

极尖区电离层离子与地磁活动及太阳风的相关分析

郭建广 史建魁 T. L. Zhang 刘振兴 A. Fazakerley
H. Rème I. Dandouras E. Lucek

(中国科学院空间天气学国家重点实验室, 北京 100080; 中国科学院研究生院, 北京 100049; Space Research Institute, Austrian Academy of Sciences, Graz A-8010, Austria; Mullard Space Science Laboratory, University College London, Holmbury St. Mary, Dorking RH5 6NT, UK; Centre d'Etude Spatiale des Rayonnements, Toulouse 31028, France; Imperial College, London S272B2, UK. E-mail: jgguo@spaceweather.ac.cn)

摘要 对 2001~2003 年间 Cluster 星簇穿越极尖区期间观测到的电离层起源的离子(O^+ 离子, He^+ 离子和 H^+ 离子)特性进行了统计分析, 主要研究了这些离子的数密度与地磁活动以及太阳风动压之间的关系. 结果表明: O^+ 离子数密度和地磁活动指数 K_p 之间存在着正相关关系, He^+ 离子数密度和地磁活动指数 K_p 不相关, O^+ 离子和 He^+ 离子数密度都和太阳风动压之间存在着显著的正相关关系; H^+ 离子数密度与太阳风动压之间存在着正相关关系, 而和地磁活动指数 K_p 不相关. 最后, 对这些离子的特性与太阳风动压及地磁活动之间的关系进行了讨论.

关键词 极尖区 离子 K_p 指数 太阳风动压

Shelley 等 [1] 首先发现磁层的热等离子体中存在 O^+ 离子成份, 后来多颗卫星的观测证实, 在磁层各个区域 [2-4], 包括极隙/极尖区在内, 都有来自电离层的离子, 电离层是磁层等离子体的一个重要源区 [5,6]. 同时磁鞘中的等离子体也可通过极尖区很容易地进入到电离层中. 因此极尖区内就混合了粒子沉降、反射、上行, 磁场和电场的扰动、湍流等现象. 可以说, 极尖区的研究对于了解太阳风-磁层-电离层的耦合过程有着重要的科学意义.

DE-1, Polar 和 Akebono 卫星的长期观测表明, 电离层离子上行的速率和太阳活动、地磁活动之间有着很好的关联 [7-9]. 此外, 很多事例研究也指出, 当太阳风有很强的扰动时, 如伴随日冕物质抛射(CME)现象的行星际激波扫过地球时, 电离层离子上行通量会有剧烈增加 [10,11].

曾有多颗卫星分别对不同高度范围的极尖区做了广泛地探测, 如 DMSF 和 Viking 卫星对低高度极尖区的探测, HEOS2 和 Hawkeye 卫星对高高度极尖区的探测, 而中高度极尖区的探测结果主要来自于 Polar 卫星. 研究范围主要集中在行星际磁场和太阳风对极尖区位形的影响, 离子在极尖区内的能量-纬度分布现象. 而对极尖区内的离子数密度与地磁活动, 以及太阳风一些参数之间的关系, 还未见报道.

本文主要利用 Cluster 星簇的数据, 建立了卫星穿越中高度极尖区的判据, 并对结果进行统计分析, 考察地磁活动指数 K_p 与太阳风动压对极尖区内离子数密度的影响. 分析结果表明, 地磁活动指数 K_p 与 O^+ 离子的数密度之间有显著的正相关关系存在, 而太阳风动压与 O^+ 离子、 He^+ 离子、 H^+ 离子之间都有正相关关系存在.

1 统计事件的选取与分析方法

1.1 极尖区穿越事件的判定

极尖区是一个复杂的区域, 很难给出一个非常全面的定义. 在中高度极尖区, 等离子体存在逆磁效应, 而且这个区域的背景磁场很弱, 这样磁场强度会出现局部下降的现象, 并伴随扰动. 另外在极尖区内还有来自磁鞘的等离子体, 它具有低能量、高密度的特征. 根据以上这些现象, 参考 Zhou 等 [12] 使用的 Polar 卫星穿越极尖区的判据, 建立了 Cluster 星簇中单颗卫星穿越极尖区的判据: 磁场强度相对于背景磁场要有超过 1 nT 的下降而且要伴随着扰动; 质子和电子的数密度要有突增, 并大于 5 cm^{-3} ; 电子的温度要小于 100 eV; 要有明显的 He^{++} 离子存在, 数密度至少要大于 0.5 cm^{-3} .

图 1 是 Cluster/SC3 卫星极尖区穿越的一个实例.

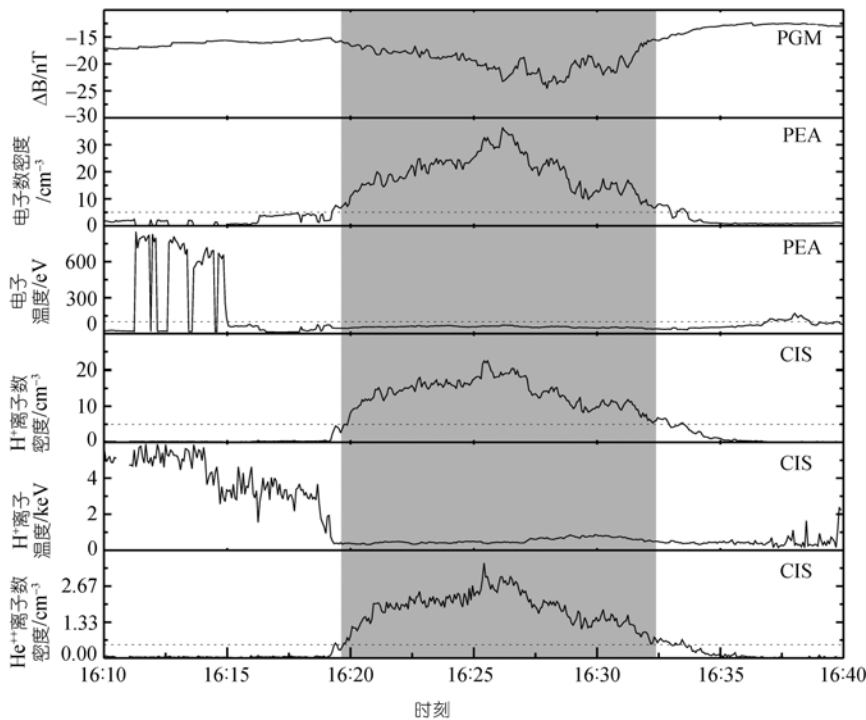


图1 2002-08-10 Cluster/SC3 卫星穿越北半球极尖区期间物理参数的变化

ΔB 是卫星测量的磁场强度减去 T96 模型磁场强度后得到的剩余磁场强度; 阴影部分是根据卫星穿越极尖区的判据确认的极尖区范围

最上面一栏是Cluster/SC3 卫星FGM仪器得到的测量磁场强度减去Tsyganenko 96^[13]模型磁场强度后得到的剩余磁场强度. 第二栏和第三栏是由PEACE仪器得到的电子数密度和电子温度. 第四栏和第五栏是由CIS仪器得到的H⁺离子数密度和H⁺离子温度, 最下面一栏是He⁺⁺离子数密度. 图中的阴影部分是依照卫星穿越极尖区的判据而确认的极尖区范围, 对应的卫星飞越时间为2002年8月10日1619~1632 UT, 磁地方时为14.22~14.41 MLT. 测量磁场强度和模型磁场强度之间的最大差值大约是-25 nT, 电子的数密度最大约为35 cm⁻³, 温度最大约为100 eV, 质子的数密度最大约为20 cm⁻³, 这些基本特征都符合上文中给出的判据.

1.2 统计事件的选取

Cluster 星簇在每年的夏季后期和秋季会经过中高度的极尖区, 本文对2001~2003年间所有可能的中高度极尖区穿越事件进行统计. 由于极尖区的判定涉及到FGM, CIS和PEACE这三种仪器的探测数据, 因此主要从C1, C3和C4这三颗卫星的穿越事件中挑选事例. 另外, 在Cluster星簇穿越极尖区的过程中, 如果多颗卫星都有明显的穿越特性, 那么只选

择其中一颗卫星的观测结果作为统计分析的样本.

1.3 太阳风参数和地磁活动指数的获取

太阳风参数来自ACE卫星(Advanced Composition Explorer). 因为ACE卫星位于磁层顶上游220 Re左右, 因此首先要计算太阳风从ACE卫星传播到地球磁层顶的时间^[14], 然后才可以将太阳风数据和磁层中的数据进行比较研究.

本文中使用的Kp指数来源于世界资料中心日本京都大学C2地磁中心.

1.4 统计分析方法

本文主要通过计算Pearson线性相关系数来考察太阳风动压, 地磁活动指数Kp和极尖区内离子平均数密度之间的关系. 为了定量地评价相关程度, 本文采用了Borovsky等^[15]在研究太阳风参量与等离子体片参量之间的关系时给出的标准(Elliott等^[16]也采用这个标准研究了太阳风对极盖区O⁺离子上行的影响)来判断相关关系的显著性. 设样本数为N, 相关系数为R, 定义Rcl = |R/(2/N^{1/2})|, 如果相关系数R > 2/N^{1/2}, 即Rcl > 1, 则在95%的置信度水平上, 没有相关关系存在, 如果1.0 < Rcl < 1.6, 则表明存在着弱的相关关系; 如果Rcl > 1.6, 则表明存在着显著的相关关系.

2 数据分析结果

2.1 极尖区离子数密度与太阳风动压的关系

从已有数据中,共得到 82 个 Cluster 卫星极尖区穿越事件.图 2(a)是 O^+ 离子数密度和太阳风动压之间的散点关系图,横坐标为太阳风动压(P_{dyn}),纵坐标为 O^+ 离子数密度,图中的直线是两者线性拟合的结果.图 2 中还在拟合的直线上加上了误差棒,其长度为 2σ . σ 的计算方法为:根据太阳风动压数值大小将数据分组,间隔为 1 nP,将拟合直线在每组数据中心处的数值作为这一组数据的平均值,然后计算标准差 σ (各图中的误差棒及其长度的计算方法与此相同).根据这些数据可以得到相关系数为 $R = 0.547$, $Rcl = 2.48$,表明极尖区内 O^+ 离子数密度与太阳风动压之间有显著的正相关关系存在.图 2(b)与(a)类似,为 He^+ 离子数密度与太阳风动压之间的散点关系图,相关系数为 $R = 0.370$, $Rcl = 1.70$,表明 He^+ 离子数密度与太阳风动压之间存在显著的正相关关系.类似的,图 2(c)是 H^+ 离子数密度与太阳风动压之间的散点关系图,可以看出 H^+ 离子数密度与太阳风动压之间也有显著的正相关关系存在($R = 0.386$, $Rcl = 1.75$).

在地磁场宁静($Kp: 0\sim 2+$)和地磁场活跃($Kp: 3\sim 9$)的条件下,分别计算了极尖区内离子数密度与太阳风动压之间的相关系数(图略),其结果见表 1.当地磁场活动从宁静变为活跃时, O^+ 离子数密度与太阳风动压之间的相关系数由 0.303 升高到 0.536,相关关系由不存在变为显著的正相关,相关程度上升; He^+ 离子的相关系数变化不大,相关关系还是弱的正相关(Rcl 数值的变化主要源自于样本数的变化,地磁场宁静时有 27 个事例,而地磁场活跃时有 55 个事例); H^+ 离子的相关系数由 0.619 降低到 0.384,相关关系由接近于显著的正相关变为弱的正相关,相关程度

表 1 不同地磁活动条件下极尖区离子数密度与太阳风动压的相关分析结果

地磁活动指数	O^+		He^+		H^+	
	R	Rcl	R	Rcl	R	Rcl
Kp						
0 ~ 9	0.547	2.48	0.370	1.70	0.386	1.75
0 ~ 2+	0.303	0.79	0.367	0.95	0.619	1.61
3 ~ 9	0.536	1.99	0.354	1.31	0.384	1.42

下降.

2.2 极尖区离子数密度与地磁活动指数 Kp 的关系

使用和图 2 类似的格式分析离子数密度与地磁活动指数 Kp 之间的相关关系.图 3(a)是 O^+ 离子数密度与地磁活动指数 Kp 之间的散点关系图,横坐标为地磁活动指数 Kp ,纵坐标为 O^+ 离子数密度,图中的直线是两者线性拟合的结果,相关系数为 $R = 0.529$, $Rcl = 2.40$,表明极尖区内 O^+ 离子数密度与地磁活动指数 Kp 之间有显著的正相关关系存在.同样在拟合的直线上也加上了误差棒,从图中可以看出,当地磁活动剧烈时(Kp 指数很大时),数据的误差棒也变得很大.图 3(b)为 He^+ 离子数密度与地磁活动指数 Kp 之间的散点关系图,相关系数为 $R = 0.157$, $Rcl = 0.71$,表明 He^+ 离子数密度与地磁活动指数 Kp 之间不存在相关关系.类似的,图 3(c)是 H^+ 离子数密度与地磁活动指数 Kp 之间的散点关系图,相关系数 $R = 0.006$, $Rcl = 0.027$,表明 H^+ 离子数密度与地磁活动指数 Kp 之间不相关.

3 结果与讨论

对中高度极尖区内电离层离子的平均数密度与地磁活动指数 Kp 以及太阳风动压之间的关系进行了相关分析,主要结果如下:

() O^+ 离子数密度与太阳风动压之间存在着显著的正相关关系,与地磁活动指数 Kp 之间也存在着

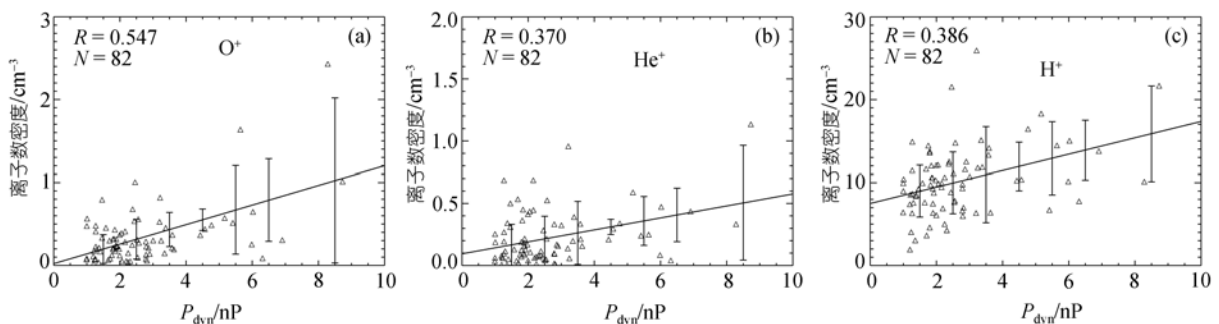


图 2 极尖区内离子平均数密度与太阳风动压的线性相关关系

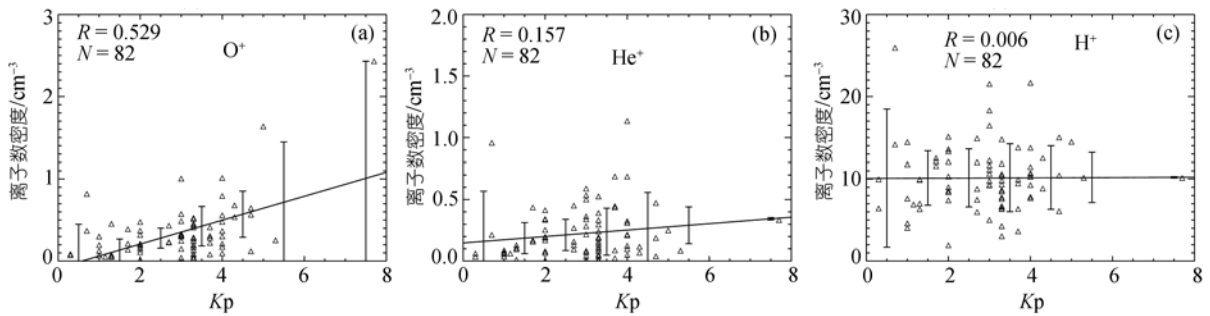


图3 极尖区内离子平均数密度与地磁活动指数 K_p 的线性相关关系

显著的正相关关系;

() He^+ 离子数密度与太阳风动压之间存在着显著的正相关关系, 与地磁活动指数 K_p 不相关;

() H^+ 离子数密度与太阳风动压之间存在着显著的正相关关系, 与地磁活动指数 K_p 不相关.

极尖区内的 O^+ 离子和 He^+ 离子是来自极区电离层的, 本文的研究显示只有 O^+ 离子的数密度与地磁活动指数 K_p 之间有显著的正相关关系存在, 而 He^+ 离子数密度与地磁活动指数 K_p 不相关. 其原因可能是随着地磁活动的增加, 大气层的温度增高, 使得 O^+ 离子的标高也相应增加, 容易获得更多的能量, 有利于上行. 而 He^+ 离子属于较轻离子, 同样的作用对其影响不大, 所以与地磁活动指数 K_p 之间没有太大的关系. 它们都与太阳风动压之间有显著的正相关关系, 而且 O^+ 离子的相关系数更大一些, 但是在不同地磁活动条件下, O^+ 离子与太阳风动压之间的相关系数变化很大, 在高 K_p 的情况下, 相关系数更高一些, 而 He^+ 离子的相关系数则没有什么变化.

极尖区内的 H^+ 离子的来源有两方面: 太阳风和电离层. 对于来自电离层的 H^+ 离子, 它应该与同样来自电离层的 He^+ 离子有着相似的规律, 其上行过程受地磁活动的影响不大, 而来自太阳风的 H^+ 离子, 其沉降过程主要受太阳风的控制, 也几乎与地磁活动无关. 在地磁活动宁静(低 K_p)的时候, H^+ 离子数密度与太阳风动压相关系数较高; 而地磁活动活跃时(高 K_p)相关系数降低, 可能的原因是当地磁活动活跃时, 极尖区内的 H^+ 离子更多的是来自于电离层.

另外还有两点需要说明: () 当太阳风动压或地磁活动很强时, 观测取得的数据点很少, 这主要是因为太阳风动压很大或地磁活动很强的时间出现几率较小. 同时因为Cluster星簇的轨道周期长达 57 h, 而星簇在极尖区的过境时间一般仅 10 多分钟所造成

的. 但这些数据点却是很珍贵的数据, 所以本文研究中保留了这些数据点; () 从各散点图可以看出, 观测得到的数据比较离散, 即误差棒比较大, 这样使得拟合直线的代表性降低, 即离子数密度与 K_p 指数或太阳风动压之间的相关程度降低, 这也是空间探测数据的一个特点. 此外为了保证与本研究领域内同类问题研究方法的一致性, 本文沿用了Borovsky等 [15] 在研究太阳风参量与等离子体片参量之间的关系时给出的标准, Elliott等 [16] 也采用这个标准研究了太阳风对极盖区 O^+ 上行的影响.

致谢 感谢中国 Cluster 数据中心为本文提供所需数据, 世界资料中心日本京都大学 C2 地磁中心提供 K_p 指数数据和美国加州理工大学 ACE Science Center 提供太阳风数据.

参 考 文 献

- 1 Shelley E G, Johnson R G, Sharp R D. Satellite observations of energetic heavy ions during a geomagnetic storm. *J Geophys Res*, 1972, 77: 6104—6110
- 2 Johnson R G, Sharp R D, Shelly E G. Observations of ions of ionospheric origin in the storm-time ring current. *Geophys Res Lett*, 1977, 4: 403—406
- 3 Peterson W K, Sharp R D, Shelly E G, et al. Energetic ion composition of the plasma sheet. *J Geophys Res*, 1981, 86: 761—767
- 4 Eastman T E, Frank L A, Peterson W K, et al. The plasma sheet boundary layer. *J Geophys Res*, 1984, 89: 1553—1572
- 5 Chappell C R, Moore T E, Waite Jr J H. The ionosphere as a fully adequate source of plasma for the Earth's magnetosphere. *J Geophys Res*, 1987, 92: 5896—5910
- 6 Yau A W, André M. Sources of ion outflow. *Space Sci Rev*, 1997, 80: 1—25[DOI]
- 7 Yau A W, Shelley E G, Peterson W K, et al. Energetic auroral and polar ion outflow at DE-1 altitudes: Magnitude, composition, magnetic activity dependence and long term variations. *J Geophys Res*, 1985, 90: 8417—8432
- 8 Peterson W K, Collin H L, Yau A W, et al. Polar/Toroidal Imaging Mass-Angle Spectrograph observations of suprathermal ion outflow during solar minimum conditions. *J Geophys Res*, 2001, 106:

- 6059—6066[DOI]
- 9 Cully C M, Donovan E F, Yau A W, et al. Akebono/Suprathermal Mass Spectrometer observations of low-energy ion outflow: Dependence on magnetic activity and solar wind conditions. *J Geophys Res*, 2003, 108: 1093—1103[DOI]
 - 10 Moore T E, Peterson W K, Russell C T, et al. Ionospheric mass ejection in response to a coronal mass ejection. *Geophys Res Lett*, 1999, 26: 2339—2342[DOI]
 - 11 Strangeway R J, Russell C T, Carlson C W, et al. Cusp field-aligned currents and ion outflows. *J Geophys Res*, 2000, 105: 21129—21142[DOI]
 - 12 Zhou X W, Russell C T, Le G, et al. The polar cusp location and its dependence on Dipole Tilt. *Geophys Res Lett*, 1999, 26: 429—432[DOI]
 - 13 Tsyganenko N A, Stern D P. Modeling the global magnetic field of the large-scale Birkeland current system. *J Geophys Res*, 1996, 101: 27187—27198[DOI]
 - 14 Ridley A J, Lu G, Clauer C R, et al. A statistical study of the ionospheric convection response to changing interplanetary magnetic field conditions using the assimilative mapping of ionospheric electrodynamics technique. *J Geophys Res*, 1998, 103: 4023—4040[DOI]
 - 15 Borovsky J E, Thomsen M F, Elphic R C. The driving of the plasma sheet by the solar wind. *J Geophys Res*, 1998, 103: 17617—17639[DOI]
 - 16 Elliott H A, Comfort R H, Craven P D, et al. Solar wind influence on the oxygen content of ion outflow in the high-altitude polar cap during solar minimum conditions. *J Geophys Res*, 2001, 106: 6067—6084[DOI]