

银河画卷($10^\circ \leq l \leq 20^\circ$) ^{13}CO & C^{18}O 致密 结构形态分析*

肖焱山^{1,2} 张海霞^{1,2} 黄瑶^{1,2†} 江治波³ 陈志维³ 郑胜^{1,2}
张鹏^{1,2} 罗晓域^{1,2} 蒋禹³ 潘雪姣^{1,2}

(1 三峡大学天文与空间科学中心 宜昌 443002)

(2 三峡大学数理学院 宜昌 443002)

(3 中国科学院紫金山天文台 南京 210023)

摘要 致密分子云团块是恒星形成的场所, 其形态特征与分子气体的物理性质密切相关. 该项工作基于紫金山天文台 13.7 m 毫米波射电望远镜观测的银经 (galactic longitude, l) $10^\circ \leq l \leq 20^\circ$ 和银纬 (galactic latitude, b) $|b| \leq 5^\circ.25$ 范围的数据, 对 $^{13}\text{CO}(J=1-0)$ & $\text{C}^{18}\text{O}(J=1-0)$ 致密结构进行了形态分类和分析. 利用 FacetClumps 检测算法对 C^{18}O 谱线数据示踪的分子云核进行了检测和人工证认, 共获得了 544 个 C^{18}O 分子云核. 该区域约 5.97% 的 ^{13}CO 团块内部存在 C^{18}O 核. 以是否存在 C^{18}O 核将 ^{13}CO 团块分为了两类, 发现包含 C^{18}O 核的 ^{13}CO 团块的峰值、流量、角面积显著大于不含 C^{18}O 核的 ^{13}CO 团块样本, 两类样本的离心率和形状因子没有明显差异. 此外, 也对 ^{13}CO 团块和 C^{18}O 核的形状因子进行了比较分析, 发现 C^{18}O 核的速度方向积分强度轮廓明显更接近圆的形态.

关键词 恒星: 形成, 星际介质: 分子, 星际介质: 谱线与谱带, 方法: 数据分析

中图分类号 P155; **文献标识码**: A

1 引言

星际分子的发现和观测对现代天文学影响深远, 明确了恒星形成于分子云中. 分子云复杂的分层结构又可以细分为云、团块和核等子结构^[1-3]. 基于大量的观测结果, 目前认为恒星形成于致密的分子云中. 分子云经过准静态收缩形成条状分子云, 在一定物理条件下, 条状分子云足够致密时, 条状内部就会发生碎裂, 进一步成为大小不一、形态各异、密度结构不同的分子云团块^[4]. 当分子云团块的密度和质量达到临界值, 即其不再能够

抵抗重力时便会开始塌缩, 形成原恒星天体^[5-6]. 致密分子云团块是恒星形成的场所, 其形态和物理特性决定了恒星形成的初始条件, 具有重要的研究意义.

在分子云中, 主要成分是分子氢(H_2). 除 H_2 外, 最重要且丰度最高的是一氧化碳分子(CO)^[7]. CO 作为丰度最高、应用最广的分子探针, 用于探究分子云的物理状态、分布和运动特性^[8]. 不同光学厚度的 CO 同位素分子可以作为探测星际介质中的不同层次和环境的有效探针^[9], 特别是完全光薄的

2024-09-18收到原稿, 2024-11-25收到修改稿

*国家自然科学基金项目(U2031202、12373030、12403052)

†huangyao@ctgu.edu.cn

C^{18}O 分子为我们提供了研究更小或更致密区域的机会, 这些区域通常是最接近或即将发生恒星形成的位置^[10-11].

为了全面了解银河系平面分子气体的分布, 国内外开展了多项针对银河系结构的 CO 分子气体巡天项目^[12], 如哈佛-史密松森天体物理中心的 $^{12}\text{CO}(J=1-0)$ 巡天^[13]、五院校射电天文台的银河系环形巡天(Galactic Ring Survey, GRS)^[14]、英国利物浦约翰摩尔斯大学天体物理研究所的 $^{13}\text{CO}/\text{C}^{18}\text{O}$ 异构内银河系平面巡天(the $^{13}\text{CO}/\text{C}^{18}\text{O}$ Heterodyne Inner Milky Way Plane Survey, CHIMPS)^[15]、马克斯-普朗克射电天文学研究所的银河系内星际介质的结构、激发机制与动力学(Structure, Excitation and Dynamics of the Inner Galactic Inter-Stellar Medium, SEDIGISM)^[16]巡天以及中国科学院紫金山天文台的银河画卷(The Milky Way Imaging Scroll Painting, MWISP)^[17]巡天等. 这些巡天项目获得了海量观测数据, 天文学家利用这些数据对银河系分子气体的特性与恒星形成的关系展开了大量有意义的研究工作.

Yuan等人将云的形态、性质和银河系环境相联系, 根据其形态将其分为条状和非条状结构, 发现约占分子云总数10%的条状分子云贡献了 ^{12}CO 分子云总流量的90%左右^[18]. Neralwar等人首先利用J-plots算法和视觉分辨对来自SEDIGISM巡天的分子云数据完成了形态分类, 发现大多数云呈现细长的结构^[19-20]. 之后Clarke等人又根据改进后的RJ-plots算法再次更新了SEDIGISM目录分类标签, 并表明分子云结构的中心聚集度与其恒星形成效率以及致密气体比例之间存在强烈的相关性, 而与条状形态之间则没有明显的相关性^[21]. 上述研究选择把更大尺度的 ^{12}CO 分子云作为分类对象, 分析分子云的形态特征和规律, 对其他同位素(^{13}CO 与 C^{18}O)所示踪的更致密结构的形态分类研究较少.

近年来, 机器学习技术的蓬勃发展提升了小尺度分子云致密结构检测算法的性能. 如Gauss-Clumps^[22]算法是通过迭代最大峰值处的数据进行三维高斯拟合来获取团块区域; ClumpFind^[23]检测算法采用等高线的方式, 将包含极值点等高线的

像素划分给该极值点作为一个致密结构; Fell-Walker^[24]算法是从数据强度较低的点沿梯度最大方向寻找局部极大值, 将交汇于同一个峰值位置的所有路径上的点划分到同一个结构; Dendrograms^[25]算法在分子谱线上展现了数据的层次结构, 通过构建分子谱线的层次结构识别分子云团块. 除此之外, 也产生了一些新的专门针对分子云团块、分子云核的检测算法. Local Density Clustering^[26]算法利用局部密度聚类方法来确定团块中心、成员和边界; ConBased^[27]算法将信号划分为小区域, 并使用基于连通性、峰值距离、强度差异以及体积的合并规则将信号从体积最小的区域合并; FacetClumps^[28]算法应用多元函数的极值判定定理来确定聚类中心, 再结合连通性和最小距离, 对中心的局部区域进行聚类来识别团块. 检测手段的提升, 产出了大量分子云致密结构源表, 为研究小尺度分子云团块、分子云核的形态特征提供了数据来源.

来自MWISP巡天项目的大规模、无偏和高灵敏度的 CO 谱线数据, 为我们系统研究分子云团块的空间分布和形态特征提供了机会. 本文利用FacetClumps算法对处于银经(galactic longitude, l) $10^\circ \leq l \leq 20^\circ$ 和银纬(galactic latitude, b) $|b| \leq 5^\circ.25$ 范围的 C^{18}O 分子云核进行了检测和认证. 结合该范围的 ^{13}CO 分子云团块源表^[29], 完成了 ^{13}CO 团块和 C^{18}O 核的匹配. 基于匹配结果对 ^{13}CO 分子云团块的形态进行了分类研究和统计分析, 还探讨了不同密度探针下的气体的形态差异.

本论文组织如下: 第2节为 ^{13}CO 分子云团块以及 C^{18}O 分子云核样本获取及匹配. 第3节以是否匹配上 C^{18}O 核为分类标准, 对两类 ^{13}CO 团块的参数进行了统计分析. 在第4节中, 我们分析讨论了 ^{13}CO 团块和 C^{18}O 核的形态特征. 第5节为论文的结论.

2 数据

2.1 数据来源

银河画卷(MWISP)使用紫金山天文台13.7 m毫米波望远镜(有关望远镜的详细信息可在<http://www.radioast.nsd.cn/mwisp.php>找到), 同

时观测 ^{12}CO 、 ^{13}CO 和 C^{18}O ($J=1-0$) 3条跃迁谱线, 是一项具有高灵敏度、宽速度范围和高分辨率的无偏巡天项目. 根据测量策略, 使用 3×3 多波束边带分离超导光谱阵列接收器系统进行观测. 该接收机采用双边带超导-绝缘体-超导混频器, 内含快速傅立叶光谱仪, 广泛采用数字技术, 结合OTF (On-The-Fly)观测模式, 具有良好的运行稳定性和效率^[30-32]. ^{12}CO 在上边带观测到, 主波束宽度为 $48''$, ^{13}CO 和 C^{18}O 谱线在下边带观测到, 主波束宽度为 $50''$, 两者带宽均为1000 MHz, 16384个通道. ^{12}CO 的速度分辨率约为 $0.159 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, ^{13}CO 和 C^{18}O 的速度分辨率约为 $0.166 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 整个观测的天空覆盖范围为 $-10^\circ \leq l \leq +250^\circ$ 和 $|b| \leq 5^\circ.25$ 共计10941个单元, 其中每个单元的大小为 $30' \times 30'$. 在完成谱线的基线校准后, 形成网格间距为 $30''$ 的 ^{12}CO 、 ^{13}CO 和 C^{18}O 谱线的三维数据立方体^[17]. ^{12}CO 、 ^{13}CO 和 C^{18}O 谱线的典型均方根 (root mean square, rms)噪声水平分别为0.47、0.22和0.21 K^[29].

2.2 数据样本

2.2.1 ^{13}CO 分子云团块

Luo等人利用来自MWISP的 ^{13}CO ($J=1-0$)发射谱线, 根据Facet-SS-3D-Clump流程, 对 $10^\circ \leq l \leq 20^\circ$ 、 $|b| \leq 5^\circ.25$ 的区域(累计覆盖面积约100 deg^2)完成了分子云团块的提取及置信度分配^[29]. ^{13}CO 团块的获取流程主要分为两步, 先根据

FacetClumps算法获得候选分子云团块, 通过与Dendrograms算法检测到的团块进行交叉匹配, 获得高置信度的团块; 再把这些高置信度的团块作为训练半监督深度聚类模型SS-3D-Clump的先验知识, 最后将训练后的模型用于验证候选团块, 为这些团块提供置信度. 最终, 包含了18757个 ^{13}CO 团块的源表发布在<https://www.scidb.cn/en/s/qEfe2m>. 该范围涵盖非常活跃的大质量恒星形成区域, 如M16^[33]、M17^[34]、W31^[35]、W33^[36]和W39^[37], 存在大量分子云团块、分子云核不同演化阶段的样本, 是了解恒星演化过程的关键区域. 本文使用的 ^{13}CO 团块选自该源表, 表1展示了统计分析所用到的分子云团块的参数信息. 表1中的团块置信度(Confidence)和团块流量(Flux)参数会作为选源标准.

团块置信度(表1中的Confidence参数)分布情况如图1所示, 其范围是0.8–1. 为了保障 ^{13}CO 分子云团块的准确性, 需选择置信度高的样本, 本文选择了置信度大于等于0.9的 ^{13}CO 团块样本作为研究对象, 即 $\text{Confidence} \geq 0.9$. 关于团块流量(表1中的Flux参数)分布情况如图2所示, 根据文献^[29]的完备性实验结果, 当流量为 $37 \text{ K} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 团块召回率为90%. 为了保障 ^{13}CO 团块样本的完备性, 本文选择了流量大于 $37 \text{ K} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的团块作为研究对象, 即 $\text{Flux} > 37 \text{ K} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$. 当Confidence和Flux两个选择条件同时满足时, 我们从源表中筛选出了7097个 ^{13}CO 分子云团块作为分析对象.

表 1 ^{13}CO 团块目录列名称(部分)说明
Table 1 Description of columns (part) in the catalog of ^{13}CO clumps

Column Name	Explanations
ID	Designation of the clump (MWISPLLL.lll+B.bbb+VVV.v)
GLON/($^\circ$)	Galactic longitude
GLAT/($^\circ$)	Galactic latitude
Velocity/($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)	The central radial velocity with respect to local standard of rest
Peak/K	The peak value of clump
Flux/($\text{K} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)	The total integrated flux of clump
Confidence	The confidence associated with the clump verified by SS-3D-Clump

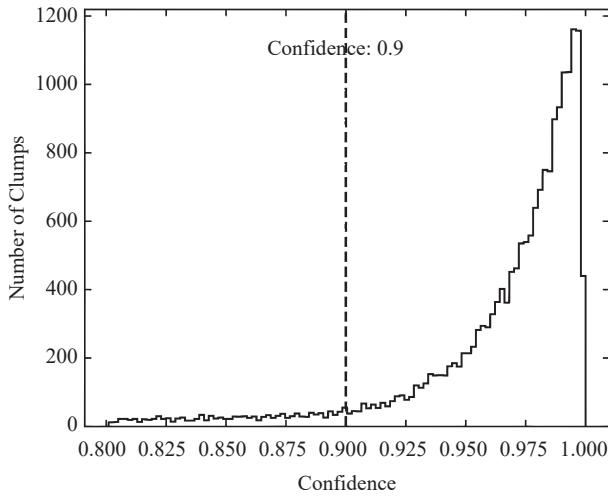


图 1 ^{13}CO 团块置信度分布图. 虚线表示置信度为 0.9 的分界线.

Fig. 1 Confidence level distribution of ^{13}CO clumps. The dashed line indicates the threshold at a confidence level of 0.9.

2.2.2 C^{18}O 分子云核

参考文献[29]中 ^{13}CO 分子云团块的提取方法, 我们采用相同的FacetClumps算法检测该区域的 C^{18}O 分子云核的候选体. FacetClumps算法是结合小面模型和多元函数极值定理, 自动定位预处理信号区域内的源中心并基于连通性的最小距离聚类方法来合并由局部梯度分割的局部区域, 从而识别出与每个源对应的区域, 对致密结构的检测具有较高的准确性. 表2给出了检测 C^{18}O 谱线的算法参数.

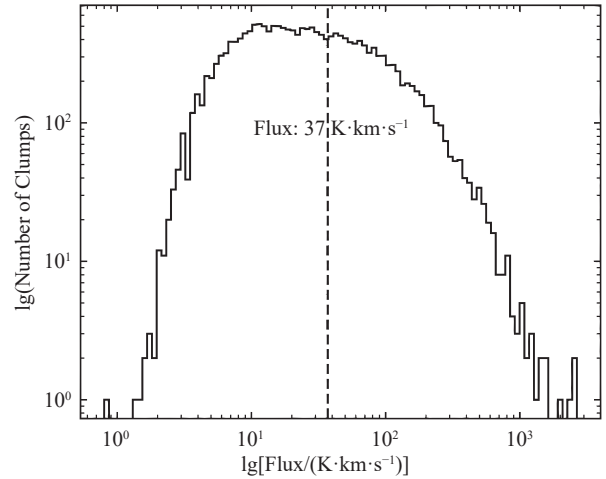


图 2 ^{13}CO 团块流量分布图. 虚线表示流量为 $37 \text{ K} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的分界线.

Fig. 2 Flux distribution of ^{13}CO clumps. The dashed line indicates the threshold at $37 \text{ K} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$.

该算法在获得源表的同时, 也输出了检测结果的掩膜(Mask)数据. 源表目录给出了每个源的相关参数, 包括源在掩膜数据中的空间坐标编号; 源的质心的银经、银纬和视向速度的位置; 源的尺寸; 源的峰值强度; 源的流量等. 在掩膜中, 属于相同源的像素点被标记为同一个整数, 未分配的像素点被标记为0. 根据源表目录记载的源的质心位置和尺寸大小, 就可以在输入数据中提取出该源的三维立方体原始数据.

表 2 C^{18}O 核检测算法参数
Table 2 Parameters of C^{18}O cores detection algorithm

Parameters	Explanations	Value
rms	The noise rms of the data	0.21
Threshold	The minimum intensity used to truncate the signals	$5 \cdot \text{rms}$
SWindow	The scale of the window function, in pixels	3
KBins	The coefficient used to calculate the number of eigenvalue bins	35
FwhmBeam	The FWHM (Full Width Half Maximum) of the instrument beam, in pixels	2
VeloRes	The velocity resolution of the instrument, in channels	2
SRecursionLBV	The minimum area of a region in the spatial direction (SRecursionLB) and the minimum length of a region in the velocity channels (SRecursionV) when a recursion terminates. The region of a clump also needs to satisfy the conditions	[16, 5]

由于噪声的存在, FacetClumps算法得到的检测结果还存在一定数量的虚假 C^{18}O 目标. 得到检测目录后, 为了保障 C^{18}O 核的可靠性, 还需要对检测结果进行证认. 对于算法输出目录中的每个 C^{18}O 分子云核候选体, 我们绘制了包含银经、银纬和视向速度方向积分强度图和谱线图的证认图片. 同时满足以下两条证认标准的候选体被判断为真实的 C^{18}O 核:

(1) 证认图片中第1排的积分图为集中型;

(2) 证认图片中第2排的平均谱和第3排的极大谱存在明显发射峰.

如图3 (a)所示, 此 C^{18}O 核证认图满足积分图为集中型且谱线图存在明显发射峰. 所以该核被判定为真实 C^{18}O 核. 在图3 (b)中, 积分图不为集中型, 谱线图未见明显发射峰; 在图3 (c)中, 积分图为集中型, 谱线图未见明显发射峰; 在图3 (d)中, 积分图不为集中型, 谱线图存在明显发射峰, 所以(b)、(c)、(d) 3类核被判定为虚假 C^{18}O 核.

在本次证认 C^{18}O 分子云核的过程中, 采用了3人投票的人工证认策略^[18]. 每个候选体由3人分别独立进行人工证认, 当有2人及以上都认为该候选体为真实 C^{18}O 核时, 将该候选体标记为真实的 C^{18}O 核. 最终共获得544个真实的 C^{18}O 核. 表3为部分核表目录.

2.3 ^{13}CO 分子云团块与 C^{18}O 分子云核的匹配

根据两条谱线上的样本在三维空间上的位置关系, 匹配7097个 ^{13}CO 分子云团块与544个 C^{18}O 分子云核, 如果 C^{18}O 核的质心在 ^{13}CO 团块范围内, 则认为匹配成功, 即该团块存在 C^{18}O 核. ^{13}CO 团块范围是根据FacetClumps给出的掩膜得到的(2.2.2节中Mask). 按此规律, 完成所有 ^{13}CO 团块的匹配, 结果如表4所示, 匹配上 C^{18}O 核的 ^{13}CO 团块总数在表格第1行展示. 匹配率(Matching Ratio)=匹配成功数(Matching Number)/样本数(Sample Number).

所有544个 C^{18}O 分子云核中只有两个核没有匹配到对应的 ^{13}CO 团块. 我们对这两个 C^{18}O 核所在位置的 ^{13}CO 团块进行了分析, 发现其对应位置存在 ^{13}CO 团块, 但该团块置信度小于0.9, 因此不在我

们选择出的 ^{13}CO 团块样本内(2.2.1节).

在指定的速度区间内, 共计424个 ^{13}CO 团块存在 C^{18}O 核, 存在1个 ^{13}CO 团块匹配上多个 C^{18}O 核的情况. 图4和图5展示了 ^{13}CO 团块和 C^{18}O 核的位置关系和匹配数量. 在图4中, 子图(a)中有蓝色和洋红色的三角形, 代表当前 ^{13}CO 团块存在2个 C^{18}O 核. 在图5中, 子图(a)中只有蓝色三角形, 代表当前 ^{13}CO 团块中存在1个 C^{18}O 核. 经过统计, 78%的 ^{13}CO 团块具有一个 C^{18}O 核, 17%的 ^{13}CO 团块具有两个 C^{18}O 核, 其余5%的 ^{13}CO 团块具有两个以上的 C^{18}O 核(图6).

通过匹配结果可以看出, 所有的 C^{18}O 核都包含在 ^{13}CO 团块内, 光薄的 C^{18}O 分子探针可以示踪分子云团块内部更致密的子结构.

3 ^{13}CO 团块参数统计分析

在第2节, 已经完成了 ^{13}CO 团块和 C^{18}O 核的匹配. 根据上述结果, 对 ^{13}CO 团块进行二元分类, 即区分为具有 C^{18}O 核和没有 C^{18}O 核的 ^{13}CO 团块. 将表4中的424个 ^{13}CO 团块命名为Match C^{18}O 团块(简称为M类), 其余的 ^{13}CO 团块命名为No Match C^{18}O 类团块(简称为NM类).

为了研究这两类 ^{13}CO 团块参数的差异性, 对它们的银道面分布、峰值强度、流量和速度跨度进行了统计分析和比较.

3.1 位置分布

我们将通过银经、银纬和径向速度上的概率密度函数图观察两类 ^{13}CO 团块在银河系所处的位置分布的差异性.

如图7 (a)所示, 彩色线条代表不同大质量恒星形成区的经度平均值. 从银经分布来看, 两类团块在恒星形成区均呈现集中趋势. 但由于M类团块的数量远少于NM类团块, 其峰值位置与恒星形成区的一致性不如数量更多的NM类.

在图7 (b)中, 在银纬位置 $-5^\circ.25$ 到 $5^\circ.25$ 之间, M类团块和NM类团块虽然都集中出现在在 $(-3^\circ, 3^\circ)$ 的范围内, 但M类团块更集中在银纬 0° , 也就是银盘的中心区域, 即包含 C^{18}O 核的 ^{13}CO 团块在银纬 0° 出现的概率更大.

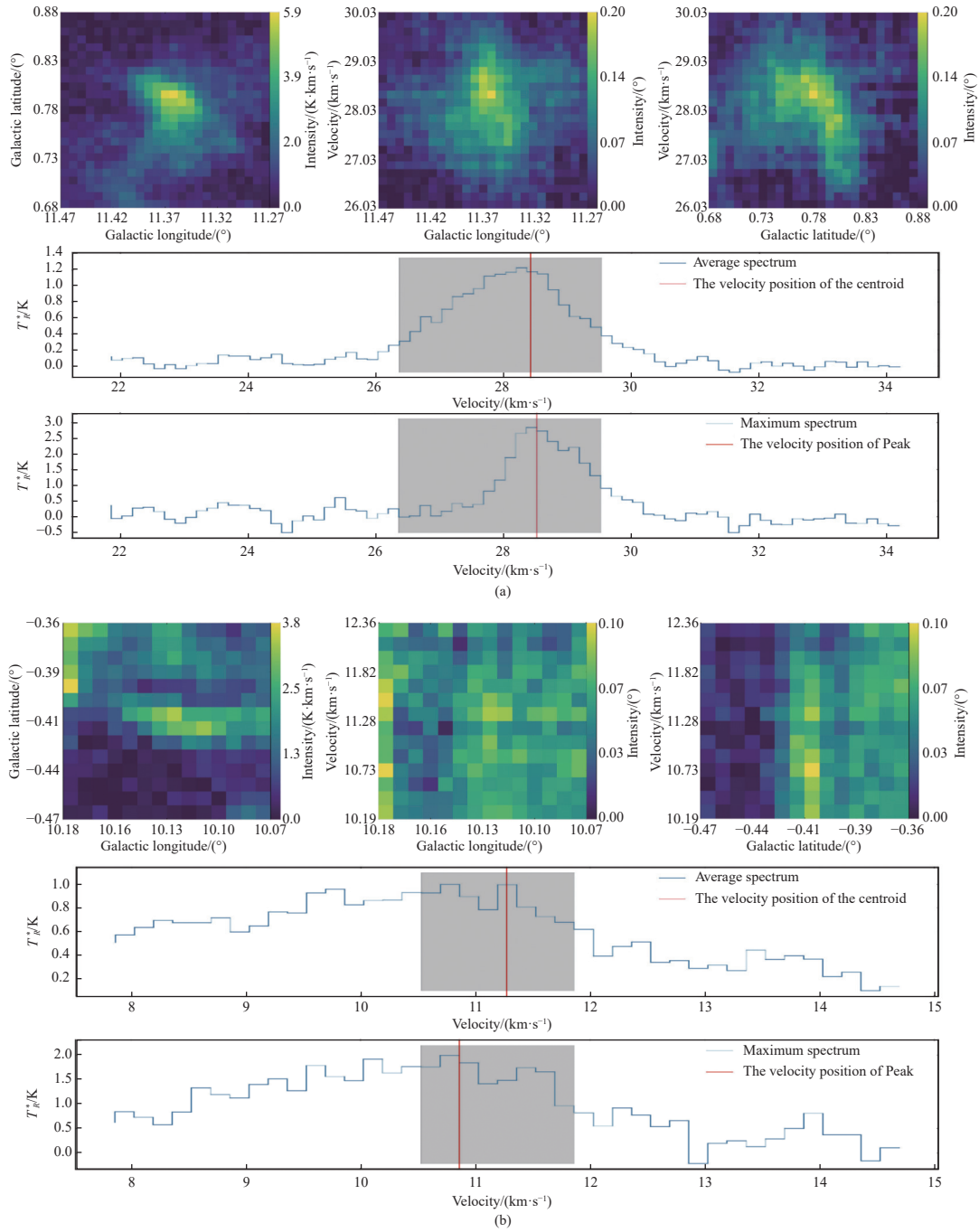


图 3 $C^{18}O$ 分子云核证认图. 子图(a)为真实 $C^{18}O$ 分子云核证认图, 子图(b)、(c)、(d)为虚假 $C^{18}O$ 分子云核证认图. 顶部从左至右分别是 l - b 、 l - v 和 b - v 原始数据的积分强度图. 中间是平均谱, 底部是极大谱, 用蓝色阶梯表示, 其中红色实线表示质心速度大小和峰值速度大小.

Fig. 3 $C^{18}O$ molecular core identification diagrams. Panel (a) shows a true identification of a $C^{18}O$ molecular core, while panels (b), (c), and (d) illustrate false identifications. From left to right at the top is the integrated intensity maps in the l - b , l - v , and b - v planes, based on the original data. The middle row shows the average spectra, and the bottom row displays the maximum spectra. Spectra are shown as blue step lines, with the red solid line indicating the centroid and peak velocities.

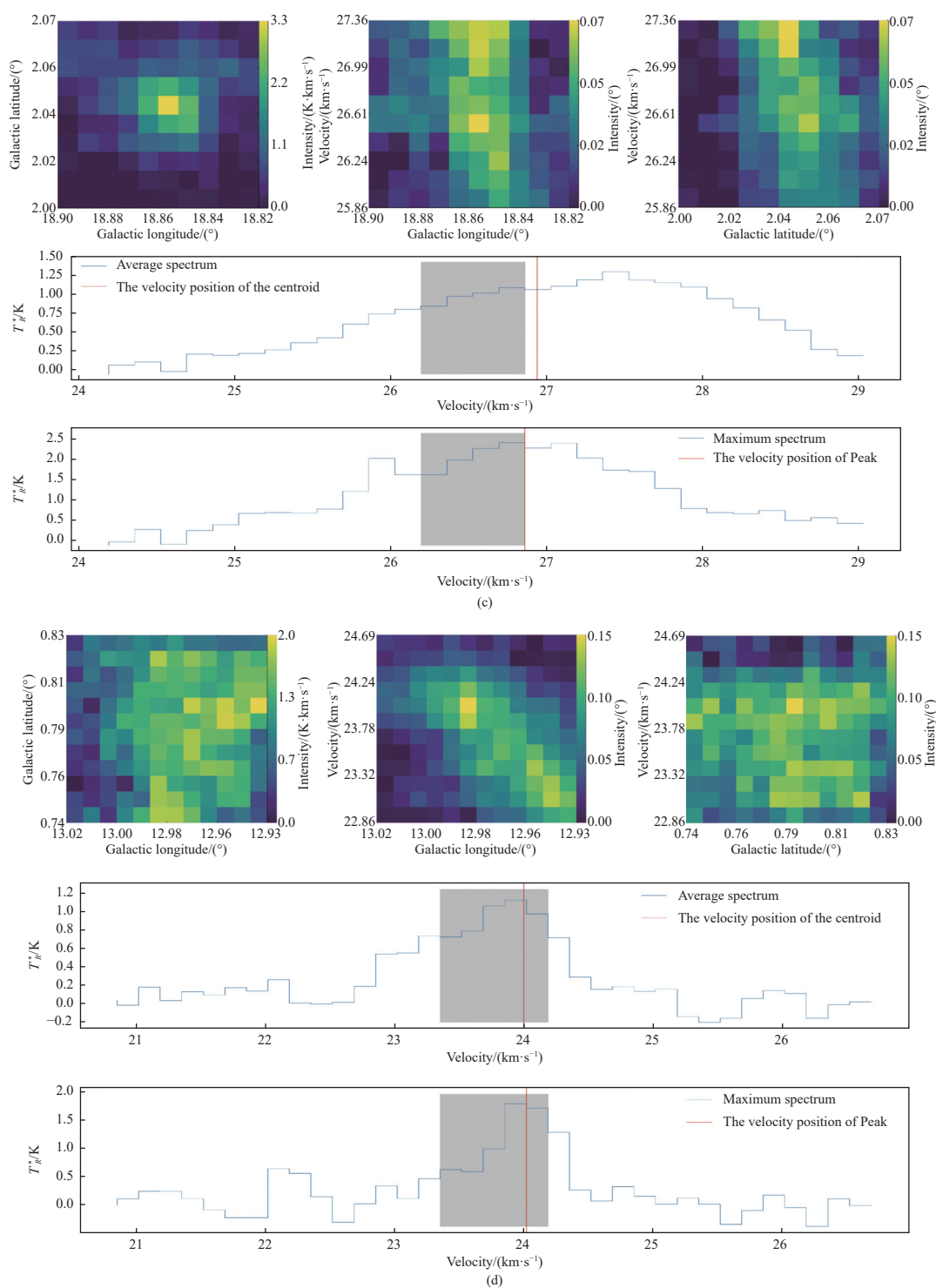


图 3 续

Fig. 3 Continued

表 3 C¹⁸O 分子云核目录(部分)
Table 3 Catalog of C¹⁸O molecular cores (part)

ID	Peak1 /(°)	Peak2 /(°)	Peak3 /(km·s ⁻¹)	Cen1 /(°)	Cen2 /(°)	Cen3 /(km·s ⁻¹)	Size1 /(")	Size2 /(")	Size3 /(km·s ⁻¹)	Peak /K	Flux /(K·km·s ⁻¹)	Volume /pix	Angle /(°)	Edge /(1/0)
MWISP014.203- 00.166+037.39	14.192	-0.167	37.528	14.203	-0.166	37.387	80.94	93.84	0.69	3.43	2358.255	1578	-75	0
MWISP014.239- 00.177+038.19	14.242	-0.175	38.028	14.239	-0.177	38.193	78.63	68.37	0.449	3.188	989.833	576	-35	0
MWISP014.198- 00.208+039.22	14.2	-0.208	39.361	14.198	-0.208	39.216	86.88	112.08	0.627	3.348	2702.795	1845	-80	0
MWISP014.218- 00.129+038.43	14.192	-0.158	38.361	14.218	-0.129	38.434	82.32	64.62	0.266	3.079	329.358	260	-36	0
MWISP014.112- 00.148+038.87	14.108	-0.142	38.694	14.112	-0.148	38.872	49.95	43.08	0.357	2.01	238.197	216	31	0
MWISP013.872- 00.082+036.80	13.883	-0.083	36.861	13.872	-0.082	36.795	47.79	48.42	0.457	2.268	342.82	305	-82	0
MWISP013.906- 00.114+038.92	13.908	-0.117	38.694	13.906	-0.114	38.924	99.57	50.28	0.624	3.01	1006.473	834	-2	0
.....														

Notes: ID refers to the name of the molecular core. Peak1 and Peak2 denote the galactic longitude and latitude of the peak intensity, respectively, while Peak3 indicates the radial velocity at the peak. Cen1 and Cen2 represent the galactic longitude and latitude of the core's centroid, respectively, and Cen3 is the centroid's radial velocity. Size1, Size2, and Size3 correspond to the core's extents along the galactic longitude, latitude, and radial velocity directions, respectively. Peak is the peak intensity, Flux is the total integrated flux, and Volume is the number of pixels comprising the core. Angle represents the orientation angle of the core, and Edge indicates whether the molecular core touches the edge of the data boundary (1 for yes, 0 for no). The complete catalog is available online (<https://www.scidb.cn/en/s/Bnumya>).

在图7 (c)中, NM类团块径向速度中心的分布与M类团块接近, 根据速度中心统计数据中的0.25–0.75的分位数表明, 两者都集中在(20, 45) $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的范围内. 但M类团块基本不会出现在速度小于 $-5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 以及大于 $75 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的范围. NM类的团块速度有少部分出现在 $75 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围, 这是因为这些团块位于更远的气体旋臂上, 导致 C^{18}O 的探测无法覆盖这些区域.

表 4 ^{13}CO 团块和 C^{18}O 核匹配结果
Table 4 Matching results between ^{13}CO clumps and C^{18}O cores

	Sample Number	Matching Number	Matching Ratio
^{13}CO	7097	424	5.97%
C^{18}O	544	542	99.63%

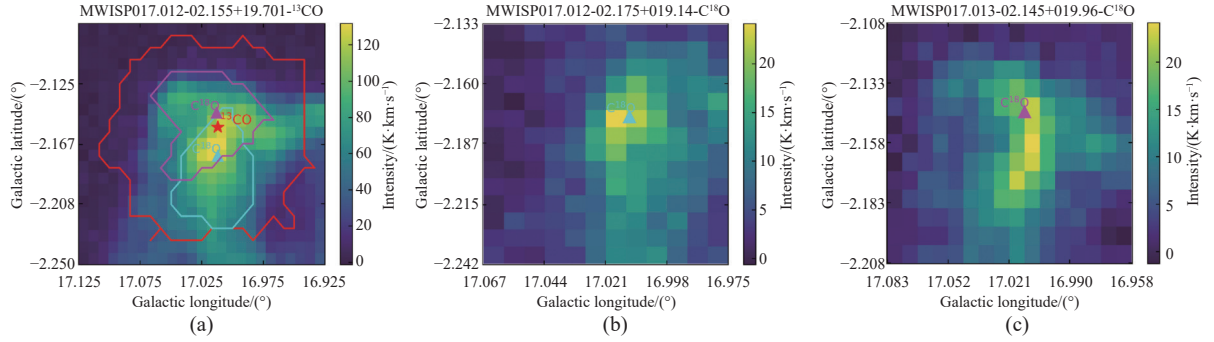


图 4 ^{13}CO 分子云团块和 C^{18}O 分子云核位置关系图. 子图(a)背景是 ^{13}CO 团块的原始数据在二维空间(l, b)平面上的速度积分图, 红色线条表示 ^{13}CO 团块轮廓, 五角星代表 ^{13}CO 团块的质心, 三角形代表 C^{18}O 核的质心. 子图(b)、(c)是 C^{18}O 核的原始数据的速度积分图.

Fig. 4 Positional relationship between ^{13}CO molecular clumps and C^{18}O molecular cores. Panel (a) has a background of the ^{13}CO clumps' original data integrated over velocity on the 2D (l, b) plane; red contours indicate the boundaries of the ^{13}CO clumps, pentagrams represent the centroids of the ^{13}CO clumps, and triangles represent the centroids of the C^{18}O cores. Panels (b) and (c) are the velocity-integrated maps of the original data for the C^{18}O cores.

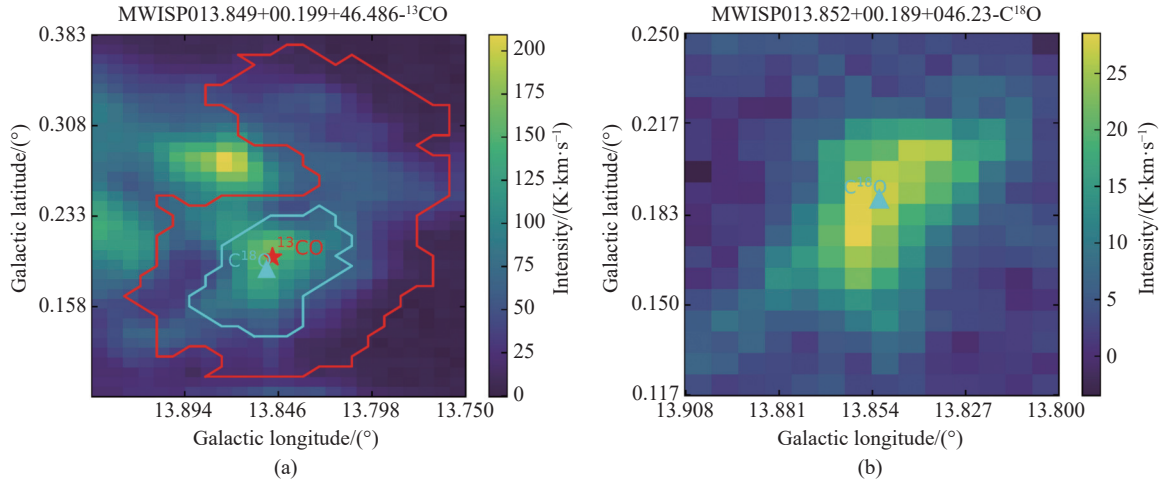
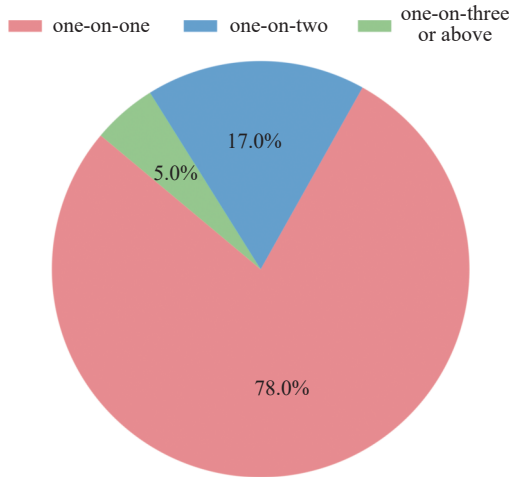


图 5 ^{13}CO 分子云团块和 C^{18}O 分子云核位置关系图

Fig. 5 Positional relationship between ^{13}CO molecular clump and C^{18}O molecular core

图 6 匹配成功的 ^{13}CO 团块对应的 C^{18}O 核数量占比图Fig. 6 Proportion of C^{18}O cores matched to ^{13}CO clumps

3.2 速度跨度

图7 (d)给出了M类团块和NM类团块的速度跨度的概率密度分布. 速度跨度为团块速度最小值与最大值的差值. 对于M类团块, 速度跨度分布在 $2.66\text{--}10.13 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的范围内, 多数源(0.25–0.75的分位数)的速度跨度值位于 $4.82\text{--}6.14 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的范围内. 而NM类团块速度跨度的取值范围为 $1.83\text{--}10.63 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 集中(0.25–0.75的分位数)分布在 $3.65\text{--}4.82 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. 这说明M类团块的速度跨度更大.

3.3 峰值强度

图8 (a)展示了M类和NM类团块在峰值强度上的不同. 对于M类, 峰值强度的分布范围为 $3.53\text{--}30.71 \text{ K}$, 对于NM类, 峰值强度分布在 $1.36\text{--}18.58 \text{ K}$ 的范围内. 与NM类相比, M类团块峰值强度分布整体向右偏移, 从中值来看, M类为 7.62 K , NM类为 3.40 K , 二者偏差接近55%. 同时, M类的 ^{13}CO 团块的峰值强度均值也比NM类团块大 4.61 K . M类的团块具有更大的峰值强度.

3.4 流量

图8 (b)展示了流量分布情况. M类团块流量的中位数值为 $1363.32 \text{ K} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$, 是NM类团块中位数值 $355.95 \text{ K} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的3.83倍. M类团块流

量的平均值为 $1755.00 \text{ K} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$, NM类团块流量的平均值为 $469.21 \text{ K} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$, M类团块的流量显著大于NM类. 此外, 我们分别计算了总分子云团块和两类团块的流量. 整个7097个 ^{13}CO 分子云团块的总流量为 $3.87 \times 10^6 \text{ K} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$, 数量占比5.97%的M类团块贡献了20%的流量 ($7.44 \times 10^5 \text{ K} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$).

4 形态参数分析

4.1 ^{13}CO 分子云团块形态分析

4.1.1 离心率

真实的 ^{13}CO 团块形态是不规则的, 而团块的理想模型是三维高斯模型, 三维高斯模型在二维平面的投影是一个椭圆. 所以我们选择对二维平面上的 ^{13}CO 团块形态进行椭圆拟合, 用离心率作为判断 ^{13}CO 团块形状的参考指标. 椭圆的离心率是描述椭圆形状的一个重要参数, 它反映了椭圆的扁平程度, 取值范围在0到1之间. 具体做法分为以下几步:

(1)对每个 ^{13}CO 团块的掩膜数据进行速度方向上的积分, 以投影在二维平面上的团块边界轮廓作为椭圆拟合的输入.

(2)采用matplotlib.patches库中的Ellipse函数完成轮廓拟合.

(3)根据输出长轴 a 和短轴 b , 计算离心率^[38–39]:

$$E = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}}. \quad (1)$$

图9 (a)为 ^{13}CO 团块轮廓拟合成功的示例图. 我们检查了所有团块轮廓形态拟合的结果, 发现在7097个 ^{13}CO 团块中有11个拟合失败(占比0.2%), 其中9个来自NM类团块. 拟合失败的原因是这些团块轮廓不规则性太大, 偏离椭圆模型, 如图9 (b)所示. 由于数量占比较小, 在不影响统计分析结论的情况下, 剔除了这11个团块.

我们比较了两类团块的离心率, 统计分布情况如图10 (a)所示, 二者的离心率取值范围相近, M类为 $0.24\text{--}0.89$, NM类为 $0.11\text{--}0.95$, M类团块的离心率分布更集中. 就中值来看, M类团块离心率中值为0.64, NM类团块为0.67. 在均值上也展现出几乎相同的大小关系.

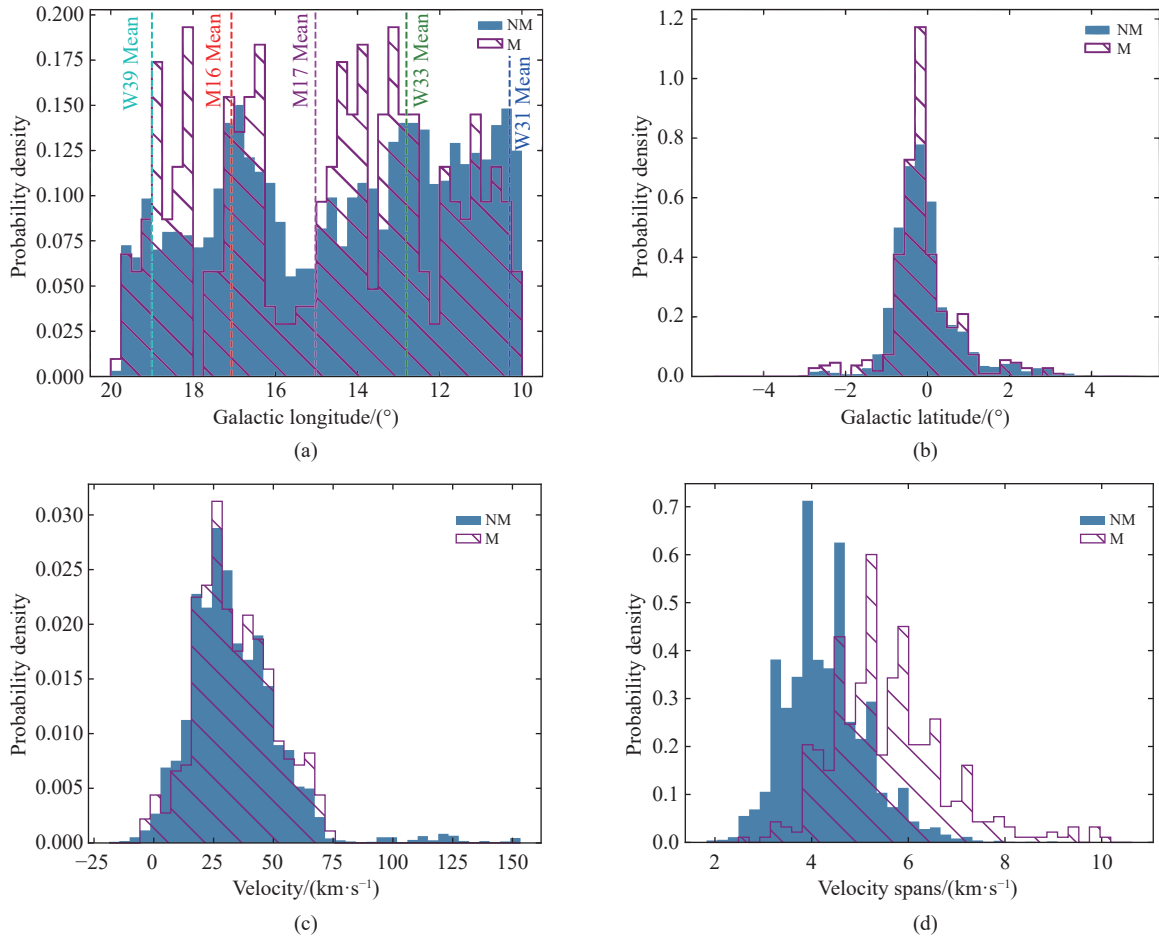


图 7 子图(a)、(b)、(c)、(d)分别为 ^{13}CO 团块银经、银纬、径向速度中心、速度跨度的概率密度分布。
蓝色直方图表示NM类团块, 紫色直方图代表M类团块。

Fig. 7 Panels (a), (b), (c), and (d) show the probability density distributions of the galactic longitude, galactic latitude, central radial velocity, and velocity span of the ^{13}CO clumps, respectively. Blue histograms represent NM-type clumps, and purple histograms represent M-type clumps.

综上, 从椭圆拟合的情况来看, 绝大部分 ^{13}CO 团块都可以拟合成功, 说明 ^{13}CO 团块在二维平面(l, b)的积分图用椭圆来描述是基本合理的. 从两类团块整体来看, 两类团块离心率的分布没有显著性差异, M类团块的均值和中值略小于NM类.

4.1.2 角面积

角面积(S)可以用于描述团块的大小(团块实际大小受距离影响很大, 此处只对算法检测到的原始结果进行讨论). 定义角面积为像素分辨率

0.25平方角分(arcmin^2)^[18]乘以掩膜团块的速度积分投影在二维平面上的像素个数 $\text{Pixel}_{\text{num}}$, 即

$$S = 0.25 \text{Pixel}_{\text{num}}. \quad (2)$$

在图10 (b)中, M类团块的角面积在30.75–227.5 arcmin^2 范围内, 集中在65.25–107.56 arcmin^2 范围内. 而NM类的角面积分布在14.0–255.25 arcmin^2 之间, 主要在45.75–77.0 arcmin^2 之间. 前者比后者在中值上大了约30%. 根据角面积的分布以及中值、均值的大小, 可以看出M类团块的角面积更大.

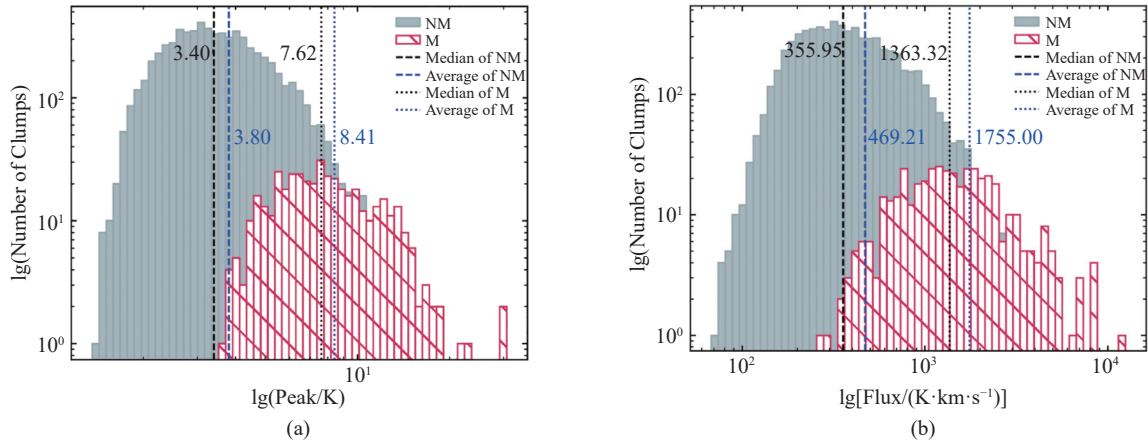


图 8 子图(a)和(b)分别为 ^{13}CO 团块峰值强度、流量的数量分布. 灰色直方图表示NM类团块, 红色直方图代表M类团块. 黑色竖虚线是NM类团块的中值, 蓝色竖虚线是NM类团块的均值. 黑色竖点线是M类团块的中值, 蓝色竖点线是M类团块的均值.

Fig. 8 Panels (a) and (b) show the distributions of peak intensity and flux of ^{13}CO clumps, respectively. The gray histogram represents NM clumps, while the red histogram represents M clumps. The black vertical dashed line indicates the median of NM clumps, and the blue vertical dashed line indicates the mean of NM clumps. The black vertical dotted line shows the median of M clumps, and the blue vertical dotted line shows the mean of M clumps.

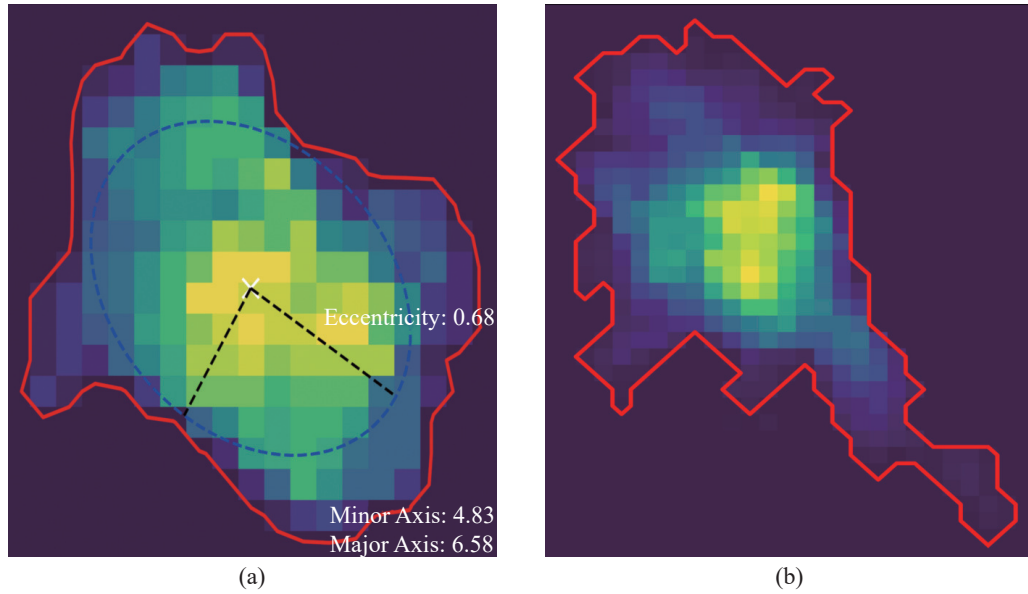


图 9 子图(a)表示 ^{13}CO 团块轮廓拟合成功图. 其中红色线条为 ^{13}CO 团块的边界轮廓, 蓝色线条为拟合椭圆. 白色十字为拟合椭圆中心, 黑色虚线为长短轴. 子图(b)表示 ^{13}CO 团块轮廓拟合失败图. 其中红色线条为 ^{13}CO 团块的边界轮廓.

Fig. 9 Panel (a) shows a ^{13}CO clump contour with successful fitting. The red line indicates the boundary contour of the ^{13}CO clump, and the blue line shows the fitted elliptical shape. The white cross marks the center of the fitted ellipse, and the black dashed lines represent the major and minor axes. Panel (b) shows a ^{13}CO clump contour with failed fitting. The red line indicates the boundary contour of the ^{13}CO clump.

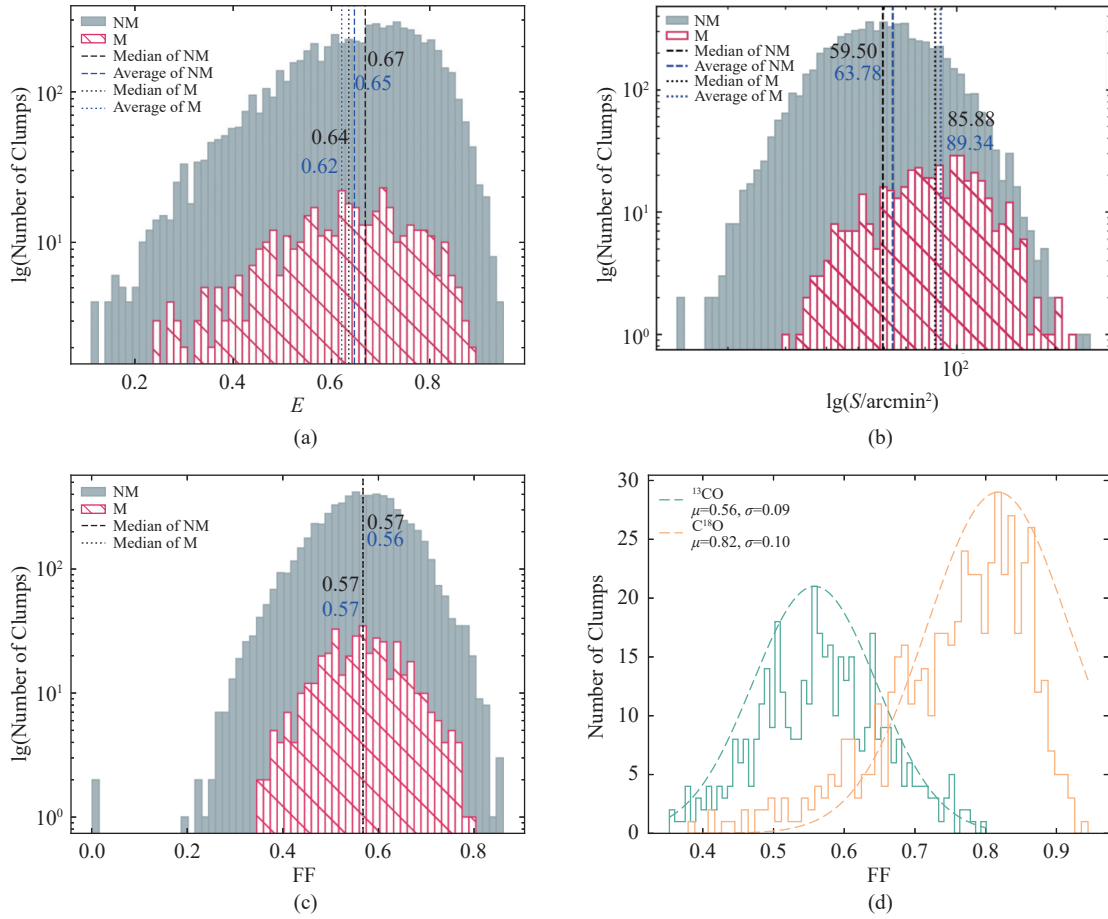


图 10 子图(a)、(b)、(c)分别为 ^{13}CO 团块离心率、角面积、形状因子的数量分布. 灰色直方图表示NM类团块, 红色直方图代表M类团块. 黑色竖虚线是NM类团块的中值, 蓝色竖虚线是NM类团块的均值. 黑色竖点线是M类团块的中值, 蓝色竖点线是M类团块的均值. 子图(d)是 ^{13}CO 中M类分子云团块和 C^{18}O 分子云核的形状因子数量分布, 绿色和黄色分别代表M类分子云团块和 C^{18}O 分子云核的直方图和高斯拟合曲线.

Fig. 10 Panels (a), (b), and (c) show the distributions of eccentricity, angular area, and form factor of ^{13}CO clumps, respectively. The gray histogram represents NM clumps, while the red histogram represents M clumps. The black vertical dashed line indicates the median of NM clumps, and the blue vertical dashed line indicates the mean of NM clumps. The black vertical dotted line shows the median of M clumps, and the blue vertical dotted line shows the mean of M clumps. Panel (d) presents the distribution of form factor for M ^{13}CO molecular clumps and C^{18}O molecular cores. Green and yellow represent the histograms and Gaussian fitting curves of M clumps and C^{18}O cores, respectively.

4.1.3 形状因子

形状因子(Form Factor, $\text{FF}^{[40]}$)是可以定量描述物体形状的参数, 当物体为正圆时, $\text{FF}=1$, 偏离正圆时, $\text{FF} < 1$. 形状因子表明, 其值越接近1, 说明该气体结构越接近圆形, 计算式为:

$$\text{FF} = \frac{4\pi A}{C^2}, \quad (3)$$

其中, A 表示面积、 C 表示周长. 我们利用shapely库中的polygonarea和polygon length函数获得了团块的面积和周长, 用于完成 ^{13}CO 团块的形状因子计算. 形状因子的数量分布如图10 (c)所示. 二者中值都是0.57. 就集中分布区间来说, M类团块为0.51–0.63, NM类团块为0.50–0.60, 两类团块十分接近, 说明 ^{13}CO 团块的形状因子不会因为是否包含 C^{18}O 核存在明显差异.

4.2 ^{13}CO 团块和 C^{18}O 核的形态

^{13}CO 大多是光薄的,这种谱线适合示踪致密的分子云团块,完全光薄的 C^{18}O 则可以示踪更小或更致密区域.我们还通过计算 ^{13}CO 中M类分子云团块和 C^{18}O 分子云核的形状因子,对不同密度探针所示踪的源的形态进行了比较分析,其分布情况如图10(d)所示.我们用高斯曲线拟合了分布直方图, μ 和 σ 分别表示拟合的均值和标准差.可以看出,两种不同密度的探针分子所探测到的源,形状因子有明显差异.

M类 ^{13}CO 团块的拟合参数 μ 为0.56,而 C^{18}O 核的拟合参数 μ 为0.82.说明 C^{18}O 核以更圆的形态被包裹在 ^{13}CO 团块内部.综上,分子云核比M类分子云团块整体更小、更接近圆形形态,代表在 ^{13}CO 团块中,存在形态更规则的高密度子结构.

5 结论

我们在银河画卷巡天 $10^\circ \leq l \leq 20^\circ$ 、 $|b| \leq 5^\circ.25$ 的区域范围,根据 ^{13}CO 团块是否存在 C^{18}O 核,完成了 ^{13}CO 分子云团块的分类工作.主要结论有:

在7097个 ^{13}CO 分子云团块中,有424个团块存在 C^{18}O 核(即M类团块),其余 ^{13}CO 团块为NM类团块.其中,78%的 ^{13}CO 团块有一个 C^{18}O 核,17%的 ^{13}CO 团块有两个 C^{18}O 核,其余5%的 ^{13}CO 团块有两个以上的 C^{18}O 核.存在 C^{18}O 核的 ^{13}CO 团块往往具有更大的速度跨度、峰值强度以及流量.在全部 ^{13}CO 分子云团块样本中,数量占比只有5.97%的M类分子云团块贡献了20%的 ^{13}CO 团块流量.M类分子云团块和NM类分子云团块在形态参数上略有区别,从离心率来看, ^{13}CO 分子云团块的均值都大于0.5,说明在二维形态上用椭圆来描述 ^{13}CO 分子云团块是合理的.从角面积分析,前者在中值上比后者大约30%,说明尺度更大的 ^{13}CO 团块更容易在其内部形成更致密的 C^{18}O 核.从形状因子来看,包含在 ^{13}CO 团块内部的 C^{18}O 核的形态更规则, ^{13}CO 团块更椭, C^{18}O 核更圆.这种规律表示,分子探针密度越高,探测到的结构更加规则.一定程度上可能预示着随着分子密度的增大,引力对分子云核的形成有着越来越重要的影响.

致谢 研究所使用的数据来自于银河画卷巡天计划.银河画卷是使用紫金山天文台13.7 m望远镜开展的北银道面 ^{12}CO & ^{13}CO & C^{18}O 多谱线巡天项目.我们非常感谢银河画卷巡天工作组的所有成员尤其是青海观测站工作人员的长期努力.

参考文献

- [1] Blitz L, Stark A A. *ApJ*, 1986, 300: L89
- [2] Rosolowsky E W, Pineda J E, Foster J B, et al. *ApJS*, 2008, 175: 509
- [3] Ballesteros-Paredes J, André P, Hennebelle P, et al. *SSRv*, 2020, 216: 5
- [4] Gomez G C, Vazquez-Semadeni E. *ApJ*, 2014, 791: 124
- [5] Shu F H, Adams F C, Lizano S. *ARA&A*, 1987, 25: 23
- [6] Bontemps S, Motte F, Csengeri T, et al. *A&A*, 2010, 524: A18
- [7] Wilson R W, Jefferts K B, Penzias A A. *ApJ*, 1970, 161: L43
- [8] Bolatto A D, Wolfire M, Leroy A K. *ARA&A*, 2013, 51: 207
- [9] 孙锦, 李守中. 分子天体物理学基础. 北京: 北京师范大学出版社, 2004: 12-15
- [10] Bo R, Jewitt D, Keil K. *Protostars & Planets V*// Francesco J D, Evans-II N J, Caselli P, et al. *An Observational Perspective of Low-Mass Dense Cores I: Internal Physical and Chemical Properties*. Tucson: University of Arizona Press, 2006: 17
- [11] Lada C J, Muench A A, Rathborne J, et al. *ApJ*, 2008, 672: 410
- [12] Mark H H, Thomas M D. *ARA&A*, 2015, 53: 583
- [13] Dame T M, Hartmann D, Thaddeus P. *ApJ*, 2001, 547: 792
- [14] Jackson J M, Rathborne J M, Shah R Y, et al. *ApJS*, 2006, 163: 145
- [15] Rigby A J, Moore T J T, Plume R, et al. *MNRAS*, 2016, 456: 2885
- [16] Schuller F, Csengeri T, Urquhart J S, et al. *A&A*, 2017, 601: 25
- [17] Su Y, Yang J, Zhang S B, et al. *ApJS*, 2019, 240: 9
- [18] Yuan L X, Yang J, Du F J, et al. *ApJS*, 2021, 257: 51
- [19] Neralwar K R, Colombo D, Duarte-Cabral A, et al. *A&A*, 2022, 663: A56
- [20] Jaffa S E, Whitworth A P, Clarke S D, et al. *MNRAS*, 2018, 477: 1927
- [21] Clarke S D, Jaffa S E, Whitworth A P. *MNRAS*, 2022, 516: 2782
- [22] Stutzki J, Guesten R. *ApJ*, 1990, 356: 513
- [23] Williams J P, de Geus E J, Blitz L. *ApJ*, 1994, 428: 693
- [24] Berry D S. *A&C*, 2015, 10: 22
- [25] Rosolowsky E W, Pineda J E, Kauffmann J, et al. *ApJ*,

- 2008, 679: 1338
- [26] Luo X Y, Zheng S, Huang Y, et al. RAA, 2022, 22: 015003
- [27] Jiang Y, Zheng S, Jiang Z B, et al. A&C, 2022, 40: 100613
- [28] Jiang Y, Chen Z W, Zheng S, et al. ApJS, 2023, 267: 32
- [29] Luo X Y, Zheng S, Jiang Z B, et al. RAA, 2024, 24: 055018
- [30] Shan W L, Yang J, Shi S C, et al. ITTST, 2012, 2: 593
- [31] 孙继先, 逯登荣, 杨戟, 等. 天文学报, 2018, 59: 3
- [32] 李振强, 张旭国, 徐烨, 等. 天文学报, 2021, 62: 24
- [33] Hill T, Motte F, Didelon P, et al. A&A, 2012, 542: 791
- [34] Chen Z W, Sun W, Chini R, et al. ApJ, 2021, 922: 90
- [35] Maity A K, Dewangan L K, Sano H, et al. ApJ, 2022, 934: 2
- [36] Messineo M, Clark J S, Figer D F, et al. ApJ, 2015, 805: 110
- [37] Oswalt T D, Gilmore G. Planets, Stars and Stellar Systems. Volume 5: Galactic Structure and Stellar Populations//Kroupa P, Weidner C, Pflamm-Altenburg J, et al. The Stellar and Sub-Stellar Initial Mass Function of Simple and Composite Populations. Heidelberg: Springer, 2013: 115
- [38] 辛科霆, 安东升, 谢基伟, 等. 天文学报, 2023, 64: 46
- [39] Shin K T, An D S, Xie J W, et al. ChA&A, 2024, 48: 1
- [40] 申洪, 朴英杰. 中国电视学与图像分析, 1999, 4: 10

Morphological Analysis of Dense ^{13}CO & C^{18}O Structure in the Milky Way Imaging Scroll Painting ($10^\circ \leq l \leq 20^\circ$)

XIAO Yan-shan^{1,2} ZHANG Hai-xia^{1,2} HUANG Yao^{1,2} JIANG Zhi-bo³ CHEN Zhi-wei³
 ZHENG Sheng^{1,2} ZHANG Peng^{1,2} LUO Xiao-yu^{1,2} JIANG Yu³ PAN Xue-jiao^{1,2}

(1 Center for Astronomy and Space Sciences, China Three Gorges University, Yichang 443002)

(2 College of Mathematics and Physics, China Three Gorges University, Yichang 443002)

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

ABSTRACT Dense molecular clumps are the sites of star formation, and their morphological characteristics are closely linked to the physical properties of the molecular gas. This study is based on data obtained with the Purple Mountain Observatory Delingha (PMODLH) 13.7 m telescope, covering the region with galactic longitudes (l) $10^\circ \leq l \leq 20^\circ$ and galactic latitudes (b) $|b| \leq 5^\circ.25$. We focus on the classification and morphological analysis of dense structures traced by ^{13}CO ($J=1-0$) & C^{18}O ($J=1-0$) emission lines. Using the FacetClumps algorithm, we detected molecular cores traced by the C^{18}O spectral line data and manually verified them, resulting in a sample of 544 C^{18}O cores. Approximately 5.97% of the ^{13}CO clumps in this region contain C^{18}O cores. We categorized the ^{13}CO clumps based on the presence or absence of C^{18}O cores and found that those containing C^{18}O cores have significantly higher peak intensities, fluxes, and angular areas compared to those without C^{18}O cores. However, no significant differences in eccentricity or form factor were found between the two categories. Furthermore, a comparative analysis of form factor shows that the velocity-integrated intensity contours of C^{18}O cores are notably closer to circular shapes than those of ^{13}CO clumps.

Key words stars: formation, ISM (interstellar medium): molecules, ISM: lines and bands, methods: data analysis