

南极格罗夫山陨石的磁化率*

罗红波^{1,2,3} 林杨挺^{2**} 胡森^{2,3} 刘焘^{2,3} 冯璐^{2,3} 缪秉魁^{2,4}

LUO HongBo^{1,2,3}, LIN YangTing^{2**}, HU Sen^{2,3}, LIU Tao^{2,3}, FENG Lu^{2,3} and MIAO BingKui^{2,4}

1. 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550002

2. 中国科学院地质与地球物理研究所地球深部重点实验室, 北京 100029

3. 中国科学院研究生院, 北京 100049

4. 桂林工学院广西地质工程中心重点实验室, 桂林 541004

1. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China

2. Key Laboratory of the Earth's Deep Interior, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

4. Key Laboratory of Geological Engineering Center of Guangxi Province, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China

2008-05-22 收稿, 2008-08-12 改回.

Luo HB, Lin YT, Hu S, Liu T, Feng L and Miao BK. 2009. Magnetic susceptibility of meteorites collected in Grove Mountains, Antarctica. *Acta Petrologica Sinica*, 25(5):1260–1274

Abstract Discovery of a large number of meteorites from the Grove Mountains (GRV) region, Antarctica, demands a non-destructive and efficient method of classifying meteorites. Magnetic susceptibility (χ) of meteorites was mainly contributed by metallic Fe-Ni, hence a potentially important criterion of classification of meteorites. In addition, magnetic susceptibility is a fundamental parameter of meteorites. In this paper we report the first measurements of magnetic susceptibility of Grove Mountains meteorites. Experiments on simulation samples demonstrated that deviation of magnetic susceptibility measurement due to various sizes and shapes of the samples is less than 1%, within the analytical precision. Magnetic susceptibility of the first classified 613 Grove Mountains meteorites was measured, including martian meteorites, eucrites, carbonaceous chondrites, ureilites, mesosiderites and pallasite. Most ordinary chondrites of H, L and LL groups can be classified according to magnetic susceptibility. Moreover, magnetic susceptibility is more reliable for classification of unequilibrated ordinary chondrites. The distribution pattern of magnetic susceptibility of H-group of Grove Mountains meteorites is nearly identical to that of other Antarctic meteorites, both with the mass normalized magnetic susceptibility ($\log\chi$, 10^{-9} m³/kg) lower by 0.2 than that of meteorite falls, indicative of terrestrial weathering effects of Grove Mountains meteorites. Magnetic susceptibility of L-group of Grove Mountains meteorites also shifts to lower values by 0.2 as H-group. In contrast, L-group of other Antarctic and desert meteorites shows scattered distribution patterns, probably indicative of various weathering degrees.

Key words Antarctic meteorites; Chondrites; Classification; Magnetic susceptibility; Terrestrial weathering

摘要 我国在南极格罗夫山发现并收集到大量南极陨石,需要一种无损、快速简单的分类方法。陨石磁化率(χ)的主要贡献是其中的铁镍金属,因而有可能成为一种简便有效的分类参数。同时,磁化率是陨石的一个重要物理参数。我们在国内首次开展陨石磁化率的研究,通过对模拟陨石磁化率样品的测量,证明可以通过不同取向的测量平均,将样品的大小和形状等几何因素的影响减小在仪器的测量精度范围之内。完成了首批613块南格罗夫山陨石的磁化率测量,除普通球粒陨石外,还包括火星陨石、灶神星陨石、碳质球粒陨石、中铁陨石、橄辉无球粒陨石等特殊类型。根据质量磁化率,可以划分大部分H、L、LL群陨石。特别重要的是,磁化率对于划分非平衡的普通球粒陨石化学群提供了更为可靠的参数。格罗夫山H群陨石的磁化

* 中国科学院知识创新方向性项目(kzcx2-yw-110)和国际极地年中国行动计划资助。

第一作者简介:罗红波,男,1979年生,硕士研究生,地球化学专业

** 通讯作者:林杨挺,男,1962年生,博士,研究员,天体化学及行星比较学专业, E-mail: linyt@mail.igcas.ac.cn

率分布与南极其他地区的陨石十分相似,二者相对降落型陨石均向低质量磁化率方向平移 $0.2(\log X, 10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg})$,反映了风化作用对南极陨石磁化率的平均影响程度;格罗夫山L群陨石的质量磁化率分布同样较降落型陨石偏低0.2左右,但南极其他地区的陨石与沙漠陨石的磁化率分布相似,二者均更为离散和偏低,可能反映了不同的风化程度。

关键词 南极陨石;球粒陨石;陨石分类;磁化率;风化作用

中图分类号 P691

1 引言

我国于1998年首次在东南极的格罗夫山地区发现4块陨石,随后的3次格罗夫山考察分别收集到28,4448、5354块陨石(琚宜太和刘小汉,2000;刘小汉和琚宜太,2002; Miao *et al.*, 2005; Lin *et al.*, 2006),使我国的南极陨石总数达到9834块,成为继日本和美国之后,拥有南极陨石最多的国家之一。南极格罗夫山陨石的收集为我国陨石学和天体化学的发展提供了前所未有的客观条件。另一方面,大量陨石的发现对陨石研究工作,特别是对陨石的基础分类工作提出了巨大的挑战。如何快速、准确、无损地对如此数量的陨石进行分类,是当前迫切需要解决的关键问题。

降落在地球上的陨石绝大部分是普通球粒陨石。对美国在南极横断山脉收集到的8941块陨石统计结果,其中8231是普通球粒陨石,占总数的92%(据 Antarctic Meteorite Newsletter)。普通球粒陨石根据铁镍合金的含量,以及硅酸盐矿物的FeO含量,划分为高铁(H)群、低铁群(L)和低铁低金属群(LL)3个化学群(Dodd, 1981)。铁镍合金是陨石中磁化率最强的组分(Nagata, 1979),此外还有少量其他磁性矿物,主要是铬铁矿和磁铁矿。陨石中的硅酸盐矿物主要为顺磁性,而陨硫铁为反磁性物质,二者对全岩磁化率的贡献很小(Coey *et al.*, 1976; Knoska and Krivsky, 1981)。因此,陨石的磁化率可以定量反映铁镍合金的含量,从而有可能为划分陨石的化学群提供依据。常温下磁化率的测量为无损分析,对陨石样品不造成任何影响。磁化率的测定简单、快速,因而可以对大量样品进行快速的测量。

陨石的磁性参数不仅可用于其化学群的划分,它本身也是陨石的重要特性参数,是正确解释陨石剩磁,从而了解其母体,即小行星、月球和火星古磁场所必须的基本参数。陨石磁学性质的研究,对探测小行星(Kivelson *et al.*, 1993; Richter *et al.*, 2001; Acuña *et al.*, 2002; Rochette *et al.*, 2002)(Terho *et al.*, 1996)、月球(Hood *et al.*, 2001)、以及火星(Acuña *et al.*, 1999; Hviid *et al.*, 1997)等天体的磁场,揭示地球等类地行星磁场的形成和演化具有重要的意义。

对陨石磁化率的初步研究表明,该项参数能够较好地地区分普通球粒陨石中的H、L、LL群陨石,并识别出弱磁性的无球粒陨石,包括来自灶神星、月球、火星等重要陨石类型(Rochette *et al.*, 2003; Folco *et al.*, 2006; Smith *et al.*, 2006)。但是,由于沙漠陨石和南极陨石降落在地表的时间很长,受到不同程度的风化作用,从而对其磁化率产生不同

程度的影响。另一方面,陨石的形态极不规则、大小差异很大,需要对陨石样品磁化率测量的精度和准确度进行评估。

本文通过对模拟普通球粒陨石磁化率样品的测量,讨论陨石样品形态和大小等几何因素,以及样品磁化率强度变化对磁化率测定的影响。在此基础上,测定了我国在南极格罗夫山收集到并已完成分类的684块陨石的磁化率,结合岩石矿物学的分类结果,讨论磁化率在我国南极陨石分类中的实际应用。Lin *et al.* (2008)报导了该项研究的初步结果。

2 样品和实验方法

为了研究陨石样品的形状和大小等几何因素,以及磁化率强度对陨石磁化率测定的影响,配制了二种磁化率的模拟样品,其磁化率分别落在高铁(H)和低铁(L)群普通球粒陨石的范围。模拟样品采用一定量的金属铁粉与橡皮泥均匀混合制成。铁粉的粒度约 $100 \mu\text{m}$,与平衡型普通球粒陨石中的铁镍金属颗粒近似。模拟样品还用于MS2D与MS2B测量探头之间的标定。

磁化率测定的南极陨石样品共613块,其中413块选自我国第十九次南极科学考察收集的样品,200块选自我国第二十二次南极科学考察收集的样品。按陨石化学群划分,普通球粒陨石597块、CM2型碳质球粒陨石2块、CO3型碳质球粒陨石1块、火星陨石1块、灶神星陨石1块、橄辉无球粒陨石3块、中铁陨石4块、橄辉陨铁1块、以及3块可能来自普通球粒陨石的大金属团块。

磁化率的测量在中国科学院地质与地球物理所地磁实验室进行。测量仪器为英国Bartington公司生产的MS2型磁化率测量仪,测量范围为 $1-9999 \times 10^{-5} \text{ SI}$ 。该仪器配备MS2B和MS2D二种测量探头。MS2B为双频传感器,频率分别为 0.465 kHz (LF)和 4.65 kHz (HF),实际测量采用的频率为 0.465 kHz (LF)。样品置于 8 cm^3 容量的塑料样品盒,磁化率测量结果的标定采用Bartington公司提供的 10 cm^3 MnCO_3 标样,该测量探头主要用于小样品的测量。对 10 cm^3 MnCO_3 标样10次重复测量结果的标准偏差 $< 1\%$ 。MS2D为直径 185 mm 的线圈,工作频率为 0.958 kHz ,该探头主要用于较大体积陨石样品的测量,其测量结果通过MS2B标定。样品置于高度可以上下调节的有机玻璃样品台,MS2D探头用木质支架固定于样品台上方。全部样品均在三个正交垂直取向上分别测量磁化率,并读取最大值,测量结果为三个取向的平均值。

3 实验结果

3.1 MS2D 测量探头的标定

样品的磁化率 K (也称为体积磁化率) 为感应磁场强度 (M) 与施加的磁场强度 (H) 之比值。通常用磁化率与密度的比值, 即质量磁化率 (χ) 来表征样品的磁学性质, $\chi = K/\rho$, χ 单位为 m^3/kg 。

为了标定 MS2D 测量探头, 配制了 8 份铁粉含量不同的模拟样品, 用 MS2B 测量其质量磁化率 χ , 并用 $10\text{cm}^3 \text{MnCO}_3$ 标样进行标定, χ 值 ($10^{-9}\text{m}^3/\text{kg}$) 落在 73390 ± 320 至 140170 ± 370 之间。用 MS2D 测量该组模拟样品, 得到相对质量磁化率 (γ)。图 1 给出用 MS2B 测量的质量磁化率 (χ) 与用 MS2D 测量的相对质量磁化率 (γ) 之间的关系, 二者呈很好的线性相关 ($R^2 = 0.99$):

$$\gamma = 360\chi - 1123.9 \quad (1)$$

3.2 形状和大小等几何形状的影响

高铁和高铁含量的二组模拟样品充分混匀后, 分别取 10 份充填于 8cc 的立方体塑料样品盒中, 用 MS2B 测量其磁化率, 并用 $10\text{cm}^3 \text{MnCO}_3$ 标样进行标定, 得到的质量磁化率 ($\log \chi$, $10^{-9}\text{m}^3/\text{kg}$) 分别为 (1σ) 5.112 ± 0.001 (高铁) 和 4.866 ± 0.002 (高铁)。高铁模拟样品分成质量不等的 13 份, 而高铁样品分成 8 份, 并依次做成圆球形和扁圆状, 用 MS2D 测量其相对质量磁化率。此外, 对上述 8cc 立方体模拟样品也用 MS2D 进行测量。MS2D 的测量结果根据公式 (1) 进行校正,

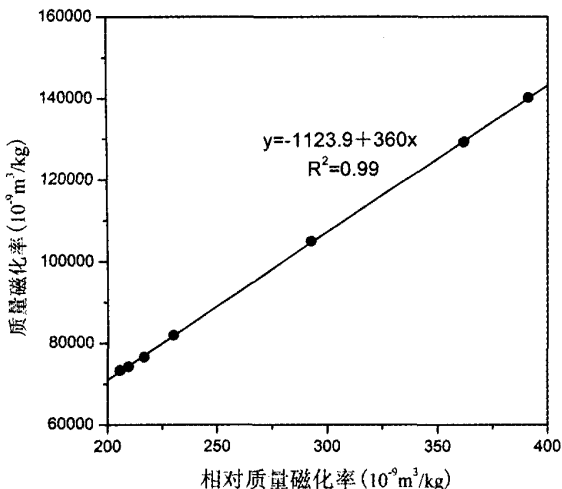


图 1 MS2B 和 MS2D 二种测量探头对 MnCO_3 标样和模拟样品磁化率测量的结果, 二者具有很好的线性相关

Fig. 1 Measurements of magnetic susceptibility of MnCO_3 standard and simulation samples by MS2B sensor and MS2D probe, showing a good linear correlation

得到质量磁化率, 并表示于图 2。从图中可以看出, 模拟样品的大小和形状等几何因素对二组磁化率模拟样品测量结果的影响很小, 几乎全部测量结果均落在 $\pm 2\%$ 的误差线以内。高铁模拟样品中, 圆球形的对数质量磁化率 ($\log \chi$, $10^{-9}\text{m}^3/\text{kg}$) 为 (1σ) 5.109 ± 0.004 , 扁圆形的对数质量磁化率 ($\log \chi$, $10^{-9}\text{m}^3/\text{kg}$) 为 (1σ) 5.112 ± 0.004 , 二者与 MS2B 直接测量结果 (5.112 ± 0.001) 的偏差均 $< 1\%$ 。同样, 对于高铁模拟样品, 圆球形和扁圆形的对数质量磁化率 ($\log \chi$, $10^{-9}\text{m}^3/\text{kg}$) 分别为 (1σ) 4.862 ± 0.003 , 4.864 ± 0.002 , 与 MS2B 的测量结果 (4.866 ± 0.002) 也几乎完全相同。

3.3 南极格罗夫山普通球粒陨石的磁化率

图 3 给出了 566 块格罗夫山平衡型普球球粒陨石的磁化率分布, 可以看出具有二个明显的峰, 并分别对应于 H 和 L 群陨石的区间。在低质量磁化率端, 有一不明显的峰, 与 LL 群陨石的范围一致。因此, 上述质量磁化率分布特征很可能代表了 H、L、LL 群陨石质量磁化率分布曲线的叠加。对格罗夫山普通球粒陨石质量磁化率分布的谱分析, 得到 H 和 L 群陨石的相对丰度分别为 79% 和 21%。LL 群的样品数较少, 故不做统计。全部 597 块普通球粒陨石的磁化率列于附录。

为了检验陨石样品磁化率的均一性, 在完成整块陨石的磁化率测量后, 对其中 375 块陨石劈分出来拟用于制备岩石光薄片的小块样品, 也做了磁化率的测量, 所用探测器为 MS2B。图 4 给出了这 375 块格罗夫山普通球粒全岩样品与小块劈分样品磁化率的对比, 可以看出绝大部分陨石的磁化率相当均一。

3.4 格罗夫山特殊类型陨石的磁化率

表 1 列出了 16 块格罗夫山特殊类型陨石的质量磁化率。2 块 CM2 型碳质球粒陨石的质量磁化率 ($\log \chi$, $10^{-9}\text{m}^3/\text{kg}$) 分别为 3.31 和 4.23, 1 块 CO3 型碳质球粒陨石的磁化率 (3.69) 均落在 LL 群陨石的范围。橄辉无球粒陨石的质量磁化率也较高 (3.97, 4.07, 4.51), 基本上与 CM2 型陨石一致。灶神星陨石 (玄武岩质) 的质量磁化率很低 (2.61), 而火星陨石的质量磁化率仅为 3.14。石铁陨石具有最高的质量磁化率, 其中 4 块中铁陨石的质量磁化率为 5.39 ~ 5.61, 1 块橄辉陨铁的质量磁化率为 5.73。此外, 还有 3 块金属团块 (0.24 ~ 5.44 g) 可能来自普通球粒陨石, 但它们的质量磁化率 (5.26 ~ 5.67) 落在石铁陨石的区间。

4 讨论

4.1 磁化率测量误差分析

本项工作研究了样品的大小和形状可能对磁化率测量结果的影响。实验结果表明, 上述样品的几何因素对磁化率

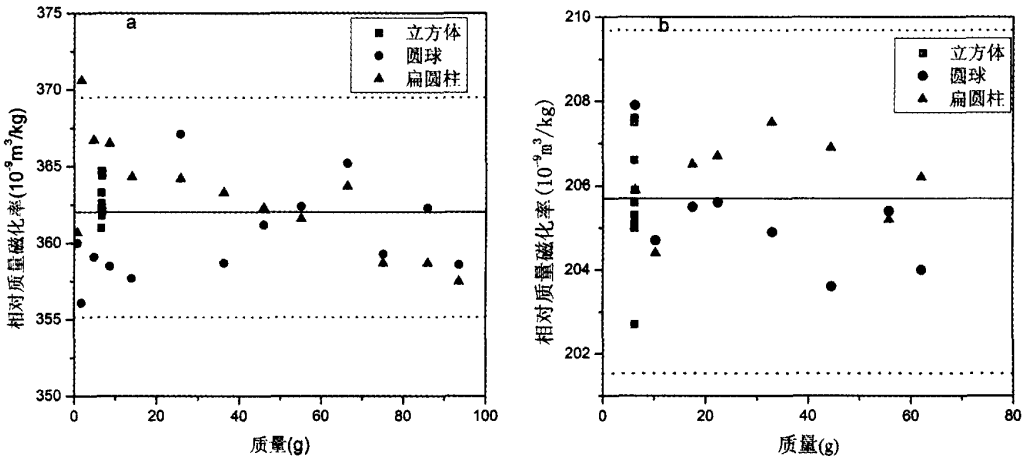


图2 不同形状、大小模拟样品磁化率的测量结果

(a)高磁化率模拟样品,(b)低磁化率模拟样品。除立方体样品外为 MS2B 测量结果外,其他样品为 MS2D 的测量结果。图中横的实线为平均值,虚线为相对平均值的误差范围(±2%)

Fig.2 Measurements of simulation samples with various masses and shapes

(a) with high magnetic susceptibility, (b) with low magnetic susceptibility. Except for the cubic simulation samples measured with MS2B sensor, other samples were analyzed by MS2D probe. The horizontal line represents the average values, and the dashed lines for a deviation of ±2%

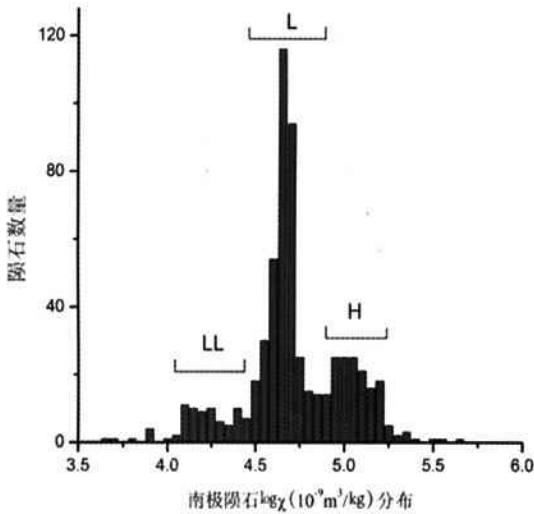


图3 566 块格罗夫山平衡型普通球粒陨石的磁化率分布图

H、L、LL 范围为南极其他区域收集的陨石 (Rochette et al., 2003)

Fig.3 Magnetic susceptibility distribution pattern of 566 equilibrated ordinary chondrites found in Grove Mountains region, Antarctica

The ranges of H, L and LL are other Antarctic meteorites (Rochette et al., 2003)

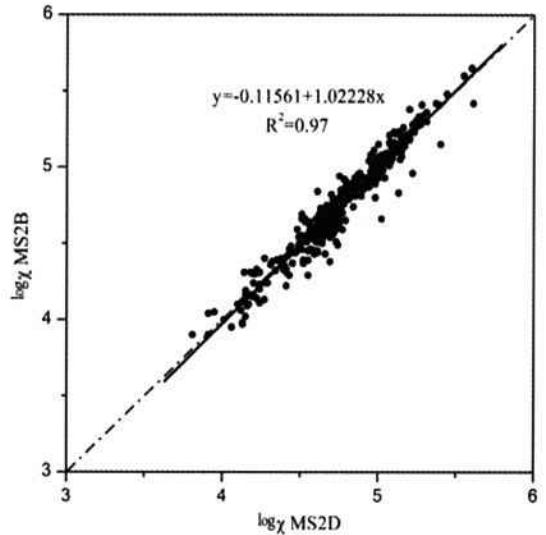


图4 375 块格罗夫山普通球粒陨石完整样品与小块劈分样品的质量磁化率(log chi, 10^-9 m^3/kg)测量结果对比 其中完整样品的磁化率由 MS2D 测量,而小块劈分样品由 MS2B 测量。绝大部分陨石的小块样品与全岩样品的质量磁化率基本一致。图中实线为全部分析数据点的线性拟合结果

Fig.4 Comparison of mass-normalized magnetic susceptibility (log chi, 10^-9 m^3/kg) of small chips and the whole rocks of 375 GRV ordinary chondrites

The whole meteorites were measured by the MS2D probe and the small chips by MS2B sensor, most of them are nearly same. The linear regression line is shown

表1 格罗夫山特殊类型陨石的磁化率

Table 1 Magnetic susceptibility of rare types of GRV meteorites

陨石编号	类型	$\log \chi (10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg})$	陨石编号	类型	$\log \chi (10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg})$
GRV 051523	Ecurite	2.61	GRV 021729	Ureilite	4.07
GRV 020090	Martian	3.14	GRV 021512	Ureilite	3.97
GRV 020124	Mesosiderite	5.55	GRV 021536	CM2	4.23
GRV 020175	Mesosiderite	5.60	GRV 050179	CM2	3.31
GRV 021525	Mesosiderite	5.61	GRV 050384	CO3	3.69
GRV 050212	Mesosiderite	5.39	GRV 053644	Metal	5.67
GRV 020099	Pallasite	5.73	GRV 055152	Metal	5.26
GRV 052382	Ureilite	4.51	GRV 055356	Metal	5.37

测量可能产生的标准偏差 < 1% (图 2), 这一偏差实际上接近测量仪器本身的测量精度。因此, 可以认为陨石样品悬殊的大小和不规则形状, 对于磁化率测量的影响可以忽略不计, 即可以利用 MS2B 和 MS2D 探头准确测定陨石的磁化率。

对相同陨石的完整手标本与劈分出的小块样品的磁化率测量结果 (图 4), 不仅进一步证实 MS2B 与 MS2D 探头之间具有很好的相关性, MS2D 的测量结果可以通过 MS2B 进行准确的校正。同时, 该测量结果还表明陨石的磁化率相当均一, 特别是相对于直径小于 1 英寸的陨石光薄片, 陨石磁化率的测量结果有很好的代表性。

4.2 平衡型普通球粒陨石的磁化率分类

格罗夫山普通球粒陨石的磁化率呈现 3 个峰值的分布特征, 并分别对应 H、L、LL 群陨石, 表明质量磁化率与普通球粒陨石的化学群有较好的对应关系。图 5a 给出了 553 块格罗夫山平衡型普通球粒陨石的磁化率与橄榄石 Fa 值相关性, 从总体上看, 平衡型普通球粒陨石的 $\log \chi$ 与 Fa 值呈负相关。但是, H、L、LL 之间还是存在比较明显的重叠, 其中 L 群陨石的磁化率 > 4.8 的样品占该群样品总数的 4.6%, 这一部分陨石落在 H 群的范围。相反, H 群陨石中磁化率 < 4.8 的样品占该群样品总数的 9.5%, 它们与 L 群陨石相同。13 个 LL 群陨石中有 2 个的磁化率 > 4.3, 落在 L 群陨石范围, 而 L 群陨石有 2.7% 的样品 $\log \chi$ < 4.3, 落在 LL 群陨石范围。

从图 5 可以看出, 对于同一化学群的平衡型普通球粒陨石, 其磁化率变化基本上与橄榄石 Fa 值没有关系。尽管风化作用可以造成陨石磁化率的明显降低 (Rochette *et al.*, 2003; Smith *et al.*, 2006), 但我们对格罗夫山陨石风化程度的分析表明, 未发现明显的磁化率与风化程度的相关性, 仅较强风化样品的 $\log \chi$ 平均值有 0.1 ~ 0.15 的降低, 远低于 H 和 L 群的变化范围。因此, 比较可能的解释是, 相对于铁镁质硅酸盐矿物的 FeO 含量, 陨石的金属含量可能比较不均一。由于金属与硅酸盐相在比重、磁化率等许多物性上的明显差异, 在小行星吸积过程中, 有可能出现一定程度的

金属-硅酸盐相分离。L 群中有一个陨石 (GRV 055056) 异常高的磁化率 (图 5a) 就与金属含量的不均一性有关。该陨石仅 0.4 g, 含一较大颗粒的金属, 结果导致很高的磁化率。另外, 从图 5a 可以看出, Fa 值异常低的一块陨石 (GRV 020043), 其质量磁化率落在 H 群的范围, 也反映了金属含量与橄榄石 Fa 值之间的一致性。

4.3 非平衡型普通球粒陨石的分类

非平衡型 (即 3 型) 普通球粒陨石的矿物化学组成十分不均一, 不仅颗粒之间, 而且同一颗粒中往往具有明显的环带结构, 橄榄石和低 Ca 辉石的 FeO 含量通常由颗粒中央向边缘升高。图 5b 给出格罗夫山 3 型普通球粒陨石的磁化率与橄榄石 Fa 之间的关系, 可以看出这些陨石的橄榄石 Fa 值变化范围很大, 其中一些甚至超过普通球粒陨石的范围。尽管对这些陨石橄榄石和辉石的定量分析点数大量超过平衡型陨石, 其平均值与化学群的对应关系仍可能出现较大的偏差。特别是对于平均值靠近相邻化学群的一部分样品, 需要更大量的分析数据才有可能比较可靠地划分其化学群。另一方面, LL 群陨石的金属含量低于 L 群陨石, 但二者差异较小 (甚至部分重叠), 且 3 型陨石的金属颗粒小, 金属含量的统计误差大。因此, 陨石的质量磁化率对 3 型普通球粒陨石的化学群划分提供了更为可信的标准。根据格罗夫山平衡型普通球粒陨石磁化率的分布特征, 可确定 H3 型陨石的质量磁化率范围 ($\log \chi 10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$) > 4.8, L3 型为 4.3 ~ 4.8, LL3 型为 < 4.3。

4.4 特殊类型陨石的磁化率分类

表 1 列出了格罗夫山陨石中碳质球粒陨石、火星陨石、灶神星陨石、橄辉无球粒陨石、中铁陨石和橄榄陨铁的质量磁化率。CM2 型碳质球粒陨石的磁化率 ($\log \chi 10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$) 为 3.92 ~ 4.47, 落在普通球粒陨石的范围 (3.68 ~ 5.40), 并靠近 L 群。橄辉无球粒陨石的磁化率很高, 并与 CM2 型碳质球粒陨石相似。橄辉无球粒陨石高的磁化率, 一方面与这

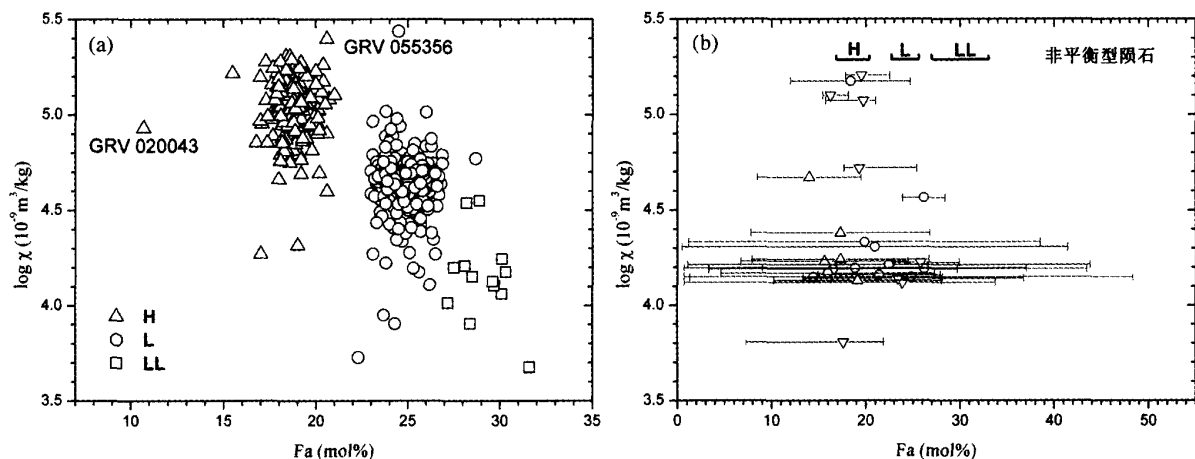


图5 格罗夫山普通球粒陨石的磁化率与橄榄石 Fa 值关系

(a) 平衡型普通球粒陨石的磁化率与橄榄石 Fa 值呈反相关趋势,但是同一化学群中,二者关系不明显;(b) 3 型普通球粒陨石的磁化率与橄榄石 Fa 值关系不明显,后者具有很大的变化范围。橄榄石 Fa 值引自以下文献: Δ 引用胡森等(2008),为平均值 $\pm 1\sigma$; ∇ 为平均值 \pm 范围, \circ 为中线 \pm 范围,二者引自 Meteoritical Bulletin No. 93

Fig. 5 Plots of mass-normalized magnetic susceptibility versus Fa content of olivine of GRV ordinary chondrites

(a) Equilibrated ordinary chondrites show a negative trend between the normalized magnetic susceptibility and Fa content of olivine, but it is not true for meteorites of the same groups; (b) No correlation between mass-normalized magnetic susceptibility and Fa content of olivine of type 3 ordinary chondrites, with a large range of the latter. Literature data are below: average $\pm 1\sigma$ of the Fa contents (Δ) from Hu *et al.* (2008), and average with ranges (∇) and middle value with ranges (\circ) from Meteoritical Bulletin No. 93

类陨石具有岩浆结晶结构,另一方面又具有类似球粒陨石未分异的全岩化学组成特征相一致,并从另一角度证明该类陨石没有发生明显的金属-硅酸盐熔融分异。其他无球粒陨石,包括火星陨石和灶神星陨石的质量磁化率很低 (< 3.35),可与其他化学群陨石很好地相区分。二类石铁陨石,即中铁陨石和橄榄陨铁均具有最高的磁化率,明显地区别于球粒陨石。

4.5 格罗夫山陨石与其他区域陨石的磁化率对比

同南极其他地区收集的陨石一致,格罗夫山普通球粒陨石的磁化率分布相对于降落型陨石有系统偏低趋势(图6)。从图6a看出,格罗夫山 H 群陨石的磁化率分布特征几乎与南极其他地区收集的相同化学群陨石完全一致,二者的峰值质量磁化率(5.1)较降落型陨石(5.3)约偏低 0.2,且半峰宽也较后增大。上述结果表明,风化作用使南极 H 群陨石的平均质量磁化率降低 0.2 ($\log \chi \cdot 10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$)。作为对比,其他地区(主要指沙漠地区)发现的 H 群陨石具有更为偏低的磁化率,且分布范围更宽,反映了更强的风化作用。

图6b 给出格罗夫山 L 群陨石与其他地区陨石之间磁化率的对比,格罗夫山 L 群陨石的磁化率也具有明显的峰值分布特征,其峰值质量磁化率为 4.7,与降落型陨石相比约降低 0.2。这与格罗夫山 H 群陨石的磁化率偏低程度一致。相反,南极其他地区 L 群陨石的磁化率呈双峰分布模式,与沙漠陨石相似,但明显不同于降落型陨石。一种可能是这些 L

群南极陨石遭受了较强烈的风化作用,造成磁化率更大范围的分布(往降低方向)。但是,这种可能性不能解释同一地区发现的 H 群陨石具有不同的风化特征。另一种可能是,南极其他地区发现的 L 群陨石的磁化率测定数据较少,上述差异是由于统计误差所导致。

5 结论

陨石磁化率模拟样品的测量表明,样品的大小和形状等几何因素对磁化率测量可能造成的误差很小,接近仪器本身的测量精度。MS2 磁化率测量系统可准确测量陨石的磁化率。对相同陨石的全岩样品和劈分小样品的磁化率测量还表明,陨石的磁化率相当均一。

测定了 613 块南极格罗夫山陨石的磁化率,其中包括 597 块普通球粒陨石,2 块 CM2 型碳质球粒陨石、1 块 CO3 型碳质球粒陨石、1 块火星陨石、1 块灶神星陨石、3 块橄辉无球粒陨石、4 块中铁陨石、1 块橄榄陨铁,以及 3 块可能来自普通球粒陨石的大金属团块。

格罗夫山普通球粒陨石的磁化率分布具有 3 个峰值,分别对应于 H、L、LL 群陨石。对于平衡型普通球粒陨石化学群的划分,磁化率可作为一个重要的分类依据。当选择质量磁化率范围 > 4.8 , $4.3 \sim 4.8$, < 4.3 分别作为划分 H、L、LL 群的参数时,落在其他区域的样品数不超过 10%。尽管风化作用使格罗夫山陨石的磁化率平均降低 0.2,同一化学

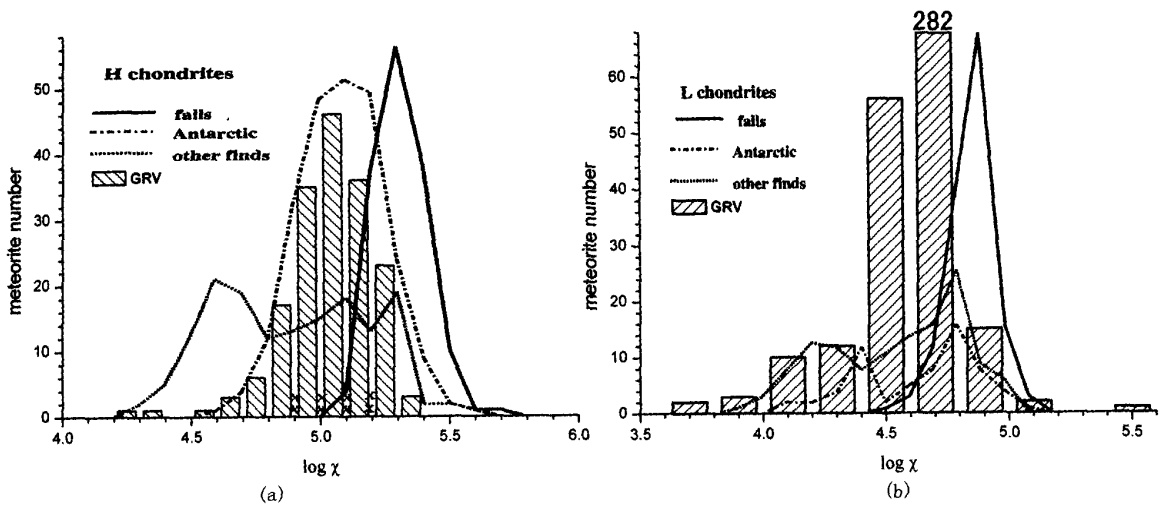


图6 格罗夫山普通球粒陨石的磁化率分布

(a) H群陨石的磁化率分布,其中格罗夫山陨石的磁化率分布与南极其他地区的陨石几乎完全一致,且相对降落型陨石大致向低磁化率方向平移0.2。其他发现型陨石(即沙漠陨石)的磁化率分布表现出更低和更离散的特征。(b) L群陨石的磁化率分布,其中格罗夫山陨石具有明显的峰值,且较降落型陨石向低磁化率方向平移0.2。作为对比,南极其他地区的陨石和沙漠陨石具有双峰和相当宽的范围。其他陨石数据引自(Rochette *et al.*, 2003)

Fig. 6 Magnetic susceptibility distribution patterns of GRV ordinary chondrites

(a) H-group, noting nearly identical patterns of GRV and other Antarctic meteorites, both with lower values by 0.2 than that of meteorite falls. Other found meteorites (e. g. desert meteorites) have even lower and scatter values. (b) L-group, noting peak distribution of GRV meteorites with lower values by 0.2 relative to the falls. In contrast, other Antarctic and desert meteorites show bimodal and scatter distributions. Literature data from (Rochette *et al.*, 2003)

群陨石中磁化率的变化可能更多地反映了陨石中金属与硅酸盐分布的不均一性。

3型普通球粒陨石的矿物化学组成极不均一,且金属含量的统计有相当大的误差,陨石磁化率可能对该类陨石化学群的划分提供了更客观和准确的分类参数。

格罗夫山H群陨石的磁化率分布与南极其他地区陨石几乎完全相同,二者相对降落型陨石向低磁化率方向平移0.2,反映了风化作用对南极陨石磁化率的平均影响程度。格罗夫山L群陨石的磁化率分布与降落型陨石相比,同样向低磁化率方向平移0.2左右,与H群陨石相似。相反,南极其他地区L群陨石的磁化率分布与沙漠陨石相似,不仅降低的程度更大,也更为分散。

致谢 全部南极格罗夫山陨石由国家海洋局中国极地研究中心提供。磁化率的测量得到潘永信研究员的帮助,王道德、王世杰研究员对本文提出了许多有益的修改意见。

References

Acuña MH, Anderson BJ, Russell CT, Wasilewski P, Kletetschka G, Zanetti L and Omid N. 2002. NEAR magnetic field observations at Eros: First measurements from the surface of an asteroid. *Icarus*, 155: 220–228

Acuña MH, Connerney JEP, Ness NF, Lin RP, Mitchell D, Carlson CW, McFadden J, Anderson KA, Rème H and Mazelle C. 1999. Global distribution of crustal magnetization discovered by the Mars Global Surveyor MAG/ER experiment. *Science*, 284: 790–793

Coe JMD, Roux-Buisson H and Brussetti R. 1976. The electronic phase transitions in FeS and NiS. In metal-non metal transition in transition metal compounds. London: Taylor and Francis

Dodd RT. 1981. *Meteorites: A petrologic-chemical synthesis*. Cambridge, England and New York: Cambridge University Press, 368

Folco L, Rochette P, Gattacceca J and Perchiazzi N. 2006. In situ identification, pairing, and classification of meteorites from Antarctica through magnetic susceptibility measurements. *Meteoritics and Planetary Science*, 41: 343–353

Hood LL, Zakharian A, Halekas J, Mitchell DL, Lin RP, Acuña MH and Binder AB. 2001. Initial mapping and interpretation of lunar crustal magnetic anomalies using Lunar Prospector magnetometer data. *Journal of Geophysical Research*, 106: 27825–27840

Hu S, Liu T, Feng L, Xu L and Lin Y. 2008. Classification of 100 Grove Mountains meteorites. *Chinese J. of Polar Research*, 20: 208–218 (in Chinese)

Hviid S, Madsen M, Gunnlaugsson H, Goetz W, Knudsen J, Hargraves R, Smith P, Britt D, Dinesen A and Mogensen C. 1997. Magnetic properties experiments on the Mars Pathfinder lander: Preliminary results. *Science*, 278: 1768–1770

Ju YT and Liu XH. 2000. Meteorites collection in the Grove Mountains. *Chinese J. of Polar Research*, 12: 137–141 (in Chinese)

Kivelson MG, Bargatze LF, Khurana KK, Southwood DJ, Walker RJ and Coleman PJ. 1993. Magnetic Field Signatures Near Galileo's Closest Approach to Gaspra. *Science*, 261: 331–334

Knoska S and Krivsky L. 1981. Types of sunspots, magnetic classification and flare yield in cycle no. 20. *Bulletin of the*

- Astronomical Institutes of Czechoslovakia, 32:292 – 303
- Lin Y, Luo H, Hu S, Feng L, Liu T and Miao B. 2008. Magnetic susceptibility of Grove Mountains meteorites (abstract). *Meteoritics and Planetary Science*, 43
- Lin Y, Ju Y, Xu X, Pan M, Huang F, Fang A, Li J, Liu X, Pen W, Hu J and Cheng X. 2006. Recovery of 5354 Meteorites in Grove Mountains, Antarctica, by the 22nd Chinese Antarctic Research Expedition. *Meteoritics and Planetary Science*, 41:A107
- Liu XH and Ju YT. 2002. Grove Mountains: A new found meteorites concentration area. *Chinese J. of Polar Research*, 14: 243 – 246 (in Chinese)
- Miao B, Lin Y, Wang D and Ouyang Z. 2005. Overview on Antarctic meteorite collection and study in China. *Proceedings of the China association for science and technology*, 2:291 – 298
- Nagata T. 1979. Magnetic classification of Stony Meteorites (iv). *National Institute Polar Research Memoirs*, 15:273 – 279
- Richter I, Brinza DE, Cassel M, Glassmeier KH, Kuhnke F, Musmann G, Othmer C, Schwingenschuh K and Tsurutani BT. 2001. First direct magnetic field measurements of an asteroidal magnetic field: DSI at Braille. *Geophysical Research Letters*, 28:1911 – 1917
- Rochette P, Sagnotti L, Chevrier V, Consolmagno G, Denise M, Folco L, Osete M and Pesonen L. 2002. Magnetic Classification of Meteorites and Asteroid Probing. In: EGS XXVII General Assembly, Nice, 21 – 26 April 2002, abstract,1022
- Rochette P, Sagnotti L, Bourot-Denise M, Consolmagno G, Folco L, Gattacceca J, Osete ML and Pesonen L. 2003. Magnetic classification of stony meteorites: 1 Ordinary chondrites. *Meteoritics and Planetary Science*, 38:251 – 268
- Smith DL, Ernst RE, Samson C and Herd R. 2006. Stony meteorite characterization by non-destructive measurement of magnetic properties. *Meteoritics and Planetary Science*, 41:355 – 373
- Terho M, Pesonen LJ and Kukkonen IT. 1996. Magnetic properties of asteroids from meteorite data: Implications for magnetic anomaly detections. *Earth Moon Planets*, 72:225 – 231

附中文参考文献

- 胡森, 刘焱, 冯璐, 徐琳, 缪秉魁, 林杨挺. 2008. 100 块南极格罗夫山陨石的分类. *极地研究*, 20: 208 – 218
- 琚宜太, 刘小汉. 2000. 格罗夫山地区陨石回收. *极地研究*, 12: 137 – 141
- 刘小汉, 琚宜太. 2002. 格罗夫山: 我国新发现的一个陨石富集区. *极地研究*, 14:243 – 246

附录: 南极格罗夫山陨石的磁化率 ($\log \chi \cdot 10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$)

Appendix: Magnetic susceptibility of Grove Mountains meteorites

Name	Mass (g)	Class	$\log \chi$	Name	Mass (g)	Class	$\log \chi$
GRV 020001	3.37	L4	4.11	GRV 053341	137.48	L6	4.63
GRV 020002	4.89	LL5	4.06	GRV 053656	6.87	H5	5.28
GRV 020003	4.76	LL5	4.55	GRV 020057	14.1	L5	4.56
GRV 020004	2.24	H4	5.24	GRV 020058	2.53	L/LL5	4.38
GRV 020006	1.67	L3	4.33	GRV 020059	209	L5	4.58
GRV 020007	25.94	H4	5.20	GRV 020060	21.2	L5	4.64
GRV 020008	6.17	H4	5.14	GRV 020061	6.55	LL/L6	4.79
GRV 020009	2.11	H5	5.26	GRV 020062	2.26	L/LL6	4.65
GRV 020011	0.55	L3	4.21	GRV 020063	2.86	LL/L6	4.75
GRV 020012	1.33	LL5	4.24	GRV 020064	1.99	L5	4.78
GRV 020014	2.72	LL6	4.18	GRV 020065	2.33	H5	5.15
GRV 020016	1.53	H3	4.29	GRV 020066	1.76	H4	4.85
GRV 020018	2.5	H/L5	5.05	GRV 020068	623.8	L5	4.60
GRV 020019	10.1	LL5	3.68	GRV 020069	171.5	L5	4.66
GRV 020020	2.56	L/LL6	4.69	GRV 020070	7.91	H4	5.20
GRV 020021	11.3	LL4	4.20	GRV 020071	4.51	H5	4.88
GRV 020022	3.4	H4	5.15	GRV 020072	13	H6	4.90
GRV 020023	2.69	H5	5.16	GRV 020073	9	L6	4.63
GRV 020024	8.09	H5	5.13	GRV 020074	1.48	H4	5.23
GRV 020026	12	H/L6	5.17	GRV 020076	37.3	H5	5.16
GRV 020027	428.8	L6	4.73	GRV 020077	1.31	H5	5.13
GRV 020028	10.1	LL4	4.54	GRV 020080	5.77	H5	5.04
GRV 020030	0.5	H4	5.16	GRV 020081	5.03	L6	4.69
GRV 020031	1.93	H6	5.22	GRV 020083	1.12	H4	5.13
GRV 020032	1.91	LL3	4.20	GRV 020084	7.73	L5	4.85
GRV 020033	1.51	LL4	4.01	GRV 020085	2.08	L5	4.94
GRV 020034	24.6	LL3	4.16	GRV 020087	2.07	H5	5.23
GRV 020035	6.32	L3	4.31	GRV 020088	3.02	H4	5.31
GRV 020036	1.1	LL3	4.17	GRV 020089	4.56	H5	5.29
GRV 020037	1.64	LL4	3.91	GRV 020091	5.32	H4	5.23
GRV 020038	25.6	L4	4.45	GRV 020092	1.26	H5	4.78
GRV 020040	31.7	L5	4.84	GRV 020093	1.06	H6	5.01
GRV 020041	1.41	LL4	4.21	GRV 020095	6.05	L6	4.27
GRV 020042	2.16	H4	5.02	GRV 020096	1.79	L5	4.41
GRV 020043	56.9	H4 - an	4.93	GRV 020097	131.2	H5	5.10
GRV 020044	5.52	H3	5.07	GRV 020098	122.7	H6	5.10
GRV 020045	1.96	H3	5.20	GRV 020100	7.25	H4	5.18
GRV 020046	3	L6	4.77	GRV 020101	2.59	H5	4.81
GRV 020049	1.22	L4	4.72	GRV 020102	4.23	H5	4.99
GRV 020050	3.13	H5	5.06	GRV 020104	26.1	LL3	4.15
GRV 020051	1.36	H4	4.88	GRV 020105	24.4	LL3	4.19
GRV 020052	12.1	H5	5.16	GRV 020106	13.9	L3	4.13
GRV 020053	10.5	L/LL6	4.87	GRV 020107	3.68	L5	4.41
GRV 020054	2.16	H3	5.17	GRV 020108	5.79	H4	4.94
GRV 020055	3.01	H5	4.88	GRV 020109	2.02	H4	4.75
GRV 020056	5.46	L6	4.66	GRV 020110	3.06	H4	4.99
GRV 020113	1.28	H4	5.00	GRV 020111	2.18	L3	4.12
GRV 020114	1	L3	4.22	GRV 020112	1.6	H3	4.72
GRV 020115	8.34	L6	4.39	GRV 020165	6.96	L3	4.19
GRV 020117	3.51	L5	4.22	GRV 020166	8.02	H3	4.24
GRV 020118	8.12	H4	5.13	GRV 020167	7.48	L6	4.67
GRV 020119	36.4	H4	5.03	GRV 020169	4.78	L3	4.19
GRV 020120	1.73	H5	4.86	GRV 020172	1.05	L/LL6	4.65
GRV 020121	14.5	H5	4.96	GRV 020173	2.62	L4	5.01
GRV 020122	13.8	H6	5.12	GRV 020174	56.05	L6	4.46
GRV 020123	3.39	H5	4.98	GRV 020178	1.6	H6	5.22
GRV 020125	2.1	L5	4.38	GRV 020179	1.29	L5	4.51
GRV 020126	4.79	H5	5.06	GRV 020181	23.1	H5	5.09

续附录

Continued Appendix

Name	Mass (g)	Class	log χ	Name	Mass (g)	Class	log χ
GRV 020127	6.77	L5	4.56	GRV 020182	1.04	L6	4.60
GRV 020128	11.7	H5	5.09	GRV 020184	3.17	L5	4.69
GRV 020130	139.7	H4	4.98	GRV 020185	1.6	H6	4.81
GRV 020131	3.81	L6	4.75	GRV 020186	37.8	H5	5.03
GRV 020132	1.9	L6	4.55	GRV 020187	1.54	L6	4.44
GRV 020134	16.4	L6	4.63	GRV 020188	558.6	L6	4.67
GRV 020135	12.3	L5	4.75	GRV 020199	38.3	H5	5.00
GRV 020136	3.31	L4	5.02	GRV 021474	30.9	L6	4.77
GRV 020137	8.75	L3	4.15	GRV 021475	183.7	L6	4.70
GRV 020138	2.27	L6	4.62	GRV 021477	58.5	L/LL6	4.75
GRV 020139	3.25	H6	4.98	GRV 021478	104.5	L6	4.35
GRV 020140	7.08	H6	4.99	GRV 021480	12.9	H5	4.98
GRV 020142	1.13	L6	4.52	GRV 021482	199.9	L6	4.73
GRV 020143	2.28	L6	4.60	GRV 021485	60.5	H5	5.12
GRV 020144	1.96	H6	4.97	GRV 021486	82.1	H5	5.04
GRV 020145	1.69	L/LL6	4.58	GRV 021489	56.2	L6	4.71
GRV 020146	2.28	H6	5.00	GRV 021491	1716.5	L6	4.52
GRV 020147	2.9	H5	4.95	GRV 021492	241.2	H4	5.23
GRV 020148	6.88	L/LL5	4.68	GRV 021495	43.7	L5	4.71
GRV 020149	8.89	L6	4.68	GRV 021499	57.1	L5	4.79
GRV 020150	2.02	H/L6	5.08	GRV 021500	12.83	L5	4.72
GRV 020151	1.45	L6	4.49	GRV 021501	17.37	L5	4.72
GRV 020152	2.53	L/LL6	4.64	GRV 021502	17.41	L6	4.74
GRV 020153	1.6	H5	5.02	GRV 021503	23.56	L6	4.69
GRV 020154	1.51	L5	4.52	GRV 021504	17.81	L6	4.62
GRV 020156	2.65	L5	4.89	GRV 021506	39.13	L6	4.75
GRV 020157	4.8	L5	4.87	GRV 021508	278.2	H4	4.60
GRV 020159	1.54	L5	4.67	GRV 021510	462.7	H4	5.10
GRV 020160	3.72	H5	5.12	GRV 021511	11.5	H6	4.85
GRV 020161	7.6	L6	4.41	GRV 021514	30.82	H6	5.02
GRV 020162	2.31	H3	4.15	GRV 021515	61.32	L6	4.72
GRV 020163	3.42	L6	4.60	GRV 021516	88.91	H5	5.04
GRV 020164	5.2	L3	4.24	GRV 021517	96.36	H5	5.03
GRV 021548	31.81	L5	4.73	GRV 021518	54.14	H5	4.99
GRV 021549	16.26	H4	4.98	GRV 021522	1.18	H6	5.07
GRV 021550	18.63	H4	5.06	GRV 021679	27.55	L5	4.62
GRV 021564	13.69	H5	5.08	GRV 021680	21.01	L6	4.67
GRV 021566	13.48	H4	4.32	GRV 021700	17.31	H/L6	5.40
GRV 021569	19.67	H4	4.92	GRV 021706	16.99	L/LL4	4.73

续附录

Continued Appendix

Name	Mass (g)	Class	log χ	Name	Mass (g)	Class	log χ
GRV 021570	24.36	H5	5.07	GRV 021712	285.3	L5	4.72
GRV 021571	112.54	H5	5.14	GRV 021713	147.89	L6	4.72
GRV 021572	56.95	L4	4.67	GRV 021714	136.81	L6	4.74
GRV 021573	47.17	L6	4.52	GRV 021715	1.47	H5	4.99
GRV 021574	19.19	L6	4.76	GRV 021722	33.21	L6	4.70
GRV 021578	14.42	L6	4.73	GRV 021723	25.55	L6	4.75
GRV 021582	44.22	L5	4.76	GRV 021724	22.02	L5	4.66
GRV 021586	11.59	L5	4.68	GRV 021725	24.99	L5	4.58
GRV 021587	31.33	L5	4.73	GRV 021726	11.24	L4	4.65
GRV 021589	67.42	H5	5.27	GRV 021785	71.74	L5	4.69
GRV 021590	16.49	H5	5.06	GRV 021786	72.49	L6	4.69
GRV 021593	28.09	H4	5.24	GRV 021787	70.11	L6	4.70
GRV 021595	22.53	L6	4.84	GRV 021789	35.11	H5	4.93
GRV 021597	26.77	L6	4.84	GRV 021790	12.62	L6	4.66
GRV 021598	79.76	H6	4.91	GRV 021791	102.02	L5	4.70
GRV 021600	24.51	H4	5.25	GRV 021792	88.64	L6	4.75
GRV 021602	13.59	H5	4.79	GRV 021793	49.78	L6	4.71
GRV 021604	371.1	H5	4.98	GRV 021794	44.5	L5	4.62
GRV 021610	49.85	L5	4.80	GRV 021795	41.78	H5	5.03
GRV 021611	26.72	H5	5.04	GRV 021796	55.32	L6	4.57
GRV 021614	47.32	L5	4.70	GRV 021797	99.66	L6	4.70
GRV 021643	12.81	L4	4.86	GRV 021799	49.78	L6	4.57
GRV 021649	13.9	L6	4.71	GRV 021800	14.06	L4	4.68
GRV 021651	35.15	L5	4.44	GRV 021801	28.08	L5	4.63
GRV 021652	57.89	L5	4.71	GRV 021802	175	L5	4.74
GRV 021654	16.56	L4	4.66	GRV 021803	115.9	L5	4.66
GRV 021668	88.53	L4	4.58	GRV 021804	46.13	L5	4.61
GRV 021669	406.1	L5	4.67	GRV 021805	179.05	L6	4.63
GRV 021670	282.4	L5	4.69	GRV 021806	58.6	L5	4.69
GRV 021671	37.8	L6	4.64	GRV 021944	11.44	L6	4.66
GRV 021672	265.2	L6	4.72	GRV 022022	228.6	L5	4.66
GRV 021673	187.38	L5	4.71	GRV 022023	102.91	L5	4.72
GRV 021674	83.65	L5	4.59	GRV 022024	405.9	L5	4.63
GRV 021675	56.25	L6	4.67	GRV 022025	101.39	L6	4.70
GRV 021676	51.6	L/LL6	4.73	GRV 022026	73.32	L5	4.72
GRV 021677	37.9	L6	4.63	GRV 022027	169.65	L5	4.71
GRV 021678	32.65	L6	4.66	GRV 022028	244.9	L5	4.67
GRV 022033	398.7	L5	4.69	GRV 022029	245.5	L6	4.68
GRV 022034	345	L5	4.71	GRV 022030	119.14	L/LL6	4.68

续附录

Continued Appendix

Name	Mass (g)	Class	log χ	Name	Mass (g)	Class	log χ
GRV 022035	107.26	L6	4.74	GRV 022031	39.86	L6	4.72
GRV 022036	96.54	L5	4.66	GRV 022032	204.8	L6	4.67
GRV 022037	935.9	L6	4.62	GRV 022147	21.15	L6	4.77
GRV 022038	1012	L5	4.64	GRV 022148	17.15	L6	4.71
GRV 022039	160.67	L5	4.73	GRV 022149	17.21	L6	4.71
GRV 022040	589.5	L5	4.68	GRV 022150	14.34	L5	4.92
GRV 022041	96.74	L5	4.74	GRV 022151	12.54	L5	4.72
GRV 022042	218.1	L5	4.68	GRV 022153	19.66	L6	4.75
GRV 022043	208.7	L6	4.73	GRV 022154	19.87	L6	4.67
GRV 022044	152.14	L6	4.68	GRV 022155	21.02	L6	4.68
GRV 022045	47.76	L6	4.60	GRV 022156	18.51	L6	4.69
GRV 022112	365.6	L6	4.68	GRV 022157	15.36	L6	4.65
GRV 022113	33.49	L6	4.75	GRV 022158	14.2	L6	4.72
GRV 022114	171.43	L6	4.70	GRV 022159	13.03	L5	4.63
GRV 022115	79.63	L6	4.71	GRV 022160	610.1	L5	4.64
GRV 022116	69.62	L5	4.71	GRV 022161	26.54	L5	4.55
GRV 022117	32.28	L5	4.70	GRV 022162	140.96	L6	4.70
GRV 022118	46.03	L/LL6	4.67	GRV 022163	94.29	L5	4.65
GRV 022119	27.2	L6	4.67	GRV 022164	14.91	L6	4.69
GRV 022120	363	L6	4.69	GRV 022168	139.67	L5	4.73
GRV 022121	107.56	L6	4.76	GRV 022169	93.07	L5	4.69
GRV 022122	45.92	L6	4.67	GRV 022170	79.97	L5	4.71
GRV 022123	103.12	L5	4.64	GRV 022172	56.95	L6	4.74
GRV 022124	22.75	L6	4.71	GRV 022173	68.33	L6	4.71
GRV 022125	47.14	L5	4.69	GRV 022174	56.05	L6	4.75
GRV 022126	47.98	L5	4.70	GRV 022175	44.46	L6	4.61
GRV 022127	39.15	L5	4.62	GRV 022176	36.6	L6	4.71
GRV 022128	31.14	L5	4.68	GRV 022177	34.47	L5	4.71
GRV 022129	30.24	L6	4.70	GRV 022178	23.94	L6	4.74
GRV 022130	30.54	L6	4.70	GRV 022185	13.26	L5	4.62
GRV 022131	24.75	L6	4.54	GRV 022186	11.99	L5	4.70
GRV 022132	23.92	L6	4.73	GRV 022190	42.08	L5	4.72
GRV 022133	21.37	L6	4.64	GRV 022191	18.76	L5	4.64
GRV 022134	19.99	L6	4.64	GRV 022192	19.03	L5	4.66
GRV 022135	17.33	L6	4.74	GRV 022193	14.8	L5	4.79
GRV 022136	12.34	L6	4.60	GRV 022194	15.57	L6	4.56
GRV 022138	69.47	L6	4.75	GRV 022199	30.08	L5	4.63
GRV 022139	40.9	L6	4.66	GRV 022200	27.79	L6	4.56
GRV 022140	36.35	L6	4.67	GRV 022201	17.37	L6	4.64

续附录

Continued Appendix

Name	Mass (g)	Class	log χ	Name	Mass (g)	Class	log χ
GRV 022141	26.6	L5	4.59	GRV 022202	13.9	L6	4.68
GRV 022142	23.31	L5	4.67	GRV 022203	16.21	L6	4.68
GRV 022143	14.71	L5	4.64	GRV 022204	13.98	L6	4.71
GRV 022145	31.8	L6	4.68	GRV 022206	22.5	L5	4.74
GRV 022146	20.67	L5	4.73	GRV 022207	15.83	L5	4.71
GRV 022220	12.01	L6	4.70	GRV 022210	11.76	L5	4.67
GRV 022221	29.09	L4	4.67	GRV 022211	11.09	L5	4.67
GRV 022222	125.96	L5	4.74	GRV 022212	12.07	L5	4.57
GRV 022223	71.24	L6	4.73	GRV 022219	100.95	L5	4.74
GRV 022224	15.45	L6	4.66	GRV 050043	128.89	L6	4.53
GRV 022227	14.1	L6	4.71	GRV 050071	24.27	H5	4.85
GRV 022228	46.45	L6	4.73	GRV 050074	3.24	H5	4.96
GRV 022229	18.68	L6	4.64	GRV 050081	3.49	H5	5.15
GRV 022230	14.76	L6	4.65	GRV 050087	8.88	H5	5.07
GRV 022237	14.11	L6	4.40	GRV 050089	910	H4	5.00
GRV 022282	43.3	L6	4.69	GRV 050092	1.07	H6	4.96
GRV 022284	11.92	L5	4.69	GRV 050099	8.76	H5	5.17
GRV 022285	37.06	L5	4.89	GRV 050104	2.87	L6	4.61
GRV 022287	11.07	L5	4.65	GRV 050111	5.99	L5	4.69
GRV 022288	33.02	L6	4.72	GRV 050115	4.59	H3	3.81
GRV 022289	38.14	L6	4.60	GRV 050122	7.79	H4	4.94
GRV 022291	12.24	L5	4.71	GRV 050123	2.79	L6	4.60
GRV 022443	720.9	L5	4.70	GRV 050128	3695	L6	4.62
GRV 022444	679.2	L5	4.73	GRV 050129	18.88	H6	4.79
GRV 022445	115.76	L6	4.73	GRV 050132	0.36	L4	4.18
GRV 022446	97.22	L5	4.69	GRV 050165	3.08	H3	4.13
GRV 022447	81.16	L6	4.68	GRV 050173	2.21	L5	4.66
GRV 022448	62.35	L5	4.68	GRV 050177	3.48	L4	4.97
GRV 022449	31.93	L6	4.71	GRV 050181	111.5	H5	5.22
GRV 022450	27.11	L5	4.63	GRV 050182	26.93	L5	4.76
GRV 022451	18.53	H6	4.90	GRV 050189	22.02	H3	4.23
GRV 022452	21.25	L6	4.71	GRV 050193	298	H4	5.10
GRV 022453	16.27	L6	4.63	GRV 050199	80.4	L5	4.76
GRV 022454	16.77	L5	4.62	GRV 050200	84.01	H3	4.24
GRV 022455	14.75	L3	4.56	GRV 050207	3.3	L6	4.81
GRV 022460	14.7	L5	4.69	GRV 050210	12.61	H4	4.93
GRV 022462	2.62	LL6	4.15	GRV 050245	3.2	H6	5.08
GRV 050004	9.15	LL4	4.13	GRV 050250	2.93	L6	4.50
GRV 050010	4.58	H5	5.28	GRV 050387	31.69	H4	5.06

续附录

Continued Appendix

Name	Mass (g)	Class	log χ	Name	Mass (g)	Class	log χ
GRV 050014	6.31	LL6	4.10	GRV 050390	7.05	H4	5.01
GRV 050020	2.16	L3	4.14	GRV 050395	6.06	L6	4.51
GRV 050021	2.88	H5	5.20	GRV 050398	11.05	L6	4.54
GRV 050025	1.77	H3	5.10	GRV 050401	21.32	H4	5.11
GRV 050026	68.63	H5	4.66	GRV 050404	10.55	H3	4.38
GRV 050028	8.91	H4	4.95	GRV 050412	2.47	H5	4.87
GRV 050033	628	L6	4.69	GRV 050418	0.81	L5	4.35
GRV 050034	38.13	L6	4.83	GRV 051218	1.82	H5	4.86
GRV 050036	11.37	L5	4.68	GRV 051525	163.69	H5	5.05
GRV 050039	1.82	H6	4.98	GRV 051529	24.36	L5	4.68
GRV 050041	3.49	H5	5.14	GRV 051533	12.26	H5	4.85
GRV 050042	180.49	L5	4.66	GRV 051535	29.64	L5	4.76
GRV 051536	44.31	H4	4.97	GRV 051924	73.47	L4	4.70
GRV 051569	13.98	H4	5.25	GRV 052011	22.72	L5	4.57
GRV 051592	10.32	H4	4.80	GRV 052013	15.43	L6	4.65
GRV 051599	7.21	H5	5.00	GRV 052023	40.46	L6	4.68
GRV 051605	4.22	H5	4.95	GRV 052026	21.47	L6	4.55
GRV 051610	7.56	L6	4.28	GRV 052034	204.4	L6	4.72
GRV 051612	462.6	H5	5.09	GRV 052049	96.72	L6	4.66
GRV 051616	6.06	H5	5.11	GRV 052051	2.24	L5	3.73
GRV 051618	161.77	L6	4.75	GRV 052055	1.69	H5	5.08
GRV 051629	103.37	L6	4.70	GRV 052074	135.4	L6	4.68
GRV 051633	35.23	L5	4.68	GRV 052076	20.79	L4	4.44
GRV 051638	146.39	L5	4.73	GRV 052082	20.35	L6	4.70
GRV 051648	56.18	L6	4.67	GRV 052085	1.38	H5	4.76
GRV 051651	22.92	L6	4.65	GRV 052104	116.38	L6	4.75
GRV 051652	13.33	L5	4.48	GRV 052116	336	L6	4.62
GRV 051656	2.46	L5	4.51	GRV 052119	94.91	L6	4.78
GRV 051659	2.07	L5	4.56	GRV 052126	17.07	L6	4.74
GRV 051669	1.98	L6	4.43	GRV 052132	16.86	L6	4.59
GRV 051674	50.22	L5	4.61	GRV 052136	2.21	H5	4.89
GRV 051680	22.17	L6	4.61	GRV 052156	4.27	L6	4.43
GRV 051685	18.57	L6	4.76	GRV 052173	7.76	H6	4.94
GRV 051733	2.18	L5	4.53	GRV 052174	5.25	L6	4.47
GRV 051738	2.22	H4	4.69	GRV 052175	4.37	L6	4.49
GRV 051739	345	L5	4.70	GRV 052244	414	L6	4.79
GRV 051741	94.1	L6	4.66	GRV 052246	57.39	L5	4.64
GRV 051744	6.22	L6	4.74	GRV 052248	28.46	L5	4.65
GRV 051754	14.14	L6	4.68	GRV 052253	2.36	H4	5.10

续附录

Continued Appendix

Name	Mass (g)	Class	log χ	Name	Mass (g)	Class	log χ
GRV 051760	221	L6	4.68	GRV 052256	1.55	H4	5.07
GRV 051764	20.92	L5	4.68	GRV 052302	49.93	H5	5.19
GRV 051770	493	L6	4.74	GRV 052321	5.25	L5	4.64
GRV 051773	41.21	L5	4.98	GRV 052342	1.15	H5	5.25
GRV 051779	12.22	H5	4.76	GRV 052345	2.96	H5	4.82
GRV 051783	15.89	L6	4.53	GRV 052357	2.79	L6	4.59
GRV 051785	137.11	L6	4.72	GRV 052358	6.66	L6	4.42
GRV 051795	33.75	L5	4.69	GRV 052359	2.85	L5	4.56
GRV 051796	13.22	L5	4.68	GRV 052373	77.07	L6	4.73
GRV 051848	19.61	L6	4.64	GRV 052392	3.48	H6	4.92
GRV 051862	1823	L6	4.61	GRV 052417	14.55	L6	4.61
GRV 051867	144.35	L6	4.67	GRV 052453	1.94	L5	4.75
GRV 051869	118.69	L5	4.69	GRV 052463	0.66	L6	4.34
GRV 051875	28.1	L6	4.70	GRV 052488	23.19	L6	4.65
GRV 051889	19.08	L6	4.66	GRV 052506	1.92	H4	5.13
GRV 051894	13.38	L4	4.65	GRV 052660	221	L6	4.74
GRV 051898	7.14	L6	4.71	GRV 052685	12.02	L5	4.74
GRV 051902	10.58	L6	4.67	GRV 053666	1.51	H4	5.02
GRV 052702	2.59	H4	5.03	GRV 053687	18.63	H4	5.31
GRV 052719	3.5	L5	4.60	GRV 053696	11.78	H5	5.06
GRV 052739	3.94	L5	4.71	GRV 053735	2.51	L5	4.20
GRV 052767	62.4	L6	4.73	GRV 053744	5.84	L5	4.27
GRV 052796	0.77	H4	4.27	GRV 053784	1.1	H5	5.17
GRV 052797	1.64	L5	3.91	GRV 053788	1.88	H5	4.99
GRV 052799	5.58	H6	5.02	GRV 053789	2.13	H5	4.69
GRV 052882	4.36	L6	4.59	GRV 053985	1.27	H5	5.12
GRV 052885	7.79	L6	4.68	GRV 054045	1.49	H5	5.04
GRV 052904	474	L6	4.74	GRV 054060	0.83	H5	4.81
GRV 052910	53.51	L5	4.70	GRV 054061	0.84	H5	5.00
GRV 052985	35.53	L5	4.71	GRV 054463	13.34	H5	5.01
GRV 053016	1.68	H6	5.15	GRV 054471	222	H6	5.20
GRV 053025	4.83	H5	4.85	GRV 054473	60.88	H4	5.21
GRV 053030	4.76	H5	5.09	GRV 054476	50.74	H4	5.15
GRV 053039	3.01	H4	5.22	GRV 054481	6.32	H4	5.11
GRV 053132	2.5	H5	5.14	GRV 054493	3.42	H4	5.18
GRV 053149	2.29	H6	5.02	GRV 054505	873	L4	4.77
GRV 053167	3.12	H3	4.67	GRV 054653	3.45	L5	3.95
GRV 053168	3.38	H5	5.03	GRV 054855	0.72	H4	5.22
GRV 053209	2.92	H4	5.04	GRV 055056	0.4	L5	5.44