丘琪,杨惠根,陆全明等.2017.日侧极光弧的发光强度与沉降电子能谱的相关关系.地球物理学报,60(2):489-498,doi:10.6038/cjg20170204.

Qiu Q, Yang H G, Lu Q M, et al. 2017. Correlation between emission intensities in dayside auroral arcs and precipitating electron spectra. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese),60(2):489-498,doi:10.6038/cjg20170204.

日侧极光弧的发光强度与沉降电子能谱的相关关系

丘琪^{1,2},杨惠根²*,陆全明¹,胡泽骏²

1 中国科学技术大学地球和空间科学学院,中国科学院近地空间环境重点实验室,合肥 2300262 中国极地研究中心国家海洋局极地科学重点实验室,上海 200136

摘要本文利用中国北极黄河站多波段全天空极光观测数据,选取稳定的日侧极光弧,统计研究了极光强度比 *I*_{557.7}/*I*_{630.0}与极光发光强度*I*_{557.7}的相关关系.发现*I*_{557.7}在午前暖点和午后热点区附近出现极大值,分别为2.2 kR 和2.9 kR;而*I*_{630.0}在磁正午出现极大值,为1.5 kR.当*I*_{557.7}从0.1 kR增加到10 kR时,极光强度比*I*_{557.7}/*I*_{630.0}也 由0.2增加到9.结合 DMSP 卫星探测的沉降粒子能谱数据,找到17 个 DMSP 卫星穿越黄河站上空极光弧的事 件,共穿越40条极光弧.得到了沉降电子的平均能量正比于极光强度比*I*_{557.7}/*I*_{630.0},沉降电子的总能通量正相关于 极光强度*I*_{557.7}的关系式.利用该关系式反演所有极光弧的电子能谱,发现在午前和午后扇区,产生极光弧的沉降电 子主要来源于等离子体片边界层;在高纬出现强度较弱的弧,对应等离子体幔区域.在磁正午附近,沉降电子的平 均能量较低,极光弧处于低纬一侧,粒子源区主要是低纬边界层.

关键词 日侧极光弧;极光发光强度;电子沉降;等离子体片边界层;低纬边界层 doi:10.6038/cjg20170204 **中图分类号** P351 **收稿日期** 2016-04-27,2016-12-29 收修定稿

Correlation between emission intensities in dayside auroral arcs and precipitating electron spectra

QIU Qi^{1,2}, YANG Hui-Gen^{2*}, LU Quan-Ming¹, HU Ze-Jun²

 CAS Key Laboratory of Geoscience Environment, Department of Geophysics and Planetary Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China
 SOA Key Laboratory for Polar Science, Polar Research Institute of China, Shanghai 200136, China

Abstract More than 20,000 dayside auroral arcs of the 557.7 and 630.0 nm emission intensities have been statistically studied, and the dependences of the $I_{557.7}/I_{630.0}$ ratio on the $I_{557.7}$ emission intensity have been determined. The 557.7 nm emission intensity has two maximum values in the hot spot and warm spot regions, with average values of 2.2 and 2.9 kR, respectively. But there is a maximum near magnetic noon for 630.0 nm emission intensity, with an average value of 1.5 kR. In the $I_{557.7}$ emission range 0.1~10 kR, the $I_{557.7}/I_{630.0}$ ratio tends to increase from 0.2 to 9. The correlation between the emission intensity and precipitating electron spectra have been investigated using 17 cases of DMSP passing through 40 auroral arcs above the Chinese Arctic Yellow River Station (YRS). We obtain the equations that the average energy of the electrons is

基金项目 国家自然科学基金重点项目(41431072)和面上项目(41274164,41504115),南北极环境综合考察与评估专项(CHINARE2016-02-03,CHINARE2016-04-01),中国科学院战略性先导科技专项(XDA04060201),浦东新区科技发展基金(Pkj2013-z01),国家海洋局 极地科学重点实验室开放基金(KP201303)和中组部青年拔尖人才计划项目共同资助.

第一作者简介 丘琪,男,1985年生,博士,研究方向为极光物理. E-mail:ariesgreen@163.com

proportional to the $I_{557.7}/I_{630.0}$ ratio. There is a positive correlation between the total energy flux of the electrons and the $I_{557.7}$ emission intensity. The typical region of electron precipitation, which the auroral arcs were observed, was BPS (boundary plasma sheet) in the prenoon and postnoon sectors. We also found some low-energy precipitating electrons from the region of mantle, where the arcs are located poleward of dayside auroral oval. The magnetic source region of the precipitating electrons with low energy was identified as the LLBL (low latitude boundary layer) adjacent to magnetic noon. Arcs are located at the lower latitude in this region.

Keywords Dayside auroral arc; Auroral emission intensity; Electron precipitation; BPS; LLBL

1 引言

极光是日地环境中的一种重要现象,被认为是 太阳风-磁层相互作用过程在极区电离层的指示器. 极光由沉降粒子与高层大气中性粒子碰撞,使中性 粒子的束缚电子从基态向高能态跃迁,再退激发产 生光子而发光(Jones, 1974). 557.7 nm, 630.0 nm 和 427.8 nm 这 3 个波段是极光在可见光波段的主要谱 线,它们的激发在极光的发光过程中起到了重要作 用(Chamberlain, 1995). 绿色极光(557.7 nm)由氧 原子O从激发态¹S至¹D能态的跃迁产生,在¹S激发 态的平均寿命为 0.8 s;红色极光(630.0 nm)由氧原子 O从1D能态往基态跃迁产生,在1D能态的平均寿 命为 110 s; 而紫色极光(427.8 nm) 是 N₂ 第一负带 系统(N⁺)激发产生.这三个波段(427.8 nm、557.7 nm 和 630.0 nm)的极光激发过程不同,它们的发光高度 也不一样. 红色极光(630.0 nm)的发光高度最高, 在 离地面 200 km 以上,由于 O(1D)往基态跃迁时间长, 在较低高度处,激发态氧原子还来不及产生辐射,就 会因碰撞而失去活动性(Meng et al., 1991). 而在低 高度处,氧原子数密度急剧下降,氮分子数量增加,因 此,绿色极光(557.7 nm)的发光高度(~150 km)高于 紫色极光(427.8 nm)的发光高度(~120 km).

通过比较不同波段谱线的极光发光强度可以研 究极光沉降粒子的能谱特征,已经有许多学者作了 相关研究.在早期,Eather 和 Mende(1972)就分析 了 557.7 nm、630.0 nm、427.8 nm 这三个波段的极 光发光强度与沉降电子能通量以及 $I_{630.0}/I_{427.8}$ 强度 比和沉降电子能量之间的关系(Eather, 1969; Eather and Mende, 1972). Gattinger 和 Jones(1972)也发现 极光强度比 $I_{630.0}/I_{427.8}$ 和 $I_{557.7}/I_{427.8}$ 随着 427.8 nm 波段发光强度 $I_{427.8}$ 的增加而减小. Jones 等(1987) 还结合雷达数据进行分析,发现极光强度比 $I_{630.0}/I_{427.8}$ $I_{557.7}/I_{427.8}$ 的变化不明显. Dashkevich 等(2006)使 用超过 3800 个观测数据也对极光强度比 $I_{630.0}/I_{427.8}$ 和 $I_{557.7}/I_{427.8}$ 与极光强度 $I_{427.8}$ 进行研究. 结果 表明,随着 $I_{427.8}$ 由 0.1 kR 增大到 3 kR, $I_{630.0}/I_{427.8}$ 从 2 减小到 0.4;当 $I_{427.8}$ 由 0.1 kR 增大到 1.8 kR, $I_{557.7}/I_{427.8}$ 从 6.4 减小到 4.2.这些研究表明了不同 波段的极光强度比与沉降电子的平均能量之间存在 着某种函数关系(Rees and Luckey, 1974). Christensen 等(1987)以及 Rees 和 Roble (1986)都通过建立模 型,用极光强度来估算沉降电子的能通量,用极光强 度比 $I_{630.0}/I_{427.8}$ 来估算沉降电子的平均能量.

中国北极黄河站位于极隙区纬度,适合观测日 侧极光.Hu 等(2009)利用黄河站三波段(427.8 nm, 557.7 nm 和 630.0 nm)的观测数据,对日侧极光进 行了综观分析,把日侧极光分为了4类.日侧极光与 磁层边界层的动力学过程密切相关,因此对日侧极 光弧的研究,首先得找到极光弧粒子对应的磁层源 区. Newell 等利用极轨卫星(DMSP)探测的粒子能 谱数据来判断粒子对应的磁层源区(Newell and Meng, 1988; Newell et al., 1991a, 1991b). 日例 极光在低高度上主要源区的特征为:低纬边界层 (LLBL),主要位于 74°~77°MLAT,在磁正午纬度 更高,晨昏侧纬度更低,电子总能通量大于 6× 10¹⁰ eV • (cm² • s • sr)⁻¹, 2 keV 或5 keV电子能道的 能通量小于 10^7 eV • (cm² • s • sr)⁻¹,平均电子能量 220 eV<*E*_e<600 eV,电子数通量在10⁹(cm² • s • sr)⁻¹ 量级 (Newell and Meng, 1988); 等离子体幔 (Mantle),位于日侧极光卵的极向侧,大约在 77° MLAT 附近,离子的数密度以及平均能量随着纬度 的增加而逐渐减小,电子、离子的平均能量较小,为 几百电子伏(Newell et al., 1991a);等离子体片边 界层(BPS),电子平均能量为 keV 量级,2 keV 或 5 keV电子能道的能通量大于 10^7 eV • (cm² • s • sr)⁻¹ (Newell et al., 1991b).

用极轨卫星(DMSP)获得的沉降粒子能谱数

据,由于轨道的限制,只与黄河站在正午和午后有少 许覆盖,要想得到极光对应的能谱数据较难.因此, 有必要建立一个极光强度与粒子能谱关系的模型. 邢赞扬等(2013)利用北极黄河站全天空极光观测图 像(ASIs)和 DMSP 能谱数据,对磁正午附近的极光 强度(427.8 nm 和 630.0 nm 波段)与沉降粒子能量 关系的参数模型进行研究,得到了磁正午附近不同 磁地方时(MLT)的相关关系式.在 Hu 等(2009)区 分的4类极光中,有一种典型的日侧极光为极光弧, 它一般并不出现在磁正午附近,而主要出现在午前 和午后(Yang et al., 2000; Sandholt et al., 2002),呈 现一个狭长型的结构,在经度方向延伸(>100 km),在 纬度方向狭窄(~18 km). 它在 557.7 nm 和 630.0 nm 波段的激发较强,而427.8 nm 波段的激发较弱.由 于极光弧在 427.8 nm 波段并不明显,并且在通常 情况下,557.7 nm 和 427.8 nm 波段的极光发光强 度成正比,能够很好地表征电子能通量(Paschmann et al., 2002),因此,我们将利用 I557.7 和 I630.0 来分 析研究沉降电子的能谱特征.

本文利用北极黄河站的多波段极光全天空观测数据,选取其中的日侧极光弧(对应于 0600~ 1800 MLT),分析极光强度比 I_{557.7}/I_{630.0} 与极光发 光强度 I_{557.7}之间的关系.同时,利用 DMSP 卫星穿 越黄河站事件,结合 DMSP 卫星探测到的粒子沉降 能谱,建立日侧极光弧的发光强度与电子沉降能谱 之间的相关关系式,并分析极光弧所对应的磁层源 区.再利用得到的关系式反演无 DMSP 卫星观测时 极光弧的能谱及对应源区,并对源区的分布进行讨论.

2 观测数据

本文采用的数据是 2003 年 12 月到 2007 年 2 月北极黄河站观测得到的 557.7 nm 和 630.0 nm 波段的全天空极光图像(ASIs).北极黄河站位于斯 瓦尔巴特(Svalbard)群岛新奥尔松(Ny-Ålesund)地 区,地理经纬度分别为 78.92°N,11.93°E,修正磁纬 为 76.24°, 磁地方时与世界时的关系可以简单地用 以下公式描述:MLT≈UT+3h(Qiu et al., 2013). 黄河站的极光全天空观测系统由3套配置相同的全 天空 CCD(Charge-Coupled Device, 电荷耦合元件) 成像观测仪组成,可分别对 427.8 nm、557.7 nm 和 630.0 nm 这 3 个波段的极光进行观测(胡泽骏等, 2005). CCD 相机选用 512×512 像素阵列,可以得 到全天空图像,图像的中心对应于观测天顶.全天空 相机每10秒拍摄一张图像,每帧图像的曝光时间为 7 s. 全天空相机采用鱼眼镜头,根据天顶角和方位 角进行全天空成像,全天空图像中每个像素观测天 空所张的立体角相等.因此,根据杨惠根等(1997)的 模型,对极光发光强度按天顶角进行了相应的修正. 在全天空图像中,选取在 557.7 nm 和 630.0 nm 这 两个波段都明显出现的极光弧.我们得到了44天, 总共 22882 条极光弧.

对于任意一条极光,沿着磁子午线方向,可以得 到发光强度随天顶角的变化曲线,如图 1 所示.图 1a 给出了 2003 年 12 月 24 日 1359 UT(1659 MLT)观测 的 557.7 nm 波段极光弧全天空图像,白线沿磁子 午线方向,以白线为直径形成的圆为全天空视野的 有效范围.从极光发光强度变化曲线(图 1b),可以 看出极光弧对应一个峰,峰值定义为这条极光弧的 发光强度,图中这条弧的发光强度为 4.7 千瑞利(kR). 对于其他 557.7 nm 波段以及 630.0 nm 波段的全天空 图像,极光弧的发光强度也采用相同的方法得到.

DMSP卫星是美国国防部发射的一系列极轨气 象卫星的统称,约每2年发射一颗,依次命名,本文 使用 F13—F16 这四颗卫星探测的粒子能谱数据. DMSP卫星上的粒子探测仪(SSJ/4)可探测32 eV



图 1 日侧极光弧发光强度测量 Fig. 1 Emission intensity measurement of dayside auroral arc

到 30 keV 能量范围的电子和离子的能谱数据 (Hardy et al., 2008). DMSP 卫星运行的轨道高度 约为 830 km,周期为 101 min (Ashrafi et al., 2005). 在所选的出现有极光弧的全天空数据中,找 到 17 次明显的 DMSP 卫星穿越事件. 这些事件都 发生在午后,从 1320 MLT 到 1755 MLT,总共经过 40 条极光弧.

3 统计结果

3.1 日侧极光弧发光强度的分布及与强度比 *I*_{557.7}/*I*_{630.0}的关系

在对日侧极光弧的能谱及源区分析之前,先给 出 22882 条极光弧发光强度的分布以及与强度比 I557.7/I630.0的关系,让我们对日侧极光弧有个直观 印象.图 2 给出了 557.7 nm(a)和 630.0 nm(b)波 段的日侧极光弧平均发光强度随磁地方时的变化. 其中,星号对应为不同磁地方时的平均强度,竖线是 相应时刻的误差棒.绿色极光(557.7 nm)的发光强 度变化范围为 0.1~17.3 kR,平均值是 2 kR. 从图 2a 中可以看出,对于绿色极光,平均发光强度在日 侧存在两个极大值,其中较强的为 2.9 kR,出现在 磁地方时15时附近,对应到午后的极光热点区 (Liou et al., 1997, 1999); 而弱一点的为 2.2 kR, 出现在磁地方时9时附近,对应到午前的极光暖点 区(Newell et al., 1996). 而红色极光(630.0 nm) 的发光强度变化范围相对较窄,为0.2~3.9 kR,平 均值是 0.9 kR,相比绿色极光较弱. 从图 2b 中可以 看出,对于红色极光,平均发光强度在午前和午后相 对较小,反而在磁正午附近出现极大值,为1.5 kR. 日侧极光弧主要在 557.7 nm 和 630.0 nm 波段发 光,其中绿色极光更为显著.

图 3 给出了在午前不同磁地方时,极光强度比

 $I_{557,7}/I_{630,0}$ 对应极光发光强度 $I_{557,7}$ 的散点分布图. 为了更好地进行对比分析,图中 $I_{557.7}/I_{630.0}$ 及 $I_{557.7}$ 的数据都取了对数.其中,黑色实线是对散点进行线 性拟合得到的直线,对应的表达式以及相关系数 R 在每幅图的左上角标示,虚线对应为拟合值 $\pm \sigma$, σ 为 标准差.从图中可以看出,取对数之后, I557.7/I630.0与 $I_{557.7}$ 呈现很好的线性相关关系,相关系数接近 0.9, 标准差约为 0.1. 当 I557.7 由 0.1 kR 增大到 10 kR 时, I557.7/I630.0从大约 0.2 增大到 9. I557.7/I630.0 在午 前的最小值是 0.17,最大值是 23.9,平均值为 2.6. 在磁正午附近, I_{557.7} / I_{630.0} 小于1的极光弧发生数更 多,这与图1得到630.0 nm 波段的平均发光强度在 磁正午附近出现极大值吻合. 由拟合曲线的表达式 可以发现,对于相同的极光发光强度 I557.7,发光强 度比 I557.7/I630.0 越靠近磁正午越小.图 4 给出了午 后不同磁地方时,极光强度比 I557.7/I630.0 对应极光 发光强度 I557.7 的散点分布图. 和图 3 一样,图中 $I_{557,7}/I_{630,0}$ 及 $I_{557,7}$ 的数据都取了对数,黑色实线也 是相应的拟合曲线.我们可以得到与午前类似的结 果, $I_{557,7}/I_{630,0}$ 与 $I_{557,7}$ 同样呈现很好的线性相关关 系,相关系数都大于 0.9,标准差基本都小于 0.1,其 变化规律与午前基本一致. I557.7/I630.0 在午后的最 小值是 0.24, 最大值是 17.1, 平均值为 2.0. 对于相 同的极光发光强度 $I_{557,7}$,发光强度比 $I_{557,7}/I_{630,0}$ 也 是越靠近磁正午越小. 总之,无论午前还是午后,对 应一定的发光强度 $I_{557,7}$,发光强度比 $I_{557,7}/I_{630,0}$ 在 磁正午小,在晨昏两侧大.

3.2 极光发光强度与沉降电子能谱之间的关系

参照邢赞扬等(2013)在磁正午附近的模型,利 用 427.8 nm 和 630.0 nm 波段的极光图像,发现沉 降电子的能通量与极光发光强度相关,而沉降电子 的平均能量与不同波段的极光强度比相关.由于极 光弧在427.8 nm波段的观测不明显,而最显著的







图 3 双对数坐标系下,在午前扇区不同 MLT,极光强度比 *I*_{557.7} / *I*_{630.0} 随极光发光强度 *I*_{557.7} 的变化 Fig. 3 *I*_{557.7} / *I*_{630.0} ratio versus *I*_{557.7} emission intensity in the double logarithmic coordinate system in the prenoon sector



图 4 双对数坐标系下,在午后扇区不同 MLT,极光强度比 *I*_{557.7}/*I*_{630.0} 随极光发光强度 *I*_{557.7} 的变化 Fig. 4 *I*_{557.7}/*I*_{630.0} ratio versus *I*_{557.7} emission intensity in the double logarithmic coordinate system in the postnoon sector

光谱波段为 557.7 nm,并且 557.7 nm 波段的极光 与 427.8 nm 波段的极光发光高度都在 100 多公里, 发光强度通常情况下正比于 427.8 nm 波段的强 度,因此本文用 557.7 nm 波段的极光强度代替 427.8 nm 波段.极光是沉降粒子与大气层中的中性

粒子碰撞、激发而产生的.沉降粒子的能量越大可以 多次碰撞产生极光,极光的发光强度就越大 (Paschmann et al., 2002),而粒子的数通量越多就 越容易与中性粒子碰撞激发极光,发光强度也越大. 因此,沉降粒子的总能通量(平均能量与数通量的乘 积)越大,极光的发光强度就越大.沉降粒子的能量 越大,可穿透到的高度就越低,在 200 km 以上,沉 降粒子的能量一般在 0.5 keV,主要光谱波段为 630.0 nm,产生红色极光;而到 100 多公里的高度, 粒子能量在 1~10 keV,绿色极光更为主要(Rees, 1963).所以,利用不同高度的极光强度比就可以表 征粒子的平均能量,如果 557.7 nm 波段的强度更 大,粒子的平均能量就越大,反之 630.0 nm 波段的 极光更强,粒子的平均能量就越小.

图 5 给出了 DMSP 卫星观测得到的沉降电子 平均能量随 $I_{557.7}/I_{630.0}$ 变化的散点分布图,采用双 对数坐标系,实线为线性拟合的结果. 拟合曲线的斜 率实际为 0.99,这里取值为 1. 由图 5 可以发现,沉 降电子的平均能量与 $I_{557.7}/I_{630.0}$ 呈正相关关系,随 着 $I_{557.7}/I_{630.0}$ 的增加而增大. 这是因为 557.7 nm 波 段的极光发生高度比 630.0 nm 波段的极光发生高 度低,而能量较高的电子能够沉降到更低的大气层 中. $I_{557.7}/I_{630.0}$ 越大,就表明有更多的电子沉降到更 低的大气层中,电子的平均能量就更大. 在双对数坐 标系中,沉降电子的平均能量与 $I_{557.7}/I_{630.0}$ 拟合的 结果较好,因而可以用 $I_{557.7}/I_{630.0}$ 来反演沉降电子 的平均能量 *E*. 拟合曲线的表达式为

 $\log E = 2.7604 + \log(I_{557.7}/I_{630.0}),$ (1) 那么,可由不同高度的极光强度比 $I_{557.7}/I_{630.0}$ 来反 演沉降电子的平均能量 E:

$$E = 10^{2.7604} \times \left(\frac{I_{557.7}}{I_{630.0}}\right) = 575.9 \times \left(\frac{I_{557.7}}{I_{630.0}}\right), (2)$$

其中,平均能量 E 的单位为 eV.

由图 2 我们知道,绿色极光(557.7 nm)的发光 强度范围相比红色极光(630.0 nm)的范围更宽,极



图 5 沉降电子平均能量与极光强度比 I_{557.7}/I_{630.0}的关系 Fig. 5 Relation between average energy of precipitating electron and I_{557.7}/I_{630.0} ratio





光弧的主要谱线在绿色波段,因此, $I_{557.7}$ 更合适表征 沉降电子的能通量.图6给出了在双对数坐标系下, 沉降电子的能通量JE随极光强度 $I_{557.7}$ 变化的散点 分布图,实线是由这些散点进行线性拟合得到.由图 6可以看出,随着 $\log(I_{557.7})$ 的增大,沉降电子能通 量的对数值 $\log(JE)$ 也逐渐增大,并呈现较好的线 性关系.拟合曲线的表达式为

 $\log JE = 11.5907 + 1.275 \times \log I_{557.7}$, (3) 那么,可以得到沉降电子的能通量 JE 与极光强度 $I_{557.7}$ 的关系为

 $JE = 10^{11.5907} \times I_{557.7}^{1.275}$, (4) 其中, JE 是总的沉降电子的能通量, 是各个能量通道 测量的能通量的总和, 单位为 eV • $(cm^2 \cdot s \cdot sr)^{-1}$.

4 讨论

4.1 日侧极光弧粒子的磁层源区

黄河站观测的极光为电子极光,为了判断沉降 电子对应的磁层源区,我们对 DMSP 卫星经过黄河 站上空极光弧的事件进行分析,讨论不同源区具有 的沉降粒子能谱特征.图7给出了2003年12月29 日发生的一次 DMSP 卫星穿越黄河站上空极光弧的事 件,展示了 DMSP 卫星穿越全天空图像的轨迹(左)及 其相应时刻的粒子能谱图(右). DMSP 卫星进入和离 开黄河站视野的时间分别为1420 UT (1720 MLT)和 1422 UT (1722 MLT).图中左侧给出了1420 UT(1720 MLT)观测的557.7 nm 和 630.0 nm 波段的全天空 图像,红线为映射到极光发光高度处 DMSP 卫星的 穿越轨迹,从南到北依次经过了3条极光弧,经过的 时刻在图中用"*"标出.右侧从上到下依次给出了



图 7 2003 年 12 月 29 日 1420—1422 UT 发生的 DMSP 卫星经过黄河站上空极光弧的事件 左侧为 557.7 nm 和 630.0 nm 波段的全天空图像,白色实线沿磁子午线方向,红色实线为 DMSP 的轨迹.右侧从上到下分别是 I_{557.7}和 I_{630.0}随时间的变化曲线,电子和离子的总能通量(eV · (cm² · s · sr)⁻¹)和平均能量(eV)的变化以及电子和离子的能谱图. Fig. 7 A case of DMSP passing above YRS between 1420—1422 UT on December 29, 2003 All-sky images (left) of 557.7 and 630.0 nm. The auroral arc intensity (kR), total energy flux (eV · (cm² · s · sr)⁻¹), average energy (eV) and the spectrograms of electron and ion are plotted from top to bottom on the right.

DMSP 卫星轨迹上 $I_{557,7}$ (绿色实线)和 $I_{630,0}$ (红色实 线)随时间的变化曲线,电子(黑点)和离子(红点)的 总能通量随时间的变化,电子(黑点)和离子(红点) 平均能量的变化,电子能谱图以及离子能谱图.图中 三条虚线分别是 DMSP 经过 3 条极光弧对应的时 刻,由于坐标映射的误差,会使得计算的时刻与实际 值之间产生几秒到十几秒的差别.从图中可以明 显地看出,极光弧存在的位置会出现一个极光发 光强度的峰值,对应到电子能谱图中的一个倒"V" 结构.在 DMSP 卫星路径上,总共经过3条极光 弧,其中前两条弧对应的电子总能通量为10¹¹~ 10¹² eV • (cm² • s • sr)⁻¹,存在大量 1 keV 以上的 电子,平均能量为1~2 keV,从能谱特征上可以判 断这块区域对应的磁层源区是等离子体片边界层 (BPS)(Newell et al., 1991b). 第3条弧,出现在全 天空图像的极向侧,在78°MLAT附近,电子的平 均能量较低,为695 eV,并且离子的总能通量和平 均能量都随着纬度的增加而逐渐减小(见图 7 右图红点随 UT 的变化), 对应到等离子体幔 (Mantle)(Newell et al., 1991a). 由于定义有所差 别,这种极光弧归类为Hu等(2009)定义的帷幔状 极光.

极光弧沉降电子对应的源区除了等离子体片边 界层和等离子体幔,还可能是低纬边界层(LLBL). 图 8 为 2003 年 12 月 25 日 1149—1150 UT 发生的 一次 DMSP 卫星穿越黄河站上空极光弧的事件.从 图中可以看到,DMSP 卫星穿越了 1 条极光弧,弧位 于视野赤道向一侧,在极光发光强度的变化曲线上 也出现了 1 个峰值.从电子能谱中,也可以看到对应 时刻出现了倒"V"结构.在 DMSP 穿越极光弧这段 时间,大于 1 keV 的电子数通量较小,并且平均能量 较低,小于 600 eV,这段区域处于日侧极光卵靠近 赤道向一侧,位于 75.6°MLAT,这些能谱特征表明 这些极光弧位于低纬边界层.

在找到的 17 次 DMSP 穿越黄河站上空的事件 中,共经过 40 条极光弧.在这些事件中,经过能谱分 析,其中大多数日侧极光弧对应的源区 BPS,共有 33 条极光弧,发光强度 $I_{557.7}$ 的范围为 0.4~5.4 kR; 强度比 $I_{557.7}/I_{630.0}$ 大于 1,电子平均能量变化范围为 537 eV~2.4 keV,平均值为 1.1 keV,电子总能通 量大于 10¹¹ eV · (cm² · s · sr)⁻¹.在其中还发现 6 条弧对应到 Mantle,发光强度 $I_{557.7}$ 的范围为 276~ 457 R;强度比 $I_{557.7}/I_{630.0}$ 为 0.4~1.2,电子平均能 量变化范围为 214~695 eV,平均值为 467 eV,电子 总能通量小于 1.2×10¹¹ eV • (cm² • s • sr)⁻¹. 在这 40 条弧中,我们仅找到一条弧对应到 LLBL,它的发 光强度为 457 R,强度比 $I_{557.7}/I_{630.0}$ 为 0.6,平均能量 是 417 eV,总能通量是 1.2×10¹¹ eV • (cm² • s • sr)⁻¹.

4.2 日侧极光弧对应沉降电子能谱的反演

由表达式(2)和(4),可利用 *I*_{557.7}/*I*_{630.0} 和 *I*_{557.7} 来反演沉降电子的平均能量 *E* 和总能通量 *JE*. 沉 降电子的总能通量 *JE* 与平均能量 *E* 的关系满足



图 8 2003 年 12 月 25 日 1149—1150 UT,全天空极光观测图及 DMSP 探测的粒子能谱图

Fig. 8 All-sky images (left) of 557.7 and 630.0 nm and the spectrogram (right) between 1149-1150 UT on December 25, 2003



图 9 沉降电子的平均能量(上)、总能通量(中)和总数通量(下)随磁地方时的变化

Fig. 9 Average energy (top), total energy flux (middle) and total number flux (bottom) as a function of MLT

 $E \equiv JE/J, \qquad (5)$

J 是沉降电子总的数通量,为经过所有能量通道(32 eV~ 30 keV)的电子数的总和,单位为(cm² • s • sr)⁻¹. 图 9 给出了由反演得到的沉降电子的平均能量 E、 总的能通量 JE 和总的数通量 J 随磁地方时的变 化. 上图对应沉降电子的平均能量 E,实线为平均值 的变化曲线,上下两条虚线分别为 600 和 220 eV; 中间的图对应总的能通量 JE,主要都是在 10¹¹~ $10^{12} \text{ eV} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr})^{-1}$;下图对应总的数通量 *J*,实 线为平均值的变化曲线,虚线为 10^9 (cm² • s • sr)⁻¹. 根据之前对不同源区的事件分析,我们把平均能量 大于 600 eV 的极光弧归为 BPS 源区,用红点标示; 而平均能量小于 600 eV 的极光弧,在赤道侧即天顶 角小于 0(<76.2 MLAT)的归为 LLBL,用绿点标 示, 而极向侧(>76.2 MLAT)的归为 Mantle, 用蓝 点标示.从图 9 中可以看出,在午前和午后主要源区 为 BPS; 而位于 Mantle 区的极光弧发生较少, 更多 地出现在晨昏两侧的高纬,这可能与 Lassen 和 Danielsen(1978)提到的位于极盖区的日向极光弧 有关. 在磁正午附近(11-13 MLT),沉降电子的平 均能量主要集中在 220~600 eV 之间,总的能通量 大于 10¹¹ eV • (cm² • s • sr)⁻¹,并且总的数通量为 $\sim 10^9$ (cm² • s • sr)⁻¹,位于低纬侧,粒子来源于低纬 边界层(LLBL).

由图 9 中沉降电子的总的数通量变化,可以发 现在磁正午附近数通量较大,峰值位于磁正午偏午 后一侧,而往晨侧和昏侧数通量逐渐减小.图2和图 3 展现出对于相同的 I 557.7, I 557.7 / I 630.0 越靠近磁正午 越小. 这是因为极光发光强度 I557 7 与总能通量正相 关,强度比 I557.7/I630.0 与沉降电子的平均能量成正 比,从表达式(5)可以看出,当电子数通量大的时候, 对同样的能通量,电子的平均能量就越小,因此,磁 正午附近 I_{557.7}/I_{630.0}相对更小. 沉降电子的数通量 与磁层源区的粒子数密度相关.磁正午附近,源区主 要是低纬边界层,对应粒子数密度为1~40/cm³ (Sckopke et al., 1981; Li et al., 2011);而午前和 午后主要是等离子体片边界层,对应粒子数密度为 0.1~1/cm³,低于低纬边界层(Eastman et al., 1984).因此,磁正午附近,沉降电子的平均数密度相 对更大. 而数通量在 14 MLT 附近出现极大值, 这 是因为这个区域对应的磁层边界层易发生反平行重 联(Hu et al., 2014),从而太阳风中的粒子可以进 入磁层再沉降到电离层,使得沉降电子的数通量增 加. 但是由图 9 也可以看出,这个区域的极光粒子源 区既可能是等离子体片边界层,也可能是低纬边界层,难以完全区分,一些物理过程还没有研究透彻, 还需要进一步分析.

5 结论

本文利用北极黄河站 4 年的多波段极光观测数 据(包括 557.7 nm 和 630.0 nm),结合 DMSP 卫星 探测的沉降粒子的能谱数据,统计分析了极光弧的 发光强度与沉降电子能谱特征之间的关系,并对不 同能谱特征对应的磁层源区进行了讨论,得到的主 要结论如下:

(1)日侧极光弧绿色波段在午前暖点和午后热 点区出现极大值,平均发光强度分别为 2.2 和 2.9 kR; 红色波段的平均强度小于绿色波段,在磁正午附近 出现极大值,为 1.5 kR.

(2)极光弧的强度比 *I*_{557.7}/*I*_{630.0}随着发光强度 *I*_{557.7}的增大而增大,当 *I*_{557.7}由 0.1 kR 增加到 10 kR
时,*I*_{557.7}/*I*_{630.0}也是从 0.1 增大到接近 10.

(3) 沉降电子的平均能量正比于极光弧的强度
 比 *I*_{557.7}/*I*_{630.0}, 总的能通量与极光弧的发光强度
 *I*_{557.7}/正相关,为指数关系.

(4)产生极光弧的沉降电子在午前和午后扇区 主要来源于等离子体片边界层,位于高纬侧的弧也 可能源于等离子体幔,在磁正午附近出现的极光弧 对应的源区为低纬边界层,主要出现在偏低纬一侧.

沉降电子的能量信息可以通过表达式(2)和(4) 反演得到,有助于在没有卫星观测的时候,极光弧对 应源区的判断.不同源区极光弧的形态和动态特征 的差别也还需要进一步研究.

致谢 该研究的极光数据由中国极地研究中心极地 大气与空间物理学研究室提供;DMSP 数据来自网 站 http://sd-www.jhuapl.edu/Aurora/.

References

- Ashrafi M, Kosch M J, Honary F. 2005. Comparison of the characteristic energy of precipitating electrons derived from ground-based and DMSP satellite data. *Annales Geophysicae*, 23(1): 135-145.
- Chamberlain J W. 1995. Physics of the Aurora and Airglow. Washington D. C. : American Geophysical Union.
- Christensen A B, Lyons L R, Hecht J H, et al. 1987. Magnetic field-aligned electric field acceleration and the characteristics of the optical aurora. *Journal of Geophysical Research*, 92(A6):

6163-6167.

- Dashkevich Z V, Zverev V L, Ivanov V E. 2006. Ratios of the $I_{630.0}/I_{427.8}$ and $I_{557.7}/I_{427.8}$ emission intensities in auroras. Geomagnetism and Aeronomy, 46(3): 366-370.
- Eastman T E, Frank L A, Peterson W K, et al. 1984. The plasma sheet boundary layer. Journal of Geophysical Research, 89 (A3): 1553-1572.
- Eather R H. 1969. Latitudinal distribution of auroral and airglow emissions: The 'Soft' Auroral Zone. Journal of Geophysical Research, 74(1): 153-158.
- Eather R H, Mende S B. 1972. Systematics in auroral energy spectra. *Journal of Geophysical Research*, 77(4): 660-673.
- Gattinger R L, Jones A V. 1972. The intensity ratios of auroral emission features. *Annales De Géophysique*, 28(1): 91-97.
- Hardy D A, Holeman E G, Burke W J, et al. 2008. Probability distributions of electron precipitation at high magnetic latitudes. *Journal of Geophysical Research Space Physics*, 113(A6): A06305, doi: 10.1029/2007JA012746.
- Hu Z J, Yang H G, Ai Y, et al. 2005. Multiple wavelengths observation of dayside auroras in visible range—A Preliminary Result of the First Wintering Aurora Observation in Chinese Arctic Station at Ny-Ålesund. *Chinese Journal of Polar Research* (in Chinese), 17(2): 107-114.
- Hu Z J, Yang H, Huang D, et al. 2009. Synoptic distribution of dayside aurora: Multiple-wavelength all-sky observation at Yellow River Station in Ny-Ålesund, Svalbard. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 71(8-9): 794-804.
- Hu Z J, Ebihara Y, Yang H G, et al. 2014. Hemispheric asymmetry of the structure of dayside auroral oval. *Geophysical Research Letters*, 41(24): 8696-8703.

Jones A V. 1974. Aurora. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company.

- Jones A V, Gattinger R L, Shih P, et al. 1987. Optical and radar characterization of a short-lived auroral event at high latitude. *Journal of Geophysical Research*, 92(A5): 4575-4589.
- Lassen K, Danielsen C. 1978. Quiet time pattern of auroral arcs for different directions of the interplanetary magnetic field in the Y-Z plane. Journal of Geophysical Research, 83(A11): 5277-5284.
- Li L Y, Cao J B, Zhou G C, et al. 2011. Multiple responses of magnetotail to the enhancement and fluctuation of solar wind dynamic pressure and the southward turning of interplanetary magnetic field. *Journal of Geophysical Research*, 116: A12223, doi: 10.1029/2011JA016816.
- Liou K, Newell P T, Meng C I. 1997. Synoptic auroral distribution: A survey using Polar ultraviolet imagery. *Journal of Geophysical Research*, 102(A12): 27197-27205.
- Liou K, Newell P T, Meng C I, et al. 1999. Source region of 1500 MLT auroral bright spots: Simultaneous Polar UV-images and DMSP particle data. Journal of Geophysical Research, 104 (A11): 24587-24602.
- Meng C I, Rycroft M J, Frank L A. 1991. Auroral Physics. New York: Cambridge University Press.
- Newell P T, Meng C I. 1988. The cusp and the cleft/boundary layer: Low-altitude identification and statistical local time variation. Journal of Geophysical Research, 93(A12): 14549-14556.

- Newell P T, Burke W J, Meng C I, et al. 1991a. Identification and observations of the plasma mantle at low altitude. *Journal of Geophysical Research*, 96(A1): 35-45.
- Newell P T, Burke W J, Sánchez E R, et al. 1991b. The lowlatitude boundary layer and the boundary plasma sheet at low altitude: Prenoon precipitation regions and convection reversal boundaries. *Journal of Geophysical Research*, 96 (A12): 21013-21023.
- Newell P T, Lylons K M, Meng C I. 1996. A large survey of electron acceleration events. *Journal of Geophysical Research*, 101(A2): 2599-2614.
- Paschmann G, Haaland S, Treumann R A. 2002. Auroral plasma physics. Space and Science Reviews, 103(1-4): 21-40.
- Qiu Q, Yang H G, Lu Q M, et al. 2013. Widths of dayside auroral arcs observed at the Chinese Yellow River Station. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 102: 222-227.
- Rees M H. 1963. Auroral ionization and excitation by incident energetic electrons. *Planetary and Space Science*, 11(10): 1209-1218.
- Rees M H, Luckey D. 1974. Auroral electron energy derived from ratio of spectroscopic emissions 1. Model computations. *Journal of Geophysical Research*, 79: 5181-5186.
- Rees M H, Roble R G. 1986. Excitation of O(¹D) atoms in aurorae and emission of the [OI] 6300-Å line. Canadian Journal of Physics, 64(12): 1608-1613.
- Sandholt P E, Carlson H C, Egeland A. 2002. Dayside and Polar Cap Aurora. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Sckopke N, Paschmann G, Haerendel G, et al. 1981. Structure of the low-latitude boundary layer. Journal of Geophysical Research, 86(A4): 2099-2110.
- Xing Z Y, Yang H G, Wu Z S, et al. 2013. A parameter model of auroral emissions and particle precipitation near magnetic noon. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 56(7): 2163-2170, doi: 10.6038/cjg20130703.
- Yang H G, Liu R Y, Huang D H, et al. 1997. An all-sky auroral video image analyzing system. *Chinese Journal of Geophysics* (Acta Geophysica Sinica) (in Chinese), 40(5): 606-615.
- Yang H, Sato N, Makita K, et al. 2000. Synoptic observations of auroras along the postnoon oval: a survey with all-sky TV observations at Zhongshan, Antarctica. *Journal of Atmospheric* and Solar-Terrestrial Physics, 62(9): 787-797.

附中文参考文献

- 胡泽骏,杨惠根,艾勇等.2005.日侧极光卵的可见光多波段观测 特征——中国北极黄河站首次极光观测初步分析.极地研究, 17(2):107-114.
- 邢赞扬,杨惠根,吴振森等. 2013. 磁正午附近极光强度与沉降粒 子能量关系的参数模型. 地球物理学报,56(7):2163-2170, doi: 10.6038/cjg20130703.
- 杨惠根,刘瑞源,黄德宏等.1997.极光全天空视频图像分析系统. 地球物理学报,40(5):606-615.