

电离层反馈效应引起喉区极光的观测证据

邱荟璇¹, 韩德胜^{1*}, 王勇², 张强³, 冯惠婷⁴, 石润¹, 张顺荣⁵, 王智伟¹, 张永良⁶

1. 海洋地质国家重点实验室, 同济大学海洋与地球科学学院, 上海 200092

2. 山东省太空环境与探测技术重点实验室, 山东大学空间科学研究院, 山东大学空间科学与技术学院, 威海 264209

3. 临近空间环境特性及效应全国重点实验室, 南京信息工程大学, 南京 210044

4. Section 2.7 Space Physics and Space Weather, GFZ German Research Centre for Geosciences, Potsdam 14473, Germany

5. Haystack Observatory, Massachusetts Institute of Technology, Westford, MA 01886, USA

6. The Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory, Laurel, MD 11100, USA

* 通讯作者, E-mail: handesheng@tongji.edu.cn

2025-06-03收稿, 2025-10-31修回, 2025-11-10接受, 2026-02-09网络版发表

国家自然科学基金项目(424B2030、42030101)、山东省自然科学基金项目(ZR2022MD034)、小米青年学者计划项目、北极黄河地球系统国家野外科学观测研究站项目(YRNORS-20242606)、中国子午工程以及中国科学院国际合作项目(183311KYSB20200003)和美国国家科学基金会(AGS-1952737、AGS-2033787、AGS-2149698)资助

摘要 电离层反馈效应被认为是喉区极光形成的关键因素之一。理论上, 该效应通过由局部电离层密度增强引发的电离层反馈不稳定性(Ionospheric Feedback Instability, IFI)发挥作用。然而, 目前仍缺乏将电离层密度增强与喉区极光直接关联的观测证据。本研究基于美国国防气象卫星计划(Defense Meteorological Satellite Program, DMSP)星载的特殊传感器紫外光谱成像仪(Special Sensor Ultraviolet Spectrographic Imager, SSUSI)于2005–2010年间观测的喉区极光图像, 并结合全球定位系统卫星(Global Positioning Satellite, GPS)获取的总电子含量(Total Electron Content, TEC)数据, 筛选出70例具有可靠GPS/TEC数据覆盖的喉区极光事件。统计分析表明, 其中50例(约71.4%)事件在喉区极光被观测到之前, 电离层中已存在羽流状TEC增强结构。这些增强结构通常从低纬延伸至高纬正午扇区(10–14磁地方时, 磁纬 $\geq 70^\circ$), 在极光附近区域平均持续约30.8分钟, 且与后续观测到的喉区极光走向平行。进一步对两个典型事件的案例分析显示, 喉区极光的电子沉降区紧邻对应TEC羽流的昏侧边界。这种空间关系符合IFI理论特征, 且TEC羽流边界处的密度梯度也有利于IFI的建立。因此, 本研究从观测上确立了电离层密度增强与喉区极光之间的高度关联, 为电离层反馈机制驱动喉区极光提供了关键证据, 同时也强调了以往常被忽略的电离层反馈效应在太阳风-磁层-电离层耦合过程中的重要性。

关键词 电离层反馈效应, 喉区极光, 太阳风-磁层-电离层耦合, 电离层反馈不稳定性, 磁层顶裂缝

1 引言

太阳风、磁层和电离层之间的耦合既包含太阳风驱动, 也涉及磁层与电离层的反馈作用(Borovsky, 2014, 2021; Walsh等, 2014)。尽管理论和模拟研究已经认识到这些反馈作用的重要性(Kivelson和Ridley, 2008; Merkin和Goodrich, 2007; Wang等, 2013), 但目前对磁层和

电离层反馈机制的理解仍十分有限(Borovsky, 2021)。

喉区极光是在日侧正午附近常观测到的一种分立极光, 反映了特殊的日侧太阳风-磁层-电离层耦合过程。它们从分立极光卵的赤道边界凸出, 近乎垂直地向低纬延伸(Han等, 2015, 2016)。一般认为, 正午附近分立极光卵的赤道边界对应于开闭磁力线边界(Lockwood, 1997; Moen等, 1996)。因此, 喉区极光的形态意味着磁层顶

中文引用格式: 邱荟璇, 韩德胜, 王勇, 张强, 冯惠婷, 石润, 张顺荣, 王智伟, 张永良. 2026. 电离层反馈效应引起喉区极光的观测证据. 中国科学: 地球科学, 56(3): 1049–1056, doi: [10.1360/N072025-0265](https://doi.org/10.1360/N072025-0265)

英文引用格式: Qiu H, Han D, Wang Y, Zhang Q, Feng H, Shi R, Zhang S, Wang Z, Zhang Y. 2026. Observational evidence of ionospheric feedback effect in generating throat aurora. Science China Earth Sciences, 69(3): 1017–1023, <https://doi.org/10.1007/s11430-025-1760-0>

存在与之相对应的局部裂缝结构,这一推测已得到磁层原位观测的证实(Han等, 2018; Qiu等, 2022)。此外,地基全天空相机常在磁正午附近观测到与喉区极光走向一致的条带状弥散极光(Han等, 2015, 2016)。由于弥散极光是由来自磁层等离子体片的粒子沿闭合磁力线沉降所产生(Ni等, 2016),其与喉区极光的一致性走向则表明,在喉区极光所表征的特殊耦合过程中,可能还存在尚未明确的磁层或电离层因素的参与。综合所有喉区极光的观测特征, Han(2019)提出了一个概念性的喉区极光模型,认为电离层反馈效应在喉区极光形成过程中起着重要作用。然而,该效应的存在迄今仍属推测。

电离层反馈不稳定性(Ionospheric Feedback Instability, IFI)长期以来被认为是夜侧平静极光弧结构形成的一种机制(Atkinson, 1970; Ogawa和Sato, 1971)。简言之,在电离层大尺度背景对流电场的作用下,电离层中的小尺度密度扰动会引起局地电导率和电势变化。这些扰动会进一步驱动场向电流以阿尔芬波的形式沿磁力线向磁层传播。在适当的相位条件下,磁层与电离层中的阿尔芬波相互作用使初始密度扰动被放大,从而激发IFI并产生极光弧(Lysak, 1991; Sato, 1978)。在喉区极光的形成过程中,若存在电离层反馈机制,其可能遵循类似原理,但具有不同的物理细节。考虑到伴随电离层密度扰动的极光弧结构是IFI的基本特征之一,评估喉区极光形成中是否涉及电离层反馈机制的首要步骤,便是确认喉区极光是否与局部电离层密度变化同时出现。

本研究利用美国国防气象卫星计划(Defense Meteorological Satellite Program, DMSP)卫星观测数据(2005–2010年)及可靠的全球定位系统卫星(Global Positioning Satellite, GPS)的总电子含量(Total Electron Content, TEC)数据,揭示了喉区极光与电离层密度增强之间的统计相关性(约71.4%)。对这些密度增强的详细分析表明,它们在喉区极光出现前从低纬延伸至高纬正午扇区,呈羽流状,在极光附近区域平均持续约30.8分钟,且与后续观测到的喉区极光结构走向一致。此外,DMSP卫星观测结果显示,喉区极光的电子沉降紧邻TEC增强结构的昏侧边界。电离层密度变化与喉区极光之间的时空对应关系与IFI理论高度一致,这为喉区极光形成中的电离层反馈观点提供了观测支持。

2 数据与方法

2.1 数据

DMSP卫星运行于约840 km高度的极地太阳同步轨道(Hardy等, 2008)。我们使用了星载特殊传感器紫外成像

光谱仪(Special Sensor Ultraviolet Spectrographic Imager, SSUSI)所采集的N₂ Lyman-Birge-Hopfield short(简称LBHS, 140–160nm)波段观测数据(Paxton等, 2002),该波段强度与极光能通量有良好的相关性(Knight等, 2008)。沉降电子和离子的能通量(能量范围为30 eV至30 keV)由特殊传感器J(Special Sensor J, SSJ)记录(Hardy等, 1984)。等离子体密度、速度和温度数据则来自特殊传感器离子电子和闪烁(Special Sensor Ions Electrons and Scintillation, SSIES)监测器。

电离层电子密度通常通过GPS获取的TEC进行量化。本研究采用地理坐标下空间分辨率为1°×1°、时间分辨率为5分钟的GPS垂直TEC数据(Rideout和Coster, 2006)。为便于分析,这些数据被进一步转换到高度调整校正地磁(Altitude Adjusted Corrected Geomagnetic, AACGM)坐标系。

2.2 数据集

我们选取了2005–2010年间北半球的45幅DMSP/SSUSI极光图像,这些图像包含10–14磁地方时(Magnetic Local Time, MLT)范围内的111次喉区极光事件。对于每幅图像,我们整合了喉区极光对应的DMSP粒子观测数据、行星际磁场(Interplanetary Magnetic Field, IMF)条件以及同时段的GPS/TEC图。图1展示了一个示例事件:图1A和1B显示了该事件的DMSP观测,包括极光图像及沿卫星轨迹的电子/等离子体密度、电子/离子温度、离子漂移速度和电子/离子能谱图;图1C为同时段的GPS/TEC图;图1D则为对应的IMF条件。更多事件详见Qiu(2025)。

2.3 喉区极光区域内GPS/TEC覆盖的识别

为识别与喉区极光相关的TEC变化,我们开发了一种自动化算法。对于每个喉区极光,该算法从SSUSI观测中提取其最高与最低磁纬度(Magnetic latitude, MLAT),以及其晨侧和昏侧边缘位置,如图1A中的红点所示。基于这些特征点的坐标,我们定义了一个扇形的极光区域:该区域的上边界由最高纬度点所在的圆弧界定,下边界则由最低纬度点向赤道方向扩展2° MLAT形成;同时,沿晨昏方向,以边缘点为基准分别向外延伸0.2 MLT,构成区域的侧向边界。如图1A所示,两个红框分别标示了由两个喉区极光结构所确定的极光区域。该扇形区域能够根据每个喉区极光的具体形态自适应调整,从而实现目标区域的灵活与准确刻画。

该极光区域从MLT-MLAT坐标映射到AACGM坐标,以匹配GPS/TEC网格,如图1C中的灰色区域所示。算法将扫描每个时间戳上该区域内所有GPS/TEC网格点,并

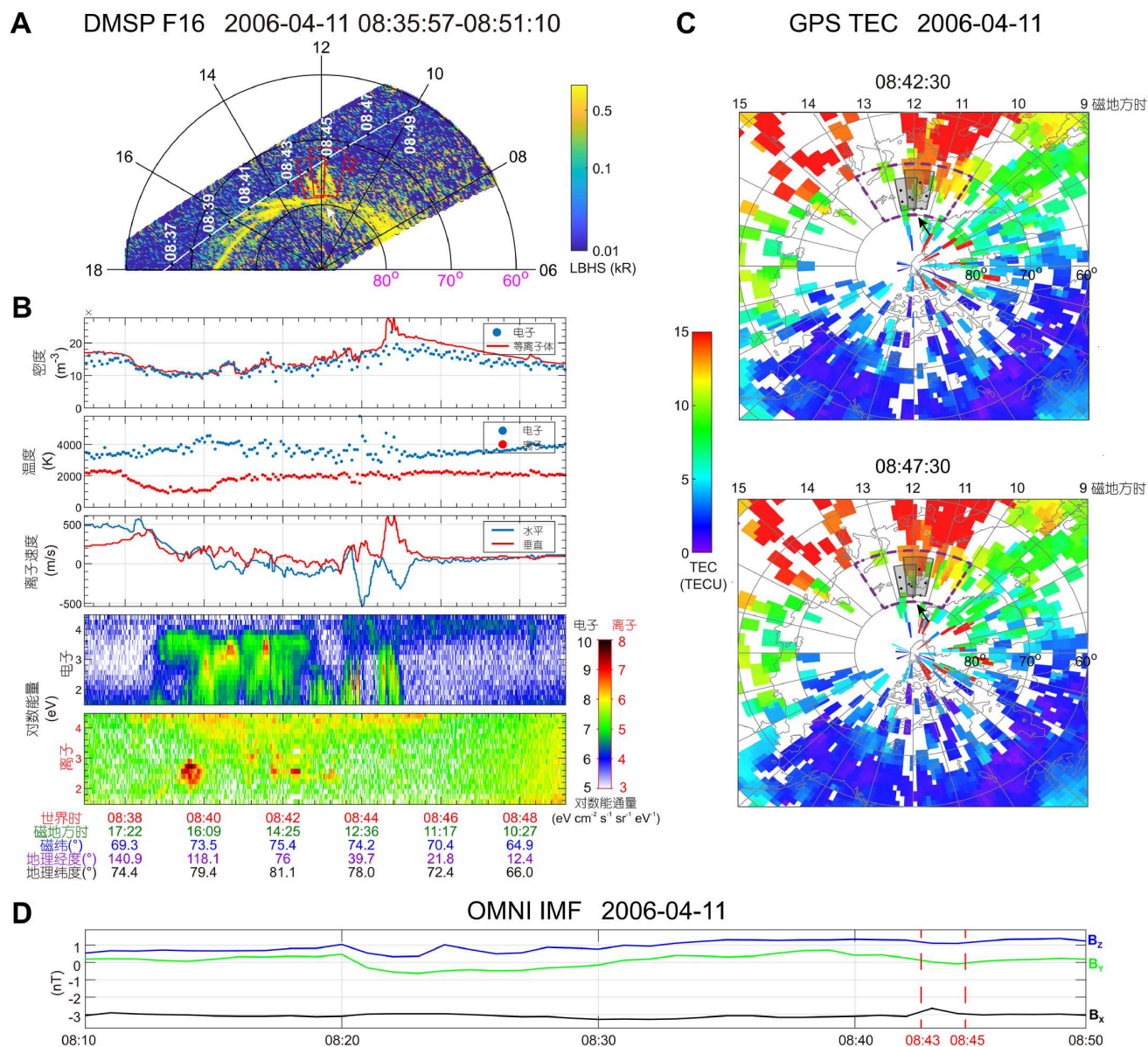


图1 2006年4月11日DMSP观测的喉区极光事件及相应的GPS/TEC和IMF数据。(A) LBHS波段的极光图像, 时间范围为08:35:57至08:51:10 UT, 叠加了白色的DMSP卫星轨迹。红点标示出喉区极光的最低/最高MLAT和晨/昏边界。红框标示了由喉区极光形状确定的极光区域。(B) 沿DMSP轨迹的粒子数据。各子图从上至下分别显示: 电子密度(蓝色)与等离子体密度(红色)、电子温度(蓝色)与离子温度(红色)、离子水平漂移(蓝色)和垂直漂移(红色), 以及电子和离子的微分能通量谱图(能量范围30 eV至30 keV)。(C) 相应的GPS/TEC图, 数据以AACGM坐标显示, 覆盖DMSP卫星穿越喉区极光前约5分钟及穿越期间。黑点和灰色区域分别对应极光图像中的红点和红框。白色和黑色箭头指示图(A)和(C)中的相同坐标位置。紫色虚线标示了正午极光区域(10–14 MLT, 70°–80° MLAT), 背景平均TEC水平由此区域观测值计算得到。TEC单位(TECU)值为 10^{16} 电子/ m^2 。(D) OMNI记录的IMF三分量。红色虚线标示DMSP观测到喉区极光的时段

记录有效的TECU值。若极光区域内超过一半的网格点上TECU值为空, 则认为该喉区极光事件缺乏可靠的GPS/TEC数据覆盖。通过此方法, 我们筛选出70例具有可靠GPS/TEC数据覆盖的喉区极光事件, 用于后续统计分析。

对于每个事件, 算法还计算了高纬正午极光区域(10–14 MLT, 70°–80° MLAT; 图1C中的紫色虚线标示)内的背景平均TEC。限定该区域的纬度范围是为了避免

低纬区高TEC背景和极盖区极低TEC水平可能带来的误差。所有事件的背景平均值见附表S1。

3 观测结果

3.1 喉区极光与TEC增强的统计相关性

我们对70个喉区极光事件进行了系统分析。对于每

个事件,我们记录了喉区极光的观测时间、MLT扇区和最低MLAT(见附表S1),并应用2.3节中的算法提取极光区域内的峰值TECU值和背景平均值。附表S1的第六列列出了喉区极光观测前最近一次GPS/TEC观测中极光区的峰值TECU。通过比较这些峰值与背景平均TEC水平,我们将喉区极光事件分为两类:一类伴随TEC增强,即极光区域内的峰值TECU超过背景均值;另一类无TEC增强,即峰值TECU等于或低于均值。例如,在图1C的示例中,极光区域(灰色区域)内的峰值约为12.1和14.6 TECU,而背景均值约为11.58 TECU,因此该事件被归类为“有TEC增强”。基于此分类方法,图2A展示了两类事件在不同MLT扇区的数量统计结果。结果显示,70个喉区极光事件中有50个(约71.4%)伴有TEC增强。值得注意的是,无论是否伴有TEC增强,喉区极光事件均更多地出现在午后扇区。这很可能是由于DMSP卫星轨道限制和晨侧GPS/TEC覆盖率较低共同所致,而非相关性的晨昏偏好。总而言之,喉区极光与TEC增强之间存在明显的相关性。

通过追踪喉区极光观测前至少一小时的所有GPS/TEC数据,我们进一步利用算法确定了这些TEC增强在极光区域内的持续时间(详见附表S1第八列)。在这50个关联事件中,TEC增强在极光区域内平均持续约30.8分钟,最短持续时间为5分钟(图2B)。在统计TEC增强的持续时间时,我们将超过60分钟的持续时间截断为60分钟,因此平均持续时间可能被低估。此外,TEC数据的5分钟时间分辨率也会引一定误差。尽管如此,极光区域内的TEC增强持续时间仍远长于典型的喉区极光持续时间(Han等, 2015, 2017)。基于此,我们认为这些与喉区极光相关的TEC增强并非由极光沉降产生,而是源于其他过程。

3.2 先于喉区极光出现的羽流状TEC增强结构

为探究与喉区极光相关的TEC增强的演化过程,我们分析了喉区极光观测前几十分钟的GPS/TEC数据。图3展示了在相对稳定的IMF条件下两个代表性事件的TEC演化情况。

2006年4月11日,DMSP F16卫星在约08:43至08:45 UT期间,于11–13 MLT之间观测到两个喉区极光结构(图1A)。图3A显示了从08:02:30至08:37:30 UT的GPS/TEC图,其中TEC增强(≥ 15 TECU)起源于低于 70° MLAT的低纬地区,并逐渐向高纬正午区域延伸,约08:17:30 UT在高纬区域开始演化出清晰的羽流状结构。至08:27:30 UT,这些TEC增强到达11–12 MLT、约 74° MLAT的极光区,邻近黑点勾勒的喉区极光结构的晨侧和赤道侧,此时距离喉区极光观测约早15分钟。在后续观测中,TEC羽流逐渐扫过极光区域并向昏侧移动。值得注意的是,极光沉降区内的TECU值低于周围的羽流状TEC增强。尽管左侧的喉区极光结构在此时间窗口内因GPS/TEC数据缺失未能显示对应的TEC羽流,但在稍后的08:42:30 UT(图4A)和08:47:30 UT(图4B)的TEC图中,可见清晰的TEC羽流在12 MLT附近向高纬延伸。

2010年10月29日,DMSP F17卫星在约01:38至01:39 UT期间,于13–14 MLT之间同样观测到两个喉区极光(图4E)。图3B显示了从01:02:30至01:37:30 UT的GPS/TEC图,在12和14 MLT扇区的低纬(低于 70° MLAT)区域始终存在强度超过10 TECU的密度增强。而在12 MLT扇区的高纬约 75° MLAT处,自01:02:30 UT起也出现了一些看似孤立的TEC增强结构。随着时间推移,后续图像表明这些高纬增强结构与低纬的背景增强连接在一起,这意味着高纬的TEC增强实际上是延伸出的羽流状结构。至

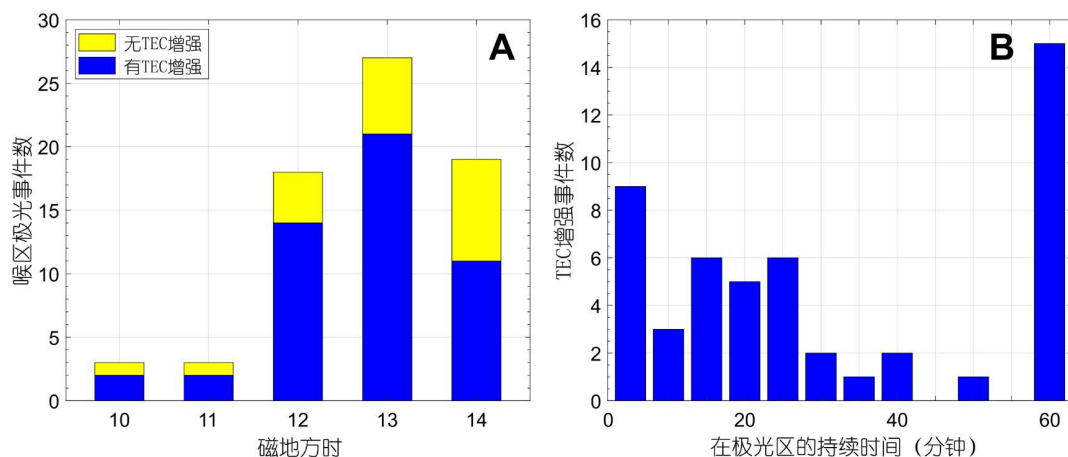


图2 70个喉区极光事件的统计结果。(A) 喉区极光观测期间,伴随(蓝色)与不伴随(黄色)TEC增强的事件数量随MLT扇区的分布。当极光区域内的峰值TECU超过背景均值时,事件被归类为“有TEC增强”。(B) TEC增强在极光区域内的持续时间,从峰值超过背景均值的时间截开始计算

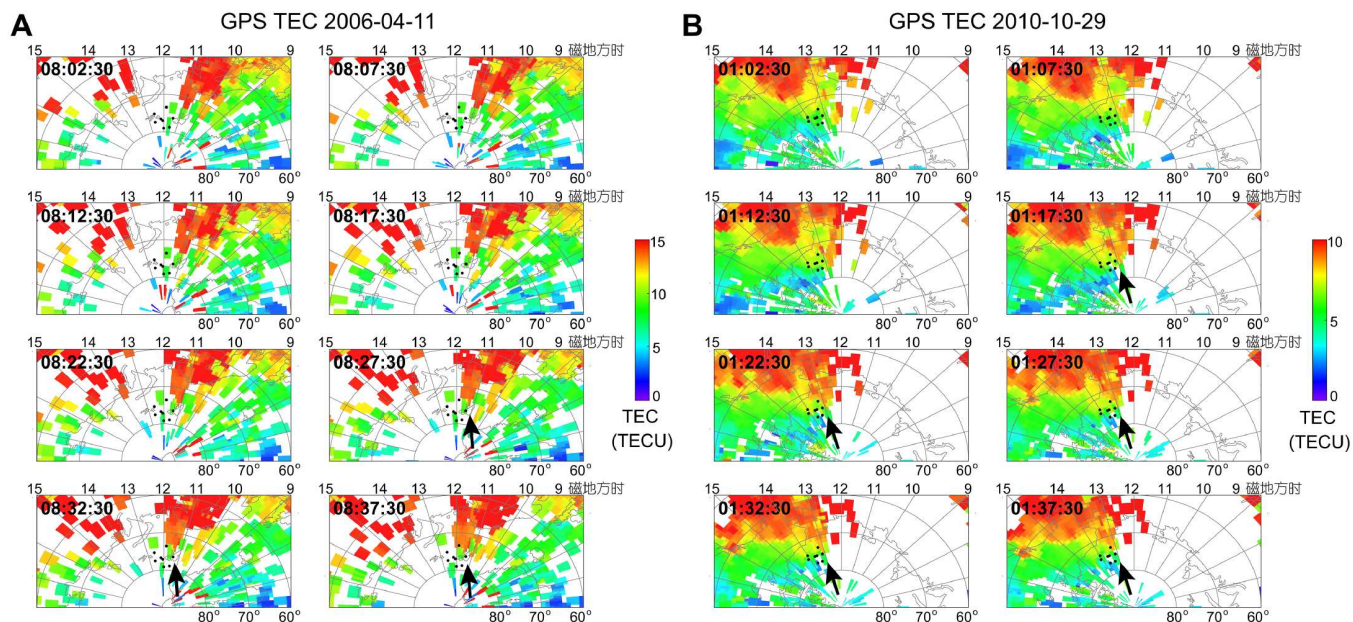


图3 2006年4月11日(A)和2010年10月29日(B)喉区极光观测前约40分钟的GPS/TEC图。TEC图以与图1C相同的格式绘制在AACGM坐标中, 仅显示日侧区域。黑点标示算法识别的喉区极光轮廓点; 箭头指示向这些区域延伸的羽流状TEC结构。2006年4月11日的喉区极光观测时间约为08:43–08:45 UT(参见图1D); 2010年10月29日的喉区极光观测约为01:38–01:39 UT(参见图4E)

01:17:30 UT, 这些TEC羽流已向昏侧移动至喉区极光区域的晨侧及赤道侧边缘, 较喉区极光观测时间提前约25分钟。此后, 羽流在13 MLT附近维持或继续缓慢向昏侧漂移, 而在喉区极光出现后呈现出向低纬回移的趋势。对于左侧的喉区极光结构, 从01:12:30 UT开始, 其赤道侧亦出现了约8 TECU的密度增强。与前一事件类似, 极光沉降区内并未观测到与周围羽流强度相当的TEC增强。以上观测表明, 本事件中的TEC增强结构同样起源于低纬区域, 并逐渐向高纬极光区输运和延伸, 在喉区极光出现之前已到达邻近区域并改变局地电离层条件。

我们注意到, 这些羽流状TEC增强的走向与相邻喉区极光一致(更多事件见Qiu, 2025), 暗示喉区极光的形态很可能与TEC羽流边界相关。我们认为这些羽流状TEC增强结构有效地为后续喉区极光形成提供了所需的电离层预置条件。

3.3 喉区极光与TEC增强结构的粒子观测

DMSP卫星提供了沿其轨迹的粒子观测数据, 包括电子和等离子体密度、离子漂移速度(水平和垂直)以及电子和离子的微分能通量谱图(30 eV至30 keV)(图4B和E)。通过将DMSP卫星轨迹叠加到GPS/TEC图像上(图4A和D), 我们详细分析了由TEC增强结构调制的电离层变化和喉区极光的粒子沉降特征。

2006年4月11日, 在约08:43:38–08:43:55 UT和

08:44:37–08:44:52 UT(图4B紫色条)分别观测到两个喉区极光(标记为“1”和“2”)的低能电子沉降。类似地, 2010年10月29日, 喉区极光“3”和“4”(图4C)在约01:38:14–01:39:32 UT期间的低能电子沉降在图4E中以紫色条标记。喉区极光轮廓在DMSP图像和GPS/TEC图中分别由红点和黑点勾勒。

在这两个事件中, 羽流状TEC增强结构均紧邻喉区极光区域的晨侧边缘(图4A和4D)。针对第一个事件(图4B), 在喉区极光“1”和“2”的电子沉降期间, 垂直离子速度分别达到约300 m/s和600 m/s(正值表示向上), 同时电子密度也发生显著变化, 表明极光沉降引起了显著的上行离子通量。值得注意的是, 在两个喉区极光晨侧、并无电子沉降的区域, 出现了约300 m/s的上行速度平台, 恰好对应羽流状TEC增强区域。这一现象说明, 在本事件中, 仅电离层密度增强本身即引发了离子上行。类似地, 这种电离层密度增强的垂直影响在第二个事件中也被观察到: 在图4E箭头所示, 在沉降区外出现了相对微弱的电子密度变化, 其位置与喉区极光“3”昏侧约8 TECU的TEC增强区(图4D红圈)吻合。综上所述, TEC羽流所代表的电离层密度增强, 能够引起可识别的离子上行以及上层电离层的密度扰动。

在喉区极光“1”和“2”中, 极向离子速度(负水平速度)在电子沉降区与TEC羽流的交界处达到最大值, 约500 m/s。该极向漂移速度不仅反映了高TEC背景的极向

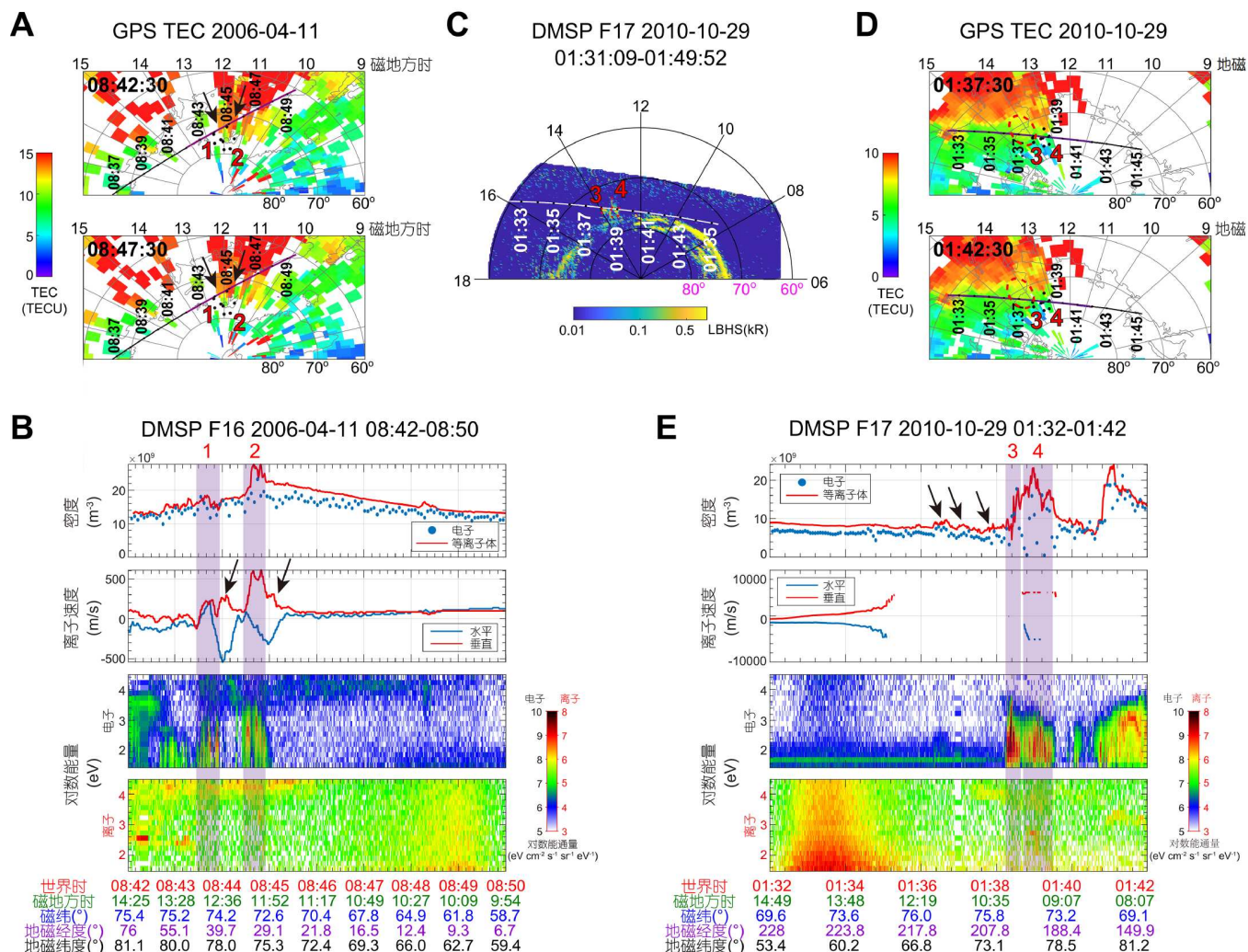


图4 2006年4月11日和2010年10月29日的GPS/TEC图和DMSP粒子观测数据。(A、D) AACGM坐标系中的GPS/TEC图, 叠加了DMSP轨迹(黑线)和勾勒的喉区极光位置(黑点)。图(A)中的黑色箭头和图(D)中的红圈标示羽流状TEC增强结构和区域。(B、E)沿DMSP卫星轨迹的粒子数据: 电子和等离子体密度、离子漂移速度(水平和垂直)以及电子和离子的微分能通量谱图(30 eV至30 keV)。紫色条标示通过沉降电子识别的喉区极光区间。(C) 01:31:09-01:49:52 UT期间的LBHS波段极光图像, 叠加DMSP轨迹(白色), 绘制于MLT-MLAT坐标中。标签“1”至“4”标示四个喉区极光结构

运输(Zou等, 2021), 更重要的是, 边界处的极向速度峰值可能标志着沿边界流动的离子流。此类离子流与边界处存在的陡峭密度梯度, 共同构成了符合IFI理论预期的典型观测特征。尽管喉区极光“3”和“4”缺少可用的离子漂移数据, 但在01:35 UT左右(当DMSP卫星接近15 MLT附近的TEC增强时), 上行和极向速度均显示出增加趋势, 暗示此处也可能存在由TEC增强引起的类似离子上行和极向离子流。

综上所述, 这些观测结果表明, 与喉区极光相伴的TEC增强能够诱发离子上行和上层电离层密度变化。而极光结构与电离层密度扰动共存, 并在其边界处同时观测到密度梯度和离子流, 这些现象进一步支持了IFI理论(Lysak和Song, 2002)。因此, 我们认为IFI正是沿此类密

度边界发生与发展, 从而调制形成与TEC羽流边界走向一致的喉区极光结构。

4 讨论

先前研究指出, 当羽流状电离层密度增强通过大尺度对流输运至粒子沉降或对流增强的区域时, 可产生显著的离子上行流(Lotko, 2007; Yau等, 2011), 并可能进一步发展为离子出流, 从而影响磁层过程(Strangeway等, 2005)。此外, 与电离层TEC增强相对应的等离子体层羽流可直接延伸至磁层顶, 对日侧重联率产生调制作用(Walsh等, 2014)。然而, 上述过程通常出现在伴随典型暴时密度增强(Storm Enhanced Density, SED)的磁暴期间, 其TEC值可达数十TECU。相比之下, 本研究中与喉

区极光高度相关(约71.4%)的羽流状TEC增强,很少出现在南向IMF(6例)或准径向IMF(14例)条件下(见附表S1),并且本研究中的TEC增强幅度普遍约为10 TECU,远低于典型的SED强度。因此,尽管这些相对温和的TEC增强能够驱动上行离子流(图4),但它们可能不足以引发显著的离子出流去调制磁层/磁层顶过程。相反,本研究中大部分事件对应的相对平静的太阳风和IMF条件更有利于IFI的发展(Atkinson, 1970; Sato, 1978)。此外,这些与TEC增强相关的喉区极光事件在IMF条件上呈现出的非径向偏好与以往报道的喉区极光发生率的准径向偏好(Han等, 2017)不同,可能进一步暗示,IFI机制本身即能作为一种驱动喉区极光的机制。

这些相对温和的电离层密度增强的反馈作用可通过喉区极光模型(Han, 2019)和IFI理论得到更好的理解。如长时间序列的GPS/TEC图像所示(图3),TEC增强从低纬延伸到喉区极光出现的高纬正午区域。在电离层背景对流电场的作用下,当局部高密度结构漂移进入极区时,其内部的电荷分离会诱发极化电场以维持电流的连续性(Pudovkin, 1974; Takahashi等, 2019)。在该高密度区域内,皮特森电导率和霍尔电导率随之增加。同时,沿羽流状TEC增强结构的边界存在陡峭的密度梯度和显著的离子流(图4)。因此,在羽流边界的陡峭密度梯度处,电场和电导率的变化十分显著。这将激发场向电流扰动和向上传播的阿尔芬波(Lysak和Song, 2002; Sato, 1978),从而促进局部电离层-磁层反馈系统中IFI的发展及极光弧的形成(Ogawa和Sato, 1971; Sato和Holzer, 1973)。实际上,极光弧是已建立的IFI系统的可见表现,与电离层密度扰动所引发的IFI共同存在。我们的观测(图4)也体现了这一点:喉区极光和羽流状TEC增强分别位于密度边界两侧,且走向一致。此外,理论和模拟研究指出,高电导率不利于IFI的建立(Lysak和Song, 2002)。这可能正是区分本研究中温和TEC增强引发的电离层反馈效应与暴时SED相关耦合效应的关键,但具体细节仍需进一步研究。

我们的统计结果还显示,一小部分喉区极光事件(20例)在观测前未出现TEC增强(图2A)。这与近期研究相符,该研究指出,小尺度、瞬态的喉区极光可由磁鞘高速流触发局部磁层顶重联而直接产生(Wang等, 2025)。这类事件在形态特征和持续时间上,应显著区别于本研究关注的、与电离层密度变化相关的喉区极光。值得注意的是,后者大多发生在相对平静、非径向的太阳风条件下(Qiu, 2025),而这些条件通常都不利于磁鞘高速流的形成。需要说明的是,我们的数据库中包含了14例在准径向IMF条件下伴随TEC增强的喉区极光,这可能反映

了电离层反馈与上游驱动共同作用的混合机制。然而,更多在非径向IMF条件下与TEC增强相关的事件(36例)表明,电离层反馈本身足以作为一种新的机制驱动喉区极光的形成。所以,我们认为至少存在两种类型的喉区极光,分别由电离层反馈效应或磁层顶上游扰动驱动,从而表现出不同的观测特征。

5 结论

本研究通过观测分析,揭示了电离层密度增强与喉区极光之间存在显著的统计关联(约71.4%)。基于GPS/TEC图像的分析表明,这些密度增强呈现为羽流状结构,由低纬延伸至高纬正午扇区,并与后续观测到的喉区极光走向一致。二者的高相关性和时空一致性,符合IFI理论预期。此外,研究还发现这些TEC羽流能够产生可测量的上行和极向离子流,并引发顶部电离层的密度扰动;同时,喉区极光的电子沉降区在紧邻TEC羽流的昏侧边界。边界处存在的显著密度梯度以及TEC增强所带来的垂直电离层影响,均有利于IFI发展。我们认为,正是在此边界区域激发并建立的IFI,调制并导致了喉区极光与TEC羽流在走向上的一致性。综上,本研究为“局部电离层密度扰动通过引发IFI,进而驱动喉区极光及相应磁层顶裂缝形成”的观点提供了关键的观测证据,强调了电离层反馈效应在日侧太阳风-磁层-电离层耦合过程中的重要性。

致谢 GNSS TEC处理及本研究所使用的CEDAR Madrigal 开放数据库由麻省理工学院Haystack天文台提供。

补充材料 本文的补充材料见网络版(<http://earthcn.scichina.com>)。补充材料为作者提供的原始数据,作者对其学术质量和内容负责。

数据可用声明 本研究中使用的IMF数据来源于OMNI数据库的协同数据分析网站(CDAWeb, https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/pub/data/omni/omni_cdaweb/hro_1min/)。GPS TEC数据可公开从Madrigal实验列表(List Madrigal experiments)获取。DMSP数据来自https://ssusi.jhuapl.edu/data_retriver和<https://ngdc.noaa.gov/eog/download.html>。本文使用的喉区极光事件及相关GPS/TEC图可从Qiu(2025)获取。

参考文献

- Atkinson G. 1970. Auroral arcs: Result of the interaction of a dynamic magnetosphere with the ionosphere. *J Geophys Res*, 75: 4746–4755
- Borovsky J E. 2014. Feedback of the magnetosphere. *Science*, 343: 1086–1087

- Borovsky J E. 2021. Is our understanding of solar-wind/magnetosphere coupling satisfactory? *Front Astron Space Sci*, 8: 634073
- Han D S. 2019. Ionospheric polarization electric field guiding magnetopause reconnection: A conceptual model of throat aurora. *Sci China Earth Sci*, 62: 2099–2105
- Han D S, Chen X C, Liu J J, et al. 2015. An extensive survey of dayside diffuse aurora based on optical observations at Yellow River Station. *JGR Space Phys*, 120: 7447–7465
- Han D S, Hietala H, Chen X C, et al. 2017. Observational properties of dayside throat aurora and implications on the possible generation mechanisms. *JGR Space Phys*, 122: 1853–1870
- Han D S, Liu J J, Chen X C, et al. 2018. Direct evidence for throat aurora being the ionospheric signature of magnetopause transient and reflecting localized magnetopause indentations. *JGR Space Phys*, 123: 2658–2667
- Han D S, Nishimura Y, Lyons L R, et al. 2016. Throat aurora: The ionospheric signature of magnetosheath particles penetrating into the magnetosphere. *Geophys Res Lett*, 43: 1819–1827
- Hardy D A, Holeman E G, Burke W J, et al. 2008. Probability distributions of electron precipitation at high magnetic latitudes. *J Geophys Res*, 113: 2007JA012746
- Hardy D A, Schmitt L K, Gussenhoven M S, et al. 1984. Precipitating electron and ion detectors (SSJ/4) for the block 5D/Flights 6-10 DMSP (Defense Meteorological Satellite Program) satellites: Calibration and data presentation. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1984peid.rept....H>
- Kivelson M G, Ridley A J. 2008. Saturation of the polar cap potential: Inference from Alfvén wing arguments. *J Geophys Res*, 113: 2007JA012302
- Knight H K, Strickland D J, Hecht J H, et al. 2008. Evidence for significantly greater N₂ Lyman-Birge-Hopfield emission efficiencies in proton versus electron aurora based on analysis of coincident DMSP SSUSI and SSJ/5 data. *J Geophys Res*, 113: 2007JA012728
- Lockwood M. 1997. Relationship of dayside auroral precipitations to the open-closed separatrix and the pattern of convective flow. *J Geophys Res*, 102: 17475–17487
- Lotko W. 2007. The magnetosphere–ionosphere system from the perspective of plasma circulation: A tutorial. *J Atmos Sol-Terrestrial Phys*, 69: 191–211
- Lysak R L. 1991. Feedback instability of the ionospheric resonant cavity. *J Geophys Res*, 96: 1553–1568
- Lysak R L, Song Y. 2002. Energetics of the ionospheric feedback interaction. *J Geophys Res*, 107: SIA 6-1-SIA 6-13
- Merkin V G, Goodrich C C. 2007. Does the polar cap area saturate? *Geophys Res Lett*, 34: 2007GL029357
- Moen J, Evans D, Carlson H C, et al. 1996. Dayside moving auroral transients related to LLBL dynamics. *Geophys Res Lett*, 23: 3247–3250
- Ni B, Thorne R M, Zhang X, et al. 2016. Origins of the Earth's diffuse auroral precipitation. *Space Sci Rev*, 200: 205–259
- Ogawa T, Sato T. 1971. New mechanism of auroral arcs. *Planet Space Sci*, 19: 1393–1412
- Paxton L J, Morrison D, Zhang Y, et al. 2002. Validation of remote sensing products produced by the Special Sensor Ultraviolet Scanning Imager (SSUSI): A far UV-imaging spectrograph on DMSP F-16. *Proceedings of the SPIE*, 2002 Jan; 4485: 338–348 doi: 10.1117/12.454268
- Pudovkin M I. 1974. Electric fields and currents in the ionosphere. *Space Sci Rev*, 16: 727–770
- Qiu H. 2025. Throat Aurora Events in the Northern Hemisphere with Corresponding GPS-TEC maps and IMF conditions from 2005 to 2010. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15238357>
- Qiu H X, Han D S, Wang B Y, et al. 2022. In situ observation of a magnetopause indentation that is correspondent to throat aurora and is caused by magnetopause reconnection. *Geophys Res Lett*, 49: e2022GL099408
- Rideout W, Coster A. 2006. Automated GPS processing for global total electron content data. *GPS Solut*, 10: 219–228
- Sato T. 1978. A theory of quiet auroral arcs. *J Geophys Res*, 83: 1042–1048
- Sato T, Holzer T E. 1973. Quiet auroral arcs and electrodynamic coupling between the ionosphere and the magnetosphere, 1. *J Geophys Res*, 78: 7314–7329
- Strangeway R J, Ergun R E, Su Y J, et al. 2005. Factors controlling ionospheric outflows as observed at intermediate altitudes. *J Geophys Res*, 110: 2004JA010829
- Takahashi T, Virtanen I I, Hosokawa K, et al. 2019. Polarization electric field inside auroral patches: Simultaneous experiment of EISCAT radars and KAIRA. *JGR Space Phys*, 124: 3543–3557
- Walsh B M, Foster J C, Erickson P J, et al. 2014. Simultaneous ground- and space-based observations of the plasmaspheric plume and reconnection. *Science*, 343: 1122–1125
- Wang Z, Han D, Chen X, et al. 2025. Observations of a throat aurora directly driven by magnetosheath high-speed jet. *JGR Space Phys*, 130: e2024JA033276
- Wang C, Xia Z Y, Peng Z, et al. 2013. Estimating the open magnetic flux from the interplanetary and ionospheric conditions. *JGR Space Phys*, 118: 1899–1903
- Yau A W, Peterson W K, Abe T. 2011. Influences of the Ionosphere, Thermosphere and Magnetosphere on Ion Outflows. In: Liu W, Fujimoto M, eds. *The Dynamic Magnetosphere*. Dordrecht: Springer. 283–314
- Zou S, Ren J, Wang Z, et al. 2021. Impact of storm-enhanced density (SED) on ion upflow fluxes during geomagnetic storm. *Front Astron Space Sci*, 8: 746429

(责任编辑: 乐超)