

太阳系的“信使”

——流星与陨石

□文 / 李 刚



> 星行电征 视觉中国 / 供

作者简介 李刚，地质矿产工程师，研究方向为岩石学、矿物学、矿床学和地学科普。

说明古人对流星和陨石的观察记录很早就开始了，并对其成因提出了猜测性解释。到了近现代，随着观测技术的进步和天文理论的发展，人们一步步揭开了“星陨如雨”的秘密。

星空“焰火”——流星

“四月辛卯夜，恒星不见，夜中星陨如雨”。两千多年前的古籍《左传》中，记录了在一个星辰寥落的夏夜里发生的一场流星雨。无独有偶，后来的《史记》里也有“星坠地则石也”的记载。

太阳系中的地外小天体（主要为小行星、彗星）或其碎块被地球引力捕获后会向着地球运动，穿过大气层陨落到地面。在落向地面的过程中，天体碎块受到地球引力的加速作用，进入大气层时的速度超过 11.2 千米 / 秒，即第二宇宙速度。高速运动的碎块剧烈压缩前方空气使其温度快速升高至 2 000℃ 以

上，巨大的热量导致碎块在瞬间燃烧并产生明显的光迹，这就是我们所看见的流星。流星的视亮度超过-4 等（-4 等相当于凌晨金星的亮度）时被称为“火流星”。火流星的光芒更亮，尾迹比一般流星更长更持久，观赏性极强。一闪而过的流星，流星体只有几厘米大小，而那些明亮的火流星，流星体大小有几十厘米，有的甚至超过 1 米，质量则有可能达到数吨。而当流星成群出现时，就称为“流星雨”。

流星雨的母体一般为彗星。彗星是太阳系形成初期遗留下的小天体，内部含有大量易于挥发的水冰和气体冰。20 世纪 50 年代，天文学家惠普尔建立了经典的“脏雪球”模型用来描述彗星的结构：一个冰与石的混合体。彗星分为周期彗星和非周期彗星，周期彗星沿扁平的椭圆形轨道绕太阳公转，公转周期短于 200 年的称为短周期彗星，主要来自海王星外围的柯伊伯带；公转周期超过 200 年的称为长周期彗星，目前普遍认为它们来自太阳系边缘的奥尔特云。著名的哈雷彗星公转周期为 76 年，是第一颗被确认的短周期彗星；2020 年观测到的新智彗星是少有的能用肉眼看到的大彗星，其公转周期在 6 000 年以上。而非周期彗星的轨道为抛物线或双曲线，在经过近日点一次后便飞离太阳系一去不返。也有理论认为它们其实并非太阳系成员，而是来自于邻近恒星系的星际天体。在运行的大部分时间里，彗星距离太阳都很远，而当靠近太阳时，受太阳辐射等因素影响，冰因受高温而升华成气体并裹挟着大量尘埃从彗星表面喷发，逐渐散布在彗星运行轨道上形成一个椭圆形的尘埃带。当地球的轨道与这个尘埃带交会时便会捕获一些尘埃，尘埃落向地面时就产生了流星雨。可以这样想象，地球就像是一辆在椭圆形轨道上循环运行的“清洁车”，不断清除散布在轨道上的“垃圾”，并将这些“垃圾”转化成一場绚丽的星空“焰火”。

由于地球轨道和彗星轨道通常都有固定的交会时间，所以出现流星雨的时间也是固定的，并以年

为周期循环。比如，地球在每年 5 月和 10 月靠近哈雷彗星的轨道，对应出现的是宝瓶座流星雨和猎户座流星雨。周期彗星每次回归都会在轨道上留下新的尘埃，伴随彗星回归，其对应的流星雨也会出现远超平时规模的爆发现象。

流星雨往往会以星座冠名，那么漫天飞舞的流星雨怎么会和固定不动的星座产生联系呢？原来形成流星雨的众多尘埃在进入大气层时，各块尘埃的下落轨迹是近于平行的，但因为透视变形的影响，从地面上看起来就像是从空中的一个点发射出来的，这个点被称为辐射点。由于不同流星雨的辐射点位置不同，故而国际天文学联合会（IAU）统一了命名规则，使用流星雨辐射点所在的星座或附近的恒星来命名流星雨，比如宝瓶座流星雨和猎户座流星雨。

但是，也有极少数流星雨的母体为小行星。为什么小行星会成为流星雨的母体，至今还没有定论。有观点认为，这类小行星是彗星解体后留下的残骸，所以会展现出与彗星类似的性质。还有观点认为，这类小行星之前可能遭遇过严重的碰撞，从而产生了大量溅射物散布在运行轨道上，具备了产生流星雨的条件。

目前已经命名的流星雨数量超过 800 个，其中，象限仪座、英仙座、双子座流星雨并称为北半球三大周期性流星雨，每小时天顶流星数量均超过 100 颗。每年 1 月 3 日左右，地球轨道与 2003 EH1 小行星轨道交会时，会发生象限仪座流星雨。值得注意的是，1928 年，国际天文学联合会在确认现代 88 个星座时，将象限仪座取消并划入邻近的牧夫座、武仙座等星座，但是象限仪座这个星座名字却通过流星雨这种方式保留下来（实际辐射点位于现在的牧夫座）。每年 8 月 12 日前后，地球轨道与斯威夫特-塔特尔（109P/Swift-Tuttle）彗星轨道交会时，会出现以火流星数量多而闻名的英仙座流星雨。以古希腊神话中太阳神之子法厄同的名字命名的 3200



＞ 叠加合成的双子座流星雨

Phaethon 小行星，是所有已命名的小行星中最靠近太阳的，它的近日点距离甚至只有水星的一半，在每年 12 月 14 日前后，地球轨道与其轨道交会时，会出现流量大而稳定、流星速度较慢的双子座流星雨。

星陨成石——陨石

流星体在下坠穿过地球大气层时，高温高压的气流会对其进行剥蚀和减速，大多数较小的流星体都会在大气层中烧蚀殆尽，这与流星体进入大气层时的速度、质量大小和机械强度等因素有关。如果流星体穿越大气层后燃烧未尽，而剩余物质降落到地面，就成为陨石。流星的母体一般是彗星，而绝大多数陨石的母体来自火星和木星之间的小行星主带，极少数来自月球或火星，还有些微小陨石来自彗星。小行星主带中密布的小行星之间会发生相互碰撞以及受到太阳系内各大天体的引力摄动而改变原来的轨道，其中一些小行星会被地球引力捕获陨

落到地面成为陨石。来自月球或火星的陨石则是小行星撞击月球或火星表面时溅射出来的岩石碎块降落到地表而形成，数量稀少，尤为珍贵。陨石是人类直接认知太阳系天体的珍贵实物标本，对研究太阳系的形成和演化具有重要意义。

根据陨石中两类主要矿物的相对比例，陨石总体上可以划分为三大类：石陨石、铁陨石和石铁陨石。石陨石的主要矿物成分是硅酸盐矿物，铁陨石的主要矿物成分是铁镍金属矿物，石铁陨石的主要矿物成分是接近等量的硅酸盐矿物和铁镍金属矿物。另外，根据陨石母体是否经过熔融分异，可以把陨石划分为未分异陨石和分异陨石。

石陨石是最常见的一种陨石，橄榄石、辉石和长石三种硅酸盐矿物含量占 75%~90%，铁镍金属矿物占 10%~25%。按照不同的结构特征，石陨石又可分为球粒陨石和无球粒陨石两大类。球粒陨石属于未分异陨石，内部含有大量毫米级的硅酸盐矿物球粒（球粒主要由橄榄石和辉石组成），球粒陨

石的母体是从太阳系原始星云中直接凝聚出来的产物，它的平均化学成分在一定程度上可以反映太阳系原始星云的组成。球粒陨石又可细分为几个亚类：普通球粒陨石、碳质球粒陨石、顽辉球粒陨石、R 型球粒陨石和 K 型球粒陨石。

普通球粒陨石是最常见的球粒陨石类型，主要矿物是橄榄石和辉石，次要矿物是铁纹石、镍纹石和陨硫铁。碳质球粒陨石的名称容易使人产生误解，其实它的碳含量只比其他球粒陨石略高一点。碳质球粒陨石的铝（Al）、钙（Ca）、钪（Sc）和稀土元素（REEs）含量高于太阳系的平均值，其他类型的球粒陨石则低于平均值，这是确定碳质球粒陨石的最主要指标。它的另外一个重要特征是氧同位素组成。通过测定地球上氧同位素（氧 17 和氧 18）组成的比值获得一条地球分馏线，碳质球粒陨石的氧同位素比值低于地球分馏线，而其他类型的球粒陨石则大多高于地球分馏线。顽辉球粒陨石含有特征矿物陨硫钙矿，这种矿物在地球上没有，在其他类型的陨石中也不存在。

无球粒陨石可以划分为四类：原始无球粒陨石、分异无球粒陨石、月球陨石和火星陨石。橄榄古铜无球粒陨石和辉石无球粒陨石的化学成分接近球粒陨石，称为原始无球粒陨石，其实质是陨石母体熔融程度低，保留了一些球粒陨石的化学特征。分异无球粒陨石中有三种较为特殊，即古铜钙长无球粒陨石、钙长辉长无球粒陨石和紫苏辉石无球粒陨石，合称为 HED 无球粒陨石（HED 是取三种陨石英文名称的首字母合写而成），研究证实三者均来自于小行星主带中非常大的小行星之一——灶神星。月球陨石可分为高地斜长岩、月海玄武岩、冲击碎屑岩和克里普岩。火星陨石可分为辉熔长无球粒陨石、透辉橄无球粒陨石、纯橄无球粒陨石和斜辉无球粒陨石。HED 群中钙长辉长无球粒陨石的氧同位素比值低于地球分馏线，



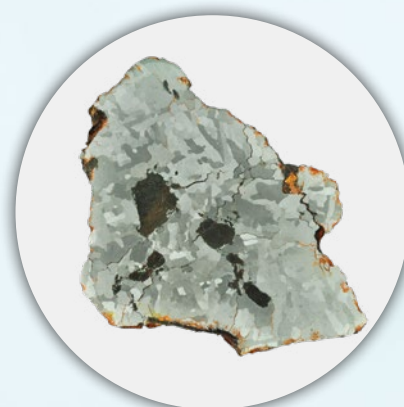
＞ 碳质球粒陨石



＞ R 型球粒陨石



＞ 古铜钙长无球粒陨石



＞ 铁陨石中的维斯台登构造



＞ 橄榄陨铁



＞ 橄辉无球粒陨石

火星陨石的氧同位素比值高于地球分馏线，而月球陨石的氧同位素比值则与地球分馏线重合。

铁陨石主要由铁纹石和镍纹石组成，还含有陨硫铁矿、陨磷铁矿、陨碳铁镍矿等矿物。铁陨石按照结构不同可分为六面体铁陨石、八面体铁陨石和富镍无结构铁陨石。铁陨石经切割抛光后，会呈现出由铁纹石和镍纹石组成的条带状交错纹理，称为维斯台登构造或魏德曼花纹。其形成机制是铁陨石的母体在极度缓慢的降温条件下冷却，冷却速率通常在 1~100℃ / 百万年范围内，据此推算，维斯台登构造的形成时间大约需要几千万年至上亿年。

石铁陨石由硅酸盐矿物和铁镍金属矿物混合组成，二者含量大致相等，可分为橄榄陨铁和中铁陨石。橄榄陨铁中含有半透明的圆形、不规则状橄榄石晶体，大小一般为几厘米，经过切割的橄榄陨铁切片观赏价值极高，黄绿色的橄榄石嵌于银灰色的铁镍合金之中，如璀璨繁星闪耀夜空。

陨石坠落地球还形成了一种特殊的景观——陨石坑。陨石坑是较大陨石以超高速撞击固体星球表面而形成的凹坑或环状地质构造，并使星球表面撞击处发生变形甚至变质作用。陨石撞击作用的特殊之处集中体现在两个方面：一是作用时间短，成坑过

程往往仅有几十秒；二是释放能量巨大，能产生极端高温高压环境。陨石坑不仅存在于地球，在太阳系的其他石质行星及卫星等表面都广泛发育。地球上的生物大灭绝事件、月球的形成等可能都与陨石撞击作用有关。

陨石撞击作用会在地貌、矿物岩石、地球化学方面留下独特的标志，成为判定陨石坑的依据。而地貌、地球化学标志只能作为辅助性指示标志，矿物岩石标志才是关键性判定标志。例如，环形凹坑地貌的形成，可能是由于构造运动引起的地壳差异性升降造成，或者火山喷发也能形成这种地貌。矿物岩石标志中以面状构造、高压矿物、击变玻璃最为重要。例如，面状构造分为面状裂隙和击变面状页理，石英、锆石等矿物受到冲击作用都会形成面状构造。石英击变面状页理只能通过冲击作用形成，是陨石坑最主要的判定标志，地球上已发现的陨石坑绝大多数都发育有石英击变面状页理。

迄今为止，地球上确定的陨石坑数量为 190 个，直径从 100 米到 300 千米不等。中国目前被国际学界认可的陨石坑只有辽宁岫岩陨石坑和黑龙江依兰陨石坑。岫岩陨石坑直径 1.8 千米、深 150 米，是大约 5 万年前由一颗直径约 60~100 米的陨石撞击而形成的，坑内发现了多种判定陨石坑的矿物岩石标志，如石英面状构造和柯石英、金刚石等高压矿物，它在 2010 年被收录进《地球撞击数据库》，是中国第一个获得国际学术机构认可的陨石坑。

荒原遗珍——陨石富集

陨石降落地球是随机事件，理论上陨石会均匀地分布在地表。



辽宁岫岩陨石坑

但由于地球表面有约 70% 的面积被海洋覆盖，再加上还存在其他大面积不适合寻找陨石的高山、森林等地区，使得我们能够进行陨石收集的区域非常有限。不过，由于具有地形、气候、地质作用等多种特殊条件，南极和沙漠成为陨石相对富集的区域。

从 1969 年日本科考队首次在南极发现陨石起，在此后的 50 多年时间里，包括中国在内的多国科学家陆续在南极收集到 5 万多块陨石，发现了 50 多个陨石富集区。南极巨大的冰盖形成于约 3 400 万年前，低温、干燥的气候有利于陨石长期保存，加之坠落在冰盖的陨石被封存在冰层中，极大地减缓了陨石的风化速率。通常情况下，地表陨石的居地年龄（陨石陨落至地球后的留存时间）不足几万年，而南极陨石的最大居地年龄长达 280 万年。更重要的是，南极的地形地貌、冰川运动、下降风作用等因素共同作用形成了陨石富集区域，富集区大部分沿着横贯南极的山脉分布，少部分位于东南极的冰原岛峰。南极陨石富集常与蓝冰区域紧密关联。所谓蓝冰，是降雪经历粒雪化、成冰作用过程形成冰层，冰层在上覆压力作用下密度增加，内部气泡减少，在光的散射作用下形成视觉上的蓝色。陨石在蓝冰中储存，并随着冰流从冰原高地向海边流动，在遇到山脉阻挡时流速减缓，强烈的下降风将表层冰雪吹走，浅层蓝冰在阳光照射下消融，陨石逐渐暴露于冰层表面。这种富集模式称为山前阻挡模式。另一种富集模式为山后峡谷模式，以东南极的格罗夫山最为典型。格罗夫山具有逐渐下降的阶梯状地形，并发育有广阔的蓝冰区，储存陨石的蓝冰随冰流从东南冰原台地流向西北方向的兰伯特裂谷，形成陨石富集区域。目前，在格罗夫山区已发现 12 000 多块陨石，成为南极发现陨石颇多的区域之一。此外，盛行风的搬运作用可以在迎风坡和一些凹地形成质量较小、个体不完整的陨石碎片富集区。南极的强风可以移动质量小于 100 克的陨石，而强风和冰碛共同作用可以搬运质量小于 200 克的陨石。

沙漠地区的陨石富集与地形和气候直接相关。沙漠地区风力地质作用强烈，风积物堆积形成形状多样、规模不一的沙丘。盛行风的推进使分散陨石（主要是小块陨石，一般质量小于 100 克）随风化碎屑物一起向沙丘方向运移。当遇到凸起的沙丘地形阻挡时，随风迁移的小块陨石就在迎风坡发生富集。同时，距离沙丘由近到远，基本呈现陨石质量由小到大散落分布的规律，小块陨



在南极收集的陨石

石大多位于更加靠近沙丘位置的风向前缘。

方寸之间，天地尽藏。无论是火星和木星之间的小行星形成的大小陨石，还是柯伊伯带、奥尔特云中的彗星化作的璀璨流星，它们都携带着异常丰富的科学信息，作为太阳系的“信使”跨越茫茫太空奔赴地球，为人类认识和研究太阳系的起源与演化提供了最重要而独特的窗口。

作者单位 / 山西地质博物馆

（本文编辑：张佳楠）