp from 0 to 4, respectively. The black lines represent the average values of the corotation factors in the region of $2 < L < 4$ (from Zhang Z et al., 2024)

另一原因. 此外, Xiao 等 (2023) 研究表明, 地球等离子体层顶的位置及径向电场会受到月球潮汐效应的影响, 具体而言, 电离层中的中性风可能受月相调制, 所产生的电位差沿磁力线映射至磁层, 从而引发径向电场的扰动. 这种径向电场的扰动可能进一步导致等离子体层在不同 MLT 区域的旋转速度出现差异.

尽管多项研究已经提供了等离子体层存在共转滞后的证据, 但现有估计共转电场的方法仍存在不足. 利用 EUV 追踪等离子体层特征结构的方法可以估计等离子体层旋转速度, 进而估计共转电场大小 (Burch et al., 2004; Galvan et al., 2010; Sandel et al., 2003), 但该方法仅能在等离子体层的特征结构存在且可以被识别的时间段使用. 基于卫星电场与磁场探测数据计算等离子体的电场漂移速度的方法, 可以不受特征结构存续时间的限制, 利用更长的时间范围内的数据进行研究 (Lejosne and Mozer, 2018). 该方法能计算出当地的等离子体在方位角方向的流速, 并估计等离子体层旋转速度和共转电场的强度. 然而, 上述两种方式都可能额外计算了其他电场对等离子体流的贡献. 内磁层中未被完全屏蔽的对流电场或 SAPS 导致的局地电场驱动的等

离子体电场漂移很难被去除. 这也能部分解释 Glavan 等 (2010) 发现共转滞后系数存在与 Kp 和 Dst 的相关性. 为减少其他电场对共转电场估计的干扰, Zhang Z 等 (2024) 通过对地球惯性参考系下电场晨昏分量统计值进行关于 MLT 的正弦函数拟合的方式, 提取出共转电场. 现有研究表明, 其他电场的晨昏向分量通常不随 MLT 呈显著的正弦变化, 因此该方式可以将共转电场单独提取出来. 然而, 这种方式也存在缺陷, 其假设了在同一 L 上, 共转速度是不变的, 即无法揭示共转速度随 MLT 的变化规律. 共转电场与对流电场、SAPS 引起的电场、屏蔽电场等电场的准确估计相互影响. 为了获取这些电场数据, 通常需要将共转电场从卫星测量值中去除. 而在估计共转电场时, 也需要考虑其他电场的不均匀分布对等离子体层旋转速度的影响. 这些电场之间的精确度相互影响, 仍需寻找新的方法估计共转电场.

3 脉冲电场

脉冲电场是由地球磁层中磁场迅速变化引发, 或伴随快速等离子体流而出现的一种电场扰动

(Blake et al., 1992; Li et al., 1998; Sarris et al., 2002; Zhang et al., 2018). 在行星际激波事件中, 太阳风动压的突然增加导致地球磁层受到压缩. 根据法拉第定律, 这种压缩使北向磁场增强, 并感应出西向的脉冲电场. 此外, 在亚暴期间也会出现西向脉冲电场, 其经常伴随着从磁尾向地球传播的快速等离子体流 (Gabrielse et al., 2012, 2016).

脉冲电场能够在短时间内显著加速内磁层中的高能带电粒子, 并将其输运到更靠近地球的区域. Blake 等 (1992) 报道了一起发生在 1991 年 3 月 24 日的行星际激波事件. 在该事件中, 处于夜侧的 CRRES 卫星探测到一个持续约 2 min、幅度高达 40 mV/m 的脉冲电场, 同时伴随着高能粒子 (>15 MeV) 的注入. Li 等 (1993) 通过模拟分析了这一事件中由行星际激波触发的脉冲电场引发的电子注入过程. 结果表明, 脉冲电场可以在电子的漂移周期内将 $L > 6$ 区域的数兆电子伏特能量的电

子加速至 40 MeV, 并输运至 $L=2.5$ 附近的区域. Liu 等 (2009) 改进了 Li 等 (1998) 与 Sarris 等 (2002) 的脉冲电场模型, 并成功模拟了在 2007 年 3 月 23 日亚暴事件中从磁尾向地球传播的极化脉冲电场导致的粒子注入. Dai 等 (2015) 报道了一起发生在亚暴期间, 由 $L=5.5$ 的午夜前区域一个与偶极化锋面相关的强脉冲电场 (幅度高达 50 mV/m) 导致的 MeV 电子注入事件.

近年来, 多个研究聚焦于研究脉冲电场的演化特性. Zhang 等 (2022) 利用 VAP 卫星观测数据以及 SWMF 模型 (Tóth et al., 2005) 对 2015 年 3 月 17 日的行星际激波事件中脉冲电场的演化进行了研究. 图 7a、7b 分别对比了 $L=5$ 和 $L=6$ 处的模拟电场脉冲开始时间 (红)、峰值时间 (橙), 以及理论估算的快波到达时间 (蓝) 和行星际激波压缩流到达时间 (绿). 研究发现, 脉冲电场到达时间主要与快波的传播有关, 而脉冲电场峰值传播与行

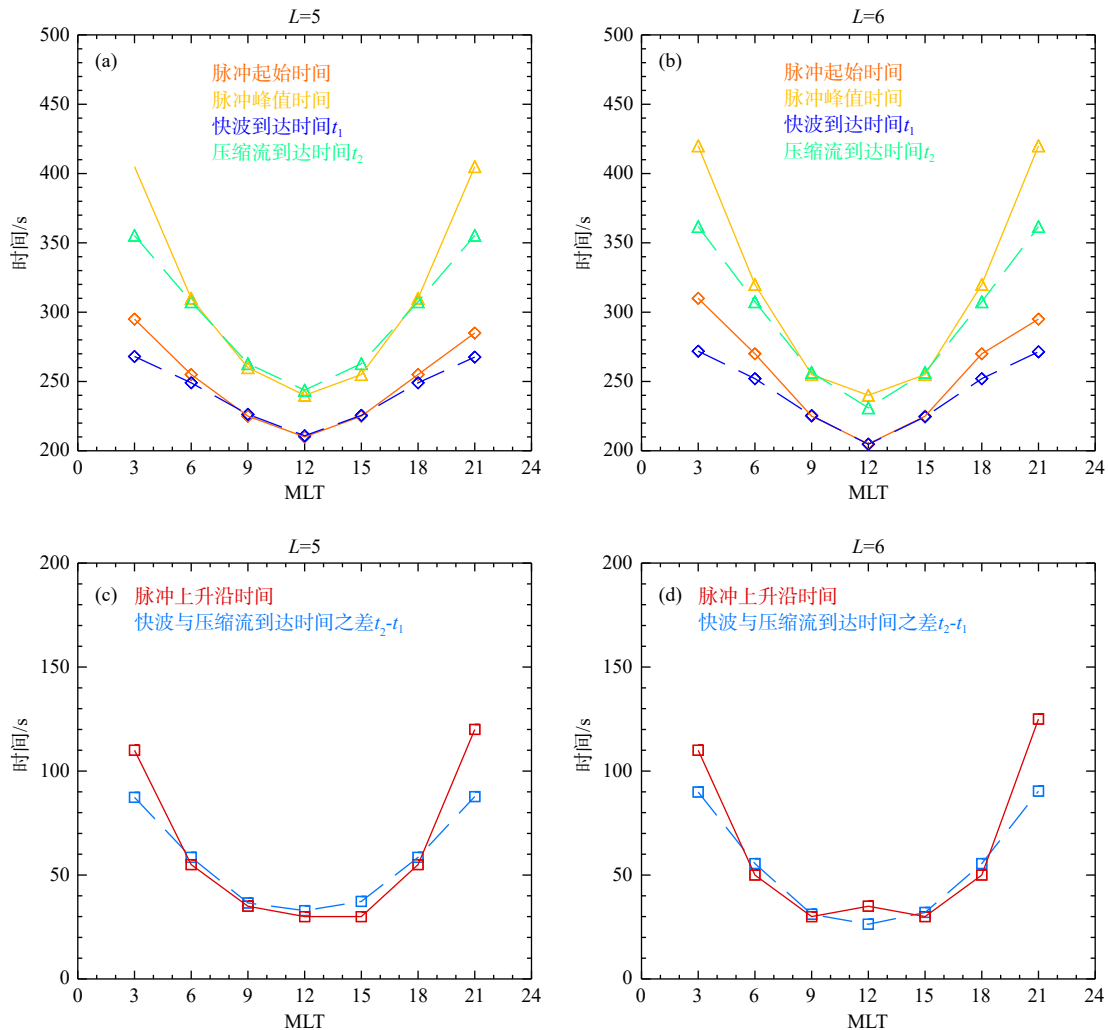


图 7 模拟和理论估算的电场脉冲的开始时间、峰值时间和上升沿时间的对比 (引自 Zhang et al., 2022)

Fig. 7 Comparison of simulated and theoretically estimated onset time, peak time, and rise time of electric field impulses (from Zhang et al., 2022)

星际激波对磁层顶的压缩密切相关. 在进一步的研究中, Zhang D 等 (2024) 通过分析 2017 年 9 月 6 日在昏侧辐射带电子的加速过程, 确认了脉冲电场的传播速度. 在该事件中, 能量通量变化最大的电子为 3.4 MeV, 漂移速度约 531 km/s. 由于当能量粒子的漂移速度与脉冲电场的传播速度接近时, 粒子与电场的相互作用时间最长, 加速效果最显著. 因此可以推测脉冲电场的传播速度应该接近于 3.4 MeV 电子的漂移速度. 具体分析显示, 在此事件中, 行星际激波的传播速度为 621 km/s, 而快磁声波速度为 1074 km/s. 这表明脉冲电场峰值的传播速度与行星际激波传播速度更为接近.

4 总结与展望

本文回顾了对流电场、共转电场和脉冲电场的研究成果与进展, 重点讨论了它们的分布及演化特征. 通过对卫星探测数据的统计分析, 研究者们揭示了不同地磁活动条件下对流电场的空间分布特征. 由于屏蔽效应, 在地磁活动较为稳定时, 内磁层对流电场被屏蔽电场所抵消; 然而, 当地磁活动变化剧烈时, 对流电场与屏蔽电场之间的平衡被打破, 内磁层呈现“过屏蔽”或“欠屏蔽”状态. SAPS 是位于亚极光区电离层的快速西向等离子体流, 当其强极向电场映射至磁层后, 可在磁地方时为黄昏至午夜的区域产生高达数毫伏每米的径向电场. 在磁暴主相期间, 对流电场会在晨昏两侧出现显著增强; 在恢复相时期, 电场增强的区域会向外移动且增强的幅度变小, 有时也会出现屏蔽或者过屏蔽的昏晨向电场. 内磁层的对流电场会对行星际磁场的变化产生响应, 但电场的响应时间及其演化过程还有待借助卫星数据进一步研究. 对于共转电场, 由于等离子体层共转滞后现象的存在, 使用 24 小时自转周期计算时, 往往会过高估计其强度, 从而给其他电场研究带来额外误差. 脉冲电场能够导致相对论能量电子的加速与注入, 而其传播速度被发现与快磁声波及行星际激波的传播速度密切相关.

随着对内磁层大尺度电场研究的展开, 人们对其分布特征及演化规律的认识在逐步加深, 然而, 目前研究还存在一些困难. 首先, 双探针式空间电场测量技术虽然可以获取三维电场数据, 但是存在一定局限性. 该种类仪器的结构决定了其在卫星平台自旋平面内电场的测量误差较小, 而自转轴方向

的测量误差较大. 虽然自转轴方向的电场可以通过 $\mathbf{E} \cdot \mathbf{B} = 0$ 的关系进行计算, 但通过该方式计算出的电场的误差会随背景磁场与卫星自转轴的夹角的减小而增大. 不完整或误差过大的数据都会给电场研究带来困难, 尤其对于需要对电场数据进行坐标转换的研究. 其次, 对流电场、共转电场和 SAPS 电场的作用区域存在交集, 从这些区域内的测量数据中很难区分出不同种类的电场, 从而为单独研究各个电场的特征或演化过程带来了挑战. 例如, 在卫星穿越 SAPS 对应的磁层区域时, 测量到的电场变化可能是对行星际磁场迅速响应的对流电场引起, 也可能是 SAPS 引起的局地电场导致. 此外, 由于缺少同一时刻覆盖全磁层范围的卫星探测数据, 现有对内磁层大尺度范围内电场演化过程的研究还存在困难. 模型对磁层演化过程的模拟是否与实际一致还需要更多探测数据进行验证.

在地球内磁层大尺度电场的研究上, 仍存在一些科学问题亟待解决, 包括: (1) 现有电场模型很难对内磁层中的屏蔽与穿透电场进行准确的估计, 是否能够建立模型将屏蔽效应导致的内磁层电场变化准确估计出来? (2) 在磁层中对流电场对行星际磁场的响应是否全球同步? 日侧磁层顶磁场重联直接驱动的对流增强导致内磁层中的电场如何演化? (3) 由于内磁层中电场分布不均匀, 如何更准确地判断等离子体层的旋转速度以及共转电场的大小? (4) 如何从卫星探测数据中准确分辨对流电场、共转电场、脉冲电场以及其他局地电场? 如何确认电场的变化是空间还是时间变化导致的? 这些科学问题的解决将有助于我们更深入地理解内磁层大尺度电场的特性, 并推动内磁层动力学的发展.

References

- Anderson P C, Carpenter D L, Tsuruda K, et al. 2001. Multisatellite observations of rapid subauroral ion drifts (SAID)[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 106(A12): 29585-29599.
- André M, Eriksson A I, Khotyaintsev Y V, Toledo-Redondo S. 2021. The spacecraft wake: Interference with electric field observations and a possibility to detect cold ions[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 126(9): e2021JA029493.
- Blake J B, Kolasinski W A, Fillius W R, Mullen E G. 1992. Injection of electrons and protons with energies of tens of MeV into $L < 3$ on 24 March 1991[J]. *Geophysical Research Letters*, 19(8): 821-824.
- Blanc M, Richmond A D. 1980. The ionospheric disturbance dynamo[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 85(A4): 1669-1686.
- Bonnell J W, Mozer F S, Delory G T, et al. 2008. The Electric Field In-

- strument (EFI) for THEMIS[J]. *Space Science Reviews*, 141(1-4): 303-341.
- Borovsky J E, Denton M H. 2008. A statistical look at plasmaspheric drainage plumes[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 113(A9): A09221.
- Breneman A W, Wygant J R, Tian S, et al. 2022. The Van Allen Probes electric field and waves instrument: Science results, measurements, and access to data[J]. *Space Science Reviews*, 218: 69.
- Burch J L, Goldstein J, Sandel B R. 2004. Cause of plasmasphere corotation lag[J]. *Geophysical Research Letters*, 31: L05802.
- Burch J L, Phan T D. 2016. Magnetic reconnection at the dayside magnetopause: Advances with MMS[J]. *Geophysical Research Letters*, 43(16): 8327-8338.
- Burke W J, Weimer D R, Maynard N C. 1999. Geoeffective interplanetary scale sizes derived from regression analysis of polar cap potentials[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 104(A5): 9989-9994.
- Califf S, Li X, Blum L, et al. 2014. THEMIS measurements of quasi-static electric fields in the inner magnetosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 119(12): 9939-9951.
- Califf S, Li X, Wolf R A, et al. 2016. Large-amplitude electric fields in the inner magnetosphere: Van Allen Probes observations of subauroral polarization streams[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 121(6): 5294-5306.
- Califf S, Li X, Zhao H, et al. 2017. The role of the convection electric field in filling the slot region between the inner and outer radiation belts[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 122(2): 2051-2068.
- Califf S, Zhao H, Gkioulidou M, et al. 2022. Multi-event study on the connection between subauroral polarization streams and deep energetic particle injections in the inner magnetosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 127(2): e2021JA029895.
- Cao J, Duan J, Du A, et al. 2008. Characteristics of middle to low latitude Pi2 excited by bursty bulk flows[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 113(A7): A07S15.
- Cao J, Ma Y, Parks G, et al. 2013. Kinetic analysis of the energy transport of bursty bulk flows in the plasma sheet[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 118(1): 313-320.
- Colella P, Woodward P R. 1984. The Piecewise Parabolic Method (PPM) for gas-dynamical simulations[J]. *Journal of Computational Physics*, 54(1): 174-201.
- Dai L, Wang C, Duan S, et al. 2015. Near-Earth injection of MeV electrons associated with intense dipolarization electric fields: Van Allen Probes observations[J]. *Geophysical Research Letters*, 42(15): 6170-6179.
- Dai L, Han Y, Wang C, et al. 2023. Geoeffectiveness of interplanetary Alfvén waves. I. Magnetopause magnetic reconnection and directly driven substorms[J]. *The Astrophysical Journal*, 945: 47.
- Dai L, Zhu M, Ren Y, et al. 2024. Global-scale magnetosphere convection driven by dayside magnetic reconnection[J]. *Nature Communications*, 15(1): 639.
- Dods J, Chapman S C, Gjerloev J W. 2017. Characterizing the ionospheric current pattern response to southward and northward IMF turnings with dynamical SuperMAG correlation networks[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 122(2): 1883-1902.
- Du Y, Liu W, Zhang D, Tan X, et al. 2024. Latitudinal distribution of dayside magnetospheric currents based on cluster observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 129: e2024JA032943.
- Dungey J W. 1961. Interplanetary magnetic field and the auroral aones[J]. *Physical Review Letters*, 6(2): 47-48.
- Ebihara Y, Kasahara S, Seki K, et al. 2009. Simultaneous entry of oxygen ions originating from the Sun and Earth into the inner magnetosphere during magnetic storms[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 114(A5): A05219.
- Eriksson A I, Andre M, Klecker B, et al. 2006. Electric field measurements on Cluster: Comparing the double-probe and electron drift techniques[J]. *Annales Geophysicae*, 24(1): 275-289.
- Fiori R A D, Boteler D H, Koustov A V. 2012. Response of ionospheric convection to sharp southward IMF turnings inferred from magnetometer and radar data[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 117(A9): A09302.
- Foster J C, Burke W J. 2002. SAPS: A new categorization for subauroral electric fields[J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 83(36): 393-394.
- Foster J C, Vo H B. 2002. Average characteristics and activity dependence of the subauroral polarization stream[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 107(A12): 1475.
- Fu H S, Khotyaintsev Y V, Vaivads A, et al. 2013. Energetic electron acceleration by unsteady magnetic reconnection[J]. *Nature Physics*, 9(7): 426-430.
- Fu H S, Xu Y, Vaivads A, Khotyaintsev Y V. 2019. Super-efficient electron acceleration by an isolated magnetic reconnection[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 870(2): L22.
- Gabrielse C, Angelopoulos V, Runov A, Turner D L. 2012. The effects of transient, localized electric fields on equatorial electron acceleration and transport toward the inner magnetosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 117(A10): A10213.
- Gabrielse C, Harris C, Angelopoulos V, et al. 2016. The role of localized inductive electric fields in electron injections around dipolarizing flux bundles[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 121(10): 9560-9585.
- Galvan D A, Moldwin M B, Sandel B R, Crowley G. 2010. On the causes of plasmaspheric rotation variability: IMAGE EUV observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 115(A1): A01214.
- Gao L, Shen C, Zhou Y, et al. 2024. Observational features of charge distribution in Earth's inner magnetosphere[J]. *Communications Physics*, 7(1): 63.
- Goldstein J, Sandel B R, Hairston M R, Reiff P H. 2003. Control of plasmaspheric dynamics by both convection and sub-auroral polarization stream[J]. *Geophysical Research Letters*, 30(24): 2243.
- Goldstein J, Wolf R A, Sandel B R, et al. 2004. Electric fields deduced from plasmopause motion in IMAGE EUV images[J]. *Geophysical Research Letters*, 31(1): L01801.
- Goldstein J, Burch J L, Sandel B R. 2005. Magnetospheric model of subauroral polarization stream[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 110(A1): A01214.

- search: *Space Physics*, 110(A9): A09222.
- Goyal R, Zhao H, Califf S, et al. 2024. Role of subauroral polarization streams in deep injections of energetic electrons into the inner magnetosphere[J]. *Geophysical Research Letters*, 51(11): e2024GL108863.
- Gussenhoven M S, Hardy D A, Burke W J. 1981. DMSP/F2 electron observations of equatorward auroral boundaries and their relationship to magnetospheric electric fields[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 86(A2): 768-778.
- Gussenhoven M S, Hardy D A, Heinemann N. 1983. Systematics of the equatorward diffuse auroral boundary[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 88(A7): 5692-5708.
- Gustafsson G, Bostrom R, Holback B, et al. 1997. The electric field and wave experiment for the CLUSTER mission[J]. *Space Science Reviews*, 79: 137-156.
- Hill T W. 1979. Inertial limit on corotation[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 84(A11): 6554-6558.
- Hones E W, Bergeson J E. 1965. Electric field generated by a rotating magnetized sphere[J]. *Journal of Geophysical Research*, 70(19): 4951-4958.
- Hu Y Q, Guo X C, Wang C. 2007. On the ionospheric and reconnection potentials of the earth: Results from global MHD simulations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 112(A7): A07215.
- Huang J, Lei J, Li S, et al. 2018. The Electric Field Detector (EFD) onboard the ZH-1 satellite and first observational results[J]. *Earth and Planetary Physics*, 2(6): 469-478.
- Huang Y, Xu R L, Shen C, Zhao H. 2011. Rotation of the Earth's plasmasphere at different radial distances[J]. *Advances in Space Research*, 48(7): 1167-1171.
- Jaggi R K, Wolf R A. 1973. Self-consistent calculation of the motion of a sheet of ions in the magnetosphere[J]. *Journal of Geophysical Research*, 78(16): 2852-2866.
- Jordanova V K, Morley S K, Engel M A, et al. 2023. The RAM-SCB model and its applications to advance space weather forecasting[J]. *Advances in Space Research*, 72(12): 5596-5606.
- Kelley M C, Fejer B G, Gonzales C A. 1979. An explanation for anomalous equatorial ionospheric electric fields associated with a northward turning of the interplanetary magnetic field[J]. *Geophysical Research Letters*, 6(4): 301-304.
- Kunduri B S R, Baker J B H, Ruohoniemi J M, et al. 2017. Statistical characterization of the large-scale structure of the subauroral polarization stream[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 122(6): 6035-6048.
- Kunduri B S R, Baker J B H, Ruohoniemi J M, et al. 2018. A new empirical model of the subauroral polarization stream[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 123(9): 7342-7357.
- Lejosne S, Mozer F S. 2016. Van Allen Probe measurements of the electric drift $E \times B/B_2$ at Arecibo's $L = 1.4$ field line coordinate[J]. *Geophysical Research Letters*, 43(13): 6768-6774.
- Lejosne S, Mozer F S. 2017. Subauroral Polarization Streams (SAPS) duration as determined from Van Allen Probe successive electric drift measurements[J]. *Geophysical Research Letters*, 44(18): 9134-9141.
- Lejosne S, Mozer F S. 2018. Magnetic activity dependence of the electric drift below $L=3$ [J]. *Geophysical Research Letters*, 45(9): 3775-3782.
- Lejosne S, Fedrizzi M, Maruyama N, Selesnick R S. 2021. Thermospheric neutral winds as the cause of drift shell distortion in Earth's inner radiation belt[J]. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 8: 725800.
- Li H, Fu T, Tang R, et al. 2022. Statistical study and corresponding evolution of plasmaspheric plumes under different levels of geomagnetic storms[J]. *Annales Geophysicae*, 40(2): 167-177.
- Li L, Cao J, Zhou G. 2005. Combined acceleration of electrons by whistler-mode and compressional ULF turbulences near the geosynchronous orbit[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 110(A3): A03203.
- Li L, Omura Y, Zhou X Z, et al. 2020. Roles of magnetospheric convection on nonlinear drift resonance between electrons and ULF waves[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 125(6): e2020JA027787.
- Li L, Zhou X Z, Zong Q G. 2022. Nonlinear interaction between particles and ultralow frequency waves[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 53(4): 443-453 (in Chinese).
- Li X, Roth I, Temerin M, et al. 1993. Simulation of the prompt energization and transport of radiation belt particles during the March 24, 1991 SSC[J]. *Geophysical Research Letters*, 20(22): 2423-2426.
- Li X, Baker D N, Temerin M, et al. 1998. Simulation of dispersionless injections and drift echoes of energetic electrons associated with substorms[J]. *Geophysical Research Letters*, 25(20): 3763-3766.
- Li X, Selesnick R, Mei Y, et al. 2024. First results from REPTile-2 measurements onboard CIRBE[J]. *Geophysical Research Letters*, 51: e2023GL107521.
- Liemohn M W, Kozyra J U, Hairston M R, et al. 2002. Consequences of a saturated convection electric field on the ring current[J]. *Geophysical Research Letters*, 29(9): 1348.
- Lindqvist P A, Olsson G, Torbert R B, et al. 2016. The spin-plane double probe electric field instrument for MMS[J]. *Space Science Reviews*, 199: 137-165.
- Liu W, Li X, Sarris T, et al. 2009. Observation and modeling of the injection observed by THEMIS and LANL satellites during the 23 March 2007 substorm event[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 114(A1): A00C18.
- Liu W, Cao J B, Li X, et al. 2013. Poloidal ULF wave observed in the plasmasphere boundary layer[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 118(7): 4298-4307.
- Liu W, Tu W, Li X, et al. 2016. On the calculation of electric diffusion coefficient of radiation belt electrons with in situ electric field measurements by THEMIS[J]. *Geophysical Research Letters*, 43(3): 1023-1030.
- Lockwood M, Cowley S W H. 1999. Comment on "A statistical study of the ionospheric convection response to changing interplanetary magnetic field conditions using the assimilative mapping of ionospheric electrodynamics technique" by A. J. Ridley et al[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 104(A3): 4387-4391.
- Lu G, Holzer T E, Lummerzheim D, et al. 2002. Ionospheric response to the interplanetary magnetic field southward turning: Fast onset and

- slow reconfiguration[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 107(A8): 1153.
- Lv X, Liu W. 2018. Measurements of convection electric field in the inner magnetosphere[J]. *Science China Technological Sciences*, 61(12): 1866-1871.
- Marchaudon A, Blelly P L. 2020. Impact of the dipole tilt angle on the ionospheric plasma as modeled with IPIM[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 125(6): e2019JA027672.
- Matsui H, Puhl-Quinn P A, Jordanova V K, et al. 2008. Derivation of inner magnetospheric electric field (UNH-IMEF) model using Cluster data set[J]. *Annales Geophysicae*, 26(9): 2887-2898.
- Matsui H, Torbert R B, Spence H E, et al. 2013. Revision of empirical electric field modeling in the inner magnetosphere using Cluster data[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 118(7): 4119-4134.
- Maus S. 2017. A corotation electric field model of the Earth derived from Swarm satellite magnetic field measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 122(8): 8733-8754.
- Maynard N C, Chen A J. 1975. Isolated cold plasma regions: Observations and their relation to possible production mechanisms[J]. *Journal of Geophysical Research*, 80(7): 1009-1013.
- McIlwain C E. 1986. A Kp dependent equatorial electric field model[J]. *Advances in Space Research*, 6(3): 187-197.
- Mei Y, Li X, Zhao H, Sarris T, et al. 2023. On the energy-dependent deep ($L < 3.5$) penetration of radiation belt electrons[J]. *Geophysical Research Letters*, 50: e2022GL101921.
- Nishida A. 1968. Coherence of geomagnetic DP2 fluctuations with interplanetary magnetic variations[J]. *Journal of Geophysical Research*, 73(17): 5549-5559.
- Nishimura Y, Shinbori A, Ono T, et al. 2006. Storm-time electric field distribution in the inner magnetosphere[J]. *Geophysical Research Letters*, 33(22): L22102.
- Nishimura Y, Kikuchi T, Wygant J, et al. 2009. Response of convection electric fields in the magnetosphere to IMF orientation change[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 114(A9): A09206.
- Paschmann G, Melzner F, Frenzel R, et al. 1997. The electron drift instrument for CLUSTER[J]. *Space Science Reviews*, 79: 233-269.
- Paschmann G, Carl E, McIlwain E, et al. 1998. The Electron Drift Technique for Measuring Electric and Magnetic Fields[M] // Pfaff R F, Borovsky J E, Young D T. *Measurement Techniques in Space Plasmas-Fields*. Washington DC: AGU Geophysical Monograph, 103: 29-38.
- Pedersen A, Mozer F S, Gustafsson G. 1998. Electric Field Measurements in a Tenuous Plasma with Spherical Double Probes[M] // Pfaff R F, Borovsky J E, Young D T. *Measurement Techniques in Space Plasmas-Fields*. Washington DC: AGU Geophysical Monograph, 103: 1-12.
- Ridley A J, Lu G, Clauer C R, Papitashvili V O. 1998. A statistical study of the ionospheric convection response to changing interplanetary magnetic field conditions using the assimilative mapping of ionospheric electrodynamics technique[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 103(A3): 4023-4039.
- Rowland D E, Wygant J R. 1998. Dependence of the large-scale, inner magnetospheric electric field on geomagnetic activity[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 103(A7): 14959-14964.
- Sandel B R, King R A, Forrester W T, et al. 2001. Initial results from the IMAGE extreme ultraviolet imager[J]. *Geophysical Research Letters*, 28(8): 1439-1442.
- Sandel B R, Goldstein J, Gallagher D L, Spasojevic M. 2003. Extreme ultraviolet imager observations of the structure and dynamics of the plasmasphere[J]. *Space Science Reviews*, 109: 25-46.
- Sarris T E, Li X, Tsaggas N, Paschalidis N. 2002. Modeling energetic particle injections in dynamic pulse fields with varying propagation speeds[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 107(A3): 1033.
- Selesnick R S, Su Y J, Blake J B. 2016. Control of the innermost electron radiation belt by large-scale electric fields[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 121(9): 8417-8427.
- Selesnick R S, Su Y J, Sauvaud J A. 2019. Energetic electrons below the inner radiation belt[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 124(7): 5421-5440.
- Stern D P. 1975. The motion of a proton in the equatorial magnetosphere[J]. *Journal of Geophysical Research*, 80(4): 595-599.
- Stern D P. 1977. Large-scale electric fields in the Earth's magnetosphere[J]. *Reviews of Geophysics*, 15(2): 156-194.
- Su Y J, Selesnick R S, Blake J B. 2016. Formation of the inner electron radiation belt by enhanced large-scale electric fields[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 121(9): 8508-8522.
- Su Z, Xiao F, Zheng H, Wang S. 2011. Radiation belt electron dynamics driven by adiabatic transport, radial diffusion, and wave-particle interactions[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 116(A4): A04205.
- Thaller S A, Wygant J R, Dai L, et al. 2015. Van Allen Probes investigation of the large-scale duskward electric field and its role in ring current formation and plasmasphere erosion in the 1 June 2013 storm[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 120(6): 4531-4543.
- Thorne R M. 2010. Radiation belt dynamics: The importance of wave-particle interactions[J]. *Geophysical Research Letters*, 37(22): L22107.
- Torbert R B, Vaith H, Granoff M, et al. 2016. The electron drift instrument for MMS[J]. *Space Science Reviews*, 199: 283-305.
- Tong X, Liu W, Zhang D, et al. 2024. Statistical study on the azimuthal mode number of Pc5 ULF wave in the inner magnetosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 129(2): e2023JA032306.
- Tóth G, Sokolov I V, Gombosi T I, et al. 2005. Space weather modeling framework: A new tool for the space science community[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 110: 12226.
- Tu C Y, Zong Q G, Zhou X Z. 2022. *Solar-terrestrial Space Physics Magnetospheric Physics*[M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Vasyliūnas V M. 2001. Electric field and plasma flow: What drives what?[J]. *Geophysical Research Letters*, 28(11): 2177-2180.
- Volland H. 1973. A semiempirical model of large-scale magnetospheric electric fields[J]. *Journal of Geophysical Research*, 78(1): 171-180.
- Wang Y, Zhang Q H, Xing Z Y, et al. 2023. Recently research advances on the polar cap patches[J]. *Reviews of Geophysics and*

- Planetary Physics*, 54(4): 398-416 (in Chinese).
- Wei Y, Pu Z, Hong M, et al. 2010. Long-lasting goodshielding at the equatorial ionosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 115(A12): A12256.
- Wei Y, Zhao B, Li G, Wan W. 2015. Electric field penetration into Earth's ionosphere: A brief review for 2000–2013[J]. *Science Bulletin*, 60(8): 748-761.
- Wolf R A, Spiro R W, Sazykin S, Toffoletto F R. 2007. How the Earth's inner magnetosphere works: An evolving picture[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 69(3): 288-302.
- Wygant J R, Harvey P R, Pankow D, et al. 1992. CRRES electric field/Langmuir probe instrument[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 29(4): 601-604.
- Wygant J, Rowland D, Singer H J, et al. 1998. Experimental evidence on the role of the large spatial scale electric field in creating the ring current[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 103(A12): 29527-29544.
- Wygant J R, Bonnell J W, Goetz K, et al. 2013. The electric field and waves instruments on the radiation belt storm probes mission[J]. *Space Science Reviews*, 179: 183-220.
- Xiao C, He F, Shi Q, et al. 2023. Evidence for lunar tide effects in Earth's plasmasphere[J]. *Nature Physics*, 19: 486-491.
- Xiong C, Lüth H, Fejer B G. 2015. Global features of the disturbance winds during storm time deduced from CHAMP observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 120(6): 5137-5150.
- Yan L, Liu W, Zhang D, et al. 2023. Cluster observation on the latitudinal distribution of magnetic Pc5 pulsations in the inner magnetosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 128(10): e2023JA031789.
- Yu Y, Ridley A J. 2009. The response of the magnetosphere-ionosphere system to a sudden dynamic pressure enhancement under southward IMF conditions[J]. *Annales Geophysicae*, 27(12): 4391-4407.
- Yu Y, Jordanova V, Zou S, et al. 2015. Modeling subauroral polarization streams during the 17 March 2013 storm[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 120(3): 1738-1750.
- Yu Y, Jordanova V K, Ridley A J, et al. 2017. Effects of electric field methods on modeling the midlatitude ionospheric electrodynamics and inner magnetosphere dynamics[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 122(5): 5321-5338.
- Zhang D, Liu W, Li X, et al. 2018. Observations of impulsive electric fields induced by interplanetary shock[J]. *Geophysical Research Letters*, 45(15): 7287-7296.
- Zhang D, Liu W, Du J, et al. 2022. Response of electric field in terrestrial magnetosphere to interplanetary shock[J]. *The Astrophysical Journal*, 938(1): 70.
- Zhang D, Liu W, Li X, et al. 2024. Surfing acceleration of radiation belt relativistic electrons induced by the propagation of interplanetary shock[J]. *Geophysical Research Letters*, 51(12): e2024GL109285.
- Zhang Q H, Lockwood M, Foster J C, et al. 2015. Direct observations of the full Dungey convection cycle in the polar ionosphere for southward interplanetary magnetic field conditions[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 120(6): 4519-4530.
- Zhang Z, Liu W L, Zhang D J, Cao J B. 2024. Estimating the corotation lag of the plasmasphere based on the electric field measurements of the Van Allen Probes[J]. *Advances in Space Research*, 73(1): 758-766.
- Zhao H, Baker D N, Califf S, et al. 2017. Van Allen Probes measurements of energetic particle deep penetration into the low L region ($L < 4$) during the storm on 8 April 2016[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 122(12): 12140-12152.
- Zhu M, Dai L, Wang C, et al. 2024. The influence of ionospheric conductance on magnetospheric convection during the southward IMF[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 129(9): e2024JA032607.
- Zhuang Y, Yue C, Zong Q G, et al. 2023. The effect of energetic ion dispersionless injections on the ring current dynamics[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 128(2): e2022JA030914.

附中文参考文献

- 李莉, 周煦之, 宗秋刚. 2022. 超低频波与带电粒子的非线性相互作用[J]. *地球与行星物理理论评(中英文)*, 53(4): 443-453.
- 涂传谔, 宗秋刚, 周煦之. 2022. 日地空间物理学-磁层物理[M]. 北京: 科学出版社.
- 王勇, 张清和, 邢赞扬, 等. 2023. 极盖区等离子体云块近十年研究进展[J]. *地球与行星物理理论评(中英文)*, 54(4): 398-416.