

恒星形成区的云核和星团*

尹 佳^{1,2†} 江治波¹ 杨 戟¹ 陈志维^{1,2} 王 敏¹

(1 中国科学院紫金山天文台 南京 210008)

(2 中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 利用青海站 13.7 m 毫米波望远镜对 17 个与星团成协的恒星形成区进行了 $^{12}\text{CO}(J=1-0)$ 、 $^{13}\text{CO}(J=1-0)$ 和 $\text{C}^{18}\text{O}(J=1-0)$ 的同时成图观测. 除了 IRAS 04547+4753, 这些源均探测到较强的 $\text{C}^{18}\text{O}(J=1-0)$ 的谱线发射. 由于分子云的大小不同, 有 13 个源观测到 $^{13}\text{CO}(J=1-0)$ 谱线积分强度极大值的一半处, 其他源因分子云延展范围较大, 没有进行大面积的成图观测. 基于观测数据, 计算了各云核的谱线线宽、亮温度、尺度、密度和质量等, ^{13}CO 和 C^{18}O 云核的维里质量与局部热动平衡 (LTE) 质量之比分别为 0.66 和 0.74, 它们接近于维里平衡状态. 为了从形态方面比较云核与星团, 将谱线的积分强度图与 2MASS 的 K 波段图像叠加. 同时, 计算了与云核成协的星团的大小和质量, 数据采用了 2MASS 的近红外点源测光结果. 基于云核与星团的质量结果, 计算了分子云的恒星形成效率, 大致在 10%~30% 的范围.

关键词 星际介质: 云, 恒星: 形成, 星际介质: 谱线与谱带, 恒星: 主序前

中图分类号: P 154; **文献标识码:** A

1 引言

恒星形成于稠密的分子云核中, 孤立的小质量恒星形成和演化的理论已经相对完善, 而大质量恒星和星团的形成机制还不是很明确. 研究表明, 银道面上的恒星多形成于巨分子云的稠密气体中, 而且恒星大多成团形成, 因此星团在对银河系的恒星形成的研究中起着至关重要的作用^[1]. 虽然, 星团的形成过程总是很短暂的, 但银河系中年轻星团一般是连续形成的, 这使我们有可能研究恒星形成的物理条件和形成过程. 然而, 大部分的年轻星团形成于遥远的巨分子云中, 它们的早期演化状态均深埋于稠密气体和尘埃中, 光学波段很难探测到这些早期的形成过程. 近年来, 红外、毫米和亚毫米波望远镜技术的飞速发展, 使我们有可能探测到许多深埋的年轻星团^[2], 同时也能探测到星团周围的 CO 、 NH_3 和 HCO^+ 等分子气体发射, 这些分子的谱线信息可以示踪稠密云核的温度和密度等. Mizuno 等^[3] 对 Chamaeleon 分子云做了 $\text{C}^{18}\text{O}(J=1-0)$ 的观测, 辨别出 23 个稠密核, 它们有高的 H_2 柱密度 ($> 10^{21} \text{ cm}^{-2}$) 并且云核质量接近于维里平衡状态. 一些高分辨率的观测^[4-5] 发现, 巨分子云包含多个云核并且周围存在着红外星团

2010-03-25 收到原稿, 2010-04-16 收到修改稿

* 国家自然科学基金项目 (10873037) 资助

† yjia.yin@gmail.com

或深埋的大质量恒星, 这些核可能在分子云的分裂过程中形成. 恒星形成于这些核中, 因此星团与云核可能存在相互作用. Saito 等^[6-7]的研究表明, 星团和云核的部分物理特征存在相关性, 如云核的线宽与恒星的 \log 最大质量相关, 云核的 H_2 柱密度与星团恒星数密度相关等.

基于上述分析, 本文计算了 17 个与星团成协的分子云核的密度和质量等参数, 并做了相关讨论. 同时, 结合 2MASS 的红外数据, 分析了分子云核与星团的相关性, 进一步研究恒星形成问题.

2 选源及观测

我们利用 Okayama Astrophysical Observatory (OAO) 1.88 m 望远镜对太阳圈外的年轻星团进行近红外波段的观测, 76 个观测区域中有 45 个明显存在年轻星天体, 大约一半的区域包含大质量恒星. 我们根据大尺度的 $\text{CO}(J=1-0)$ 观测^[8]对这些区域做了筛选, 选取了其中 17 个年轻星团作为研究对象 (表 1). 这些年轻星团与 IRAS 源成协并且相应位置有较强的 CO 发射, 峰值位置的 CO 谱线存在线翼发射. 部分谱线线翼较宽, 暗示这些区域可能存在分子外流等恒星形成活动, 它们仍有诞生恒星的可能. 表 1 列出了各源的 IRAS 源名、相关源、坐标 (观测中心)、距离和相对本地静止标准的视向速度.

表 1 分子云核列表

Table 1 List of molecular cores

Source name	Association ^[8]	RA (h m s)	DEC ($^{\circ}$ ' ")	Distance (kpc)	V_{lsr} ($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)	Distance references
01202+6133	S187	01 23 32	61 48 49	1.44	-14.4	[9]
02232+6138	W3(OH)	02 27 01	61 52 14	1.95	-46.94	[10]
02245+6115	RAFGL 333	02 28 21	61 28 29	1.95	-48.2	[10]
02593+6016	RAFGL 416	03 03 17	60 27 52	2.3	-37.77	[11]
04000+5052		04 03 49	51 00 49	4.29	-31.55	[12]
04324+5106	RAFGL 5124	04 36 21	51 12 54	6	-35.94	[13-14]
04547+4753	RAFGL 5133	04 58 29	47 58 28	5	-18.47	[15]
05274+3345	RAFGL 5142	05 30 45	33 47 52	1.8	-3.68	[13]
05358+3543	S233	05 39 10	35 45 19	1.8	-17.34	[13]
06073+1249	RAFGL 5185	06 10 12	12 48 46	6	25.31	[16]
06099+1800	RAFGL 896	06 12 53	17 59 22	2.4	6.89	[17]
06105+1756	S258	06 13 28	17 55 30	2.4	8.10	[17]
06114+1745	RAFGL 5188	06 14 23	17 44 36	2.5	8.16	[18]
06117+1350	S269	06 14 36	13 49 35	5.28	16.68	[19]
20205+3948		20 22 21	39 58 05	4.5	-1.74	[14]
22566+5830	S152	22 58 41	58 46 57	3.5	-50.59	[20]
23138+5945	RAFGL 3057	23 16 04	60 02 00	3.5	-43.12	[20]

Note: The equatorial coordinates of sources are in J2000.0 epoch, the velocities of sources are relative to the local standard of rest

在 2007~2009 年期间, 我们利用紫金山天文台青海观测站 13.7 m 毫米波望远镜对这 17 个源进行了 $^{12}\text{CO}(J=1-0)$ 、 $^{13}\text{CO}(J=1-0)$ 和 $\text{C}^{18}\text{O}(J=1-0)$ 同位素谱线的同时成

图观测. IRAS 01202+6133 和 IRAS 06099+1800 是 2007 年的观测数据, 其他源是 2009 年的观测数据. 2009 年期间, 该望远镜在 93 GHz 本振频率下的波束宽度是 $56'' \times 55''$ (图 1 实心圆圈), 全天指向精度和跟踪误差均小于 $5''$, 天顶方向的主波束效率为 0.62. 望远镜前端是一台 3 mm 波段的 SIS 超导接收机, 系统温度在 150~300 K 之间变化. 接收机后端为 3 个 1 024 通道的声光频谱仪 (AOS), 可同时观测 3 条谱线: $^{12}\text{CO}(J=1-0)$ (115.271 GHz)、 $^{13}\text{CO}(J=1-0)$ (110.201 GHz) 和 $\text{C}^{18}\text{O}(J=1-0)$ (109.782 GHz), 相应的谱线带宽分别是 145.36 MHz、42.76 MHz 和 43.15 MHz, 频率分辨率分别是 209.0 kHz、81.3 kHz 和 77.3 kHz, 速度分辨率分别是 $0.37 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $0.11 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $0.11 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$.

观测时采用标准的斩波轮法定标, 给出修正大气吸收后的天线温度 T_A^* . 各源的观测中心设置为 IRAS 源的坐标 (表 1), 每次对源的有效积分时间为 60 s, 其中 12 个源的采样间隔为 $40''$, 其它为 $60''$. 为了得到较好的信噪比, 我们对每个源的核区 (高于 C^{18}O 积分强度最大值的一半处) 做 5~6 次的重复观测, 使噪声温度降到 0.1 K. 各源的边缘部分做 1~2 次的观测. 观测期间, 每隔 2 h 观测一次标准源 (NGC 2264 和 S 140), 标准源的俯仰关系可作参考并用于待测源的俯仰 (EL) 改正. 参考对 NGC 2264^[21-22] 和 S 140^[23-24] 的研究, 我们得到了两标准源由天线温度到亮温度的转换关系, ^{12}CO 的转换关系分别是 $T_A^* = T_R^* \times (0.64 - 0.06 \cos(EL))$ 和 $T_A^* = T_R^* \times (0.76 - 0.16 \cos(EL))$, ^{13}CO 的转换关系分别是 $T_A^* = T_R^* \times (1 - 0.10 \cos(EL))$ 和 $T_A^* = T_R^* \times (1 - 0.02 \cos(EL))$, C^{18}O 采用了与 ^{13}CO 相同的修正关系, 最后将这些转换关系分别应用于南北天区的观测源.

17 个观测区域的近红外观测采用了 2MASS 的巡天数据, 主要是 K 波段的近红外图像和 J、H、K 波段的点源测光数据. J、H 和 K 波段的点源 10σ 的测光星等分别是 15.8 mag、15.1 mag 和 14.3 mag. 数据处理中对测光质量做了筛选, 采用了 K 波段中测光质量标记为 A、B、C 和 D 的测光结果.

3 观测结果和数据处理

3.1 谱线结果与成图

我们利用 IRAM 的 Gildas/Class 软件包对这些谱线的数据进行初步处理, 由各谱线的高斯拟合得到该谱线的半峰全宽 (FWHM) 和亮温度 (表 2), 同时对 ^{13}CO 和 C^{18}O 的积分强度进行成图 (图 1). 表 2 给出了 17 个观测源的谱线信息, offset 是 C^{18}O 积分强度峰值位置相对于 IRAS 源位置的偏移量. 一般地, $\text{FWHM}(^{12}\text{CO}) > \text{FWHM}(^{13}\text{CO}) > \text{FWHM}(\text{C}^{18}\text{O})$, 而 IRAS 04324+5106 和 IRAS 06073+1249 的 $\text{FWHM}(^{13}\text{CO}) < \text{FWHM}(\text{C}^{18}\text{O})$, 可能是由于两源的 C^{18}O 亮温度较低, 噪声影响较大. 各源的亮温度也有类似的结果 $T_R^*(^{12}\text{CO}) > T_R^*(^{13}\text{CO}) > T_R^*(\text{C}^{18}\text{O})$, 一般认为 ^{13}CO 和 C^{18}O 相对于 ^{12}CO 是光薄的, 它们可以探测分子云的稠密区域, ^{13}CO 的亮温度普遍高于 C^{18}O 的亮温度. 由于 ^{12}CO 在这些区域是光厚的, ^{12}CO 的峰值位置与 ^{13}CO 的峰值位置可能存在差异, 部分源 ^{12}CO 的亮温度与 ^{13}CO 亮温度大小相近, 如 IRAS 01202+6133.

表 2 C¹⁸O 积分强度极大值位置的谱线结果Table 2 Properties of lines at the positions where C¹⁸O integrated intensities reach their maximums

Source name	Offset (arcsec)	Spacing grid (arcsec)	FWHM(km·s ⁻¹)			T _R [*] (K)		
			¹² CO	¹³ CO	C ¹⁸ O	¹² CO	¹³ CO	C ¹⁸ O
01202+6133	(0, 0)	60	4.31	2.82	2.09	10.80	10.78	2.87
02232+6138	(40, 0)	40	7.78	4.49	4.24	18.74	11.46	1.51
02245+6115	(-80, 80)	40	5.62	3.21	2.18	12.89	10.92	4.02
02593+6016	(60, 0)	60	3.19	1.84	1.57	15.78	7.00	0.75
04000+5052	(0, 60)	60	5.37	2.06	1.34	3.55	3.78	0.99
04324+5106	(40, 0)	40	4.94	3.18	3.50	14.66	7.11	0.54
04547+4753	(0, 0)	40	3.01	1.72	1.39	22.27	7.07	0.38
05274+3345	(0, 0)	40	4.92	2.66	2.18	19.50	10.85	1.76
05358+3543	(40, -40)	40	5.22	2.60	1.86	13.08	6.31	0.92
06073+1249	(-40, 0)	40	2.56	1.68	2.24	25.18	6.46	0.45
06099+1800	(0, 0)	60	4.33	2.93	2.70	29.61	12.38	1.24
06105+1756	(40, 40)	40	2.84	1.59	1.34	13.61	7.68	1.17
06114+1745	(40, 40)	40	4.65	2.62	2.31	12.74	6.61	1.09
06117+1350	(-60, -60)	60	4.82	3.03	2.37	20.67	6.52	0.70
20205+3948	(-40, 40)	40	2.85	1.94	1.20	18.09	9.93	1.31
22566+5830	(80, -80)	40	5.98	3.26	2.21	18.37	11.57	3.05
23138+5945	(40,-160)	40	3.98	2.90	2.70	18.54	9.11	1.08

图 1 显示了 17 个源的 ¹³CO 和 C¹⁸O 的积分强度等高图, 我们将其与 K 波段图像叠加, 用于比较云核与星团在形态上的联系. 由图 1 可以看出, 分子云的形态各异, 部分云核的结构比较延展, 如 IRAS 01202+6133、IRAS 02245+6115 和 IRAS 20205+3948 等. ¹³CO 和 C¹⁸O 积分强度的峰值位置比较一致, ¹³CO 的云核范围更大.

3.2 谱线数据的处理

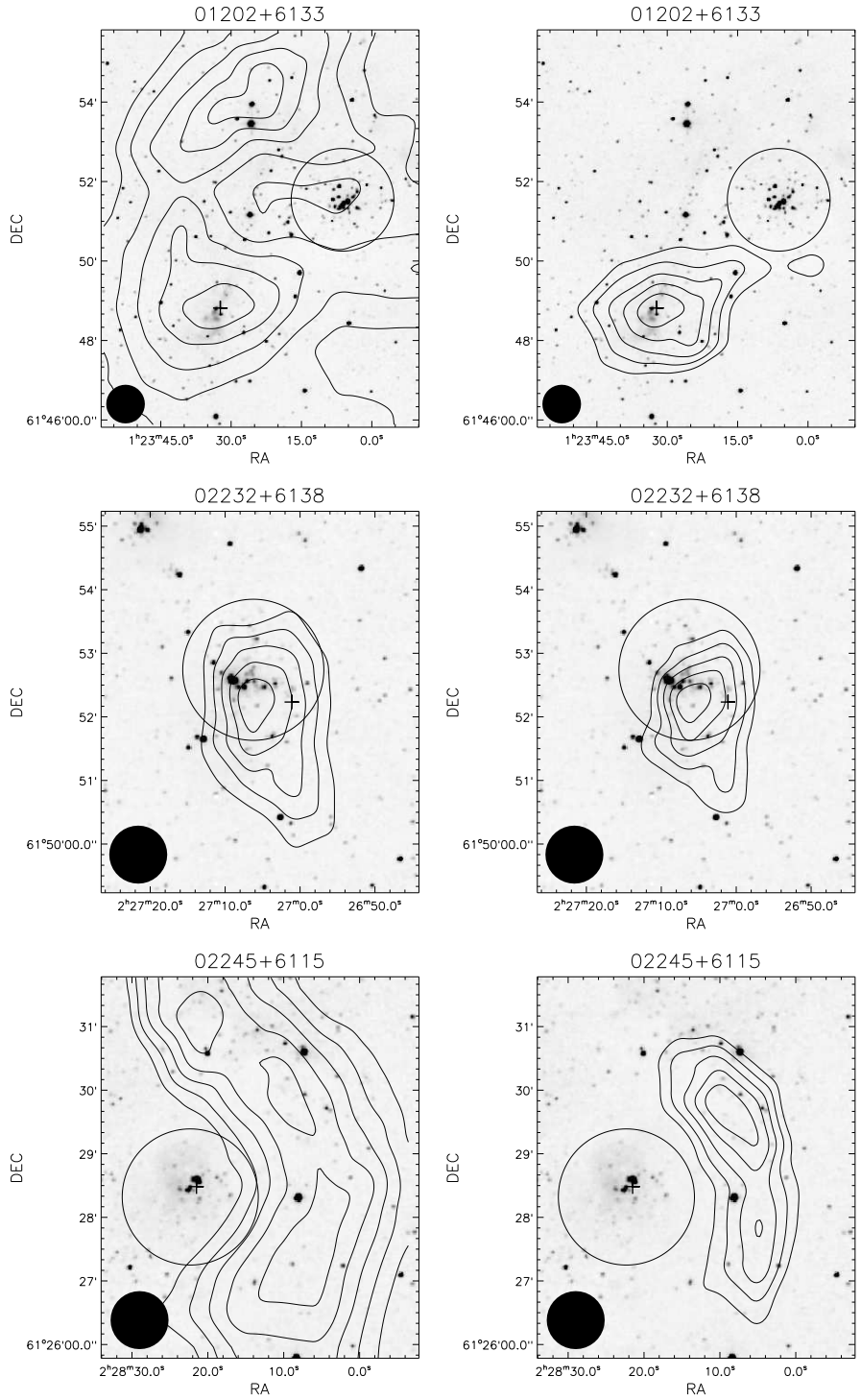
为研究分子云核的性质, 我们计算了各云核的物理参数 (光深、柱密度、质量和半径等). 在计算过程中, 假定云核处于局部热动平衡状态, 由于分子云核对分子 ¹²CO 的发射通常是光厚的, 因此可以通过 ¹²CO 的峰值亮温度 T_R^{*}(¹²CO) 求出云核的激发温度 [25]

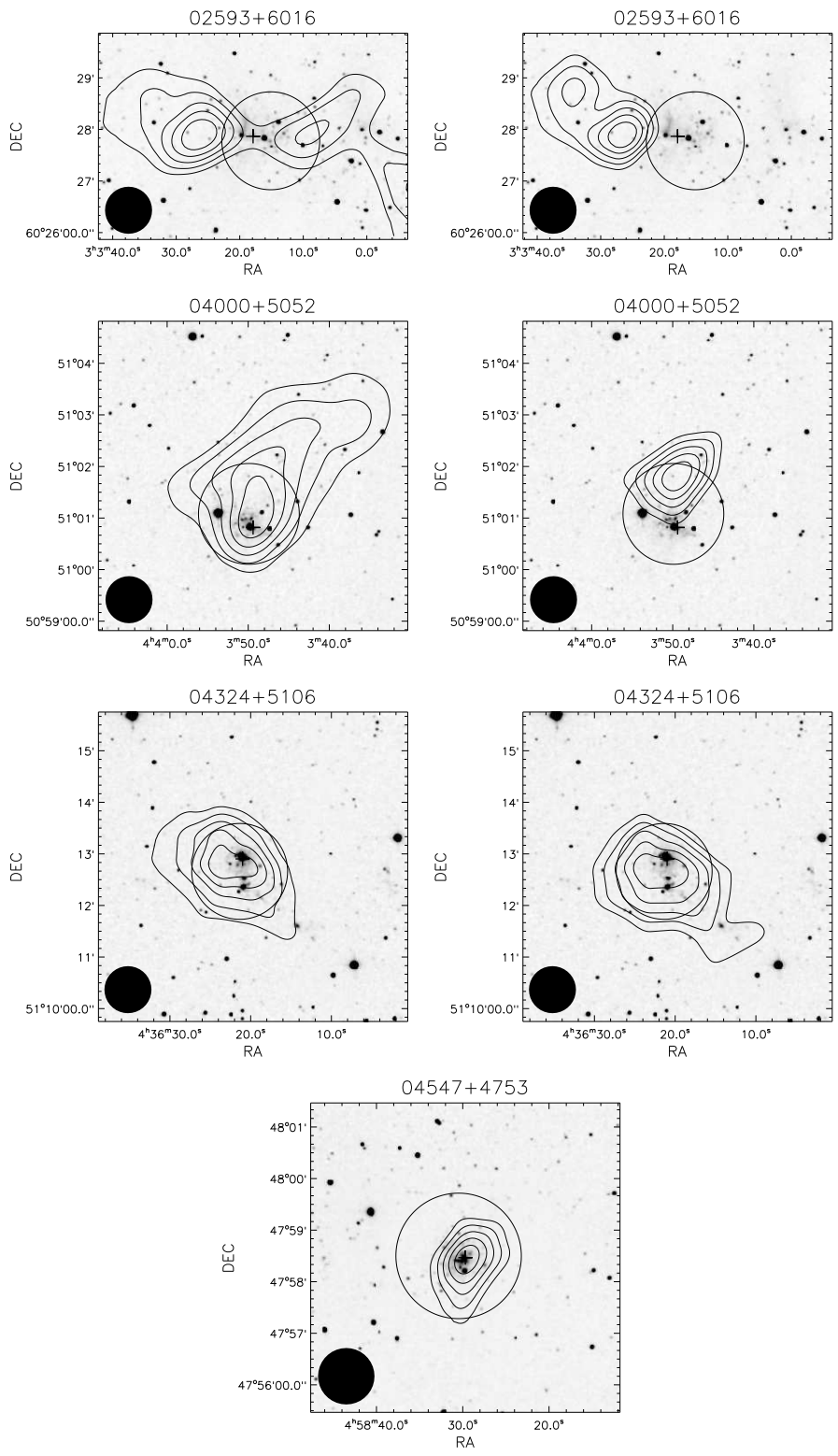
$$T_{\text{ex}} = \frac{5.53}{\ln\{1 + 5.53/[T_{\text{R}}^*(^{12}\text{CO}) + 0.819]\}} \text{ K}, \quad (1)$$

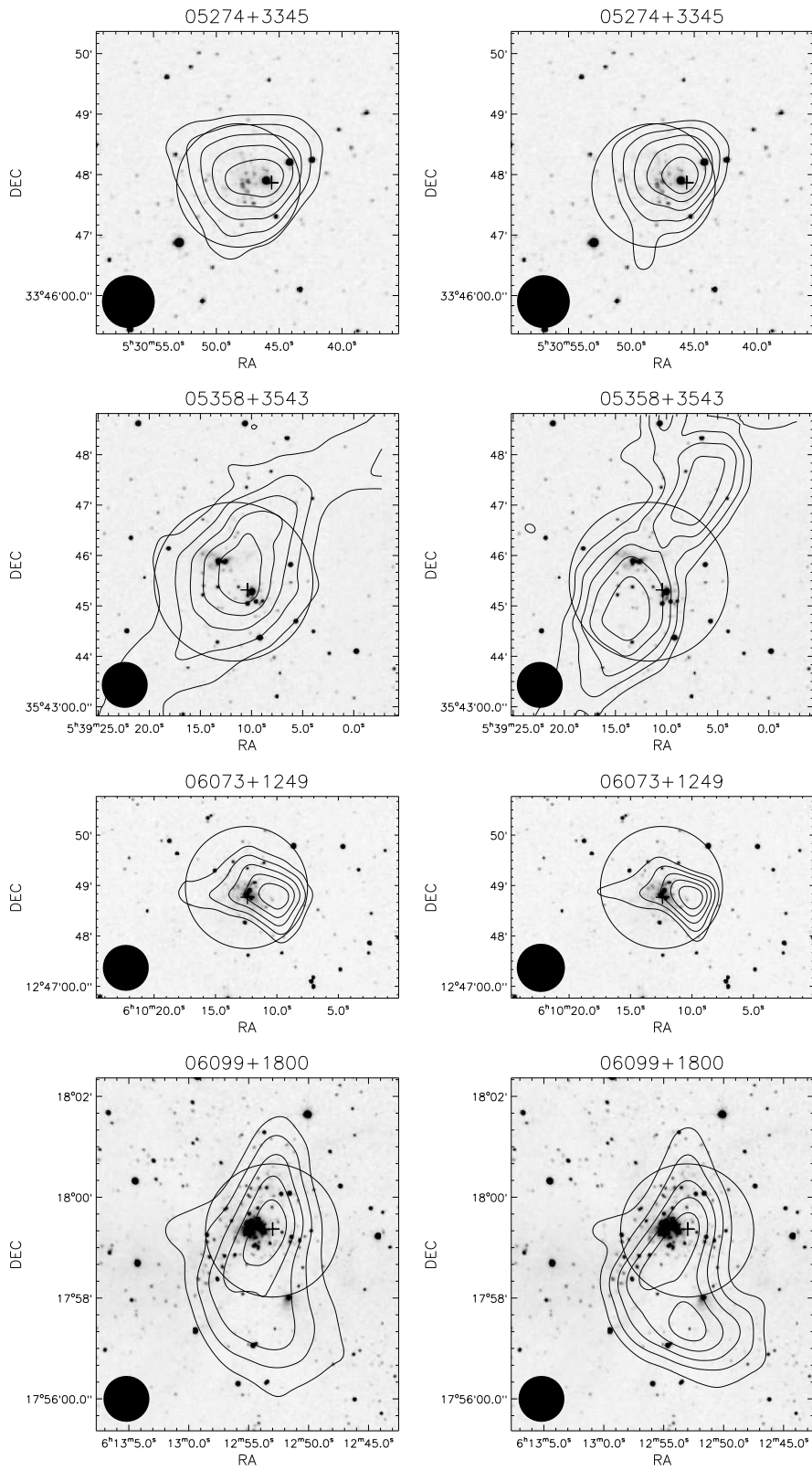
同时假定 ¹³CO 和 C¹⁸O 分子谱线的激发温度与 ¹²CO 的相同, 可由辐射转移关系求得光学厚度 [7,25]

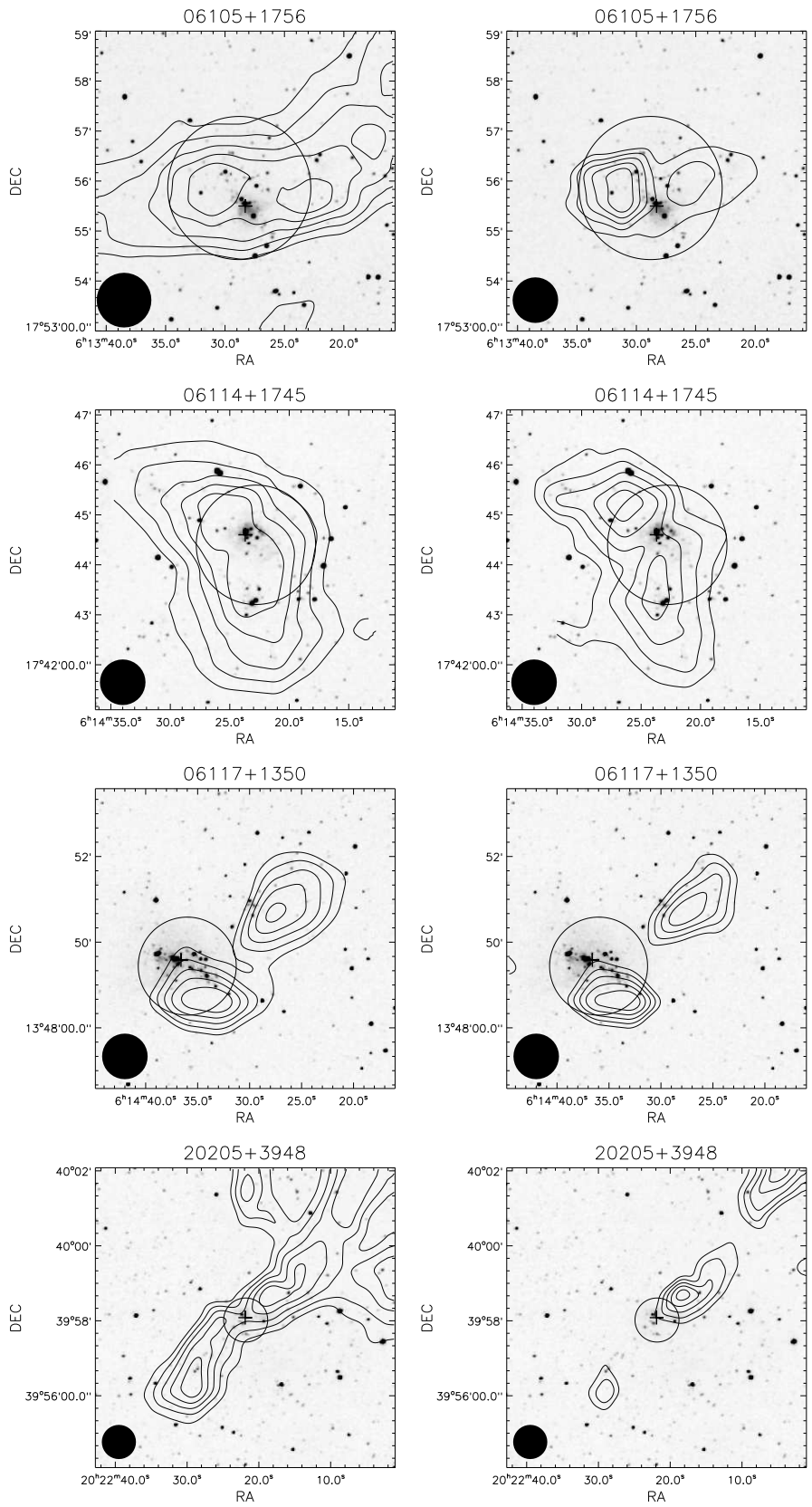
$$\tau(^{13}\text{CO}) = -\ln\left\{1 - \frac{T_{\text{R}}^*(^{13}\text{CO})}{5.29} \times \left[\frac{1}{\exp(5.29/T_{\text{ex}})} - 0.164\right]^{-1}\right\}, \quad (2)$$

$$\tau(\text{C}^{18}\text{O}) = -\ln\left\{1 - \frac{T_{\text{R}}^*(\text{C}^{18}\text{O})}{5.27} \times \left[\frac{1}{\exp(5.27/T_{\text{ex}})} - 0.166\right]^{-1}\right\}. \quad (3)$$









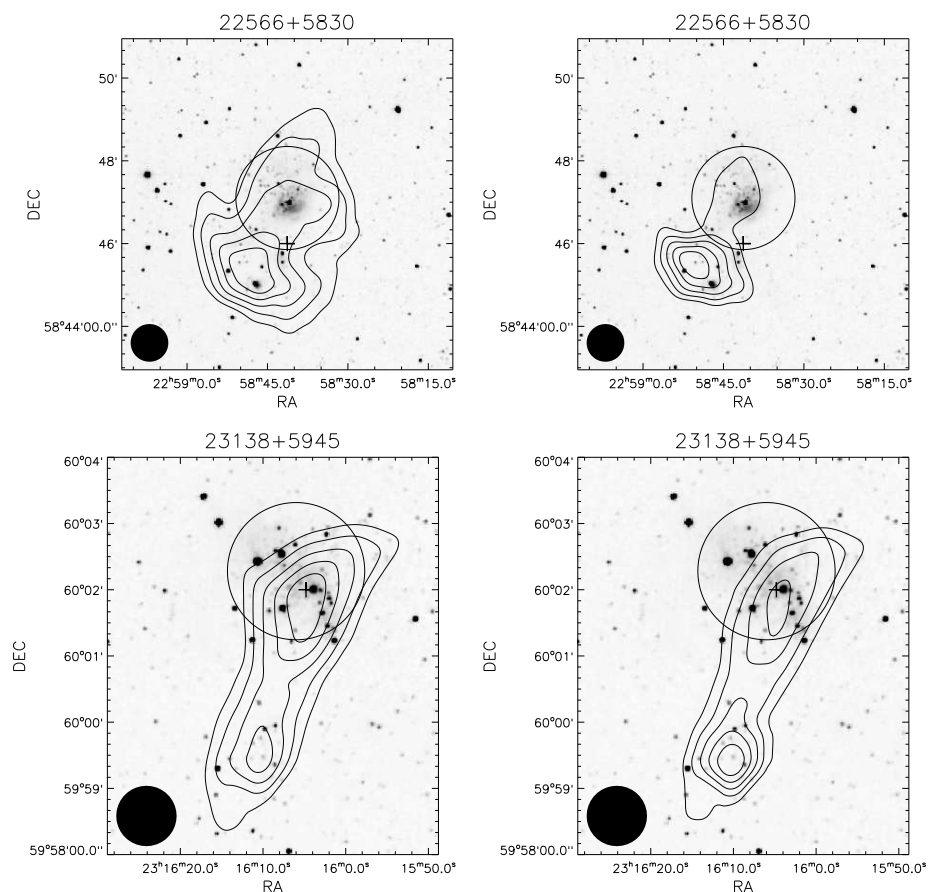


图 1 谱线积分强度与 K 波段图像的叠加图. 左图等值线为 ^{13}CO 积分强度, 右图等值线为 C^{18}O 积分强度, IRAS 04547+4753 仅给出了 ^{13}CO 的积分强度图. 等值线由积分强度极大值的 50% 开始, 间隔为积分强度极大值的 10%. 空心圆表示估计的星团边界, 左下角实心圆表示望远镜的波束宽度, “+” 表示 IRAS 点源的位置

Fig. 1 ^{13}CO (left) and C^{18}O (right) integrated intensities indicated by contours are overlaid on the 2MASS K band images. The C^{18}O emission of IRAS 04547+4753 is too weak to be detected, only ^{13}CO integrated intensity is shown. The contour levels are from 50% of the peak intensity in steps of 10% of the peak intensity. The hollow circle, filled circle and plus indicate the boundary of cluster region, beamwidth and the position of the IRAS point source, respectively

根据 ^{13}CO 和 C^{18}O 谱线的 FWHM 宽度 ΔV 可得到相应的柱密度 [7,25]

$$N(^{13}\text{CO}) = 2.42 \times 10^{14} \times \frac{\tau(^{13}\text{CO})\Delta V T_{\text{ex}}}{1 - \exp(-5.29/T_{\text{ex}})} \text{ cm}^{-2}, \quad (4)$$

$$N(\text{C}^{18}\text{O}) = 2.42 \times 10^{14} \times \frac{\tau(\text{C}^{18}\text{O})\Delta V T_{\text{ex}}}{1 - \exp(-5.27/T_{\text{ex}})} \text{ cm}^{-2}, \quad (5)$$

一般取元素丰度值为 $N(\text{H}_2)/N(^{13}\text{CO}) \approx 5 \times 10^5$ [26] 和 $N(\text{H}_2)/N(\text{C}^{18}\text{O}) \approx 6 \times 10^6$ [27], 这样可以得到氢分子的柱密度. 根据 LTE 假设稠密核的质量为

$$M_{\text{LTE}} = \mu m_{\text{H}_2} \int_S N(\text{H}_2) dS = \mu m_{\text{H}_2} \sum_i N(\text{H}_2)_i S_i, \quad (6)$$

S_i 是按采样间隔划分的求和面积, m_{H_2} 是氢分子的质量, μ 是考虑氦等重元素的平均分子量, 这里取 2.8 [25]. 云核的尺度 R 是指与稠密核积分强度半极大轮廓面积 $A_{1/2}$ 相等的圆的半径 (这里对波束宽度去卷积):

$$R = D \left(\frac{A_{1/2}}{\pi} - \frac{\theta_{\text{mb}}^2}{4} \right)^{1/2}, \quad (7)$$

D 是稠密核的距离, θ_{mb} 是望远镜的波束直径 (这里取 $55''$). 假设稠密核是球状结构, 则稠密核中氢分子的平均体密度

$$n(\text{H}_2) = N(\text{H}_2)/2R. \quad (8)$$

处理结果见表 3, 其中 M_{vir} 是分子云核的维里质量.

表 3 ^{13}CO 分子云核的物理参数

Table 3 Physical parameters of ^{13}CO molecular cores

Source name	τ	R (pc)	$N(\text{H}_2)$ (10^{21} cm^{-2})	$n(\text{H}_2)$ (10^3 cm^{-3})	M_{LTE} (M_{\odot})	M_{vir} (M_{\odot})
01202+6133	2.25	1.28	8.24	1.56	1093	2139
02232+6138	0.98	0.70	16.4	5.70	770	2963
02245+6115	1.88	0.68	11.7	4.18	499	1473
02593+6016	0.64	0.55	3.05	1.34	120	393
04000+5052	1.13	1.82	1.29	0.17	436	1460
04324+5106	0.73	1.79	6.28	0.85	2166	3785
04547+4753	0.41	0.85	8.03	2.29	389	527
05274+3345	0.76	0.52	8.93	4.13	273	779
05358+3543	0.35	0.95	6.99	1.78	579	4285
06073+1249	0.31	1.38	3.35	0.59	893	817
06099+1800	0.57	1.20	14.0	2.83	1973	2160
06105+1756	0.90	1.09	3.80	0.85	369	576
06114+1745	0.65	1.50	5.36	0.87	1045	2346
06117+1350	0.40	1.48	5.54	0.91	1728	2849
20205+3948	0.76	1.33	6.86	1.25	1284	1055
22566+5830	0.97	1.98	14.2	1.74	4836	5095
23138+5945	0.35	0.99	12.5	3.06	1377	2129

3.3 近红外数据的处理

根据 2MASS 的点源测光星表和 SIMBAD 给出的星团位置, 重新估计星团的中心, 即对星团中心 $1'$ 半径内的恒星位置 (赤经和赤纬) 取平均, 多次迭代后得到新的星团中心. 虽然实际上年轻星团的结构并非均匀和对称的, 但多数研究还是采用了方位平均的方法研究星团的表面密度, 这种方法可以拟合径向轮廓的变化并估计出星团的半径^[28]. 以 IRAS 02232+6138 为例, 图 2(a) 是根据新的星团中心对径向表面密度作的拟合, 采用的拟合形式是 $\sigma(r) = a_0 + a_1 e^{-r/r_0}$. 图中实线是拟合结果, 虚线表示拟合轮廓降低到高于平均场星密度 3σ 的位置 (σ 取距星团中心 $3' \sim 4'$ 的恒星数密度的均方差), 该范围包含了星团的主要成员, 各星团的半径大小在 $0.5' \sim 2'$ 的范围 (图 1 圆圈所示). 星团的参数结果见表 4, 其中 SFE 和 LFE 分别表示分子云的恒星形成效率和局部恒星形成效率, 计算公式见 4.3 节.

表 4 星团的物理参数

Table 4 Physical parameters of clusters

	Source	RA	DEC	R	Field	Members of	$N(\text{H}_2)$	M_*	SFE	LFE
	name	(h m s)	($^\circ$ ' ")	(pc)	stars	cluster	(10^{21} cm^{-2})	(M_\odot)	(%)	(%)
1	01202+6133	01 23 06	61 51 32	0.54	8	75	4.71	228.7	8	70
2	02232+6138	02 27 06	61 52 44	0.63	13	61	21.9	186.9	19	23
3	02245+6115	02 28 22	61 28 19	0.61	17	39	4.95	93.1	4	41
4	02593+6016	03 03 15	60 27 46	0.64	8	63	2.66	160.9	45	67
5	04000+5052	04 03 49	51 01 04	1.22	10	32	2.93	135.0	23	30
6	04324+5106	04 36 21	51 12 39	1.62	6	36	13.3	178.5	7	6
7	04547+4753	04 58 30	47 58 29	1.77	19	63	8.03	216.9	35	10
8	05274+3345	05 30 48	33 47 49	0.53	8	51	17.9	88.3	24	19
9	05358+3543	05 39 11	35 45 28	0.82	25	62	16.6	166.1	22	17
10	06073+1249	06 10 12	12 48 57	2.12	18	64	6.22	266.4	22	11
11	06099+1800	06 12 53	17 59 20	0.92	22	105	30.2	339.1	14	15
12	06105+1756	06 13 28	17 55 51	1.00	19	70	5.00	204.5	24	36
13	06114+1745	06 14 22	17 44 23	0.87	11	48	9.59	152.1	12	22
14	06117+1350	06 14 36	13 49 26	1.76	11	67	8.17	303.2	8	14
15	20205+3948	20 22 21	39 58 01	0.77	5	19	8.46	103.4	3	22
16	22566+5830	22 58 41	58 47 05	1.27	27	91	18.7	365.9	7	14
17	23138+5945	23 16 06	60 02 16	1.06	22	84	27.8	260.3	15	10

Hillenbrand 等^[29] 在对 Orion 内部星团的研究中, 利用颜色星等图和主序前演化模型对星团的质量分布做了估计, 这里我们采用类似的方法估计年轻星团的质量. 由于 K 波段的消光较小, 计算中采用了 K-(H-K) 颜色星等图, 图 2(b) 是年轻星在 K-(H-K) 中的分布. 由于各星团的年龄并不确定, 我们使用了 Siess 等^[30] 演化模型的零龄主序线 (图中曲线) 来估计星团的质量. 根据恒星的测光误差, 对每个年轻星分布做高斯卷积, 卷积结果沿消光矢量做投影得到每个星的质量分布, 将所有星的质量分布进行积分求和即得到星团的总质量 (包括场星). 为了估计场星带来的影响, 这里采用距星团中心 $4' \sim 5'$ 的区域作为参考区域, 场星数目由参考区域大小归算到星团大小. 由于演化模型和恒星年龄的不确定性, 星团质量误差约为 20%^[31].

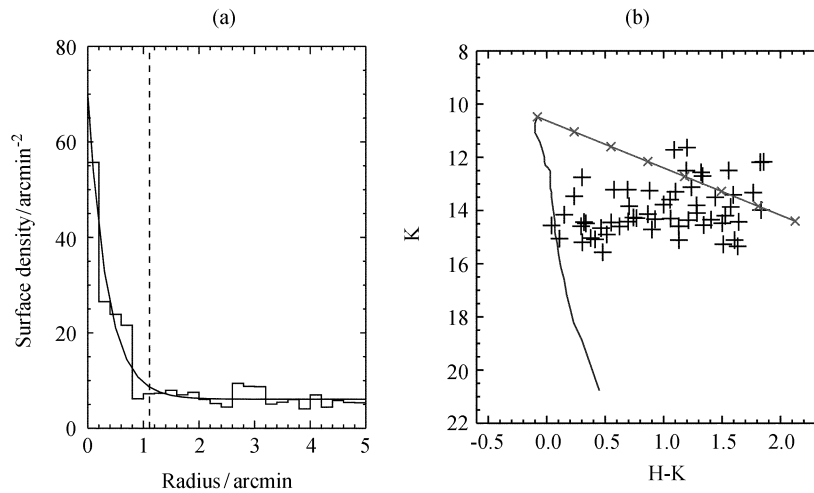


图 2 (a) 与 IRAS 02232+6138 成协的星团面密度分布. 实线是柱状图的拟合线, 虚线是高于平均场星密度 3σ 的星团半径. (b) 星团成员在 K-(H-K) 图中的分布. 直线是红化矢量, 另一条是零龄主序线. 乘号表示零消光开始, 间隔为 $A_V = 5$ mag 的消光值, 加号表示星团成员

Fig. 2 (a) Azimuthally averaged stellar radial density profiles of IRAS 02232+6138 cluster. The solid and dashed lines show the fitting result of histogram and the radius of cluster where stellar radial density is 3σ above the averaged density of field stars. (b) K-(H-K) Color-Magnitude diagram for the sources of cluster.

The straight line is the reddening vector and the other line indicates the unreddened Zero Age Main Sequence (ZAMS) track. Crosses are plotted along the reddening line from the ZAMS track in steps of $A_V = 5$ mag. Pluses show the members of cluster

4 分析和讨论

4.1 动力学平衡与维里质量

假定稠密核是等温的球状系统, 并忽略其磁场、表面压力和旋转等因素的影响, 其维里质量如下 [7]:

$$M_{\text{vir}} = \frac{5R(\Delta V)^2}{8G \ln 2}, \quad (9)$$

G 、 R 和 ΔV 分别是引力常数、分子云半径和谱线强度的 FWHM. 这里的 ΔV 代表分子云核总的速度弥散, 不仅包括分子热运动, 而且也包括分子气体的湍动、转动和塌缩以及恒星形成活动. 表 3 最后一列给出了 ^{13}CO 云核的维里质量 M_{vir} . 维里质量是研究分子云平衡状态的关键参量, 一般在没有外部压力条件下, 而且 $M_{\text{vir}} > M_{\text{LTE}}$ 时, 即云核动力学能量大于引力能量时, 云核不会引力塌缩. 因此, M_{vir} 与 M_{LTE} 的比值可以反映云核的引力稳定性程度.

我们比较了两质量的对数关系 (如图 3), ^{13}CO 和 C^{18}O 的结果分别是 0.66 ± 0.14 和 0.74 ± 0.15 , 相关系数 (c.c.) 分别为 0.77 和 0.81, 这与已有的研究结果类似^[32]. 由图 3 可以看出分子云核的质量平均略小于维里平衡质量, 各云核处于稳定状态. 大部分云核可能接近于临界稳定状态, 云核附近的年轻星团的星风可能给云核带来外部压力, 这使得云核引力塌缩并进一步形成恒星成为可能.

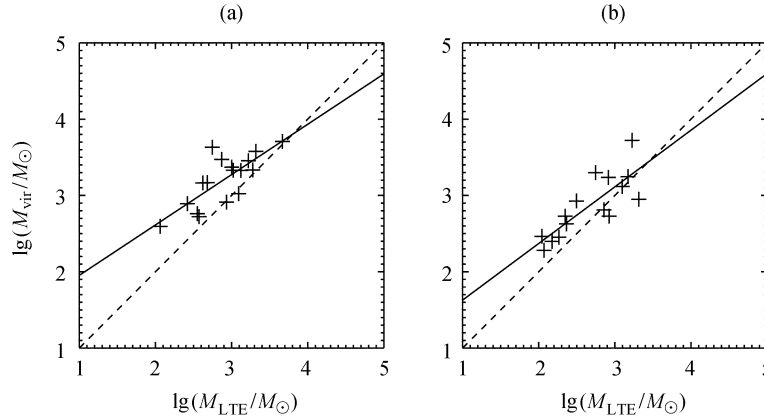


图 3 分子云核维里质量与局部热动平衡质量的关系. 图 (a) 和 (b) 分别是 ^{13}CO 和 C^{18}O 的结果

Fig.3 Relation of virial mass M_{vir} and local thermodynamic equilibrium (LTE) mass M_{LTE} of molecular cores. Panels (a) and (b) show the results of ^{13}CO and C^{18}O , respectively

4.2 线宽与尺度的关系

Larson^[33] 对早期的分子云观测做了统计研究, 发现云核内部的速度弥散与云核的尺度有很强的相关性, 云核尺度范围由 0.1 pc 的密核到 100 pc 的巨分子云, 云核谱线线宽 ΔV 与半径 R 的关系为 $\Delta V \propto R^{0.4 \sim 0.5}$. 目前对于两者关系的研究没有明确统一的结论, 云核尺度与线宽也可能是无关的.

图 4 是对云核的谱线线宽与半径的分析, 这里对云核内所有谱线做了平均, 线宽 ΔV 是高斯拟合确定的谱线 FWHM. ^{13}CO 和 C^{18}O 的拟合结果分别为 $\Delta V = 2.8 \times R^{-0.04 \pm 0.17}$ (c.c.=0.06) 和 $\Delta V = 2.6 \times R^{0.24 \pm 0.19}$ (c.c.=0.33). 两个拟合斜率存在明显差异, 可能是由于部分分子云核的中心位置对 ^{13}CO 的发射不完全是光薄的 (τ 略大于 1), ^{13}CO 的谱线拟合受到影响. 另外, 少数 C^{18}O 云核的发射较弱、信噪比不高, 这也可能影响拟合结果. 两个拟合的相关系数分别是 0.06 和 0.33, 表明云核的尺度和谱线线宽之间没有明显的相关性或相关性很弱. 部分研究也表明, 对于 $R \leq 2$ pc 的云核, 尺度和线宽几乎没有相关性. 而且, 两个量的拟合斜率在 0~0.6 之间, 没有统一的拟合结果^[32], 这可能与研究对象的选取和演化状态相关. 尺度较小且稳定的云核, 其气体弥散程度较低, 尺度与线宽的相关性较强. 相反地, 尺度大的恒星形成区, 其恒星形成活动剧烈、气体湍流程度较高, 两者的相关性也较弱. 虽然, 这里研究的云核较小, 但是它们都与年轻星团成协. 恒星形成活动引起的湍流以及星团的动力学演化必将增加气体的弥散程度, 线宽与

半径的相关性也会很弱. 并且, 样本数目较小也可能是相关性较弱的原因之一.

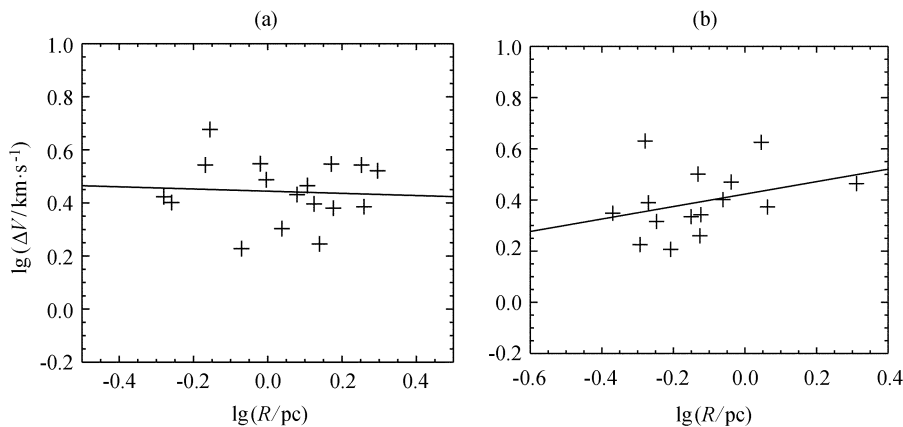


图 4 分子云核峰值谱线线宽与半径的关系. 图 (a) 和 (b) 分别是 ^{13}CO 和 C^{18}O 的结果

Fig. 4 Relation of FWHM line width and radius of molecular cores. Panels (a) and (b) show the results of ^{13}CO and C^{18}O , respectively

4.3 云核与星团的形态特征

图 1 给出了各云核的积分强度图与 K 波段图像的叠图, 部分云核有延展的结构, 如 IRAS 02245+6115 和 IRAS 20205+3948. 从形态学的角度来看, 部分云核的形态可能是由附近星团星风导致的, 如星团 IRAS 01202+6133、IRAS 02245+6115、IRAS 02593+6016、IRAS 06117+1350 和 IRAS 20205+3948. 而 IRAS 05358+3543、IRAS 06105+1756 和 IRAS 06114+1745 在 C^{18}O 的两核之间, 它们可能触发了两核的形成. 其他星团位于云核的中心区域, 它们可能处于早期阶段而驱散作用不明显, 也可能有明显的驱散作用和多个亚核的结构, 由于距离太远而未能分辨出云核更细致的结构. 如果排除距离差异, 即只关注云核和星团的投影位置, 那么这些年轻星团是由该处的分子云引力塌缩形成的, 而年轻星团在进一步的演化过程中必然会对母分子云有驱散作用, 使分子云碎裂成多个小的云核, 进而触发新一轮的恒星形成活动.

4.4 恒星形成效率

分子云的恒星形成效率 (SFE) 是形成的恒星质量与产生它的气体质量之比. 根据下式得到各分子云的 SFE, 即星团质量与星团和周围稠密云核的总质量之比.

$$\text{SFE} = \frac{\sum M_*}{\sum M_* + M_{\text{gas}}}, \quad (10)$$

如图 5(a) 所示, SFE 存在差异, 它们集中在 10%~30% 之间, 高的 SFE 倾向于有高的恒星数密度. 星团与周围分子云核的大小和中心位置存在差异, 星团成员星可能超出云核的范围或者云核还包括星团以外的年轻星, 这里的 SFE 只能大致反映分子云的恒星形成效率. 类似地, 我们计算了星团质量与星团范围内恒星和气体的总质量之比 (LFE), 气体

柱密度取星团位置的柱密度 (表 4). LFE (图 5(b)) 表示分子云局部的恒星形成效率, 反映了星团对周围气体密度的影响. LFE 与 SFE 存在明显的差异, 其中 IRAS 01202+6133、IRAS 02245+6115、IRAS 02593+6016、IRAS 04547+4753 和 IRAS 20205+3948 的差异最明显. 这与它们的形态直接相关, 它们周围的气体显示被驱散或者大部分被消耗, 如 IRAS 04547+4753. 它附近有一光学 HII 区, 包含两个大质量恒星^[34], 剧烈的恒星形成活动使得气体密度变低, 而且分子云核也较小, 这使得 SFE 较高.

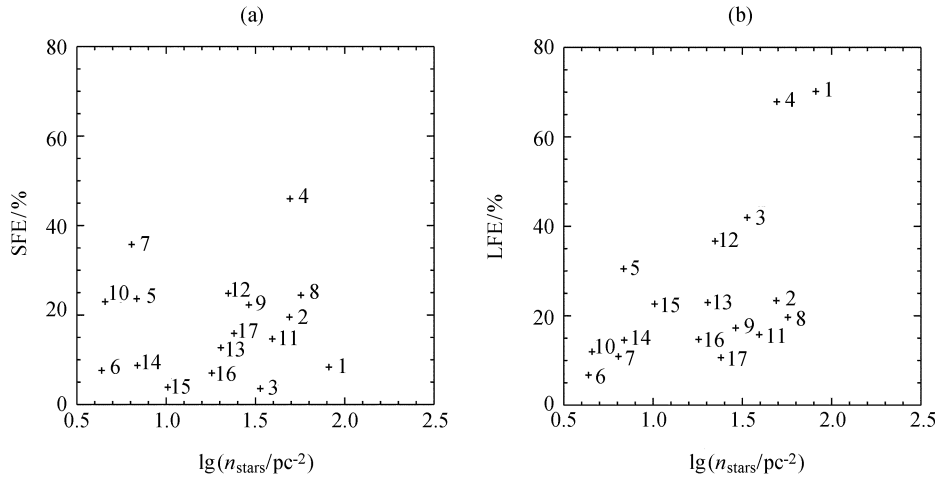


图 5 (a) 分子云的恒星形成效率与恒星数密度的关系. (b) 局部形成效率与恒星数密度的关系. 两图中的加号和数字分别表示各源的位置和序号 (见表 4)

Fig. 5 (a) Star formation efficiency (SFE) and (b) local star formation efficiency (LFE) plotted against the number density of clusters, respectively. Pluses show the positions of sources with its order numbers listed in Table 4

5 结论

(1) 对 17 个与星团成协的分子云进行了 $^{12}\text{CO}(J=1-0)$ 、 $^{13}\text{CO}(J=1-0)$ 和 $\text{C}^{18}\text{O}(J=1-0)$ 的同时成图观测. 所有的分子云核均观测到 $\text{C}^{18}\text{O}(J=1-0)$ 积分强度极大值的一半处, 大部分云核达到 $^{13}\text{CO}(J=1-0)$ 积分强度极大值的一半处. 各云核的特征尺度在 $0.1\sim 2$ pc.

(2) 计算了分子云核的密度、质量和谱线 FWHM. ^{13}CO 和 C^{18}O 分子云核的维里质量与 LTE 质量的比分别为 0.66 和 0.74. 这些云核接近于稳定的临界状态, 星团的星风压力可能会引起它们的引力塌缩.

(3) 比较年轻星团与各云核的形态. 两者在形态上存在相关, 星团的演化对分子云核的形成有触发作用.

(4) 对恒星形成效率和局部形成效率做了分析. 大部分 SFE 在 $10\%\sim 30\%$ 之间, 这与星团的形态相关, 也可能与演化阶段和周围环境有密切的关系. LFE 更高的星团可能

更加年老, 长期的演化已经驱散掉大部分的母分子云气体, 相应位置的分子气体密度偏低.

致谢 感谢紫金山天文台青海观测站全体工作人员在观测中给予的支持和帮助.

参 考 文 献

- [1] Lada C J, Lada E A. *ARA&A*, 2003, 41: 57
- [2] Bica E, Dutra C M, Barbuy B. *A&A*, 2003, 397: 177
- [3] Mizuno A, Hayakawa T, Tachihara K, et al. *PASJ*, 1999, 51: 859
- [4] Carpenter J M, Heyer M H, Snell R L. *ApJS*, 2000, 130: 381
- [5] Onishi T, Mizuno A, Kawamura A, et al. *ApJ*, 2002, 575: 950
- [6] Saito H, Saito M, Moriguchi Y, et al. *PASJ*, 2006, 58: 343
- [7] Saito H, Saito M, Sunada K, et al. *ApJ*, 2007, 659: 459
- [8] Yang J, Jiang Z B, Wang M, et al. *ApJS*, 2002, 141: 157
- [9] Russeil D, Adami C, Georgelin Y M. *A&A*, 2007, 470: 161
- [10] Xu Y, Reid M J, Zheng X W, et al. *Sci*, 2006, 311: 54
- [11] Mampaso A, Vilchez J M, Pismis P, et al. *RMxAA*, 1987, 14: 474
- [12] Wang J, Wei J, Hu J. *ApJ*, 2002, 573: 238
- [13] Snell R L, Huang Y L, Dickman R L, et al. *ApJ*, 1988, 325: 853
- [14] Snell R L, Dickman R L, Huang Y L. *ApJ*, 1990, 352: 139
- [15] Deharveng L, Zavagno A, Salas L, et al. *A&A*, 2003, 399: 1135
- [16] Bronfman L, Nyman L A, May J. *A&AS*, 1996, 115: 81
- [17] Chavarría L A, Allen L E, Hora J L, et al. *ApJ*, 2008, 682: 445
- [18] Henning T, Cesaroni R, Walmsley M, et al. *A&AS*, 1992, 93: 525
- [19] Honma M, Bushimata T, Choi Y K, et al. *PASJ*, 2007, 59: 889
- [20] Harju J, Walmsley C M, Wouterloot J G A. *A&AS*, 1993, 98: 51
- [21] Crutcher R M, Hartkopf W I, Giguere P T. *ApJ*, 1978, 226: 839
- [22] Krügel E, Güsten R, Schulz A, et al. *A&A*, 1987, 185: 283
- [23] Snell R L, Scoville N Z, Sanders D B, et al. *ApJ*, 1984, 284: 176
- [24] Hayashi M, Hasegawa T, Omodaka T, et al. *ApJ*, 1987, 312: 327
- [25] 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: 139-144
- [26] Dickman R L. *ApJS*, 1978, 37: 407
- [27] Frerking M A, Langer W D, Wilson R W. *ApJ*, 1982, 262: 590
- [28] Gutermuth R A, Megeath S T, Pipher J L, et al. *ApJ*, 2005, 632: 397
- [29] Hillenbrand L A, Carpenter J M. *ApJ*, 2000, 540: 236
- [30] Siess L, Dufour E, Forestini M. *A&A*, 2000, 358: 593
- [31] Siess L. *ASPC*, 2001, 243: 581
- [32] Yonekura Y, Dobashi K, Mizuno A, et al. *ApJS*, 1997, 110: 21
- [33] Larson R B. *MNRAS*, 1981, 194: 809
- [34] Qin S L, Wang J J, Zhao G, et al. *A&A*, 2008, 484: 361

Molecular Cores and Young Clusters of Star Forming Regions

YIN Jia^{1,2} JIANG Zhi-bo¹ YANG Ji¹ CHEN Zhi-wei^{1,2} WANG Min¹

(1 *Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008*)

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

ABSTRACT Data of ($J = 1 - 0$) lines of ^{12}CO , ^{13}CO and C^{18}O were taken simultaneously by using 13.7 m millimeter telescope of Qinghai station of Purple Mountain Observatory at Delingha. We map 17 star forming regions which are associated with the clusters. All but IRAS 04547+4753 show C^{18}O emission, 13 regions where ^{13}CO integrated intensities reach the half maximums are fully mapped, while some cores of the other four regions may be missed because of the wide extension of the molecular clouds. Based on the data, some physical properties have been derived, such as the full width at half maximum (FWHM) of three lines, excitation temperature and optical depth. The column density, local thermodynamic equilibrium mass (M_{LTE}) and virial mass (M_{vir}) have also been obtained. The average ratios of M_{vir} to M_{LTE} for ^{13}CO and C^{18}O cores are 0.66 and 0.74, respectively, suggesting these cores are close to virial equilibrium. The maps of integrated intensities of ^{13}CO and C^{18}O are overlaid on the 2MASS K band images to compare the cores with clusters in morphology. We also calculate the sizes and masses of clusters from the photometric results of point sources released by 2MASS database. Based on the result, the star formation efficiency (SFE) of clouds associated with young clusters is calculated. SFE varies over a wide range, from 10% to 30%.

Key words ISM: clouds, stars: formation, ISM: lines and bands, stars: pre-main sequence