

NGC 2264 Cone区域极端高速分子外向流*

刘馨嵘^{1,2} 李晶晶^{1†} 刘德剑^{1,2} 孔德沅^{1,2} 李英杰¹
林泽昊¹ 郝超杰¹ 卞帅博¹

(1 中国科学院紫金山天文台 南京 210023)

(2 中国科学技术大学天文与空间科学技术学院 合肥 230026)

摘要 使用紫金山天文台青海观测站13.7 m毫米波望远镜进行的 ^{12}CO ($J=1-0$, J 为角动量量子数)分子谱线的高灵敏度、高分辨率成像观测,首次发现NGC 2264 Cone的两个子区域Spokes和Cone (C)存在总速度宽度约 $60\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 的极端高速气体. 将探测到的外向流的速度划分为3个速度成分(低速、高速、极端高速),以揭示分子外向流的形态和分布的变化. 极端高速的 ^{12}CO 发射显示出多个蓝瓣和红瓣,随着气体速度的增加,蓝瓣和红瓣之间的距离明显增大,呈现向外运动的趋势. 计算了Cone区域不同速度外向流的相关物理量参数,结果显示低速气体拥有最多的能量和光度. 通过分子外向流的总能量和总光度与分子云的湍动能和光度进行比较发现Cone区域的分子外向流可能是影响分子云湍动的重要因素.

关键词 星际介质: 外向流, 星际介质: 云, 恒星: 形成, 恒星: 活动

中图分类号 P155; **文献标识码**: A

1 引言

分子云在因引力不稳定而引起自内而外塌缩形成恒星的过程中,由磁流体力学驱动的星风从原恒星-盘系统的转轴方向喷发出来,带动周围气体,使周围气体的速度高于分子云的速度,从而形成分子外向流^[1]. 在年轻恒星的演化过程中,分子外向流扮演着不可或缺的角色:一方面,它可以抛射物质,转移在物质下落过程中积累的多余角动量,促进分子云核的进一步收缩;另一方面,分子外向流可以向周围介质注入能量从而阻碍恒星的形成. 两者相互制约,调控恒星的形成过程. 分子外向流不仅在原恒星的形成过程中发挥重要作用,还会对其周围环境产生巨大影响. 高能的分子外

向流能够向周围介质注入动量和能量^[2-3],在此过程中它们可能会分散周围的气体并引起湍流运动^[4-8]. 尤其在小质量恒星形成区域,外向流可能会破坏周围环境,限制其母分子云的寿命^[9]. 有分析和数值研究表明,外向流可以与分子云相互作用,并能有效地驱动母分子云的湍流运动^[7-8, 10-11]. 也有其他研究表明,外向流能够破坏致密的团块并影响分子云的结构,但对分子云内的湍流影响较小^[12].

Zuckerman等^[13]于1976年利用 ^{12}CO ($J=1-0$, J 为角动量量子数)分子谱线首次在猎户座分子云中发现高速分子外向流,其速度总宽度超过了 $150\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$,后来发现分子外向流在恒星的形成过程中普遍存在^[14-15],无论是小质量还是大质量恒星形成

2024-05-27收到原稿, 2024-08-22收到修改稿

* 国家自然科学基金项目(11933011)资助

† jjli@pmo.ac.cn

区都被证实有分子外向流现象^[16],甚至在褐矮星形成区域也探测到它的痕迹^[17-18].在近几十年里,随着望远镜分辨率和灵敏度的提高,使得研究人员能够大规模搜寻分子云区域内的分子外向流^[1-2, 19],这使外向流的样本急剧增加,极大地提高了我们对分子外向流的认识和理解.有些研究揭示了分子外向流与其激发源特性之间的关系^[14, 16, 20-22],例如Shepherd等^[23, 24]、Henning等^[25]、Zhang等^[26]、Ridge等^[27]对大质量恒星的外向流进行了研究,他们都发现大约90%的大质量恒星形成区域与高速气体有关.还有部分研究直接测量了分子外向流注入其母星团的湍动能^[1, 28-29],表明外向流对分子云注入的能量可以与分子云的湍动能或引力束缚能相比拟.然而,对于分子外向流的演化过程,至今尚未形成一个清晰连贯的图景.

CO分子是星际介质中除了分子氢和氦以外含量最丰富的,自发发射系数很小,即使在相对较低的密度下,CO分子也可以通过碰撞而被激发,这使得CO ($J=1-0$)跃迁成为分子气体的良好探针.目前,CO ($J=1-0$)分子谱线已被广泛用于观测恒星形成区域^[30-31],为我们提供了研究分子云的形态和物理性质的宝贵信息. Shepherd等^[23]利用¹²CO ($J=1-0$)谱线总宽度(Full Width, FW)将大质量恒星形成区划分为不同的类型:低速源 $FW < 15 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$;中速源 $15 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1} \leq FW < 30 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$;高速源 $30 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1} \leq FW < 45 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$;极端高速源 $FW \geq 45 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$.不同的速度成分具有明显不同的空间分布和物理特性. Chernin等^[32]表明极端高速CO气体比低速CO气体分布更准直,温度更高,同时他们发现极端高速CO分子外向流是由母分子云与喷流的相互作用产生的.在大多数情况下,分子外向流都呈现为低速气体,只有小部分的分子外向流被极端高速的气体主导,似乎与最年轻的原恒星相关^[33],并代表恒星演化早期高能量的物质喷发阶段.

在过去的研究过程中,极端高速分子外向流持续吸引着研究人员的极大关注.极端高速分子外向流的研究在80年代已经开始活跃起来^[34-37],早期认为它们很可能是由原恒星天体的星风加速母分子云的物质组成的^[38].然而,通过对驱动高速气

体的电离星风的研究发现,电离气体的动量不足以迁移分子云的物质^[39].因此,许多文章中都假设是中性风的作用^[40-41],并在一些源周围的HI 21 cm谱线中探测到中性风的存在^[34, 40, 42]. Lizano等^[34]发现在HH7-11中探测到了HI星风,认为中性星风能够驱动分子外向流. Koo^[35-36]和Margulis等^[37]也在几个源的CO光谱中识别到极端高速线翼,表明星风中可能含有CO.最近Li等^[43-44]的工作发现,在大质量恒星形成区中HI星风也能够驱动分子外向流.关于极端高速气体模型的研究,特别令人感兴趣的是Shang等^[45]提出的“unified model”:作者模拟了恒星风与周围致密气体之间的相互作用,表明外向流的壳层源自被广角星风冲击而压缩的环境气体,喷流状的极端高速气体代表了中心和星风本身最准直的部分.

NGC 2264是研究极端高速外向流形成的极佳对象,它距离很近,为727 pc,由Flaccomio等^[46]利用盖亚(Global Astrometric Interferometer for Astrophysics, Gaia)视差估计得到的,前景消光较低,并且有大量的主序前星,以其著名的Cone Nebula而闻名. Cone Nebula中存在着活跃的恒星形成活动,许多嵌埋O/I类原恒星在亚毫米连续谱中被观测到.距离Cone Nebula北方约0.7 pc处, Allen发现了一个明亮的嵌埋红外源^[47],称为IRS1,与IRAS 06384+0932相关,也被称为Allen's源,其光度为 $2000 L_{\odot}$ ^[48],质量为 $10 M_{\odot}$ ^[49].大约向IRS1西北方向约1.4 pc处,有另一个IRAS (Infrared Astronomical Satellite)源,是IRAS 06382+0939,也称为IRS2,它是一个I类年轻恒星,光度为 $400 L_{\odot}$,质量为 $8 M_{\odot}$ ^[49]. IRS1和IRS2都与分子外向流有关^[50]. Sung等^[51]利用Spitzer测光数据对NGC 2264进行分析,绘制出了该区域的空间结构并探索可能存在的子星团.基于星团成员的空间分布及其与盘或包层特性之间的联系,他们确定了两个活跃的恒星形成区:一个是位于NGC 2264北部的S Mon;一个是位于NGC 2264南部、靠近Cone Nebula尖端的Cone区域.此外, Sung等^[52]又将Cone区域划分为Spokes星团和Cone (C)两个子区域,其中Cone (C)是Cone Nebula的核.图1是NGC 2264整个区域的积分强度图,白色框内的区域为我们

后续分析的重点区域.

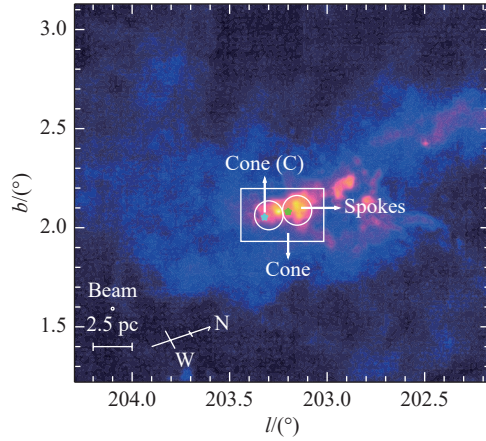


图 1 NGC 2264区域 ^{12}CO 分子谱线的积分强度图. Spokes、Cone (C)和Cone区域分别标记在图中, 蓝绿色星和绿黄色星分别为IRS1和IRS2, l 和 b 分别是银经和银纬, 左下角分别是波束大小(白色圆圈)、pc标度和赤道坐标系尺(N为沿赤纬向北, W为沿赤经向西).

Fig. 1 The integrated intensity of ^{12}CO in NGC 2264 region. Spokes, Cone (C) and Cone regions are marked in the figure. The cyan and lime stars show the location of the IRS1 and IRS2, respectively. l and b represent right ascension and declination. The beam size (white circle), pc scale and the equatorial coordinate system scale (N indicates northward along declination, and W indicates westward along right ascension) are reported in the left lower corner.

青海观测站德令哈13.7 m毫米波望远镜 ^{12}CO ($J=1-0$)分子谱线长时间积分观测能够达到30 mK的灵敏度, 为研究高速外向流提供了条件. 先前关于Cone区域的研究发现存在高速双极外向流^[53-55], 谱线的速度总宽度 $\text{FW} < 40 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, 而本文将利用 ^{12}CO ($J=1-0$)谱线将线翼进一步推高至极高速($\text{FW} > 45 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$), 这是首次发现Cone区域存在极端高速双极外向流现象. 文章的结构主要由以下几部分组成: 第2节描述德令哈13.7 m毫米波望远镜的相关性能和观测数据; 第3节是对Cone区域分子外向流的形态结构的介绍, 主要分为Spokes区域和Cone (C)区域分别描述; 第4节描述Cone区域分子外向流的物理性质; 第5节是分子外向流对母分子云的能量反馈; 第6节总结全文.

2 数据

我们使用紫金山天文台青海观测站13.7 m毫米波望远镜指向 $l = 203.1^\circ \sim 203.5^\circ$, $b = 1.8^\circ \sim 2.3^\circ$ 区域进行了 ^{12}CO 、 ^{13}CO 和 C^{18}O ($J=1-0$)谱线观测. 该望远镜的接收机是含有 3×3 个波束的超导成像频谱仪(Superconducting Spectroscopic Array Receiver, SSAR), 它采用边带分离型的超导SIS混频器(superconductor-insulator-superconductor mixer, SIS mixer), 能够同时观测 ^{12}CO 、 ^{13}CO 和 C^{18}O 的谱线发射. 其中 ^{12}CO ($J=1-0$)谱线在上边带, 对应的系统噪声温度为 $250 \sim 300 \text{ K}$, ^{13}CO ($J=1-0$)和 C^{18}O 谱线在下边带, 对应的系统噪声温度为 $150 \sim 200 \text{ K}$. 每个边带的后端由快速傅里叶变换频谱仪(Fast Fourier Transform Spectrometer, FFTS)对频谱进行实时处理, 其总带宽为1 GHz, 分为16384个频率通道, 每个通道的频率分辨率为61 kHz, 速度范围是 $2600 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, 对应115 GHz处的速度分辨率为 $0.16 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, 110 GHz处为 $0.17 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ ^[56].

我们采用赤道坐标系下的飞行扫描On-The-Fly (OTF)^[57]成图模式对该区域进行观测. 所有的原始数据通过GILDAS (Grenoble Image and Line Data Analysis Software)中的Class¹软件包进行处理, 对 ^{12}CO 谱线进行最低阶多项式(通常为线性的)拟合, 并通过与高斯函数卷积将原始的OTF数据采样到沿银经和银纬方向的 $30'' \times 30''$ 像素上, 最终转换为三维普适图像传输系统(Flexible Image Transport System, FITS)文件. 文章中的所有结果均为主波束亮温度(T_{mb}), 观测过程中使用 $T_{\text{mb}} = T_{\text{A}}^* / \eta_{\text{mb}}$ 对天线温度(T_{A}^*)进行修正, η_{mb} 为主波束效率, 它的值可以从望远镜的观测季节状态报告²中获得. 分子谱线的基本参数见表1, Molecular line是分子谱线的种类, Rest frequency是谱线的静止频率, HPBW (Half-Power Beam Width)是半功率波束宽度, T_{sys} 是系统温度, δ_v 是谱线每个通道对应的速度大小. Koo^[35]和Margulis

¹<http://www.iram.fr/IRAMFR/GILDAS/>

²<http://english.dlh.pmo.cas.cn/fs/>

等^[37]发现, 通常情况下, 亮温度低于100 mK时才可以看到高速发射. 为了减少噪声均方根(root mean square, rms)干扰, 速度通道被平滑为1 km·s⁻¹.

图2展示了Cone区域¹²CO分子谱线的rms随空间分布的变化情况. 从图2中可以看到, 该区域的噪声水平分布在0~0.05 K之间.

表 1 分子谱线的基本参数
Table 1 Basic parameters of the molecular line

Molecular line	Rest frequency/GHz	HPBW/''	T_{sys}/K	η_{mb}	$\delta_v/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$
¹² CO ($J=1-0$)	115.2	49	250–300	0.51	0.16
¹³ CO ($J=1-0$)	110.2	51	150–200	0.56	0.17
C ¹⁸ O ($J=1-0$)	109.8	52	150–200	0.56	0.17

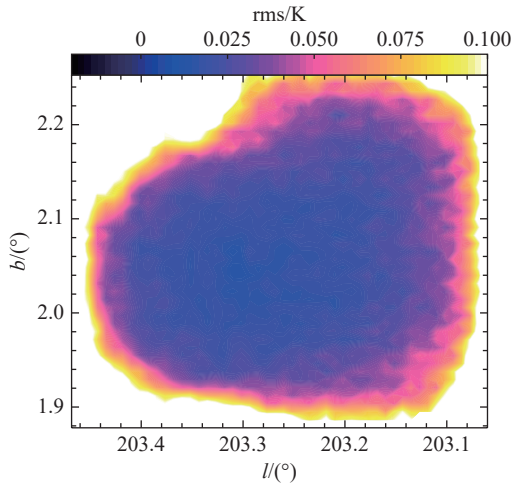


图 2 ¹²CO分子谱线的rms噪声分布图

Fig. 2 The rms noise distribution of ¹²CO molecular line

3 分子外向流的形态特征

我们采用比较峰值位置处¹²CO和¹³CO光谱(图3)及速度通道图(见附录A1)相结合的方法, 根据1 rms (即 σ) T_{mb} 水平处的谱线总宽度, 把¹²CO分子谱线的线翼划分为不同的速度范围, 即划分为低速成分(LV)、高速成分(HV)和极端高速成分(EHV). 将外向流中速度较低的气体与速度较高的气体分隔开, 从而更好地定义高速气体的运动学, 这是首次利用高灵敏度数据探测到Cone区域的极端高速分子外向流. 图3 (b)–(i)展示了Cone区域蓝瓣和红瓣发射峰位置的¹²CO ($J=1-0$)和¹³CO ($J=1-0$)分子谱线图, 速度范围由虚线划分, 划分的速

度范围总结在表2中. 其中 Δv_b 和 Δv_r 分别为蓝瓣和红瓣的速度范围.

图3 (a)展示了Cone区域¹²CO ($J=1-0$)分子谱线的双极外向流结构(没有区分低速、高速和极端高速外向流). 该区域由两个双极外向流组成, 一个双极外向流分布在Cone (C)区域, 沿东南-西北方向(虚线1)延伸, 另一个双极外向流分布在Spokes区域, 沿东北-西南方向(虚线2)延伸. 其中, Cone (C)区域的外向流的蓝瓣速度范围是 $-16\sim 0$ km·s⁻¹, 红瓣速度范围是 $10\sim 39$ km·s⁻¹; Spokes区域的外向流的蓝瓣速度范围是 $-24\sim 3$ km·s⁻¹, 红瓣速度范围是 $10\sim 35$ km·s⁻¹. 从图中可以清晰地看到, Spokes区域外向流的蓝瓣和红瓣比Cone (C)区域外向流的蓝瓣和红瓣分布更延展. Spokes区域外向流的蓝瓣和红瓣的角大小均为360'', 对应的有效半径为1.25 pc; 而沿东南-西北方向的蓝瓣和红瓣的角大小均为144'', 对应的有效半径为0.5 pc.

3.1 Spokes区域分子外向流的形态特征

图4展示了Spokes区域¹²CO ($J=1-0$)分子外向流结构的LV、HV和EHV成分, 速度范围见表2. 由图4可见, Spokes区域的分子外向流显示出明显的双极特征, 并且不同速度区间的气体中都能清晰地看到空间分离的红瓣和蓝瓣. 同时, 分子外向流存在这样的系统趋势: 随着外向流速度的增加, 红瓣逐渐向西北方向延伸, 蓝瓣和红瓣之间的距离也随之增加. Lada等^[58]利用麦克斯韦望远镜(James Clerk Maxwell Telescope, JCMT)观测的¹²CO ($J=2-1$)谱线探测NGC 2264G区域的外向流, 也发现了相同的运动趋势.

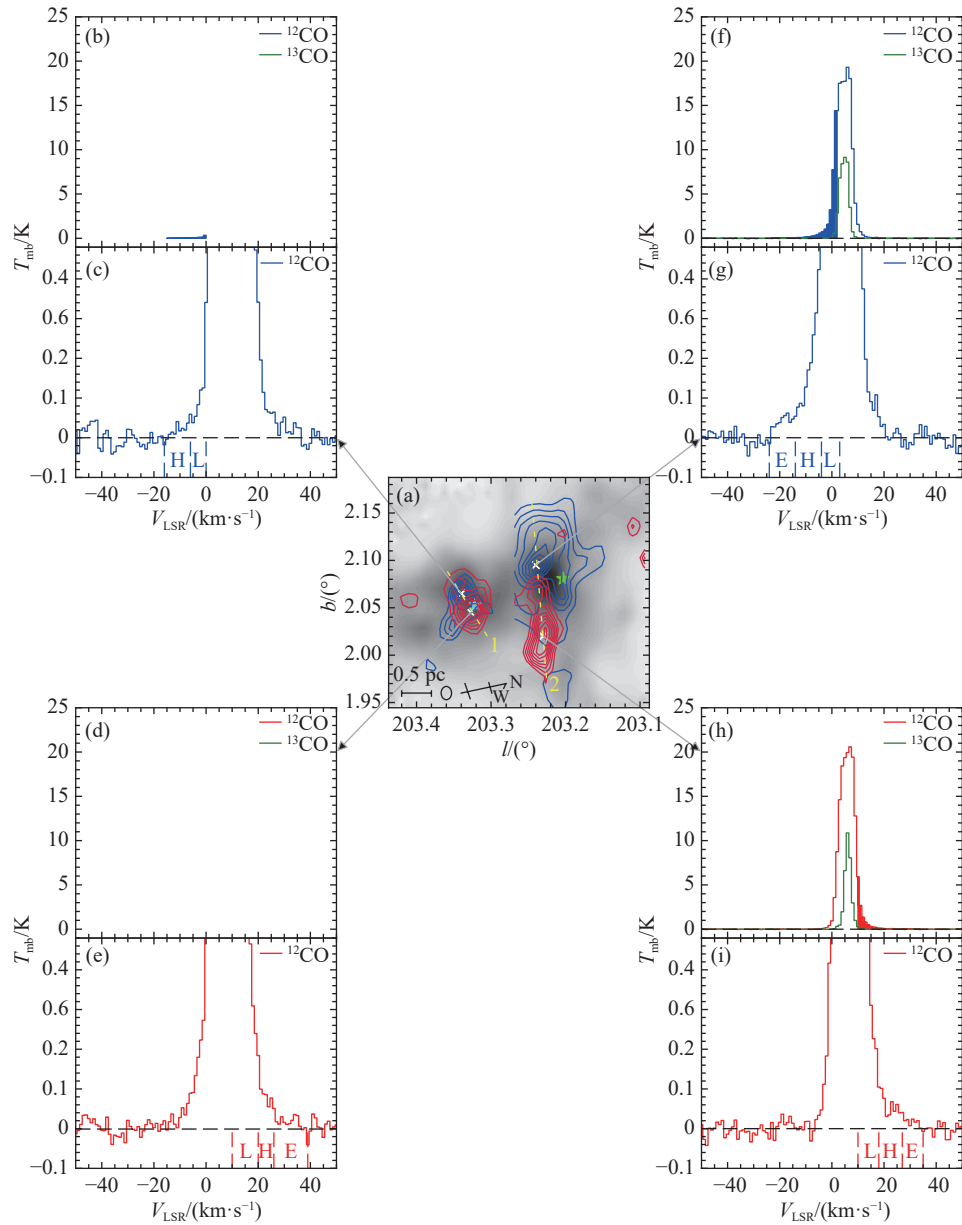


图 3 图(a)为Cone区域的 ^{12}CO 分子谱线的蓝瓣和红瓣图, 底图是 ^{13}CO 分子谱线的积分强度图, 蓝绿色星为IRS1, 绿黄色星为IRS2, 左下角是波束大小(黑色圆圈)、pc标度和赤道坐标系标尺. 图(b)–(i)分别是蓝瓣和红瓣极点位置的 ^{12}CO 和 ^{13}CO 谱线. 图中的阴影部分为蓝瓣和红瓣的速度范围. L为低速成分, H为高速成分, E为极端高速成分.

Fig. 3 Panel (a) shows the blue and red lobes of the ^{12}CO molecular spectral line in the Cone region. The background is the integrated intensity map of the ^{13}CO molecular spectral line. The cyan and lime stars show the location of the IRS1 and IRS2 sources, respectively. The beam size (black circle), pc scale and the equatorial coordinate system scale are reported in the left lower corner. Panels (b)–(i) are the ^{12}CO and ^{13}CO spectral lines at the extreme point positions of the blue lobe and red lobe, respectively. The shadow parts indicate the velocity range of the blue and red lobes. L is the low velocity, H is the high velocity and E is the extremely high velocity.

表 2 分子外向流的速度区间
Table 2 The velocity range of molecular outflow

Region	LV		HV		EHV	
	$\Delta v_b/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	$\Delta v_r/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	$\Delta v_b/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	$\Delta v_r/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	$\Delta v_b/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	$\Delta v_r/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$
Spokes	(-4,3)	(10,18)	(-14,-4)	(18,27)	(-24,-14)	(27,35)
Cone (C)	(-6,0)	(10,20)	(-16,-6)	(20,25)	(-, -)	(25,39)

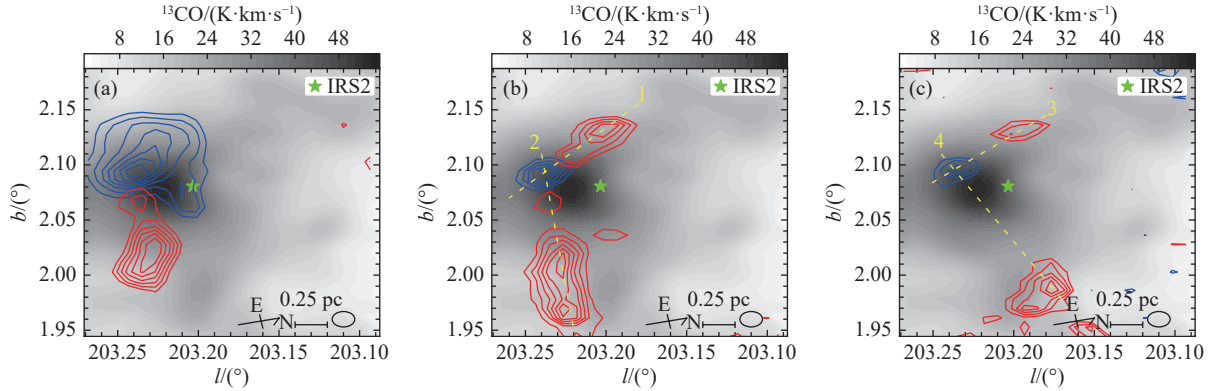


图 4 Spokes区域在低速、高速和极端高速状态下的 ^{12}CO 分子谱线的蓝瓣和红瓣图, 底图为 ^{13}CO 积分强度图, 绿黄色星为IRS2, 右下角是波束大小(黑色圆圈)、pc标度和赤道坐标系标尺. (a)低速分子外向流图. 蓝瓣的等高线值为15、18、21、24、27、30、33 $\text{K}\cdot\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$, 红瓣的等高线值为9、11、13、15、17、19 $\text{K}\cdot\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$. (b)高速分子外向流图. 蓝瓣的等高线值为0.9、1.4、1.9、2.4、2.9 $\text{K}\cdot\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$, 红瓣的等高线值为0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9 $\text{K}\cdot\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$. (c)极端高速分子外向流图. 蓝瓣的等高线值为0.2、0.3、0.4、0.5 $\text{K}\cdot\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$, 红瓣的等高线值为0.3、0.39、0.48、0.57、0.66 $\text{K}\cdot\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$.

Fig. 4 The blue and red lobes of the ^{12}CO molecular spectral line for low velocity, high velocity and the extremely high velocity in Spokes region. The background is the integrated intensity of ^{13}CO . Lime star is IRS2. In the lower right corner are the beam size (black circle), pc scale and equatorial coordinate system scale. (a) Low velocity molecular outflow. Blueshifted lobe contours are at 15, 18, 21, 24, 27, 30, 33 $\text{K}\cdot\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$, redshifted lobe contours are at 9, 11, 13, 15, 17, 19 $\text{K}\cdot\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$. (b) High velocity molecular outflow. Blueshifted lobe contours are at 0.9, 1.4, 1.9, 2.4, 2.9 $\text{K}\cdot\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$, redshifted lobe contours are at 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 $\text{K}\cdot\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$. (c) Extremely high velocity molecular outflow. Blueshifted lobe contours are at 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 $\text{K}\cdot\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$, redshifted lobe contours are at 0.3, 0.39, 0.48, 0.57, 0.66 $\text{K}\cdot\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$.

图4 (a)展示了低速分子外向流的分布特征, 蓝瓣的速度范围是 $-4\sim 3\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, 红瓣的速度范围是 $10\sim 18\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$. 低速分子外向流具有双极结构, 沿东西方向延展. 蓝瓣和红瓣在空间中分离, 蓝瓣主要分布在分子团块的东部, 呈现向四周蔓延的块状结构, 而红瓣集中分布在西部, 沿东北-西南方向延伸. 同时, 蓝瓣和红瓣与图3 (a)(包含了低速、高速和极端高速外向流成分)中沿东北-西南方向的蓝瓣和红瓣具有相似的空间结构, 但是低速蓝瓣和红瓣的分布范围更小.

图4 (b)展示了高速分子外向流的分布特征,

蓝瓣的速度范围是 $-14\sim -4\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, 红瓣的速度范围是 $18\sim 27\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$. 高速分子外向流的空间结构更复杂, 由一个蓝瓣和两个红瓣组成, 红瓣分别位于蓝瓣的西部和东北方向. 蓝瓣呈现沿南北方向延伸的椭圆结构, 沿东北-西南方向(虚线1)延伸的红瓣在高速外向流中被探测到, 但在低速外向流中没有探测到该位置有红瓣的踪迹. 沿东西方向(虚线2)延伸的红瓣包含两个发射峰, 分别位于 $l = 203.3^\circ$ 、 $b = 1.96^\circ$ 和 $l = 203.24^\circ$ 、 $b = 2.01^\circ$ 位置处. 与低速外向流中的红瓣相比, 沿东西方向(虚线2)的红瓣向西延伸得更远, 约为0.5 pc.

图4 (c)展示了极端高速分子外向流的分布特征. 我们首次利用高灵敏度数据探测到Spokes区域的极端高速运动的蓝瓣和红瓣, 蓝瓣的速度范围是 $-24 \sim -14 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 红瓣的速度范围是 $27 \sim 35 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. 极端高速分子外向流的空间结构更为延展, 由一个蓝瓣和两个红瓣组成, 两个红瓣分别位于蓝瓣的西北方向和东北方向. 极端高速蓝瓣与高速蓝瓣的形态结构相似, 但是分布范围更小. 沿东北-西南方向(虚线3)的极端高速红瓣分布在高速分子外向流中沿东北-西南方向红瓣的发射峰位置处, 该红瓣可能是高速分子外向流的遗留. 位于蓝瓣东北方向(虚线4)的极端高速红瓣沿东北-西南方向延伸, 它出现在低速红瓣末端的西北方向, 那里几乎没有低速气体. 与高速分子外向流中沿东西方向延伸的红瓣相比, 极端高速红瓣向北移动了 0.5 pc , 与蓝瓣的距离更远, 这表明分子外向流在极端高速时分布更延展, 随着速度的增大, 分子外向流逐渐向外运动.

Shimoikura等^[59]利用角分辨率为 $22''$ 、 1σ 噪声水平为 1.2 K 的 ^{12}CO ($J=1-0$)分子谱线的成图观测仅发现Spokes区域的低速蓝瓣, 速度范围是 $-9 \sim 1 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. Kim等^[55]使用NRAO (National Radio Astronomy Observatory) 12 m 望远镜对 ^{12}CO ($J=2-1$)进行观测, 角分辨率为 $27''$, 速度分辨率为 $0.68 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, rms为 0.2 K . 结果显示Spokes区域存在双极分子外向流结构, 蓝瓣的速度范围是 $-10.3 \sim 0.1 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 红瓣的速度范围是 $10.5 \sim 20.3 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. Margulis等^[53]使用空间分辨率为 $66''$ 的NRAO 12 m 望远镜和空间分辨率为 $45''$ 的FCRAO (Five College Radio Astronomy Observatory) 14 m 望远镜的观测数据探测到Spokes区域存在分子外向流, rms在 $0.1 \sim 0.3 \text{ K}$ 之间. 蓝瓣的速度范围是 $-10 \sim 2 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 红瓣的速度范围是 $11 \sim 21 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. 为了更清晰地展示利用德令哈望远镜 ^{12}CO ($J=1-0$)谱线探测到的分子外向流与以往研究的Spokes区域的分子外向流的形态结构的区别, 我们将研究得到的分子外向流叠加在Kim等^[55]和Margulis等^[53]探测的分子外向流图(图5和图6)中进行比较.

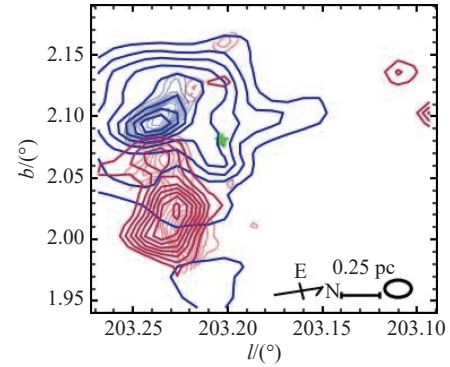


图 5 Spokes区域红瓣和蓝瓣的 ^{12}CO 发射等高线图, 红瓣的速度范围是 $10 \sim 35 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 等高线强度为7、9、11、13、15、17、19 $\text{K} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$; 蓝瓣的速度范围是 $-24 \sim 3 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 等高线强度为7、11、15、19、23、27、31、35 $\text{K} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$. 背景是Kim等^[55]绘制的 ^{12}CO ($J=2-1$)分子谱线积分强度图.

Fig. 5 Redshifted and blueshifted ^{12}CO emission profiles in the Spokes region. Redshifted lobe velocity is $10 \sim 35 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, contours are at 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19 $\text{K} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$. Blueshifted lobe velocity is $-24 \sim 3 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, contours are at 7, 11, 15, 19, 23, 27, 31, 35 $\text{K} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$. The background is the integrated intensity diagram of ^{12}CO ($J=2-1$) molecular spectral line drawn by Kim et al.^[55].

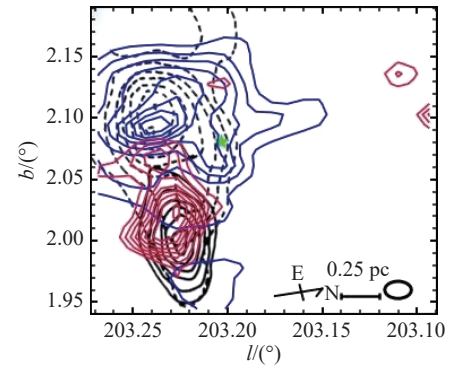


图 6 Spokes区域红瓣和蓝瓣的 ^{12}CO 发射等高线图, 红瓣的速度范围是 $10 \sim 35 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 等高线强度为7、9、11、13、15、17、19 $\text{K} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$; 蓝瓣的速度范围是 $-24 \sim 3 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 等高线强度为7、11、15、19、23、27、31、35 $\text{K} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$. 背景是Margulis等^[53]绘制的 ^{12}CO ($J=1-0$)分子谱线积分强度图.

Fig. 6 Redshifted and blueshifted ^{12}CO emission profiles in the Spokes region. Redshifted lobe velocity is $10 \sim 35 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, contours are at 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19 $\text{K} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$. Blueshifted lobe velocity is $-24 \sim 3 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, contours are at 7, 11, 15, 19, 23, 27, 31, 35 $\text{K} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$. The background is the integrated intensity diagram of ^{12}CO ($J=1-0$) molecular spectral lines drawn by Margulis et al.^[53].

图5的底图是Kim等^[55]探测到的Spokes区域 ^{12}CO ($J=2-1$)分子谱线的外向流结构,上面覆盖着的是我们利用 ^{12}CO ($J=1-0$)谱线示踪的外向流.图5显示这两种分子谱线存在着一些形态差异.利用 ^{12}CO ($J=1-0$)分子谱线探测到的蓝/红瓣的整体形态比 ^{12}CO ($J=2-1$)分子谱线探测到的更延展,尤其是在蓝/红瓣的短轴方向上. ^{12}CO ($J=2-1$)蓝瓣沿东北-西南方向延伸,集中分布在 ^{12}CO ($J=1-0$)蓝瓣的峰值位置附近. ^{12}CO ($J=2-1$)红瓣沿东西方向延伸,其峰值位置相对于 ^{12}CO ($J=1-0$)红瓣的峰值位置向西北方向移动 $70''$. ^{12}CO ($J=1-0$)和 ^{12}CO ($J=2-1$)分子谱线之间明显的形态差异表明 ^{12}CO ($J=2-1$)与 ^{12}CO ($J=1-0$)分子谱线示踪的环境气体有所区别.图6底图是Margulis等^[53]绘制的IRS2周围的蓝瓣(虚线)和红瓣(实线),我们探测到的外向流覆盖在底图上.利用德令哈望远镜探测到的分子外向流与Margulis等^[53]探测到的分子外向流具有相似的形态分布,但Margulis等^[53]探测到的蓝瓣和红瓣的覆盖范围更广,这可能是由于选取的 ^{12}CO ($J=1-0$)分子谱线的线翼速度范围不同导致的.

3.2 Cone (C)区域分子外向流的形态特征

图7分别展示了Cone (C)区域在低速、高速和极端高速状态下的 ^{12}CO ($J=1-0$)分子外向流结构.图7 (a)展示了低速分子外向流结构,蓝瓣的速度范围是 $-6 \sim 0 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$,红瓣的速度范围是 $10 \sim 20 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$.低速分子外向流具有两极特征,蓝瓣呈现球状,红瓣沿东北-西南方向延展.蓝瓣和红瓣出现部分重叠,可能是由投影效应导致的.图7 (b)展示了高速分子外向流结构,蓝瓣的速度范围是 $-16 \sim -6 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$,红瓣的速度范围是 $20 \sim 25 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$.高速分子外向流由位于红瓣东部(虚线1)沿东西方向延伸、位于红瓣西南方向(虚线2)和沿西北-东南方向延伸(虚线3)的3个蓝瓣和一个红瓣组成.与低速红瓣相比,高速红瓣逐渐向南北方向延长,成为沿南北方向延伸的椭圆形.图7 (c)展示了极端高速分子外向流结构,极端高速分子外向流只探测到沿南北方向(虚线4)延伸和沿东西方向(虚线5)延伸的红瓣,速度范围是 $25 \sim 39 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$.与高速红瓣相比,沿南北方向延伸(虚线5)的极端高速红瓣变得更狭长.

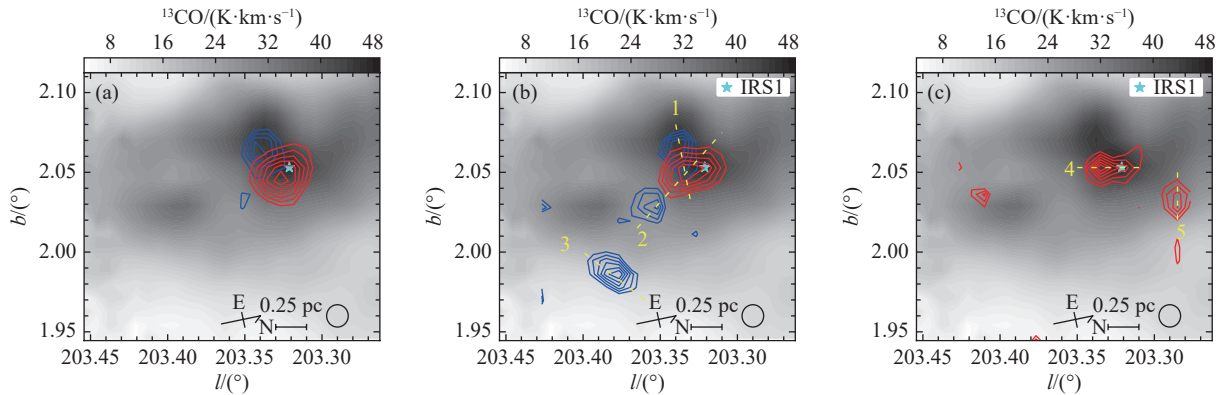


图 7 Cone (C)区域在低速、高速和极端高速状态下的 ^{12}CO 分子谱线的蓝瓣和红瓣图,底图为 ^{13}CO 积分强度图,蓝绿色星为IRS1,右下角是波束大小(黑色圆圈)、pc标度和赤道坐标系标尺.(a)低速分子外流图.蓝瓣的等高线值为0.55、0.7、0.85、 $1 \text{ K}\cdot\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$,红瓣的等高线值为25、30、35、40、45、 $50 \text{ K}\cdot\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$.(b)高速分子外流图.蓝瓣的等高线值为0.14、0.18、0.22、0.26、0.3、 $0.34 \text{ K}\cdot\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$,红瓣的等高线值为0.37、0.47、0.57、0.67、 $0.77 \text{ K}\cdot\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$.(c)极端高速分子外流图.红瓣的等高线值为0.28、0.32、0.36、0.4、0.44、 $0.48 \text{ K}\cdot\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$.

Fig. 7 The blue and red lobes of the ^{12}CO molecular spectral line for low velocity, high velocity and the extremely high velocity in Cone (C) region. The background is the integrated intensity of ^{13}CO . Cyan star is IRS1. In the lower right corner are the beam size (black circle), pc scale and equatorial coordinate system scale. (a) Low velocity molecular outflow. Blueshifted lobe contours are at 0.55, 0.7, 0.85, $1 \text{ K}\cdot\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$, redshifted lobe contours are at 25, 30, 35, 40, 45, $50 \text{ K}\cdot\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$. (b) High velocity molecular outflow. Blueshifted lobe contours are at 0.14, 0.18, 0.22, 0.26, 0.3, $0.34 \text{ K}\cdot\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$, redshifted lobe contours are at 0.37, 0.47, 0.57, 0.67, $0.77 \text{ K}\cdot\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$. (c) Extremely high velocity molecular outflow. Redshifted lobe contours are at 0.28, 0.32, 0.36, 0.4, 0.44, $0.48 \text{ K}\cdot\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$.

Margulis等^[53]利用NRAO 12 m望远镜和FCRAO 14 m望远镜, 探测到了Cone (C)区域的 ^{12}CO 红瓣, 速度范围是 $12\sim 22\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, 有效长度为 0.24 pc , 没有发现蓝瓣. Liu等^[54]通过使用rms达到 47.4 mK 的 ^{12}CO ($J=1-0$)分子谱线发现该区域存在双极外向流, 但蓝瓣并不明显, 其中蓝瓣的速度范围是 $-7\sim 0\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, 红瓣的速度范围是 $12\sim 22\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$. 由于青海观测站德令哈望远镜的高灵敏度观测, 我们首次成功探测到了Cone (C)区域明显的高速和极端高速外向流.

4 分子外向流的物理性质

为了理解分子外向流对其周围环境的影响, 计算外向流的质量、动量和能量是非常重要的, 但是根据Arce等^[60]的研究结果表明, 这些物理量的计算存在误差. 一方面是在估计分子外向流的物理性质时, 分子外向流的低速部分容易与不属于外向流的云核气体混淆. 通过判断 ^{13}CO ($J=1-0$)分子谱线发射的速度范围, 我们尝试通过简单地消除分子气体在低速部分的发射来尽量避免周围环境气体的污染, 这意味着计算得到的外向流的质量和能量是下限. 确定分子外向流物理性质的另一个主要的不确定性是难以确定外向流喷向的倾角, 因此我们选择呈现未对倾角进行改正的分子外向流的物理参数.

表3和表4总结了Spokes和Cone (C)区域分子外向流的物理性质, M 为分子外向流的质量, P 为

动量, E 为能量, L 为机械光度, t 为动力学时标. $L_{\text{blue/red}}$ 为低速蓝/红瓣, $H_{\text{blue/red}}$ 为高速蓝/红瓣, $E_{\text{blue/red}}$ 为极端高速蓝/红瓣, 详细的计算过程见附录A2. 应该指出的是, 表3和表4中列出的质量、动量、能量和机械光度是下限, 因为有些影响因素尚未考虑在内, 如果考虑影响因素, 这些参数将会增加. 根据表中数据可以看到, Spokes区域的分子外向流的质量在 $0.01\sim 3.39\text{ }M_{\odot}$ 之间、动量是 $0.21\sim 13.45\text{ }M_{\odot}\cdot\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 、能量是 $0.51\times 10^{44}\sim 9.18\times 10^{44}\text{ erg}$ 、光度是 $0.05\sim 0.41\text{ }L_{\odot}$ 、动力学时标为 $0.5\times 10^4\sim 8.5\times 10^4\text{ yr}$. 而Cone (C)区域的分子外向流的质量范围是 $0.01\sim 3.38\text{ }M_{\odot}$ 、动量是 $0.06\sim 20.55\text{ }M_{\odot}\cdot\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 、能量是 $0.08\times 10^{44}\sim 13.71\times 10^{44}\text{ erg}$ 、光度是 $0.01\sim 0.74\text{ }L_{\odot}$ 、动力学时标为 $0.5\times 10^4\sim 1.5\times 10^4\text{ yr}$. 低速、高速和极端高速外向流具有相似的机械光度. 但是大部分的质量、动量和能量都集中在低速区域, 而极端高速外向流的质量、动量和能量最少. 从数量上看, Spokes区域的极端高速外向流仅包含1%的质量、5%的动量和16%的能量, Cone (C)区域的极端高速外向流也仅包含1%的质量、3%的动量和8%的能量, 而两个区域的低速外向流承载了绝大部分的质量、动量和能量. 对于动力学时标 $t_L > t_H > t_E$, 表明极端高速外向流是最年轻的. 此外, 我们发现Spokes和Cone (C)区域的红瓣均比蓝瓣拥有更多的动量和能量. Buckle等^[61]利用CO数据探测了NGC 2264区域的分子外向流, 也发现红瓣包含更多的动量和能量.

表 3 Spokes区域分子外向流的基本性质
Table 3 Basic properties of the molecular outflow in the Spokes region

	L_{blue}	L_{red}	H_{blue}	H_{red1}	H_{red2}	E_{blue}	E_{red3}	E_{red4}
$M/M_{\odot}$	3.39	1.63	0.08	0.03	0.13	0.01	0.01	0.04
$\langle \Delta v_{\text{lobe}} \rangle / (\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	4.0	7.1	12.6	15.7	14.5	20.0	34.0	23.8
$P / (M_{\odot} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	13.45	11.57	1.05	0.49	1.96	0.21	0.35	0.99
$E / (10^{44}\text{ erg})$	5.56	9.18	1.36	0.82	3.01	0.51	0.88	2.47
$L/L_{\odot}$	0.05	0.41	0.08	0.10	0.21	0.07	0.15	0.20
$t / (10^4\text{ yr})$	8.5	1.8	1.5	0.7	1.2	0.6	0.5	1.0

表 4 Cone (C)区域分子外向流的基本性质
Table 4 Basic properties of the molecular outflow in the Cone (C) region

	L_{blue}	L_{red}	H_{blue1}	H_{blue2}	H_{blue3}	H_{red}	E_{red4}	E_{red5}
$M/M_{\odot}$	0.05	3.38	0.01	0.01	0.01	0.04	0.02	0.01
$\langle \Delta v_{\text{lobe}} \rangle / (\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	9.0	6.1	11.0	8.0	8.9	15.8	18.0	28.0
$P / (M_{\odot} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	0.46	20.55	0.11	0.08	0.06	0.65	0.37	0.29
$E / (10^{44} \text{ erg})$	0.43	13.71	0.18	0.08	0.16	1.00	0.78	0.62
$L/L_{\odot}$	0.01	0.74	0.01	0.01	0.01	0.07	0.12	0.11
$t / (10^4 \text{ yr})$	1.5	1.5	1.1	1.1	0.9	1.1	0.5	0.5

5 分子外向流对分子云的影响

在过去的30 yr里, 分子云中的湍流运动一直存在争议^[62-64]. 在大尺度结构上, 超新星和星系的较差自转产生的动能可以提供湍动的能量. 而在小尺度结构中, H II区域的恒星反馈、辐射驱动风和辐射吸积外向流是湍动能量的主要来源^[65]. 有理论和数值研究表明, 外向流能够有效驱动分子云的湍流运动. 在小尺度的分子云中, 外向流注入的能量可以补偿在几个动力学时标内的快速湍流耗散. 在Nakamura等^[7]的模型中, 外向流平衡了分子云的内落和吸积运动, 使分子云维持在准静态平衡状态. 如果没有外向流注入额外的湍流运动, 湍动将在几次自由下落时标内消散. 因此, 分子外向流可能会阻止分子云的局部引力塌缩, 从而延长分子云的生命.

一般来说, 从两个角度研究外向流对母分子云的反馈作用: 湍动支撑和对分子云的破坏性. 在研究过程中, 通常通过将外向流的总能量与其母分子云的湍动能进行比较, 从而评估外向流对分子云湍动的影响. 例如, Graves等^[66]发现巨蛇座分子云的外向流能量是湍动能量的70%; Arce等^[1]确定了巨蛇座分子云中60个外向流候选体, 并得出外向流的总能量足以弥补湍动耗散的结论. 在金牛座^[62]、蛇夫座^[67]和猎户座^[68]等区域中也发现了类似的结果. 同时, Li等^[3]对265个分子云研究了外向流对分子云的湍动支撑和破坏作用, 发现外向流能够在比较小的尺度上维持分子云的湍动, 甚至破坏分子云.

为了估计Cone区域分子云中外向流对湍动的贡献, 我们可以将总的分子外向流能量与分子云的湍动能进行比较, 主要包括分子外向流的总能量与分子云的湍动能、外向流的总光度(总的能量注入速率)与湍动的光度(能量耗散速率)、外向流的总动能和分子云的引力束缚能3个方面.

我们使用 ^{13}CO 计算分子云的相关物理量. 一方面, 利用 C^{18}O 数据计算具有 C^{18}O 辐射的区域的光深, 然后通过丰度比转换为 ^{13}CO 的光深. 另一方面, 在没有 C^{18}O 辐射的区域, 我们仍然使用 ^{13}CO 的光深. 然后对气体的柱密度进行光深改正, 并进行了随后的关于分子云物理量的计算.

假设 ^{12}CO ($J=1-0$)发射为光学厚, 激发温度公式^[69]为:

$$T_{\text{ex}} = \frac{5.53}{\ln [1 + 5.53 / (T_{\text{mb},12} + 0.82)]}. \quad (1)$$

$T_{\text{mb},12}$ 是 ^{12}CO 主波束温度.

在具有 C^{18}O 的区域, 使用 ^{12}CO 分子谱线的激发温度估算 C^{18}O 的光深为:

$$\tau_{18} = -\ln \left\{ 1 - \frac{T_{\text{mb},18}}{5.27} \left[\left(e^{\frac{5.27}{T_{\text{ex}}}} - 1 \right)^{-1} - 0.166 \right]^{-1} \right\}. \quad (2)$$

由此得到的 ^{13}CO 的光深为:

$$\tau_{13} = \tau_{18} X_{13/18}, \quad (3)$$

$T_{\text{mb},18}$ 是 C^{18}O 主波束温度, $X_{13/18} = [^{13}\text{CO}/\text{C}^{18}\text{O}] = 9.7^{[70]}$ 是 ^{13}CO 与 C^{18}O 的丰度比.

在没有 C^{18}O 的区域, 使用 ^{12}CO 分子谱线的激

发温度估算 ^{13}CO 的光深为:

$$\tau_{13} = -\ln \left\{ 1 - \frac{T_{\text{mb},13}}{5.29} \left[\left(e^{\frac{5.29}{T_{\text{ex}}}} - 1 \right)^{-1} - 0.164 \right]^{-1} \right\}. \quad (4)$$

$T_{\text{mb},13}$ 是 ^{13}CO 主波束温度.

假设分子气体处于局部热力学平衡(local thermal equilibrium, LTE)状态, 利用 ^{13}CO ($J=1-0$)分子谱线来估计分子气体的柱密度和质量. 根据Garden等^[69]的研究, 经过光深改正后的 ^{13}CO 的柱密度可以通过以下公式估计:

$$N(^{13}\text{CO}) = 4.71 \times 10^{13} \frac{T_{\text{ex}} + 0.88}{e^{(-5.29/T_{\text{ex}})}} \frac{\tau_{13}}{1 - e^{\tau_{13}}} \int T_{\text{mb},13} dv. \quad (5)$$

由 $X(^{13}\text{CO}) = [\text{H}_2] / [^{13}\text{CO}] \approx 5 \times 10^5$ 估计 H_2 的柱密度(N_{H_2})^[71], 得到分子云的质量为:

$$M_{\text{cloud}} = \mu m_{\text{H}} N_{\text{H}_2} S. \quad (6)$$

其中, $\mu=2.8$ ^[72]是平均分子权重; m_{H} 代表氢原子的质量, 值为 1.674×10^{-27} kg; S 是分子云投影到天空上的面积.

通过Spokes区域和Cone (C)区域的 ^{13}CO ($J=1-0$)分子谱线得到这两个区域的平均线宽 Δv_{FWHM} 分别为 $3 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $4 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. 由此得到分子云的湍动能公式为:

$$E_{\text{turb}} = \frac{3}{16 \ln 2} M_{\text{cloud}} \Delta v_{\text{FWHM}}^2. \quad (7)$$

为了估计湍流的耗散能量速率, 我们需要估计湍动的能量耗散时标. 数值研究表明, 均匀驱动的磁流体动力学湍动的能量耗散速率可以近似由下式给出^[73]:

$$t_{\text{diss}} \sim \frac{3.9\kappa}{M_{\text{rms}}} t_{\text{ff}}. \quad (8)$$

其中 $\kappa = \lambda_{\text{d}}/\lambda_{\text{J}}$ 是驱动波长, 约等于外向流的长度与分子云的金斯长度的比值. M_{rms} 是湍动的马赫数(湍动速度与声速之比). $t_{\text{ff}} = \sqrt{3\pi/32G\rho_{\text{reg}}}$ 是自由下落时标, $\rho_{\text{reg}} = 3M_{\text{cloud}}/4\pi R_{\text{cloud}}^3$. 湍动的耗散速率可写为分子云的湍动能量与耗散时标的比:

$$L_{\text{turb}} = E_{\text{turb}}/t_{\text{diss}}. \quad (9)$$

比较分子外向流的总动能和分子云的引力束缚能可以估计分子外向流对分子云的破坏作用. 分子云的引力束缚能为:

$$E_{\text{grav}} = \frac{GM_{\text{cloud}}^2}{R_{\text{cloud}}}. \quad (10)$$

表5总结了分子云的物理性质. E_{flow} 为分子外向流的总能量, L_{flow} 为分子外向流的总光度. 表5中分子外向流的能量和光度均为下限是因为没有考虑倾角和混合改正. 若对混合因素进行改正, 则外向流的质量应乘2. 假设分子外向流的平均倾角为 57.3° , 则速度和动力学时标应分别乘以1.9和0.64. 结合混合和倾角引起的改正系数, 外向流的动量、能量和光度应分别乘以3.8、6.8和11^[62]. 改正以后, Spokes区域的外向流的总能量和总光度分别为 $1.6 \times 10^{46} \text{ erg}$ 和 $5.4 \times 10^{34} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$, Cone (C)区域外向流的总能量和总光度分别为 $1.2 \times 10^{46} \text{ erg}$ 和 $4.5 \times 10^{34} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$. 根据改正后的数据显示, Spokes区域和Cone (C)区域的湍动能分别大于相应区域分子外向流的能量, 表明分子外向流的总能量不能够平衡分子云的湍动能. Spokes区域外向流的总光度和Cone (C)区域外向流的总光度分别大于其母分子云的湍动光度, 说明分子外向流有足够的能量注入率能够维持分子云的湍流耗散. Spokes区域和Cone (C)区域的 $E_{\text{flow}}/E_{\text{grav}}$ 均不到10%, 表明分子外向流还不足以破坏它们所在的分子云.

表 5 分子云的物理性质
Table 5 Physical properties of the molecular cloud

Region	$E_{\text{turb}}/(10^{47} \text{ erg})$	$L_{\text{turb}}/(10^{33} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1})$	$R_{\text{cloud}}/\text{pc}$	$E_{\text{grav}}/(10^{47} \text{ erg})$	$E_{\text{flow}}/(10^{45} \text{ erg})$	$L_{\text{flow}}/(10^{33} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1})$
Spokes	0.6	2.5	0.5	2.6	2.4	4.9
Cone (C)	1.3	7.4	0.6	3.5	1.7	4.1

6 总结

我们使用青海观测站德令哈13.7 m毫米波望远镜的 ^{12}CO ($J=1-0$)分子谱线研究了Cone区域的动力学结构——分子外向流. 得益于高灵敏度的成图观测, 我们首次探测到了Cone区域的极端高速分子外向流, 同时分析了分子外向流对分子云的影响. 关于Cone区域分子云的动力学结构及其特性的研究结果如下:

(1) Spokes区域 ^{12}CO ($J=1-0$)分子谱线有高达 $59\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 的零强上的速度宽度, 包括3个不同的速度成分: 低速、高速和极端高速外向流. 基于 ^{12}CO ($J=1-0$)分子谱线, Spokes区域的不同速度成分均表现出两极特征, 呈现了独特的分子外向流的状态演化过程.

(2) Cone (C)区域 ^{12}CO ($J=1-0$)分子谱线有高达 $55\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 的零强上的速度宽度, 先前研究得到的零强上的速度宽度仅 $29\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$. 在低速和高速气体中均探测到双极分子外向流, 其中高速气体含有3个蓝瓣. 极端高速气体探测到两个红瓣.

(3)随着分子外向流速度的增加, 红瓣和蓝瓣之间的距离也逐渐增大, 有向外运动的趋势, 这与Lada等^[58]之前利用 ^{12}CO ($J=2-1$)对NGC 2264G区域观测的外向流变化趋势相同.

(4)对于每个分子外向流, 我们都在假设局部热力学平衡状态下计算了它们的质量、动量、动能、机械光度、动力学时标等物理性质, 发现低速气体比极端高速气体拥有更多的质量、动量和能量. 同时, Spokes区域和Cone (C)区域的红瓣比蓝瓣包含的动量和能量更多.

(5)对分子云动力学参数例如湍动能、湍流的耗散能量速率和引力束缚能等进行计算, 并将它们与分子外向流的能量和光度进行比较, 发现Spokes区域和Cone (C)区域的分子外向流有足够的能量注入率来平衡分子云的湍流耗散. 但是外向流没有足够的能量来维持目前观测到的分子云的湍动, 并且, 外向流的动能较小, 还不足以破坏分子云.

致谢 这项工作利用德令哈13.7 m毫米波望远镜的观测数据展开研究, 感谢紫金山天文台青海观测站对本课题提供的数据支持. 同时感谢审稿

人对文章提出的宝贵建议, 使得文章的质量有了显著的提高.

参考文献

- [1] Arce H G, Borkin M A, Goodman A A, et al. ApJ, 2010, 715: 1170
- [2] Li Y J, Li F C, Xu Y, et al. ApJS, 2018, 235: 15
- [3] Li Y J, Xu Y, Sun Y, et al. ApJS, 2020, 251: 26
- [4] Bachiller R. ARA&A, 1996, 34: 111
- [5] Plunkett A L, Arce H G, Corder S A, et al. ApJ, 2013, 774: 22
- [6] Lada C J. ARA&A, 1985, 23: 267
- [7] Nakamura F, Li Z Y. ApJ, 2007, 662: 395
- [8] Cunningham A J, Frank A, Carroll J, et al. ApJ, 2009, 692: 816
- [9] Hartmann L, Ballesteros-Paredes J, Bergin E A. ApJ, 2001, 562: 852
- [10] Matzner C D. ApJ, 2007, 659: 1394
- [11] Carroll J J, Frank A, Blackman E G, et al. ApJ, 2009, 695: 1376
- [12] Banerjee R, Klessen R S, Fendt C. ApJ, 2007, 668: 1028
- [13] Zuckerman B, Kuiper T, Rodriguez K E. ApJL, 1976, 209: L137
- [14] Hatchell J, Fuller G A, Richer J S. A&A, 2007, 472: 187
- [15] Hatchell J, Dunham M M. A&A, 2009, 502: 139
- [16] Wu Y, Wei Y, Zhao M, et al. A&A, 2004, 426: 503
- [17] Phan B N, Lee C F, Ho P T P, et al. ApJ, 2011, 735: 14
- [18] Phan B N, Riaz B, Lee C F, et al. ApJL, 2008, 689: L141
- [19] Li Y J, Xu Y, Sun Y, et al. ApJS, 2019, 242: 19
- [20] Cabrit S, Bertout C. A&A, 1992, 261: 274
- [21] Bontemps S, Andre P, Terebey S, et al. A&A, 1996, 311: 858
- [22] Curtis E I, Richer J S, Swift J J, et al. MNRAS, 2010, 408: 1516
- [23] Shepherd D S, Churchwell E. ApJ, 1996, 457: 267
- [24] Shepherd D S, Churchwell E. ApJ, 1996, 472: 225
- [25] Henning T H, Schreyer K, Launhard R, et al. A&A, 2000, 353: 211
- [26] Zhang Q, Hunter T R, Brand J, et al. ApJ, 2001, 552: L167
- [27] Ridge N A, Moore T J T. A&A, 2001, 378: 495
- [28] Ginsburg A, Bally J, Williams J P. MNRAS, 2011, 418: 2121
- [29] Nakamura F, Sugitani K, Shimajiri Y, et al. ApJ, 2011, 737: 56
- [30] Goldsmith P F, Heyer M, Narayanan G, et al. ApJ,

- 2008, 680: 428
- [31] Yonekura Y, Asayama S, Kimura K, et al. ApJ, 2005, 634: 476
- [32] Chernin L M, Masson C R. ApJ, 1992, 396: L35
- [33] André P, Ward-Thompson D, Barsony M. ApJ, 1993, 406: 122
- [34] Lizano S, Heiles C, Rodriguez L F, et al. ApJ, 1988, 328: 763
- [35] Koo B C. ApJ, 1989, 337: 318
- [36] Koo B C. ApJ, 1990, 361: 145
- [37] Margulis M, Snell R L. ApJ, 1989, 343: 779
- [38] Snell R L, Loren R B, Plambeck R L. ApJL, 1980, 239: L17
- [39] Evans N J, Levreault R M, Beckwith S, et al. ApJ, 1987, 320: 364
- [40] Bally J, Predmore R. ApJ, 1983, 265: 778
- [41] Rodriguez L F, Cantó J. ApJ, 1983, 8: 163
- [42] Snell R L, Scoville N Z, Sanders D B, et al. ApJ, 1984, 284: 176
- [43] Li Y J, Xu Y, Xu J L, et al. ApJL, 2022, 933: L26
- [44] Li Y J, Xu Y, Xu J L, et al. ApJ, 2022, 935: 153
- [45] Shang H, Allen A, Li Z Y, et al. ApJ, 2006, 649: 845
- [46] Flaccomio E, Micela G, Peres G, et al. A&A, 2023, 670: A37
- [47] Allen D. ApJ, 1972, 172: 55
- [48] Schwartz P R, Thronson H A, Odenwald S F, et al. ApJ, 1985, 292: 231
- [49] Schoettler C, Parker R J, de Bruijne J. MNRAS, 2022, 510: 3178
- [50] Peretto N, André P, Belloche A. A&A, 2006, 445: 979
- [51] Sung H, Bessell M S, Chun M Y, et al. AJ, 2008, 135: 441
- [52] Sung H, Stauffer J R, Bessell M S. AJ, 2009, 138: 1116
- [53] Margulis M, Lada C J, Snell R L. ApJ, 1988, 333: 316
- [54] Liu D J, Xu Y, Li Y J, et al. ApJS, 2021, 253: 15
- [55] Kim K T, Kurtz S E. ApJ, 2006, 643: 978
- [56] Shan W, Yang J, Shi S, et al. ITTST, 2012, 2: 593
- [57] Sun J X, Lu D R, Yang J, et al. AcAer, 2018, 59: 3
- [58] Lada C J, Fich M. RMxAA, 1995, 1: 93
- [59] Shimoikura T, Dobashi K, Nakamura F, et al. ApJ, 2018, 855: 45
- [60] Arce H G, Goodman A. ApJL, 2001, 551: L171
- [61] Buckle J V, Richer J S, Davis C. NRAS, 2012, 423: 1127
- [62] Li H, Li D, Qian L, et al. ApJS, 2015, 219: 20
- [63] Larson R B. MNRAS, 1981, 194: 809
- [64] Heyer M H, Brunt C M. ApJ, 2004, 615: L45
- [65] Narayanan G, Snell R, Bemis A. MNRAS, 2012, 425: 2641
- [66] Graves S F, Richer J S, Buckle J V, et al. MNRAS, 2010, 409: 1412
- [67] Nakamura F, Kamada Y, Kamazaki T, et al. ApJ, 2011, 726: 46
- [68] Federrath C. MNRAS, 2015, 450: 4035
- [69] Garden R P, Hayashi M, Gatley I, et al. ApJ, 1991, 374: 540
- [70] Wang C, Feng H R, Yang J, et al. AJ, 2023, 166: 121
- [71] Simon R, Jackson J M, Clemens D P, et al. ApJ, 2001, 551: 747
- [72] Kauffmann J, Bertoldi F, Bourke T L, et al. A&A, 2008, 487: 993
- [73] Mac L, Mordecai M. ApJ, 1999, 542: 169

The Extremely High Velocity Molecular Outflow in the NGC 2264 Cone Region

LIU Xin-rong^{1,2} LI Jing-jing¹ LIU De-jian^{1,2} KONG De-yun^{1,2} LI Ying-jie¹
 LIN Ze-hao¹ HAO Chao-jie¹ BIAN Shuai-bo¹

(1 Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023)

(2 School of Astronomy and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

ABSTRACT Using the high-sensitivity and high-resolution observations of the ^{12}CO ($J=1-0$, J is angular-momentum quantum number) molecular line observed by the Qinghai Observatory of Purple Mountain Observatory with the 13.7 meter telescope, extremely high velocity molecular outflows with total velocity width up to $\sim 60 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ were detected for the first time in the two sub-regions, Spokes and Cone (C), of the NGC 2264 Cone. The detected outflow velocities were divided into three components (low, high and extremely high velocity) to reveal changes in the morphology and distribution of the molecular outflows. The ^{12}CO emission of extremely high velocity shows multiple

blueshifted and redshifted lobes. As the gas velocities increase, the distances between the lobes increase significantly, indicating an outward movement. The physical parameters of the outflows at different velocities in the Cone region were calculated, and the results showed that low velocity gas possesses the most energy and luminosity. The comparison of the total energy and luminosity of the outflow with the turbulent energy and luminosity of the molecular cloud suggests that the outflows may be a significant factor in influencing the turbulence in the Cone region.

Key words ISM (interstellar medium): outflows, ISM: clouds, stars: formation, stars: activity

附录

A1 分子外向流的速度通道图

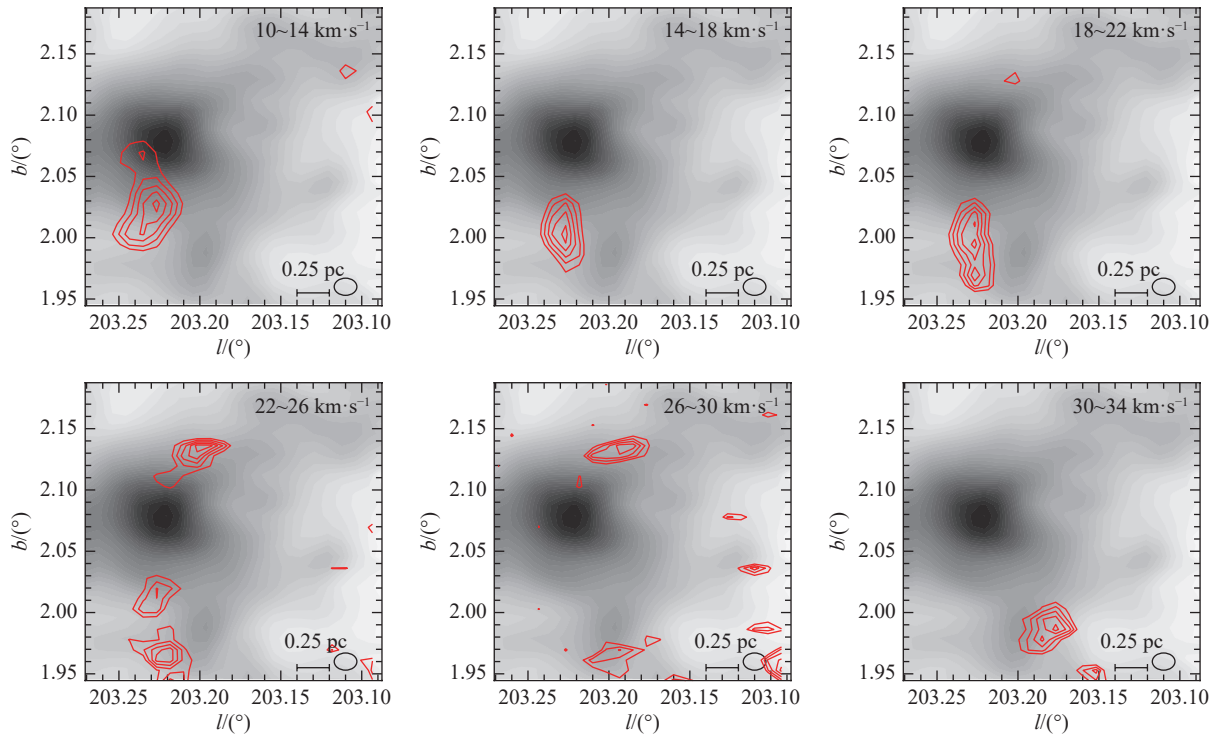


图 A.1 Spokes区域 ^{12}CO 红瓣的速度通道图, 底图为 ^{13}CO 分子谱线积分强度图. 每个通道的速度显示在每个图的右上角. 每个通道红瓣的等高线值是每个红瓣其峰值强度的40%–90%. 右下角是波束大小(黑色圆圈)和pc标度.

Fig. A.1 The red lobe of the ^{12}CO velocity channel in Spokes region. The background is the integrated intensity map of the ^{13}CO molecular spectral. The speed of each channel is shown in the top right corner of each panel. The contour levels of the red lobes are from 40%–90% of the peak intensity of each lobe. In the lower right corner are the beam size (black circle) and pc scale.

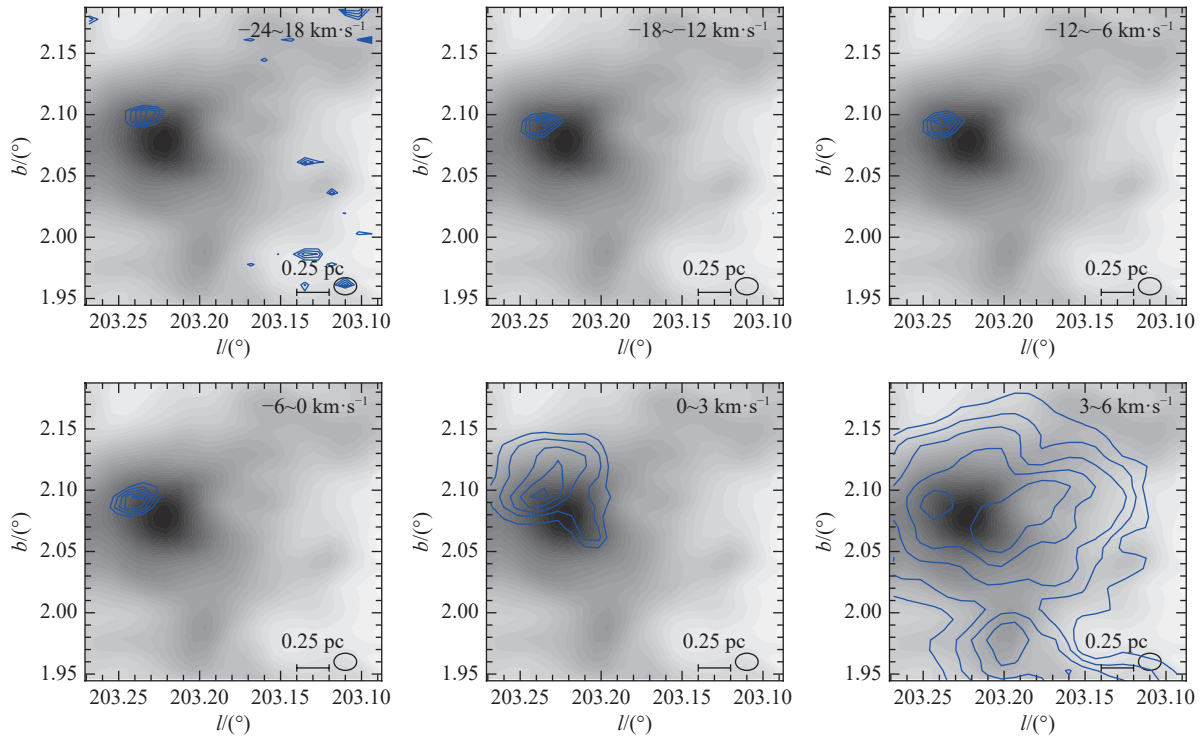


图 A.2 Spokes区域 ^{12}CO 蓝瓣的速度通道图, 底图为 ^{13}CO 分子谱线积分强度图. 每个通道的速度显示在每个图的右上角. 每个通道蓝瓣的等高线值是每个蓝瓣其峰值强度的40%–90%. 右下角是波束大小(黑色圆圈)和pc标度.

Fig. A.2 The blue lobe of the ^{12}CO velocity channel in Spokes region. The background is the integrated intensity map of the ^{13}CO molecular spectral. The speed of each channel is shown in the top right corner of each panel. The contour levels of the blue lobes are from 40%–90% of the peak intensity of each lobe. In the lower right corner are the beam size (black circle) and pc scale.

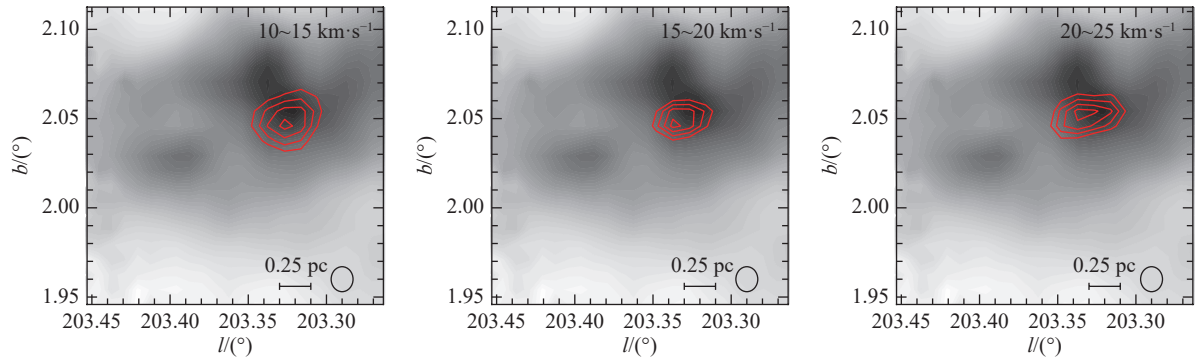


图 A.3 Cone (C)区域 ^{12}CO 红瓣的速度通道图, 底图为 ^{13}CO 分子谱线积分强度图. 每个通道的速度显示在每个图的右上角. 每个通道红瓣的等高线值是每个红瓣其峰值强度的40%–90%. 右下角是波束大小(黑色圆圈)和pc标度.

Fig. A.3 The red lobe of the ^{12}CO velocity channel in Cone (C) region. The background is the integrated intensity map of the ^{13}CO molecular spectral. The speed of each channel is shown in the top right corner of each panel. The contour levels of the red lobes are from 40%–90% of the peak intensity of each lobe. In the lower right corner are the beam size (black circle) and pc scale.

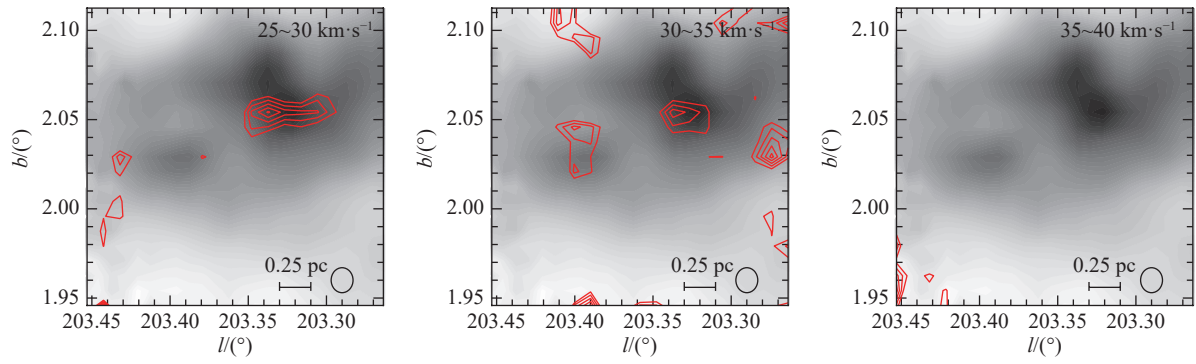


图 A.3 续

Fig. A.3 Continued

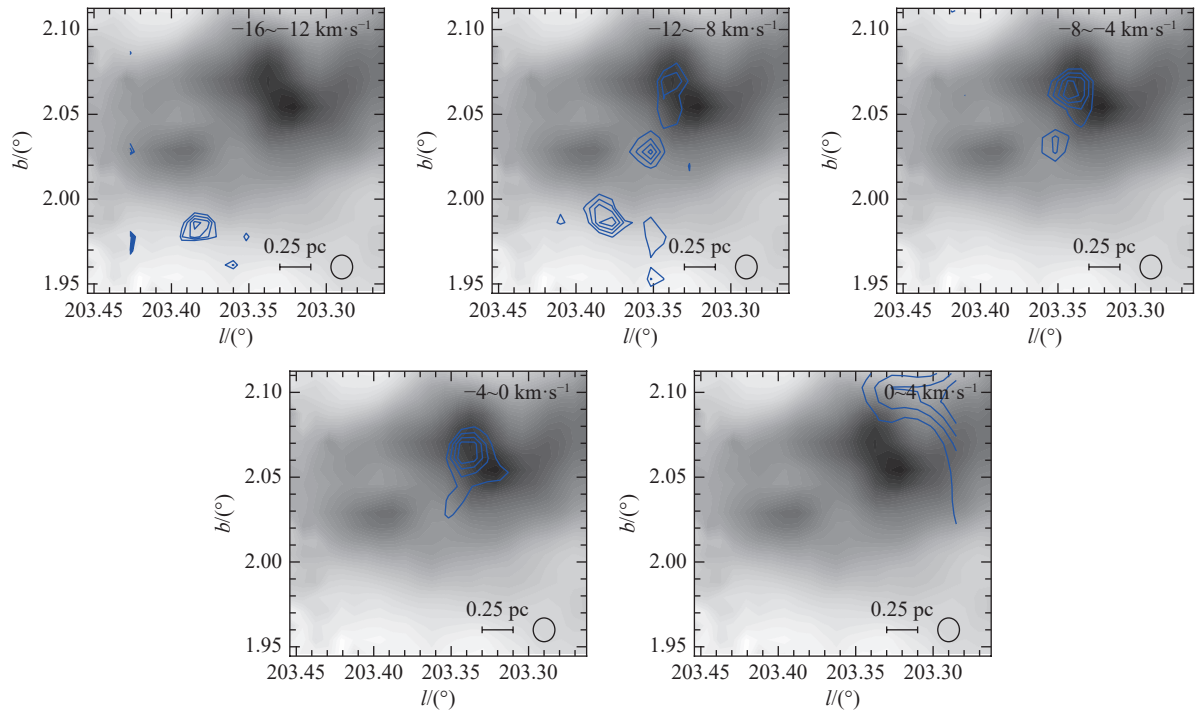


图 A.4 Cone (C)区域 ^{12}CO 蓝瓣的速度通道图, 底图为 ^{13}CO 分子谱线积分强度图. 每个通道的速度显示在每个图的右上角. 每个通道蓝瓣的等高线值是每个蓝瓣其峰值强度的40%~90%. 右下角是波束大小(黑色圆圈)和pc标度.

Fig. A.4 The blue lobe of the ^{12}CO velocity channel in Cone (C) region. The background is the integrated intensity map of the ^{13}CO molecular spectral. The speed of each channel is shown in the top right corner of each panel. The contour levels of the blue lobes are from 40%~90% of the peak intensity of each lobe. In the lower right corner are the beam size (black circle) and pc scale.

A2 分子外向流物理参数的计算过程

估计外向流的质量, 我们使用Snell等^[42]的方法. 假设在局部热力学平衡条件下, 高速气体为光学薄, 激发温度(T_{ex})为 30 K, $X(^{12}\text{CO})=[^{12}\text{CO}]/[\text{H}_2] \approx 10^{-4}$, X 为丰度. 由 ^{12}CO 示踪的 H_2 的柱密度为:

$$N_{\text{H}_2} = 4.2 \times 10^{17} \frac{T_{\text{ex}}}{e^{-5.5/T_{\text{ex}}}} \int T_{\text{mb},12} dv. \quad (\text{A.1})$$

积分是谱线的蓝翼和红翼的速度范围.

外向流气体的质量为:

$$M_{\text{lobe}} = \mu m_{\text{H}} A_{\text{lobe}} N_{\text{H}_2}. \quad (\text{A.2})$$

其中, A_{lobe} 是蓝瓣和红瓣投影到天空上的面积, 由外流瓣峰值强度的50%确定;

对于分子外向流速度(外向流瓣相对核成分中心的相对速度), 计算公式^[2]为:

$$\langle \Delta v_{\text{lobe}} \rangle = \frac{\sum_i (v_i - v_{\text{peak}}) T_i \Delta v_{\text{res}}}{\sum_i T_i \Delta v_{\text{res}}}. \quad (\text{A.3})$$

其中, i 和 T_i 分别是蓝瓣和红瓣线翼的通道编号和

通道上的主波束温度, v_i 是该通道编号对应的速度, v_{peak} 是谱线的中心速度, Δv_{res} 是通道的速度分辨率.

分子外向流的动量、能量、力学光度和动力学演化时标分别为:

$$P_{\text{lobe}} = \sum_{A_{\text{lobe}}} M_{\text{lobe}} \langle \Delta v_{\text{lobe}} \rangle. \quad (\text{A.4})$$

$$E_{\text{lobe}} = \frac{1}{2} \sum_{A_{\text{lobe}}} M_{\text{lobe}} \langle \Delta v_{\text{lobe}}^2 \rangle. \quad (\text{A.5})$$

$$L_{\text{lobe}} = E_{\text{lobe}} / t_{\text{lobe}}. \quad (\text{A.6})$$

$$t_{\text{lobe}} = l_{\text{lobe}} / \Delta v_{\text{max}}. \quad (\text{A.7})$$

其中, $\langle \Delta v_{\text{lobe}}^2 \rangle = \frac{\sum_i (v_i - v_{\text{peak}})^2 T_i \Delta v_{\text{res}}}{\sum_i T_i \Delta v_{\text{res}}}$, 是蓝瓣和红瓣速度的平方, l_{lobe} 是外向流的尺度, Δv_{max} 是蓝瓣和红瓣的最大速度.