

南极格罗夫山陨石收集、研究进展和富集机制

陈宏毅¹ 缪秉魁¹ 夏志鹏¹ 谢兰芳¹ 赵斯哲^{1,2}

(¹ 桂林理工大学, 广西隐伏金属矿产勘查重点实验室, 行星地质演化广西高校重点实验室,
陨石与行星物质研究中心, 广西 桂林 541006;

² 中国科学院地球化学研究所, 月球与行星科学研究中心, 贵州 贵阳 550081)

提要 经过 7 次南极格罗夫山考察, 我国成功收集陨石 12 665 块, 证明格罗夫山为南极陨石富集区, 但和南极其他富集区相比, 格罗夫山陨石数量多、平均重量小、特殊类型陨石所占比例小。第 3 次和第 4 次格罗夫山考察共收集陨石 9 802 块, 106.5 kg, 分别占总数量和总重量的 77.4% 和 82.5%, 之后收集陨石的数量和重量持续下降。相对于国际上研究程度高的陨石富集区, 格罗夫山冰流速快、流向复杂、冰裂隙发育、夏季盛行偏东风且风力大, 可能是格罗夫山陨石碎块相对富集的客观原因; 但格罗夫山的蓝冰消融率、冰川流速、全年的气象条件等方面积累数据不足。因此, 尽快采集格罗夫山地区的冰川变化和气象数据, 建立格罗夫山陨石富集机制模型, 对合理规划格罗夫山陨石科考和探索新的陨石富集区具有重要意义。

关键词 南极 格罗夫山 陨石收集 研究进展 富集机制

doi: 10.13679/j.jdyj.20200006

0 引言

陨石是来自太阳系小行星、行星及其卫星等星体的地质样品, 保存了太阳星云凝聚、星子堆积和熔融分异等全部过程的信息, 这些样品对研究太阳系的形成和演化、行星和小行星岩浆演化、地球生命起源和深部物质组成等均具有极其重要的意义。相对于登陆外星表面采样, 陨石具有成本低廉和代表性广泛等特点。但是, 同地球上的其他资源相比, 陨石极为稀少, 在发现南极陨石之前, 人类收集到的陨石总数仅 2 000 多块^[1], 且大部分为降落型陨石。1969 年, 日本的南极科学考察队在东南极的大和山区发现了 9 块不同类型的陨石^[2-3], 从此揭开了人类南极陨石科学收集和富集机制研究的序幕^[4-8]。在此后 50 余年的时

间里, 日本、美国、中国、韩国和欧洲联队等国科学家在南极共收集到 5 万多块陨石, 发现了 50 多个陨石富集区^[9-17](图 1)。尤为重要的是: (1) 这些富集区均沿着横贯南极山脉、大和山区和格罗夫山等山脉和冰原岛峰分布, 这些山脉有效阻挡和减缓了冰盖的运动速度, 为陨石搁浅和富集提供了天然的屏障; (2) 我国的中山站和泰山站可为格罗夫山陨石收集和潜在的南查尔斯王子山陨石调查提供后勤支撑, 而罗斯海新建站可为在横贯南极山脉东南侧的米勒山区、戴维冰川和先锋山等地开展陨石收集提供保障, 美国等国家在该区域已经发现了包括月球陨石^[18]在内的大量珍贵陨石; (3) 1998 年至今, 我国共组织了 7 次格罗夫山考察, 收集到 12 665 块陨石, 使格罗夫山成为南极陨石密度最高的富集区之一^[10-17]; (4) 随着陨石分类工作的持续开展, 一批珍贵陨石类型如钙

[收稿日期] 2020 年 2 月收到来稿, 2020 年 3 月收到修改稿

[基金项目] 国家自然科学基金(41866008, 41776196)、桂林理工大学科研启动金(RD19200001)、广西科技计划项目(桂科 AD16450001, 桂科 AD1850007)资助

[作者简介] 陈宏毅, 男, 1980 年生。博士, 主要从事陨石学和天体化学研究。E-mail: Chy@glut.edu.cn

长辉长无球粒陨石、橄辉无球粒陨石、原始无球粒陨石、顽辉石球粒陨石、碳质球粒陨石等逐步被识别并开展研究工作；此外，随着分析测试技术的进步和我国综合国力的提升，2008年之前已经开展研究的珍贵陨石类型如火星陨石等，利用 NanoSIMS 等高精设备测试取得了重要的科学新发现；在对普通球粒陨石稀有气体测试、氧同位素分析、磁化率测试等方面同样取得了重要进展。因此，针对格罗夫山已回收

陨石的分布、数量、重量和类型等数据进行统计学分析，并结合现场考察采集的气象和冰川流速数据，通过卫星遥感采集的冰流方向和蓝冰变化等数据开展陨石富集规律的研究，不但可以合理规划格罗夫山陨石考察，还可以预测和发现新的陨石富集区，收集更多的南极陨石。而南极陨石的资源储备，将可以有效促进我国陨石学与行星科学的学科发展，更大程度上服务于我国深空探测的国家战略。

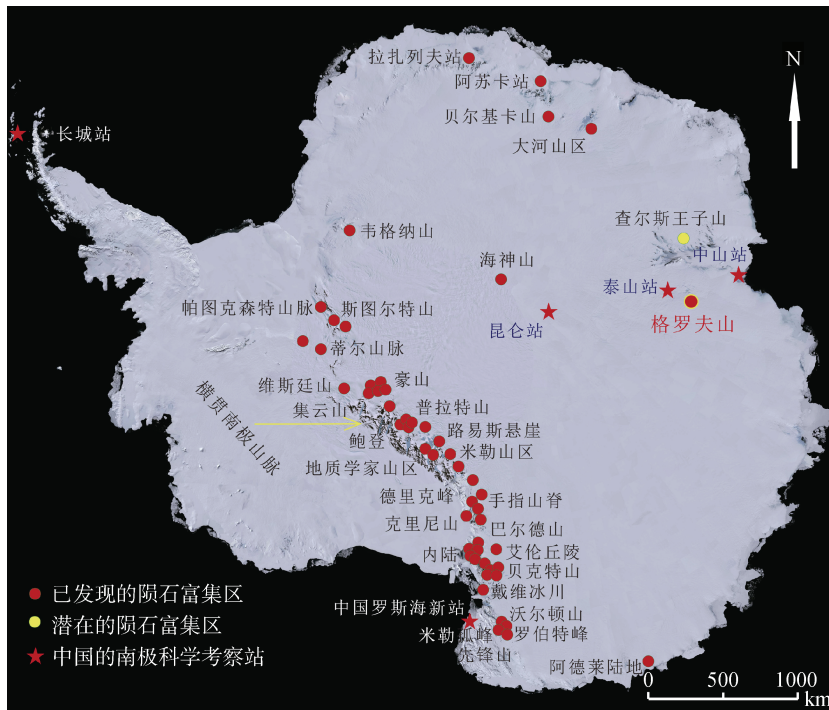


图 1 南极大陆陨石富集区分布图

Fig.1. The distribution of meteorite concentration areas in Antarctica

1 格罗夫山地形地貌和气象条件

格罗夫山位于东南极普里兹湾兰伯特裂谷东岸，中山站南西方向直线距离约 400 km 处(图 1)。该地区由 64 座冰原岛峰和面积出露的蓝冰区组成，总体地势东南高西北低，东南侧为冰原高地，与下方的蓝冰区落差形成阵风悬崖(盖尔陡崖)，冰面最高海拔 2 130 m，最低 1 831 m，平均海拔 2 000 m。兰伯特(Lambert)冰川由南东向北西流经格罗夫山地区，由于岛峰链及其冰下隐伏山系走向垂直于主要冰流方向(图 2)，对冰川的流动构成了巨大障碍。格罗夫山地区蓝冰出露面

积广阔，角峰众多，高低不一，形态万千，冰流十分复杂，在几十平方公里的不同区域内冰流速度存在明显差别，导致冰裂隙分布甚广^[19-20]。冰川流经格罗夫山地区减速明显，加上强烈下降风的作用，蓝冰的消融作用非常明显^[21]，为陨石的搁浅富集提供了得天独厚的条件。

陨石的搁浅富集不但与冰川流动和冰原山脉分布有直接关系，而且强烈受制于富集区的温度、风速、风向等气象条件。为此，作者在第 32 次中国南极科考格罗夫山考察过程中专门采集了工作区的气象数据。采集地点为距离工作区较近的营地周边，分中午和傍晚两次采集，从 2015 年 12 月 22 日进入格罗夫山地区开始，到 2016 年 1

月 25 日离开结束, 共计采集 35 天。使用常规的手持式风速风向仪及最高、最低温度表, 仪器在赴南极前和在中山站都进行过标定, 其观测精度可满足气象观测规范的要求^[22]。

2015 年格罗夫山地区夏季 12 月份最低温度 -21°C , 最高温度 -9°C , 10 天的平均气温为 -13°C ; 2016 年 1 月份最低温度 -27°C , 最高 -12°C , 25 天的平均气温为 -19°C ; 相对于 12 月份, 1 月份的平均气温下降 6°C 。风向以东风、偏东风、东南风和偏南风为主, 最大风速 $16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (7 级风), 7 级风出现 6 天, 频率为 24%, 35 天中风速大于 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (5 级风) 的天气有 22 天, 特殊的天气情况有地吹雪和白化天。而程彦杰等^[22]在 1998—1999 年第 1 次格罗夫山考察测得的气象数据为 1 月份平均气温 -18.5°C , 夏季盛行风向为偏东风, 平均风速为 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 7 级风出现频率为 25%。由此可见, 格罗夫山地区在 17 年间, 1 月份的气象条件稳定, 没有太大变化。由于 32 次队在格罗夫山国旗营地首次设置的自动气象仪在队伍撤离 1 周后出现故障, 至今没有格罗夫山地区冬季的气象数据。

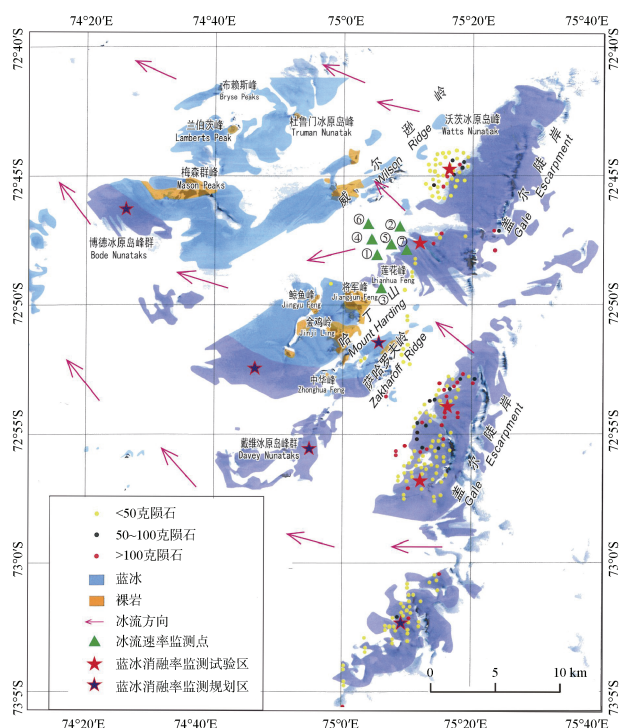


图 2 格罗夫山地区地形、冰流方向和陨石分布图^[15]

Fig.2. The topography, direction of ice stream and distribution of meteorites of Grove Mountains^[15]

2 陨石收集、分类和类型分布

1998 年 12 月, 我国组织了第一次南极内陆格罗夫山考察, 揭开了我国南极内陆科学考察的序幕, 并在阵风悬崖北段和中段的蓝冰表面回收 4 块陨石, 其中 3 块为普通球粒陨石, 1 块为铁陨石^[23-24]; 第 2 次考察, 发现了 28 块陨石^[25], 经鉴定, 发现火星陨石 1 块, 钙长辉长无球粒陨石 1 块^[26]; 第 3 次考察收集到 4 448 块陨石^[27]。至此, 格罗夫山作为南极一个新的陨石富集区的推断被证实。此后, 第 4—7 次格罗夫山考察分别收集到 5 354 块、1 618 块、583 块和 630 块陨石, 我国的南极陨石拥有量达 12 665 块(表 1)。

2.1 陨石分布特征

我国 7 次南极格罗夫山陨石考察收集的陨石绝大多数分布于阵风悬崖下方的蓝冰和冰碛带中, 其次收集于萨哈罗夫岭东侧的蓝冰区, 在哈丁山、戴维冰原岛峰和梅森峰周边的蓝冰上也曾发现零星陨石, 总体规律是从东南到西北的蓝冰上发现陨石数量越来越少(图 2)。

根据 7 次格罗夫山陨石收集情况, 主要特征有: (1)按产状, 格罗夫山陨石可分为蓝冰型和冰碛型两类; (2)陨石主要产出区域位于阵风悬崖下方的蓝冰区和萨哈罗夫岭东侧蓝冰区, 并非所有蓝冰区均富集陨石; (3)在迎风坡的冰碛带和一些蓝冰凹地富集了许多质量小的陨石, 这些小陨石大部分是陨石碎片, 完整个体较少, 可能与风的搬运作用有关; (4)7 次考察的陨石分布区基本重叠, 例如第 4 次所收集的 5 354 块陨石, 绝大部分与第 3 次考察所收集的 4 448 块陨石是在相同的区域内被发现的。

2.2 陨石收集数量和重量规律

7 次格罗夫山陨石搜寻工作共计收集陨石 12 665 块, 总重量 127.72 kg, 参与搜寻工作 65 人次。由于在格罗夫山采用步行拉网式的陨石搜寻方式, 因此, 在已经搜寻过的区域内, 陨石基本被搜寻殆尽, 陨石搜集的信息基本能够反映一定时间段内被搜寻区域的陨石富集特征。

第 1 次格罗夫山考察回收的 4 块陨石重量分别为 13.5 g、76.4 g、282.2 g 和 154.8 g^[23-24], 平均重量较大, 此后历次考察收集陨石数量增多, 在第 4 次考察达到峰值(5 354 块), 之后 3 次考察

收集数量快速下降,平均重量也下降(表 1,图 3),主要规律为:(1)7 次陨石收集总量的单块重量呈正态分布,主峰值出现在 0.1~0.5 g 区间(4 499 块),次要峰值在 1~5 g 区间(2 549 块),大于 1 kg 的陨石数量仅 10 块;(2)单次搜集的数量和重量与总体规律基本一致,细节略有差别:峰值出现在 1~5 g 区间的有第 2、5 和 6 次,峰值在 0.1~0.5 g 区间的有第 3、4 次和第 7 次;(3)第 3 次和第 4 次在历次收集中数量最多(两次合计 9 802 块,105.57 kg,分别占总数量和总重量的 77.39%和 82.66%),高居历次陨石收集数量和重量的顶峰,之后陨石收集的数量和重量均急剧下降;(4)第 5 次收集小于

0.1 g、0.1~0.5 g 和 1~5 g 的数量相当,第 6 次 0.1~0.5 g、0.5~1 g 和 1~5 g 数量相当,而第 7 次 0.5~1 g 和 1~5 g 数量相当;(5)在陨石产状分布上,第 1 次和第 2 次全部为蓝冰型,第 3 次和第 4 次转为冰碛型为主,但蓝冰型仍占据一定比例(21.81%和 39.86%),在第 5—7 次蓝冰型所占比例急剧减少(占比分别为:0%、3.26%、7.30%),总体上蓝冰型占有回收陨石比例的 25.27%(表 1),大多数陨石在冰碛带中被发现,收集难度加大。主要原因是蓝冰型陨石易于识别,在视力可见范围内基本不会被漏掉,因此,在目前可到达的工作区内,蓝冰型陨石基本被收集完。

表 1 我国南极格罗夫山陨石收集信息数据表
Table 1. The collection information of Grove meteorites in Antarctica

格罗夫山考察次序	第1次	第2次	第3次	第4次	第5次	第6次	第7次	合计
南极科考总队次	第15次队	第16次队	第19次队	第22次队	第26次队	第30次队	第32次队	7
考察时间(年份)	1998—1999	1999—2000	2002—2003	2005—2006	2009—2010	2013—2014	2015—2016	
参与搜寻人数	4	10	9	12	10	10	10	65
收集数量(块,比例)	4, 0.03%	28, 0.22%	4 448, 35.12%	5 354, 42.27%	1 618, 12.78%	583, 4.60%	630, 4.97%	12 665
收集总重量/kg	0.53, 0.41%	0.59, 0.46%	43.47, 34.04%	62.10, 48.62%	17.14, 13.42%	2.18, 1.71%	1.71, 1.34%	127.72
重量分布/g	<0.1	0	835	604	340	17	41	1 837
	0.1~0.5	0	2	1 733	1 965	368	173	4 499
	0.5~1.0	0	3	562	846	172	155	1 891
	1.0~5.0	0	12	797	1 016	384	197	2 549
	5.0~10	0	5	158	250	117	21	567
	10~100	2	5	285	565	205	19	1 097
	100~500	2	1	64	98	29	0	197
	500~1 000	0	0	9	5	3	1	18
	1 000~2 000	0	0	3	2	0	0	5
>2 000	0	0	2	3	0	0	5	
陨石产状								
蓝冰型(块,比例)	4, 100.00%	28, 100.00%	970, 21.81%	2 134, 39.86%	0, 0.00%	19, 3.26%	46, 7.30%	3 201, 25.27%
冰碛型(块,比例)	0, 0.00%	0, 0.00%	3 475, 78.13%	3 193, 59.64%	1 618, 100.00%	564, 96.74%	584, 92.70%	9 434, 74.49%
不明确(块,比例)	0, 0.00%	0, 0.00%	3, 0.07%	27, 0.50%	0, 0.00%	0, 0.00%	0, 0.00%	30, 0.24%
分布区域	阵风悬崖北段、中段	阵风悬崖南段	阵风悬崖全段, 1号和4号冰碛带, 天问碎石带	阵风悬崖全段, 戴维角峰和撒哈洛夫岭东侧	1、2、3、4号碎石带, 梅森峰南侧, 撒哈洛夫岭, 天问碎石带	阵风悬崖中段, 1、2、4号碎石带, 天问碎石带	阵风悬崖北段、中段, 1、2、4号碎石带, 撒哈洛夫岭东侧, 天问碎石带	

2.3 陨石分类工作进展和类型分布规律

自格罗夫山陨石发现以来,我国持续开展了南极陨石分类、国际命名提交和相关的科学研究工作^[28-42]。截至 2020 年 10 月,已经分类的南极陨石共 4 049 块,其中提交国际命名的陨石有 3 426

块,暂未提交命名的陨石可在中国极地标本资源共享平台中检索(<http://birds.chinare.org.cn/index/>)。在已经提交国际命名的陨石中主要为普通球粒陨石,占申报总数的 98.31%,其余特殊类型陨石数量分别为:火星陨石 2 块, HED

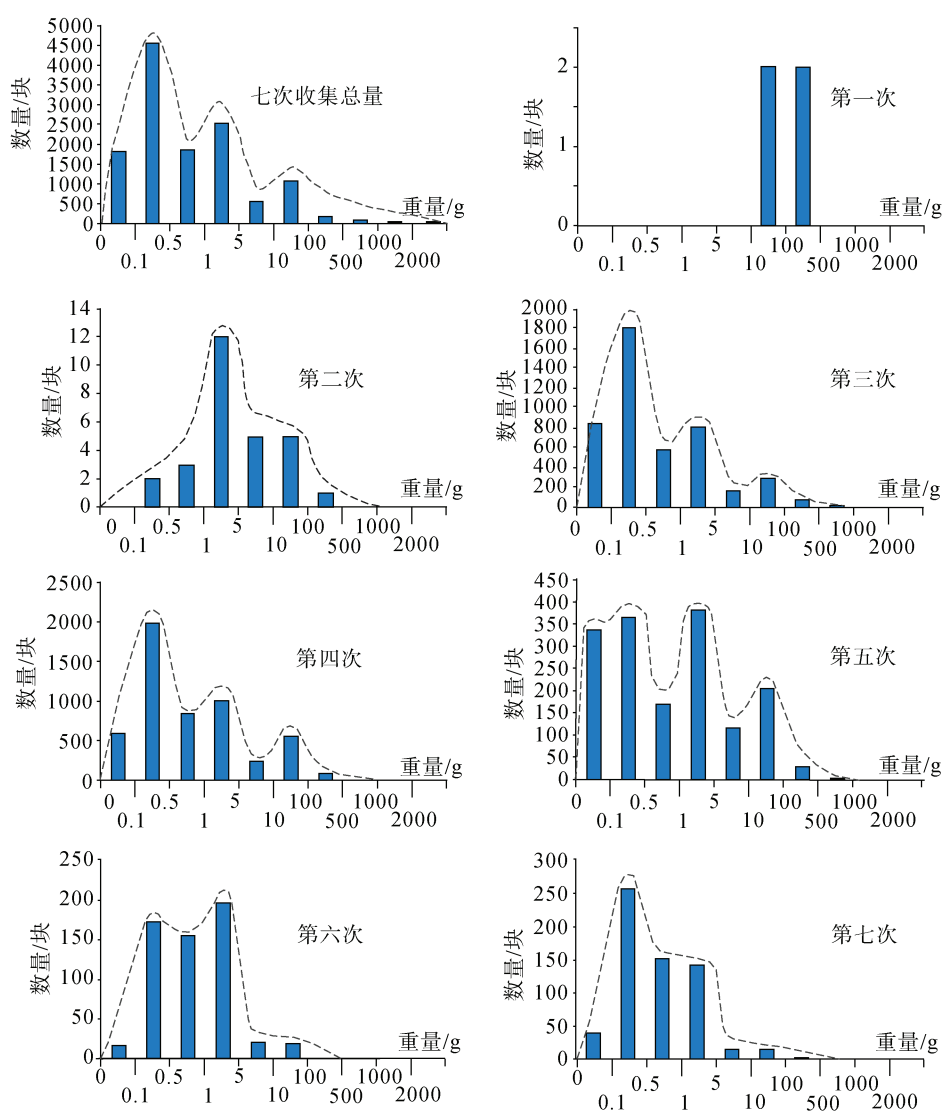


图3 我国历次南极格罗夫山科学考察陨石收集数量和重量分布图
Fig.3. The distribution of quantity and weight of Grove meteorites in Antarctica

(Howardite-Eucrite-Diogenite)族陨石3块, 原始无球粒陨石2块, 橄辉无球粒陨石11块, 铁陨石4块, 橄榄陨铁1块, 中铁陨石12块, 碳质球粒陨石21块, 顽辉石球粒陨石2块(表2, 图4)。在已申报的陨石中, HED族陨石(1块)、铁陨石(3块)、中铁陨石(1块)、橄辉无球粒陨石(1块)、碳质球粒陨石(1块)、顽辉石球粒陨石(1块)是2013年之后新提交的特殊陨石类型^[41-42]。

将已获得国际陨石命名的格罗夫山陨石与南极其他陨石富集区的陨石进行对比, 可见如下特点: (1)在格罗夫山所发现的特殊类型陨石比例相

对较小, 至今未发现月球陨石、顽辉石无球粒陨石、钛辉无球粒陨石等, 而HED族陨石、碳质球粒陨石、顽辉石球粒陨石、铁陨石和橄榄陨铁等陨石类型不但数量上远小于南极其他富集区的发现比例, 且其亚类也相对单一, 唯有中铁陨石比例(0.35%)高于南极其他富集区(0.13%); (2)格罗夫山普通球粒陨石比例(98.31%)高于其他富集区(91.73%); (3)所发现的普通球粒陨石中, L群的占大多数(68.21%), 被认为其中存在大量的陨石碎块或成对陨石^[41-42]; (4)非平衡型普通球粒陨石比例(2.34%)与南极其他地区(3.99%)接近(表2)。

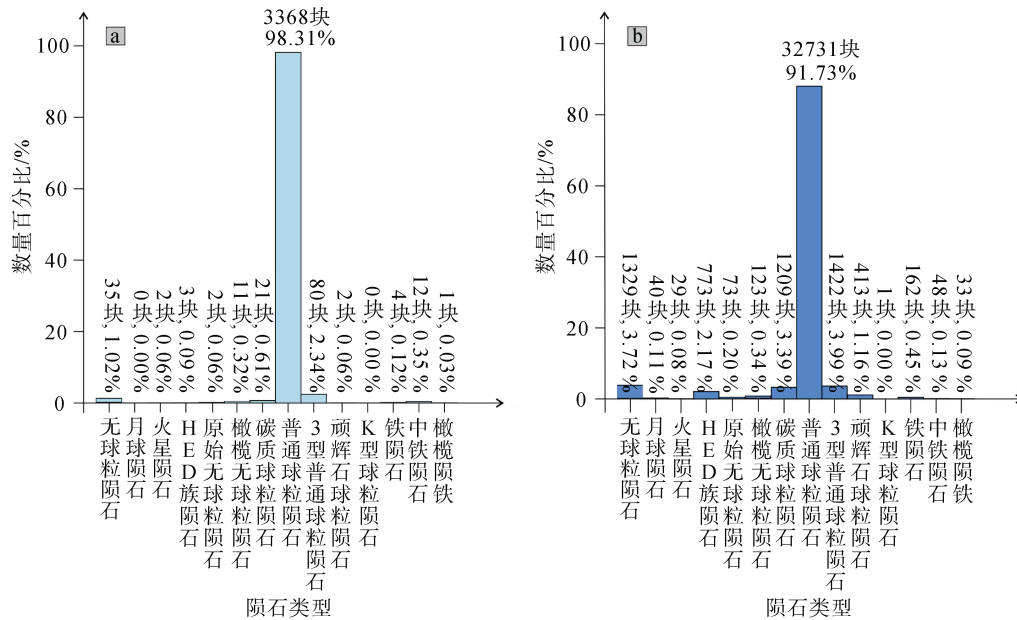


图 4 格罗夫山和南极其他陨石富集区不同类型陨石分布图. a)格罗夫山; b)南极除格罗夫山之外的其他富集区总数
Fig.4. Histogram of chemical groups of meteorites recovered from Antarctica. a) meteorites from the Grove Mountains; b) meteorites from the other concentration areas

表 2 格罗夫山和南极其他地区不同类型陨石数量对比

Table 2. Comparison of chemical groups of meteorites recovered from the Grove Mountains and the other concentration areas in Antarctica

陨石类型	格罗夫山/块	百分比/%	南极其他富集区/块	百分比/%	南极合计/块	百分比/%	
普通球粒陨石	H群	982	28.66	15 153	42.47	16 135	41.26
	L群	2 337	68.21	11 909	33.37	14 246	36.43
	LL群	49	1.43	5 669	15.89	5 718	14.62
	3型 ^a	80	2.34	1 422	3.99	1 502	3.84
	合计	3 368^b	98.31	32 731^c	91.73	36 099	92.30
碳质球粒陨石	CB	0	0.00	11	0.03	11	0.03
	CH	0	0.00	13	0.04	13	0.03
	CI	0	0.00	4	0.01	4	0.01
	CK	1	0.03	136	0.38	137	0.35
	CM	8	0.23	503	1.41	511	1.31
	CO	1	0.03	301	0.84	302	0.77
	CR	4	0.12	98	0.27	102	0.26
	CV	7	0.20	143	0.40	150	0.38
合计	21^c	0.61	1 209^d	3.39	1 230	3.15	
顽辉石球粒陨石	EH	1	0.03	117	0.33	118	0.30
	EL	0	0.00	64	0.18	64	0.16
	合计	2^d	0.06	413^d	1.16	415^d	1.06
K型球粒陨石	0	0.00	1	0.00	1	0.00	
球粒陨石合计	3 391	98.98	34 375	96.28	37 745	96.51	
火星陨石	2	0.06	29	0.08	31	0.08	
月球陨石	0	0.00	40	0.11	40	0.10	
顽辉石无球粒陨石	0	0.00	44	0.12	44	0.11	

续表 2

陨石类型	格罗夫山/块	百分比/%	南极其他富集区/块	百分比/%	南极合计/块	百分比/%
橄辉无球粒陨石	11	0.32	123	0.34	134	0.34
钛辉无球粒陨石	0	0.00	4	0.01	4	0.01
	Howardite	0	161	0.45	161	0.41
HED族陨石	Eucrite	3	371	1.04	374	0.96
	Diogenite	0	241	0.68	241	0.62
	Acapulcoite	1	58	0.16	59	0.15
原始无球粒陨石 ^e	Winonaite	1	11	0.03	12	0.03
	Brachinite	0	4	0.01	4	0.01
	Lodranite	0	0	0.00	0	0.00
铁陨石		4	162	0.45	166	0.42
橄榄陨铁		1	33	0.09	34	0.09
中铁陨石		12	48	0.13	60	0.15
无球粒陨石合计	35	1.02	1 329	3.72	1 364	3.49
总计	3 426	100.00	35 704 ^d	100.00	39 109	100.00

注: a)3型为非平衡型陨石,与普通球粒陨石的化学群重复计数; b)我国第一块南极陨石GRV 98001未开展化学群分类; c)部分陨石包含多种化学群组分; d)存在未划分亚型的陨石; e)GRV 020043被认为代表了原始无球粒陨石的母体物质,在国际陨石分类表上被划分为普通球粒陨石H4型。

3 格罗夫山陨石研究新进展

在对南极格罗夫山开展陨石搜寻工作的同时,我国科学家十分重视陨石分类和科学研究工作:在陨石的岩石学矿物学特征、地球化学特征及其类型划分,陨石的起源、岩浆演化及其母体的地质过程,陨石的冲击变质和热变质过程,陨石的爆裂年龄和溅射年龄、氧同位素组成特征、磁化率和难熔包裹体等方面开展了大量的科研工作,取得了突出的科研成果。缪秉魁等^[14]和林杨挺等^[16]做了系统综述,本文主要总结 2008 年之后的研究进展。

3.1 火星陨石

我国在格罗夫山收集火星陨石 2 块,分别为 GRV 99027 和 GRV 020090,从发现伊始,科研工作者就对它们开展了持续研究,截至发稿,累计发表科研论文 17 篇^[43-59]。GRV 99027 和 GRV 020090 均为二辉橄榄岩质火星陨石^[43,45],属于火星陨石分类中的辉玻无球粒陨石,对研究火星早期的岩浆演化和火星水等具有重要意义。

GRV 99027 陨石 Σ REE(Rare Earth Element, 稀土元素总量)低,橄榄石和辉石富集 HREE (Heavy Rare Earth Element,重稀土元素);熔长石

富 LREE(Light Rare Earth Element,轻稀土元素), $\delta\text{Eu}(\delta\text{Eu}=\text{Eu} \times [(\text{Sm}+\text{Gd}) \times 2^{-1}]^{-1})$ 具较高的正异常($\delta\text{Eu}>1$ 为正异常, $\delta\text{Eu}<1$ 为负异常);白磷钙矿具有极高的 Σ REE, $\text{LREE} \sim \text{HREE}$, δEu 负异常明显;全岩氢同位素具有高的 δD 值^[52,54];橄榄石、辉石和斜长石的 Rb-Sr 等时线年龄为 $177 \pm 5(2\sigma)\text{Ma}$, 初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.710364 \pm 11(2\sigma)$, Sr 同位素的初始比值落在 ALHA 77005 和 LEW 88516 等辉玻无球粒陨石之间^[46,55],这些特征与辉玻无球粒陨石一致,与其他类型的火星陨石不同,说明不同类型的火星陨石具有不同的岩浆源区,二辉橄榄岩质火星陨石来自于同一岩浆构造单元,反应了火星幔的均一性^[54-55]。通过计算宇宙成因核素 ^{10}Be 的含量得出 GRV 99027 的宇宙射线暴露年龄为 $(4.4 \pm 0.6)\text{Ma}$ ^[50],稀有气体计算得出的宇宙射线暴露年龄为 $(5.7 \pm 0.4)\text{Ma}$ (1 σ)^[59],与同为火星幔起源的 LEW 88516, Y-793605, NWA 1950 和 ALHA77005 具有相似的矿物学、地球化学特征和宇宙线暴露年龄,说明它们极有可能来自火星上的同一次撞击事件^[50]。

GRV 020090 具有嵌晶结构和非嵌晶结构两种结构类型,相对于 GRV 99027 和其他辉玻无球粒陨石,具有较高的二辉橄榄岩和熔长石含量 (24.2%)^[53],橄榄石和辉石相对富铁,熔长石具有

较高的碱金属含量,轻稀土元素相对富集,和玄武岩质辉玻无球粒陨石一致^[55,57],其岩石学、矿物学和地球化学特征表明其原始岩浆来源于稀土亏损的火星幔,之后部分熔融,具有两个阶段的岩浆结晶过程^[56-57]。Hu 等^[58]对 GRV 020090 岩浆包裹体的水含量和 H 同位素做了研究,发现两者具有非常好的对数相关性,指示为火星大气水交换的结果。岩浆包裹体的水含量和 D/H 比值非常不均匀,两者都从中央向外逐渐升高,表明这些水是由外部通过扩散进入岩浆包裹体。因此,这些水是火星大气水而不是岩浆水,该文章首次报道火星存在大气降水的同位素证据。通过对水在这些岩浆包裹体中的扩散模拟,进一步对液态水存在的最长时间进行了估算:在 0℃ 的条件下,液态水最长可存在 13 万~25 万年左右,如果温度升高到 40℃,则时间缩短至 700~1 500 年。这表明 GRV 020090 火星陨石的岩浆上侵至火星近表面时,其热量熔化了周围的冻土层,形成了一个区域性的、有限时间的地下热水体系。同时,由于所测得的 D/H 比值远高于之前报导的结果,表明有更多的水逃离了火星,意味着火星早期曾经有过更深的海洋^[58]。

3.2 HED 族陨石

我国在格罗夫山共收集到 3 块 HED 族陨石,全部为 Eucrite,分别为 GRV 99018^[60], GRV 051523^[61]和 GRV 13001^[62-63]。GRV 99018 是一块遭受强烈冲击变质和热变质的角砾岩化玄武岩质无球粒陨石,冲击导致了部分熔融,冲击熔脉宽 5~20 μm;辉石具有 1~3 μm 宽的出溶条带,重结晶的颗粒普遍发育,说明其遭受了多期的热变质作用^[60]。GRV 051523 玄武岩质无球粒陨石受到强烈的撞击并角砾化,形成冲击熔脉;粗粒辉石晶体周边普遍存在微粒状或细针状铬铁矿,并具有定向分布特征,不同产状的辉石成分均一,表明该陨石经历过强烈的热变质作用,其岩石类型为 5—6 型^[61]。GRV 13001 重 1 299 g,是我国在南极发现最大的一块无球粒陨石,其四分之三表面被一层灰黑色熔壳覆盖,熔壳厚度 0.02~0.10 mm;陨石内部呈深灰—灰白色,含大量深灰色不规则角砾,基质为灰白色;易变辉石出溶普通辉石片晶,斜长石出溶富铁纳米颗粒,含硫元素的二氧化硅热液沿裂隙交代辉石和斜长石,形成

陨硫铁和石英,证明其母体上发生过热液变质反应^[62]。通过氧和铬同位素的对比研究($\delta^{18}\text{O}\text{‰}=3.65$, $\delta^{17}\text{O}\text{‰}=-0.238\pm 0.001$; $\varepsilon^{54}\text{Cr}=-0.32$),推测 GRV 13001 可能直接起源于一个直径数公里的 V 型小行星碎片,该小行星碎片在进入地球轨道之前位于比灶神星更加靠近火星的位置^[62]。通过 GRV 13001 和其他 HED 族陨石的热变质对比综合研究, Eucrite 热变质发育程度最高,而 Diogenite 只有微弱的热变质,组成 Howdite 不同的角砾具有不同的热变质程度,玄武岩质 Eucrite 具有最高程度的热变质,辉长堆晶岩型 Eucrite 次之, Diogenite 角砾热变质程度最低;因此, Eucrite 热变质的热量最有可能来源于玄武岩浆喷发的覆盖加热^[63]。

3.3 橄辉无球粒陨石

橄辉无球粒陨石是一类特殊的无球粒陨石,既具有高度分异的火成特征,又具有原始球粒陨石的特征,对了解太阳系形成和演化有重要意义^[64]。我国在格罗夫山成功收集橄辉无球粒陨石 11 块,占已分类陨石总数的 0.32%,与国际水平相当(表 2),累计发表科研论文 9 篇^[64-72],其中, GRV 021788, GRV 024516, GRV 024237, GRV 022888, GRV 052382 和 GRV 052408 在岩石学和矿物化学特征、地球化学特征、宇宙射线暴露年龄和气体保存年龄、冲击变质作用等方面开展了一定的研究工作^[64-72]。

GRV 021788 由橄榄石、辉石、少量的富碳基质和不透明矿物组成,橄榄石晶体具有三线共点的三联晶结构和富镁还原边等典型的橄辉无球粒陨石特征。黑色的填隙基质富含碳、金刚石和石墨,属于单矿 I 型橄辉无球粒陨石,可能形成于多阶段部分熔融和堆积^[64]。GRV 024516 的宇宙射线暴露年龄为 33.3 Ma,气体保存年龄为 1 936.8 Ma,填隙物含金刚石、石墨和无定型碳,并为主要稀有气体的载体,且冲击变质效应明显,导致 ^{40}Ar 部分丢失^[65]。GRV 052382 遭受了强烈的冲击变质作用,主要由橄榄石(75%)、易变辉石(5%)、富碳填隙物(20%)和少量金属组成,橄榄石具有镁质还原边,辉石成分均匀,但存在冲击作用影响下的波浪状成分变化,石墨和金刚石作为填隙物充填在橄榄石裂隙中,冲击作用的主要表现为橄榄石细晶化、易变辉石中的不规则气孔被金属铁充填、石墨的金刚石相变等,与 GRV 021788 一样可

划分为富铁的 I 型^[66-68,70]。GRV 024237 由粗粒橄榄石(60%)、易变辉石(30%)和不透明矿物组成, 橄榄石具有 120° 角三联晶、反环带等典型橄辉无球粒陨石特征, 基质富含碳质, 充填于裂隙中, 冲击程度弱, 与 GRV 021788 同属于单矿 I 型橄辉无球粒陨石^[69,71]。GRV 052408 由橄榄石(60%)、辉石(35%)和富碳质填隙物(5%)组成; 而 GRV 022888 橄榄石含量达 98%, 仅有极少量的辉石和含碳质填隙物。GRV 052408 和 GRV 022888 的共同特征是橄榄石具有核部富铁边部富镁的反环带结构, 属于单矿 I 型橄辉无球粒陨石^[72]。

通过以上研究, 可以明确橄辉无球粒陨石的主要特点是: 矿物组成以橄榄石为主, 辉石为辅, 辉石中以易变辉石为主; 填隙物中富含石墨和金刚石; 橄榄石具有 120° 的三联晶结构和核部富铁边部富镁的反环带, 说明其经历了岩浆结晶后期复杂的重熔或变质作用, 可能起源于陨石母体部分熔融后残余物质的重结晶^[64-72]。

3.4 原始无球粒陨石

我国在格罗夫山陨石中识别出两块原始无球粒陨石 GRV 021663 和 GRV 022890^[73-77], 亚类分别为 Acapulcoite 和 Winonaite(表 2)。Li 等^[73]对 GRV 021663 做了报道, GRV 021663 主要由原始的镁橄榄石($\text{Fa}_{5.4}$)、顽辉石($\text{Fs}_{4.7}\text{Wo}_{3.0}$)、透辉石($\text{En}_{53.6}\text{Fs}_{2.4}\text{Wo}_{44.0}$)、陨硫铁、铁镍合金和斜长石($\text{Ab}_{74.5}\text{Or}_{4.0}\text{An}_{21.5}$)组成, 含有少量的陨磷铁镍石和富钾长石; 全岩的氧同位素组成为 $\delta^{18}\text{O}=7.50\text{‰}$, $\delta^{17}\text{O}=3.52\text{‰}$ 。Zeng 等^[74]通过对 GRV 021663、GRV 022890 两块南极格罗夫山原始无球粒陨石, 以及四块西北非原始无球粒陨石综合的岩石学和地球化学特征分析后认为, 原始无球粒陨石母体在演化历史上形成了四层结构: 由球粒陨石物质组成的表层、经历了变质反应和 FeNi-FeS 部分熔融物质形成的亚层、深部的硅酸盐部分熔融层和最里面不完全分异的金属熔体。

此外, 通过对球粒陨石 GRV 020043 进行氧和铬同位素测试, 全岩氧同位素组成为: $\delta^{18}\text{O}=3.226\pm 0.267\text{‰}$, $\delta^{17}\text{O}=0.797\pm 0.131\text{‰}$, $\Delta^{17}\text{O}=-0.927\pm 0.017\text{‰}$, 全岩铬同位素组成为: $\varepsilon^{54}\text{Cr}=0.48\pm 0.10\text{‰}$ 。同位素组成和普通球粒陨石以及未分组的球粒陨石不同, 而与已知的原始无球粒陨石一

致, 从而推测 GRV 020043 代表了原始无球粒陨石母体形成之前的物质来源^[74-76], 并结合部分原始无球粒陨石的研究给出了其母体的可能结构^[76]。

3.5 铁陨石

王道德和林杨挺^[77-78]对我国在南极发现的第一块铁陨石 GRV 98003 做了研究, 将其划分为 IAB-complex 群, 化学类型与南丹铁陨石、邕宁铁陨石和 NWA 468 铁陨石等一致。与 NWA 468 相比, GRV 98003 具有明显的难熔亲铁元素(Re, Ir)和中等挥发性元素(Ga, Ge)的贫化, 其他的化学组成与 NWA 468 相似, 两者均可能是在碳质球粒陨石小行星母体表面由表土经过冲击熔融形成的。

3.6 碳质球粒陨石

碳质球粒陨石是我国在格罗夫山发现的陨石中除了普通球粒陨石之外数量最多的陨石类型, 目前已鉴定出 21 块(表 2)。碳质球粒陨石的岩石学矿物学特征, 富 Ca, Al 难熔包裹体(CAI, Calcium-aluminum Inclusions)特征和成因^[79-84], 以及太阳系外颗粒和来源分析^[85]等方面是研究的重点。

GRV 020025、GRV 021579、GRV 022459 和 GRV 020017 分别被划分为 CM2、CO3、CV3 和 CM2 型碳质球粒陨石, 基质和球粒的面积比值分别为 2.8、1.2、1.0 和 2.0, 最大的球粒直径达 0.6~2 mm(GRV 022459), 4 个陨石薄片中共发现 30 个钙铝包裹体^[79]。大部分钙铝包裹体强烈蚀变, 被划分为 A 型或尖晶石-辉石富集型, 具有类似的岩石学和矿物化学特征, 推测它们具有相似的起源^[80]。在 GRV 020025 和 GRV 021579 中还发现两个富尖晶石球粒状钙铝包裹体, 分别为 3R18 和 3R15, 3R18 中尖晶石含量高, 在球粒的最外边存在严重蚀变的不规则边, 钙钛矿主要分布在靠近边的位置; 3R15 的尖晶石中的钙钛矿消失, 发现深绿辉石, 薄薄的蚀变层位于尖晶石核和富钙辉石边之间, TiO_2 含量较高, 岩石学和矿物化学特征表明, 3R18 和 3R15 都经历过熔融结晶过程, 它们的蚀变均发生在非氧化的含水或无水的环境中^[81-82]。GRV 022459 的蠕虫状橄榄石集合体中的尖晶石强烈富铁, 说明其形成于高氧逸度的环境^[83]。GRV 023155 和 GRV 050179 分别被划分为 CV3 和 CM2 型碳质球粒陨石, 多数难熔包裹体强烈蚀变, 在球粒、基质和包裹体中均发现了层状硅酸盐, 证明在其母体上发生了较强

烈的含水蚀变,所有包裹体被划分为 A 型或尖晶石-辉石富集型,可能代表了太阳星云的连续凝聚^[84]。

利用 NanoSIMS 在 CR 型碳质球粒陨石 GRV 021710 中发现了前太阳系颗粒(太阳系外颗粒),在 35 个异常的含碳颗粒中 28 个为碳化硅(SiC),通过 N 和 Si 同位素测试,在 7 个颗粒中,1 个为新星颗粒、1 个为 Y 颗粒、1 个为 Z 颗粒,4 个为主流颗粒;112 个氧异常的颗粒中有 89 个属于 1 组(Group 1),说明了起源于低到中等质量红巨星和 AGB 星,21 个属于 4 组(Group 4)颗粒,起源于超新星^[85]。

3.7 顽辉石球粒陨石

谢兰芳等^[86-87]对我国在南极新发现的顽辉石球粒陨石 GRV 13100 做了系统研究。GRV 13100 为 EH4 型,冲击变质程度为 S2,风化程度为 W2。主要由不同类型的球粒、基质和不透明矿物组成,球粒及基质矿物组成均以顽火辉石或辉石质玻璃为主,次要矿物为钠长石、镁橄榄石、方石英和不透明矿物。不透明矿物包括陨硫铁、陨硫铬铁矿、陨硫镁矿、陨硫钙矿、含硅铁纹石(Si 含量 2.23~3.90 wt.%)、陨磷铁矿、硅磷镍矿等金属硫化物和磷化物,不透明矿物总含量达 21 vol.%。陨硫镁矿中 FeS 含量可以反映母体变质温度,通过计算和对比,GRV 13100 中大部分陨硫镁矿变质温度为 200℃~300℃,个别经历了 400℃~800℃ 的高温,可能为外来吸入成因或代表了原始星云的凝聚或结晶温度;陨硫镁矿形成于太阳星云的直接凝聚,并在橄榄石和顽火辉石冷凝结晶之后形成;陨硫铁的成因分为原生和次生两种,原生的陨硫铁由太阳星云直接凝聚而成,次生的陨硫铁是在后期热变质过程中由铁镍金属经过硫化作用或者由陨硫镁矿分解而形成;硅磷镍矿可能来自含硅铁纹石的出溶^[86-87]。

3.8 普通球粒陨石的冲击变质作用

Feng 等^[88-92]、Xie 等^[93-96]、冯璐等^[97]、张广良等^[98]、王江与缪秉魁^[99]、Zhong 等^[100]、朱佳玲等^[101]在南极格罗夫山陨石的冲击变质特征、高压相矿物集合体对温度和压力约束、冲击熔融过程等方面做了积极探索。

通过对 93 块格罗夫山普通球粒陨石的调查,它们的冲击变质特征表现为主要组成矿物的破

裂、消光、熔融和重结晶等,存在林伍德石、镁铁榴石、辉石玻璃和熔长石等多种硅酸盐矿物的高压多形。在遭受强烈冲击变质(S4—S5)的 23 块样品中,22 块为 L 群,1 块为 H 群,且大部分为平衡型(5—6 型)陨石,说明热变质程度高的 L 群陨石母体遭受冲击变质程度最高^[90,97]。陨石遭受强烈的冲击变质可导致球粒的全部或部分消失,如 GRV 052483 撞击熔融角砾岩型 L6 普通球粒陨石^[98]。H 群普通球粒陨石的冲击变质程度相对较弱,冲击熔脉宽度较窄,在调查的 47 块 H 型陨石中,仅在 GRV 022469 的冲击熔脉中发现了橄榄石的高压矿物相瓦兹利石^[99]。GRV 090228(L5)中硅酸盐矿物具破裂、波状消光、击变面状页理,长石熔长石化,冲击熔脉中铁镍金属与陨硫铁共熔,含橄榄石-林伍德石集合体、镁铁榴石等高压矿物组合,冲击变质程度达到 S5,冲击压力峰值在 18~23 GPa,冲击温度峰值在 1 800~2 500℃^[101]。

在 GRV 052049(L5—6 型)中发现了辉石的高压变质矿物镁铝榴石,限定冲击压力峰值 21~25 GPa,之后橄榄石及其高压相矿物林伍德石在 <10 GPa 压力和 1 473 K 温度下达到平衡,橄榄石的出溶条带可能在橄榄石向林伍德石和瓦兹利石固相转变以及之后的退变质过程中形成^[88]。橄榄石-林伍德石-瓦兹利石共存可能有沿晶界不连贯结晶和共格晶内成核生长两种成因机制,而在 GRV 052049 中发现林伍德石和与其共存的瓦兹利石之间存在巨大的成分空隙可能说明还有其他的成因机制^[89]。在 GRV 052082(L6)的冲击熔脉中发现了钛铁矿的高压相矿物阿基墨石、林伍德石、镁铁榴石与镁铁榴石和辉石固融体共存,限定冲击压力峰值在 18~23 GPa,温度峰值在 2 000~2 300℃。熔脉中的低钙辉石角砾已经部分或全部转变为阿基墨石和辉石玻璃集合体,阿基墨石中 Fe 含量减少(Fs₆₋₁₉),辉石玻璃中 Fe 含量增加(Fs₃₁₋₃₉),而原始辉石具有均匀中等的 Fe 含量,说明冲击导致辉石全部熔融之后重结晶,阿基墨石先结晶,辉石质玻璃从残余熔体中快速淬火^[92]。GRV 022321 发育网脉状的冲击熔脉,在熔脉中发现了橄榄石和林伍德石集合体,中心为橄榄石,边部为林伍德石,林伍德石(Fa₅₀)比橄榄石(Fa₁₀₋₃₀)具有高的铁含量,该样品有助于合理计算的冲击持续时间内温度的转变^[93-94],利用电子探针、激

光拉曼和超薄切片透射电镜相结合的技术,可以阐明橄榄石和林伍德石中 Mg-Fe 迁移机制,并用动力学原理评估冲击持续时间^[94,96]。Xie 等^[95]利用 FIB-TEM(Focused Ion Beam-Transmission Electron Microscope, 聚焦离子束超薄切片和透射电镜)技术研究了 GRV 022115(L6)中主要硅酸盐相的破裂相变、蒸汽相和纳米铁的形成机制。

由于 GRV 052049 中的林伍德石具有巨大的成分分带(Fa_{27.8-86.1}), Feng 等^[91]探讨了拉曼光谱和化学成分之间的关系,研究发现林伍德石颗粒的 Fa 值与拉曼谱峰有很好的线性相关。随着林伍德石的 Fa 值从 27.8% 升高至 86.1%, DB1 峰从 796.3 cm⁻¹ 位移至 782.7 cm⁻¹; SB1 峰从 296.0 cm⁻¹ 位移至 284.6 cm⁻¹。从而建立了林伍德石 Fa 值与拉曼谱峰的关系式,得到利用拉曼光谱测定林伍德石的化学成分的新方法,其分析精度好于 5 mol%。该项技术具有两个潜在应用,即在高温高压实验中在线测定橄榄石-林伍德石的相变及其化学组成变化,以及在深空探测中,利用拉曼谱仪实现矿物结构和化学组成的同时测定。

3.9 普通球粒陨石的稀有气体

Lorenzetti 等^[102], Ranjith 等^[103]先后对格罗夫山普通球粒陨石进行了 He、Ne 和 Ar 等稀有气体含量测试。GRV 98002(L5)的宇宙射线暴露年龄(CRE, Cosmic Ray Exposure Age)为(17.0±2.5) Ma, GRV 98004(H5)从母体暴露到地球的时间极短:(0.052±0.008) Ma, 它的岩石学和矿物化学特征与其他 H5 型陨石也不同,只有 3 个陨石具有类似低的 CRE 年龄: Farmington (L5), Galim (LL6)和 ALH 82100 (CM2)。因此,这些 CRE 年龄≤0.1 Ma 陨石的母体可能是天文观测中那些和地球轨道相交或者主带小行星中接近于弹射共振的小行星^[102]。GRV 13095(L5)的 K-Ar 气体保留年龄为(459±13)Ma, 支持发生在 470 Ma 年前 L 型球粒陨石母体的大撞击事件,利用 He、Ne 和 Ar 含量(avg. ⁴He=61.5×10⁻⁸ ccSTP·g⁻¹, avg. ⁴⁰Ar=173.5×10⁻⁸ ccSTP·g⁻¹)计算的 CRE 年龄为 14.1±2.5 Ma; GRV 13083(H4)的 K-Ar 气体保留年龄为(3.67±0.26) Ga, 落在 3.5~4.0 Ga 期间 H 型球粒陨石大撞击范围内,其 CRE 年龄为(3.9±0.7) Ma, 比 H 型陨石 CRE 年龄峰值年轻^[103]。

3.10 陨石的磁化率、风化程度和氧同位素

磁化率是陨石的一个基本物理常数,对磁化率影响较大的是陨石中铁镍金属的含量,利用磁化率对未分异型球粒陨石以及铁陨石和 中 铁 陨 石 等 分 类 可 以 起 到 快 速、 便 捷 的 作 用^[104]。通过对 613 块格罗夫山陨石磁化率测量,结果表明利用磁化率可以划分大部分 H、L、LL 群陨石。格罗夫山 H 群陨石的磁化率分布与南极其他地区的陨石十分相似,两者相对于降落型陨石均向低质量磁化率方向平移 0.2(log₁₀, 10⁻⁹ m³·kg⁻¹), 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,反映了风化作用对南极陨石磁化率的影响程度^[105]。

采用对金属和硅酸盐同时进行风化等级划分的办法,尚颖丽等^[106]对南极陨石的风化等级标准进行了重新厘定。金属的风化等级划分为 W_m0—W_m4 五级,硅酸盐风化等级 W_s0—W_s3 四级。按照这个方案,GRV 021588、021636、021772 和 021957 等 4 块无法用 Wlotzka 标准确定风化等级的陨石的风化程度被划分为 W_m1—W_s1, 而 GRV 023312 的风化等级为 W_m3—W_s0, 相当于 Wlotzka 标准的 W3^[107]。

富铝球粒在岩石学矿物学和同位素组成等方面兼具富钙富铝难熔包体和镁铁质球粒的特征,在 GRV 022410(H4)、GRV 052722(H3.7)和 Julesburg (L3.6)3 个普通球粒陨石中发现了 7 个富铝球粒,它们的全岩 Al₂O₃ 含量为 17%~33%, 均显示火成结构。富铝球粒的氧同位素成分(δ¹⁸O=-6.1‰~7.1‰; δ¹⁷O=-4.5‰~5.1‰), 与镁铁质球粒相近, 远比富钙富铝难熔包体(δ¹⁸O=-40‰; δ¹⁷O=-40‰)亏损 ¹⁶O。在三氧同位素图上,大部分富铝球粒投在地球分异(TF)线附近,少部分(含尖晶石)投在 TF 线和碳质球粒陨石无水矿物(CCAM)线之间。与前人研究结果相比,更缓的斜率及更贫 ¹⁶O 的成分进一步表明普通球粒陨石中的富铝球粒不是 CAI 与镁铁质球粒简单混合形成的,相反,它们很有可能在多次熔融过程中与贫 ¹⁶O 的星云气体经历了更高程度的氧同位素交换^[108-109]。

4 南极陨石富集机制和规律探讨

自 1969 年以来,南极陨石富集机制日益受到各国陨石研究者的关注。南极陨石富集机制是指

在数以百万年时间里降落在南极冰盖上的陨石,在蓝冰中储存、运移,并随着冰川运动由中心向四周流动,在接近海岸遇到冰原岛峰或冰下山脉阻挡,流速减缓,在下降风的作用下蓝冰消融,薄层积雪被吹走,历经数以万年的积累,储存在蓝冰中的陨石逐渐被暴露,并在强风作用下产生分选和富集的过程^[110-111]。在南极大陆目前已经发现了 50 多个陨石富集区,大部分沿着横贯南极山脉分布,少部分位于东南极的冰原岛峰,如大和山区、拉扎列夫站和格罗夫山等地(图 1)。

陨石的富集与搁浅区的地形地貌条件、冰盖流动速率、蓝冰的消融速率、下降风和盛行风的作用等因素密切相关^[112]。(1)携带陨石的蓝冰从冰原高地向海边运动过程中遇到山脉阻挡,流速减缓,如维多利亚地东部先锋山区的冰流遇到山脉阻挡后,流速从 $100 \text{ cm}\cdot\text{a}^{-1}$ 降低到 $10 \text{ cm}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[113],强烈的下降风吹走表层冰雪,消融浅层蓝冰,携带在蓝冰中的陨石暴露于冰层表面;(2)根据多个陨石富集区的统计数据,陨石搁浅冰面的海拔高度一般在 2 000 m 左右^[8],这个海拔易于使流入搁浅区的冰和流出及消融的冰保持动态平衡(陨石富集区的冰流条件必须满足: $V_{\text{流入}} \geq V_{\text{流出}} + V_{\text{升华}}$, V 指蓝冰的体积);(3)陨石搁浅区必须是裸冰区,裸冰具有动态消融过程,根据多个陨石富集区裸冰消融率测试,南极蓝冰平均消融速率为 $5\sim 6 \text{ cm}\cdot\text{a}^{-1}$,如先锋山区蓝冰消融率为 $6.5 \text{ cm}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[25],艾伦丘陵为 $4 \text{ cm}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[114],大和山区为 $5 \text{ cm}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[115];(4)蓝冰的消融使陨石暴露于冰面产生富集的时间最长可达 5 万年^[113];(5)艾伦丘陵的强风可以移动冰面上重量小于 100 g 的陨石^[115],而先锋山区的强风和冰碛共同作用可以搬运小于 200 g 的陨石^[111]。

格罗夫山地区平均海拔为 2 000 m 左右,符合陨石搁浅冰面海拔的最佳条件。根据卫星影像数据,格罗夫山地区的蓝冰在 9—12 月份体积明显增加,在 1 月中下旬达到最大值,2—4 月份面积显著减少^[116]。蓝冰具有动态流动和变化过程,蓝冰体积增大主要原因是覆盖在上面积雪的融化或者被盛行风吹走造成的,蓝冰体积最大的时候也是收集陨石的最佳时刻。利用 Envisat ASAR 数据对格罗夫山冰流数据提取表明,受角峰群的影响,格罗夫山的冰流十分复杂,外围的两大主冰

流流速最高可达 $40 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[117];中国第 22 次南极考察队测得从中山站行进到格罗夫山地区 7 个观测点的冰流速率介于 $7.6\sim 21.3 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ 之间,位于格罗夫山上游 4 个点的冰流平均速率 $8 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$,而在格罗夫山岛峰内部的 14 天内冰流运动了 0.282 m,平均合计 $7.35 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[113];而在格罗夫山内部的威尔逊岭、哈丁山和阵风悬崖北段之间的几十平方公里冰面上,GPS 实测的 7 个竹竿标志点(图 2)的冰流速度分别为 3.54、1.11、0.62、5.98、7.32、5.40 和 $12.34 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$;同时,将 DInSAR 和偏移量跟踪得到的二维平面相应点的流速分别为 2.82、1.39、1.43、7.09、9.19、5.60 和 $10.84 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[118];两种方法数据规律基本一致,流速差值分别为 $11.72 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $9.45 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ 。因此,格罗夫山岛峰对于冰流减速十分显著,但在岛峰内部冰流速率有非常大的差值,这是造成格罗夫山冰裂隙发育的主要原因^[118],广布的冰裂隙对陨石收集队员的安全构成了巨大的威胁,是不利于陨石收集的自然因素。

至今依然没有格罗夫山蓝冰消融率的确切数据,而冰流在遇到山脉岛峰阻挡之后的流速依然远大于维多利亚地东部先锋山区的冰流速度,格罗夫山的盛行偏东风能够搬运多大重量的陨石,也没有做过相应的现场实验。因此,作者在 2015—2016 年的考察季在格罗夫山阵风悬崖北段和中段设置了 4 处蓝冰消融率和冰流速度的监测点,计划下次科考再在不同岛峰之间设置 5 个类似的监测点(图 2)。每个监测点由点距 50 m 的测量用花杆和竹竿阵组成,以期采集到近 5 年来的蓝冰消融率和冰流速度,建立格罗夫山陨石富集规律模型。此外,格罗夫山地区的下降风和流行风特别强烈,夏季 5 级以上大风占 62.9% 以上,富集的陨石在强风作用下易发生碰撞破碎和风化,这个结论和在格罗夫山收集到 0.1~0.5g 重量的陨石占比最多一致。

5 结论、问题分析和建议

我国经过 7 次南极格罗夫山考察,成功回收陨石 12 665 块,证明格罗夫山为南极陨石富集区。但相对于南极其他的陨石富集区,我国在格罗夫山收集的陨石数量多,平均重量小,特殊类

型陨石所占比例偏低,至今没有发现月球陨石。主要原因为:(1)相对于国际上研究程度高的陨石富集区,格罗夫山冰流速率快、流向复杂、冰裂隙发育、夏季盛行偏东风且风力大,可能是格罗夫山陨石碎块相对富集的客观原因;(2)我国在格罗夫山收集陨石基本采用徒步方式,可搜寻的范围非常有限,与美国在横贯南极山脉等地采用雪地摩托车大范围的搜寻方式有很大不同,搜寻方式的差别可能是造成格罗夫山回收陨石数量多但质量小的主要原因;(3)在历次格罗夫山陨石考察中,回收的蓝冰型陨石总体上逐步下降,第5—7次考察收集的小质量陨石大部分发现于冰碛带中,这些陨石成对的比例较大;(4)限于冰裂隙发育等安全因素考虑,我国并未在蓝冰区开展大面积陨石搜寻工作。

为了持续有效开展我国南极陨石回收工作,提高特殊类型陨石回收比例,以产生更有价值的

科研成果,建议:(1)制定周密的野外工作方案,利用雪地摩托车在格罗夫山扩大蓝冰区的搜寻范围,进一步提高陨石单块重量和特殊类型陨石比例;(2)尽快采集格罗夫山地区的蓝冰消融率、不同区域冰川流向和流速、全年的气象条件等方面的数据,建立健全格罗夫山陨石富集机制模型,对合理规划格罗夫山陨石科考和探索新的陨石富集区具有重要意义;(3)陨石的富集需要几千年甚至上万年的时间,格罗夫山富集区可回收的陨石资源量所剩不多,急需探测新的陨石富集区,依托于中山站的南查尔斯王子山和罗斯海新站的横贯南极山脉南延部分是下一步陨石勘探的潜力区。

致谢:中国历次南极格罗夫山科考队和中国极地研究中心提供了部分资料,匿名审稿人提出了很好的修改意见,在此一并感谢。

参考文献

- 1 DODD R T. Meteorites: A petrologic-chemical synthesis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1981: 368.
- 2 YOSHIDA M, ANDO H, OMOTO K, et al. Discovery of meteorites near Yamato Mountains, east Antarctica[J]. Antarctic Record, 1971, 39(39): 62-65.
- 3 YOSHIDA M. Discovery of the Yamato meteorites in 1969[J]. Polar Science, 2010, 3(4): 272-284.
- 4 ANNEXSTAD J O. The meteorite concentration mechanism at Allan Hills, Antarctica[J]. Composites Part B Engineering, 1980, 78(4): 8-25.
- 5 ANNEXSTAD J O. Some observations on the mechanism of meteorite concentration in Victoria Land, Antarctica [J]. Meteoritics, 1981, 16: 290.
- 6 YANAI K, KOJIMA H, SCHULTZ L, et al. Over 5,600 Japanese collection of Antarctic meteorites: Recoveries, curation and distribution[J]. In Lunar and Planetary Inst. International Workshop on Antarctic Meteorites, 1986: 113-116.
- 7 DELISLE G, SIEVERS J. Meteorites, concentration mechanisms at the Allan Hills, Victoria Land, Antarctica[J]. Journal of Agronomy & Crop Science, 1989, 24(1): 25-36.
- 8 HARVEY R P, MEIBOM A, HAACK H. Meteorite stranding surfaces and the Greenland icesheet[J]. Meteoritics & Planetary Science, 2001, 36(6): 807-816.
- 9 HARVEY R. The origin and significance of Antarctic meteorites[J]. Geochemistry, 2003, 63(2): 93-147.
- 10 刘小汉, 琚宜太. 格罗夫山:我国新发现的一个陨石富集区[J]. 极地研究, 2002, 14(4): 243-247.
- 11 缪秉魁. 格罗夫山陨石考察现状及其发展设想[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2015, 34(6): 1079-1089.
- 12 缪秉魁, 林杨挺, 王道德, 等. 我国南极陨石收集进展(2000-2010)[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2012, 31(6): 565-574.
- 13 王道德, 林杨挺. 我国回收的南极陨石分类研究综述[J]. 极地研究, 2002, 14(4): 252-265.
- 14 缪秉魁, 欧阳自远, 林杨挺, 等. 我国南极陨石研究的新进展[J]. 地质科技情报, 2008(1): 16-22, 33.
- 15 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.
- 16 林杨挺, 王道德, 欧阳自远. 中国南极陨石研究新进展[J]. 极地研究, 2008, 20(2): 81-94.
- 17 LIN Y T, WANG D D, OUYANG Z Y. Progress in study of Chinese Antarctic Meteorites[J]. Advance in Polar Science, 2009, 20(2): 81-96.
- 18 陈宏毅, 缪秉魁, 谢兰芳, 等. 南极月球陨石 MIL05035 矿物学、岩石学及演化历史[J]. 岩石学报, 2015, 31(4): 1171-1182.

- 19 程晓, 李小文, 邵芸, 等. 南极格罗夫山地区冰川运动规律 DINSAR 遥感研究[J]. 科学通报, 2006, 51(17): 2060-2067.
- 20 王泽民, 谭智, 艾松涛, 等. 南极格罗夫山核心区冰下地形测绘[J]. 极地研究, 2014, 26(4): 399-404.
- 21 周春霞, 邓方慧, 陈一鸣, 等. 利用 SAR 数据研究南极 Grove 山地区冰流运动特征[J]. 武汉大学报, 2015, 40(11): 1428-1433.
- 22 程彦杰, 陆龙骅, 卞林根, 等. 东南极格罗夫山地区夏季的天气特征[J]. 极地研究, 1999, 11(4): 291-300.
- 23 据宜太, 刘小汉. 格罗夫山地区陨石回收[J]. 极地研究, 2000, 12(2): 137-142.
- 24 陈晶, 刘小汉, 据宜太, 等. 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.
- 25 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.
- 26 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.
- 27 据宜太, 缪秉魁. 南极格罗夫山 2002-2003 年收集 4448 块陨石: 新陨石富集区的证实[J]. 极地研究, 2005, 17(3): 215-223.
- 28 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.
- 29 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.
- 30 缪秉魁, 林杨挺, 周新华. 南极格罗夫山普通球粒陨石的化学-岩石类型分布及成对陨石的判别[J]. 科学通报, 2003, 48(8): 874-880.
- 31 MIAO B K, LIN Y T, ZHOU X H. Type distribution pattern and pairing of ordinary chondrites from Grove Mountains, Antarctica [J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(9): 908-913.
- 32 LU R, MIAO B K, WANG G Q, et al. Classification of 24 new ordinary chondrites from the Grove mountains, Antarctica[J]. Acta Geologica Sinica - English Edition, 2004, 78(5): 1052-1059.
- 33 李世杰, 王世杰, 刘燊, 等. 100 块南极格罗夫山陨石的类型划分及其岩石学特征[J]. 极地研究, 2008, 20(2): 177-188.
- 34 王英, 徐伟彪, 王鹤年, 等. 南极格罗夫山普通球粒陨石的矿物岩石学特征[J]. 极地研究, 2008, 20(2): 129-140.
- 35 缪秉魁, 王道德, 胡森, 等. 100 块南极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.
- 36 胡森, 刘焯, 冯璐, 等. 100 块南极格罗夫山陨石的化学-岩石类型[J]. 极地研究, 2008, 20(2): 208-218.
- 37 JIANG Y, HUS W B. Subdivision of petrologic type of unequilibrated ordinary chondrites from Antarctica[J]. Advances in Polar Science, 2009, 20(2): 135-150.
- 38 DAI D, LIN Y, WANG D, et al. The Petrography, Mineral Chemistry of 6 New Unequilibrated Ordinary Chondrites Collected from the Grove Mountains, Antarctica[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2009, 3(3): 405-412.
- 39 JIANG Y, HSU W B. Subdivision of petrologic type of unequilibrated ordinary chondrites from Antarctica[J]. Advances in Polar Science, 2009, 20(2): 135-150.
- 40 DAI D Q, WANG D D, MIAO B K. Weathering, shock metamorphism and type distribution patterns of 98 ordinary chondrites from the Grove Mountains, Antarctica[J]. Chinese journal of polar science, 2009, 20 (2): 138-147.
- 41 李世杰, 王世杰, 刘燊, 等. 部分格罗夫山陨石的类型划分及其矿物岩石学特征[J]. 极地研究, 2013, 25(4): 369-377.
- 42 XIA Z P, ZHANG J, MIAO B K, et al. Meteorite classification for building the Chinese Antarctic Meteorite Depository-Introduction of the classification of 500 Grove Mountains meteorites[J]. Advance in Polar Science, 2016, 27(1): 56-63.
- 43 LIN Y T, WANG D D, MIAO B K, et al. Grove Mountains (GRV) 99027: A new Martian meteorite[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(16): 1771-1774.
- 44 林杨挺, 王道德, 缪秉魁, 等. 南极格罗夫山陨石 GRV99027: 一个新的火星陨石[J]. 科学通报, 2003(16): 104-108.
- 45 MIAO B K, OUYANG Z Y, WANG D D, et al. A new Martian meteorite from Antarctica: Grove mountains (GRV) 020090[J]. Acta Geologica Sinica - English Edition, 2004, 78(5): 1034-1041.
- 46 LIN Y T, GUAN Y B, WANG D D, et al. Petrogenesis of the new lherzolitic shergottite Grove Mountains 99027: Constraints of petrography, mineral chemistry, and rare earth elements[J]. Meteoritics & Planetary Science, 2005, 40(11): 1599-1619.
- 47 王鹤年, 徐伟彪, 管云彬, 等. 南极格罗夫山 GRV 99027 二辉橄榄岩质火星陨石的氢同位素地球化学[J]. 科学通报, 2006, 51(19): 2292-2296.
- 48 WANG H N, HSU W B, GUAN Y B, et al. Hydrogen isotope geochemistry of lherzolitic shergottite in Martian meteorite GRV99027 from the Grove Mountains in Antarctica[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(16): 2001-2005.
- 49 WANG D Q, CHEN M. Shock-induced melting, recrystallization, and exsolution in plagioclase from the Martian lherzolitic shergottite

- GRV 99027[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2006, 41(4): 519-527.
- 50 孔屏, FABEL D, BROWN R, et al. 南极格罗夫山火星陨石 GRV 99027 的宇宙射线暴露年龄[J]. *中国科学(地球科学)*, 2007, 37(8): 1020-1023.
- 51 KONG P, FABEL D, BROWN R, et al. Cosmic-ray exposure age of Martian meteorite GRV 99027[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, 50(10): 1521-1524.
- 52 王鹤年, 谢志东, 徐伟彪, 等. 南极 GRV 99027 火星陨石的地球化学特征[J]. *极地研究*, 2008, 20(2): 105-128.
- 53 LIN Y T, LIU T, SHEN W, et al. Grove mountains (GRV) 020090: A highly fractionated lherzolitic shergottite[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2008, 43, A86-A86.
- 54 WANG H N, XIE Z D, LIANG Y. Geochemistry of the Martian Meteorite GRV 99027[J]. *Chinese Journal of Polar Science*, 2009, 20(2): 110-134.
- 55 LIU T, LI C F, LIN Y T. Rb-Sr and Sm-Nd isotopic systematics of the lherzolitic shergottite GRV 99027[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2011, 46(5): 681-689.
- 56 JIANG Y, HSU W. Petrogenesis of Grove Mountains 020090: An enriched "lherzolitic" shergottite[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2012, 47(9): 1419-1435.
- 57 LIN Y T, HU S, MIAO B K, et al. Grove Mountains 020090 enriched lherzolitic shergottite: A two-stage formation model[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2013, 48(9): 1572-1589.
- 58 HU S, LIN Y T, ZHANG J, et al. NanoSIMS analyses of apatite and melt inclusions in the GRV 020090 Martian meteorite: Hydrogen isotope evidence for recent past underground hydrothermal activity on Mars[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 2014, 140: 321-333.
- 59 STEPHENSON P C, LIN Y T, LEYA I. The noble gas concentrations of the Martian meteorites GRV 99027 and paired NWA 7906/NWA 7907[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2017, 52(12): 2505-2520.
- 60 LIN Y T, WANG D D, WANG G Q. A tiny piece of basalt probably from asteroid 4 vesta[J]. *Acta Geologica Sinica - English Edition*, 2004, 78(5): 1025-1033.
- 61 刘焱, 林杨挺, 胡森, 等. GRV 051523: 一块新的灶神星陨石[J]. *极地研究*, 2008, 20(2): 219-228.
- 62 陈宏毅. HED 族陨石的岩石学成因及其对母体岩浆演化的指示[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2018: 37-43, 106, 130.
- 63 陈宏毅, 缪秉魁, 谢兰芳, 等. HED 族陨石: 分异型小行星物质组成和演化. *矿物岩石地球化学通报*[J]. 2016, 35(5): 1037-1052.
- 64 梁英, 王鹤年, 徐伟彪, 等. 南极 GRV 021788 橄辉无球粒陨石的岩石学和矿物学特征[J]. *地球化学*, 2006, 35(1): 19-26.
- 65 王道德, 缪秉魁, 林杨挺. 我国南极橄辉无球粒陨石(GRV 024516)和 H5 球粒陨石(GRV 024517)宇宙射线暴露年龄和气体保存年龄[J]. *极地研究*, 2006, 18(3): 157-165.
- 66 MIAO B K, LIN Y T, WANG G Q, et al. Petrology and mineral chemistry of new ureilites found in Grove Mountains, Antarctica[J]. *Progress in Natural Science*, 2008, 18(4): 431-439.
- 67 MIAO B K, LIN Y T, WANG D D, et al. Grove mountains (GRV) 052382 - likely a most heavily shocked ureilite[C]. *Workshop on Antarctic Meteorites-search*, 2008, 43(7): 3579-3588.
- 68 缪秉魁, 林杨挺, 胡森, 等. 东南极格罗夫山陨石(GRV 052382): 一块强烈冲击变质的橄辉无球粒陨石[J]. *岩石学报*, 2009, 26(12): 3579-3588.
- 69 江小英, 王桂琴, 缪秉魁. 南极 GRV 024237 橄辉无球粒陨石的岩石矿物学特征[J]. *极地研究*, 2010, 22(4): 375-385.
- 70 MIAO B K, LIN Y T, HU S, et al. Grove Mountains (GRV) 052382 from East Antarctica: Likely a most heavily shocked ureilite[J]. *Acta Petrologica Sinica* , 2010, 26(12): 3579-3588.
- 71 JIANG X Y, WANG G Q, WANG D D, et al. Grove Mountains (GRV) 024237: A new ureilite from Antarctica[J]. *Advances in Polar Science*, 2012, 23(1): 25-29.
- 72 黄婉, 何琦, 肖龙. 南极 GRV 022888 和 GRV 052408 橄辉无球粒陨石的岩石矿物学特征及成因探讨[J]. *极地研究*, 2014, 26(3): 369-377.
- 73 LI S J, WANG S J, BAO H M, et al. The Antarctic achondrite, Grove Mountains 021663: An olivine-rich winonaite [J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2011, 46(9): 1329-1344.
- 74 ZENG X J, SHANG Y L, LI S J, et al. The layered structure model for winonaite parent asteroid implicated by textural and mineralogical diversity[J]. *Earth, Planets and Space*, 2019, 71: 38.

- 75 LI S J, YIN Q Z, BAO H M, et al. Evidence for a multilayered internal structure of the chondritic acapulcoite-lodranite parent asteroid[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2018, 242: 82-101.
- 76 李世杰, 王世杰, 刘燊等. 南极格罗夫山陨石 GRV 020043: 一个特殊的 E/H 过渡型球粒陨石[J]. *地质学报*, 2011, 85(1): 131-137.
- 77 王道德, 林杨挺. 南极 GRV 98003 和其他 3 个铁陨石的化学组成及分类[J]. *极地研究*, 2004, 16(2): 4-13.
- 78 WANG D D, LIN Y T. Chemical compositions and classification of Grove Mountains (GRV) 98003 and other Chinese iron meteorites[J]. *Advances in Polar Science*, 2005, 16(1): 13-22.
- 79 DAI D Q, WANG D D. Petrography and Mineral Chemistry of 4 Carbonaceous Chondrites from the Grove Mountains, Antarctica[J]. *Advances in Polar Science*, 2009, 20(2): 166-171.
- 80 DAI D Q, LIN Y T, MIAO B K, 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- English Edition*, 2004, 78(5): 1042-1051.
- 81 戴德求, 林杨挺, 缪秉魁, 等. 南极碳质球粒陨石中两个富尖晶石球粒状难熔包体的岩石学和矿物化学特征[J]. *地球化学*, 2006, 35(5): 540-546.
- 82 DAI D Q, LIN Y T. Petrography and mineral chemistry of two spinel-rich spherules in carbonaceous chondrites from the Antarctica [J]. *Geochimica*, 2006, 5: 414-419.
- 83 DAI D Q, CHEN X Y, YANG R F. Comparison of petrography and mineral chemistry characteristics among olivine and Ca, Al-rich assemblages [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2013, 48(3): 762-772.
- 84 DAI D, ZHOU C, CHEN X. Ca-, Al-rich inclusions in two new carbonaceous chondrites from grove mountains, Antarctica[J]. *Earth, Moon, and Planets*, 2015, 115(1/2/3/4): 101-114.
- 85 ZHAO X, FLOSS C, LIN Y T, et al. Stardust investigation into the CR chondrite Grove Mountain 021710[J]. *The Astrophysical Journal*, 2013, 769: 1-16.
- 86 谢兰芳, 陈宏毅, 缪秉魁, 等. GRV 13100: 一块在南极新发现的顽火辉石球粒陨石[J]. *极地研究*, 2019, 31(2): 168-178.
- 87 谢兰芳, 陈宏毅, 缪秉魁. GRV 13100 顽火辉石球粒陨石中金属硫化物特征与成因[J]. *矿物学报*, 2020, 40(1): 83-91.
- 88 FENG L, LIN Y T, HU S, et al. Assemblages of olivine polymorphs in Grove Mountains (GRV) 052049: constraints on pressure-temperature condition of shock metamorphism[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2007, 42(17): 69-88.
- 89 FENG L, MIYAHARA M, NAGASE T, et al. Chemically fractionated olivine-wadsleyite-ringwoodite assemblages in Grove Mountains meteorites: Constraints on formation mechanism of ringwoodite[C]. *AGU Fall Meeting*, 2009.
- 90 FENG L, LIN Y T, HU S, et al. Shock metamorphism of ordinary chondrites from Grove Mountains, Antarctica[J]. *Advances in Polar Science*, 2009, 20(2): 187-199.
- 91 FENG L, LIN Y T, HU S, et al. Estimating compositions of natural ringwoodite in the heavily shocked Grove Mountains 052049 meteorite from Raman spectra[J]. *American Mineralogist*, 2011, 96(10): 1480-1489.
- 92 FENG L, MIYAHARA M, NAGASE T, et al. Shock-induced P-T conditions and formation mechanism of akimotoite-pyroxene glass assemblages in the Grove Mountains (GRV) 052082 (L6) meteorite[J]. *American Mineralogist*, 2017, 102(6): 1254-1262.
- 93 XIE Z, LI X, SHARP T G, et al. Ringwoodite rims around olivine cores in shock-induced melt veins of an Antarctic chondrite: Mechanisms of Transformation and Fe-Mg Diffusion[R]. *New York: 73rd Annual Meeting of the Meteoritical Society*, 2010.
- 94 XIE Z, LI X, SHARP T G, et al. Shock-induced ringwoodite rims around olivine fragments in melt vein of Antarctic chondrite GRV022321: Transformation Mechanism[R]. *California: American Geophysical Union Fall Meeting*, 2011.
- 95 XIE Z, LI Y, ZUO S, et al. Major silicate phase transformations and nano-Fe formation in shock-induced melt vein of Antarctic chondrite GRV 022115[R]. *Texas: 48th Lunar and Planetary Science Conference*, 2017.
- 96 XIE Z, LI X, SHARP T G, et al. Ringwoodite rims around olivine fragments in melt vein of Antarctic chondrite GRV 022321: Transformation kinetics[R]. *Edmonton: 76th Annual Meeting of the Meteoritical Society*, 2013.
- 97 冯璐, 林杨挺, 胡森, 等. 南极格罗夫山球粒陨石冲击变质程度及特征[J]. *极地研究*, 2008, 20(2): 189-200.
- 98 张广良, 李春来, 刘建忠, 等. 南极陨石 GRV052483 中岩石矿物学特征: 撞击熔融型普通球粒陨石[J]. *极地研究*, 2008, 20(2): 201-207.
- 99 王江, 缪秉魁. 南极格罗夫山 H 群普通球粒陨石冲击变质特征[J]. *极地研究*, 2010, 22(3): 231-243.
- 100 ZHONG X, PATEL S S, WERNEBURG G, et al. Partial transformed high pressure phases in shocked-induced melt vein of Antarctic

- GRV meteorites[J]. *Lip contribution*, 2015, 1856(39): 11891-11900.
- 101 朱佳玲, 缪秉魁, 高杨, 等. 南极陨石 GRV090228 的岩石矿物学及冲击变质特征[J]. *桂林理工大学学报*, 2018, 38(2): 230-238.
- 102 LORENZETTI S, LIN Y T, WANG D D, et al. Noble gases and mineralogy of meteorites from China and the Grove Mountains, Antarctica: A 0.05 Ma cosmic ray exposure age of GRV 98004[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2003, 38(8): 1243-1253.
- 103 RANJITH P M, HE H Y, Miao B K, et al. Petrographic shock indicators and noble gas signatures in a H and an L chondrite from Antarctica. *Planetary and Space Science*, 2017, 146: 20-29.
- 104 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方法对比分析[J]. *极地研究*, 2013, 25(4): 362-368.
- 105 罗红波, 林杨挺, 胡森, 等. 南极格罗夫山陨石的磁化率[J]. *岩石学报*, 2009, 25(5): 1260-1274.
- 106 尚颖丽, 李世杰, 王世杰, 等. 南极普通球粒陨石风化等级的重新厘定[J]. *岩石学报*, 2016, 32(1): 71-76.
- 107 WLOTZKA F. A weathering scale for the ordinary chondrites[J]. *Meteoritics*, 1993, 28(3): 460.
- 108 JIANG Y, HSU W B, GUAN Y B, et al. In situ SIMS oxygen isotope analyses: Evidence for the formation of aluminum-rich chondrules from ordinary chondrites[J]. *Science China Earth Sciences*, 2015, 58(10): 1748-1757.
- 109 蒋云, 徐伟彪, GUAN Y B, 等. 普通球粒陨石中富铝球粒的成因: 离子探针氧同位素证据[J]. *中国科学: 地球科学*, 2015, 9: 1324-1334.
- 110 CASSIDY W A, OLSEN E, YANAI K. Antarctica: A deep-freeze storehouse for meteorites[J]. *Science*, 1977, 198: 727-731.
- 111 CASSIDY W, HARVEY R, SCHUTT J, et al. The meteorite collection sites of Antarctica[J]. *Meteoritics*, 1992, 27(5): 490-525.
- 112 ANNEXSTAD J O, SCHULTZ L, WAENKE H. Meteorite concentration mechanisms in Antarctica[J]. *Lunar and Planetary Institute, International Workshop on Antarctic Meteorites*, 1986, 1: 23-25.
- 113 FOLCO L, CAPRA A, CHIAPPINI M, et al. The Frontier Mountain meteorite trap (Antarctica)[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2002, 37(2): 209-228.
- 114 CASSIDY W A. *Meteorites, ice, and Antarctica (A personal account)*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003: 227-319.
- 115 YOSHIDA M. Discovery of the yamato meteorites in 1969[J]. *Polar Science*, 2010, 3(4): 272-284.
- 116 鄂栋臣, 张辛, 王泽民, 等. 利用卫星影像进行南极格罗夫山蓝冰变化监测[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2011, 36(9): 1009-1011, 1016.
- 117 周春霞, 邓方慧, 陈一鸣, 等. 利用 SAR 数据研究南极 Grove 山地区冰流运动特征[J]. *武汉大学学报*, 2015, 40(11): 1428-1433.
- 118 王泽民, 谭智, 艾松涛, 等. 南极格罗夫山核心区冰下地形测绘[J]. *极地研究*, 2014, 26(4): 399-404.

RECOVERIES, RESEARCH PROGRESS, AND CONCENTRATION MECHANISM OF METEORITES IN THE GROVE MOUNTAINS, ANTARCTICA

Chen Hongyi¹, Miao Bingkui¹, Xia Zhipeng¹, Xie Lanfang¹, Zhao Sizhe^{1,2}

¹Guangxi Key Laboratory of Hidden Metallic Ore Deposits Exploration, Guangxi Key Laboratory of Planetary Geological Evolution, Research Center of Meteorites and Planetary Materials, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China;

²Center for Lunar and Planetary Sciences, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China)

Abstract

China has successfully recovered 12 665 meteorites in the previous seven expeditions to the Grove Mountain region of Antarctica, unarguably demonstrating that the Grove Mountains are a meteorite concentration area. However, meteorites recovered from the Grove Mountains display larger numbers, lower average weights and smaller proportions of specific types of meteorites compared with other meteorite concentration areas in Antarctica. A total of 9 802 meteorites (106.5 kg) were collected in the third and fourth Grove Mountains expeditions, accounting for 77.4% and 82.5% of the total amount and weight, respectively. Then, the number and weight of meteorites recovered in the Grove Mountain region continually decreased from 1 618(17.1 kg) to ~600 (~2.0 kg) in the following three missions. Compared with mature meteorite concentration areas in Antarctica, the ice flow rate of the Grove Mountains is fast, the flow direction is complex, the crevasses of glacier are well developed, and the prevailing easterly wind in summer is strong, which may be the reasons for the relative enrichment of meteorite fragments in the Grove Mountains. However, the data of ablation rates of blue ice, glacier velocity, and annual meteorological conditions are insufficient. Therefore, it is of great significance to collect glacier change and meteorological data as soon as possible and to establish a model of the meteorite concentration mechanism in the Grove Mountains for reasonable planning of meteorite scientific expeditions to the Grove Mountains and the exploration of new meteorite concentration areas.

Key words Antarctica, Grove Mountains, meteorite recovery, research progress, concentration mechanism