

我国南极陨石收集进展(2000—2010)

缪秉魁¹, 林杨挺², 王道德³, 欧阳自远⁴

1. 桂林理工大学 广西隐伏金属矿产勘查重点实验室, 广西 桂林 541004;
2. 桂林理工大学 地球科学学院, 广西 桂林 541004;
3. 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;
4. 中国科学院 广州地球化学研究所, 同位素年代学和地球化学重点实验室, 广州 510640;
5. 中国科学院 地球化学研究所, 贵阳 550002

摘要: 自上世纪中叶以来, 南极陨石收集就成为国际上南极考察项目中的一个重要亮点。在世纪之交之际, 我国南极考察队开始了南极陨石收集, 在短短的十年时间, 在南极陨石收集方面取得了丰硕成果。我国不但收集了一万多块陨石样品, 成为拥有南极陨石最多的国家之一, 而且新发现了一个陨石富集区——格罗夫山。

关键词: 南极陨石; 陨石收集; 天体化学; 格罗夫山

中图分类号: P185.13 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2802(2012)06-0565-10

Progress of Antarctic Meteorite Collection in China(2000—2010)

MIAO Bing-kui¹, LIN Yang-ting², WANG Dao-de³, OUYANG Zi-yuan⁴

1. Guangxi Key Laboratory of Hidden Metallic Ore Deposits Exploration, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi 541004 China;
2. College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi 541004, China;
3. Key Laboratory of the Earth's Deep Interior, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;
4. Key Laboratory of Isotope Geochronology and Geochemistry, Guangzhou 510640, China;
5. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China

Abstract: Antarctic meteorite survey has been one of the most important Antarctic expedition projects of many countries since the middle of the last century. China Antarctic Research Expedition (CHINARE) began to search meteorites in Antarctica at the end of the last century, and has obtained great achievements in the new century. During the first decade of this century, CHINARE has collected more than ten thousands Antarctic meteorites, China became one of the richest countries with Antarctic meteorites, and had found a new meteorite concentrated area in East Antarctica—Grove Mountains.

Key words: Antarctica meteorite; meteorite collection; cosmochemistry; Grove Mountains

陨石是来自地球之外的岩石样品, 是研究太阳系起源与演化的重要窗口。陨石分为两大类: 球粒陨石和非球粒陨石。球粒陨石是早期太阳系星云凝聚形成的由球粒、金属和基质等组成的集合体, 它还可能包括各种类型恒星的尘埃, 因此, 球粒陨石记录了太阳系起源的重要信息。而非球粒陨石, 即铁陨石、石铁陨石和其它无球粒陨石, 则是由行星和小行星熔融产生, 它代表了行星的核-幔-壳分异产物^[1]。勿容置疑, 陨石是珍贵的科学研究资源, 是研究和探索太阳系形成和演化的重要对象。除了 Apollo 和 Luna 计划收集的月岩样品和太空采集的微颗粒外,

陨石是人类唯一可以在实验室直接分析研究的地外样品。在南极陨石样品被大量发现之前, 国际上的陨石收藏量非常少, 数量不超过 3000 块。1969 年之后, 由于南极冰盖陨石运移及富集机制的发现, 陨石收藏量急剧上升, 因此, 陨石学和天体化学研究得到快速发展。半个多世纪以来, 南极陨石收集已经成为南极考察工作的热点之一, 同时, 也是地球化学和天体化学研究的重要领域。在新世纪, 我国南极陨石收集工作取得了重大突破, 收集了一万多块陨石, 成为拥有南极陨石最多的国家之一, 同时还发现了新的陨石富集区——格罗夫山。

收稿日期: 2012-04-25 收到, 06-01 改回

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41173077)

第一作者简介: 缪秉魁(1966—), 男, 教授, 博士, 研究方向: 地球化学、天体化学. E-mail: miaobk@glite.edu.cn.

1 国际南极陨石考察概况

1969年日本南极考察队在南极 Yamato 地区发现 9 块不同类型陨石之后^[2],人们意识到南极存在陨石富集机制,因此,南极陨石收集成为南极科学考察的重要内容之一^[3]。40 多年以来日本组织了 20 多次南极陨石考察,在 Yamato、Asuka、Belgica、Thiel 等南极内陆蓝冰区,独自收集到陨石样品 17000 多块。1976~1978 年,美国与日本联合开展

南极陨石考察,1979 年以后独立组队,每年都沿南极横贯山脉(Trans-Antarctic Mountains)进行陨石搜寻。至今,日本和美国是世界上拥有最多南极陨石的 国家。据不完全统计,截至 2010 年,日本和美国各自独立收集了 17236 个和 17325 个陨石样品(表 1)。从 1984 年起,欧洲一些国家也组织陨石考察队在南极搜集陨石,共发现陨石样品 738 块。1989 年我国在东南极拉斯曼丘陵建立的第二个南极考察站-中山站,这是我国南极内陆考察的重要基

表 1 南极陨石收集数量表

Table 1 Collections of Antarctic Meteorites

	日本	美国	中国	其它		备注/总数
	NIPR	ANSMET	CHINARE	数量	考察队	
1969	9					
1973	12					
1974	663					
1975	310					
1976	9,2(ANSMET)				NIPR-ANSMET 联合考察	
1977	248					
1978	228					
1979	4098	73				
1980	14	100				
1981	133	315				
1982	211	108				
1983	42	281				
1984	59	272		37	EUROMET	
1985		360				
1986	817	558				
1987	352	670				
1988	2124	876				
1990	48	1098		231	EUROMET-PNRA	EUROMET-PNRA 联合考察
1991		600				
1992	3	254				
1993		840		54	EUROMET-PNRA	EUROMET-PNRA 联合考察
1994	16	596				
1995		235		48	EUROMET-PNRA	EUROMET-PNRA 联合考察
1996		388				
1997		1086		61	PNRA	
1998	4136	190	4			
1999		1031	28	39	PNRA	
2000	3554	756				
2001		335		170	PNRA	
2002		885	4448			
2003		1353		98	PNRA	
2004		1228				
2005		233	5354			
2006		833		5	KOREAMET	
2007		750		16	KOREAMET	
2008		9		16	KOREAMET	
2009		1010	1600			
2010	635			36	PNRA-KOREAMET	PNRA-KOREAMET 联合考察
合计	17236	17325	11434		811	47281
	日美共享 475 块					

注:①EUROMET—欧洲陨石考察项目;PNRA—意大利南极考察项目;KOREAMET—韩国陨石考察队;②数据来源:文献[5],国际陨石学会陨石数据库^[6],国家自然科技资源平台极地标本资源共享平台南极陨石标本库^[7]和文献[8~12];③表中数据为不完全统计,统计时间主要于 2010 之前

地,为开展南极陨石的野外考察提供了重要的支撑条件。格罗夫山(Grove Mountains)是内陆岛峰群,距中山站约 400km,发育有大面积的蓝冰区。1998 年之后,我国南极科考队先后 5 次对该地区进行了综合考察,发现了一万多块陨石样品。韩国 2006 年第一次组织南极陨石搜寻队,在横贯山脉发现 4 块陨石,2007 年和 2008 年在陨石考察中分别收集了 16 个陨石样品,2010 年与意大利考察队合作收集了数十块陨石,其中分类命名 36 块。

上述近 5 万块陨石样品的收集和 40 多年的南极陨石现场考察观察充分表明,南极是地球上最富集陨石的地区。南极陨石富集机制与冰盖的流动密切相关,即南极冰盖在向四周流动过程中遇到山脉或隐伏山系的阻挡,冰流受阻或者冰流速度大幅度减缓,在下降风的作用下,局部冰层快速消融,而其中的陨石露出冰面并富集。因此,南极陨石的富集区沿着东南极冰盖边缘分布,主要有横断山脉地区和东南极的东侧边缘(图 1)。目前在东南极四周已发现了 50 多个陨石富集区^[3]。

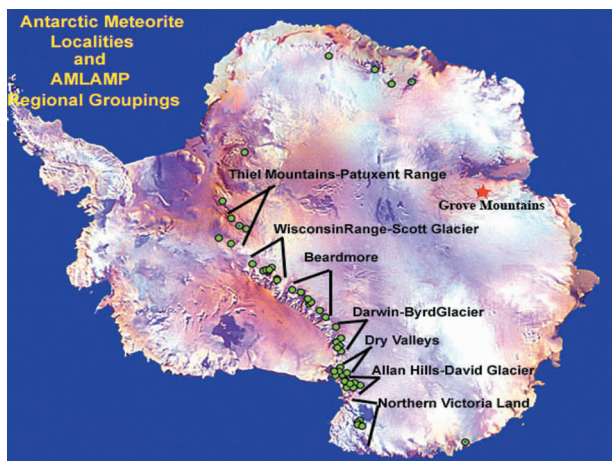


图 1 南极陨石富集区的分布图(据文献[4]修改)

Fig. 1 The distribution of Antarctic meteorite concentrated areas (modified from ref. [4])

2 我国格罗夫山陨石考察

2.1 格罗夫山考察概况

自 1998 年起,我国先后在格罗夫山地区开展了 5 次综合考察,每次均有陨石发现(表 2)。1998/1999 年第 15 次南极科考队对格罗夫山地区开展首次综合考察时偶然发现了 4 块陨石样品。1999/2000 年第 16 次南极科学考察在格罗夫山综合考察中,发现并收集到 28 块陨石,其中 1 块火星陨石和 1 块灶神星陨石。这些陨石的发现表明,格罗夫山地区可能是南极又一个陨石富集区^[9, 10]。因此,在专家的建议下,国家海洋局极地考察办公室专门组织了以收集陨石为主要任务的综合考察分队,2002/2003 年该考察分队赴格罗夫山进行考察,收集到陨石样品 4448 块^[11]。2005/2006 年,中国第 22 次南极科学考察队组织了第 4 次格罗夫山内陆综合考察,在 20 天左右的陨石搜寻中,共收集到陨石样品 5354 块^[8],总重 62 kg。2009/2010 年,我国再次在南极收集到 1600 多块陨石。

2.2 野外考察与陨石收集程序

2.2.1 野外工作与装备条件 五次格罗夫山考察,除首次外,其余四次的考察人员与装备情况基本相近,随后每次考察装备略有改善和加强^[8~11, 13]。1998/1999 年首次考察格罗夫山时只有 4 名队员,配备一辆雪地车,但是开展了地理、地质、气候、冰川等多方面综合考察任务,陨石的发现是偶然的,这四块陨石是阵风悬崖北段和中段蓝冰陡坡发现的,陨石类型完全不同。1999/2000 年第二次考察格罗夫山时,队伍和装备大为加强,队员 8 名,雪地车和雪地摩托各二辆,野外考察时特别开展了陨石搜寻工作,共获得 28 块陨石样品。这些陨石特点是质量比较小,主要发现于阵风悬崖南段下方蓝冰区。2002/2003 年第三次格罗夫山考察时,考察队组成 8 人,

表 2 格罗夫山考察与陨石收集

Table 2 Antarctic meteorite surveys in Grove Mountains with the collections

中国考察队	时间	陨石考察天数	主要搜寻的区域	收集陨石数量	特殊陨石
第 15 次	1998/1999	10	阵风悬崖中段、北段	4	铁陨石一块
第 16 次	1999/2000	12	阵风悬崖中段、北段、南段	28	火星陨石和灶神星陨石各一块
第 19 次	2002/2003	33	阵风悬崖中段、北段、南段	4448	部分分类,火星陨石、橄榄无球粒陨石、碳质球粒陨石、石铁陨石均有发现
第 22 次	2005/2006	20	阵风悬崖中段、北段、南段	5354	部分分类,橄榄无球粒陨石、碳质球粒陨石、石铁陨石均有发现
第 26 次	2009/2010	30	阵风悬崖中段、北段、萨哈罗夫岭	>1618	尚未分类
合计				>11452	

注:数据来源于文献[8~11]

包括陨石专业人员 2 人、地质 1 人、冰雪 1 人、测绘 2 人和机械师 2 人。因条件限制,这次考察队员分两批进入格罗夫山地区,这次考察装备有 3 辆雪地车、2 辆雪地摩托车、3 架雪橇、3 个工作生活仓、2 台发电机。2005/2006 年和 2009/2010 年第 4 次和第 5 次考察时,人员增加至 10 人和 12 人,其它装备条件基本相同,略有加强。

2.2.2 陨石收集程序 格罗夫山陨石考察时,先乘坐雪地车或雪地摩托车对未知蓝冰区进行踏勘,了解地形和蓝冰分布特点,再制定搜寻计划和安排,然后对大的蓝冰区进行步行拉网式搜寻,对小的蓝冰区采用分区包干搜寻,同时雪地摩托配合搜寻^[11, 13]。当队员们发现陨石或者怀疑是陨石样品时,则按陨石收集程序进行收集:①GPS 定位,记录经纬度(精度至秒);②野外临时顺序编号;③原位拍照,需加参照物作为比例尺;④收集样品,用高质量一次性聚乙烯塑料自封袋装样品,装样过程注意避免样品污染;⑤保存在样品箱或样品袋带回营地。

回营地后逐个对样品进行鉴定,确定是否为陨石和大概类型,并按国际惯例统一编号(地名+发现时间+顺序号),格罗夫山收集的陨石编号为 GRV+时间+顺序号最后,对陨石进行登记和,记录内容包括:陨石编号、发现位置(经纬度)、发现者、主要鉴定特征(包括形状、大小、熔壳、颜色、内部结构、风化程度等)、初步鉴定结果和鉴定者。为了尽可能保持其原始状态,运输过程一直保存在冰库中,使陨石尽可能减少氧化和污染。

2.3 格罗夫山陨石的分类研究与保存

2.3.1 陨石类型及其科学意义 陨石研究首先需要对收集到的样品进行岩石矿物学分析,确定其化学群、岩石类型以及冲击变质程度和风化程度。由于我国收集的格罗夫山陨石数量巨大,因此,这项陨石分类工作是一项工作量巨大的基础性研究。

根据陨石形成之后是否经历高温熔融,陨石类型可划分为球粒陨石(或未分异型)和非球粒陨石(分异型)两大类。未分异型陨石更为古老,代表了太阳星云形成的产物,它们因为普遍含有毫米大小的球状硅酸盐集合体(即球粒),又被称为球粒陨石。球粒陨石如果受到高温加热,将发生熔融,并导致金属与硅酸盐的分异,从而形成分异型陨石。按照金属与硅酸盐含量的比例,分异型陨石被划分为铁陨石、石铁陨石、无球粒陨石^[1]。

根据全岩化学组成、氧同位素组成和岩石矿物学特征等,球粒陨石可进一步划分为不同的化学群,包括顽辉石球粒陨石的高铁(EH)和高铁(EL)群、

普通球粒陨石的高铁群(H)、高铁群(L)和高铁低金属群(LL)、富¹⁷O 的 R 群,以及许多碳质球粒陨石化学群(CI、CM、CO、CV、CR、CH、CB、CK 等)。它们形成于太阳星云不同的空间区域,代表了不同的小行星母体。铁陨石根据金相特征和微量元素的变化趋势可划分为不同的化学群——来自不同的小行星母体。石铁陨石包括橄榄陨铁和中铁陨石两大类,前者可能代表小行星金属核—硅酸盐幔边界的物质,后者可能来自类似灶神星的母体。无球粒陨石中已知源区的有月球陨石、火星陨石、以及灶神星陨石,它们还可细分为各种岩石类型。还有一些无球粒陨石虽然经历了熔融作用,但金属与硅酸盐之间没有发生明显分离,属原始无球粒陨石。

球粒陨石形成之后,还经历了不同程度的热变质作用和水蚀变,因此,在化学群分类的基础上,根据热变质和水蚀变的强弱将它们的岩石类型划分为 1~6 型,热变质的强度与水蚀变呈消长关系。1~3 为非平衡型(矿物化学组成没有达到平衡状态),且 1~2 型以水的蚀变为主,4~6 型为平衡型,以热变质为主。陨石是通过小行星之间的撞击,被溅射进入太空,因此普遍遭受程度不等的冲击变质改造,甚至出现熔融结晶,并形成一系列高压矿物,据此将普通球粒陨石的冲击变质程度划分为 S1~S6 等级别。此外,陨石的形成条件与地表有很大的差异,陨石降落地表之后,随着时间的推移,不断受到风化作用,使其中的金属和硫化物逐渐被氧化,甚至硅酸盐矿物也产生水的蚀变,据此将其风化程度划分为 W0~W6 等级。

2.3.2 格罗夫山陨石分类工作概况 我国南极陨石的分类工作和样品管理,大致经历了三个阶段:①2000 年以前的分散研究;②2000~2006 年的小团队形成;③2006 年启动的南极陨石样品库和共享平台建设。首次收集的 4 块格罗夫山陨石由北京大学和中国科学院地质与地球物理研究所联合完成分类工作^[12]。2000 年 12 月,国家海洋局极地考察办公室组织中国科学院广州地球化学研究所、中国科学院地质与地球物理研究所、中国科学院地球化学研究所和南京大学等 4 个单位,协作完成第二次格罗夫山考察所收集的全部 28 块陨石的分类工作。2003 年在第三次格罗夫山考察后,国家海洋局再次组织上述研究机构,对收集的 4448 块陨石中的 51 块代表性样品开展分类工作。2006~2008 年,在国家科技部“南北极生物和地质标本资源标准化整理与共享试点项目”资助下,我国开展了系统南极陨石分类工作,同时在中国极地研究中心组建了南极陨石库

和南极陨石网络共享平台^[7]。

2.4 南极陨石库与共享平台

陨石是非常珍贵的自然资源,对于天体化学和地球化学研究具有重要的科学价值。但陨石来自地外太空,其成分特性与地球表面环境有很大差异,陨石落后极易产生风化和化学成分变化,因此大多数陨石在地表不易保存。南极因其特殊寒冷干燥的环境而保存了大量陨石。为了使这些在冰面上发现的陨石尽可能减轻风化和成分变化而保存其科研价值,在陨石收集过程及后期的保管程序都非常严格和慎重。因此,为了长久地保存这些特殊的科研样品,建立专门的陨石样品保管机构是非常必要的。另外,建立一个网络展示平台和管理系统,让学术界和社会更多地了解和利用陨石资源,对充分发挥这些陨石的科学价值也具有重要意义。

为了更好地保存和利用这些珍贵的科学资源,南极陨石样品列入国家科技部的“南北极生物和地质标本资源标准化管理与共享试点项目”,国家海洋局中国极地研究中心负责组织建立南极陨石样品库。该项目的建设有四方面任务:①研究和登记南极陨石样品;②建立现代的陨石样品库;③建立样品管理体系和相关管理规定;④建设网络平台。

在该项目的支持下,第一期任务是 2350 块陨石的分类和样品整理工作,其中 2006 年、2007 年、

2008 年分别完成 600 块、800 块、950 块。陨石分类研究是在中国南极陨石专家委员会的指导下完成的。2006 的 600 块陨石分别由中国科学院地质与地球物理研究所、中国科学院广州地球化学研究所、中国科学院地球化学研究所、中国科学院国家天文台、桂林理工大学、南京大学等 6 个研究机构完成,各自承担 100 块陨石的分类^[7,14]。2007 年和 2008 年的 800 块和 950 块由上述研究单位和中国科学院紫金山天文台、北京天文馆等 8 家单位共同完成。

陨石样品库的建设由中国南极陨石专家委员会设计,中国极地研究中心负责具体建设。陨石库由样品保藏室、样品处理实验室和陨石研究室等三部分组成。中国南极陨石专家委员会制定了陨石库和样品共享平台(<http://birds.chinare.org.cn/yunshiku/>)的有关管理规定,日常管理由中国极地研究中心负责。该平台以陨石样品信息为基础,包含有共享平台的有关管理规定、样品申请程序、建设成果等内容,目前已向国内外开放。

2.5 格罗夫山陨石分类结果

截至 2010 年,我国共完成格罗夫山陨石分类 2437 块(表 3),所有这些陨石分类和命名都得到了国际陨石学会的批准,并且分类结果分别在第 84、86、89、93、95、96 期《陨石学年报》(*Meteoritical Bulletin*)的形式在《*Meteoritics and Planetary Sci*

表 3 格罗夫山分类陨石统计表

Table 3 Summary of classified meteorites from Grove Mountains

大类	类	族	群	亚群	GRV 98	GRV 99	GRV 02	GRV 05	其它分类
	class	(clan)	(group)	(subgroup)					
球粒陨石(未分异的)	碳质球粒陨石	CM-CO	CM CO	CVA,CVB,CVred			6	2	
		CV-CK	CV CK					7	
		CR	CR					1	
			CH					4	
			CB	CBa,CBb					
		普通球粒陨石	H-L-LL	H L LL	1 1	6 15	476 810	279 750	1 1
			金属						3
			其它		1		1	1	1
			顽辉石球粒陨石				1		
原始无球粒陨石(分异的)		橄辉无球粒陨石(URE)					7	2	1
	ACA-LOD 族	斜方辉石-橄辉石无球粒陨石(ACA)					1		
	WIN-IAB-IIICD 族	顽辉石-镁橄辉石无球粒陨石(WIN)					1		
无球粒陨石(分异的)	铁陨石族				1				
	火星陨石	辉玻无球粒陨石(S)				1	1		
	灶神星陨石	钙长辉长石无球粒陨石(EUC)				1		1	
		中陨铁(Mes)					6	4	1
	橄辉陨铁族		橄辉陨铁				1		
合计			(2437)		4	28	1351	1050	4

ences》刊物正式公布。据分类结果,这些陨石绝大部分为普通球粒陨石,仅50个特殊类型陨石。1998年首次收集的4块南极陨石有普通球粒陨石3块、IAB复合群中的未分群铁陨石(IAB-ung)1块^[12, 15, 16]。2002年分类的28块陨石主要有火星陨石1块^[17~19]、灶神星陨石1块^[20]、L3型陨石6块^[21]、LL4-6型角砾岩1块^[22]、以及平衡型普通球粒陨石19块^[22~25]。2003年分类的51块陨石,除39块普通球粒陨石(包括2块H3型、1块LL3型、36块平衡型)以外^[26],还有1块火星陨石^[27]、1块橄榄陨铁、3块橄辉无球粒陨石、7块碳质球粒陨石^[28]等特殊陨石类型。另外分类的2350块陨石类型主要为普通球粒陨石,除火星陨石或月球陨石外,其它类型陨石均有出现,如碳质球粒陨石、顽辉石无球粒陨石、橄辉无球粒陨石等^[7]。

3 格罗夫山——新南极陨石富集区

人类在其居住区域收集到的陨石数量很少,总数不到3000块。相反,自1969年在南极发现9块陨石以来的40多年里,日本、美国和中国在南极收集到的陨石总数超过47000块。南极是地球上保存陨石最多的区域,另外,由于南极极端的低温、干燥、洁净等环境,南极陨石样品非常新鲜和很少受到地球物质的污染,具有极高的科研价值。因此,南极陨石的搜寻就成为各国南极科学考察的重要项目。

南极富集陨石的主要原因有二:①南极的气候条件非常有利于陨石的长期保存。南极陨石的居地年龄表明,其降落在冰盖上的时间长达几十万年,一些甚至达两三百万年。南极冰盖保存了相当于近百万年间降落的全部陨石样品,仅此南极冰盖的陨石富集程度至少是地球上宜居区域的上百万倍;②南极冰盖的流动,使陨石在一些特定区域得到进一步富集。南极陨石降落到冰盖后被积雪掩埋,而后,随蓝冰的流动而被搬运。如遇山脉阻挡,同时由于南极强烈下降风对蓝冰的消融作用,使陨石在该处暴露出冰层,并随时间不断积累而富集。事实也证明,包括格罗夫山陨石在内,绝大部分南极陨石都发现于南极内陆的山脉区域,与蓝冰的分布密切相关。

3.1 格罗夫山地理概况

格罗夫山是东南极内陆冰原岛峰群,位于普里兹湾兰伯特裂谷东岸,距中山站450 km,地理坐标 $72^{\circ}20' \sim 73^{\circ}10'S, 73^{\circ}50' \sim 75^{\circ}40'E$,由64座岛峰和面积的蓝冰区组成,面积约3000 km²,其中蓝冰出露约500 km²。该区平均海拔约2000 m,岛峰相对高度约300~600 m,地势东高西低,东侧为冰原

高地,与下方的蓝冰区落差形成阵风悬崖,落差在100~300 m之间。阵风悬崖零星出露基岩。岛峰与蓝冰区构成12个条带或区域,这些蓝冰区多为背靠岛峰,呈条带状分布,它们走向基本为北北东向或北东向,主要有阵风悬崖南段、阵风悬崖中段、阵风悬崖北段、萨哈罗夫岭、哈丁山、梅森峰等^[29]。从冰盖中心向北流动的冰川越过阵风悬崖,再从岛峰间穿过格罗夫山地区,由于岛峰群的阻挡,冰流滞留,冰的消融作用明显,从而冰流中的陨石在岛峰间合适的地方产生了富集。野外科学考察和大量陨石证明格罗夫山是南极新的陨石富集区。

3.2 格罗夫山陨石分布特征及陨石特征

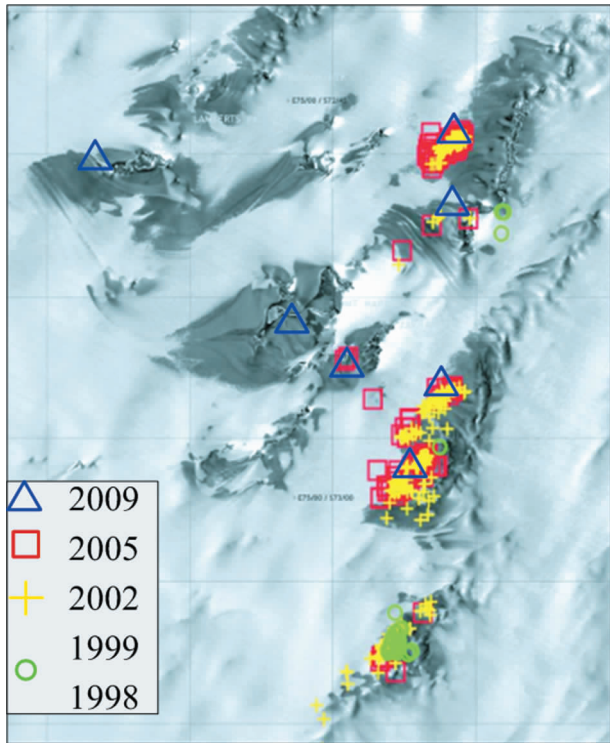
3.2.1 格罗夫山陨石分布特征 格罗夫地区东侧,由南到北呈雁行北北东向分布三段山脉,即阵风悬崖南段、中段和北段(图2)^[30]。该区域冰川大致由东向西流动,在阵风悬崖受阻。由于阵风悬崖一线山岭的高度较低,冰川很可能曾经漫过大部分区域。因此,绝大部分陨石富集于阵风悬崖西侧(冰川下游,图2)^[8, 11],这不同于横贯山脉和Yamato山脉等区域的陨石分布:主要富集于山脉迎向冰川一侧。沿阵风悬崖西侧由南向北,陨石的富集程度有明显增大趋势,并且大块的陨石主要发现于北段,南段陨石很少大于20 g,均落在该区域风力的搬运能力范围,其分布和富集可能与风的搬运有关。格罗夫山核心区的陨石很少发现,仅十九次队在哈丁山冰碛带发现2块陨石,二十二次队在萨哈罗夫岭与哈丁山之间的冰碛带发现47块陨石^[8],而格罗夫山西侧的梅森峰附近冰碛带和蓝冰区仅有少量发现。

格罗夫山陨石分布的另一重要特征是,超过一半以上(约60%)的陨石发现于冰碛带中。事实上,格罗夫山地区的蓝冰表面分布有大量主要来自下覆基岩的岩石角砾,许多区域蓝冰与冰碛带的界线是不清楚的。格罗夫山陨石的分布与冰碛带有非常密切的空间联系,特别是较大块陨石,而个体较小的陨石分布可能与风的搬运有很大关系。

同日本和美国收集的南极陨石相比,格罗夫山陨石的平均重量明显偏低。一部分原因是有一部分样品呈碎屑状、缺失熔壳,很可能是由大陨石与冰碛砾石碰撞破碎而成。但是,即使排除这些碎屑状样品,对其他具有明显熔壳陨石的统计,同样显示与南极其它地区完全不同的质量分布特征。这或许反映了格罗夫山地区独特的陨石富集规律,或许与陨石的搜寻方式有关。日本美国南极陨石考察队多采用雪地摩托为代步工具,因而易于发现大块的陨石,而我国南极陨石考察队多以徒步方式为主,搜寻

的面积有限,但发现陨石较为彻底,这应该更真实地反映了南极陨石的质量分布特征。

图2还反映了5次格罗夫山考察所发现陨石的空间分布,可以看出不同期次考察所发现的陨石在空间分布上几乎完全重合。尽管第19次南极考察收集到4448块陨石(GRV 02),仅相隔3年后,第22次南极考察在相同的区域又收集到5354块陨石(GRV 05)。大量陨石在同一区域的不断出露,一方面与蓝冰的持续消融有关,另一方面与该区域蓝冰表面的积雪由于风的搬运发生变化有关。很显然,格罗夫山地区不仅是已知最富集陨石的区域,而且仍有大量陨石未被发现,该区域的陨石搜寻是未来长期的考察任务。



(陨石分布由陨石发现位置 GPS 数据投图而成)

(note that the meteorite locations are plotted follow their GPS data)

图2 格罗夫山陨石分布图

Fig. 2 The map of meteorite distribution in Grove Mountains

3.2.2 格罗夫山陨石特征 在已分类的2437块陨石中,除2003年51块和其它特殊类型陨石是人为选择外,其它分类主要是采用随机方式进行选择的,因此,在已分类的格罗夫山陨石中,特殊类型陨石的比例难以反映客观情况,普通球粒陨石的类型、大小、质量、风化程度、冲击变质等特征在一定程度上是能代表格罗夫山陨石的。根据分类陨石结果和野外考察分析,格罗夫山陨石有如下特征:

(1)质量特征:以第三次格罗夫山考察收集的

4448 陨石为代表^[13],格罗夫山陨石明显比美国 ANSMET 收集的陨石质量要小很多,格罗夫山陨石平均质量约 10 g,而 ANSMET 陨石平均质量近 240 g(图3)。造成格罗夫山陨石质量小的原因可能与富集机制及其影响元素、陨石收集方式或富集历史等因素有关。

(2)陨石类型特征:格罗夫山陨石类型较齐全(表3、图4),除普通球粒陨石外,火星陨石、灶神星陨石、常见碳质球粒陨石类型、铁陨石、石铁陨石、包括橄辉无球粒陨石 Acapulcoite 在内的原始无球粒陨石等大部分特殊类型陨石均有出现。但通过与 ANSMET 陨石对比,格罗夫山陨石的类型特征是:L 群陨石的比例高于 ANSMET 陨石,而 LL 群陨石的比例低于 ANSMET 陨石,对于其它特殊类型陨石的数量比例就更低,特别是目前格罗夫山尚未发现月球陨石。

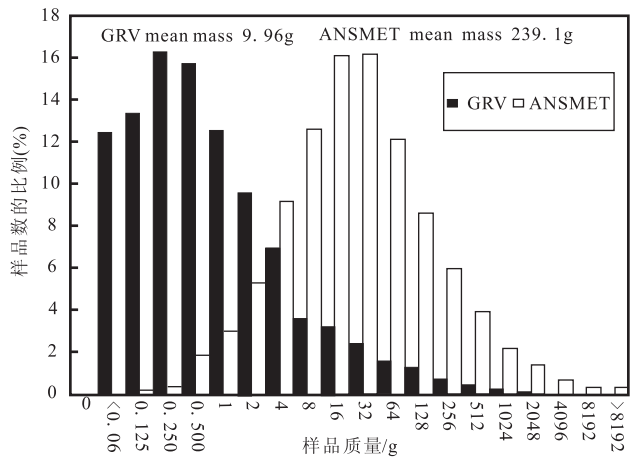


图3 格罗夫山陨石质量分布特征(据文献[13])

Fig. 3 The histogram of mass distribution of Grove Mountains meteorites(modified from ref. [13])

(3)陨石风化特征:根据发现位置,格罗夫山陨石产状主要有蓝冰型(发现于蓝冰区)和冰碛型(发现于冰碛)。蓝冰型陨石样品一般比较新鲜,大多有黑色熔壳,少部分仅表面有少量褐色斑点。而冰碛型陨石大部分样品表面呈深褐色,大部分熔壳脱落,表明经历了较强的地球风化作用。但根据部分陨石风化程度统计,样品风化程度以 W1 和 W2 为主(图5)。总体上,格罗夫山陨石的样品较新鲜,但冰碛中发现的陨石暴露出蓝冰表面的时间可能比较长。

(4)成对陨石:由于南极陨石发现数量大,且发现位置非常集中,因此,南极陨石中成对陨石的概率是非常高的。为了真正了解陨石进入地球的通量和小行星带的物质类型分布,成对陨石的判别在南极陨石研究中是非常重要的内容。目前,我们开展了

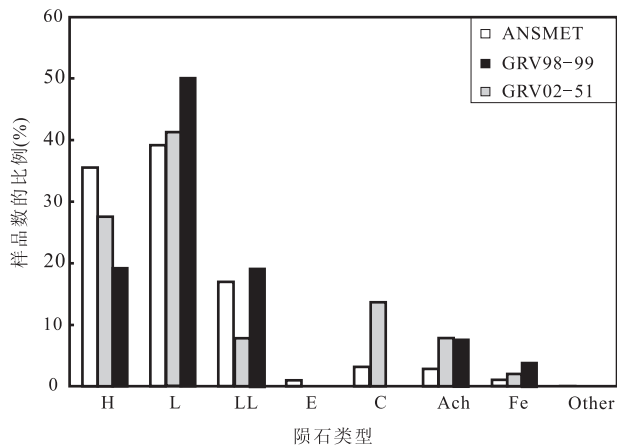


图4 陨石类型分布特征(据文献[13])

Fig. 4 The histogram of the meteorite types of Grove Mountains(modified from ref. [13])

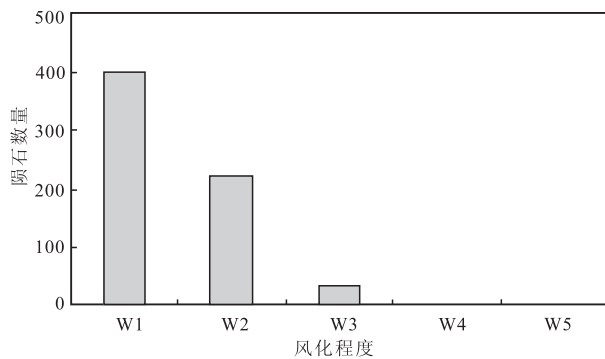


图5 格罗夫山陨石风化程度统计(据文献[30])

Fig. 5 The histogram of the weathering degrees of Grove Mountains meteorites(modified from ref. [30])

部分陨石的岩石矿物学特征对比研究,在132块陨石中共发现26对可能的成对陨石^[31,32],这说明格罗夫山陨石中成对的可能性比较高。成对陨石的进一步确证还需要居地年龄和热释光等数据。

3.3 陨石富集机制和影响因素

南极陨石富集的主要动力是冰盖的流动,当冰盖从中心向四周流动遇到南极大陆边缘山系的阻挡,冰流在阻挡山系前的流动大幅度地减缓或者停滞,此时,冰川在下降风的作用下强烈消融,而冰川中在历史过程中积累起来的陨石逐渐出露并富集,这是典型的南极陨石富集“山前模式”^[3]。而格罗夫山地区除少量陨石发现于阵风悬崖顶部蓝冰区,目前绝大部分陨石主要分布在阵风悬崖冰流下方的蓝冰区。另外,还有一些陨石发现于岛峰之间的冰碛带。因此,格罗夫山地区陨石的富集应属于南极内陆地区的“山后模式”或“山间模式”。根据野外考察和格罗夫山陨石特征分析,认为该地区陨石富集影响因素主要有:①地形因素,格罗夫山分布有64座

岛峰,地形有三四百米以上的落差,冰流产生多级台阶的降落,并在岛峰之间形成“之”形流动,冰流速度大幅度减缓,局部可能产生回流;②下降风的作用,由于该地区的下降风非常强烈,地形的落差和普利兹湾冰流出口,造成冰的强烈消融,产生大面积的蓝冰区;③风化破碎作用,格罗夫山陨石相当部分为缺乏熔壳的碎块,显然风化作用对格罗夫山陨石产生了严重的破坏。

4 展 望

十多年来,国际上不但在南极陨石方面取得了丰硕成果,如1万多块陨石样品(表1)、6块火星陨石^[33];10块月球陨石^[34]。而且在沙漠上也收集了大量陨石:自1999年后西北非洲就回收了6613块^[6],39块火星陨石^[33],52块月球陨石^[34]。此外,国际上不少全天相机流星监测网也不断发现了陨石的降落,其中Almahata Sitta陨石就是全天相机监测后搜寻发现的一块非常有名的橄辉无球粒陨石角砾岩^[6]。在陨石管理方面,美国NASA和日本国立极地研究中心建立了非常完善的陨石保管系统,向国际公布陨石样品管理机制和网络平台。虽然,我国近年来在南极陨石收集和陨石样品管理上取得了非常显著的成绩,但是与美国和日本差距依然是显著的。为此,我国今后在陨石收集和管理的许多方面进行努力和发展。

(1)我们虽然有1万多块南极陨石数量,但是与美国和日本的南极陨石相比,在质量上的差距非常明显,如我们至今未发现月球陨石样品。格罗夫山地区有500多km²的蓝冰区,理论上,应该存在发现月球陨石的概率。因此,我们应该尽快建立专业的陨石搜寻考察队,持续地开展陨石考察活动,而且扩大我国在南极的陨石搜集区域。

(2)在格罗夫山地区制定更为科学的陨石搜寻方案和计划,加强陨石富集机制研究,扩大陨石收集成果,提高我国南极考察在国际上的影响。

(3)继续加强我国南极陨石库的建设,完善南极陨石样品分配制度,同时,鼓励我国各领域积极参与南极陨石研究,丰富南极陨石研究成果。

(4)我国拥有广阔的沙漠和戈壁地区,民间和国际一些陨石猎人已在此类地区开展陨石搜集,并取得初步成果,因此我国相关研究机构应尽快联合组织力量开展陨石搜寻,以免错失良机。

(5)为充分发挥北京地区的全天相机监测网的成效,应加强陨石降落信息的通报和寻找工作。

致 谢:王道德研究员为我国南极陨石收集工作做出了突出贡献,谨以此文向王老先生表示深切怀念!中国极地考察办公室为南极陨石收集工作做出前瞻性的决策和规划,为我国南极陨石重大突破提供了重要保障。中国极地研究中心为南极陨石样品管理提供了重要平台,特别是张丽华和张洁同志做了大量管理工作,为陨石库和共享平台良好运转付出了辛勤汗水。此外,本文得到了刘小汉研究员建设性意见,赵旭晔博士协助完成图件制作,在此一并致谢。

参考文献 (References):

- [1] 王道德, 缪秉魁, 林杨挺. 陨石的矿物-岩石学特征及其分类[J]. 极地研究, 2005, 17(1): 45—74.
Wang Daode, Miao Bingkui, Lin Yangting. Mineralogic—petrological characteristic of meteorites and their classification [J]. Chinese J. Polar Res., 2005, 17(1): 45—74. (in Chinese with English abstract)
- [2] Yoshida M, Ando H, Omato K, Naruse R, Ageta Y. Discovery of meteorites near Yamato Mountains, East Antarctica [J]. Antarctic Record, 1971, 39: 62—65.
- [3] Harvey R. The origin and significance of Antarctic meteorites [J]. Chemie der Erde Geochemistry, 2003, 63: 93—147.
- [4] Schutt J. Antarctic meteorite location and mapping project (AMLAMP) [R/OL]. 2009, <http://geology.geol.cwru.edu/~amlamp/intro/>.
- [5] 刘书燕, 译. 日本南极考察队新采集 635 块陨石[R/OL]. 国外极地考察信息汇编, 2010, (18): 20.
Translated by Liu Shuyan. New collection of 635 meteorites by NIPR[R/OL]. The corpus of information of international polar expeditions, 2010, (18): 20. (in Chinese)
- [6] The Meteoritical Society. Meteoritical Bulletin Database [DB/OL]. 2012, <http://www.lpi.usra.edu/meteor/metbull.php>.
- [7] 中国南极陨石专家委员会. 国家自然资源平台极地标本资源共享平台南极陨石标本库[DB/OL]. <http://birds.chinare.org.cn/yunshiku>, 2008.
The Committee of Antarctic Meteorite Specialists of China. Deep-space category of resource-sharing platform of polar samples, National Science and Technology Infrastructure Project of China [DB/OL]. 2008, <http://birds.chinare.org.cn/yunshiku>.
- [8] Lin Y T, Ju Y T, Xu X X, Pan M R, Huang F X, Fang A M, Li J Y, Liu X B, Pen W J, Hu J M, Chen X. Recovery of 5354 meteorites in Grove Mountains, Antarctica, by the 22nd Chinese Antarctic Research Expedition[J]. Meteoritics and Planetary Science Supplement, 2006, 41: 5102.
- [9] 据宜太, 刘小汉. 格罗夫山地区陨石回收[J]. 极地研究, 2000, 12(6): 137—141.
Ju Yitai, Liu Xiaohan. Meteorites collection in the Grove Mountains[J]. Chin. J. Polar Res., 2000, 12(6): 137—141. (in Chinese with English abstract)
- [10] 据宜太, 刘小汉. 格罗夫山地区陨石回收概况及展望[J]. 极地研究, 2002, 14(4): 248—251.
Ju Yitai, Liu Xiaohan. Meteorites collection in the Grove Mountains: Retrospect and prospect[J]. Chi. J. Polar Res., 2002, 14(4): 248—251. (in Chinese with English abstract)
- [11] 据宜太, 缪秉魁. 南极格罗夫山于 2002—2003 年搜集 4448 块陨石: 新陨石富集区的证实[J]. 极地研究, 2005, 17(3): 215—223.
Ju Yitai, Miao Bingkui. The collection of 4448 meteorites in Grove Mountains, Antarctica, in 2002—2003: Confirmation of a new meteorite concentration[J]. Chin. J. Polar Res., 2005, 17(3): 215—223. (in Chinese with English abstract)
- [12] 陈晶, 刘小汉, 据宜太, 徐军, 阎允杰. 我国首批回收的四块南极陨石类型的确定[J]. 岩石学报, 2001, 17(2): 314—320.
Chen Jing, Liu Xiaohan, Ju Yitai, Xu Jun, Yan Yunjie. The classification of the first four Antarctic meteorites in China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2001, 17(2): 314—320. (in Chinese with English abstract)
- [13] 缪秉魁, 欧阳自远, 林杨挺, 肖龙, 黄定华, 何骑. 我国南极陨石研究的新进展[J]. 地质科技情报, 2008, 27(1): 13—19, 30.
Miao Bingkui, Ouyang Ziyuan, Lin Yangting, Xiao Long, Dinghua, He Qi. The retrospect and prospect on Antarctic meteorite researches in China [J]. Geol. Sci. Tech. Inf., 2008, 27(1): 13—19, 30. (in Chinese with English abstract)
- [14] 秦为稼, 王道德, 杨惠根, 林杨挺, 缪秉魁, 徐伟彪, 王世杰, 李春来, 刘小汉, 谢志东, 王鹤年, 李院生, 王勇, 朱进. 南极陨石目录: 格罗夫山第一辑[M]. 北京: 海洋出版社, 2008: 375.
Qin Weijia, Wang Daode, Yang Huigen, Lin Yangting, Miao Bingkui, Xu Weibiao, Wang Shijie, Li Chunlai, Liu Xiaohan, Xie Zhidong, Wang Henian, Li Yuansheng, Wang Yong, Zhu Jin. Catalogue of Antarctic Meteorites: Grove Mountains I [M]. Beijing: The Ocean Press, 2008: 375. (in Chinese)
- [15] 林杨挺, 王道德, Kimura M. 南极 GRV 98002(L5)和 GRV 98004(H5)普通球粒陨石的热变质作用[J]. 极地研究, 2002, 14(4): 266—275.
Lin Yangting, Wang Daode, Kimura M. Thermal metamorphism of GRV 98002 (L5) and GRV 98004 (H5) ordinary chondrites [J]. Chin. J. Polar Res., 2002, 14(4): 266—275. (in Chinese with English abstract)
- [16] 王道德, 林杨挺. 南极 GRV 98003 和其它 3 个铁陨石的化学组成及分类[J]. 极地研究, 2004, 16(2): 81—90.
Wang Daode, Lin Yangting. Chemical compositions and classification of Grove Mountains (GRV) 98003 and other three iron meteorites [J]. Chin. J. Polar Res., 2004, 16(2): 81—90. (in Chinese with English abstract)
- [17] Lin Y, Ouyan Z, Wang D, Miao B, Liu X, Kimura M, Jun Y. Grove Mountains (GRV) 99027: A new martian lherzolite[J]. Meteoritics and Planetary Science, 2002, 37(Suppl.): A87.

- [18] Lin Y T, Wang D D, Miao B K, Ouyang Z Y, Liu X H, Ju Y T. Grove Mountains (GRV) 99027: A new Martian meteorite[J]. *Chin. Sci. Bull.*, 2003, 48(16): 1771—1774.
- [19] 王鹤年, 王汝成, 张富生, 林承毅, 张文兰, 周丽娅. 南极 GRV 99027 陨石: 火星陨石中的一个新成员[J]. *极地研究*, 2002, 14 (4): 300—307.
Wang Henian, Wang Rucheng, Zhang Fusheng, Li Chengyi, Zhang Wenlan, Zhou Liya, Chen Xiaoming. Antarctic GRV 99027 meteorite: A new member in Martian meteorite[J]. *Chin. J. Polar Res.*, 2002, 14(4): 300—307. (in Chinese with English abstract)
- [20] Lin Y T, Wang D D, Wang G Q. A tiny piece of basalt probably from Asteroid 4 Vesta[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 78(5): 1025—1033.
- [21] 缪秉魁, 林杨挺, 欧阳自远, 周新华. 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.
Miao Bingkui, Lin Yangting, Ouyang Ziyuan, Zhou Xinhua. Petrology of Grove Mountains meteorites I: L3 ordinary chondrites [J]. *Chin. J. Polar Res.*, 2002, 14(4): 276—287. (in Chinese with English abstract)
- [22] 缪秉魁, 林杨挺, 欧阳自远, 周新华. 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.
Miao Bingkui, Lin Yangting, Ouyang Ziyuan, Zhou Xinhua. Petrology of Grove Mountains meteorites II: Equilibrated ordinary chondrites [J]. *Chin. J. Polar Res.*, 2002, 14(4): 288—299. (in Chinese with English abstract)
- [23] 刘建忠, 邹永廖, 李春来, 徐琳, 欧阳自远. 南极格罗夫山陨石的岩石-矿物学特征及初步分类[J]. *极地研究*, 2002, 14 (4): 330—337.
Liu Jianzhong, Zou Yongliao, Li Chunlai, Xu Lin, Ouyang Ziyuan. Meteorite characteristics of petrology-mineralogy and classification in Grove Mountains, Antarctica[J]. *Chin. J. Polar Res.*, 2002, 14 (4): 330—337. (in Chinese with English abstract)
- [24] 王鹤年, 王汝成, 张富生, 林承毅, 张文兰, 周丽娅, 陈小明. 南极格罗夫山 23 个普通球粒陨石的化学群及岩石类型[J]. *极地研究*, 2002, 14 (4): 308—318.
Wang Henian, Wang Rucheng, Zhang Fusheng, Lin Chengyi, Zhang Wenlan, Zhou Liya, Chen Xiaoming. Chemical groups and petrologic types of 23 ordinary chondrites from Grove Mountains, Antarctica[J]. *Chin. J. Polar Res.*, 2002, 14 (4): 308—318. (in Chinese with English abstract)
- [25] 陶克捷, 据宜太, 刘小汉. 28 块南极陨石的类型研究[J]. *极地研究*, 2002, 14 (4): 320—329.
Tao Kejie, Ju Yitai, Liu Xiaohan. Studies on the types of 28 Antarctic Meteorites [J]. *Chin. J. Polar Res.*, 2002, 14 (4): 320—329. (in Chinese with English abstract)
- [26] Lu R, Miao B K, Wang G Q, Dai D Q, Lin Y T, Ouyang Z Y, Li C L. Classification of 24 new ordinary chondrites from the Grove Mountains, Antarctica[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 78(5): 1052—1059.
- [27] Miao B K, Ouyang Z Y, Wang D D, Ju Y T, Wang G Q, Lin Y T. A new Martian meteorite from Antarctica: Grove Mountains (GRV) 020090[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 78(5): 1034—1041.
- [28] Dai D Q, Lin Y T, Miao B K, Shen W J, Wang D D. 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(5): 1042—1051.
- [29] Liu X H, Zhao Y, Liu X C, Yu L J. Geology of the Grove Mountains in East Antarctica—New evidence for the final suture of Gondwana Land[J]. *Science in China (D)*, 2003, 46 (4): 305—319.
- [30] 缪秉魁, 王道德. 南极格罗夫山陨石的分类及其研究意义[J]. *极地研究*, 2008, 20(2): 95—104.
Miao Bingku, Wang Daode. Classification of meteorites from the Grove Mountains and its significance[J]. *Chin. J. Polar Res.*, 2008, 20(2): 95—104. (in Chinese with English abstract)
- [31] Miao B K, Lin Y T, Zhou X H. Type distribution pattern and pairing of ordinary chondrites from Grove Mountains, Antarctica[J]. *Chin. Sci. Bull.*, 2003, 48: 908—913.
- [32] 缪秉魁, 王道德, 胡森, 王葆华, 刘焘, 王秀娟, 冯璐. 100 块格罗夫山陨石的分类及其成对陨石的初步判别 [J]. *极地研究*, 2008, 20(2): 141—152.
Miao Bingkui, Wang Daode, Hu Sen, Wang Baohua, Liu Tao, Wang Xiujuan, Feng Lu. Classification of 100 Grove Mountains meteorites and preliminary pairing[J]. *Chin. J. Polar Res.*, 2008, 20(2): 141—152. (in Chinese with English abstract)
- [33] Irving T. An up-to-date List of Martian Meteorites [DB/OL]. The International Meteorite Collectors Association, IMCA Inc, <http://www.imca.cc/mars/martian-meteorites-list.htm>. 2012; The International Meteorite Collectors Association, IMCA Inc.
- [34] Korotev R L. An up-to-date list of lunar meteorites[DB/OL]. http://meteorites.wustl.edu/lunar/moon_meteorites_list_alumin.a.htm. 2012.