

发生在活动区 11931 附近的重复喷流*

胡玉坤^{1,2†} 徐 稚¹ 薛志科¹ 闫晓理¹ 申远灯¹ 吴 宁³
林 隽^{1‡}

(1 中国科学院云南天文台 昆明 650011)

(2 中国科学院大学 北京 100049)

(3 云南师范大学旅游与地理科学学院 昆明 650031)

摘要 根据SDO/AIA (Solar Dynamics Observatory/Atmospheric Imaging Assembly) 2013年12月25日到26日的171 Å观测,发现在活动区NOAA 11931西南同一区域连续发生了一系列同源喷流事件,选取了其中的12次比较典型的喷流作了分析研究.与大部分喷流有关的磁场结构在抛射的过程中都有明显的解缠运动,少部分的几个没有.有的喷流的过程可以分为两个阶段:慢速无解缠抛射阶段和快速解缠抛射阶段.有的喷流在发生前,观测到有亮点沿着磁拱底部从远离喷流的一端向靠近喷流的一端延伸,而在喷流过程当中,靠近磁拱底部的区域有两部分磁力线同时在做旋转运动.在最后一次喷流过程中,喷流底部的磁结构东南端有两个磁拱先后出现,同时在西北端有一个小磁环浮现出来.对比SDO/HMI (Helioseismic and Magnetic Imager)的视向磁图发现,大约在第1次喷流出现之前4 h,一对正负磁极从有关磁结构的底部浮现,并且在整个喷流事件过程中一直在上浮.虽然在这12次喷流发生前后底部磁场整体上是浮现的,但是具体到每个喷流底部磁场的变化也不尽相同,有的喷流底部的磁拱附近磁场既有浮现过程又有对消过程,而有的喷流底部磁场附近只有明显磁浮现或者磁对消过程.

关键词 太阳: 大气, 太阳: 活动, 太阳: 磁场拓扑结构

中图分类号: P144; 文献标识码: A

1 引言

在太阳大气中存在许多种类的喷流现象,它们通常出现在活动区和两极冕洞.喷流现象在不同波段的名称也不同,例如: H α 日浪^[1]、H α 针状体^[2]、UV 喷流^[3]、EUV 喷流^[4]和X射线喷流^[5].这些喷流最显著的不同是抛射等离子体温度的差别,但是它们的

2015-03-05 收到原稿, 2015-04-11 收到修改稿

*973 项目 (2011CB811403, 2013CBA01503)、国家自然科学基金项目 (11273055, 11333007, 11103075) 及中国科学院“宇宙结构起源”B类先导专项 (XDB09040202) 资助

[†]hyk@ynao.ac.cn

[‡]jlin@ynao.ac.cn

形状和运动特征非常相似, 这表明它们应该是由同一种物理机制产生, 并且是在整体结构类似的磁位形当中形成的^[6].

一般认为相反方向磁力线接触时发生的磁重联是产生喷流的核心机制^[5], 在磁重联过程中磁能转变成抛射等离子体的热能和动能. 根据光球物质的流动特征和日冕磁结构的具体细节, 可以将引起磁重联的过程分成不同种类, 例如: 新浮现的磁通量与已有磁通量之间的相互作用^[6-10], 汇聚的磁通量之间相互作用^[11], 准分界层 (QSL) 的变化^[12]等等. Moreno-Insertis 等^[13]用新浮现磁场与原有磁场的作用模拟导致喷流的磁重联过程, 而 Pariat 等^[14-15]用水平光球扭缠运动也模拟了同样的过程. 尽管其中有些工作主要关注的是太阳耀斑和日冕亮点, 但是也讨论了磁重联产生喷流的可能性.

Shimojo 等^[16]对日冕喷流进行了统计性研究, 其统计研究表明喷流的典型长度为 $10^4 \sim 4 \times 10^5$ km, 典型宽度为 $5 \times 10^3 \sim 10^5$ km, 平均速度为 200 km/s. Shimojo 等^[17]进一步研究发现 8% 的喷流出现在单极磁区, 12% 出现在两极磁区, 24% 出现在混合极区域, 而 48% 的喷流则出现在卫星磁极区域. Shimojo 等^[18]还发现喷流等离子体的温度与足点耀斑的大小密切相关.

重复发生的喷流也经常被观测到^[19-26]. 王俊峰等^[24-25]研究发现新浮卫星磁场与黑子内磁场之间的重联引起了连续 3 个 H α 喷流事件. Chae 等^[27]建议由新浮磁通量过程驱动的磁重联可以解释活动区 EUV 重复喷流. Pariat 等^[15]提出一个由光球扭缠运动驱动的喷流磁零点扇形分界模型. 在这个模型中, 由于光球物质的连续运动, 在日冕磁结构的零点扇形周围产生了重复喷流, 这能够解释这些重复喷流的准周期特征. Zhang 等^[23]提出另一个可能机制: 磁重联过程的准周期性被束缚在磁场线上的慢模磁声波调整, 而慢模波也被 Cirtain 等^[28]的观测所证实.

Moore 等^[6]将 X 射线喷流分为标准喷流 (standard jet) 和爆破喷流 (blow-out jet) 两类. 前者符合 Shibata 等^[5]提出的模型, 即喷流由新浮现磁场与背景日冕磁场之间发生的磁重联所导致, 在喷射过程中涉及到的磁场结构比较简单; 而后者则类似于日冕物质抛射 (CME) 过程中的中心场暗条的爆发, 在喷射过程中涉及到的磁场结构比较复杂. 由此他们认为两种喷流的判据是: 爆破喷流在爆发过程中明显变宽, 底部拱内部变亮出现爆发; 而标准喷流则没有这些现象. 他们认为后一种喷流能够用绳切 (Tether-Cutting) 式磁重联^[29]和爆破 (Breakout) 式磁重联^[30]来解释. 两种形式的喷流在数值模拟中均得到了表现^[13, 31]. Shen 等^[32]报导了一个在低层大气中发生的爆破式喷流, 及其动力学相关的、在较高层出现的一个喷流状和一个泡状的小尺度 CME. 他们发现爆破式喷流中同时包含冷的和热的等离子体; 其中, 冷等离子体来自于喷流底部磁拱内部的爆发暗条内的物质, 这一爆发产生了泡状 CME, 而喷流状 CME 则与热等离子体相伴, 这些热等离子体来自于底部磁拱与周围磁场的重联过程.

在有些喷流抛射过程中, 还伴随着相应磁场明显的解缠运动^[33], 即在喷流抛射过程中, 相应的磁结构绕着喷流的方向做旋转运动^[34-36]. Shen 等^[34]和 Moore 等^[35]认为这是喷流底部浮现的磁场内部的扭缠在喷流过程中释放出来, 并伴随着喷流运动的结果. Zhang 等^[36]用多波段资料研究了一个与耀斑相关的旋转喷流. 他们发现在沿着喷流的方向上物质有上升和下降的运动, 重力加速度远低于自由落体加速度; 而且, 喷流的起始时间与耀斑脉冲相开始的时间相吻合; 在这个过程中, 喷流表现出螺旋结构和减速的逆

时针旋转运动, 并且在旋转过程中, 喷流中粗的扭缠纤维经过解缠成为多条细纤维. 通过对视向磁场的研究, 他们认为喷流是由于爆发前连续的磁对消引起的.

Schmieder 等^[37] 对一个解缠喷流进行了研究, 在喷流发生的区域底部, 有磁力线上的秃斑 (bald patch, 即日冕中下凹磁力线靠近或是接触到光球的部分)、位置很低的磁通量绳、发散的物质流以及一个磁中性点, 上述这些结构或特征可被认证出来. 他们认为发生在秃斑所处区域中的磁重联是产生该喷流的关键, 喷流周围的磁结构通过重联得到磁通量绳中的扭缠, 然后这些扭缠在喷流的过程中解开了. 他们猜测这个喷流是与传统的标准喷流和爆发喷流不同的一类另类喷流. 当然这需要更多的研究来证实. Suematsu 等^[38] 发现针状体的单纤维阶段 (single-thread phase) 和双纤维阶段 (double-thread phase) 周期性出现 (可以参考该文章图 3), 他们认为这是由于针状体像刚体一样进行旋转所呈现出来的结构.

Pariat 等^[39] 的三维数值模拟显示标准喷流最好用直线喷流来描述, 而爆破喷流则非常好地对应于螺旋喷流. 他们注意到当直线喷流出现在螺旋喷流之前时, 触发螺旋喷流的能量阈值就会降低, 因此螺旋喷流释放的能量就会变少, 导致在磁重联点产生较弱的粒子加速. 他们发现螺旋喷流并不是直线喷流引起的, 但是二者之间有关联: 螺旋喷流之前的直线喷流越强, 那么螺旋喷流就会越弱. 所以, 他们预测如果在爆破喷流之前有直线喷流, 那么它的辐射特征会比较弱.

本文将对活动区 11931 西南连续发生的 12 次喷流进行研究. 第 2 部分对观测数据、活动区特征、喷流的特征以及磁场的特征进行简要描述; 第 3 部分对喷流的运动特征和演化进行研究; 第 4 部分对喷流底部附近的磁场进行了研究; 最后一部分给出本工作的结论.

2 观测数据及事件概述

我们使用的数据来自美国太阳动力学天文台 (Solar Dynamics Observatory: SDO) 搭载的太阳大气成像仪 (Atmospheric Imaging Assembly: AIA^[40]) 提供的 171 Å 全日面图像. 该数据的时间分辨率为 12 s, 空间分辨率为 1.5". SDO/AIA 提供 7 个 EUV 波段的图像 (94 Å、131 Å、171 Å、193 Å、211 Å、304 Å 和 335 Å)、2 个 UV 波段的图像 (1600 Å 和 1700 Å) 和一个可见光图像 (4500 Å). 它的 4 个 CCD 靶面大小均为 4096 × 4096 像素, 每个像素大小为 0.6", 视场为 41' × 41', 能够完全覆盖 1.3 个太阳半径的空间范围. 观测对象的范围从光球 (5000 K) 一直到日冕 (10 MK).

磁场数据采用的是同一个卫星搭载的日震与磁场图像仪 (Helioseismic and Magnetic Imager: HMI^[41]) 提供的全日面视向磁图. 该数据的时间分辨率是 45 s, 空间分辨率为 1". SDO/HMI 用一个滤波器和两个 CCD 在 Fe I 6173 Å 对全日面进行观测. 两个 CCD 的大小为 4096 × 4096 像素, 记录两组数据, 用来计算视向磁场和矢量磁场. 视向磁场的的数据只记录 Stokes 参数的 I±V 单色像, 时间分辨率是 45 s; 对于矢量磁场则还要记录另外 4 个单色像 (I、Q、U、V), 时间分辨率大约是 135 s, 但是为了提高信噪比, 一般都要把 12 min 内的这些斯托克斯参量进行平均.

为了消除太阳自转带来的误差, 我们参考 2013 年 12 月 26 日 19:58 UT 的视向磁图, 对所使用的数据统一进行消旋. 文中分析的资料覆盖的时间段从 2013 年 12 月 25 日

19:00 UT 到 2013 年 12 月 26 日 10:00 UT. 下文中出现的 19:00 UT 到 23:59 UT 的时间段是 2013 年 12 月 25 日内的时间, 而从 00:00 UT 到 10:00 UT 是 26 日内的时间.

从 2013 年 12 月 25 日 23:40 UT 到 26 日 07:40 UT, 在活动区 11931 连续发生了一系列 EUV 同源喷流 [26]. 图 1 中子图分别是活动区 11931 的 SDO/AIA 171 Å 图像 (a), SDO/AIA 4500 Å 图像 (b) 以及 SDO/HMI 视向磁图 (c). 由图 1(a) 可以看出发生喷流的区域中日冕磁场的大致结构以及其中一个喷流的走向和形状; 由图 1(b) 可以看出活动区 11931 黑子为单极 α 型黑子, 有清晰的本影和半影; 对照图 1(c) 中的视向磁图可以看出, 主黑子是一个正极性黑子, 该区域最强磁场强度达到 2 000 Gs.

分析在 SDO/AIA 171 Å 波段的视频资料, 我们发现在这个活动区一共发生了 12 次喷流, 而且差不多源自同一个位置, 都是由东北向西南喷发, 轨迹接近直线, 与大部分喷流有关的磁场结构在抛射过程中有明显的解缠运动. 对照图 1(a) 和图 1(b), 我们发现喷流都发生在黑子的西南侧, 而图 1(c) 则表明该区域为磁场浮现区域. 研究 SDO/HMI 获得的视频资料, 我们注意到在第 1 次喷流爆发前 4 h 就有 A、B 两个磁极浮现在该区域中 (如图 1(c) 所示), 对照 SDO/AIA 4500 Å 提供的资料, 发现在 A、B 的浮现过程中, 在其对应位置上的光球表面形成两个气孔 P1 和 P2 (如图 1(b) 所示).

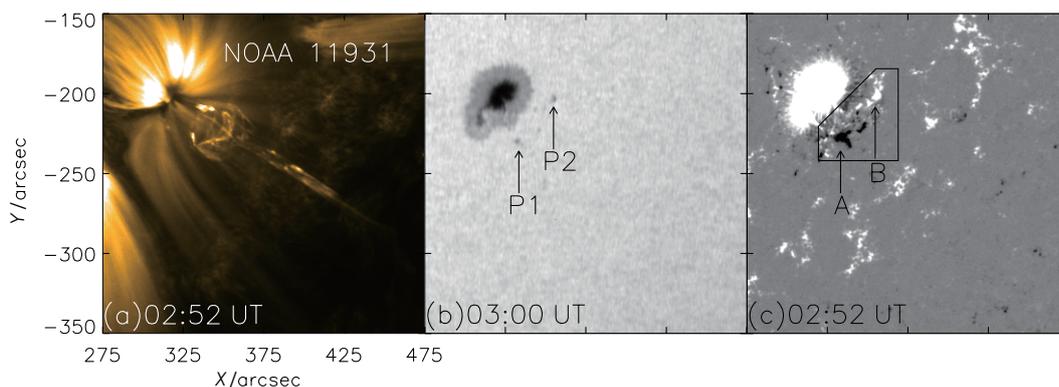


图 1 (a) SDO/AIA 171 Å 图像, 可以看出一个喷流的形状和方向; (b) SDO/AIA 4500 Å 图像. P1、P2 为两个气孔; (c) SDO/HMI 视向磁图. 黑框为磁通量浮现的区域. A、B 为两个浮现磁极.

Fig. 1 (a) SDO/AIA 171 Å image, which shows the shape and direction of a jet; (b) SDO/AIA 4500 Å image. P1, and P2 indicate two pores; (c) SDO/HMI line-of-sight magnetogram. Black box indicates emerging flux area. A, and B indicate two emerging magnetic polarities.

图 2(a) 显示了 A、B 两个磁极的运动方向, 图中箭头的长度和方向分别代表了活动区中相应磁场结构横向速度的大小和方向. 从中可以看到磁极 A 向东南运动, 而磁极 B 向西北运动, 图中的虚线框为磁通量浮现区域. 图 2(b) 是虚线框区域内的磁通量随时间的演化, 实线代表了负磁通量, 点线代表了正磁通量, 虚线代表了总磁通量的绝对值; 竖实线和竖点线之间代表了喷流发生的时间段, 数字 3、8、9 和 12 代表了第 3、8、9 和第 12 次喷流. 由于第 1 和第 2 次喷流之间、第 4、5、6 和第 7 次喷流之间、第 10 和第 11 次喷流之间时间重叠或者接近, 因此我们用罗马数字 I 来标示第 1 和第 2 次喷流发生的时间段, 用罗马数字 II 来标示第 4、5、6 和第 7 次喷流发生的时间段, 用罗马数字 III 来标示第 10 和第 11 次喷流发生的时间段. 从图 2(b) 中我们可以看出, 大部分喷

流(从第 3 到第 11 次)都发生在正磁通量明显上升的时间段内,同时我们发现正磁通量从第 4 次喷流开始逐渐大于负磁通量.我们并没有在每个喷流发生前观测到负磁通量的下降,反而在有些喷流(如第 3 次)之前可以看到负磁通量的上升.虽然在喷流底部的磁场最明显的运动是两个磁极 A 和 B 的浮现,但是在局部地区我们依然能够明显观测到磁极对消过程.详细内容将在后面的章节中给出.

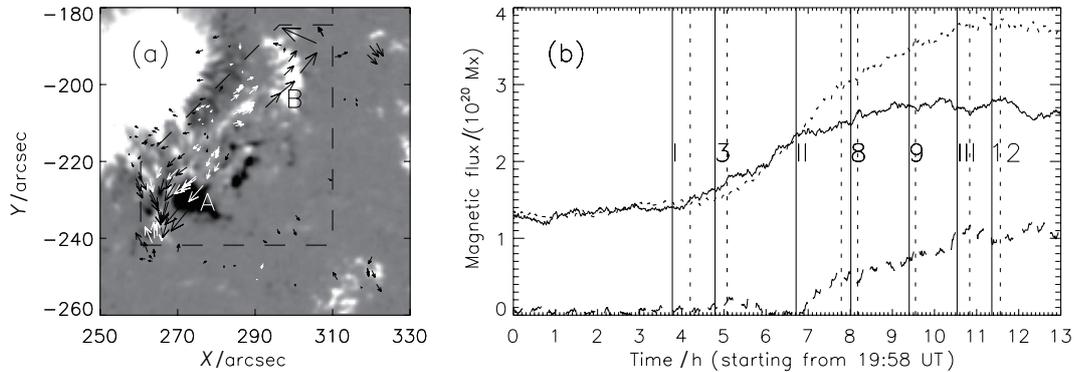


图 2 (a) SDO/HMI 视向磁图. 虚线黑框为磁场浮现区域, 箭头的长度(方向)代表了横向速度的大小(方向); (b) (a) 图中虚线框区域内磁通量的时间演化. 实线为负磁通量, 点线为正磁通量, 虚线为总磁通量的绝对值, 竖实线和竖虚线之间为喷流发生的时间段. 数字 3、8、9 和 12 分别表示第 3、8、9 和第 12 次喷流, 罗马数字 I 标示第 1 和第 2 次喷流, 罗马数字 II 标示第 4、5、6 和第 7 次喷流, 罗马数字 III 标示第 10 和第 11 次喷流.

Fig. 2 (a) SDO/HMI line-of-sight magnetogram. The dashed black box is emerging flux area. The arrows' length (direction) indicate the magnitude of transverse speed (direction); (b) The time sequences of magnetic flux of dashed box in panel (a). Solid line indicates the negative magnetic flux, dotted line indicates positive magnetic flux, dashed line indicates the absolute value of total magnetic flux, and the time intervals between vertical solid lines and vertical dashed lines indicate the jet's duration, respectively. The numbers 3, 8, 9, and 12 indicate the third, eighth, ninth, and twelfth jets, the Roman numeral I indicates the first and second jets, the Roman numeral II indicates the fourth, fifth, sixth, and seventh jets, the Roman numeral III indicates the tenth and eleventh jets, respectively.

3 各个喷流的运动学特征

在本文中研究的 12 次喷流尽管各不相同,但是它们当中的有些表现出相似的特征.根据喷流的旋转特征,我们可以将它们分为两类:第 1 类喷流物质抛射轨迹近似于直线,物质在抛射过程中没有旋转,或是旋转不明显(比如,旋转没有超过半圈).在研究的一系列喷流中,包括第 2、3、6、8、9 和第 10 次喷流,我们以第 3 次喷流为代表,对其进行详细研究.第 2 类喷流在抛射过程中有明显的旋转,旋转的角度超过了半圈.这一类喷流包括第 1、4、5、7、11 和第 12 次喷流,我们以第 4 和第 5 次喷流为代表,分别对其进行深入研究,因为两个喷流的旋转在细节上又不完全相同.

另外,我们也可以根据喷流运动复杂程度将它们分成两类:第 12 次喷流单独构成一类,其旋转的角度略微超过 1.0π ,在其发生的前后新浮磁场与原有磁场之间有明显的相互作用,涉及到的磁结构也比较复杂,它应该是由发生在新旧磁场之间的磁重联所导致的;其他喷流由于运动和磁场结构相对简单被分成一类.下面,我们结合这些喷流发生前后的磁场运动和演化过程,对它们的运动学特征进行详细的描述和分析.

3.1 第 3 次喷流

在大部分喷流过程中, 我们可以观测到明显的解缠运动, 但是在第 3 次喷流中并没有. 第 3 次喷流从 00:43 UT 开始, 同时观测到底部拱开始发亮, 抛射轨迹近似于直线, 11 min 之后喷流抛射到最远的距离之后消失. 我们在 AIA 171 Å 图像上只观测到简单抛射, 并没有观测到解缠运动. 我们沿着喷流的方向做切片分析 (图 3(a) 虚线 Q), 图 3(b) 显示了喷流物质沿着 Q 的距离随时间的演化, 图 3(b) 中虚线是亮点位置二次拟合结果, 拟合公式如下:

$$h = 10.4t^2 - 6.30t + 2.21, \quad (1)$$

式中 $t(\text{min})$ 是喷流抛射时间, $h(\text{arcsec})$ 是沿切片 Q 抛射的距离. 由 (1) 式可得抛射过程中的加速度为 4.19 km/s^2 , 明显大于太阳的重力加速度 (272 m/s^2), 表明在喷流爆发时刻磁能的释放推动了等离子体的迅速上升. 可以看到喷流抛射的距离随时间近似于线性增加, 由此可以估计出抛射的平均速度为 141 km/s .

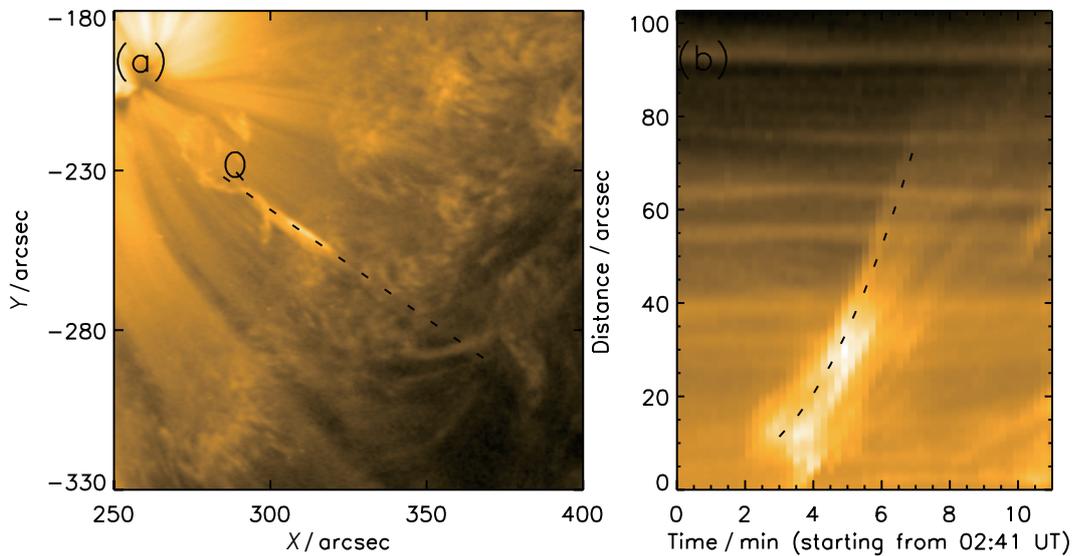


图 3 (a) 第 3 次喷流在 00:48 UT 时刻的 SDO/AIA 171 Å 图像. 虚线 Q 大致为沿着喷流的方向; (b) 喷流物质沿着直线 Q 分布随时间的演化. 虚线是用 (1) 式对观测的拟合结果.

Fig. 3 (a) The SDO/AIA 171 Å image shows the third jet at 00:48 UT. The dashed line Q indicates the slit position along which the jet ejects; (b) Time sequence of the jet along the slit Q. The dashed line gives the fitting to the observation according to Eq. (1).

3.2 第 4 次喷流

图 4 展示了在 171 Å 观测到的第 4 次喷流的过程, 这次喷流从 02:41 UT 开始, 16 min 之后消失. 从图中可以看出, 这次喷流过程可以分成两个阶段: 前 7 min 的简单慢速抛射, 没有观测到相应磁结构的解缠运动 (图 4(a)-(g)); 在之后的 9 min, 抛射加快, 而且还可以观测到相应磁结构在等离子体向外抛射的过程中有明显的解缠运动 (图 4(h)-(p)). 我们沿着喷流的方向 (图 5(a) 中虚线 Q), 将不同时刻的喷流物质沿着直线 Q

的分布排列起来 (图 5(b)), 图 5(b) 中虚线是亮点位置二次拟合结果, 拟合公式如下:

$$h = 11.1t^2 - 5.59t + 1.13, \quad (2)$$

式中 $t(\text{min})$ 是喷流抛射时间, $h(\text{arcsec})$ 是沿切片 Q 抛射的距离. 由 (2) 式可得抛射过程中的加速度为 4.47 km/s^2 , 依然明显大于太阳的重力加速度, 说明磁场的作用很显著. 可以明显地看到前 7 min 的喷流较慢, 平均速度为 60 km/s , 而之后 9 min 的抛射速度明显加快, 平均速度为 253 km/s . 而整个阶段的平均速度为 157 km/s . 根据视频资料提供的信息, 我们还可以看出后一阶段中喷流的解缠运动; 另外, 与图 3(b) 相比, 图 5(b) 所展示的较为复杂的喷流物质的分布特征也表明了喷流过程中发生了扭转运动 (也可对比 Schmieder 等^[37] 的图 3(b)). 图 5(c) 显示了不同时刻喷流物质沿着 Q1 的分布排列, 可以看出喷流在前 7 min 里并没有明显的解缠运动, 而后 9 min 里发生了明显的解缠运动. 跟踪喷流 9 min 的运动特征, 我们发现其旋转的角度为 3.5π .

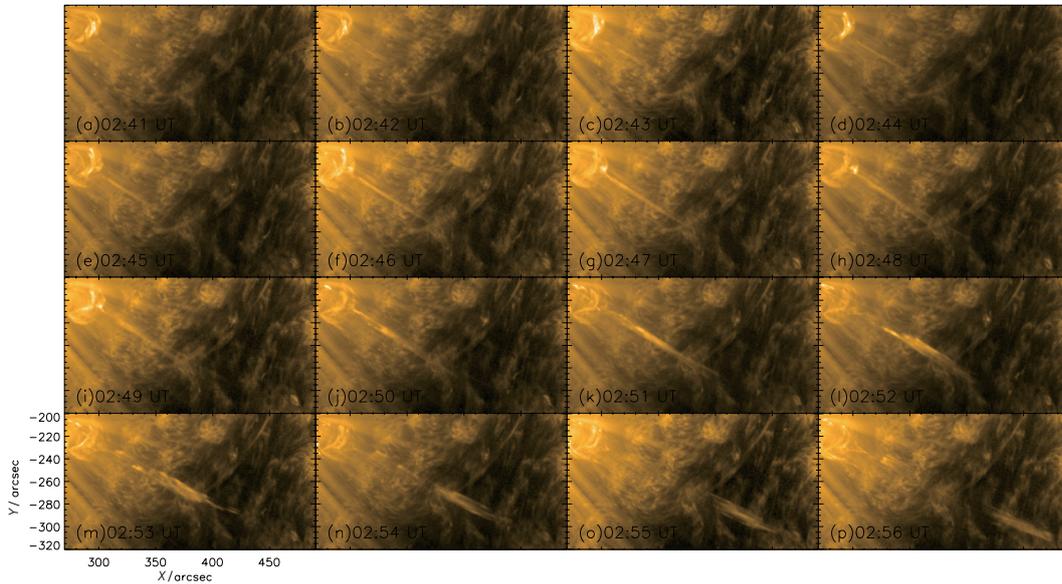


图 4 由 SDO/AIA 171 Å 观测到的第 4 次喷流的时间演化

Fig. 4 Time sequence of the forth jet observed by SDO/AIA 171 Å image

3.3 第 5 次喷流

第 5 次喷流似乎是从活动区中一个磁拱的底部开始的. 图 6(a)-(e) 两条短线之间的角度随时间逐渐增大, 这表明了第 5 次喷流之前发生在磁拱上的演化. 我们可以看出亮点在 02:57 UT, 磁拱的北端出现一个亮点, 随后沿着磁拱向上运动延伸, 在 03:01 UT 到达磁拱的另一端后, 喷流开始形成.

在随后的抛射过程中, 喷流的结构交替出现单纤维结构 (见图 7(a)) 和双纤维结构 (见图 7(b)), 纤维的宽度大约为 $3''$ 到 $4''$, 也就是在 2.18×10^3 到 $2.90 \times 10^3 \text{ km}$ 之间. 我们在相应的子图中用一根和两根短线分别表示这两种情况. 其中图 6(i)、6(k) 和 6(m) 中喷流为单纤维结构, 而图 6(j)、6(l)、6(n) 和 6(p) 中喷流为双纤维结构, 不过在其中一

个短暂的时段中, 喷流表现出更为复杂的结构 (见图 6(o)), 我们在图中用 3 条短线表示这种情况. 为了更好地看清楚喷流的这种纤维结构的特征, 我们将图 6(k)、6(l) 和 6(o) 中用黑框圈出来的区域放大后放在图 7(a)、7(b) 和 7(c) 中, 可以明显看出其中的很多细节.

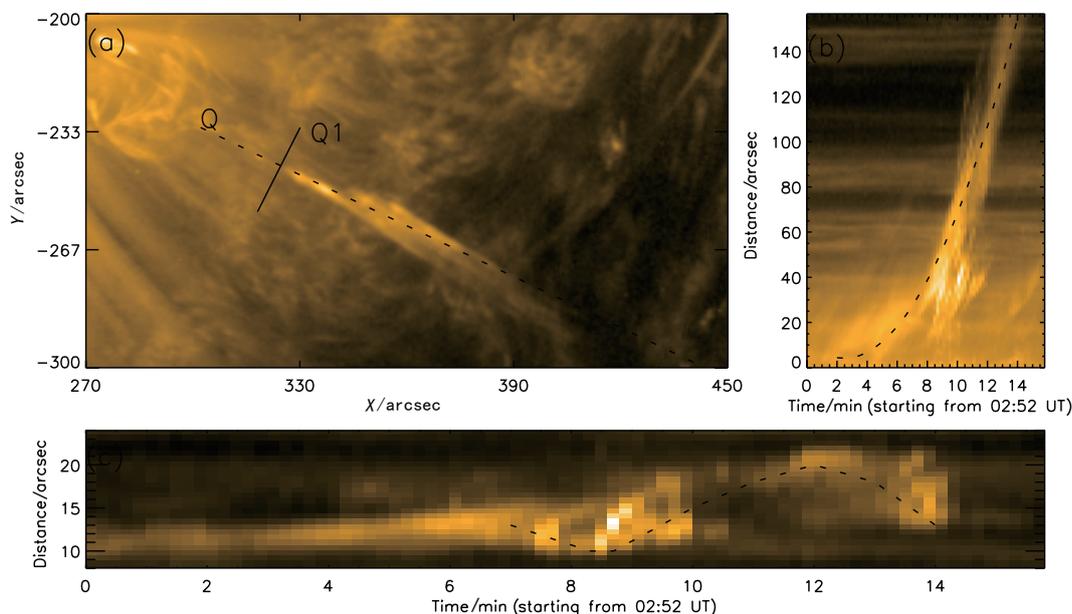


图 5 (a) 第 4 次喷流在 02:52 UT 时刻 SDO/AIA 171 Å 图像. 虚线 Q 沿着喷流的方向延伸. 实线 Q1 垂直于 Q; (b) 喷流物质沿着直线 Q 分布随时间的演化. 虚线是用 (2) 式对观测的拟合结果; (c) 沿着 Q1 的喷流物质分布的时间序列.

Fig. 5 (a) The SDO/AIA 171 Å image shows the fourth jet at 02:52 UT. The dashed line Q indicates the slit position along which the jet ejects. The solid line Q1 indicates the position perpendicular to Q; (b) Time sequence of the jet along the slit Q. The dashed line gives the fitting to the observation according to Eq. (2); (c) Time sequence of the jet along solid line Q1.

与前面分析喷流的运动学特征类似, 我们同样沿着喷流的方向对喷流的运动状态进行跟踪 (图 8(a) 中虚线 Q). 将不同时刻得到的喷流物质沿着虚线 Q 的分布按时间顺序排列起来 (见图 8(b)), 可以看到第 5 次喷流其实包含了多次物质抛射, 这些物质抛射的平均速度为 203 km/s.

由于这次喷流表现出来的比较复杂的运动和结构特征, 我们模仿 Schmieder 等^[37]的方法, 考察喷流在沿着垂直于虚线 Q 方向上的演化特征 (见图 8(a) 中的实线 Q1). 同样, 我们将不同时刻得到的喷流物质沿着 Q1 的分布按时间顺序排列起来, 得到图 8(c), 从中我们可以看到两个亮结构分离和交叉 (见图中虚线) 以及单个亮结构的分裂. 这再现了图中出现的单双纤维结构交替出现的现象, 并进一步表明了这一现象展示的是与喷流有关的磁结构的旋转运动. 深入研究表明, 磁结构在此过程中已旋转了 2.5π 的角度. Suematsu 等^[38]在对针状体的研究中也观测到相类似的现象, 即可以观测到单针状体阶段和双针状体阶段交替出现 (参考该文章中的图 3). 他们认为这个针状体的旋转运动类似于刚体的旋转.

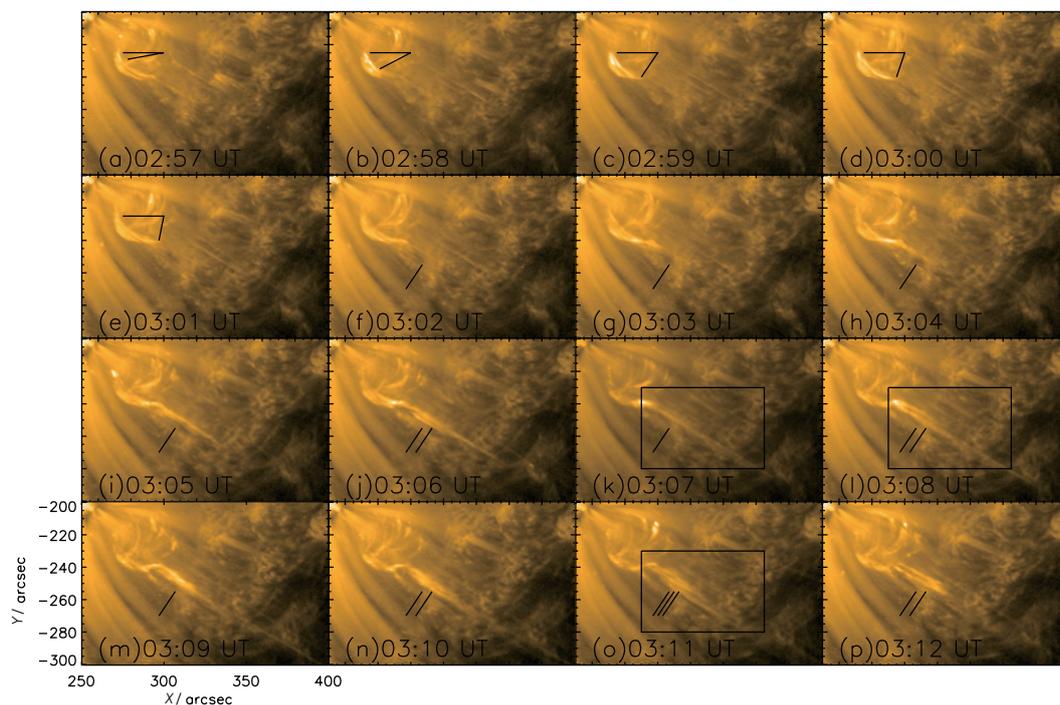


图 6 SDO/AIA 171 Å 观测到的第 5 次喷流的时间序列. 图 (a)-(e) 中两条短线之间的夹角代表了亮点在底部拱的运动. 图 (f)-(p) 中短线的数目代表了图中喷流纤维的数目. 子图 (k)、(l) 和 (o) 中由黑框圈出的区域放大之后分别放到图 7(a)、7(b) 和 7(c) 中, 以看清更多的细节.

Fig. 6 Time sequence of the fifth jet observed by SDO/AIA 171 Å. The angles between the lines in panels (a)-(e) represent the movement of the bright point on the base arcade. The number of lines in panels (f)-(p) represent the number of threads in panels (f)-(p). The regions in the black boxes in panels (k), (l), and (o) will be enlarged for more details (see panels 7(a), 7(b), and 7(c), respectively).

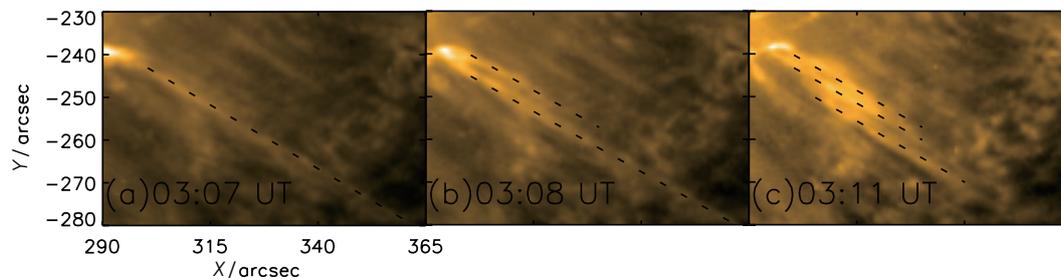


图 7 (a)、(b) 和 (c) 分别是图 6(k)、6(l) 和 6(o) 中的黑框圈起来区域的放大图.

Fig. 7 Panels (a), (b), and (c) show the enlarged regions surrounded by black boxes in panels 6(k), 6(l), and 6(o), respectively.

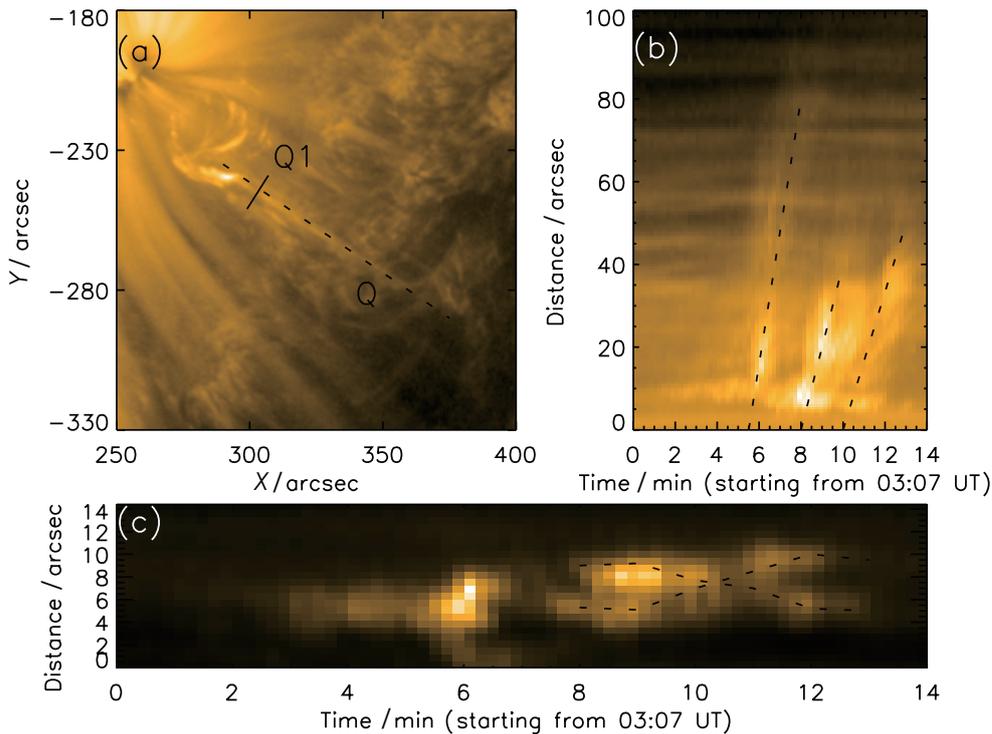


图 8 (a) 第 5 次喷流在 03:07 UT 时刻的 SDO/AIA 171 Å 图像. 虚线 Q 沿着喷流的方向. 实线 Q1 垂直于 Q; (b) 沿着 Q 的喷流物质分布的时间序列; (c) 沿着 Q1 的喷流物质分布的时间序列.

Fig. 8 (a) The SDO/AIA 171 Å image shows the fifth jet at 03:07 UT. The dashed line Q indicates the direction of the jet. The solid line Q1 indicates the position perpendicular to Q; (b) Time sequence of the jet along the dashed line Q; (c) Time sequence of the jet along the solid line Q1.

3.4 第 12 次喷流

图 9 显示了第 12 次喷流过程中磁结构随时间的演化. 这次喷流从 07:16 UT 开始出现, 直到 07:32 UT 喷流消失结束. 从图 9 可以看出, 在喷流发生之前 4 min, 底部磁拱 (base arcade) 首先开始发亮 (如图 9(b) 所示). 在喷流的过程中, 靠近底部磁拱的区域内出现了两个运动特征. 首先在底部磁拱东南端两个新的磁拱先后出现, 向喷流的方向运动. 第 1 个磁拱 (arcade 1) 在整个过程中一直向喷流方向运动, 第 2 个磁拱自 07:24 UT 从底部磁拱东南角出现 (arcade 2, 如图 9(h) 所示), 此后磁拱 1 逐渐变暗, 而磁拱 2 则逐渐变亮, 继续向喷流运动, 到喷流结束后, 磁拱 1 只剩下一部分可被观测到, 而磁拱 2 则完全保留了下来, 似乎是叠加在了磁拱 1 之上. 第 2 个特征是底部磁拱西北端有一个磁环向上浮现. 该磁环和喷流在 07:16 UT 同时出现 (如图 9(d) 所示). 磁环在上升的过程中东南侧明显发亮 (如图 9(g) 和图 9(h) 所示), 这表明磁环在这侧可能与周围的日冕磁场发生了磁重联, 从图中可以看出磁环上升一直持续到 07:28 UT.

考虑这个喷流涉及到的磁场结构比较复杂, 我们沿着多个方向来研究喷流的运动特征 (见图 10). 在图 10(a)、10(c) 和 10(e) 中, 我们用多条虚线 Q1、Q2 和 Q3 标示出我们将考察的区域和喷流物质分布的方向; 在图 10(b)、10(d) 和 10(f) 分别表示出相应的沿着这些方向的喷流物质分布的时间序列. 沿着喷流方向 Q3 延伸, 图 10(f) 表明这次喷

流由多次的小喷流组成, 平均速度为 241 km/s. 图 10(a) 中的虚线 Q1 位于新浮磁环上升的路径上, 在上升的过程中, 则有多次间歇性的发亮, 而且发亮区域的运动特征大致相同. 这种发亮很有可能是磁环与周围磁场发生磁重联的结果. 进一步估算发现磁环的上升速度为 118 km/s (见图 10(b)). 图 10(c) 虚线 Q2 的位置和方向是对两个磁拱的运动特征而设置的. 沿着这条线获取的喷流物质分布时间序列 (图 10(d)) 清晰地描述了二者的运动特征: 磁拱 1 的上升速度为 13 km/s, 而磁拱 2 的上升速度为 7 km/s.

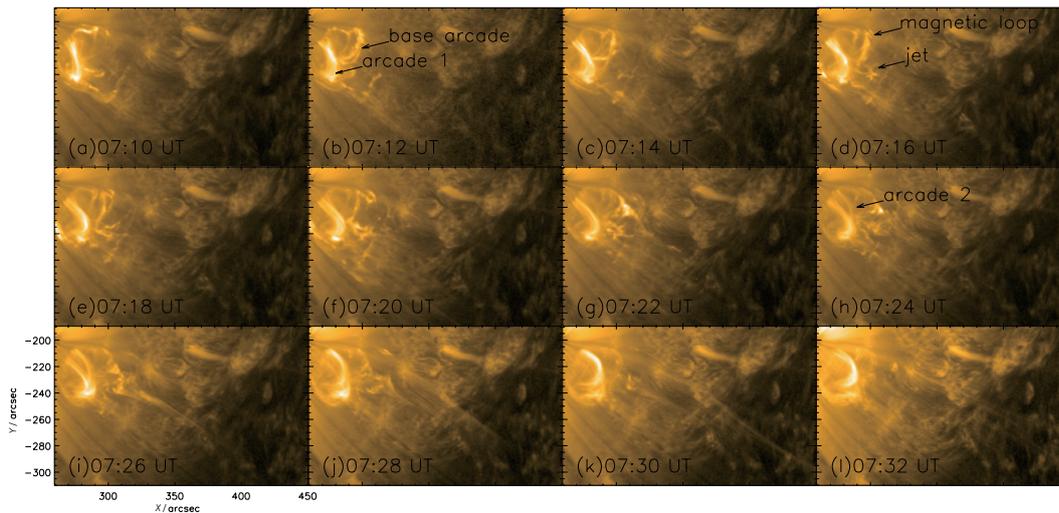


图 9 由 SDO/AIA 171 Å 观测到的第 12 次喷流的时间序列

Fig. 9 Time sequence of the 12th jet observed by SDO/AIA 171 Å

3.5 其他的喷流

在结束这部分的工作之前, 我们也简要介绍一下其他的喷流. 与我们分析过的这 4 次喷流相比, 这些喷流没有表现出非常特别的特征, 它们都经历了解缠运动, 旋转角在 0.5π 到 2.5π 之间, 平均速度在 130 km/s 到 289 km/s 之间, 居于通常的喷流速度范围之内, 且小于太阳表面的逃逸速度, 但是这些喷流在到达最高处之后就消失了, 我们并没有观测到喷流回落到太阳表面. 我们将更多的细节列在表 1 中. 可以得到这些喷流的寿命在 6 min 到 26 min 之间, 平均寿命为 12 min, 旋转的角度在 0.5π 到 3.5π 之间, 平均旋转角度为 1.5π . 因此, 喷流的解缠运动应该是一个较普遍的现象. 我们同时可以得到在能够分辨的极限内, 这些喷流的投影长度在 7.60×10^4 到 1.69×10^5 km 之间, 平均长度为 1.14×10^5 km; 而它们的宽度在 4.53×10^3 到 1.82×10^4 km 之间, 平均宽度为 9.70×10^3 km. 由表 1 可以看出, 不同喷流之间的高度差别并不大, 而喷流的宽度在后期普遍宽于前期. 这可能是由于底部磁拱的浮现之后尺度变大, 从而导致了喷流的宽度变大. 根据前面提到喷流的分类^[6], 我们发现第 1、5、7 和第 8 次喷流属于标准喷流, 而其他喷流属于爆破喷流.

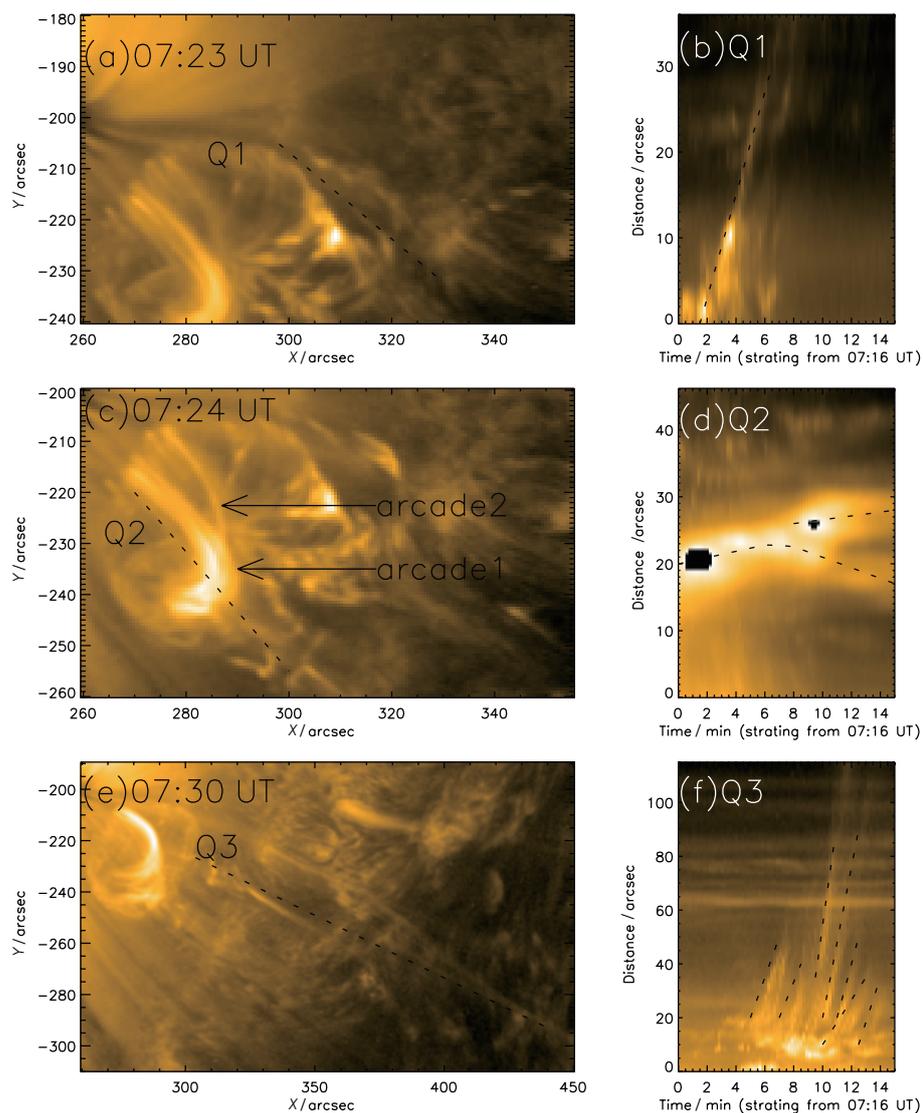


图 10 (a)、(c)、(e) 在不同时刻获得的第 12 次喷流的 SDO/AIA 171 Å 图像; (b)、(d)、(f) 根据 (a)、(c)、(e) 图中的虚线走向获得的喷流的时间序列

Fig. 10 (a), (c), and (e) The SDO/AIA 171 Å images show the evolution of the twelfth jet at different times; (b), (d), and (f) Time sequence of the jet along dashed lines in panels (a), (c), and (e), respectively

4 喷流过程中的光球磁场演化

这次 EUV 喷流事件过程中相应的光球磁场区域最明显的变化是 A、B 两个磁极的浮现 (如图 1(c) 所示). 对该区域的磁通量进行分析, 我们发现大部分喷流 (从第 3 次喷流到第 11 次喷流) 发生在该区域明显浮现的时间段内, 相应磁通量整体表现出上升趋势, 在第 3 次喷流和第 8 次喷流发生之前, 我们还观测到磁通量的明显上升 (如图 2(b) 所示). 另外, 在 12 次喷流发生之前和过程中, 对相应的光球磁场进行深入研究发现, 有

的喷流发生时, 附近区域既有明显的磁场浮现过程也有明显的对消过程, 有的喷流的附近区域有明显的磁浮现过程, 而有的喷流则伴随着明显的磁对消过程. 我们下面对其中 3 个具有代表性的喷流所对应的光球磁场进行分析.

表 1 12 次 EUV 喷流各物理量
Table 1 The parameters of twelve EUV jets

No.	Start time (UT)	Duration /min	Projection height /km	Width /km	Projection speed /(km/s)	Rotation angle / π
1	23:44	13	110282	7195	174	1.5
2	23:56	14	126829	11489	150	1.0
3	00:43	11	92472	4994	141	0
4	02:41	16	168921	6985	157	3.5
5	03:01	13	110958	7920	203	2.5
6	03:17	26	96036	11141	163	1.0
7	03:19	8	76010	13615	134	1.5
8	03:58	10	132644	4531	241	1.0
9	05:21	9	108955	11225	236	1.0
10	06:30	9	109980	7783	130	0.5
11	06:42	6	110217	11264	289	1.5
12	07:16	14	122062	18246	241	1.0
Avg		12	113780	9699	188	1.5

4.1 第 1 次喷流

在这次喷流及其所代表的喷流的过程中, 光球磁场既有上浮也有对消. 图 11(a) 给出了第 1 次喷流在 23:50 UT 时的 171 Å 图像, 图 11(b)-(d) 显示了第 1 次喷流前后 1 h 期间磁场的变化. 图 11(a) 和 11(b) 中的白圈表示了喷流发生时底部磁拱的位置. 对照图 11(b)、11(c) 和 11(d) 可以看出, 在磁拱附近最明显的磁场变化是在磁拱的右侧 C 和 D 两个负磁极的浮现, 同时在磁拱的左侧有正磁极 F 和负磁极 E 相互对消. 分别计算这两部分区域 (见图 11(c) 和 11(d) 中的黑框) 中的不同时刻的磁通量随时间的变化, 我们得到图 11(e). 竖实线和竖虚线之间的时间段代表了喷流发生的时间, 虚线和虚点线分别对应着图 11(c) 和 11(d) 左侧黑框中的负磁通量和正磁通量随时间的演化, 可以看出在喷流过程中这个区域中的正负磁通量整体都在下降, 表明两个区域中的磁场发生了对消. 另外, 这个区域中的正负磁通量比较接近, 说明其中的正负磁极大致对等; 而实线和点线分别对应右侧黑框区域负磁通量和正磁通量随时间的演化, 二者相差明显, 而正磁通量接近于零, 说明该区域以实线为代表的负的磁通量为主, 且呈整体上升趋势.

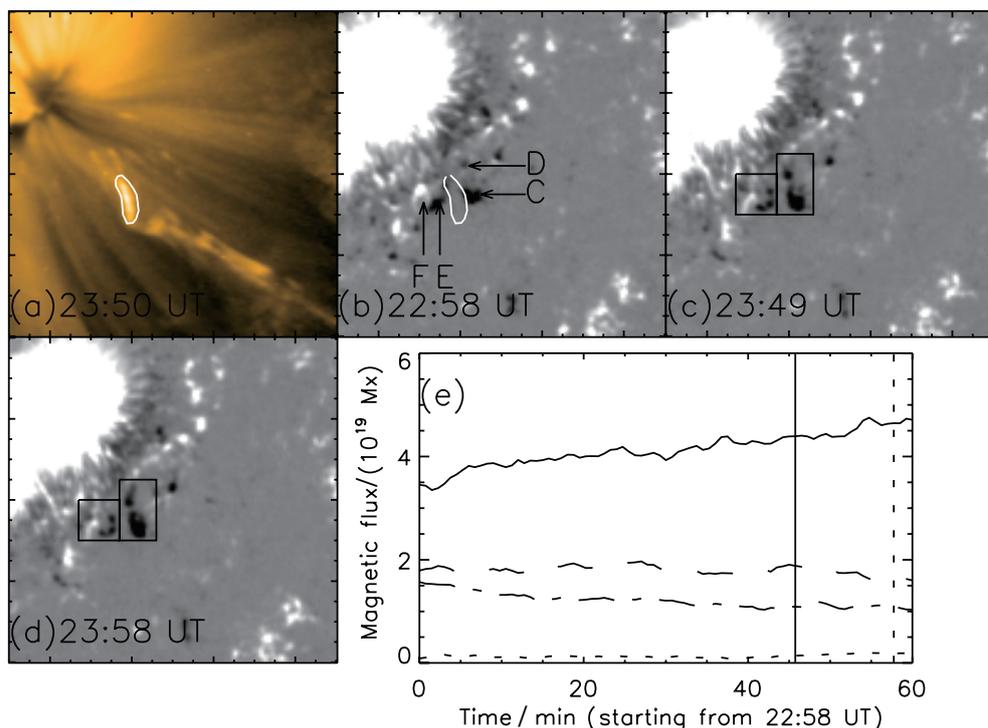


图 11 (a) 第 1 次喷流在 23:50 UT 时刻的 SDO/AIA 171 Å 图像. 白线圈表示底部拱的位置; (b) - (d) SDO/HMI 视向磁图随时间的演化. 白线圈与 (a) 图中相同. 左侧黑框为 E、F 两个磁极变化的区域. 右侧黑框为 C、D 两个磁极变化的区域; (e) 两个黑框区域的磁通量的演化. 虚线和点虚线分别表示了左侧黑框区域负磁通量和正磁通量, 实线和点线分别表示了右侧黑框区域负磁通量和正磁通量, 竖实线和竖虚线之间为喷流发生的时间段.

Fig. 11 (a) The SDO/AIA 171 Å image shows the first jet at 23:50 UT. White circle indicates the position of base arcade; (b) - (d) time sequence of SDO/HMI line-of-sight magnetogram. White circle is the same with panel (a)'s. The left black box is the area where E and F magnetic polarities change. The right black box is the area where C and D magnetic polarities change; (e) Time sequence of magnetic flux of two box areas. Dashed and dot-dashed lines respectively indicate negative and positive magnetic flux of left box area, solid and dotted lines respectively indicate negative and positive magnetic flux of right box area. The time interval between vertical solid line and vertical dashed line indicates the jet duration.

4.2 第 2 次喷流

这个喷流的特点是在喷流的过程前后, 光球上只有负极性的磁场浮现. 与前一个喷流相比, 第 2 次喷流发生的磁结构要复杂一些 (见图 12(a)). 因此, 这次喷流的产生原因应该是新浮磁场与色球或者是低日冕中原有磁场之间的重联导致的. 图 12(b)-(d) 展示了第 2 次喷流前后 1 h 的磁场的变化. 图 12(a) 和 12(b) 中的白圈代表了底部磁拱的位置, 对照图 12(b)、12(c) 和 12(d) 可以看出, 在磁拱附近最明显的磁场变化是 C 和 D 两个负磁极的浮现. 这两个磁极从上一次喷流开始就一直在浮现. 相对而言, 周围的其他磁极的变化就不是很明显. 图 12(e) 给出了图 12(c) 和 12(d) 中的黑框内的磁通量随时间的变化. 竖实线和竖虚线之间时间段代表了喷流发生的时间; 实线对应着负磁通量, 点线对应着正磁通量, 虚线对应着总磁通量的绝对值. 可以看出这次喷流过程中, 负磁通量浮现占主导地位.

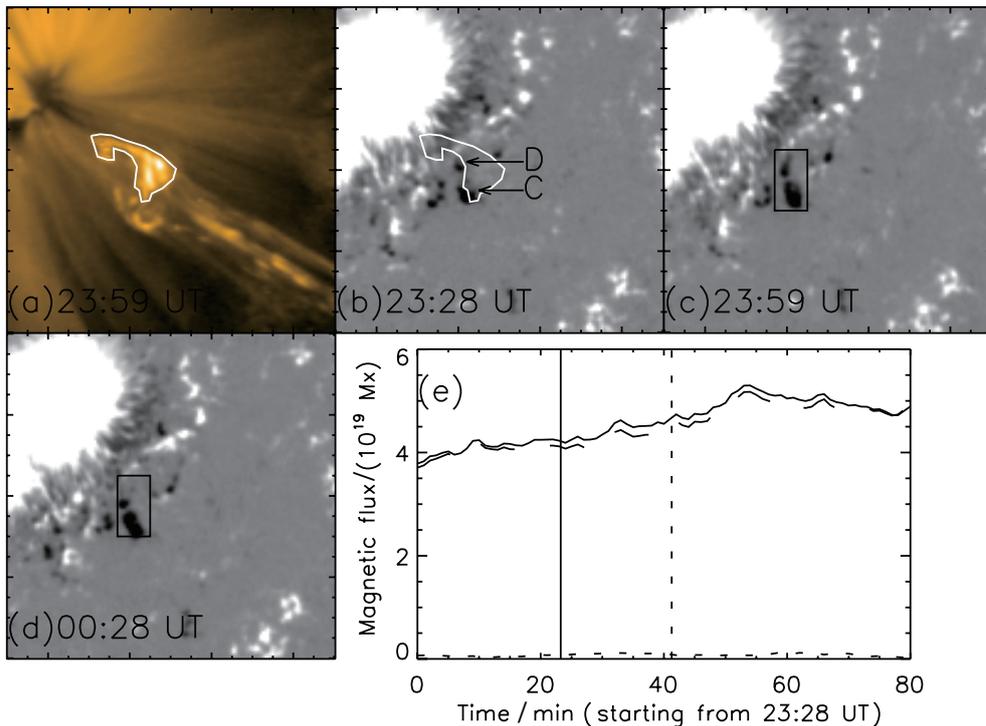


图 12 (a) 第 2 次喷流在 23:59 UT 时刻的 SDO/AIA 171 Å 图像. 白线圈表示底部拱的位置; (b)-(d) SDO/HMI 视向磁图随时间的演化. 白线圈与 (a) 图中的相同. 黑框为 C、D 两个磁极变化的区域; (e) 黑框区域磁通量随时间的演化. 线的意义与图 2(b) 中的相同.

Fig. 12 (a) The SDO/AIA 171 Å image shows the second jet at 23:59 UT. White circle indicates the position of base arcade; (b) - (d) time sequence of SDO/HMI line-of-sight magnetogram. White circle is the same with panel (a)'s. Black box is the area where C and D magnetic polarities change; (e) Time sequence of magnetic flux of black box area. The lines' meaning is the same with panel 2(b)'s.

4.3 第 8 次喷流

图 13 中给出了第 8 次喷流发生过程中的相关信息. 与第 2 次喷流发生的情况正好相反, 在这次喷流的过程中, 光球表面磁场只有对消而没有浮现. 图 13(a) 给出了本次喷流在 03:59 UT 时刻的 171 Å 单色像, 而图 13(b)-(d) 则展示了第 8 次喷流前后 1 h 的磁场的变化. 图 13(a) 和 13(b) 中的白圈代表了喷流底部磁拱的位置. 在第 8 次喷流发生前后, 相应区域的光球磁场变化更为复杂 (见图 13(b) 中 4 个小磁极 K、H、I 和 J 以及右边的大磁极 A). 当负的小磁极 H 和 I 与相反极性的磁极 K 相互作用消失之后, 磁极 K 连续与旁边的大磁极 A 和小磁极 J 相互作用, 直到喷流消失结束. 竖直实线和竖直虚线之间时间段代表了喷流发生的时间, 实线对应着负磁通量, 点线对应着正磁通量, 虚线对应着总磁通量的绝对值, 可以看出喷流发生时正磁通量减少, 表明黑框区域内的正磁极 K 与附近负磁极 H 和 I 发生了对消. 而负磁通量在喷流发生时增加, 这可能是由于虽然几个负磁极与正磁极 K 发生对消, 但是总的负磁通量是增加的.

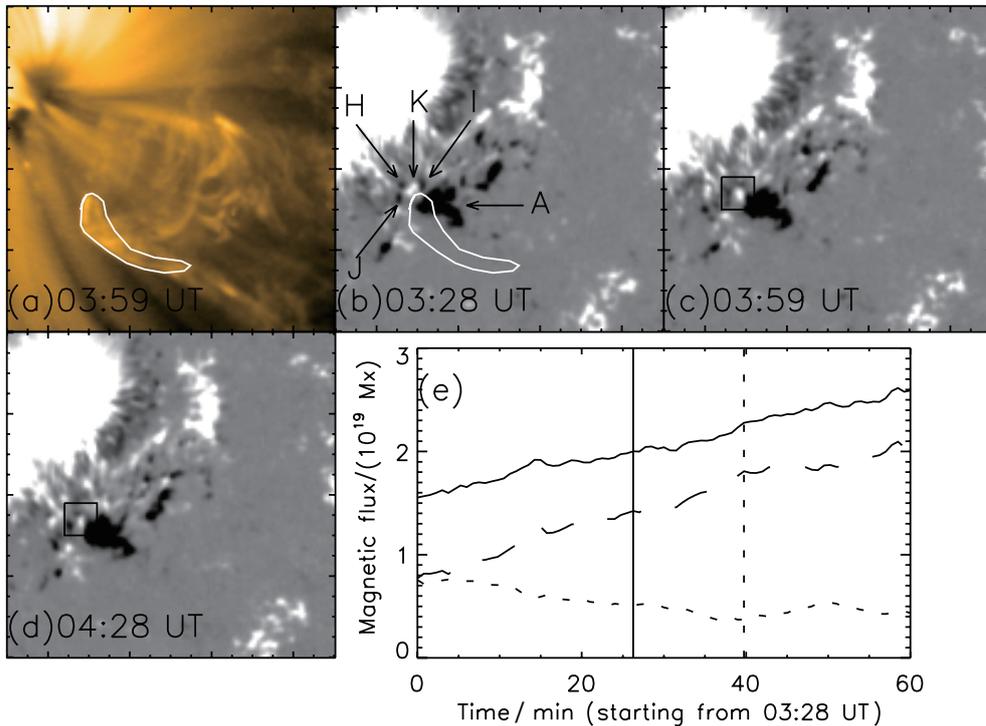


图 13 (a) 第 8 次喷流在 03:59 UT 时刻的 SDO/AIA 171 Å 图像. 白线圈表示底部拱的位置; (b) - (d) SDO/HMI 视向磁图随时间的演化. 白线与 (a) 中的相同. 黑框为 H、I、J 和 K 磁极变化区域. (e) 黑框区域磁通量随时间的演化. 线的意义与图 2(b) 中的相同.

Fig. 13 (a) The SDO/AIA 171Å image shows the eighth jet at 03:59 UT. White circle indicates the position of base arcade; (b) - (d) time sequence of SDO/HMI line-of-sight magnetogram. White circle is the same with panel (a)'s. Black box is the area where H, I, J, and K magnetic polarities change; (e) Time sequence of magnetic flux of black box area. The lines' meaning is the same with panel 2(b)'s.

4.4 其他喷流过程中的光球磁场变化

我们对其他 9 次喷流底部拱附近磁场进行分析, 发现第 10 和第 12 次喷流与第 1 次喷流底部拱附近磁场变化类似, 不仅有明显的对消过程还有明显的浮现过程. 第 4、6 和第 7 次喷流和第 2 次喷流底部拱附近磁场变化类似, 只有明显的浮现过程^[7]. 而第 3、5、9 和第 11 次喷流与第 8 次喷流底部拱附近磁场变化相同, 只有明显的对消过程^[13].

5 结论

从 2013 年 12 月 25 日到 26 日, 在活动区 11931 西南连续爆发了一系列 EUV 同源喷流, 我们选取其中较为明显的 12 个进行研究. 结合 SDO/HMI 视向磁图和 SDO/AIA 171 Å 图像, 我们得到如下结论:

(1) 这 12 次 EUV 喷流都发生在活动区 11931 西南的同一区域, 抛射方向都为西南, 轨迹接近直线, 但是具体到每个喷流运动特征又不尽相同. 与大部分喷流有关的磁场结构在抛射的过程中都有明显的解缠运动, 而第 3 次喷流没有. 第 4 次喷流过程可以分为两个阶段: 慢速无解缠抛射和快速解缠抛射. 第 5 次喷流发生前, 有亮点沿着磁拱底部

从远离喷流的一端向靠近喷流一端延伸, 在喷流过程中, 靠近磁拱底部的区域有两部分磁力线同时在做旋转运动. 在最后一次喷流发生过程中, 底部拱东南端有两个磁拱先后出现, 同时在磁拱底部西北端有一个磁环浮现上升, 可能发生了重联. 我们还可以发现在大部分喷流中的演化过程中比较明亮、致密的结构 (有可能是等离子体团) [26] 并不是一次性产生的, 而是连续不断从底部向外抛射;

(2) 我们对喷流的各运动参数过程进行统计分析. 可以看到喷流的平均寿命为 12 min, 喷流的平均速度为 188 km/s, 平均投影高度为 1.14×10^5 km, 平均宽度为 9.70×10^3 km, 平均旋转的角度为 1.5π . 我们得到的平均速度基本上与 Shimojo 等 [16] 得到的平均速度相吻合. 喷流的高度变化并不大, 而喷流的宽度在后期普遍宽于前期, 这可能是由于底部磁拱的浮现之后尺度变大, 从而导致了喷流的宽度变大. 根据 Moore 等 [6] 的两种喷流的分类方法, 我们发现第 1、5、7 和第 8 次喷流属于标准喷流, 而其他喷流属于爆破喷流;

(3) 对照 SDO/HMI 视向磁图, 发现该区域在爆发前 4 h, 有两个磁极从喷流的底部浮现出来, 正极向西北移动, 负极向东南移动. 虽然在这个喷流事件中, 底部磁场变化整体属于浮现过程, 但是具体到不同喷流底部拱附近磁场的变化过程不尽相同, 第 1、10 和第 12 次喷流底部磁场既有明显的浮现过程, 又有明显的对消过程, 而在第 2、4、6 和第 7 次喷流底部磁场只有明显的浮现过程 [5], 在第 3、5、8、9 和第 11 次喷流底部磁场只有明显的对消过程 [11].

Suematsu 等 [38] 在针状体中发现了单针状体阶段和双针状体阶段周期性出现, 他们认为这是由于针状体旋转类似于刚体. 我们在第 5 次喷流过程中观测到类似的现象, 但是我们与他们的观测不同的是, 在其中一段时间内出现了多个亮线, 如图 6(o).

由于喷流出现在日面上, 因此喷流的某些特征不可避免地受背景光所影响, 如在很多喷流中只有在底部可以观测到明显的解缠运动, 而在上部只能观测到简单的抛射. 同时由于只是简单对照喷流的 171 \AA 图像和 HMI 视向磁图, 并不能确定喷流的足点位于何处, 因此下一步工作是对磁场进行非线性无力场外推, 以确定喷流具体足点的位置, 同时还将结合 $H\alpha$ 观测资料对喷流的解缠运动进行深入研究.

致谢 感谢 SDO 卫星成员组为我们提供了详尽全面的数据支持, 也非常感谢审稿人提出的宝贵意见.

参 考 文 献

- [1] Roy J R. SoPh, 1973, 28: 95
- [2] Beckers J M. ARA&A, 1972, 10: 73
- [3] Brueckner G E, Bartoe J-D F. ApJ, 1983, 272: 329
- [4] Budnik F, Schroeder K-P, Wilhelm K, et al. A&A, 1998, 334: L77
- [5] Shibata K, Ishido Y, Acton L W, et al. PASJ, 1992, 44: L173
- [6] Moore R L, Cirtain J W, Sterling A C, et al. ApJ, 2010, 720: 757
- [7] Heyvaerts J, Priest E R, Rust D M. ApJ, 1977, 216: 123
- [8] Gontikakis C, Archontis V, Tsinganos K. A&A, 2009, 506: L45
- [9] Archontis V, Tsinganos K, Gontikakis C. A&A, 2010, 512: L2
- [10] Shibata K, Nozawa S, Matsumoto R. PASJ, 1992, 44: 265

- [11] Priest E R, Parnell C E, Martin S F. ApJ, 1994, 427: 459
- [12] Mandrini C H, D emoulin P, van Driel-Gesztelyi L, et al. SoPh, 1996, 168: 115
- [13] Moreno-Insertis F, Galsgaard K, Ugarte-Urra I. ApJ, 2008, 673: L211
- [14] Pariat E, Antiochos S K, DeVore C R. ApJ, 2009, 691: 61
- [15] Pariat E, Antiochos S K, DeVore C R. ApJ, 2010, 714: 1762
- [16] Shimojo M, Hashimoto S, Shibata K, et al. PASJ, 1996, 48: 123
- [17] Shimojo M, Shibata K, Harvey K L. SoPh, 1998, 178: 379
- [18] Shimojo M, Shibata K. ApJ, 2000, 542: 1100
- [19] Schmieder B, Shibata K, van Driel-Gesztelyi L. SoPh, 1995, 156: 245
- [20] Asai A, Ishii T T, Kurokawa H. ApJ, 2001, 555: L65
- [21] Chifor C, Isobe H, Mason H E, et al. A&A, 2008, 491: 279
- [22] Wang H, Liu C. ApJ, 2012, 760: 101
- [23] Zhang Q M, Chen P F, Guo Y. ApJ, 2012, 746: 19
- [24] 王俊峰, 周团辉, 季海生. 天文学报, 2013, 54: 4
- [25] Wang J F, Zhou T H, Ji H S. ChA&A, 2014, 38: 65
- [26] Zhang Q M, Ji H S. A&A, 2014, 567: 11
- [27] Chae J, Qiu J, Wang H, et al. ApJ, 1999, 513: L75
- [28] Cirtain J W, Golub L, Lundquist L, et al. Science, 2007, 318: 1580
- [29] Moore R L, Sterling A C, Hudson H S, et al. ApJ, 2001, 552: 833
- [30] Antiochos S K. ApJ, 1998, 502: L181
- [31] Archontis V, Hood A W. ApJL, 2013, 769: L21
- [32] Shen Y, Liu Y, Su J, et al. ApJ, 2012, 745: 164
- [33] Yan X L, Xue Z K, Liu J H, et al. ApJ, 2014, 797: 52
- [34] Shen Y, Liu Y, Su J, et al. ApJ, 2012, 735: L43
- [35] Moore R L, Sterling A C, Falconer D A, et al. ApJ, 2013, 769: 134
- [36] Zhang Q M, Ji H S. A&A, 2014, 561: 134
- [37] Schmieder B, Guo Y, Moreno-Insertis F, et al. A&A, 2013, 559: 1
- [38] Suematsu Y, Ichimoto K, Katsukawa Y, et al. ASPC, 2008, 397: 27
- [39] Pariat E, Dalmasse K, DeVore C R, et al. A&A, 2015, 573: 130
- [40] Lemen J R, Title A M, Akin D J, et al. SoPh, 2012, 275: 17
- [41] Schou J, Scherrer P H, Bush R I, et al. SoPh, 2012, 275: 229

Recurrent Jets Occurred in Nearby Active Region NOAA 11931

HU Yu-kun^{1,2} XU Zhi¹ XUE Zhi-ke¹ YAN Xiao-li¹ SHEN Yuan-deng¹
WU Ning³ LIN Jun¹

(1 Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

(3 School of Tourism and Geographical Sciences, Yunnan Normal University, Kunming 650031)

ABSTRACT According to SDO/AIA (Solar Dynamics Observatory/Atmospheric Imaging Assembly) 171 Å observation, a series of homologous jets are found in the southwest area of active region NOAA 11931 from 2013 December 25 to 26, from which 12 typical jets are selected to analyze and study. During the eruption process, the magnetic field structure of most jets have obvious untwisting movement, though a few of them don't. The movement of some jets can be divided into two phases: slow no untwisting

movement, and rapid twisting movement. Before some jets start, a bright point grows along the base arcade, from the distant end of jet to the close end, and two kinds of magnetic field structures untwist near the base simultaneously during the ejection process. During the process of the last jet, two magnetic arcades appear to the southeast of the base arcade, and a magnetic loop emerges to the northwest of the base arcade. Compared with the SDO/HMI (Helioseismic and Magnetic Imager) line-of-sight magnetogram, about 4 h before the first jet appears, a magnetic bipolar emerges from the jet ejection region, and the bipolar continuously emerges during the recurrent jets. Even though the magnetic field emerges on the whole, for every single jet, the change pattern is different from one another: for some jets, there is not only magnetic emerging, but also magnetic cancellation occurs near the base arcade; however, for some jets, there is only obvious emerging or cancellation.

Key words sun: atmosphere, sun: activity, sun: magnetic topology