

喉区极光过程中的能量输入估算*

范天舒¹ 曹永军¹ 邱荟璇²
王智伟² 韩德胜²

1(内蒙古师范大学物理与电子信息学院 呼和浩特 010020)

2(同济大学海洋与地球科学学院 上海 200129)

摘要 喉区极光是一种只发生在磁正午附近的特殊分立极光, 具有明显的从分立极光卵赤道侧边界向低纬延伸的特征. 已有研究表明, 喉区极光对应于一种由磁重联导致的磁层顶局地凹陷. 磁重联是太阳风能量注入到地球磁层空间的重要方式之一, 但伴随喉区极光过程有多少能量传输进入电离层尚不明确. 利用 2015 年 12 月的地基全天空极光观测与经过电离层上方的卫星粒子共轭观测, 建立了极光强度与沉降电子能通量之间的相关关系. 在此基础上, 针对发生在 2015 年 12 月 8 日的一个典型喉区极光事件, 在综合考虑持续时间与空间尺度基础上, 估算出伴随该事件由电子携带的输入到电离层的总能量约为 1.07×10^{11} J, 单位面积输入能量的平均功率约为 1.31×10^{-4} W·m⁻², 对比以往研究中 MHD 模拟给出的通常情况下极隙区能量输入结果, 本文给出的喉区极光过程中能量输入的效率约为 MHD 模拟结果的两倍, 表明伴随喉区极光过程的能量输入非常可观, 可能引起局地空间天气效应.

关键词 喉区极光, 电子能通量, 极光强度, 能量输入功率

中图分类号 P353

Estimation of Energy Input during Throat Aurora Processes

FAN Tianshu¹ CAO Yongjun¹ QIU Huixuan²
WANG Zhiwei² HAN Desheng²

1(College of Physics and Electronic Information, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010020)

2(School of Ocean and Earth Science, Tongji University, Shanghai 200129)

Abstract The throat aurora is a kind of discrete auroras occurred around the Magnetic Local Noon (MLN). The discrete arc is almost vertical to the auroral oval and extends equatorward. Previous studies have shown that the throat auroral structure corresponds to the localized magnetopause indentations which are related to the particular magnetopause reconnection. As is known, magnetic reconnection is the important approach inputting energy of solar wind, so the research of energy input of throat

* 国家自然科学基金项目 (42030101) 和内蒙古师范大学基本科研业务费专项资金项目 (2022JBTD008) 共同资助

2023-06-11 收到原稿, 2023-08-01 收到修定稿

©The Author(s) 2024. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

aurora is key to understand this particular magnetopause reconnection. A new way to estimate the energy input by using all auroral events happened on December 2015 is built. A relational expression about auroral intensity and energy flux of electronic precipitation is set up by observations of both ground station and satellite. Estimating the total energy input of a typical throat auroral event which lasted three minutes and happened on 8 December 2015 by this relational expression, and the answer is about 1.07×10^{11} J. And the average power of input energy per area is about $1.31 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Compared with the usual polar gap energy input results given by MHD simulation in previous studies, the energy input efficiency of the throat auroral process given in this paper is about twice that of the MHD simulation results, which indicates that the energy input accompanying the throat auroral process is very considerable and may cause local space weather effects.

Key words Throat aurora, Electron energy flux, Auroral intensity, Energy input power

0 引言

地球磁场在与太阳风的相互作用下形成磁层^[1]. 太阳风携带的能量可以通过多种动力学过程进入磁层, 最主要的两种方法中, 第一种是粘滞作用^[2]. 由于冻结效应, 太阳风等离子体携带地球磁力线背离太阳运动, 根据守恒定律, 在磁层内部会产生相反方向运动的质量与磁通量, 同时在赤道平面内, 通过回旋运动正电荷在晨侧进入磁层, 负电荷在昏侧进入磁层, 形成电荷分离, 产生晨昏电场并映射到电离层, 驱动电离层等离子体回流, 形成完整循环过程; 第二种是磁重联^[3]. 当太阳风主要携带南向行星际磁场 (Interplanetary Magnetic Field, IMF) 时, 持续的动压将南向 IMF 的磁力线挤压, 与方向相反的地球磁层顶磁力线靠近, 就会发生磁场重联. 这时发生重联的磁层顶磁力线一端与太阳风相连, 另一端与地球相连, 在磁张力和太阳风的共同作用下会跨越极区甩向磁尾, 成为尾瓣磁力线, 同时将大量能量储存在磁尾, 而后伴随着亚暴发生, 这些被储存的能量就会释放到磁层内.

在一定条件下, 高能粒子会沿着磁力线输入到极区电离层, 与电离层粒子相互碰撞引起能量耗散, 同时产生极光. 根据极光发生的地方时不同可以将极光分为日侧极光与夜侧极光. 而根据观测形态, 极光又可分为弥散极光与分立极光^[4]. 弥散极光一般分布在极光卵低纬侧^[4], 观测上常常呈现为亮度较低的、模糊一片的极光结构^[5]. 产生弥散极光的电子沉降具有相对均匀的能通量. 分立极光一般分布在极光卵高纬侧, 在观测上常常呈现出明亮的离散的极光结构^[5]. 对应产生分立极光的电子沉降具有分立通量相对较

高的能谱特征. 从产生机制来分析, 不管是日侧还是夜侧的弥散极光, 都是由亚暴过程中由磁尾注入的带电粒子从夜侧漂移到日侧过程中经过波粒相互作用散射至损失锥产生的^[6]. 一般认为, 日侧分立极光与夜侧分立极光分别对应磁力线由闭到开^[7,8]与由开到闭的过程, 并且产生分立极光的粒子在沉降过程中都会经历加速过程^[9].

太阳风-磁层-电离层耦合过程是一个系统性的过程, 可以通过发生在极区电离层的极光现象来反演太阳风-磁层耦合的空间过程^[10]. 自从黄河站建立以来积累了大量日侧极光的地面观测数据. 基于这些数据, 近些年的研究发现在磁正午附近存在一种沿电离层对流方向分布的条带状弥散极光, 并且发现一种与其密切相关的特殊分立极光结构. 因为该极光结构发生在电离层对流喉区附近, 所以将其命名为喉区极光^[11]. 喉区极光具有明显的从分立极光卵赤道侧边界向低纬延伸的特征^[11]. 结合 Magnetospheric Multi-scale (MMS) 卫星和地面极光仪器的观测, 研究认为喉区极光的低纬向延伸特征对应于磁层顶凹陷式位形, 并推测该特殊位形由磁层顶的一种特殊低纬重联过程产生^[12]. 利用 Time History of Events and Macro-scale Interactions during Substorms (THEMIS) 卫星和 Defense Meteorological Satellite Program (DMSP) 卫星的共轭观测数据, 后续研究证实喉区极光对应于磁层顶凹陷结构, 并提供了喉区极光对应于磁层顶低纬重联的观测证据^[13]. 此外, 系列研究还表明磁层的内、外因素都对喉区极光的产生有影响. 磁层内部因素主要表现为喉区极光期间的电离层观测特征^[14]; 磁层外部因素表现为喉区极光的产生与径向行星际磁场条件有关^[15].

基于喉区极光系列研究开展到目前所积累的研究成果, 喉区极光的概念模型被提出. 该模型可以合理地解释所有喉区极光的观测特征与产生机理^[16]. 但有关喉区极光空间天气效应的研究仍留有空白. 例如喉区极光这一现象在整个太阳风-磁层-电离层能量耦合过程中是否重要, 在喉区极光过程中, 太阳风输入磁层的能量有多少, 其效率如何等问题还没有答案.

为研究上述问题, 利用地基全天空相机与经过电离层上方卫星对极光的共轭观测, 建立了极光强度与沉降电子能通量的相关关系, 针对某一个典型喉区极光事件, 估算出了该典型事件由电子携带的能量的注入情况. 并与 MHD 模拟结果进行了对比.

1 数据与方法

1.1 数据来源

使用数据来源于 DMSP 的卫星原位粒子观测与黄河站的地面极光观测. DMSP 卫星搭载的粒子谱仪 SSJ (Precipitating Electron and Ion Spectrometer) 提供了极光沉降粒子的观测数据. 其数据集包括每秒记录的 30 eV 到 30 keV 之间的电子、离子通量, 在该区间有 19 个对数步长的能量观测通道. 此外, 黄河站的全天空成像系统 (All Sky Imager, ASI) 提供了分辨率为 512×512 pixel 的极光照片, 分辨率为 10 s. 曝光时间与记录时间分别为 7 s 和 3 s.

1.2 地面极光与卫星粒子探测处理

1.2.1 极光共轭观测事例

图 1 给出了 2015 年 12 月 13 日 12:32:10 UT, 黄河站 ASI 观测到的一个极光事件. 同时, 图 2(a) 给出了在 12:31:00 UT–12:33:30 UT 时间段内的 DMSP 卫星的沉降电子能通量观测, 图 2(b) 给出了同一时间段内对应卫星位置的极光强度值. 该时间段内 DMSP 卫星的运动轨迹被投影到磁经纬坐标系中. 在图 1 中, 红色圆圈标出了 DMSP 卫星在 12:32:10 UT 时的位置, 而该位置对应图 2(a) 中箭头所指示的粒子观测和图 2(b) 中箭头所指示的极光强度值.

如图 1 所示, 极光亮部特征在地面光学设备的成像位置与 DMSP 卫星的电子能通量峰值所对应的位置存在一一对应关系. 在该次卫星穿越极光事件中, 由 DMSP 卫星测得的沉降电子能通量得到的能谱图可以大致分为三个区域. 将卫星在电离层的足点沿着

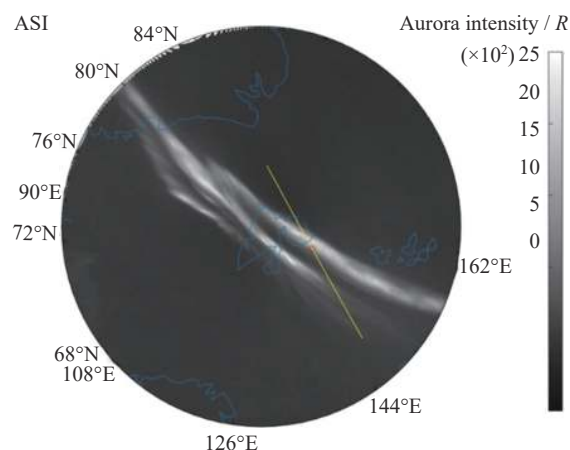


图 1 2015 年 12 月 13 日 12:32:10 UT 地面极光观测和 12:31:00 UT–12:33:30 UT 时段的 DMSP 卫星粒子观测. DMSP 卫星运动轨迹 (黄线) 叠加在地面极光观测中
Fig. 1 Ground auroral observations happened on 13 December 2015 at 12:32:40 UT and DMSP-Satellite particle observations between 12:31:00 UT and 12:33:30 UT. The track of DMSP-Satellite is showed by yellow line on the ground auroral observations

磁力线投影到极光高度上, 可以看到卫星在这段时间穿越了两个极光弧结构, 其中第二次的穿越过程完整的跨越了极光弧. 通过对比极光图像与原位探测数据, 可以发现当卫星完全越过极光区域时, 可以观测到很明显的电子沉降, 此时地面极光图像和卫星粒子探测之间具有较好的对应关系. 因此, 将类似这种完整穿越事件的极光强度与电子能通量提取出来, 就得到一对数据对应点, 称为有效对应点. 这样的极光穿越事件就称为有效事件.

1.2.2 有效事件筛选准则

针对 2015 年 12 月的 ASI 和 DMSP 粒子数据, 找到一系列如图 1 的极光穿越事件, 但往往极光与 DMSP 粒子数据的对应有一定的错位, 而这部分需要肉眼识别手动将其对应. 为尽量保证得到的有效对应点的对应关系一致性, 并且尽量减少数据本身带来的误差和取对应时产生的误差, 采用以下选取准则来筛选有效事件.

(1) 排除如图 3(a) 所示的不清晰的极光事件. 由于极光强度较低, 极光结构不易区分, 得到的对应点之间的对应关系较差.

(2) 排除如图 3(b) 所示的受外来光源影响的极光事件. 由于外来光源所带来的曝光值, 其并不对应

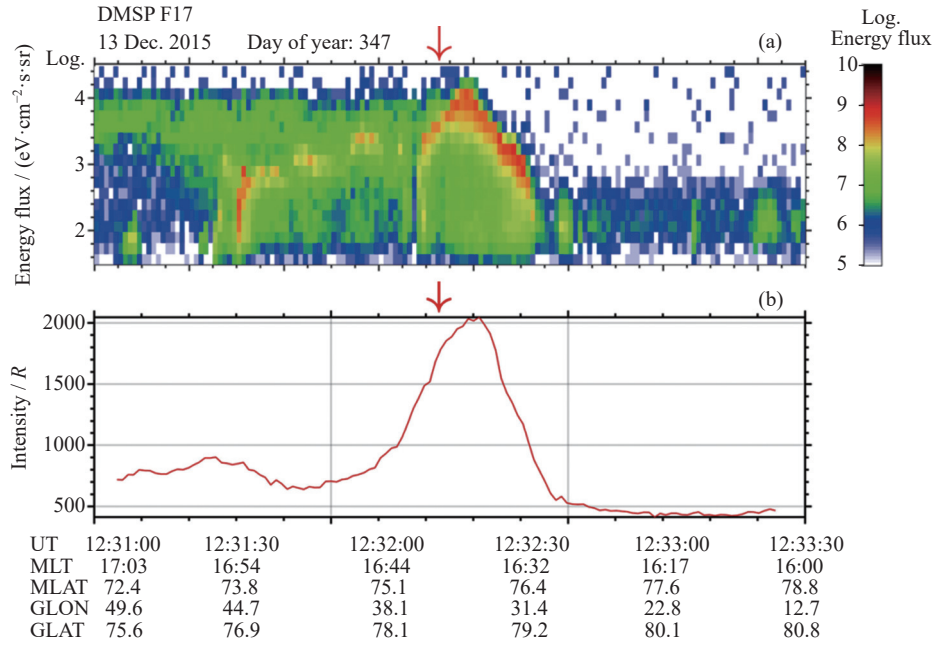


图 2 DMSP 观测到的沉降电子能通量 (a) 及对应卫星位置的极光强度 (b)

Fig. 2 Pseudo-color image that energy flux of electronic precipitation observed by DMSP-Satellite (a) and aurora intensity value corresponding to satellite position (b)

电子能量沉降, 会导致取出的对应关系与实际的对应关系有较大偏差.

(3) 排除如图 3(c) 所示的复杂极光事件. 这类极光事件的极光结构不易用肉眼区分在选取对应有效点时, 难以准确地找到极光结构和与其对应的能通量“热区”.

选择图 3(d) 所示的极光事件作为理想的有效事件. 这类事件既无明显外来光源干扰, 又具有相对简单清晰的极光结构. 在对照 ASI 观测同时段的 SSJ 观测时, 更容易找到极光强度与电子能通量之间准确的对应.

1.3 极光强度与电子能通量关系

根据有效事件的选取准则, 从 2015 年 12 月的所有极光观测中共找到 9 个有效事件. 这些事件的详细信息在表 1 中给出. 表 1 中列出了事件的观测卫星, 观测时间以及极光强度与沉降电子的能通量有效对应点的具体数值.

根据有效对应点数据, 可以得到图 4 中极光强度和沉降电子能通量之间的关系:

$$\phi_e = 2.46 \times 10^8 P - 4.65 \times 10^{10}. \quad (1)$$

其中, P 为极光强度, 单位瑞利 Rayleigh (R); ϕ_e 为该位置的沉降电子能通量, 单位 $\text{eV} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.

2 估算过程

在 2015 年 12 月 8 日 10:06:30 UT 附近, 黄河站 ASI 观测到一个持续时间约为 3 min 的典型喉区极光事件. 如图 5 所示, 提取该典型事件中三个时刻的 ASI 观测, 黄色标点区域就是喉区极光, 红色标点为极光卵低纬向边界 (喉区极光最明显观测特征为磁正午附近的低纬向极光延伸结构).

为了估算能量的输入, 根据式 (1) 所给出的 P 与 ϕ_e 之间的关系, 并考虑典型喉区极光事件的空间尺度以及持续时间, 利用该典型事件的 ASI 数据进行能量估算. 在极光照片中划出喉区极光轮廓时, 极光周围位置存在一定的背景亮度 (平均为 $300R$), 这部分不对应喉区极光. 为了尽量减少误差, 将极光照片中 $< 300R$ 的像素点值设置为 0. 在后续的能量估算中, 手动选取的喉区极光区域中带来的这部分背景亮度则不计入能量输入估算.

此外, 为了计算每一个像素块的能量沉降, 还需要知道每一个像素块所对应的实际面积 S_i . 基于地理坐标与空间几何矫正方法^[17], 可以对图 6(a) 所示的喉区极光照片进行真实空间面积的计算. 根据定标数据, 图 6(b) 与图 6(c) 给出了本文所用全天空图像各

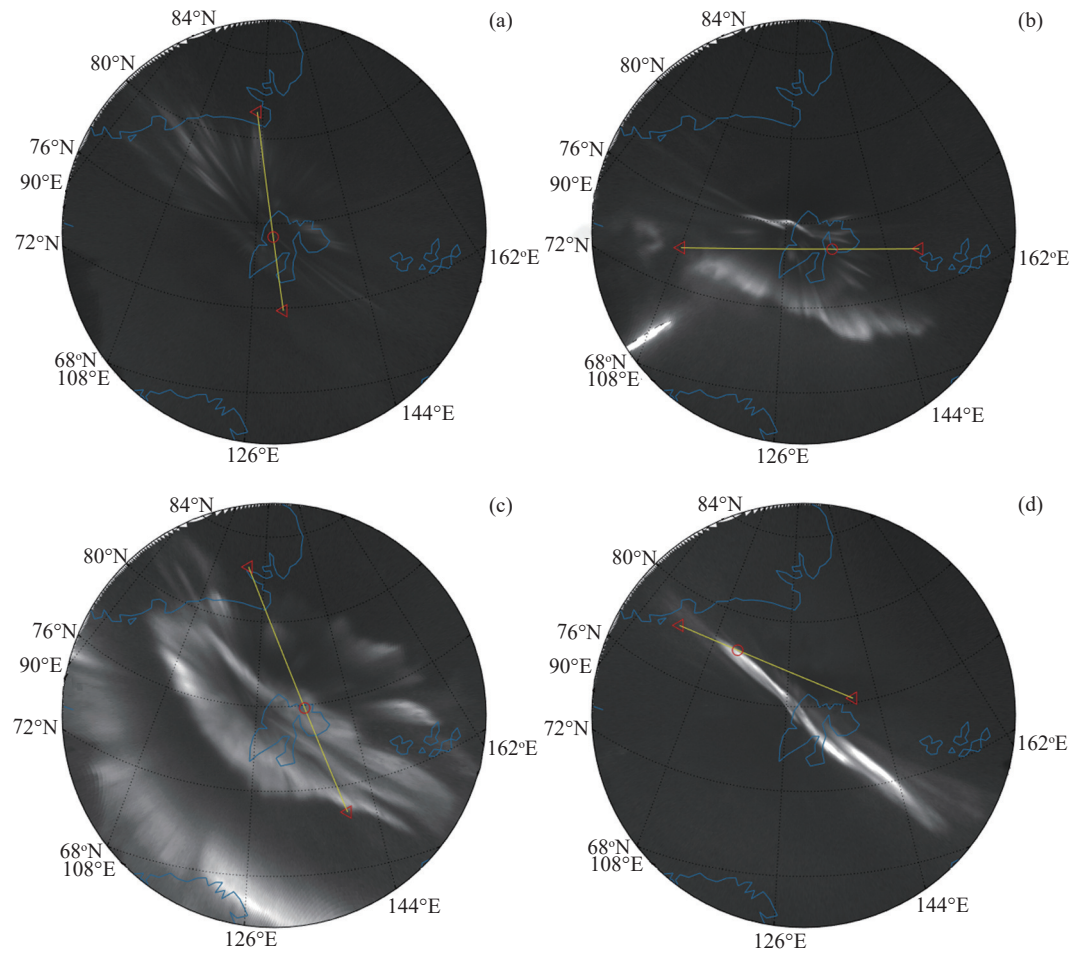


图 3 有效事件筛选准则. (a) 不清晰极光事件. (b) 干扰极光事件. (c) 复杂极光事件. (d) 理想的有效样本事件

Fig. 3 Effective event filtering diagram. (a) Unclear aurora events. (b) Disturbed aurora events. (c) Complex aurora events. (d) Ideal aurora events

表 1 2015 年 12 月数据得到的全部有效对应点以及相关参数信息
Table 1 Sample event data selected according to the criteria in December 2015

No.	Satellite	Date	UT	Electron energy flux / ($\text{eV} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	Auroral intensity / R
1	F17	13 Dec. 2015	12:32:40	2.939×10^{11}	1415
2	F17	13 Dec. 2015	12:33:00	2.607×10^{11}	982
3	F17	14 Dec. 2015	13:59:20	1.971×10^{11}	944
4	F17	15 Dec. 2015	12:05:30	2.250×10^{11}	824
5	F17	16 Dec. 2015	11:53:10	1.036×10^{11}	489
6	F17	16 Dec. 2015	11:53:20	1.788×10^{10}	498
7	F17	16 Dec. 2015	11:53:40	7.662×10^{10}	533
8	F17	16 Dec. 2015	11:53:50	4.121×10^{10}	546
9	F18	13 Dec. 2015	10:56:00	2.384×10^{11}	1387

像素值的对应的经度与纬度信息. 红色区域是标记出的整个事件喉区极光发生的大致区域^[11], 其包含的像

素块数量记为 N . 经处理后, 利用式 (1) 可以得到该典型喉区极光事件区域包含的每一个像素块的沉降

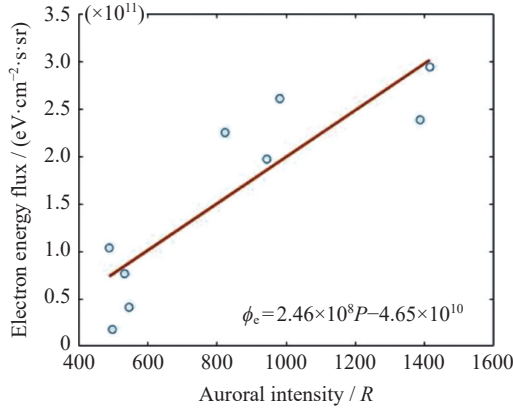


图4 极光强度-电子能通量有效对应点的散点图与拟合函数曲线(散点即为表1给出的有效对应点)

Fig. 4 Scatter plot and fitting function curve of effective corresponding points of the auroral intensity and electron energy flux (the scatter point is the effective corresponding point given in Table 1)

电子能通量, 有

$$\begin{aligned}\phi_i &= 2.46 \times 10^8 P_i - 4.65 \times 10^{10}; \\ i &= 1, 2, 3, \dots, N.\end{aligned}\quad (2)$$

其中, ϕ_i 为第 i 块像素面积的沉降电子能通量, P_i 为其对应的极光强度.

为了求解每个像素对应的真实面积, 需要先将相邻像素块经度与纬度的差值 Δl_{lon} 与 Δl_{lat} 转化为以地心为原点的弧度角 (r_{lon} 与 r_{lat}), 其中

$$r_{\text{lon}} = \Delta l_{\text{lon}} \times \frac{\pi}{180}, \quad (3)$$

$$r_{\text{lat}} = \Delta l_{\text{lat}} \times \frac{\pi}{180}. \quad (4)$$

将其绘制在以地轴为旋转轴的地球俯视视角图 7(a) 和以地轴为旋转轴的地球侧视视角图 7(b) 中. 假设极光结构距离地面高度 $h = 100 \text{ km}$, 可以将 r_{lon} 与 r_{lat} 转化为实际极区空间中的尺度 ΔL_{lon} 与 ΔL_{lat} , 表达式如下:

$$\Delta L_{\text{lon}} = r_{\text{lon}} H, \quad (5)$$

$$\Delta L_{\text{lat}} = r_{\text{lat}} H. \quad (6)$$

其中, $H = R_e + h$, 这里 R_e 为地球半径, $R_e \approx 6371 \text{ km}$. 图 7(c) 给出了 ΔL_{lon} , ΔL_{lat} , r_{lon} 和 r_{lat} 所求像素的面积. 这样一个像素块对应的实际面积 S 近似等于 ΔL_{lon} 和 ΔL_{lat} 围成曲边梯形的面积, 对应虚线方框就是像素块的面积, 有

$$S = \Delta L_{\text{lon}} \Delta L_{\text{lat}}. \quad (7)$$

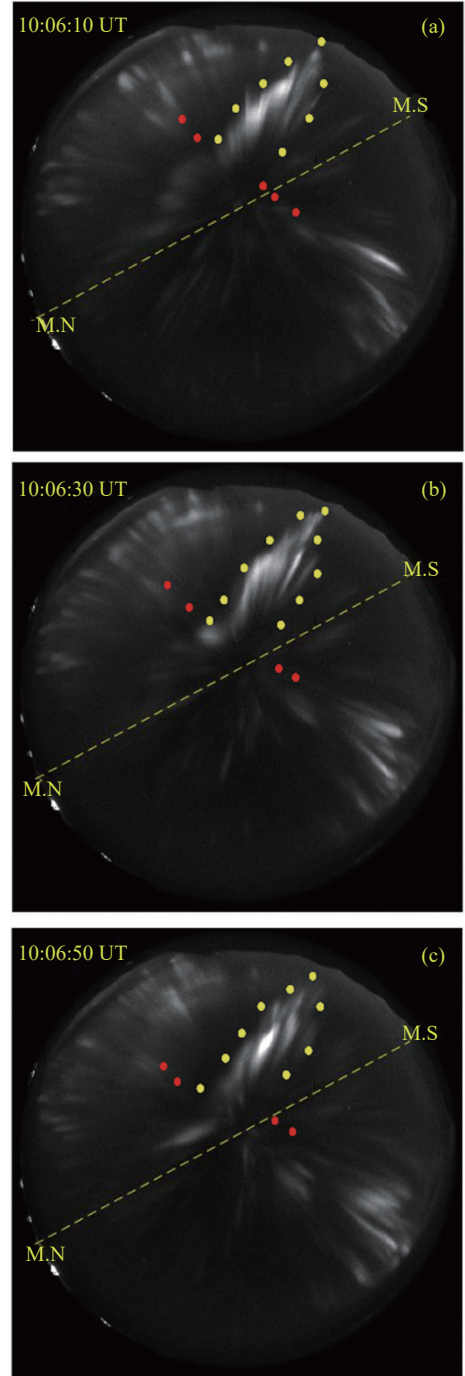


图5 2015年12月8日10:06:10 UT, 10:06:30 UT和10:06:50 UT的喉区极光结构

Fig. 5 Schematic diagram of the throat aurora at 10:06:10 UT, 10:06:30 UT, and 10:06:50 UT on 8 December 2015

在某一时刻, 一个像素块对应的喉区极光输入能量为

$$E_i = \phi_i S_i t. \quad (8)$$

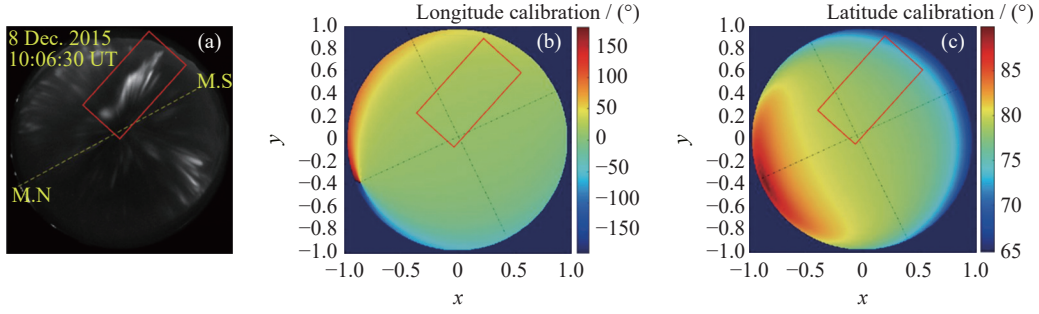


图 6 喉区极光样本事件的 ASI 观测. (a) ASI 观测. (b) 经度定标图. (c) 纬度定标图. 其中定标图原点表示图像中心, 整个 ASI 像素映射在 $-1 \sim 1$ 的归一化网格点中

Fig. 6 ASI observation of sample event of throat aurora. (a) The image of ASI observation. (b) Pseudo-color image for longitude calibration. (c) Pseudo-color image for latitude calibration. The origin of the calibration map represents the image center, the whole ASI pixel is mapped in the normalized grid point of $-1 \sim 1$

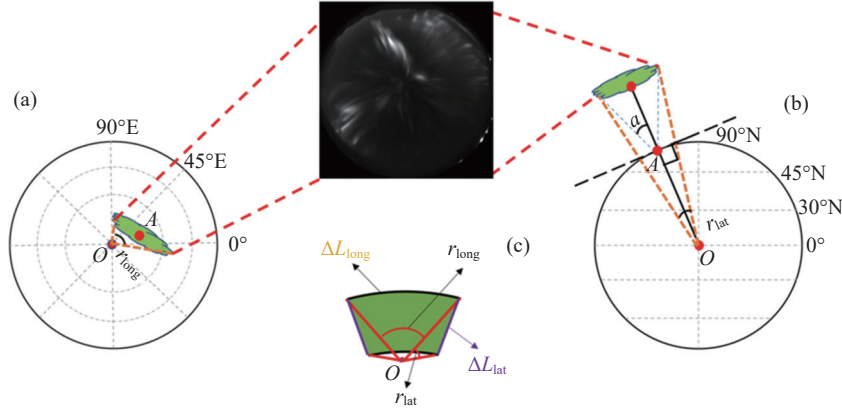


图 7 像素面积与实际面积的对应方法. (a) 极光事件俯视概念. (b) 极光事件侧视概念. (c) 所求像素面积

Fig. 7 Schematic diagram of the corresponding method between pixel area and actual area. (a) Aurora event overhead concept map. (b) Aurora event lateral concept map. (c) Pixel area diagram

其中, ϕ_i 为 i 块像素面积的沉降电子能通量, t 为持续时间为 1 s. 进而求得这一时刻整个喉区极光区域内的总能量输入为

$$E = \sum E_i = \sum \phi_i S_i t; \quad i = 1, 2, 3, \dots, N. \quad (9)$$

考虑到地面极光观测的照片时间分辨率为 10 s, 在喉区极光持续时间中, 近似认为在每相邻 10 s 间隔的极光照片所给出的极光强度是连续变化的. 根据式 (8) 给出的每一时刻的能量输入, 计算持续时间为 T (180 s) 的喉区极光事件的总能量输入为

$$E_{\text{throat}} = \sum E_t; \quad t = 0, 1, 2, \dots, 180 \text{ s}. \quad (10)$$

其中, E_t 为 t 时刻喉区极光区域内的总能量输入. 图 8 给出了横轴以 10 s 为单位, 纵轴为输入能量, 持续时

间 T (180 s) 的样本喉区事件的估算折线图. 可以看到喉区极光的注入的能量速率随着时间呈现下降趋势, 并且该下降趋势呈现出线性的关系.

利用式 (1)(7)(9) 可以估算总能量输入

$$E_{\text{throat}} = 6.70 \times 10^{29} \text{ eV} = 1.07 \times 10^{11} \text{ J}. \quad (11)$$

喉区极光的平均面积 $\bar{S} = 1.2 \times 10^8 \text{ m}^2$, 得出单位面积的平均功率为

$$P_{\text{throat}} = 1.31 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}. \quad (12)$$

3 结果与讨论

3.1 结果

利用卫星粒子探测与地面全天空极光成像仪的观测数据提出了一种估算喉区极光能量的方法, 并利用

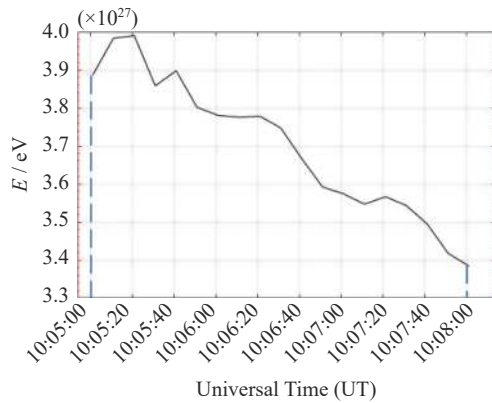


图8 在一个喉区极光示例中随时间 (T) 变化的能量 (E) 输入情况

Fig. 8 Energy input (E) over time (T) of sample event of throat aurora

该方法对一个典型喉区极光事例进行研究. 结果如下.

(1) ASI 给出的极光强度与 DMSP 卫星给出的电子能通量之间关系为 $\phi_e = 2.46 \times 10^8 P - 4.65 \times 10^{10}$.

(2) 喉区极光的能量注入效率随着时间演化呈现线性降低关系.

(3) 单位面积内, 喉区极光电子携带的平均能量注入功率为 $1.31 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

3.2 讨论

本文所建立的估算方法中, 使用的黄河站极光观测主要是电子极光^[18], 所以拟合出的线性关系 ϕ_e 是极光强度和电子能通量的关系. 而喉区极光研究的出发点主要还是电子极光^[11]. 因此, 从方法的建立到估算, 目标是估算出喉区极光过程中沉降的电子能量.

一般来讲, 根据激发出极光的沉降粒子可将极光分电子极光与质子极光. 而两种沉降粒子在不同极光过程也有不同的能量占比. 此外, 极光是日地能量耦合过程中能量沉降在极区电离层最直接的表现. 太阳风输入磁层的能量主要是以电磁能和太阳风粒子携带的机械能的形式输入. 研究表明, 来自不同太阳风条件下磁层的电磁能与机械能的输入功率大体相同^[18]. 总而言之, 太阳风能量输入的能量可以分为电磁能与机械能, 而携带机械能沉降至极区的粒子又分为电子和离子, 这样估算出的沉降电子能量就可以根据不同能量的占比关系在一定程度上反推出日地能量耦合情况.

MHD 模拟结果表明^[19], 在一般情况下日侧能量注入 (尤其是机械能) 主要发生在地球南北极隙区,

其单位面积内太阳风向磁层注入最大的机械能功率约为 $6 \times 10^{-5} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ^[19]. 本文研究发现, 在所给出的喉区极光过程中, 单位面积内磁层向电离层的功率为 $1.31 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 比 MHD 模拟结果高出约一倍. MHD 模拟结果是对磁层顶能量输入的模拟, 而本文是对局地的喉区极光能量输入估算, 从能量量级来看, 估算的结果有一定的合理性. 实际上, 喉区极光过程总是经历点亮、PMAF、变暗三个过程^[20], 根据图7可以发现 10:05:20 UT 为一个转折点, 能量输入到达峰值然后缓慢降低, 对应着极光由亮变暗的过程. 一个完整的喉区极光过程通常是持续时间较短的瞬态过程^[11], 即使是持续时间较长的喉区极光事件, 也是由多个独立的瞬态事件组成的. 此外, 从喉区极光观测上来看, 每当条带状弥散极光与分立极光卵接触时, 就会爆发式地从分立极光卵低纬侧延伸出一条空间尺度可观的, 亮度较大的喉区极光. 这说明喉区极光从点亮到变暗的过程从时间尺度上看不仅是瞬态过程, 还是一个能量爆发式增长的一个过程. 因此, 认为本文得出的输入效率是 MHD 模拟结果的两倍是有一定合理性的.

4 结论

为了估算伴随喉区极光过程中输入到电离层能量, 使用 2015 年 12 月黄河站与 DMSP 卫星的共轭观测, 建立了沉降电子能通量与极光强度的关系. 由此对发生在 2015 年 12 月 8 日的一个典型喉区极光事件, 估算出了该事件由电子携带的输入到电离层的总能量约为 $1.07 \times 10^{11} \text{ J}$, 单位面积输入能量的平均功率约为 $1.31 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 而伴随喉区极光过程输入到电离层的能量是太阳风输入到磁层的机械能的两倍, 也证实了喉区极光过程是一个爆发式的过程, 伴随着较为可观的能量输入. 而这种瞬态、爆发式的喉区极光过程, 可能会引起相应特征的局地空间天气效应.

参考文献

- [1] CHAPMAN S, FERRARO V C A. A new theory of magnetic storms[J]. *Nature*, 1930, **126**(3169): 129-130
- [2] AXFORD W I, HINES C O. A unifying theory of high-latitude geophysical phenomena and geomagnetic storms[J]. *Canadian Journal of Physics*, 1961, **39**(10): 1433-1464
- [3] BIRN J, DRAKE J F, SHAY M A, *et al.* Geospace Envir-

- onmental Modeling (GEM) magnetic reconnection challenge[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2001, **106**(A3): 3715-3719
- [4] SANDHOLT P E, FARRUGIA C J, MOEN J, *et al.* A classification of dayside auroral forms and activities as a function of interplanetary magnetic field orientation[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1998, **103**(A10): 23325-23345
- [5] HAN Desheng, HU Zejun, CHEN Xiangcai, *et al.* Recent results obtained from dayside optical auroral observations at Yellow River station[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2018, **30**(3): 235-250 (韩德胜, 胡泽骏, 陈相材, 等. 基于北极黄河站观测的日侧极光研究新进展 [J]. *极地研究*, 2018, **30**(3): 235-250)
- [6] MENG C I, MAUK B, MCILWAIN C E. Electron precipitation of evening diffuse aurora and its conjugate electron fluxes near the magnetospheric equator[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1979, **84**(A6): 2545-2558
- [7] LOCKWOOD M. Relationship of dayside auroral precipitations to the open-closed separatrix and the pattern of convective flow[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1997, **102**(A8): 17475-17487
- [8] MENDE S B, FREY H U, ANGELOPOULOS V. Source of the dayside cusp aurora[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2016, **121**(8): 7728-7738
- [9] SHI R, LIANG J, HU Z J, *et al.* The potential role of modified electron acoustic wave and nonlinear mode coupling in mono-energetic aurora[J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, **50**(9): e2022GL102680
- [10] FELDSTEIN Y I, ELPHINSTONE R D. Aurorae and the large-scale structure of the magnetosphere[J]. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 1992, **44**(12): 1159-1174
- [11] 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]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2015, **120**(9): 7447-7465
- [12] 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]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2018, **123**(4): 2658-2667
- [13] QIU H X, HAN D S, WANG B Y, *et al.* In situ observation of a magnetopause indentation that is correspondent to throat aurora and is caused by magnetopause reconnection[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, **49**(15): e2022GL099408
- [14] HAN D S. Ionospheric polarization electric field guiding magnetopause reconnection: a conceptual model of throat aurora[J]. *Science China Earth Sciences*, 2019, **62**(12): 2099-2105
- [15] HAN D S, HIETALA H, CHEN X C, *et al.* Observational properties of dayside throat aurora and implications on the possible generation mechanisms[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2017, **122**(2): 1853-1870
- [16] HAN Desheng, QIU Huixuan, SHI Run. Reconsideration on the concept model of throat aurora[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 2022, **53**(5): 605-612 (韩德胜, 邱荟璇, 石润. 喉区极光模型再考 [J]. *地球与行星物理评论*, 2022, **53**(5): 605-612)
- [17] LI Guojun. Location and Modeling of the Ionospheric Projection Boundary of Earth's Cusp Region Based on ASI[D]. Xi'an: Xidian University, 2021 (李国君. 基于 ASI 的地球极隙区电离层投影边界定位与建模 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021)
- [18] QIU Qi, YANG Huigen, LU Quanming, *et al.* Correlation between emission intensities in dayside auroral arcs and precipitating electron spectra[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, **60**(2): 489-498 (丘琪, 杨惠根, 陆全明, 等. 日侧极光弧的发光强度与沉降电子能谱的相关关系 [J]. *地球物理学报*, 2017, **60**(2): 489-498)
- [19] LU J, ZHANG H X, WANG M, *et al.* Energy transfer across the magnetopause under radial IMF conditions[J]. *The Astrophysical Journal*, 2021, **920**(1): 52
- [20] CHEN X C, HAN D S, LORENTZEN D A, *et al.* Dynamic properties of throat aurora revealed by simultaneous ground and satellite observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2017, **122**(3): 3469-3486

作者简介



范天舒 男, 1998 年 1 月出生于内蒙古巴彦淖尔. 内蒙古师范大学硕士研究生, 主要研究方向为磁层物理.
E-mail: a1361318457@163.com



曹永军 (通信作者) 男, 1975 年 7 月出生. 内蒙古师范大学教授, 博士生导师, 主要从事人工微结构复合材料物理及数学物理问题的数值计算研究.
E-mail: phyicao@immu.edu.cn



韩德胜 (通信作者) 男, 1973 年 7 月出生. 同济大学海洋与地球科学学院教授, 主要研究方向为极光科学.
E-mail: handesheng@tongji.edu.cn