doi: 10.15940/j.cnki.0001-5245.2022.03.010

红外暗云中分子气体团块的性质研究*

得力达·别尔得汗^{1,2} 加尔肯·叶生别克^{3,4,5†} 徐 烨⁶ 刘德剑⁶ 周建军^{3,4,5} 何玉新^{3,4,5} 朱春花¹ 李光辉^{3,4,5} (1新疆大学物理科学与技术学院乌鲁木齐 830046) (2中国科学院大学北京 100049) (3中国科学院新疆天文台乌鲁木齐 830011) (4中国科学院射电天文重点实验室乌鲁木齐 830011) (5 新疆射电天体物理重点实验室乌鲁木齐 830011)

(6 中国科学院紫金山天文台 南京 210023)

摘要 利用¹²CO(1-0)、¹³CO(1-0)与C¹⁸O(1-0)分子谱线成图观测数据,并结合ATLASGAL (The APEX (Atacama Pathfinder Experiment) Telescope Large Area Survey of the Galaxy)尘埃连续谱巡天观测结果详 细地研究了9个红外暗云(Infrared Dark Clouds, IRDCs)中团块的物理性质与运动学特征. 给出了红外暗云的 速度区间,以及在红外暗云所对应的Spitzer (Spitzer Space Telescope) 8 µm辐射背景上叠加了与红外暗云轮廓 基本吻合的¹³CO和C¹⁸O积分强度分布图. 9个红外暗云中有8个呈纤维状结构. 在这些红外暗云中共找出51个致 密团块,质量偏大的团块大部分聚集在红外暗云的枢纽位置. 质量统计直方图中表现出明显的双峰结构,进一步 证实纤维状分子云物质输送的图景. ¹²CO(1-0)计算所得的典型激发温度T_{ex}在这些团块中的分布为10-15 K之 间. 证认出3个蓝轮廓的团块和5个红轮廓的团块,发现有17个处于不同演化阶段的团块与外流候选体位置重叠, 这表明外流活动可能普遍存在于不同演化阶段的团块中. 在MSF (Massive Star-Forming)团块和YSO (Young Stellar Object)团块中较高的外流探测率表明吸积率随着团块中恒星形成的演化阶段而增加. 这些都是引力束 缚的团块,并有可能进一步塌缩. 所有团块都满足形成大质量恒星的基本物理条件. 这些处在不同演化阶段的早 期大质量恒星形成团块是研究大质量恒星形成的理想候选体.

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

质量M大于8倍太阳质量(M_☉)的大质量恒星 在宇宙演化中起着关键作用,然而大质量恒星相对 罕见、距离遥远、演化时标短且深埋于分子团块 中等特点,使得对其观测研究尤为困难.众所周知, 恒星形成于分子云之中,恒星形成的每一个过程都 在其母体分子云中留下痕迹,因此我们可以通过对 这些痕迹的诊断分析最终描绘出恒星形成的完整 图像.如今大多数大质量恒星形成研究也都是针对

2021-07-19收到原稿, 2021-12-06收到修改稿

*国家自然科学基金项目(11433008)、中国科学院西部之光项目(2020XBQNXZ-017)、新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2018D01B38、2021D01C075)、2019年新疆维吾尔自治区灵活引进高端人才工程资助

 $^{\dagger} Jarken @xao.ac.cn$

当前正在形成恒星的致密分子云区域,细致地开展 恒星形成的早期性质研究^[1],使我们对大质量恒星 形成区恒星形成活动的早期性质有了更完整的认 识.然而,至今对更为早期的"星前"或"无星"阶段 的致密分子团块研究较少,致使我们对这一阶段的 认识仍然不足.

近些年的观测研究认为大质量恒星或星团往 往形成于红外暗云(Infrared Dark Cloud, IRDC) 中. 红外暗云指的是在红外空间天文台(Infrared Space Observatory, ISO)^[2]和太空中途红外实验室 (Midcourse Space Experiment, MSX)^[3-4]红外巡天 数据中,在明亮中红外辐射的映衬下呈现暗弱轮廓 的一类天体. 近些年, 通过分子谱线与尘埃连续谱 的观测研究,得出红外暗云的典型尺度在1-10 pc, 同时它们具有较低的温度(T<25 K)、较 高的密度(~10⁵ cm⁻³)与氢分子柱密度(≥ 10²³ cm⁻²)^[2, 4-9]. 这些特征同时也进一步表明红 外暗云极有可能是与最早期大质量恒星成协的天 体.因此,我们可以通过射电、毫米/亚毫米、红外 等波段探测红外暗云中有可能诞生大质量恒星的 致密团块,研究它们的物理学性质与运动学特征, 进而对大质量恒星形成的早期阶段有更全面的认 识.

许多对红外暗云团块的研究表明它们的典型 质量为120 M_{\odot} 、尺寸约为0.5 pc^[5]. 团块的光谱能 量分布(Spectral Energy Distribution, SED)研究 表明其尘埃温度范围在16-52 K之间^[10]. 红外暗团 块中的恒星形成活动会使团块呈现出特定的演化 序列,从冷的、中红外暗状态,到产生可观测到 24 μ m^[11]点源的热核^[12],最后到核中出现(超)致密 电离氢区^[13]. 同时致密红外暗团块中经常伴随分子 外流^[14-15]和脉泽发射等活动^[11, 16]. 红外暗云团块 的高质量、高密度和高柱密度等特征是形成大质 量恒星的关键因素. 通过上述特征,我们发现红外 暗云为大质量恒星形成最难以捉摸的早期阶段— "星前"或"无星"阶段提供了大量候选体^[11, 16-20], 这些候选体是大质量恒星和星团诞生的理想位 置^[5, 10].

阿塔卡马探路者实验望远镜(Atacama Pathfinder Experiment, APEX)在870 μm波段的银 盘巡天工作ATLASGAL (The APEX Telescope Large Area Survey of the Galaxy)中获得了大量的 大质量致密团块. Urguhart等^[21]在2018年的研究 工作中整理计算了这些团块的基本物理参数,如光 度、尺度、距离、质量等,这为深入讨论红外暗云 团块的性质提供了基础.并且他们根据文献[22]中 的演化阶段分类方法将团块划分为4个阶段: (1)星 前阶段(Prestellar/Quiescent clump, 指无70 µm辐 射特征); (2)原恒星阶段(Protostellar clump, 指远 红外亮但24 um暗弱的团块); (3)包含年轻星的阶 段(YSO (Young Stellar Object)-forming clump, 指 具有24 µm点源辐射的团块); (4)大质量恒星形成 阶段(MSF clump, 指24 µm辐射明亮且存在大质量 恒星形成活动特征,如:电离氢区、II型甲醇脉泽、 水脉泽等).因此,我们现在有机会可以系统地讨论 处于不同演化阶段红外暗云中的闭块性质,并研究 大质量恒星形成以及其对周围环境的反馈.

为了更好地研究红外暗云与致密团块的性质, 我们选择了银河系第1象限的9个红外暗云,利用 连续谱数据(红外/亚毫米)、CO及其同位素分子 的谱线,对其进行了分析研究.在第2节中,我们描 述了红外暗云样本的筛选与分析所使用的数据; 第3节给出了红外暗云的辐射特征与形态并使用 CO谱线辐射对团块参数进行了计算;第4节分析讨 论了团块的CO谱线轮廓、引力稳定性及是否满足 恒星形成条件等;第5节对工作进行了总结.

2 数据与研究样本选择

2.1 红外暗云样本选择

FUGIN (FOREST unbiased Galactic plane imaging survey with the Nobeyama 45-m telescope)巡天是对¹²CO、¹³CO和C¹⁸O分子的(1-0)跃 迁开展的谱线成图观测(如文中无特殊说明, 全文 CO分子及同位素均为(1-0)跃迁). 巡天观测范围 (银经 $l = 10^{\circ}-50^{\circ}$,银纬 $|b| \leq 1^{\circ}$)^[23-25]在100 GHz 附近的角分辨率约为20",速度分辨率约为0.16 km· s⁻¹.从FUGIN CO谱线巡天项目观测区域,我们 结合Parsons等^[26]源表中的红外暗云位置,共选出 了13个位于北天区的红外暗云.为了接下来能开

展相对可靠的数据分析和研究,我们仅保留了 FUGIN数据中9个¹²CO、¹³CO、C¹⁸O谱线信噪比 较高的红外暗云作为本研究工作的样本(具体见 附录图5). Spitzer-GLIMPSE (Galactic Legacy Infrared Mid-Plane Survey Extraordinaire)^[27] 是一个 中红外巡天项目,望远镜上搭载的IRAC (Infrared Array Camera) 探测器工作在3.6、4.5、5.8和8 μm 波段. GLIMPSE的巡天范围为10° < $l < 65^{\circ}$, |b|< 1°, 角分辨率介于1.5″-1.9″之间. 为了确保这9 个源均为红外暗云,我们利用高分辨率空间望远镜 Spitzer-GLIMPSE巡天^[28]中的8 µm图像数据进一 步进行视觉检查.检查结果表明我们所选的9个 区域在8 um连续谱辐射中都表现出暗弱特征. 我 们利用Urguhart等^[21]发表的870 µm大质量致密团 块源表,筛选出51个在空间位置上与我们所研究 的红外暗云重叠的团块(见附录图5中红色"十"字 标记). 这51个致密团块中大部分质量偏大的团块 聚集在红外暗云的枢纽位置. 另外, 与文献[21]中 已按照演化阶段进行分类的ATLASGAL团块进 行交叉匹配后,发现我们所选样本中的红外暗 云团块处于不同的演化阶段. 附录表3第4列中列 出了这些致密团块所对应的演化阶段.51个致密 团块中有7个是MSF团块,15个是YSO团块,12个 是Protostellar团块, 14个是Quiescent团块以及3个

未确定演化阶段的团块.

2.2 分子谱线数据

本研究中,我们所采用的分子谱线数据来自 Nobeyama 45 m的CO及其同位素分子谱线巡天 观测和紫金山天文台青海观测站13.7 m射电望远 镜的CO谱线观测. 由于FUGIN观测深度不够. 谱 线的信噪比不适用于团块的运动学特征分析,因 此,选取了51个致密团块中FUGIN ¹²CO速度成 份比较简单的6个团块(见附录图6),于2021年5月, 使用紫金山天文台青海观测站13.7m射电望远 镜进行了观测. 此次主要观测了CO分子及其同 位素发射线. 观测模式为OTF (On The Fly)模 式,典型的步长为10"-15".每个具有1 GHz带宽 的快速傅里叶变换(FFT)光谱仪提供16384个通 道, 对应输出61 kHz的光谱分辨率¹. 数据处理使 用GILDAS (Grenoble Image and Line Data Analysis Software)²软件将OTF观测的原始数据制作成 像素为30"×30"的FITS (Flexible Image Transport System)格式数据. 表1列举了PMO 13.7 m射电望 远镜的性能与CO分子跃迁的基本参数表,其中, Lines为分子谱线种类, Frequency是谱线的静止频 率, T_{svs} 是系统温度, η_{mb} 是主波束效率, HPBW是 半功率波束宽度, dV是速度分辨率.

HPBW/" $dV/(km \cdot s^{-1})$ Lines Frequency/GHz $T_{\rm sys}/{\rm K}$ $\eta_{\rm mb}$ $^{12}CO(1-0)$ 115.271 250 - 300490.1590.49 $^{13}CO(1-0)$ 110.201 150 - 2000.54510.166 $C^{18}O(1-0)$ 109.782 150 - 2000.54520.166

表 1 PMO 13.7 m射电望远镜的性能与CO分子跃迁的基本参数表 Table 1 List of performance of PMO 13.7 m radio telescope and CO molecular transitions parameters

3 研究结果

3.1 红外暗云的分子谱线辐射特征与形态

从附录图5展示的红外暗云FUGIN巡天项目的 CO谱线轮廓中,可见CO谱线在同一视线方向上展 现出了多个速度成分,这些成分所对应的辐射可能 来自我们所研究的目标源的前景辐射、背景辐射 和其本身的辐射.为了区分出目标源所对应的速度 成分,我们基于最基本的原理,即CO分子辐射空间 分布在形态上应该与尘埃辐射背景上的红外暗云 轮廓基本吻合,此时所对应的CO分子辐射速度成

 $^{^{1}\}rm http://www.radioast.nsdc.cn/english/zhuangtaibaogao.php <math display="inline">^{2}\rm http://www.iram.fr/IRAMFR/GILDAS$

分应该来自红外暗云自身的辐射. 我们通过CO分 子的谱线轮廓和速度通道图来确定红外暗云所对 应谱线成分的线心速度与速度分布范围. 图中展示 了9个红外暗云所对应的Spitzer 8 um连续谱背景 上叠加了与红外暗云轮廓基本吻合的¹³CO和C¹⁸O 谱线积分强度等值线,图片下方为红外暗云的 ¹³CO和C¹⁸O平均谱线,图中的黑色垂直虚线指示 出了所对应的速度范围,红色垂直虚线指示通过高 斯拟合获得的红外暗云所对应的系统速度. 各个 红外暗云的速度区间都列在附录表4中的第2列. 我 们发现这9个红外暗云中有8个呈纤维状结构并且 表现出多致密分子云核的结构,只有一个红外暗 云MSXDCG30.97-0.14中展示出一个致密分子云 核. 另外这些纤维状结构的脊交会在一起形成多个 枢纽(纤维状结构脊连接的节点我们称之为枢纽). 研究表明纤维状分子云结构以脊为通道不断为处 于引力中心的致密核输送燃料,最终位于枢纽位置 的云核处将形成大质量恒星[1].因此位于枢纽位置 的团块往往具有更大的质量.

3.2 红外暗云团块的性质

我们提取了ATLASGAL团块中心位置所对应 波束面积8.5"×8.5"内的FUGIN巡天项目的CO分 子3个同位素的(1-0)跃迁谱线.每个团块的谱线展 示在附录图6中.其中一些团块的¹³CO的峰值强度 较弱,没有达到3σ阈值.因此,在此后的讨论中我们 只考虑¹³CO的峰值强度大于3σ (谱线峰值强度大 于3倍谱线噪声)的团块.基于此,最终一共有49个 团块符合这一标准.

激发温度 T_{ex} 可由¹²CO的峰值亮温度估算, 假设¹²CO分子谱线光学厚, 并且波束的填充因子为1,即可通过以下函数根据¹²CO的峰值亮温度估算激发温度 $T_{ex}^{[29-31]}$:

$$T_{\rm ex} = 5.33 \left\{ \ln \left[1 + \frac{5.33}{(T_{\rm mb,^{12}CO} + 0.818)} \right] \right\}^{-1},$$
(1)

其中 $T_{mb,^{12}CO}$ 即¹²CO的峰值亮温度. 在¹²CO辐射 受自吸收影响的位置,激发温度的值可能会被低 估. 我们假设¹³CO和C¹⁸O谱线的激发温度与光 学厚¹²CO谱线的激发温度相同.在分子团块处于 局部热力学平衡的假设下,利用下列方程估算了 ¹³CO和C¹⁸O的光深:

$$\tau_{^{13}CO} = -\ln\left\{1 - \frac{T_{\rm mb,^{^{13}CO}}}{5.29[J_1(T_{\rm ex}) - 0.164]}\right\}, \quad (2)$$

$$\tau_{\rm C^{^{18}O}} = -\ln\left\{1 - \frac{T_{\rm mb,C^{^{18}O}}}{5.27[J_2(T_{\rm ex}) - 0.166]}\right\}, \quad (3)$$

其中

$$J_1(T_{\rm ex}) = \frac{1}{\exp(5.29/T_{\rm ex}) - 1} ,$$

$$J_2(T_{\rm ex}) = \frac{1}{\exp(5.27/T_{\rm ex}) - 1} .$$

 $T_{\rm mb,^{13}CO}$ 、 $T_{\rm mb,C^{18}O}$ 分别为¹³CO与C¹⁸O的峰值亮 温度.

附录表4中总结列出了所有上述计算所得到的 物理参数.为了研究红外暗云中团块的性质,我们 统计了团块物理参数的分布,图1为团块CO谱线的 激发温度、质量、尺度和光深的柱状图. 从图1中, 我们发现红外暗云中团块的典型激发温度在10-15 K之间, 平均值为14 K, 最大值26.5 K, 最小值 6 K. 这与Du等^[32]得到的结果基本一致. 我们计算 的CO激发温度高于由N2D+分子推得的温度^[33-34], 低于NH₃、HCO⁺、HCN^[35-36]等分子推得的温度. 这可能是由于不同的分子示踪分子云不同的区 域, CO分子更倾向于示踪温度比较低的部分, 亦或 是因为观测的稀释效应. 附录表3中红外暗云团块 所对应的质量平均值为2.3×10³ M_☉,其典型尺度 在0.2-0.8 pc之间,平均尺度为0.7 pc^[21].图1中质量 统计直方图中表现出明显的双峰结构,通过对双峰 所对应团块与红外暗云位置对比,我们发现质量偏 大的致密团块(对应统计直方图质量偏大的峰)大部 分位于红外暗云的枢纽位置,这进一步证实3.1节描 述的关于纤维状分子云物质输送的图景.除此之外, τ¹³CO与τC¹⁸O的柱形分布图展示了¹³CO与C¹⁸O的 典型光深范围分别为0.19-2.22与0.09-1.05, 平均值 分别为0.92与0.39.



图 1 红外暗云团块的各个物理参数柱形图: (a)激发温度 T_{ex} , (b)团块质量 M_{clump} , (c)团块大小R, (d)和(e)分别是¹³CO和C¹⁸O分子谱线的光 深 τ_{13CO} 、 τ_{C18O} . 光深源自GILDAS内置的"高斯"拟合方法. 团块的质量和半径来自Urquhart等^[21].

Fig. 1 The histograms of the physical parameters towards the IRDC clumps: (a) excitation temperature $T_{\rm ex}$, (b) clumps mass $M_{\rm clump}$, (c) radius R, (d) optical depths of the ¹³CO lines $\tau_{13}_{\rm CO}$, (e) optical depths of the C¹⁸O line $\tau_{\rm C^{18}O}$. These peak optical depths are derived from the GILDAS built-in "Gaussion" fitting method. The clump mass and radius are from Urquhart et al^[21].

4 讨论

4.1 团块的CO谱线轮廓及其运动学特征

谱线轮廓的不对称性可以用来研究气体的运动状态.通常来说,蓝轮廓(谱线轮廓表现出不对称且蓝端的峰值大于红端)被认为是气体的下落或坍缩所导致;而红轮廓(与蓝轮廓同理,峰值出现在红端)可被认为是气体的膨胀或外流导致的.对大多数团块,¹³CO是光薄的.而对一些¹³CO光厚的团块(光深比较大)或可能出现¹³CO自吸收的团块,我们采用C¹⁸O进行分析.在这里,我们用Mardones等^[37]所提出的归一化判据来证认蓝/红轮廓:

$$\delta_{\rm v} = (V_{\rm thick} - V_{\rm thin}) / \Delta V_{\rm thin} , \qquad (4)$$

 $δ_v$ 为Mardones等^[37]定义的无量纲参数, V_{thick} 是光 厚线¹²CO的峰值对应的速度, V_{thin} 、 ΔV_{thin} 分别是 ¹³CO或C¹⁸O的系统速度和线宽. 对一些可能存在 多个速度成分的团块, 我们拟合了谱线主波束温度 最高的区间所对应速度成分的线宽ΔV_{thin}.团块的 δ_v值如果小于0.25,那么这个团块被认为是蓝轮廓, 反之如果δ_v值大于0.25,那么这个团块被认为是红 轮廓.51个团块中我们找到了21个有蓝轮廓的团块 和14个有红轮廓的团块.我们经过人工视觉检查 后,发现18个蓝轮廓的团块和9个红轮廓的团块可 能是多速度成分导致的误判,最终有3个被判定为 蓝轮廓团块,5个被判定为红轮廓团块,我们将其标 示在附录表4第8列中.

分子外流普遍存在于恒星形成区中,几乎与恒 星形成早期所有阶段成协^[38].为了探究团块的动 力学性质,我们挑选了部分团块,对它们的外流进 行研究.由于大部分团块的速度成份都相对复杂, 因此我们主要选取¹²CO速度成份较为简单的团 块进行研究,即仅有单个或两个速度成份的团块. 最终有6个团块符合条件,分别是AGAL031.946+ 00.076、AGAL031.971+00.061、AGAL031.982+ 00.064、 AGAL032.007+00.062、 AGAL033.744-00.007和AGAL033.756-00.002. 我们仅在4个源中 探测到了外流现象,我们将其源名与外流速度范 围列在表2中,其中,V_{LSR}是团块的线心速度,V_b是 蓝瓣外流的速度区间,V_r是红瓣外流的速度区间. Lada^[39]曾指出谱线的线翼部分可以通过对两种示 踪不同密度的分子进行轮廓对比来确定.¹²CO的 分子谱线中结构较为复杂,受其他因素影响较大, 因此我们使用¹³CO和C¹⁸O分子谱线进行外流搜寻 证认工作.由于C¹⁸O一般示踪年轻恒星周围的致 密气体区域,因此C¹⁸O被用作判断和获取外流活 动在¹³CO谱线辐射所造成的高速线翼速度范围的 参考谱线^[40].

表 2 外流团块基本参数 Table 2 Properties of outflow clumps

Source name	$V_{\rm LSR}/$	$V_{\rm b}/$	$V_{\rm r}/$
Source name	$(km \cdot s^{-1})$	$(\rm km\cdot s^{-1})$	$(\rm km\cdot s^{-1})$
AGAL031.946+00.076	92.5	(89, 93)	(98, 102)
AGAL031.971+00.061	95.0		(98, 100)
AGAL031.982+00.064	95.9	(89, 93)	(100, 103)
AGAL032.007+00.062	95.1	(87, 91)	(100, 103)

Note: In AGAL031.971+00.061 clump, we only detected the red lobe outflow, and the blue lobe outflow could not get a clear distribution of the outflow due to the strong interference from the left radiation.

图2 (a)展示了AGAL031.946+00.076的外流剖 析图,可以从右图中发现两组双极外流,其中一组 位于图像中心,一组位于图像边缘.位于中心的外 流,我们可以清晰地观察到双极外流的特征,由于 其位于中心,故认为该外流与团块AGAL031.946+ 00.076成协.而位于图像边缘的外流,则无法获得 其完整结构.图2 (b)为AGAL031.971+00.061的外 流剖析图,从这个团块中我们仅探测到了红瓣外 流,蓝瓣由于受到来自左侧辐射的干扰太强,无法 得到清晰的外流分布情况.图2 (c)展示的是AGAL 031.982+00.064的外流剖析图,从外流的分布图中 可以观察到清晰的双极特征.图2 (d)为AGAL032. 007+00.062的外流剖析图,从外流分布图中同样可 以发现两组外流均呈现清晰的双极特征,其中一组 位于图像中心,另一组则位于边缘位置,我们认为 位于中心的外流与团块成协.另外两个团块AGAL 033.744-00.007和AGAL033.756-00.002,由于受周 围信号过多的干扰,难以对其外流进行清晰的成 图.我们在其中4个团块中探测到了外流迹象,而未 探测到外流迹象的两个团块是由于受周围信号干 扰无法做出准确的判断,其次,我们绘制的¹³CO速 度分布图,这两个团块也并未发现明显的速度梯 度.

Yang等^[41]也曾利用¹³CO与C¹⁸O分子来搜寻 ATLASGAL团块中的外流候选体. 他们的工作 中一共包含919个团块,其中325个团块被证认为 外流候选体. 将这325个团块与本文红外暗云中 的团块进行交叉匹配后,发现我们的团块样本 中,有13个团块与其证认的外流候选体重叠,其 中5个(39%)是MSF团块、5个(39%)是YSO团块、2 个(15%)是Protostellar团块、1个(7%)为未确定演 化阶段的团块, Quiescent团块无对应的外流候选 体. 而我们选取的在青海观测站观测的6个分子 云团块中,有3个为YSO团块,3个为Quiescent团块, 且YSO与Quiescent中均有两个探测到了外流. Quiescent是König等^[22]定义的,表示大质量恒星形成 早期阶段,该阶段表现出较弱的辐射,但可能已 经在坍缩,只是还没有形成原恒星.而我们选取 的3个Quiescent团块中,有2个探测到了外流,表明 在一部分Quiescent团块中可能已经有原恒星正在 形成,我们认为Quiescent团块很可能也与外流成 协.

在我们所选择的51个团块中,原本有13个与外流候选体成协^[41],在本文使用青海站望远镜对6个¹²CO的速度成份比较简单的团块观测之后,在其中4个团块中探测到了外流,因此结合Yang等^[41]的研究与本文的观测,我们发现一共有17个团块与外流候选体成协,其中YSO团块与Quiescent团块均增加了两个.所以,可以得出外流活动在各个阶段的团块中都是普遍存在的,无论是YSO团块,还是Quiescent团块.同时,在MSF团块和YSO团块中

较高的外流探测率可能表明吸积随着团块中恒星 形成的演化阶段而增加^[42-45].我们的团块样本中 只有1个被证认为是外流的候选体同时表现出蓝轮 廓. 这一结果表明下落或塌缩团块中的外流活动探测率较低.



(a) Analysis diagram of outflow of AGAL031.946+00.076. The blue contour represents the outflow blue petal, the red contour represents the outflow red petal, and the step size of the contour is 50%, 70%, 90% and 95% of the peak value (4.7 K).



(b) Analysis diagram of outflow of AGAL031.971+00.061. The blue contour represents the outflow blue petal, the red contour represents the outflow red petal, and the step size of the contour is 68%, 70%, 72% and 75% of the peak value (4.6 K).

图 2 4个探测到外流现象的源的外流剖析图. 每个子图的左图为:外流中心发射点位置的谱线,黑色、蓝色、红色分别表示13.7 m射电望远镜的¹²CO、¹³CO以及C¹⁸O的分子谱线,纵坐标T_{mb}为主波束温度,横坐标V是速度,蓝色阴影部分表示蓝瓣外流的速度区间,红色阴影部分表示红 瓣外流的速度区间,其中谱线经过了5个通道的平滑. 每个子图的右图为:外流的分布情况,其中底图为C¹⁸O的积分强度图.

Fig. 2 Analysis diagram of outflow for four sources with detected outflow. The left panels of each subgraph are: the molecular spectral lines of ¹²CO, ¹³CO and C¹⁸O of 13.7 m radio telescope in the center of outflow with black, blue and red lines. The ordinate $T_{\rm mb}$ is the beam temperature and the abscissa V is the velocity. The blue shaded part is the velocity range of blue lobe outflow, and the red shaded part is the velocity range of red lobe outflow, in which the spectral lines are smoothed by five channels. The right panels of each subgraph are: distribution of outflow, the base map is the integral map of C¹⁸O.



(c) Analysis diagram of outflow of AGAL031.982 \pm 00.064. The blue contour represents the outflow blue petal, the red contour represents the outflow red petal, and the step size of the contour is 50%, 70%, 90% and 95% of the peak value (4.5 K).



(d) Analysis diagram of outflow of AGAL032.007+00.062. The blue contour represents the outflow blue petal, the red contour represents the outflow red petal, and the step size of the contour is 80%, 85%, 90% and 70%, 75%, 80% of the peak value (5.4 K) for the blue petal and red petal respectively.

4.2 团块的稳定性

评估团块是否处于引力平衡的重要参量是维 里质量*M*_{vir}:

$$M_{\rm vir} = \frac{5\sigma_{\rm v}^2 R}{G} \,, \tag{5}$$

其中 σ_v 是一维的速度弥散,它跟谱线半高全宽的关系为 $\sigma_v = \Delta V / \sqrt{8 \ln 2}$,其中 ΔV 为谱线线宽,*G*是

万有引力常数. 对于¹³CO光学厚和¹³CO谱线可能 存在自吸收现象的团块, 如C¹⁸O谱线强度达到 3σ 阈值, 我们将采用C¹⁸O谱线的半高全宽.

维里系数由 $\alpha_{vir} = M_{vir}/M_{clump}$ 表示. 在不考 虑磁场的情况下, 若 $\alpha_{vir} < 2$, 则团块是引力束缚 的, 并有可能进一步塌缩, 反之, 团块的引力无法 抗衡湍流或者热压力, 可能会膨胀或弥散到星际空 间中. 我们展示了39个团块的 M_{clump} 和 M_{vir} 的关系 图, 见图3. 图中的黑色虚线表示 $M_{\text{clump}} = M_{\text{vir}}$. 我 们的样本中所有的团块都是引力束缚的, 可能正处于引力塌缩阶段. 我们发现绝大部分的Quiescent

团块维里参数都较小,这可能表明团块的维里参数与它们的演化阶段有关.MSF团块、YSO团块、 Protostellar团块、Quiescent团块平均维里参数分 别为0.2、0.18、0.24、0.13.



图 3 $M_{\text{clump}} \pi M_{\text{vir}}$ 的关系图. 黑色虚线表示关系式: $M_{\text{clump}} = M_{\text{vir}}$. 左上角标示了团块的不同演化阶段.

Fig. 3 The relation graph between M_{clump} and M_{vir} . The black dotted line represents the relation of $M_{\text{clump}} = M_{\text{vir}}$. The name of the evolutionary stage is given on the top left corner of each panel.

4.3 大质量恒星形成区

Carey等^[3]提出红外暗云是大质量恒星形成的 理想场所. 近些年, 这一猜测被大量的相关研究工 作证实^[46-48]. 目前被广泛使用的判断红外暗云中 团块是否满足形成大质量恒星的经验方法是研究 致密团块的质量与其半径的关系.

Lada等^[49]分析了分布在500 pc内的分子云的 恒星形成速率与质量之间的关系.指出恒星形成率 并不取决于云的总质量,而是取决于体密度.Lada 等^[49]、Lombardi等^[50]提出了能有效形成恒星的 团块临界面密度为116 $M_{\odot} \cdot pc^{-2}$ (0.024 g·cm⁻²). Heiderman等^[51]将恒星形成速率与20个分子云的 面密度进行了拟合,这些分子云主要与中小质 量恒星形成以及大质量致密团有关,拟合结果为 129 $M_{\odot} \cdot pc^{-2}$ (0.027 g·cm⁻²). Kauffmann等^[52]对 难以形成高质量恒星的分子云团块进行了分析, 假设m(r)为分子云团块的质量,r为大小,给出了 更为严苛的大质量恒星形成条件: $m(r) \ge 870$ $M_{\odot} \cdot (r \cdot pc^{-1})^{1.33}$, 这一点得到了Urquhart等^[53]的 证实.

图4展示了团块质量与大小的关系图, MSF团 块、YSO团块、Protostellar团块、Quiescent团块 分别用不同符号标注在图上. 虚线指示出质量为 100 M_{\odot} 的位置, 图中我们可以看出几乎所有的 团块质量都满足形成大质量恒星的基本条件, 即 团块质量大于100 M_{\odot} . 图中灰色阴影部分表示小 质量恒星形成区的范围. 下方的两条实线分别对 应116 M_{\odot} ·pc⁻²及129 M_{\odot} ·pc⁻², 落在这两条实 线之上和左上方区域的源满足恒星形成的基本条 件. 我们的源全都分布在这两条实线之上. 黑色 实线表示图中所有源最小二乘法拟合得到的经验 关系lg(M_{clump}) = 3.48±0.05 + (1.17±0.12) × lg (R/pc), 相关系数为0.83. Csengeri等^[54]提出了团 块形成大质量恒星的质量限制条件, 研究认为 质量大于650 M_{\odot} 的致密团块中可能存在大质量 致密核和大质量原恒星,图中点划线为指示出 质量为650 M_{\odot} 的位置.我们研究样本中有76% (39/51)的ATLASGAL团块的质量大于这一阈值. 灰色虚线为 $m(r) \ge 870 M_{\odot} \cdot (r \cdot pc^{-1})^{1.33}$,我们发 现此研究工作中几乎所有的团块都满足了形成大 质量恒星的条件,只有一个团块没有达到形成大质 量恒星的标准.再次映证了这些团块是研究大质量 恒星形成早期阶段的良好候选体.



图 4 团块质量与大小的关系图. MSF团块、YSO团块、Protostellar团块、Quiescent团块分别用不同符号标注在图上. 灰色阴影部分表示小质 量恒星形成区的范围. Kauffmann等^[52]提出的大质量恒星形成的下限为 $m(r) \ge 870 \ M_{\odot} \cdot (r \cdot pc^{-1})^{1.33}$. 右下方的两条实线分别 为116 $M_{\odot} \cdot pc^{-2}$ (0.024 g·cm⁻²)及129 $M_{\odot} \cdot pc^{-2}$ (0.027 g·cm⁻²),分别为Lada等^[49]、Lombardi等^[50]和Heiderman等^[51]所提出的能 有效形成恒星的团块质量下限. 黑色实线表示图中所有源最小二乘法拟合得到的经验关系lg(M_{clump}) = 3.48 ± 0.05 + (1.17 ± 0.12) × lg(R). 点划线指示出质量为650 M_{\odot} 的位置,虚线则指示出质量为100 M_{\odot} 的位置.

Fig. 4 Clump mass as a function of radius for MSF clumps, YSO clumps, Protostellar clumps and Quiescent clumps presented in different symbols. The shaded gray area indicates the extent of the low-mass star forming region. The threshold is $m(r) \ge$ 870 $M_{\odot} \cdot (r \cdot pc^{-1})^{1.33}$ adopted from Kauffmann et al.^[52]. Two solid lines at the bottom right represented surface density

thresholds for "efficient" star formation of 116 $M_{\odot} \cdot \text{pc}^{-2}$ (0.024 g $\cdot \text{cm}^{-2}$) (Lada et al.^[49], Lombardi et al.^[50]) and 129 $M_{\odot} \cdot \text{pc}^{-2}$ (0.027 g $\cdot \text{cm}^{-2}$) (Heiderman et al.^[51]). The black solid line represents the empirical relationship

 $lg(M_{clump}) = 3.48 \pm 0.05 + (1.17 \pm 0.12) \times lg(R)$ fitted by all source using least square methods. The dot-dashed line indicates the position with a mass of 650 solar mass, and the dashed line indicates the position with a mass of 100 solar mass.

5 总结

我们利用¹²CO、¹³CO和C¹⁸O的分子谱线以 及Spitzer 8 μm巡天数据对9个红外暗云进行了研 究.分析了红外暗云的形态结构以及红外暗云中团 块的气体性质,并对团块的恒星形成条件进行了讨 论.主要的研究结果总结如下:

(1)在9个红外暗云中,有8个红外暗云呈纤维 状结构,并且其中包含至少两个致密团块. 仅一个 红外暗云MSXDCG30.97-0.14中只包含一个致密团块. 基于ATLASGAL数据, 我们在这些红外暗云中共找出51个致密团块, 这些团块中的大质量团块大都聚集在红外暗云的枢纽位置. 质量统计直方图中表现出明显的双峰结构, 进一步证实关纤维状分子云物质输送的图景;

(2)由¹²CO(1-0)计算所得的典型激发温度T_{ex} 分布在10-15 K之间,平均值为14 K,低于通过致密 分子推得的温度.这不同的分子可能示踪分子云不同的区域.团块的平均质量为 $2.3 \times 10^3 M_{\odot}$,典型尺度在0.2到0.8 pc之间,平均尺度为0.7 pc;

(3)在51个团块中,最终证认了3个蓝轮廓的团 块和5个红轮廓的团块.在我们的研究样本中,我 们发现17个团块与外流的候选体重叠.在MSF团块 和YSO团块中较高的外流探测率表明,在不同演化 阶段吸积率可能不同.同时我们还在Quiescent团块 中探测到了外流活动,这表明外流活动可能在不同 演化阶段的致密团块中都普遍存在;

(4)我们还通过计算团块的维里参数来判断它 们的稳定性.所有样本都是引力束缚团块,可能正 在发生引力塌缩;

(5)几乎所有团块都满足形成大质量恒星的基本物理条件.这些团块的演化阶段都处在比较早的时期,是研究大质量恒星形成早期阶段较理想的样本.

致谢 本工作利用了FUGIN的巡天数据及Spitzer-GLIMPSE巡天中的8 μm图像数据用于红外暗云 的检查工作.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]~ Motte F, Bontemps S, Louvet F. ARA&A, 2018, 56: 41
- [2] Pérault M, Omont A, Simon G, et al. A&A, 1996, 315: L165
- [3] Carey S J, Clark F O, Egan M P, et al. ApJ, 1998, 508: 721
- [4] Egan M P, Shipman R F, Price S D, et al. ApJ, 1998, 494: L199
- [5] Rathborne J M, Jackson J M, Simon R. ApJ, 2006, 641: 389
- [6] Simon R, Jackson J M, Rathborne J M, et al. ApJ, 2006, 639: 227
- [7] Butler M J, Tan J C. ApJ, 2009, 696: 484
- [8] Tan J C, Beltrán M T, Caselli P, et al. Massive Star Formation//Protostars and Planets VI. Beuther H, Klessen R S, Dullemond C P, et al. Tucson: University Arizona Press, 2014: 149-172
- [9] Pillai T, Wyrowski F, Carey S J, et al. A&A, 2006, 450: 569

- [10] Rathborne J M, Jackson J M, Chambers E T, et al. ApJ, 2010, 715: 310
- [11] Chambers E T, Jackson J M, Rathborne J M, et al. ApJS, 2009, 181: 360
- $[12]\$ Rathborne J M, Jackson J M, Zhang Q, et al. ApJ, 2008, 689: 1141
- [13] Battersby C, Bally J, Jackson J M, et al. ApJ, 2010, 721: 222
- [14] Beuther H, Sridharan T K, Saito M. ApJ, 2005, 634: L185
- [15] Sanhueza P, Garay G, Bronfman L, et al. ApJ, 2010, 715: 18
- [16] Wang Y, Zhang Q Z, Rathborne J M, et al. ApJ, 2006, 651: L125
- [17] Rygl K L J, Wyrowski F, Schuller F, et al. A&A, 2010, 515: A42
- [18] Vasyunina T, Linz H, Henning T, et al. A&A, 2011, 527: A88
- [19] Pillai T, Kauffmann J, Wyrowski F, et al. A&A, 2011, 530: A118
- [20] Devine K E, Chandler C J, Brogan C, et al. ApJ, 2011, 733: 44
- [21] Urquhart J S, König C, Giannetti A, et al. MNRAS, 2018, 473: 1059
- [22] König C, Urquhart, J S, Csengeri T, et al. A&A, 2017, 599: A139
- [23] Minamidani T, Nishimura A, Miyamoto Y, et al. SPIE, 2016, 9914: 99141Z
- $[24]\,$ Kuno N, Tosaki T, Onodera S, et al. Proceedings of the IAU, 2010, 6: 67
- [25] Umemoto T, Minamidani T, Kuno N, et al. PASJ, 2017, 69: 78
- [26] Parsons H, Thompson M A, Chrysostomou A. MNRAS, 2009, 399: 1506
- [27] Benjamin R A, Churchwell E, Babler B L, et al. PASP, 2003, 115: 953
- [28] Wilson R W, Jefferts K B, Penzias A A, ApJ, 1970, 161: L43
- [29] Pineda J L, Goldsmith P F, Chapman N, et al. ApJ, 2010, 721: 686
- [30] König S, Lada C J, Lada E A, et al. ApJ, 2015, 805: 58
- [31] Lin S J, Shimajiri Y, Hara C, et al. ApJ, 2016, 826: 193
- [32] Du F J, Yang J. ApJ, 2008, 686: 384
- [33] König S, Tan J C, Caselli P, et al. ApJ, 2016, 821: 94
- [34] Fontani F, Palau A, Caselli P, et al. A&A, 2011, 529:
 L7
- [35] Ragan S E, Bergin E A, Plume R, et al. ApJS, 2006, 166: 567
- [36] Liu X L, Wang J J, Xu J L. MNRAS, 2013, 431: 27
- [37] Mardones D, Myers P C, Tafalla M, et al. ApJ, 1997, 489: 719
- [38] Reipurth B, Bally J. ARA&A, 2001, 39: 403
- [39] Lada C J. ARA&A, 1985, 23: 267

- $[40]\,$ Li F C, Xu Y, Wu Y W, et al. AJ, 2016, 152: 92
- [41] Yang A Y, Thompson M A, Urquhart J S, et al. ApJS, 2018, 235: 3
- [42] Bernasconi P A, Maeder A. A&A, 1996, 307: 829
- [43] Norberg P, Maeder A. A&A, 2000, 359: 1025
- [44] Behrend R, Maeder A. A&A, 2001, 373: 190
- [45] Haemmerlé L, Eggenberger P, Meynet G, et al. A&A, 2013, 557: A112
- [46] Beltrán M T, Olmi L, Cesaroni R, et al. A&A, 2013, 552: A123
- [47] Beuther H, Linz H, Tackenberg, J, et al. A&A, 2013, 553: A115

- [48] Peretto N, Fuller G A, Duarte-Cabral A, et al. A&A, 2013, 555: A112
- [49] Lada C J, Lombardi M, Alves J F. ApJ, 2010, 724: 687
- [50] Lombardi M, Alves J, Lada C J. A&A, 2015, 576: L1
- [51] Heiderman A, Evans II N J, Allen L E, et al. ApJ, 2010, 723: 1019
- [52] Kauffmann J, Pillai T, Goldsmith P F. ApJ, 2013, 779: 185
- [53] Urquhart J S, Moore T J T, Schuller F, et al. MNRAS, 2013, 431: 1752
- [54] Csengeri T, Urquhart J S, Schuller F, et al. A&A, 2014, 565: A75

Study on the Properties of Molecular Gas Clumps in IRDCs

BERDIKHAN Dilda^{1,2} ESIMBEK Jarken^{3,4,5} XU Ye⁶ LIU De-jian⁶ ZHOU Jian-jun^{3,4,5} HE Yu-xin^{3,4,5} ZHU Chun-hua¹ LI Guang-hui^{3,4,5}

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

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

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

(4 Key Laboratory of Radio Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011)

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

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

ABSTRACT Using the observation data of ${}^{12}CO(1-0)$, ${}^{13}CO(1-0)$ and $C^{18}O(1-0)$ lines, and combined with the observation results of ATLASGAL (The APEX (Atacama Pathfinder Experiment) Telescope Large Area Survey of the Galaxy) dust continuum survey, the physical properties and kinematic characteristics of clumps have been studied in nine infrared dark clouds (IRDCs) in detail. Velocity range of infrared dark clouds are given. It is showed that the Spitzer 8 µm radiation background corresponding to the infrared dark cloud is superimposed with the ${}^{13}CO(1-0)$ and $C^{18}O(1-0)$ integral intensity distribution map basically consistent with the outline of the infrared dark cloud. Eight of the nine IRDCs present the filamentary structure. Totally, with 51 identified dense clumps in these infrared dark clouds, most of these clumps with large masses gather at the hub of infrared dark clouds. The obvious bimodal structure is shown in the mass statistical histogram, which further confirms the picture of matter transport in a fibrous molecular cloud. The typical excitation temperature distribution of CO in these clumps is between 10 K and 15 K. We find three clumps with blue profiles and five clumps with red profiles. There are 17 in different evolution stages associated with outflow candidates, so outflow should be common in clumps. The higher detection rate of outflow in MSF (Massive Star-Forming) and YSO (Young Stellar Object) clumps may indicate that the accretion in the process of star formation may increase with the evolution stage of star formation in the clumps. All of these clumps are gravitationally bound and tend to collapse. All clumps meet the basic physical conditions for the formation of massive stars. These early stage massive star-forming clumps at different evolution stages are ideal targets to study the massive star formation.

Key words stars: formation, ISM: clouds, ISM: molecules, ISM: stars

附录

1 红外暗云积分强度分布图与红外暗云的分子谱线



(a) The integral intensity maps of MSXDCG28.37+0.07. Top: the $C^{18}O$ integrated intensity map overlays on Spitzer 8 µm emission, and the step size of the contour is 65%, 75%, 85% of the peak value (32.7 K). Middle: ¹³CO integrated intensity map overlays on Spitzer 8 µm emission, and the step size of the contour is 75%, 85%, 95% of the peak value (55.6 K). Bottom: Average spectral lines of $C^{18}O$ (red) and ^{13}CO (blue) of infrared dark cloud.



(b) The integral intensity maps of MSXDCG28.53-0.25. Top: the C¹⁸O integrated intensity map overlays on Spitzer 8 μ m emission, and the step size of the contour is 60%, 70%, 80%, 90% of the peak value (26.3 K). Middle: ¹³CO integrated intensity map overlays on Spitzer 8 μ m emission, and the step size of the contour is 55%, 70%, 80%, 90% of the peak value (62.4 K). Bottom: Average spectral lines of C¹⁸O (red) and ¹³CO (blue) of infrared dark cloud.



(c) The integral intensity maps of MSXDCG30.77+0.22. Top: the $C^{18}O$ integrated intensity map overlays on Spitzer 8 µm emission, and the step size of the contour is 50%, 70%, 80%, 95% of the peak value (9.0 K). Middle: ¹³CO integrated intensity map overlays on Spitzer 8 µm emission, and the step size of the contour is 75%, 85%, 90% of the peak value (22.1 K). Bottom: Average spectral lines of $C^{18}O$ (red) and ¹³CO (blue) of infrared dark cloud.

图 5 9个红外暗云FUGIN巡天项目的CO积分强度分布图(a)-(i).积分强度分布图上的红色"+"标出了团块的中心位置,左下角的圆表示CO数据的分辨率.

Fig. 5 The CO integral intensity maps of FUGIN project of 9 IRDCs (a)–(i). The "+" marks the centres of the clumps. The beam size is showed in the bottom-left corner of each diagram.







(d) The integral intensity maps of MSXDCG30.97-0.14. Top: the C¹⁸O integrated intensity map overlays on Spitzer 8 μ m emission, and the step size of the contour is 50%, 70%, 80%, 90% of the peak value (14.3 K). Middle: ¹³CO integrated intensity map overlays on Spitzer 8 μ m emission, and the step size of the contour is 70%, 75%, 80%, 90% of the peak value (20.7 K). Bottom: Average spectral lines of C¹⁸O (red) and ¹³CO (blue) of infrared dark cloud.

(e) The integral intensity maps of M-SXDCG31.03+0.26. Top: the C¹⁸O integrated intensity map overlays on Spitzer 8 μ m emission, and the step size of the contour is 50%, 60%, 70%, 80% of the peak value (14.1 K). Middle: ¹³CO integrated intensity map overlays on Spitzer 8 μ m emission, and the step size of the contour is 75%, 80%, 90% of the peak value (44.8 K). Bottom: Average spectral lines of C¹⁸O (red) and ¹³CO (blue) of infrared dark cloud.

(f) The integral intensity maps of MSXDC G31.23+0.05. Top: the $C^{18}O$ integrated intensity map overlays on Spitzer 8 µm emission, The speed ranges are 73–77 (green contour), 101-107 (pink contour), 105-113 (blue contour), the step size of the contour are 60%, 70%, 80%, 90% (green contour), 60%, 70%, 80%, 90% (pink contour), 50%, 70%, 80%, 90% (blue contour) of peak 12.0, 18.2 and 25 K respectively. Middle: ¹³CO integrated intensity map overlays on Spitzer 8 µm emission, the step size of the contour are 70%, 80%, 90% (green contour), 60%, 70%, 80%, 90% (pink contour), 60%, 70%, 80%, 90% (blue contour) of peak 35.7, 71.2 and 73.1 K respectively. Bottom: Average spectral lines of $\mathbf{C}^{18}\mathbf{O}$ (red) and ¹³CO (blue) of infrared dark cloud.

图 5 续 Fig.5 Continued



(g) The integral intensity maps of M-SXDC G31.97+0.07. Top: the C¹⁸O integrated intensity map overlays on Spitzer 8 μ m emission, and the step size of the contour is 70%, 80%, 90% of the peak value (20.4 K). Middle: ¹³CO integrated intensity map overlays on Spitzer 8 μ m emission, and the step size of the contour is 40%, 60%, 70%, 80%, 90%, 95% of the peak value (77.5 K). Bottom: Average spectral lines of C¹⁸O (red) and ¹³CO (blue) of infrared dark cloud.



(h) The integral intensity maps of MSXDCG33.69-0.01. Top: the C¹⁸O integrated intensity map overlays on Spitzer 8 μ m emission, and the step size of the contour is 60%, 70%, 80%, 90% of the peak value (23.7 K). Middle: ¹³CO integrated intensity map overlays on Spitzer 8 μ m emission, and the step size of the contour is 45%, 65%, 75%, 85%, 95% of the peak value (31.2 K). Bottom: Average spectral lines of C¹⁸O (red) and ¹³CO (blue) of infrared dark cloud.



(i) The integral intensity maps of M-SXDCG34.43+0.24. Top: the C¹⁸O integrated intensity map overlays on Spitzer 8 μ m emission, and the step size of the contour is 70%, 80%, 90% of the peak value (24.3 K). Middle: ¹³CO integrated intensity map overlays on Spitzer 8 μ m emission, and the step size of the contour is 40%, 50%, 70%, 80%, 90% of the peak value (83 K). Bottom: Average spectral lines of C¹⁸O (red) and ¹³CO (blue) of infrared dark cloud.

图5 续

Fig. 5 Continued

2 红外暗云中团块的分子谱线



图 6 每个团块的¹²CO、¹³CO和C¹⁸O分子谱线(来自FUGIN巡天项目).分别用黑、蓝、红3种颜色画在图上.绿色平行虚线标注了谱线数据 的3*o*阈值.蓝色实线表示对¹³CO分子谱线高斯拟合后得到的中心速度位置,绿色竖直虚线标示对C¹⁸O分子谱线高斯拟合后得到的中心速度位置. 左上角还标明了每个团块的名称与团块的不同演化阶段的类型.

Fig. 6 12 CO, 13 CO, and C¹⁸O spectra of each clump (using the data from FUGIN sky survey). For each plot, the lines of 12 CO, 13 CO, and C¹⁸O are coloured black, blue, and red, respectively. Green parallel dashed lines show the 3σ threshold of main-beam efficiency corrected data. Blue lines show the fitted centre velocities of 13 CO, and green vertical dashed lines show the fitted centre velocities of 13 CO, and green vertical dashed lines show the fitted centre velocities of 13 CO, and green vertical dashed lines show the fitted centre velocities of 13 CO, and green vertical dashed lines show the fitted centre velocities of 13 CO, and green vertical dashed lines show the fitted centre velocities of 13 CO, and green vertical dashed lines show the fitted centre velocities of 13 CO.



图 6 续 Fig. 6 Continued



图 6 续 Fig. 6 Continued

3 红外暗云中团块的物理参数

表 3 ATLASGAL团块的物理参数 Table 3 Physical properties of ATLASGAL clumps

ATLASGAL source	$l/^{\circ}$	$b/^{\circ}$	Assosiation	R/pc	$lg(M_{\rm clump}/M_{\odot})$
AGAL028.341+00.142	28.341	0.142	YSO	0.21	2.18
AGAL028.344+00.061	28.344	0.061	Protostellar	0.85	3.63
AGAL028.354+00.072	28.354	0.072	Quiescent	0.70	3.30
AGAL028.354+00.102	28.354	0.102	Protostellar	0.55	2.97
AGAL028.361+00.054	28.361	0.054	Protostellar	0.88	3.69
AGAL028.364+00.121	28.364	0.121	Quiescent	0.46	2.82
AGAL028.374+00.054	28.374	0.054	Quiescent	0.18	2.85
AGAL028.384+00.066	28.384	0.066	YSO	0.21	2.40
AGAL028.388+00.037	28.388	0.037	Quiescent	0.21	2.78
AGAL028.398+00.081	28.398	0.081	MSF	1.18	3.52
AGAL028.418+00.141	28.418	0.141	YSO	0.21	2.41
AGAL028.526-00.251	28.526	-0.251	Protostellar	0.48	3.07
AGAL028.536-00.279	28.536	-0.279	Quiescent	0.53	3.15
AGAL028.539-00.269	28.539	-0.269	Quiescent	0.18	3.24
AGAL028.541-00.237	28.541	-0.237	Protostellar	0.34	3.10
AGAL028.564-00.236	28.564	-0.236	nan	1.92	
AGAL030.756+00.206	30.756	0.206	YSO	1.38	3.40
AGAL030.783+00.276	30.783	0.276	Protostellar	0.40	2.97
AGAL030.786+00.204	30.786	0.204	MSF	0.65	3.14
AGAL030.971-00.141	30.971	-0.141	MSF	1.60	3.61
AGAL031.208+00.101	31.208	0.101	YSO	0.48	2.47
AGAL031.221+00.021	31.221	0.021	YSO	0.25	2.77
AGAL031.239+00.062	31.239	0.062	Protostellar	0.95	3.18
AGAL031.254+00.057	31.254	0.057	Quiescent	0.25	2.91
AGAL031.268+00.077	31.268	0.077	Protostellar	0.80	3.22
AGAL031.281+00.062	31.281	0.062	MSF	1.55	3.65
AGAL031.288+00.084	31.288	0.084	Quiescent	0.63	3.45

	Ta	ble 3 C	ontinued		
ATLASGAL source	$l/^{\circ}$	$b/^{\circ}$	Assosiation	$R/{ m pc}$	$\log(M_{\rm clump}/M_{\odot})$
AGAL031.946+00.076	31.946	0.076	Quiescent	0.50	3.48
AGAL031.971+00.061	31.971	0.061	YSO	0.75	3.36
AGAL031.982+00.064	31.982	0.064	Quiescent	0.25	3.02
AGAL032.007+00.062	32.007	0.062	YSO	1.16	3.67
AGAL032.019+00.064	32.019	0.064	YSO	1.03	3.65
AGAL032.044+00.059	32.044	0.059	MSF	1.63	3.77
AGAL033.623-00.032	33.623	-0.032	Protostellar	1.32	3.66
AGAL033.633-00.022	33.633	-0.022	MSF	0.76	2.93
AGAL033.638-00.034	33.638	-0.034	YSO	0.79	3.36
AGAL033.651-00.026	33.651	-0.026	YSO	1.42	3.46
AGAL033.656-00.019	33.656	-0.019	YSO	0.31	2.67
AGAL033.659-00.029	33.659	-0.029	YSO	1.51	3.62
AGAL033.684-00.021	33.684	-0.021	YSO	1.07	3.71
AGAL033.698-00.009	33.698	-0.009	Quiescent	0.82	3.78
AGAL033.713-00.012	33.713	-0.012	Quiescent	0.44	3.62
AGAL033.723-00.017	33.723	-0.017	Quiescent	0.60	3.39
AGAL033.739-00.021	33.739	-0.021	Protostellar	1.92	3.72
AGAL033.744-00.007	33.744	-0.007	YSO	1.20	3.78
AGAL033.756-00.002	33.756	-0.002	Quiescent	0.31	3.39
AGAL034.326+00.181	34.326	0.181	Protostellar	0.07	1.84
AGAL034.376+00.236	34.376	0.236	Protostellar	0.07	2.30
AGAL034.391+00.214	34.391	0.214	nan	0.39	
AGAL034.401+00.226	34.401	0.226	MSF	0.30	2.72
AGAL034.411+00.234	34.411	0.234	YSO	0.29	2.59
AGAL034.421+00.236	34.421	0.236	nan	0.41	
AGAL034.459+00.247	34.459	0.247	Protostellar	0.48	2.53

表3 续

Note: The name, coordinate, evolutionary phase, mass and radius of the clumps are from Urquhart et al.^[21]. In this paper, we continue to use the name, classification, mass and radius of the clumps in this table.

	Table 4	表4 E Line prof	团块的谱纹 files and	线轮廓及参 parame	诊数 iters of clump	ŵ		
ATLASGAL source	Velocity range/(km $\cdot s^{-1}$)	$T_{\rm ex}/{\rm K}$	$\tau^{13}CO$	$\tau_{\rm C^{18}O}$	$\lg(M_{ m vir}/M_{\odot})$	$\delta_{ m v}/({ m km}\cdot{ m s}^{-1})$	Profile	Outflow sight
G028.37 + 00.07	68-85							
AGAL028.341 + 00.142		13.00	1.20			0.31	I	
$AGAL028.344 \pm 00.061$		15.63	0.60		3.68	-0.35	BP	
$AGAL028.354{+}00.072$		7.81		0.53	2.88	-0.35	BP	
$AGAL028.354{+}00.102$		10.73	0.54	0.51	3.64	0.00	nan	
$AGAL028.361 \pm 00.054$		9.62	0.97	0.67	3.52	0.36	RP^{**}	
$AGAL028.364{+}00.121$		13.25	0.57		3.21	0.12	nan	
$AGAL028.374 \pm 00.054$		6.01		0.82	2.73	-0.50	BP^{**}	
$AGAL028.384{+}00.066$		10.53	0.43	0.28	2.03	1.45	BP^{**}	
$AGAL028.388 \pm 00.037$		9.98	0.77	0.33	2.97	0.26	RP^{**}	
$AGAL028.398\!+\!00.081$		10.15	1.14			-0.21	I	Yes
AGAL028.418+00.141		7.44	1.05			-0.37	I	
G028.53-00.25	83–92							
AGAL028.526-00.251		13.51	0.67	0.40	3.15	0.08	nan	
AGAL028.536-00.279		10.12	1.80	0.64	3.17	0.48	RP^{**}	
AGAL028.539-00.269		12.19	0.86	0.32	2.72	-0.03	BP^{**}	
AGAL028.541-00.237		14.01	0.84	0.42	3.26	0.12	nan	
AGAL028.564-00.236		15.43	1.22	0.09	3.75	0.44	RP	
G030.77 + 00.22	82 - 92							

63 卷

3 期

 \mathbf{Yes}

 BP^{**}

-0.05

4.49

0.11

0.37

15.33

 $AGAL030.756 \pm 00.206$

		de T	志 4 C	续 Intinued				
ATLASGAL source	Velocity range/(km $\cdot s^{-1})$	$T_{\rm ex}/{\rm K}$	$T^{13}CO$	$\tau_{\rm C^{18}O}$	$\lg(M_{ m vir}/M_{\odot})$	$\delta_{ m v}/({ m km}\cdot{ m s}^{-1})$	Profile	Outflow sight
AGAL030.786+00.204		12.21	1.01	0.37	3.76	-0.14	nan	Yes
G030.97-00.14	73-82							
AGAL030.971-00.141		21.17	0.70	0.12	3.73	-0.05	BP^{**}	$\mathbf{Y}_{\mathbf{es}}$
G031.03 + 00.26	75-80							
G031.23 + 00.05	73-78, 101-107, 105-113							
AGAL031.208+00.101		13.30	1.07	0.53	2.57	-0.88	BP^{**}	$\mathbf{Y}_{\mathbf{es}}$
AGAL031.221 + 00.021		18.05	0.74	0.24	2.85	0.23	nan	
AGAL031.239+00.062		15.43	0.86	0.32	2.68	-1.42	BP^{**}	
AGAL031.254+00.057		22.58	1.90	1.06	2.91	-0.78	BP^{**}	
AGAL031.268+00.077		18.86	0.22	0.23	3.64	-0.70	BP^{**}	
AGAL031.281 + 00.062		22.38	0.82	0.30	3.58	0.26	RP^{**}	\mathbf{Yes}
AGAL031.288+00.084		17.85	0.35		3.20	-0.46	BP^{**}	
$G031.97 \pm 00.07$	90 - 102							
$AGAL031.946 \pm 00.076$		16.94	0.60	0.15	2.98	-0.22	nan	
AGAL031.971+00.061		20.37	0.61		3.57	-0.35	BP^{**}	
$AGAL031.982 \pm 00.064$		18.45	0.68		2.77	-0.13	nan	
${ m AGAL032.007}{ m +00.062}$		20.47	0.81	0.17	3.74	0.25	nan	
AGAL032.019+00.064		26.49	0.69		3.51	-0.27	BP^{**}	\mathbf{Yes}
$AGAL032.044 \pm 00.059$		22.28	0.53	0.10	4.07	-0.40	BP^{**}	\mathbf{Yes}
G033.69-00.01	100 - 111							
AGAL033.623-00.032		11.98	1.62	0.35	3.28	-0.04	nan	
AGAL033.633-00.022		13.71	1.30	0.41	2.64	0.78	RP	

63 卷

3 期

		$\delta_{\mathrm{v},\mathrm{v}}$
		${ m g}(M_{ m vir}/M_{\odot})$
续	Jontinued	$ au_{\mathrm{C}^{18}\mathrm{O}}$]

ATLASGAL source Velocity r AGAL033.638-00.034 AGAL033.651-00.026 AGAL033.651-00.026 AGAL033.656-00.019 AGAL033.656-00.019 AGAL033.659-00.029 AGAL033.684-00.029 AGAL033.684-00.021	$range/(km \cdot s^{-1})$	$T_{\rm ex}/{ m K}$ 8.76	τ^{13} CO	$ au_{ m C^{18}O}$	$\log(M_{ m wir}/M_\odot)$	$\delta_{\rm s}/({\rm km\cdot s^{-1}})$	Profile	Outflow cicht
AGAL033.638-00.034 AGAL033.651-00.026 AGAL033.656-00.019 AGAL033.659-00.029 AGAL033.684-00.021		8.76		>	(D/=x)0-			Ullinuw signi
AGAL033.651-00.026 AGAL033.656-00.019 AGAL033.659-00.029 AGAL033.684-00.021				0.64	3.21	0.71	RP^{**}	
AGAL033.656-00.019 AGAL033.659-00.029 AGAL033.684-00.021		12.51	1.47	0.44	3.24	-0.46	BP	Yes
AGAL033.659-00.029 AGAL033.684-00.021 ACAL033.688 00.000		8.92		0.52	3.15	-0.15	nan	
AGAL033.684-00.021		9.62	2.22	0.63	3.45	-0.64	BP^{**}	
		11.58	1.27	0.19	3.35	0.63	RP^{**}	
CONTRACTOR CONTRACTOR					3.97	-0.16	Ι	
AGAL033.713-00.012		15.53	0.36		3.16	0.50	BP^{**}	
AGAL033.723-00.017		18.76	0.19		2.34	-0.68	BP^{**}	
AGAL033.739-00.021		14.22	0.48	0.27	3.37	0.37	RP^{**}	Yes
AGAL033.744-00.007					3.78	0.45	RP^{**}	
AGAL033.756-00.002		13.27	0.87	0.22	3.17	-0.40	BP^{**}	
$G034.43 \pm 00.24$	49–61							
AGAL034.376+00.236		11.41	1.00	0.44	1.51	-0.27	BP^{**}	
AGAL034.391 + 00.214		7.78	1.55	0.34	2.91	0.91	RP^{**}	Yes
AGAL034.401 + 00.226		10.97		0.69	2.88	-0.60	Ι	
AGAL034.411+00.234		12.96	1.14	0.18	2.80	0.78	RP	Yes
AGAL034.421 + 00.236		11.93	0.91		2.48	1.04	RP	
$AGAL034.459\!+\!00.247$		15.03	1.20	0.28	2.67	0.89	RP	\mathbf{Yes}

63 卷