

文章编号: 1000-8349(2012)03-302-14

恒星形成区红外消光规律讨论

冯 翀^{1,2}, 李金增¹

(1. 中国科学院 国家天文台, 北京 100012; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要: 恒星形成区的红外消光研究不仅有利于增进对年轻天体物理性质的了解, 也是进一步研究尘埃颗粒特性的基础。首先, 简述了星际消光规律与红化的概念、红外观测研究的发展历史、相关领域的研究进展以及恒星形成区消光规律的研究意义。然后, 重点回顾了观测数据常用分析方法、常用观测天区和研究波段, 并在总结已有研究结果的基础上, 对基于测光的3种恒星形成区消光研究方法, 包括RC法、色余比法和参考天区法进行了分析、优缺点讨论和比较。最后, 对消光与红化研究领域已有的研究成果和主要前沿问题进行了概述。

关键词: 消光与红化; 色余比; 参考天区

中图分类号: P155 文献标识码: A

1 引言

1.1 星际消光规律与红化的概念

星际空间中存在原子、分子和尘埃等各种物质, 其中星际尘埃会对天体发出的电磁辐射进行吸收和散射, 这是造成星际消光的主要原因。已有观测表明, 星际消光的数值不仅随距离和视线方向变化, 而且对波长也具有选择性, 星际消光在光学和紫外波段比在红外波段更严重, 从而导致观测到的天体颜色偏红, 也就是星际红化现象。星际消光随波长的分布规律, 称为“消光规律”^[1, 2]。星际消光的数值通常以 A_λ 表示, 该参量表示在波长 λ 处由星际消光所造成的电磁辐射强度减弱的程度。 $A_\lambda \equiv -2.5 \lg(F_\lambda/F_\lambda^0)$, 式中 F_λ^0 代表未受消光影响到达观测者的辐射流量, F_λ 代表观测者实际观测到的辐射流量^[3]。因为天体的距离不是直接可观测, 所以直接测量消光较难, 因此常用比对方法(pair method), 将红化比(即色余比)换算成 A_λ ^[4]。比对方法是指将两个具有相同光谱型、一个受到消光影响而另一个未受到消光影响的恒星光谱进行比对, 根据色余来给出消光情况, 因而也常称为色余法^[1, 5]。消光规律的表达形式如下:

$$\frac{E(\lambda - V)}{E(B - V)} = \frac{(\lambda - V) - (\lambda - V)_0}{(B - V) - (B - V)_0} = \frac{A_\lambda - A_V}{A_B - A_V} = \left(\frac{A_\lambda}{A_V} - 1\right)R_V \quad (1)$$

收稿日期: 2011-12-12; 修回日期: 2012-03-27

资助项目: 国家自然科学基金(11073027); 科技部国际合作重大项目(2010DFA02710)

或者 $\frac{A_\lambda}{E(B-V)} = R_V \left(\frac{A_\lambda}{A_V} \right)$, 其中 $R_V \equiv \frac{A_V}{E(B-V)}$ 。

1.2 红外观测的历史

对于星际消光, 在光学和紫外波段的观测研究较为透彻且已有精确的消光曲线给出。然而, 在红外波段, 由于受到红外探测设备的局限, 红外消光的研究一直局限在一些小的天区范围中进行, 这在一定程度上限制了红外消光研究的深入开展。近年来红外探测技术的迅猛发展给红外消光研究带来了新的契机, 尤其是红外波段全天巡天 2MASS、局域深度巡天 UKIDSS 和 GLIMPSE 等项目给相关领域研究提供了海量观测数据资料, 使得红外消光的观测研究不再受到观测天区的局限^[6]。

1965 年, 美国用 1.5 m 口径的地面红外望远镜, 在 3.2 μm 波段首次进行了红外巡天。然而, 地球大气对红外辐射的吸收以及大气本身在该波段强烈的噪声, 使得人们认识到中、远红外波段的观测必须依赖空间探测设备才能进行。1983 年, IRAS 在 12、25、60 和 100 μm 共 4 个波段进行了首次空间中、远红外观测, 这次观测给出了年轻天体、恒星诞生以及银河系中心细节等重要信息, 同时给出了大量红外波段的观测研究数据资料, 大幅提高了人们对红外波段的认识。红外天文的迅速发展使得所覆盖的观测波段进一步扩大至 0.7~350 μm , 各种多波段、覆盖广的空间观测计划也使红外波段数据的精度和数量得到大幅提高^[7]。1989 年, COBE 卫星在多个红外波段给出了全天空亮度, 发现了可能与星系形成相关的不均匀宇宙背景辐射。1995 年, IRTS 和 ISO 又相继在更宽的波段和更高灵敏度的条件下进行了红外波段的观测^[8]。1997 年, 2MASS 开始进行覆盖全天的近红外波段巡天观测, 该项目不仅描绘了银河系大尺度结构、普查了亮于 13.5 等的星系、统计了极端偏红和光学波段消光严重的稀有天体, 还给出了点源表和展源表等测光数据, 这些都是 1990 年以来主要的数据扩充来源。Spitzer 和 Herschel 已于 2003 年和 2009 年相继发射, 至今 AKARI 和 WISE 的数据也已释放, 这些设备正不断给出更丰富、更高精度的红外数据^[3, 9]。

1.3 星际消光规律的研究进展

人们利用光学和紫外波段数据开展了大量研究, 得到了对应波段较为清晰的星际消光规律: (1) 消光强度在远紫外随波长的倒数迅速增加; (2) 在波长为 2175 \AA 处呈现出较大的驼峰结构; (3) 从光学到远紫外的消光是随天区环境变化的, 具体可参见图 1^[1, 10]。值得说明的是, 2175 \AA 消光驼峰是星际消光曲线在紫外波段非常重要的特征, 其强度和宽度随天区环境而变化, 但峰值波长则几乎不变。2175 \AA 消光驼峰于 1965 年由 Stecher 首次探测到, 起初认为这是石墨颗粒特征线。直到 20 世纪 90 年代, 人们才认识到该特征来自芳香的含碳物质, 即类似 PAH 分子的混合物, 但其具体证认还需要进一步研究。目前有大量理论工作都是围绕 2175 \AA 消光驼峰展开的^[11-14]。

相较于光学和紫外波段, 红外波段消光规律在不同视线方向上的变化要小得多, 然而, 红外波段的消光规律还不是很清楚^[15-18]。1982 年 Burstein 和 Heiles 用 HI/ 星系计数方法得到了银河系红化图。1998 年 Schlegel 等人又综合 COBE、DIRBE 和 ISSA 等数据给出了

全天范围 $100\ \mu\text{m}$ 尘埃红外发射图, 据此可得到尘埃密度分布图, 并以此来估计银河系的星际消光, 这些结果为估计银河系各视线方向红外消光提供了重要依据^[2, 19, 20]。对于河外星系, 人们仅对近邻星系大小麦哲伦云的光学、紫外消光规律有较为深入的了解。大麦哲伦云中消光曲线只存在较弱的 $2175\ \text{\AA}$ 消光驼峰; 在小麦哲伦云的消光研究中, 大多数视线方向上的消光曲线没有或只有极弱的 $2175\ \text{\AA}$ 消光驼峰。已有研究指出, 这可能是由于其极端的天体物理环境导致了其中的尘埃破碎率较高, 或者是其金属丰度低而造成尘埃形成率低, 其尘埃颗粒大小比银河系弥散星际介质中的要小^[2, 21, 22]。

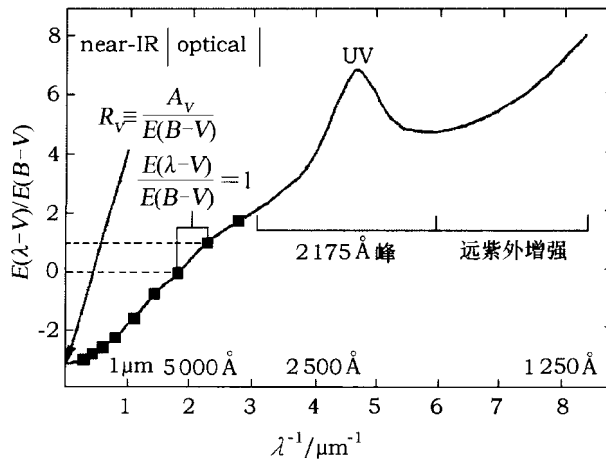


图1 光学和紫外波段的消光曲线 (银河系平均消光规律 $R_V = 3.1$)^[10]

1.4 恒星形成区红外消光规律的研究意义

对于被星际尘埃遮蔽的天体, 红外波段是重要的观测研究波段。红外消光的测定是修正实测结果的必要根据, 有助于还原天体的内禀颜色和能谱分布, 以及进一步研究星际尘埃的尺寸、物质成分和分布等^[1, 6, 23, 24]。目前, 红外消光 (包括吸收和散射) 规律、星际尘埃颗粒的性质和分布都是重点研究内容。消光对波长的依赖关系是研究尘埃颗粒物理性质的重要依据, 也是进一步构建尘埃颗粒物理模型的基础^[3]。研究显示, 波长与消光的关系直接与尘埃颗粒的物理性质相关, 如, 尘埃颗粒大小、化学组成及颗粒中是否有冰幔结构等^[16, 25]。已有文献表明, 不同的消光曲线 R_V 值表征着不同尺度的尘埃颗粒, R_V 较大的消光曲线表示该视线方向上的尘埃颗粒大小比平均尺寸大, 反之亦然^[3]。一般致密分子云的消光曲线 R_V 值较大, 而弥散星际介质的较小。由此可见, 根据消光曲线, 可分析得到尘埃颗粒尺寸及分布, 并进一步推算该天区尘埃的分布情况。通过对银心方向的红外消光研究, 可得具体视线方向上的消光数值及不同波长下的消光结果, 这些结果是研究银心附近的恒星分布密度、恒星大气模型以及红外波段实际辐射亮度等的依据^[26, 27]。研究高银纬天区的尘埃颗粒性质将会增加人们对高银纬星团气体性质的了解^[28]。另外, 也有对局部天区进行消光规律的针对性研究, 如具体分析星暴星系核和活动星系核中的年轻恒星这类被严重遮蔽的天体^[29]。对于分子

云, 可基于背景场星的红化情况, 给出尘埃密度分布图, 推测分子云结构分布。在光学消光严重的恒星形成区和暗云区, 也可将近中红外波段观测作为研究手段, 对更致密的中心区进行研究^[30]。红外消光规律的研究对分子云的结构与演化、恒星形成与演化、星际介质、银河系结构、星系等重要前沿课题都有非常重要的意义^[10, 31]。

恒星形成区消光较严重, 其中的年轻星体大多为尘埃所包围, 对这类天区进行红外消光观测和研究, 有助于增进人们对中心年轻星体物理性质及演化状态的认识。另外, 恒星形成区中既存在伴随着恒星形成过程的已有尘埃, 也存在着源自年轻恒星的星风尘埃。红外消光规律的计算, 有助于加深人们对这些尘埃颗粒物理性质、化学组成和分布特性的认识。通过观测恒星形成区, 获得其消光曲线, 可以分析尘埃颗粒的性质和分布, 并对恒星的形成和早期演化过程开展进一步的深入研究^[32, 33]。

随着观测技术的进步以及数据量的积累, 红外消光规律的研究日趋深入。目前, 在低银纬天区, 通常对已知光谱型恒星进行多色测光, 利用光谱型与颜色的对应关系, 确定每颗星的消光情况, 给出 R 和 A_V 等值。对于高银纬天区, 虽难以给出和低银纬天区一样精确的消光结果, 不过利用 Schlegel 等人所用方法给出的全天范围消光估计结果也已经较为准确^[20]。但对于恒星形成区, 局域消光较复杂且随视线方向变化, 而且由于年轻星团成员星大多未到主序, 光谱型与颜色的关系难以准确确定, 一般的多色测光求解消光的方法并不适用。

本文将在回顾已有研究结果的基础上, 对 3 种常用的恒星形成区红外消光规律推算方法进行分析和比较。着重从测光角度入手, 列举不同的数据分析方法, 讨论各种方法的差异。第 2 章列举常用观测波段和天区, 并逐一给出对于 3 种方法的分析; 第 3 章对 3 种方法的优缺点进行比较和讨论; 第 4 章为总结和工作展望。

2 基于测光的常用红外消光规律研究方法

2.1 研究波段和天区

在近中红外消光规律的研究中, 主要涉及 $1.24 \mu\text{m}$ (J)、 $1.66 \mu\text{m}$ (H)、 $2.16 \mu\text{m}$ (K)、 $3.6 \mu\text{m}$ 、 $4.5 \mu\text{m}$ 、 $5.8 \mu\text{m}$ 和 $8.0 \mu\text{m}$ 等波段^[4, 6, 15, 16, 23, 34]。早期的研究主要集中在银心方向, 大多数研究结果都认为该天区在近红外波段的消光规律可用幂律谱表示, 且在 $3 \mu\text{m}$ 水冰吸收特征处轻微上升, 在 $9.7 \mu\text{m}$ 出现较明显的硅酸盐吸收特征。随着观测技术的不断进步和数据量的积累, 研究天区逐渐扩展到了更大范围的银盘和诸多暗云区^[4, 6, 15, 16, 23, 25, 34]。观测波段的拓展和天区范围的扩大, 有效促进了大天区范围和多个视线方向上红外消光规律的对比分析与研究。

2.2 数据筛选和分析

以红团簇星或红巨星作为研究红外消光规律的探针, 建立有效的选源标准, 进行样本筛选并通过拟合来进行红外消光规律的分析与研究。选源规则一般对测光精度、极限星等、颜色等参数进行限制, 以获得可靠的数据样本; 而且, 特定天区中选取的样本数量也有相应的

要求,以保证统计分析结果的有效性。需要说明的是,红外消光探针的选择、不同的选源标准以及研究方法的选择都会对研究结果产生一定的影响。所选择本源既要具有相对一致的恒星大气性质,还要在观测天区中普遍存在,以便进行统计分析^[6]。以下介绍3类较常用的数据筛选和分析方法。

2.2.1 RC法

RC法是以红团簇星(RC)为探针,从“星团法”改进而来的方法。“星团法”中假定消光导致的色余为常数,但考虑到具体天区位置和尘埃性质差异等导致消光变化的因素,在RC法中更为合理地用消光曲线代替常数。该方法最初由Wozniak和Stanek于1996年提出,后经Udalski和Sumi进一步推广,Nishiyama等人将其应用于红外波段的消光规律研究^[16]。红团簇星在银河系核球和银心大量分布,常用于研究银河系的消光分布和结构,已得到较好的研究结果^[27]。虽然红团簇星星周可能会有少量尘埃,但由于成员星颜色非常接近,所以对红外消光规律结果影响较小,因此,可以认为红团簇星的红化主要源自星际尘埃的消光影响^[1]。

红团簇星的光度和颜色分布窄而集中,而且仅与年龄、金属丰度间存在弱相关,可假设小范围天区内的红团簇星具有相对一致的平均光度、距离和颜色,是同一性很好的消光和红化探针。已有研究表明,在小范围天区内红团簇星并不会体现出差异性^[4, 23, 27]。在颜色星等图(CMD)中红团簇星本应呈垂直条状分布,但由于视线方向尘埃的消光和红化作用,使红团簇星的分布轨迹出现倾斜,不过其分布区域较为独立,仍能被区分出,所以还是可以被选作这个距离尺度上的标准烛光^[6]。

具体做法是,先划分子天区;分别对各子天区作出CMD,确定红团簇星在CMD中集中分布的范围,提取出红团簇星数据;针对各子天区的红团簇星数据,分别对光度和颜色进行高斯拟合,由此得到星等和颜色的峰值,该步骤可见图2^[23]。由于各视线方向的消光程度不同,所以各子天区的星等峰值也存在差异。为保证所选数据的可靠性,一般只选用星等峰值比极限星等(10σ)亮1个星等的子天区来进行估算,以避免消光严重的天区所带来的影响。峰值不明显的子天区也要剔除。最后,以各子天区的颜色峰值和星等峰值为横、纵坐标,作出CMD;利用最小二乘法进行拟合并得到斜率,即 $k = \frac{A_{\lambda_2}}{E(\lambda_2 - \lambda_1)}$ 。假设红团簇星的星等和颜色变化完全是由红外消光造成的,则可得到相对消光值,如 $A_J : A_H : A_K$ 等。

在RC法的基础上,利用红巨星(RGB)有效温度相近、内禀色指数变化小、在红外波段较亮而容易观测的特点,Nishiyama等人又发展出了RC RGB法^[4, 24, 35]。该方法假设在以银心为中心的天区内,红团簇星和红巨星的空间分布一致,且红团簇星具有相近的平均光度和距离,而红巨星的色只与光度弱相关。因此,红团簇星在该方法中被作为消光研究探针,红巨星则作为红化研究探针,由此来确定银心方向的星际红化和消光情况。已有研究结果表明,在银河系核球天区,红巨星金属丰度的变化并未对其分布斜率产生明显的影响。该方法假设各天区都具有相同的红巨星分布斜率,是针对观测天区中无法确定红团簇星具体范围时的等效可用方法。通过比较已有结果可知,该方法和RC法所得结果一致,说明引入红巨星

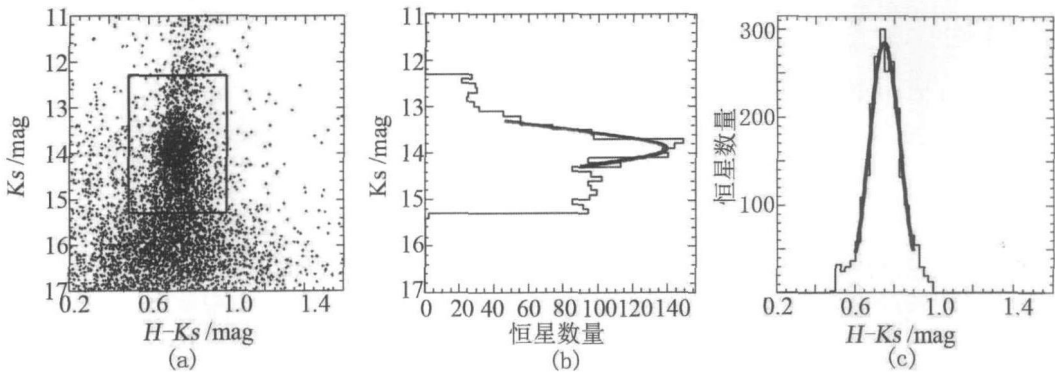


图 2 (a) 为子天区的 CMD, 矩形框内为选出的红团簇星样本; (b) 为所选样本源的光度函数拟合; (c) 为所选样本源颜色的高斯拟合结果^[23]

开展相关研究的合理性。

类似于 RC 法, RC-*RGB* 法首先也要划分子天区; 作出各子天区红团簇星的星等分布图, 而后进行光度函数拟合 (常用高斯拟合), 得出对应的星等峰值, 作为消光程度的指示; 然后, 确定各子天区的红巨星颜色, 通过对子天区分别作出的 CMD, 以单位星等 (0.5 等) 进一步划分单元格; 对每个单元格内的数据作颜色分布图, 并拟合出该子天区、该单元格的红巨星颜色峰值; 将该子天区内各单元格的峰值重新描点于 CMD 中, 并对这些颜色峰值进行直线拟合, 求出该子天区对应的斜率, 该步骤可见图 3^[4]。同时也要剔除无法得到明显峰值, 或者样本源过少的子天区。最后作出各子天区的斜率值分布图, 再次通过拟合得到斜率的峰值。所得斜率值与 RC 法求得的斜率类似, 然后也可得出相对消光值。

由此得到的相对消光值较为精准, 且便于比较。通过选取多个天区, 还可分别求出各视线方向上的比值进行比对研究。Nishiyama 等人就在 2008 年把银心天区分成 4 个象限, 分别比较红外消光情况, 结果显示 4 个方向存在微小差异^[4, 16, 23]。

2.2.2 色余比法

色余比法是利用不同波长的观测色余和本征色余比值来表示视线方向的红外消光规律

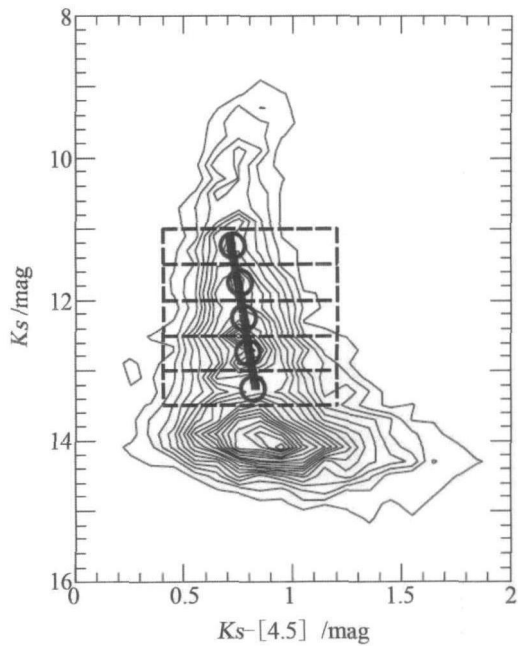


图 3 对 CMD 中每个单元格分别求解颜色峰值, 并拟合出斜率^[4]

和尘埃柱密度。定义色余比为 $C_\lambda \equiv \frac{E(H-\lambda)}{E(H-K_S)} = \frac{(H-\lambda) - (H-\lambda)_0}{(H-K_S) - (H-K_S)_0}$ ，式中 $(H-\lambda)$ 和 $(H-K_S)$ 表示观测数据。基于红团簇星普遍分布于银盘且颜色和金属丰度相关性弱的特点，选其作为探针，并假设 $(H-K_S)_0 = 0.10$ ，以 $E(H-K_S)$ 为横坐标、 $E(H-\lambda)$ 为纵坐标的色余关系图中，截距和斜率分别为 $(H-\lambda)_0$ 、 C_λ ^[6, 36]。

具体步骤也是利用 CMD 进行样本选取。首先，对原始数据进行测光精度和颜色限制，以剔除不合格的数据；然后，参照主序星、红团簇星和红巨星等的非红化 CMD，确定被剔除矮星和红化红巨星的范围；对照该范围扣除观测所得 CMD 中的对应数据，并根据分布密集程度选取红团簇星源，具体可参见图 4^[6]。依据挑选出的样本源绘出各子天区的双色图，得到各子天区的斜率和截距，在此基础上可进一步研究斜率、截距与银心角距等位置因素的关联。Zasowski 等人的研究结果表示，得到的 C_λ 结果符合现有全天消光趋势，而且 $(H-\lambda)_0$ 也符合模型给出的数值，这暗示了子天区中的红团簇星并无明显差异。另外，还可根据 $\frac{A_\lambda}{A_{K_S}} = \frac{A_H}{A_{K_S}} - (\frac{A_H}{A_{K_S}} - 1)C_\lambda$ 给出 $\frac{A_\lambda}{A_{K_S}}$ ，便于结果的比较^[6, 36]。

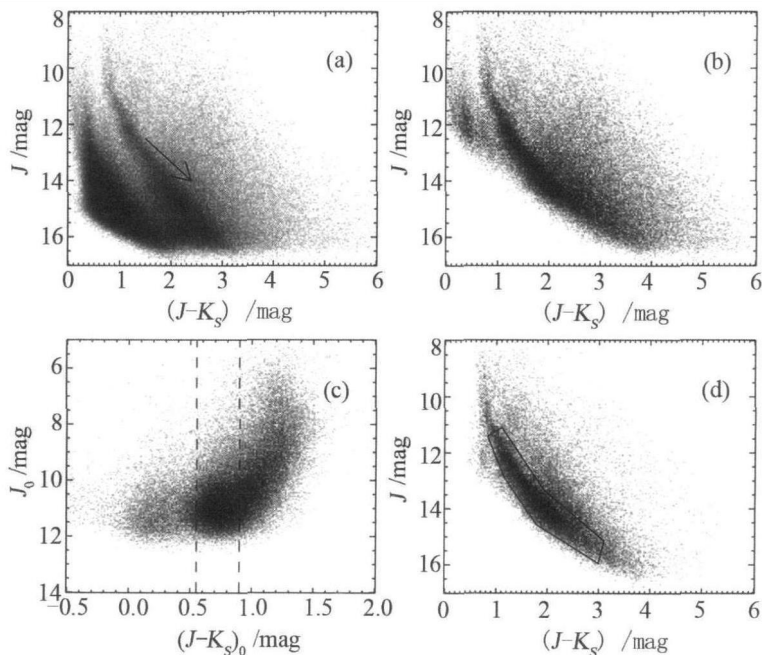


图 4 (a) 为完整数据源的 CMD，箭头指示了红团簇星的主要分布区域；(b) 为剔除精度不合格的数据，并根据颜色限制所得剩余源的 CMD；(c) 为主序星和红团簇星等源的非红化 CMD，用虚线表示需要排除的矮星和红巨星源的范围；(d) 为扣除非红化源后的 CMD^[6]。

根据色余比的定义，还可以利用其他选源标准进行分析。以分子云为例，利用从色余比法拓展出的特定参考源法，进行红外消光规律的研究。特定参考源方法是指根据确定类型的参考源，通过对比其在 CMD 上对应的典型分布区间，从观测数据中进行选用和剔除的方法。要得到准确的红外消光规律，需要高准确度的交叉认证，同时仔细地挑选数据源。以下方法

将通过剔除年轻天体 (YSO) 和背景星系来获得可靠的数据样本。

在观测子天区的双色图中发现亮源较集中地呈直线分布, 而暗源的分布趋势则不太明显。剔除暗弱的星系也是必要的步骤。对比完整数据源和剔除了已知 YSO 数据的双色图, 发现两者斜率存在差异, 与文献中提到的 YSO 分布于双色图中红化区域右侧的现象相符, 说明了剔除 YSO 的必要性。通过选用基本只有恒星和星系的北银极天区数据, 得到可靠性较高的参考源, 将其绘于 CMD 中, 可以明确地区分出恒星、YSO、星系和其他天体, 见图 5(a)^[25]。根据 YSO 和星系的分布范围进行剔除, 最后可得到较为干净恒星分布情况。将选出的恒星和被剔除源绘于双色图上对比, 可见两者分布基本独立, 这也证明了剔除步骤的必要性和有效性。然后进行线性拟合, 在双色图中将恒星和被剔除源分开。拟合出的直线也就是选源标准的具体表达形式, 见图 5(b)^[25]。根据已有数据, 对不同波段给出相应的选源标准, 将提高消光数据的可靠性^[25]。另外, 由于围绕年轻恒星的尘埃盘和演化晚期恒星的星周包层会造成额外的星周尘埃消光, 所以还须剔除有尘埃盘的 YSO、星周包层较厚的 AGB 恒星、前景场星和背景早型恒星等^[34]。

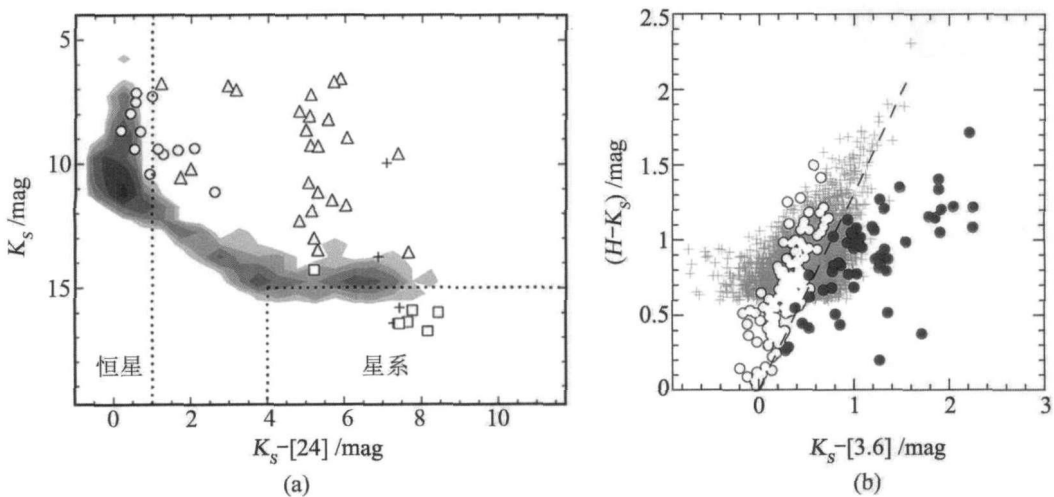


图 5 (a) 圆圈表示恒星, 正方形表示星系, 三角形表示 YSO, 正号表示其他源, 虚线为确定的选源区域; (b) 灰色正号表示观测数据, 白圈表示“已知”恒星, 灰圈表示星系, 虚线将两者区分, 也就是选源标准^[25]。

色余比法给出的具体消光结果可用相对消光值、色余比表示, 也可利用等值线对应空间位置作出消光分布图, 或者经过加权计算作出颜色密度分布图 (density distribution of colors) 和色余密度分布图 (density distribution of color excesses), 并结合具体的天区物理性质和尘埃颗粒模型等, 进行子天区结构的物理性质解释^[34]。

2.2.3 参考天区法

参考天区法是通过选取目标天区附近消光较弱的天区作为零消光天区, 以此为参考天区分别求出各目标天区的色余, 由色余关系图进行斜率拟合, 从而得出红外消光规律。该方法

最早由 Kenyon 等人于 1998 年提出 (简称为 KLB 98), 经常用于研究暗云区消光, 该方法假设被暗云遮挡的恒星和参考天区的恒星有相同的分布^[34]。在选择参考天区时, 要避开暗云区, 选择消光较弱的天区; 对于参考天区内源的星等和颜色分布可进行检验 (如 K-S 检验), 以确保统计上的不显著性, 然后再根据天区情况, 剔除主序前星等源^[37]。已有研究通过对比不同参考天区的双色图, 发现不同视线方向的参考天区红化程度存在轻微差异, 表明了选择合适参考天区的必要性。

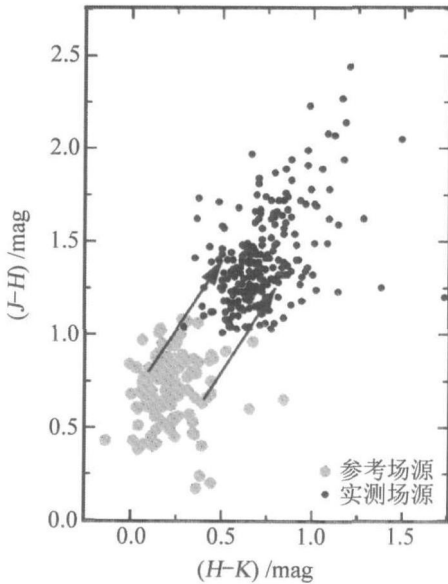


图 6 图中黑圈表示目标天区中的数据, 灰圈表示参考天区中的数据^[34]

首先, 在观测天区内, 避开暗云和致密星际介质集中区, 选择恒星分布均匀且低密度处作为参考天区。通过对比参考天区和目标天区的双色图, 会发现参考天区中源的分布较靠近主序和巨星轨迹, 而且可粗略看出与目标天区数据源之间存在的红化箭头, 如图 6 所示, 这可验证参考天区源主要是背景场星, 也可通过计算场星密度作进一步确定^[34]。

根据色余定义, $E_{\lambda_1 - \lambda_2} = (\lambda_1 - \lambda_2) - (\lambda_1 - \lambda_2)_0$, 式中 $(\lambda_1 - \lambda_2)$ 表示实测源的色指数, $(\lambda_1 - \lambda_2)_0$ 表示本征色指数, 在此方法中用参考天区源的色指数代替本征色指数, 即假设参考天区中的背景场星远离暗云, 未受消光影响。大量的参考天区数据可以给出较好的平均消光结果, 但该方法仅适用于探测亮星的情况。对于参考天区 j 和实测天区 i 可得 $E_{ij, \lambda_1 - \lambda_2} = (\lambda_1 - \lambda_2)_i - (\lambda_1 - \lambda_2)_j$, 可通过 $\langle E_{i, \lambda_1 - \lambda_2} \rangle = \frac{1}{N_0} \sum E_{ij, \lambda_1 - \lambda_2}$ 计算目标天区 i 的消光情况, 其中 N_0 是参考天区中的恒星个数。将各天区求得的色余作成色余图, 进行直线拟合, 得到斜率; 另外, 也可根据 KLB98 方法提出的加权计算进一步作出颜色密度分布图, 通过求解等高线脊来确定红化箭头的斜率。该处理方法便于对不同视线方向的红外消光规律进行比较, 有利于特殊天区和暗云的结构分析和研究, 还可以进一步拓展到尘埃颗粒物理模型的对应分析^[15, 34, 37]。

3 优缺点对比讨论

数据源和方法的选择会影响红外消光规律研究结果的准确性。误差主要来自观测数据本身、所用假设和拟合过程等。

一方面要对数据进行测光精度、颜色和极限星等等参数限制, 提高可靠性; 另一方面要建立合适的选源标准, 剔除非恒星的源, 如星系等^[25]。不合格数据会造成双色图中红化箭头的不清晰。尽量选择在同一天区内大量存在, 且具有相同内禀色指数的恒星作为样本源。大

量的源可以提高结果的可信度, 相同的内禀色指数可以限制弥散程度。以 RC 法为例, 通过参考文献给出的极限星等下限, 剔除过于暗弱的源, 经过计算确认, 源的数量、完整性与星等峰值并无明显的相关性, 这表明该剔除步骤不仅不影响峰值求解, 还保证了数据质量。这是因为红团簇星星等分布本身的完整度相当高, 而且绝对光度校准才是误差的主要来源^[16, 27]。另外, 不同测光系统数据间的转换也值得注意, 其中包括系统的零点误差和系统内相对误差^[16]。Kenyon 等人早期得到的蛇夫 ρ 星云 (ρ Ophiuchi cloud) 和蝎虎座暗云 (Chamaeleon dark cloud) 消光曲线差异, 后经 Naoi 等人利用参考天区法发现, 该差异来源于不同测光系统间的偏差, 而非各天区的消光规律差异^[15, 34]。因此, 在研究中要进行不同测光系统间转换的步骤, 或者尽量采用同一测光系统的数据以避免这类误差。

方法的选择则需要根据具体的天体物理环境而定。早期消光研究曾用色差法 (color-difference, 简称 CD 法), 即用 $\frac{E(\lambda - \lambda_1)}{E(\lambda_2 - \lambda_1)}$ 和 λ^{-1} 的函数关系体现消光曲线的斜率, $E(B - V)$ 常用做正则化标准, 但大部分情况下 $R_\lambda = \frac{A_\lambda}{E(\lambda' - \lambda)}$ 中的 R_λ 只能从参考模型中插值外推, 所以红外波段 A_λ 的精确数值取决于 R_λ 的取值。但 RC 法可从观测数据给出 R_λ 的值, 再计算出 A_λ 数值, 这比外推法要精准很多。通过比较 RC 法与 CD 法的结果可知, 在某些波段 CD 法给出的结论变化较大, 其中可能有 CD 法本身的原因, 也可能是研究天区消光情况的各向异性导致的^[23]。

尽管 RC 法优于 CD 法和上文提到的“星团法”, 但仍有不足。首先, 红团簇星样本的选择需要经验的判断, 选源标准需要基于具体天区等多种因素考虑。比如由于内禀色指数和测光误差的影响, 红团簇星的弥散是随着视星等的变大而增大的, 所以不同天区对应的弥散宽度也不同^[1]。其次, 是由红团簇星源差异性造成的误差。在研究中, 一般假设子天区范围内的红团簇星具有相同距离和星等。尽管大量的红团簇星样本可以给出较好的结果, 但由于其亮度和金属丰度还是存在弱相关, 所以红团簇星的颜色和星等差异将是红外消光规律求解中的可能误差因素。而且对于相同距离的假设也需要参考实际的观测天区, 以免距离的差异成为消光结果的误差来源^[23]。不过已有结果也显示, 由于红团簇星亮度和金属丰度的相关性很弱, 所以对于金属丰度梯度不大的天区, 虽然红团簇星的距离可能并不完全一致, 但这种误差对结果影响较小。另外, 计算相对消光值 (如 $\frac{A_\lambda}{A_{K_S}} = \frac{A_H}{A_{K_S}} - \left(\frac{A_H}{A_{K_S}} - 1 \right) C_\lambda$) 时, 常需要假设一个参考相对消光值 (如 $\frac{A_H}{A_{K_S}}$)。研究表明, 在红团簇星集中分布的银盘天区中求解更长波段的消光规律, 利用假设的参考相对消光值计算的结果比色余比值曲线外推的结果要准确。但在应用于其他天区时需要注意, 由于弥散星际介质和恒星形成区等天区的物理性质不同, 所以引入不合适的参考相对消光值可能会带来比外推法更大的误差。由此可见, 在应用 RC 法和引入各种假设前, 需要先确定观测天区的金属丰度等具体物理属性。

当观测天区是大范围银盘时, 就不能引入“红团簇星具有相同距离^[4]”的假设来计算相对消光值, 考虑到无法单独计算每个视线方向上的参考值, 所以可选择色余比法。在该方法

中会引入常用值 (如 $\frac{A_H}{A_{K_S}} = 1.55$, 该值为 Indebetouw 等人针对银道面天区给出的平均值, 常被作为参考值来研究红外消光规律), 这会给结果带来一定的不确定性, 偏离真实值, 但并不会改变消光曲线的相对形状^[1, 36]。

针对大视场红外消光规律研究, 利用参考天区法可避免引入额外的假设和观测限制条件, 比如, 既不需要获得光谱型信息, 也不需要利用光学波段的消光规律外推。对于斜率拟合时可能会增大数据离散度的测光误差, 以及影响红化箭头绝对值的参考天区本身颜色这两项, 通过提高数据精度限制和剔除背景场中红外超, 可减小一部分误差。Kenyon 等人在 1998 年发现, 引入这两项修正可减少近一半的误差。但参考天区中颜色的实际分布还是会造成结果的误差。

以上这些方法在进行斜率拟合时, 大部分使用最小二乘法, 但也可用 ROBUST 拟合法, 后者更适合样本数目少而且离群值较多的情况。对不同的样本源情况, 选择合适的拟合方式, 将得到更接近真实的结果。而且, 在每次拟合中都剔除偏离较大的源, 也进一步提高了数据的质量^[1]。

除了第 2 章介绍的比对方法外, 还有红化统计法、恒星计数法和 SED 法等均可以用来分析红外消光数据^[38]。利用上述方法给出相对消光值后, 可以根据不同视线方向、银心角距等因素进行比较分析, 进一步研究物质分布以及尘埃颗粒性质等。对于参与了恒星形成和星系演化这些重要过程的星际尘埃, 红外消光规律研究是对其建立和检验尘埃颗粒模型的有效途径。目前对 $3.4 \mu\text{m}$ 处的 C-H 特征、 $9.7 \mu\text{m}$ 处的 Si-O 特征和 $18 \mu\text{m}$ 处的 O-Si-O 特征等的研究已经有了一定进展, 但更多细节的研究以及更加理想模型的建立还有待努力。李墨萍等人曾对各种天体物理环境中的硅酸盐观测证据及对应环境下硅酸盐的物理、化学性质进行了系统的介绍和讨论^[39]。研究结果均表明, 红外消光规律随视线方向变化, 不存在普适的红外消光规律, 是星际尘埃的尺寸和成分分布不均导致了这种变化^[10]。2009 年高健分析多天区消光结果发现, 中红外消光规律随银经坐标系统性变化, 与银河系的旋臂结构, 以及星际尘埃在远红外的辐射密切相关^[1, 24]。

4 工作展望

随着观测手段的进步和数据的积累, 关于近中红外消光规律的研究亦不断深入, 关注的焦点主要有: 红外消光规律是否普适, 是否随视线方向变化, 如何随视线方向变化以及相应的星际尘埃颗粒模型等^[1]。近几年利用比对法已经对不同环境下红外消光的平均值有了较好的估计, 众多研究结果表明, 对于银河系弥散星际介质, R_V 的典型值是 3.1, 即银河系平均消光。1~4 μm 近红外波段的消光曲线可以用幂律函数表达 (指数在 1.6~1.8 之间, 但也有超过 2 的情况), 4~9.7 μm 更长波段的消光规律斜率较小^[4, 5, 23, 38, 40]。区别于弱消光区域, 对于尘埃遮蔽严重的天体, 沿视线方向消光曲线的变化是不得而知的。一般研究认为在暗云和恒星形成区的 R_V 值要比平均值高, 在 4~5 之间^[29]。在星际物质稠密区域, 如暗云中心或者恒星形成区, 由于尘埃聚团或者冰幔包覆等原因, 导致尘埃颗粒变大, 进而影响消光曲

线的斜率。在一些特殊星云中还发现了红外消光与区域密度大小之间的关联^[6, 17, 25, 29, 30]。这些研究通常采用已知内禀颜色的天体, 如红团簇星和低质量流失 AGB 等作为红化背景标准烛光^[4, 36]。

20 世纪 90 年代初的研究大多关注低银纬天区, 最近人们则更多地利用高精度的巡天来观测高银纬、小质量且分布稀疏的星团^[28]。针对 Pipe 星云的研究表明, 其近红外波段的消光规律虽然由于天区不同存在微小差异, 但大部分符合幂律关系。在中红外波段也给出了可能普适银盘附近星云的消光函数, 但还不完善^[25, 30]。还有研究利用 Spitzer 数据, 对不同分子云的消光曲线进行分析。早期研究常把分子云看成整体进行红外消光规律求解, 随着观测精度的提高, 目前的研究已经开始从分子云的包层到内核的密度变化和尘埃性质变化着手, 分析红外消光强弱变化^[25, 30, 36, 41]。也有针对高红移伽马暴余辉受其宿主星系的尘埃遮蔽和红化的消光规律研究, 但现有结果并未表现出红移与消光之间的明显关系^[32, 42]。在其他星系的消光研究中, 大小麦哲伦云由于距离近且存在低金属丰度的特殊环境, 所以研究得较多^[2, 5]。

不过, 由于目前红外观测波段较窄, 天区数目较少, 而且分析方法不同也会导致结论存在差异, 所以红外消光规律还有待进一步研究, 接下来可开展的工作包括:

(1) 扩充研究数据, 提高结果精准度。观测精度的提高和天区的扩大, 会缩小测光误差和系统间误差, 使所选参考天区更合理, 这将进一步提高红外消光规律结果的精度和准确度。而且双色图中数据源密度的增加也有利于加权计算和背景场星的分离。更大范围天区的数据将更符合统计要求, 保证数据源的平均分布。研究表明参考天区星密度的增加可直接降低消光估算结果的不确定度。这些改进还可以用于进一步检验方法的可行性。利用丰富的巡天数据, 合理地选择数据分析方法, 将可给出更完备且接近真实的红外消光规律。

(2) 对应不同天区, 选择最佳分析方法。通过本文第 2 章和第 3 章对各种研究分析方法的比较可知各有利弊, 可选择物质分布情况不同的子天区, 分别采用以上方法处理, 再进行结果的横向比较, 综合比较后可确定出对应子天区的最佳分析方法。具体选择条件如, 参考天区、探针以及拟合方法等。

(3) 根据对应天区选用数据分析方法, 处理大范围巡天数据, 给出红外消光规律。

这些结果是对实测数据进行消光改正的基础, 也是研究宇宙尘埃颗粒模型的数据来源, 而且也有助于理解不同区域红外消光规律与星际环境变化的对应关系^[3]。不过, 尘埃消光实际上包含两部分, 一部分是来自星际空间尘埃造成的星际消光, 另一部分是由恒星周围的尘埃即星周尘埃壳层造成的星周云消光^[43]。本文涉及的消光规律分析方法中并未对两者分别研究, 而是对两部分消光之和的综合讨论。星际消光和星周云消光具体的区分其实较为困难, 所以还有待于进一步的深入研究和讨论。

致谢: 作者感谢审稿人所给出的建设性意见和建议, 以及对本文写作质量的提高所付出的辛劳和努力。作者也感谢胡景耀老师的悉心指导, 以及李墨萍老师提出的宝贵意见。

参考文献:

- [1] 高健. 博士论文, 北京: 北京师范大学, 2009: 119
- [2] 李墨萍, 赵刚, 李爱根. 天文学进展, 2006, 24: 260
- [3] Fitzpatrick E L. *Astrophysics of Dust*. 2004, 309: 33
- [4] Nishiyama S, Tamura M, Hatano H, et al. *ApJ*, 2009, 696: 1407
- [5] Draine B T. *ARA&A*, 2003, 41: 241
- [6] Zasowski G, Majewski S R, Indebetouw R, et al. *ApJ*, 2009, 707: 510
- [7] 曹莉, 胡景耀, 魏建彦等. 红外, 2010, 31(2): 1
- [8] 焦维新. 国际太空, 2003, 8: 1
- [9] 高建云, 陈力, 王家骥等. 天文学进展, 2004, 22(4): 275
- [10] 高健, 姜碧汾. 天文学进展, 2007, 25(3): 226
- [11] Fitzpatrick E L, Massa D. *ApJ*. 1986. 307: 286
- [12] Stecher T P. *ApJ*, 1965, 142: 1683
- [13] Joblin C, Leger A, Martin P. *ApJ*, 1992, 392: L79
- [14] Li A, Draine B T. *ApJ*, 2001, 554: 778
- [15] Naoi T, Tamura M, Nakajima Y. et al. *ApJ*, 2006, 640: 373
- [16] Nishiyama S, Nagata T, Tamura M, et al. *ApJ*, 2008, 680: 1174
- [17] Stead J J, Hoare M G. *MNRAS*, 2009, 400: 731
- [18] Cardelli J A. *ASP Conf.Ser.* 1994, 58: 24
- [19] Burstein D, Heiles C. *AJ*, 1982, 87: 8
- [20] Schlegel D J, Finkbeiner D P, Davis M. *ApJ*, 1998, 500: 525
- [21] Lequeux J, Maurice E, Prevot-Burnichon M L, et al. *A&A*, 1982, 113: L15
- [22] Prevot M L, Lequeux J, Prevot L, et al. *A&A*, 1984, 132: 389
- [23] Nishiyama S, Nagata T, Kusakabe N, et al. *ApJ*, 2006, 638: 839
- [24] Gao J, Jiang B W, Li A G. *ApJ*, 2009, 707: 89
- [25] Chapman N L, Mundy L G, Lai S P. et al. *ApJ*, 2009, 690: 496
- [26] Fritz T K, Gillessen S, Dodds-Eden K, et al. *ApJ*, 2011, 737: 73
- [27] Schödel R, Najarro F, Muzic K, et al. *A&A*, 2010, 511: 18
- [28] Larson K A, Whittet D C B. *ApJ*, 2005, 623: 897
- [29] Moore T J T, Lumsden S L, Ridge N A, et al. *MNRAS*, 2005, 359: 589
- [30] Roman-Zuniga C G, Lada C J, Muench A. *ApJ*, 2007, 664: 357
- [31] 王术军, 叶彬浔, 何香涛. 北京师范大学学报(自然科学版), 2005, 41(3): 280
- [32] Liang S L, Li A. *ApJ*, 2009, 690: L56
- [33] Fischera J, Dopita M A, Sutherland R S. *ApJ*, 2003, 599: L21
- [34] Kenyon S J, Lada E A, Barsony M. *AJ*, 1998, 115: 252
- [35] Jiang B W, Omont A, Ganesh S, et al. *A&A*, 2003, 400: 903
- [36] Indebetouw R, Mathis J S, Babler B L, et al. *ApJ*, 2005, 619: 931
- [37] Alves J, Lada C J, Lada E A, et al. *ApJ*, 1998, 506: 292
- [38] Olofsson S, Olofsson G. *A&A*, 2010, 522: 84
- [39] 李墨萍, 赵刚, 李爱根. 天文学进展, 2007, 25: 132
- [40] Rieke G H, Lebofsky M J. *ApJ*, 1985, 288: 618
- [41] Cambrésy L, Rho J, Marshall D J, et al. *A&A*, 2011, 527: 141
- [42] Li A, Liang S L, Kann D A, et al. *ApJ*, 2008, 685: 1046
- [43] 胡景耀. 天体物理学报, 1991, 11: 234

Extinction in the Infrared toward Star Formation Regions

FENG Chong^{1,2}, LI Jin-Zeng¹

(1. *National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China;* 2. *Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: Interstellar dust extinction is one of the key issues for investigations of various fields of astronomical studies. Interstellar extinction is wavelength dependent and is known to vary much less among different lines of sight in the infrared than it does in the optical and ultraviolet.

As stellar sources located within or behind star forming regions suffer from increasing amounts of interstellar dust along the line of sight, it is important to make measurements of the interstellar extinction toward these regions. Investigation on extinction in the infrared is the basis for studying the physics of young stellar objects in star forming regions, as well as the spacial distribution and the properties of interstellar dust. It can provide, in the meanwhile, constraints to interstellar grain models.

In this paper, we first present an overview of the definition of interstellar extinction and reddening law, its historical studies, the progresses and its various applications in related fields. This is followed by a detailed review and comparison of the traditional methods for determining interstellar extinction toward star formation regions, which include the red cluster (RC) method, color excess ratio method and reference field method. In the end, we outline the major issues and future perspectives in the study of interstellar extinction and reddening.

Key words: interstellar extinction and reddening; color excess ratio; reference field