

一个大质量恒星形成复合体的动力学性质*

周愉欣^{1,2} 徐 焯^{3,4†} 加尔肯·叶生别克^{2,4,5‡} 刘德剑³ 周建军^{2,4,5}
何玉新^{2,4,5} 吴 刚^{2,4,5} 李光辉^{2,5}

(1 新疆大学物理科学与技术学院 乌鲁木齐 830046)

(2 中国科学院新疆天文台 乌鲁木齐 830011)

(3 中国科学院紫金山天文台 南京 210023)

(4 中国科学院射电天文重点实验室 南京 210023)

(5 新疆射电天体物理重点实验室 乌鲁木齐 830011)

摘要 恒星形成于分子云之中, 分子外向流是恒星形成正在进行的重要动力学特征, 也是研究和认识恒星形成的重要切入点. 利用紫金山天文台青海观测站德令哈13.7 m毫米波望远镜, 采用5种分子谱线探针(包括 ^{12}CO 、 ^{13}CO 、 C^{18}O 、 HCO^+ $J=1-0$ 和 CS $J=2-1$, J 为角动量量子数), 对一个包含IRAS 19230+1506、IRAS 19232+1504和G050.3179-00.4186这3个源的大质量恒星形成复合体进行了成图观测研究. 通过对以上分子谱线数据并结合红外波段巡天数据的分析, 在这3个源中首次探测到了分子外向流活动, 并确定了分子外向流的中心驱动源. 最后对这3个源进行了分子外向流相关物理量参数的计算, 分析了这些物理量参数之间的关系, 结果表明分子外向流的性质与中心驱动源的性质息息相关.

关键词 恒星: 形成, 星际介质: 云, 星际介质: 分子, 星际介质: 恒星

中图分类号: P154; 文献标识码: A

1 引言

恒星形成研究是天体物理学的基本问题之一, 该研究既有助于星系结构和演化的理解, 又关系到行星的形成, 所以在天体起源的研究中, 恒星形成研究起着枢纽作用^[1]. 恒星形成于分子云中, 同时又通过星风、物质、大质量恒星的UV (UltraViolet)辐射、超新星爆发等过程动态地改变着其母体分子云的环境. 换言之, 恒星形成的每一个过程都会在母体分子云中留下痕迹, 我们可以通过对这

些痕迹的诊断分析最终描绘出恒星形成的完整图像. 因此, 对分子云物理化学环境的研究便成了我们了解恒星形成过程的必由之路. 由于分子云中尘埃的消光作用使得光学和近红外的观测受到严重限制, 然而这却是毫米、亚毫米波段的用武之地. 毫米、亚毫米观测所研究的主要对象是分子云及其中发生的恒星形成过程中的各种成协现象^[2].

目前小质量恒星形成的过程已经达成普遍共识, 但是关于大质量恒星形成机制的细节仍然

2021-09-14收到原稿, 2022-09-07收到修改稿

*新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2019D01B55)、中国科学院西部之光-西部青年学者项目(2021-XBQNXZ-028, 2020-XBQNXZ-017)、2019年自治区高层次人才引进工程(自治区柔性人才徐焯)、2020年自治区高层次人才引进工程(自治区柔性人才高煜)资助

†xuye@pmo.ac.cn

‡Jarken@xao.ac.cn

不清楚, 所以绘制出大质量恒星形成的过程图是一项极具挑战性的工作^[3-4]. 为了实现这一目标, 研究分子云的动力学性质是至关重要的. 同时分子外向流出现在大质量恒星形成的重要阶段, 是恒星形成早期阶段普遍存在的现象^[5]. Zuckerman等^[6]和Kwan等^[7]于1976年用高灵敏度的观测方法, 在恒星形成区-猎户座中测到第一个分子外向流. 此后分子外向流的搜寻和研究蓬勃开展, 无论在大质量恒星形成区, 还是在小质量年轻星体周围, 均探测到了分子外向流. 随后许多研究人员对大质量恒星形成区中的分子外向流进行了研究^[8-13]. 在这些研究中, 通常只使用了一种分子探针来示踪分子外向流, 然而分子外向流需要用多种分子探针来进行完整表征. 因此, 为了更加全面地了解分子外向流的物理性质, 有必要对多种分子探针所示踪的分子外向流进行系统研究^[14].

在这项工作中, 我们使用紫金山天文台青海观测站德令哈13.7 m毫米波望远镜对一个大质量恒星形成复合体进行了¹²CO、¹³CO、C¹⁸O、HCO⁺和CS的成图观测研究. 本文的CO和HCO⁺分子谱线均为 $J = 1 - 0$, CS均为 $J = 2 - 1$, 下文将角量子数省略. 图1是整个观测区域在中红外波段下的连续谱辐射图. 蓝色背景代表4.5 μm 的延展辐射, 这种延展辐射主要由大质量年轻星外向流的反馈与星际介质碰撞而产生的激波激发CO和H₂的能级跃迁而形成的; 绿色背景是8 μm 的连续谱辐射, 主要来自有机大分子多环芳烃(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs), 是其吸收大质量年轻恒星的远紫外光子激发产生的; 红色背景是24 μm 的辐射, 主要来自热尘埃的连续谱辐射.

在以往的研究中, 这个复合体分子云主要由3个源组成, 分别被命名为IRAS 19230+1506^[15-17]、IRAS 19232+1504^[17]和G050.3179-00.4186^[17], 在图1中使用红色箭头标出. 3个源的基本信息列在表1中, 其中 l 和 b 分别表示银经和银纬, M 为源的质量, M_{\odot} 为太阳质量. 各个源的气体质量是由德令哈13.7 m毫米波望远镜观测的¹²CO分子谱线计算得到的, 计算方法详见文献^[18]和附录2. Johnston等^[17]在2009年利用中红外、1.1 mm、3.6 cm和分子谱线的观测数据研究了复合体分子云的物理性质和恒星形成

活动. 研究结果表明IRAS 19230+1506附近2.5''处存在一个HII区, 并给出了G050.3179-00.4186是一个大质量恒星形成区的观测证据. 但在IRAS 19232+1504中, 由于没有探测到热尘埃和电离气体的存在, 他们认为这个源可能是宁静的或处于恒星形成的早期阶段. 另外, 他们认为IRAS 19230+1506中还可能存在分子外向流, 但未进行证认. 随后Retes-Romero等^[16]在2020年中指出我们所研究的复合体是一个位于1.3 kpc处的红外暗云, 线尺度约为4.2 pc. 此外, 在第3节中, 我们在3个源中均探测到了双极外向流活动, 进一步证实此复合体位于运动学距离的近距离上(~ 1.3 kpc).

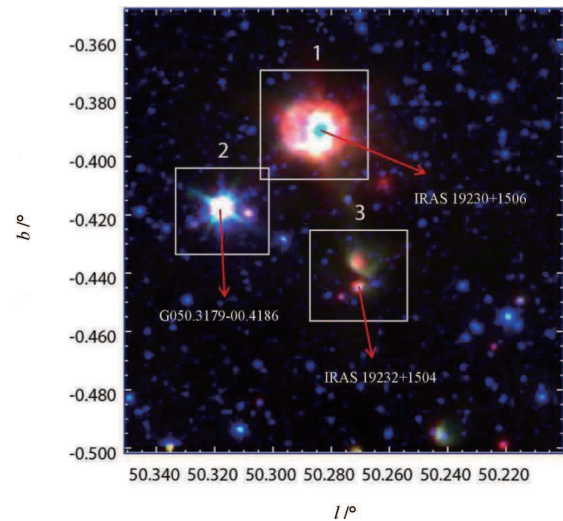


图1 复合体分子云的中红外辐射. 由Spitzer-IRAC (Infrared Array Camera)和MIPSGAL (Galactic Legacy Infrared Mid-Plane Survey Extraordinaire)数据叠加的三色图(4.5 μm 为蓝色, 8 μm 为绿色, 24 μm 为红色). 3个波段的数据采用的数值范围都是从最小到最大, 采用的比例是线性的. 白色框表示后续我们主要分析的重点区域. 另外, 4.5 μm 辐射既包括恒星形成区的延展辐射, 也包括来自背景和前景星的辐射.

Fig. 1 Mid-infrared radiation of complex molecular clouds. A three-color plot (Blue for 4.5 μm , Green for 8 μm , Red for 24 μm) overlaid with Spitzer-IRAC and MIPSGAL data. The range of values used in the data of the three bands is from the smallest to the largest, and the proportion used is linear. The white box represents the key areas of our subsequent analysis. In addition, 4.5 μm radiation includes both extended radiation from star-forming regions and radiation from background and foreground stars.

表 1 源的基本信息
Table 1 Basic information of sources

	Source name	$l/^\circ$	$b/^\circ$	M/M_\odot
1	IRAS 19230+1506	50.28	-0.39	85
2	G050.3179-00.4186	50.31	-0.41	44
3	IRAS 19232+1504	50.27	-0.44	50

虽然前人对这个复合体中的3个源有了一定的研究, 但是对它动力学性质的认识不够清晰. 本研究首次对这个复合体开展5种分子谱线(^{12}CO 、 ^{13}CO 、 C^{18}O 、 HCO^+ 和 CS)成图观测, 对这个大质量恒星形成复合体的动力学性质进行系统研究. 其中分子谱线 C^{18}O 主要用来示踪分子云核, 其余4种分子谱线 ^{12}CO 、 ^{13}CO 、 HCO^+ 和 CS 用来示踪复合体分子云中的外向流. 在多种分子谱线的观测研究中, 可以更为清晰地了解分子气体的分布、分子云动力学状态等性质, 从而全面了解分子云的恒星形成活动. 文章的其余部分如下: 在第2节介绍了数据观测和数据处理; 第3节展示出了结果和相关的物理量参数计算; 第4节对工作进行了总结.

2 观测与数据处理

2021年1月11日至17日, 我们使用紫金山天文台青海观测站德令哈13.7 m毫米波望远镜以 $l = 50.28^\circ$, $b = -0.45^\circ$ 为中心进行了 $10' \times 10'$ 的OTF (On-The-Fly)成图观测. 其中1月11日至13日观测了 ^{12}CO 、 ^{13}CO 和 C^{18}O 这三条分子谱线; 1月14日至15日观测了 HCO^+ 分子谱线; 1月16日至17日观测了 CS 分子谱线. 该望远镜采用了9波束超导成像频谱仪阵列, 工作模式为双边带分离模式^[18], 其中分子谱线 ^{12}CO 、 HCO^+ 、 CS 在上边带, ^{13}CO 和 C^{18}O 在下边带. 望远镜还采用了快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)频谱仪, 该频谱仪将1 GHz带宽分为了16384个通道, 每个通道为61 kHz. 使用OTF观测模式, 以恒定的速率沿银经和银纬方向隔行扫描, 扫描间隔为 $15''$, 接收机每隔0.3 s记录一次数据^[19], 观测到的数据会被网格化为 $30''$ 的像素单元. 最终所有数据都通过GILDAS

¹<http://www.iram.fr/IRAMFR/GILDAS>.

²<http://www.radioast.nsd.cn/english/zhuangtaibaogao.php>.

(Grenoble Image and Line Data Analysis Software)¹软件中的Class和Greg软件包处理得到.

文章中给出的所有结果均表示为主波束天线温度 $T_{\text{mb}} = T_{\text{A}}^*/\eta_{\text{mb}}$, 其中 T_{A}^* 是经过大气改正的天线温度, η_{mb} 是望远镜的主波束效率. 在观测中, 每种分子谱线的典型的系统温度 T_{sys} 也都不一样. 关于望远镜的工作状态和上述参数详情参见紫金山天文台青海观测站的最新状态报告². 表2中列出了分子谱线观测的基本参数, 其中, Lines为分子谱线种类, Frequency是谱线的静止频率, HPBW (Half-Power BeamWidth)是半功率波束宽度, dV 是速度分辨率. 由于3个源在同一个观测区域内, 所以我们对观测区域的每种分子探针进行了主波束噪音均方根(root mean square, rms)的计算: ^{12}CO 分子谱线的rms约为200 mK、 ^{13}CO 分子谱线的rms约为95 mK、 C^{18}O 分子谱线的rms约为91 mK、 HCO^+ 分子谱线的rms约为95 mK、 CS 分子谱线的rms约为93 mK.

表 2 分子谱线观测的基本参数
Table 2 Basic observation parameters of the observed molecular line

Lines	Frequency /GHz	T_{sys} /K	η_{mb}	HPBW /"	$dV /(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$
^{12}CO	115.27	237	0.49	49	0.16
^{13}CO	110.20	143	0.54	51	0.17
C^{18}O	109.78	143	0.54	52	0.17
HCO^+	88.18	115	0.63	60	0.21
CS	97.98	120	0.64	55	0.18

3 结果与分析

3.1 分子谱线成图结果

我们对大质量恒星形成复合体的观测范围约为 $10' \times 10'$. 我们采用相对坐标的方式进行绘制, 其中心位置(0,0)为 $l = 50.28^\circ$; $b = -0.45^\circ$, 然后分别对5种分子谱线的积分强度 I 进行成图, 结果显示在图2 (a)-(e). 5种分子谱线的速度积分范围

都是 $10\text{--}21\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$. 对于 ^{12}CO 分子谱线的轮廓图2 (a)中黑色等高线由外向里的值为 $3\text{--}88\text{ K}\cdot\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$, 步长为 $6.5\text{ K}\cdot\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$. 对于 ^{13}CO 分子谱线的轮廓图2 (b)中黑色等高线由外向里的值为 $1.5\text{--}15\text{ K}\cdot\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$, 步长为 $1.2\text{ K}\cdot\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$. 对于 HCO^+ 分子谱线的轮廓图2 (c)中黑色等高线由外向里的

值为 $0.5\text{--}5.6\text{ K}\cdot\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$, 步长为 $0.5\text{ K}\cdot\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$. 对于 CS 分子谱线的轮廓图2 (d)中黑色等高线由外向里的值为 $0.4\text{--}3.7\text{ K}\cdot\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$, 步长为 $0.4\text{ K}\cdot\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$. 对于 C^{18}O 分子谱线的轮廓图2 (e)中黑色等高线由外向里的值为 $0.35\text{--}1.4\text{ K}\cdot\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$, 步长为 $0.35\text{ K}\cdot\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$.

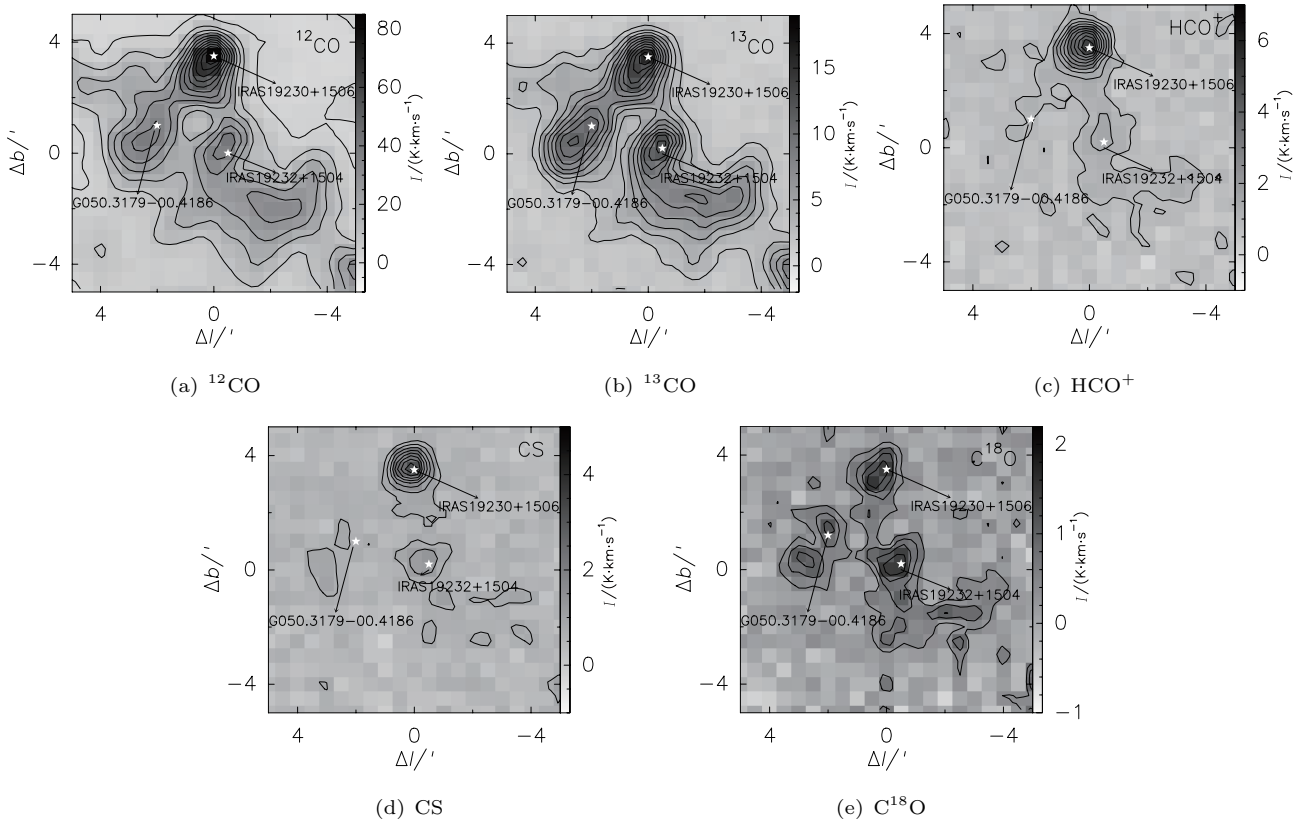


图 2 5种分子谱线的积分强度图. 中心位置(0,0)为 $l = 50.28^\circ$; $b = -0.45^\circ$. 速度积分范围 $10\text{ km}\cdot\text{s}^{-1} < V_{\text{LSR}} < 21\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, V_{LSR} 为视向速度. Δb 和 Δl 为相对坐标, I 为积分强度. 每种分子谱线的名称都在子图底部给出. 等高线详细请见上文描述. 3个白色星号分别代表IRAS 19230+1506、IRAS 19232+1504和G050.3179-00.4186.

Fig. 2 Integrated intensity plot of five molecular lines. The central position (0,0) is $l = 50.28^\circ$; $b = -0.45^\circ$. Speed integral range $10\text{ km}\cdot\text{s}^{-1} < V_{\text{LSR}} < 21\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, V_{LSR} is the radial velocity. Δb and Δl are relative coordinates, and I is the integral intensity. The name of each molecular line is given at the bottom of the panel. The contour lines are described in detail above. The three white asterisks represent IRAS 19230+1506, IRAS 19232+1504 and G050.3179-00.4186.

从图2成图结果中可以看出, IRAS 19230+1506的信号强度要比其他两个源的都要强. 另外, CO及其同位素分子谱线和CS分子谱线在这3个源中均被探测到, 然而 HCO^+ 分子谱线只在IRAS 19230+1506和IRAS 19232+1504中被探测到, 而在

G050.3179-00.4186中未被明显探测到(信号的峰值强度小于3倍的噪声).

通过对比5种分子谱线的积分强度图可以发现, ^{12}CO 和 ^{13}CO 分子谱线的辐射区域比另外3种分子谱线的辐射区域都要延展. ^{12}CO 光学厚度较

大, 可用于追踪相对高速的外向流气体^[20]. ^{13}CO 比 ^{12}CO 光薄, 穿透力强, 能探测到较深的区域, 一般作为气体柱密度的主要探针, 还可用于追踪相对低速的外向流^[21–22]. C^{18}O 、 HCO^+ 和 CS 这三条分子谱线都是用来示踪致密区域的分子探针, 不过相较于 C^{18}O 分子谱线, HCO^+ 和 CS 分子谱线示踪更为致密的区域. 这5种分子谱线辐射区域的不同, 可能跟各分子谱线的化学性质和临界激发密度有关. 除此之外 HCO^+ 分子谱线还广泛用作研究分子云的塌缩活动^[23], 也经常用来研究分子外向流, 可用于追踪相对高速的外向流. CS 分子谱线一般在(亚)毫米波段容易被观测到且光深不大, 还能用于追踪相对低速的外向流^[24].

3.2 分子谱线特征

我们对观测区域内的 ^{12}CO 和 ^{13}CO 分子谱线($> 5\sigma$, σ 为分子谱线的噪声水平)都采用moment-1 (以谱线强度为权重的加权平均速度)的方法得到了分子云的速度场, 在图3中画出了 ^{12}CO 和 ^{13}CO 分子谱线的速度分布. 这样能更直观地了解分子云的运动学性质. 两幅图上均叠加了对应分子的积分强度轮廓, 背景颜色反映了速度的变化. 通过对比发现, 分子谱线 ^{12}CO 和 ^{13}CO 的速度分布相似, 速度梯度变

化主要集中在 $13\text{--}16\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间.

在图4中描绘出了3个源在发射峰值位置处的5种分子谱线轮廓. 在没有改变谱线轮廓的条件下, 对 C^{18}O 、 HCO^+ 和 CS 的发射峰谱线平滑4个通道用来提高信噪比, 而 ^{12}CO 和 ^{13}CO 谱线的信噪比较高, 则未采取平滑措施. 表3列出了每个源在发射峰处分子谱线的基本参数. 其中, T_{mb} 是主波束温度, V_{peak} 是峰值速度, ΔV 是谱线线宽. 通过对比发现, IRAS 19230+1506每种分子的线宽和主波束温度都大于另外两个源, 说明这个源的内部恒星活动相对剧烈, 发生分子外向流活动的可能性较大, 这也证实了Johnston等^[17]认为IRAS 19230+1506中可能存在分子外向流的猜想. 这3个源中的每种分子谱线线宽存在如下关系: $\Delta V_{^{12}\text{CO}} > \Delta V_{\text{HCO}^+} > \Delta V_{\text{CS}} \approx \Delta V_{^{13}\text{CO}} > \Delta V_{\text{C}^{18}\text{O}}$, 谱线线宽使用 ΔV 表示, 下标为对应的分子谱线. 这一结果与Liu等^[24]在研究分子外向流活动中的结果一致. 同一源中的5种分子谱线所示踪的速度基本一致, 其中IRAS 19230+1506中心速度为 $16\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$; IRAS 19232+1504中心速度为 $14\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$; G050.3179–0.4186的中心速度为 $13\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, 与图3速度分布结果相对应.

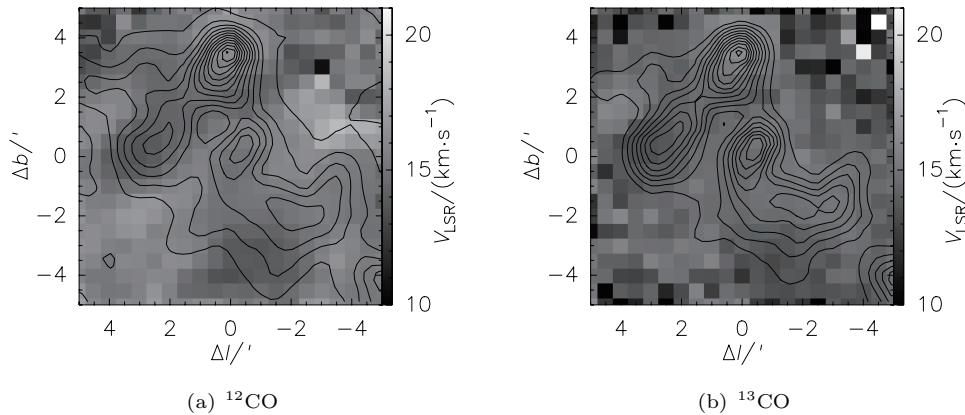


图3 ^{12}CO 和 ^{13}CO 分子谱线的视向速度分布图. 中心位置(0,0)为 $l = 50.28^\circ$; $b = -0.45^\circ$. V_{LSR} 的范围为 $10\text{--}21\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$. 等高线以 ^{12}CO 和 ^{13}CO 的积分强度为准.

Fig. 3 Velocity profiles of ^{12}CO and ^{13}CO molecular lines. The central position (0,0) is $l = 50.28^\circ$; $b = -0.45^\circ$. The velocity range of V_{LSR} is $10\text{--}21\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$. The contour lines are based on the integral intensities of ^{12}CO and ^{13}CO .

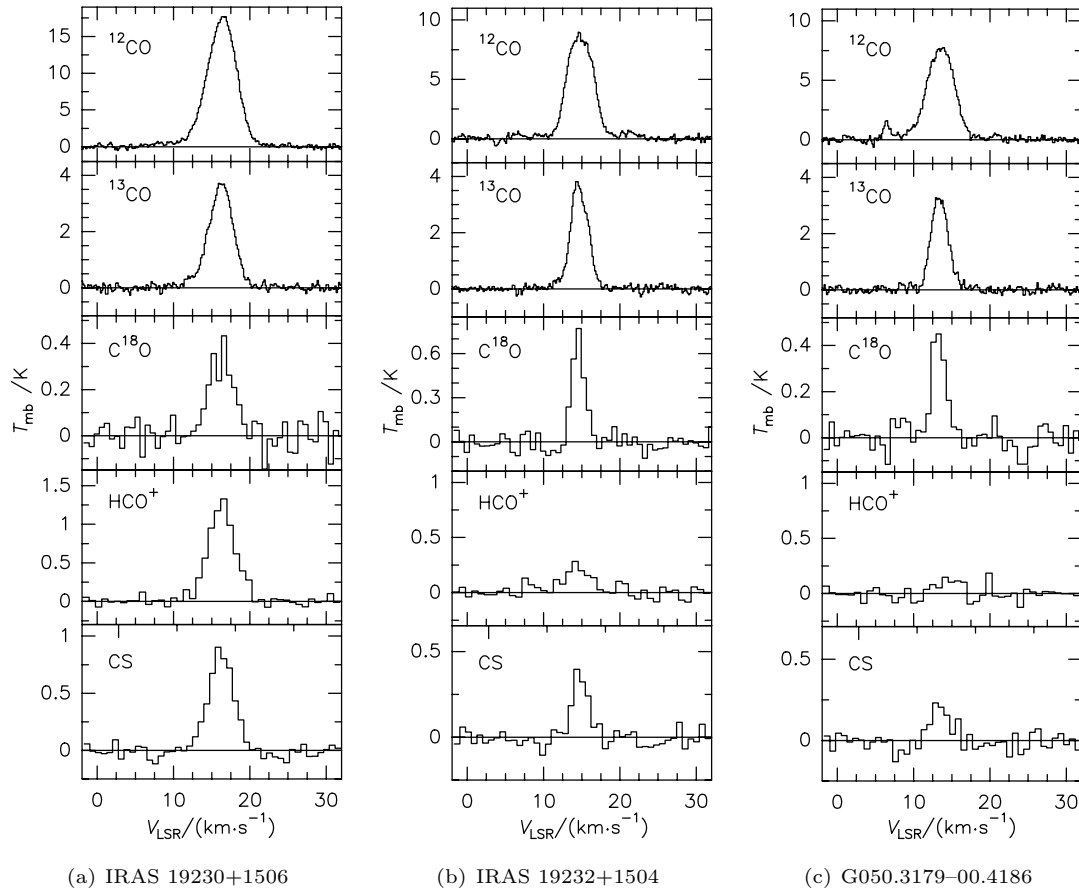


图 4 3 个源的分子谱线跃迁轮廓图. 分子谱线是在 $C^{18}O$ 发射峰位置处获取得到, 每个源的名称在子图底部给出. 从上到下依次是 ^{12}CO 、 ^{13}CO 、 $C^{18}O$ 、 HCO^+ 和 CS .

Fig. 4 Molecular lines transition profiles of three sources. The molecular lines were obtained at the position of the $C^{18}O$ emission peak. The name of each source is given at the bottom of each panel. From top to bottom the lines are ^{12}CO , ^{13}CO , $C^{18}O$, HCO^+ and CS respectively.

表 3 分子谱线的基本参数
Table 3 Basic parameters of the molecular lines

Lines	IRAS 19230+1506			IRAS 19232+1504			G050.3179-00.4186		
	T_{mb} /K	V_{peak} /($km \cdot s^{-1}$)	ΔV /($km \cdot s^{-1}$)	T_{mb} /K	V_{peak} /($km \cdot s^{-1}$)	ΔV /($km \cdot s^{-1}$)	T_{mb} /K	V_{peak} /($km \cdot s^{-1}$)	ΔV /($km \cdot s^{-1}$)
^{12}CO	17.6	16.3	4.4	9.0	14.8	3.8	7.9	13.5	4.1
^{13}CO	3.7	16.2	3.7	3.7	14.7	2.8	3.3	13.4	2.6
$C^{18}O$	0.4	16.3	3.6	0.7	14.5	1.8	0.5	13.3	2.0
HCO^+	1.3	16.3	4.1	0.3	14.4	3.1	-	-	-
CS	0.9	16.3	3.8	0.4	14.7	2.3	0.2	13.4	2.7

3.3 分子外向流形态

我们利用5种分子谱线的观测数据来研究这个大质量恒星形成复合体, 除去 $C^{18}O$ 分子谱线用来示踪致密云核外, 其余4种分子谱线(^{12}CO 、 ^{13}CO 、 HCO^+ 和 CS)都用来探测分子外向流. 通常判断分子外向流速度范围的方法是采取 $C^{18}O$ 谱线轮廓作为对比, 获得 ^{12}CO 谱线轮廓的线翼速度范围, 也就是我们需要的外向流速度范围. 具体的方法是先对 ^{12}CO 的谱线和 $C^{18}O$ 谱线进行强度的归一化, 然后再使用归一化之后的 ^{12}CO 谱线轮廓减去 $C^{18}O$ 谱线轮廓, 得到的速度突起就是红蓝瓣外向流的速度范围^[8, 22], 如图5阴影部分所示(其余的分子谱线图见附录1). 然后再根据红蓝瓣的速度范围画出红蓝瓣的积分强度图, 并沿着可能是外向流延展的方向画出位置-速度图, 并在位置-速度图上也标出了红蓝瓣的速度范围. 其余的分子谱线证认外向流的方法与 ^{12}CO 分子谱线一致. 表4中分别列出了3个源的外向流速度范围, Δv_r 和 Δv_b 分别为红/蓝瓣的速度范围. IRAS 19230+1506在这4种分子谱线的观测数据中都探测到了分子外向流, 而IRAS 19230+1506和G050.3179-00.4186只在 ^{12}CO 和 ^{13}CO 分子谱线的观测数据中探测到了分子外向流.

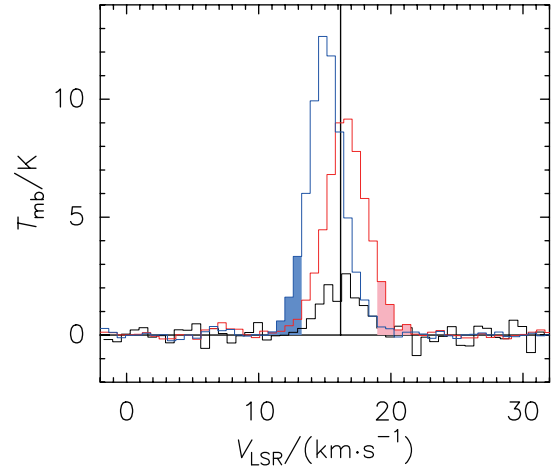


图5 IRAS 19230+1506中 ^{12}CO 分子外向流的红/蓝瓣谱线图. 黑色谱线为 $C^{18}O$ 峰值速度处的发射谱线, 对 T_{mb} 放大5倍以方便与 ^{12}CO 分子谱线做对比; 蓝色谱线是从蓝瓣发射区域的峰值提取出来的, 红色谱线是从红瓣发射区提取出来的; 黑色竖线表示 $C^{18}O$ 谱线的峰值速度. 图中阴影部分表示红/蓝瓣的速度范围.

Fig. 5 Red/blue lobe outflow for IRAS 19230+1506 of ^{12}CO molecular line. The black line is emission-peak position of the $C^{18}O$, and the T_{mb} is magnified five times to facilitate comparison with the ^{12}CO molecular line. The blue line is extracted from the peak of the blue lobe emission region. The red line is extracted from the red lobe emission region. The black vertical line represents the peak velocity of the $C^{18}O$. The shaded part of the figure indicates the velocity range of the red/blue lobes.

表4 分子外向流的红/蓝瓣速度范围
Table 4 Red/blue lobe velocity range of molecular outflow

Lines	IRAS 19230+1506		IRAS 19232+1504		G050.3179-00.4186	
	Δv_b /($km \cdot s^{-1}$)	Δv_r /($km \cdot s^{-1}$)	Δv_b /($km \cdot s^{-1}$)	Δv_r /($km \cdot s^{-1}$)	Δv_b /($km \cdot s^{-1}$)	Δv_r /($km \cdot s^{-1}$)
^{12}CO	(11, 13.5)	(19, 21)	(11, 12.5)	(17.5, 19)	(9, 11.5)	(16.5, 19)
^{13}CO	(12, 14)	(18.5, 20)	(11, 13)	(16.5, 18)	(10.5, 12)	(16, 17)
HCO^+	(12.5, 14)	(18.5, 20.5)	(-, -)	(-, -)	(-, -)	(-, -)
CS	(12.5, 14)	(18.5, 20)	(-, -)	(-, -)	(-, -)	(-, -)

红外波段的观测数据可以用来示踪分子云中的恒星形成活动^[25]. 因此, 我们利用红外卫星 WISE (Wide-field Infrared Survey Explorer)在 4.6、12和22 μm 波段的巡天数据, 并结合 $C^{18}O$ 分

子谱线示踪出的致密核的位置与IRAS点源表 Catalog2.1³来寻找这3个源的外向流中心驱动源. 在图6-8中, 我们将分子谱线的等值线图叠加在 WISE的三色图上, 并在图中用蓝色点标出分子

³<https://irsa.ipac.caltech.edu/Missions/iras.html>.

谱线 $C^{18}O$ 所示踪的致密核,即 $C^{18}O$ 分子谱线分别在这3个区域里面辐射最强的位置,白色五角星为IRAS源的位置.然后用肉眼来判断图中是否存在外向流中心驱动源,判断依据为红外源是否与 $C^{18}O$ 示踪出的致密核重叠,如果重叠则该外向流就是由与致密核成协的红外点源驱动的.最终得到了IRAS 19230+1506、IRAS 19232+1504和G050.3179-00.4186的外向流速度范围,同时给出了分子外向流红蓝瓣的积分强度图.

3.3.1 IRAS 19230+1506

图6 (a)-(d)分别给出了IRAS 19230+1506的 ^{12}CO 、 ^{13}CO 、 HCO^+ 和 CS 分子谱线的双极外向流结构.其中 ^{12}CO 分子谱线的蓝瓣速度范围为11-13.5 $km \cdot s^{-1}$,红瓣速度范围为19-21 $km \cdot s^{-1}$. ^{13}CO 分子谱线的蓝瓣速度范围为12-14 $km \cdot s^{-1}$,红瓣速度范围为18.5-20 $km \cdot s^{-1}$. HCO^+ 和 CS 分子谱线的蓝瓣速度范围为12.5-14 $km \cdot s^{-1}$,红瓣速度范围为18.5-20.5 $km \cdot s^{-1}$.从 HCO^+ 和 CS 分子谱线的红/蓝瓣成图结果可以看出,红蓝瓣偏离角度较小,几乎重叠在一起无法分离.造成此情况的原因有两个:一是因为使用的望远镜的空间分辨率相对较低,从而无法分辨开外向流的双极结构;二是因为分子外向流的方向本身是延着视线的方向,从而使蓝瓣部分和红瓣部分重叠在一起^[21].通过对比发现 HCO^+ 分子谱线示踪出的外向流波瓣相比于 CS 分子谱线的外向流波瓣比较大,其结构也更为延展,说明对于IRAS 19230+1506而言, HCO^+ 分子谱线比其他3种分子更适合探测该源的外向流特征.从图中可以看出, $C^{18}O$ 分子谱线所示踪的致密核位置与IRAS 19230+1506的位置有偏差,但是在误差范围内,所以本研究工作认为IRAS 19230+1506就是这个外向流的中心驱动源.

3.3.2 IRAS 19232+1504

图7 (a)-(b)分别给出了IRAS 19232+1504的 ^{12}CO 和 ^{13}CO 分子谱线的双极外向流结构.其中 ^{12}CO 分子谱线的蓝瓣速度范围为11-12.5 $km \cdot s^{-1}$,红瓣速度范围为17.5-19 $km \cdot s^{-1}$, ^{13}CO 分子谱线的蓝瓣速度范围为11-13 $km \cdot s^{-1}$,红瓣速度范围为16.5-18 $km \cdot s^{-1}$.外向流的方向沿西北-东南方向延展.通过对比发现, ^{12}CO 分子谱线示踪出外向流

的波瓣比 ^{13}CO 分子谱线的大并且更为延展,这说明 ^{12}CO 能追踪外部相对高速的外向流,而 ^{13}CO 追踪内部相对低速的外向流.遗憾的是 HCO^+ 和 CS 分子谱线未能示踪出这个源的外向流结构,原因可能是由于观测积分时间不足导致的谱线信噪比较低.从成图结果可以看出, $C^{18}O$ 分子谱线所示踪的致密核位置与IRAS 19232+1504的位置有偏差,但是在误差范围内,所以本研究工作认为IRAS 19232+1504就是这个外向流的中心驱动源.

3.3.3 G050.3179-00.4186

图8 (a)-(b)分别给出了G050.3179-00.4186的 ^{12}CO 和 ^{13}CO 分子谱线的双极外向流结构.其中 ^{12}CO 分子谱线的蓝瓣速度范围为9-11.5 $km \cdot s^{-1}$,红瓣速度范围为16.5-19 $km \cdot s^{-1}$, ^{13}CO 分子谱线的蓝瓣速度范围为10.5-12 $km \cdot s^{-1}$,红瓣速度范围为16-17 $km \cdot s^{-1}$.外向流的方向是沿西北-东南方向延展.同样在这个源中,也未探测到 HCO^+ 和 CS 分子谱线的外向流结构,原因可能是由于观测积分时间不足导致的谱线信噪比较低.从成图结果可以看出, $C^{18}O$ 分子谱线所示踪的致密核中心位于红蓝瓣等值线交叉的位置,且与WISE波段辐射区域基本重合,所以认为此外向流的驱动源位于致密核中心.

3.4 外向流的物理性质及分布

通过对这3个源的深度观测,我们计算了与它们相关外向流活动的物理参数,包括红蓝瓣的氢分子柱密度 N_{lobe} 、质量 M_{lobe} 、外向流速度(外向流瓣相对核成分中心速度的相对速度) $\langle \Delta v_{lobe} \rangle$ 、长度 L_{lobe} 、动量 P_{lobe} 、动能 E_{lobe} 、动力学时标 t_{lobe} 和机械光度(流出光度) $L_m(lobe)$.根据这些分子谱线计算出来的物理量参数总结在表5-7中.通过对比3个源的流出物理量参数发现,IRAS 19230+1506的流出物理量参数普遍比另外两个源的高,说明该源的内部活动剧烈,向外喷出的物质较多,损失率相对较大.这4种分子谱线计算出来的流出质量 M_{lobe} 大约都在几倍的太阳质量($M_{\odot} = 2.0 \times 10^{30} kg$);动量 P_{lobe} 大约为2.3 - 26.1 $M_{\odot} \cdot km \cdot s^{-1}$;动能 E_{lobe} 大约为4.2-84.4 $\times 10^{45} erg$;动力学时标 t_{lobe} 约为2.3-15.4 $\times 10^4 yr$; L_m 约为几倍的太阳光度($L_{\odot} = 3.845 \times 10^{33} erg \cdot s^{-1}$).上述计算所得外

向流的相关物理参数, 均落在Wu等^[26]和Li等^[13]大样本外向流的物理参数统计范围之中.

从IRAS 19230+1506、IRAS 19232+1504和G050.3179-00.4186这3个源的外向流物理参数中可以看出, 每种分子谱线计算得出的结果参数存

在明显差异. ^{13}CO 分子谱线计算结果普遍大于另外3种分子谱线计算结果. 对于同一个源使用不同分子谱线计算相同物理参数存在差异是由于不同分子的物理化学性质不同, 所示踪的区域不同所导致的.

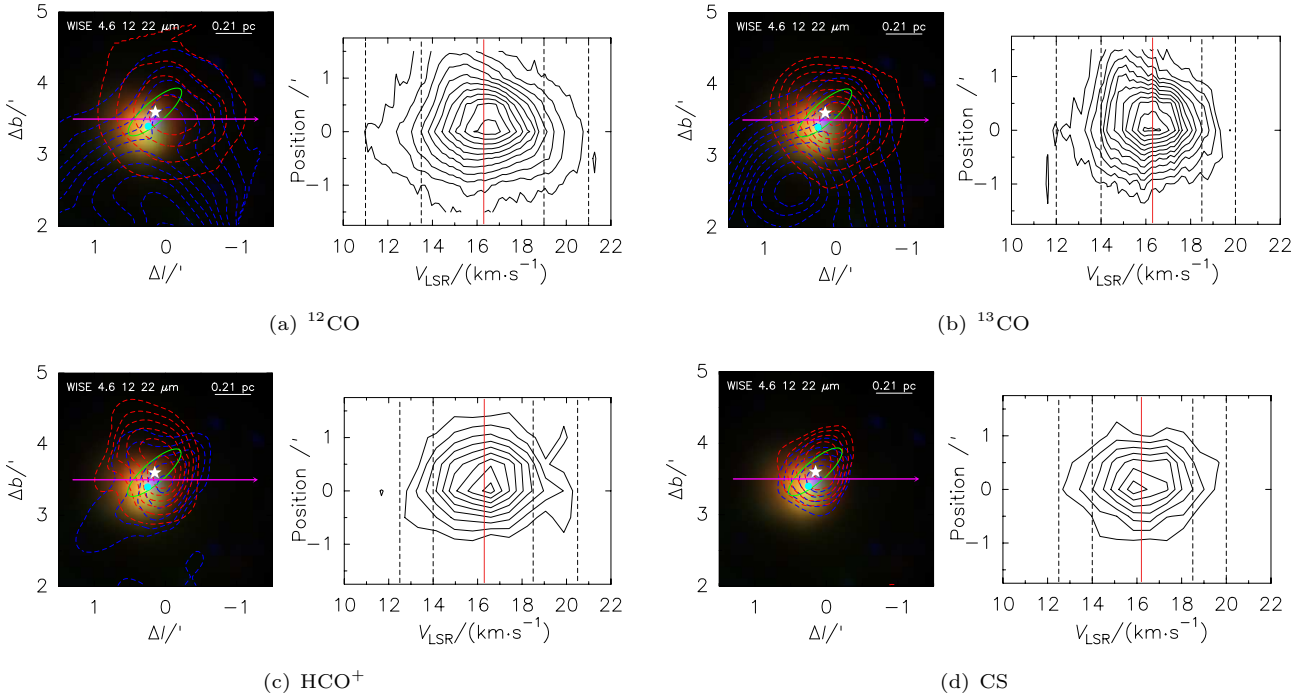


图6 IRAS 19230+1506分子外向流示意图. 图(a)左图是 ^{12}CO 分子谱线红/蓝瓣的积分强度图, 背景为WISE三色图, 其中蓝色为 $4.6\ \mu\text{m}$ 、绿色为 $12\ \mu\text{m}$ 、红色为 $22\ \mu\text{m}$. 等值线从 3σ ($\sigma = 0.27\ \text{K} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)开始以 5σ 为步长进行绘制增加. 蓝色点标出 C^{18}O 示踪出致密核的位置, 白色五角星为IRAS源的位置, 绿色椭圆为IRAS源的误差椭圆. 图(a)右图是沿着图(a)左图中紫色箭头方向的位置-速度图, 红线表示源的中心速度, 红/蓝瓣的速度范围我们用虚线划分出来. 其他子图表述跟图(a)一致. 不同的是图(b)中 ^{13}CO 的等值线从 8σ ($\sigma = 0.13\ \text{K} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)开始以 2σ 为步长增加. 图(c)中 HCO^+ 的等值线从 3σ ($\sigma = 0.14\ \text{K} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)开始以 σ 为步长增加. 图(d)中CS的等值线从 2σ ($\sigma = 0.12\ \text{K} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)开始以 0.5σ 为步长增加.

Fig.6 The diagram of molecular outflow in IRAS 19230+1506. The left figure of panel (a) is the integrated intensity map of the red/blue petals of the ^{12}CO molecular line, and the background is the WISE three-color figure, where the blue is $4.6\ \mu\text{m}$, the green is $12\ \mu\text{m}$, and the red is $22\ \mu\text{m}$. The contours are drawn in steps of 5σ starting at 3σ ($\sigma = 0.27\ \text{K} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$). The blue dot marks the position where C^{18}O traces the dense core, the white pentagonal star is the position of the IRAS source, and the green ellipse is the error ellipse of the IRAS source. The right figure of panel (a) shows the position-velocity figure along the direction of the purple arrow in the left figure, the red line shows the center velocity of the source, and the speed range of the red/blue petals is divided by dashed lines. The other subfigure representations are the same as in panel (a). The difference is that the ^{13}CO contours of panel (b) start at 8σ ($\sigma = 0.13\ \text{K} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$) and increase in steps of 2σ . The HCO^+ contours of panel (c) start from 3σ ($\sigma = 0.14\ \text{K} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$) and increase in steps of σ . The CS contours of panel (d) start at 2σ ($\sigma = 0.12\ \text{K} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$) and increase in steps of 0.5σ .

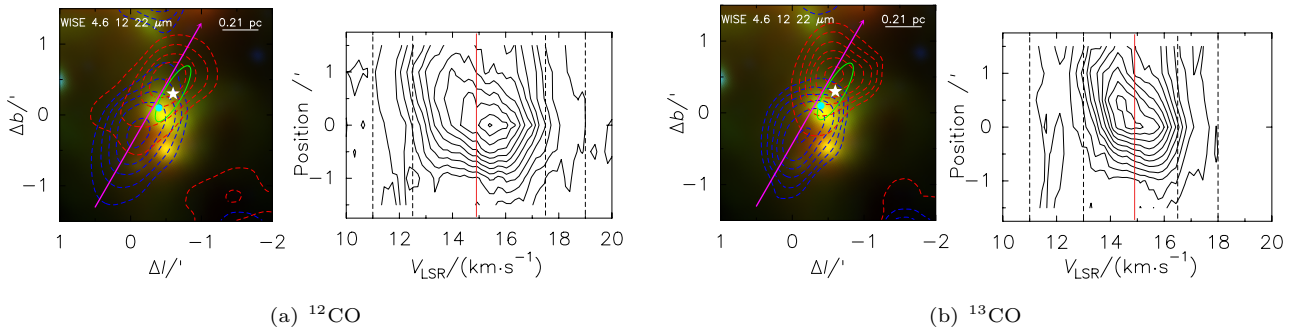


图 7 IRAS 19232+1504 分子外向流示意图. 图(a)左图是 ^{12}CO 分子谱线的红/蓝瓣的积分强度图, 背景为 WISE 三色图, 其中蓝色为 4.6 μm 、绿色为 12 μm 而红色为 22 μm . 等值线从 8σ ($\sigma = 0.27 \text{ K} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$) 开始以 3σ 为步长进行绘制增加, 蓝色点标出 C^{18}O 示踪出致密核的位置, 白色五角星为 IRAS 源的位置, 绿色椭圆为 IRAS 源的误差椭圆. 图(a)右图是沿着图(a)左图中紫色箭头方向的位置-速度图, 红线表示源的中心速度, 红/蓝瓣的速度范围我们用虚线划分出来. 图(b)中 ^{13}CO 等值线从 5σ ($\sigma = 0.13 \text{ K} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$) 开始以 σ 为步长增加. 其他表述跟图(a)一致.

Fig. 7 The diagram of molecular outflow in IRAS 19232+1504. The panel (a) left is the integrated intensity map of the red/blue petals of the ^{12}CO molecular line, and the background is the WISE three-color figure, where the blue is 4.6 μm , the green is 12 μm , and the red is 22 μm . The contours are drawn in steps of 3σ starting at 8σ ($\sigma = 0.27 \text{ K} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$). The blue dot marks the position where C^{18}O traces the dense core, the white pentagonal star is the position of the IRAS source, and the green ellipse is the error ellipse of the IRAS source. The panel (a) right shows the position-velocity figure along the direction of the purple arrow in the left figure, the red line shows the center velocity of the source, and the speed range of the red/blue petals is divided by dashed lines. The ^{13}CO contours of panel (b) start at 5σ ($\sigma = 0.13 \text{ K} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$) and increase in steps of σ . The other representations are the same as in panel (a).

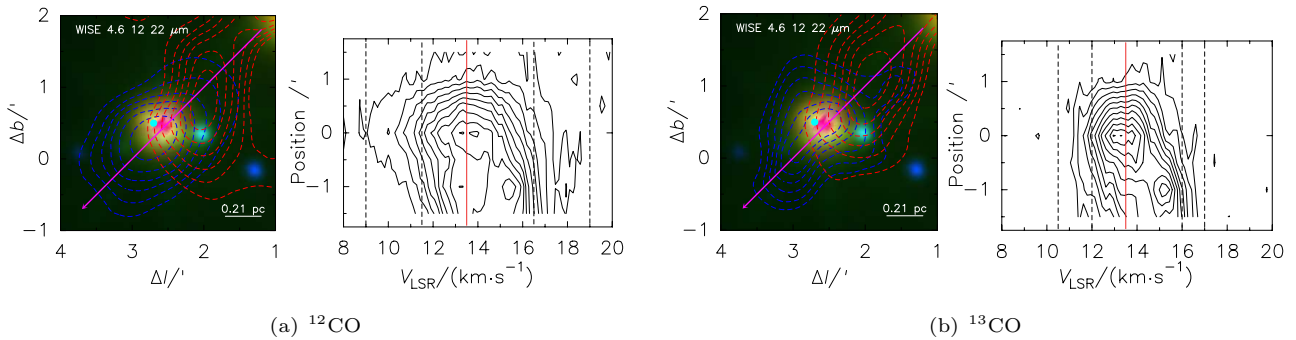


图 8 G050.3179-00.4186 分子外向流示意图. 图(a)左图是 ^{12}CO 红蓝瓣的积分强度图, 背景为 WISE 三色图, 其中蓝色为 4.6 μm 、绿色为 12 μm 而红色为 22 μm . 等值线从 3σ ($\sigma = 0.27 \text{ K} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$) 开始以 σ 为步长进行绘制增加, 蓝色点标出 C^{18}O 示踪出致密核的位置, 图(a)右图是沿着(a)左图中紫色箭头方向的位置-速度图, 红线表示源的中心速度, 红蓝瓣的速度范围我们用虚线划分出来. 图(b)中 ^{13}CO 等值线从 5σ ($\sigma = 0.13 \text{ K} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$) 开始以 σ 为步长增加. 其他表述跟图(a)一致.

Fig. 8 The diagram of molecular outflow in G050.3179-00.4186. The panel (a) left is the integrated intensity map of the red/blue petals of the ^{12}CO molecular line, and the background is the WISE three-color figure, where the blue is 4.6 μm , the green is 12 μm , and the red is 22 μm . The contours are drawn in steps of σ starting at 3σ ($\sigma = 0.27 \text{ K} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$). The blue dot marks the position where C^{18}O traces the dense core, the white pentagonal star is the position of the G050.3179-00.4186. The panel (a) right shows the position-velocity diagram along the direction of the purple arrow in the left figure, the red line shows the center velocity of the source, and the speed range of the red/blue petals is divided by dashed lines. The ^{13}CO contours of panel (b) start at 5σ ($\sigma = 0.13 \text{ K} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$) and increase in steps of σ . The other representations are the same as in panel (a).

表 5 IRAS 19230+1506 分子外向流的物理参数
Table 5 Physical parameters of molecular outflow in IRAS 19230+1506

Lines	Lobe	N_{lobe} $/(10^{20} \text{ cm}^{-2})$	M_{lobe} $/M_{\odot}$	$\langle \Delta v_{\text{lobe}} \rangle$ $/(km \cdot s^{-1})$	L_{lobe} $/pc$	P_{lobe} $/(M_{\odot} \cdot km \cdot s^{-1})$	E_{lobe} $/(10^{45} \text{ erg})$	t_{lobe} $/(10^4 \text{ yr})$	$L_{\text{m(lobe)}}$ $/L_{\odot}$
^{12}CO	blue	2.3	2.7	3.2	0.7	8.6	30.4	11.2	2.2
	red	3.3	3.6	3.1	0.5	11.2	35.3	8.3	3.5
^{13}CO	blue	20.6	8.7	3.0	0.6	26.1	84.4	9.4	7.3
	red	15.3	9.5	2.7	0.5	25.7	68.4	8.3	6.7
HCO^+	blue	15.9	4.9	2.8	0.7	13.7	42.5	15.4	2.3
	red	20.4	6.3	2.5	0.6	15.8	43.5	11.9	3.0
CS	blue	14.5	3.4	2.6	0.4	8.8	24.1	8.8	2.3
	red	12.6	2.9	2.2	0.5	6.4	14.8	8.2	1.5

表 6 IRAS 19232+1504 分子外向流的物理参数
Table 6 Physical parameters of molecular outflow in IRAS 19232+1504

Lines	Lobe	N_{lobe} $/(10^{20} \text{ cm}^{-2})$	M_{lobe} $/M_{\odot}$	$\langle \Delta v_{\text{lobe}} \rangle$ $/(km \cdot s^{-1})$	L_{lobe} $/pc$	P_{lobe} $/(M_{\odot} \cdot km \cdot s^{-1})$	E_{lobe} $/(10^{45} \text{ erg})$	t_{lobe} $/(10^4 \text{ yr})$	$L_{\text{m(lobe)}}$ $/L_{\odot}$
^{12}CO	blue	2.1	1.5	2.1	0.7	3.2	11.4	13.1	0.7
	red	2.7	2.3	2.6	0.7	6.0	16.8	8.2	1.6
^{13}CO	blue	13.4	6.4	2.0	0.6	12.8	24.3	13.2	1.5
	red	10.9	5.3	2.1	0.5	11.1	21.7	10.1	1.8

表 7 G050.3179-00.4186 分子外向流的物理参数
Table 7 Physical parameters of molecular outflow in G050.3179-00.4186

Lines	Lobe	N_{lobe} $/(10^{20} \text{ cm}^{-2})$	M_{lobe} $/M_{\odot}$	$\langle \Delta v_{\text{lobe}} \rangle$ $/(km \cdot s^{-1})$	L_{lobe} $/pc$	P_{lobe} $/(M_{\odot} \cdot km \cdot s^{-1})$	E_{lobe} $/(10^{45} \text{ erg})$	t_{lobe} $/(10^4 \text{ yr})$	$L_{\text{m(lobe)}}$ $/L_{\odot}$
^{12}CO	blue	1.4	0.9	2.6	0.8	2.3	4.2	3.4	1.0
	red	1.3	0.7	2.7	0.7	1.9	2.6	2.3	0.9
^{13}CO	blue	10.4	5.8	1.4	0.7	8.1	15.1	6.9	1.8
	red	9.8	3.6	1.6	0.6	5.8	11.5	5.8	1.6

我们把上述计算出的 ^{12}CO 与 ^{13}CO 的外向流质量、动能、动量、运动学时标以及机械光度参数,用直分布方图形式绘制在图9中,通过对比5组图片可以看出 ^{12}CO 与 ^{13}CO 分子谱线计算出来的外向流

参数结果存在明显的差异.此外,同一种分子谱线对不同源进行计算时得到的结果也存在明显差异,这也间接说明外向流的性质是由中心驱动源本身决定的.

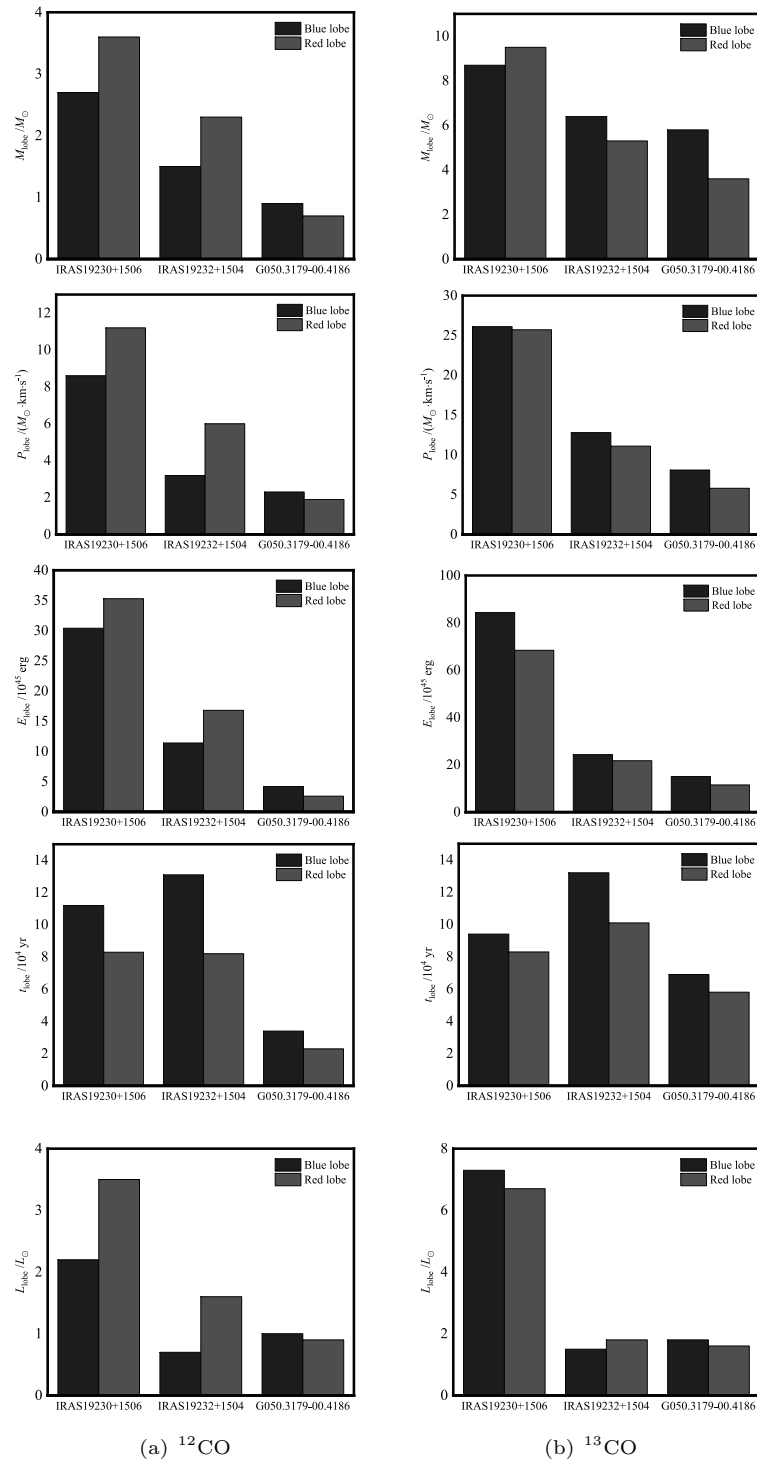


图 9 分子外向流的物理参数分布图。红瓣与蓝瓣在图中用颜色区分。横坐标给出了 3 个源的名称，纵坐标给出了物理量参数的名称与单位。

Fig. 9 Physical parameter distribution diagram for the molecular outflow. The red and blue lobes are distinguished by color in the drawing. The abscissa gives the names of the three sources and the ordinate gives the names and units of the parameters of the physical quantities.

4 总结

我们利用紫金山天文台青海观测站德令哈 13.7 m 毫米波望远镜对一个大质量恒星形成复合体进行 ^{12}CO 、 ^{13}CO 、 C^{18}O 、 HCO^+ 和 CS 分子谱线成图观测研究, 现研究的结果总结如下:

(1) 首次发现了 IRAS 19230+1506、IRAS 19232+1504 和 G050.3179-00.4186 的外向流两极结构, 并且给出了具体的流出参数. 3 个源都存在外向流特征并且都是大质量外向流, 说明同时在进行恒星形成活动, 并处于早期演化阶段;

(2) ^{12}CO 、 ^{13}CO 、 HCO^+ 和 CS 都能用来示踪恒星形成区中源的外向流结构. 对于 ^{12}CO 外向流结构较为复杂的源, 往往可以通过尝试探测 HCO^+ 和 CS 谱线对其进行探测, 或许可以获得更为清晰的外向流结构;

(3) 对于不同的源, 同一种分子计算得出的外向流参数有明显差异, 说明分子外向流的性质由中心驱动源本身决定;

(4) ^{12}CO 和 HCO^+ 分子谱线可用于追踪相对高速的外向流, ^{13}CO 和 CS 分子谱线可用于追踪相对低速的外向流;

(5) 不同分子谱线的线宽在相同尺度内可能存在如下关系: $\Delta V_{^{12}\text{CO}} > \Delta V_{\text{HCO}^+} > \Delta V_{\text{CS}} \approx \Delta V_{^{13}\text{CO}} > \Delta V_{\text{C}^{18}\text{O}}$.

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数据支持. 同时也非常感谢审稿人对本文提出的宝贵意见.

参考文献

- [1] 秦胜利, 王俊杰, 赵刚, 等. 天文学进展, 2004, 22: 122
- [2] 曾琴, 毛瑞青, 裴春传. 天体物理中的微波谱线诊断. 北京: 中国科学技术出版社, 2006
- [3] Shu F H, Adams F C, Lizano S. ARA&A, 1987, 25: 23
- [4] McKee C F, Ostriker E C. ARA&A, 2007, 45: 565
- [5] Beuther H, Schilke P, Sridharan T K, et al. A&A, 2002, 383: 892
- [6] Zuckerman B, Kuiper T B H, Rodriguez Kuiper E N. ApJ, 1976, 209: L137
- [7] Kwan J, Scoville N. ApJ, 1976, 210: L39
- [8] Yang A Y, Urquhart J S, Wyrowski F, et al. A&A, 2022, 658: A160
- [9] Zhang Q Z, Hunter T R, Brand J, et al. ApJ, 2001, 552: L167
- [10] Zhang Q Z, Hunter T R, Brand J, et al. ApJ, 2005, 625: 864
- [11] Xu Y, Shen Z Q, Yang J, et al. AJ, 2006, 132: 20
- [12] Li Y J, Li F C, Xu Y, et al. ApJS, 2018, 235: 15
- [13] Li Q, Zhou J J, Esimbek J, et al. MNRAS, 2019, 488: 4638
- [14] Bally J. ARA&A, 2016, 54: 491
- [15] Retes-Romero R, Mayya Y D, Luna A, et al. ApJ, 2017, 839: 113
- [16] Retes-Romero R, Mayya Y D, Luna A, et al. ApJ, 2020, 897: 53
- [17] Johnston K G, Shepherd D S, Aguirre J E, et al. ApJ, 2009, 707: 283
- [18] Li Y J, Xu Y, Yan S, et al. ApJS, 2019, 242: 19
- [19] 孙继先, 遯登荣, 杨戟, 等. 天文学报, 2018, 59: 3
- [20] Wu Y F, Evans II N J. ApJ, 1989, 340: 307
- [21] 孙锦, 李守中. 分子天体物理学基础(上册). 北京: 北京师范大学出版社, 2003
- [22] Li Y J, Xu Y, Sun Y, et al. ApJS, 2020, 251: 26
- [23] He Y X, Zhou J J, Esimbek J, et al. MNRAS, 2015, 450: 1926
- [24] Liu D J, Xu Y, Li Y J, et al. ApJS, 2021, 253: 15
- [25] Wright E L, Eisenhardt P R M, Mainzer A K, et al. AJ, 2010, 140: 1868
- [26] Wu Y, Wei Y, Zhao M, et al. A&A, 2004, 426: 503
- [27] Snell R L, Scoville N Z, Sanders D B, et al. ApJ, 1984, 284: 176
- [28] Wilson T L, Rohlfs K, Hüttemeister S. Tools of Radio Astronomy. 6th ed. Heidelberg: Springer, 2013
- [29] Yang J, Umemoto T, Iwata T, et al. ApJ, 1991, 373: 137
- [30] Tatematsu K, Umemoto T, Heyer M H, et al. ApJS, 1998, 118: 517
- [31] Garden R P, Hayashi M, Gatley I, et al. ApJ, 1991, 374: 540

Dynamic Properties of a Massive Star Formation Complex

ZHOU Yu-xin^{1,2} XU Ye^{3,4} ESIMBEK Jarken^{2,4,5} LIU De-jian³ ZHOU Jian-jun^{2,4,5}
HE Yu-xin^{2,4,5} WU Gang^{2,4,5} LI Guang-hui^{2,5}

(1 School of Physical Science and Technology, Xinjiang University, Urumqi 830046)

(2 Xinjiang Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011)

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

(4 Key Laboratory of Radio Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023)

(5 Xinjiang Key Laboratory of Radio Astrophysics, Urumqi 830011)

ABSTRACT Stars are formed in molecular clouds. Molecular outflow is an important dynamic feature of star formation and an important entry point for the study and understanding of star formation. Using the 13.7 m millimeter wave telescope of Delingha, Qinghai Observation Station of Purple Mountain Observatory, we used five molecular line probes (including ^{12}CO , ^{13}CO , C^{18}O , HCO^+ $J = 1 - 0$ and CS $J = 2 - 1$, J is the quantum number of angular momentum). A massive star formation complex containing three sources IRAS 19230+1506, IRAS 19232+1504 and G050.3179-00.4186 were been mapped. Through the analysis of the above molecular spectral line data combined with infrared band sky survey data, we detected the molecular outflow activity for the first time in the three sources, and identified the central driver of the molecular outflow. Finally, the physical parameters related to the outflow is calculated for the three sources, and the relationship between these physical parameters is analyzed. The results show that the properties of the outflow is closely related to the properties of the central driving source.

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

附录

1 分子外向流的谱线信息

1.1 IRAS 19230+1506

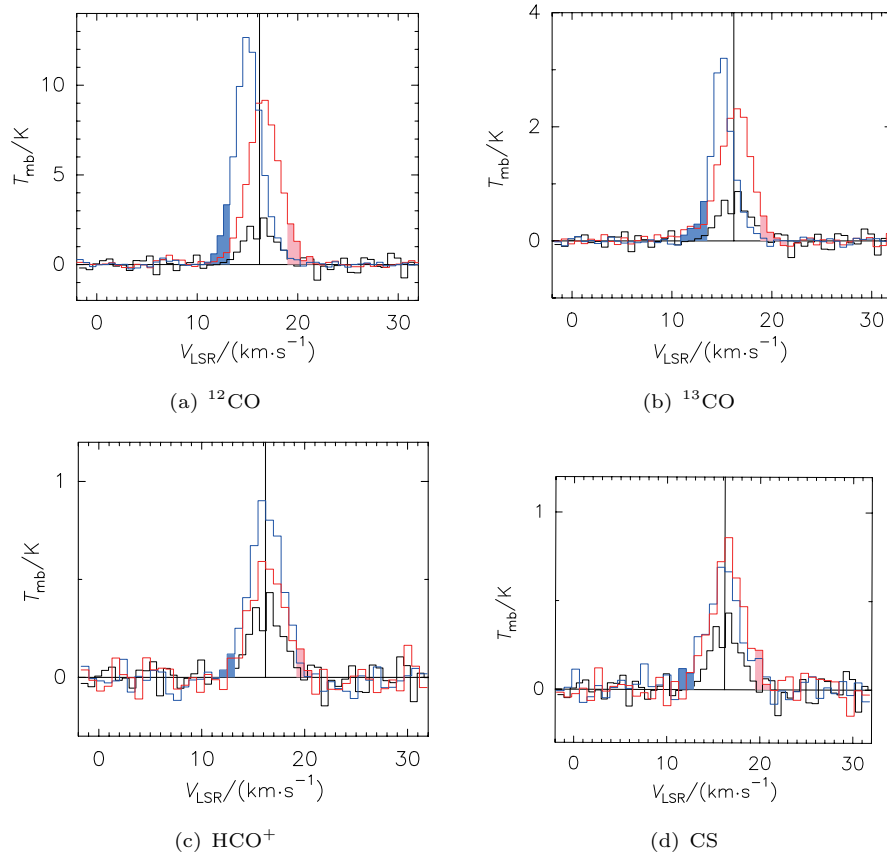


图 10 IRAS 19230+1506 中分子外向流的红/蓝瓣谱线图. 黑色谱线为 $C^{18}O$ 峰值速度处的发射谱线, 对 T_{mb} 放大 5 倍以方便与 ^{12}CO 分子谱线做对比; 蓝色谱线是从蓝瓣发射区域的峰值提取出来的, 红色谱线是从红瓣发射区提取出来的; 黑色竖线表示 $C^{18}O$ 谱线的峰值速度. 图中阴影部分表示红/蓝瓣的速度范围.

Fig. 10 Red/blue lobe diagram of molecular outflow in IRAS 19230+1506. The black line is emission-peak position of the $C^{18}O$, and the T_{mb} is magnified five times to facilitate comparison with the ^{12}CO molecular line. The blue line is extracted from the peak of the blue lobe emission region. The red line is extracted from the red lobe emission region. The black vertical line represents the peak velocity of the $C^{18}O$. The shaded part of the figure indicates the velocity range of the red/blue lobes.

1.2 IRAS 19232+1504

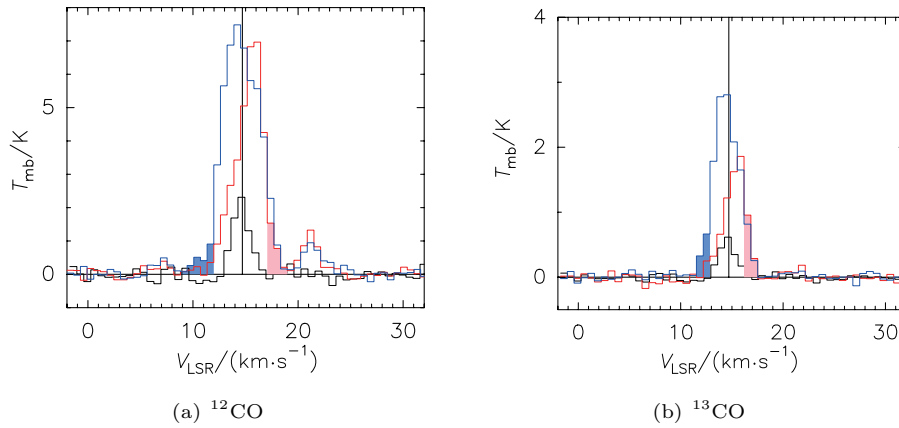


图 11 IRAS 19230+1504 中分子外向流的红/蓝瓣谱线图. 黑色谱线为 $C^{18}O$ 峰值速度处的发射谱线, 对 T_{mb} 放大 5 倍以方便与 ^{12}CO 分子谱线做对比; 蓝色谱线是从蓝瓣发射区域的峰值提取出来的, 红色谱线是从红瓣发射区提取出来的; 黑色竖线表示 $C^{18}O$ 谱线的峰值速度. 图中阴影部分表示红/蓝瓣的速度范围.

Fig. 11 Red/blue lobe diagram of molecular outflow in IRAS 19230+1504. The black line is emission-peak position of the $C^{18}O$, and the T_{mb} is magnified five times to facilitate comparison with the ^{12}CO molecular line. The blue line is extracted from the peak of the blue lobe emission region. The red line is extracted from the red lobe emission region. The black vertical line represents the peak velocity of the $C^{18}O$. The shaded part of the figure indicates the velocity range of the red/blue lobes.

1.3 G050.3179-00.4186

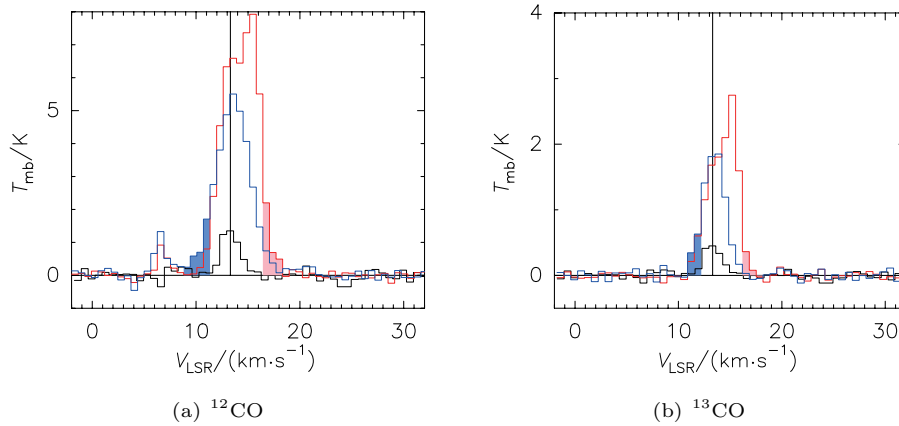


图 12 G050.3179-00.4186 中分子外向流的红/蓝瓣谱线图. 黑色谱线为 $C^{18}O$ 峰值速度处的发射谱线, 对 T_{mb} 放大 5 倍以方便与 ^{12}CO 分子谱线做对比; 蓝色谱线是从蓝瓣发射区域的峰值提取出来的, 红色谱线是从红瓣发射区提取出来的; 黑色竖线表示 $C^{18}O$ 谱线的峰值速度. 图中阴影部分表示红/蓝瓣的速度范围.

Fig. 12 Red/blue lobe diagram of molecular outflow in G050.3179-00.4186. The black line is emission-peak position of the $C^{18}O$, and the T_{mb} is magnified five times to facilitate comparison with the ^{12}CO molecular line. The blue line is extracted from the peak of the blue lobe emission region. The red line is extracted from the red lobe emission region. The black vertical line represents the peak velocity of the $C^{18}O$. The shaded part of the figure indicates the velocity range of the red/blue lobes.

2 流出参数计算公式

Snell等^[27]于1984年给出了由¹²CO示踪出H₂柱密度 $N(\text{H}_2)$ 的计算公式:

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

在这个方程中, 要积分的速度范围是红蓝瓣的速度范围. 假设气体处于局部热力学平衡状态(LTE), $X(^{12}\text{CO}) = [^{12}\text{CO}]/[\text{H}_2] = 10^{-4}$, X 为丰度, dv 为速度的微分, 激发温度 T_{ex} 为30 K.

Wilson等^[28]于2013年给出了由¹³CO示踪出H₂柱密度 $N(\text{H}_2)$ 的计算公式:

$$N(\text{H}_2) = 2.3 \times 10^{19} \frac{T_{\text{ex}}}{e^{-5.3/T_{\text{ex}}}} \int T_{\text{mb}} dv, \quad (2)$$

在这个方程中, 要积分的速度范围是红蓝瓣的速度范围. 假设气体处于局部热力学平衡状态. $X(^{13}\text{CO}) = [^{13}\text{CO}]/[\text{H}_2] = 2 \times 10^{-6}$, 其中激发温度 T_{ex} 为30 K.

Yang等^[29]于1991年给出了由HCO⁺示踪出H₂柱密度 $N(\text{H}_2)$ 的计算公式:

$$N(\text{H}_2) = 1.87 \times 10^{19} \frac{T_{\text{ex}}}{1 - e^{-4.3/T_{\text{ex}}}} \int T_{\text{mb}} dv, \quad (3)$$

在这个方程中, 要积分的速度范围是红蓝瓣的速度范围. 假设气体处于局部热力学平衡状态, $X(\text{HCO}^+) = [\text{HCO}^+]/[\text{H}_2] = 10^{-8}$. 其中激发温度 T_{ex} 为15 K.

Tatematsu等^[30]于1998年给出了由CS示踪出H₂柱密度 $N(\text{H}_2)$ 的计算公式:

$$N(\text{H}_2) = 3 \times 10^9 \frac{k^2 T_{\text{ex}}}{4\pi^3 \mu_{\text{d}}^2 h \nu e^{-h\nu/kT_{\text{ex}}}} \int T_{\text{mb}} dv, \quad (4)$$

在这个方程中, 要积分的速度范围是红蓝瓣的速度范围. 其中 k 是玻尔兹曼常数(1.38×10^{-16} erg·K⁻¹),

h 是普朗克常数(6.626×10^{-27} erg·s), μ_{d} 是电偶极距(1.96D), ν 是跃迁频率(97.981 GHz). 假设气体处于局部热力学平衡状态. $X(\text{CS}) = [\text{CS}]/[\text{H}_2] = 10^{-9}$, 其中激发温度为 T_{ex} 为20 K.

外向流瓣的质量 M_{lobe} 和长度 l_{lobe} 的计算公式分别为:

$$M_{\text{lobe}} = N_{\text{lobe}} A_{\text{lobe}} \mu m_{\text{H}}, \quad (5)$$

$$l_{\text{lobe}} = 1.77 \sqrt{A_{\text{lobe}}}, \quad (6)$$

其中 A_{lobe} 为外向流瓣的面积, 通常由峰值积分强度的40%的等值线包裹的区域来估计. $\mu = 2.72$ 是平均分子量常数^[31], m_{H} 是氢原子质量(1.674×10^{-27} kg)^[5]. 此外, 在用公式计算源的质量时, 我们选取大于 5σ 的像素点包裹的区域为源的面积, 对每个像素点的质量求和得到源的质量.

P_{lobe} 和 E_{lobe} 都取决于 $\langle \Delta v_{\text{lobe}} \rangle$, L_{lobe} 和 t_{lobe} 的计算公式分别为:

$$\langle \Delta v_{\text{lobe}} \rangle = \frac{\sum_i (v_i - v_{\text{peak}}) T_i \Delta v_{\text{res}}}{\sum_i T_i \Delta v_{\text{res}}}, \quad (7)$$

$$P_{\text{lobe}} = \sum_{A_{\text{lobe}}} M_{\text{lobe}} \langle \Delta v_{\text{lobe}} \rangle, \quad (8)$$

$$E_{\text{lobe}} = \frac{1}{2} \sum_{A_{\text{lobe}}} M_{\text{lobe}} \langle \Delta v_{\text{lobe}}^2 \rangle, \quad (9)$$

$$L_{\text{lobe}} = E_{\text{lobe}} / t_{\text{lobe}}, \quad (10)$$

$$t_{\text{lobe}} = l_{\text{lobe}} / \Delta v_{\text{max}}, \quad (11)$$

其中, i 和 T_i 分别是蓝瓣和红瓣线翼的通道编号和该通道上的主波束温度, v_i 是该通道编号所对应的速度, v_{peak} 为谱线的中心速度, Δv_{res} 就是该通道的速度分辨率. Δv_{max} 是外向流瓣相对核成分中心速度的最大速度.

3 谱线轮廓图

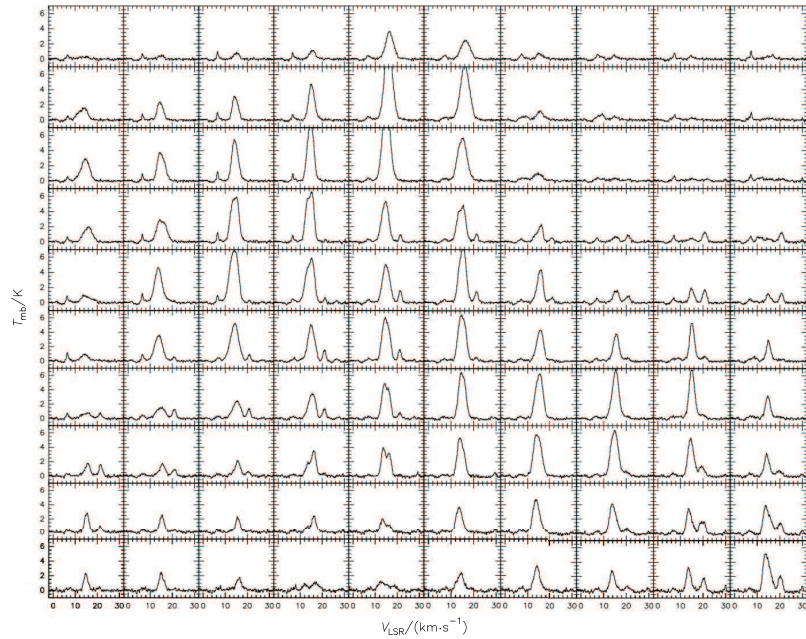
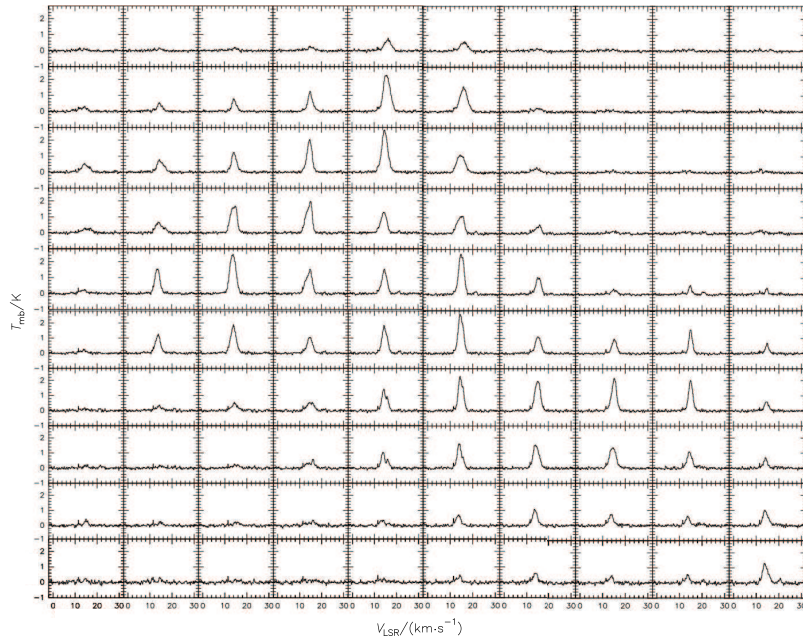
(a) ^{12}CO (b) ^{13}CO

图 13 我们对观测区域内的 5 种分子谱线按每角分生成一个谱轮廓图, 每个线框代表一角分, 采用相对坐标系与上文相对应. 图(a)–(e)分别为 ^{12}CO 、 ^{13}CO 、 C^{18}O 、 HCO^+ 和 CS 分子谱线

Fig. 13 We divided the five kinds of molecular lines in the observation area into a spectral contour map according to each angle, each line frame represents a corner, and the relative coordinate system is used to correspond to the above. Panels (a)–(e) are ^{12}CO , ^{13}CO , C^{18}O , HCO^+ and CS molecular lines respectively.

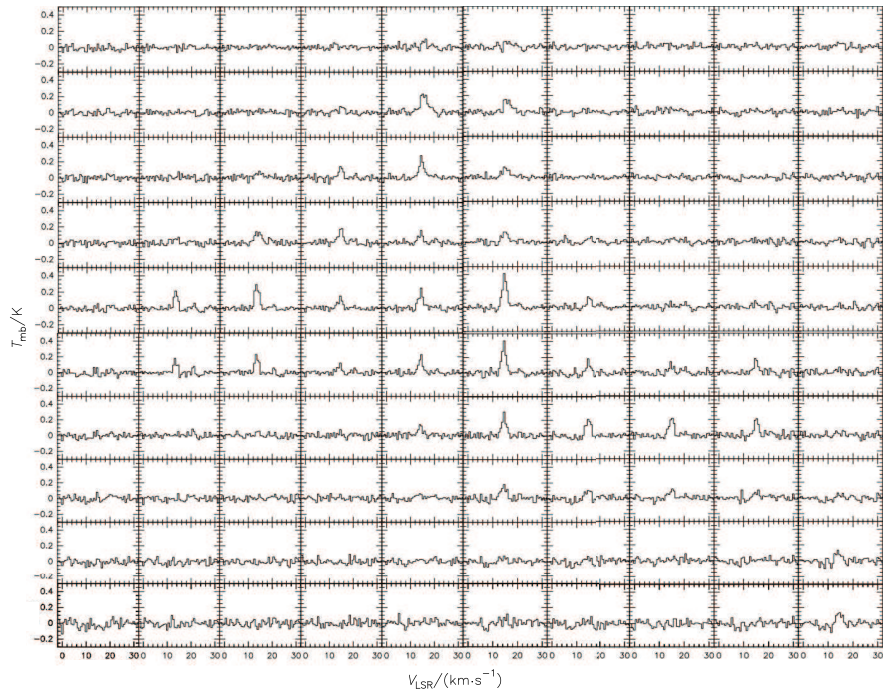
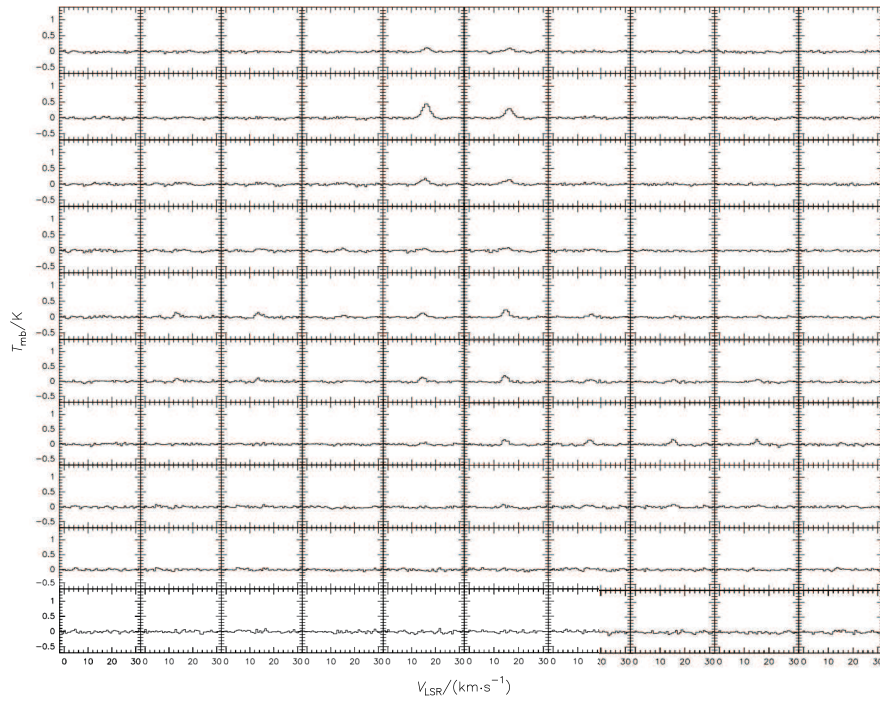
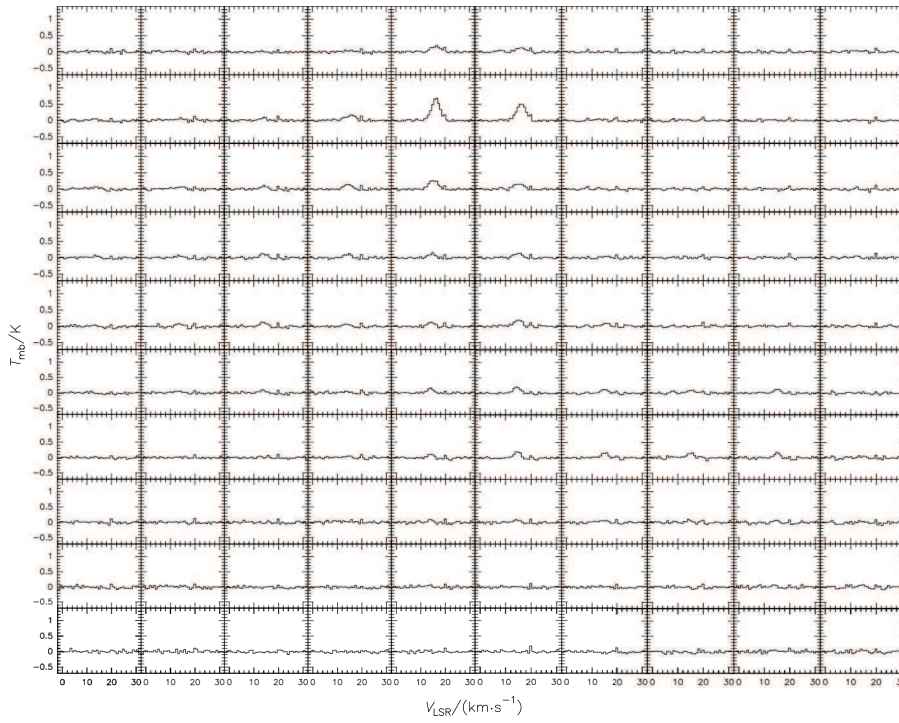
(c) $C^{18}O$ (d) HCO^+

图 13 续

Fig. 13 Continued



(e) CS

图 13 续

Fig. 13 Continued