0254-6124/2016/36(3)-272–07 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

YUAN Huanzhi, LÜ Jianyong, WANG Ming. Influence of the dipole tilt angle on the subsolar standoff distance and the tail flaring angle of the bow shock (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2016, **36**(3): 272-278. DOI:10.11728/cjss2016.03.272

偶极倾角对弓激波日下点距离和尾部张角的影响*

袁换只　吕建永　王　明

(南京信息工程大学数学与统计学院　南京 210044)

摘　要　通过对 IMP 8, Geotail, Magion 4 和 Cluster 1 四颗卫星弓激波穿越数据的统计及拟合分析, 定量研究了偶极倾角对弓激波日下点距离和尾部张角的影响. 结果表明: 弓激波日下点距离随偶极倾角绝对值的增大而增大, 且偶极倾角为负值时比其为正值时日下点距离增大的幅度更大; 弓激波尾部张角随偶极倾角绝对值增大而减小; 当偶极倾角由负变为正的时候, 弓激波向地球一侧移动, 同时尾部张角增大. 研究结果为进一步建立包含偶极倾角效应的弓激波模型奠定了基础.

关键词　弓激波, 偶极倾角, 太阳风–磁层耦合

中图分类号　P 353

Influence of the Dipole Tilt Angle on the Subsolar Standoff Distance and the Tail Flaring Angle of the Bow Shock

YUAN Huanzhi　LÜ Jianyong　WANG Ming

(*School of Mathematics and Statistics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing* 210044)

Abstract　The Earth's bow shock has been found to be affected by the dipole tilt angle. Based on the bow shock crossings of IMP 8, Geotail, Magion 4, and Cluster 1, quantitative analysis has been made to examine the influence of the dipole tilt angle on the subsolar standoff distance and the tail flaring angle of the bow shock by fitting the bow shock shape and location in each range of the data sets after normalizing and classifying the data sets. The results show that the subsolar standoff distance increases as the absolute value of the dipole tilt angle increases, and the negative dipole tilt angle does greater influence on the standoff distance than the positive tilt angle; the flaring angle decreases with the increasing absolute value of the dipole tilt angle; when the dipole tilt angle changes from negative to positive, the bow shock moves to Earth, meanwhile the flaring angle increases. This

* 国家重点基础研究发展计划项目 (2012CB825606), 国家自然科学基金重点项目 (41031063), 国家自然科学基金项目 (41574158), 江苏省双创 (2014) 人才项目和南京信息工程大学人才启动项目共同资助

2015-04-02 收到原稿, 2015-11-28 收到修定稿

E-mail: yuanhuanzhi@126.com. 通信作者吕建永, E-mail: jylu@nuist.edu.cn

study make a good foundation for the bow shock model which will include the effects of the dipole tilt angle.

Key words Bow shock, Dipole tilt angle, Solar wind-magnetosphere coupling

0 引言

太阳风遇到地球磁层顶会引起相应的扰动, 进而引起弓激波位置和结构随时间和空间的变化. 研究弓激波的位形可以更好地理解太阳风与地球磁层的耦合过程以及与此相关的太阳风向地球的能量输运, 有助于分析地球地磁环境及空间天气的定量化预报.

观测资料及数值模拟研究结果表明, 上游太阳风等离子体参量和磁层顶位形对弓激波位形均有一定影响. 弓激波日下点距离随太阳风动压增大而减小 [1−2], 弓激波位置随磁声波马赫数增大而更靠近地球 [1−5]; 当行星际磁场垂直于激波法向时快磁声波速度最大, 弓激波远离地球; 当行星际磁场平行于激波法向时快磁声波速度最小, 弓激波更靠近地球 [6]. 磁层顶位形的变化还会引起弓激波位形的一些变化, 例如当行星际磁场转为南向时, 磁层顶日下点距离减小而尾部张角增大, 因此行星际磁场南向时弓激波日下点更接近地球 [4,7].

近几年的研究发现, 偶极倾角是影响磁层顶位形的重要参数 [8−13]. Tsyganeko[10] 发现, 随着偶极倾角的增大, 北半球磁层顶尾部张角增大而南半球磁层顶尾部张角减小. Boardsen 等 [12]、Lin 等 [13] 及 Liu 等 [14] 的磁层顶模型加入了偶极倾角的影响.

基于磁层顶与弓激波的关系及偶极倾角对磁层顶位形的影响, 可以推断偶极倾角对弓激波位形也会有影响. Merka 等 [15] 根据 IMP8 卫星 1973—1999 年的弓激波穿越数据, 认为偶极倾角可能在预测弓激波位置时起到重要作用, 并且在平均太阳风条件下, 当偶极轴从向阳方向 (偶极倾角为正) 变为背阳方向 (偶极倾角为负) 时, $-15\,R_e < x < -10\,R_e$ (弓激波尾部, R_e 为地球半径) 的弓激波在南北方向上移动了 $3.8\,R_e$. Jelínek 等 [16] 根据对不同卫星观测数据的统计分析提出, 当偶极倾角由负变正时, 日侧弓激波 ($x > 4R_e$) 向地球一侧移动约 $0.5\,R_e$, 而当偶极倾角增加时, 夜侧弓激波 ($x < 4\,R_e$) 向地球外侧移动, 弓激波在晨昏子午面附近具有类似于磁层顶极尖区的结构. 但是上述研究并没有定量给出弓激波位形随偶极倾角的具体变化, 尤其是日下点距离和尾部张角随偶极倾角的具体变化.

本文根据四颗卫星弓激波的穿越数据, 通过弓激波位形的整体拟合和分段拟合定量研究了偶极倾角对弓激波日下点距离和尾部张角的影响.

1 数据与方法

基于 IMP 8, Magion 4, Geotail 和 Cluster 1 四颗不同卫星的弓激波穿越数据, 拟合出不同偶极倾角下的弓激波位形, 通过比较得到偶极倾角对弓激波位形的影响, 尤其是对弓激波日下点距离和尾部张角的影响. 通常弓激波日下点距离是指日地连线上地心到弓激波的距离, 尾部张角代表了弓激波尾部的张开程度, 如图 1 所示. 从图 1 可以看出, 尾部张角越大, 弓激波张开程度越大.

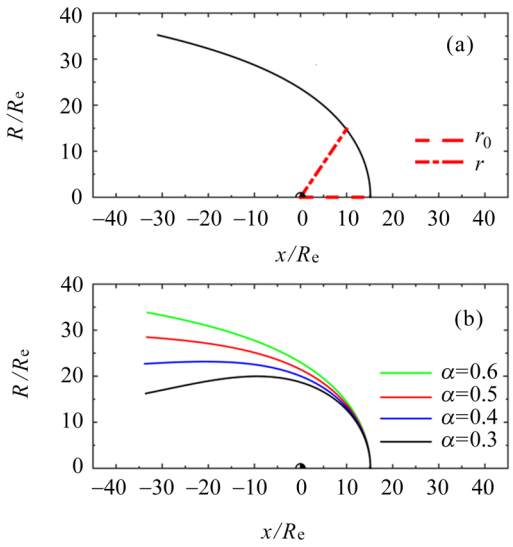


图 1 弓激波日下点距离与尾部张角 ($R = \sqrt{y^2 + z^2}$). (a) r_0 为弓激波日下点距离, r 为弓激波径向距离; (b) 不同 α 时的弓激波位形

Fig. 1 Subsolar standoff distance and the tail flaring angle of the bow shock ($R = \sqrt{y^2 + z^2}$). (a) r_0 is the subsolar standoff distance of the bow shock, r is the radial distance of the bow shock; (b) the bow shock shapes with different α

1.1 数据

分析共使用 7844 个有确定上游太阳风和行星际条件的弓激波穿越点, 其中包括 IMP 8 卫星 1973—2000 年的 5870 个数据, Magion 4 卫星 1995—1996 年的 802 个数据, Geotail 卫星 1995—1997 年 785 个数据, Cluster 1 卫星 2001—2002 年的 387 个数据.

所有确定的弓激波穿越点均位于

$$-30R_{\rm e} < x < 20\,R_{\rm e},$$

$$-42\,R_{\rm e} < y < 42\,R_{\rm e},$$

$$-36\,R_{\rm e} < z < 36\,R_{\rm e},$$

如图 2 所示. 图 2 表示的是 yz (GSM 坐标) 平面内各卫星穿越点的投影. 弓激波穿越发生的太阳风条件为: 太阳风速度 270~770 $\rm km{\cdot}s^{-1}$, 太阳风密度 1~35 $\rm cm^{-3}$, 阿尔芬马赫数 2~60.

1.2 数据归一化处理

为消除太阳风动压的影响, 对观测到的弓激波位置数据进行了归一化处理. 归一化公式 [17] 如下:

$$x = x_0\Big(\frac{n_0v_0^2}{n_{\rm a}v_{\rm a}^2}\Big)^{\frac{1}{6}},$$

$$y = y_0\Big(\frac{n_0v_0^2}{n_{\rm a}v_{\rm a}^2}\Big)^{\frac{1}{6}},$$

$$z = z_0\Big(\frac{n_0v_0^2}{n_{\rm a}v_{\rm a}^2}\Big)^{\frac{1}{6}}. \qquad (1)$$

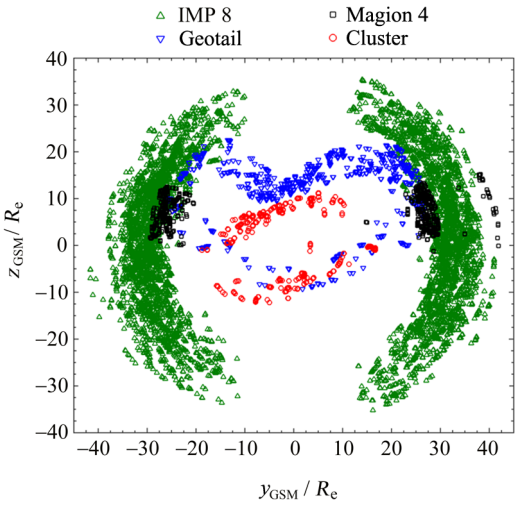


图 2 yz (GSM 坐标系) 平面内的卫星穿越点

Fig. 2 Projections of all used bow shock crossings observed by different spacecraft in the yz (GSM coordinates) plane

其中, n_0 和 v_0 分别表示观测到的太阳风数密度及速度, $n_{\rm a}$ 和 $v_{\rm a}$ 分别表示确定的弓激波穿越数据中太阳风数密度及速度的平均值.

1.3 拟合公式

将各个卫星穿越弓激波时的位置转换到极坐标 (r,θ) 下, r 为地心到弓激波上一点的连线, 即弓激波径向距离, θ 为日地连线与弓激波径向距离的夹角 (见图 1). 转换公式为

$$r = \sqrt{x^2+y^2+z^2},$$

$$\theta = \arccos\Big(\frac{x}{r}\Big). \qquad (2)$$

基于 Chao[1] 的弓激波模型

$$r = r_0\Big(\frac{1+\varepsilon}{1+\varepsilon\cos\theta}\Big)^{\alpha} \qquad (3)$$

进行弓激波位形拟合. 式中, r 为弓激波径向距离, r_0 为弓激波日下点距离, α 为弓激波尾部张角参数, θ 为日地连线与弓激波径向距离之间的夹角, ε 为一个类似于离心率的量, 模型中取 1.029. 之所以采用该模型进行弓激波位形拟合, 是因为这个模型物理意义比较明确, 可以很清楚地得到弓激波日下点距离和弓激波尾部张角. 同时, Dmitriev 等 [2] 基于卫星观测数据对 Chao 等 [1]、Verigin 等 [4]、Peredo 等 [18]、Russell 等 [19] 的四个弓激波模型进行了比较研究, 发现 Chao 等 [1] 预测的弓激波位置最准确, 也就是说 Chao 等 [1] 的研究可以更好地反映上游太阳风及磁层顶变化对弓激波的影响.

2 结果与分析

通过分析穿越点位置的分布特征, 可以根据整体拟合、分段拟合以及南北半球拟合讨论偶极倾角对弓激波位形的影响.

2.1 整体拟合

以 10° 为单位将偶极倾角分为 7 个区间

$$(-35^\circ,-25^\circ],(-25^\circ,-15^\circ],$$

$$(-15^\circ,-5^\circ],(-5^\circ,5^\circ],$$

$$(5^\circ,15^\circ],(15^\circ,25^\circ],(25^\circ,35^\circ)$$

对不同偶极倾角集合内的弓激波穿越点进行弓激波位形的整体拟合, 得到每个集合内的弓激波位形, 如图 3 所示.

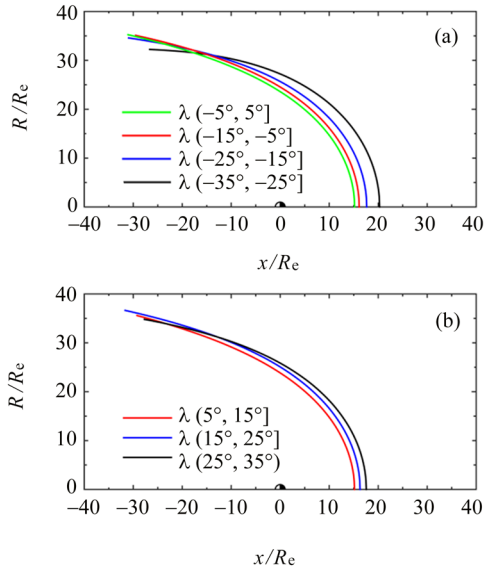


图 3 不同偶极倾角区间内的整体弓激波位形拟合

Fig. 3 Overall fitting in different dipole angle range

图 3(a) 所示为偶极倾角小于零的情况, 可以看出, 随着偶极倾角负向增大, 弓激波日下点距离增大, 尾部张角减小. 图 3(b) 为偶极倾角大于零的情况, 可以看出, 随着偶极倾角正向增大, 弓激波日下点距离增大, 尾部张角减小. 比较图 3(a) 与 (b), 可以发现偶极倾角为负值时相比其为正值时日下点距离增大的幅度大.

为得到偶极倾角与弓激波日下点距离和尾部张角之间的具体关系, 将拟合得到的弓激波日下点距离和尾部张角分别与偶极倾角再进行拟合, 结果如图 4 所示.

从图 4(a) 可以看出, 当偶极倾角小于零时, 日下点距离随偶极倾角增大而增大, 增大幅度约为 5.21 R_e, 而当偶极倾角大于零时, 日下点距离也随偶极倾角增大而增大, 但增大幅度较小, 约为 2.41 R_e. 通过拟合可以得到如下日下点距离随偶极倾角的变化关系:

$$r_0 = 4.17 \times 10^{-3}\lambda^2 - 4.29 \times 10^{-2}\lambda - 15.5. \quad (4)$$

从图 4(b) 可以看出, 当偶极倾角小于零时, 尾部张角随偶极倾角增大而减小, 而当偶极倾角大于零时, 尾部张角减小, 但减小幅度较小. 尾部张角随偶极倾角的变化关系为

$$\alpha = -1.69 \times 10^{-4}\lambda^2 + 2.18 \times 10^{-3}\lambda + 0.64. \quad (5)$$

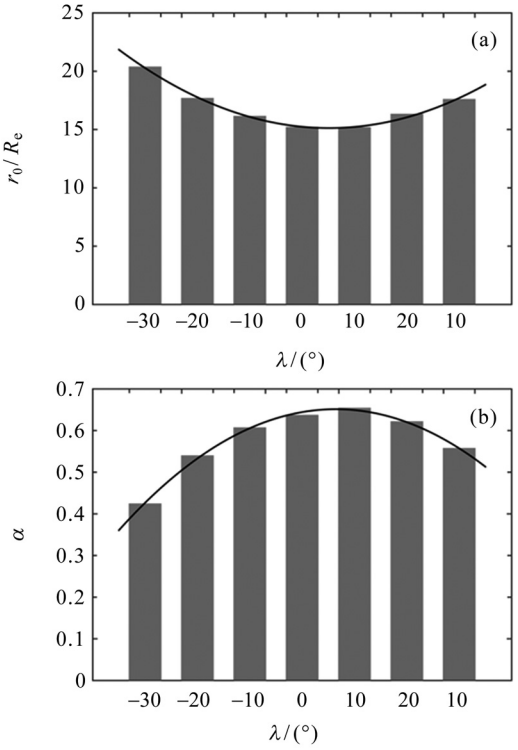


图 4 整体拟合得到的各偶极倾角区间内的弓激波日下点距离和尾部张角与偶极倾角的关系. (a) 偶极倾角与弓激波日下点距离, (b) 偶极倾角与尾部张角. 每个条柱表示各偶极倾角区间内拟合得到的日下点距离和尾部张角, 曲线分别表示日下点距离和尾部张角随偶极倾角的变化趋势

Fig. 4 Relationship between dipole tilt angle and the subsolar standoff distance, and the flaring angle obtained by overall fitting. (a) is the relationship between the dipole tilt angle and the subsolar standoff distance, and (b) is the relationship between the dipole tilt angle and the flaring angle. Each bar stands for the distance and the flaring angle in each range of dipole tilt angle. The lines are the distance and the flaring angle variation tendency along with the dipole tilt angle, respectively

比较图 4(a) 与 (b) 可以发现, 负偶极倾角不论对日下点距离还是尾部张角影响都比正偶极倾角明显. 如果将 (−5°, 5°] 内的偶极倾角近似为零, 当偶极倾角从负变正时, 则日下点距离减小, 即弓激波向地球一侧移动, 如图 4(a) 所示, 而当偶极倾角从负变为正时, 尾部张角增大, 如 4 图 (b) 所示.

2.2 分段拟合

由于所确定的弓激波穿越点多集中在弓激波尾部, 而日下点区域数据较少, 直接进行整体拟合可能

会使得到的日下点距离偏大, 因此这里将每个集合内的弓激波穿越点分为日侧弓激波 ($x > 0$) 和夜侧弓激波 ($x < 0$) 分别进行拟合.

值得注意的是, 日侧弓激波拟合时只考察偶极倾角与日下点距离的关系, 而夜侧弓激波拟合时只分析偶极倾角与尾部张角的关系. 图 5(a) 给出的是偶极倾角小于零时拟合日侧弓激波位形得到的弓激波日下点距离随偶极倾角的变化情况, 表现出随偶极倾角负向的增大, 弓激波日下点的距离也不断增大, 这与整体拟合结果一致. 从图 5(b) 可以看出, 随着偶极倾角正向的增大, 弓激波日下点距离增大, 但是当偶极倾角增大到较大值时, 日下点距离基本不随偶极倾角变化而变化.

夜侧弓激波拟合情况如图 6 所示. 从图 6 可以看出, 无论偶极倾角为正还是为负, 弓激波尾部张角都随偶极倾角绝对值的增大而减小.

2.3 南北半球拟合

通常认为偶极倾角基本不影响赤道面磁层顶 [20], 而主要影响磁层顶的南北不对称性、旋转不对称性及磁层顶极尖区位形. 因此可以推测偶极倾角对南北半球弓激波的影响也会不同. 这里将每个偶极倾角区间内的数据划为南北半球分别拟合. 值得注意的是, 由于南北半球拟合是为了考察弓激波的不对称性, 此时只分析偶极倾角对弓激波尾部张角的影响.

北半球的拟合情况如图 7 所示. 从图 7 可知, 当偶极倾角负向增大时, 弓激波尾部张角随偶极倾角增大而减小, 这与 Liu 等 [20] 的研究结果是相似的, 其发现偶极倾角负向增大时北半球磁层顶张角减小. 同时, 当偶极倾角正向增大时, 弓激波尾部张角基本不变, 但是偶极倾角增大到较大值时, 张角减小.

南半球的拟合情况如图 8 所示. 由图 8 可以看到, 当偶极倾角正向增大时, 弓激波尾部张角随偶极倾角增大而减小, 而当偶极倾角负向增大时, 弓激波尾部张角基本不变, 且同样表现出当偶极倾角增大到较大值时张角突然减小的情况.

比较图 7 与图 8 可以发现, 同一偶极倾角范围内的南北半球弓激波尾部张角有所不同, 这反映出弓激波具有南北不对称性.

3 结论

基于四颗不同卫星的弓激波穿越事件, 通过对弓激波位形的整体拟合、分段拟合及南北半球拟合, 得到不同偶极倾角下弓激波日下点距离及尾部张角, 进而分析了偶极倾角与弓激波日下点距离和尾部张角的关系, 主要结论如下.

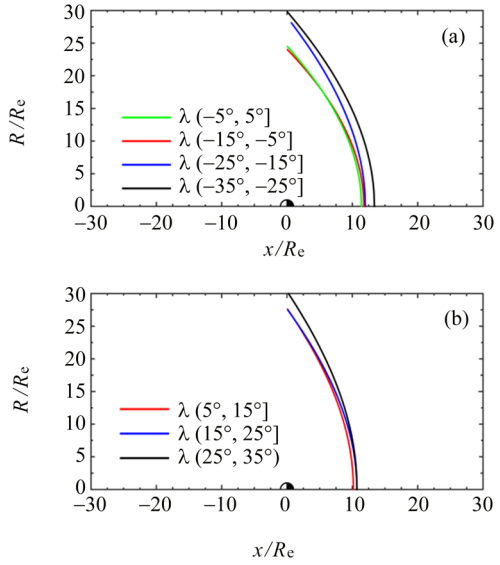


图 5 日侧弓激波随偶极倾角的变化

Fig. 5 Relationship between dayside bow shock and dipole tilt angle

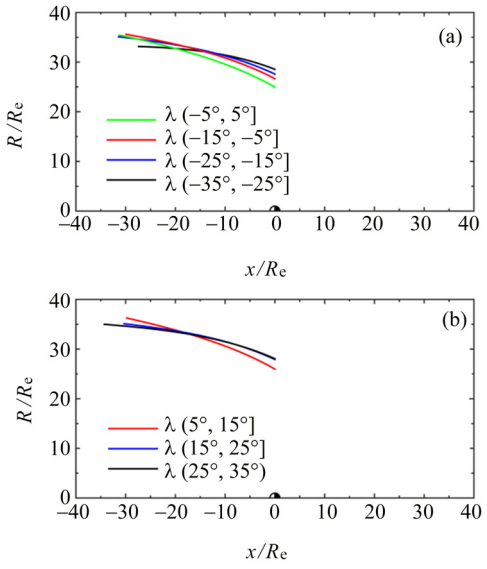


图 6 夜侧弓激波随偶极倾角的变化

Fig. 6 Relationship between nightside bow shock and dipole tilt angle

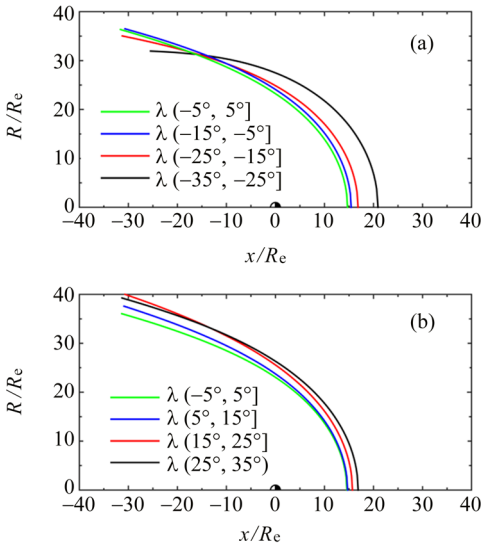


图 7 北半球弓激波随偶极倾角的变化

Fig. 7 Relationship between north hemisphere bow shock and dipole tilt angle

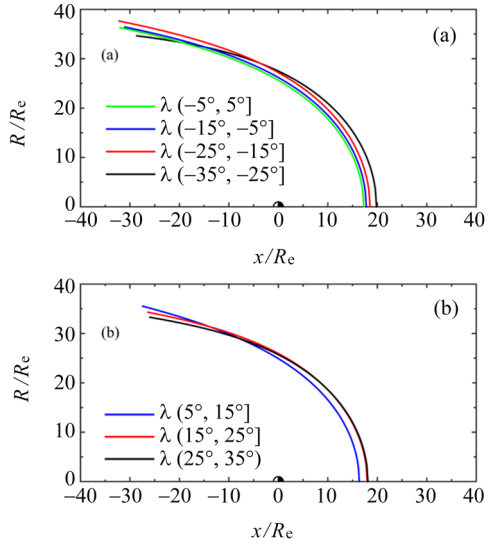


图 8 南半球弓激波随偶极倾角的变化

Fig. 8 Relationship between south hemisphere bow shock and dipole tilt angle

(1) 随着偶极倾角绝对值的增大, 弓激波日下点距离增大, 弓激波日下点距离与偶极倾角的关系为

$$r_0 = 4.17 \times 10^{-3}\lambda^2 - 4.29 \times 10^{-2}\lambda - 15.5.$$

(2) 随着偶极倾角绝对值的增大, 弓激波尾部张角减小, 其关系为

$$\alpha = -1.69 \times 10^{-4}\lambda^2 + 2.18 \times 10^{-3}\lambda + 0.64.$$

(3) 当偶极倾角由负变正时, 弓激波向地球一侧移动.

(4) 弓激波与磁层顶同样具有南北不对称性. 对于北半球弓激波, 当偶极倾角负向增大时, 弓激波尾部张角随偶极倾角增大而减小; 当偶极倾角正向增大时, 弓激波尾部张角基本不变; 当偶极倾角正向增大到较大数值时, 弓激波尾部张角突然减小. 对于南半球弓激波, 当偶极倾角正向增大时, 弓激波尾部张角随偶极倾角增大而减小; 当偶极倾角负向增大时, 弓激波尾部张角随偶极倾角增大基本不变; 同样当偶极倾角增大到较大数值时, 弓激波尾部张角突然减小.

综上所述, 可以看到偶极倾角对弓激波位形的影响还是很大的, 但到目前为止尚没有一个包含偶极倾角参数的弓激波模型, 接下来将根据所得到的偶极倾角对弓激波位形的影响, 建立一个包含偶极倾角效应的弓激波模型.

致谢 数据由 ftp://cdaweb.gsfc.nasa.gov/pub/data/aaa_boundary_crossings/ 网站提供, 美国 NASA 的 Space Physics Data Facility (SPDF) 以及相关学者对数据进行了收集整理.

参考文献

[1] CHAO J K, WU D J, LIN C H, *et al.* Models for the size and shape of the Earth's magnetopause and bow shock [C]//COSPAR Colloquia series. Pergamon: COSPAR, 2002, **12**: 127-135

[2] DMITRIEV A V, CHAO J K, WU D J. Comparative study of bow shock models using WIND and Geotail observations [J]. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108**(A12): 1464

[3] FARRIS M H, RUSSELL C T. Determining the standoff distance of the bow shock: Mach number dependence and use of models [J]. *J. Geophys. Res.*, 1994, **99**: 17 681-17 689

[4] VERIGIN M I, KOTOVA G A, SLAVIN J, *et al.* Analysis of the 3-D shape of the terrestrial bow shock by Interball/Magion 4 observations [J]. *Adv. Space Res.*, 2001, **28**(6): 857-862

[5] HU Huiping, LU Jianyong, ZHOU Quan, *et al.* Simulation of three-dimensional Earth's bow shock [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2015, **35**(1): 1-8 (胡慧萍, 吕建永, 周全, 等. 地球弓激波的三维模拟 [J]. 空间科学学报, 2015, **35**(1): 1-8)

[6] CHAPMAN J F, CAIRNS I H, LYON J G, *et al.* MHD simulations of Earth's bow shock: interplanetary magnetic field orientation effects on shape and position [J]. *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, 2004, **109**(A4): A04215. DOI:10.1029/2003JA010235

[7] VERIGIN M, SLAVIN J A, KOTOVA G, GOMBOSI T.

Planetary bow shocks: asymptotic MHD Mach cones [J]. *Earth Planets Space*, 2003, **55**: 33-38

[8] PETRINEC S M, RUSSELL C T. An examination of the effect of dipole tilt angle and cusp regions on the shape of the dayside magnetopause [J]. *J. Geophys. Res.*: *Space Phys.*, 1995, **100**(A6): 9559-9566

[9] ZHOU X W, RUSSELL C T. The location of the high-latitude polar cusp and the shape of the surrounding magnetopause [J]. *J. Geophys, Res.*, 1997, **89**: 11 048-11 052

[10] TSYGANENKO N A. Modeling of twisted/warped magnetospheric configurations using the general deformation method [J]. *J. Geophys. Res.*: *Space Phys.*, 1998, **103**(A10): 23 551-23 563

[11] ŠAFRÁNKOVÁ J, DUŠÍK Š, NĚMEČEK Z. The shape and location of the high-latitude magnetopause [J]. *Adv. Space Res.*, 2005, **36**(10): 1934-1939

[12] BOARDSEN S A, EASTMAN T E, SOTIRELIS T, *et al.* An empirical model of the high-latitude magnetopause [J]. *J. Geophys. Res.*: *Space Phys.*, 2000, **105**(A10): 23 193-23 219

[13] LIN R L, ZHANG X X, LIU S Q, *et al.* A three-dimensional asymmetric magnetopause model [J]. *J. Geophys. Res.*, 2010, **115**: A04207

[14] LIU Z Q, LU J Y, WANG C, *et al.* A three-dimensional high Mach number asymmetric magnetopause model from global MHD simulation [J]. *J. Geophys Res.*: *Space Phys.*, 2015, **120**: 5645-5666

[15] MERKA J, SZABO A. Bow shock's geometry at the magnetospheric flanks [J]. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**(A12): A12224. DOI:10.1029/2004JA010567

[16] JELÍNEK K, NĚMČEK Z, ŠAFRÁNKOVÁ J, *et al.* Influence of the tilt angle on the bow shock shape and location [J]. *J. Geophys. Res.*, 2008, **113**(A5): 521-532

[17] FORMISANO V. Orientation and shape of the Earth's bow shock in three dimensions [J]. *Planet. Space Sci.*, 1979, **27**(9): 1151-1161

[18] PEREDO M, SLAVIN J A, MAZUR E, *et al.* Three-dimensional position and shape of the bow shock and their variation with Alfvenic, sonic and magnetosonic Mach numbers and interplanetary magnetic field orientation [J]. *J. Geophys. Res.*: *Space Phys.*, 1995, **100**(A5): 7907-7916

[19] RUSSELL C T, PETRINECS M. Towards an MHD theory for the standoff distance of Earth's bow shock [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1996, **23**(3): 309-310

[20] LIU Z Q, LU J Y, KABIN K, *et al.* Dipole tilt control of the magnetopause for southward IMF from global magnetohydrodynamic simulations [J]. *J. Geophys. Res.*: *Space Phys.*, 2012, **117**(A7): 282-292