

日冕物质抛射的磁绳正演法及源区投影修正方法的讨论^{*}

桂彬^{1,2} 申成龙¹ 汪毓明¹ 叶品中¹ 王水¹

1(中国科学技术大学地球和空间科学学院 中国科学院基础等离子体物理重点实验室 合肥 230026)

2(中国科学院空间科学与应用研究中心 空间天气学国家重点实验室 北京 100190)

摘要 利用磁绳正演法 (forward modeling) 研究了 2007—2008 年 STEREO 卫星观测到的 21 个结构清晰的日冕物质抛射 (CME) 事件, 得到这些 CME 事件在三维空间的运动速度; 与根据 STEREO A 星和 B 星观测速度进行源区投影修正得到的结果进行比较, 发现这种源区投影修正方法存在很大的局限性. 统计结果表明, 当 CME 源区在日面上的日心角距 (CME 源区和日心连线与观测点和日心连线的夹角) 大于 50° 时, 修正速度与三维速度之间的差别不大; 当日心角距小于这个值时, 修正速度与三维速度差别明显, 尤其对于小日心角距, 相差甚大. 统计结果还表明, 当日心角距大于 65° 时, A 星和 B 星得到的投影速度与三维速度相近, 投影速度可以作为 CME 的三维速度.

关键词 磁绳正演法, 日冕物质抛射 (CME), 投影速度, 修正速度, 三维速度, 活动区

中图分类号 P 353

Forward Modeling Method of CME and Discussion About the Projection Modified Method

GUI Bin^{1,2} SHEN Chenglong¹ WANG Yuming¹
YE Pinzhong¹ WANG Shui¹

1(CAS Key Laboratory of Basic Plasma Physics, School of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, 230026)

2(State Key Laboratory of Space Weather, Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

Abstract In this paper, the three-dimension velocity of 21 well-structured Corona Mass Ejections (CMEs) were obtained by Forward Modeling based on STEREO-SECCHI observations during 2007—2008. By measuring the height of the projected front in STEREO-A and STEREO-B sky plane and using the projection modified method, modified velocities of these CME, which were treated as 3D

* 国家自然科学基金项目 (40874075, 40904046, 40525014), 教育部全国优博专项基金 (200530) 和科技部 973 项目 (2006CB806304) 共同资助
2009-10-10 收到原稿, 2010-10-08 收到修定稿
E-mail: guibin@mail.ustc.edu.cn

velocity before, were also obtained. Comparing the 3D velocity obtained from the Forward Modeling method and the modified velocity, it is found that the 3D velocity and the modified velocity are almost the same when angular distance, which is defined as the angle between the line connecting CME source region and Sun center and the line connecting observer and Sun center, is greater than 50° ; that when the angular distance is less than 50° , the difference is obvious. The latter result shows that the modified method can not be used for the CMEs with angular distance less than 50° . It is found that the projected velocity is almost the same as the 3D velocity when the angular distance is greater than 65° . This result implies that the CME event with angular distance larger than 65° could be treated as a limb event.

Key words Forward modeling method, Corona mass ejection, Projected velocity, Modified velocity, 3D velocity, Active region

1 引言

日冕物质抛射是一种剧烈的太阳爆发活动,是引起各种空间天气效应的重要原因之一,对宇宙飞船、人造卫星、电网以及无线通信都会产生不利的影 响。为了避免日冕物质抛射造成的危害,有必要对其到达地球的时间做出预报,因此研究日冕物质抛射的运动学特征具有重要的意义^[1]。

从 20 世纪 70 年代初,通过搭载在轨道太阳观测台(OSO7)和 Skylab 飞船上的日冕仪首次获得 CME 图像,到 90 年代 SOHO/Lasco 的观测^[2],已经能够获得很多关于 CME 的图像。但是对于 CME 在三维空间的运动学特征一直了解甚少,所能观测到的 CME 图像都是在天空平面中的投影,其速度或加速度等也是投影的结果,只能利用各种修正方法对投影速度进行修正。为此人们提出了各种不同的修正模型^[3],但是很难判断通过修正得到的三维速度与真实三维速度的差别。在以往的研究中,例如日面附近激波的形成和传播的研究都需要比较准确的 CME 速度^[4]。投影效应给研究带来了很大的不确定性。2006 年 10 月发射的 STEREO 卫星通过同时进行两点观测,第一次提供了确定 CME 真实空间位置以及在三维空间运动速度的可能性^[5]。STEREO 由两颗相同的卫星组成,其均位于地球的公转轨道平面内。A 星距太阳比地球距太阳近,角速度大于地球公转角速度,而 B 星则相反。其分别以每年 22.5° 的角速度远离地球,因此可以提供在同一时刻从不同角度观测到的 CME 图像。利用三角分析的方法可以对 CME 的三维结构以及空间位置进行反演^[6],但前提是要解决同一时

刻观测到的 CME 图像之间的匹配关系。由于 CME 是光学薄的,通常看到的图像是 CME 在天空平面投影得到的二维图像,所以很难实现两幅图像的匹配。

近年来,Thernisien 等^[7]将磁绳正演法应用到 STEREO 的观测数据上^[8]。磁绳正演法首先假设 CME 的三维结构是一个磁通量管结构。长期以来,大多关注三分量结构的 CME 模型,即认为 CME 由三个部分组成:明亮的弧状前沿,前沿后面的暗腔,以及一个明亮的内核。借助于 SOHO/Lasco 高清晰的观测,特别是对 CME 图像中弧形条纹的分析,人们提出了磁通量管模型。Thernisien 等通过改变磁通量管模型的参数,调整其空间位置以及形态,使得同一个磁通量管在 A 星和 B 星天空平面中的投影同时与各自观测到的 CME 图像一致。通过分析 CME 在一个时间序列内参数的变化,即可得到三维空间的运动学特征。Thernisien 等利用这种方法分析了 26 个 CME 事件的运动学特征,并且将结果与其他方法进行比较,证实这种方法能够较好地得到 CME 在三维空间的运动速度以及传播方向。

本文利用这种磁绳正演法,分析了 2007—2008 年 STEREO/SECCHI 观测到的 21 个结构清晰的 CME 事件,得到其在三维空间的运动速度,可以认为这些结构清晰的 CME 具有磁通量管状结构^[9],同时根据 CME 的投影速度和投影修正方法得到的三维速度,可以称之为修正速度。在诸多的投影修正方法中,最简单的方法是只考虑 CME 在日面上的源区位置,而忽略它的空间形状,可将这种方法称之为源区投影修正法^[4]。本文通过三维速度与修正速度之间的比较,对源区投影修正方法的可靠性和适用范

围进行了讨论,进而分析了 CME 三维速度与活动区之间的关系.

2 磁绳正演法

磁绳正演法首先假设 CME 的三维结构是一个磁通量管,并且假设它是沿径向方向传播.如图 1(a)所示,磁通量管由两个部分组成,即磁通量管本身和支撑它的两个锥体.这两个锥体的顶点都位于日心 O 点.磁通量管形状由三个参数决定:两锥体中心轴线之间的半角宽度 α ,顶点与日心的距离 h_f 及反映粗细程度的参数 κ .其中参数 $\kappa = \frac{a}{r}$, a 为磁通量管上任一点到其轴线的垂直距离, r 为这一点到两锥体顶点 O 的距离.图 1(b)所示为磁通量管从侧面看到的情况.如图 1(c)所示,决定磁通量管空间位置的参数有经度 ϕ 、纬度 θ 以及轴线在日面上投影与纬度线上的夹角 γ .CME 在三维空间的前沿即磁通量管的顶点,是磁通量管上距离日心 O 距离最远的点,位于对称轴 Oy 上,其高度 h_f 与锥体高度 h 之间的关系为

$$h_f = h \frac{1}{1 - \kappa} \frac{1 + \sin \alpha}{\cos \alpha}. \quad (1)$$

通常所说的 CME 源区位置即磁通量管轴线在日面上投影的中点,也是直线 Oy 与日面的交点.在此使用 Stonyhurst 坐标系确定 CME 源区在日面上的位置.在太阳赤道平面内是以观测者与日心的连线为极

轴的极坐标,由东向西经度坐标值逐渐变大,纬度值即为该点和日心的连线与赤道面的夹角^[10].

通过调节以上的 6 个参数,可以使得磁通量管在 A 星和 B 星天空平面的投影前沿同时与 A 星 B 星观测到的 CME 的轮廓保持一致.这里关注的 CME 的轮廓由差分图像中一条最亮的曲线决定.通常认为使得磁通量管投影与 CME 轮廓匹配得最好的参数即反映了 CME 的三维空间位置和本身的形状.通过分析参数随时间的变化,可以得到 CME 在这段时间内的运动速度.

以 2007 年 5 月 15 日的 CME 事件为例,具体说明磁绳正演法的分析过程.该事件第一次出现在 COR1 中的时间是 2007 年 5 月 15 日 19:06 UT.但是磁绳正演法要求能看到一个比较完整的磁通量管结构,所以这里只选取了从 2007 年 5 月 15 日 21:52 UT 到 5 月 16 日 01:52 UT 这段时间内,CME 在 COR2 中运动的 9 个时刻,分析其运动特征,可以看出大致需要经过以下三个过程.

图 2 所示为 CME 在 2007 年 5 月 15 日 23:52 UT 与背景时刻之间的差分图像.根据视觉观测,在前沿各有一条明亮的曲线.这里定义图像最外层的明亮曲线为磁通量管在 A 星和 B 星天空平面投影所要匹配的 CME 前沿^[8](用虚线标出).

通过初步调节磁通量管模型的 6 个参数,使得投影大致与两颗卫星观测到的 CME 图像一致(见图 3).

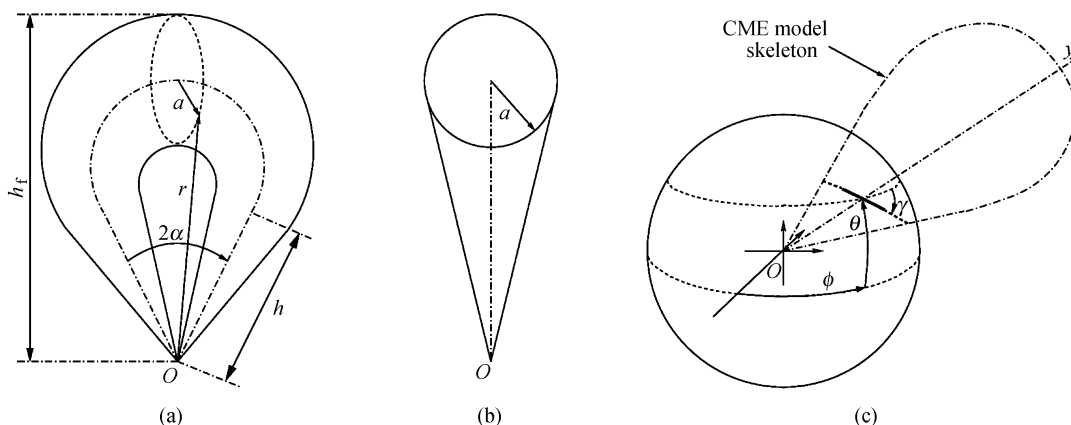


图 1 CME 磁通量管模型及在三维空间的位置. (a) 从垂直于轴线平面方向看到的通量管图像,点画线为磁通量管的轴线; (b) 从轴线平面内看到的通量管图像; (c) 磁通量管轴线在三维空间的位置与经度、纬度及倾角的关系

Fig. 1 Flux rope model of CME and its position in 3D space. (a) projected flux rope image seen from face on, the dotted line is the axes of the flux rope; (b) projected flux rope image seen from edge on; (c) position of flux rope in the 3D space, decided by the longitude, latitude and tilt angle

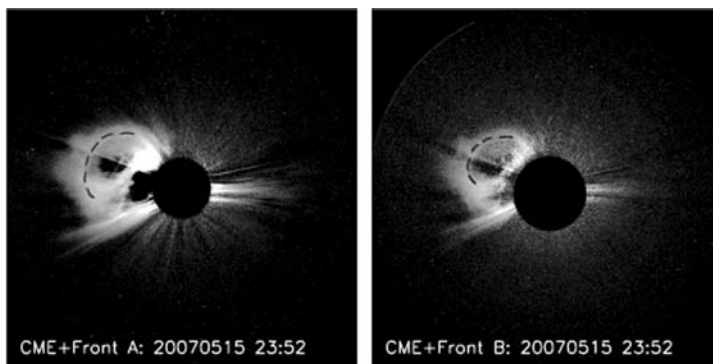


图 2 2007 年 5 月 15 日 23:52 UT CME 事件的差分图像 (虚线分别为 A 星和 B 星观测到 CME 在各自天空平面中的前沿位置)

Fig. 2 Difference images of CME event at 23:52 UT on 15 May 2007 (Green dashed lines shows the front edge of CME projected in their sky plane at this time)

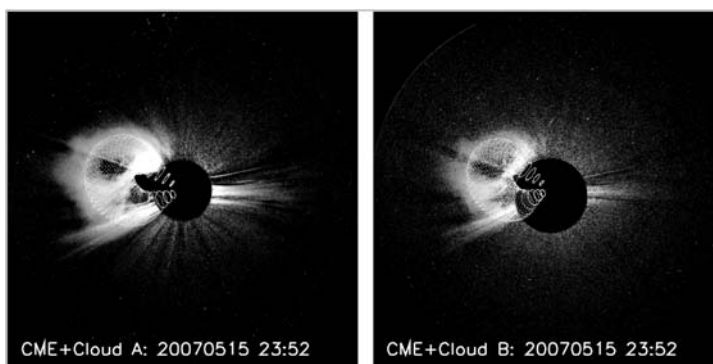


图 3 2007 年 5 月 15 日 23:52 UT A 星和 B 星观测到的 CME 图像叠加磁通量管投影后的情况

Fig. 3 Observed CME images at 23:52 UT on May 15 2007 which superposed by the projected images of the flux rope in both STEREO-A and STEREO-B sky plane

在图 3 所示的磁通量管基础上, 程序自动微调模型中的三个参数: 经度、纬度和磁通量管在日面上投影的倾角, 使模型给出的磁通量管在天空平面投影的前沿与 CME 的前沿匹配达到最好. 这组参数即最好地描述了此时 CME 的空间位置和本身形状.

对其他时刻重复以上过程, 得到表 1 中的 9 列参数. 表 1 中, 第 1 列为观测日期; 第 2 列为具体时刻; 第 3, 4 列为磁通量管轴线在日面投影的中点分别在卡林顿坐标和 Stonyhurst 坐标系下的经度值; 第 5 列为轴线投影中点的纬度值; 第 6 列为轴线投影与纬度线的夹角; 第 7 列为比例 κ ; 第 8 列为半角宽度 α ; 第 9 列为磁通量管顶点到日心的距离, 其中 H_{3d} 为 CME 前沿的高度, H_{pa} 和 H_{pb} 为 A 星和 B 星观测到的 CME 前沿在天空平面中心角方向的投影高度, H_{ma} 和 H_{mb} 为根据投影高度经过源区投影

修正得到的修正高度 (高度均以太阳半径为单位).

对时间高度进行一次和二次拟合, 结果如图 4 所示. 图 4(a) (b) 为 CME 在三维空间高度 H_{3d} 的一次和二次拟合结果, 从拟合结果得到这个事件在三维空间的运动速度为 374 km/s , 加速度为 -2 m/s^2 . 图 4(c) (d) 分别为 CME 在 A 星天空平面内投影前沿中心角方向高度 H_{pa} 的一次和二次拟合结果, 投影速度为 349 km/s , 其加速度为 2 m/s^2 . 图 4(e) (f) 分别为 CME 在 B 星天空平面内投影前沿中心角方向高度 H_{pb} 的一次和二次拟合结果, 投影速度为 321 km/s , 其加速度为 6 m/s^2 . 依此方法, 可以得到其他事件的速度和加速度, 由于在 COR2 视野中, CME 的加速度较小, 在下面的研究中仅考虑 CME 的平均速度, 各事件投影速度与三维速度比较结果在表 4 中给出.

表 1 2007 年 5 月 15 日 CME 事件 9 个时刻参数及各时刻 A 星和 B 星的投影高度及修正高度
Table 1 Parameters and the heights of the event at nine different moments on 15 May 2007

日期	时间 (UT)	卡林顿 经度/(°)	Stonyhurst 经度/(°)	纬度/(°)	$\gamma/(^\circ)$	κ	$\alpha/(^\circ)$	H_{3d}/R_s	H_{pa}/R_s	H_{pb}/R_s	H_{ma}/R_s	H_{mb}/R_s
2007-05-15	21:52:30	51.82	291.91	14.21	-54.78	0.284	27.392	6.17	5.94	5.61	6.18	6.11
2007-05-15	22:22:30	59.11	299.48	11.67	-58.69	0.296	30.185	7.01	6.81	6.17	7.42	7.20
2007-05-15	22:52:30	61.37	302.01	9.57	-68.19	0.296	30.185	8.11	7.60	6.99	8.46	8.40
2007-05-15	23:22:30	63.18	304.10	8.27	-68.19	0.296	30.185	9.14	8.45	7.81	9.59	9.65
2007-05-15	23:52:30	62.16	303.35	11.03	-68.19	0.296	30.185	10.07	9.57	8.57	10.76	10.43
2007-05-16	00:22:30	63.63	305.09	11.03	-68.19	0.296	30.185	11.00	10.42	9.55	11.90	11.86
2007-05-16	00:52:30	62.23	303.97	11.74	-68.19	0.299	30.466	11.92	11.36	10.29	12.83	12.59
2007-05-16	01:22:30	62.24	304.25	13.59	-68.19	0.299	30.466	13.00	12.03	11.31	13.59	13.83
2007-05-16	01:52:30	60.19	302.49	13.64	-68.19	0.299	30.466	13.82	13.22	12.15	14.71	14.56

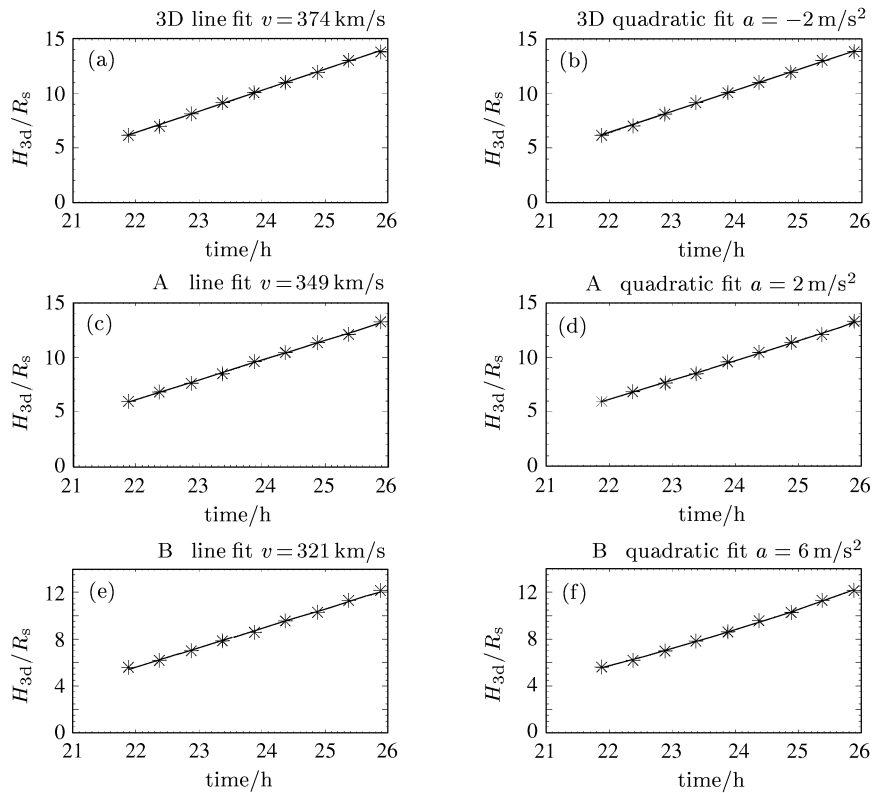


图 4 2007 年 5 月 15 日 CME 事件时间高度曲线的一次拟合和二次拟合结果
Fig. 4 Line fit and quadratic fit curves of height time measurements on 15 May 2007

3 关于源区投影修正方法及修正结果的讨论

在以往的研究中, 通常根据 CME 源区在日面上

的位置对投影高度或速度进行源区投影修正, 修正所得结果则认为是 CME 在三维空间高度的速度. 下面讨论源区投影修正方法得到的修正速度与三维速度之间的关系. 本文中的三维速度特指磁绳正演法得

到的三维速度, 而由投影速度修正得到的速度称之为修正速度, 由投影高度经过修正得到的高度称之为修正高度.

当确定源区的经度 ϕ 和纬度 θ 后, 可以得到日心角距 φ , 即 CME 源区和日心连线与观测点和日心连线的夹角 ($\cos \varphi = \cos \theta \cos \phi$). 在不考虑 CME 前沿的空间范围时, 投影修正公式为

$$\begin{cases} v_m = v_p / \sin \varphi, \\ H_m = H_p / \sin \varphi. \end{cases} \quad (2)$$

其中, v_p 和 H_p 为 CME 的投影速度和投影高度, v_m 和 H_m 为修正速度和修正高度. 2007 年 5 月 15 日事件 A 星和 B 星得到的投影高度和修正高度在表 1 中给出.

表 2 给出了 2007 年 5 月 15 日事件投影修正参数的结果. 表 2 中给出的经纬度是源区位置在 A 星和 B 星观测到的日面位置, 即 Stonyhurst 坐标下的经纬度; φ 为源区位置的日心角距; v_p 为 A 星和 B 星观测到的 CME 投影速度, v_m 为修正速度, v_{3d} 为根据磁绳正演法得到的三维速度, v_p/v_{3d} 和 v_m/v_{3d} 分别为投影速度、修正速度与三维速度的比值; H_p/H_{3d} 和 H_m/H_{3d} 为 2007 年 5 月 15 日事件在 COR2 中运动的 9 个时刻投影高度、修正高度与三维高度比值的平均值.

在表 2 中, 由 A 星和 B 星得到的修正速度分别为 388 km/s 和 384 km/s, 与磁绳正演法得到的 CME 在三维空间的运动速度 374 km/s 基本吻合. 可见对于 2007 年 5 月 15 日事件, 修正速度基本上可以反映 CME 真实的三维速度. 表 2 中 CME 修正高度与三维高度的比值 H_m/H_{3d} 也接近于 1, 说明修正高度也能反映 CME 在三维空间的高度. 但是在分析

的 21 个 CME 事件中, 有些事件并非如此, 不仅 A 星和 B 星的修正速度不同, 而且其与三维速度也有较大差异, 例如 2008 年 1 月 23 日观测到的 CME 就是这样典型的事件, 表 3 列出了该事件的结果.

在表 3 中, A 星和 B 星各自得到的修正速度分别为 702 km/s 和 442 km/s, 同一事件得到的修正速度存在很大差异, 并且它们与磁绳正演法得到的三维速度 385 km/s 差别也很大, 尤其是从 A 星得到的修正速度更是远大于三维速度. 显然对于该事件由源区投影修正得到的修正速度已无意义, 说明源区投影修正方法对这个事件并不适用. 从表 3 的 H_m/H_{3d} 比值可以看出, CME 修正高度与三维高度之间差别也很大, 从 A 星得到的修正高度与三维高度的比值更是达到 1.75.

下面对导致这一事件中修正速度及三维速度之间的差别进行具体分析. 对这种速度 (高度) 之间的差别给出定性的解释. 由于速度是高度对时间的微分, 因此只需要考察三种高度之间的差别. 图 5 所示为从太阳北极看到的 CME 投影高度、修正高度

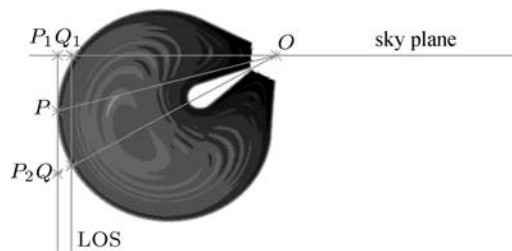


图 5 从太阳北极看到的 CME 投影速度与真实前沿速度差别示意

Fig. 5 Difference between projected velocity and 3D velocity seen from the north direction of Sun

表 2 2007 年 5 月 15 日 CME 事件投影修正参数

Table 2 Projected modified parameters of CME event on 15 May 2007

卫星	经度/(°)	纬度/(°)	φ /(°)	v_p /(km·s ⁻¹)	v_m /(km·s ⁻¹)	v_{3d} /(km·s ⁻¹)	v_p/v_{3d}	v_m/v_{3d}	H_p/H_{3d}	H_m/H_{3d}
A	296.47	13.53	64.32	349.67	388.00	374.17	0.93	1.04	0.95	1.05
B	304.50	14.83	56.80	321.75	384.50	374.17	0.86	1.03	0.87	1.04

表 3 2008 年 1 月 23 日 CME 事件投影修正参数

Table 3 Projection modified parameters of CME event on 23 January 2008

卫星	经度/(°)	纬度/(°)	φ /(°)	v_p /(km·s ⁻¹)	v_m /(km·s ⁻¹)	v_{3d} /(km·s ⁻¹)	v_p/v_{3d}	v_m/v_{3d}	H_p/H_{3d}	H_m/H_{3d}
A	177.29	-24.42	24.56	291.83	702.23	385.09	0.76	1.82	0.73	1.75
B	222.21	-28.65	49.46	336.02	442.17	385.09	0.87	1.15	0.83	1.09

以及三维高度之间差别的情况. 图 5 中横线是经过日心 O 点的天空平面, 两条竖线表示视线方向, P 点为 CME 在天空平面内投影距日心的最远点. 定义直线 OP 是 CME 的投影轴; Q 点为 CME 在三维空间内距日心的最远点, 位于 CME 源区的径向方向上, 其运动速度即为 CME 在三维空间真实的运动速度; P_1 和 Q_1 点分别为 P 点和 Q 点在天空平面内的投影; P_1 点在天空平面内的运动速度即为 CME 的投影速度. 对 P_1 点按照源区投影修正的方法做投影修正时, 得到的修正点 P_2 位于 CME 的源区径向方向上, P_2 点在三维空间的运动速度即为修正速度. 从图 5 中可以看到 P_2 点与 Q 点之间的差别, 即修正高度与三维高度之间的差别, 而 P_1 点与 Q 点之间的分离即为投影高度与三维高度之间的差别.

如图 5 所示, 在理想的磁通量管中, 代表修正高度、投影高度以及三维高度的线段 $|OP_2|$, $|OP_1|$ 和 $|OQ|$ 之间存在以下的大小关系: $|OP_2| \geq |OQ| \geq |OP_1|$, 即修正高度 $|OP_2|$ 大于等于三维高度 $|OQ|$, 又大于等于投影高度 $|OP_1|$. 同时还可以看到, 对于 A 星和 B 星, 这三种高度之间的差别也并不相同, 如表 3 所列. A 星得到的投影高度、修正高度与三维高度之间的差别要大于 B 星得到的结果, 造成结果不同的主要原因是 CME 源区在 A 星和 B 星观测到的日面上的日心角距不同, 使得 CME 投影轴与源区径向方向之间的夹角不同. 对于 2008 年 1 月 23 日事件, CME 源区在 A 星日面上的日心角距小于 B 星日面上的日心角距, A 星 CME 投影轴与源区径向方向的夹角更大, 也就造成三种高度之间的差别更大.

CME 在向外运动的过程中, 投影高度、修正高度与三维高度之间的关系决定了投影速度、修正速度与三维速度之间的关系. 造成三种速度(高度)之间的差别主要是因为 CME 投影轴 OP 与源区径向方向之间的分离, 对于同一个 CME, 日心角距越小, 这种分离越大, 造成修正速度(高度)与三维速度(高度)之间的差别也越大. 只有当 CME 源区的径向方向位于天空平面内时, 此时投影轴位于源区的径向方向上, P 点与 Q 点重合, 这时得到的 CME 的三种速度(高度)才是相等的.

4 统计分析

为定量分析 CME 源区位置对于投影效应及投

影修正的影响, 对 2007—2008 年中的 21 个 CME 事件源区位置与投影效应之间的关系进行统计分析.

选取 2007—2008 年结构清晰的 21 个 CME 事件, 分析其在 COR2 视野中的投影速度(高度)、修正速度(高度)与三维速度(高度)之间的差别, 进而分析这种差别与 CME 源区位置的关系. 分析结果列于表 4 (符号的含意与表 2 和表 3 相同).

统计分析日心角距对投影修正的影响. 图 6 给出的是根据表 4 得到的结果, 图 6(a) (c) 分别为所有事件修正速度、投影速度与三维速度比值关于日心角距的散点结果; 图 6(b) (d) 分别为日心角距位于某个区间内的所有事件修正速度、投影速度及三维速度比值与 1 之间偏差的均方根值, 对于每个日心角距, 取前后各 5° 范围内的事件, 具体计算结果列于表 5. 以投影速度和三维速度之间的差别为例, 计算公式如下:

$$\Delta(v_p/v_{3d}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (v_{pi}/v_{3di} - 1)^2/n}. \quad (3)$$

式中, v_{pi}/v_{3di} 为某个事件投影速度和三维速度之间的比值, n 为日心角距位于 10° 范围内的事件数. 式 (3) 反映了在这个日心角距附近修正速度、投影速度与三维速度之间的差别. 该值越接近于 0, 表示速度之间存在的差别越小, 反之, 该值越大速度之间的差别越大. 这里取值小于 0.1, 表示两种速度之间的差别足够小, 修正速度或投影速度基本上反映了 CME 的三维速度.

从图 6(a) (b) 可以看出, 经过源区投影修正得到的修正速度要大于 CME 的三维速度, 尤其在日心角距很小, 即源区位置靠近日面中心的情况下, 修正速度与三维速度差别很大, 甚至达到 90%. 在这种情况下, 这种源区投影修正方法显然是不对的. 当日心角距逐渐变大, 即源区位置离日面边缘越来越远时, 速度比值越来越接近于 1, 修正速度越来越接近于 CME 的三维速度. 从表 5 得知, 当日心角距达到 50° 时, 修正速度与三维速度的差别减小到 10% 以内. 可以认为当源区日心角距大于这个特定值时, 投影修正得到的速度是比较可信的; 而当日心角距小于这个值时, 投影速度与三维速度之间差别较大. 图 6(c) (d) 给出了投影速度与三维速度之间的比值随日心角距的变化. 可以看到, 随着日心角距的变大, 投影速度与三维速度的差别也逐渐变小, 当日心角距

表 4 2007—2008 年中 21 个 CME 事件的投影速度、修正速度及三维速度
 Table 4 Projected velocity, modified velocity and the 3D velocity of the 21 CME events observed during 2007—2008 years

日期	卫星	$\varphi/(^\circ)$	$v_p/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	$v_m/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	$v_{3d}/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	活动区	v_p/v_{3d}	v_m/v_{3d}	H_p/H_{3d}	H_m/H_{3d}
2007-03-31	A	89.33	253.29	253.31	255.05	Y	0.99	0.99	0.97	0.97
	B	87.75	249.92	250.11			0.98	0.98	0.99	1.00
2007-05-09	A	50.85	224.92	290.02	311.50	Y	0.72	0.93	0.81	1.04
	B	57.98	248.86	293.51			0.80	0.94	0.87	1.02
2007-05-15	A	64.32	349.67	388.00	374.17	Y	0.93	1.04	0.95	1.05
	B	56.80	321.75	384.50			0.86	1.03	0.87	1.04
2007-05-22	A	65.80	407.58	446.86	451.71	Y	0.90	0.99	0.91	1.00
	B	74.83	417.27	432.34			0.92	0.96	1.00	1.04
2007-06-07	A	54.93	232.15	283.66	268.08	Y	0.87	1.06	0.84	1.02
	B	66.04	235.71	257.94			0.88	0.96	0.94	1.03
2007-07-08	A	86.50	367.96	368.65	385.16	Y	0.96	0.96	0.96	0.97
	B	69.31	337.47	360.72			0.88	0.94	0.87	0.94
2007-08-31	A	67.77	266.30	287.68	287.11	N	0.93	1.00	0.93	1.00
	B	86.91	291.89	292.32			1.02	1.02	1.01	1.01
2007-10-08	A	34.14	158.13	281.78	250.92	N	0.63	1.12	0.63	1.13
	B	69.20	239.11	255.78			0.95	1.02	0.94	1.01
2007-10-16	A	22.89	135.46	348.27	249.13	N	0.54	1.40	0.53	1.35
	B	55.79	206.53	249.75			0.83	1.00	0.84	1.02
2007-11-04	A	64.85	275.42	304.25	270.84	N	1.02	1.12	0.97	1.07
	B	26.37	165.27	372.07			0.61	1.37	0.65	1.47
2007-11-14	A	40.53	229.65	353.38	271.04	N	0.85	1.30	0.77	1.19
	B	76.13	282.13	290.60			1.04	1.07	1.01	1.04
2007-11-16	A	79.04	410.92	418.56	401.85	N	1.02	1.04	0.95	0.97
	B	40.88	293.53	448.52			0.73	1.12	0.70	1.08
2007-12-04	A	50.80	218.51	281.97	259.29	N	0.84	1.09	0.85	1.09
	B	87.72	252.55	252.75			0.97	0.97	0.98	0.99
2007-12-31	A	67.47	776.61	840.76	776.23	Y	1.00	1.08	0.93	1.01
	B	68.95	699.98	750.02			0.90	0.97	0.91	0.98
2008-01-02	A	84.79	455.43	457.31	445.15	Y	1.02	1.03	1.01	1.02
	B	51.61	392.06	500.18			0.88	1.12	0.84	1.07
2008-01-23	A	24.56	291.83	702.23	385.09	Y	0.76	1.82	0.73	1.75
	B	49.46	336.02	442.17			0.87	1.15	0.83	1.09
2008-02-23	A	49.21	189.22	249.93	245.68	N	0.77	1.02	0.78	1.03
	B	89.56	235.14	235.15			0.96	0.96	0.99	0.99
2008-03-25	A	74.97	959.57	993.55	951.55	Y	1.01	1.04	0.96	1.00
	B	57.83	922.31	1089.66			0.97	1.15	0.90	1.07
2008-04-05	A	89.53	1024.99	1025.03	975.73	Y	1.05	1.05	0.98	0.98
	B	42.39	660.45	979.70			0.68	1.00	0.72	1.06
2008-04-09	A	83.69	499.49	502.53	528.95	Y	0.94	0.95	0.98	0.99
	B	49.37	390.73	514.86			0.74	0.97	0.85	1.11
2008-04-26	A	48.31	540.04	723.14	692.48	Y	0.78	1.04	0.80	1.08
	B	14.19	330.88	1349.63			0.48	1.95	0.49	2.00

注 “活动区” 表示磁通量管轴线投影附近的活动区情况, Y 表示在磁通量管轴线投影的附近有活动区存在, N 表示磁通量管轴线投影附近没有活动区.

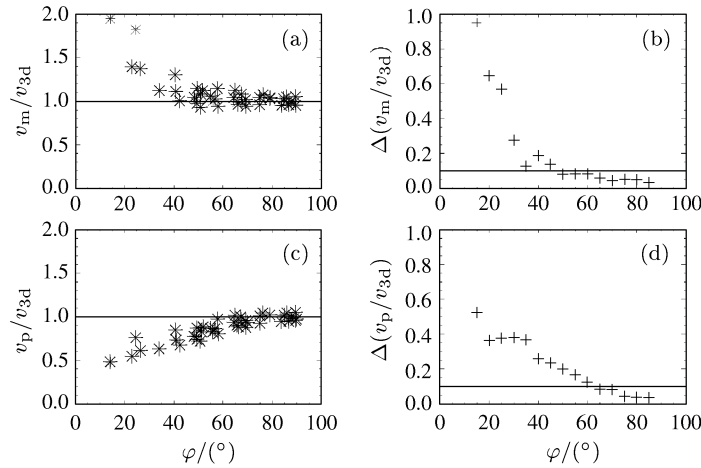


图 6 CME 源区的日心角距对速度投影修正效果的影响. (a) (c) 分别为所有事件修正速度、投影速度与三维速度比值关于日心角距的散点图, (b) (d) 中每个点为日心角距位于某个区间内的所有事件修正速度、投影速度和三维速度比值与 1 之间偏差的均方根值

Fig. 6 CME angular distance and its impact on the projection modified result of CME velocity. (a) and (c) are the modified velocity and the projected velocity compare to the 3D velocity respectively, (b) and (d) show the change of these differences versus the angular distance

达到 65° 时, 它们的差别减小到 10% 以内.

综上所述, 对于源区投影修正方法存在两个特定的日心角距. 一个是 50°, 当日心角距大于这个值时, 源区投影修正方法得到的修正速度是可信的; 另一个是 65°, 当 CME 源区在日面上的日心角距大于这个值时, 该 CME 可以作为边缘事件处理, 不需要对投影速度进行修正, 其已经可以反映 CME 在三维空间的真实速度.

按照同样的方法对 CME 高度之间的比值与日

心角距之间的关系进行分析, 结果示于图 7 和表 6. 图 7 和表 6 中的 H_m , H_p , H_{3d} 分别为修正高度、投影高度与三维高度.

从图 7 和表 6 可以得到高度和速度存在相似的结果. 经过源区投影修正得到的修正高度要大于 CME 的三维高度. 当日心角距小于 50° 时, 源区投影修正方法对高度的修正结果与三维高度存在较大差别; 当日心角距大于 50°, 修正高度与三维高度之间的误差减小到 10% 以内; 当日心角距大于 65°

表 5 修正速度与三维速度之间的差别及投影速度与三维速度之间的差别随日心角距的变化情况

Table 5 Difference between the modified velocity and the 3D velocity and the difference between the projected velocity and the 3D velocity varied with angular distance

$\varphi/(\circ)$	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
$\Delta(v_m/v_{3d})/(\%)$	94.9	64.7	57.0	27.8	12.3	18.8	13.7	8.4	8.4	8.3	5.8	4.4	5.2	5.0	3.5
$\Delta(v_p/v_{3d})/(\%)$	52.2	36.5	37.4	38.0	37.0	25.8	23.5	20.0	16.7	12.6	8.2	8.3	4.5	3.8	3.6

表 6 修正高度与三维高度之间的差别及投影高度与三维高度之间的差别随日心角距的变化情况

Table 6 Difference between the modified height and the 3D height and the difference between the projected velocity and the 3D height varied with angular distance

$\varphi/(\circ)$	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
$\Delta(H_m/H_{3d})/(\%)$	99.9	58.7	55.0	34.3	12.8	12.3	10.3	7.4	5.4	5.1	3.9	2.8	3.1	2.6	2.0
$\Delta(H_p/H_{3d})/(\%)$	51.1	38.6	37.4	35.9	36.9	27.0	22.7	17.8	15.1	11.0	7.7	7.5	3.1	2.7	2.1

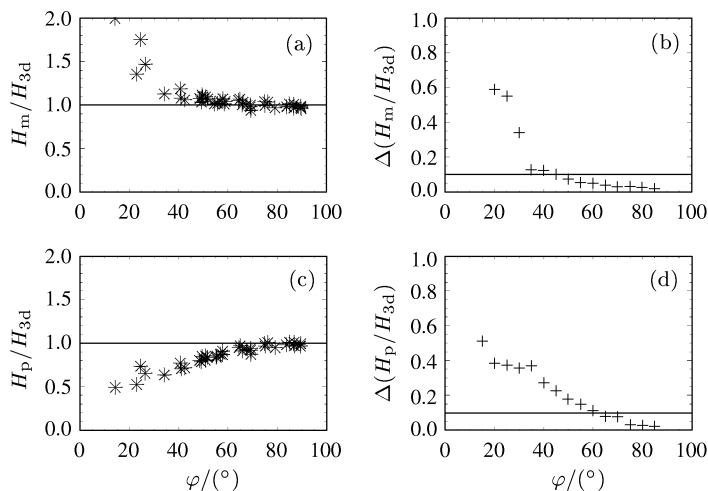


图 7 CME 源区日心角距对高度投影修正效果的影响. (a) (c) 分别为所有事件修正高度、投影高度与三维高度比值关于日心角距的散点图, (b) (d) 中每个点为日心角距位于某个区间内的所有事件修正高度、投影高度和三维高度比值与 1 之间偏差的均方根值

Fig. 7 CME angular distance and its impact on the projection modified result of CME height (a) and (c) are the modified height and the projected height compared to the 3D height respectively, (b) and (d) show the change of these differences versus the angular distance

时, 可以认为观测到的投影高度基本上等于 CME 的三维高度.

5 CME 速度大小与活动区的关系

根据表 4 所列情况, 将这 21 个 CME 事件按照在磁通量管轴线投影附近有无活动区存在分成两类, 第一类 13 个事件有活动区存在, 第二类 8 个事件没有活动区存在. 图 8 给出了这两类 CME 事件的速度分布. 从图 8 可以发现, 前者的速度要明显大于后者的速度, 可见活动区的存在对 CME 事件的速度有很大影响, 源区附近有活动区的存在更容易产生快速的 CME.

6 结论与讨论

利用 Thernisien 等 [8] 提出的磁绳正演法得到了 2007—2008 年中 21 个 CME 事件在三维空间的运动速度, 同时根据 STEREO A 星和 B 星观测到的投影速度进行源区投影修正, 得到修正速度, 并将二者进行比较, 得到如下结论.

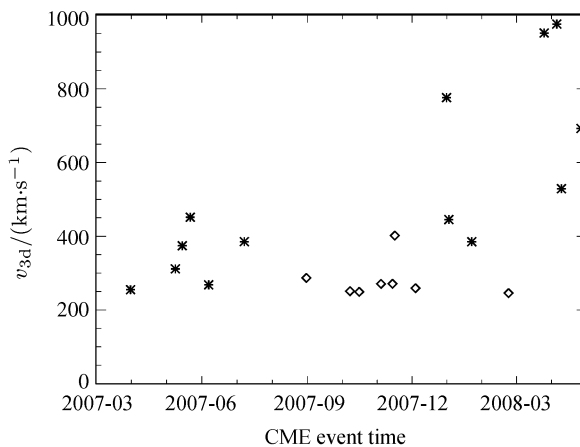


图 8 磁通量管在日面上投影附近有无活动区的两类 CME 事件的速度分布情况(\diamond 表示磁通量管在日面上投影附近没有活动区的一类事件, * 表示磁通量管在日面上投影的附近有活动区的 CME 事件)

Fig. 8 Distribution of two classes of CME events binarized by the existence of active region near the CME source regions. The asterisks present the events with associated active region while the diamonds present the events without associated active region (\diamond denote the events that no active region could be found near the source region, while the asterisks (*) show other events)

(1) 源区投影修正方法存在局限性

在实际观测中,对天空平面投影贡献的投影轴随着观测者的方位不同而改变,即不同的观测卫星投影轴是不同的.另外,进行的投影修正所采用的角度是根据源区的径向方向得到的,并不是投影轴的方向.这两个因素在小日心角距情况下对修正结果影响尤为明显,不同的卫星得到的修正速度差别很大,修正速度与三维速度差别也很明显.一般说来,源区投影修正方法得到的修正速度要大于 CME 的三维速度,同时修正得到的高度也要大于 CME 实际的高度.

(2) 源区投影修正方法存在适用范围

通过对源区位置与速度差别之间的关系统计,可以看出,源区位置离日面边缘越近时,修正速度与三维速度的比值和投影速度与三维速度的比值均越接近于 1,即修正速度和投影速度都更接近于 CME 的三维速度.当日心角距小于 50° 时,修正速度与三维速度之间存在较大差别,此时源区投影修正方法是不适用的;当 CME 源区位置日心角距大于 50° 时,修正速度与三维速度之间误差小于 10%,可以通过这种修正方法得到 CME 的三维速度;当日心角距达到 65° 时,CME 在天空平面内的投影速度与三维速度之间的差别已经小于 10%,此时投影速度即可以反映 CME 的三维速度.

(3) 活动区对 CME 事件的速度有较大影响

磁通量管轴线在日面上投影附近有无活动区存在,对 CME 事件的速度有较大的影响,有活动区存在的事件速度要明显大于没有活动区存在的事件.

磁绳正演法在 CME 的三维重构中有很大的优点,其避免了在三角分析过程中遇到的图像匹配问题;通过引入 CME 磁通量管的模型,使 CME 的三维重构问题变成了磁通量管在 A 星和 B 星天空平面投影与观测到的 CME 前沿的匹配问题.利用这种方

法可以得到 CME 在三维空间比较准确的运动速度,通过分析由源区投影修正方法得到的修正速度与三维速度之间的关系,进而对这种源区修正方法带来的误差有一个更深入的认识.

参考文献

- [1] Gopalswamy N, Lara A, Yashiro S, Karser M L, *et al.* Predicting the 1 AU arrival time of coronal mass ejections [J]. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**(A12):29 207-29 217
- [2] Brueckner G E, *et al.* The Large Angle Spectroscopic Coronagraph (LASCO) [J]. *Solar Phys.*, 1995, **162**(1-2):357-402
- [3] Leblanc Y, Dulk G A, Vourlidas A, Bougeret J L. Tracing shock waves from the corona to 1 AU: Type II radio emission and relationship with CMEs [J]. *J. Geophys. Res.*, **106**(A11):25 301-25 312
- [4] Shen Chenglong, Wang Yuming, Ye Pinzhong, *et al.* Strength of coronal mass ejection-driven shocks near the sun and their importance in predicting solar energetic particle events [J]. *Appl. J.*, 2007, **670**(1):849-856
- [5] Aschwanden M J, Burlaga L F, Kaiser M L *et al.* Theoretical Modeling for the STEREO Mission [J]. *Space Sci. Rev.*, 2008, **136**(1-4):565-604
- [6] Aschwanden M J, Wuelser J P, Nitta N V. First three-dimensional reconstructions of coronal loops with the STEREO A and B spacecraft. I. Geometry [J]. *Appl. J.*, 2008, **679**(1):827-842
- [7] Thernisien A F, Howard R A, Vourlidas A. Modeling of flux rope coronal mass ejections [J]. *Appl. J.*, 2006, **652**(1):763-773
- [8] Thernisien A F, Vourlidas A, Howard R A. Forward modeling of coronal mass ejections using STEREO-SECCHI data [J]. *Solar Phys.*, 2009, **256**(1-2):111-130
- [9] Cremades H, Bothmer V. On the three-dimensional configuration of coronal mass ejections [J]. *Astron. Astrophys.*, 2004, **422**:307-322
- [10] Thompson W T. Coordinate systems for solar image data [J]. *Astron. Astrophys.*, 2006, **449**(2):791-803