

吉林陨石研究的十年

欧阳自远 李肇辉

(地球化学研究所)

世界最大规模的陨石雨——吉林陨石雨陨落已经十年了。这位罕见的“天外来客”，给我们带来了极其丰富的有关太阳系起源和演化、生命起源、宇宙线及物质相互作用等方面的宝贵信息。十年来，中国科学院对它组织了多学科综合考察研究，研究结果被编辑出版成《吉林陨石雨论文集》、《吉林陨石研究专号》等著作，并拍摄了考察资料影片和科教电影《天外来客》。吉林陨石研究工作开创了我国陨石学和宇宙化学研究的新阶段，也推动了世界陨石学的新发展。

一、从现场综合考察入手

吉林陨石雨分布面积近 500 平方公里(图 1), 主体重 1170 公斤(见照片), 陨落过程极为壮观, 现场情况十分复杂。研究工作正是从全面系统地考察陨石降落过程、现场分布范围和分布特征、陨石的瓦解情况等开始和入手的。



吉林陨石雨的分布示意图

考察确定,沿飞行方向,质量最大的碎片落在最前面,随后碎片按质量递减顺序依序落在较后的地区。由陨石的这一质量分布特点,以及陨落方位和落地倾角,并根据宇宙成因核素²⁶Al所确定的陨石近日距,确定陨石的空间轨道与阿波罗型小行星相近。陨落时大体是顺着地球公转方向从后面追上地球,在空气动力与热应力作用下,约在19公里的高度上发生主爆裂。详尽的现场考察为开展学科研究和拍摄《天外来客》这一科教电影等提供了丰富的资料和可靠的科学依据。



吉林 1 号陨石(重 1170 公斤)

二、为研究太阳星云凝聚过程提供了新论据

太阳星云如何凝聚和吸积形成太阳系,是近代太阳系起源和化学演化的一个基本问题。本世纪五十年代通过球粒陨石化学组成和太阳光谱的对比研究,确立了以球粒陨石元素丰度为基础的太阳系元素丰度(宇宙丰度)。依据陨石矿物组成的研究,自六十年代起,用化学热力学和等离子体物理学方法研究太阳成份气体的凝聚过程,相继提出了三个代表性的星云凝聚模型:(一)热凝聚模型;(二)冷凝聚模型;(三)等离子体凝聚模型。这三个模型都还不够完善,有待实验事实的检验和修正。

系统的矿物学研究鉴定出吉林陨石中存在 41 种矿物(主要的列于表 1),是世界数千块同类陨石中发现矿物种类最多的陨石,还发现了自然铜、不同结构类型的铬铁矿-尖晶石变种、白色高硅包体等。观察到了多种结构类型的古铜辉石球粒、橄榄石球粒、橄榄石-古铜辉石球粒、玻璃、脱玻球粒和金属球粒。依据这套系统、完整的复杂矿物组合和对球粒结构类型形成的物理化学条件与过程的研究,将太阳星云的凝聚过程划分为六个阶段(表 1),它为阐明太阳星云中化学元素凝聚为各矿物相的物理化学过程、球粒的起源和形成过程提供了丰富的新论据,为检验和完善太阳星云的演化模式提供了重要的实验依据。

表 1 太阳星云凝聚过程中凝聚形成吉林陨石矿物的组合和阶段(在 $\sim 10^{-3}$ 大气压条件下)

阶段名称	温度范围 ($^{\circ}\text{K}$)	形成的矿物
高温凝聚阶段	≥ 1600	碳硅石、刚玉、锆石、金红石、钛铁矿
金属和硅酸盐分馏阶段	1600—1200	铁纹石、镍纹石、单斜辉石、橄榄石、斜方辉石
碱金属硅酸盐凝聚阶段	1200—1000	斜长石、正长石、石英、钙钛榴石、白磷钙矿、方钠石
硫化物凝聚阶段	1000—570	黄铜矿、黄铁矿、陨硫铁、磁黄铁矿、磷铁镍矿、闪锌矿
SiO_2 包体的形成	570—450	磷石英、方石英
含水硅酸盐形成	450—300	透闪石、黑云母、蛇纹石、方解石、菱铁矿

三、建立了吉林陨石形成演化过程的模式

陨石是太阳系的一个小成员,它的母体主要是来自小行星。小行星由形成行星的同一太

阳星云演化形成,但由于其大小和质量远小于行星,因此形成后经受的热变质作用小,研究它的形成演化过程,对于了解太阳系的早期演化过程具有重要意义,并可为太阳系形成后的行星演化过程提供比较的标准。

根据吉林陨石 Rb—Sr, Pb—Pb, U—Th—Pb 等时线年龄与初始 Sr 同位素比值的系统研究,确定太阳星云的形成时间为 47 亿年,太阳星云及陨石固结年龄(行星形成年龄)约为 46 亿年;橄榄石、辉石、白磷钙石等的裂变径迹年龄和包裹体测温研究提供了吉林陨石母体早期热历史和冷却速率的资料。并且,首次发现一个陨石不同部位样品具有不同的气体保留年龄(^4He 年龄 4.4 亿年—20.3 亿年, ^{40}Ar 年龄 22.2—39 亿年)和陨星表面至中心放射成因 ^4He 、 ^{40}Ar 浓度呈现递增倾向的独特分布特征。这种分布特征难以由天体的大小、质量和样品埋藏深度控制的惯常热变质作用来解释,它可能是小天体间的碰撞除气、太阳辐射加热迭加于惯常热变质作用的结果,这个发现和非惯常热效应的研究,丰富和扩大了陨石史的研究内容,推动了世界陨石学研究的新发展。

根据吉林陨石多学科综合研究结果,可将其形成演化过程划分为五个阶段和九个过程(表 2),并具体地分析了各个阶段的主要特征。

表 2 吉林陨石的形成演化过程

演化阶段	主要过程	距今时间 $\times 10^9$ 年(经历时间 $\times 10^9$ 年)	温度* ($^{\circ}\text{K}$)
一、星云盘的形成、分馏与凝聚阶段	(一) 星云盘的形成,星云物质的分馏及开始凝聚过程	$54. \pm 0.4 - 4.7$ (>0.3)	星云温度由低升高星云逐渐冷却。 $\sim 2,000$
	(二) 太阳星云物质的凝聚	$4.7 - 4.55$ (~ 0.15)	$>1,600$ $1,600 - 1,400$ $1,500 - 1,200$ $1,100 - 1,000$ $1,000 - 570$ $570 - 450$
二、母体的形成与热变质阶段	(三) 星云凝聚的物质聚集形成母体	$4.6 - 4.55$ (~ 0.05)	$570 - 400$ < 400 < 400
	(四) 母体的热变质	$\sim 4.55 - 4.5$	$1,100 - 1,000$
三、母体的冷却与冲击破裂阶段	(五) 母体的冷却	$4.55 - 0.008$	$1,000 \sim 200$
	(六) 母体受冲击变质及破裂		
四、吉林陨星的形成与运行阶段	(七) 吉林陨星的形成	0.008	
	(八) 吉林陨星的运行	$0.008 - 0.0004 -$ (1976. 3. 8)	
五、吉林陨星的陨落及吉林陨石雨的形成	(九) 陨落及形成吉林陨石雨	1976 年 3 月 8 日 15 时(北京时间)	陨星表面温度约 $3,000 - 3,500^{\circ}\text{C}$, 周围大气温度约 $20,000^{\circ}\text{C}$, 陨星 表面动压约 100 大气压/厘米 2

* 同一阶段中的不同温度对应着不同的演变特征

四、开辟了小天体的宇宙线照射历史研究的新领域

系统地研究宇宙线与陨石母体作用生成的宇宙成因核素及核粒子径迹, 对于认识自然界的高能核作用现象, 研究宇宙线的组成、性质、能谱、通量及其随时间的变化, 宇宙成因核素的产率与深度的关系, 陨石母体的破裂历史, 以及恢复陨石母体的初始形状等方面均具有重要价值。

对宇宙成因稀有气体 ^3He 、 $^{20,21,22}\text{Ne}$ 和 ^{38}Ar , 以及宇宙成因放射性核素 ^{10}Be 、 ^{22}Na 、 ^{26}Al 、 $^{53,54}\text{Mn}$ 、 $^{57,58,60}\text{Co}$ 的系统研究证明, 吉林陨石具有两阶段暴露历史: 第一阶段吉林陨石埋藏在母体的近表面区接受宇宙线的 2π 照射, 与月球表面接受宇宙线照射的情况相似, 宇宙成因稳定核素的产率随深度发生明显的变化; 吉林陨石由第一阶段母体中分离出来后开始接受宇宙线的 4π 照射, 与通常陨石接受宇宙线照射的情况类似, 宇宙成因核素的产率几乎保持恒定并与深度无关。通过关于吉林 1 号陨石各顶角样品和两个相互垂直钻孔中宇宙成因核素的深度剖面研究, 建立了具有两阶段暴露历史的石陨石的宇宙成因核素分布的标准模式。用 ^{21}Ne – ^{26}Al , ^{21}Ne – ^{53}Mn , ^{21}Ne – ^{10}Be 等宇宙成因稳定核素和放射性核素组成的核素对计算出吉林陨石第一阶段的暴露年龄约为 800 万年, 第二阶段暴露年龄约为 40 万年。用宇宙成因 ^{21}Ne 含量作为第一阶段样品的深度标尺, ^{60}Co 作为第二阶段样品的深度标尺, 复原后的吉林陨石母体的形状如图 2。这个模式获得各国学者的称赞, 被誉为研究宇宙成因核素和宇宙线暴露历史的典型。吉林陨石宇宙线辐照历史的研究为检验现行的 2π 和 4π 照射理论模式提供了标准陨石, 在月球与陨石的辐照作用间架起了桥梁, 开辟了小天体宇宙线照射历史研究的新领域。

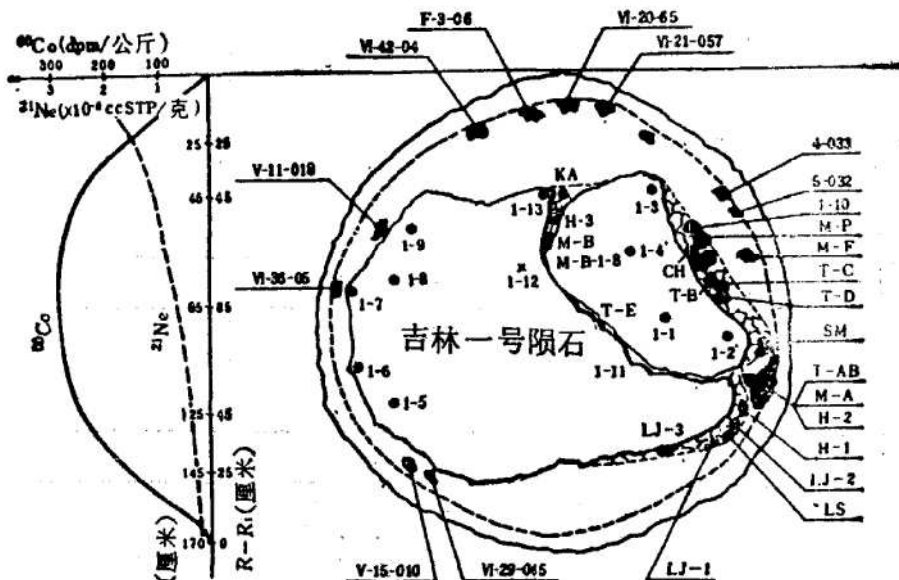


图 2 吉林陨石第一阶段和第二阶段母体的形状、大小及各样品根据 ^{21}Ne 、 ^{60}Co 含量恢复其在两个阶段母体中的相对位置

五、有可能为研究前生期有机物的化学演化和生命起源问题提供新信息

有机物的化学演化与生命起源是当代科学的一个基本问题, 陨石可为此提供宝贵的研究资料。自 Monge 于 1806 年分析了当年 3 月陨落于法国亚来 (Alais) 的碳质球粒陨石的有机质以来, 已在各类碳质球粒陨石中鉴定到了原生的脂肪烃、芳香烃、酯肪醇、脂肪酸、色素卟啉、蛋白质氨基酸和非蛋白质氨基酸、嘌呤、嘧啶碱和结构不明的聚合有机物等。碳质球粒陨石有机化合物的研究表明, 太阳系有机物的出现比人们原先的预期要早得多, 即太阳系生命前期的有机物的化学演化早在行星形成前的星云时期便开始了。

吉林陨石是普通球粒陨石, 在尽可能排除污染的条件下, 经研究分析表明, 该陨石含有烷烃、芳烃、类异戊二烯烷烃、氨基酸、卟啉色素和可裂解的聚合有机物, 其种类与分布和碳质球粒陨石相类似, 同时存在非蛋白氨基酸 (B-丙氨酸), 因此吉林陨石中的复杂有机化合物可能是原生有机物。但也有人认为这些结果仍有可能受到了地球污染的影响, 它们的“原生性”有待进一步鉴别。如果结论是肯定的, 那么在普通球粒陨石中所发现的如此多种而复杂的有机质, 必将为研究前生期有机物的化学演化和生命起源问题提供新的信息, 推动这一学科领域研究的发展。

六、开创了我国宇宙化学研究的新阶段

十年来对吉林陨石全面、系统的综合研究, 使我国在宇宙地球化学领域的科研工作由基础薄弱的状态跃居世界前茅。我国地学家们在成果鉴定意见中纷纷赞扬: “这项工作为我国陨石学、宇宙化学及空间地质学奠定了坚实的基础”; 对陨石降落现场的考察, “在科学性, 详尽度方面都高度完善”; 许多研究是“开创性的、国际水平的”……。著名宇宙化学家、美国科学院院士 E. 安德斯说: “中国的陨石研究已达到国际先进水平, 在许多方面已超过苏联。”

吉林陨石研究的十年, 在我国逐步形成了一支多学科、能进行综合研究的陨石学、宇宙化学和空间地质学科研队伍。正是这支队伍在我国地学界最早采用仪器中子活化分析、放射化学中子活化分析、快中子活化分析、高分辨电镜、质子激发 X-射线分析、稀有气体同位素质谱分析、低水平放射性宇宙成因核素分析、离子探针质谱分析、火花源质谱分析、加速器质谱分析、裂变径迹和热释光分析等先进技术研究吉林陨石, 对促进我国地学研究的设备与技术更新、提高研究水平起了重要的推动作用。

吉林陨石的研究成果已在吉林陨石雨学术讨论会, 全国陨石学、空间化学和空间地质学学术讨论会, 第 16 届国际宇宙线会议, 多届国际陨石学会议等十几次国内外学术会议上进行了广泛的交流。主要成果已为国内外的有关专著、教科书和中国大百科全书所采用。研究领域已由吉林陨石扩展到其他陨石、宇宙尘、陨石坑和地球上的灾变事件以及实验天体化学等多个领域, 促进了我国天文-空间-物理-化学-生物-地学的相互渗透和交叉发展。