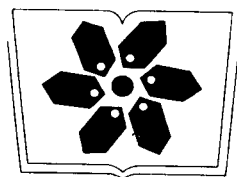


亳县陨石研究

王奎仁 陈江峰 洪吉安 著
彭子成 李彬贤

科学出版社



中国科学院科学出版基金资助出版

亳县陨石研究

王奎仁 陈江峰 彭子成 著
李彬贤 洪吉安



科学出版社

1998

内 容 简 介

本书是系统综合总结亳县陨石的研究成果。亳县陨石是我国发现的唯一的一块不平衡普通球粒陨石。球粒轮廓分明,结构齐全,保持原始信息多。这对于探讨球粒成因、演化过程;探讨太阳星云成分、凝聚过程以及陨石的形成和演化过程都有重要的指示意义。

全书分十二章,主要有陨石的研究意义、化学-岩石分类、宇宙成因矿物学和陨石研究现状,微束分析,波谱学,熔壳,球粒,包裹体,热释光,化学组成,微量元素和稀土元素,放射性同位素定年和演化的时间历程,亳县陨石的形成及演化过程等。

本书对从事天体化学、陨石学、矿物学、岩石学、地质学、地球化学、地球物理学、天文学和空间科学等研究和教学人员都有重要的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

亳县陨石研究/王奎仁等著.-北京:科学出版社,1998.7
ISBN 7-03-006419-4

I. 亳… II. 王… III. 陨石-研究-安徽-亳县 IV. P185.83

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 26651 号

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号
邮政编码: 100717

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1998年7月第一版	开本: 787×1092 1/16
1998年7月第一次印刷	印张: 12 3/4 插页: 14
印数: 1-500	字数: 280 000

定价: 44.00 元

序

中国科学技术大学地球与空间科学系王奎仁教授和他领导的研究群体,对亳县陨石进行了全面、系统、深入的多学科综合研究,取得了一系列的新发现与新认识。对一块陨石开展如此系统的综合研究,在世界范围内也属罕见。亳县陨石的研究成果,反映了我国陨石系统研究的水平已跻身于国际先进行列。集亳县陨石研究之大成的《亳县陨石研究》专著的出版,是我国天体化学与陨石学界的一件喜事。

大家知道,陨石是研究太阳系形成演化的考古标本,是构成地球和行星的原始物料,是生命起源前期化学演化的胚胎,是行星际空间的古记录与探测器,是人工飞行器重返大气层的过程模拟,是人类获得自然降落的极其珍贵的宇宙样品。陨石蕴藏了极其丰富的有关元素起源、太阳星云形成与演化、地球与行星的起源与演化、生命的前生期化学演化、行星际空间环境及高速通过大气层的物理化学过程、撞击诱发全球性气候环境灾变及生物灭绝的科学信息,一直是天体化学、天文学、空间科学和地球科学研究的主要对象。亳县陨石是我国发现的唯一的一块不平衡普通球粒陨石,较之其他普通球粒陨石蕴藏着更为丰富的有关太阳星云分馏、凝聚过程、行星形成历史以及陨石及其母体的演变历程的信息。《亳县陨石研究》集中论述了上述领域获得的新成果。

亳县陨石研究采用了一系列先进的分析测试技术。对陨石矿物与球粒的结构与成分研究,应用电子探针、扫描电镜、透射电镜、扫描质子探针和 X 射线微区衍射等微束分析技术,红外光谱、穆斯堡尔谱和拉曼光谱等波谱学测定技术;应用仪器中子活化分析及放射化学中子活化分析技术测定各种物相类型的微量元素与稀土元素;对微粒、微区与微量矿物学与地球化学研究做出了贡献。陨石形成的铀-钍-铅钍年龄、 ^{40}Ar 保存年龄及 ^{38}Ar 宇宙暴露年龄的测定,为探讨陨石的演化历史提供了重要时标。应用热释光测定技术,对陨石的岩石类型、受冲击的强度及通过大气层的温度梯度,进行了有益的探索。陨石古磁场强度的测定,揭示出行星际磁场强度随时间衰减的特征。

作者通过对亳县陨石矿物学的精细研究,发现了新矿物——张衡矿,以及 Wadsleyite 和亚铁尖晶石等矿物;确立了亳县陨石的化学群与岩石类型,深入研究了陨石物相类型的不均一性及球粒结构的多样性,对太阳星云凝聚、母体热变质与冲击变质过程提供了富有新意的科学论据。

《亳县陨石研究》分十二章,层次清楚、结构合理、数据翔实、立论有据,特别是“亳县陨石的形成过程与演化”一章,是亳县陨石研究的综合性总结,描绘了太阳星云分馏与矿物相的形成、亳县陨石母体的形成及其形成环境以及亳县陨石的演化过程。无论从科学性、系统性及综合性而言,《亳县陨石研究》是一部陨石系统研究的优秀著作。我深信《亳县陨石研究》的出版,在推动陨石学与天体化学研究的发展,提高我国陨石学与天体化学研究水平及培养新一代的研究人才方面将发挥重要的作用。

欧阳自远

1995年4月15日于北京

前 言

陨石是最珍贵的宇宙样品,它是太阳系星际物质或者是小行星和类地行星碰撞后的碎片,是陨落到地球表面的残块。目前,国内外通用和公认的陨石分类为:石陨石、石铁陨石和铁陨石。而陨石中的球粒陨石更为珍贵,它们提供了“四大起源”(天体起源、地球起源、生命起源和人类起源)的最直接的宇宙信息。因为球粒陨石一般未分异或仅受最小的分异,它们记载了形成以来的全部历史的“密码”。而地球上的样品受后来的岩浆作用或变质作用等地质营力的强烈改造,原始形态已经面目全非,难以追溯。特别是 3.9×10^9 a 到 4.5×10^9 a 这一段历史只能通过球粒陨石来加以探索。

目前全球收集到的陨石已超过 2 000 多次降落,特别是南极冰盖上的陨石被不断发现,已超过 10 000 多块,同时月球陨石(AHL8105)、QUE93069 和火星陨石(SNC)的发现,都为陨石学研究提供了极好的样品,为陨石学的研究开辟了广阔的前景。

本书所讨论的陨石为亳县普通球粒陨石,是我国发现的唯一的一块不平衡普通球粒陨石,与其他球粒陨石相比,它的独特之处在于:它保持的原始信息最多,是讨论“四大起源”最佳样品。

该陨石于 1977 年 10 月 20 日下午 2 时 30 分左右,在安徽亳县张沃公社吝子门大队降落。当时降落了两块,分别命名为一号陨石和二号陨石(照片 0.1)。25 日我们赶到现场考察。据阎学文等几十人介绍,当时观察一号陨石降落的约 200 余人,开始听到像飞机的呜呜响声,然后有点像鞭炮噼叭噼叭的爆炸声,落地时尘土腾空而起,像烟雾一样,尘柱约 6、7m 高。由于当时人们很惊疑,不敢立即接近,后隔一个半小时取出,该陨石已不热了。一号陨石重 5.5kg,高 16.5cm,底面积直径为 12cm,接近顶部直径为 9cm,近似锥体。降落地点位于吝子门大队小阎庄西南约 200m 处。经度为 $115^{\circ}33'$,纬度为 $33^{\circ}53'$ 。坑深约 50cm,坑口 30cm,坑口至坑底轴线与地面倾角为 $50^{\circ} \sim 70^{\circ}$ 。由于陨石坑已被取陨石者破坏,只能根据他们的回忆而得到上述参数。二号陨石重约 3kg,降落地点位于吝子门大队吝楼庄阎国民的院内,经度为 $115^{\circ}34'$,纬度为 $33^{\circ}34'$,打坏一墙角,并由墙上再反射到地下,地下小坑呈椭圆形,长轴 19cm,短轴 13cm。一号陨石与二号陨石相距 2 000m 左右,在空中运行方向均为 $NE45^{\circ}$ 。一号陨石样品完整,全部收集,二号陨石由于当时被社员阎国清好奇而破碎,分散在阎东林等几个学生手中,经动员后,只交出一小部分。这两块陨石分别呈锥体和椭球体,表面灰黑色,新鲜面为浅灰色。由于陨石和大气层相互作用而引起高温,致使表面有明显的烧蚀现象,具 0.5mm 厚的灰黑色烧蚀层,气印(烧蚀坑)发育,烧蚀层龟裂花纹清晰可见(照片 0.2)。一、二号陨石均为明显的球粒结构,球粒直径一般为 1.5~0.5mm.,二号陨石最大的一颗球粒直径可达 1.2cm。经比重测定,一号陨石为 3.426,二号陨石为 3.419。

经中国科学技术大学地球和空间科学系部分教师协同有关单位合作,共同对亳县陨石进行了研究,已发表中文论文 24 篇,英文论文 8 篇,这是我国继吉林陨石雨研究之后又

一次较为细致和深入的研究工作。

在亳县陨石的研究中,我们采用了多种先进与配套的分析测试技术,开展了多学科综合研究。如应用了电子探针、扫描电镜、透射电镜、质子探针、X射线分析、X射线微区分析、红外光谱、拉曼光谱、穆斯堡尔谱、热释光、矿物包裹体、光学显微镜、湿化学分析等方法;另外用中子活化(INAA)法与同位素稀释法测定微量元素;用放射化学中子活化(RNAA)法测定了稀土元素;进行了陨石铅-铅等时线、铀-铅与铷-锶模式年龄及钾-氩年龄与 ^{38}Ar 宇宙暴露年龄的测定;同时对古磁场强度也作了较系统的研究。

《亳县陨石研究》主要贡献在于:①发现了一种新矿物,命名为张衡矿,并得到国际矿物协会新矿物及矿物命名委员会承认与批准,填补了矿物学上的一项空白;②在中国首次发现 Wadsleyite,在国际上也属于第二例;③对亳县陨石中透明矿物和不透明矿物共31种作了详细研究,丰富了宇宙矿物学内容;④根据该陨石全岩X射线多次分析结果,其橄榄石 d_{130} 值较为稳定,为 2.784 \AA ,由此值在前人合成橄榄石曲线图上求得Fa值与大量的电子探针分析得出的Fa值是一致的,因此,提出用全岩X射线分析求出Fa值可作为划分球粒陨石的化学群参数之一,这样可以节省费用和精力;⑤对陨石中罕见的橄榄石环带成分进行了测定,为太阳系星云凝聚形成球粒的过程、球粒形成的物理化学环境提出了新证据;⑥肯定了玻璃质结构球粒及球粒中玻璃质基质成分;⑦无论是球粒还是基质,在橄榄石中FeO与MnO含量有明显的线性关系,在辉石中 Al_2O_3 与CaO也有线性关系,同时绝大部分都是低铝的,这些特点说明了由太阳星云凝聚物质熔融形成液滴后再冷凝形成球粒;⑧发现顽辉石与斜长石是紧密伴生的,这种规律对讨论球粒成因有重要意义;⑨确定了亳县陨石球粒结构类型演化过程;⑩对球粒结构多样性进行了合理解释;⑪发现了球粒外圈与内圈矿物相的差异,球粒内圈辉石为单斜辉石,长石为钙长石,而外圈的辉石为斜方辉石,其长石为斜方钙长石;⑫对陨石熔壳的击变作用、矿物晶胞参数的变化及矿物变形机制提出了新的看法;⑬确定了亳县陨石化学-岩石类型为 LL_3 型,这是我国首次发现和确定的一块不平衡的普通球粒陨石;⑭球粒中包裹体研究和球粒的研究为探讨太阳星云早期凝聚和球粒的形成机理提供了新证据;⑮对该陨石中微量元素和稀土元素作了系统研究,这对于论证太阳星云凝聚过程中元素的宇宙化学行为提出了新的观点和依据;⑯铀-铅年龄测定、铷-锶同位素分析、钾-氩年龄 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 与 ^{38}Ar 暴露年龄测定等,对于讨论亳县陨石的形成与演化过程提供了定量的年龄数据;⑰对亳县陨石的形成与演化过程进行了论述,并提出了新的证据。

亳县陨石研究成果于1988年通过中国科学院院级评审与鉴定。由中国科学院院士孙枢教授主持,中国科学院院士欧阳自远教授任评审与鉴定委员会主任,中国科学院院士、地学部主任涂光炽教授,中国科学院院士、地学部副主任叶连俊教授,中国科学院院士陈国达教授任评审与鉴定委员会委员。与会学者一致认为:“亳县陨石10年来的较全面而系统的研究,获得了大量有关星云凝聚、球粒成因、母体演化、热变质特征与通过大气层的物理化学条件定量等科学信息,取得了一批具有重大理论价值的国际水平科研成果。建议呈报中国科学院申请自然科学奖。”此研究成果1989年获中国科学院自然科学奖二等奖。

由于亳县陨石的研究成果突出,《美国矿物学家》与《美国物理学会》等杂志又重新发表我们的文章2篇。国际衍射资料中心和国际穆斯堡尔谱资料中心都曾来函索取了有关资料及数据,分别刊在他们的杂志上。此外国内外来函索取单行本也较多。在该陨石中发

现的新矿物——张衡矿得到国际矿物协会新矿物与矿物命名委员会投票一致通过并批准。《光明日报》头版头条作了报道，中央人民广播电台也作了相应的广播，《文汇报》与《中国科学报》也作了相应的报道。因此，《亳县陨石研究》的研究成果在国内外均产生了重大的影响，对陨石学发展起了积极的推动作用。由于该陨石的研究成果分别发表在不同的杂志上，每篇论文只是就某个方面来讨论，因而没有很好总结与归纳。再者最近几年我们对该陨石又作了一些补充研究工作，因此我们有必要对亳县陨石进行认真的总结，在原有的基础上深入提高，使之系统化。为此特撰写了这部专著——《亳县陨石研究》。

在此，值得提出的是，亳县现改为亳州市，由于原来发表的一系列文章都为亳县陨石，该亳县陨石在国际上有重要影响，例如，在该陨石中发现的新矿物命名为张衡矿，得到国际批准，故本书的亳县不能改为亳州市。

全书共分十二章。前言、第一章、第二章、第三章、第四章、第五章、第六章、第七章和第十二章由王奎仁撰写。洪吉安参加了第三章、第四章、第五章和第六章的撰写。第八章的第一节和第二节由王奎仁撰写。第三节到第六节由陈江峰撰写。第九章由李彬贤撰写。第十章由陈江峰撰写。第十一章中的第一节由彭子成撰写，第二节和第三节由陈江峰撰写。全书由王奎仁负责统稿和校定。

在撰写本专著过程中，得到涂光炽教授、欧阳自远教授、王道德教授的大力支持。欧阳自远教授审阅了全书，并为本书作了序。同时，欧阳自远教授与王道德教授提出了宝贵的修改意见。周泰禧教授为本书拍摄了显微照片。谢洪源副编审为本书作了审定与编辑工作，在此一并致谢。

本书的出版得到中国科学院科学出版基金专家委员会于1993年1月19日批准，正式列为中国科学院科学出版基金的资助项目，这为本书的出版提供了可靠的保证，对此，我们表示衷心的感谢。

目 录

序 前言

第一章 引 言	1
第一节 研究陨石的意义.....	1
第二节 陨石分类及球粒陨石的化学-岩石分类特征	2
第三节 陨石矿物.....	8
第四节 陨石研究的现状	12
第二章 矿物学	22
第一节 新矿物——张衡矿(CuZn, Zhanghengite)	22
第二节 Wadsleyite 在我国的首次发现	24
第三节 陨石中罕见的亚铁尖晶石在亳县陨石中首次发现	30
第四节 不透明矿物	34
第五节 透明矿物	41
第三章 微束分析方法	59
第一节 电子探针(EPMA)	59
第二节 扫描电镜(SEM)	60
第三节 透射电镜(TEM)	62
第四节 扫描质子探针(SPM)	63
第五节 X 射线微区衍射	66
第四章 亳县陨石的波谱学特征	69
第一节 矿物的红外光谱	69
第二节 穆斯堡尔谱	71
第三节 拉曼光谱	74
第五章 亳县陨石熔壳的研究	76
第一节 概述	76
第二节 熔壳的物质成分分析	76
第三节 X 射线粉晶分析	77
第四节 红外光谱分析	79

第五节	熔壳的穆斯堡尔谱	80
第六节	熔壳的微形貌特征	81
第六章	球粒	83
第一节	球粒的物相类型	83
第二节	球粒的结构类型	85
第三节	球粒中物相的化学成分	88
第四节	有关球粒问题的讨论	89
第五节	环带结构	90
第六节	球粒中的气孔构造	100
第七节	球粒与基质	102
第七章	陨石包裹体的研究	110
第一节	概述	110
第二节	亳县陨石包裹体特征	111
第三节	讨论	114
第八章	陨石的热释光研究	115
第一节	概述	115
第二节	剩余热释光的测定	116
第三节	诱发热释光和自然热释光的测定	119
第四节	亳县陨石的岩石类型	121
第五节	冲击作用强度估计	123
第六节	自然热释光	123
第九章	亳县陨石化学组成的研究	124
第一节	球粒陨石的化学分类法	124
第二节	实验方法	125
第三节	分析结果	127
第四节	化学群	130
第十章	亳县陨石的微量元素和稀土元素研究	131
第一节	分析方法	131
第二节	测定结果	135
第三节	亳县球粒陨石全岩元素分布特点及其意义	138
第四节	亳县陨石全岩的稀土元素丰度形式	141
第五节	球粒的元素丰度特征及其成因意义	141
第六节	结论	146

第十一章 放射性同位素定年和亳县陨石演化的时间历程	148
第一节 亳县陨石铀-钍-铅年代学	148
第二节 氩同位素和定年结果.....	158
第三节 亳县陨石的时间演化序列.....	164
第十二章 亳县陨石的形成与演化过程	166
第一节 星云分馏凝聚与矿物相的形成.....	166
第二节 亳县陨石母体的形成及其形成环境的探讨.....	166
第三节 亳县陨石的演化过程.....	168
主要参考文献	173
英文摘要	176
图版说明	186

Contents

Foreword

Preface

Chapter 1 Introduction	1
§ 1.1 Scientific significance of meteorite studies	1
§ 1.2 Taxonomy of meteorites and chemical petrological taxonomic principles of chondrites	2
§ 1.3 Mineralogy of meteorites	8
§ 1.4 Current situation of meteorite studies	12
Chapter 2 Mineralogy	22
§ 2.1 New mineral—Zhanghengite	22
§ 2.2 First discovery of wadsleyite in China	24
§ 2.3 The first discovery of rare mineral pleonaste in Boxian chondrite	30
§ 2.4 Opaque minerals	34
§ 2.5 Transparent minerals	41
Chapter 3 Microbeam Analyses	59
§ 3.1 Electron probe microbeam analyses (EPMA)	59
§ 3.2 Scan electron microscope analyses (SEM)	60
§ 3.3 Transmission electron microscope analyses (TEM)	62
§ 3.4 Scan proton microprobe analyses (SPM)	63
§ 3.5 X-ray microbeam diffraction	66
Chapter 4 Wave spectrum studies of Boxian chondrite	69
§ 4.1 Infrared spectra of minerals	69
§ 4.2 Mössbauer spectra	71
§ 4.3 Raman spectra	74
Chapter 5 Studies of the fusion crust of Boxian chondrite	76
§ 5.1 Introduction	76
§ 5.2 Compositions of the fusion crust	76
§ 5.3 X-ray powder diffraction	77
§ 5.4 Infrared spectrum analysis	79
§ 5.5 Mössbauer spectrum	80
§ 5.6 Micro-morphologic features	81
Chapter 6 Studies of chondrules	83
§ 6.1 Phase types of the chondrules	83
§ 6.2 Textual types of the chondrules	85
§ 6.3 Chemical compositions of mineral phases in the chondrules	88
§ 6.4 Discussion about the chondrules	89
§ 6.5 Zonal texture	90

§ 6.6	Vesicular structure	100
§ 6.7	Chondrule and matrix	102
Chapter 7	Studies of the mineral inclusions in Boxian chondrite	110
§ 7.1	Introduction	110
§ 7.2	Characteristics of the mineral inclusions	111
§ 7.3	Discussion	114
Chapter 8	Thermoluminescence studies of Boxian chondrite	115
§ 8.1	Introduction	115
§ 8.2	Determination of the residual thermoluminescence	116
§ 8.3	Determination of the induced and the natural thermoluminescence	119
§ 8.4	Rock types of Boxian meteorite	121
§ 8.5	Estimation of the shock effects	123
§ 8.6	Natural thermoluminescence	123
Chapter 9	Studies of the chemical compositions of Boxian chondrite	124
§ 9.1	Taxonomy of chondrites	124
§ 9.2	Experimental methods	125
§ 9.3	Analytical results	127
§ 9.4	Chemical group	130
Chapter 10	Trace elements and rare earth elements	131
§ 10.1	Analytical methods	131
§ 10.2	Analytical results	135
§ 10.3	Elemental distribution characteristics of the whole rock in Boxian chondrite and its senses	138
§ 10.4	REE pattern of the whole rock in Boxian chondrite	141
§ 10.5	Elemental abundance characteristics of the chondrules and their genetic significance	141
§ 10.6	Conclusive remarks	146
Chapter 11	Determination of the age of Boxian chondrite	148
§ 11.1	Determination of the age of Boxian chondrite by U-Th-Pb method	148
§ 11.2	Ar isotope and determination of the age by Ar method	158
§ 11.3	Time system of Boxian chondrite	164
Chapter 12	Origin and evolution of Boxian chondrite	166
§ 12.1	The nebular fractionation and the formation of minerals	166
§ 12.2	The formation of the mother of Boxian chondrite and its forming environment	166
§ 12.3	The evolving process of Boxian chondrite	168
Main references		173
Abstract with English		176
Explanation of plates		186

第一章 引言

第一节 研究陨石的意义

一、探讨“四大起源”问题

天体起源、地球起源、生命起源和人类起源是自然科学中最著名的“四大起源”。因陨石是太阳系最古老、最原始的样品,是地球上能够找到的分异最小的天体标本,它能作为太阳星云初始物质的某些地球化学证据。根据陨石、月球以及地球的锶同位素研究,证明了它们是在大约同时期由太阳星云的重力凝聚而成,都接近于 4.5×10^9 a。又根据陨石、月球与地球的其他同位素研究,进一步证明了它们的初始物质是同源的,如陨石中 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 为 $89.6 \sim 91.8$,而地球上为 $88.7 \sim 91.8$;陨石中 $^{32}\text{S} : ^{33}\text{S} : ^{34}\text{S}$ 为 $100 : 0.79 : 4.51$,而地球上为 $100 : 0.8 : 4.57$;又如陨石中 $^{32}\text{S}/^{34}\text{S}$ 与地球上的上地幔物质、超基性岩、基性岩和月球上物质近于一致。

要想研究天体起源,其最佳样品就是陨石。要想研究地球起源,必须找到上地幔样品与未被改造、分异的样品才行。现在人们还不能直接获得上地幔样品,地球上只能从新生代玄武岩中获得深源包体,或从深大断裂中获得超基性岩、基性岩样品,或从金伯利岩中获得。但这些都受到某种程度的改造,也不是最佳样品。此外,地球上其他样品由于受后来的岩浆作用或变质作用的强烈改造,使原来的物质面目全非,无从追溯。同时地球上只能记载到 3.9×10^9 a 历史。而 3.9×10^9 a 到 4.5×10^9 a 这一段历史只能由球粒陨石所记载。因此,球粒陨石能记载自形成以来全部经历的信息,所以它是探讨“天体起源”与“地球起源”的重要理论课题。

陨石学研究的另一个重要方面是有机质,从现有资料来看,在宇宙空间有许多大小不等的星际分子云。已发现的星际分子共有 30 种左右,其中有甲醛、乙醛、甲醇、乙酸、乙腈、甲酰胺、环氧丙烷等十几种有机分子。月球样品发现有 C_2H_2 、 CH_4 、 C_2H_6 、 C_2H_4 、 C_3H_6 、 C_3H_8 、卟啉、核酸以及甘氨酸、丙氨酸等数种氨基酸,在约 2t 重的 Allende 碳质球粒陨石中发现有 18 种氨基酸和 2 种嘧啶。在其他碳质球粒陨石中发现有直链脂肪族碳氢化合物、芳香族化合物、羟基化合物、含氧碳氢化合物、各种氨基酸、甲醛以及生物成因的饱和烃类等。在十几块陨石中,甚至发现有机体的残余微粒。根据形态、特性和光性鉴定,共有 5 类。其中 4 类与地球上存在的种属相似,另一类与地表上的任何生态都不同,可能是一种微化石。因此,陨石中有机组分的研究,将对认识地球外以及地球上生命起源前期的化学演化过程、氨基酸的演化规律有重要意义,为我们探讨生命起源与人类起源开辟了新的方向。此外,也有人认为,彗星核中产生了单细胞菌,这种生命物质夹杂在尘埃雨中倾泻到地球上,人类便演化而来,因而,研究宇宙尘将会对生命起源的认识有一定的突破。

二、对研究宇宙线及探索超重元素有一定意义

陨石在宇宙空间运行中,受到宇宙线的辐射,产生了各种类型的核反应,从而使陨石物质(矿物)的同位素组成产生变异。通过对陨石中宇宙成因核的分布、产额及同位素组成的研究,有助于认识宇宙线引起核反应性质;对认识太阳系的形成与演化过程,鉴定陨石母体破碎年龄以及降落至地表年龄有重要价值。研究陨石宇宙成因核已成为研究宇宙线的新方向,因此,陨石可认为是宇宙线的考古记录器及探测器。

三、对航空、航天材料研制的意义

陨石的熔壳是陨石陨落过程中与大气层相互作用的产物。陨星以高速进入地球大气层,随着大气密度的逐渐增加,冲击波产生的压力增大,陨石表面温度逐渐升高,从而发热发光,气化熔融。随着阻力的增大,速度降低,表面熔融物质凝固形成熔壳。此外,大气层还给陨石提供了特殊的环境,即高温和冲击波。所以熔壳是一种“特殊的高温冲击实验室”中的残余产物。因此,对熔壳的详细研究,可了解大气层与陨石的作用方式、作用过程和作用程度。这对航空、航天材料的研制能提供一定的理论依据和实践意义。

四、陨石球粒的研究意义

球粒是太阳星云分馏凝聚,物质熔融形成液滴后结晶形成的。对球粒的研究,不但可以提供球粒陨石详细分类的根据,而且可以讨论陨石的热变质作用和冲击变质作用,提供陨石球粒形成时的物理化学条件和演化过程等信息。

五、微量元素和稀土元素的研究意义

陨石微量元素和稀土元素的测定以及与其他陨石的对比研究,可以了解和探索早期太阳星云的化学分馏作用、凝聚和吸积作用。

六、新发现的意义

在陨石详细研究中,有望发现太阳系以外的物质、新矿物、新的核素以及新的陨石类型,填补陨石研究的空白。

第二节 陨石分类及球粒陨石的化学-岩石分类特征

一、陨石分类

根据陨石中的金属与硅酸盐的比例,可将陨石划分为石陨石(硅酸盐 $>90\%$)、铁陨石

(金属相>90%)和石铁陨石(金属与硅酸盐含量大致相当)三大类,这是以矿物成分划分的。Prior-Mason 于 1965 年根据矿物成分和化学成分又将各大类分成亚类,详见表 1.1。

表 1.1 陨石分类

类别	主要矿物	类别	主要矿物
一、石陨石		(2)透辉橄榄无球粒陨石	透辉石、橄榄石
A. 球粒陨石		(3)辉斜无球粒陨石	
(a)顽辉球粒陨石	顽辉石、镍铁	(i)紫苏钙长无球粒陨石	紫苏辉石、钙斜长石
(b)橄榄古铜球粒陨石	橄榄石、古铜辉石、镍铁	(ii)钙长辉石无球粒陨石	易变辉石、钙斜长石
(c)橄榄紫苏球粒陨石	橄榄石、紫苏辉石、镍铁	二、石铁陨石	
(d)橄榄易变球粒陨石	橄榄石、易变辉石	(a)橄榄陨铁	橄榄石、镍铁
(Ⅲ型碳质球粒陨石)		(b)古英陨铁	古铜辉石、镍铁
(e)碳质球粒陨石(I、Ⅰ型)	蛇纹石	(c)橄古陨铁	橄榄石、古铜辉石、镍铁
B. 无球粒陨石		(d)中陨铁	橄榄石、斜方辉石、斜长石、镍铁
(a)贫钙无球粒陨石(CaO 为 0%~3%)		三、铁陨石	
(1)顽无球粒陨石	顽辉石	(a)方陨铁	铁纹石 Ni4%~6%
(2)紫苏无球粒陨石	紫苏辉石	(b)八面陨铁(按合金构造划分)	铁纹石宽(mm) 镍含量(%)
(3)橄榄无球粒陨石	橄榄石	(1)粗粒八面陨铁	>2 6.4~7.2
(4)橄辉无球粒陨石	橄榄石、易变辉石、镍铁	(2)中粒八面陨铁	0.5~2 7.4~10.3
(b)富钙无球粒陨石(CaO 为 5%~25%)		(3)细粒八面陨铁	<0.5 7.8~12.7
(1)钛辉无球粒陨石	普通辉石	(c)富镍角砾陨铁	镍纹石 Ni>14%

注:据 Prior-Mason,1965.

石陨石中的球粒陨石是我们研究“四大起源”的主要对象,它保存了“四大起源”的原始信息和记载了全部经历及其演化过程。因此,对球粒陨石的化学-岩石分类特征详细叙述是有必要的。现在人们通用 Van Schmus 和 Wood 的分类,见表 1.2。表 1.2 中的化学群: E 群为顽辉石球粒陨石;H 群为高铁群,也叫橄榄石古铜辉石球粒陨石;L 群为低铁群,也叫做橄榄石紫苏辉石球粒陨石;LL 群为低低铁群(低铁低金属群),也叫做橄榄石易变辉石球粒陨石;C 群为碳质球粒陨石。此外,H、L 和 LL 三个群通常又称为 O 群球粒陨石,或叫普通球粒陨石。

表 1.2 中岩石类型共分六类,由一到六是原始球粒陨石经热变质作用逐渐增高的。

表 1.2 球粒陨石分类

岩石类型 化学群	一	二	三	四	五	六
E	E ₁ —	E ₂ —	E ₃₁	E ₄₄	E ₅₂	E ₆₆
C	C ₁₄	C ₂₁₆	C ₃₈	C ₄₂	C ₅ —	C ₆
H	H ₁ —	H ₂ —	H ₃₇	H ₄₃₅	H ₅₇₄	H ₆₄₄
L	L ₁ —	L ₂ —	L ₃₉	L ₄₁₈	L ₅₄₃	L ₆₁₅
LL	LL ₁ —	LL ₂ —	LL ₃₄	LL ₄₃	LL ₅₇	LL ₆₂₁

注:表中所标出的数字是当时(1967年)统计的每种陨石类型的实例数,据 Van Schmus 和 Wood,1967。

二、球粒陨石的化学-岩石分类特征

1. 球粒陨石的化学群特征

1) 根据球粒陨石全岩化学成分主元素有关参数来划分, 见表 1.3。

E 群的特点是: ① 缺失橄榄石的 Fa 值; ② 铁的氧化程度低, 即 Fe^0/TFe 值比其他球粒陨石高; ③ SiO_2/MgO 值最高; ④ Fa 值接近于零。

表 1.3 球粒陨石化学群的划分参数

参数		TFe/SiO ₂	Fe ⁰ /TFe	SiO ₂ /MgO	Fa(%)	H ₂ O	C
E		0.77±0.30	0.80±0.10	1.90±0.15	0		
H		0.77±0.07	0.63±0.07	1.55±0.05	18±2		
L		0.55±0.05	0.33±0.07	1.59±0.05	24±2		
LL		0.49±0.03	0.08±0.07	1.58±0.05	29±2		
C	I 型	0.77±0.07		1.42±0.05	33	20	3~4
	II 型					10	2
	III 型					<2	<0.5

据 Van Schmun 和 Wood, 1967。

注: TFe 为全铁; Fe⁰ 为金属铁; $Fa = Fe^{2+}/(Fe^{2+} + Mg^{2+})$ 。

H 群的特点是: ① 在普通球粒陨石中, TFe/SiO₂ 值最高, 高铁群因此得名; ② Fe⁰/TFe 值在普通球粒陨石中也最高, 这反映了氧化程度较低的特点; ③ Fa 值较小。

L 群与 LL 群的特点是: ① 它们的全铁含量较低 (即 TFe/SiO₂ 值低), 氧化程度较高, 低铁群也因此而得名; ② L 群与 LL 群的区别在于 Fa 值和 Fe⁰/TFe 值有明显的差异。

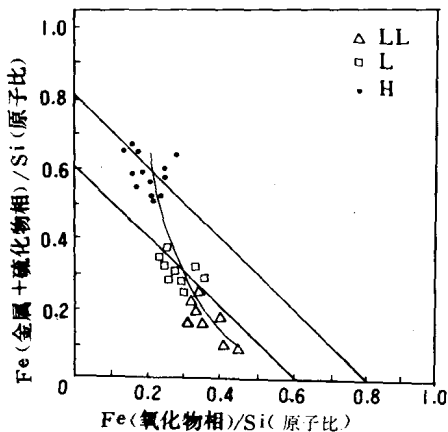


图 1.1 球粒陨石中还原的金属相、陨硫铁相及氧化物相之间的铁分布 (Wasson, 1974) 图中曲线表示通过 H、L 及 LL 的一种可能分馏趋势 $\Delta 1$ 和 $\Delta 2$ 为亳县陨石投影位置

C 群 (碳质球粒陨石) 特点是: ① SiO_2/MgO 值比其他群低; ② Fa 值最高; ③ 通常缺少金属铁; ④ 根据水和碳的含量可明显区分 I、II、III 型。

2) 根据球粒陨石 Fe (金属相 + 硫化物相) / Si (原子比) 与 Fe (氧化物相) / Si (原子比) 可确定化学群, 见图 1.1。

3) 利用普通球粒陨石中的微量元素可以区分 L 及 LL 群。

由表 1.3 可见, 普通球粒陨石中 L 群与 LL 群的主元素参数差异很小, 因此, 王道德等于 1985 年提出了球粒陨石全岩中 Ir/Au 原子比值及橄榄石化学成分 (Fa%) 的两维参数, 以此作为划分普通球粒陨石 (H、L、LL 群) 新的分类参数。图 1.2 列出了 L 群及 LL

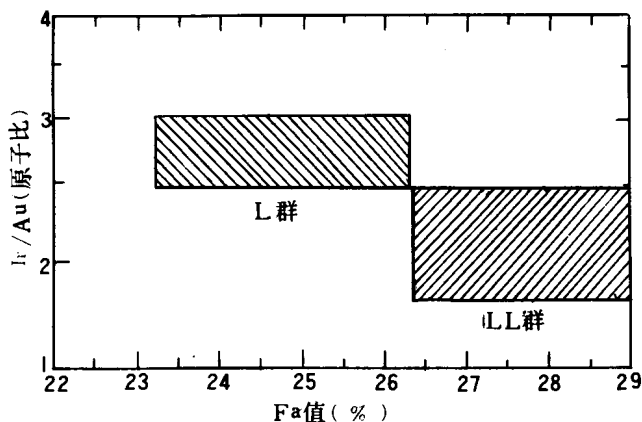


图 1.2 L 及 LL 群球粒陨石 Ir/Au-Fa% 分类参数图

群普通球粒陨石 Ir/Au-Fa% 分类参数及其分布范围, 因此, 利用此图可以很方便的区分出 L 群及 LL 群。

4) 根据橄榄石 Fa 值和辉石 Fs 值确定化学群(Dodd, 1981), 见图 1.3。

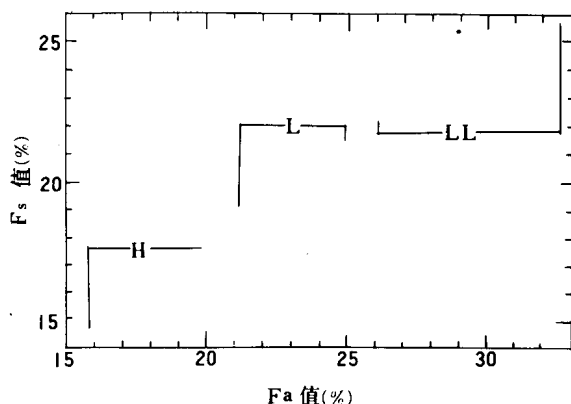


图 1.3 普通球粒陨石(H、L、LL)中Fs与Fa的关系

5) 根据钛铁矿与铬铁矿的化学成分可以划分, 笔者于 1987 年通过对亳县陨石中钛铁矿化学成分研究, 及总结前人的钛铁矿资料, 发现钛铁矿中 FeO 与 MgO 的含量变化与普通球粒陨石化学群有一定的规律性, 随着 H→L→LL 的变化, FeO 的含量增高, MgO 的含量降低。据现有不完全资料统计, 其平均值如下:

化学群	H	L	LL
FeO(wt%)	38.55	41.90	43.70
MgO(wt%)	5.98	3.30	2.58

因此, 笔者认为钛铁矿中 FeO 与 MgO 含量能作为划分普通球粒陨石化学群的参数之一, 但是一定要多分析几个晶体成分, 取其平均值, 若只根据个别晶体成分可能会出现重叠与交叉现象。最好与其他参数配合使用。

6) 笔者根据不同成因的铬尖晶石 $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{MgO} - \text{Cr}_2\text{O}_3$ 作了成因三角图, 此图可明显地区分 H 群、L 群、LL 群(见图 1.4)。