

doi:10.13745/j.esf.2014.06.010

6 块新回收沙漠陨石的矿物岩石学特征及类型划分

戴德求^{1,2}, 杨荣丰^{1,3}, 陈新跃¹

1. 湖南科技大学 地质研究所, 湖南 湘潭 411201
2. 中国科学院 地球化学研究所, 贵州 贵阳 550002
3. 页岩气资源利用湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201

DAI Deqiu^{1,2}, YANG Rongfeng^{1,3}, CHEN Xinyue¹

1. Institute of Geology, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China
2. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China
3. Hunan Provincial Key Laboratory of Shale Gas Resource Utilization, Xiangtan 411201, China

DAI Deqiu, YANG Rongfeng, CHEN Xinyue. The petrography, mineral chemistry and classification of 6 new desert meteorites collected from Xinjiang. *Earth Science Frontiers*, 2014, 21(6):092-101

Abstract: Meteorite samples can be better preserved in Antarctic ice sheet and arid desert regions. Forty-seven desert meteorites were collected from Xinjiang during the meteorite expedition since April to May, 2013. Petrography and mineral chemistry of the 6 samples of them have been studied, in order to determine their chemical-petrographic types. Modal compositions of the Arlatager 004, 006, 0014, 0022 and TuzLeik001 meteorites are similar, mainly consisting of olivine, low-Ca pyroxene, metallic Fe-Ni and troilite. Due to intensive thermal metamorphism the spherulitic textures in the chondrules are poorly defined, with only a few fragments remaining spherulitic. The olivine and low-Ca pyroxene in these meteorites are similar in composition, which in some degree reflects the thermodynamic equilibrium during their development. According to the structures of chondrules and mineral chemistry there are 5 petrographic types to be classified. The four meteorite samples (Arlatager 004, 006, 0014 and 0022) are classified into chemical group L, and TuzLeik001 is classified into chemical group H. Kumtag005 meteorite sample shows typical spherulitic texture, combined with its Fa value in olivine and ferrosilite content (Fs) in low Ca pyroxene and its petrographical features, it is assigned to common chondrite of L3 type. Based on Percent Mean Deviation (PMD) of Fa content of olivine and its correction with petrographic subtype of unequilibrated meteorites, Kumtag005 is subdivided as L3.4. The 6 samples of meteorites belong to 3 chemical groups, combining the other analytical results of meteorites collected from this region, it is suggested that the desert of Hami in Xinjiang is likely a new meteorite-enriched region. The collection and study of desert meteorite will help to promote the development of meteoritics and cosmochemistry in China.

Key words: desert meteorite; petrography; mineral chemistry; classification; Xinjiang

摘要: 干旱沙漠地区与南极冰盖均有利于陨石样品保存。2013 年 4—5 月, 通过首次新疆哈密沙漠陨石考察, 回收了陨石样品 47 块。文中报导其中 6 块样品的矿物岩石学特征, 并划分它们的化学-岩石类型。Arlatager004、006、0014、0022 和 TuzLeik001 等 5 块样品主要由橄榄石、辉石、长石、铁镍金属和陨硫铁组成, 具有典型的普通球粒陨石岩石结构特征, 其球粒结构不明显, 表明经历过较强的热变质, 岩石类型划分为 5 型; 根据样品中橄榄石 Fa 值, 低钙辉石 Fs 值和样品的金属含量等, 将 Arlatager004、006、0014、0022 划分为 L5 型普通球粒陨石; TuzLeik001 划分为 H5 型普通球粒陨石。Kumtag005 具有典型的球粒结构, 结合橄榄石 Fa 值

收稿日期: 2013-11-26; 修回日期: 2014-04-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41103032); 中国博士后基金项目(2011M501423); 贵州省基金项目(2011GZ40851)

作者简介: 戴德求(1976—), 男, 博士, 副教授, 地球化学专业, 主要从事陨石学和天体化学研究。E-mail: ddqygf@163.com

和低钙辉石 F_s 值以及岩石学特征,将其划分为 L3 型普通球粒陨石。根据橄榄石 F_a 值与其百分标准平均方差(PMD)之间的关系,将 Kumtag005 的岩石类型亚型划分为 L 3.4。这 6 块样品代表了 3 个化学群,结合该地区回收到的其他陨石分析结果,表明新疆哈密沙漠是一个新的陨石富集区,这些沙漠陨石的发现和研究,必将极大促进中国陨石学和天体化学的发展。

关键词:沙漠陨石;岩石学特征;矿物化学组成;类型;新疆

中图分类号:P185.83;P597;P595 文献标志码:A 文章编号:1005-2321(2014)06-0092-10

不同类型的陨石分别保存了从太阳星云形成和冷凝、小行星的吸积、类地行星的星子堆积、金属-硅酸盐分异以至行星后期演化历史的各种信息^[1],是太阳系形成和演化不同阶段残留的“化石”,对认识地球的形成演化和内部结构也具有重要意义^[2-3]。除特殊的科学价值外,陨石样品极为稀少。降落到地球表面后即被发现的陨石总数仅 3 000 多个(其中我国约有 100 个),该类陨石又被称为降落型陨石。绝大部分陨石发现于南极蓝色冰盖表面和干旱沙漠地区,前者为南极陨石,后者为沙漠陨石,两者均属发现型陨石。在 1998 年至 2010 年间,我国对东南极的格罗夫山内陆地区开展了 5 次科学考察活动,共收集到陨石样品 11 452 块,使中国成为世界上陨石存有量最多的国家之一^[4-6]。南极陨石的发现和多学科研究有力推动了中国陨石学和天体化学的发展^[7-10],丰富了该领域的研究对象和内容。另外,中国西北部拥有广袤的沙漠,沙漠陨石回收潜力巨大,但我国沙漠陨石的回收主要由一些私人组成的陨石猎人队完成,出于经济利益等多方面原因的考虑,科研人员获得沙漠陨石样品困难重重,造成了中国沙漠陨石的研究严重滞后于南极陨石。

2013 年 4 月 28 日到 5 月 12 日,中国科学院地

质与地球物理研究所、桂林理工大学、湖南科技大学等 10 余家单位相关科研人员联合在新疆维吾尔自治区哈密地区开展了沙漠陨石的首次考察和收集工作,并取得重大突破,共收集陨石样品 47 块。本文报导其中 6 块样品的矿物岩石学特征,划分其化学-岩石类型,并对中国沙漠陨石的收集和进行研究进行探讨和展望。

1 样品和实验方法

样品包括 6 块沙漠陨石,初步编号分别为: Arlatager004、006、0014、0022、TuzLeik001 和 Kumtag005(图 1,表 1)。样品均使用环氧树脂注胶,然后分别切割、磨制成光片各一块。

岩石学特征(形态、结构以及矿物之间的相互关系等)主要在中科院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室的带能谱的扫描电镜(型号:JSM 6460LV)背散射模式(BSE)下进行。代表性矿物化学成分的定量分析在桂林理工大学的电子探针(型号:JEOL 8230)下完成。实验条件为:加速电压 15 keV,束流 20 nA,束斑 5.0 μm ;分析标准为硅酸盐矿物和氧化物。检测限为: MgO 、 CaO 、 K_2O 和

表 1 6 块沙漠陨石的主要特征

Table 1 The main characteristics of the 6 new desert meteorites

陨石	类型	发现位置	质量/g	不透明矿物含量/%	橄榄石		低钙辉石	
					平均 F_a	PMD/%	平均 F_s	PMD/%
Arlatager004	L5	N:41°41'3.9" E:92°57'37.3"	12.2	4.2	22.8	1.22	19.7	2.56
Arlatager006	L5	N:41°41'8.5" E:92°56'24.3"	17.4	3.9	22.6	1.81	20.0	1.46
Arlatager0014	L5	N:41°41'14.1" E:92°56'16.8"	18.3	4.7	23.0	2.10	19.1	2.07
Arlatager0022	L5	N:41°41'13.5" E:92°56'7.2"	37.8	4.5	23.0	1.95	19.3	3.25
TuzLeik001	H5	N:42°02'46.2" E:93°53'14.5"	152	7.8	18.2	2.56	16.3	2.29
Kumtag005	L3	N:41°57'30.4" E:93°13'36.3"	693	3.2	23.3	56.1	21.5	70.3

注: F_a 、 F_s 和 PMD 见文中注释。

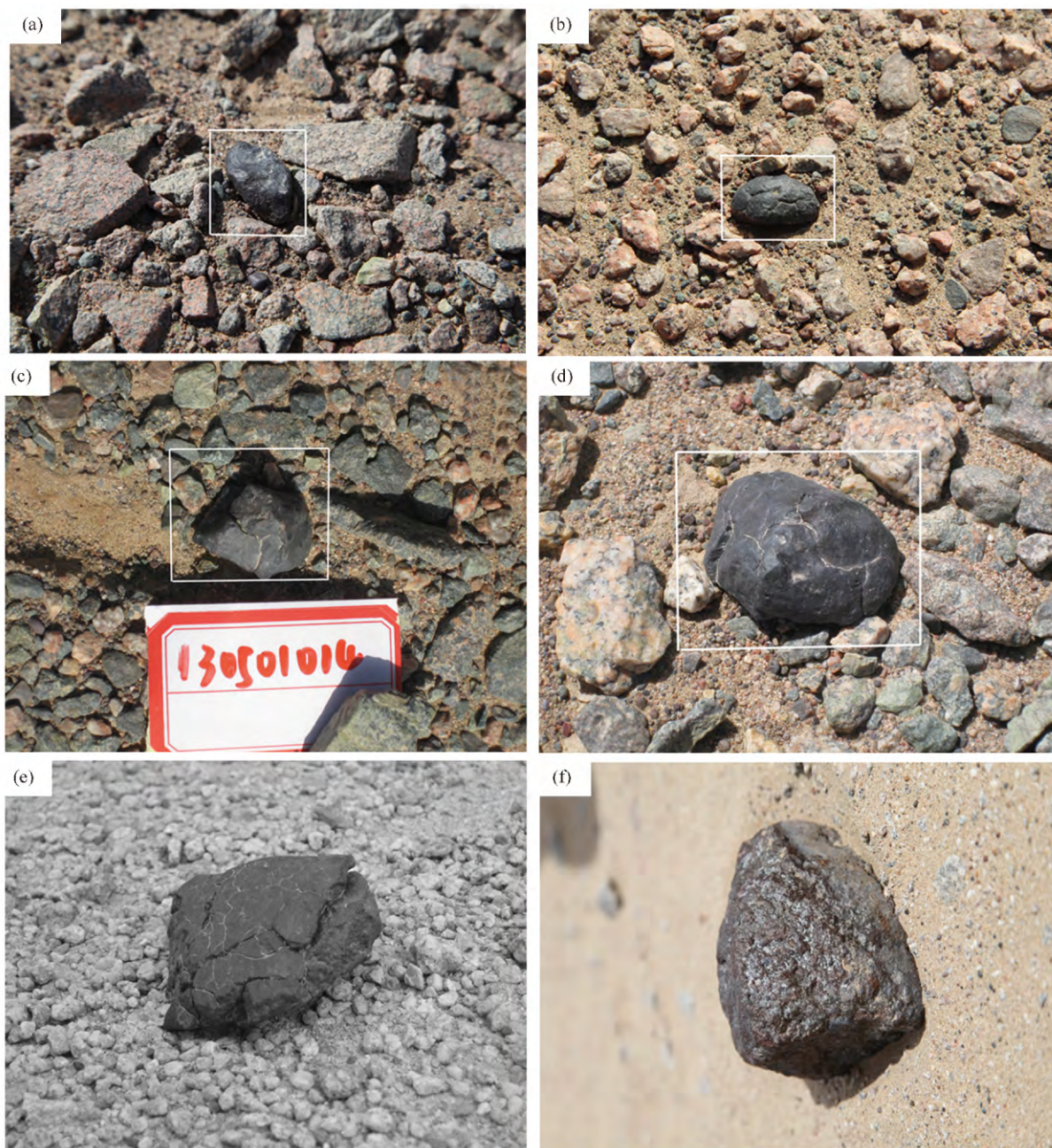


图 1 6 块沙漠陨石的手标本照片

Fig. 1 The specimens of the 6 new desert meteorites

a—Arlatager004(L5); b—Arlatager006(L5); c—Arlatager0014(L5); d—Arlatager0022(L5); e—TuzLeik001(H5); f—Kumtag005(L3)。
a、b、c、d 白框内为陨石样品, 注意样品表面的裂纹和熔壳。

Na_2O 质量分数为 0.01%, TiO_2 、 Al_2O_3 和 Cr_2O_3 为 0.02%, FeO 和 MnO 为 0.03%, SiO_2 和 NiO 为 0.04%。分析中对一些元素特征峰的叠加进行了校正, 如 Cr 的 K_β 线对 Mn 的 K_α 线的叠加等, 分析结果采用 ZAF 方法校正。

2 岩石学特征

Arlatager 004、006、0014 和 0022 均具有不规则外形, 表面可见不完整熔壳。除了 Arlatager004 外, 其余 3 块样品的表面均可见细长裂纹。样品的质量较小, 为 12.2~37.8 g(图 1, 表 1)。这些样品

球粒结构不明显,只能发现少量的保存较完好的球粒或球粒碎片(图2)。基质重结晶程度较高。样品中矿物组成主要包括橄榄石、低钙辉石、铁镍合金(主要为铁纹石和镍纹石)、陨硫铁、斜长石和铁的氧化物(主要为褐铁矿)等。褐铁矿主要沿着裂缝发

育,是这些沙漠陨石受到较强烈风化作用的产物(图2)。经统计,4块陨石的不透明矿物(包括铁镍合金、陨硫铁和风化产物,下同)含量分别为4.2%、3.9%、4.7%和4.5%(表1)。

TuzLeik001样品质量为154g,为不规则棱角

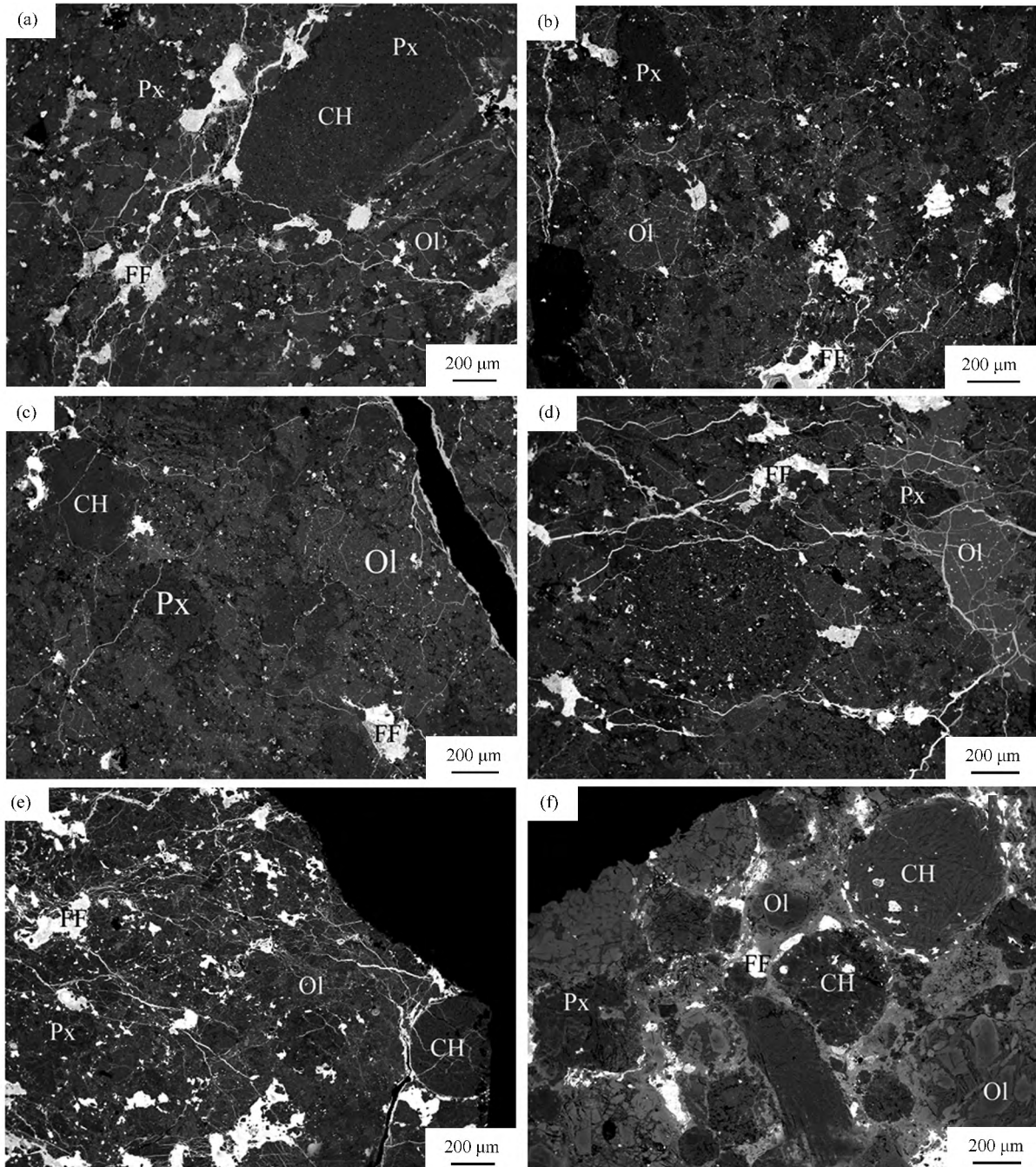


图2 6块沙漠陨石的典型背散射电子图像(BSE)照片

Fig. 2 BSE images of the 6 new desert meteorites

a—Arlatager004(L5); b—Arlatager006(L5); c—Arlatager0014(L5); d—Arlatager0022(L5); e—TuzLeik001(H5); f—Kumtag005(L3)。Ol—橄榄石;Px—低钙辉石;FF—铁镍合金、金属硫化物和风化产物。Kumtag005具有较其他5个样品明显的球粒结构, Kumtag005中橄榄石具有明显的环带结构;TuzLeik001的不透明矿物含量明显较其他样品高;沿裂隙存在大量风化产物。

状, 样品裂缝非常发育, 可见宽且深的裂缝(图 1, 表 1), 可能与样品相对较松散有关。TuzLeik001 中少量球粒结构和轮廓较明晰, 大部分球粒轮廓模糊(图 2e), 可见斑状橄榄石球粒、斑状辉石球粒、斑状橄榄石辉石球粒和炉条状球粒或其碎块等。大部分基质重结晶。TuzLeik001 矿物组合与上述 Arlatager 陨石相似, 样品也受到了较强烈的风化作用, 可见大量沿裂缝发育的褐铁矿(图 2e)。不透明矿物含量为 7.8%。

Kumtag005 陨石质量为 693 g, 是此次收集沙漠陨石中最重的样品。样品外形不规则, 熔壳部分脱落, 肉眼可以分辨出样品中明显的球粒结构(图 1, 表 1)。在 BSE 模式下, 可发现样品的球粒结构非常清晰(图 2f), 球粒类型主要包括斑状橄榄石球粒、斑状辉石球粒、斑状橄榄石辉石球粒、放射状辉石球粒和炉条状球粒等。球粒的直径位于 0.1~3.0 mm, 平均约为 0.5 mm。基质主要由细小的硅酸盐矿物和少量的铁镍合金以及陨硫铁组成。样品受到的风化作用强烈, 边部可见大量沿裂缝发育的褐铁矿, 中部裂隙褐铁矿相对较少。Kumtag005 受到的风化作用, 相对上述 4 块样品较弱。不透明矿物含量为 3.2%。

3 矿物化学组成

6 块样品的橄榄石和低钙辉石的矿物化学组成均采用电子探针进行了详细定量分析。分析结果详见表 1~3。

Arlatager004、006、0014、0022、TuzLeik001 均具有均一的矿物化学组成。Arlatager004、006、0014 和 0022 橄榄石的 Fa 值($100 \times \text{FeO}/(\text{FeO} + \text{MgO})$, 摩尔分数比)变化范围分别为 22.3~23.1、21.8~23.3、22.6~23.9 和 22.3~23.4, 平均 Fa 值分别为 22.8、22.6、23.0 和 23.0, 其百分标准平均方差(PMD)值分别为 1.22、1.81、2.10 和 1.95。低钙辉石的 Fs 值($100 \times \text{FeO}/(\text{FeO} + \text{MgO})$, 摩尔分数比)的变化范围分别为 19.1~20.3、19.6~20.4、18.7~19.7 和 18.1~20.0, 平均 Fs 值分别为 19.7、20.0、19.1 和 19.3, 其百分标准平均方差(PMD)值分别为 2.56、1.46、2.07 和 3.25。TuzLeik001 的橄榄石的 Fa 值变化范围为 17.4~19.0, 平均 Fa 值为 18.2, 其 PMD 值为 2.56。低钙辉石的 Fs 值变化范围为 15.8~16.9, 平均 Fs 值为

16.3, 其 PMD 值为 2.29。

Kumtag005 的橄榄石和低钙辉石均具有不均一的矿物化学组成。橄榄石的 Fa 值变化范围为 1.97~39.9, 平均 Fa 值为 23.3, 其 PMD 值为 56.1。Kumtag005 球粒的橄榄石矿物化学组成变化, 主要表现在两方面:(1) 不同球粒的橄榄石化学组成变化非常大, 有些球粒中 Fa 值小于 10, 而大部分球粒的 Fa 值大于 25;(2) 部分球粒中的单个橄榄石具有明显的成分环带(图 2f), 晶体核部富 Mg, 边部富 Fe, 如核部的 Fa 值为 5.26, 边部可以达到 26.6。低钙辉石的 Fs 值变化范围为 2.41~57.1, 平均 Fs 值为 21.5, 其 PMD 值为 70.3。虽然辉石的矿物化学组成在不同的球粒之间变化非常大, 但单个辉石晶体的成分环带变化不如橄榄石明显。

4 讨论

4.1 化学-岩石类型划分

依据陨石是否经历过后期的熔融分异作用, 陨石分为未分异型陨石(球粒陨石)和分异型陨石。球粒陨石主要包括碳质球粒陨石(CC)、普通球粒陨石(OC)和顽火辉石球粒陨石(EC)。普通球粒陨石主要根据金属含量和矿物化学组成又分为高铁群(H)、中铁群(L)和低铁低金属(LL)3 个化学群。普通球粒陨石在其小行星母体中经历了不同程度的热变质作用, 因此将它们划分为不同的岩石类型(3~6 型), 其中热变质程度很低的 3 型又被称为非平衡型, 而明显热变质的 4 至 6 型又被称为平衡型^[1]。

Arlatager004、006、0014、0022 等 4 块陨石的橄榄石平均 Fa 值分别为 22.8、22.6、23.0 和 23.0, 低钙辉石平均 Fs 值分别为 19.7、20.0、19.1 和 19.3, Fa 值和 Fs 值完全落在 L 群陨石的范围内^[11-14](表 2、3, 图 3)。另外, 4 块陨石的不透明矿物含量均较低, 分别为 4.2%、3.9%、4.7%和 4.5%(表 1)。依据 4 块陨石的橄榄石 Fa 值和辉石 Fs 值, 参考样品的不透明矿物含量, Arlatager004、006、0014、0022 等 4 块陨石的化学群为 L 群。样品的橄榄石 PMD 值(分别为 1.22、1.81、2.10 和 1.95)和低钙辉石 PMD 值(分别为 2.56、1.46、2.07 和 3.25)均小于 5(表 1), 说明样品属于平衡型陨石。另外, 我们发现, 样品球粒结构不明显, 只能发现少量的球粒或球粒碎片。所以, 将 4 块样品的岩石类型定为 5 型。综上, Arlatager004、006、0014、0022 的化学-岩石类

表 2 沙漠陨石代表性橄榄石的电子探针分析结果

Table 2 Representative electron microprobe analyses of olivine from 6 desert meteorites

陨石 颗粒	wtB/%																	单位分子所含原子数									
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	NiO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total	Si	Ti	Al	Cr	Fe	Ni	Mn	Mg	Ca	Na	K	Sum	Fa		
Arlatager 004(L5)	1	37.6	0.00	0.03	0.03	21.1	0.03	0.70	40.3	0.06	0.02	0.00	99.9	0.969	0.000	0.001	0.000	0.453	0.001	0.015	1.558	0.002	0.001	0.000	0.000	2.999	22.5
	2	37.6	0.23	0.12	0.06	20.9	0.07	0.59	40.4	0.08	0.00	0.00	100.1	0.967	0.004	0.004	0.000	0.448	0.002	0.013	1.559	0.002	0.000	0.000	0.000	2.999	22.3
	3	38.0	0.00	0.03	0.04	21.6	0.03	0.68	40.4	0.05	0.00	0.00	100.8	0.971	0.000	0.001	0.000	0.460	0.001	0.015	1.550	0.001	0.000	0.000	0.000	2.999	22.9
Arlatager 006(L5)	1	37.4	0.38	0.04	0.06	20.5	0.05	0.69	39.2	0.08	0.00	0.00	98.4	0.981	0.007	0.001	0.000	0.449	0.001	0.015	1.541	0.002	0.000	0.000	0.000	2.999	22.5
	2	37.0	0.53	0.00	0.06	21.1	0.00	0.65	39.7	0.07	0.00	0.00	99.1	0.964	0.010	0.000	0.000	0.459	0.000	0.014	1.550	0.002	0.000	0.000	0.000	2.999	22.8
	3	37.6	0.00	0.02	0.00	21.0	0.06	0.70	39.8	0.10	0.02	0.02	99.4	0.975	0.000	0.001	0.000	0.453	0.001	0.015	1.549	0.003	0.001	0.001	0.001	3.000	22.6
Arlatage 0014(L5)	1	37.6	0.08	0.00	0.05	22.0	0.00	0.59	40.8	0.07	0.00	0.01	101.2	0.958	0.001	0.000	0.000	0.466	0.000	0.013	1.558	0.002	0.000	0.000	0.000	2.999	23.0
	2	38.3	0.00	0.06	0.04	21.7	0.08	0.70	40.8	0.09	0.00	0.00	101.7	0.969	0.000	0.002	0.000	0.459	0.002	0.015	1.550	0.002	0.000	0.000	0.000	2.999	22.9
	3	38.3	0.23	0.01	0.05	21.5	0.02	0.69	41.0	0.08	0.00	0.01	101.9	0.968	0.004	0.000	0.000	0.453	0.000	0.015	1.556	0.002	0.000	0.000	0.000	2.999	22.5
Arlatager 0022(L5)	1	38.1	0.00	0.00	0.01	21.6	0.01	0.64	40.8	0.06	0.00	0.01	101.2	0.969	0.000	0.000	0.000	0.457	0.000	0.014	1.558	0.002	0.000	0.000	0.000	3.000	22.7
	2	37.5	0.00	0.00	0.07	21.5	0.20	0.70	41.6	0.08	0.03	0.01	101.7	0.946	0.000	0.000	0.000	0.453	0.004	0.015	1.577	0.002	0.002	0.000	0.000	2.999	22.3
	3	38.8	0.53	0.07	0.07	21.9	0.12	0.73	40.3	0.08	0.01	0.03	102.7	0.980	0.010	0.002	0.000	0.461	0.002	0.016	1.524	0.002	0.001	0.001	0.001	2.999	23.2
Tuzileik 001(H5)	1	38.7	0.00	0.02	0.02	16.7	0.03	1.04	43.9	0.03	0.04	0.01	100.5	0.962	0.000	0.001	0.000	0.351	0.001	0.022	1.661	0.001	0.002	0.000	0.000	3.000	17.4
	2	38.1	0.36	0.05	0.03	17.0	0.00	0.92	41.8	0.12	0.00	0.01	98.5	0.965	0.007	0.001	0.000	0.359	0.000	0.020	1.644	0.003	0.000	0.000	0.000	2.999	17.9
	3	38.8	0.00	0.00	0.00	17.1	0.03	1.31	42.8	0.02	0.01	0.00	100.0	0.983	0.000	0.000	0.000	0.360	0.001	0.028	1.627	0.001	0.000	0.000	0.000	3.000	18.1
	4	37.4	0.25	0.01	0.03	16.4	0.01	0.92	44.0	0.05	0.02	0.00	99.1	0.943	0.005	0.000	0.000	0.364	0.000	0.020	1.665	0.001	0.001	0.000	0.000	2.999	17.9
Kumtag 005(L3)	1	41.3	0.00	0.04	0.01	22.4	0.04	0.71	34.4	0.30	0.00	0.02	99.2	1.100	0.000	0.001	0.000	0.497	0.001	0.016	1.375	0.009	0.000	0.000	0.001	3.000	26.6
	2	41.0	0.08	0.96	0.40	5.1	0.04	0.19	50.7	0.12	0.28	0.19	99.0	0.993	0.001	0.027	0.000	0.102	0.001	0.004	1.841	0.003	0.013	0.006	0.006	2.992	5.26
	3	35.5	0.00	0.11	0.05	30.6	0.11	0.81	30.3	0.05	0.00	0.01	97.5	0.991	0.000	0.004	0.000	0.713	0.002	0.019	1.268	0.002	0.000	0.000	0.000	2.999	36.0
5	4	36.4	0.14	0.13	0.13	27.5	0.24	0.97	32.7	0.06	0.05	0.01	98.3	0.994	0.003	0.004	0.000	0.625	0.005	0.022	1.339	0.002	0.003	0.000	0.000	2.997	31.8
	5	41.7	0.06	0.17	0.24	2.0	0.01	0.13	54.5	0.39	0.04	0.05	99.3	0.991	0.001	0.005	0.000	0.039	0.000	0.003	1.943	0.010	0.002	0.002	2.995	2.0	
6	40.0	0.16	0.00	0.10	22.7	0.01	0.73	35.6	0.32	0.01	0.02	99.7	1.056	0.003	0.000	0.000	0.500	0.000	0.016	1.412	0.009	0.001	0.001	0.001	2.998	26.1	

注: 氧化物的质量分数由电子探针测定, 单位分子所含原子数根据矿物分子式和氧化物的质量分数计算得出, 下同。

表 3 沙漠陨石代表性低钙辉石的电子探针分析结果
Table 3 Representative electron microprobe analyses of low-Ca pyroxene from 6 desert meteorites

陨石 颗粒	wt%/ %																单位分子所含原子数									
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	NiO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total	Si	Ti	Al	Cr	Fe	Ni	Mn	Mg	Ca	Na	K	Sum	Fa	
Arlatager 004(L5)	1	56.2	0.26	1.26	0.07	12.8	0.01	0.72	29.4	0.87	0.07	101.6	0.982	0.003	0.025	0.000	0.186	0.000	0.011	0.771	0.016	0.002	0.000	0.000	1.999	19.5
	2	57.5	0.18	0.63	0.15	13.3	0.03	0.68	29.0	0.98	0.06	102.6	1.001	0.002	0.013	0.000	0.193	0.000	0.010	0.758	0.018	0.002	0.000	0.000	1.998	20.3
	3	56.8	0.07	0.47	0.12	12.3	0.00	0.74	28.9	1.04	0.04	100.5	1.005	0.001	0.010	0.000	0.182	0.000	0.011	0.769	0.020	0.001	0.000	0.000	1.998	19.1
Arlatager 006(L5)	1	55.6	0.15	0.41	0.05	13.2	0.00	0.55	30.0	0.73	0.06	100.7	0.979	0.002	0.008	0.000	0.193	0.000	0.008	0.793	0.014	0.002	0.000	0.000	1.999	19.6
	2	55.7	0.07	0.29	0.09	13.1	0.01	0.67	29.2	0.85	0.04	100.0	0.990	0.001	0.006	0.000	0.194	0.000	0.010	0.780	0.016	0.001	0.000	0.000	1.999	19.9
	3	56.7	0.12	0.57	0.15	13.4	0.09	0.79	29.2	1.11	0.05	102.1	0.990	0.002	0.012	0.000	0.194	0.001	0.012	0.765	0.021	0.002	0.000	0.000	1.998	20.3
Arlatager 0014(L5)	1	53.7	0.09	0.55	0.13	12.9	0.00	0.62	30.0	0.96	0.02	99.0	0.961	0.001	0.012	0.000	0.192	0.000	0.009	0.804	0.018	0.001	0.000	0.000	1.998	19.3
	2	53.6	0.22	0.49	0.08	12.7	0.01	0.59	30.4	0.81	0.02	98.9	0.957	0.003	0.010	0.000	0.188	0.000	0.009	0.815	0.015	0.001	0.000	0.000	1.999	18.8
	3	54.9	0.13	0.45	0.09	12.8	0.00	0.81	29.9	0.67	0.00	99.7	0.976	0.002	0.009	0.000	0.190	0.000	0.012	0.797	0.013	0.000	0.000	0.000	1.999	19.2
Arlatager 0022(L5)	1	54.1	0.09	0.34	0.08	12.0	0.02	0.59	30.1	0.85	0.02	98.2	0.972	0.001	0.007	0.000	0.180	0.000	0.009	0.812	0.016	0.001	0.000	0.000	1.999	18.1
	2	55.0	0.25	0.58	0.15	13.4	0.00	0.60	30.7	0.94	0.00	101.6	0.959	0.003	0.012	0.000	0.195	0.000	0.009	0.803	0.018	0.000	0.000	0.000	1.998	19.5
	3	54.6	0.27	0.65	0.21	13.0	0.10	0.69	29.4	1.27	0.03	100.2	0.968	0.004	0.014	0.000	0.192	0.001	0.010	0.782	0.024	0.001	0.000	0.000	1.997	19.7
TuzLeik 001(H5)	1	52.6	0.15	0.25	0.07	12.2	0.08	1.06	33.1	0.64	0.08	100.3	0.919	0.002	0.005	0.000	0.173	0.001	0.016	0.867	0.012	0.003	0.000	0.000	1.999	16.6
	2	53.7	0.30	0.18	0.07	12.3	0.00	1.23	32.2	0.76	0.01	100.8	0.942	0.004	0.004	0.000	0.172	0.000	0.018	0.848	0.011	0.000	0.000	0.000	1.999	16.9
	3	53.5	0.35	0.63	0.52	11.9	0.03	1.26	31.6	1.44	0.07	101.2	0.939	0.005	0.013	0.000	0.159	0.000	0.016	0.831	0.027	0.002	0.000	0.000	1.993	16.1
	4	52.6	0.23	0.65	0.41	11.5	0.04	1.19	31.8	1.12	0.07	99.6	0.923	0.003	0.013	0.000	0.167	0.000	0.018	0.838	0.029	0.002	0.000	0.000	1.994	16.7
Kunntag 005(L3)	1	56.5	0.08	1.77	1.64	12.2	0.01	0.54	26.8	1.72	0.00	101.2	1.003	0.001	0.037	0.000	0.180	0.000	0.008	0.714	0.033	0.000	0.000	0.000	1.977	20.1
	2	60.1	0.00	0.40	0.98	12.0	0.02	0.67	24.5	0.91	0.00	99.5	1.097	0.000	0.008	0.000	0.182	0.000	0.010	0.670	0.018	0.000	0.000	0.000	1.986	21.3
	3	53.7	0.00	0.31	0.81	14.3	0.11	1.07	26.8	0.54	0.01	97.5	0.991	0.000	0.007	0.000	0.219	0.002	0.017	0.741	0.011	0.000	0.000	0.000	1.988	22.8
	4	56.0	0.00	0.29	0.36	8.4	0.13	0.51	32.4	0.39	0.11	98.7	0.987	0.000	0.006	0.000	0.124	0.002	0.008	0.858	0.007	0.004	0.000	0.000	1.995	12.6
	5	62.3	0.45	0.70	1.18	9.6	0.07	0.46	22.3	1.19	0.16	98.4	1.155	0.006	0.015	0.000	0.148	0.001	0.007	0.621	0.024	0.006	0.000	0.000	1.983	19.2
	6	59.0	0.00	0.50	0.70	1.6	0.02	0.34	36.8	0.36	0.00	99.4	1.004	0.000	0.010	0.000	0.023	0.000	0.005	0.941	0.006	0.000	0.000	0.000	1.990	2.4

型为 L5 型平衡型普通球粒陨石。

TuzLeik001 橄榄石平均 Fa 值为 18.2, 低钙辉石平均 Fs 值为 16.3, Fa 值和 Fs 值落在 H 群陨石的范围内^[13-14](表 2, 3, 图 3)。不透明矿物含量相对上述 4 块 L 群陨石高, 达到 7.8%(表 1, 图 2)。TuzLeik001 的化学群属于 H 群。样品具有均一的矿物化学组成, 橄榄石和低钙辉石的 PMD 值分别为 2.56 和 2.29。另外, 样品中只有少量的球粒结构轮廓清晰, 故将其岩石类型划分为 5 型。TuzLeik001 的化学-岩石类型为 H5 型平衡型普通球粒陨石。

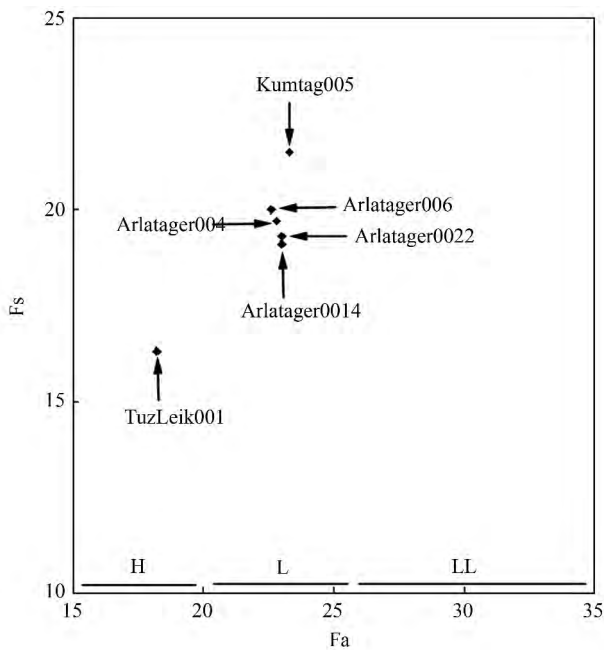


图 3 6 块沙漠陨石橄榄石 Fa 和低钙辉石 Fs 分布图

Fig. 3 The diagram of olivine Fa and low-Ca pyroxene Fs of the 6 new desert meteorites

Kumtag005 橄榄石平均 Fa 值为 23.3, 低钙辉石平均 Fs 值为 21.5, Fa 值和 Fs 值均落在 L 群陨石的范围内(图 3)。同时, 样品的不透明矿物含量较低, 为 3.2%。故 Kumtag005 的化学群初步划分为 L 群。另外, 样品的球粒结构非常明显, 肉眼可以直接观察到球粒, BSE 照片下也可以发现大量完整球粒的存在(图 2f), 说明样品属于原始的非平衡型(3 型)陨石。橄榄石和辉石的 PMD 值分别为 56.1 和 70.3, 也说明了样品具有非常不均一的矿物化学组成, 属于非平衡型球粒陨石^[15-16]。在非平衡型陨石中, 由于热变质的差异, 导致它们在矿物岩石学特征上也存在一定差异。Sears 等^[17]提出将非平衡 3 型陨石划分为 3.0~3.9 等 10 个级别, 且提出了根据橄榄石 Fa 的 PMD 划分非平衡陨石的岩石

类型亚型的方案。他们认为除极少数陨石外, 绝大多数非平衡型陨石橄榄石 Fa 的 PMD 能判断其岩石类型亚型, 但为 3.0~3.4 的细分难以确定^[17-18]。Kumtag005 橄榄石 PMD 值为 56.1, 根据 Sears 等的标准, Kumtag005 的岩石类型亚型为 L3.4 型, 属于较原始的非平衡型普通球粒陨石。综上, Kumtag005 陨石属于较原始的 L3.4 型普通球粒陨石。

4.2 沙漠陨石回收与意义

陨石样品具有极其重要的科研价值而且极为稀少, 每一块陨石样品均是独一无二的。绝大部分陨石发现于南极蓝色冰盖表面和干旱沙漠地区。我国已经在南极格罗夫山地区收集陨石样品 11 452 块, 使我国成为世界上南极陨石拥有量仅次于日本和美国的第三大国。

近年大量沙漠陨石的发现和回收, 使沙漠成为继南极之后最富集陨石的地区^[19]。绝大部分沙漠陨石来自非洲撒哈拉大沙漠^[20-21], 主要分布于利比亚、摩洛哥、阿尔及利亚, 及其周边的西北非国家。撒哈拉沙漠陨石的回收主要是一些私人组成的陨石猎人队, 或通过野外搜寻, 或向当地游牧民购买等多种方式获得。出于巨大经济利益的考虑, 大部分陨石的确切发现地点并没有被公布, 而且已回收的陨石总数也不详, 但应超过 8 000 块。同南极陨石冰川运移的富集机制不同, 沙漠陨石的富集主要是由于干旱的气候有利于陨石的保存。

同大量回收的南极陨石及研究成果相比较, 我国目前沙漠陨石的回收和研究显得严重滞后。我国沙漠陨石的回收主要由一些私人组成的陨石猎人队完成, 由于受到专业水平的限制, 收集到沙漠陨石的数量和质量均不能令人满意。另外, 出于经济利益等多方面原因的考虑, 科研人员获得私人沙漠陨石样品也困难重重。2004 年 4—5 月, 中国科学院地质与地球物理研究所、国家天文台和广州地球化学研究所相关科研人员组织了首次内蒙古自治区沙漠陨石考察, 由于受限于经验等多方面客观原因, 此次沙漠陨石的收集并未取得突破。之后, 桂林理工大学缪秉魁教授和中国科学院地质与地球物理研究所胡森博士参加了由陨石爱好者雷克斯先生组织的新疆沙漠陨石回收, 获得了数块样品。另外, 对美国西南部沙漠和澳大利亚 Nullarbor 沙漠陨石的彻底搜寻, 以及所回收到陨石的居地年龄研究, 可以估算近 5 万年以来, 降落在地球表面, 质量大于 20 g(更小

的沙漠陨石难以发现)的陨石通量为 59~159 块/($10^6 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$)^[22]。我国西北部广袤的干旱沙漠地区,和这些沙漠较长的稳定时间,均表明我国沙漠陨石回收具有较大的潜力。

2013 年 4—5 月,中国科学院地质与地球物理研究所、地球化学研究所、广州地球化学研究所、桂林理工大学、湖南科技大学、中山大学、中国极地研究中心、美国加州大学戴维斯分校等 10 多家单位相关科研人员组织了首次新疆沙漠陨石考察,考察区域主要包括哈密市的沙东和沙西部分区域。此次考察,取得了重大突破,共收集陨石样品 47 块,共 3 912.7 g,其中最大的一块 693 g,最小的为 2.6 g。初步判断,此次收集的陨石,除了 Kumtag005 属于非平衡型普通球粒陨石外,其余陨石均属于平衡型普通球粒陨石。本文研究的 6 块样品属于 3 个不同的化学群,表明新疆哈密地区很可能为一个新的陨石富集区域。与我国回收的南极陨石比较,此次回收的沙漠陨石具有以下两个特征:(1) 南极发现了各种类型陨石,如普通球粒陨石、碳质球粒陨石、石铁陨石、火星陨石和灶神星陨石等,而此次发现的沙漠陨石类型较单一;(2) 南极陨石受到的风化作用较低,一般为 W1-W2^[6],而沙漠陨石受到了明显较南极更强的风化作用。国外回收的沙漠陨石除了大部分属于普通球粒陨石外,还发现了特殊的陨石样品,包括碳质球粒陨石、顽火辉石球粒陨石、铁陨石、火星陨石和月球陨石等^[23-24]。我国西北部广袤的沙漠地区为沙漠陨石的收集提供了广阔的场所。虽然,此次考察取得了重大突破,但由于此次考察搜索区域面积有限,首次考察经验不足等因素,导致考察中没有发现特殊类型的陨石样品。随着沙漠陨石考察计划的持续和样品数量的增加,在不久的将来,我国各种特殊类型沙漠陨石一定会被发现。我国沙漠陨石的发现和研究,必将和南极陨石一样,取得大量原创性成果,极大的促进我国陨石学和天体化学的发展。

5 结论

(1) Arlatager004、006、0014、0022 和 TuzLeik001 等 5 块沙漠陨石均具有均一的矿物化学组成,根据矿物-岩石学特征,划分了它们的化学-岩石类型: Arlatager004、006、0014、0022 属于 L5 型, TuzLeik001 属于 H5 型。

(2) Kumtag005 球粒结构清晰,矿物化学组成非常不均一等矿物岩石学特征表明其属于典型的 L3 型非平衡普通球粒陨石。根据橄榄石 Fa 的 PMD 值,将其亚型划分为 L3.4 型,属于较原始的非平衡型陨石。

(3) 我国首次沙漠陨石考察取得了重大突破,收集了陨石样品 47 块,表明我国沙漠陨石回收潜力巨大,新疆哈密地区很可能为一个新的陨石富集区域,但特殊类型样品有待进一步突破。沙漠陨石的发现和研究,必将和南极陨石一样,极大的促进我国陨石学和天体化学的发展。

研究样品是在首次沙漠陨石考察队成员林杨挺研究员、缪秉魁教授、尹庆柱教授、李世杰副研究员、沈文杰副教授、胡森博士、王鹏高级工程师、雷克斯、张洁、夏志鹏、赖永旺等的共同努力下收集的,在此表示诚挚的谢意!

参考文献

- [1] 王道德. 中国陨石导论[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 1-505.
- [2] 谢先德, 陈鸣. 动态高压下陨石矿物的冲击熔融和分离结晶及其地球化学意义[J]. 地学前缘, 2009, 16(1):134-145.
- [3] 陈鸣. 陨石中林伍德石的形成条件对寻找地球产状林伍德石的启示[J]. 地学前缘, 2005, 12(1):23-27.
- [4] Miao B, Lin Y, Ouyang Z, et al. Type distribution pattern and pairing of ordinary chondrites from Grove Mountains, Antarctica[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48: 908-913.
- [5] 胡森, 林杨挺, 冯璐, 等. 格罗夫山普通球粒陨石的磁化率和化学分类对比研究[J]. 极地研究, 2013, 25(4): 362-368.
- [6] 戴德求, 王道德, 王桂琴. 南极格罗夫山 100 块陨石的矿物-岩石学特征[J]. 极地研究, 2008, 20(2):153-166.
- [7] Lin Y, Wang D, Miao B, et al. Grove Mountains (GRV) 99027: A new Martian meteorite[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48: 1771-1774.
- [8] Lin Y, Hu S, Miao B, et al. Grove Mountains 020090 enriched lherzolitic shergottite: A two-stage formation model [J]. Meteoritics & Planetary Science, 2013, 48: 1572-1589.
- [9] Miao B, Ouyang Z, Wang D, et al. A new Martian meteorite from Antarctica: Grove Mountains (GRV) 020090[J]. Acta Geologica Sinica, 2004, 78: 1034-1041.
- [10] Dai D, Lin Y, Miao B, et al. Ca-, Al-rich inclusions in three new carbonaceous chondrites from the Grove Mountains, Antarctica: New evidence for a similar origin of the objects in various groups of chondrites [J]. Acta Geologica Sinica, 2004, 78: 1042-1051.
- [11] Van S, Wood J. A chemical-petrologic classification for the chondritic meteorites[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1967, 31: 747-765.

- [12] Rubin A. Kamacite and olivine in ordinary chondrites: Inter-group and intragroup relationships[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, 54: 1217-1232.
- [13] 缪秉魁, 林杨挺, 欧阳自远, 等. 南极格罗夫山陨石岩石学特征: II: 平衡型普通球粒陨石[J]. *极地研究*, 2002, 14(4): 288-299.
- [14] Lu R, Miao B, Wang G, et al. Classification of 24 new ordinary chondrites from the Grove Mountains, Antarctica[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 78: 1052-1059.
- [15] 缪秉魁, 林杨挺, 欧阳自远, 等. 南极格罗夫山陨石岩石学特征: I: 非平衡 L3 型普通球粒陨石[J]. *极地研究*, 2002, 14(4): 276-287.
- [16] 戴德求, 林杨挺, 王道德, 等. 南极格罗夫山 6 块非平衡型普通球粒陨石的矿物-岩石学特征[J]. *矿物学报*, 2009, 29(3): 405-412.
- [17] Sears D, Grossman J, Melcher C. Chemical and physical studies of type 3 chondrites, I: Metamorphism related studies of Antarctic and other type 3 ordinary chondrites [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1982, 46: 2471-2481.
- [18] Sears D, Grossman J, Melcher C, et al. Measuring metamorphic history of unequilibrated ordinary chondrites[J]. *Nature*, 1980, 287: 791-795.
- [19] 王道德, 林杨挺, 戴诚达, 等. 南极陨石与沙漠陨石的对比研究[J]. *极地研究*, 1999, 11(2): 122-135.
- [20] Jull A, Wlotzka F, Brown S, et al. ¹⁴C terrestrial ages of meteorites from desert regions: Algeria and Australia[J]. *Meteoritics*, 1993, 28: 376-378.
- [21] Ash R, Pillinger C. Carbon, nitrogen and hydrogen in Sahara chondrites: The importance of weathering[J]. *Meteoritics*, 1995, 30: 490-525.
- [22] Bland P, Berry F, Smith T, et al. The flux of meteorites to the Earth and weathering in hot desert ordinary chondrite finds[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60: 2053-2059.
- [23] Bischoff A, Weber D. Dar AL Gani 262: The first lunar meteorite from the Sahara[J]. *Meteoritics and Planetary Science*, 1997, 32(Suppl): 13.
- [24] Mercer C, Treiman A, Joy K. New lunar meteorite Northwest Africa 2996: A window into farside lithologies and petrogenesis[J]. *Meteoritics and Planetary Science*, 2013, 48: 289-315.

《地学前缘》中文版入选 EI 检索系统

经 Elsevier 工程信息公司中国信息部通知,由中国地质大学(北京)和北京大学主办的中文刊《地学前缘》从 2013 年第 1 期开始,正式被 EI 检索系统收录。这将进一步提高《地学前缘》的知名度和影响力。EI (The Engineering Index, 简称 EI)创刊于 1884 年,是美国工程信息公司(Engineering information Inc.)出版的著名工程技术类综合性检索工具,是世界著名的三大检索系统之一。

收录《地学前缘》的国外检索系统

美国《工程索引》(EI)

俄罗斯《文摘杂志》(AJ)

《日本科学技术振兴机构中国文献数据库》(JST)

美国《化学文摘(网络版)》(CA)

美国《乌利希期刊指南(网络版)》(Ulrichsweb)