

早期阶段大质量团块中的HCN、HNC、 HCO^+ 和CN化学性质研究*

李宏杰^{1,2} 何玉新^{2,3,4†} 周建军^{2,3,4} 加尔肯·叶生别克^{2,3,4}
周冬冬^{2,3,4}

(1 新疆大学物理科学与技术学院 乌鲁木齐 830046)

(2 中国科学院新疆天文台 乌鲁木齐 830011)

(3 中国科学院射电天文重点实验室 南京 210023)

(4 新疆射电天体物理重点实验室 乌鲁木齐 830011)

摘要 选择67个相对孤立的大质量恒星形成团块,使用4种分子谱线(HCN (1-0)、HNC (1-0)、 HCO^+ (1-0)和CN (1-0),括号中的1-0代表分子从转动能级1跃迁到转动能级0)和红外波段数据,研究它们的整体化学性质.通过对源的积分强度、柱密度、分子丰度和丰度比在不同演化阶段的统计,发现大质量恒星形成团块CN (1-0)、 HCO^+ (1-0)、HCN (1-0)和HNC (1-0)的积分强度和柱密度中值随着演化阶段的增加都呈现增加趋势,这与理论预期相符.然而单一分子进行的柱密度和丰度统计结果存在较大的误差,用以示踪的演化阶段有很大的局限性. $I(\text{CN})/I(\text{HNC})$ 、 $I(\text{CN})/I(\text{HCN})$ 和 $I(\text{HNC})/I(\text{HCO}^+)$ 的积分强度比随演化阶段递增(I 代表分子的积分强度),是潜在的用来示踪大质量恒星形成团块演化的探针; $N(\text{CN})/N(\text{H}_2)$ 、 $N(\text{HNC})/N(\text{H}_2)$ 和 $N(\text{HCN})/N(\text{HCO}^+)$ 的中值随演化阶段单调递增(N 代表分子的柱密度),有望作为示踪大质量恒星演化的化学探针.需要注意的是由于研究工作观测数据的限制,不能获得各分子的光学厚度,受光学厚度影响得不到可靠的柱密度,从而得不到可靠的丰度,最终影响对丰度比化学时钟的检验.

关键词 星际介质: 分子, 星际介质: 丰度, 恒星: 形成, 星际介质: 谱线与谱带

中图分类号: P154; **文献标识码**: A

1 背景介绍

研究早期恒星形成团块/核的物理化学性质是获得大质量恒星形成初始条件的重要途径,对理解大质量恒星形成机制至关重要.在恒星形成过程中,物理化学性质的变化紧密联系.随着团块/核中

物质的塌缩,其温度和密度升高,化学性质也同时发生变化,表现为促进或抑制不同分子的形成,这一过程将直接反映在团块/核中分子丰度的变化上.因此,研究指出一些分子(如: $N(\text{HNC})/N(\text{HNC})$ 、 $N(\text{N}_2\text{H}^+)/N(\text{HNC})$ 、 $N(\text{N}_2\text{H}^+)/N(\text{HCO}^+)$ 等,其

2023-04-26收到原稿, 2023-06-05收到修改稿

*中国科学院西部之光-西部青年学者项目(2020-XBQNXZ-017、2021-XBQNXZ-028)、新疆维吾尔自治区重点实验室开放课题(2023D04033)、新疆维吾尔自治区区域协同创新专项(上海合作组织科技伙伴计划及国际科技合作计划,项目编号: 2022E01050)、新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2022D01A359)资助

[†]heyuxin@xao.ac.cn

中 N 代表分子的柱密度)的丰度比变化可被用以示踪大质量恒星形成团块/核演化阶段的化学时钟(如研究工作[1–3]),即通过研究团块/核中分子化学成分的变化追踪其物理变化过程.

近些年,针对早期演化阶段大质量恒星形成团块的化学性质已经开展了一些统计性的研究工作. Sanhueza等^[2]对红外暗云中的致密团块开展多种致密分子的化学性质研究.类似的工作还包含文献[1]和[3].这些研究工作中团块的演化阶段都是依据中红外辐射特征划分为:最早期无中红外辐射特征的星前阶段(Prestellar);包含 $24\ \mu\text{m}$ 辐射或者与外流活动相关的 $4.5\ \mu\text{m}$ 辐射特征的原恒星阶段(Protostellar);更晚期表现出多波段中红外辐射特征的电离氢区阶段(H II/PDR).上述研究工作所采用的分子都包含 N_2H^+ 、 HCO^+ 、HCN和HNC 4种常见的致密气体探针.在化学性质方面, N_2H^+ 和 HCO^+ 的丰度容易受CO的影响,CO是 HCO^+ 的母体分子,生成 HCO^+ 的过程中同时会破坏气相的 N_2H^+ .而CO容易被冻结到低温的尘埃表面上,随着恒星形成团块/核的演化,温度逐渐升高,CO也会从尘埃表面上释放出来,CO丰度增加,促进上述反应.在小质量恒星形成中,研究发现演化阶段从星前到原恒星, N_2H^+ 的丰度减小, HCO^+ 的丰度增加^[4–7].而在大质量恒星形成团块中,两种分子的丰度都随着演化阶段逐渐增加^[1].对于HCN和HNC,观测研究表明它们的丰度比和积分强度比都随演化阶段增加.然而上述这些分子随演化阶段的变化趋势均不显著,在参数的统计分布上存在明显的重叠.这种现象可能是由于上述研究工作中在对团块进行演化阶段划分的时候只使用了容易受消光影响的中红外波段数据,没有考虑结合受消光影响更小的远红外波段数据(如Herschel $70\ \mu\text{m}$),容易把中红外辐射特征较弱的原恒星阶段团块误划分到星前阶段,将会较大地影响星前和原恒星阶段团块参数的准确分析.

至今开展大质量星前阶段团块的化学性质研究数量还较少,所得结论的普遍性和可靠性还有不

足,因此我们申请使用紫金山天文台青海观测站德令哈 $13.7\ \text{m}$ 毫米波望远镜对30个大质量星前阶段团块(从文献[8–11]中选取)进行CN (1-0)、 HCO^+ (1-0)、HCN (1-0)、HNC (1-0)谱线观测(括号中的1-0代表分子从转动能级1跃迁到转动能级0).本研究工作中我们加入了CN分子,此分子的主要形成途径是由N与H的碰撞形成^[12],而且其丰度在受到紫外(Ultraviolet, UV)辐射时会显著增加.为进一步进行化学演化方面的对比分析和研究,我们从文献[13]中选择了37个分子谱线信噪比大于3的大质量恒星形成团块(见表1和表2,表1列出文中每类源各分子的积分强度、积分强度比、柱密度、丰度和丰度比的统计结果,表2列出文中所研究源的信息),共计67个目标源作为此工作的研究样本.文章的第2部分介绍数据和数据处理;第3部分介绍研究样本的检查和分类;第4部分计算和统计CN、 HCO^+ 、HCN、HNC 4种分子的积分强度、积分强度比、柱密度、柱密度之比、丰度和丰度比;第5部分对研究结果进行讨论和总结.

2 数据及数据处理

2.1 德令哈 $13.7\ \text{m}$ 望远镜观测

2016年6月我们使用紫金山天文台青海观测站德令哈 $13.7\ \text{m}$ 毫米波望远镜完成对30个大质量无星核CN (1-0) ($113.490982\ \text{GHz}$)、 HCO^+ (1-0) ($89.188526\ \text{GHz}$)、HCN (1-0) ($88.6318473\ \text{GHz}$)和HNC (1-0) ($90.663572\ \text{GHz}$) 4条谱线的成图观测.观测使用的是该望远镜9波束超导成像频谱仪,工作模式为双边带分离模式,带宽设置为 $1\ \text{GHz}$,通道数为16384,相应的频率分辨率约为 $61\ \text{kHz}$ ($\sim 0.16\ \text{km/s}$).望远镜的半功率波束宽度(Half-Power Beam Width) $50''$,采用on-the-fly (OTF)成图观测模式,每个目标源的观测区域约为 $10' \times 10'$.文章中计算所使用的谱线均为天线的主波束天线温度 $T_{\text{MB}} = T_{\text{A}}^*/\eta_{\text{mb}}$,其中 T_{A}^* 是经过大气改正的天线温度, $\eta_{\text{mb}} \approx 57\%$ 为主波束天线效率.谱线的观测灵敏度 $\sim 100\ \text{mK}$.

表 1 每类源各分子的积分强度、积分强度比、柱密度、丰度和丰度比的统计结果

Table 1 The integrated intensity, integrated intensity ratio, column density, abundance and abundance ratio of each molecule of each type of source, and the statistical results

Property	Prestellar			Protostellar			H II/PD		
Integrated intensity/(K · km · s ⁻¹)									
<i>I</i> (CN)	2.10	1.72	1.24	5.09	3.00	4.20	10.13	7.08	7.51
<i>I</i> (HCN)	5.28	3.50	3.04	6.42	4.24	5.23	14.75	13.07	8.31
<i>I</i> (HCO ⁺)	2.77	0.40	2.86	5.11	4.29	3.84	11.05	6.58	9.83
<i>I</i> (HNC)	3.14	2.51	2.59	4.02	2.25	4.02	5.95	4.82	4.59
Integrated intensity ratio									
<i>I</i> (CN)/ <i>I</i> (HNC)	0.38	0.12	0.42	1.50	0.79	1.42	1.76	0.62	1.78
<i>I</i> (HCN)/ <i>I</i> (HNC)	1.79	0.52	1.88	1.69	0.88	1.50	2.54	0.90	2.32
<i>I</i> (HCO ⁺)/ <i>I</i> (HNC)	1.68	0.52	1.94	1.54	0.91	1.35	1.97	0.55	1.72
<i>I</i> (CN)/ <i>I</i> (HCO ⁺)				0.75	0.29	0.75	1.06	0.19	0.97
<i>I</i> (HCN)/ <i>I</i> (HCO ⁺)	1.41	0.38	1.16	1.35	0.61	1.23	1.58	0.13	1.52
<i>I</i> (CN)/ <i>I</i> (HCN)	0.29	0.10	0.29	0.56	0.23	0.49	0.64	0.22	0.56
Column density/cm ⁻²									
<i>N</i> (H ₂) (×10 ²²)	3.55	1.82	3.08	3.67	2.46	3.28	4.41	5.58	2.23
<i>N</i> (CN) (×10 ¹²)	2.62	2.09	1.60	7.04	4.55	5.57	12.00	8.42	9.09
<i>N</i> (HCN) (×10 ¹²)	14.57	10.56	8.52	16.88	11.94	14.44	48.07	45.12	25.39
<i>N</i> (HCO ⁺) (×10 ¹²)	2.54	0.37	2.67	5.02	4.66	3.35	13.07	7.90	11.41
<i>N</i> (HNC) (×10 ¹²)	5.06	4.42	3.90	6.20	3.43	6.01	11.14	9.62	8.02
Abundance									
<i>N</i> (CN)/ <i>N</i> (H ₂) (×10 ⁻¹⁰)	0.37	0.21	0.22	1.61	1.14	1.16	5.16	4.05	3.42
<i>N</i> (HCN)/ <i>N</i> (H ₂) (×10 ⁻¹⁰)	3.67	1.12	4.17	4.15	2.94	3.94	19.70	13.03	14.16
<i>N</i> (HCO ⁺)/ <i>N</i> (H ₂) (×10 ⁻¹⁰)	0.92	0.27	0.85	0.92	0.68	0.86	4.74	4.45	2.99
<i>N</i> (HNC)/ <i>N</i> (H ₂) (×10 ⁻¹⁰)	1.12	0.43	1.00	1.73	1.32	1.63	5.25	4.57	3.56
Abundance ratios									
<i>N</i> (CN)/ <i>N</i> (HNC)	0.29	0.08	0.34	1.37	0.80	1.39	1.17	0.41	1.16
<i>N</i> (HCN)/ <i>N</i> (HNC)	3.13	0.92	3.26	2.95	1.56	2.63	4.50	1.62	4.11
<i>N</i> (HCO ⁺)/ <i>N</i> (HNC)	1.06	0.33	1.23	1.00	0.62	0.83	1.26	0.37	1.09
<i>N</i> (CN)/ <i>N</i> (HCO ⁺)				1.05	0.44	0.98	1.08	0.19	1.03
<i>N</i> (HCN)/ <i>N</i> (HCO ⁺)	3.97	1.10	3.24	3.66	1.79	3.48	4.39	0.27	4.31
<i>N</i> (CN)/ <i>N</i> (HCN)	0.13	0.03	0.13	0.28	0.12	0.27	0.25	0.08	0.22

2.2 红外连续谱数据

本工作所使用的红外连续谱数据均为公开的档案数据. 中红外数据为斯皮策空间望远镜(Spitzer Space Telescope, Spitzer)的 $3.6\ \mu\text{m}$ 、 $4.5\ \mu\text{m}$ 、 $5.8\ \mu\text{m}$ 、 $8.0\ \mu\text{m}$ 巡天数据^[14]和广域红外巡天探测器(Wide-field Infrared Survey Explorer, WISE)空间望远镜的 $3.4\ \mu\text{m}$ 、 $4.6\ \mu\text{m}$ 、 $12\ \mu\text{m}$ 巡天数据^[15]. 远红外数据为Spitzer望远镜的 $24\ \mu\text{m}$ ^[16]、WISE望远镜的 $22\ \mu\text{m}$ 和Herschel空间望远镜的 $70\ \mu\text{m}$ 数据^[17].

2.3 亚毫米波尘埃连续谱辐射数据

本工作中用于示踪尘埃辐射特征的数据为ATLASGAL (APEX Telescope Large Area Survey of the Galaxy, 其中APEX为Atacama Pathfinder Experiment望远镜的缩写) $870\ \mu\text{m}$ ^[18]和BGPS (Bolocam Galactic Plane Survey) $1.1\ \text{mm}$ ^[19]巡天观测数据. ATLASGAL观测使用的望远镜是APEX $12\ \text{m}$, 观测波束 $\sim 19''$. BGPS观测使用的望远镜是Caltech Submillimeter Observatory (C-SO) $10.4\ \text{m}$, 观测波束 $\sim 33''$. 后续提取尘埃团块中各分子平均谱线所使用的位置等参数信息来自Urquhart等^[20]从ATLASGAL巡天数据证认的10163个大质量尘埃团块源表和Ginsburg等^[21]从BGPS巡天数据证认的8594个尘埃团块源表.

2.4 数据处理

对HCN (1-0)、HNC (1-0)、 HCO^+ (1-0)和CN (1-0) 4种分子谱线进行数据处理所采用的是GILDAS (Grenoble Image and Line Data Analysis Software)¹软件包和Python. 由于对同一目标源进行多次观测, 首先采用GILDAS软件包中的CLASS软件对相同观测区域进行叠加提升谱线的信噪比, 然后提取目标源所对应位置一个波束大小区域的平均谱线, 并对谱线进行两次平滑(平滑之后CN的速度分辨率是 $\sim 0.6\ \text{km/s}$, HCO^+ 、HCN和HNC速度分辨率 $\sim 0.8\ \text{km/s}$). 最终HCN、HNC、 HCO^+ 和CN 4种分子在30个样本源中信噪比大于3的探测率分别为57%、43%、63%和10%. 对探测到的CN、HNC和 HCO^+ 谱线我们采用高斯函数进行拟合. 而HCN分子存在精细结构, 且由于大质量

团块中的湍动较大, 精细结构辐射混叠为3个峰, 因此对HCN近似采用三成分高斯拟合. 拟合获得的谱线线心速度(v), 线宽(Full Width Half Maxima, FWHM), 峰值亮温度(T_{MB})列在附录表2中, 高斯拟合分子谱线的积分强度及积分强度比结果列在附录表3中.

3 样本源的分类

本工作首先对研究样本进行分类, 在Hoq等^[1]对团块分类方法的基础上, 我们同时结合Herschel $70\ \mu\text{m}$ 辐射, 最终将67个目标源划分为3个演化阶段. 命名方式延续文献^[1], 为星前阶段(Prestellar)、原恒星阶段(Protostellar)和电离氢区阶段(H II/PDR). 最终15个源被划分为星前阶段, 这类源无中红外辐射和Herschel $70\ \mu\text{m}$ 辐射. 其余的52个团块与星前阶段类型团块表现出不同的红外特征, 其中的36个源在 $24\ \mu\text{m}$ 波段和/或者 $70\ \mu\text{m}$ 波段有点源辐射, 且没有延展的 $8\ \mu\text{m}$ 辐射, 这些源被划分为原恒星阶段; 剩余的16个源周围存在明显的 $8\ \mu\text{m}$ 延展辐射和较延展的远红外辐射, 这类恒星形成团块被划分到电离氢区阶段. 本研究工作在样本源的分类中加入Herschel $70\ \mu\text{m}$ 数据, 提升了分类的准确性, 特别是对星前和原恒星阶段类型源, 将提高后续各阶段源统计结果的准确性. 如图1所示的是目标源G18.60-0.07的演化阶段划分示例, 图1中的左图为红外三色图, 蓝色是 $3.6\ \mu\text{m}$, 绿色是 $8\ \mu\text{m}$, 红色是 $24\ \mu\text{m}$. 等高线是ATLASGAL $870\ \mu\text{m}$ 连续谱辐射, 圆圈标识的是目标源的位置, 圆圈的半径为Urquhart等^[20]所证认团块的有效半径. 图中圆圈所标识的位置为红外暗源, 无3个中红外波段辐射, 因此在之前的研究工作中, 此源的演化阶段被划分到星前阶段. 但是从图1右所示的Herschel $70\ \mu\text{m}$ 连续谱图像上可以清晰看到圆圈所标识的位置存在明显的点源辐射, 预示着团块中的恒星形成活动正在进行, 因此该团块的演化阶段应被划分到原恒星阶段. 通过Spitzer 红外数据和Herschel $70\ \mu\text{m}$ 连续谱辐射相结合, 我们对67个样本源进行检查并重新进行演化阶段划分, 分类结果见附录表2.

¹<https://www.iram.fr/IRAMFR/GILDAS/>

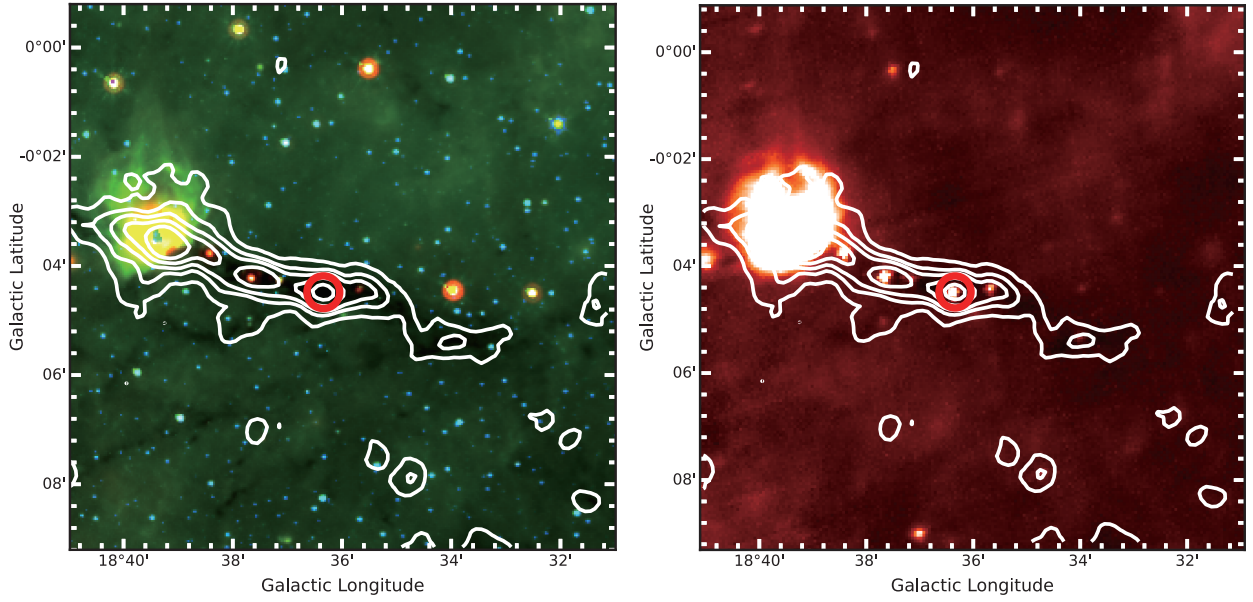


图 1 目标源G18.60-0.07的不同波段辐射图像. 左图为红外辐射三色图, 不同波段是由Spitzer空间望远镜观测, 红色是24 μm 、绿色是8 μm 、蓝色是3.6 μm , 图上叠加的等高线是870 μm 尘埃辐射, 是由APEX射电望远镜观测, 黄色圆圈大小代表源的有效半径; 右图的背景是70 μm 尘埃辐射, 是由Herschel空间望远镜观测, 图上叠加的等高线是870 μm 尘埃辐射.

Fig. 1 Different band radiation images of the target source G18.60-0.07. The left image is a three-color infrared radiation image, with different bands observed by the Spitzer Space Telescope: red is 24 μm , green is 8 μm , blue is 3.6 μm . The contour lines overlaid on the image represent 870 μm dust radiation observed by the APEX radio telescope, with the yellow circle size indicating the effective radius of the source. The background of the right image is 70 μm dust radiation observed by the Herschel Space Telescope, with contour lines overlaid representing 870 μm dust radiation.

4 结果和讨论

4.1 分子的柱密度

假设团块处于局部热动平衡状态, 并且用尘埃温度代替气体激发温度, 团块的尘埃温度从文献[22]中获取. 对于样本中的少数源没有查找到尘埃温度, 我们选用同类型源的平均温度进行计算. 本工作使用ATLASGAL 870 μm 流量密度计算氢分子柱密度(N_{H_2}) (见(1)式):

$$N_{\text{H}_2} = \frac{S_\nu R_{\text{ISM}}}{B_\nu(T_d) \Omega \kappa_\nu \mu_{\text{ISM}} m_{\text{H}}}, \quad (1)$$

其中

$$B_\nu(T_d) = (2h\nu^3/c^2)[\exp(h\nu/kT_d) - 1]^{-1}, \quad (2)$$

B_ν 是在尘埃温度 T_d 下频率为 ν 的普朗克定律; S_ν 是870 μm 的总流量密度; R_{ISM} 是气体与尘埃的质

量比, 假设为100; Ω 为立体角; κ_ν 是尘埃吸收系数, 取 $1.85 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ [23]; μ_{ISM} 是星际介质的平均分子量, 假设为2.8; m_{H} 是氢原子的质量; h 为普朗克常数; k 为玻尔兹曼常数. 样本团块平均柱密度的计算结果列于附录表4中.

由于观测数据限制, 无法获取HCN、HNC、HCO⁺和CN分子的光学厚度, 因此这里假设4种分子是光学薄的, 各分子的 N 由(3)式[2]计算获得:

$$N = \frac{3k}{8\pi^3 B \mu^2 R} \frac{T_{\text{ex}} + hB/3k}{J+1} \frac{\exp(E_J/kT_{\text{ex}})}{[1 - \exp(-h/kT_{\text{ex}})]} \frac{1}{J(T_{\text{ex}}) - J(T_{\text{bg}})} \int T_{\text{MB}} dv, \quad (3)$$

其中

$$J(T) = \frac{h\nu}{k} \frac{1}{\exp(h\nu_m/kT) - 1}, \quad (4)$$

B 为分子的转动常数, μ 为分子的永久偶极矩, HC-

N、HNC、HCO⁺和CN分子的永久偶极矩分别为1.45、3.89、2.985和3.05德拜, R 为分子精细结构的修正参数, CN、HCO⁺、HCN和HNC分子的精细结构的修正参数分别为0.33、1、0.6和1. T_{ex} 为激发温度(上文假设团块处于局部热动平衡, 因此分子的激发温度与团块的尘埃温度相同, $T_{\text{ex}} = T_d$), J 为跃迁的下能级数, E_J 为分子跃迁下能级能量, ν_m 为分子静止频率, T_{bg} 为微波背景辐射温度(2.73K), T_{MB} 为分子跃迁的主波束天线温度.

通过上述公式, 我们计算了信噪比大于3谱线分子的柱密度. 由氢分子柱密度和分子柱密度我们得出分子的丰度(谱线分子柱密度与氢分子柱密度之比)和丰度比(两种分子的柱密度之比), 计算结果列在附录表5中. 在假设4种分子都为光学薄的情况下, 计算得到的分子柱密度、丰度与实际值偏差较大, 所以下文4.3节中对单一分子进行的柱密度和丰度统计结果存在较大的误差, 用以示踪的演化阶段有很大的局限性. 因此我们在下节中着重讨论分子的积分强度比和丰度比. 同时受光学厚度影响得不到可靠的柱密度, 从而得不到可靠的丰度, 最终影响对丰度比化学时钟的检验.

4.2 积分强度和积分强度比

谱线的积分强度容易受物理因素的影响, 谱线的积分强度与电子跃迁概率、激发能、激发温度以及恒星形成区分子的密度等物理因素相关, 而且在辐射转移的过程中还受光学厚度和电离氢区等环境的影响. 积分强度是直接观测量, 相较于单一分子的柱密度和丰度等计算量有切实的意义, 由于上述计算量会带入观测误差和计算误差, 因此统计研究分子的积分强度、积分强度比与演化阶段的关系具有一定的意义.

我们对样本源中HNC (1-0)、CN (1-0)、HCN (1-0)和HCO⁺ (1-0)分子谱线进行平均(一个波束区域), 获得分子的平均谱线(如图2为源G18.60–0.07中各分子的平均谱线), 并对谱线进行高斯拟合(图2中的黑色实线), 拟合获得的参数, 如积分强度、积分强度比, 列于附录表3中. 不同演化阶段4种分子谱线积分强度和强度比等值的统计结果列于表1, 本工作统计结果均使用中值, 是由于:

(1)研究样本相较小; (2)中值可以有效避免由于样本极值对整体统计结果带来的较大偏差.

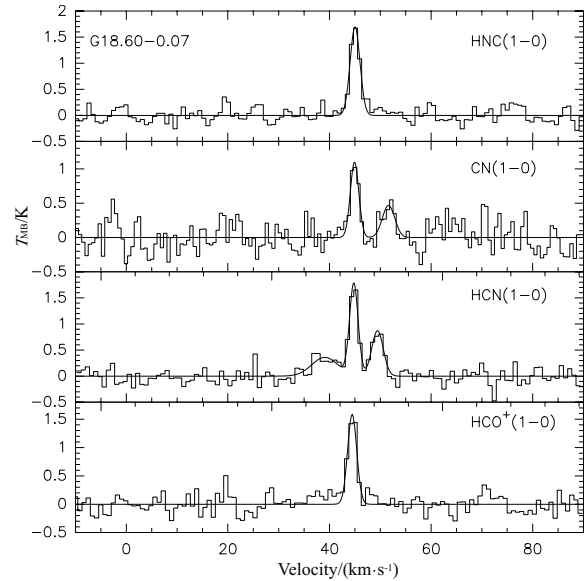


图2 源G18.60–0.07中HNC、CN、HCN和HCO⁺分子转动跃迁1-0的平均谱线, 黑色实线为对谱线进行高斯拟合结果.

Fig. 2 Average spectra of rotational transitions 1-0 of HNC, CN, HCN, and HCO⁺ molecules in source G18.60–0.07, with the black solid line representing the Gaussian fit to the spectra.

我们对 $I(\text{HCN})$ 、 $I(\text{HNC})$ 、 $I(\text{HCO}^+)$ 和 $I(\text{CN})$ 的统计结果绘制在图3中. 图示从星前到原恒星, 再到电离氢区阶段, $I(\text{CN})$ 的中值是1.24、4.20和7.51 $\text{K} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$, 表现出增加趋势, 从星前阶段到原恒星阶段中值的增幅约238%, CN分子对UV辐射敏感, 因此电离氢区阶段相较于星前阶段和原恒星阶段中值增幅显著, 分别约500%和79%. $I(\text{HCN})$ 的中值是3.04、5.23和8.31 $\text{K} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$, 随演化阶段表现出递增的趋势, 星前阶段到原恒星阶段中值的增幅约72%, 电离氢区阶段与原恒星阶段相比增幅约59%, 根据HCN和HNC分子的化学特性, 当温度升高时尘埃颗粒冰幔释放出更多的HCN和HNC分子, 两种分子的丰度都会增加, 同时部分HNC转化为HCN^[24–25], 所以HCN分子随演化阶段增加更显著(见下文). 文献[1]中得到 $I(\text{HCN})$ 的中值是1.67、2.37和2.82 $\text{K} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$, 星前阶段到原恒星阶段增幅约为30%. 可见, 相较于文献[1]中的

研究结果, 本工作中HCN的增幅更加明显, 可能是由于我们在划分团块演化阶段时加入70 μm 波段数据, 星前阶段与原恒星阶段区分更加准确的结果. 本工作所展示分子的积分强度都是经过天线效率改正之后的, 而用于对比研究的其他工作则没有, 所以本文中所展示的统计值整体偏大. $I(\text{HCO}^+)$ 的中值是2.86、3.84和9.83 $\text{K} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$, 同样表现为增加趋势, 然而, 星前阶段与原恒星阶段的温度接近, 化学反应环境近似相同, 所以增幅较小(约34%), 电离氢区阶段相较于原恒星阶段中值的增幅约156%, 温度的升高将CO从尘埃颗粒冰慢释放到气相中, HCO⁺主要是和CO反应生成^[26], 同时UV辐射可以加快反应速率, 所以电离氢区阶段HCO⁺

增幅更加明显. $I(\text{HNC})$ 的中值是2.59、4.02和4.59 $\text{K} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$, 随演化阶段表现出增加趋势, 星前阶段到原恒星阶段增幅约为55%, 原恒星到电离氢区阶段增幅约14%, 这是由于随着团块温度的升高, 部分HNC分子转化生成HCN分子, 所以增幅下降. 文献[1]中的 $I(\text{HNC})$ 的中值是1.5、2.38和2.81 $\text{K} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$, 星前阶段到原恒星阶段增幅约为58%, 原恒星到电离氢区阶段的增幅约18%, 我们得到的结果与文献[1]中的研究结果一致. 此外, 文献[3]的研究工作中同样得出 $I(\text{N}_2\text{H}^+)$ 、 $I(\text{HCO}^+)$ 、 $I(\text{HCN})$ 和 $I(\text{HNC})$ 都呈现出随着演化阶段递增的趋势.

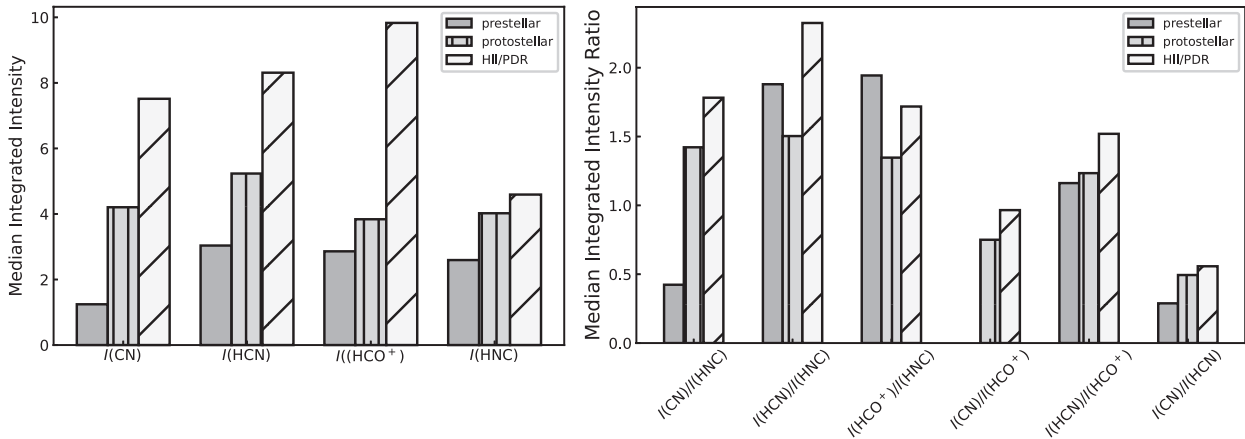


图3 左图是把不同演化阶段源中 $I(\text{HCN})$ 、 $I(\text{HNC})$ 、 $I(\text{HCO}^+)$ 和 $I(\text{CN})$ 谱线积分强度的中值绘制成直方图形式. 纵轴的单位是 $\text{K} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$. 深色柱是星前阶段, 竖线柱是原恒星阶段, 斜线柱是电离氢区阶段; 右图是把不同演化阶段源的积分强度比绘制成直方图形式.

Fig. 3 The left panel shows the median values of the integrated intensities of $I(\text{HCN})$, $I(\text{HNC})$, $I(\text{HCO}^+)$, and $I(\text{CN})$ spectral lines in sources at different evolutionary stages plotted in a schematic histogram. The vertical axis is in units of $\text{K} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$. The dark bars represent the Prestellar phase, the vertical bars represent the Protostellar phase, and the slanted bars represent the HII/PDR phase. The right panel illustrates the ratios of integrated intensities at different evolutionary stages in a schematic histogram.

星前阶段源没有可以同时探测到CN (探测率为20%)和HCO⁺ (探测率约27%)分子谱线辐射的源, 所以没有做积分强度比 $I(\text{CN})/I(\text{HCO}^+)$ 的统计, 可能的原因是在无星核阶段CN激发温度低, 所以积分强度较小. 原恒星阶段 $I(\text{CN})/I(\text{HCO}^+)$ 的中值是0.75, 电离氢区阶段的中值是0.97, 这可能是由于CN分子对UV辐射敏感, 在电离氢区阶段能

够更快地生成CN分子. $I(\text{CN})/I(\text{HNC})$ 在各演化阶段的中值是0.42、1.42和1.78, 星前阶段到原恒星阶段增幅显著(约236%), 原恒星阶段到电离氢区阶段增幅约25%, 这与文献[13]的研究结果一致. $I(\text{CN})/I(\text{HCN})$ 的中值同样随着演化阶段呈现递增趋势, 星前阶段到原恒星阶段增幅约71%, 原恒星阶段到电离氢区阶段增幅约13%. CN分子对UV

辐射敏感, 随着团块的演化UV辐射逐渐增强, 将部分HNC和HCN分子光致解离为CN分子^[27], 因此 $I(\text{CN})/I(\text{HCO}^+)$ 、 $I(\text{CN})/I(\text{HNC})$ 和 $I(\text{CN})/I(\text{HCN})$ 可能是示踪团块演化阶段的理想化学时钟. $I(\text{HCN})/I(\text{HCO}^+)$ 的中值随着演化呈现微弱的递增趋势, 而 $I(\text{HCO}^+)/I(\text{HNC})$ 和 $I(\text{HCN})/I(\text{HNC})$ 都没有随演化阶段表现单调变化趋势, 与文献[3]中的研究结果不同, 这可能是由于星前阶段分子辐射较弱, 加之本工作统计样本较小造成的.

在图4绘制不同演化阶段源中 $I(\text{HCN})$ 、 $I(\text{HNC})$ 、

$I(\text{HCO}^+)$ 和 $I(\text{CN})$ 谱线积分强度散点图, 星前阶段与原恒星阶段源基本分布在图中的左下方, 而电离氢区阶段分子辐射强度跨度最大, 同时覆盖前两个演化阶段, 这可能是由于电离氢区阶段团块自身和周围环境比较复杂造成的. 此外对图中散点进行线性拟合, 得到分子间的相关系数(r)变化范围从0.75到0.91, 都表现出较强的线性相关性. 其中CN与HCN的线性相关最强, 相关系数是0.91, $I(\text{HCN}) = (1.51 \pm 0.15)I(\text{CN}) + 1.51 \pm 1.19$, 说明两种分子的激发条件和机制可能相似.

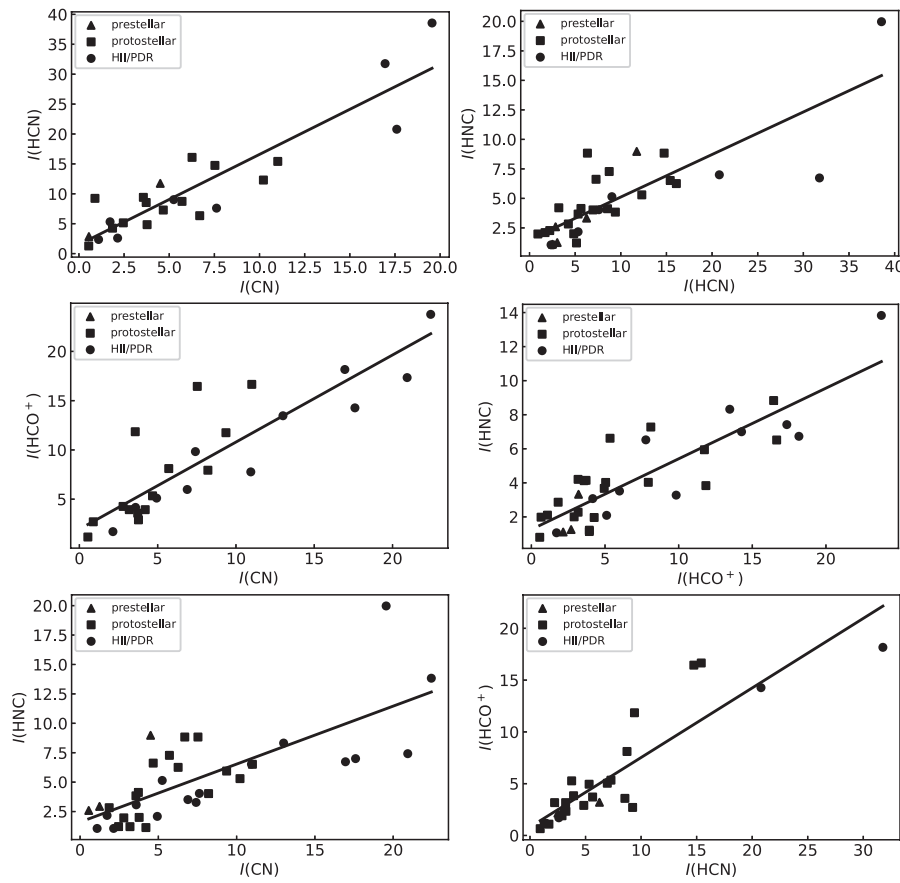


图 4 不同演化阶段源中 $I(\text{HCN})$ 、 $I(\text{HNC})$ 、 $I(\text{HCO}^+)$ 和 $I(\text{CN})$ 谱线积分强度散点图, 横、纵坐标是分子的积分强度, 单位为 $\text{K} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$. 三角形是星前阶段, 正方形是原恒星阶段, 圆点是电离氢区阶段.

Fig. 4 Scatter plot of the integrated intensity of the $I(\text{HCN})$, $I(\text{HNC})$, $I(\text{HCO}^+)$, and $I(\text{CN})$ spectral lines at different evolutionary stages of sources. The horizontal and vertical axes represent the integrated intensity of the molecules, with units of $\text{K} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$. Triangles represent the Prestellar phase, squares represent the Protostellar phase, and circles represent the H II/PDR phase.

4.3 柱密度、丰度和丰度比

图5所示的不同演化阶段CN、HCN、HCO⁺和HNC分子柱密度和丰度统计结果示意图, 各分子的柱密度和丰度的中值均随演化阶段呈现递增趋势, $N(\text{CN})$ 在3个演化阶段的中值是1.60、5.57和9.09 ($\times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$); $N(\text{HCN})$ 随演化阶段中值是8.52、14.44和25.39 ($\times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$); $N(\text{HCO}^+)$ 是2.67、3.35和11.41 ($\times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$). $N(\text{HCO}^+)$ 的中值在前两个演化阶段变化不明显(增幅约26%), 原恒星阶段到电离氢区阶段的增幅约240%, 说明HCO⁺随着团块的演化, 在更高温度下生成速率更快. $N(\text{HNC})$ 在各演化阶段中值分别是3.90、6.01和8.02 ($\times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$), 同样表现为随演化递增.

$N(\text{HCN})/N(\text{H}_2)$ 和 $N(\text{HCO}^+)/N(\text{H}_2)$ 的中值从星前到原恒星阶段近似相同, 而电离氢区阶段相较前两个演化阶段增幅明显, $N(\text{HCN})/N(\text{H}_2)$ 增幅约259%, $N(\text{HCO}^+)/N(\text{H}_2)$ 增幅约249%. $N(\text{CN})/N(\text{H}_2)$ 和 $N(\text{HNC})/N(\text{H}_2)$ 的中值随演化递增. 这些趋势与文献[1-3]的研究结果一致. 总之, 各分子随着演化阶段的推移, 团块温度逐渐升高, 尘埃冰慢慢释放出更丰富的分子促进化学反应, 多数分子的柱密度都表现为随演化阶段递增. 为进一步探究团块演化与分子化学性质的关系, 我们开展了分子丰度比研究, 分子的丰度比能更好地减少样本源之间的差异, 如质量、密度、原恒星的质量等物理因素的影响, 所以分子丰度比可以很好地体现出随演化阶段变化的化学时钟特性.

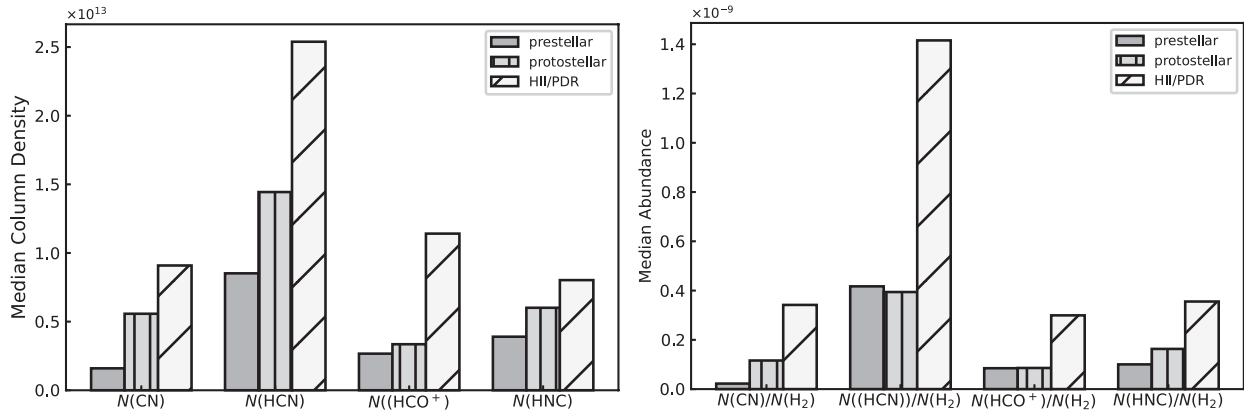


图5 左图是不同演化阶段源中CN、HCN、HCO⁺和HNC分子柱密度中值的直方示意图, 纵轴的单位是 cm^{-2} ; 右图是丰度中值的直方示意图.

Fig. 5 The left panel shows a schematic histogram of the median column densities of CN, HCN, HCO⁺, and HNC molecules in sources at different evolutionary stages. The vertical axis is in units of cm^{-2} . The right panel displays a schematic histogram of the median abundances.

图6显示的为各分子丰度比中值统计结果, $N(\text{CN})/N(\text{HNC})$ 的中值是0.34、1.39和1.1, 原恒星和电离氢区阶段相较无星核阶段增幅明显, 增幅分别约为309%、241%. 由上文可知CN和HNC分子的柱密度都随演化阶段增加(如图5所示), $N(\text{CN})/N(\text{HNC})$ 的增加说明CN分子丰度增长速率大于HNC分子丰度增长速率. 这可能是由于: (1)随着团块温度的升高, 冰慢慢释放出更多CN分子; (2)随着温度的升高, 有利于CN分子通过N与H的碰撞形成;

(3)部分HNC被光致分解为CN分子. 因此CN分子丰度增长速率更快. $N(\text{HCN})/N(\text{HNC})$ 的中值是3.26、2.63和4.11, 无星核阶段高于原恒星阶段, 电离氢区阶段相较于原恒星阶段增幅约56%. 理论上, 随着团块温度的升高, 部分HNC分子将转化为HCN分子, $N(\text{HCN})/N(\text{HNC})$ 应随着演化阶段呈现单调递增趋势, 由于本研究工作样本较小、统计误差较大, 无星核阶段的 $N(\text{HCN})/N(\text{HNC})$ 高于原恒星阶段, 但是 $N(\text{HCN})/N(\text{HNC})$ 整体随团块

的演化增大. $N(\text{HCO}^+)/N(\text{HNC})$ 的中值是1.23、0.83和1.09, 分子的丰度比没有随演化阶段表现出明显的变化趋势. $N(\text{CN})/N(\text{HCO}^+)$ 的中值是0.98、1.03, 在无星核阶段没有同时探测到CN与 HCO^+ 分子, 因为CN对UV辐射敏感, 所以在无星核阶段很难探测, 而 HCO^+ 是CO气相化学生成, 无星核阶段温度低, 故而 HCO^+ 探测难度大. 原恒星阶段相较无星核阶段更容易探测, 说明随着团块演化阶段的推移CN和 HCO^+ 的丰度都有所升高(如图5所示). $N(\text{CN})/N(\text{HCN})$ 的中值是0.13、0.27和0.22, 分子的丰度比没有随演化阶段表现出明显的变化趋势. $N(\text{HCN})/N(\text{HCO}^+)$ 的中值是3.24、3.48和4.31, 中值随演化阶段表现为单调递增趋势, 星前阶段到原恒星阶段增幅约7%, 原恒星阶段到电离氢区阶段增幅约24%, 因此这两种分子的丰度比有望作为示踪大质量恒星演化的化学探针.

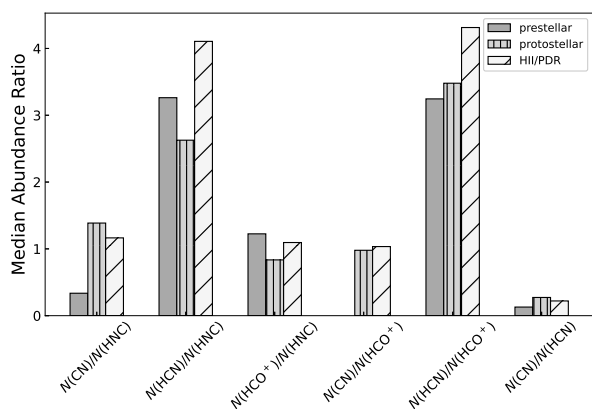


图6 不同演化阶段源中CN、HCN、 HCO^+ 和HNC分子的丰度比中值柱状示意图

Fig. 6 Schematic histogram of the median abundance ratios of CN, HCN, HCO^+ , and HNC molecules in sources at different evolutionary stages

图7展示的为不同演化阶段源中CN、HCN、 HCO^+ 和HNC分子柱密度散点图, 图8展示的为分子丰度散点图, 从两幅图中可见各分子之间表现为明显的线性相关性(相关系数0.71–0.90). $N(\text{CN})$ 与 $N(\text{HCO}^+)$ 存在强线性相关, 相关系数 r 约0.90, $\lg N(\text{HCO}^+) = (0.90 \pm 0.09) \lg N(\text{CN}) + 1.32 \pm 1.13$. $N(\text{HCN})$ 与 $N(\text{HCO}^+)$ 相关系数 r 约0.90, $\lg N$

$(\text{HCO}^+) = (0.94 \pm 0.09) \lg N(\text{HCN}) + 0.23 \pm 1.19$. 散点图整体上表现为分子柱密度越小分布越弥散, 随着分子柱密度升高弥散减小. 原恒星阶段与电离氢区阶段整体分布较为弥散, 散布于整个演化阶段, 这说明源的物理状态随演化阶段变得更加复杂. 从上述研究结果我们推测4个可能导致分子丰度变化不明显的原因: (1)研究样本大小的限制, 导致统计结果误差较大; (2)基于现有手段对团块演化阶段的划分仍有很大提升空间, 不准确的演化阶段划分也是一个影响化学演化研究的主要因素; (3)观测分辨率的限制. 德令哈望远镜观测分辨率 $\sim 52''$, 在3 kpc处的大质量恒星形成区, 其物理尺度约为0.8 pc. 因此观测探测到是恒星形成团块, 其中可能包含多个不同演化状态的恒星形成核; (4)大质量恒星形成中化学过程与低质量恒星中的过程不同, 这方面已经在一些研究中得到验证; (5)由于不能准确测量所研究分子的光学厚度, 导致分子丰度测量误差较大. 因此我们计划在后续研究工作中结合高分辨率、多种分子谱线数据解决上述问题;

5 总结

我们利用德令哈13.7 m毫米波望远镜对30个大质量团块进行CN、HCN、HNC和 HCO^+ 分子谱线观测研究, 结合文献[9]中对37个大质量团块的观测结果, 将67个大质量团块划分为无星核、原恒星和H II/PDR阶段开展分子化学性质随演化阶段变化研究. 本研究工作中在计算4种分子柱密度、丰度时假设它们都为光学薄, 计算结果与实际值偏差较大, 所以对单一分子进行的柱密度和丰度统计结果存在较大的误差, 用以示踪的演化阶段有很大的局限性. 然而分子的丰度比能更好地减少样本源之间的差异, 可以很好地体现出随演化阶段变化的化学时钟特性, 因此我们着重讨论了各分子的积分强度比和丰度比随演化阶段的变化趋势. 同时受光学厚度影响得不到可靠的柱密度, 从而得不到可靠的丰度, 最终影响对丰度比化学时钟的检验. 研究结果总结如下:

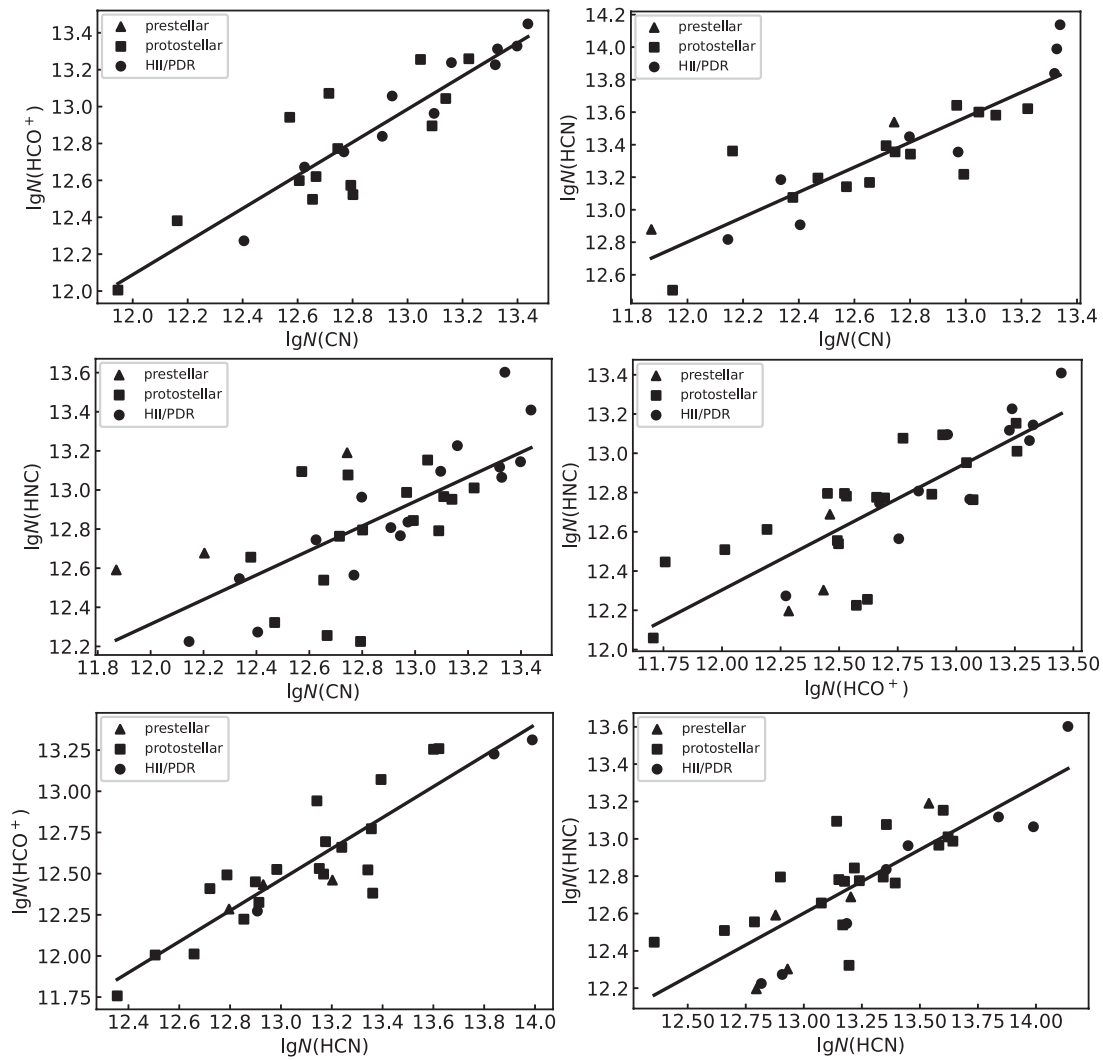


图 7 不同演化阶段源中CN、HCN、HCO⁺和HNC分子柱密度散点图, 黑色实线为线性拟合结果. 横、纵坐标的单位是cm⁻². 三角形是星前阶段, 正方形是原恒星阶段, 圆点是电离氢区阶段.

Fig. 7 Scatter plot of column densities of CN, HCN, HCO⁺, and HNC molecules in sources at different evolutionary stages, with the black solid line representing the linear fit result. The units of the horizontal and vertical axes are cm⁻². Triangles represent the Prestellar phase, squares represent the Protostellar phase, and circles represent the H II/PDR phase.

(1) 大质量恒星形成团块中CN (1-0)、HCO⁺ (1-0)、HCN (1-0)和HNC (1-0)的积分强度、柱密度和丰度的中值随团块的演化都呈现递增趋势. $I(\text{CN})/I(\text{HNC})$ 、 $I(\text{CN})/I(\text{HCN})$ 和 $I(\text{HCN})/I(\text{HCO}^+)$ 的积分强度比随演化阶段递增, 可以用来追踪高质量恒星形成团块的演化;

(2) 丰度比 $N(\text{HCN})/N(\text{HCO}^+)$ 的中值随演化阶段单调递增, 有望作为示踪大质量恒星演化的化学探针;

(3) CN、HCO⁺、HCN和HNC分子的积分强度和柱密度都表现出显著的线性相关性, 说明这4种致密分子探针的激发条件和机制类似.

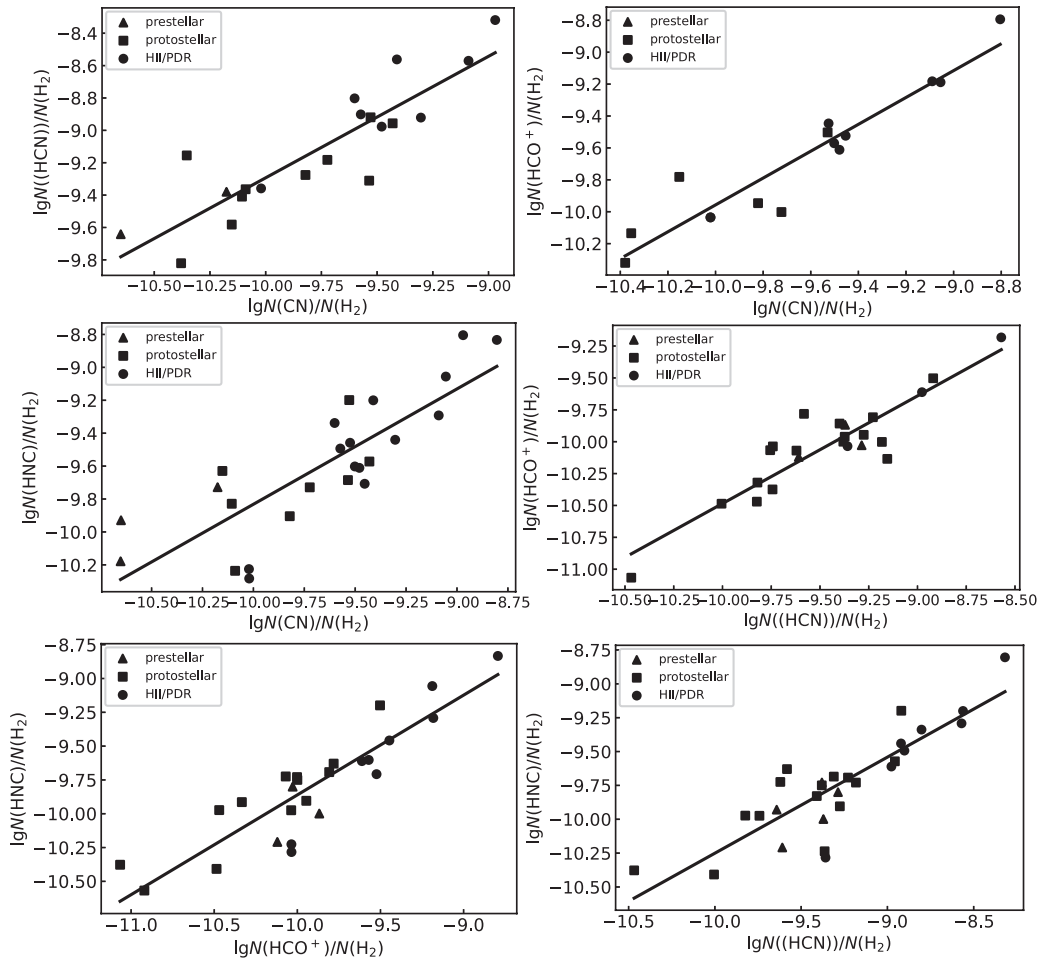


图 8 不同演化阶段源中 CN、HCN、HCO⁺ 和 HNC 分子丰度散点图，黑色实线为线性拟合结果。三角形是星前阶段，正方形是原恒星阶段，圆点是电离氢区阶段。

Fig. 8 Scatter plot of abundances of CN, HCN, HCO⁺, and HNC molecules in sources at different evolutionary stages, with the black solid line representing the linear fit result. Triangles represent the Prestellar phase, squares represent the Protostellar phase, and circles represent the HII/PDR phase.

致谢 这项工作利用德令哈 13.7 m 毫米波望远镜的观测数据展开研究，感谢紫金山天文台青海观测站对本课题提供数据支持，同时感谢审稿人对本文提出的宝贵意见。

参考文献

- [1] Hoq S, Jackson J M, Fosyer J B, et al. ApJ, 2013, 777: 2
- [2] Sanhueza P, Jackson J M, Foster J B, et al. ApJ, 2012, 756: 1
- [3] Zhang Y J, Zhou J J, Esimbek J, et al. Ap&SS, 2016, 361: 6
- [4] Bergin E A, Langer W D. ApJ, 1997, 486: 316
- [5] Bergin E A, Tafalla M. ARA&A, 2007, 45: 339
- [6] Lee J E, Bergin E A, Evans N J II. ApJ, 2004, 617: 360
- [7] Lee J E, Evans N J, Shirley Y L, et al. ApJ, 2003, 583: 789
- [8] Wienen M, Wyrowski F, Schuller F, et al. A&A, 2012, 544: 1
- [9] Urquhart J S, Thompson M A, Moore T, et al. MNRAS, 2013, 435: 1
- [10] Wienen M, Wyrowski F, Menten K M, et al. A&A, 2015, 579: 91
- [11] Csengeri T, Leurini S, Wyrowski F, et al. A&A, 2016, 586: 149

- [12] Cazzoletti P, van Dishoeck E F, Visser R, et al. A&A, 2018, 609: 93
- [13] Han X H, Zhou J J, Wang J Z, et al. A&A, 2015, 576: 131
- [14] Fazio G G, Hora J L, Allen L E, et al. ApJS, 2004, 154: 10
- [15] Wright E L, Eisenhardt P, Mainzer A, et al. AJ, 2010, 140: 6
- [16] Carey S J, Noriega-Crespo A, Mizuno D R, et al. PASP, 2009, 121: 76
- [17] Molinari S, Swinyard B. PASP, 2010, 122: 889
- [18] Schuller F, Menten K M, Contreras Y, et al. A&A, 2009, 504: 2
- [19] Aguirre J E, Ginsburg A G, Dunham M K, et al. ApJS, 2011, 192: 4
- [20] Urquhart J S, Csengeri T, Wyrowski F, et al. A&A, 2014, 568: 41
- [21] Ginsburg A, Glenn J, Rosolowsky E, et al. ApJS, 2013, 208: 14
- [22] Marsh K A, Whitworth A P, Lomax O, et al. MNRAS, 2017, 471: 3
- [23] Ossenkopf V, Henning T. A&A, 1994, 291: 943
- [24] Vasyunina T, Linz H, Henning T, et al. A&A, 2011, 527: 88
- [25] Ungerechts H, Bergin A, Goldsmith F, et al. ApJ, 2009, 482: 1
- [26] 曾琴, 毛瑞青, 裴春传. 天体物理中的微波谱线诊断. 北京: 中国科学技术出版社, 2006: 148-156
- [27] Baan W A, Henkel C, Loenen A F, et al. Ap, 2007, 477: 3

Chemical Properties of HCN, HNC, HCO⁺ and CN in the Early Stages of High-mass Clumps

LI Hong-jie^{1,2} HE Yu-xin^{2,3,4} ZHOU Jian-jun^{2,3,4} ESIMBEK Jarken^{2,3,4}
ZHOU Dong-dong^{2,3,4}

(1 College of Physical Science and Technology, Xinjiang University, Urumqi 830046)
(2 Xinjiang Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011)
(3 Key Laboratory of Radio Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023)
(4 Xinjiang Key Laboratory of Radio Astrophysics, Urumqi 830011)

ABSTRACT We selected 67 relatively isolated massive star-forming clumps and studied their overall chemical properties using four molecular spectral lines (HCN(1-0), HNC(1-0), HCO⁺(1-0), and CN(1-0), where the numbers in parentheses represent the transition from rotational energy level 1 to rotational energy level 0) and infrared band data. Based on the statistics of the source's integral intensity, column density, molecular abundance and abundance ratio at different evolutionary stages, we found that the median values of the integral intensity and column density of the massive star forming clumps CN(1-0), HCO⁺(1-0), HCN(1-0) and HNC(1-0) all showed an increasing trend with the increase of the evolutionary stage, which is consistent with the theoretical expectation. However, the statistical results of column density and abundance based on a single molecule have large errors. The stage of evolution used to trace is very limited. The integral intensity ratio of $I(\text{CN})/I(\text{HNC})$, $I(\text{CN})/I(\text{HCN})$ and $I(\text{HNC})/I(\text{HCO}^+)$ increases with the evolution stage (I represents the integrated intensity of the molecule), which is a potential probe to trace the evolution of massive star forming clumps. The median values of $N(\text{CN})/N(\text{H}_2)$, $N(\text{HNC})/N(\text{H}_2)$ and $N(\text{HCN})/N(\text{HCO}^+)$ increase monotonically with the evolution stage (N represents the column density of the molecule), which is promising as a chemical probe to trace the evolution of massive stars. It should be noted that due to the limitations of the observational data in this study, optical depths of individual molecules cannot be obtained. As a result, reliable column densities and abundances cannot be determined, which ultimately affects the testing of abundance ratio chemical clocks.

Key words interstellar medium (ISM): molecules, ISM: abundances, stars: formation, ISM: lines and bands

表 2 源的参数信息. Source代表源名, L 代表源的银经坐标, B 代表源的银纬坐标, Type为源的分类(I是星前阶段, II是原恒星阶段, III是电离氢区阶段), T_{MB} 为分子谱线的峰值亮度, FWHM为分子谱线的线宽, v 为分子谱线的线心速度

Table 2 The parameter information of the source. Source represents the name of the source, L represents the Galactic longitude of the source, B represents the Galactic latitude of the source, Type is the classification of the source (I represents the pre-star stage, II represents the protostar stage, III represents the ionized hydrogen region stage), T_{MB} is the peak brightness temperature of the molecular spectral line, FWHM is the line width of the molecular spectral line, and v is the line center velocity of the molecular spectral line

Source	$L/^{\circ}$	$B/^{\circ}$	Type	CN			HCN			HCO ⁺			HNC		
				T_{MB} /K	FWHM /(km·s ⁻¹)	v /(km·s ⁻¹)	T_{MB} /K	FWHM /(km·s ⁻¹)	v /(km·s ⁻¹)	T_{MB} /K	FWHM /(km·s ⁻¹)	v /(km·s ⁻¹)	T_{MB} /K	FWHM /(km·s ⁻¹)	v /(km·s ⁻¹)
A15.00+0.00	15.007	0.009	I	-	-	-	0.28	9.87(1.73)	23.20(0.66)	0.39	5.26(0.86)	23.70(0.38)	0.32	2.91(0.75)	23.80(0.31)
A27.46+0.11	27.464	0.119	I	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A29.22+0.02	29.226	0.024	II	-	-	-	0.33	6.12(1.59)	96.42(0.62)	0.58	4.76(0.68)	96.70(0.31)	-	-	-
A30.32+0.29	30.32	0.295	I	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A49.25-0.41	49.253	-0.411	I	-	-	-	0.42	8.07(0.82)	68.28(0.42)	0.55	4.59(0.69)	67.47(0.26)	0.27	2.53(0.68)	66.58(0.33)
G10.61-0.03	10.618	-0.031	I	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
G10.97-0.09	10.973	-0.093	II	-	-	-	0.61	4.42(1.57)	12.87(0.86)	0.69	2.57(0.91)	15.88(0.48)	-	-	-
G11.05-0.09	11.058	-0.095	II	-	-	-	0.12	8.76(3.34)	37.72(1.54)	0.17	6.10(1.84)	33.24(1.00)	0.52	3.79(0.80)	29.43(0.31)
G11.12-0.12	11.127	-0.127	II	-	-	-	-	-	-	0.25	6.92(1.98)	26.74(0.89)	0.74	3.63(0.76)	30.09(0.41)
G12.49-0.22	12.497	-0.223	II	-	-	-	0.71	7.45(1.15)	36.91(0.49)	1.31	2.67(0.31)	35.93(0.14)	1.06	3.66(0.54)	35.74(0.22)
G13.95-0.40	13.952	-0.407	I	-	-	-	0.62	4.88(0.69)	19.57(0.24)	0.61	4.93(0.41)	19.79(0.16)	0.81	3.88(0.50)	19.09(0.27)
G14.32-0.53	14.328	-0.532	I	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
G14.64-0.11	14.644	-0.117	II	-	-	-	0.54	5.56(1.10)	41.06(0.52)	0.86	3.46(0.46)	40.72(0.25)	1.38	2.87(0.35)	40.97(0.16)
G14.68-0.22	14.685	-0.223	II	-	-	-	-	-	-	0.65	0.82(4.81)	58.65(0.09)	0.35	2.16(1.01)	58.09(0.48)
G16.30-0.52	16.301	-0.526	I	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
G16.37-0.61	16.377	-0.612	II	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
G17.91-0.48	17.914	-0.489	II	0.34	1.48(0.43)	56.94(0.33)	0.59	2.04(0.40)	52.31(0.20)	0.42	2.62(1.19)	52.33(0.37)	-	-	-
G18.60-0.07	18.605	-0.075	I	1.1	1.96(0.33)	44.95(0.14)	1.76	1.98(0.18)	44.81(0.07)	1.58	2.12(0.22)	44.48(0.09)	1.7	2.28(0.18)	45.04(0.07)
G19.73-0.65	19.732	-0.65	II	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
G20.89-0.17	20.893	-0.18	II	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.51	8.66(1.56)	59.84(0.80)
G22.37+0.44	22.375	0.447	II	0.26	3.19(1.05)	52.13(0.47)	0.5	17.20(2.11)	53.71(0.98)	0.79	3.23(0.58)	52.81(0.28)	-	-	-

表2 续
Table 2 Continued

Source	$L/^\circ$	$B/^\circ$	Type	CN			HCN			HCO ⁺			HNC		
				T_{MB} /K	FWHM /(km·s ⁻¹)	v /(km·s ⁻¹)	T_{MB} /K	FWHM /(km·s ⁻¹)	v /(km·s ⁻¹)	T_{MB} /K	FWHM /(km·s ⁻¹)	v /(km·s ⁻¹)	T_{MB} /K	FWHM /(km·s ⁻¹)	v /(km·s ⁻¹)
G23.20-0.37	23.205	-0.378	II	-	-	-	0.29	17.44(1.90)	84.98(0.87)	0.59	7.93(1.01)	78.42(0.33)	0.63	5.50(1.15)	78.65(0.37)
G24.00+0.48	24.01	0.489	II	-	-	-	0.35	10.50(2.56)	96.03(1.35)	0.46	7.89(1.78)	95.49(0.82)	-	-	-
G25.15-0.29	25.153	-0.292	I	-	-	-	1.15	2.85(0.57)	63.15(0.22)	-	-	-	-	-	-
G28.27-0.16	28.272	-0.167	I	-	-	-	-	-	-	0.45	6.25(1.17)	79.04(0.84)	-	-	-
G31.46+0.18	31.463	0.187	II	-	-	-	0.35	2.49(1.04)	44.04(0.47)	0.33	1.89(0.89)	42.57(0.43)	0.38	4.85(1.56)	44.79(0.95)
G32.00-0.19	32.002	-0.199	I	-	-	-	0.32	9.43(3.42)	91.85(1.42)	0.68	3.25(1.58)	94.61(0.45)	-	-	-
G34.73-0.11	34.738	-0.12	I	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
G38.95-0.46	38.959	-0.467	II	-	-	-	0.62	10.50(1.35)	43.79(0.48)	1.15	4.12(0.46)	41.91(0.19)	1.37	2.76(0.20)	42.49(0.10)
I05358+3543	173.485	2.433	II	1.24	2.93(0.26)	-17.01(0.10)	2.26	2.99(0.10)	-17.64(0.04)	4.34	3.56(0.07)	-17.51(0.03)	2.53	3.28(0.11)	-17.09(0.04)
I18517+0437	37.427	1.518	II	1.24	2.93(0.27)	43.77(0.11)	2.24	3.50(0.13)	43.72(0.07)	-	-	-	1.76	3.33(0.08)	43.99(0.03)
I20126+4104	78.122	3.633	II	2	2.80(0.16)	-3.62(0.07)	2.24	2.95(0.12)	-3.71(0.05)	4.27	3.66(0.09)	-3.35(0.04)	2.03	3.02(0.11)	-3.49(0.04)
I20293+3952	78.975	0.356	II	1.31	2.00(0.18)	6.15(0.071)	1.59	2.80(0.13)	6.19(0.06)	3.04	2.51(0.09)	6.06(0.04)	2.51	2.72(0.08)	6.14(0.04)
I20343+4129	80.828	0.568	II	1.89	2.67(0.16)	11.78(0.07)	2.75	2.73(0.06)	11.66(0.03)	-	-	-	1.9	2.62(0.11)	11.38(0.05)
C41.1-0.21	41.096	-0.213	III	0.22	9.31(1.47)	63.30(0.78)	0.26	3.80(0.58)	60.05(0.26)	0.38	4.23(0.99)	60.04(0.41)	0.26	3.80(0.58)	60.05(0.26)
C48.93-0.29	48.93	-0.286	III	1.93	4.71(0.26)	68.71(0.10)	2.61	5.13(0.83)	68.85(0.83)	2.6	5.16(0.11)	68.80(0.04)	1.97	3.34(0.12)	68.60(0.05)
C49.00-0.30	48.999	-0.293	III	2.4	4.53(0.27)	68.10(0.11)	-	-	-	3.55	6.29(0.11)	68.35(0.04)	2.62	4.95(0.12)	68.03(0.05)
C49.38-0.30	49.384	-0.298	III	1.06	5.14(0.44)	51.22(0.16)	-	-	-	1.13	6.47(0.37)	51.65(0.13)	1.34	4.58(0.31)	51.41(0.10)
C51.36-0.00	51.362	-0.001	III	0.96	2.56(0.19)	54.09(0.07)	1.45	3.08(0.13)	53.59(0.05)	-	-	-	1.55	3.11(0.13)	53.96(0.05)
C52.94-0.59	52.94	-0.588	III	0.34	4.78(1.56)	49.17(0.42)	0.59	8.53(0.58)	49.36(0.21)	-	-	-	0.38	5.43(0.58)	48.51(0.32)
D53.64+0.24	53.639	0.235	III	0.24	4.20(0.82)	36.39(0.49)	0.28	7.80(0.88)	37.16(0.35)	-	-	-	0.29	3.45(0.48)	36.25(0.21)
I22134+5834	103.876	1.855	II	0.4	3.41(0.88)	-18.76(0.32)	0.67	3.47(0.27)	-18.27(0.13)	0.98	2.77(0.08)	-18.06(0.04)	0.68	2.77(0.17)	-18.52(0.08)
I22551+6221	110.21	2.616	II	1.14	2.06(0.16)	-13.39(0.07)	-	-	-	1.5	2.46(0.13)	-13.28(0.06)	0.56	1.90(0.27)	-13.22(0.12)
I22570+5912	109.098	-0.346	II	0.72	2.32(0.35)	-45.84(0.13)	-	-	-	1.5	2.75(0.16)	-45.65(0.06)	0.64	1.78(0.26)	-45.59(0.11)
I23033+5951	110.093	-0.067	II	0.53	3.81(0.25)	-53.09(0.10)	1.14	3.16(0.15)	-52.74(0.06)	2.49	4.47(0.14)	-53.27(0.05)	1.14	3.16(0.15)	-52.74(0.06)
I23139+5939	111.253	-0.77	II	0.51	2.52(0.28)	-44.25(0.12)	-	-	-	0.99	4.04(0.12)	-44.19(0.05)	0.55	3.37(0.48)	-44.55(0.19)
I01202+6133	126.713	-0.822	III	0.78	2.11(0.15)	-14.15(0.07)	-	-	-	1.5	2.61(0.15)	-14.37(0.06)	1.35	2.14(0.13)	-13.96(0.06)

表2 续
Table 2 Continued

Source	$L/^{\circ}$	$B/^{\circ}$	Type	CN			HCN			HCO ⁺			HNC		
				T_{MB} /K	FWHM /(km·s ⁻¹)	v /(km·s ⁻¹)	T_{MB} /K	FWHM /(km·s ⁻¹)	v /(km·s ⁻¹)	T_{MB} /K	FWHM /(km·s ⁻¹)	v /(km·s ⁻¹)	T_{MB} /K	FWHM /(km·s ⁻¹)	v /(km·s ⁻¹)
I03035+5819	139.912	0.2	III	1.15	2.80(0.23)	-39.67(0.10)	-	-	-	1.98	2.84(0.13)	-39.56(0.05)	1.31	2.53(0.18)	-39.71(0.07)
I19078+0901	43.172	0.006	III	0.55	4.65(0.75)	3.20(0.25)	1.82	12.14(0.31)	2.24(0.10)	-	-	-	1.48	7.16(0.41)	3.63(0.19)
I19097+0847	43.186	-0.526	III	0.9	4.42(0.31)	57.45(0.14)	0.97	4.32(0.39)	57.51(0.16)	-	-	-	0.88	4.29(0.33)	57.46(0.15)
I19111+1048	45.122	0.132	III	1.47	4.60(0.31)	58.71(0.12)	-	-	-	2.45	5.17(0.18)	58.96(0.07)	1.45	5.40(0.25)	59.07(0.10)
I19442+2427	60.883	-0.129	III	2.72	4.09(0.17)	22.35(0.08)	-	-	-	3.87	4.21(0.05)	22.04(0.02)	1.9	3.67(0.16)	22.03(0.07)
I20081+3122	69.54	-0.976	II	0.99	4.79(0.54)	12.10(0.22)	-	-	-	1.24	8.87(0.27)	11.96(0.11)	1.07	5.19(0.16)	12.28(0.07)
I23116+6111	111.543	0.779	III	1.99	4.16(0.27)	-57.50(0.10)	2.51	3.25(0.15)	-57.88(0.05)	3.18	5.37(0.15)	-57.92(0.05)	1.31	4.83(0.19)	-57.23(0.07)
I23133+6050	111.612	0.373	III	0.89	2.90(0.19)	-56.50(0.08)	-	-	-	1.37	3.50(0.12)	-56.53(0.04)	0.58	3.38(0.17)	-56.84(0.07)
I23138+5945	111.284	-0.664	III	1.2	3.40(0.28)	-43.98(0.12)	-	-	-	2.61	3.54(0.09)	-43.83(0.04)	0.7	4.39(0.36)	-43.22(0.16)
G22.35+0.41	22.376	0.447	I	0.22	2.35(0.94)	52.73(0.41)	0.45	13.22(1.15)	54.70(0.44)	-	-	-	0.56	4.40(0.47)	52.56(0.19)
G23.60+0.00	23.568	0.014	I	0.37	3.13(1.40)	52.19(0.50)	-	-	-	-	-	-	0.96	2.86(0.24)	53.47(0.09)
G34.43+0.24	34.412	0.235	I	0.67	11.62(1.09)	64.23(0.39)	0.46	6.88(1.43)	49.55(0.60)	-	-	-	1.8	4.69(0.17)	58.23(0.07)
I18223-1243	18.606	-0.074	II	1.02	3.19(0.36)	45.19(0.15)	0.98	1.85(0.14)	44.69(0.07)	-	-	-	1.65	2.58(0.13)	45.55(0.05)
I18151-120	18.319	1.792	II	1.63	2.59(0.16)	33.06(0.07)	-	-	-	2.37	3.14(0.12)	32.97(0.05)	1.5	2.52(0.18)	33.15(0.08)
I18306-0835	23.296	0.055	II	0.39	2.83(0.43)	77.88(0.19)	0.39	10.21(0.72)	79.99(0.28)	-	-	-	0.69	3.84(0.15)	77.97(0.07)
I18337-0743	24.372	-0.158	I	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.34	4.91(0.94)	55.23(0.37)
I18310-082	23.478	0.115	II	-	-	-	0.22	9.49(2.39)	80.43(0.99)	0.35	8.52(3.84)	82.09(0.91)	0.37	5.76(0.71)	85.55(0.30)
I18445-022	30.383	-0.11	II	0.44	3.34(0.30)	86.92(0.16)	0.76	3.93(0.25)	87.15(0.11)	-	-	-	0.42	2.76(0.35)	86.82(0.19)
I18530+021	35.436	0.147	II	0.82	3.30(0.25)	76.61(0.12)	1.25	3.44(0.15)	77.00(0.06)	1.42	3.53(0.17)	76.71(0.08)	1.8	3.45(0.10)	76.74(0.05)

表 3 源的分子谱线积分强度及积分强度比
Table 3 Source molecular spectral line integrated intensity and integrated intensity ratio

Source	Integrated intensity				Integrated intensity ratio					
	$I(\text{CN})$	$I(\text{HCN})$	$I(\text{HCO}^+)$	$I(\text{HNC})$	$\frac{I(\text{CN})}{I(\text{HNC})}$	$\frac{I(\text{HCN})}{I(\text{HNC})}$	$\frac{I(\text{HCO}^+)}{I(\text{HNC})}$	$\frac{I(\text{CN})}{I(\text{HCO}^+)}$	$\frac{I(\text{HCN})}{I(\text{HCO}^+)}$	$\frac{I(\text{CN})}{I(\text{HCN})}$
	$/(K \cdot km \cdot s^{-1})$	$/(K \cdot km \cdot s^{-1})$	$/(K \cdot km \cdot s^{-1})$	$/(K \cdot km \cdot s^{-1})$						
A15.00+0.00		2.51	2.16	1.11		2.26	2.18		1.35	-
A27.46+0.11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A29.22+0.02	-	3.75	5.27	-	-	-	-	-	0.71	-
A30.32+0.29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A49.25-0.41	-	3.04	2.70	1.26	-	2.42	3.67	-	1.35	-
G10.61-0.03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
G10.97-0.09	-	2.88	1.90	-	-	-	-	-	1.52	
G11.05-0.09	-	1.70	1.09	2.10	-	0.81	0.52	-	1.56	-
G11.12-0.12	-	-	1.82	2.86	-	-	0.64	-	-	
G12.49-0.22	-	5.64	3.71	4.14	-	1.36	0.90	-	1.52	-
G13.95-0.40	-	6.25	3.20	3.33	-	1.88	0.96	-	1.95	-
G14.32-0.53	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
G14.64-0.11	-	3.21	3.17	4.20	-	0.76	0.75	-	1.01	-
G14.68-0.22	-	-	0.57	0.80	-	-	0.71	-	-	-
G16.30-0.52	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
G16.37-0.61	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
G16.43-0.66	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
G17.91-0.48	0.54	1.28	1.16	-	-	-	-	0.47	1.10	0.42
G18.60-0.07	3.72	8.54	3.58	4.13	0.90	2.07	0.87	1.04	2.39	0.44
G19.73-0.65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
G20.89-0.17	-	-	-	4.66	-	-	-	-	-	-
G22.37+0.44	0.89	9.24	2.70	-	-	-	-	0.33	3.42	0.10
G23.20-0.37	-	5.32	4.95	3.67	-	1.45	1.35	-	1.08	-
G24.00+0.48	-	3.92	3.84	-	-	-	-	-	1.02	-
G25.15-0.29	-	3.50	-	-	-	-	-	-	-	-
G28.27-0.16	-	-	3.02	-	-	-	-	-	-	-
G31.46+0.18	-	0.92	0.66	1.98	-	0.46	0.33	-	1.40	-
G32.00-0.19	-	3.23	2.34	-	-	-	-	-	1.38	-
G34.73-0.11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
G38.95-0.46	-	6.96	5.04	4.02	-	1.73	1.25	-	1.38	-
I05358+3543	7.53	14.75	16.45	8.83	0.85	1.67	1.86	0.46	0.90	0.51
I18517+0437	6.26	16.09	-	6.26	1.00	2.57	-	-	-	0.39
I20126+4104	11.01	15.42	16.65	6.52	1.69	2.37	2.56	0.66	0.93	0.71
I20293+3952	5.71	8.73	8.11	7.28	0.78	1.20	1.11	0.70	1.08	0.65

表3 续
Table 3 Continued

Source	Integrated intensity				Integrated intensity ratio					
	$I(\text{CN})$	$I(\text{HCN})$	$I(\text{HCO}^+)$	$I(\text{HNC})$	$\frac{I(\text{CN})}{I(\text{HNC})}$	$\frac{I(\text{HCN})}{I(\text{HNC})}$	$\frac{I(\text{HCO}^+)}{I(\text{HNC})}$	$\frac{I(\text{CN})}{I(\text{HCO}^+)}$	$\frac{I(\text{HCN})}{I(\text{HCO}^+)}$	$\frac{I(\text{CN})}{I(\text{HCN})}$
	$/(\text{K} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	$/(\text{K} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	$/(\text{K} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	$/(\text{K} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1})$						
I20343+4129	10.22	12.30	-	5.30	1.93	2.32	-	-	-	0.83
C41.1-0.21	2.14	2.59	1.71	1.07	2.01	2.43	1.60	1.26	1.52	0.83
C48.93-0.29	17.60	20.79	14.27	7.00	2.51	2.97	2.04	1.23	1.46	0.85
C49.00-0.30	22.44	-	23.76	13.83	1.62	-	1.72	0.94	-	-
C49.38-0.30	10.95	-	7.77	6.52	1.68	-	1.19	1.41	-	-
C51.36-0.00	5.25	9.02	-	5.14	1.02	1.75	-	-	-	0.58
C52.94-0.59	1.72	5.32	-	2.17	0.79	2.45	-	-	-	0.32
D53.64+0.24	1.09	2.36	-	1.06	1.02	2.22	-	-	-	0.46
I22134+5834	3.77	4.84	2.90	2.00	1.89	2.42	1.45	1.30	1.67	0.78
I22551+6221	4.20	-	3.94	1.14	3.69	-	3.45	1.07	-	-
I22570+5912	3.19	-	3.94	1.22	2.62	-	3.23	0.81	-	-
I23033+5951	3.57	9.40	11.85	3.84	0.93	2.45	3.09	0.30	0.79	0.38
I23139+5939	2.79	-	4.26	1.96	1.42	-	2.17	0.65	-	-
I01202+6133	3.59	-	4.17	3.07	1.17	-	1.36	0.86	-	-
I03035+5819	6.89	-	5.98	3.52	1.96	-	1.70	1.15	-	-
I19078+0901	19.55	38.56	-	19.97	0.98	1.93	-	-	-	0.51
I19097+0847	7.62	7.60	-	4.04	1.89	1.88	-	-	-	1.00
I19111+1048	13.00	-	13.47	8.32	1.56	-	1.62	0.97	-	-
I19442+2427	20.93	-	17.34	7.42	2.82	-	2.34	1.21	-	-
I20081+3122	9.36	-	11.75	5.94	1.58	-	1.98	0.80	-	-
I23116+6111	16.95	31.77	18.17	6.73	2.52	4.72	2.70	0.93	1.75	0.53
I23133+6050	4.93	-	5.11	2.09	2.36	-	2.44	0.97	-	-
I23138+5945	7.41	-	9.83	3.28	2.26	-	3.00	0.75	-	-
G22.35+0.41	0.55	2.85	-	2.59	0.21	1.10	-	-	-	0.09
G23.60+0.00	1.24	-	-	2.94	0.42	-	-	-	-	-
G34.43+0.24	4.50	11.74	-	8.98	0.50	1.31	-	-	-	0.38
I18223-1243	6.69	6.34	-	8.83	0.76	0.72	-	-	-	1.05
I18306-0835	1.86	4.25	-	2.83	0.66	1.50	-	-	-	0.44
I18337-0743	-	-	-	1.75	-	-	-	-	-	-
I18151-120	8.21	-	7.94	4.03	2.04	-	1.97	1.03	-	-
I18310-082	-	2.21	3.17	2.27	-	0.97	1.39	-	0.70	-
I18445-022	2.46	5.14	-	1.22	2.01	4.20	-	-	-	0.48
I18530+021	4.67	7.29	5.34	6.62	0.71	1.10	0.81	0.87	1.36	0.64

表 4 源的分子柱密度和丰度
Table 4 Source molecular column density and abundance

Source	Column density					Abundance			
	$N(\text{H}_2)$	$N(\text{CN})$	$N(\text{HCN})$	$N(\text{HCO}^+)$	$N(\text{HNC})$	$\frac{N(\text{CN})}{N(\text{H}_2)}$	$\frac{N(\text{HCN})}{N(\text{H}_2)}$	$\frac{N(\text{HCO}^+)}{N(\text{H}_2)}$	$\frac{N(\text{HNC})}{N(\text{H}_2)}$
	$/(10^{20} \text{ cm}^{-2})$	$/(10^{20} \text{ cm}^{-2})$	$/(10^{20} \text{ cm}^{-2})$	$/(10^{20} \text{ cm}^{-2})$	$/(10^{20} \text{ cm}^{-2})$	$(\times 10^{-10})$	$(\times 10^{-10})$	$(\times 10^{-10})$	$(\times 10^{-10})$
A15.00+0.00	254.08	-	6.25	1.93	1.57	-	2.46	0.76	0.62
A27.46+0.11	365.65	-	-	-	-	-	-	-	-
A29.22+0.02	299.08	-	5.25	2.56	-	-	1.76	0.86	-
A30.32+0.29	216.67	-	-	-	-	-	-	-	-
A49.25-0.41	200.13	-	8.52	2.71	2.01	-	4.26	1.36	1.00
G10.61-0.03	318.51	-	-	-	-	-	-	-	-
G10.97-0.09	395.94	-	7.15	1.67	-	-	1.81	0.42	-
G11.05-0.09	303.42	-	4.55	1.03	3.23	-	1.50	0.34	1.06
G11.12-0.12	335.66	-	-	1.56	4.09	-	-	-	0.46
G12.49-0.22	339.91	-	14.16	3.40	6.05	-	4.17	1.00	1.78
G13.95-0.40	308.16	-	15.94	2.89	4.89	-	5.17	0.94	1.59
G14.32-0.53	277.51	-	-	-	-	-	-	-	-
G14.64-0.11	331.18	-	7.93	2.82	6.25	-	2.40	0.85	1.89
G14.68-0.22	423.50	-	-	0.51	1.15	-	-	0.12	0.27
G16.30-0.52	432.10	-	-	-	-	-	-	-	-
G16.37-0.61	288.13	-	-	-	-	-	-	-	-
G16.43-0.66	214.39	-	-	-	-	-	-	-	-
G17.91-0.48	211.85	0.88	3.20	1.01	-	0.42	1.51	0.48	-
G18.60-0.07	334.64	6.33	21.98	3.33	6.24	1.89	6.57	1.00	1.87
G19.73-0.65	168.30	-	-	-	-	-	-	-	-
G20.89-0.17	276.58	-	-	-	6.62	-	-	-	2.39
G22.37+0.44	328.21	1.45	22.97	2.41	-	0.44	7.00	0.73	-
G23.20-0.37	1514.62	-	14.98	4.94	5.92	-	0.99	0.33	0.39
G24.00+0.48	241.65	-	9.63	3.35	-	-	3.99	1.39	-
G25.15-0.29	291.18	-	9.23	-	-	-	3.17	-	-
G28.27-0.16	414.06	-	-	2.62	-	-	-	0.63	-
G31.46+0.18	666.27	-	2.27	0.57	2.79	-	0.34	0.09	0.42
G32.00-0.19	193.46	-	8.19	2.12	-	-	4.23	1.09	-
G34.73-0.11	145.66	-	-	-	-	-	-	-	-
G38.95-0.46	293.79	-	17.36	4.57	5.97	-	5.91	1.55	2.03
I05358+3543	-	11.15	39.87	18.00	14.22	-	-	-	-
I18517+0437	-	9.28	43.87	18.00	9.72	-	-	-	-
I20126+4104	-	16.70	41.84	18.16	10.24	-	-	-	-
I20293+3952	529.22	3.73	13.85	8.75	12.42	0.70	2.62	1.65	2.35

表4 续
Table 4 Continued

Source	Column density					Abundance			
	$N(\text{H}_2)$	$N(\text{CN})$	$N(\text{HCN})$	$N(\text{HCO}^+)$	$N(\text{HNC})$	$\frac{N(\text{CN})}{N(\text{H}_2)}$	$\frac{N(\text{HCN})}{N(\text{H}_2)}$	$\frac{N(\text{HCO}^+)}{N(\text{H}_2)}$	$\frac{N(\text{HNC})}{N(\text{H}_2)}$
	$/(10^{20} \text{ cm}^{-2})$	$/(10^{20} \text{ cm}^{-2})$	$/(10^{20} \text{ cm}^{-2})$	$/(10^{20} \text{ cm}^{-2})$	$/(10^{20} \text{ cm}^{-2})$	$(\times 10^{-10})$	$(\times 10^{-10})$	$(\times 10^{-10})$	$(\times 10^{-10})$
I20343+4129	345.43	12.82	38.17	-	9.25	3.71	11.05	-	2.68
C41.1-0.21	76.61	2.54	8.08	1.87	1.88	3.32	10.54	2.44	2.45
C48.93-0.29	256.45	20.85	68.97	16.85	13.09	8.13	26.89	6.57	5.11
C49.00-0.30	174.62	27.40	-	28.07	25.64	15.69	-	16.08	14.68
C49.38-0.30	141.73	12.49	-	9.19	12.46	8.81	-	6.48	8.79
C51.36-0.00	58.59	6.28	28.13	-	9.19	10.71	48.01	-	15.69
C52.94-0.59	55.83	2.17	15.31	-	3.52	3.88	27.43	-	6.31
D53.64+0.24	52.30	1.40	6.56	-	1.68	2.67	12.55	-	3.21
I22134+5834	277.67	4.51	14.72	3.14	3.46	1.51	5.30	1.13	1.25
I22551+6221	-	6.22	-	3.75	1.68	-	-	-	-
I22570+5912	-	4.65	-	4.18	1.80	-	-	-	-
I23033+5951	-	5.17	24.77	11.79	5.80	-	-	-	-
I23139+5939	-	4.04	-	3.97	-	-	-	-	-
I01202+6133	-	4.22	-	4.70	5.56	-	-	-	-
I03035+5819	256.93	8.09	-	6.90	6.42	3.15	-	2.69	2.50
I19078+0901	871.06	21.83	137.31	-	39.99	2.51	15.76	-	4.59
I19097+0847	188.88	9.39	22.65	-	6.86	4.97	11.99	-	3.63
I19111+1048	483.88	14.44	-	17.31	16.84	2.98	-	3.58	3.48
I19442+2427	710.80	25.02	-	21.28	13.94	3.52	-	2.99	1.96
I20081+3122	-	13.77	-	11.06	8.96	-	-	-	-
I23116+6111	2227.69	21.24	97.53	20.54	11.61	0.95	4.38	0.92	0.52
I23133+6050	617.10	5.87	-	5.68	3.67	0.95	-	0.92	0.59
I23138+5945	-	8.79	-	11.41	5.84	-	-	-	-
G22.35+0.41	331.47	0.74	7.56	-	3.90	0.22	2.28	-	1.18
G23.60+0.00	717.12	1.60	-	-	4.75	0.22	-	-	0.66
G34.43+0.24	829.18	5.53	34.59	-	15.50	0.67	4.17	-	1.87
I18223-1243	337.81	9.84	16.52	-	6.98	2.91	4.89	-	2.07
I18306-0835	305.49	2.39	11.90	-	4.53	0.78	3.90	-	1.48
I18337-0743	296.26	-	-	-	2.80	-	-	-	0.94
I18151-120	-	12.28	-	7.86	6.19	-	-	-	-
I18310-082	338.29	-	6.13	3.11	3.59	-	1.81	0.92	1.06
I18445-022	362.04	2.94	15.66	-	2.10	0.81	4.33	-	0.58
I18530+021	188.54	5.57	22.69	5.92	11.93	2.96	12.04	3.14	6.33

表 5 源的分子丰度比
Table 5 Source molecular abundance ratio

Source	Abundance ratio					
	$\frac{N(\text{CN})}{N(\text{HNC})}$	$\frac{N(\text{HCN})}{N(\text{HNC})}$	$\frac{N(\text{HCO}^+)}{N(\text{HNC})}$	$\frac{N(\text{CN})}{N(\text{HCO}^+)}$	$\frac{N(\text{HCN})}{N(\text{HCO}^+)}$	$\frac{N(\text{CN})}{N(\text{HCN})}$
A15.00+0.00	-	3.98	1.23	-	3.24	-
A27.46+0.11	-	-	-	-	-	-
A29.22+0.02	-	-	-	-	2.05	-
A30.32+0.29	-	-	-	-	-	-
A49.25-0.41	-	4.24	1.35	-	3.14	-
G10.61-0.03	-	-	-	-	-	-
G10.97-0.09	-	-	-	-	4.27	-
G11.05-0.09	-	1.41	0.32	-	4.43	-
G11.12-0.12	-	-	0.38	-	-	-
G12.49-0.22	-	2.34	0.56	-	4.17	-
G13.95-0.40	-	3.26	0.59	-	5.52	-
G14.32-0.53	-	-	-	-	-	-
G14.64-0.11	-	1.27	0.45	-	2.81	-
G14.68-0.22	-	-	0.44	-	-	-
G16.30-0.52	-	-	-	-	-	-
G16.37-0.61	-	-	-	-	-	-
G16.43-0.66	-	-	-	-	-	-
G17.91-0.48	-	-	-	0.87	3.16	0.28
G18.60-0.07	1.01	3.52	0.53	1.90	6.60	0.29
G19.73-0.65	-	-	-	-	-	-
G20.89-0.17	-	-	-	-	-	-
G22.37+0.44	-	-	0.60	9.55	0.06	-
G23.20-0.37	2.53	0.83	-	3.03	-	-
G24.00+0.48	-	-	-	2.87	-	-
G25.15-0.29	-	-	-	-	-	-
G28.27-0.16	-	-	-	-	-	-
G31.46+0.18	-	0.81	0.20	-	3.97	-
G32.00-0.19	-	-	-	-	3.87	-
G34.73-0.11	-	-	-	-	-	-
G38.95-0.46	-	2.91	0.77	-	3.80	-
I05358+3543	0.78	2.80	1.27	0.62	2.21	0.28
I18517+0437	0.96	4.51	-	-	-	0.21
I20126+4104	1.63	4.08	1.77	0.92	2.30	0.40
I20293+3952	0.30	1.12	0.70	0.43	1.58	0.27
I20343+4129	1.39	4.13	-	-	-	0.34

表5 续

Table 5 Continued

Source	Abundance ratio					
	$\frac{N(\text{CN})}{N(\text{HNC})}$	$\frac{N(\text{HCN})}{N(\text{HNC})}$	$\frac{N(\text{HCO}^+)}{N(\text{HNC})}$	$\frac{N(\text{CN})}{N(\text{HCO}^+)}$	$\frac{N(\text{HCN})}{N(\text{HCO}^+)}$	$\frac{N(\text{CN})}{N(\text{HCN})}$
C41.1-0.21	1.35	4.30	1.00	1.36	4.31	0.31
C48.93-0.29	1.59	5.27	1.29	1.24	4.09	0.30
C49.00-0.30	1.07	-	1.09	0.98	-	-
C49.38-0.30	1.00	-	0.74	1.36	-	-
C51.36-0.00	0.68	3.06	-	-	-	0.22
C52.94-0.59	0.61	4.35	-	-	-	0.14
D53.64+0.24	0.83	3.91	-	-	-	0.21
I22134+5834	1.30	4.25	0.91	1.44	4.68	0.31
I22551+6221	3.70	-	2.23	1.66	-	-
I22570+5912	2.58	-	2.32	1.11	-	-
I23033+5951	0.89	4.27	2.03	0.44	2.10	0.21
I23139+5939	1.39	-	1.37	1.02	-	-
I01202+6133	0.76	-	0.85	0.90	-	-
I03035+5819	1.26	-	1.08	1.17	-	-
I19078+0901	0.55	3.43	-	-	-	0.16
I19097+0847	1.37	3.30	-	-	-	0.41
I19111+1048	0.86	-	1.03	0.83	-	-
I19442+2427	1.79	-	1.53	1.18	-	-
I20081+3122	1.54	-	1.23	1.25	-	-
I23116+6111	1.83	8.40	1.77	1.03	4.75	0.22
I23133+6050	1.60	-	1.55	1.03	-	-
I23138+5945	1.51	-	1.96	0.77	-	-
G22.35+0.41	0.18	1.94	-	-	-	0.10
G23.60+0.00	0.34	-	-	-	-	-
G34.43+0.24	0.36	2.23	-	-	-	0.16
I18223-1243	1.41	2.37	-	-	-	0.60
I18306-0835	0.53	2.63	-	-	-	0.20
I18337-0743	-	-	-	-	-	-
I18151-120	1.98	-	1.27	1.56	-	-
I18310-082	-	1.71	0.87	-	1.97	-
I18445-022	1.40	7.46	-	-	-	0.19
I18530+021	0.47	1.90	0.50	0.94	3.83	0.25