

# 荷叶塘陨石: 一个 L3 型普通球粒陨石的岩石学和地球化学特征\*

王桂琴<sup>1</sup> 缪秉魁<sup>2</sup> 林杨挺<sup>3\*\*</sup>

WANG GuiQin<sup>1</sup>, MIAO BingKui<sup>2</sup> and LIN YangTing<sup>3\*\*</sup>

1. 中国科学院广州地球化学研究所, 同位素国家重点实验室, 广州 510640

2. 桂林理工大学, 桂林 541004

3. 中国科学院地质与地球物理研究所, 地球与行星物理重点实验室, 北京 100029

1. State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2. Guilin University of Technology, Guilin 541004, China

3. Key Laboratory of Earth and Planetary Physics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2014-02-05 收稿, 2015-01-02 改回.

**Wang GQ, Miao BK and Lin YT. 2015. Heyetang meteorite: Petrological and geochemical characteristics of the L3 ordinary chondrite. *Acta Petrologica Sinica*, 31(9):2724–2736**

**Abstract** Petrography, mineral chemistry and bulk composition of Heyetang meteorite falling in China have been studied. The Heyetang meteorite has typical chondritic texture, with 80vol% chondrules, 5vol% metal and 15vol% matrix. Chondrules are very sharply defined. The matrix is opaque, no recrystallization. Mineral compositions in molecular percent are: olivine,  $Fa_{0.41-34.1}$  (PMD = 51); low-Ca pyroxene,  $Fs_{1.82-27.2}$  (PMD = 88),  $Wo_{0.18-3.13}$  (PMD = 103). The chemical-petrographic type of Heyetang is presented an ordinary chondrite (OC) of unequilibrated 3 type. It indicates a L group feature with total content of Fe-Ni metal and troilite is as low as 5vol% in whole meteorite, and average Co is 0.62% (PMD = 20) in Kamacite. Bulk compositions suggest that the lithophile elements and siderophile elements are also consistent with the average contents in L group of OC. The subclassification of Heyetang meteorite is a L3.4. The stage of shock metamorphism is S2, and the weathering grade is W1. Some olivine grain show zonal texture with the higher Fe contents in rim than that in core. The compositions show a large variation between chondrules, matrix and mesostasis, which indicate the different material source of these components.

**Key words** Ordinary chondrite; L3.4; Mineralogy; Petrography; Geochemistry

**摘要** 荷叶塘为一块我国降落的原始3型普通球粒陨石,因此具有重要研究意义。本文对荷叶塘陨石光薄片及粉末样品的岩石学、矿物学和全岩组成地球化学特征进行研究,为这块陨石的深入研究提供重要基础数据。研究表明荷叶塘陨石具L3型陨石岩石学特征,具典型的球粒陨石结构,球粒清晰,球粒结构类型多,基质重结晶程度低,组成模式为:球粒80vol%,金属和硫化物含量为5vol%,基质15vol%。矿物化学成分表明,该陨石球粒以I型(贫铁型)球粒为主,橄榄石  $Fa_{0.41-34.1}$  (PMD = 51),低钙辉石  $Fs_{1.82-27.2}$  (PMD = 88),  $Wo_{0.18-3.13}$  (PMD = 103),铁纹石中Co含量平均0.62% (PMD = 20),矿物成份不均一程度高,橄榄石矿物结晶颗粒内部化学成分变化大,呈正环带分布,与岩浆型结晶顺序一致,球粒与基质及间隙物成分明显不同,表现为不同物质来源。化学成分全岩分析结果显示,荷叶塘陨石亲石、亲铁元素含量均为L型陨石特征。依据以上岩石矿物学和化学组成特征,依照陨石亚分类参数,将其类型划分为L3.4型普通球粒陨石。冲击变质程度S2,风化程度W1。研究结果表明荷叶塘陨石为一块受后期水、热蚀变和风化影响较少的原始类型陨石。组成矿物成分极不均一,在矿物晶体内部,球粒内部及球粒与基质间均有明显变化。

\* 本文受国家自然科学基金重大项目(4149630013)资助。

第一作者简介:王桂琴,女,1968年生,博士,副研究员,陨石学、天体化学专业, E-mail: guiqinwang@gig.ac.cn

\*\* 通讯作者:林杨挺,男,研究员,陨石学、天体化学专业, E-mail: LinYT@mail.iggcas.ac.cn

**关键词** 普通球粒陨石; L3.4 型; 矿物学; 岩石学; 地球化学  
**中图法分类号** P691; P575.1; P595

## 1 引言

天体化学研究是通过地外物质的研究来反演太阳系及太阳系中其它行星的形成和演化, 因此, 获取地外样品是研究的前提。地外物质样品的来源主要是陨落在地球的陨石, 每年陨落地球的陨石数量估计为  $40 \sim 210$  个/ $10^6 \text{ km}^2 \cdot \text{y}$  (Bland *et al.*, 1996; Jull *et al.*, 1998), 或  $54 \text{ kg}/10^6 \text{ km}^2 \cdot \text{y}$  (Halliday, 2001), 质量大于 500g 的降落陨石仅为 1 块/ $10^6 \text{ km}^2 \cdot \text{y}$  (Wasson, 1985), 但实际可以被我们发现并收集到的则少于陨落总量的 1% (Hutchison, 2004), 从这些数据可以看出, 陨石样品稀少而珍贵。普通球粒陨石是已发现陨石的重要组成部分, 而其中 3 型普通球粒陨石是遭受水和热变质程度都最少的原始类型陨石。目前, 已获国际命名的 3 型普通球粒陨石 (包括 H, L 和 LL 型) 共有 2114 块, 仅占普通球粒陨石总数 5%, 样品更为稀缺。

球粒陨石的研究具有重要意义, 其一, 球粒陨石的组成与太阳光谱成份一致, 而与地球表面和非球粒陨石完全不同, 因此它可能代表着原始太阳的组成。其二, 球粒陨石的形成年龄 (4.6Ga) 比任何地球、月球的岩石都要老, 为月球、地球和太阳年龄对比提供了依据。其三, 其岩石学特征明显与任何已知的行星过程不一致。球粒陨石的“岩石学类型”也是一个广泛用于指示热变质程度的参数, 在陨石及其母体小行星研究中常指示封闭温度或峰值温度。球粒陨石由金属颗粒 (Fe, Ni 合金), 陨硫铁 (FeS) 和硅酸盐以基质和球粒的形式组成: 球粒是由毫米大小的硅酸盐聚集而成, 且在形成陨石之前便已存在。这种不同物质的混合, 并具微细结构, 显然不是星云过程的产物, 而是一种宇宙沉积的形式。球粒是大多数球粒陨石群的主要组成物质, 在未变质的 (如 3 型) 普通球粒中大约占 70% ~ 75% 体积比, 其成因并不清楚, 普遍认为球粒形成于太阳星云中的瞬间熔融 (Grossman *et al.*, 1988; Grossman and Wasson, 1983; Taylor *et al.*, 1983), 也有人认为是凝聚等其它成因 (Wood, 1989), 球粒的组成研究也可提供星云加热事件的信息。因此, 含丰富球粒的 3 型普通球粒陨石可以为我们提供独特的途径去了解太阳系中最早形成的固体物质, 以及原始星云演化过程的信息。

我国新发现 3 型荷叶塘陨石质量较大 (2.5kg), 保存完好, 且为仅经历过轻微母体变质的原始类型陨石, 因而具有重要研究意义。本文对这块陨石进行了矿物学、岩石学, 和全岩化学组分的测定分析, 并对其进行了岩石学、矿物化学和岩石化学三维分类, 也为进一步深入研究提供详细的岩石矿物学和地球化学特征信息。



图 1 荷叶塘陨石样品

浑圆状, 黑色熔壳完整, 切面球粒和金属颗粒清晰可见

Fig. 1 The hand specimen of Heyetang meteorite

It is an almost complete rounded stone covered by a dull-black fusion crust. It is clearly to see the chondrules and metal grains in the cut surface

## 2 样品描述

荷叶塘陨石是一块降落陨石。于 1998 年 10 月末降落在湖南省新邵县荷叶塘村一块水稻田中, 由当地村民发现并捡回收藏, 2008 年由中国科学院地质与物理研究所收购并保存。据村民文毅描述, 该陨石降落时为一团红色拖尾火球, 伴随尖锐似口哨声响, 落入已收割水稻田中, 砸出一个比篮球略大的洞, 冒着热气, 入土深度约为 1m, 村民用水冲洗后捡拾回家。降落点 GPS 定位纬度和经度位置分别为:  $27^{\circ} 14' 48.73'' \text{N}$  和  $111^{\circ} 19' 18.72'' \text{E}$ 。样品为浑圆状, 黑色熔壳完整, 剖开面圆形球粒多而清晰, 可见金属颗粒, 可能由于降落时的冲洗原故, 致使陨石表面金属氧化呈现红褐色斑状锈迹 (图 1), 磁性明显, 总重量 2.5kg。这块样品已向国际陨石学会申请命名并获得批准, 英文名称为 Heyetang。

## 3 实验方法

本次研究中岩石学和矿物学特征观察和矿物化学成分分析使用光、薄片样品。全岩主、微量元素分析使用粉末样品。

### 3.1 样品准备和标准参考物质

陨石薄片样品用金刚石慢速切片机切成厚约 1mm 的薄片, 再分别磨制成直径为 2.54cm 的圆形标准光薄片。

粉末样品取荷叶塘陨石原样中新鲜部分 1.08g, 用玛瑙

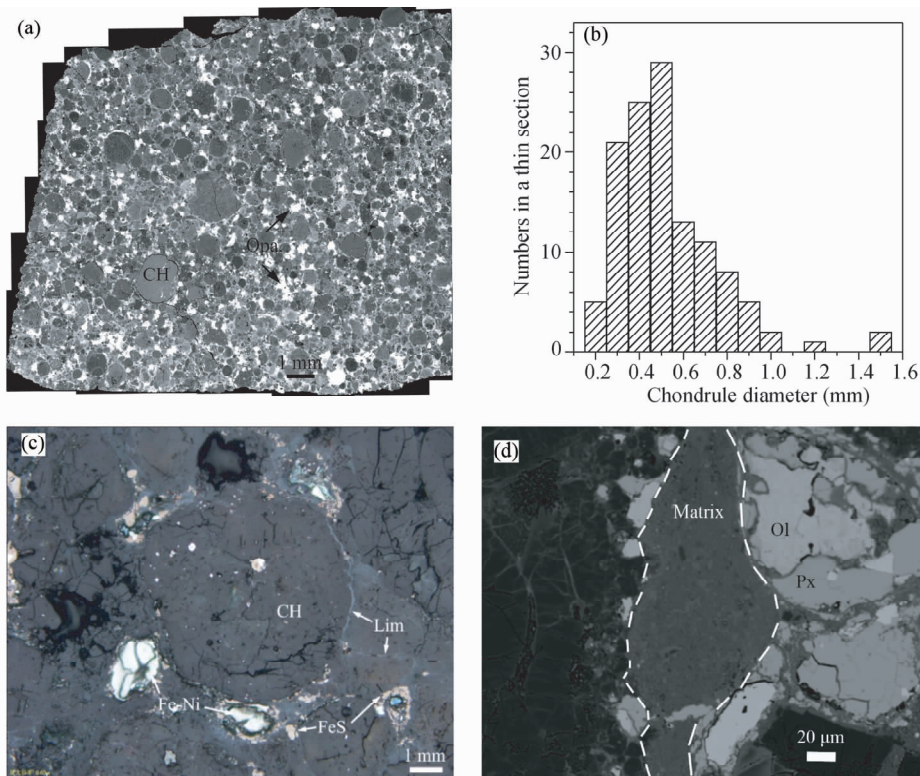


图2 荷叶塘陨石组成矿物模式

(a) 薄片样品40倍背散射图像;(b)薄片中秋粒直径和个数统计柱状图;(c)光学显微镜反射光图像,不透明矿物为铁镍金属(亮白)和陨硫铁(淡黄色),呈粒状或细脉状分布于球粒边缘和裂隙中,细脉被氧化为褐铁矿(浅灰色);(d)背散射图像,中部细粒基质由隐晶质橄榄石、辉石、长石质玻璃及金属和硫化物组成。球粒中的结晶矿物主要为橄榄石和辉石(图右侧)。CH-球粒;Opa.-不透明矿物;Fe-Ni-铁镍金属;FeS-陨硫铁;Lim-褐铁矿;Ol-橄榄石;Px-辉石

Fig. 2 Modal compositions of Heyetang meteorite

(a) the back-scattered-electron image (BSE) of a thin section, magnified 40 times; (b) column chart showing chondrule diameter and numbers in a thin section; (c) graph of reflecting microscope. The opaque minerals are granular and veinlet with white (Fe-Ni metal) or yellowish (troilite) colour, which distribute around chondrules or in small joint surfaces and cracks. A very few of them were oxidized to yield limonite; (d) The BSE image. Central section marked by white dash line is matrix, which is composed of cryptocrystalline minerals and feldspathic glass, include olivine, pyroxene, Fe-Ni metal and FeS. Chondrite consists of large crystal of olivine and pyroxene. CH-chondrule; Opa.-opaque minerals; Fe-Ni-Fe-Ni alloy; FeS-troilite, Lim-limonite; Ol-olivine; Px-pyroxene

钵研磨为 <200 目粉末,充分均匀后,用对分法取出两份,样量分别为 41.9mg 和 40.6mg,两份样品作为平行样分两次进行主、微量元素含量测定。同时,对肇东陨石进行了主、微量元素测定,与过去的中子活化分析结果进行对比。肇东陨石为我国发现的一块 I4 型普通球粒陨石,于 1987 年获国际陨石学会正式命名,与本次研究样品荷叶塘陨石岩石学类型上基本相似,仅重结晶程度稍高,本次研究选择其用于全岩成分测定的方法精度对比。本次研究用 6 个标准参考物质作为外标对样品进行外部校正,分别为美国地质勘探局标准物质(USGS):AGV-1(安山岩),BHVO-1(玄武岩),BHVO-2(玄武岩),BCR-2(玄武岩);南非矿物冶金技术局标准物质(MINTEK):SARM-4(苏长岩);以及一个实验室内部标样 RO-A1(辉石岩)(Xu, 2002)。样品和标准物质粉末(<200 目)~40mg 经精确称重后置入 Teflon 容器中,加 7M HNO<sub>3</sub> 0.6mL 和浓 HF 0.6mL,超声 1h 后,110℃ 保温 24h,然后将

Teflon 容器置入不锈钢 Bomb,190℃ 密封炉中保温 48h,冷却后取出并蒸干,重溶于 4mL 4M HNO<sub>3</sub>,分出其中 1/4,用 0.3% HNO<sub>3</sub> 稀释至 500 倍,再将 500 倍样品溶液分成 3/4 和 1/4 份分别稀释为 1000 倍和 2000 倍,使用等离子体发射光谱仪(ICP-AES)和电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)分别进行主量元素和微量元素测定,样品处理过程与测定方法详见 Wang and Lin (2007)。

本次工作使用超纯 HNO<sub>3</sub> 和 HF 由分析纯(AR) HNO<sub>3</sub>、HF 经过亚沸腾二次蒸馏获得。超纯水为(18Ω)微孔水净化系统提供。所有上机测定溶液介质为 3% (v/v) HNO<sub>3</sub>。

### 3.2 矿物岩石学和主、微量元素测定方法

本次研究使用荷叶塘陨石磨制光片和薄片各一片,应用正交偏光透反射显微镜和电子探针(EMPA)进行岩矿观察研究。矿物化学组成的定量分析使用桂林理工大学

JXA8230 电子探针测定, 加速电压为 20kV, 加速电流为 20nA, 束斑 10 $\mu$ m (细粒矿物 3~5 $\mu$ m), 数据校正用 ZAF 方法。全岩主量元素测定使用 VISTA-PRO, ICP-AES, 5 $\mu$ g/mL 的 Mn 溶液用于调节 ICP-AES 的火炬 X, Y 位置, 多元素标准溶液 (单元素含量为 5 $\mu$ g/mL) 用来优化仪器。1 $\mu$ g/mL Lu 为 ICP-AES 测定内标。全岩痕、微量元素测定则使用 Perkin-Elmer Sciex ELAN 6000 ICP-MS (电感耦合等离子质谱仪)。使用多元素混合溶液 (单元素含量为 10ng/mL) 对 ICP-MS 进行仪器优化。10ng/ml Rh 信号读数高于  $3 \times 10^5$  每秒 (cps), 氧化物产率小于 2%。10ng/mL Rh 作为 ICP-MS 测定内标。详细测定程序和干扰校正参考文献 Liu *et al.* (1998) 和刘颖等 (1996)。全岩化学成分分析测试完成于中科院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室。

## 4 矿物学特征

### 4.1 模式组成

荷叶塘陨石中球粒密集堆积, 金属、硫化物呈团块状或细脉状分布, 具有典型的球粒陨石结构, 球粒边界清晰 (图 2a)。荷叶塘陨石组成成分模式丰度为: 球粒 80%, 金属矿物 5%, 基质 15%。球粒直径大小 0.2~1.6mm 不等, 以 ~0.5mm 直径的球粒为主, 对薄片 122 个球粒直径统计 (图 2b), 平均直径 0.53mm。不透明矿物主要为铁镍金属和陨硫铁, 分布在球粒边缘、球粒中或矿物裂隙中, 呈粒状和细脉状, 细脉多被氧化为褐铁矿 (图 2c)。基质不透明, 背散射电子图像中观察其组成主要为隐晶质 (矿物结晶颗粒 < 5 $\mu$ m) 的橄榄石、辉石、玻璃质长石和金属、硫化物等, 图 2d)。球粒中主要矿物为橄榄石、辉石、Fe-Ni 金属和硫化物。球粒中金属和硫化物为圆珠状和粒状, 其中粒状主要分布于球粒边部, 细脉充填于裂隙中, 未见有穿叉关系, 氧化边较细较少。

### 4.2 球粒

荷叶塘陨石球粒多而密集, 球粒形状呈圆-次圆形、卵形或碎片出现 (图 2a)。球粒类型多, 矿物组成和结构具明显差异, 所有球粒均有一个富 Fe 的细粒橄榄石围绕边 (图 3a-h), 其成分与球粒组成物质截然不同。主要球粒类型详述如下:

斑状橄榄石球粒 (PO, 图 3a)。由紧密堆积的橄榄石斑晶和间隙物组成。斑晶为镁橄榄石, 背散射图中橄榄石颗粒边部和裂隙明显更亮, 颜色更浅, 表明含铁量明显增加。间隙物为长石质玻璃, 颜色较镁橄榄石斑晶浅。不透明矿物呈圆珠状, 由铁纹石或铁纹石、镍纹石和陨硫铁三者共生组成, 不同矿物之间无包围关系。球粒外围由细粒边包围, 主要成分为橄榄石和金属、硫化物。

斑状辉石橄榄石球粒 (POP, 图 3b)。橄榄石和辉石斑晶共存, 为镁橄榄石和顽火辉石。见嵌晶结构, 辉石核部有

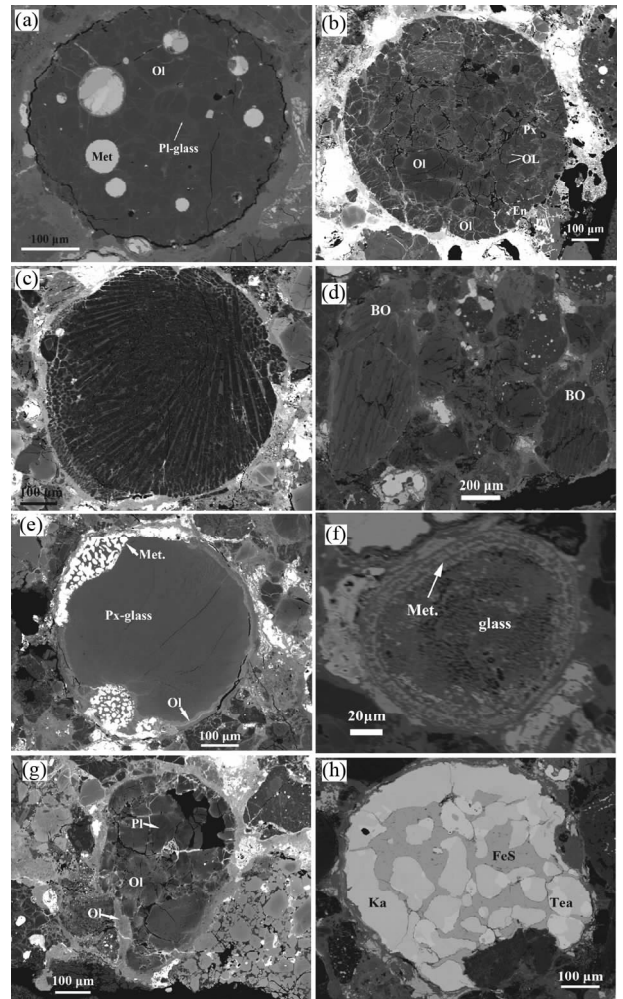


图 3 荷叶塘陨石中的球粒多样性背散射图像

(a) 斑状橄榄石球粒 (PO); (b) 橄榄石辉石球粒 (POP); (c) 放射状辉石球粒 (RP); (d) 炉条状橄榄石球粒 (BO); (e) 隐晶质球粒 (C); (f) 复合球粒 (CC); (g) 粒状橄榄石球粒 (GO); (h) 金属-硫化物球粒

Fig. 3 BSE images of chondrule diversity in Heyetang meteorite

(a) porphyritic olivine chondrule (PO); (b) porphyritic olivine-pyroxene chondrule (POP); (c) radial pyroxene chondrule (RP); (d) barred olivine chondrule (BO); (e) cryptocrystalline chondrule (C); (f) compound chondrule (CC); (g) granular olivine chondrule (GO); (h) metal-sulfide chondrule

小而浑圆的橄榄石晶体, 矿物表面裂隙较多, 球粒边部裂隙多被金属细脉充填。球粒核部斑晶矿物的 Mg 含量比边部高, Fe 含量相反。球粒边缘被细粒橄榄石和金属颗粒及细脉环绕, 不透明矿物明显比 PO 球粒边缘多。

放射状辉石球粒 (RP, 图 3c)。由斜顽火辉石纤维束状放射排列, 间隙物为长石质玻璃。表现为初始结晶状态, 间隙物少, 球粒有细粒橄榄石包围边。

炉条状橄榄石球粒 (BO, 图 3d)。橄榄石条状平行排列, 图 3d 中有两个 BO 球粒分别位于图片左边和右边。

表1 球粒中代表性硅酸盐矿物化学成分电子探针测定结果(wt%)

Table 1 Silicate mineral analyses by electron probe microanalysis (wt%)

Mineral	Grain	CH type	Sub-type	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Total
Ol	1	PO		42.5	0.06	0.25	0.04	0.47	n. d.	56.2	0.54	n. d.	n. d.	100.0
	2	PO		44.2	0.08	0.18	0.08	0.41	n. d.	56.2	0.50	0.03	n. d.	101.6
	3	GO		40.7	0.02	0.02	0.04	7.14	0.08	51.6	0.02	n. d.	0.01	99.6
	4	GO		40.5	n. d.	0.03	0.12	7.88	0.10	50.5	0.01	0.02	n. d.	99.1
	5	GO		40.1	0.08	0.21	0.23	8.92	0.06	50.6	0.05	0.17	0.11	100.6
	6	GO		42.6	0.04	0.01	0.09	13.7	0.31	46.6	0.01	n. d.	0.01	103.3
	7	POP		42.3	0.09	0.39	0.19	4.55	0.12	52.8	0.48	0.08	0.01	101.0
	8	POP	I type	42.0	0.01	n. d.	0.10	5.75	0.47	51.6	0.10	0.04	0.02	100.0
	9	POP		41.4	0.02	0.08	0.20	2.20	0.01	55.5	0.10	0.03	0.01	99.5
	10	POP		41.3	0.08	0.07	0.20	5.22	0.07	52.7	0.27	0.03	n. d.	99.9
	11	POP		39.8	n. d.	0.08	0.15	5.38	0.10	52.7	0.17	n. d.	0.01	98.4
	12	POP		40.4	n. d.	0.01	0.03	3.78	0.09	53.7	0.13	0.01	n. d.	98.2
	13	PO		42.2	0.03	0.16	0.08	2.43	0.07	54.5	0.33	0.01	0.01	99.8
	14	PO		42.0	n. d.	0.03	n. d.	2.73	0.06	54.2	0.17	n. d.	n. d.	99.3
	15	PO		41.6	0.09	0.17	0.14	1.71	0.08	55.2	0.44	n. d.	0.02	99.4
	16	POP		37.8	0.03	0.01	0.08	30.4	0.31	32.6	0.17	n. d.	n. d.	101.4
	17	POP		39.8	0.07	0.20	0.64	12.1	0.29	47.3	0.02	0.08	0.07	100.6
	18	PO		41.1	n. d.	0.02	0.20	10.2	0.24	49.0	0.06	0.05	n. d.	100.8
	19	PO	II type	39.0	n. d.	0.01	0.03	18.3	0.47	42.1	0.09	0.07	n. d.	100.0
	20	POP		44.2	0.07	0.91	0.46	11.1	0.38	42.0	0.47	0.13	0.07	99.9
	21	POP		40.8	n. d.	0.02	n. d.	14.8	0.79	43.7	0.17	0.02	0.02	100.3
	22	PO		38.8	n. d.	0.02	0.09	20.2	0.38	40.4	0.10	0.01	0.01	100.0
	23	PO		40.9	n. d.	n. d.	0.23	10.6	0.31	48.1	0.05	0.02	n. d.	100.2
Fa 变化区间 0.41 ~ 34.1; Fa 平均值 17.8; PMD 51														
Px	1	CC		57.3	0.02	0.21	0.47	2.33	0.05	38.0	0.10	0.08	0.01	98.5
	2	CC		58.7	0.01	0.20	0.50	1.56	0.05	38.4	0.11	0.01	n. d.	99.5
	3	POP		57.3	0.08	0.37	0.79	3.63	0.38	35.4	0.78	0.24	0.09	99.1
	4	POP	I type	57.7	0.09	0.27	0.69	3.99	0.43	35.9	0.44	0.08	0.04	99.6
	5	POP		57.5	0.08	0.52	0.57	1.38	0.13	38.1	0.20	n. d.	0.01	98.5
	6	POP		59.0	0.06	0.47	0.52	1.27	0.09	37.8	0.28	n. d.	0.01	99.5
	7	POP		58.1	0.07	0.33	0.64	6.64	0.51	33.2	0.40	0.05	0.03	100.0
	8	POP		57.7	0.08	0.27	0.69	5.99	0.40	34.4	0.32	0.06	0.01	99.9
	9	C	II type	55.8	0.09	1.51	0.97	15.7	0.72	22.4	1.41	0.96	0.38	99.9
Fs 平均值 10.7; PMD 88; Wo 平均值 0.90; PMD 103; En 平均值 91.7; PMD 9.65														
Ol	基质	球粒边部微晶	33.8	0.1	2.4	0.2	35.4	0.3	24.5	1.0	0.8	0.4	99.0	
			35.6	0.1	0.1	0.6	41.8	0.6	20.0	0.3	0.1	n. d.	99.1	
Px	间隙物	辉石碎屑	54.1	0.04	0.25	0.17	15.0	0.18	28.2	0.52	0.09	0.01	98.7	
			54.5	0.10	1.42	0.22	15.7	0.85	23.2	1.82	0.70	0.07	98.5	
长石质	基质		58.5	1.1	22.1	0.6	1.7	0.0	0.2	0.0	10.3	4.8	99.3	
	基质	玻璃	50.4	1.0	21.3	0.5	1.1	0.1	7.0	14.8	3.0	0.2	99.4	
	间隙物		69.1	0.6	15.8	0.1	1.7	0.1	3.0	1.6	7.5	0.1	99.5	

注:Fa-橄榄石中 Fe 含量(mol%),  $Fa = [Fe/(Fe + Mg)] \times 100$ ;Fs-辉石中 Fe 含量(mol%),  $Fs = [Fe/(Fe + Mg)] \times 100$ ;En-辉石中 Mg 含量(mol%),  $En = [Mg/(Fe + Mg + Ca)] \times 100$ ;Wo-辉石中 Ca 含量(mol%),  $Wo = [Ca/(Fe + Mg + Ca)] \times 100$ ;PMD = 标准偏差/平均值  $\times 100\%$ . n. d. -低于检测线

隐晶质球粒(C, 图 3e, f)。图 3e 中隐晶质球粒由辉石质玻璃组成,局部可见放射状晶骸。近边部金属熔滴状出现,熔滴间隙成分与球粒中部一致;图 3f 中隐晶质球粒完全由未结晶玻璃组成,边部为金属,近似于图 3e 球粒中的熔滴状。两球粒均具细粒橄榄石包围边。

粒状橄榄石球粒(GO, 图 3g)。粒状橄榄石组成,晶体

颗粒大小 20 ~ 200  $\mu\text{m}$ , 橄榄石成分呈环带分布,铁含量由橄榄石颗粒核部至边部增高,核部可见长石玻璃,几乎无间隙物,图中黑色区域可能是间隙物,因其松散而在磨制薄片过程中丢失。具球粒橄榄石细粒包围边,探针成分表明细粒部分 Fe 含量明显比球粒中大颗粒橄榄石高。

金属-硫化物球粒(图 3h)。次圆形,球粒由铁纹石、镍纹

表 2 金属和硫化物化学成分电子探针测定结果 (wt%)

Table 2 Kamacite, taenite, and troilite analyses by electron probe microanalysis (wt%)

Mineral	含量	Cu	Fe	S	Co	P	Cr	Ni	Total	n
陨硫铁	平均值	0.01	64.0	35.78	0.03	n. d.	0.03	0.04	99.9	17
	min	n. d.	62.3	32.60	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.		
	max	0.08	67.3	37.46	0.09	0.02	0.12	0.13		
铁纹石	平均值	0.01	94.4	0.05	0.62	n. d.	0.16	4.63	99.9	38
	min	n. d.	92.1	n. d.	0.32	n. d.	n. d.	2.74		
	max	0.07	96.3	1.54	0.86	0.03	1.20	6.36		
	PMD		1.11		20.1			22.4		
镍纹石	平均值	0.16	57.1	0.01	0.13	0.01	0.07	42.5	100	28
	min	0.03	47.0	n. d.	0.06	n. d.	n. d.	27.8		
	max	0.23	71.6	0.03	0.37	0.03	0.54	52.7		

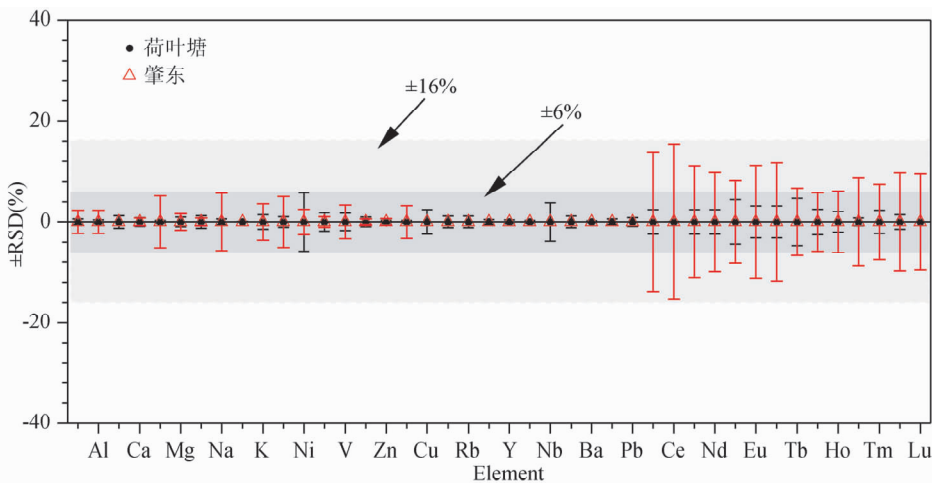


图 4 本次测定结果精度与准确度

图中实心圆符号为荷叶塘陨石本次研究两次测定结果偏差相对平均值的 RSD(%), 空心三角符号为肇东陨石本次测定与中子活化测定结果(王道德等, 1993)和 ICPMS 测定结果(Liu *et al.*, 1998)的偏差相对平均值的 RSD(%)

Fig. 4 The precision and accuracy of analyses in this study

Solid circles are RSD(%) from two times measurement results of Heyetang meteorite in this study, open triangles are that of Zhaodong meteorite from this study and published data (Wang *et al.*, 1993; Liu *et al.*, 1998)

石和陨硫铁组成, 内部 Fe-Ni 金属和陨硫铁混杂分布没有明显规律性, 外层主要为铁纹石, 球粒具细粒橄榄石边。

### 4.3 金属和硫化物

金属和硫化物以球粒或熔离状态呈圆珠状出现在硅酸盐球粒中或间隙物中(图 3a-h), 在一些球粒矿物裂隙中以细脉状分布, 基质中呈粒状分布(图 3b, g)。金属球粒中偶见磁铁矿。陨硫铁中 Ni 含量平均值为 0.04%。

### 4.4 矿物化学成分

荷叶塘陨石中 I 型(贫铁型)球粒为主, II 型(富铁型)球粒很少, 本次研究分别选取两种球粒中的橄榄石和辉石组分及金属、硫化物进行了电子探针测定, 结果见表 1、表 2。球粒中结晶矿物为橄榄石和辉石, 橄榄石  $\text{Fa}_{9.15(0.41-34.1)}$ , PMD (percent of mean deviation) = 51, 次要组分为 MnO

(~0.21%), CaO(~0.19%),  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ (~0.15%); 辉石颗粒以斜方辉石为主, 钙含量低,  $\text{Fs}_{10.7(1.82-27.2)}$ ,  $\text{En}_{91.7(69.7-97.7)}$  和  $\text{Wo}_{0.90(0.18-3.13)}$ , PMD 分别为 88、9.65 和 103, 次要组分为  $\text{Al}_2\text{O}_3$ (~0.46%),  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ (~0.47%), MnO(~0.39%), CaO(~0.47%),  $\text{Na}_2\text{O}$ (~0.22%) 和  $\text{K}_2\text{O}$ (~0.05%)。球粒中橄榄石和辉石两种矿物大多为高 Mg, 低铁矿物。球粒边部细粒矿物则相反, Fe 含量普遍高于球粒中的结晶矿物颗粒, 球粒间隙物中细粒辉石的 Fe 和 Ca 含量也明显高于球粒中辉石晶体, 表明间隙物与球粒来源和成因的差异。基质和间隙物中的长石质玻璃具较高的  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、CaO、 $\text{Na}_2\text{O}$  和  $\text{K}_2\text{O}$  含量(表 1)。

铁纹石中的 Ni 含量为 2.74% ~ 6.36%, Co 含量为 0.32% ~ 0.86%, PMD 为 20.1。镍纹石中 Ni 含量为 27.8% ~ 52.7%, 平均 42.5%, Co 平均 0.13%, Cu 平均 0.16%。陨硫铁中 Fe 和 S 的含量基本无变化, 平均值分别为 64.0% 和

表3 荷叶塘陨石全岩主(wt%)、微量( $\times 10^{-6}$ )元素含量Table 3 Bulk chemical compositions of Heyetang meteorite (major elements; wt%; trace elements;  $\times 10^{-6}$ )

地区 样品	荷叶塘		肇东(L4)				
	荷叶塘 -1	荷叶塘 -2	RSD (%)	本次 测定	中子活 化 <sup>a)</sup>	ICP- MS <sup>b)</sup>	RSD (%)
SiO <sub>2</sub>	41.4	41.8	0.6	41.4	40.0		2.3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.17	2.16	0.3	2.32	2.25		2.3
TiO <sub>2</sub>	0.10	0.09	1.2	0.10			
CaO	1.63	1.62	0.8	1.70	1.72		0.8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	31.3	31.2	0.3	29.9	32.1		5.2
MgO	23.3	23.1	0.9	24.3	24.8		1.6
MnO	0.29	0.29	1.2	0.32	0.32		0.7
Na <sub>2</sub> O	0.66	0.66	0.5	0.86	0.95		6.8
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.25	0.25	0.0	0.21			
K <sub>2</sub> O	0.08	0.08	1.4	0.11	0.10		3.7
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.52	0.51	1.0	0.54	0.58		5.1
Ni(wt%)	1.24	1.34	5.8	1.23	1.27		2.5
Sc	7.31	7.49	1.8	8.10	8.22		1.0
V	61.30	62.8	1.7	69.6	73.0		3.4
Co	542	549	0.9	562	566		0.6
Zn	54.5	54.3	0.2	60.4	61.0		0.7
Ga	5.57	5.54	0.3	5.97	5.70		3.2
Cu	74.2	76.8	2.4	80.8			
Ge	10.1	10.2	1.1	12.4			
Rb	2.23	2.20	1.1	3.77			
Sr	9.28	9.34	0.5	9.98			
Y	2.05	2.06	0.4	2.24			
Zr	10.6	10.6	0.2	10.9			
Nb	0.41	0.43	3.9	0.45			
Cs	0.13	0.13	1.1	0.41			
Ba	5.10	5.09	0.1	5.89			
Hf	0.14	0.14	0.5	0.15			
La	0.29	0.30	2.4	0.31	0.03	0.37	13.8
Ce	0.78	0.78	0.1	0.82		1.03	15.5
Pr	0.12	0.12	2.4	0.13		0.15	11.1
Nd	0.58	0.60	2.4	0.63		0.72	9.7
Sm	0.19	0.20	4.4	0.21	0.21	0.24	8.2
Eu	0.07	0.07	3.2	0.08	0.08	0.09	11.1
Gd	0.24	0.25	3.1	0.28		0.33	11.7
Tb	0.04	0.05	4.7	0.05		0.06	6.7
Dy	0.31	0.32	2.5	0.36		0.39	5.9
Ho	0.07	0.07	2.0	0.08		0.09	6.2
Er	0.20	0.21	0.7	0.23		0.26	8.7
Tm	0.03	0.03	2.2	0.03		0.04	7.5
Yb	0.20	0.21	1.4	0.23	0.21	0.26	9.6
Lu	0.03	0.03	0.0	0.03	0.03	0.04	9.4

注:主量元素含量由 ICP-AES 测定,微量元素含量由 ICP-MS 测定; SiO<sub>2</sub> 含量为平衡模式计算结果. a) 王道德等(1993)等中子活化分析结果;b) Liu *et al.* (1998), ICP-MS 分析结果. RSD(%) = (标准偏差/平均值)  $\times 100$ , 荷叶塘陨石 RSD(%) 为两次测定值,肇东主量元素含量的 RSD(%) 为本次测定与王道德等(1993)等中子活化分析结果比较,肇东微量元素 RSD(%) 为本次测定与 Liu *et al.* (1998), ICP-MS 分析结果比较. n. d. -低于检测线

35.8%, Ni 含量  $< 0.13\%$ 。

## 5 主微量元素组成

全岩的主微量元素含量见表3。为了检验仪器测定稳定性和精度及化学过程,对荷叶塘样品分别两次取样和测定,两次测定结果的所有测定元素 RSD(相对标准偏差)均小于6%。肇东陨石主量测定结果与中子活化分析结果(王道德等, 1993)一致, RSD 小于7%, 微量元素测定结果与 Liu *et al.* (1998)测定结果一致, RSD 小于16%, 表明本次测定主、微量元素精度和准确度可靠。测定偏差对比见图4。

## 6 类型划分

### 6.1 岩石、矿物学和全岩化学组成的类型划分

依据 Van Schmus and Wood (1967) 提出的岩石学-化学二维分类法, 将球粒陨石划分为6个岩石学类型(1-6型), 分别代表化学平衡、结构重结晶和热变质程度的变化。Kerridge and Matthews (1988) 在此基础上将其延伸为7个岩石学类型, 即按其受蚀变和重结晶程度划分: 3型以下2-1型水蚀变程度和含水矿物增加, 1型陨石中矿物几乎完全水蚀变; 3型以上4-7型热变质程度和组成矿物重结晶程度增加, 7型陨石经历多阶段冲击熔融, 球粒和基质物质完全重结晶, 几乎看不到球粒轮廓, 具残余球粒, 长石颗粒  $> 100\mu\text{m}$ , 贫钙的斜方辉石中  $\text{CaO} > 1\%$ ; 3型普通球粒陨石是遭受水、热变质程度都最少的原始类型陨石。划分参数见表4, 因7型是6型的延伸, 很少见, 未列入表中。

荷叶塘陨石中球粒紧密堆积, 球粒边界清晰, 基质不透明, 球粒占体积比80%, 金属和硫化物5%, 基质15%。球粒类型多, 直径大小0.2~1.6mm不等, 以0.5mm直径球粒为主, 平均直径为0.53mm(图2b), 球粒中辉石矿物以低钙单斜辉石为主, 观察薄片未发现难熔包体。基质中长石质玻璃未发生重结晶, 无二次长石。铁纹石和镍纹石都有出现, 矿物组成成分变化大, 橄辉石  $\text{Fa}_{0.41-34.1}$  (PMD = 51), 低钙辉石  $\text{Fs}_{1.82-27.2}$  (PMD = 88); 有原始玻璃球粒, 铁纹石、镍纹石、陨硫铁均有出现, 镍纹石中 Ni 最高含量达52.7%, 陨硫铁中 Ni 平均含量为0.04%。对比表4岩石学类型划分参数, 可将其岩石类型划分为3型非平衡型原始普通球粒陨石。

金属和硫化物体积百分比和球粒平均直径也可作为普通球粒陨石的岩石学分类参考, 据 Scott and Krot (2007) 统计, 高铁群(H)、低铁群(L)和低铁低金属群(LL)普通球粒陨石的金属和硫化物含量平均值分别为8vol%, 3vol%和1.5vol%, 球粒平均直径分别为0.3mm、0.5mm和0.6mm, 荷叶塘陨石岩石学特征(金属和硫化物含量5vol%, 球粒平均直径为0.53mm)更接近L型。

表 4 岩石类型划分参数(据 Kerridge and Matthews, 1988)

Table 4 Definitions of petrologic types (after Kerridge and Matthews, 1988)

特征	岩石类型						荷叶塘陨石	
	1	2	3	4	5	6		
橄榄石和辉石组成均一性		PMD > 5%		PMD < 5%		均一		Fa-PMD = 50.9%、 Fs-PMD = 78.9%
低钙辉石结构		单斜辉石为主		单斜		斜方		单斜辉石为主
				>20%	<20%			
二次长石的发育程度		无		<2 $\mu$ m grains	<50 $\mu$ m grains	>50 $\mu$ m grains		无
火成玻璃		纯净的均质原始玻璃; 丰度不确定		无或浑浊	无			原始玻璃
金属矿物(Ni 最大含量)		<20%、无镍纹石或很小		>20%、铁纹石和镍纹石都有出现				镍纹石最大 Ni 含量: 52.7%
硫化物(平均 Ni 含量)		>0.5%		<0.5%				平均 0.04%
整体结构	无球粒	球粒边界清晰		球粒易分辨	球粒可分辨	球粒难分辨		球粒边界清晰
基质结构	全部细粒, 不透明	几乎不透明		不透明	透明微晶	重结晶		不透明

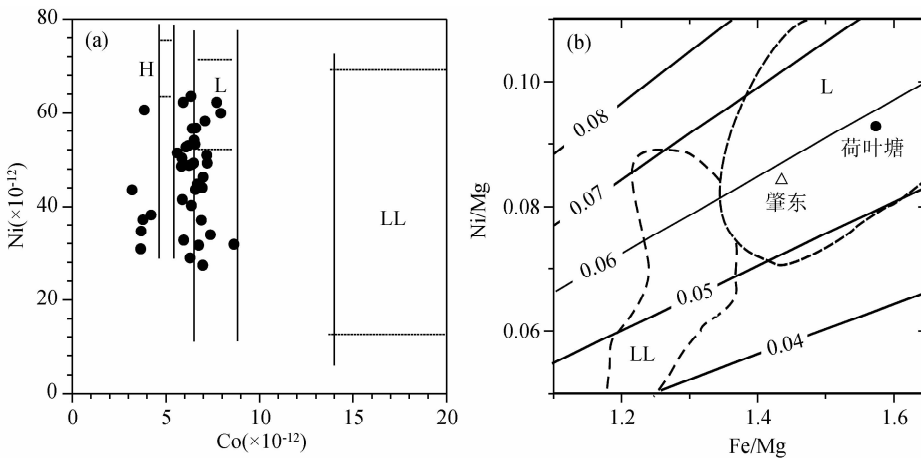


图 5 Co, Ni 在铁纹石和全岩中的含量特征

(a) 图中实心圆点为本次测定铁纹石中 Co 和 Ni 含量, 而划分 H, L 和 LL 区域的虚、实线为参考分界线, 划分参数引自 Rubin (1988); (b) 低铁型普通球粒陨石 Ni/Mg-Fe/Mg 分布图引自 Jarosewich and Dodd (1981), 斜线为 Ni/Fe 比. 荷叶塘与肇东数据均落在 L 群范围内

Fig. 5 Co and Ni contents in kamacite and whole rock

(a) solid circles are the Co and Ni contents in kamacite from Heyetang meteorite in this study. The solid and dot line is the boundary of H, L and LL from Rubin (1988); (b) plot of Ni/Mg vs. Fe/Mg in iron-poor ordinary after Jarosewich and Dodd (1981). Lines of constant Ni/Fe are shown in the plot. Both data of Heyetang and Zhaodong meteorites are fallen in L field

球粒陨石由硅酸盐矿物、硫化物和金属等聚集而成, 不同类型球粒陨石矿物和全岩化学组成呈系统性变化, 普通球粒陨石的一个重要分类参数是陨石的氧化程度, 它与铁的价态相关, Fe 以 FeO 的形式产出于硅酸盐氧化物内, 和以  $Fe^{2+}$  或  $Fe^{3+}$  产出于硫化物和氧化物内. 普通球粒陨石群由 H $\rightarrow$ L $\rightarrow$ LL 氧化态增加, 硅酸盐中的氧化铁比例也随之增加, 金属铁则因氧化作用而减少, 使 Fe-Ni 金属中 Fe 亏损而 Ni 及 Co 相对富集, 而 Co 的富集程度更为明显. 因此, 橄榄石和低钙辉石中可反映 Fe 含量的 Fa、Fs 可作为重要分类参数 (Brearley and Jones, 1998; Burke, 1986; Kerridge and

Matthews, 1988; Larimer and Wasson, 1988; Sears and Dodd, 1988; Van Schmus and Wood, 1967; Wasson, 1985), 对于橄榄石和低钙辉石的 Fa/Fs 值介于群分界值附近或因成分变化大而不能使用 Fa/Fs 值作为分类依据的非平衡型陨石, 金属中 Co 含量则可作为重要补充参数. 荷叶塘陨石为非平衡型原始陨石, 橄榄石和辉石的 Fa/Fs 变化范围大, 由于数值分散, 不能作为分类依据, 所测 38 个铁纹石颗粒中 Co 含量范围在 3.2~8.6 mg/mg, 平均值为 6.2 mg/mg (表 2), 覆盖了 H 和 L 群普通球粒陨石的 Co 含量范围 (H: 4.4~5.2 mg/mg, L: 6.7~8.9 mg/mg) 内, 铁纹石中 Ni 含量作为一个参考, 不能精



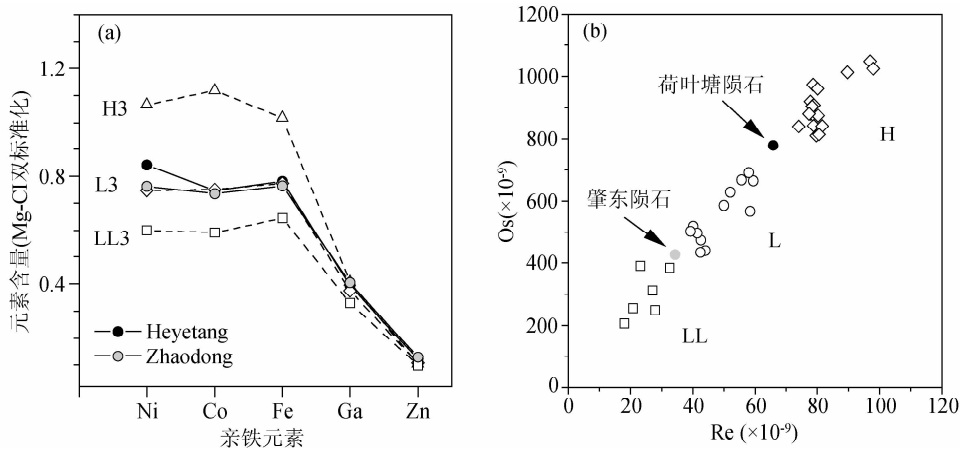


图6 荷叶塘陨石亲铁元素特征

(a) CI-Mg 双标准化后的亲铁元素丰度. 本次测定荷叶塘陨石和肇东陨石(L4)亲铁元素分布特征与 H3, L3 和 LL3 型陨石平均值(王道德等,1993)对比, 与 L3 型特征基本一致;(b)普通球粒陨石 Re, Os 含量分布具明显分类意义, 数据引自己发表文献(Chen *et al.*, 1998; Horan *et al.*, 2009; Morgan and Lovering, 1967; Poirier *et al.*, 2004; Walker *et al.*, 2002; 王道德等, 1993; 支霞臣等, 2007). 荷叶塘陨石和肇东陨石数据分别位于 L 群两个端元

Fig.6 Siderophile element abundances of Heyetang meteorite

(a) magnesium- and CI-normalized bulk siderophile element abundances of the H3, L3 and LL3 after Wang *et al.* (1993). Data of Heyetang and Zhaodong meteorites in this study are agree with that of L3 type. (b) Re and Os content of ordinary chondrites shows significance on classification after published data (Chen *et al.*, 1998; Horan *et al.*, 2009; Morgan and Lovering, 1967; Poirier *et al.*, 2004; Walker *et al.*, 2002; Wang *et al.*, 1993 and Zhi *et al.*, 2007). The values of Heyetang and Zhaodong meteorite are at opposite ends of L group

确匹配类型划分, 38 个铁纹石中 Ni 含量范围在 27.4 ~ 63.6g/mg, 平均含量为 46.3g/mg, 覆盖了 L 和 LL 型普通球粒陨石的 Ni 含量范围(L: 52 ~ 71g/mg, LL: 13 ~ 69g/mg) (Rubin, 1988) (图 5a)。依据荷叶塘陨石全岩化学组成, 其 Mg/Si、Ca/Si 和 Fe/Si 原子比分别为 0.92、0.046 和 0.62, Kerridge and Matthews (1988) 经统计列出普通球粒陨石元素平均值 Mg/Si 原子百分比为 0.96 (H)、0.93 (L)、0.94 (LL), Ca/Si 原子百分比为 0.05 (H)、0.046 (L)、0.049 (LL), Fe/Si 原子百分比为 0.81 (H)、0.57 (L)、0.52 (LL), 与之对比, 荷叶塘陨石中以上三种原子百分比均接近 L 型普通球粒陨石。依据全岩成分, 荷叶塘陨石和对比样肇东陨石(L4)的 Ni/Mg 和 Fe/Mg 比值均落于 L 群范围, 且接近 0.06 Ni/Fe 比值线(图 5b)。

元素具不同的化学亲和性决定了它们出现在陨石中的环境。与已发表数据对比, 荷叶塘陨石亲铁元素 Ni, Co, Fe, Ga 和 Zn 的含量分布与 L3 型陨石基本一致, Ni 元素略微偏高, 而本次测定的另一 L4 型肇东陨石亲铁元素与 L3 型陨石则完全吻合(图 6a), 而另一重要参数, Re-Os 含量亦与 L 群普通球粒陨石一致(图 6b)。综上所述, 荷叶塘陨石在矿物和全岩化学组成上, 均与 L3 型普通球粒陨石一致。

## 6.2 荷叶塘陨石亚类型划分

3 型球粒陨石是未受或受变质程度最低的岩石学类型, 在矿物学上是最接近小行星堆积形成的最原始类型, 因为其矿物未经历足以使它们达到平衡的热过程, 也叫“非平衡型

球粒陨石”。3 型球粒陨石的变质强度范围也很宽, 鉴于 3 型陨石的重要性和矿物学上的较大差异, 亚类划分对鉴别最原始球粒物质非常有用。目前, 主要对普通球粒陨石(OC), CV3 和 CO3 群球粒陨石进行了亚类划分。OC 的 3 型(包括 H3、L3 和 LL3)亚类划分主要依据(Sears and Dodd, 1988)的参数, 如基质的重结晶体积百分数、FeO 相对全岩比例、橄榄石中 Fa 和铁纹石中 Co 的 PMD 值、以及热释光特性(TL), 将其划分为 3.0 ~ 3.9 等 10 个亚类。CV3 的亚类划分依据(Guimon *et al.*, 1995)的划分参数, 如橄榄石的 Fa 和 PMD 值、硫化物中 Ni 含量、碳含量和水含量等将其划分为 3.0 ~ 3.3 等 4 个亚类。CO3 的亚类划分则是参照 Scott and Jones (1990)的参数, 依据橄榄石、基质和铁纹石中的成分含量变化将其划分为 3.0 ~ 3.7 等 8 个亚类。总之, 球粒间的基质重结晶程度决定了亚类型的高低, 根据扫描电镜和电子探针测定可进行精确划分。

依据 Sears and Hasan (1987)、Sears and Dodd (1988) 的 3 型 OC 划分参数(表 5), 荷叶塘陨石基质重结晶程度低 (<20vol%), 对应亚类为 3.3; 硫化物中 Ni 平均含量 0.04% < 0.5%, 对应亚类  $\geq 3.2$ ; 橄榄石 Fa 的 PMD 为 51 (n=23), 对应亚类  $\leq 3.4$ ; 铁纹石中 Co 的 PMD 为 20 (n=38), 对应亚类为 3.2 型, 铁纹石中 Ni 的 PMD 为 22 (n=38), 对应亚类为  $\leq 3.1$  型。综合 5 项参数, 荷叶塘陨石各类参数集中在 3.2 ~ 3.4 之间。

Scott *et al.* (1994) 针对 LL3 型陨石中 I A 型球粒和 II A 型球粒中橄榄石的 CaO 和 FeO 含量, 对其进行了亚类划分。

表 5 3 型球粒陨石的次类型划分

Table 5 Subclassification of type 3 chondrites

亚类	基质		硫化物		PMD					
	重结晶(vol%)	HYT	Ni 平均含量(%)	HYT	Fa(橄榄石)	HYT	Co(铁纹石)	HYT	Ni(铁纹石)	HYT
3.0	<10		>0.5		>50		>26.3		>17	
3.1	10~20		>0.5		>50		21.3~26.3		>17	22.4
3.2	10~20	<20%	<0.5	0.04%	>50	50.9	16.3~21.3	20.1	10~17	
3.3	10~20		<0.5		>50		12.5~16.3		10~17	
3.4	~20		<0.5		>50		10.0~12.5		6~10	
3.5	~50		<0.5		41~50		7.5~10.0		6~10	
3.6	>60		<0.5		31~40		6.3~7.5		2.5~6	
3.7	>60		<0.5		21~30		3.1~6.3		2.5~6	
3.8	>60		<0.5		11~20		1.9~3.1		<2.5	
3.9	>60		<0.5		5~10		<1.5~1.9		<2.5	

注:亚分类参数引自 Sears and Dodd (1988) 和 Sears and Hasan (1987)

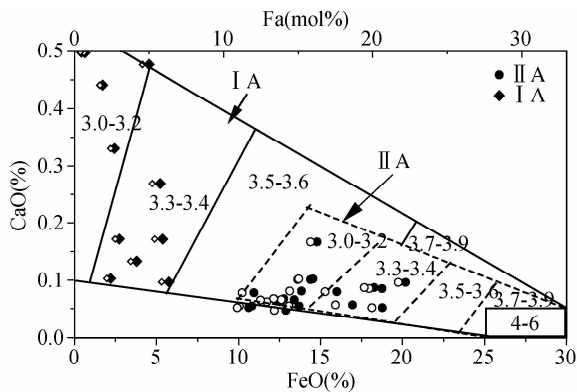


图 7 亚类型划分投影图(据 Scott *et al.*, 1994)

图中实心符号为 FeO-CaO 投影,空心符号为 Fa-CaO 投影

Fig. 7 Schematic plot for subclassification (after Scott *et al.*, 1994)

Solid circle and square are data of FeO vs. CaO, open circle of square are data of Fa vs. CaO

I A 型球粒是指贫 FeO 的橄榄石球粒(如 PO 或 BO), II A 型球粒是指富 FeO 的橄榄石球粒。L3 与 LL3 陨石在矿物组成上接近,因此,本文借用 Scott *et al.* (1994) LL3 型陨石的亚类划分方法,对荷叶塘陨石中两种类型球粒中橄榄石的 CaO 和 FeO 含量进行投影(图 7)。结果表明,本次测定数据均可落在此亚类划分图上,且数据分布于 3.0~3.4 区间。将此结果作为参考,综合 Sears and Hasan (1987)、Sears and Dodd (1988) 划分的参数,将荷叶塘陨石亚类划分为 L3.4 型。

### 6.3 冲击变质和风化程度

正交偏光透射镜下观察荷叶塘陨石薄片,橄榄石以清晰消光为主,部分可见微弱波状消光,橄榄石和辉石不规则破裂,无冲击脉。以上特征表明荷叶塘陨石遭受冲击程度较弱,依据 Stoeffler *et al.* (1991) 法,可将其划分为 S2 型。

陨石降落后会受到各种物理和化学的风化作用,这种作

用与陨落地点的气候条件、陨落时间和陨石本身的大小都有关系,这些风化最终可导致陨石分裂、破碎和消失,风化类型可指示陨石落地后所遭受的氧化程度,对我们了解陨石的居地时间和估算陨石的降落率有重要帮助。反光显微镜下观察荷叶塘陨石光、薄片,金属和硫化物无明显氧化,或有较薄褐铁矿氧化边和细脉,氧化物约占金属总量 5%~10% (图 2c),样品总体风化程度低,依据 Wlotzka (1993) 陨石风化类型划分法,可将其风化程度定义为 W1 型。

## 7 全岩化学成分和矿物化学组成几何空间的变化特征

荷叶塘陨石亲铁元素 Fe, Co, Ni 经 Mg-CI 双标准化计算后的值为 ~0.8 (图 6a), 低于 H 群而高于 LL 群, 与其经历氧化程度一致, 强挥发性元素 Ga 和 Zn 迅速降低, 表明其经历了高温过程。Re 和 Os 的含量分布位置(图 6b) 表明荷叶塘陨石形成位置间于 H 群与 L 群之间, 但更为靠近 L 群。亲石元素无明显变化, 与王道德和陈永亨(1991) 对 69 个普通球粒陨石的 L 和 LL 群亲石元素平均值特征一致(图 8a), K, Na 略微偏低。稀土元素模式为水平状(图 8b), 轻、重稀土分布一致, 但有明显的 Eu 负异常, 和略微偏高的 Lu。

矿物内部、球粒内部和球粒边部的细粒组成部分的矿物成分均具规律性变化。选取 II A 型球粒中成分环带状分布的较大橄榄石斑晶进行剖面测定, 镜下观察矿物核部颜色较深, 向边部逐渐变浅, 结果表明, 由橄榄石核部至边部, Fe 含量增加, Mg 含量降低, Cr 含量在核部最高, 向边部迅速降低(图 8c)。

I A 型球粒中的矿物颗粒成分较为均一, 以镁橄榄石和单斜顽辉石为主, 选取同一球粒中不同部分的橄榄石矿物颗粒进行测定, 结果表明, 在球粒个体空间范围内, 矿物颗粒成分亦呈规律性变化。由图 8d 可见, 球粒边部的矿物颗粒较之于球粒中心部位的颗粒具略微的 Fe 升高和 Mg 降低趋势, 边部矿物 Cr 含量与 Fe 变化趋势一致。与球粒内矿物相比,

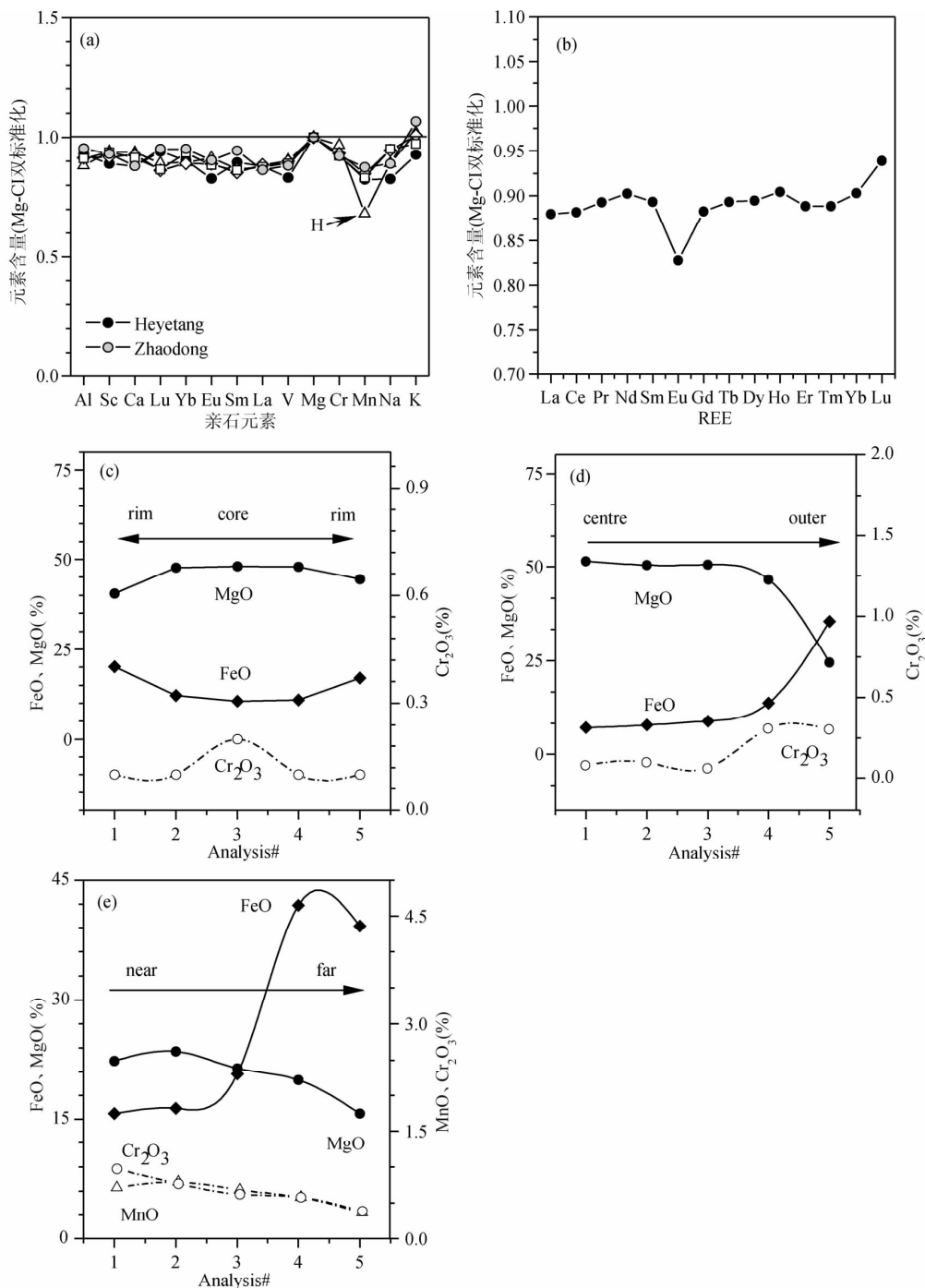


图8 亲石元素分布特征

(a) Mg-Cl 双标准化后的亲石元素丰度. 图中实心数据为本次研究测定荷叶塘数据,空心为引用亲石元素数据(王道德和陈永亨,1991); 空心三角为 H 群,空心正方形为 LL 群,空心圆为 L 群;(b) 稀土元素分布特征;(c) II 型 PO 球粒中橄榄石斑晶由边到核部的成分变化;(d) I 型 GO 球粒中由球粒中心至球粒边部不同橄榄石颗粒的成分变化,最外边两点分别为球粒包围边中细粒隐晶质橄榄石颗粒的成分变化;(e) 球粒边部细粒橄榄石成分变化与距离球粒位置相关

Fig. 8 Lithophile element abundances of Heyetang meteorite

(a) magnesium- and Cl-normalized bulk lithophile element abundances of Heyetang meteorite. Solid symbols are the data in this study, and hollow symbols are mean value of H3, L3 and LL3 after Wang and Chen (1991). Open triangle-H group, open square-LL group, open circle-L group; (b) magnesium- and Cl-normalized bulk REE element abundances of Heyetang meteorite; (c) composition vary in olivine phenocryst of II PO chondrule from rim to core; (d) compositions of olivine grain in GO chondrule of I type vary from chondrule centre to rim; (e) the compositions of fine-grain olivine are related to the distance from chondrule

细粒包围边 Fe、Mg 成分明显不同, Cr 含量变化不大。

对球粒包围边的细粒橄榄石成分进行测定表明, 细粒边由靠近球粒一端至远离球粒一端亦存在规律性成分变化, 即由近至远, Fe 含量增加, Mg 含量降低, Mn、Cr 含量亦降低(图 8e)。

金属和硫化物中普遍存在高 Ni 的镍纹石和 Fe-Ni 合金, FeS 中 Ni 含量很低 (<0.05%), 这些特征表明荷叶塘陨石未经历后期冲击和热蚀变作用。综上所述, 荷叶塘陨石中矿物组成元素没有经历平衡过程, 为原始组成。

## 8 结论

荷叶塘陨石在岩石学上应划分为 L3.4 型普通球粒陨石; 其风化程度为 W1 型; 冲击变质程度为 S2 型。是一块保存完好、质量较大的、很好的研究样品。

球粒中矿物组合为非平衡结晶产物, 具高温熔融快速冷却的明显特征。橄榄石和辉石颗粒有环带状和均一型两种, 均一型矿物主要为镁橄榄石和顽辉石, 球粒矿物成分与间隙物明显不同。环带状颗粒从核到边 FeO 增加, 一些球粒伴随橄榄石细粒包围边并富含 SiO<sub>2</sub> 玻璃。这些性质与球粒结构一样, 体现了迅速结晶的过程。环带和富 SiO<sub>2</sub> 玻璃可能都是由于未固化的残留液体保持瞬时平衡的结果。矿物环带与球粒矿物结构类型相关。II 型 PO 球粒中橄榄石环带更明显, 而 BO 球粒和 I 型 PO 球粒中橄榄石环带则不明显。

斑状球粒中橄榄石做为嵌晶被包围在辉石颗粒中, 橄榄石可能是来自前太阳颗粒的残余, 也可能是球粒原始物质细粒加热产物, 几乎纯的镁橄榄石被顽辉石包围形成嵌晶结构。

**致谢** 本文研究工作始终得到王道德先生的关心和帮助。感谢审稿人两次细致的评审和给予的中肯意见, 使本文在内容上更为完善。

## References

Bland PA, Berry FJ, Smith TB, Skinner SJ and Pillinger CT. 1996. The flux of meteorites to the Earth and weathering in hot desert ordinary chondrite finds. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(11): 2053-2059

Brearely AJ and Jones RH. 1998. Chondritic meteorites. In: Papike JJ (ed.). *Planetary Materials*. Washington DC: Mineralogical Society of America, 36: 1-398

Burke JG. 1986. *Cosmic Debris. Meteorites in History*. Berkeley: University of California Press

Chen JH, Papanastassiou DA and Wasserburg GJ. 1998. Re-Os systematics in chondrites and the fractionation of the platinum group elements in the early solar system. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(19-20): 3379-3392

Grossman JN and Wasson JT. 1983. The compositions of chondrules in unequilibrated chondrites an evaluation of models for the formation of chondrules and their precursor materials. In: King EA (ed.). *Chondrules and their Origins*. Houston, TX: Lunar and Planetary

Institute, 88-121

Grossman JN, Rubin AE, Nagahara H and King EA. 1988. Properties of chondrules. In: Kerridge JF and Matthews MS (eds.). *Meteorites and the Early Solar System*. Tucson: University of Arizona Press, 619-659

Guimon RK, Symes SJK, Sears DWG and Benoit PH. 1995. Chemical and physical studies of type 3 chondrites XII: The metamorphic history of CV chondrites and their components. *Meteoritics*, 30(6): 704-714

Halliday I. 2001. The present-day flux of meteorites to the Earth. In: Peucker Ehrenbrink B and Schmitz B (eds.). *Accretion of Extraterrestrial Matter Throughout Earth's History*. New York, United States: Kluwer Academic/Plenum Publishers

Horan MF, Alexander CMOD and Walker RJ. 2009. Highly siderophile element evidence for early solar system processes in components from ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(22): 6984-6997

Hutchison R. 2004. *Meteorites*. New York: Natural History Museum

Jarosewich E and Dodd RT. 1981. Chemical variations among L-group chondrites, II-Chemical distinctions between L3 and LL3 chondrites. *Meteoritics*, 16(1): 83-91

Jull AJT, Cloud TS and Cielaszyk E. 1998. 14C terrestrial ages of meteorites from Victoria Land, Antarctica, and the infall rates of meteorites. In: Grady MM (ed.). *Meteorites: Flux with Time and Impact Effects*. London: Geological Society Special Publication, 140: 75-91

Kerridge JF and Matthews MS. 1988. Chondrite bulk elemental analyses. In: Kerridge JF and Matthews MS (eds.). *Meteorites and the Early Solar System*. Tucson: University of Arizona Press, 1196-1197

Larimer JW and Wasson JT. 1988. Refractory lithophile elements. In: Kerridge JF and Matthews MS (eds.). *The Early Solar System*. Arizona: University Arizona Press, 394-415

Liu HC, Liu Y and Zhang ZX. 1998. Determination of ultra-trace rare earth elements in chondritic meteorites by inductively coupled plasma mass spectrometry. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 53(10): 1399-1404

Liu Y, Liu HC and Li XH. 1996. Simultaneous and precise determination of 40 trace elements in rock samples using ICP-MS. *Geochimica*, 25(6): 552-558

Morgan JW and Lovering JF. 1967. Rhenium and osmium abundances in chondritic meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 31(10): 1893-1909

Poirier A, Doucelance R and Gariépy C. 2004. Radiogenic isotope investigation of the St-Robert H5 fall. *Meteoritics & Planetary Science*, 39(12): 1983-1993

Rubin AE. 1988. Kamacite in Ordinary Chondrites. *Meteoritics*, 23: 299

Scott ERD and Jones RH. 1990. Disentangling nebular and asteroidal features of CO<sub>3</sub> carbonaceous chondrite meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54(9): 2485-2502

Scott ERD, Jones RH and Rubin AE. 1994. Classification, metamorphic history, and pre-metamorphic composition of chondrules. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(3): 1203-1209

Scott ERD and Krot AN. 2007. 1.07-Chondrites and Their Components. In: Heinrich DH and Karl KT (eds.). *Treatise on Geochemistry*. Oxford: Pergamon, 1-72

Sears DWG and Hasan FA. 1987. The type three ordinary chondrites: A review. *Surveys in Geophysics*, 9(1): 43-97

Sears DWG and Dodd RT. 1988. Overview and classification of meteorites. In: Kerridge JF and Matthews MS (eds.). *Meteorites and the Early Solar System*. Tucson: University of Arizona Press, 3-31

Stoeffler D, Keil K and Scott ERD. 1991. Shock metamorphism of ordinary chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 55: 3845-3867

Taylor GJ, Scott ERD and Keil K. 1983. Cosmic setting for chondrule formation. In: King EA (ed.). *Chondrules and their Origins*. Houston: Lunar and Planetary Institute, 262-278

Van Schmus WR and Wood JA. 1967. A chemical-petrologic

- classification for the chondritic meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 31(5): 747–747
- Walker RJ, Horan MF, Morgan JW, Becker H, Grossman JN and Rubin AE. 2002. Comparative  $^{187}\text{Re}$ - $^{187}\text{Os}$  systematics of chondrites: Implications regarding early solar system processes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66(23): 4187–4201
- Wang DD and Chen YH. 1991. Petrology and chemistry of ordinary chondrites from China and their classification. *Geochimica*, (1): 13–25 (in Chinese with English abstract)
- Wang DD, Chen YH, Li ZH *et al.* 1993. Introduction of Chinese Meteorites. Beijing: Science Press (in Chinese)
- Wang GQ and Lin YT. 2007. Bulk chemical composition of the Ningqiang carbonaceous chondrite: An issue of classification. *Acta Geologica Sinica*, 81(1): 141–147
- Wasson JT. 1985. Meteorites: Their Record of Early Solar-system History. New York: W. H. Freeman
- Wlotzka F. 1993. A weathering scale for the ordinary chondrites. *Meteoritics*, 28(3): 460
- Wood JA. 1989. Chondrules as Recorders of Conditions in the Primordial Solar Nebula. NASA Special Publication, 498: 96
- Xu YG. 2002. Evidence for crustal components in the mantle and constraints on crustal recycling mechanisms: Pyroxenite xenoliths from Hannuoba, North China. *Chemical Geology*, 182(2–4): 301–322
- Zhi XC, Qin X, Shi RD and Hong JA. 2007. Re-Os isotopic geochemistry of 3 Chinese ordinary chondrites. *Chinese Science Bulletin*, 52(16): 1930–1934 (in Chinese)

#### 附中文参考文献

- 刘颖, 刘海臣, 李献华. 1996. 用 ICP-MS 准确测定岩石样品中的 40 余种微量元素. *地球化学*, 25(6): 552–558
- 王道德, 陈永亨. 1991. 我国普通球粒陨石岩石学、化学组成及分类的研究. *地球化学*, (1): 13–25
- 王道德, 陈永亨, 李肇辉等. 1993. 中国陨石导论. 北京: 科学出版社
- 支霞臣, 秦协, 史仁灯, 洪吉安. 2007. 中国 3 块普通球粒陨石的 Re-Os 同位素地球化学. *科学通报*, 52(16): 1930–1934