

# 南极普通球粒陨石风化等级的重新厘定\*

尚颖丽<sup>1,2</sup> 李世杰<sup>1\*\*</sup> 王世杰<sup>3</sup> 李雄耀<sup>1</sup> 李阳<sup>1</sup>  
SHANG YingLi<sup>1,2</sup>, LI ShiJie<sup>1\*\*</sup>, WANG ShiJie<sup>3</sup>, LI XiongYao<sup>1</sup> and LI Yang<sup>1</sup>

1. 中国科学院地球化学研究所月球与行星科学研究中心, 贵阳 550002
  2. 中国科学院大学, 北京 100049
  3. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002
1. Lunar and Planetary Science Research Center, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China  
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China  
3. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China
- 2015-06-08 收稿, 2015-10-11 改回.

Shang YL, Li SJ, Wang SJ, Li XY and Li Y. 2016. The reclassification of weathering degree of Antarctic ordinary chondrites. *Acta Petrologica Sinica*, 32(1): 71–76

**Abstract** There is a contradiction when categorizing some ordinary chondrites (OCs) from Grove Mountains (GRV), Antarctica, according to Wlotzka's criteria. That is only a minor of metal and troilite (less than 20%) were replaced by oxide while silicates being partly weathered, especially along cracks. The weathering degree of these OCs are all W1 if categorized by the oxidation of metal and troilite; however, they should be W5 by the weathering degree of silicates. Therefore, we propose new criteria to categorize the weathering degree of these OCs, in which the weathering degree of metal and silicates are categorized into 5 and 4 progressive stages (they are  $W_m0$ ,  $W_m1$ ,  $W_m2$ ,  $W_m3$  and  $W_m4$  for metal and  $W_s0$ ,  $W_s1$ ,  $W_s2$  and  $W_s3$  for silicates), respectively. Consequently, meteorites GRV 021588, GRV 021636, GRV 021772 and GRV 021957 which can't fit Wlotzka's criteria are all  $W_m1$ - $W_s1$ . Furthermore, GRV 023312 is  $W_m3$ - $W_s0$  type, which is the same with W3 in Wlotzka's criteria.

**Key words** Ordinary chondrite; Weathering degree; Weathering; Alteration; Antarctica

**摘要** 在南极格罗夫山普通球粒陨石的风化等级划分中出现了和 Wlotzka (1993) 标准矛盾的现象。部分普通球粒陨石的金属和陨硫铁氧化不足 20%, 然而硅酸盐却发生了蚀变。如果考虑金属的氧化量, 这种风化程度应为 W1, 如果考虑硅酸盐的蚀变, 这种风化程度应为 W5。对于存在如此大的差异本文给出了折衷的解决办法——对金属和硅酸盐同时进行风化等级划分。金属的风化等级划分为  $W_m0$ - $W_m4$  五个, 硅酸盐风化等级划分为  $W_s0$ - $W_s3$  四个。依据新方案, GRV 021588、021636、021772 和 021957 等 4 块无法用 Wlotzka (1993) 标准来确定风化等级的陨石的风化等级均为  $W_m1$ - $W_s1$ 。而陨石 GRV 023312 的风化等级为  $W_m3$ - $W_s0$ , 其相当于 Wlotzka (1993) 标准中的 W3。

**关键词** 普通球粒陨石; 风化等级; 风化; 蚀变; 南极

**中图法分类号** P575; P68

成为陨石研究的热点领域。我国在南极格罗夫山地区收集到了上万块陨石, 国内共有 8 家研究单位对其中的数千块陨石进行了基础分类。南极陨石类型和其它地区收集到的陨石情况类似, 绝大多数属于普通球粒陨石。在普通球粒陨石

## 1 引言

南极是地球上已知最富集陨石的地区, 南极陨石研究已

\* 本文受国家自然科学基金项目(41273080、41473067)和国家自然科学基金重大基金项目(41490630)联合资助。

第一作者简介: 尚颖丽, 女, 1989 年生, 博士生, 地球化学专业, E-mail: shang.yingli@foxmail.com

\*\* 通讯作者: 李世杰, 男, 1978 年生, 博士, 副研究员, 陨石学和天体化学研究方向, E-mail: ldlsj@126.com

的分类研究中,光薄片下的风化等级划分是反映陨石在地球上遭受风化程度的重要参数。Wlotzka(1993)在光薄片下将南极普通球粒陨石的风化等级划分为7个,具体如下:W0:陨石没有发生风化,说明是降落型陨石;W1:小于20%的金属和陨硫铁受到地球风化作用而发生氧化,在其周围形成氧化边;W2:约20%~60%的金属被氧化;W3:60%~95%金属和硫化物被氧化;W4:金属和陨硫铁几乎全部氧化(>95%),但无硅酸盐蚀变;W5:硅酸盐开始蚀变,主要沿裂隙;W6:硅酸盐被粘土矿物和蚀变矿物大量替代。目前国内外对普通球粒陨石和一些原始无球粒陨石光薄片下的风化等级划分一般都按这一标准进行判定(刘建忠等,2002;缪秉魁等,2002;Lu *et al.*,2004;李世杰等,2008;Weisberg *et al.*,2008,2009)。美国NASA陨石工作组对陨石的风化等级划分是基于陨石手标本的一些外部特征,他们将陨石手标本的风化程度定为三个等级:A、B和C,分别代表弱、中、强风化程度,该划分方法只能定性的说明陨石的风化程度。此外,Bland *et al.*(1995)提出了采用穆斯堡尔谱测定陨石中 $Fe^{3+}$ 含量的方法来确定陨石的风化程度,但该方法在普通球粒陨石的分类研究中并未采用。Wlotzka的风化等级不仅能很好的揭示出陨石内部的风化程度,而且还能间接反映陨石的居地年龄,以及能够估计陨石真实的降落频率(Wlotzka,1993)。

然而,在南极格罗夫山普通球粒陨石风化等级的划分过程中发现有部分样品中金属和硫化物的氧化程度很低,但硅酸盐已经发生了蚀变,X射线粉晶衍射(XRD)分析显示这些陨石中已有一定数量的粘土矿物,它们的风化等级很难利用Wlotzka的标准(Wlotzka,1993)来确定。本文就这一现象的可能形成原因进行分析并提出解决办法。此外需要指出的是本文中风化等级W没有下标的属于Wlotzka的划分标准,而W有下标m或s的属于笔者的划分方案。

## 2 样品和实验方法

本次实验的5块样品是从2002年中国第19次南极科学考察队在格罗夫山收集的普通球粒陨石中挑选出来的,他们的编号分别为GRV 021588、021636、021772、021957和023312,每块陨石均在慢速金刚石切割机上做切片,随后将切片粘贴于载玻片后磨制成标准厚度的光薄片用于显微镜下观察和电子探针分析。有关这些陨石详细的外表特征、产状和地理坐标等信息可在南极陨石标本库(<http://birds.chinare.org.cn/yunshiku>)或国际陨石学会网站(<http://tin.er.usgs.gov/meteor/metbull.php>)上查阅。

陨石岩相学的观察主要是在带摄像系统(OLYMPUS DP50)的光学显微镜(OLYMPUS BX51)下进行的,单偏光和正交光下观察并确定这些陨石的岩石学特征并确定他们的岩石类型,同时确定陨石中硅酸盐矿物的蚀变情况,反光下

观察并估计了金属和陨硫铁的氧化程度。本次实验所使用的扫描电子显微镜是中国科学院地球化学研究所的日本电子JSM-6460LV低、高真空数字化扫描电子显微镜,该设备配有EDAX公司生产的X射线能谱仪,高真空分辨率为3.0nm,低真空分辨率为4.0nm,加速电压为0.3~30kV,放大倍数为5~300000倍。扫描电子显微镜主要用于结构观察和BSE图像拍摄。利用电子探针(中国科学院地球化学研究所矿床国家重点实验室:EPMA 1600)测定了橄榄石和低钙辉石的化学成分,确定了普通球粒陨石的化学群。分析所用加速电压为25kV,束流10nA,橄榄石和辉石的分析中Mg、Ni和Fe的标准为橄榄石,Al、Si和Ca的标准为斜长石,Cr和Mn的标准为镁铝石榴子石;长石的分析中Na、K、Al、Ca和Si的标准为斜长石,Mg、Fe和Ti的标准为镁铝石榴子石。主要元素氧化物的检测限为0.01%。

为了测定陨石GRV 021636中硅酸盐的风化状况,切取0.5g不带熔壳的样品,在玛瑙研钵中研磨至200目,然后在中国科学院地球化学研究所矿床国家重点实验室的X射线粉晶衍射仪(D/Max-2200)上进行了矿物鉴别分析。

## 3 实验结果

### 3.1 岩石学特征和矿物化学组成

陨石GRV 021588、021636、021772和021957具有类似的岩石学特征,这些陨石中的球粒结构和轮廓难辨,基质重结晶程度高,其它矿物颗粒也有比较明显的重结晶,次生长石颗粒一般大于50 $\mu m$ ,矿物化学成分较均匀(表1)。GRV 021588橄榄石的平均Fa值为26.8,低钙辉石的平均Fs值为22.4;GRV 021636橄榄石的平均Fa值为25.9,低钙辉石的平均Fs值为22.6;GRV 021772橄榄石的平均Fa值为26.1,低钙辉石的平均Fs值为22.1;GRV 021957橄榄石的平均Fa值为26.8,低钙辉石的平均Fs值为22.1。

陨石GRV 023312球粒结构和轮廓可辨,整个薄片未见任何完整球粒,硅酸盐矿物颗粒破碎显著,基质结晶程度较高,多数长石颗粒大小为2~50 $\mu m$ 。此外,铁镍金属和硫化物的分布很不均匀。电子探针成分测定表明(表2),该陨石中的橄榄石和低钙辉石成分均一,橄榄石和低钙辉石的Fa和Fs值分别为26.3和22.9。

### 3.2 风化特征

在光学显微镜和扫描电子显微镜的BSE模式下对这些陨石的风化特征进行了细致观察,发现GRV 021588、021636、021772和021957等4块陨石样品中金属仅边缘有少量发生风化,但硅酸盐发生了蚀变,尤其在裂隙处更为明显,单偏光下对硅酸盐矿物颗粒表面较粗糙(图1a-d)。而陨石GRV 023312和Wlotzka(1993)所描述的绝大多数普通球粒陨石一样,金属虽然风化比较严重(金属约90%已被氧化),但观察不到硅酸盐蚀变的特征(图1e, f)。

表 1 5 块普通球粒陨石的岩石学特征

Table 1 Petrological characteristics of the 5 Grove Mountains ordinary chondrites

陨石名	金属含量 (vol%)	陨硫铁含量 (vol%)	球粒轮廓	化学群及岩石类型	冲击程度	橄榄石 Fa (mol%)	低钙辉石 Fs (mol%)	低钙辉石 Wo (mol%)
GRV 021588	1.2	2.2	难分辨	L6	S5	26.8	22.4	1.6
GRV 021636	0.9	3.5	难分辨	L6	S5	25.9	22.6	1.6
GRV 021772	1.1	3.9	难分辨	L6	S5	26.1	22.1	1.6
GRV 021957	1.2	3.6	难分辨	L6	S5	26.8	22.1	1.7
GRV 023312	0.6	4.3	易分辨	L5	S3	26.3	22.9	1.4

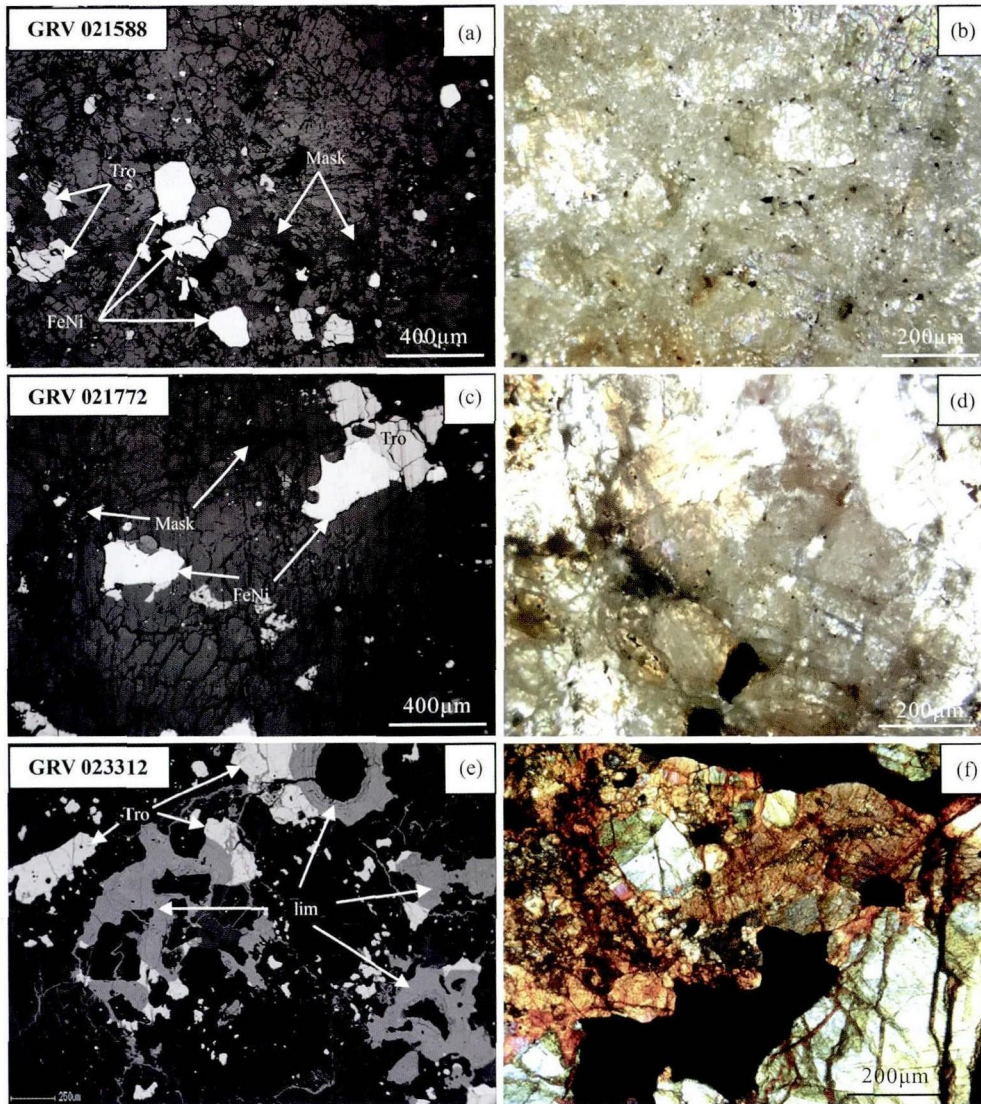


图 1 南极格罗夫山普通球粒陨石的显微照片

(a) GRV 021588 (L6) 的金属仅少量发生了风化; (b) GRV 021588 的正交光照片, 该陨石破碎非常严重, 黑色线条为微裂隙; (c) GRV 021772 (L6) 的反光照片, 硅酸盐矿物中的裂隙非常发育, 黑色线条为微裂隙, 金属仅少量发生了风化; (d) GRV 021772 的正交光照片, 该陨石中硅酸盐破碎显著; (e) GRV 023312 (L5) 的背散射图像 (BSE), 该陨石中的金属几乎全部风化为褐铁矿, 褐铁矿脉较为发育; (f) GRV 023312 的正交光照片, 橄榄石和辉石颗粒具波状消光. Mask-熔长石, Tro-陨硫铁, FeNi-金属, Lim-褐铁矿, 图 a, c 和 e 中灰色部分为硅酸盐. a 和 c 图为反光照片, b, d 和 f 图均为正交光照片

Fig. 1 Micrographs of ordinary chondrites from Grove Mountains, Antarctica

(a) ordinary chondrite GRV 021588 (L6), minor oxide rims around metal, the dark lines are a series of microcracks; (b) silicates in GRV 021588 were severely fractured; (c) ordinary chondrite GRV 021772 (L6), the minor oxide rims around metal, the dark lines are a series of microcracks; (d) silicates in GRV 021772 were fractured; (e) heavy oxidation of metal in GRV 023312 (L5), about 90% being replaced; (f) undulatory extinction of olivine and pyroxene in GRV 023312, no alteration of silicates. Mask-maskelynite; Tro-troilite; FeNi-metal; Lim-limonite; the gray portion of (a), (b) and (c) are silicate minerals. (a) and (c) are all reflectance photographs. (b), (d) and (f) are all crossed polarized photographs

表2 5块南极格罗夫山普通球粒陨石中代表性橄榄石和低钙辉石的电子探针分析结果(wt%)

Table 2 Representative electron microprobe analyses of olivine and Low-Ca pyroxene of the 5 GRV ordinary chondrites (wt%)

陨石	矿物	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Total	Fa/Fs
GRV 021588	ol	37.8 ± 0.5	0.02 ± 0.06	0.21 ± 0.53	23.7 ± 0.3	0.41 ± 0.01	36.3 ± 0.5	0.01 ± 0.01	98.4 ± 0.6	26.8 ± 0.4
	pyx	55.6 ± 0.3	0.14 ± 0.02	0.11 ± 0.01	14.3 ± 0.1	0.44 ± 0.03	27.2 ± 0.3	0.79 ± 0.08	98.5 ± 0.4	22.4 ± 0.3
GRV 021636	ol	38.3 ± 0.3	b. d.	0.01 ± 0.01	23.0 ± 0.4	0.45 ± 0.02	36.9 ± 0.3	b. d.	98.7 ± 0.7	25.9 ± 0.4
	pyx	55.1 ± 0.4	0.05 ± 0.06	0.17 ± 0.09	14.5 ± 0.5	0.46 ± 0.05	27.4 ± 0.4	0.81 ± 0.19	98.4 ± 0.9	22.6 ± 0.6
GRV 021772	ol	37.8 ± 0.6	0.01 ± 0.01	0.01 ± 0.01	23.3 ± 0.2	0.44 ± 0.03	37.0 ± 0.5	0.01 ± 0.01	98.6 ± 0.9	26.1 ± 0.4
	pyx	55.3 ± 0.8	0.04 ± 0.05	0.14 ± 0.03	14.3 ± 0.4	0.46 ± 0.03	27.7 ± 0.4	0.80 ± 0.16	98.7 ± 1.0	22.1 ± 0.6
GRV 021957	ol	37.9 ± 0.8	b. d.	0.03 ± 0.03	23.8 ± 0.9	0.42 ± 0.02	36.3 ± 0.6	0.01 ± 0.01	98.5 ± 1.0	26.8 ± 1.0
	pyx	56.5 ± 0.5	0.05 ± 0.05	0.13 ± 0.03	14.4 ± 0.5	0.45 ± 0.01	27.8 ± 0.3	0.84 ± 0.13	100.1 ± 0.8	22.1 ± 0.6
GRV 023312	ol	39.0 ± 0.4	0.05 ± 0.10	0.03 ± 0.01	23.6 ± 0.4	0.42 ± 0.02	37.0 ± 0.7	0.01 ± 0.01	100.0 ± 0.8	26.3 ± 0.7
	pyx	57.1 ± 0.3	0.16 ± 0.09	0.16 ± 0.12	15.0 ± 0.1	0.44 ± 0.02	27.7 ± 0.6	0.69 ± 0.20	101.2 ± 0.7	22.9 ± 0.3

注: b. d 代表低于检测限; ol 代表橄榄石; pyx 代表低钙辉石

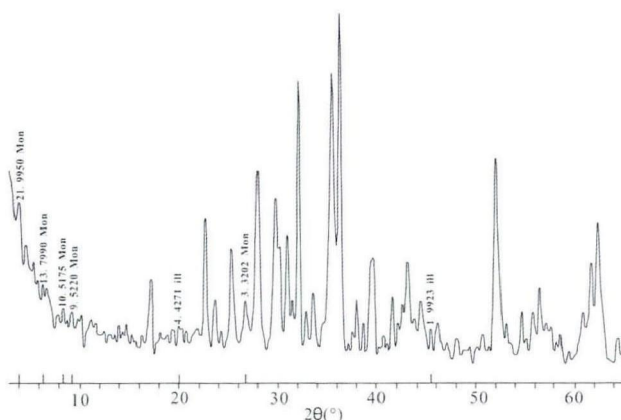


图2 GRV 021636陨石的粉晶X射线衍射谱图

Mon-蒙脱石; ill-伊利石. 未标注的峰为其它矿物, 如橄榄石、辉石、长石、陨硫铁和金属等

Fig. 2 X-ray powder diffraction patterns of GRV 021636

Mon-montmorillonite; ill-illite. The unlabeled peaks in figure are other minerals, such as olivine, pyroxene, feldspar, troilite, metal, etc.

为了深入了解上述4块金属少量风化而硅酸盐已经有蚀变的陨石的风化状况, 选取了陨石 GRV 021636 进行了 X 射线矿物粉晶衍射实验。结果显示该陨石中已经有明显的粘土矿物特征峰(图2), 粘土矿物主要为蒙脱石和伊利石。

## 4 讨论

陨石 GRV 021588, 021636, 021772 和 021957 具有类似的岩石学、矿物化学特征, 根据 Van Schmus and Wood(1967)的化学群-岩石类型分类标准他们均属于普通球粒陨石 L6。GRV 021588 中的橄榄石和辉石在正交光下具有较强的马赛克状消光, 同时这些矿物中的裂隙非常发育, 在薄片能见到熔长石

(图 1a, b); GRV 021636 陨石薄片局部有近 300 μm 宽的冲击脉体, 橄榄石和辉石颗粒在正交光下具有弱的马赛克状消光且橄榄石和辉石中裂隙非常发育, 局部能见到熔长石; GRV 021772 陨石薄片中的橄榄石和辉石具弱的马赛克状消光, 且裂隙十分发育, 局部有熔长石出现(图 1c, d)。GRV 021957 陨石薄片局部有冲击脉体, 橄榄石和辉石具马赛克状消光, 局部有熔长石出现, 橄榄石和辉石中的裂隙非常发育。按照 Stöffler *et al.* (1991) 关于普通球粒陨石冲击程度的划分标准, 这些陨石均属于 S5。依据陨石 GRV 023312 的岩石学、矿物化学特征, 该陨石为普通球粒陨石 L5。冲击程度为 S3。

在 GRV 021588, 021636, 021772 和 021957 等 4 块陨石的 风化等级的划分中, 我们发现很难利用 Wlotzka(1993) 的标准来确定。如果从金属和硫化物的风化程度来讲, 这些陨石中的金属仅边缘有少量被褐铁矿代替, 其转化为氧化物的褐铁矿不及金属含量的 20%, 依据 Wlotzka(1993) 的标准, 他们的风化等级为 W1。但是, 这些陨石中的硅酸盐矿物发生了蚀变, 而且 GRV 021636 的矿物粉晶衍射实验也证实了这些陨石中部分硅酸盐已蚀变为了粘土矿物。从硅酸盐角度判断这些陨石的风化等级又和 Wlotzka(1993) 的标准中 W5 一致。因此, 我们无法利用 Wlotzka(1993) 的标准确定这些陨石的风化等级, 因为 W1 和 W5 在 Wlotzka(1993) 的标准中有本质的区别, 低于 W4 风化等级的普通球粒陨石中硅酸盐未发生蚀变, 而 W4 以上的风化等级中金属已全部转化为氧化物。由此可以看出, Wlotzka(1993) 对普通球粒陨石风化程度的划分标准不适合上述普通球粒陨石风化等级的确定。

在普通球粒陨石的风化过程中, 所有矿物处于同一体系, 其所处的物理化学条件可以认为是相同的, 因此, 各矿物的风化速率主要受其化学性质决定。普通球粒陨石主要由橄榄石、辉石、长石、陨硫铁和金属(铁纹石和镍纹石)构成, 这些矿物的抗风化能力依次为长石 > 辉石 > 橄榄石 > 陨硫铁 > 金属。也就是说通常情况下普通球粒陨石中最先风化的是金

属,而最后风化的是长石等硅酸盐矿物,这也是 Wlotzka (1993)普通球粒陨石风化等级标准的基础。然而伊利石和蒙脱石的出现说明了这些陨石中长石已发生了部分风化,同时表明形成过程的风化强度较弱且是在干冷的条件下形成的(汤艳杰等, 2002),这和南极陨石的风化缓慢是一致的。

Lee and Bland (2004)在沙漠和南极两种环境中的陨石风化产物中检测到  $\text{Si}^{4+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  的存在,表明普通球粒陨石中硅酸盐(橄榄石、斜方辉石、单斜辉石)发生了溶蚀。并且根据两种环境下风化产物之间 Fe/Si 比率的不同,他们认为在南极环境条件下硅酸盐将更容易发生溶蚀。在其研究的一块 Fe-Ni 金属和陨硫铁部分蚀变的南极陨石 ALHA 78045 L6 中发现有绿锥石产生(Lee *et al.*, 2003),绿锥石是一种三八面体 1:1 型层状硅酸盐,属蛇纹石-高岭石族(Hybler *et al.*, 2000)。Lee and Bland (2004)通过对南极陨石风化的研究认为,最初的硅酸盐被铁、镍金属、陨硫铁氧化和水化过程中产生的酸性流体溶解而得到  $\text{Si}^{4+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 。这些  $\text{Si}^{4+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  可能通过吸附或取代与铁的氧化物/氢氧化物微晶结合,或者可能存在于与铁的氧化物/氢氧化物共生的非常细微结晶的硅酸盐矿物中。在其研究的 4 块风化程度最低的南极陨石中发现,风化产物中  $\text{Si}^{4+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  的平均浓度随着氧化程度的增加而降低,这表明在风化作用早期,橄榄石和辉石的表面与外界接触时容易发生溶蚀,而随着风化程度加深,铁镍金属风化所形成的褐铁矿等物质填充孔隙,并包裹橄榄石和辉石晶体表面,使得硅酸盐矿物风化速率减缓(Lee and Bland, 2004)。Buchwald and Clarke (1989)也曾观察到,在南极普通球粒陨石中溶蚀的硅酸盐可以随着铁、镍金属共同发生化学风化作用。Lee and Bland (2004)认为南极陨石风化形成粘土和层状硅酸盐这一现象可能是普遍存在的,但由于之前的研究未采用高分辨率成像和分析技术才使得相关的报道较少。尤其是在硅酸盐风化产物含量很低时往往被忽略。

为何我们样品中的 4 块普通球粒陨石在其金属氧化程度很低的情况下硅酸盐矿物已发生了一定蚀变呢? 问题可能主要在于这些陨石普遍冲击程度较高(均达 S5),使得橄榄石和辉石矿物中裂隙异常发育(图 1a-d),而这些现象恰好大大增加了硅酸盐的孔隙度和渗透性以及与水可能接触的表面积。孔隙度和渗透性是两个影响硅酸盐风化速度非常重要的因素(Noack *et al.*, 1993)。此外这些陨石均为 L 群普通球粒陨石,它们的共同特点就是金属含量比 H 群普通球粒陨石低很多,初步风化所形成的褐铁矿等物质的含量不足以填充冲击所形成的缝隙,从而利于硅酸盐的风化。而 H 群陨石的情况相反,由于金属含量很高,金属风化物很容易填充冲击裂隙,使得陨石的整个孔隙度和渗透性降低,这可能就是该风化现象目前还未在 H 群中发现的主要原因。同样道理,铁陨石由于其内部结构非常致密,尽管铁纹石和镍纹石较硅酸盐易于风化,但铁陨石比石陨石抗风化能力强,这可能是在沙漠中发现的陨石中铁陨石的比例明显比其在降

落陨石中所占比例高的主要原因。

因此,当遇到冲击裂隙非常发育的普通球粒陨石时,一定要细致观察其硅酸盐的风化情况,虽然金属和硫化物易于硅酸盐风化,但矿物的物理状态也是影响风化作用的一个重要因素。尽管陨石的冲击没有发生在地球上,但对于已经开始风化的陨石而言,硅酸盐中的冲击裂隙无疑可以理解成一种物理风化现象,而金属和硫化物在冲击作用下不会形成广泛发育的裂隙,也就是说冲击作用几乎不改变金属的孔隙度和渗透性,甚至冲击所形成的金属和硫化物脉体和小球减小了金属的表面积而不利于其风化的进行。

因此这一标准有必要进行修正。我们可以通过金属和硅酸盐的双重标准来划分普通球粒陨石的风化程度。在 Wlotzka(1993)的标准中 W1 至 W4 仅为金属和硫化物的风化,硅酸盐还未发生蚀变。硅酸盐沿裂隙开始蚀变时金属和硫化物已经风化殆尽。因此我们可以先用  $W_{m,1}$  至  $W_{m,4}$ (未风化用  $W_{m,0}$  表示)来确定金属以及硫化物的风化程度,再用  $W_s,1$  至  $W_s,2$ (未风化用  $W_s,0$  表示)来确定其硅酸盐的风化程度。因此新降落的普通球粒陨石其风化程度可以表示为  $W_{m,0}$ - $W_s,0$ (前者表示金属和硫化物的风化程度,后者表示硅酸盐的风化程度),对于上述金属略有风化且硅酸盐有蚀变的普通球粒陨石,其风化程度可以定为  $W_{m,1}$ - $W_s,1$ 。根据金属(包括硫化物)风化程度和硅酸盐的蚀变程度可以将不同风化程度的普通球粒陨石划分为 15 个风化等级,具体见表 3。

依据表 3 的风化等级划分方案,GRV 021588、021636、021772 和 021957 等 4 块陨石的风化等级均为  $W_{m,1}$ - $W_s,1$ 。而陨石 GRV 023312 的风化等级为  $W_{m,3}$ - $W_s,0$ ,其相当于 Wlotzka (1993)标准中的 W3。

## 5 结论

通过岩石学、矿物化学特征的研究,陨石 GRV 021588、021636、021772 和 021957 均属于普通球粒陨石 L6,冲击程度均为 S5,其金属和硫化物仅少量发生了风化,而硅酸盐在裂隙处有蚀变现象,风化等级不能利用 Wlotzka 的标准来确定。陨石 GRV 023312 为普通球粒陨石 L5,冲击程度为 S3,依照 Wlotzka 的标准其风化程度为 W3。

对 GRV 021636 的 X-射线粉晶衍射实验表明硅酸盐已有少量蚀变为了粘土矿物伊利石和蒙脱石,这两种矿物的存在也表明了南极陨石是在寒冷的条件下经历了弱的风化作用,这与南极寒冷的气候条件是完全吻合的。

新的风化等级划分方案为:先用  $W_{m,1}$  至  $W_{m,4}$ (未风化用  $W_{m,0}$  表示)来确定金属以及硫化物的风化程度,再用  $W_s,1$  至  $W_s,2$ (未风化用  $W_s,0$  表示)来确定其硅酸盐的风化程度。那么依照该方案陨石 GRV 021588、021636、021772 和 021957 等 4 块陨石的风化等级均为  $W_{m,1}$ - $W_s,1$ 。而陨石 GRV 023312 的风化等级为  $W_{m,3}$ - $W_s,0$ 。

表3 普通球粒陨石风化程度划分

Table 3 The weathering degree classification of ordinary chondrites

陨石风化程度	金属硫化物				
	金属和硫化物 无氧化 ( $W_m0$ )	金属和陨硫铁 出现小的氧化 边,仅有少量 氧化物脉 ( $W_m1$ )	金属中等氧化, 大约20%~60% 受到影响 ( $W_m2$ )	金属和硫化物 有较强的风化, 60%~95%被 氧化物替代 ( $W_m3$ )	金属和陨硫铁 几乎全部氧化 ( $>95%$ ) ( $W_m4$ )
硅酸盐					
无硅酸盐蚀变( $W_s0$ )	$W_s0-W_m0$	$W_m1-W_s0$	$W_m2-W_s0$	$W_m3-W_s0$	$W_m4-W_s0$
硅酸盐裂隙处有蚀变( $W_s1$ )	$W_m0-W_s1$	$W_m1-W_s1$	$W_m2-W_s1$	$W_m3-W_s1$	$W_m4-W_s1$
硅酸盐被粘土矿物和氧化物 大量替代( $W_s2$ )	$W_m0-W_s2$	$W_m1-W_s2$	$W_m2-W_s2$	$W_m3-W_s2$	$W_m4-W_s2$

注:下标 m 表示金属, s 表示硅酸盐

致谢 南极陨石样品由中国极地研究中心南极陨石库提供;感谢缪秉魁教授和张爱斌教授的指导和帮助;同时感谢中国科学院地球化学研究所矿床国家重点实验室的龚国洪老师在实验过程中的帮助;最后感谢审稿人所提供的宝贵意见。

## References

- Bland PA, Berry FJ and Pillinger CT. 1995. Weathering of ordinary chondrites from Algeria and Australia as a climatic indicator. *Meteoritics*, 30(5): 487
- Buchwald VF and Clarke Jr RS. 1989. Corrosion of Fe-Ni alloys by Cl-containing akaganéite ( $\beta$ -FeOOH): The Antarctic meteorite case. *Am. Mineral.*, 74(5-6): 656-667
- Hybler J, Petřiček V, Ďurovič S and Smrček L. 2000. Refinement of the crystal structure of cronstedtite-1T. *Clays Clay Miner.*, 48(3): 331-338
- Lee MR, Bland PA and Graham G. 2003. Preparation of TEM samples by focused ion beam (FIB) techniques: Applications to the study of clays and phyllosilicates in meteorites. *Mineral. Mag.*, 67(3): 581-592
- Lee MR and Bland PA. 2004. Mechanisms of weathering of meteorites recovered from hot and cold deserts and the formation of phyllosilicates. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(4): 893-916
- Li SJ, Wang SJ, Liu S, Li XY, Tang H, Li P and Wang T. 2008. The classification of 100 Grove Mountains ordinary meteorites. *Chinese Journal of Polar Research*, 20(2): 177-188 (in Chinese with English abstract)
- Liu JZ, Zou YL, Li CL, Xu L and Ouyang ZY. 2002. Meteorite characteristics of petrology-mineralogy and classification in Grove Mountains, Antarctica. *Chinese Journal of Polar Research*, 14(4): 330-337 (in Chinese with English abstract)
- Lu R, Miao BK, Wang CQ, Dai DQ, Lin YT, Ouyang ZY and Li CL. 2004. Classification of 24 new ordinary chondrites from the Grove Mountains, Antarctica. *Acta Geologica Sinica*, 78(5): 1052-1059
- Miao BK, Lin YT, Ouyang ZY and Zhou XH. 2002. Petrology of Grove

Mountains meteorites II; Equilibrated ordinary chondrites. *Chinese Journal of Polar Research*, 14(4): 288-299 (in Chinese with English abstract)

- Noack Y, Colin F, Nahon D, Delvigne J and Michaux L. 1993. Secondary-mineral formation during natural weathering of pyroxene: Review and thermodynamic approach. *American Journal of Science*, 293(2): 111-134
- Stöffler D, Keil K and Scott ERD. 1991. Shock metamorphism of ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55(12): 3845-3867
- Tang YJ, Jia JY and Xie XD. 2002. Environment significance of clay minerals. *Earth Science Frontiers*, 9(2): 337-344 (in Chinese with English abstract)
- Van Schmus WR and Wood JA. 1967. A chemical-petrologic classification for the chondritic meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 31(5): 747-765
- Weisberg MK, Smith C, Benedix G, Folco L, Righter K, Zipfel J, Yamaguchi A and Aoudjehane HC. 2008. The meteoritical bulletin, No. 94. *Meteoritics & Planetary Science*, 43(9): 1551-1584
- Weisberg MK, Smith C, Benedix G, Folco L, Righter K, Zipfel J, Yamaguchi A and Aoudjehane HC. 2009. The meteoritical bulletin, No. 95. *Meteoritics & Planetary Science*, 44(3): 429-462
- Wlotzka F. 1993. A weathering scale for the ordinary chondrites. *Meteoritics*, 28(3): 460

## 附中文参考文献

- 李世杰, 王世杰, 刘燊, 李雄耀, 唐红, 李芃, 王涛. 2008. 100 块南极格罗夫山陨石的类型划分及其岩石学特征. *极地研究*, 20(2): 177-188
- 刘建忠, 邹永廖, 李春来, 徐琳, 欧阳自远. 2002. 南极格罗夫山陨石的岩石——矿物学特征及初步分类. *极地研究*, 14(4): 330-337
- 缪秉魁, 林杨挺, 欧阳自远, 周新华. 2002. 南极格罗夫山陨石岩石学特征 II: 平衡型普通球粒陨石. *极地研究*, 14(4): 288-299
- 汤艳杰, 贾建业, 谢先德. 2002. 粘土矿物的环境意义. *地学前缘*, 9(2): 337-344