

研究综述

极地微陨石的收集、研究与设想

夏志鹏^{1,2,3} 缪秉魁^{1,2,3} 张川统^{1,2,3} 黄丽霖^{1,2,3}

¹广西隐伏金属矿产勘查重点实验室, 桂林理工大学, 广西 桂林 541004;

²行星地质演化广西高校重点实验室, 桂林理工大学, 广西 桂林 541004;

³陨石与行星物质研究中心, 桂林理工大学, 广西 桂林 541004)

提要 微陨石对于人类研究地外环境和太阳系的演化而言, 具有极其重要的意义。20 世纪 40 年代开始, 微陨石的收集便成了国际上的热点。尤其是 80 年代后, 通过在南北两极开展微陨石收集, 产出了大量的科学成果。我国的微陨石研究主要集中在 20 世纪 80—90 年代, 而后便处于停滞的状态。本文简要介绍了各国在极地微陨石方面取得的成果, 基于我国陨石和微陨石的研究现状, 对我国开展极地微陨石研究提出了几点设想和规划。

关键词 微陨石 南极 北极 陨石 收集

doi: 10.13679/j.jdyj.20180014

0 引言

21 世纪以来, 人们普遍将粒径约小于 2 mm, 收集于地表的天然固体物质定义为微陨石^[1-2]。据统计, 地球每年吸积的地外物质总量为 4×10^4 t, 其中大部分为微陨石^[3]。微陨石作为了解太阳系乃至恒星际空间的钥匙, 其收集与研究已经成为天体化学和空间科学的热点研究领域^[4-6]。20 世纪 80 年代起, 世界各国在两极地区进行了大规模的微陨石收集, 并取得了十分可观的科学成果。1998 年以来, 我国在南极格罗夫山地区开展了 7 次陨石考察工作, 成功收集了一万多块陨石^[7-10]。经过 20 年的发展, 我国的南极陨石考察与研究队伍已经逐渐成熟, 因此, 我国应在南极陨石的工作基础上, 尽快开展系统的极地微陨石的收集与研究。在我国南极内陆科学考察 30 周年之际, 本文总结了南北两极微陨石的收集情况和研究进展,

并结合我国陨石与微陨石研究现状提出了几点设想, 希望本文能为我国极地微陨石的研究提供一些启示。

1 微陨石的研究

自第一次发现微陨石^[11], 已经过去了一个多世纪, 人们在不同的环境中收集了相当多的微陨石, 对其开展了详细的科学研究, 获取了一大批科学成果。

1.1 微陨石的收集

微陨石是在 1873—1876 年间, 英国皇家海军舰艇挑战者号(Her/His Majesty's Ship Challenger)在进行远洋科学考察过程中, 于深海黏土内首次被发现, 这为人类开启了探索地外物质的新窗口^[11]。后来, 国内外学者先后在深海沉积物^[12]、内陆沉积岩^[13]、沙漠^[14]等工业污染物较低的环境中, 收集了大量的微陨石。随着科学技术的飞速发展, 微

[收稿日期] 2018 年 3 月收到来稿, 2018 年 4 月收到修改稿

[基金项目] 国家自然科学基金项目(41173077、41776196)、科技部国家科技基础条件平台项目(2005DKA21406)、广西科技计划项目(桂科 AD16450001)、桂林理工大学 2017 年大学生创新创业训练计划项目(201710596005)资助

[作者简介] 夏志鹏, 男, 1990 年生。实验师, 博士研究生, 主要研究陨石。E-mail: xiazhipeng@glut.edu.cn

[通信作者] 缪秉魁, E-mail: miaobk@glut.edu.cn

陨石的收集逐渐由原来的地面环境扩展到近地空间。此外,伴随着极地科学考察成为各国科学研究的热点,极地陨石与微陨石收集也成为一个重要研究领域。总的来说,根据不同时间段收集环境的差异,微陨石收集历史可分为以下三个阶段。

1. 第一阶段(20世纪40—70年代)

微陨石的大规模收集是在20世纪40年代以后,大量科学家们开始在深海中进行微陨石采样^[12,15-16]。根据采样的方式不同,可以分为两种:(1)利用磁性的金属耙在深海沉积物中直接吸取微陨石;(2)深海中采集大量软泥或黏土,在地面实验室进行微陨石的挑选。两种收集方式各有特色,前者采集方式简单,颗粒中微陨石丰度高但类型单一,主要类型为含金属或磁铁矿的微陨石;后者挑选工作相对复杂,但微陨石类型丰富,除前者收集的类型外,还发现了多种类型的石质微陨石。

在这个时间段中除大规模深海采集微陨石外,国内外学者还在其他环境进行了一些小范围的采集。例如,在更新世的海滩砂砾发现了大量磁性的微陨石^[13];在美国南加州沙漠中发现了2颗微陨石^[17];在志留纪和二叠纪的沉积岩盐矿床中收集了少量微陨石^[18]。值得注意的是,期间极地微陨石的收集也开始了,如Langway等^[19]在北极格陵兰岛(Greenland)通过融化新鲜雪收集微陨石;Nishibori等^[20]在南极冰架边缘的日本昭和站附近通过融化冰山上的冰收集微陨石;Thiel等^[21]在冰芯中偶然也发现了少量微陨石。虽然以上工作收集的微陨石数量非常少,但在方法上,为往后的大规模极地微陨石收集起到了重要的示范作用。

2. 第二阶段(20世纪70—90年代)

真正大规模的微陨石收集是在20世纪70年代之后,微陨石的收集范围先从平流层到太平洋中部,再到格陵兰和南极冰盖。

20世纪70—90年代,微陨石的主要收集环境为大气层。由于平流层尘粒的通量比行星际空间高出3—5个数量级,各国利用探空火箭、飞机和高空热气球对平流层微陨石进行采集^[22]。1967—1970年,国际上开始利用热气球开始高空微陨石收集,从收集到的尘粒中筛选出了少量的微陨石^[23-24]。1974年,美国国家航空和宇宙航行局(NASA)开

始尝试在高空利用飞行器进行微陨石收集^[25]。在成功采集了300多颗微陨石样品后,自1981年起,NASA利用飞行器在平流层中开展长期收集工作^[26]。在本阶段中,日本、德国、法国等也开展了小规模的大气层微陨石收集^[27]。在1984—1987年间,我国采用热气球的方式在30—36 km的平流层中,开展了5次微陨石的收集,并成功筛选了上百颗微陨石^[28]。

除高空收集外,本阶段内还开始了大规模的极地微陨石收集。1984年,法国的Maurette等^[29]首先在格陵兰岛冰架边缘的湖水中收集了大量微陨石,其中熔融(部分熔融)微陨石约750颗,未熔融微陨石约250颗,并计算了该湖水微陨石的通量。1987年,Maurette等^[30]又开始在南极进行大规模的融冰,从100 t冰中的残余沉积物内筛选了上千颗微陨石。至此,拉开了极地大规模采集微陨石的序幕。

3. 第三阶段(20世纪90年代至今)

从20世纪90年代开始,美国、日本、俄罗斯、法国-意大利、比利时等考察队开始在两极地区进行系统的微陨石采集,并收获了大量的样品。例如,美国考察队^[31-32]于1995年和2000年,在阿蒙森斯科特站(Amundsen-Scott Station)的水井底部利用特殊的机器人采集微陨石;法国和意大利的合作考察队于1991、2000、2002、2006、2013年在冰穹C(Dome C)的康科迪亚(Concordia)考察站,不仅通过融化新鲜降落的雪来收集微陨石,而且在古老的花岗岩裂隙或大裂缝中找到微陨石^[33-34];日本队自1995年起,在富士站(Fuji Station)和大和山地区(Yamato Mountains)共开展了超过10次微陨石收集^[35-36]。这一阶段,根据沉积物中微陨石的分布密度初步估计,国外极地科考队共采集到的微陨石总量达到了数百万颗^[37],详细的收集成果在下一节描述。

除在极地开展系统地微陨石采集外,其他环境的微陨石收集也达到了高潮,并取得了可观的收集成果。例如,城镇高楼^[38]、太平洋中部的大气^[39]、古老的沉积灰岩^[40]、内陆蒸发岩^[41]等。

1.2 微陨石的研究

尽管人们在一百多年前就已经发现了微陨石,但因其细小的粒径导致人们早期对其开展深入研究具有一定的难度。在进行系统的微陨石研究之

前,曾出现将地球金属颗粒误认为微陨石的错误报道。20 世纪 70 年代后,随着大气层及两极地区微陨石的大量收集,以及分析技术的快速发展,微陨石的研究逐步深入。本节简要介绍三方面:微陨石的类型及其特征、微陨石的沉降通量、微陨石的来源。

1.2.1 微陨石的类型及基本特征

微陨石在大小、质量、成分和结构等方面是多种多样的。在收集微陨石的过程中,如何区分微陨石与地球物质是其关键,因此,了解微陨石的类型和基本特征是收集和研究的微陨石前提条件。

从大量球体样品中筛选出或识别出微陨石是开展微陨石研究的前提。所有已发现的微陨石与地球微型球体相比,除同位素地球化学特征外,可以从以下 3 个特征进行快速鉴别:(1)具有与陨石相似的成分特征;(2)含有富 Ni 的金属;(3)具有完整或残余的磁铁矿壳^[42-44]。

微陨石以极高速飞向地球,因其特别小的质量($<10^{-2}$ g),微陨石飞行方向与地球自转方向角

度的不同,导致了微陨石在大气层中的熔融程度具有明显的差异(图 1),甚至有大量的原始未熔融微陨石。因此,人们常根据微陨石的熔融程度对其进行分类:熔融群、部分熔融群、原始群/未熔融群,并对不同类型进行了细分^[42,44-45]。然而,因对微陨石的定义不同,微陨石的类型划分具有少量的区别。笔者结合前人的分类标准,根据本文对于微陨石的定义,划分如表 1,因篇幅有限,仅作简要说明。

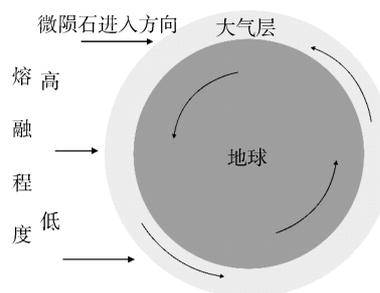


图 1 微陨石进入大气层中熔融程度示意图

Fig.1. Melting degree of micrometeorites during atmospheric entry

表 1 微陨石的基本类型
Table 1. Basic classification of micrometeorites

| 群(Group) | 类(Class) | 型(Type) |
|----------------------------|------------------------------|---|
| 熔融(Melted) | 宇宙消融球体 (Cosmic Spherules) | 硅酸盐型(Silicate type, S型) 磁铁矿-玻璃质型(Glass with magnetite type, G型) 富铁型(iron-rich type, I型) |
| | 陨石消融球体(Ablation Spheres) | — |
| | 细粒类(Fine-grained) | C1、C2、C3 |
| 原始/未熔融(Primitive/Unmelted) | 粗粒类(Coarse-grained) | 球粒陨石质(Chondritic) |
| | 难熔类(Refractory) | — |
| | 超碳质类(Ultracarbonaceous) | — |
| 部分熔融(Partially Melted) | 熔渣类(Scoriaceous) | — |

1. 熔融群(Melted Micrometeorites): 是指在大气层中完全熔融的微陨石。熔融群在所有微陨石中所占的比例与其粒径有着密切关系, Maurette 等^[29]在已发现的 2 500 颗南极微陨石中, 粒径小于 100 μm 的微陨石中, 熔融群约占 20%, 粒径大于 100 μm 的, 熔融群所占比例超过了 50%, 而粒径超过 400 μm 的, 熔融群所占比例接近 90%。根据微陨石的来源, 熔融群被分为两大类: 宇宙消融球粒和陨石消融球体。宇宙消融球粒(Cosmic Spherules)在进入大气层前, 其本身为矿物集合体或单晶, 根据矿物组成可分为硅酸盐型(S 型)、磁铁矿-

玻璃质型(G 型)、富铁型(I 型)。陨石消融球体(Ablation Spheres)为陨石在进入大气层时, 表面高温熔融后掉落的球形熔融体, 主要为玻璃质, 成分上与陨石母体的全岩成分十分接近。因此, 陨石消融球体的类型多样, 与陨石类型一致。在部分文献中, 陨石消融球体作为陨石的消融产物, 并不属于微陨石^[46]。

2. 原始/未熔融群(Primitive/Unmelted Micrometeorites): 该群未见明显的熔融现象, 保留了更丰富的地外信息, 是近些年微陨石收集的热点。该群主要分为细粒类(Fine-grained)、粗粒类

(Coarse-grained)、难熔类(Refractory)、超碳质类(Ultarcarbonaceous)。细粒类和粗粒类是本群中较常见的类型, 两者的首要区别在于单矿物颗粒粒径不同。(1)细粒类原始群微陨石主要由粒径小于 $1\ \mu\text{m}$ 的矿物组成。在全岩成分上, 细粒类与球粒陨石的基质类似, 大部分与CI、CM、CR型碳质球粒陨石接近。根据结构和化学成分均一程度, 将细粒类划分为C1、C2、C3三种类型。(2)大部分粗粒类原始群微陨石的结构与球粒陨石的十分相似, 常呈斑状结构, 斑晶主要为大于 $1\ \mu\text{m}$ 的无水硅酸盐矿物, 基质主要为玻璃质和细粒的金属和硫化物, 该类型为球粒陨石型粗粒原始微陨石(Chondritic); 少量的粗粒类具有无球粒陨石的结构, 矿物结构上表明经历了明显的分异作用, 该类型被细分为无球粒陨石型粗粒原始微陨石(Achondritic); 还有极少量的粒径大于 $1\ \mu\text{m}$ 的单矿物碎屑被划为粗粒类。(3)主要由难熔矿物或其蚀变矿物组成的微陨石, 被划分为难熔类(Refractory)。该类型微陨石与球粒陨石中富钙铝难熔包体(CAIs)十分相似。因该类型微陨石仅发现3颗, 因此, 还没有对其进行更详细的分类, 仅参考富钙铝包体(CAIs)的分类标准。(4)超碳质微陨石(Ultarcarbonaceous)中碳质的丰度比CI碳质球粒陨石更高, 已经证实是其母体是彗星, 并且来源于太阳系边缘的奥尔特星云。

3. 部分熔融群(Partially Melted Micrometeorites): 该群因不完全熔融, 导致呈不规则状, 具有较多的孔隙, 因此, 也被称为熔渣类微陨石(Scoriaceous Micrometeorites)。在该群中, 可见原始未熔融群的残余物, 这些残余物的类型与原始型微陨石的类型对应。在早期的微陨石研究中, 部分熔融群和熔融群微陨石都被统称为熔融群微陨石。

1.2.2 微陨石的沉降通量

Murrell 等^[47]通过从太平洋深海黏土中发现的微陨石, 利用微陨石质量与黏土总质量的关系, 来计算微陨石的降落通量。我国彭汉昌(Peng)等^[48]在太平洋 20 个地点的深海软泥中收集了微陨石, 并利用软泥的沉降速率、厚度、微陨石的分布密度等信息, 得出了 20 个地点的微陨石不同的沉降速率, 计算得出的地球微陨石沉降通量为最慢 $5\ \text{t}\cdot\text{a}^{-1}$, 最快 $6\ 867\ \text{t}\cdot\text{a}^{-1}$, 平均为 $2\ 346\ \text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ 。然而,

因地球风化、黏土沉降速率的变化、微陨石识别的准确性等因素的影响, 该结果存在着很大的不确定性。

随着大气层微陨石收集的发展, Love 和 Brownlee^[3]通过统计高空卫星设备表面的高速撞击坑的尺寸和数量, 计算得出地球每年吸积的地外物质总量为 $40\ 000\pm 20\ 000\ \text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ 。该数据虽然无法反应地表微陨石的沉降速率, 但被认为是现阶段地球吸积地外物质的准确速率。

在系统地收集极地微陨石阶段, 人们利用极地表蓝冰和新鲜雪中的微陨石分布特征, 准确计算了地表微陨石的每年的沉降通量(表 2)。从这些数据中可以清楚看出, 地表微陨石的沉降速率都远远低于 Love 和 Brownlee 在高空测定的吸积率。毫无疑问, 大部分地球吸积物在进入大气层后挥发或熔融成为纳米级的微陨石。然而, 因收集方法和测试方法的不同, 计算得出的同一时期沉降通量具有显著差异, 有些差异甚至达到了一个数量级, 而其中的原因非常复杂, 没有可靠的解释。

尽管如此, 在地球演化方面, 基于微陨石的沉降通量研究, 取得了一些共同的认识, 如微陨石的沉降通量与地球的大撞击历史有着密切联系^[49]; 早期地球的海洋和大气中微量元素的变化受到了微陨石沉降的重要影响^[50]; 微陨石是地球上最多的地外物质, 其通量要远远高于陨石^[51]等。

表 2 不同时期的微陨石沉降通量
Table 2. The micrometeorite flux in different periods

| 沉降时期 | 沉降通量/($\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$) | 位置 | 参考文献 |
|-------------|---------------------------------------|---------|------|
| 20万年前 | 1 500 | 康科迪亚站 | [52] |
| 12万年前 | 320 | 富士站 | [53] |
| 0.38万—9.7万年 | 210 | 南极内陆 | [54] |
| 第四纪冰期末 | 5 300 | 大和山地区 | [55] |
| | | | [56] |
| 6千—1万年前 | 220 | 格陵兰岛 | [57] |
| 5 000年前 | 8 600 | 富士站 | [53] |
| 4 000年前至今 | 1 000 | 康科迪亚站 | [58] |
| 4 000年前 | 170 | 格陵兰岛 | [54] |
| 现今 | 2 700 | 阿蒙森斯科特站 | [59] |
| 现今 | 4 100 | 格陵兰岛 | [30] |
| 现今 | 1 300 | 富士站 | [53] |
| 现今 | 6 000 | 康科迪亚站 | [60] |

1.2.3 母体来源

微陨石的直接来源是微小的流星体。这些微流星体因颗粒细小,它们在星际空间中的运动不仅受到太阳及行星引力的影响,同时还受到太阳风、辐射等各种非引力作用,这导致了它们的运行轨迹极其复杂。而且,大量研究证实,微陨石在太阳系内的存在寿命小于 10^5 a,但上文中地球微陨石沉降通量研究表明,微陨石数量并不与其本身的寿命有着明显的联系。因此,微陨石在衰亡的同时,必定有新的来源进行补充,结合微陨石复杂的运动轨迹,微陨石的来源必定是丰富且多样的^[22,61-62]。

虽然,对少量原始未熔融群微陨石的研究表明,其主要来源于小行星的碰撞和彗星在近日区域内的活动。但是,因分析样品数量不足已发现微陨石总量的千分之一,这些研究并不能代表所有微陨石的确切来源。另外,微陨石的粒径主要分布在 50—100 μm ,在微观尺度上,尤其是在我们对其母体本身了解并不够清晰的情况下,大部分微陨石所具有的特征并不能代表其母体的特征。因此,确定每一块微陨石确切的来源,是非常困难的,还需要更详细的研究工作。目前,普遍认为太阳系内尘粒的主要来源包括:小行星碰撞、太阳系内彗星的活动、柯伊伯带内的碰撞、恒星际颗粒等^[63-65]。微陨石作为太阳系内尘粒的重要组成,有可能有着与其一致的来源。

2 极地微陨石

南北两极地区因人类活动稀少,污染物含量低且常年低温,是收集和保存微陨石的绝佳环境。近些年,开展极地科学研究已经成为了世界各国占领极地资源的重要手段之一,伴随着极地多学科的发展,微陨石研究已是国际上极地科学考察工作中的重点。本节简要介绍了南北两极在微陨石收集与研究方面取得的一些进展,为我国开展这些工作提供一些思路。

2.1 北极微陨石

北极在地理上常包括两个部分:一部分是欧亚大陆北部,另一部分是北美大陆北部和格陵兰岛(Greenland)。虽然因地理位置、气候特征、政

治归属等因素,北极微陨石的研究程度要远远低于南极,但北极微陨石的研究要早于南极,开启了极地微陨石研究的大门。在北极开展微陨石研究的主要涉及两个区域:

1. 格陵兰岛^[30,66-72]

格陵兰岛是两极地区中最早开展大规模微陨石收集的区域。距格陵兰岛冰架西部边缘约 20 km 的地区,有着一个直径约 3 km 的湖泊。每年夏季,约一亿吨的冰融化并流入湖水中,大量的冰川沉积物汇入湖内,当湖水增多时,高位的湖水会流出,并入到河流中。这一过程持续了上百年,因此,有着上百亿吨的冰川水流过此湖。法国和丹麦于 1984 年在湖水的沉积物中收集了近千颗微陨石。其中约 75%为熔融群(含部分熔融群)微陨石,约 25%为原始未熔融群微陨石。通过系统的研究,初步验证了部分微陨石的母体特征,即来源于小行星或彗星。与大气层和深海沉积物中收集到的微陨石相比,格陵兰岛的微陨石具有以下特征:(1)粒径要大于大气层收集的,格陵兰岛微陨石主要大于 100 μm ,而大气层中收集的一般小于 50 μm ;(2)深海收集的主要为富铁型(I 型)熔融群微陨石,格陵兰岛的则类型丰富,有大量未熔融群微陨石;(3)沉积物中微陨石的丰度要远远高于深海收集。以上特征也是所有极地微陨石所具有的。然而,在此区域收集到的微陨石却有三个不足:(1)因在水中沉积的时间过长,微陨石中的有机碳质被水中细菌或微生物严重破坏;(2)微陨石中大量的溶于水性矿物在水中逐渐溶解;(3)从湖水中收集的微陨石普遍具有一层特殊的膜,在取样过程中,大量的易碎微陨石被破坏掉。鉴于以上原因,在此区域没有继续开展微陨石收集。

2. 新地岛(Novaya Zemlya archipelago)

欧亚大陆北部的新地岛坐落于北极圈内,岛北部的冰川在最近的几十年存在快速融化的现象,因此,部分沉积物遗留在蓝冰的表面或水沟中。这一现象无疑导致了微陨石的富集。Badjukov 等^[73-76]从这些沉积物收集了大量的微陨石,预计每一克沉积物中,有着 300 颗 50—500 μm 的微陨石。类型以熔融群微陨石为主,也有着部分熔融群和未熔融群。尽管这些微陨石都存在着陆地风化造成的破坏,但从中发现了两种特殊的未熔融群微陨石:(1)4 颗未熔融群的玄武岩质微陨石,其中 2

块分别来自于钙长辉长无球粒陨石(Eucrite)和中铁陨石(Mesosiderite), 另外两块来源于与已知陨石母体不一样的玄武岩质小行星; (2)发现了表2中没有的未熔融群 Fe-Ni 金属类微陨石。

2.2 南极微陨石

南极是几乎完全被冰雪覆盖的大陆, 冰盖的起源可追溯到 3 400 万年以前^[77], 古老的冰盖积累了大量降落于地球的地外物质, 南极陨石收集上取得的重大突破也验证了这一点。另外, 与北极地区相比, 南极具有更少的人类污染物。人类生活产生的尘粒至少需要在空中漂浮 2 500 km 才能到达南极, 而其中稍大一些的尘粒会降落在海洋中, 因此, 南极是地球上人类污染物含量最低的地区。目前, 根据微陨石收集的国家和方法, 南极微陨石的研究主要在以下五个地区开展。

1. 普吕多姆角(Cap-Prudhomme)

该地区是最早在南极进行大规模收集微陨石的区域, 收集点位于法国的迪蒙·迪维尔南极科考站(Dumont d'Urville Station)附近。法国科考队在格陵兰岛收集微陨石后, 将收集区域转移到了南极, 于 1987—1988 年、1991—1992 年、1994—1995 年、1999—2000 年间, 使用蒸汽机共融化了约 800 t 的蓝冰, 通过不同粒径的过滤, 从中收集粒径大于 25 μm 沉积物。Maurette 等^[29,78]在对少量的沉积物进行鉴别后, 发现微陨石在沉积物中所占的比例约为 20%, 因此, 粗略估计, 共采集了约 20 万颗微陨石, 其中熔融群和部分熔融群 10 万颗, 未熔融群 10 万颗。少量较大粒径(>100 μm)微陨石的岩石学和矿物化学、稀有气体特征表明, 这些微陨石与 CM 和 CR 型碳质球粒陨石有着较多相似之处, 但也存在着一些细微的差异, 它们极有可能与陨石有着不同的来源^[45,79]。Yano 和 Noguchi 等^[80]通过从 50—100 μm 的湖水沉积物中筛选微陨石, 提出了一套有效的微陨石筛选方法, 对于极地微陨石的大规模筛选具有重要意义。

经过这 4 次的收集工作, 蓝冰中微陨石的富集规律被逐渐认识, 并在收集过程中得到印证, 即: (1)沉降的微陨石被降雪快速掩埋, 并沉积在蓝冰中; (2)当蓝冰的消融速度大于冰层的沉积速度时, 蓝冰内的微陨石会逐渐接近表面, 甚至暴露出来; (3)在夏季, 深色的微陨石会快速吸收太阳热量, 重新淹没在表层冰中; (4)微陨石持续沉

降, 新鲜的降雪又会继续覆盖。这一循环的过程导致了浅层蓝冰的富集程度明显要高于深部的。

2. 阿蒙森-斯科特站水井^[31,59,81-82]

阿蒙森-斯科特站是 1957 年美国在南极极点设立的科学考察站, 并长期为美国南极科考服务。科考站的大部分用水都依靠一个巨大的水井提供。该水井深超过 100 m, 底部是一个直径约 24 m, 深约 15 m 的融雪池, 融雪池中的水由约 4 000 t 的冰融化而成。因此, 该水井保存了这些冰中所有的微陨石, 被认为是迄今为止最大的微陨石来源。1995 年, Taylor 等设计了一款特制的回收装置, 收集水井中粒径大于 50 μm 的沉积物。根据冰层的深度得出这些微陨石是在公元 1100—1500 年间落到地球。而后, 因科考站的用水影响, 井底每年会下沉。根据冰层的深度和年龄的关系, 计算得出现今微陨石沉降速率(见 1.2.2 节)。此次收集的微陨石数量不仅是普吕多姆收集的 3 倍, 而且类型更丰富, 除稀有的难熔类和超碳质类外, 表 2 中的其他类型的微陨石均有发现。氧同位素研究也表明, 这些水井中的部分微陨石的母体来源与已知的陨石来源不一样。然而, 因为微陨石在水井中的时间过长, 导致了部分可溶性矿物和有机物的严重溶解, 这对于开展原始群微陨石研究的影响是破坏性的。

3. 富士站和大和山地区^[55,83-87]

日本系统的收集微陨石是在其第 37 次(1995—1997 年)南极科考中进行的, 通过融化富士站最近降落的雪, 从 200 L 的融化水中, 筛选微陨石。而此次收集的沉积物中大多是天然的或工业的地球物质, 因此日本也研究了一系列从沉积物中筛选微陨石的理论和设备, 以提高这些微陨石的挑选速度。第二次收集是在第 39 次(1997—1999 年)科考中, 沉积物中微陨石的浓度比第一次要多得多, 共收集了数千颗微陨石。而后, 日本持续地在富士站附近开展表层雪中的微陨石收集, 尤其是日本第 46 次和第 47 次南极科考, 首次发现了超碳质类原始群微陨石, 对微陨石的彗星起源, 提供了更加充分的证据。在最近对这些超碳质型的研究中, 科学家们正逐步了解不同彗星的演化过程。

大和山地区是日本发现的陨石富集区, 不仅是第一个南极陨石富集区, 也是迄今发现的最大的陨石富集区。基于在蓝冰中陨石与微陨石具有

相似的富集特征,日本于1998年在大和山地区采取了与普吕多姆地区类似的方法,融化了36 t冰,从24个位置收集到微陨石。与富士站收集的相比,这些微陨石相当的古老,降落于约2.7—3.3万年前。然而,这些微陨石与普吕多姆和阿蒙森-斯科特站收集的一样,可能因为在冰中沉积的时间过长或者,也出现了明显的地球风化导致的破坏现象,如具有明显的S、Ca和Ni等元素的亏损等。

4. 康科迪亚站^[33-34,58,88]

康科迪亚站位于南极内陆高原的冰穹C,是南极最寒冷的地区之一。该站是由法国和意大利共同运营,因此,该地区的微陨石收集也是由这两个国家实施。在该站的首次收集微陨石是在1987年,法国科考队通过融化了131 kg的冰芯,从中回收了5颗微陨石:为S型和I型熔融群微陨石。基于冰芯的沉积年龄,Yiou等^[56]计算了4 000年前的粒径大于30 μm的微陨石沉降速率为1 000 t·a⁻¹。然而,这次收集的微陨石不仅数量少,且都属于熔融群。另外,如前文所述,在普吕多姆和阿蒙森斯科特站收集的微陨石都受到不同程度地地球污染或破坏。因此,以收集风化程度低且为原始群的微陨石为目的,法国和意大利联合科考队于2000、2002、2006年在康科迪亚站附近的新鲜积雪中进行微陨石收集。结果确实如此,在对收集到的部分球粒陨石质原始群微陨石的研究表明,并没有出现风化引起的S、Ca等元素的亏损,也从此部分微陨石中发现了碳酸盐矿物晶体和高含量的陨硫铁。通过对超碳质微陨石的研究中发现,它们包含的富氮有机物形成于奥尔特星云。

5. 横贯山脉^[2,89-90]

美国在横贯山脉的Beardmore冰川地区(该地区富集陨石)的冰碛沉积物中发现微陨石,通过筛选,每100 g沉积物中约有粒径为125—500 μm的微陨天上千颗,大部分有磁性,比重大于2.89 g·cm⁻³。这些微陨石在结构和类型上与深海沉积物和格陵兰岛中发现的微陨石类似,主要为熔融群微陨石,且风化程度明显比深海的和格陵兰岛的要低。这次搜集表明,冰川的消融作用和风蚀沉积对于地表微陨石的富集也具有重要意义。

法国和意大利南极科考队于2003年和2006年,在横贯山脉维多利亚地(Victoria Land)几个孤立的冰原岛峰的峰顶上裂隙和坑中发现了大量的

大颗粒(200 μm—2 mm)的微陨石。该裂隙发育在具有上百万年历史的冰蚀花岗岩中,因此这些微陨石的居地年龄可能也达到了百万年。在这些微陨石中,粒径为400 μm—2 mm的微陨石所占比例比南极其他地区收集的微陨石都要高,数量上预计与融化100 t蓝冰的数量相当,而且类型上,与斯科特站的水井收集结果一样,十分丰富,同时还发现一些结构与当前分类体系不一致的微陨石。

3 我国陨石与微陨石的研究

3.1 南极陨石收集与研究

南极陨石的系统收集早于极地微陨石。1969年日本南极考察队在Yamato地区发现9块不同类型的陨石后,总结了南极陨石的富集机制,从此,南极陨石收集成为南极科学考察的重要任务之一。此后的半个世纪,美国、日本、中国、欧洲联队、韩国、俄罗斯等在南极收集了超过5万块陨石。

1984年11月,“向阳红10号”科考船载着第一支中国南极考察队队员从上海出发,开始了首次南极考察。1998年我国开展首次南极内陆考察时,在格罗夫山地区发现了4块陨石,从此揭开了中国南极陨石收集的序幕。至今的20年间,我国已经开展了7次格罗夫山陨石考察,共收集了12 665块南极陨石(表3)。格罗夫山成为了仅次于Yamato的陨石富集区,我国也成为了名副其实的南极陨石大国。我国在南极陨石收集上取得的巨大成功,对于开展天体化学具有极为重要的意义^[10,91-93]。

在国家科技基础条件平台和国家标本资源共享平台建设项目的支持下,我国完成了3 178块南

表3 南极格罗夫山陨石考察情况

Table 3. Investigation of meteorite in the Grove Mountains, Antarctic

| 考察时间 | 队次 | 陨石数量 |
|------------|------|--------|
| 1998—1999年 | 第15次 | 4 |
| 1999—2000年 | 第16次 | 28 |
| 2002—2003年 | 第19次 | 4 448 |
| 2005—2006年 | 第22次 | 5 354 |
| 2009—2010年 | 第26次 | 1 618 |
| 2013—2014年 | 第30次 | 587 |
| 2015—2016年 | 第32次 | 630 |
| 合计 | 7次 | 12 665 |

极陨石的分类(表4)。在已分类的陨石中,我国发现了大量的特殊陨石,并取得了较多的科研成果,加固了我国在国际南极陨石研究领域的地位。这些特殊类型的陨石分别为:2块火星陨石、3块 HEDs 陨石、2块文诺纳群(Winonaite)、

2块顽辉石球粒陨石、12块中铁陨石、1块橄榄陨铁、4块铁陨石、11块橄辉无球粒陨石、21块碳质球粒陨石,3型(非平衡型)普通球粒陨石76块,普通球粒陨石熔融角砾岩(melt breccia)7块。

表 4 格罗夫山已分类陨石汇总
Table 4. Summary of classified meteorites from Grove Mountains

| 陨石类型 | 数量 | 陨石名称 | |
|----------------|-------------|--|---|
| 火星陨石 | 2 | GRV 99027、GRV 020090 | |
| HEDs陨石 | 3 | GRV 99018、GRV 051523、GRV 13001 | |
| Winonaite | 2 | GRV 022890、GRV 021663 | |
| 顽辉石球粒陨石 | 2 | GRV 021692、GRV 13100 | |
| 非普通球粒陨石 | 中铁陨石 | 略 | |
| | 橄榄陨铁 | GRV 020099 | |
| | 铁陨石 | GRV 98003、GRV 090018、GRV 090327、GRV 090333 | |
| 橄辉无球粒陨石 | 11 | 略 | |
| 碳质球粒陨石 | 21 | 略 | |
| 小计 | 58 | | |
| H-melt breccia | 3 | GRV 053644、GRV 054336、GRV 055356 | |
| H3 | 39 | 略 | |
| H4 | 340 | 略 | |
| H5 | 402 | 略 | |
| H6 | 127 | 略 | |
| L-melt breccia | 4 | GRV 052483、GRV 055152、GRV 090407、GRV 13136 | |
| L3 | 33 | 略 | |
| L3-6 | 1 | GRV 050202 | |
| L4 | 112 | 略 | |
| 普通球粒陨石 | L5 | 1 026 | |
| | L6 | 987 | |
| | L7 | 1 | |
| | LL3 | 6 | GRV 020010、GRV 020032、GRV 020034、GRV 020036、GRV 020104、GRV 020105 |
| | LL4 | 11 | 略 |
| | LL4-6 | 2 | GRV 020013、GRV 99002 |
| | LL5 | 13 | 略 |
| | LL6 | 12 | 略 |
| | 普通球粒陨石(未分类) | 1 | GRV 98001 |
| | 小计 | 3 120 | |
| 合计 | 3 178 | | |

除了通过对特殊陨石的研究取得的丰硕成果外,我国还开展了一系列的南极陨石的深入研究。例如,火星岩浆演化及对水的指示, HED 族陨石的起源和演化,小行星的冲击变质过程,前太阳颗粒的发现,碳质球粒陨石的母体特征,富 Ca、Al 难熔包体研究,陨石的密度、磁性等物理特性研究等^[94-98]。这一系列成果,不仅将我国陨石学研究推向了新的高潮,也对国际天体化学研究作出了重要贡献。

3.2 微陨石收集与研究

我国首次发现微陨石是在 1964 年,叶连俊等^[99]在燕山地区的震旦纪沉积地层中发现了一种微型的球体,并根据其结构特征,推测其为地外来源。

1978—1979 年,我国海洋调查船“向阳红 9 号”在太平洋西部海域数千米深的沉积物内发现了少量微球体。1983—1984 年,我国海洋调查船“向阳红 5 号”在南海中部海域进行海底底质调查时,在表层沉积物中发现了近百颗微型球体。大量研究工作证实,这些球体中存在一定数量的微陨石,其中大部分为熔融群富铁型微陨石。国内科研工作者对这些样品的来源、类型、岩石-矿物-地球化学特征开展了详细的研究^[100-103]。1988 年,我国再次在太平洋深海沉积物中收集微陨石,用了近一年的时间,统计了分布在数十万平方海里的是个站位中的微陨石含量,并结合古地磁测算的沉积速率,得出了深海中微陨石的沉降速率^[48](见 1.2.2 节)。

为收集更多的未熔融群微陨石,在 1984—1987 年间,由欧阳自远院士组织,在中国科学院高能物理研究所和大气物理研究所的协助下,利用中国科学院地球化学研究所自行设计和研制的沉降板式收集器、卷帘式收集器和高压静电收集器,进行了 5 次平流层微陨石收集。欧阳自远等^[28,104-105]系统地分析了粒径大于 10 μm 的 276 颗尘粒,并发现其中大部分为地球的自然污染物,微陨石和人工污染物相对较少。

另外,我国还开展了一些微玻璃陨石的收集及研究工作^[106],但因微玻璃陨石包含了陨石母体和地球抛射物的混合成分,并不属于本文定义微陨石。因此,暂不说明。

除在深海和高空收集微陨石外,我国也在极地开展了微陨石收集工作。2002—2003 年第 19

次及 2015—2016 年第 32 次南极科考队在格罗夫山地区进行南极陨石考察时,通过融化少量的表层雪和冰,收集了其中的残余物。然而,至今未见与这些残余物相关的研究报告,尚不清楚残余物中微陨石的数量及特征。

4 我国极地微陨石研究展望和设想

4.1 我国开展极地微陨石的研究意义

太阳系内细小颗粒在经过地球附近时,会因地球大气层的制动作用,停留在地球表面,因此,地球大气层中的宇宙粒子比地外空间高出了 10^6 倍。在地球的引力作用下,这些粒子会降落到地表或其他近地空间,成为微陨石。据前文描述,现今地表微陨石的沉降通量至少达到了 $1\ 300\ \text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ 。而历史上,陨石的平均降落量约为 $50\ \text{t}\cdot\text{a}^{-1}$,微陨石的整体重量要远远大于陨石^[43]。另外,相对陨石而言,微陨石的类型更为复杂,来源也更加广泛,不仅有着与陨石一样的母体,并可能来源于太阳系边缘的奥尔特星云和恒星际空间等。因此,微陨石对于人类探索和研究地外环境和太阳系的演化而言,具有极其重要的意义。

除此以外,极地微陨石研究已经是近些年国际极地考察的重点工作。因此,开展极地微陨石研究还具有以下意义:(1)国际上在极地微陨石方面已经取得了丰硕的成果,我国应尽快开展系统的极地微陨石收集与研究,这有利于我国极地考察多学科的综合发展,开启一个新的研究方向;(2)丰富我国南极考察成果,为提高南极科学研究水平作出重要贡献;(3)提高我国在南极研究上的国际地位,增加我国南极科学考察的实际存在具有重要意义。

4.2 极地微陨石收集的可行性

南北两极有着古老且巨大的冰盖,低温的冰层是保存微陨石的极佳条件,因此,持续沉降的微陨石,有着与冰盖形成同期的历史环境,冰层中微陨石的数量是十分可观的。另外,两极地区具有极低的地球污染背景,且与地外空间的收集相比,有着较低的成本。因此,南北两极是最理想的微陨石收集地区。

20 世纪末我国便开展了深海和高空热气球的微陨石收集,已经有了丰富的微陨石研究经验,并在

国际上取得了一定的认可。同时,随着我国科学研究水平的整体提升,已完全具备开展新时期微陨石研究工作的能力。另外,我国在极地其他领域的研究已经为微陨石的收集提供了一定的平台基础,如在两极地区已经建立完成的5个科学考察站,为开展极地微陨石收集提供了野外工作基础,为不同方法收集微陨石提供了便利。冰芯的采集和研究也为极地微陨石收集提供了多学科综合发展的平台等。

自1998年我国首次发现南极陨石算起,已经过去整整20年。7次科考中南极陨石的成功收集,证明了我国在南极内陆开展陨石野外考察上的技术方法和手段是成熟的,因此,可以结合南极陨石考察的经验,将其应用到极地微陨石考察上。冰川的消融是南极陨石富集的主要原因之一,同样,也是导致微陨石在蓝冰浅表处富集的必要因素。缪秉魁在格罗夫山陨石考察的规划中也提出,将南极微陨石收集列入到格罗夫山陨石考察中去^[7]。因此,在南极内陆地区的陨石富集区内开展微陨石收集也是可行的。

4.3 开展极地微陨石研究的规划

综合以上内容,极地微陨石的研究将是我国一个新的重要科学研究领域,国际上所取得的成果,也充分说明了这一点。为了更好的促进我国微陨石的研究,迫切需要加大我们极地微陨石收集和研究的投入,进而推进我国天体化学和南极科学的发展。基于目前微陨石的研究情况,笔者对我国极地微陨石研究提出的初步设想如下:

1. 以南极陨石为基础,成立专业的极地陨石与微陨石考察队

我国通过7次南极陨石考察,熟悉了南极野外地区的地理环境,摸清了当地陨石的富集特点,掌握了陨石搜寻的经验。目前,参加过南极陨石考察的专业人员约有5—6人,他们同时也是天体化学专业的科研人员,具有开展微陨石收集和研究的知识背景,以这些人员为先导力量,成立南极微陨石收集分队。分队以南极陨石考察的基础上,开展微陨石工作:制定极地微陨石收集的整体方案;开展极地微陨石的收集;对微陨石进行预分析等。微陨石收集队伍的成立不仅能提高微陨石收集成效,而且对于我国培养年轻一代天体化学专业人才具有重要的意义。

2. 结合极地考察站,进行不同区域不同环境

下的微陨石收集

我国开展极地考察已经30多年,在南北两极地区建立了5个考察站作为极地考察的后勤基地,以促进极地科学的发展。科考站分布广,地理位置特殊,所处的气候环境各有不同。因此,以考察站为基础,根据世界各国在极地收集微陨石的情况以及微陨石的富集因素,我国的收集可以在以下几个方面开展:(1)与极地冰川、地质等研究队伍合作,从昆仑站和泰山站附近采集的内陆冰层(冰芯)中收集微陨石;(2)以5个考察站的生活用水为基础,大量化雪化冰来收集微陨石;(3)结合极地的地质情况,在北极的黄河站、南极的中山站和长城站附近寻找季节性湖泊,在湖底中收集微陨石;(4)在格罗夫山陨石富集区,收集暴露于蓝冰上颗粒较大的微陨石,同时融化浅层的蓝冰,收集微陨石;(5)在北极黄河站和南极长城站附近,利用夏季冰川融化后造成的残余水沟中,收集沉积物中的微陨石;(6)在内陆的昆仑站、泰山站及中山站周边,通过融化新鲜雪来收集微陨石。

3. 开展系统的微陨石分析和理论研究

在上20世纪70—80年代,我国的微陨石研究工作取得了一些成果。开展微陨石研究的意义已经在前文中描述,然而,我国在现阶段开展微陨石研究方面,还存在以下几个问题:(1)在南极陨石大量的收集之后,天体化学专业发展迅速,但近20年来,我国的微陨石研究几乎是空白;(2)天体化学研究队伍人员不多,且分散在各个不同的科研机构,每个科研机构有着自己的工作特色和研究方向;(3)微陨石因颗粒细小,对样品处理和分析技术的要求高,且微陨石类型丰富,需要有较强的理论知识背景和分析水平;(4)尽管第19次和第32次南极科考队在格罗夫山收集了少量微陨石,但未开展任何研究。因此,我国应从以下几方面开展微陨石研究:(1)以已有的样品为基础,开展一些基础性研究工作;(2)将收集的微陨石样品分发给不同的科研院所,从不同的研究方向出发,相互配合,全面开展微陨石研究;(3)以微陨石收集为基础,激发青年研究人员工作热情,培养年轻一代天体化学人才。

致谢 我国南极陨石和微陨石研究得到了国家极地考察办公室和中国极地研究中心的大力支持。论文得到了匿名专家的评审和建议。在此一并致谢。

参考文献

- 1 RUBIN A E, GROSSMAN J N. Meteorite and meteoroid: New comprehensive definitions[J]. *Meteoritics and Planetary Science*, 2010, 45(1):117—125.
- 2 ROCHETTE P, FOLCO L, SUAVET C, et al. Micrometeorites from the transantarctic mountains[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2008, 105(47): 18206—18211.
- 3 LOVE S G, BROWNLEE D E. A direct measurement of the terrestrial mass accretion rate of cosmic dust[J]. *Science*, 1993, 262(5133): 550—553.
- 4 YADA T, STADERMANN F J, FLOSS C, et al. First presolar silicate discovered in an Antarctic micrometeorite[C]// *The Workshop on Chondrites & the Protoplanetary Disk. Workshop on Chondrites and the Protoplanetary Disk*, 2004.
- 5 MAURETTE M, OLINGER C, MICHEL-LEVY M C, et al. A collection of diverse micrometeorites recovered from 100 tonnes of Antarctic blue ice[J]. *Nature*, 1991, 351(6321): 44—47.
- 6 DUPRAT J, DACHWALD B, HILCHENBACH M, et al. The MARVIN project: a micrometeorite harvester in Antarctic snow[C]// *Lunar and Planetary Science Conference. Lunar and Planetary Science Conference*, 2013:2031.
- 7 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): 1081—1089.
- 8 王道德, 林杨挺. 南极格罗夫山陨石的研究与展望[J]. *极地研究*, 2003, 15(3): 161—170.
- 9 CHEN L Q, LIU X H, BIAN L G, et al. Overview of China's Antarctic research progress 1984—2016[J]. *Adv Polar Sci*, 2017, 28(3): 151—160, doi: 10.13679/j.advps.2017.3.00151.
- 10 Miao B K, Xia Z P, Zhang C T, et al. Progress of Antarctic meteorite survey and research in China[J]. *Adv Polar Sci*, 2018, 29(1): 3-19, doi: 10.13679/j.advps.2018.1.00003.
- 11 MURRAY J, RENARD A F. Mineral substances of terrestrial and extraterrestrial origin in deep-sea deposits[M]//*Report on Deep-sea Deposits Based on the Specimens Collected During the Voyage of H.M.S. Challenger in the Years 1872 to 1876*. 1891:291—334.
- 12 LAEVASTU T, MELLIS O. Extraterrestrial material in deep-sea deposits[J]. *Transactions, American Geophysical Union*, 1955, 36(3): 385.
- 13 MARVIN U B, EINAUDI M T. Black, magnetic spherules from Pleistocene and recent beach sands[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1967, 31(10): 1871—1884.
- 14 FREDRIKSSON K, GOWDY R. Meteoritic debris from Southern California Desert[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 1963, 27(3):241—243.
- 15 PETTERSSON H, FREDRIKSSON K. Magnetic spherules in deep-sea deposits[J]. *University of Hawaii Press*, 1958.
- 16 HUNTER W, PARKIN D W. Cosmic dust in recent deep-sea sediments[J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1960, 255(1282):382—397.
- 17 FREDRIKSSON K, GOWDY R. Meteoritic debris from Southern California desert[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 1963, 27(3):241—243.
- 18 MUTCH T A. Abundances of magnetic spherules in Silurian and Permian salt samples[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1966, 1(5): 325—329.
- 19 LANGWAY Jr C C. Some physical and chemical investigations of a 411 meter deep Greenland ice core and their relationship to accumulation[J]. *Union Geodesique et Geophysique Internationale. Association Internationale d'Hydrologie Scientifique*, 1962.
- 20 NISHIBORI E, ISHIZAKI M. Meteoritic dust collected at Syowa Base, Ongul Island, east coast of Lutzow-Holm Bay, Antarctica[J]. *Antarctic Record*, 1959, 7(7):407—410.
- 21 THIEL E, SCHMIDT R A. Spherules from the Antarctic ice cap[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1961, 66(1): 307—310.
- 22 TAYLOR S R. *Solar system evolution: A new perspective*[M]. Cambridge University Press, 2001.
- 23 HEMENWAY C L, HALLGREN D S, KERRIDGE J F. Preliminary micrometeorite results from Gemini IX and XII[J]. *Nasa Special Publication*, 1967, 150:147.
- 24 HALLGREN D S, HEMENWAY C L, WLOCHOWICZ R. *Magellan collections of large cosmic dust particles*[M]//*Interplanetary Dust and Zodiacal Light*, Springer, Berlin, Heidelberg, 1976: 284—288.
- 25 BLANCHARD M B, KYTE F T. Are the stratospheric dust particles meteor ablation debris or interplanetary dust?[J]. 1978.

- 26 CDPET (COSMIC DUST PRELIMINARY EXAMINATION TEAM). Cosmic dust catalog[R]. Houston: NASA/JSC, 1981—1994: 1—14.
- 27 欧阳自远. 天体化学[M]. 北京:科学出版社, 1988.
- 28 欧阳自远, 万固存, 黄伯钧, 等. 利用高空科学气球收集宇宙尘粒[J]. 空间科学学报, 1993, 13(1): 73—79.
- 29 MAURETTE M, IMMEL G, HAMMER C, et al. Collection and curation of IDPs from the Greenland and Antarctic ice sheets[C]//AIP Conference Proceedings. AIP, 1994, 310(1): 277—290.
- 30 MAURETTE M, JÉHANNO C, ROBIN E, et al. Characteristics and mass distribution of extraterrestrial dust from the Greenland ice cap[J]. Nature, 1987, 328(6132): 699—702.
- 31 LEVER J H, TAYLOR S, HARVEY R. A collector to retrieve micrometeorites from the South Pole Water Well[C]// Lunar and Planetary Science Conference. Lunar and Planetary Science Conference, 1996.
- 32 GRÜN E, KRÜGER H, LANDGRAF M. Cosmic dust[J]. Heliosphere near solar minimum the Ulysses perspective, 2001, 138(2001):72—77.
- 33 DUPRAT J, ENGRAND C, MAURETTE M, et al. Micrometeorites from Central Antarctic snow: The Concordia collection[J]. Advances in Space Research, 2007, 39(4): 605—611.
- 34 ENGRAND C, DUPRAT J, DARTOIS E, et al. Cosmic dust flux on Earth inferred from the Concordia micrometeorite collection[C]// EGU General Assembly Conference. EGU General Assembly Conference Abstracts, 2017.
- 35 MIURA A, SAITO Y, TAZAWA Y, et al. The accretion rate of micrometeorites obtained from ice chips shaved during ice core of ca 120 kyr ago drilling at Dome Fuji[C]// Abstracts of Annual Meeting of the Geochemical Society of Japan. GEOCHEMICAL SOCIETY OF JAPAN, 2010:274.
- 36 NAKAMURA T, IMAE N, NAKAI I, et al. Antarctic micrometeorites collected at the Dome Fuji Station: Initial examination and curation[C]//Antarctic Meteorites XXIII. 1998, 23: 104—106.
- 37 MAURETTE M. Micrometeorites and the mysteries of our origins[M]. Springer, Berlin, Heidelberg, 2006.
- 38 GENGE M J, LARSEN J, VAN GINNEKEN M, et al. An urban collection of modern-day large micrometeorites: Evidence for variations in the extraterrestrial dust flux through the Quaternary[J]. Geology, 2016, 45(2): 119—122.
- 39 WOZNIAKIEWICZ P J, BRADLEY J P, PRICE M C, et al. Initial results from the Kwajalein micrometeorite collections[J]. 2014.
- 40 DREDGE I, PARNELL J, LINDGREN P, et al. Elevated flux of cosmic spherules (micrometeorites) in Ordovician rocks of the Durness Group, NW Scotland[J]. Scottish Journal of Geology, 2010, 46(1): 7—16.
- 41 DAVIDSON J, GENGE M J, MILLS A A, et al. Ancient cosmic dust from Triassic halite[C]// Lunar and Planetary Science Conference. Lunar and Planetary Science Conference, 2007.
- 42 GENGE M J, ENGRAND C, GOUNELLE M, et al. The classification of micrometeorites[J]. Meteoritics & Planetary Science, 2008, 43(3): 497—515.
- 43 MAURETTE M. Classification of meteorites and micrometeorites[M]//Micrometeorites and the Mysteries of Our Origins. Springer, Berlin, Heidelberg, 2006: 54—71.
- 44 VENTURA BORDENCA C, HUBER M S, GODERIS S, et al. Classification of cosmic spherules from Widerøefjellet (Sør Rondane Mountains, East Antarctica)[C]// Lunar and Planetary Science Conference, 2015.
- 45 KURAT G, KOEBERL C, PRESPEL T, et al. Petrology and geochemistry of Antarctic micrometeorites[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1994(18): 3879—3904. DOI:10.1016/0016-7037(94)90369-7.
- 46 GENGE M J, GRADY M M. The fusion crusts of stony meteorites: Implications for the atmospheric reprocessing of extraterrestrial materials[J]. Meteoritics & Planetary Science, 1999, 34(3): 341—356.
- 47 MURRELL M T, DAVIS P A, NISHIZUMI K, et al. Deep-sea spherules from Pacific clay: mass distribution and influx rate[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1980, 44(12): 2067—2074.
- 48 PENG H, LUI Z. Measurement of the annual flux of cosmic dust in deep-sea sediments[J]. Lpi Contributions, 1989, 24(4):194.
- 49 PRASAD M S, RUDRASWAMI N G, PANDA D K. Micrometeorite flux on Earth during the last ~50,000 years[J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2013, 118(11): 2381—2399.
- 50 MAURETTE M. Formation of the post-lunar atmosphere[M]//Micrometeorites and the Mysteries of Our Origins. Springer, Berlin, Heidelberg, 2006: 93—102.
- 51 ZOLENSKY M, BLAND P, BROWN P, et al. Flux of extraterrestrial materials[J]. Meteorites and the early solar system II, 2006:

- 869—888.
- 52 YIOU F, RAISBECK G M, JÉHANNO C. The micrometeorite flux to the Earth during the last ~ 200,000 years as deduced from cosmic spherule concentration in Antarctic ice cores[J]. *Meteoritics*, 1991, 26:412.
- 53 MIURA A, SAITO Y, TAZAWA Y, et al. Micrometeorites in Antarctic ice detected by Ir: estimation of 120k year old accretion rate[J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2011, 291(1): 213—216.
- 54 BROOK E J, KURZ M D, CURTICE J, et al. Accretion of interplanetary dust in polar ice[J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(19): 3145—3148.
- 55 YADA T, NAKAMURA T, NOGUCHI T, et al. The accretion rates of cosmic dust on the Earth based on the concentrations of micrometeorites in bare ice around Yamato Mountains[J]. *Meteoritics and Planetary Science Supplement*, 2000, 35: A173.
- 56 YADA T, NAKAMURA T, TAKAOKA N, et al. The global accretion rate of extraterrestrial materials in the last glacial period estimated from the abundance of micrometeorites in Antarctic glacier ice[J]. *Earth, Planets and Space*, 2004, 56(1): 67—79.
- 57 KARNER D B, LEVINE J, MULLER R A, et al. Extraterrestrial accretion from the GISP2 ice core[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2003, 67(4): 751—763.
- 58 YIOU F, RAISBECK G M. Cosmic spherules from an Antarctic ice core[J]. *Meteoritics*, 1987, 22(4):539.
- 59 TAYLOR S, LEVER J H, HARVEY R P. Accretion rate of cosmic spherules measured at the South Pole[J]. *Nature*, 1998, 392(6679): 899—903.
- 60 ENGRAND C, DUPRAT J, DARTOIS E, et al. Cosmic dust flux on Earth inferred from the Concordia micrometeorite collection[C]// EGU General Assembly Conference. EGU General Assembly Conference Abstracts, 2017.
- 61 胡中为, 徐伟彪. 宇宙尘的源和鉴别判据[J]. *紫金山天文台台刊*, 1989, 8(2): 109—120.
- 62 王道德, 戴诚达. 南极冰雪及非南极地区尘粒的研究及其成因[J]. *南极研究*, 1994(4): 4—16.
- 63 MILLMAN P M. Interplanetary dust[J]. *Naturwissenschaften*, 1979, 66(3): 134—139.
- 64 RIETMEIJER F J M. Interrelationships among meteoric metals, meteors, interplanetary dust, micrometeorites, and meteorites[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2000, 35(5): 1025—1041.
- 65 FLYNN G J, KELLER L P, FESER M, et al. The origin of organic matter in the solar system: evidence from the interplanetary dust particles[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2003, 67(24): 4791—4806.
- 66 ROBIN E, MICHEL-LEVY N C, BOUROT-DENISE M, et al. Crystalline micrometeorites from Greenland blue lakes: Their chemical composition, mineralogy and possible origin[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1990, 97(1): 162—176.
- 67 WRIGHT I P, YATES P, HUTCHISON R, et al. The content and stable isotopic composition of carbon in individual micrometeorites from Greenland and Antarctica[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 1997, 32(1): 79—89.
- 68 BECKERLING W, BISCHOFF A. Occurrence and composition of relict minerals in micrometeorites from Greenland and Antarctica-implications for their origins[J]. *Planetary and Space Science*, 1995, 43(3): 435—449.
- 69 BECKERLING W, BISCHOFF A. Mineralogy of micrometeorites from Greenland and Antarctica: Indications for their asteroidal origin[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1995, 38(1):28—40.
- 70 MICHEL-LEVY M C, BOUROT-DENISE M. Mineral compositions in Antarctic and Greenland micrometeorites[J]. *Meteoritics*, 1992, 27(1): 73—80.
- 71 MAURETTE M, HAMMER C, REEH N, et al. Placers of cosmic dust in the blue ice lakes of greenland[J]. *Science*, 1986, 233(4766): 869—872.
- 72 LORIN J C, LÉVY C M, SLODZIAN G, et al. Isotopic and minor elements signature of coarse-grained micrometeorites from greenland blue ice lakes[J]. *Lpi Contributions*, 1989, 24(4):136.
- 73 BADJUKOV D D, BRANDSTÄTTER F, RAITALA J, et al. Unmelted achondritic micrometeorites from the Novaya Zemlya glacier[J]. *Meteoritics and Planetary Science Supplement*, 2009, 72: 5224.
- 74 BADJUKOV D D, BRANDSTÄTTER F, RAITALA J, et al. Basaltic micrometeorites from the Novaya Zemlya glacier[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2010(9): 1502—1512. DOI:10.1111/j.1945-5100.2010.01125.x.
- 75 BADJUKOV D D, RAITALA J. Micrometeorites from the northern ice cap of the Novaya Zemlya archipelago, Russia: The first occurrence[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2003, 38(3): 329—340.
- 76 BADJUKOV D D, BRANDSTÄTTER F, RAITALA J, et al. Unmelted FeNi metal micrometeorites from the Novaya Zemlya glacier[C]//Lunar and Planetary Science Conference. Lunar and Planetary Science Conference, 2009, 40.

- 77 唐学远, 孙波, 李院生, 等. 南极冰盖研究最新进展[J]. 地球科学进展, 2009, 24(11): 1210—1218.
- 78 MAURETTE M, POURCHET M, PERREAU M. The 1991 EUROMET micrometeorite collection at Cap-Prudhomme, Antarctica[J]. Meteoritics, 1992, 27(4): 473—475.
- 79 OLINGER C T, MAURETTE M, DAS J P, et al. Noble gas contents of unmelted Cap-Prudhomme “Giant Micrometeorites”[C]//Lunar and Planetary Science Conference. Lunar and Planetary Science Conference, 2013:84—95.
- 80 YANO H, NOGUCHI T. Sample processing and initial analysis techniques for Antarctic micrometeorites[J]. Antarctic meteorite research, 1998, 11: 136.
- 81 MATRAJT G, GUAN Y, LESHIN L, et al. Oxygen isotope measurements of individual unmelted Antarctic micrometeorites[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2006, 70(15): 4007—4018.
- 82 GOUNELLE M, MAURETTE M, KURAT G, et al. Comparison of the 1998 “Cap-Prudhomme” and “Astrolabe” Antarctic micrometeorite collections with the 1996 “South Pole” collection: Preliminary implications[C]//Lunar and Planetary Science Conference. Lunar and Planetary Science Conference, 1999, 30.
- 83 YABUTA H, NOGUCHI T, ITOH S, et al. Formation of an ultracarbonaceous Antarctic micrometeorite through minimal aqueous alteration in a small porous icy body[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2017, 214: 172—190.
- 84 NOGUCHI T, NAKAMURA T. Mineralogy of Antarctic micrometeorites recovered from the Dome Fuji Station[J]. Antarctic Meteorite Research, 2000, 13(13): 285—301.
- 85 NAKAMURA T, IMAE N, NAKAI I, et al. Antarctic micrometeorites collected at the Dome Fuji Station[J]. Antarctic Meteorite Research, 1999, 12: 183.
- 86 YADA T, KOJIMA H. The collection of micrometeorites in Yamato meteorite ice filed of Antarctica in 1998[J]. Antarctic Meteorite Research, 2000, 13:9—18.
- 87 野口高明, 大橋憲昭, 佐伯具亮, 等. 南極表層雪中の微隕石の鉱物と有機物について[C]//日本鉱物科学会年会講演要旨集 日本鉱物科学会 2009 年年会. 一般社団法人日本鉱物科学会, 2009: 215.
- 88 DOBRICĀ E, ENGRAND C, LEROUX H, et al. Transmission electron microscopy of CONCORDIA ultracarbonaceous Antarctic micrometeorites (UCAMMs): mineralogical properties[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2012, 76: 68—82.
- 89 SUAVET C, ROCHETTE P, KARS M, et al. Statistical properties of the transantarctic mountains (TAM) micrometeorite collection[J]. Polar Science, 2009, 3(2): 100—109.
- 90 KOEBERL C, HAGEN E H. Extraterrestrial spherules in glacial sediment from the transantarctic mountains, Antarctica—structure, mineralogy, and chemical composition[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1989, 53(4):937—944.
- 91 缪秉魁, 林杨挺, 王道德, 等. 我国南极陨石研究与展望[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2004, 23(2): 149—154.
- 92 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.
- 93 XIA Z, ZHANG J, MIAO B, et al. Meteorite classification for building the Chinese Antarctic meteorite depository—introduction of the classification of 500 Grove Mountains meteorites[J]. Advances in Polar Science, 2016, 27(1): 56—63.
- 94 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): 1081—1089.
- 95 林杨挺, 缪秉魁, 徐琳, 等. 陨石学与天体化学(2001—2010)研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2013, 32(1): 40—55.
- 96 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.
- 97 LUO H B, LIN Y T, HU S, et al. Magnetic susceptibility of meteorites collected in Grove Mountains, Antarctica[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(5): 1260—1274.
- 98 LI S, WANG S, LI X, et al. A new method for the measurement of meteorite bulk volume via ideal gas pycnometry[J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2012, 117(10).
- 99 叶连俊, 陈先沛, 占巴扎布, 等. 十亿年前的宇宙尘[J]. 地质科学, 1964, (3): 230—240.
- 100 彭汉昌, 徐培苍. 铁质宇宙尘中的有机分子的发现[J]. 海洋与湖沼, 1995, 26(5): 509—513.
- 101 柴之芳, 毛雪瑛, 马淑兰, 等. 深海宇宙尘的痕量元素丰度特征[J]. 中国科学(B 辑 化学 生物学 农学 医学 地学), 1986(10): 1089—1099.
- 102 肖小月. 我国宇宙尘研究的新进展[J]. 矿物岩石地球化学通讯, 1985(4): 156—158.
- 103 彭汉昌, 赵奎寰, 陈穗. 深海宇宙尘的初步研究[J]. 科学通报, 1981, 26(11): 682—685.

- 104 欧阳自远. 陨石、宇宙尘研究对认识地球演化的几点启示[J]. 矿物岩石地球化学通讯, 1989(2): 132—134.
- 105 肖小月, 欧阳自远. 宇宙尘的收集、鉴别与类型[J]. 地质地球化学, 1984(2): 32—38.
- 106 李春来, 欧阳自远, 刘东生, 等. 黄土中微玻璃陨石和微玻璃球的发现与意义[J]. 中国科学 B 辑, 1992, 1(1).

COLLECTION, RESEARCH AND PROSPECTS OF MICROMETEORITES FROM POLAR REGIONS

Xia Zhipeng^{1,2,3}, Miao Bingkui^{1,2,3}, Zhang Chuantong^{1,2,3}, Huang Lilin^{1,2,3}

¹Guangxi Key Laboratory of Hidden Metallic Ore Deposits Exploration, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China;

²Key Laboratory of Planetary Geological Evolution at Universities of Guangxi Province, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China;

³Institute of Meteorites and Planetary Materials Research, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract

The study of micrometeorites provides valuable insights into extraterrestrial environments and the evolution of the solar system. Since the 1940s, micrometeorite collection has been the focus of international research, with many scientific achievements made based on collections from polar regions. Although micrometeorite research in China occurred mainly between the 1980s and 1990s, it has more recently stagnated. This article summarizes discoveries regarding micrometeorites from polar regions, and proposes prospects and plans for future study.

Key words micrometeorite, Antarctic, Arctic, meteorite, collection