



银河系内恒星形成区中含硫和含氮分子观测研究进展

罗睿*, 徐雅霓, 王均智*

广西大学物理科学与工程技术学院, 广西相对论天体物理重点实验室, 南宁 530004

* 联系人, E-mail: luorui1120@st.gxu.edu.cn; junzhiwang@gxu.edu.cn

2024-12-24 收稿, 2025-03-21 修回, 2025-03-24 接受, 2025-03-25 网络版发表

摘要 天体化学通过研究星际介质中的元素和分子等的丰度, 分析分子及离子之间的反应, 并通过研究分子的形成和破坏, 进一步研究分子云的结构、动力学和演化. 本文介绍如何从含硫与含氮的相对简单的分子作为切入点研究天体化学. 硫和氮是星际介质中的关键元素, 对恒星形成和星际天体化学过程具有重要意义. 本文总结了含硫和含氮分子在恒星形成区的观测现状和理论研究进展. 含硫分子如CS、H₂S、SO等被广泛用于示踪高密度分子云和激波区域, 氮元素则在星际介质中以多种形态存在, 如NH₃、NO等, 是研究恒星形成区致密气体和磁场的重要示踪剂. 本文介绍了对部分含硫分子的大样本探测结果, 发现H₂S、H₂CS和HCS⁺分子丰度之间存在紧密的线性关系. 同时, 团队搭建气体-尘埃-冰的三相化学模型, 发现模型结果不能完全解释观测的结果, 需要将激波加入硫化学模型以更好地解释观测结果. 含氮分子NO很可能在星际天体化学中扮演着重要角色, 但NO分子相关的观测结果较少, 未来高空间分辨率的观测将会对研究NO相关的天体化学过程起到关键作用.

关键词 天体化学, 星际介质, 含硫分子, 含氮分子

天体化学是天文学与化学的交叉学科, 通过天文观测、实验室化学和构建模型来解释星际介质中各种分子的辐射线和吸收线^[1]. 主要的研究方法是通过获得星际介质中的元素和分子丰度, 分析分子之间的反应, 并通过研究分子的形成和破坏, 进一步探讨分子云的结构、动力学和演化. 天文观测的主要手段是通过分析电磁辐射(如可见光、红外线、射电波等)或直接探测天体物质样本(空间探测器), 将实验室测得的分子谱线与观测数据比对, 确定分子种类和丰度, 进而研究宇宙物质的结构、化学反应及其演化过程. 目前, 已经有超过300种分子在星际空间被探测到(<http://molecules-in.space/>). 天体化学领域关注的主要问题包括: 这些分子是如何、何时以及在何处产生和激发的? 它们的丰度如何反映分子云层的温度、密度、气体质量、电离率、辐射场和动力学? 它们是如何在恒星形成及演化的各个阶段循环的? 星际分子能否成为下一代恒星及

行星系统的一部分, 并成为形成生命的基石^[1]?

恒星形成是天文学的基本问题之一, 其中大质量恒星形成对于星系演化、金属元素增丰、星际介质演化等起到了关键作用. 分子气体在自引力作用下会塌缩形成恒星, 而新形成的恒星会对周围的星际介质产生反馈. 同时, 在恒星形成的整个过程中, 分子云的化学性质也会受到恒星形成活动的影响, 有着明显的分子天体化学, 包括气相化学、尘埃及冰表面化学、激波化学、光化学反应等. 星际分子气体的主要成分是氢分子和氦. 尘埃和除了氢分子以外的其他分子虽然所占比例很小, 但是可以对分子气体的性质产生非常大的影响, 包括通过加热或冷却的方式改变化学成分. 在恒星形成过程中, 分子气体中的分子成分会随着天体物理环境不同而有所差异, 其中包括冷核化学、热核化学、激波化学、光致离解等. 恒星形成过程中的分子天体化学过程十分复杂, 观测结果的信息不完备

引用格式: 罗睿, 徐雅霓, 王均智. 银河系内恒星形成区中含硫和含氮分子观测研究进展. 科学通报

Luo R, Xu Y, Wang J. Observations of sulfur and nitrogen molecules in star-forming regions of the Milky Way (in Chinese). Chin Sci Bull, doi: [10.1360/TB-2024-1371](https://doi.org/10.1360/TB-2024-1371)

以及天体环境的复杂性使得化学模型无法准确地还原天体物理环境, 导致难以理解其中的化学过程. 当今, 复杂有机分子(complex organic molecules, COM)的搜寻是国际上比较热门的一个方向. 尤为值得注意的是, 国内天文学家也曾经主导发现了2个非常重要的新分子: 丙酰胺^[2]以及氰基甲酰胺^[3]. 但是, 星际复杂有机分子的形成和破坏十分复杂, 难以理清其中的化学过程. 复杂分子由简单分子通过化学过程形成, 而即使是相对简单的分子, 很多天体化学过程都未能理解. 硫(S)和氮(N)都是排名靠前而且有着丰富的天体化学过程的元素, 含硫与含氮的简单分子是形成包括前生命分子在内的复杂有机分子的重要原材料. 基于此, 本文将介绍以部分在天体化学研究中有着重要影响的含硫与含氮的简单分子作为切入点, 开展相关天体化学研究的进展和展望.

1 含硫分子

硫是一种在地球环境常见的元素, 拥有多种化合价和形态, 是所有生物的必需元素, 是多种氨基酸组成部分, 也是多种维生素和酶的主要成分. 它不仅参与了生物体的许多重要的生理功能, 如代谢、免疫调节、信号传导等, 也是工业、农业、医药、环境等领域的重要原料和产品. 硫在地球的地壳、地幔、大气和海洋中都有分布, 其中以地壳中的硫化物和硫酸盐矿物最为丰富. 地球的地壳中, 硫的平均含量为0.06%, 主要以硫化物和硫酸盐的形式存在. 那硫元素在宇宙中的含量如何呢? 下文将进行简要介绍.

1.1 含硫分子的天文观测现状

作为宇宙中含量第十的元素, 硫在太阳中与氢的相对丰度(S/H)约为 1.3×10^{-5} ^[4]. 致密云中存在于分子态的硫丰度约为太阳中硫元素丰度的1%^[5], 但是其中的含硫分子种类十分丰富, 比如SH、SH⁺、SO、SO₂、CS、C₂S、C₃S、CH₃SH、NS、SiS、H₂S、H₂CS、HCS⁺、OCS、HNCS和HSCN^[6]. 针对不同恒星形成区(如致密无星云核L1544^[7]、类太阳原恒星IRAS 16293-2422^[8]的周围环境或大质量原恒星的包层)进行的单天线望远镜巡天结果显示了含硫分子的多样性. 针对一批晚期大质量恒星形成区, 我们团队利用IRAM 30m毫米波望远镜对51个源进行单点观测^[9], 其中有50个源都探测到了H₂S 1₁₀-1₀₁、H₂CS 5-4和HCS⁺ 4-3的发射谱线, 说明这几种含硫的简单分子在恒星形成区广泛存

在; 同时, H₂S、H₂CS和HCS⁺的柱密度及相对于氢分子的丰度在除了Sgr B2和W49M之外的源中, 依次递减. H₂CS与HCS⁺相对于H₂和H₂S的丰度比, 取对数后拟合的皮尔逊相关系数分别为0.94和0.87, 且它们呈线性关系, 斜率分别为1.00和1.09; 而H₂S与H₂CS相对于H₂的丰度比取对数后拟合得到的相关系数和斜率分别为0.77和0.98, H₂S与HCS⁺的为0.76和0.97^[9]. 虽然关系的紧密程度不及前者, 但是能够显示出它们之间可能有化学联系. 同时, 在所有源中, 每个源中这些谱线的半高全宽(full width at half maximum, FWHM)数值基本一致, 在1 ~ 10 km/s之间, 说明它们很可能示踪的是相同的分子气体成分^[9]. 上述结果是利用IRAM 30m做的单点观测, 缺乏空间分布的信息, 导致只能粗略地对每个源的平均性质进行探讨, 后续的高空间分辨率观测可以提供在每个源中这些分子的相对丰度比的空间分布, 对于理解这几种分子的化学联系将十分重要.

目前, 部分含硫分子被认为有以下作用: (1) CS是比较常用的致密分子气体探针^[10], 部分含硫分子(如OCS和SO^[11])是高密度分子云中复杂恒星形成区化学和物理特性的有用示踪剂, 可用于研究大质量恒星形成的演化阶段. (2) 部分含硫分子(如SO和SO₂^[12])被视为激波的示踪剂. 超新星爆炸及遗迹的膨胀、云-云碰撞以及年轻恒星产生的喷流可以导致周围的星际介质中产生强烈的激波^[13]. 在薄的激波层中, 气体温度升高到几百甚至上千K, 引发了在冷气体(~10 K)中无法进行的、拥有高能量(~2000 K)势垒的化学反应^[14]. 例如, 这几种硫化学反应过程: S⁺ + H₂ → SH⁺ + H(ΔH = 0.85 eV, 9860 K)、SH⁺ + H₂ → H₂S⁺ + H(ΔH = 0.55 eV, 6380 K)与H₂S⁺ + H₂ → H₃S⁺ + H(ΔH = 0.25 eV, 2900 K), 能在忽略磁场且存在激波的情况下发生^[15]. 同时, 激波可以使得原本被束缚于尘埃表面的S被释放到气相中, 在激波环境中, 它们会迅速与O原子结合形成SO和SO₂^[16], 这些分子被视为激波的示踪剂. 例如, 观测结果显示, 在Orion KL的激波活动区域, 含硫分子(SO和SO₂)的柱密度较高, 比云层的宁静区域高3个数量级左右^[12]. (3) SO、H₂S、CS和OCS等从冰幔中释放出的含硫分子, 被认为是探测类太阳质量原恒星CLASS 0系统中的热核的示踪剂^[17]. 在大质量恒星形成区的样本中, NS、CCS和HCS⁺可以追踪冷的(~10 K)、宁静的、延展的气体; OCS和SO示踪较热的(20~30 K)、湍流、较致密(>10⁴ cm⁻³)的物质; 而SO则同时示踪宁静和湍流气体^[11].

1.2 实验室化学及相关理论模型的研究现状

自20世纪80年代以来, 恒星形成区的硫化学一直是观测与模型研究关注但未解决的难题. 例如, 致密云核中硫的主要存在形式至今仍是谜团, 由含硫分子观测值推导出的致密云中, 以分子形式存在的硫元素丰度只占在太阳中的硫丰度的约1%^[18-20]. 含硫分子的气相丰度低于期望的硫元素丰度, 表明它们可能是在冰层上形成的, 并且部分物质被锁定在冰幔上, 但是这部分在冰表面的含硫分子的具体含量, 无法通过目前的观测得知. 除了气相及可能被锁在尘埃及冰表面的各种含硫分子, 分子云中的硫元素还可能以硫单质的形态存在, 但是也无法通过观测判断其含量.

关于冰中主要的含硫物种仍存在争议. 要确定星际冰中存在的分子, 就需要获得在模拟星际条件下生成的实验室数据, 以便进行比较. 为此, 实验室天体化学领域的多个研究小组都投入了大量精力, 在各种实验条件下对星际冰模拟物进行光谱定性, 并建立了大量的数据库.

H₂S被认为是主要含硫物种之一, 天体化学模型预测, H₂S可能是气态中硫元素的主要储存方式之一. Vidal等人^[21]模型结果显示: 在低气体温度和低尘埃温度环境中(<20 K), H₂S在冰表面非常丰富. 一旦H₂S分子形成, 它们就会迅速引发反应, 推动其他含硫分子的生成. 但很遗憾的是, 在星际介质的冰上还没有探测到H₂S分子. 除了H₂S, OCS也被认为是含硫物种的主要载体之一. van der Tak^[22]通过对9个大质量恒星形成区进行研究, 得出以下结论: OCS是冰幔中的主要硫库, 而不是H₂S; SO的浓度从外包层($T < 100$ K)向内包层或热核($T > 100$ K)增加. 当然, 除了无机硫化物之外, 据预测, 大量硫还以有机硫的形式被困在冰幔上.

含硫分子的形成与环境密切相关, 即温度^[23]、紫外光子和高能粒子^[24]以及离子辐照^[25]. 在分子云中, 离子-分子反应最为常见^[26], 而在热核和激波的暖气体中, 中性-中性反应最为常见^[27]. 天体化学模型预测, H₂CS可能在Orion KL和Sgr B2等大质量恒星形成区的气相中, 通过CH + H₂S形成^[28]. 此外, H₂CS还可以通过S + CH₃形成, 并在气相中被C⁺破坏^[29]. 我们团队也进行了尝试, 由于激波化学中的不确定性太大, 我们搭建了不含激波的气体-尘埃-冰的三相化学模型, 结果显示: H₂S与H₂CS均由S生成, 被H₃⁺破坏; HCS⁺由H₃⁺生成, 被电子破坏^[9]. 将模型与观测结果比较时, 发现模型可以基本解释但并不能完全解释观测的结果, 所以, 我

们认为需要在硫化学模型中加入激波的影响. 在这批源中, 激波示踪物SiO 4-3的观测结果显示激波普遍存在, 所以激波的影响不能忽略.

目前尚未完全了解星际分子云中完整的硫化学过程, 但模型在不断改进. Woods等人^[19]限制了以难熔残余物形式锁定的硫的数量, 并在模型中纳入了以下内容: 模拟了宇宙射线对冰H₂S的撞击, 导致CS的产生^[29], 通过CS和O₂生成OCS^[30,31]. 根据这些研究, 得出结论: 被锁定的硫, 即从冰中解吸后留在晶粒上的硫, 模型量约为10%. Vidal等人^[21]跟进了这一结论, 他们为类太阳原恒星构建了一个模型, 并跟踪了原恒星各个演化阶段的硫化学成分. 根据他们的模型, CS₂可能与O原子反应生成OCS和NS, 或者其他产物^[21]. 在低温(~10 K)下, 吸附在冰表面的O原子与CS₂发生反应, 主要产物为OCS, 且OCS生成效率是NS的3~5倍; 当温度略微提高时(20~30 K), 反应产物更多为NS. 所以, NS和OCS有望成为分子云初始温度的示踪剂^[32].

2 含氮分子

氮元素(N)是星际介质中第六丰富的元素, 也是氨基酸和核酸等前生物分子的基本组成部分. 在星际介质中, 氮元素主要以氮原子(N)和氮分子(N₂)的形式存在. 然而, N₂缺乏永久偶极矩, 导致转动跃迁无法观测. 因此, 研究星际氮化学时, 需要借助其他含氮分子作为探针, 如氮与氢、碳、氧等元素形成的分子. 目前, 已有近70种含氮分子通过气相旋转跃迁在星际介质中被探测, 复杂程度从简单的双原子分子CN^[33]、NH^[34]等, 到如HC₁₁N^[35]等复杂有机分子. 这些分子广泛分布于银河系及更遥远星系的不同天体环境中, 包括弥散气体、原恒星核及原行星盘等^[36-38].

氮氢化物的化学网络描述了它们在星际介质中的形成、转化和消耗过程, 对研究星际化学、恒星形成过程和宇宙中氮的循环至关重要. NH、NH₂和NH₃等分子的形成始于氮原子与氢的逐级氢化反应. NH作为起始物质, 通过后续氢化逐步生成NH₂和NH₃. 这一反应链对星际介质的物理条件高度敏感, 分子丰度比可用于约束暗云中的H₂ o/p(正氢/仲氢)的比值(H₂ o/p ≈ 10⁻³)^[39,40], 也可用于示踪致密恒星形成区气体中的氮元素的迁移路径^[41]. 观测表明, 这些分子的丰度分布与尘埃表面氮沉积的程度以及氢化反应的强度密切相关^[41].

N₂H⁺是星际介质中重要的三原子离子, 已在暗

云^[42]、半透明云^[43]、原恒星核^[44]和光解离区(photo dissociation region, PDR)^[45]等多种环境中被探测到. 它可以作为 N_2 的间接探针^[46], 主要通过 N_2 质子化生成^[47], 并可通过解离重组(dissociative recombination, DR)分解回 N_2 ^[48]. 同时, 它也是冷致密气体的重要探针, 可用于研究恒星形成区的早期演化, 并深入理解丝状结构、原始星团和核心的化学组成、运动学及动力学特性^[49~51].

碳氮化合物目前已知的种类相对较少, 主要包括 CN ^[33]、 $C_xN_2^-$ 和 $C_xN_4^-$ 等^[52]. 其中, CN 是最常见的碳氮化合物之一, 广泛分布于星际介质中. CN 分子具有1.45 Debye的偶极矩(作为参考, CS 为1.96 Debye), 是示踪恒星形成区致密区域和磁场的理想工具^[53,54]. 此外, CN 的超精细结构使得光学深度和柱密度的测定更加精确, 为分子云化学分层和物理条件研究提供了关键线索^[55~59]. 目前, CN 已广泛应用于恒星形成区、分子云核以及星际磁场的研究中, 其谱线特征为理解星际介质的动力学和化学演化提供了重要依据.

氮氧化物等能锁住大量的氮元素, 丰度通常仅次于分子氮^[53,58]. 目前, 在星际介质中已检测到的氮氧化物包括 NO ^[59,60]、 HNO ^[61]、 N_2O ^[62]以及 $HONO$ ^[63]. 其中, NO 是形成 N_2 的关键分子, 而 N_2 又是更复杂含氮分子形成的基础^[64]. 与 NH 、 NH_2 和 NH_3 等分子相比, 目前认为的 NO 的化学过程相对简单. 生成最直接的途径是中性-中性反应: $N+OH\rightarrow NO+H$, 而主要的破坏路径为: $N+NO\rightarrow N_2+O$, 同时反应 $O+NH\rightarrow NO+H$ 也能生成一定量的 NO 分子^[58]. 因此, NO 的丰度主要取决于气体中可用氮的含量.

观测数据表明, NO 分子在某些天体环境中的丰度显著高于其他含氮分子. 例如, 在富氧的星周包层中, NO 相对 H_2 的丰度可达到 10^{-6} , 成为该环境中丰度最高的含氮分子之一^[54]. 这一现象表明, 氮的化学反应和丰度分布在宇宙中具有高度的环境依赖性. 此外, 在低速激波环境下(<20 km/s), NO 能够直接反映氧分子的丰度^[53]. 该模型指出, O_2 的丰度在激波后显著增加, 大约300年后, O_2 的相对丰度达到了约 3×10^{-6} , 并且在1000年内达到了最高值 4×10^{-5} . NO 的丰度增强时间与 O_2 一致, 表明它们的丰度可能在相同时间内达到峰值^[65]. 由于 O_2 很难直接观测到, NO 分子可以成为有效替代示踪分子. 但由于复杂的超精细结构和不稳定的化学性质, NO 的观测仍然较为匮乏. 尤其是在分子云中 NO 分子的具体特性, 目前的观测信息依然有限. 对于在角秒级

空间分辨率下研究 NO 分布的高分辨率观测, 仅有对小质量原恒星二元系统IRAS 16293–2422B做了辐射强度谱线图的简单展示^[60].

3 总结与展望

目前, 已有不少研究团队在恒星形成区探测到含硫分子, 但绝大多数都是小样本的探测. 除了我们团队在2024年报道的针对 H_2S 、 $H_2^{34}S$ 、 H_2CS 和 HCS^+ 分子的大样本的单点观测结果^[9], 仅有 CS 、 OCS 等部分含硫分子有大样本搜寻^[66]. 这些探测结果都说明含硫分子似乎在恒星形成区的丰度不低. 为更好理解恒星形成区的化学过程, 我们需要更多的样本, 尤其是在恒星形成区内的空间分布情况, 还需要更多团队与高精度的射电望远镜参与. 硫化学观测与模型之间的难题还未解决, 不少团队都认为“消失”的硫被禁锢在冰中, 但冰中主要的含硫物种仍存在争议. 星际分子云中完整的硫化学过程尚待理清, 需要更多理论科学家参与.

具有空间分布信息的观测可以给我们带来单点观测无法提供的信息, 比如不同的分子可以是空间错位的. 我们的一个正在进行的工作, 利用IRAM 30m毫米波望远镜对22个晚期阶段的大质量恒星形成区进行了成图观测, 初步结果发现一个有趣的现象: 在部分源中, $H^{13}CO^+$ 和 HCS^+ 空间分布有明显的错位现象(图1). 虽然含硫/氧分子有着比较相似的化学性质, 但这两种分子

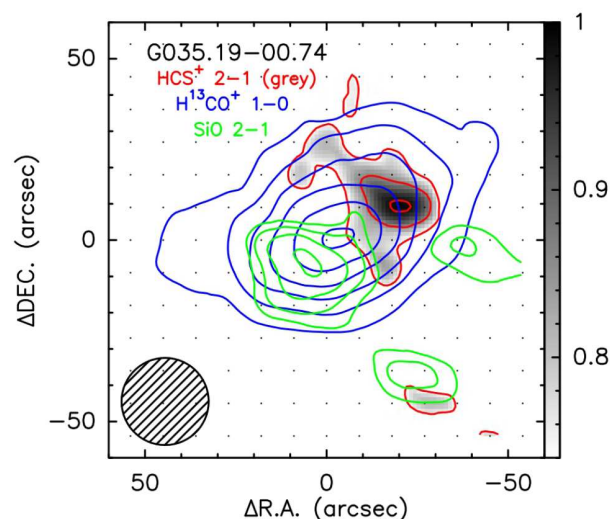


图1 大质量恒星形成区G035.19-00.74中 HCS^+ 2-1、 $H^{13}CO^+$ 1-0和 SiO 2-1三条谱线的流量积分强度空间分布图

Figure 1 Spatial distribution of the flux-integrated intensity for the HCS^+ 2-1, $H^{13}CO^+$ 1-0, and SiO 2-1 molecular emission lines observed in the massive star-forming region G035.19-00.74

似乎能示踪不同的恒星形成区的位置,暗示着它们有着不同的化学途径, S和O在此类分子中的特性不太相似. 为了探讨含硫分子HCS⁺的增丰与激波可能存在的关系, 我们利用强激波的示踪分子SiO(图1中的绿色曲线)与HCS⁺进行对比, 发现在G035.19-00.74中, HCS⁺与SiO的空间分布也有明显的错位. 后续大样本高空间分辨率的观测, 进行S与O对照分子(比如HCS⁺和H¹³CO⁺、H₂CS和H₂CO等)的空间分布的信息分析, 进而探讨这

些含硫分子化学起源, 将十分有效.

对于含氮分子, 未来的观测目标将聚焦于高分辨率的氮化物(比如NO并结合NH₃)的观测, 同时与其他分子(特别是有着化学关联的分子, 比如激波示踪物SiO)的谱线, 以深入理解NO分子的形成与破坏的天体化学过程, 从而更全面地了解星际化学和恒星演化的关键过程, 为探索生命起源和宇宙演化提供新的科学视角.

参考文献

- 1 Van Dishoeck E F. Astrochemistry: overview and challenges. *Proc Int Astron Union*, 2017, 13(S332): 3–22
- 2 Li J, Wang J, Lu X, et al. Propionamide (C₂H₅CONH₂): the largest peptide-like molecule in space. *Astrophys J*, 2021, 919: 4
- 3 Li J, Quan D, Wang J, et al. Tentative detection of cyanoformamide NCCONH₂ in space. *Publ Astron Soc Jpn*, 2024, 76: 54–64
- 4 Asplund M, Grevesse N, Jacques Sauval A. The solar chemical composition. *Nucl Phys A*, 2007, 777: 1–4
- 5 Jenkins E B. A unified representation of gas-phase element depletions in the interstellar medium. *Astrophys J*, 2009, 700: 1299–1348
- 6 Neufeld D A, Godard B, Gerin M, et al. Sulphur-bearing molecules in diffuse molecular clouds: new results from SOFIA/GREAT and the IRAM 30 m telescope. *Astron Astrophys*, 2015, 577: A49
- 7 Vastel C, Quénard D, Le Gal R, et al. Sulphur chemistry in the L1544 pre-stellar core. *Mon Not R Astron Soc*, 2018, 478: 5514–5532
- 8 Blake G A, van Dishoeck E F, Jansen D J, et al. Molecular abundances and low-mass star formation. 1: Si- and S-bearing species toward IRAS 16293-2422. *Astrophys J*, 1994, 428: 680–692
- 9 Luo R, Wang J Z, Zhang X, et al. Observational studies of S-bearing molecules in massive star-forming regions. *Astron Astrophys*, 2024, 691: A359
- 10 Lada C J, Forbrich J, Lombardi M, et al. Star formation rates in molecular clouds and the nature of the extragalactic scaling relations. *Astrophys J*, 2012, 745: 190
- 11 Spitzer Jr L. *Physical Processes in the Interstellar Medium*. New York: John Wiley & Sons, 2008
- 12 Goicoechea J R, Cernicharo J, Karska A, et al. The complete far-infrared and submillimeter spectrum of the Class 0 protostar SerpensSMM1 obtained with Herschel-Characterizing UV-irradiated shocks heating and chemistry. *Astron Astrophys*, 2012, 548: A77
- 13 Millar T J, Adams N G, Smith D, et al. The chemistry of SH⁺ in shocked interstellar gas. *Mon Not R Astron Soc*, 1986, 221: 673–678
- 14 Rybarczyk D R, Stanimirović S, Gusdorf A. Shaken or stirred: the diffuse interstellar medium with exceptionally high SiO abundance. *Astrophys J*, 2023, 950: 52
- 15 Esplugues G B, Tercero B, Cernicharo J, et al. A line confusion-limited millimeter survey of Orion KL-III. Sulfur oxide species. *Astron Astrophys*, 2013, 556: A143
- 16 Tychoniec L, van Dishoeck E F, van't Hoff M L R, et al. Which molecule traces what: chemical diagnostics of protostellar sources. *Astron Astrophys*, 2021, 655: A65
- 17 Fontani F, Roueff E, Colzi L, et al. The evolution of sulphur-bearing molecules in high-mass star-forming cores. *Astron Astrophys*, 2023, 680: A58
- 18 Tiefrunk A, Pineau des Forets G, Schilke P, et al. SO and H₂S in low density molecular clouds. *Astron Astrophys*, 1994, 289: 579–596
- 19 Woods P M, Occhiogrosso A, Viti S, et al. A new study of an old sink of sulphur in hot molecular cores: the sulphur residue. *Mon Not R Astron Soc*, 2015, 450: 1256–1267
- 20 Rivière-Marichalar P, Fuente A, Goicoechea J R, et al. Abundances of sulphur molecules in the Horsehead nebula-First NS⁺ detection in a photodissociation region. *Astron Astrophys*, 2019, 628: A16
- 21 Vidal T H G, Loison J C, Jaziri A Y, et al. On the reservoir of sulphur in dark clouds: chemistry and elemental abundance reconciled. *Mon Not R Astron Soc*, 2017, 469: 435–447
- 22 van der Tak F F S, Boonman A M S, Braakman R, et al. Sulphur chemistry in the envelopes of massive young stars. *Astron Astrophys*, 2003, 412: 133–145
- 23 Druard C, Wakelam V. Polysulphanes on interstellar grains as a possible reservoir of interstellar sulphur. *Mon Not R Astron Soc*, 2012, 426: 354–359
- 24 Jiménez-Escobar A, Caro G M M. Sulfur depletion in dense clouds and circumstellar regions-I. H₂S ice abundance and UV-photochemical

- reactions in the H₂O-matrix. *Astron Astrophys*, 2011, 536: A91
- 25 Garozzo M, Fulvio D, Kanuchova Z, et al. The fate of S-bearing species after ion irradiation of interstellar icy grain mantles. *Astron Astrophys*, 2010, 509: A67
 - 26 Goldsmith P F, Linke R A. A study of interstellar carbonyl sulfide. *Astrophys J*, 1981, 245: 482–494
 - 27 Charnley S B. Sulfuretted molecules in hot cores. *Astrophys J*, 1997, 481: 396–405
 - 28 Inostroza-Pino N, Palmer C Z, Lee T J, et al. Theoretical rovibrational characterization of the *cis/trans*-HCSH and H₂SC isomers of the known interstellar molecule thioformaldehyde. *J Mol Spectr*, 2020, 369: 111273
 - 29 Esplugues G, Fuente A, Navarro-Almida D, et al. Gas phase elemental abundances in molecular clouds (GEMS)-VI. A sulphur journey across star-forming regions: study of thioformaldehyde emission. *Astron Astrophys*, 2022, 662: A52
 - 30 Garozzo M, Fulvio D, Kanuchova Z, et al. The fate of S-bearing species after ion irradiation of interstellar icy grain mantles. *Astron Astrophys*, 2010, 509: A67
 - 31 Ward M D, Hogg I A, Price S D. Thermal reactions of oxygen atoms with CS₂ at low temperatures on interstellar dust. *Mon Not R Astron Soc*, 2012, 425: 1264–1269
 - 32 Vidal T H G, Wakelam V. A new look at sulphur chemistry in hot cores and corinos. *Mon Not R Astron Soc*, 2018, 474: 5575–5587
 - 33 McKellar A. Evidence for the molecular origin of some hitherto unidentified interstellar lines. *PASP*, 1940, 52: 187–192
 - 34 Meyer D M, Roth K C. Discovery of interstellar NH. *Astrophys J*, 1991, 376: L49
 - 35 Bell M B, Feldman P A, Travers M J, et al. Detection of HC₁₁N in the cold dust cloud TMC-1. *Astrophys J*, 1997, 483: L61–L64
 - 36 Liszt H, Lucas R. Comparative chemistry of diffuse clouds-II. CN, HCN, HNC, CH₃CN & N₂H⁺. *Astron Astrophys*, 2001, 370: 576–585
 - 37 Bergin E A, Tafalla M. Cold dark clouds: the initial conditions for star formation. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2007, 45: 339–396
 - 38 Dutrey A, Henning T, Guilloteau S, et al. Chemistry in disks-I. Deep search for N₂H⁺ in the protoplanetary disks around LkCa 15, MWC 480, and DM Tauri. *Astron Astrophys*, 2007, 464: 615–623
 - 39 Dislaire V, Hily-Blant P, Faure A, et al. Nitrogen hydrides and the H₂ ortho-to-para ratio in dark clouds. *Astron Astrophys*, 2012, 537: A20
 - 40 Le Gal R, Hily-Blant P, Faure A. Dark cloud chemistry of nitrogen hydrides with the Herschel Space Observatory. In: SF2A-2014: Proceedings of the Annual meeting of the French Society of Astronomy and Astrophysics, 2014. 397–401
 - 41 Visser R, Doty S D, Van Dishoeck E F. The chemical history of molecules in circumstellar disks-II. Gas-phase species. *Astron Astrophys*, 2011, 534: A132
 - 42 Turner B E. U93.174 - A new interstellar line with quadrupole hyperfine splitting. *Astrophys J*, 1974, 193: L83
 - 43 Turner B E. The physics and chemistry of translucent molecular clouds. IV. HCO⁺ and N₂H⁺. *Astrophys J*, 1995, 449: 635
 - 44 Caselli P, Walmsley C M, Zucconi A, et al. Molecular ions in L1544. II. The ionization degree. *Astrophys J*, 2002, 565: 344–358
 - 45 Fuente A, Martin-Pintado J, Cernicharo J, et al. A chemical study of the photodissociation region NGC 7023. XXVIIIth Rencontre de Moriond, 1993, 276: 473–488
 - 46 Herbst E, Green S, Thaddeus P, et al. Indirect observation of unobservable interstellar molecules. *Astrophys J*, 1977, 215: 503–510
 - 47 Herbst E, Klemperer W. The formation and depletion of molecules in dense interstellar clouds. *Astrophys J*, 1973, 185: 505–534
 - 48 Mezei J Z, Ayoub M A, Orbán A, et al. Dissociative recombination of N₂H⁺: a revisited study. *Eur Phys J Spec Top*, 2023, 232: 1967–1973
 - 49 Fontani F, Caselli P, Crapsi A, et al. Searching for massive pre-stellar cores through observations of N₂H⁺ and N₂D⁺. *Astron Astrophys*, 2006, 460: 709–720
 - 50 Schwarz K R, Teague R, Bergin E A. Line ratios reveal N₂H⁺ emission originates above the midplane in TW hydrae. *ApJL*, 2019, 876: L13
 - 51 Lobos N J L S, Ncube A M, Pantig R C, et al. Analyzing the effect of higher dimensions on the black hole silhouette, deflection angles, and PINN approximated quasinormal modes. *Ann Phys*, 2025, 473: 169906
 - 52 Lalanne M R. Gas phase formation and photodissociation spectroscopy of mass selected nitrogen and oxygen substituted carbon clusters. Doctor Dissertation. Berlin: Freie Universität Berlin, 2016
 - 53 Codella C, Viti S, Lefloch B, et al. Nitrogen oxide in protostellar envelopes and shocks: the ASAI survey. *Mon Not R Astron Soc*, 2018, 474: 5694–5703
 - 54 Simon R, Stutzki J, Sternberg A, et al. Chemical stratification in the Orion Bar region: CN and CS submillimeter observations. *Astron Astrophys*, 1997, 327: L9–L12
 - 55 Falgarone E, Troland T H, Crutcher R M, et al. CN Zeeman measurements in star formation regions. *Astron Astrophys*, 2008, 487: 247–252
 - 56 Turner B E, Gammon R H. Interstellar CN at radio wavelengths. *Astrophys J*, 1975, 198: 71–89
 - 57 Green S, Chapman S. Collisional excitation of interstellar molecules—Linear molecules CO, CS, OCS, and HC₃N. *Astrophys J Suppl Ser*, 1978, 37: 169–194
 - 58 Herbst E, Leung C M. Effects of large rate coefficients for ion-polar neutral reactions on chemical models of dense interstellar clouds. *Astrophys J*, 1986, 310: 378–382

-
- 59 Liszt H S, Turner B E. Microwave detection of interstellar NO. [Astrophys J](#), 1978, 224: L73
- 60 Ligterink N F W, Calcutt H, Coutens A, et al. The ALMA-PILS survey: stringent limits on small amines and nitrogen-oxides towards IRAS 16293–2422B. *Astron Astrophys*, 2018, 619: A28
- 61 Snyder L E, Kuan Y J, Ziurys L M, et al. New 3 millimeter observations of interstellar HNO—Reinstating a discredited identification. [Astrophys J](#), 1993, 403: L17
- 62 Ziurys L M, McGonagle D, Minh Y, et al. Nitric oxide in star-forming regions—Further evidence for interstellar N-O bonds. [Astrophys J](#), 1991, 373: 535–542
- 63 Coutens A, Ligterink N F, Loison J C. The ALMA-PILS survey: first detection of nitrous acid (HONO) in the interstellar medium. *Astron Astrophys*, 2019, 623: L13
- 64 Hily-Blant P, Walmsley M, Des Forêts GP. Nitrogen chemistry and depletion in starless cores. *Astron Astrophys*, 2010, 513: A41
- 65 Chen J H, Goldsmith P F, Viti S, et al. *Herschel* HIFI observations of O₂ toward orion: special conditions for shock enhanced emission. [Astrophys J](#), 2014, 793: 111
- 66 Hatchell J, Thompson M A, Millar T J, et al. Sulphur chemistry and evolution in hot cores. *Astron Astrophys*, 1998, 338: 713–722

Summary for “银河系内恒星形成区中含硫和含氮分子观测研究进展”

Observations of sulfur and nitrogen molecules in star-forming regions of the Milky Way

Rui Luo^{*}, Yani Xu & Junzhi Wang^{*}

Guangxi Key Laboratory for Relativistic Astrophysics, School of Physical Science and Technology, Guangxi University, Nanning 530004, China

^{*} Corresponding authors, E-mail: luorui1120@st.gxu.edu.cn; junzhiwang@gxu.edu.cn

Astrochemistry investigates the radiation and absorption features of molecules in the interstellar medium (ISM) through a multidisciplinary framework encompassing astronomical observations, laboratory experiments, and theoretical modeling. Core methodologies focus on determining elemental and molecular abundances, analyzing reaction networks, and studying molecular formation and destruction processes to decode the structure, dynamics, and evolution of molecular clouds. To date, over 300 molecular species have been identified in interstellar environments, with the detection of complex organic molecules (COMs) representing a major research frontier. While COMs are synthesized from simpler precursors via chemical pathways, even fundamental mechanisms governing basic molecular species remain poorly constrained. We adopt S-bearing and N-bearing molecules as probes to unravel the chemical complexity of the ISM. Sulfur and nitrogen are critical elements for star formation and interstellar chemistry, serving as key tracers of physical and chemical processes.

We synthesize observational and theoretical advancements in understanding S-bearing and N-bearing molecules within star-forming regions. S-bearing species, such as carbon monosulfide (CS), are widely employed to trace high-density molecular clouds. Molecules like hydrogen sulfide (H_2S), sulfur monoxide (SO), and sulfur dioxide (SO_2) act as shock tracers while S-bearing species (e.g., SO, H_2S , CS, and OCS) liberated from ice mantles are pivotal indicators of hot cores in Class 0 protostellar systems of solar-like masses. Despite extensive efforts, sulfur chemistry in star-forming regions remains enigmatic, particularly the dominant reservoirs of sulfur in dense cloud cores. Nitrogen, existing in forms such as ammonia (NH_3) and nitric oxide (NO), is crucial for probing dense gas dynamics and magnetic fields in these regions.

We present a large-sample analysis of S-bearing molecules in late-stage massive star-forming regions. A robust linear correlation was identified among the abundances of H_2S , thioformaldehyde (H_2CS), and thiomethylum (HCS^+) across 51 sources, with H_2CS and HCS^+ displaying the strongest relationship. A three-phase gas-dust-ice chemical model was developed to interpret these findings, yet simulations failed to fully replicate observations. The detection of SiO 4-3 emission lines revealed weak correlations between SiO and $\text{H}_2\text{S}/\text{H}_2\text{CS}/\text{HCS}^+$ abundances, suggesting that shock-driven processes must be integrated into sulfur chemistry models to resolve discrepancies. Notably, the current dataset relies on single-point observations; spatially resolved mapping is imperative to advance our understanding of chemical distributions.

Ongoing mapping observations of 22 late-stage massive star-forming regions using the IRAM 30m millimeter-wave telescope have uncovered spatial misalignments between H^{13}CO^+ and HCS^+ distributions in select sources. Despite shared chemical traits among S/O-bearing molecules, these species trace distinct spatial zones, implying divergent chemical pathways. For nitrogen chemistry, NO exhibits anomalously high abundances in specific environments compared to other N-bearing species. In low-velocity shock regions, NO directly reflects oxygen molecular abundances, positioning it as a unique tracer of oxygen chemistry. However, observational constraints on NO remain limited, underscoring the need for high spatial-resolution studies (e.g., ALMA, JWST) to elucidate its role in astrochemical networks. Future efforts must combine multi-scale observations with advanced chemical models to unravel the lifecycle of molecular clouds and the origins of chemical complexity in the universe.

astrochemistry, interstellar medium, S-bearing molecules, N-bearing molecules

doi: [10.1360/TB-2024-1371](https://doi.org/10.1360/TB-2024-1371)