

红外暗云G 011.0970–0.1093的多种分子氘化 增丰差异性与气态CO耗损*

师昆鹏 冯思轶[†] 林淑婷 高乐涵

(厦门大学物理科学与技术学院天文学系 厦门 361005)

摘要 利用毫米波射电天文所(Institut de Radioastronomie Millimétrique, IRAM) 30 m射电望远镜在1.3–4.0 mm波段的分子谱线成图, 结合70–870 μm 连续谱数据以及绿岸射电望远镜(Green Bank Telescope, GBT)对 $\text{NH}_3(J, K) = (1, 1)$ 和 $(2, 2)$ 谱线的成图(J 为总角动量子数, 而 K 描述角动量在分子主轴方向的分量), 对G 011.0970–0.1093纤维状分子云末端的一对比邻云团进行了观测. 尽管在870 μm 波段下它们都表现出与连续谱流量峰值成协, 但在70 μm 波段下, 它们呈现出明亮与暗弱的对照特性. 对这两个云团进行对比分析发现: (1)该极早期大质量恒星形成区的气体尘埃温度高度耦合; (2) 70 μm 明亮云团的气体尘埃温度从中心(约17 K)到包层边缘呈递减趋势, 这预示着云团内部可能已经有原恒星形成; 70 μm 暗弱云团中心较边缘更冷(约11 K)更致密(约 $5 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$), 且氢分子柱密度与尘埃温度存在强反相关, 故外部辐射可能主导该云团加热; (3)在pc尺度上, 气态 C^{18}O 的耗损率 $f_{\text{D}}(\text{C}^{18}\text{O})$ 与 HCO^+ 的氘化率存在强正相关, 且气态 C^{18}O 在冷且致密的 DCO^+ 主导云团耗损 $f_{\text{D}}(\text{C}^{18}\text{O})$ 高达7; (4)在气体尘埃温度从10 K到20 K, 氢分子柱密度从 10^{22} cm^{-2} 到 10^{23} cm^{-2} 的变化环境里, HCO^+ 、 N_2H^+ 、 HNC 在更为致密冷暗的环境氘化率增丰明显, HCN 则在稍温暖且70 μm 明亮的环境氘化率增丰更大, 而 NH_3 氘化率在此环境中没有明显变化. 这些不同分子氘化增丰的差异性可能源自其气体尘埃反应路径的差异性.

关键词 恒星: 形成, 星际介质: 云, 星际介质: 谱线与谱带, 星际介质: 分子, 亚毫米: 星际介质

中图分类号 P161; **文献标识码**: A

1 引言

红外暗云(Infrared Dark Clouds, IRDCs)是星际疏散分子云的引力与湍动磁场抗衡后的产物. 这些分子云由于其数密度(n_{H})大($n_{\text{H}} > 10^4 \text{ cm}^{-3}$)、温度低($T < 25 \text{ K}$)^[1–3], 因此存在较大的尘埃消光, 不会有明显的红外辐射, 故称为“红外暗云”. 红外暗云通常是恒星形成的摇篮, 其中可能孕育着低质量星前核、大质量无恒星核以及大质量年轻恒星^[4–5].

红外暗云对恒星形成极早期的物理及化

学演化过程的研究具有重要意义. 在这些致密($n_{\text{H}} > 10^4 \text{ cm}^{-3}$)而低温($T < 25 \text{ K}$)的恒星形成极早期区域中, 恒星加热和反馈活动并未大规模出现, 因此使得早期分子云的动力学和化学特性得以保留^[6]. 这些特性对于理解恒星形成的物理及化学演化过程来说至关重要. 分子氘化(deuteration)与气态CO分子耗损(depletion)是该阶段两个重要的化学过程, 也是本研究的重点. 在星际介质中, 氘原子主要以HD形式存在^[7–8]; 而氘化过程则是在低温高密环境中, 在宇宙射线驱动下, 氘原子通过离子–分子反应从HD中释放出来, 与 H_3^+ 交换同位

2024-04-07收到原稿, 2024-05-20收到修改稿

*国家自然科学基金项目(12373023)、厦门大学校长基金项目(20720220024)资助

[†]syfeng@xmu.edu.cn

素, 形成如 H_2D^+ 、 D_2H^+ 、 D_3^+ 等离子^[8-11]; 这些离子进一步与其他分子反应, 产生诸如 DCO^+ 、 DCN 、 NH_2D 、 DNC 和 N_2D^+ 等分子或离子^[12]. 气态 CO 分子耗损则是指, 重元素分子如 CO 被吸附于尘埃表面, 导致气态 CO 分子的丰度降低^[13-18]; 此过程中气态 CO 耗损程度可以使用预期的气态 CO 丰度与观测到的气态 CO 丰度之间的比率衡量. 长久以来, 在分子云中观测到的气态 CO 耗损现象主要集中在亚秒差距(subparsec, subpc)尺度的云团中^[14-15, 19-20], 此种耗损只有少量在秒差距(parsec, pc)尺度分子云上被观测到^[21-22].

此前大量的对简单分子如 HCO^+ 、 N_2H^+ 的观测发现, 这些分子在低温($T < 20\text{ K}$)致密($n_{\text{H}} > 10^4\text{ cm}^{-3}$)环境的氘化率比疏散星际介质(n_{H} 约 10^{-5} cm^{-3})高几个数量级^[8, 23]. 随着原恒星形成, 分子氘化率下降. 然而, 2019–2020年Feng等^[6, 24]对G 28.34+0.06纤维状红外暗云末端两个邻近(约1.8 pc)的, 在870 μm 连续谱峰值处的, 且在70 μm 连续谱分别为明亮与暗弱区域的致密云团进行高灵敏度宽带“对照”谱线成图观测发现: (1) 不同分子的氘化增丰并非都在相对低温环境(约14 K)中比相对高温环境(约22 K)高, 有的分子如 HCN 、 CH_3OH 随温度升高而氘化增丰, 有的分子如 NH_3 在14–22 K氘化增丰不明显, 这可能因其气尘反应路径不同而不同; (2) 在pc尺度上, 气态 CO 耗损与 DCO^+ 增丰在空间分布上呈强正相关, 可能因 CO 参与 DCO^+ 化学反应所致.

为探究G 28.34+0.06分子云中的上述两个化学现象是由其本身物理化学环境的特殊性引起, 或是这些化学过程在极早期大质量恒星形成分子云中具有普适性, Feng等^[24]主持了MIAO (The Multiwavelength Line-Imaging Survey of the 70 μm Dark and Bright Clouds)巡天项目. 该项目选择了24个冷的(尘埃温度 $< 20\text{ K}$)、致密的(pc尺度的分子体密度 $n_{\text{H}} > 10^4\text{ cm}^{-3}$)、邻近的(动力学距离 $d < 5\text{ pc}$)且处在纤维状红外暗云尾部的分子云区域. 为了减小外部环境差异性导致的统计不确定性, 该巡天中的每个区域覆盖了一对在870 μm 连续谱皆为峰值但在70 μm 连续谱处分别为明亮与暗弱的云团.

在MIAO巡天项目中, 位于G 011.0970–0.1093

分子云末端的70 μm 明亮与暗弱云团对与该巡天项目的试点研究源^[6], 位于G 28.34+0.06分子云末端的70 μm 明亮与暗弱云团对有极大的物理化学环境相似性: (1) 这对团块的质量(M_{c})也符合 $M_{\text{c}} \geq 870 M_{\odot}(\text{radius/pc})^{1.33}$ 的标准^[25], 表面密度 $\Sigma > 0.2\text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$, 超过了大质量恒星形成的经验阈值($> 0.05\text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$)^[26-27]; (2) 这对团块在G 011.0970–0.1093分子云中投影距离约1.0 pc; (3) 其中, 70 μm 暗弱云团的光度约为108 $L_{\odot}$, 质量约为397 $M_{\odot}$, 光质比小于1个太阳光质比($L_{\text{bol}}/M_{\text{c}} < 1 L_{\odot}/M_{\odot}$).

本文对上述区域的云团对的物理性质(尘埃气体温度和密度)以及低温化学(多种分子的氘化率差异性与气态 CO 耗损)进行了成图观测与对照分析, 旨在检验试点研究源G 28.34+0.06结论是否具有普适性. 本文结构如下: 第2节主要介绍观测数据, 第3节描述观测得到的关键分子的谱线轮廓与其空间分布, 第4节讨论整个区域各物理化学参数之间可能存在的相关性, 第5节列举通过分析该源得到的结论.

2 观测数据来源

在2017年8月至2018年5月期间, 我们使用毫米波射电天文所(Institut de Radioastronomie Millimétrique, IRAM) 30 m射电望远镜对G 011.0970–0.1093分子云在1.3 mm、3.4 mm和4.0 mm波段进行了分子谱线成图观测. 利用Eight Mixer Receiver (EMIR) Fast Fourier Transform Spectrometers (FTS)–200后端, 在每个波段覆盖了16 GHz的带宽(即70.718–78.501 GHz、82.056–94.183 GHz和217.122–224.842 GHz), 实现了200 kHz的频率分辨率(对应于93.173 GHz处, 即 N_2H^+ (1–0)的速度分辨率为 $0.637\text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$).

采用On-The-Fly (OTF)模式, 我们以 $18^{\text{h}}10^{\text{m}}25^{\text{s}}.70$, $-19^{\circ}22'59''.50$ (J2000)为中心, 对 $200'' \times 200''$ 的天区进行成图, 步长为 $5''.0$. 图1是G 011.0970–0.1093分子云末端连续谱及分子谱线成图, 从中可以看到一对相邻的(约1 pc)云团, 其连续谱峰值都位于870 μm , 但在70 μm 连续谱处却一明一暗. 对于指向和流量, 我们选用火星和土星作为校准源. 在1.3 mm、3.4 mm和4.0 mm波长处, 考虑到前向效率(F_{eff})分别为93%、95%和95%, 主瓣效率(B_{eff})

分别为60%、81%和81%¹, 观测到的天线温度(T_A^*)可以被转换为主瓣温度($T_B = F_{\text{eff}}/B_{\text{eff}} \times T_A^*$). 在观测过程中, 天气条件处于良好状态, 辐射计不透明度(τ)在255 GHz低于0.6. 因此在1.3 mm、3.4 mm和4.0 mm波段对目标天区经过1 h成图后,

1 σ rms (root mean square)分别为0.14–0.54 K、0.02–0.04 K和0.02–0.06 K^[24]. 随后, 我们使用 GILDAS 软件包²对观测得到的初步数据(以赤经(Right Ascension, R.A.)–赤纬(Declination, Dec.)–速度三维存储)进行了预处理和初步分析.

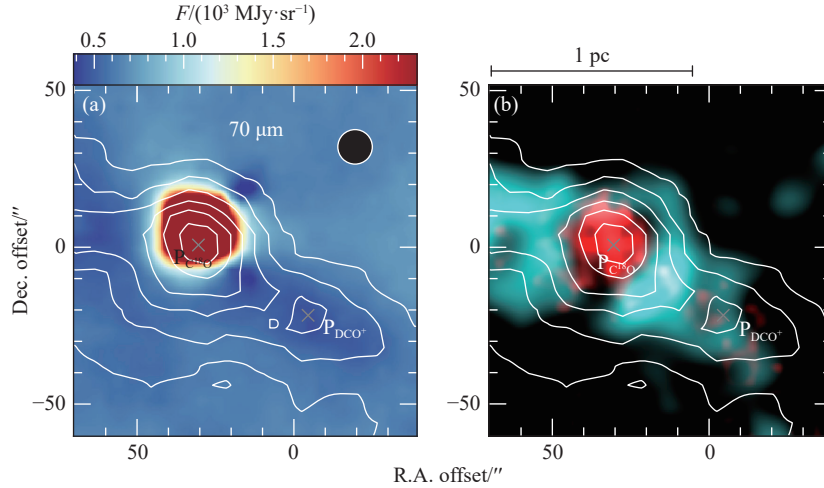


图 1 G 011.0970–0.1093 的分子云尾端连续谱及分子谱线成图. 左图(a): Herschel 70 μm 示踪的尘埃图(F 表示流量密度), 右上角的黑色圆圈表示角分辨率的大小 $10''.2$. 右图(b): 两色图, 其展示在相同速度范围内($15\text{--}45\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$)积分的 C^{18}O (2–1)(以红色显示, 角分辨率为 $11''.8$)和 DCO^+ (1–0)(以青色显示, 角分辨率为 $36''.0$)的积分强度; 洋红色虚线圆圈内为70 μm 明亮且 C^{18}O 主导, 洋红色虚线圆圈外为70 μm 暗弱且 DCO^+ 主导. 两子图中的白色等高线为APEX在870 μm 处观测到的连续谱辐射^[28], 等高线水平从 5σ ($\sigma = 5.6\text{ MJy}\cdot\text{sr}^{-1}$)开始, 增加的步长为 5σ , 角分辨率为 $18''.2$, 870 μm 峰值处以灰色‘x’标记, 同时 $\text{P}_{\text{C}^{18}\text{O}}$ 和 P_{DCO^+} 作为标记放置于此.

Fig. 1 The multi-wavelength continuum and molecular spectral line image towards the tail of G 011.0970–0.1093. Subfigure (a) depicts the dust distribution measured by Herschel at 70 μm (flux density, F), with a black circle in the top right corner indicating a resolution of $10''.2$. Subfigure (b) shows a two-color plot presenting the integrated intensities of C^{18}O (2–1) and DCO^+ (1–0) within the same velocity range ($15\text{--}45\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$), displayed in red and cyan respectively, with resolutions of $11''.8$ and $36''.0$; Inside the magenta dashed circle is 70 μm bright and C^{18}O -dominated, outside the magenta dashed circle is 70 μm weak and DCO^+ -dominated. White contours in both subfigures represent the continuum radiation observed by APEX at 870 μm ^[28], starting from 5σ ($\sigma = 5.6\text{ MJy}\cdot\text{sr}^{-1}$) and increasing in steps of 5σ , with a resolution of $18''.2$, 870 μm continuum peaks are marked with a gray ‘x’, while $\text{P}_{\text{C}^{18}\text{O}}$ and P_{DCO^+} are placed as markers here.

除此之外, 我们还使用了以下望远镜数据库来量化观测区域的物理特性(即, 气体与尘埃的温度密度). 尘埃连续谱数据来自赫歇尔(Herschel)空间望远镜的Hi-GAL (Herschel Infrared Galactic Plane Survey)巡天项目(波长分别为70 μm 、160 μm 、250 μm 、350 μm 和500 μm , 对应角分辨率分别为 $10''.2$ 、 $13''.5$ 、 $18''.1$ 、 $24''.9$ 和 $36''.4$)^[29], 以及来自阿塔卡马探路者实验望远镜(Atacama

Pathfinder Experiment (APEX) telescope, 其波长为870 μm , 角分辨率为 $19''.2$)^[28].

NH_3 (J, K) = (1, 1)和(2, 2)跃迁线(J 为总角动量子数, 而 K 描述角动量在分子主轴方向的分量)数据来自RAMPS (Radio Ammonia Mid-plane Surve)巡天项目^[30], 由绿岸射电望远镜(Green Bank Telescope, GBT)进行观测, 角分辨率约 $34''.7$, 速度分辨率为 $0.018\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, 在观测区域的每个速

¹ <https://publicwiki.iram.es/Iram30 mEfficiencies>

² <https://www.iram.fr/IRAMFR/GILDAS/>

度采样通道中, T_B 的 1σ rms 噪声水平为 0.5 K.

3 结果

3.1 分子谱线轮廓

在低温 ($T < 20$ K) 且致密 ($n_H > 10^4 \text{ cm}^{-3}$) 环境中, 分子谱线的高能级跃迁很有可能未被激发, 故 IRAM 30 m 观测的目标谱线为 N_2H^+ 、 HCN 、 HNC 、 HCO^+ 中含 ^{12}C 与 ^{13}C 的同位素分子对, 含氢 (H) 与含氘 (D) 的同位素分子对的 $J = 1 - 0$ 转动谱线以及 ^{12}CO 、 ^{13}CO 和 C^{18}O 的 $J = 2 - 1$ 转动谱线. 其中含 ^{12}C 的分子丰度最大, 最容易测得. 然而, 含 ^{12}C 谱线通常表现出强烈的自吸收特

征^[6-24, 31], 这一现象主要由于含 ^{12}C 的分子丰度较高引起的较大光深产生. 同时, 含 ^{12}C 的分子的低能级谱线在观测天区出现混合有来自银河系旋臂的多个速度分量的线翼^[32]. 相比之下, 丰度较小的含 ^{13}C 或 ^{18}O 的分子基态跃迁线和氘化同位素基态跃迁线受这些因素的影响较小. 因此, 本工作的分析重点在稀有同位素 H^{13}CN 、 HN^{13}C 和 H^{13}CO^+ 及其氘化同位素 DCN 、 DNC 和 DCO^+ 的基态旋转跃迁, 这些分子谱线在温度范围为 10–20 K 时具有临界密度大于 10^4 cm^{-3} ^[33-35], 因此可作为致密气体探针. 表 1 展现出所研究的 G 011.0970–0.1093 分子云尾端 70 μm 明亮与暗弱云团中所涉上述分子谱线的化学成分与观测特性.

表 1 G 011.0970–0.1093 分子云尾端 70 μm 明亮与暗弱云团对中所涉分子谱线的化学成分与观测特性
Table 1 Chemical and observational characteristics of molecular lines towards the 70 μm bright and dark clouds pair in G 011.0970–0.1093

Mol.	Freq./GHz	Transition	$S\mu^{2a}$ /D ²	$(E_u/k_B)^a$ /K	n_{crit}^b /(10^5 cm^{-3})	n_{eff}^c /(10^5 cm^{-3})	Beam/''	Telescope
H^{13}CN	86.340	$J = 1-0^d$	26.7	4.1	9.3	1.6–3.5	30.0	IRAM 30 m
DCN	72.415	$J = 1-0^d$	26.8	3.5	5.5	...	35.8	IRAM 30 m
HN^{13}C	87.091	$J = 1-0$	7.3	4.2	1.9	...	29.8	IRAM 30 m
DNC	76.306	$J = 1-0$	9.3	3.7	1.7	...	34.0	IRAM 30 m
H^{13}CO^+	86.754	$J = 1-0^e$	15.2	4.2	1.4	0.2–0.4	29.9	IRAM 30 m
DCO^+	72.039	$J = 1-0^e$	14.5	3.5	2.6	...	36.0	IRAM 30 m
N_2H^+	93.173	$J = 1-0^d$	104.0	4.5	1.5	0.1	27.8	IRAM 30 m
N_2D^+	77.109	$J = 1-0^d$	104.0	3.7	0.5	...	33.6	IRAM 30 m
NH_3	23.694	$1_10a - 1_10s$	6.6	23.8	0.1	0.01	34.7	GBT 100 m
NH_2D	85.926	$1_{1,1}0s - 1_{0,1}0a$	28.6	20.7	39.0	...	30.2	IRAM 30 m
C^{18}O	219.560	$J = 2-1$	0.02	15.8	0.01	...	11.8	IRAM 30 m

^a The line strength $S\mu^2$ (Debye², D²), the upper state energy E_u , and the Boltzmann constant k_B are given by CDMS (Cologne Database for Molecular Spectroscopy)^[36-37] or JPL (Jet Propulsion Laboratory)^[38].

^b The critical density n_{crit} for each transition is measured from the corresponding Einstein coefficient A_{ij} and the collision rates C_{ij} in the temperature range of 10–20 K given by LAMDA (Leiden Atomic and Molecular Database)^[39]. The collision rates C_{ij} for deuterated lines are assumed to be the same as those for their hydrogenated counterparts.

^c The effective excitation density is obtained from Shirley^[35] at 10–20 K, with “...” denoting unrecorded values.

^d The hyperfine splittings are resolved in our observations, though, we simply use the sum of $S\mu^2$ for total column density calculation for keeping the consistency of the velocity range that different lines integrate.

^e The hyperfine splittings are recorded in JPL and CDMS but not resolved in our observations, so the sum of $S\mu^2$ is used for the rotational transitions to calculate the total column density.

图2为G 011.0970–0.1093尾端70 μm 明亮与暗弱云团对中各分子谱线图. 比较从870 μm 连续谱

峰值处提取的单位角分辨率平均分子谱线轮廓可以看出, $70\ \mu\text{m}$ 连续谱明亮与暗弱团块的线心速度(约 $29.8\ \text{km}\cdot\text{s}^{-1}$)和半峰全宽(Full Width at Half-Maximum, FWHM)的线宽($0.8\text{--}3.3\ \text{km}\cdot\text{s}^{-1}$)差异小于10%. 由此可以肯定, 这对云团在空间上相邻, 并处于同一条纤维状分子云中. 值得注意的一点

是, 因观测波段跨度大, 故不同波段的空间分辨率与速度分辨率并未统一. 考虑到上述分子谱线的超精细结构, 它们的线心速度、速度弥散度、线心强度以及沿速度轴的积分强度都由PySpecKit软件包^[40]拟合给出(假设高斯轮廓, 见表2中各分子谱线最佳拟合参数).

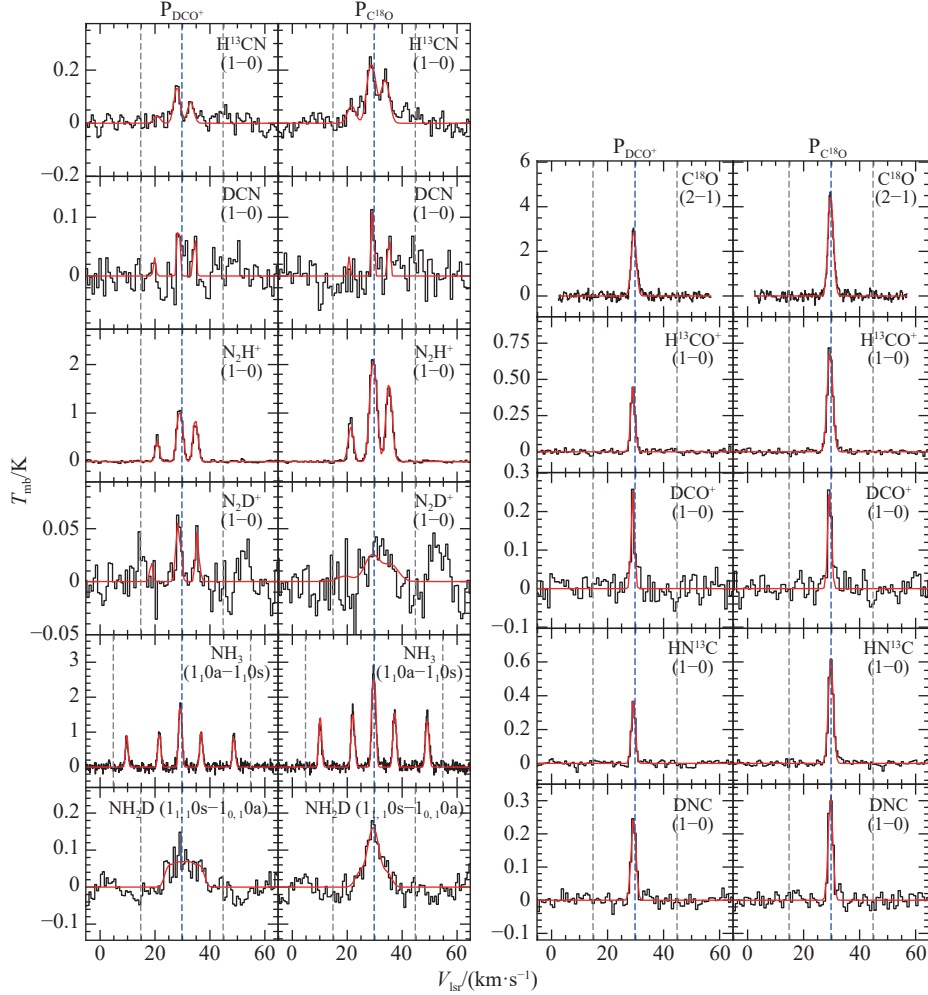


图 2 G 011.0970–0.1093尾端 $70\ \mu\text{m}$ 明亮与暗弱云团对中各分子谱线图. 所涉分子均是从一个单位角分辨率抽取的平均谱线轮廓, 黑色为观测数据(频率分辨率 $200\ \text{kHz}$), 红色为PySpecKit软件包^[40]假设高斯轮廓拟合的结果. 两条灰色垂直虚线表示积分的速度范围, 为保留精细结构子线对流量的贡献, ($\text{NH}_3\ (1_{1,0a} - 1_{1,0s})$ 积分范围为 $5\text{--}55\ \text{km}\cdot\text{s}^{-1}$, 其它分子谱线积分范围为 $15\text{--}45\ \text{km}\cdot\text{s}^{-1}$), 蓝色垂直虚线表示源的系统速度, V_{lsr} 为相对速度($V_{\text{sys}} = 29.8\ \text{km}\cdot\text{s}^{-1}$).

Fig. 2 The beam averaged line profiles towards the $70\ \mu\text{m}$ bright and dark clumps pair in G 011.0970–0.1093. Black lines are from observations (with a frequency resolution of $200\ \text{kHz}$), and the red lines are from Gaussian profile fits by using the PySpecKit software package^[40]. Two gray vertical dashed lines indicate the velocity ranges that the intensity integrated, i.e., $5\text{--}55\ \text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ ($\text{NH}_3\ (1_{1,0a} - 1_{1,0s})$ for covering all the hyperfine structures, and $15\text{--}45\ \text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ for the rest lines to reduce the noise). The blue vertical dashed line indicates the systemic velocity of the source ($V_{\text{sys}} = 29.8\ \text{km}\cdot\text{s}^{-1}$), V_{lsr} is velocity relative to the local standard of rest.

表 2 G 011.0970–0.1093 分子云尾端 70 μm 明亮与暗弱云团对中所涉分子谱线的最佳拟合参数
Table 2 Best-fit parameters of molecular lines towards the 70 μm bright and dark clumps pair in G 011.0970–0.1093

Line ^{a,b}	Freq. ^c / GHz	$\theta^d / ''$	$P_{\text{DCO}^+}^e$		$P_{\text{C}^{18}\text{O}}^e$		$r_{\text{rms}}^f /$ (K · km · s ⁻¹)
			$\Delta v /$ (km · s ⁻¹)	$\int T_{\text{B}}(v)dv /$ (K · km · s ⁻¹)	$\Delta v /$ (km · s ⁻¹)	$\int T_{\text{B}}(v)dv /$ (K · km · s ⁻¹)	
C ¹⁸ O (2 – 1)	219.560	11.8	2.2 ± 0.1	7.31 ± 0.50	2.3 ± 0.0	10.84 ± 0.51	2.21
H ¹³ CO ⁺ (1 – 0)	86.754	29.9	1.8 ± 0.0	0.85 ± 0.05	2.3 ± 0.0	1.82 ± 0.06	0.21
DCO ⁺ (1 – 0)	72.039	36.0	1.3 ± 0.2	0.50 ± 0.14	1.5 ± 0.1	0.56 ± 0.11	0.11
HN ¹³ C (1 – 0)	87.091	29.8	1.6 ± 0.1	0.65 ± 0.08	2.1 ± 0.0	1.41 ± 0.09	0.18
DNC (1 – 0)	76.306	34.0	2.0 ± 0.1	0.52 ± 0.08	1.9 ± 0.1	0.64 ± 0.12	0.11
H ¹³ CN (1 – 0)	86.340	30.0	... ^g	$\sigma = 0.80^g$	3.3 ± 0.2	2.05 ± 0.10	0.32
DCN (1 – 0)	72.415	35.8	... ^g	$\sigma = 0.26^g$	0.8 ± 0.4	0.41 ± 0.02	0.12
N ₂ H ⁺ (1 – 0)	93.173	27.8	1.6 ± 0.0	5.70 ± 0.29	2.2 ± 0.0	13.21 ± 0.66	0.98
N ₂ D ⁺ (1 – 0)	77.109	33.6	... ^g	$\sigma = 0.26^g$	... ^g	$\sigma = 0.24^g$	0.11
NH ₃ (1 ₁ 0a – 1 ₁ 0s)	23.694	34.7	1.0 ± 0.1	8.42 ± 0.42	1.2 ± 0.1	15.55 ± 0.78	1.48
NH ₂ D (1 _{1,1} 0s – 1 _{0,1} 0a)	85.926	30.2	... ^g	$\sigma = 0.88^g$	... ^g	$\sigma = 1.01^g$	0.34

^a Lines are extracted from images by averaging a beam-sized region centered at P_{DCO^+} and $P_{\text{C}^{18}\text{O}}$. All line images have the same pixel size, but whose native angular and velocity resolution we kept as in the observations.

^b The velocity range for our integrations of NH₃ (1₁0a – 1₁0s) is 5–55 km · s⁻¹, the other lines are 15–45 km · s⁻¹.

^c Rest frequencies are given from the main line of the hyperfine splittings.

^d Angular resolution is from observations.

^e The best-fit parameters line width Δv and integrated intensity $\int T_{\text{B}}(v)dv$ (T_{B} is main beam temperature) for lines in Fig.2 given by PySpecKit^[40].

^f The integrated intensity maps in Fig.3 exhibit the σ rms values.

^g For a line with $< 3\sigma$ emission, “...” is given in the line width column, and a σ rms is given.

3.2 积分强度

通过积分图2中各分子谱线对应的公有速度范围(除NH₃ (1₁0a – 1₁0s)以外的分子谱线的速度积分范围为15–45 km · s⁻¹), 可以得到图3 G 011.0970–0.1093 分子云末端中所涉分子积分强度图. 为了方便该源中的尘埃辐射与气体分布在空间上相对应, APEX测到的870 μm 连续谱被叠加在每张子图上^[28], 值得注意的是, 由于NH₃ (1₁0a – 1₁0s)的多条精细结构子线所覆盖速度范围(5–55 km · s⁻¹)略大于其它目标分子谱线(见图2), 故图3 (e)为NH₃ (1₁0a – 1₁0s)所有精细结构子线积分的总流量, 较

15–45 km · s⁻¹速度范围的流量积分高约15%.

在宽带成图中, DCO⁺ (1–0)的积分强度图相较于其它氘化分子谱线在每个像素格点处的信噪比(signal to noise ratio, S/N)均为最高(S/N > 5). 与C¹⁸O (2 – 1)相比该分子谱线积分强度在空间分布上呈现出明显的偏移, 与Feng等^[24]在G 28.34+0.06分子云观测到的这两条谱线的空间偏移一致. 为后续定量分析之便, 我们将DCO⁺ (1–0)与C¹⁸O (2 – 1)的积分强度图叠加为青–红两色图(见图1 (b)), 并用洋红色虚线圆圈勾画出两区域分界线. 即DCO⁺为主导的青区(洋红色虚线圆圈以

外), 以 P_{DCO^+} 命名并标记在该区域中的 $870 \mu\text{m}$ 峰值处; C^{18}O 为主导的红区(洋红色虚线圆圈以内), 以 $P_{\text{C}^{18}\text{O}}$ 命名并标记在该区域中的 $870 \mu\text{m}$ 峰值处. 综合图 1 (a)–(b) 可以看出 DCO^+ 和 C^{18}O 主导区分别与 $70 \mu\text{m}$ 暗弱和明亮分布在空间上相似.

图 3 还表明, 虽然 N_2H^+ 、 H^{13}CN 、 HN^{13}C 、 H^{13}CO^+ 和 NH_3 的氘化同位素分子的基态跃迁线

的积分强度图与 $870 \mu\text{m}$ 连续谱辐射空间分布高度一致, 但它们对应的氘化物分子的基态跃迁线积分强度图却表现出了多样性: $\text{N}_2\text{D}^+(1-0)$ 、 $\text{DNC}(1-0)$ 和 $\text{DCO}^+(1-0)$ 相对较强的积分强度主要分布在 $70 \mu\text{m}$ 暗弱区域(即 P_{DCO^+} 主导区), 而 $\text{DCN}(1-0)$ 和 $\text{NH}_2\text{D}(1_{1,1}0_{0,1}0_{0,1})$ 相对较强的积分强度主要分布在 $70 \mu\text{m}$ 明亮区域(即 $P_{\text{C}^{18}\text{O}}$ 主导区).

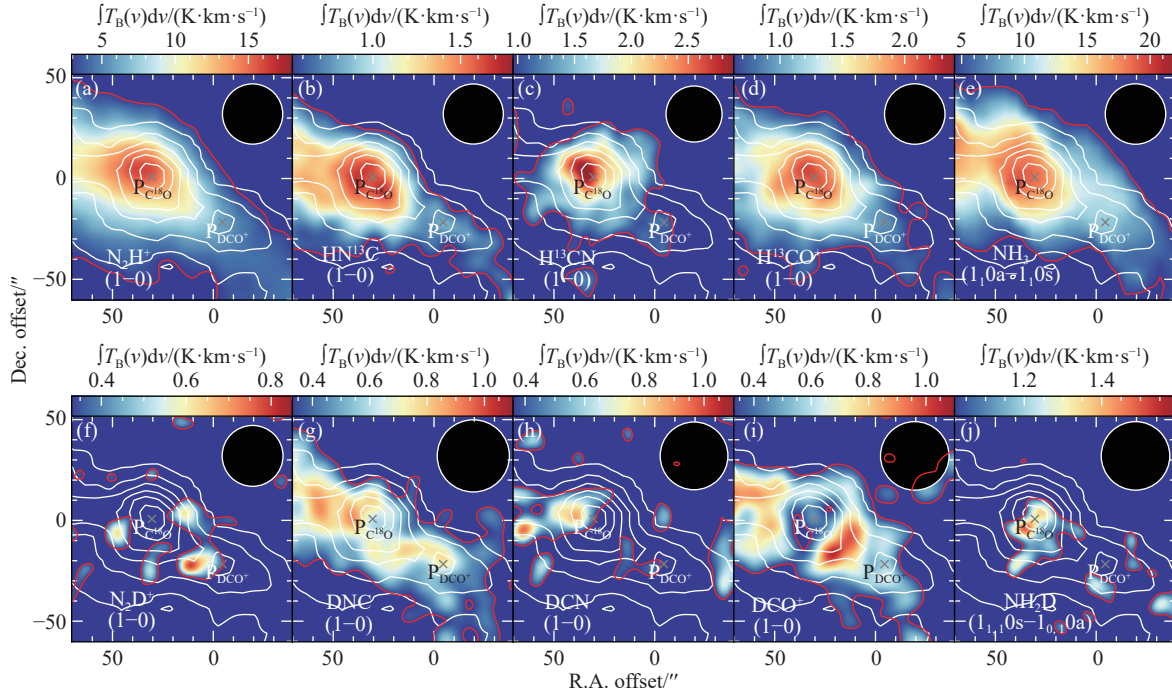


图 3 G 011.0970–0.1093 分子云末端中所涉分子积分强度图. 各子图的速度积分范围如图 2 所示. 各子图中红色轮廓表示具有 $S/N > 3$ 的积分强度区域, 右上角的黑色圆圈表示其对应的观测角分辨率大小(见表 1), 白色等高线为 APEX 在 $870 \mu\text{m}$ 处观测到的连续辐射^[28], 等高线水平从 5σ ($\sigma = 5.6 \text{ MJy} \cdot \text{sr}^{-1}$) 开始, 增加的步长为 5σ , 角分辨率为 $18''.2$, $870 \mu\text{m}$ 峰值处以灰色 'x' 标记, 同时 $P_{\text{C}^{18}\text{O}}$ 和 P_{DCO^+} 作为标记放置于此.

Fig. 3 The integrated intensity of molecular lines towards the end of G 011.0970–0.1093 molecular cloud. The velocity range that intensity integrated for each line is given in Figure 2. In each subfigure, the red contour indicates regions $S/N > 3$, with the black circle in the top right corner indicating their corresponding angular resolutions (see Table 1), white contours represent the continuum emission observed by APEX at $870 \mu\text{m}$ ^[28], starting from 5σ ($\sigma = 5.6 \text{ MJy} \cdot \text{sr}^{-1}$) and increasing in steps of 5σ , with a resolution of $18''.2$, $870 \mu\text{m}$ continuum peaks are marked with a gray 'x', while $P_{\text{C}^{18}\text{O}}$ and P_{DCO^+} are placed as markers here.

3.3 物理结构

3.3.1 尘埃温度与氢分子柱密度

利用第 2 节提及的多波段连续谱数据, 我们可以通过拟合理想黑体谱的光谱能量分布(Spectral Energy Distribution, SED)的方法获取氢分子柱密度(N_{H_2})、尘埃温度(T_{dust})等参数. 过程如下:

首先把多波段数据平滑(卷积)到均一波束, 然后把观测区域前景与背景流量扣除, 最后整理数据并进行 SED 拟合. 以下为此过程的详细描述.

利用 Astropy 卷积包^[41], 对不同波段数据进行平滑处理, 使其达到相同角分辨率, 即 Herschel 在 $500 \mu\text{m}$ 波长处的分辨率 $36''.4$. 然后, 我们将各波

段的卷积数据重新网格化,以使它们的像素达到共同的大小(约1/3个角分辨率,符合Nyquist采样标准,即11".5)并对齐,并且在该过程中重新计算每个像素格点的流量.

依照Yuan等^[42]的流程,采用Starlink软件³的Clump Identification (CUPID)-findback算法⁴,通过迭代方式构建G 011.0970-0.1093分子云观测区域前景与背景流量图.具体操作如下:首先,将每个输入像素格点替换为该像素格点周围输入值的最小值.然后,将每个像素格点的值替换为以该像素格点为中心的方框(2'.5)内的最大值.最后,对于这些初步处理后数据中的每个像素格点,取该像素格点为中心的方框(2'.5)内的平均值来进行进一步处理.在数据处理过程中,由于APEX位于地面,任何大于2'.5空间尺度上的均匀天文信号都与大气辐射一起被滤除^[28],所以我们在前3个步骤都采用了相同的方框尺寸(2'.5),得出初步前景与背景的流量估计图(详尽流程见CUPID-findback算法介绍).在迭代过程中,前一次处理产生的前景与背景流量估计图被用作下一次迭代的输入数据;上述迭代过程进行10次即得到要去除的前景和背景流量图.

在对多波段尘埃连续谱数据进行平滑统一空间分辨率,统一像素格点大小,以及扣除前景和背景流量后,我们利用以下改良的黑体模型对各波段频率光深 τ_ν 进行改正:

$$S_\nu = \Omega_b B_\nu(T)(1 - e^{-\tau_\nu}), \quad (1)$$

其中, S_ν 是在频率 ν 处的流量密度, Ω_b 为波束的立体角, $B_\nu(T)$ 表示普朗克方程.由此, N_{H_2} 可通过如下方程得到:

$$N_{\text{H}_2} = R_{\text{gd}} \frac{\tau_\nu}{\kappa_\nu \mu_{\text{H}_2} m_{\text{H}}}, \quad (2)$$

其中, R_{gd} 表示气体和尘埃的比例系数,通常取150^[43]; μ_{H_2} 是平均分子量,通常取2.8^[44]; m_{H} 是氢原子质量,取 1.67×10^{-24} g; κ_ν 为我们假设的尘埃不透明度:

$$\kappa_\nu = \kappa_{230} \left(\frac{\nu}{230 \text{ GHz}} \right)^\beta, \quad (3)$$

其中, $\kappa_{230} = 0.899 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ^[45]; 假设尘埃发射率 $\beta = 1.8$ ^[24, 46-47].

在本文中,我们利用python中提供的Levenberg-Marquardt算法 Lmfit (Lmfit: Non-Linear Least-Square Minimization and Curve-Fitting for Python)⁵进行拟合,得到如图4 G 011.0970-0.1093分子云尾端的物理环境图,从图(a)-(b)可以看到: N_{H_2} 范围在 $10^{22} - 10^{23} \text{ cm}^{-2}$ (在每个像素上不确定度约10%), T_{dust} 则跨越 $10 - 20 \text{ K}$ (在每个像素上不确定度约5%), N_{H_2} 和 T_{dust} 与 $870 \mu\text{m}$ 连续谱辐射在空间分布上保持一致.特别在 $70 \mu\text{m}$ 暗弱且 DCO^+ 丰沛的 $870 \mu\text{m}$ 峰值处 (P_{DCO^+} , T_{dust} 约 11 K 、 N_{H_2} 约 $5.0 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$), 相较边缘包层更冷更致密,还表现出中心到包层 T_{dust} 递增而 N_{H_2} 递减的趋势. 在 $70 \mu\text{m}$ 明亮且 C^{18}O 丰沛的 $870 \mu\text{m}$ 峰值处 ($P_{\text{C}^{18}\text{O}}$, T_{dust} 约 17 K 、 N_{H_2} 约 $3.5 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$) 相较边缘包层更暖更致密,还表现出中心到边缘包层 T_{dust} 递减但 N_{H_2} 同样递减的趋势. 这预示着在 P_{DCO^+} 处的云团可能是由外部辐射主导加热,而在 $P_{\text{C}^{18}\text{O}}$ 处的云团内部可能已经有原恒星形成.

3.3.2 气体温度

由于 NH_3 分子在低温 ($T < 20 \text{ K}$) 且致密 ($n_{\text{H}} > 10^4 \text{ cm}^{-3}$) 的环境中相较其它分子(例如 CO) 可能没有被耗损^[9, 14, 16], 且 $\text{NH}_3(J, K) = (1, 1)$ 和 $(2, 2)$ 两条反转跃迁线都可在 $10-100 \text{ K}$ 的温度范围内被有效地激发^[35, 48-52], 在Feng等^[6]对MIAO样本其他源的研究中,对这两条谱线精细结构的拟合(利用HfS程序包^[53])表现出它们作为此种环境下高精度(不确定度为 1 K) 温度探针的有效性. 对 G 011.0970-0.1093分子云观测区域,我们使用同样的方法拟合得到气体温度图,即,对每一像素格点对应的 $\text{NH}_3(J, K) = (1, 1)$ 和 $(2, 2)$ 分别做精细结构拟合得到各自的激发温度 (T_{ex}) 图,并将两条线各子线相加通过转动能级(rotation diagram)图得

³ <http://starlink.eao.hawaii.edu/starlink/WelcomePage>

⁴ <http://starlink.eao.hawaii.edu/starlink/findback.html>

⁵ <https://lmfit.github.io/lmfit-py/index.html>

到 T_{kin} 与 NH_3 分子的柱密度. 值得注意的是, 观测的两条线皆为 NH_3 的对构(para)异构体, 因此拟合所得的柱密度($N_{p-\text{NH}_3}$)仅为 NH_3 柱密度的一部分

(详见3.4节讨论). 值得注意的是, 因为GBT的观测分辨率为 $34''.7$, 与多波段拟合统一后的连续谱分辨率一致, 故此处的温度图不作平滑处理.

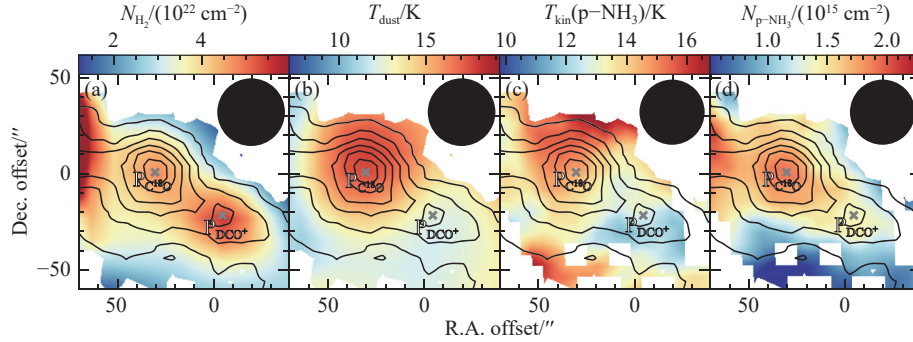


图 4 G 011.0970–0.1093 分子云尾端的物理环境图. 子图(a)–(b)分别是氢分子柱密度(N_{H_2})图和尘埃温度(T_{dust})图, 由多波段连续谱数据 SED 拟合得到, 角分辨率均为 $36''.4$. 子图(c)–(d)分别是气体温度($T_{\text{kin}}(p-\text{NH}_3)$)图和 NH_3 的对构异构体柱密度($N_{p-\text{NH}_3}$)图, 由 $\text{NH}_3(J, K) = (1, 1)$ 和 $(2, 2)$ 两条反转跃迁线的转动能级拟合得到, 角分辨率均为 $34''.7$. 各子图中黑色等高线为 APEX 在 $870 \mu\text{m}$ 处观测到的连续辐射^[28], 等高线水平从 5σ ($\sigma = 5.6 \text{ MJy} \cdot \text{sr}^{-1}$) 开始, 增加的步长为 5σ , 角分辨率为 $18''.2$, $870 \mu\text{m}$ 峰值处以灰色 'x' 标记, 同时 $\text{P}_{\text{C}^{18}\text{O}}$ 和 P_{DCO^+} 作为标记放置于此. 各子图中仅展示了 $870 \mu\text{m}$ 连续谱辐射 $> 3\sigma$ 的区域, 且各参数的角分辨率由子图右上角的黑色圆圈表示.

Fig. 4 The physical structure of the tail of G 011.0970–0.1093 molecular cloud. Subfigures (a) and (b) show the H_2 column density (N_{H_2}) map and the dust temperature (T_{dust}) map, obtained from SED fit to multi-wavelength continuum, both with an angular resolution of $36''.4$. Subfigures (c) and (d) show the gas temperature ($T_{\text{kin}}(p-\text{NH}_3)$) map and the para- NH_3 ($N_{p-\text{NH}_3}$) column density map, from rotation diagram of $\text{NH}_3(J, K) = (1, 1)$ and $(2, 2)$ inversion transition lines, both with an angular resolution of $34''.7$. Black contours in each subfigure indicate the continuum from APEX at $870 \mu\text{m}$ ^[28], starting from 5σ ($\sigma = 5.6 \text{ MJy} \cdot \text{sr}^{-1}$) and increasing in steps of 5σ , with an angular resolution of $18''.2$, $870 \mu\text{m}$ continuum peaks are marked with a gray 'x', while $\text{P}_{\text{C}^{18}\text{O}}$ and P_{DCO^+} are placed as markers here. Only regions with $> 3\sigma$ at $870 \mu\text{m}$ are shown in each subfigure, with the angular resolution of each parameter indicated by the black circle in the top right corner of each subfigure.

总体而言, 在相当的角分辨率下(尘埃为 $36''.4$, NH_3 为 $34''.7$)气体温度 T_{kin} 与尘埃温度 T_{dust} 在每个像素点的差异 $< 20\%$, 所以我们可以合理假定尘埃与气体在 pc 尺度上耦合, 故本文研究的成对云团为 $870 \mu\text{m}$ 峰值处一个波束大小区域($36''.4$), 以期获得各分子谱线更高的信噪比, 增加对比分析的可信度.

3.4 分子氘化与气态 CO 耗损

为了量化 HCO^+ 、 N_2H^+ 、 HNC 、 HCN 、 NH_3 5 个分子的氘化率与气态 CO 耗损在 G 011.0970–0.1093 分子云尾 $70 \mu\text{m}$ 明亮与暗弱云团对随温度密度空间分布的变化, 本文采用了 Feng 等^[6, 24] 在比较多种方法后验证的假定合理性⁶ 进行计算. 即假设目标谱线是光学薄的、波束填充因子为 1、处于局部热动平衡 LTE (Local Thermal Equilibrium)

⁶ Feng 等^[6] 对 MIAO 的前导源, G 28.34+0.06 分子云中的一对 $70 \mu\text{m}$ 明亮与暗弱的云团对的观测, 每个分子都设计了多个同位素分子(含 ^{12}C 与 ^{13}C 、 ^{14}N 与 ^{15}N 、 ^{16}O 与 ^{18}O)多条不同能级跃迁的谱线成图, 并验证得出: (1) 假设 LTE 环境利用旋转温度图与假设非 LTE 环境利用大速度梯度 (large velocity gradient, LVG) 下, 对含 ^{13}C 、 ^{15}C 、 ^{18}O 的分子所得柱密度计算差别 $< 10\%$; (2) 对于观测可分辨的超精细结构的线(例如, N_2H^+ 、 N_2D^+ 、 H^{13}CN 和 DCN 的 $J = 1 - 0$ 谱线以及 $\text{NH}_3(1_{1,0a} - 1_{0,1}0s)$ 、 $\text{NH}_2\text{D}(1_{1,1}0s - 1_{0,1}0a)$ 谱线), 利用超精细拟合方法中得出的柱密度(带有光深校正)与假设所有跃迁具有恒定激发温度 (CTEX 近似) 的方法得出的柱密度之间的差异 < 5 倍; (3) 而对于观测不可分辨超精细结构的线(例如, H^{13}CO^+ 、 DCO^+ 、 HN^{13}C 和 DNC 的 $J = 1 - 0$ 线以及 $\text{C}^{18}\text{O}(2-1)$ 线), 它们可视为光学薄.

并且各分子谱线激发温度与尘埃温度相近 ($T_{\text{ex}} \sim T_{\text{dust}}$), 以统一的 $36''.4$ 的角分辨率得出除 NH_3 外的所有目标分子柱密度.

在上述假定下, 对于不同分子 α , 其柱密度可近似为:

$$N_{\text{T},\alpha} \cong \frac{3k_{\text{B}}Q(T_{\text{ex}})e^{\frac{E_{\text{u}}/k_{\text{B}}}{T_{\text{ex}}}}}{8\pi^3\nu S\mu^2} \int T_{\text{B}}(v)dv, \quad (4)$$

其中, k_{B} 是玻尔兹曼常数; $Q(T_{\text{ex}})$ 是激发温度的配分函数, 通过分子谱线固定温度的配分函数表(来自 JPL⁷ 或 CDMS⁸ 数据库)插值得到; E_{u} 和 $S\mu^2$ 也可通过 JPL 或 CDMS 数据库得到; $\int T_{\text{B}}(v)dv$ 为分子谱线的积分强度(除 NH_3 线外如图 2 所示范围积分可得). 表 3 中列出各分子分别以 P_{DCO^+} 和 $\text{P}_{\text{C}^{18}\text{O}}$ 为中心, 一个波束大小 ($36''.4$) 区域(云团)的平均柱密度.

表 3 G 011.0970–0.109 分子云尾 70 μm 明亮与暗弱云团对中所涉分子柱密度
Table 3 Column densities of molecules towards the 70 μm bright and dark clumps pair in G 011.0970–0.109

Region	Mol.				
	$N_{\text{HN}^{13}\text{C}}^{\text{a}}$ $/(10^{12} \text{ cm}^{-2})$	$N_{\text{DNC}}^{\text{a}}$ $/(10^{11} \text{ cm}^{-2})$	$N_{\text{H}^{13}\text{CO}^+}^{\text{a}}$ $/(10^{12} \text{ cm}^{-2})$	$N_{\text{DCO}^+}^{\text{a}}$ $/(10^{11} \text{ cm}^{-2})$	$N_{\text{H}^{13}\text{CN}}^{\text{a}}$ $/(10^{12} \text{ cm}^{-2})$
P_{DCO^+}	2.3 ± 0.1	13.9 ± 0.7	1.5 ± 0.1	4.4 ± 0.2	$< 2.6^{\text{c}}$
$\text{P}_{\text{C}^{18}\text{O}}$	3.8 ± 0.2	18.7 ± 0.9	2.3 ± 0.1	3.1 ± 0.2	4.5 ± 0.2
Region	Mol.				
	$N_{\text{N}_2\text{H}^+}^{\text{a}}$ $/(10^{12} \text{ cm}^{-2})$	$N_{\text{N}_2\text{D}^+}^{\text{a}}$ $/(10^{11} \text{ cm}^{-2})$	$N_{p\text{-NH}_3}^{\text{b}}$ $/(10^{15} \text{ cm}^{-2})$	$N_{o\text{-NH}_2\text{D}}^{\text{a}}$ $/(10^{12} \text{ cm}^{-2})$	$N_{\text{C}^{18}\text{O}}^{\text{a}}$ $/(10^{15} \text{ cm}^{-2})$
P_{DCO^+}	11.7 ± 0.6	$< 5.1^{\text{c}}$	1.5 ± 0.9	$< 10.9^{\text{c}}$	3.4 ± 0.2
$\text{P}_{\text{C}^{18}\text{O}}$	19.0 ± 1.0	$< 4.8^{\text{c}}$	1.8 ± 0.4	12.6 ± 1.1	4.0 ± 0.2

^a The column density derived from the $T_{\text{ex}} \sim T_{\text{dust}}$ from SED fitting with an angular resolution of $36''.4$.

^b The $N_{p\text{-NH}_3}$ column density is derived from roatation diagram fit to $\text{NH}_3(1, 1)$ and $(2, 2)$ lines with an angular resolution of $34''.7$.

^c An upper limit is given when the detected molecule lines show $< 3\sigma$.

比较氢化与其氘化同位素分子柱密度图, 我们可以得到图 5 5 组分子氘化率以及气态 C^{18}O 耗损图, 其中子图(a)–(e)为各分子的氘化率图. 对于除 NH_3 和含 ^{13}C 以外的分子, 如 N_2H^+ , 其氘化率 $D_{\text{N}_2\text{H}^+}$ 计算如下:

$$D_{\text{N}_2\text{H}^+} = \frac{N_{\text{N}_2\text{D}^+}}{N_{\text{N}_2\text{H}^+}}. \quad (5)$$

值得注意的是, N_2H^+ 的柱密度计算可以通过观测谱线可分辨的精细结构拟合改正其子线光深. 对于 HCO^+ 、 HCN 、 HNC , 我们采用含 ^{13}C 的 $J = 1\text{--}0$ 光学薄线推测其柱密度, 进而获得其氘化率

估计. 根据 Giannetti 等^[54] 的统计结果, 我们假设目标源的 ^{12}C 与 ^{13}C 同位素比符合随银心距 ($R_{\text{GC}} = 4.9 \text{ kpc}^{[24]}$) 的变化规律: $\mathcal{R}_{^{12}\text{C}/^{13}\text{C}} = 6.1 R_{\text{GC}} (\text{kpc}) + 14.3 \approx 44.2$, 并且该比值在分子云内部没有变化. 同时, 我们假设同位素分子丰度比与同位素比一致^[6, 24]. 以 HCN 氘化率 D_{HCN} 的计算为例:

$$D_{\text{HCN}} = \frac{N_{\text{DCN}}/N_{\text{H}^{13}\text{CN}}}{\mathcal{R}_{^{12}\text{C}/^{13}\text{C}}}. \quad (6)$$

如 3.3.2 节曾提及的, NH_2D 与 NH_3 的正构异构体(ortho)与对构异构体(para)两种状态对应不同的分子. 假设 NH_2D 和 NH_3 的正对异构比(ortho-to-

⁷ <https://spec.jpl.nasa.gov/>

⁸ <https://cdms.astro.uni-koeln.de/>

para ratio, OPR) 遵循大样本统计结果, 分别为 3 和 1^[55–56], 我们可通过将 O–NH₂D 和 P–NH₃ 的柱密度转换为总的 (o + p) 柱密度来推导出 NH₃ 氘化率 D_{NH_3} :

$$D_{\text{NH}_3} = \frac{N_{(\text{o}+\text{p})\text{NH}_2\text{D}}}{N_{(\text{o}+\text{p})\text{NH}_3}} = \frac{2}{3} \frac{N_{\text{o}-\text{NH}_2\text{D}}}{N_{\text{p}-\text{NH}_3}}, \quad (7)$$

其中, $N_{(\text{o}+\text{p})\text{NH}_2\text{D}}$ 为 NH₂D 分子总的柱密度, $N_{(\text{o}+\text{p})\text{NH}_3}$ 为 NH₃ 分子总的柱密度, $N_{\text{o}-\text{NH}_2\text{D}}$ 为 NH₂D 正构异构体柱密度, $N_{\text{p}-\text{NH}_3}$ 为 NH₃ 对构异构体柱密度。

与此同时, 利用柱密度相比的方法, 我们也可以获得气态 CO 的耗损图。在没有气态 CO 耗损的分子云环境中, Giannetti 等^[54]的统计结果为: 气

态 CO 相对 H₂ 的预期丰度 ($\chi_{12\text{CO}}^{\text{E}} = N_{12\text{CO}}^{\text{E}}/N_{\text{H}_2}$), ¹⁶O 与 ¹⁸O 的同位素比 $\mathcal{R}_{16\text{O}/18\text{O}}^{\text{E}}$ 都会随着到银河系中心距离 R_{GC} 的变化而变化 ($\chi_{12\text{CO}}^{\text{E}} = 9.50 \times 10^{-5} e^{(1.11-0.13R_{\text{GC}}(\text{kpc}))} \approx 1.5 \times 10^{-4}$, $\mathcal{R}_{16\text{O}/18\text{O}}^{\text{E}} = 58.8R_{\text{GC}}(\text{kpc}) + 37.1 \approx 325.2$)^[57–58]。因此, 在没有气态 CO 附着在尘埃表面的环境中, 气态 C¹⁸O 柱密度 $N_{\text{C}^{18}\text{O}}^{\text{E}}$ 为:

$$N_{\text{C}^{18}\text{O}}^{\text{E}} = \frac{N_{12\text{CO}}^{\text{E}}}{\mathcal{R}_{16\text{O}/18\text{O}}^{\text{E}}}, \quad (8)$$

所以, 气态 C¹⁸O 附着在尘埃表面的耗损率可以表达为预期气态 C¹⁸O ($N_{\text{C}^{18}\text{O}}^{\text{E}}$) 与观测所得的 C¹⁸O ($N_{\text{C}^{18}\text{O}}^{\text{O}}$) 的柱密度比值, 如图 5 (f) 所示:

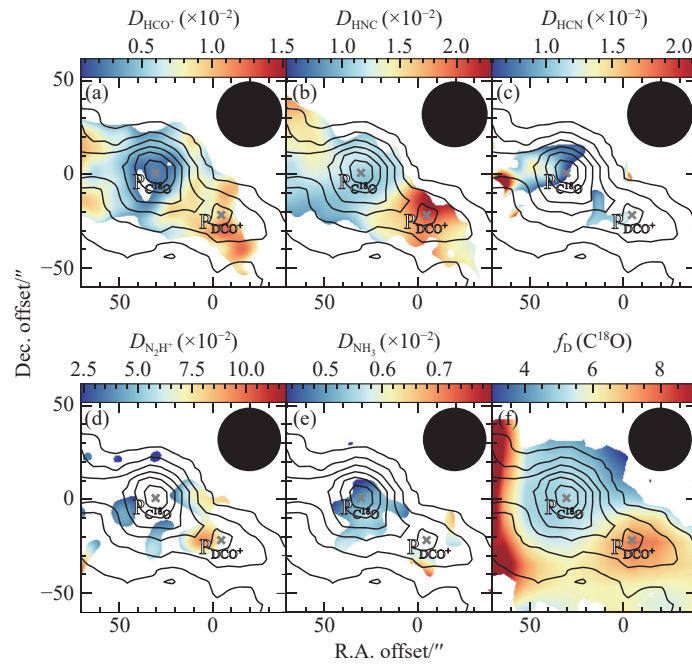


图 5 5 组分子氘化率以及气态 C¹⁸O 耗损图。子图 (a)–(e) 中氢化或氘化分子谱线积分强度 $< 3\sigma$ (各分子线噪声水平 σ 由表 1 给出) 的像素格点被遮蔽; 子图 (d) 中仅展示了 870 μm 连续谱辐射 $> 3\sigma$ 的区域。各子图中黑色等高线为 APEX 在 870 μm 处观测到的连续辐射^[28], 等高线水平从 5σ ($\sigma = 5.6 \text{ MJy} \cdot \text{sr}^{-1}$) 开始, 增加的步长为 5σ , 角分辨率为 $18''.2$, 870 μm 峰值处以灰色 ‘x’ 标记, 同时 $\text{P}_{\text{C}^{18}\text{O}}$ 和 P_{DCO^+} 作为标记放置于此。各参数角分辨均为 $36''.4$, 由黑色圆圈在右上角表示。

Fig. 5 The relative abundance ratio maps between the deuterated and hydrogenated species and the C¹⁸O depletion map. In subfigures (a) to (e), pixels with integrated intensities $< 3\sigma$ (see Table 1 for sigma rms for each line) are masked out. In subfigure (d) only the region with 870 μm continuum emission $> 3\sigma$ is shown. Black contours in each subfigure represent the continuum emission observed by APEX at 870 μm ^[28], starting from 5σ ($\sigma = 5.6 \text{ MJy} \cdot \text{sr}^{-1}$) and increasing in steps of 5σ , with an angular resolution of $18''.2$. 870 μm continuum peaks are marked with a gray ‘x’, while $\text{P}_{\text{C}^{18}\text{O}}$ and P_{DCO^+} are placed as markers here. The angular resolution for each parameter is $36''.4$, indicated by the black circle in the top right corner of each subfigure.

$$f_D(C^{18}O) = \frac{N_{C^{18}O}^E}{N_{C^{18}O}^O}. \quad (9)$$

比较HCO⁺的氘化率与气态C¹⁸O的耗损率(图5 (a)与(f)), 以及表4中分子云尾70 μm明亮与暗弱云团对的物理性质、气态C¹⁸O耗损及不同分子氘化率(表4中P_{DCO⁺}与P_{C¹⁸O}为以P_{DCO⁺}和P_{C¹⁸O}

为中心, 一个波束大小(36".4)区域(云团)的物理性质、气态C¹⁸O耗损率及不同分子氘化率的平均值). 我们可以得到: HCO⁺的氘化率在DCO⁺主导云团(D_{HCO^+} 约0.7%)是C¹⁸O主导云团(约0.3%)的2.3倍, 气态C¹⁸O的耗损率在DCO⁺主导云团($f_D(C^{18}O)$ 约6.8)比C¹⁸O主导云团(约5.1)高33%.

表 4 G 011.0970–0.1093分子云尾70 μm明亮与暗弱云团对的物理性质、气态C¹⁸O耗损及不同分子氘化率
Table 4 Physical properties, C¹⁸O depletion, and differential deuterium fraction of various molecules towards the 70 μm bright and dark clumps pair in G 011.0970–0.1093

Region	Properties			
	$N_{H_2}^a / (10^{22} \text{ cm}^{-2})$	$T_{\text{dust}}^a / \text{K}$	$T_{\text{kin}}(p - \text{NH}_3)^b / \text{K}$	$f_D(C^{18}O)^c$
P _{DCO⁺}	4.3±0.4	12.7±0.7	12.5±0.5	6.8±0.5
P _{C¹⁸O}	3.5±0.3	16.7±0.7	14.6±0.7	5.1±0.2

Region	Properties				
	$D_{HCO^+}^d$	D_{HNC}^d	D_{HCN}^d	$D_{N_2H^+}$	D_{NH_3}
P _{DCO⁺}	0.7%±0.1%	1.4%±0.1%	<0.6% ^e	<4.6% ^e	<0.5% ^e
P _{C¹⁸O}	0.3%±0.0%	1.1%±0.1%	0.7%±0.1%	<2.5% ^e	0.5%±0.1%

^a T_{dust} and N_{H_2} are derived from SED fitting with a resolution of 36".4.

^b $T_{\text{kin}}(p - \text{NH}_3)$ is derived from rotation diagram fit to NH₃(1, 1) and (2, 2) lines with an angular resolution of 34".7.

^c C¹⁸O depletion is given by assuming the expected abundance with respect to H₂ as $N_{C^{18}O}^E$ (see in Section 3.4) and assuming a gas-to-dust mass ratio γ , $\lg(\gamma) = 0.087R_{GC} \text{ (kpc)} + 1.44^{[57]}$.

^d Deuterium fraction is given from the target lines list in Table 1, by assuming that they are optically thin, have the same beam filling toward each pixel, and have a constant fraction of $R_{12C/13C} \approx 6.1R_{GC} \text{ (kpc)} + 14.3^{[54]}$.

^e Lower limit is given when the deuterated molecular lines show $< 3\sigma$ emission.

在我们观测的灵敏度下, 另外四种分子的氘化率虽然有效成图区域(S/N > 3的像素格点)较DCO⁺少, 但综合全图的统计结果仍具有意义: N₂D⁺ (1–0)成图的有效格点虽然仅占全图像素格点约16%, 但仍能看出 D_{HCO^+} 与 $D_{N_2H^+}$ (图5 (a)与(d))在空间分布上的相似性. 即N₂H⁺在显示相对冷(约13 K)而致密(约 $4 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$)的DCO⁺主导云团中较C¹⁸O主导云团的氘化率(< 2.5%)高84%. 特别是无论是DCO⁺主导云团还是C¹⁸O主导云团, N₂H⁺的氘化率比其它分子(除HCN以外的)的氘化率高出约一个数量级(见图5 (a)–(e)),

这与Caselli等^[9]的观测结果以及Albertsson等^[59]的模拟结果一致.

HCN与HNC这对同分异构体的氘化增丰表现截然不同(见图5 (b)–(c)和表4). D_{HNC} 在DCO⁺主导云团的增强尤为明显, HNC氘化率在DCO⁺主导云团为1.4%, 比C¹⁸O主导云团高27%. 然而, D_{HCN} 却显示出截然相反的增强趋势, HCN氘化率 D_{HCN} 在C¹⁸O主导云团(约0.7%)比DCO⁺主导云团高(> 17%). 就分子谱线积分强度而言, H¹³CN(1–0)和HN¹³C(1–0)的积分强度比在P_{C¹⁸O}处云团和P_{DCO⁺}处云团分别为约1.5和约1.2 K · km · s^{–1},

而DCN (1–0)和DNC (1–0)的积分强度比在 $P_{C^{18}O}$ 处云团和 P_{DCO^+} 处云团分别为约0.6和 $< 0.5 \text{ K} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$. 尽管过去的观测已经注意到了HCN和HNC基态跃迁之间的强度差异, 并将这种差异归因于它们的形成活化能的不同^[54, 60–62], 但这对同分异构体在观测上截然相反的氘化趋势仅在Feng等^[6]对G 28.34+0.06进行的初步成像和一些最近的点源观测中被注意到^[63], 包括G 011.0970–0.1093在内的所有MIAO样本“对照成图”观测表明这两者的氘化差异趋势具有普适性.

NH_3 在全图平均的氘化率 D_{NH_3} 约0.5%, 这与先前研究一致^[55, 64]. 当然, $NH_2D(1_{1,1}0_s - 1_{0,1}0_a)$ 因在观测中受到驻波的影响(见图2), 其氘化率的计算结果上显示出较大的不确定性(约20%). 即使考虑了不确定度, 在图5 (e)中依然可以看出 D_{NH_3} 在全图起伏不明显(除边缘噪声导致突变外), 这与Feng等^[6]在试点研究源G 28.34+0.06的观测中得出的结论吻合, 即 NH_3 的氘化对于14–22 K的温度变化不敏感.

上述5组分子氘化率差异性, 可能与其气体尘埃反应途径有关. 比如, HCO^+ 与 N_2H^+ 主要产生于气态, 而 NH_3 一般在气态和尘埃表面皆可产生.

4 相关性讨论

虽然3.3和3.4节中计算的气体、尘埃温度和氢分子柱密度以及各分子柱密度的数值因 R_{gd} 、 κ_ν 等物理量的取值的不确定性有相对误差, 但对如图4和图5所示的温度、氢分子柱密度梯度以及各分子氘化率图而言, 由同样物理取值导致的梯度都不是由误差造成的, 而是其内禀属性. 因这些梯度出现的外部环境条件可视为一致(同一分子云的近邻云团), 故这些物理量在各子图上随空间分布的差异性直接与中心恒星形成的物理化学过程有关.

为了将 T_{dust} 、 N_{H_2} 、 $N_{C^{18}O}$ 、 $N_{H^{13}CO^+}$ 与 N_{DCO^+} 5个参数空间分布可能存在的相关性量化, 我们从统一角分辨率($36''.4$)下的各参数图中提取信噪比 $S/N > 3$ 的像素格点的数值, 生成了4组双变量高斯核密度图(见图6). 图6中的密度轮廓根据参数

提取的位置着色, $C^{18}O$ 和 DCO^+ 主导区分别以红色和蓝色绘制, 相应的斯皮尔曼(Spearman)相关系数(ρ)也以相应的颜色文字表示^[65]. 此外, 对于整个区域我们也以黑色给出其斯皮尔曼相关系数(ρ). 为了量化两两参数间可能的相关性, 我们沿用Feng等^[24]的分类方法, 即 $\rho \geq |0.5|$ 表示强相关或强反相关; $|0.5| > \rho \geq |0.3|$ 表示中等相关或中等反相关; $|0.3| > \rho \geq |0.1|$ 表示弱相关或弱反相关; $\rho \leq |0.1|$ 表示无相关性. 从图6中, 我们总结出下列有意思的规律:

1. 在子图(a)的 DCO^+ 主导云团中, T_{dust} 与 N_{H_2} 呈现强烈的空间反相关关系($\rho = -0.75$), 说明在相对更致密区域中, 温度相对更低, 对该区域气体与尘埃的加热, 外部贡献很可能比内部大. 而 $C^{18}O$ 主导云团 T_{dust} 与 N_{H_2} 呈现较弱的空间正相关关系($\rho = 0.19$), 在 $C^{18}O$ 主导云团中存在云团边缘包层到云团中心 T_{dust} 呈递增趋势, 说明云团内部可能已经存在加热来源, 甚至可能来自原恒星核辐射加热.

2. 细化到子图(b)具体区域, 气态 $C^{18}O$ 与 DCO^+ 的相对丰度比在相对温暖的 $C^{18}O$ 主导云团(T_{dust} 约16–18 K)较相对较冷的 DCO^+ 主导云团(T_{dust} 约11–16 K)高出约4倍.

3. 根据子图(c), 对于 $\chi(C^{18}O)$ 和 $\chi(H^{13}CO^+)$ 这两个参数, 无论在 $C^{18}O$ 主导云团($\rho = 0.64$), 还是 DCO^+ 主导云团($\rho = 0.92$)都表现出较强的正相关性. 理论上, $H^{13}CO^+(1-0)$ 线具有更高的临界密度($T = 10-20 \text{ K}$ 时, $n_{crit} = 9.3 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$); 在相对更致密的区域, 如 DCO^+ 主导云团中, 这对参数确实存在更为显著的正相关性($\rho = 0.92$). 这种更强的正相关性($\rho > 0.70$)现象不仅在本源中存在, 也在MIAO样本如G 28.34+0.06、G 15.22–0.43和G 14.49–0.13源中存在^[6–24].

4. 在子图(d)中, HCO^+ 的氘化率 D_{HCO^+} 和气态 $C^{18}O$ 耗损率 $f_D(C^{18}O)$ 在整个观测区域中表现出强正相关($\rho = 0.78$), 在 DCO^+ 主导云团中表现出更强的正相关($\rho = 0.83$).

这些正负相关性可以被理解成分子化学反应网络综合效率所致: HCO^+ 的形成涉及CO的化学

反应(例如, $\text{H}_3^+ + \text{CO} \rightarrow \text{H}_2 + \text{HCO}^+$), DCO^+ 可以通过CO氙化(例如, $\text{H}_2\text{D}^+ + \text{CO} \rightarrow \text{H}_2 + \text{DCO}^+$,

$\text{D}_2\text{H}^+ + \text{CO} \rightarrow \text{HCO}^+ + \text{D}_2$)以及 HCO^+ 的氙化(例如, $\text{HCO}^+ + \text{D} \rightarrow \text{DCO}^+ + \text{H}$)等多种途径形成^[66–69].

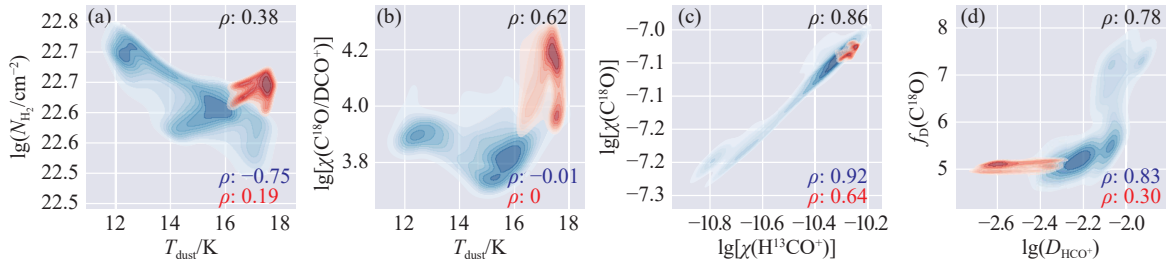


图 6 各变量间二元高斯核密度图. 各子图数据是将各参数平滑到相同的角分辨率($36''.4$)后, 从像素格点中提取的值, 并使用二元高斯核密度估计作为轮廓线绘制. C^{18}O 和 DCO^+ 主导区分别用红色和蓝色表示, 相应的斯皮尔曼(Spearman)相关系数(ρ)也以相应的颜色文字表示. 整个区域的斯皮尔曼相关系数 ρ 用黑色表示. 在 $870\ \mu\text{m}$ 连续谱处辐射 $< 5\sigma$ ($\sigma = 5.6\ \text{MJy} \cdot \text{sr}^{-1}$)或 $\text{DCO}^+(1-0)$ 积分强度 $< 3\sigma$ ($\sigma = 0.11\ \text{K} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)的像素格点被遮蔽.

Fig. 6 Bivariate Gaussian kernel density plots depict the relationships between various variables. Data in each subplot are smoothed to a consistent angular resolution ($36''.4$) and extracted from pixel grids, with contours drawn using bivariate Gaussian kernel density estimation. Regions dominated by C^{18}O and DCO^+ are respectively highlighted in red and blue, while Spearman correlation coefficients ρ are indicated in corresponding colors. The overall Spearman correlation coefficient ρ is represented in black. Pixel data where the $870\ \mu\text{m}$ continuum radiation is $< 5\sigma$ ($\sigma = 5.6\ \text{MJy} \cdot \text{sr}^{-1}$), or where the integrated intensity of $\text{DCO}^+(1-0)$ is $< 3\sigma$ ($\sigma = 0.11\ \text{K} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$), are masked.

5 结论

为了定量描绘极早期大质量恒星形成区的物理化学环境, 我们展开了MIAO巡天项目. 本文以该巡天项目中G 011.0970–0.1093纤维状分子云末端的一对同处于 $870\ \mu\text{m}$ 连续谱流量峰值但在 $70\ \mu\text{m}$ 连续谱分别为明亮和暗弱的比邻云团为例, 在角分辨率为 $36''.4$ (相应的空间尺度分辨率约 $0.5\ \text{pc}$)的情况下, 重点对 HCO^+ 、 N_2H^+ 、 HNC 、 HCN 、 NH_3 5组分子的氙化与 pc 尺度上气态CO耗损进行分析, 并发现该目标源与MIAO巡天项目的试点研究源G 28.34+0.06在以下物理化学特性上具有一致性, 表明在相对低温环境中不同分子的氙化增丰并非都比相对高温环境高以及气态CO耗损与 DCO^+ 增丰在空间分布上呈强正相关(pc 尺度)可能具有普遍性:

1. 在减去前景和背景后, 多波段尘埃连续光谱数据的SED拟合表明, $70\ \mu\text{m}$ 明亮区域的温度及密度从云团中心(T_{dust} 约 $17\ \text{K}$, N_{H_2} 约 $3.5 \times 10^{22}\ \text{cm}^{-2}$)到包层边缘递减, 预示云团内部可能已经形成原恒星. 而 $70\ \mu\text{m}$ 暗弱区域云团中心(T_{dust} 约

$11\ \text{K}$, N_{H_2} 约 $5.0 \times 10^{22}\ \text{cm}^{-2}$)相较包层边缘更冷且更致密, 氢分子柱密度和尘埃温度之间存在强反相关关系, 表明主导该团块的加热来源可能来自外部星际辐射.

2. 通过拟合 $\text{NH}_3(J, K) = (1, 1)$ 和 $(2, 2)$ 线得到的气体动力学温度图与尘埃温度图的每像素的差异 $< 20\%$, 表明尘埃和气体之间可以合理假设为热耦合关系.

3. DCO^+ 与 C^{18}O 在空间分布上呈现明显的偏差. 在光学薄、波束填充因子为1、局部热动平衡(LTE)以及同位素比与同位素分子丰度比一致等条件下, 通过 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 、 $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$ 等银河系内元素丰度统计关系换算得到的分子柱密度与相对丰度图表明: 在相对低温的 DCO^+ 主导云团, C^{18}O 耗损程度高达7, 比相对高温 C^{18}O 主导云团高约33%, 且 C^{18}O 耗损率 $f_{\text{D}}(\text{C}^{18}\text{O})$ 与 HCO^+ 氙化率 D_{HCO^+} 在空间上也存在强正相关关系($\rho = 0.78$).

4. 5组分子的氙化率差异明显. N_2H^+ 、 HN^{13}C 、 H^{13}CO^+ 和 H^{13}CN 的基态跃迁($J = 1-0$)以及 $\text{NH}_3(1_10a - 1_10s)$ 显示出与 $870\ \mu\text{m}$ 连续谱在空间上的一致性, 表明这些分子作为致密探针的有效

性. $N_2D^+(1-0)$ 、 $DCO^+(1-0)$ 和 $DNC(1-0)$ 的积分强度分布与 $70\ \mu m$ 暗弱区域一致, 在此处云团的氘化率 ($D_{N_2H^+} < 4.6\%$, D_{HCO^+} 约 0.7 和 D_{HNC} 约 1.4) 相较于 $70\ \mu m$ 明亮区域云团的氘化率高出 30%–150%, 表明这些分子更容易在低温环境下氘化增丰. $DCN(1-0)$ 和 $NH_2D(1_{1,1}0s-1_{0,1}0a)$ 的积分强度与 $70\ \mu m$ 明亮区域高度重合. HCN 在 $70\ \mu m$ 明亮区域云团氘化率 (D_{HCN} 约 0.7%) 较 $70\ \mu m$ 暗弱区域云团高 $>17\%$, 表明 HCN 分子可能更容易在温热环境 (约 17 K) 增丰, 而 NH_3 分子在 14–20 K 氘化增丰不明显 (D_{NH_3} 约 0.5%). 这些分子的氘化差异性可能与其气体尘埃反应途径有关.

致谢 感谢审稿人对文章提出的宝贵建议, 使得文章的质量有了显著的提高. 感谢 IRAM 30 m 的工作人员在执行 IRAM 30 m 观测服务模式期间提供的宝贵帮助. 感谢 RAMPS 巡天项目工作人员提供的 NH_3 数据.

参考文献

- [1] Carey S J, Clark F O, Egan M P, et al. *ApJ*, 1998, 508: 721
- [2] Carey S J, Feldman P A, Redman R O, et al. *ApJL*, 2000, 543: 157
- [3] Rigby A J, Peretto N, Anderson M, et al. *MNRAS*, 2024, 528: 1172
- [4] Tan J C, Beltrán M T, Caselli P, et al. *Massive Star Formation* // Beuther H, Klessen R S, Dullemond C P, et al. *Protostars and Planets VI*. Tucson: University of Arizona Press, 2014: 149–172
- [5] McKee C F, Tan J C. *ApJ*, 2003, 585: 850
- [6] Feng S, Caselli P, Wang K, et al. *ApJ*, 2019, 883: 202
- [7] Millar T J, Bennett A, Herbst E. *ApJ*, 1989, 340: 906
- [8] Ceccarelli C, Caselli P, Bockelée-Morvan D, et al. *Protostars and Planets*. Tucson: University of Arizona Press, 2014, VI: 859
- [9] Caselli P, Walmsley C M, Zucconi A, et al. *ApJ*, 2002, 565: 344
- [10] Crapsi A, Caselli P, Walmsley C M, et al. *ApJ*, 2005, 619: 379
- [11] Vastel C, Phillips T G, Caselli P, et al. *RSPTA*, 2006, 364: 3081
- [12] Menten K M, Lundgren A, Belloche A, et al. *A&A*, 2008, 477: 185
- [13] Willacy K, Langer W D, Velusamy T. *ApJL*, 1998, 507: 171
- [14] Caselli P, Walmsley C M, Tafalla M, et al. *ApJL*, 1999, 523: 165
- [15] Kramer C, Alves J, Lada C J, et al. *A&A*, 1999, 342: 257
- [16] Bergin E A, Alves J, Huard T, et al. *ApJL*, 2002, 570: 101
- [17] Bacmann A, Lefloch B, Ceccarelli C, et al. *ApJL*, 2003, 585: 55
- [18] Fontani F, Giannetti A, Beltrán M T, et al. *MNRAS*, 2012, 423: 2342
- [19] Tafalla M, Myers P C, Caselli P, et al. *ApJ*, 2002, 569: 815
- [20] Pineda J L, Goldsmith P F, Chapman N, et al. *ApJ*, 2010, 721: 686
- [21] Hernandez A K, Tan J C, Caselli P, et al. *ApJ*, 2011, 738: 11
- [22] Barnes A T, Kong S, Tan J C, et al. *MNRAS*, 2016, 458: 1990
- [23] Caselli P, Walmsley C M, Zucconi A, et al. *ApJ*, 2002, 565: 331
- [24] Feng S, Li D, Caselli P, et al. *ApJ*, 2020, 901: 145
- [25] Kauffmann J, Pillai T. *ApJL*, 2010, 723: 7
- [26] Urquhart J S, Moore T J T, Csengeri T, et al. *MNRAS*, 2014, 443: 1555
- [27] He Y, Zhou J, Esimbek J, et al. *MNRAS*, 2015, 450: 1926
- [28] Schuller F, Menten K M, Contreras Y, et al. *A&A*, 2009, 504: 415
- [29] Molinari S, Swinyard B, Bally J, et al. *A&A*, 2010, 518: L100
- [30] Hogge T, Jackson J, Stephens I, et al. *ApJS*, 2018, 237: 27
- [31] Feng S, Beuther H, Zhang Q, et al. *ApJ*, 2016, 828: 100
- [32] Beuther H, Sridharan T K. *ApJ*, 2007, 668: 348
- [33] Bergin E A, Tafalla M. *ARA&A*, 2007, 45: 339
- [34] Csengeri T, Bontemps S, Schneider N, et al. *A&A*, 2011, 527: A135
- [35] Shirley Y L. *PASP*, 2015, 127: 299
- [36] Müller K E, Shirley Y L, Evans N J, et al. *ApJS*, 2002, 143: 469
- [37] Müller, Holger S P, Schlöder F, et al. *JMoSt*, 2005, 742: 215
- [38] Pickett H M, Poynter R L, Cohen E A, et al. *JQSRT*, 1998, 60: 883

- [39] Schöier F L, van der Tak F F S, van Dishoeck E F, et al. *A&A*, 2005, 432: 369
- [40] Ginsburg A, Sokolov V, De Val-Borro M, et al. *AJ*, 2022, 163: 291
- [41] Robitaille T P, Tollerud E J, Greenfield P, et al. *A&A*, 2013, 558: A33
- [42] Yuan J, Wu Y, Ellingsen S P, et al. *ApJS*, 2017, 231: 11
- [43] Draine B T. *ARA&A*, 2003, 41: 241
- [44] Kauffmann J, Bertoldi F, Bourke T L, et al. *A&A*, 2008, 487: 993
- [45] Ossenkopf V, Henning T. *A&A*, 1994, 291: 943
- [46] Lin Y, Liu H B, Li D, et al. *ApJ*, 2016, 828: 32
- [47] Lin Y, Liu H B, Dale J E. *ApJ*, 2017, 840: 22
- [48] Ho P T P, Townes C H. *ARA&A*, 1983, 21: 239
- [49] Walmsley C M, Ungerechts H. *A&A*, 1983, 122: 164
- [50] Crapsi A, Caselli P, Walmsley M C, et al. *A&A*, 2007, 470: 221
- [51] Rosolowsky E W, Pineda J E, Foster J B, et al. *ApJS*, 2008, 175: 509
- [52] Juvela M, Ysard N. *ApJ*, 2011, 739: 63
- [53] Estalella R. *PASP*, 2017, 129: 025003
- [54] Giannetti A, Wyrowski F, Brand J, et al. *A&A*, 2014, 570: A6
- [55] Fontani F, Busquet G, Palau A, et al. *A&A*, 2015, 575: A87
- [56] Harju J, Daniel F, Sipilä O, et al. *A&A*, 2017, 600: A61
- [57] Draine B T. *Physics of the Interstellar and Intergalactic Medium*. Princeton: Princeton University Press, 2011: 326
- [58] Giannetti A, Leurini S, König C, et al. *A&A*, 2017, 606: L12
- [59] Albertsson T, Semenov D A, Vasyunin A I, et al. *ApJS*, 2013, 207: 27
- [60] Loison J, Wakelam V, Hickson K M. *MNRAS*, 2014, 443: 398
- [61] Hacar A, Bosman A D, van Dishoeck E F. *A&A*, 2020, 635: A4
- [62] Long F, Bosman A D, Cazzoletti P, et al. *A&A*, 2021, 647: A118
- [63] Yang K, Wang J, Qiu K, et al. *ApJS*, 2024, 270: 35
- [64] Pillai T, Kauffmann J, Wyrowski F, et al. *A&A*, 2011, 530: A118
- [65] Cohen J. *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*. New York: Routledge, 1988: 246
- [66] Caselli P, Vastel C, Ceccarelli C, et al. *A&A*, 2008, 492: 703
- [67] Watson W D. *RvMP*, 1976, 48: 513
- [68] Gerlich D, Schlemmer S. *P&SS*, 2002, 50: 1287
- [69] Aikawa Y, Furuya K, Hincelin U, et al. *ApJ*, 2018, 855: 119

The Differentiation in Molecular Deuteration and CO Depletion towards the Infrared Dark Cloud G 011.0970–0.1093

SHI Kun-peng FENG Si-yi LIN Shu-ting GAO Le-han

(Department of Astronomy, College of Physical Science and Technology, Xiamen University, Xiamen 361005)

ABSTRACT Using the IRAM (Institut de Radioastronomie Millimétrique) 30 m for a molecular line imaging survey at 1.3–4.0 mm, in conjunction with archival dust continuum images spanning 70–870 μm , and $\text{NH}_3(J, K) = (1, 1)$ and $(2, 2)$ images from GBT (Green Bank Telescope), a pair of neighboring clumps within the tail of filamentary molecular cloud G 011.0970–0.1093 is studied. While both clumps coincide spatially with the dust continuum emission peak at 870 μm , they exhibit contrasting brightnesses at 70 μm . Comparative analysis of these two clumps reveals: (1) The gas and dust temperatures are tightly coupled within this extremely young high-mass star-forming region. (2) Gas-dust temperatures of the 70 μm bright clump decrease from the center (~ 17 K) to the envelope edge, suggesting the initiation of protostellar activities within the clump; conversely, the central region of the 70 μm dark cloud clump is colder (~ 11 K) and denser ($\sim 5 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$) compared to its periphery, with a strong anti-correlation between the H_2 column density and dust

temperature pixel by pixel, indicating dominant external heating shaping the temperature profile of this clump. (3) A strong positive correlation exists between the gaseous C^{18}O depletion ($f_{\text{D}}(\text{C}^{18}\text{O})$) and the deuterium fraction of HCO^+ at pc scales, with $f_{\text{D}}(\text{C}^{18}\text{O})$ reaching up to 7 in the cold and dense DCO^+ dominated region. (4) With gas-dust temperatures ranging from 10 K to 20 K and H_2 column densities ranging from 10^{22} cm^{-2} to 10^{23} cm^{-2} , HCO^+ , N_2H^+ , and HNC exhibit significant deuteration enhancements towards the colder and denser clump, while HCN shows greater deuteration enhancement in slightly warmer and $70 \mu\text{m}$ brighter clumps, and NH_3 deuteration shows no significant change. These deuteration differentiation among species are likely related to their gas-dust forming pathways.

Key words stars: formation, ISM: clouds, ISM: lines and bands, ISM: molecules, submillimeter: ISM