

LIU Yingyu, XING Zanyang, FENG Huiting, CHEN Xiangcai, ZHANG Qinghe, HAN Desheng. Comparative analysis of optical observation characteristics between PMAFs and throat aurora (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2021, **41**(5): 737-745. DOI:10.11728/cjss2021.05.737

极向运动极光结构和喉区极光光学 观测特征的对比分析*

刘映好^{1,2} 邢赞扬¹ 冯惠婷³

陈相材⁴ 张清和¹ 韩德胜³

1(山东大学空间科学与物理学院 威海 264209)

2(中国科学技术大学地球和空间科学学院 合肥 230026)

3(同济大学海洋与地球科学学院 上海 200092)

4(中国极地研究中心 上海 200136)

摘要 利用中国北极黄河站高时间分辨率的三波段全天空成像仪极光观测数据, 联合太阳风和行星际磁场等观测, 分析了极向运动极光结构 (PMAFs) 和喉区极光的形成及演化特征. 研究发现: 一系列 PMAFs 与喉区极光事件同时出现在观测视野中, 其中 PMAFs 主要发生在日侧极隙区极光卵赤道向边界的极向一侧, 沿东西方向分布, 点亮后向高纬运动; 喉区极光紧靠 PMAF 一侧发生, 从极光卵赤道向边界向低纬延伸, 沿南北方向分布, 点亮后向高纬偏西方向运动; 观测期间 PMAFs 发生频率高于喉区极光; 当 PMAFs 与喉区极光同时出现时, PMAFs 可以与喉区极光几乎同时出现或略晚于喉区极光出现, 持续时间较喉区极光短. 观测结果表明: 与 PMAF 相对应的磁层顶重联过程和与喉区极光对应的磁层顶凹陷导致的磁重联过程在日侧磁层顶上的相邻区域分别发生, 两种极光事件的形成过程相对独立, 可能不存在相互触发关系.

关键词 极向运动极光结构, 喉区极光, 弥散极光, 磁重联, 极隙区

中图分类号 P 352

Comparative Analysis of Optical Observation Characteristics between PMAFs and Throat Aurora

LIU Yingyu^{1,2} XING Zanyang¹ FENG Huiting³ CHEN Xiangcai⁴

ZHANG Qinghe¹ HAN Desheng³

1(School of Space Science and Physics, Shandong University, Weihai 264209)

2(School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

* 国家自然科学基金项目 (41604139, 41874170, 41831072), 电波环境特性及模化技术重点实验室项目 (6142403180103, 6142403180102) 和中国电波传播研究所项目 (A132101W02) 共同资助

2020-06-01 收到原稿, 2021-03-29 收到修定稿

E-mail: xingzanyang@sdu.edu.cn

3(School of Ocean and Earth Science, Tongji University, Shanghai 200092)

4(Polar Research Institute of China, Shanghai 200136)

Abstract Both Poleward Moving Auroral Forms (PMAFs) and throat aurora are typical transient auroral structures occurred near the magnetic noon. Previous studies have shown that throat auroras contain PMAFs. However, their characteristics and the correlation between these two auroras are not clear yet. By using the observation data of the high-resolution All-Sky Imagers (ASI) at the Yellow River Station in Arctic, together with solar wind and Interplanetary Magnetic Field (IMF) observations, the evolution characteristics of polar ionospheric PMAFs and the throat aurora are detailedly analyzed. It was found that a series of PMAFs and throat auroras appeared in the field of view of the all-sky imagers of the Yellow River Station. Among them, PMAFs mainly occurred in polar side of the equatorial boundary of aurora oval dayside of cusp area, were distributed along the east-west direction, and extended to the high latitude after brightening. Throat auroras were distributed along the north-south direction, which extended to low latitude from equatorward of discrete auroral oval and moved to the west after brightening, usually exist in the side of PMAFs. The frequency of PMAFs during observed period is higher than that of the throat aurora. When PMAFs and the throat aurora appear simultaneously, PMAFs can appear almost simultaneously with throat aurora or slightly later than throat aurora, and have a shorter duration than throat aurora. Based on the above observations, we suggest that magnetopause reconnection corresponding to PMAFs and magnetopause reconnection mapping to throat aurora caused by magnetopause indentations are two relatively independent processes happening in adjacent magnetopause region. The formation processes of the two auroral events are relatively independent, and there may be no mutual triggering relationship.

Key words PMAFs, Throat aurora, Diffuse aurora, Reconnection, Cusp

0 引言

极向运动极光结构 (Poleward Moving Auroral Forms, PMAF) 是发生在磁正午附近 09:00—15:00 MLT (磁地方时) 的典型瞬态极光现象, 属于分立极光的一种, 一般呈东西向分布. PMAF 首先在日侧极光卵的赤道向边界点亮, 然后极向运动并消褪, 是磁层顶重联伴随的磁层附近的通量传输事件 (Flux transfer event, FTE) 对应的电离层特征^[1-3]. 目前, 许多研究认为 PMAF 伴随的沉降电子能量与源于磁鞘沿开放场线未经加速过程沉降到电离层的等离子体特征能量吻合, 其形成和演化反映了日侧磁层顶重联发生后磁通量管在太阳风带动下向磁尾方向运动的动力学过程^[4-8].

喉区极光与 PMAF 同属磁正午附近的典型极光现象. 喉区极光是在电离层对流喉区观察到的, 呈南北向分布的一种特殊瞬态分立极光结构^[9]. 当条带

状弥散极向延伸并与磁正午附近的分立极光卵接触时, 喉区极光于极光卵赤道向点亮, 向低纬侧延伸并常常向西运动^[9]. 在此演化过程中, 点亮的喉区极光可能与开放磁力线对应, 变暗的过程则可能与磁力线闭合相关^[10]. 已有研究表明, 喉区极光对应磁层顶局地凹陷变形结构^[11], 与磁层顶重联相关^[12], 反映出磁层顶凹陷结构发生重联后在太阳风拖拽下向磁尾方向移动的过程.

PMAF 和喉区极光都是发生在日侧磁正午附近对应磁重联过程的极光现象, 且喉区极光有时也具有极向运动特征^[10]. 然而二者是否存在相互触发关系或者其他关联尚不清楚, 需要做进一步研究. 本文主要利用中国北极黄河站极光全天空 CCD 成像仪的极光观测数据, 寻找 2003—2017 年极光观测数据中 PMAF 和喉区极光的协同观测事件, 联合 OMNI 数据库提供的行星际磁场 (IMF) 和太阳风等信息, 进行 PMAF 和喉区极光形态及运动特征的对比

分析, 对二者的发生位置、时间、频率等开展更深入的研究, 进一步推知二者的产生机制以及是否存在相互触发关系.

1 数据来源

中国北极黄河站 (Yellow River Station, YRS) 位于北极斯瓦尔巴特群岛新奥尔松地区 (地理位置: 78.92°N, 11.93°E; 磁纬度: 76.24° MLAT), 地理位置优越, 日侧位于极隙区纬度带, 极夜时间长达 4 个月, 是国际上少数能够开展日侧极光观测的台站. 2003 年, 北极黄河站建立拥有三台极光全天空成像仪 (All-sky imager, ASI) 的极光观测系统^[4,13], 对极光在三个波段 (427.8 nm, 557.7 nm, 630.0 nm) 进行同时、连续的观测. 每个成像仪均配备有 CCD 相机, 分辨率为 512 pixel×512 pixel, 采集的时间分辨率为 10 s, 包括 7 s 曝光时间和 3 s 数据存储时间. 自 2003 年起, 黄河站进行了高时间分辨率的数据采集, 现已积累十余年极光数据, 为研究日侧各种瞬态极光现象提供了重要条件.

本文使用的是 OMNI 数据库*提供的太阳风和行星际磁场数据. OMNI 数据库利用包含 ACE 卫星在内的多颗卫星观测, 提供超过 5 个太阳活动周内的 1 AU 处太阳风观测数据. 在对应于拉格朗日 L1 点的局地观测参数中, 太阳风质子数密度 (N_{sw})、太阳风速度 (v) 和太阳风动压 (P_{dyn}) 为基本太阳风参数, GSM 坐标系下 IMF 的三个分量 B_x , B_y , B_z 为行星际磁场数据. 在这项研究中, 主要关注 PMAFs 和喉区极光这两种瞬态极光现象及其相互间关系.

2 PMAFs 和喉区极光光学特征对比

从 2003—2017 年的极光观测数据中寻找同时观测到的 PMAFs 和喉区极光事件, 从中挑选出发生在 2007 年 1 月 16 日 09:00—09:45 UT 期间的典型事件. 在此期间, ASI 等地面设备位于午后, 记录了两种极光结构的详细演化过程.

2.1 太阳风和 IMF 条件

图 1(a) 给出了 ACE 卫星在 2007 年 1 月 16 日 09:00—09:45 UT 期间观测的 IMF 条件、太阳风等离子体和地磁数据, 从上至下分别为 GSM 坐标系

下 IMF 的三个分量 B_x , B_y , B_z 以及太阳风质子数密度 (N_{sw})、太阳风速度 (v) 和太阳风动压 (P_{dyn}). 其中, IMF 和太阳风参数考虑了 7 min 时延 (其中, 从弓激波传输到磁层顶日下点 5 min, 再到电离层 2 min). 由图 1(a) 可知, 该时间段内, 行星际磁场 (IMF) 相对较小, 其中 B_x 分量保持负向, B_y 分量保持正向, B_z 分量从北向转为南向并且中间有几次变向小扰动; 太阳风质子数密度在 $2\sim 5.5\text{ cm}^{-3}$ 内波动; 太阳风速度保持在 $610\sim 630\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$; 致使太阳风动压在 $2.5\sim 4\text{ nPa}$ 内保持基本稳定. 图 1(b) 给出了黄河站全天空成像仪三波段的极光 Keogram 图, 即抽取每一帧极光图像磁子午线上的极光强度, 按照时间顺序排列, 并表示为天顶角和时间的函数, 表征了沿磁子午线的极光强度变化. 左侧纵坐标为天顶角度, 正数为磁北, 负数为磁南. 中间三个 Keogram 图分别表示同一时间段在三个波段的极光发光强度, 由上到下分别为 427.8 nm, 557.7 nm 和 630.0 nm. PMAFs 在 Keogram 图上的表征为沿时间轴向高纬一侧倾斜的结构. 基于此, 在图 1(b) 中用黑色线段表示 6 个 PMAFs 事件. 喉区极光是南北向分布的分立极光结构, 由条带状弥散极光从低纬向高纬延伸, 与极光卵接触后点亮并运动, 位于极光卵的低纬侧^[9], 在 Keogram 图中表现为在极光卵赤道向边界处朝向低纬方向突出的一种结构. 红色线段标示了持续发生喉区极光的两个时间段, 红色箭头标示了两个事件在对应时间段内点亮时边缘清晰的结构. 由图 1 可以看出, PMAFs 与喉区极光都基本发生在 557.7 nm 和 630.0 nm 波段, 在 427.8 nm 波段非常弱.

从图 1 还可以看到, 该观测期间共出现 6 次 PMAFs 事件和 2 次喉区极光事件. 其中, 2 个 PMAFs 事件发生在 IMF B_z 南向期间, 开始时间分别为 09:02 UT 和 09:18 UT, 4 个 PMAFs 发生在 IMF B_z 分量由北转南后, 开始时间分别为 09:09 UT, 09:24 UT, 09:32 UT 和 09:42 UT, 2 个喉区极光事件发生在 IMF B_z 后两次由北转南时, 开始时间分别为 09:05 UT 和 09:16 UT. 由此可见, 在该观测期间, PMAFs 发生频率高于喉区极光. 此外, 可以看出大多数 PMAF 事件发生在 IMF B_z 分量南向期间, 此时更有利于磁层顶重联的发生^[2,7]. 在 PMAFs 事件发生的同时, 观测到喉区极光事件, 这些喉区极光可能也与日侧磁层顶重联有关^[12]. 从图 1(b) 可以看

*<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/>

出, PMAFs 事件发生的位置在喉区极光的极向一侧, 且该时段内 PMAFs 发生次数多于喉区极光. 此外, 从图 1(b) 中还可以看出, 09:10 UT 和 09:30 UT 处弥散极光突然减少, 而分立极光 (喉区极光、PMAFs) 突然增亮, 对应 IMF B_z 从北向转为南向, 这与已有观测结果一致 [11,14–16].

此外, 在 09:05–09:12 UT 和 09:16–09:27 UT 两个时间段内, 总有 PMAFs 或者喉区极光的发生. 可以发现: 在第一个时间段内, PMAFs 出现的时间约为 09:09–09:12 UT, 存在喉区极光事件的

时间约为 09:05–09:09 UT; 在第二个时间段内, 两个 PMAFs 于 09:18–09:21 UT 和 09:24–09:28 UT 相继出现, 喉区极光出现时间为 09:16–09:27 UT. 由此可见, 在观测时间段内, 喉区极光可以存在 10 min 以上, PMAFs 的持续时间较喉区极光短, 但发生频率更高.

2.2 极光全天空成像仪观测

为分析 PMAFs 和喉区极光的结构及其演化特征, 图 2 给出极光全天空成像仪观测到的 2007 年 1 月 16 日 09:08:40 UT 的 630.0 nm 和 557.7 nm 波段的

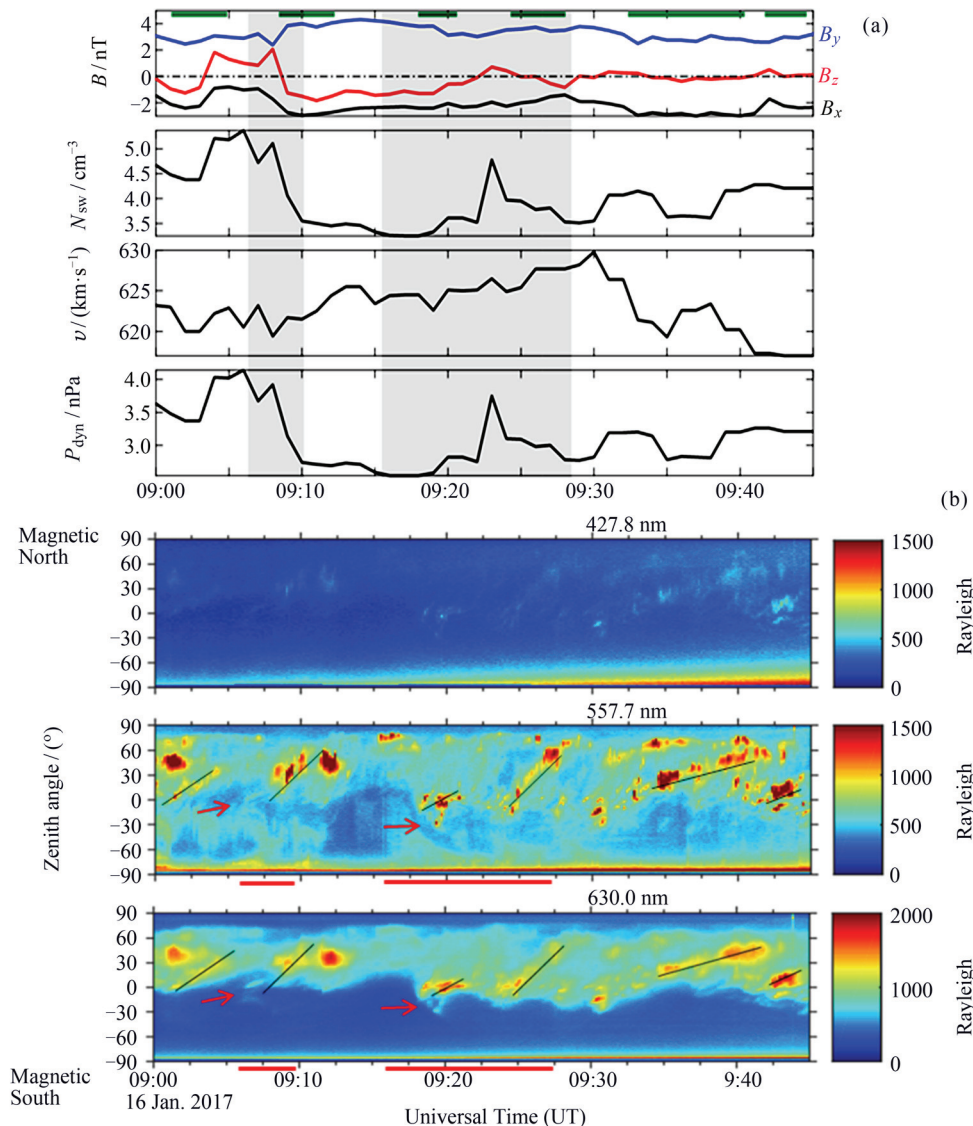


图 1 (a) 2007 年 1 月 16 日 09:00–09:45 UT 期间观测的 IMF 条件和太阳风参数. (b) 北极黄河站三波段全天空成像仪观测的极光 Keogram 图. 黑色线段表示 6 个 PMAFs 事件, 红色线段表示两次喉区极光事件

Fig. 1 (a) Observations of IMF conditions and solar wind parameters during 09:00–09:45 UT on 16 January 2007.

(b) Aurora Keogram observed by the three-band all-sky imagers at Yellow River Station in Arctic. Black lines indicate 6 PMAF events, and the red lines indicate 2 throat auroral events

PMAF、喉区极光和弥散极光图像. 弥散极光只出现在 557.7 nm (Green) 波段, 由此可以大致分辨出弥散极光的轮廓. 每张图像上都标有磁北、南、西 (晨) 和东 (昏), 并以红色箭头标出 PMAF 事件, 绿色虚线标出喉区极光事件的边界, 黄色箭头标出弥散极光. 从图 2 可以看出, PMAF 在极光卵极向一侧点亮, 而喉区极光出现在极光卵的赤道向一侧, 与 PMAF 出现的空间位置有很大差别.

图 3 给出了 09:08:20–09:09:20 UT 两个 PMAF 事件 (红色箭头标出) 和一个喉区极光事件 (绿色箭头标出) 点亮及运动过程的图像序列. 图 3 第一和第三行是 630.0 nm (Red) 波段极光观测, 第二和第四行是 557.7 nm (Green) 波段极光观测, 时间分辨率为 10 s. 从图 3 可以清晰看出, 在 09:08:30 UT, 一个 PMAF 事件和一个喉区极光同时点亮. 其中, PMAF 事件出现在图像的子午线东侧, 在极光卵的极向一侧点亮后沿极向运动; 喉区极光出现在图像的子午线附近, 靠近极光卵的赤道向一侧, 并与极光卵成一角度, 点亮后向西运动并逐渐变暗. 在 09:09:00 UT, 第一个 PMAF 尚未消失, 第二个 PMAF 于其赤道向一侧、喉区极光的极向一侧点亮并沿极向运动. 这表明, PMAF 可以同时存在多种表现形式, 但均位于图中子午线的东侧, 且处在极光卵的极向一侧, 对应日侧磁层顶磁重联产生的上行场向电流^[22], 点亮后沿极向运动.

图 4 给出 09:19:50–09:20:50 UT 一个 PMAF 事

件 (红色箭头标出) 和二个喉区极光事件 (绿色箭头标出) 点亮及运动过程的图像序列. 图 4 中两个喉区极光出现在极光卵赤道向一侧, 向西运动然后变暗. 这表明, 同一时间也可以同时出现多个喉区极光事件, 且亮度、形状不一, 但是与极光卵边界的相对位置一致, 运动方向也一致, 与图 3 中喉区极光事件出现的位置和运动情况基本相同. 喉区极光的主要动态特性是向西运动, 一般的结构化喉区极光都显示出这样的运动特性, 对应磁层顶的上行场向电流, 这与已有研究结果一致^[9,23]. 此外, 从图 4 还可以看出, 该 PMAF 事件晚于喉区极光事件发生, 于 09:20:20 UT 在极光卵赤道向一侧点亮, 随后沿极向运动.

观察图 3 和图 4 中 PMAFs 和喉区极光事件点亮的先后顺序, 发现喉区极光可与 PMAFs 几乎同时点亮或早于 PMAFs 点亮. PMAFs 在极光卵里点亮后向极盖区 (Polar cap) 运动演化, 对应磁层顶磁重联过程; 喉区极光在极光卵的赤道向一侧产生和演化, 对应磁层顶凹陷结构^[11] 及其伴随或引起的重联过程^[12]. 这些结果表明 PMAFs 和喉区极光虽然都发生在磁正午附近, 且都具有极向运动特征, 但是二者可能对应磁层顶不同位置独立发生的磁重联过程.

3 讨论

PMAFs 是磁正午附近一种典型的瞬态极光现

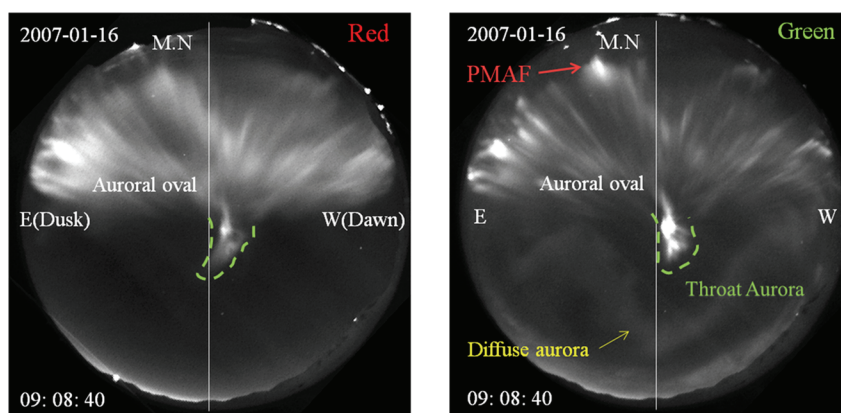


图 2 全天空成像仪观察到的 2007 年 1 月 16 日 09:08:40 UT 630.0 nm 和 557.7 nm 波段 PMAF、喉区极光的图像, 每张图像上都大致标有磁北、南、西 (晨) 和东 (昏), 并标出几种极光事件

Fig. 2 Images of PMAF and throat aurora in the 630.0 nm and 557.7 nm bands observed by the all-sky imagers at 09:08:40 UT on January 16, 2007. Each image is roughly marked with magnetic north (M.N), west (dawn) and east (dusk), and several auroral events are marked respectively

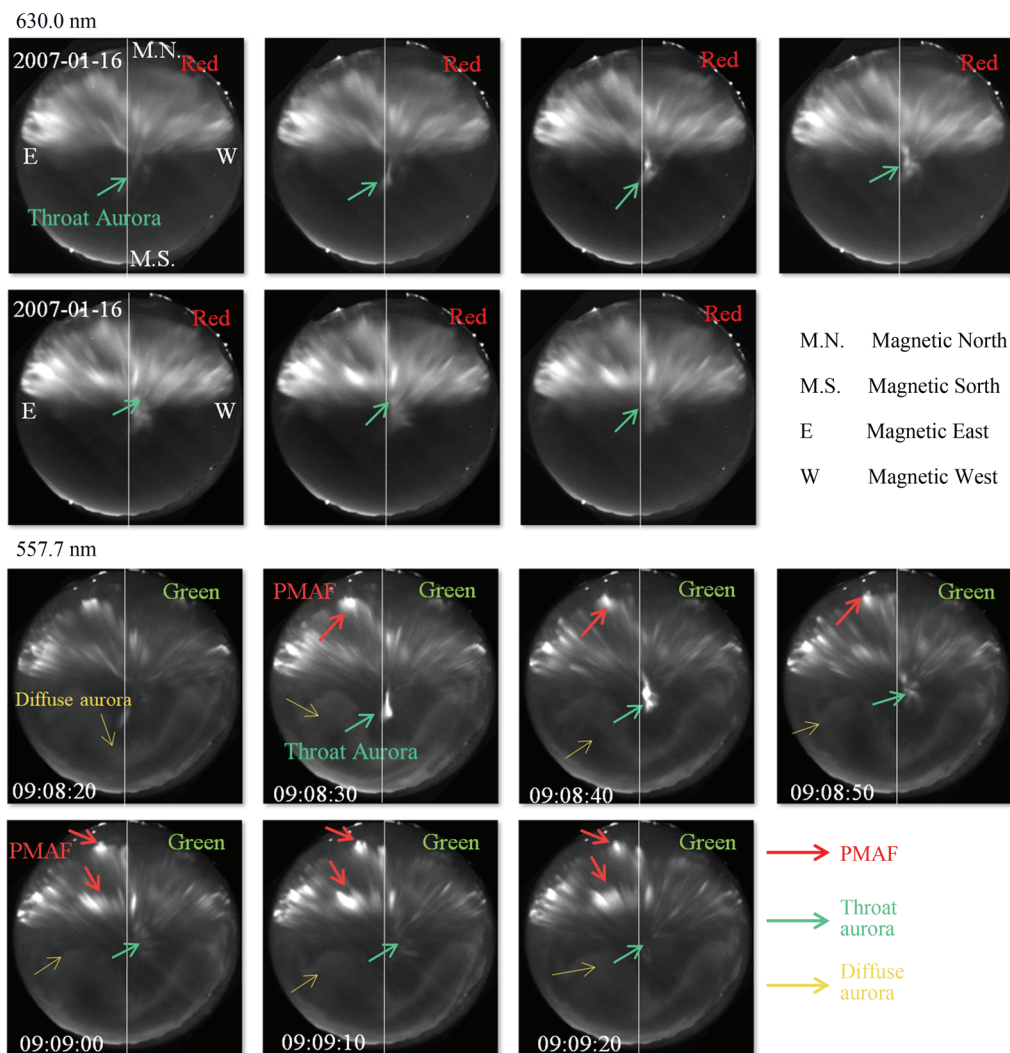


图3 09:08:20—09:09:20 UT 观察到的两个 PMAF 事件和一个喉区极光事件点亮和演化的过程

Fig. 3 Evolutions of two PMAFs events and one throat aurora that were observed during 09:08:20—09:09:20 UT

象,被认为是日侧重联过程的光学特征之一^[18–20],在 Keogram 图像上表征为沿时间轴向高纬倾斜的结构,一般出现在极光卵的极向一侧,主要由低能电子(100 eV 量级)沉降引起^[17,18],并且这种沉降电子能量与源于磁鞘沿开放场线未经加速过程沉降到电离层的等离子体特征能量吻合,对应上行场向电流^[22].大量观测表明,PMAFs 是磁层顶重联伴随的磁层附近 FTE 对应的电离层特征^[2,3],发生在 IMF $B_z < 0$ 的情况下^[2,7],而本文分析的 PMAFs 也主要发生在 $B_z < 0$ 时(见图 1a),因此可以推测,日侧磁层顶发生重联后能量粒子沿磁力线沉降,与高层大气中的粒子相互作用而产生 PMAFs 的极光点亮,而后 PMAFs 的极向运动主要是因为重联产生的磁通

量管在受到太阳风拖拽向磁尾尾瓣运动过程中,管内粒子类似沙漏效应而形成^[6].随着沉降到电离层能量粒子通量的降低,PMAFs 发光强度变弱,慢慢消退并最终消失在极盖区(见图 2).

喉区极光也是磁正午附近瞬态极光的一种,在 Keogram 图像上表征为极光卵赤道向边界处朝向低纬方向突出的南北向分布结构,与极光卵赤道向边界成一角度^[9],一般出现在极光卵赤道向边界的赤道向一侧,位于弥散极光与分立极光交界处,也具有极光强度增亮再减弱的演化特性^[10],归因于太阳风动力学过程引起的磁层向内凹陷而发生的磁重联过程.向内凹陷的区域发生磁重联后,引起磁鞘粒子沿新开放的磁力线向极区电离层沉降,进而形成

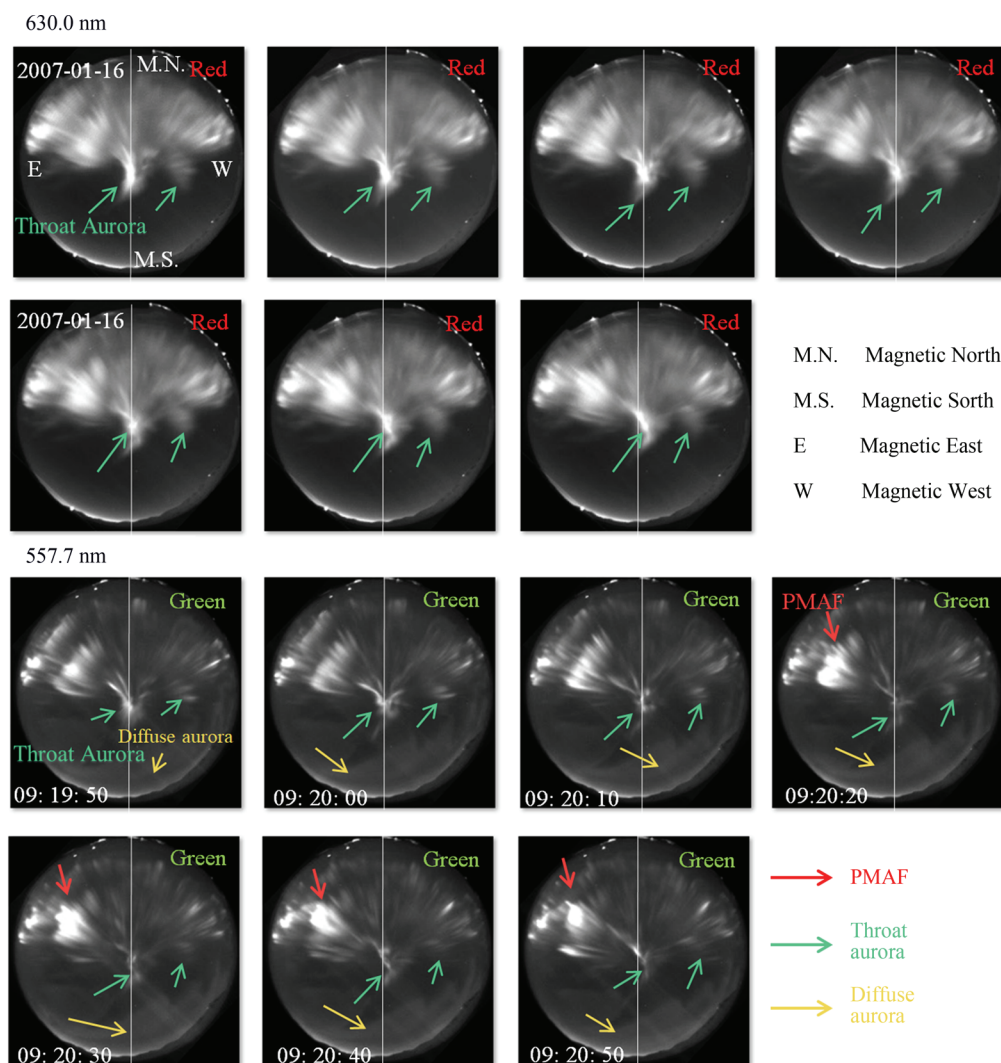


图4 09:19:50—09:20:50 UT 观察到的一个 PMAF 事件和两个喉区极光事件点亮和演化的过程

Fig. 4 Evolutions of one PMAF event and two throat aurora events that were observed during 09:19:50—09:20:50 UT

喉区极光^[10], 可以被视为新开发的磁通量管的侧面之一, 对应磁层顶的上行场向电流^[23]. 在已有的研究中, 喉区极光由局部区域磁鞘粒子沉淀引起, 能量约为 1 keV^[16]. 根据 Keogram 图 (图 1b) 的观测, 喉区极光在 557.7 nm 和 630.0 nm 的发光强度较强, 可以认为喉区极光的出现伴随着低能粒子沉降, 这与已有研究结果一致. 此外, 从图 1(a) 可知, 在喉区极光点亮及随后的运动过程中, IMF B_z 分量基本保持南向, 这种与 PMAFs 类似的性质意味着增亮的喉区极光很可能与低纬度磁层顶重联有关. 从图 2 中还可以看出, 喉区极光在 557.7 nm 和 630.0 nm 的形态也不尽相同, 这表明引起喉区极光的不同能量沉降粒子的空间分布也有所不同. 根据以上观测结果, 推测喉区

极光发生时, 磁鞘电子具有较低的能通量, 伴随着磁层电子, 可能处在开放的磁力线上, 与低纬磁重联相关. 以往研究表明, 喉区极光事件可以存在与 PMAFs 相同的极向运动特征^[10], 但二者之间是否存在关联尚不清楚.

特别地, 观测到了喉区极光的点亮及演化过程. 喉区极光与极光卵成一角度, 弥散极光自赤道向一侧向极向延伸并与喉区极光接触后, 喉区极光点亮并向西运动, 如图 3 和图 4 所示. 在观测期间, 同时有 6 个 PMAFs 事件发生, 其中, 09:09 UT, 09:18 UT 和 09:24 UT 时开始出现的 PMAFs 事件也伴随着喉区极光事件的点亮与运动. 当喉区极光与 PMAFs 事件同时发生时, PMAFs 在极光卵内更高纬一侧呈

东西向延展结构,自午前点亮后极向运动然后变暗;而喉区极光出现在极光卵赤道向外侧,沿南北方向分布,在午后产生随后向西运动,并且点亮和运动时间长于 PMAFs (见图 4). 在已有的研究中,从高地磁纬度到低地磁纬度的所有喉区极光都向西运动,速度约为每秒数十至数百米,有时伴随着高纬极光卵区 PMAFs 的相继出现^[10].

基于以上观测,绘制出 PMAFs 和喉区极光出现在磁层顶的相对位置及其极区电离层投影(见图 5),并标出一个 PMAF 事件和一个喉区极光事件. PMAF 发生在极隙区,大致呈东西向分布;喉区极光在极光卵赤道向一侧,向低纬侧延伸.

PMAF 发生在极光卵的极向一侧,点亮后向高纬扩展,反映出在日侧磁层顶发生低纬重联后太阳风拖拽磁力线向夜侧运动的动态特性,伴随着低能粒子沉降;而在发生 PMAF 的相邻区域,弥散极光极向延伸与分立极光卵接触后,沿南北向分布的喉区极光点亮,极向运动最后变暗,反映出与喉区极光对应的磁层顶凹陷结构发生重联后,太阳风拖拽磁力线向磁尾方向移动,同时伴随着低能粒子沿磁力线沉降到极区电离层的过程^[11]. 这说明, PMAF 和喉区极光对应的不同位置的磁层顶几乎同时发生磁重联. 根据观测, PMAF 和喉区极光发生的时刻、频率及时长并无明显相关特征;绘制出磁层顶处的地磁投影(见图 5)

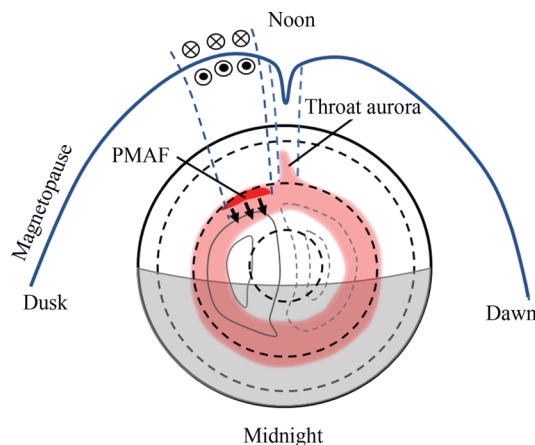


图 5 磁层顶处的地磁投影 (PMAF 以红色显示并标记了运动方向,喉区极光对应于磁层顶部的凹陷结构)

Fig. 5 Geomagnetic projection of the magnetopause (PMAF is shown in red band, and the black arrows indicate the moving direction of the PMAF, and throat aurora corresponds to localized indentation of the magnetopause)

表明, PMAF 与喉区极光的产生位置不同,并且分属于磁层顶结构重联和磁层顶凹陷结构重联的结果. 可以推测,磁层顶处扭曲的行星际磁场与地球磁力线,在磁层顶不同位置可以同时因不同条件触发而发生磁重联,并使得磁鞘粒子沉降到电离层产生空间位置不同的 PMAFs 和喉区极光,二者形成过程相对独立,可能不存在相互触发关系.

4 结论

利用高时间分辨率的极光 ASI 多年数据筛选出 2007 年 1 月 16 日发生的 PMAFs 和喉区极光的协同观测事件,详细分析了二者形成和演化的光学特征. 结合太阳风和 IMF 的观测,分析了 PMAFs 与喉区极光观测特征的异同及其物理机理,绘制出二者所在磁层顶的地磁投影,进而推测二者的产生是否有相互依赖关系. 主要研究结果如下.

(1) 在观测时间段内,喉区极光可以存在 10 min 以上,而且可以同时存在多种表现形式,但都与极光卵边界的相对位置一致(均位于极光卵赤道向一侧),且点亮后的运动方向一致(向西运动).

(2) 在总有 PMAF 或喉区极光事件发生的两个时间段内, PMAFs 与喉区极光的出现时间、持续时间、发生频率不同. PMAFs 可以与喉区极光几乎同时出现或略晚于喉区极光出现,持续时间较喉区极光短,但发生频率高于喉区极光.

(3) IMF B_z 转南向后,喉区极光与 PMAFs 出现. PMAFs 在极光卵赤道向一侧点亮后向高纬扩展;喉区极光出现在极光卵靠赤道向一侧的分立极光与弥散极光交界处,点亮后向西运动. IMF $B_z < 0$ 有利于磁层顶重联的发生,可以推测 PMAFs 事件和喉区极光事件可能都与日侧磁层顶重联有关,伴随着低能粒子沉降. 沉降粒子在太阳风的拖拽下向磁尾方向移动,同时沿着磁力线沉降到极区电离层,产生部分磁正午附近的瞬态极光结构. 根据本文绘制的磁层顶处磁重联示意图,认为 PMAF 与喉区极光的产生位置不同,且分属于磁层顶结构重联和磁层顶凹陷结构重联. 可以推测,导致与 PMAF 对应的磁层顶重联的因素和导致与喉区极光相对应的磁层凹陷结构重联的因素不同,使得两种极光事件在日侧磁层顶上的相邻区域分别发生,两种极光事件的形成过程相对独立,可能不存在相互触发关系.

致谢 中国极地研究中心极地大气与空间物理学研究室课题组对本研究提供了支持和帮助; 中国极地研究中心胡泽骏研究员对本文提出了宝贵建议; 中国北极黄河站历次科学考察队的科考队员进行了数据采集, 国家极地科学数据中心和 OMNI 工作组提供了数据支持.

参考文献

- [1] FASEL G J, MINOW J I, SMITH R W, *et al.* Multiple brightenings of transient dayside auroral forms during oval expansions [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1992, **19**(24): 2429
- [2] FASEL G J. Dayside poleward moving auroral forms: a statistical study [J]. *J. Geophys. Res.*, 1995, **100**(A7): 11891-11905
- [3] SANDHOLT P E, DEEHR C S, EGELAND A, *et al.* Signatures in the dayside aurora of plasma transfer from the magnetosheath [J]. *J. Geophys. Res.*, 1986, **91**(A9): 10063-10079
- [4] HU Z J, YANG H, HUANG D, *et al.* Synoptic distribution of dayside aurora: multiple-wavelength all-sky observation at Yellow River Station in Ny-Ålesund, Svalbard [J]. *J. Atmos. Sol.: Terr. Phys.*, 2019, **71**: 794-804
- [5] LEMAIRE J. Impulsive penetration of filamentary plasma elements into the magnetospheres of the Earth and Jupiter [J]. *Planet Space Sci.*, 1977, **25**: 887-890
- [6] ZHANG Q H, DUNLOP M W, LOCKWOOD M, *et al.* Simultaneous observations of reconnection pulses at Cluster and their effects on the cusp aurora observed at the Chinese Yellow River Station [J]. *J. Geophys. Res.*, 2010, **115**(A10): 237-248
- [7] XING Z Y, YANG H G, HAN D S, *et al.* Poleward Moving Auroral Forms (PMAFs) observed at the Yellow River Station: a statistical study of its dependence on the solar wind conditions [J]. *J. Atmos. Sol.: Terr. Phys.*, 2012, **86**: 25-33
- [8] RODRIGUEZ J V, CARLSON H C, HEELIS R A. Auroral forms that extend equatorward from the persistent midday aurora during geomagnetically quiet periods [J]. *J. Atmos. Sol.: Terr. Phys.*, 2012, **86**: 6-24
- [9] HAN D S, CHEN X C, LIU J J, *et al.* An extensive survey of dayside diffuse aurora based on optical observations at Yellow River Station [J]. *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 2015, **120**: 7447-7465
- [10] CHEN X C, HAN D S, LORENTZEN D A, *et al.* Dynamic properties of throat aurora revealed by simultaneous ground and satellite observations [J]. *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 2017, **122**: 3469-3486
- [11] HAN D S, LIU J J, CHEN X C, *et al.* Direct evidence for throat aurora being the ionospheric signature of magnetopause transient and reflecting localized magnetopause indentations [J]. *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 2018, **123**: 2658-2667
- [12] HAN D S, XU T, JIN Y, *et al.* Observational evidence for throat aurora being associated with magnetopause reconnection [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2019, **46**: 7113-7120
- [13] LIU R Y, LIU Y H, XU Z H, *et al.* The Chinese ground-based instrumentation in support of the combined Cluster/Double Star satellite measurements [J]. *Ann. Geophys.*, 2005, **23**: 2943-2951
- [14] HAN D S, HIETALA H, CHEN X C, *et al.* Observational properties of dayside throat aurora and implications on the possible generation mechanisms [J]. *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 2017, **122**: 1853-1870
- [15] HAN D S, LI J X, NISHIMURA Y, *et al.* Coordinated observations of two types of diffuse auroras near magnetic local noon by magnetospheric multiscale mission and ground all-sky camera [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2017, **44**: 8130-8139
- [16] HAN D S, NISHIMURA Y, LYONS L R, *et al.* Throat aurora: the ionospheric signature of magnetosheath particles penetrating into the magnetosphere [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2016, **43**: 1819-1827
- [17] WHALEN J A, BUCHAU J, WAGNER R A, Airbourne ionospheric and optical observations of noontime aurora [J]. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1971, **33**: 661
- [18] MURPHREE J S, COGGER L L, ANGER C D, *et al.* Large scale 6300 Å, 5577 Å, 3914 Å dayside auroral morphology [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1980, **7**(4): 239-242
- [19] ZHANG Q H, ZHANG B C, LIU R Y, *et al.* On the importance of interplanetary magnetic field $|B_y|$ on polar cap patch formation [J]. *J. Geophys. Res.*, 2011, **116**(A5): 308
- [20] LOCKWOOD M, MCCREA I W, MILAN S, *et al.* Plasma structure within poleward-moving cusp/cleft auroral transients: EISCAT Svalbard radar observations and an explanation in terms of large local time extent of events [J]. *Ann. Geophys.*, 2000, **18**: 1027-1042
- [21] LOCKWOOD M, MOEN J. Reconfiguration and closure of lobe flux by reconnection during northward IMF: possible evidence for signatures in cusp/cleft auroral emissions [J]. *Ann. Geophys.*, 1999, **17**: 996-1011
- [22] OKSAVIK K J, MOEN C H. High-resolution observations of the small-scale flow pattern associated with a poleward moving auroral form in the cusp [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2004, **31**(11): 807
- [23] HAN D S, XU T, JIN Y, *et al.* Observational evidence for throat aurora being associated with magnetopause reconnection [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2019, **46**: 7113-7120