

# 陨石撞击的地学意义与撞击构造的判识标志

房建军<sup>1</sup>, 王建强<sup>1</sup>, 邱欣卫<sup>1</sup>, 高飞<sup>1</sup>, 高新奎<sup>2</sup>

(1 西北大学地质学系, 陕西西安 710069; 2 延长油田井下作业公司, 陕西延安 716000)

**摘要:** 陨石撞击是太阳系各行星及卫星演化、地质历史中导致古气候环境灾变与生物灭绝和新生的主要营力之一, 在地球演化早期是一种较为普遍发生的事件。研究陨石撞击作用及其影响是探讨地球演化的有机组成部分, 无论在基础理论方面还是在实际应用方面, 都具有重大的意义。目前对于陨石撞击的地学意义研究, 主要集中在撞击事件与地球环境灾变、地球生命更替、板块构造动力学、富集成矿(藏)等关系方面。撞击构造是判识陨石撞击事件最明显和最直接的记录, 其形态和规模、岩石学、矿物学、地球化学、构造和地球物理等特征是判识撞击构造的重要标志。

**关键词:** 陨石撞击; 地学意义; 撞击构造; 判识标志

**中图分类号:** P69 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2008)03-0234-06

## Geoscience Significance and Identification of Meteorite Impact Structure

FANG Jian-jun<sup>1</sup>, WANG Jian-qiang<sup>1</sup>, QIU Xin-wei<sup>1</sup>, GAO Fei<sup>1</sup>, GAO Xin-kui<sup>2</sup>

(1. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China;

2. Operation Engineering Company, Yanchang Oilfield, Yan'an 716000, Shaanxi, China)

**Abstract** Meteorite impact is one of the important agents that caused the palaeoclimatic environment catastrophe and the extinction and rebirth of creatures in the geologic history during the evolution of planets and satellites in the solar system, and it is also the very common event during the nonage evolution of the earth. The study of meteorite impact and its influence is necessary to investigate the evolution of the earth and has an important significance both in the basic theories and practical applications. Nowadays, the studies on the geoscience significance of meteorite impact mainly focus on the relationship between impact event and the earth's environment catastrophe, the life successions on the earth, the plate tectonic dynamics and the concentration in ore-formation etc. The impact structures are the most evident and direct records to identify the meteorite impact events and their characters of shape, size, lithology, mineralogy, geochemistry, structures and geophysics are the important signs to identify the impact structure.

**Key words:** meteorite impact; geoscience significance; impact structure; identification

## 0 引言

陨石撞击, 主要指星际运行的小天体(如小行星、彗星、流星体等)对包括地球在内的各个星球的撞击。撞击构造是小天体撞击星球地表形成的一

种近圆形的构造凹地, 也被称为陨石坑(陨击坑)或星疤构造。

随着航天科技的飞跃进步和行星科学的迅速发展, 特别是 1969 年人类首次踏足月球以来, 取得了十分丰富的空间研究资料, 才促使人们认识到陨

收稿日期: 2007-10-20

基金项目: 教育部长江学者“油气盆地”创新团队发展计划项目(IRT0559); 国家自然科学基金项目(40372096)

作者简介: 房建军(1979-), 男, 山东滨州人, 工学博士研究生, 从事含油气盆地地动力学研究。E-mail: leouisa@163.com

©1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

星撞击在太阳系内是一种较普遍发生的事件, 而不是个别特例。在地质历史上, 陨星也是造访地球的“常客”, 在近代也有“天地大冲撞”事件的发生, 如 1994 年 7 月发生的“慧木相撞”事件就是典型实例。如果这种哈雷慧星级的天体与地球相撞, 其几何数量级的破坏力将造成毁灭性的灾难, 不过这种可能性约是每 1 亿年中 1 次或 2 次。即使是规模较小的小天体, 因其“造访”地球的概率较大, 也往往具有破坏性的威力。如 20 世纪初在西伯利亚发生的“通古斯”事件, 研究与计算表明, 这是由一颗直径仅 60 m 的小行星撞击地球造成的。从宇宙尘到规模较大的小天体, 不同等级陨星的撞击强度和频率也差别很大。如果用陨星的直径来近似地表征撞击强度, 可以看出, 撞击的强度和频率之间一般呈负相关性(图 1)。根据对突破大气层的陨星进行观测和分析, 地球轨道正面临陨石进入的高峰期。

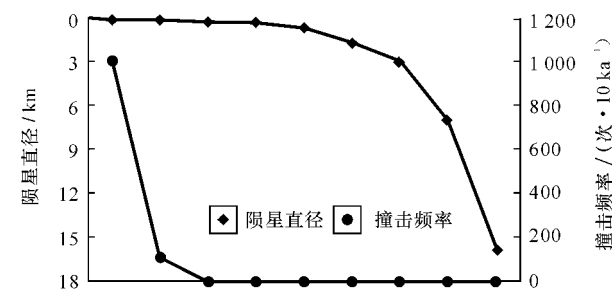


图 1 陨星直径与撞击频率关系

Fig 1 Relationship of Meteorite Diameter and Impact Frequency

地球物质组成的非均一性与演化的非均变性, 决定了在地球演化过程中突发事件必然频繁发生。这些突发事件所形成的许多现象和规律, 仅从地球本身的发展和内部动力是难以解释的。如果将其置于统一的宇宙系统中来考虑, 则使长期困惑地质学家的许多问题有可能迎刃而解<sup>[1]</sup>。太阳系中小天体(小行星、彗星)撞击地球、行星及其卫星, 是太阳系各行星及卫星演化、地质历史中导致古气候环境灾变与生物灭绝和新生的主要营力之一<sup>[2]</sup>。因此, 探讨陨星撞击作用及其影响是探讨地球演化的有机组成部分, 无论在基础理论方面还是在实际应用方面, 都具有重大的地学意义。

## 1 陨星撞击的地学意义

正是由于陨星撞击在地质历史中频繁发生并具有巨大威力和深远影响, 随着地质研究过程中发

现的许多新的现象和事实, 人们进一步关注和研究陨星撞击作用, 研究的内容也不断深化和扩大。国内外一些学者, 已开始从全球这一空间尺度来重新考察和研究地球演化史中的撞击遗迹, 重新认识地外营力在地球演化史中的地位问题<sup>[2]</sup>。所以, 刘池阳<sup>[3-4]</sup>将陨星撞击作用作为盆地和构造形成动力的一种特殊类型, 划归重力作用大类<sup>①</sup>。目前对于陨星撞击的地学意义研究, 主要集中在以下方面。

### 1.1 陨星撞击与地球环境灾变

陨石、小行星等天体撞击突然和灾变性干扰地表环境, 把整个处于常规态演化的生物圈、水圈和大气圈毫无先兆地导入空前的混乱状态<sup>[2]</sup>, 对于全球环境的影响巨大而深远。

陨星以宇宙速度穿越大气层, 形成超高温高压的冲击体撞击地面并瞬时爆炸、撞击成坑, 诱发超强地震和巨型海啸。撞击生热造成高温大火, 点燃地面的大片森林与植被。森林燃烧与爆炸造成的大量尘埃与气体共同散布于大气中, 屏蔽太阳辐射, 导致气温骤降, 抑制和阻断植物的光合作用, 致使食物链中断乃至崩溃, 黑暗而寒冷的“核冬天”降临, 造成“死劫难海洋”<sup>[5]</sup>。地表温度的急剧降低使得雪线下降和冰川增大, 形成“白色地球”, 进入新的冰期。超高温的冲击体离解大气分子, 形成氮氧化物  $\text{NO}_x$ , 并最终被氧化成为硝酸雨, 沉降侵蚀地面, 严重污染地表生态环境。

### 1.2 陨星撞击与地球生命演替

与生态环境进行物质和能量的交换是生物有机体生存与发展的必需条件, 因此生态环境控制和影响着生物有机体的演化与改造。如果生态环境发生重大变迁, 生物有机体特别是它们的物种必然产生响应。当自然灾害频发和环境严重恶化, 可能会导致物种的集群绝灭。地质历史中曾经发生的几次最大规模古生物集群绝灭事件及随后的“生命大爆发”, 均出现在地史发展中的重大转折时期, 彼时必然发生过地球不同圈层或与地外的异常相互作用。

1980 年, Alvarez 小组<sup>[6]</sup>在 Gubbio 的 K/T 界线发现了铱的高含量异常, 从而提出了陨星撞击理论作为 K/T 过渡时期的集群绝灭机制, 之后又在全球不同的 K/T 界线剖面中相继发现了类似的铱异常。由于铱异常在时间和空间分布上存在着较

① 刘池阳. 沉积盆地分析. 西北大学研究生学位课程, 2004.

强的差异性,而且从火山喷发物中也测得铱异常<sup>[7]</sup>,并引发了陨星撞击与德干高原火山事件之间关系的广泛讨论与思考<sup>[8-10]</sup>。由此可见,铱异常的出现可能存在多解性,陨星撞击事件的确定,关键在于发现具有异常高丰度的铂族元素及其他微量元素的地层<sup>[11]</sup>。但是 K/T 界线铱和其他铂族元素的丰度异常呈全球性分布<sup>[12]</sup>,在铂族元素异常层位上有冲击变质矿物、冲击玻璃伴生<sup>[13]</sup>,并且找到了与其具有成因联系的同时代陨击坑<sup>[14]</sup>,以及  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年龄显示德干高原火山活动的时间为  $(67\pm 2)\text{Ma}$ ,明显早于集群绝灭事件<sup>[15]</sup>等证据的存在,成为火山绝灭机制难以解释的致命缺陷,陨星撞击导致集群绝灭已经被绝大多数学者普遍接受和采纳。但对其复杂和特殊的模式与过程尚未取得共识,陨星撞击几何数量级的破坏威力所引起的诸如极强烈冲击波与大火<sup>[16]</sup>、海啸<sup>[17]</sup>、毒气<sup>[18]</sup>、酸雨<sup>[19]</sup>、突然急剧地降温<sup>[20]</sup>等诸因素综合<sup>[2]</sup>造成的环境恶化应该是主要机制和关键作用。

陨星撞击对生物演化带来的不仅是灾难与绝灭,也可能提供了一个契机,推动地球生物有机体的演化。大批物种集群绝灭之后,随着温室效应的增强,古气候经历由降温至升温的漫长过程,残存和新生的物种得以滋生繁衍。而且,陨星携带的地外成因的有机物质可能会促进地球生命的演化<sup>[15]</sup>,例如“寒武纪生命大爆发”,地球生命的数量和种类如雨后春笋般的突然增加,复杂的多细胞生物大量出现,此时正值地球频遭陨星撞击之际。二者是否存在必然的内在联系,值得进一步探索。

### 1.3 陨星撞击与板块构造动力学

板块构造学说自 20 世纪 60 年代兴起,为地球科学和生产实践作出了巨大贡献。其主要论点与事实已经得到公认,但动力学机制至今仍是一个争论的课题。许多学者认为,地幔对流驱动岩石圈板块是比较困难的或难以成立的,而陨星撞击对板块运动的影响应给予重视。

一些天体学家提出,撞击作用可降低或释放潜在的超压,导致地幔物质的熔融。巨大的撞击可以分裂岩石圈,致使板块分裂、拼合与运动<sup>[21]</sup>。Oberbeck 等<sup>[22]</sup>研究了二叠纪末的冰碛岩,发现冰碛岩主要分布在大陆分裂的边界,且常与溢流玄武岩共生,因而认为冈瓦纳大陆的分裂是由陨击作用引起的。巨大的陨击作用可能造成上岩石圈上部物质的局部亏损,为保持岩石圈的平衡,就可引起

地幔物质的局部上涌,派生出巨大的平流传输效应,影响地幔上层的温度分布,并可局部改变地幔对流<sup>[23]</sup>。这样在巨大陨击作用下,就有可能出现以陨石坑为中心的岩石圈板块扩张作用,形成板块的三联点,出现板块的放射状水平运动,并同时局部改变地幔对流的模式。据此假说,中、新生代地外巨大陨击作用可能是板块运动和局部地幔物质上涌的主要诱发因素或重要诱发因素之一<sup>[24]</sup>。

### 1.4 陨星撞击与富集成矿(藏)

由陨石、小行星等天外来物撞击作用而形成的矿产包括金刚石、宝玉石;铂族元素矿床;铀、钍、稀土元素;石油、天然气、煤和许多非金属矿床。早在 20 世纪 60 年代, R S Dietz 就提出加拿大的萨德伯里(Sudbury)超大型铜镍矿是小行星撞击形成的<sup>[25]</sup>。近年来,人们愈来愈重视对撞击成矿作用的研究,并提出许多与撞击作用有关的矿产资源<sup>[2,26]</sup>,如卡斯韦尔(Carswell)铀矿、希尔津(Siljan)铅锌矿、里斯(Ries)煤矿、布伦特(Brent)石膏和萤石矿、白云鄂博铁钨稀土元素矿床<sup>[27]</sup>以及美国 Ames 和澳大利亚 Tookoonooka 的油气能源矿产等。

撞击与成矿的关系十分密切,其成因可能有几种情况。

(1)撞击作用提供了成矿物质,撞击体本身富含某些元素,在撞击过程中可以富集成矿。

(2)撞击事件导致的大规模生物绝灭为有机矿产的形成提供了一定的物质基础。

(3)撞击作用产生了成矿环境,如高压高温矿物形成所需的环境;引起成矿元素的活化和分异,诱发含矿流体浮升富集成矿。

(4)撞击作用形成了某些地质建造,为矿产的富集、分布与保存提供了有利的场所。

## 2 撞击构造的判识

撞击构造是判识陨星撞击事件最明显和最直接的记录,是发现和解决众多令人困惑的地质现象和问题的重要途径和有效手段之一。

陨星撞击星球的频率较高,已使月球、火星和木星等星体表面伤痕累累。据美国史密森尼博物馆的估计,在过去的 10 亿年间,陨星撞击地球造成直径超过 1 km 的陨石坑就多达 13 万个<sup>[28]</sup>。至今地球上发现的撞击坑有近 200 个,其形成的地质年代从元古代至全新世<sup>[29]</sup>。全球陨石坑分布遍布世界各大洲,大多集中在澳大利亚、北美和斯堪的那

维亚半岛等克拉通地区, 主要原因是这些地区具有相对稳定的地表保存条件和详细的地质研究基础。大陆表层长期的侵蚀和沉积作用, 使相当一部分撞击坑已消失或掩埋。大约有 20% 的的撞击坑是由地球物理异常、钻探所证实; 约 20% 是通过撞击熔岩辨识的; 约有 50% 的撞击坑年龄小于 200 Ma<sup>[2]</sup>。这反映地质作用的改造使撞击坑的保存率较低。

撞击构造有其独特的特征, 这些特征是判识撞击构造的主要标志。

### 2.1 形态和规模特征

由于地质条件、岩性和地表起伏等差异, 所形成的撞击构造形态也不相同, 主要有 3 种: 简单撞击构造(图 2)、具有中心隆起的复杂撞击构造和多环撞击盆地。大多数撞击构造具有圆形外貌, 一般内部低凹, 周缘常有环拱的堤埂甚至是环山。但是一些古老的撞击构造, 如北美地盾上的一些前寒武纪陨石坑, 历经长期的改造, 其周围的堤埂、环山地形已不明显甚至消失。有些圆形外观的陨石坑, 中央还有隆起, 经过长期的剥蚀, 形成中心高四周低的地貌, 甚至具有多层的同心环状构造。当然, 并非所有的圆形或环形构造都是撞击成因的, 如火山和岩浆作用也可以造成近圆形外观的构造, 但是撞击构造的圆度远大于其他成因形成构造的圆度。

撞击构造的规模大小不等, 月球上最大的撞击坑艾特肯盆地直径达 2 400 km<sup>[28]</sup>。地球已经发现的撞击坑的直径, 从几十米(如美国堪萨斯的 Havi-land 坑, 直径 14 m)到 229 km (Yucatan 坑, 墨西哥)<sup>[29]</sup>。已发现的撞击构造大多数规模较小, 直径仅有几千米, 甚至更小。

### 2.2 岩石学特征

陨星撞击地表过程中, 冲击变质作用十分强烈且普遍, 存留了天然产出的冲击变质产物, 主要有撞击玻璃、击变岩和高压相矿物等, 其特征可以作为甄别和判识撞击构造的重要标志。

撞击玻璃是陨星爆炸而被溅射出的熔融物质在空中急速冷却而成的非晶质熔体, 具各种形状。同一撞击事件中撞击玻璃的化学成分基本相同, 是靶区原岩的不同岩性按其所占比例的混合熔融<sup>[31]</sup>。撞击玻璃的稀土元素模式反映出其母岩的特性, 并表明岩石在瞬态高温高压下不发生化学分异作用, 只有物态的转变<sup>[2]</sup>。

击变岩是一种含有各冲击阶段的变质岩石<sup>[14]</sup>, 可分为撞击熔岩和撞击角砾岩两类(图 2)。撞击熔岩是由于陨星撞击产生的超高温高压熔融靶区原岩而形成的, 其成分和结构一般与原岩联系密切, 不能完全对比。撞击角砾岩是撞击玻璃与撞击产生的岩石碎块胶结而成的一类岩石, 按位移与否, 可分为异地和原地两类。原地角砾岩完全碎裂, 具碎斑结构, 通常分布在撞击构造底部。异地角砾岩大致成层, 但其层序与原地角砾岩层序相反, 属爆炸溅落成因。

### 2.3 矿物学特征

由于撞击高压而产生的高压相矿物, 如柯石英、斯石英和长石等, 是撞击构造存在的有力证据。在自然环境中, 柯石英和斯石英都是地下深处的稳定矿物, 柯石英存在于地幔上部, 斯石英则处于更大的深度。柯石英是在压力释放过程中由斯石英转变而来的, 故在撞击构造中更为多见。由于在静态高压试验和挤压构造带中均观察有柯石英, 所以柯石英不能单独作为撞击构造的判识标志, 必须佐以其他证据<sup>[2]</sup>。

由于陨星岩石矿物的形成环境与地球完全不同, 某些矿物是陨星特有的。例如在还原条件下形成的陨磷铁镍石、陨硫铬铁和硫钛铁矿等陨石矿物在地球上罕见或几乎没有发现。有的陨石矿物虽然在地球上也有, 但它们的形成条件是不相同的。如产于碳质球粒陨石难熔包体中的许多难熔矿物如黑复铝钛石、钙钛矿<sup>[32]</sup>、PGE 合金(以铂为主的

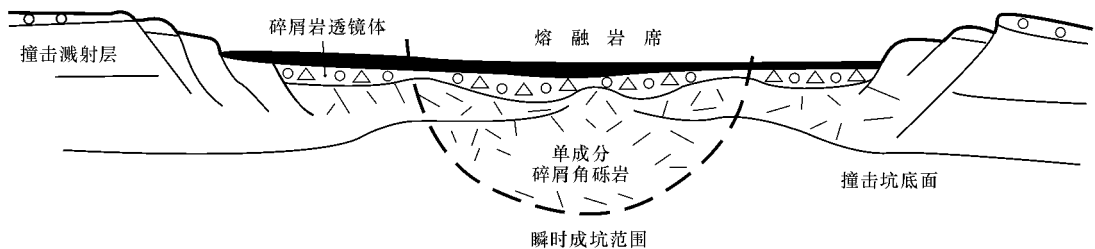


图 2 陆地上简单撞击构造形态截面图<sup>[30]</sup>

Fig. 2 Cross-Section Showing Structure and Morphology of Typical Subaerial Simple Impact Structure

合金)是高温下气相凝聚的产物。在地球上这类矿物只产于变质石灰岩、霞石正长岩和碳酸盐(钙钛矿)和超镁铁岩中(PGE 合金)<sup>[33]</sup>。金刚石<sup>[34-35]</sup>、镁铁榴石等陨石矿物在地表的自然条件下难以形成,但高压实验证明它们可能存在于地幔深部。

## 2.4 地球化学特征

地球化学特征主要是指撞击过程及其后续效应中发生强烈的物质分异,一些易挥发组分损失较多,造成亲铁元素尤其是铂族元素的异常富集,如有些撞击构造或地层剖面中的铱含量与地壳中的铱平均含量具有数量级的差异。

值得注意的是,就所含亲铁元素的异常丰度值而言,某些撞击构造远低于较远处具因果联系的溅落层。如 Acraman 撞击构造中英安岩具有非常低的亲铁元素丰度值,而 Acraman 溅落层则富集了高异常丰度的亲铁元素<sup>[36]</sup>。这种异常的亲铁元素特征在撞击产物中分配的不均匀性也明显说明,巨大撞击作用可抛射大量的物质在远离源坑的地层中产生地外物质层,从另一个侧面也反映了比 Acraman 撞击事件能量更为巨大的地外物体撞击事件,完全有能力产生全球性分布的地外物质层,如 K/T 撞击事件。这同时表明,某些构造或构造单元虽与撞击构造的地球化学特征不完全类似,也不具备撞击构造的典型形态和规模特征,它未必不是撞击构造。特别是当这些构造或构造单元久经改造,后期构造叠置其上,原始面貌面目全非,加之再无其他判据佐证时,则更容易将其排除于撞击构造之外。因此,对于撞击构造的判识,应以地球化学证据为主,辅以其他特征综合考虑,认真细致地对比和甄别,才有可能得出较为可靠的结论。

## 2.5 构造特征

撞击构造的构造标志主要包括震裂锥、环状及放射状断裂、堤坝附近的褶皱以及各种矿物中的撞击微页理等。震裂锥是在高应变率剪应力作用下,岩石中出现的一种特殊小型锥形构造,其形成机制是一种来自上方的撞击效应。核爆炸、陨石撞击或冲击试验,都有震裂锥的出现,充分说明了震裂锥是冲击波作用的产物。堤坝附近的褶皱是爆炸中心周围不同距离的介质以不同的质点位移速度向外位移的结果。按照轴面和两翼产状的不同,可分为斜歪、倒转、平卧和翻卷等褶皱构造,反映了堤坝处地层受到的冲击程度由弱变强。撞击作用也产生不同规模和级别的破裂构造,大到断层,小至

节理,并可见显微页理。这些破裂构造的空间组合很复杂,但却具有明显的平面展布规律,以撞击为中心呈环状或放射状分布。

## 2.6 地球物理特征

地球物理异常是发现和证实撞击构造存在的重要标志之一。撞击构造一般表现为负的重力异常和正的磁力异常,前者是基岩破裂与熔岩角砾化引起的,而后者是由于冲击变质形成的压电矿物和介电矿物的极化所造成的。

## 3 结语

到目前为止,在中国境内尚未发现一例证据确凿的陨星撞击构造<sup>[28]</sup>,这显然与中国大陆勘查和研究程度不够、天然和人为的后期改造较强有关。随着调研程度、勘探技术及测试水平的进一步提高,在中国大陆一定会发现证据确凿的天体撞击构造及其相关矿产<sup>[4]</sup>。

### 参考文献:

- [1] 吴智勇. 天文地质学的发展与展望[J]. 地球科学进展, 1996, 11(2): 24-29.
- [2] 欧阳自远. 小天体撞击与古环境灾变: 新生代六次撞击事件的研究[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 1997.
- [3] 刘池洋. 盆地构造动力学研究的弱点、难点及重点[J]. 地学前缘, 2005, 12(3): 113-124.
- [4] 刘池洋. 沉积盆地动力学与盆地成藏(矿)系统[J]. 地球科学与环境学报, 2008, 30(1): 1-23.
- [5] 许靖华. 祸从天降——恐龙灭绝之谜[M]. 翦万筹, 王媛, 译. 西安: 西北大学出版社, 1989.
- [6] Alvarez L W, Alvarez W, Asaro F, et al. Extraterrestrial Cause for the Cretaceous-Tertiary Extinction[J]. Science, 1980, 208: 1095-1108.
- [7] Zoller W H, Parrington J R, Phelan Kotra J M. Iridium Enrichment in Airborne Particles from Klikaue Volcano[J]. Science, 1983, 222: 1118-1121.
- [8] Carter N L, Officer C B, Chesner C A, et al. Dynamic Deformation of Volcanic Ejecta from the Toba Caldera: Possible Relevance to Cretaceous/Tertiary Boundary Phenomena[J]. Geology, 1986, 14: 380-383.
- [9] Officer C B, Hallam A, Drake C L, et al. Late Cretaceous and Paroxysmal Cretaceous/Tertiary Extinction[J]. Nature, 1987, 326: 143-149.
- [10] Hallam A. End-Cretaceous Mass Extinction Event: Argument for Terrestrial Causation[J]. Science, 1987, 238: 1237-1242.
- [11] Kyte F T, Zhou Z, Wasson J T. High Noble Metal Concentrations in a Late Pliocene Sediment[J]. Nature, 1981, 292:

- 417-420.
- [12] Alvarez W, Alvarez L W, Asaro F, et al. Current Status of the Impact Theory for the Terminal Cretaceous Extinction [J]. Geological Society of America Special Paper, 1982, 190: 305-315.
- [13] Sutherland F L. Volcanism Around K/T Boundary Time-Its Role in an Impact Scenario for the K/T Extinction Events [J]. Earth-Science Reviews, 1994, 36: 1-26.
- [14] Hildebrand A R, Penfield G T, King D A, et al. Chicxulub Crater: a Possible Cretaceous /Tertiary Boundary Impact Crater on the Yucatan Peninsula, Mexico [J]. Geology, 1991, 19: 867-871.
- [15] Courtillot V, Feraud G, Maluski H, et al. Deccan Flood Basalts and the Cretaceous/Tertiary Boundary [J]. Nature, 1988, 333: 843-846.
- [16] Melosh H J, Schneider N M, Zahnle K J, et al. Ignition of Global Wildfires at the Cretaceous/Tertiary Boundary [J]. Nature, 1990, 343: 251-254.
- [17] Burek P J, Wanke H. Impacts and Glacio-Eustasy, Plate-Tectonic Episodes, Geomagnetic Reversals: a Concept to Facilitate Detection of Impact Events [J]. Phys Earth Planet Inter, 1988, 50: 183-194.
- [18] Crutzen P J. Acid Rain at the K/T Boundary [J]. Nature, 1987, 330: 108-109.
- [19] Lewis J S, Watkins G H, Hartman H, et al. Chemical Consequences of Major Impact Events on Earth [J]. Geological Society of America Special Paper, 1982, 190: 215-221.
- [20] Ganapathy R. A Major Meteorite Impact on the Earth 65 Million Years Ago: Evidence from the Cretaceous-Tertiary Boundary clay [J]. Science, 1980, 209: 921-923.
- [21] Alt A D, Sears J W, Hyndman D W. Terrestrial Maria: the Origins of Large Basalt Plateaus Hotspot Tracks and Spreading Ridges [J]. Journal of Geology, 1988, 96: 647-662.
- [22] Oberbeck V R. Impacts and Global Change [J]. Geotimes, 1993, 38(9): 16-18.
- [23] 石耀霖. 天体撞击对岩石圈热结构的影响 [C] //地质矿产部岩石圈构造与动力学开放研究实验室. 地质矿产部岩石圈构造与动力学开放研究实验室 1994 年年报. 北京: 地震出版社, 1995.
- [24] 万天丰, 尹延鸿, 张长厚. 论地外陨石撞击与板块构造动力学——一种可能的假说 [C] //项礼文, 盛怀斌. 第 30 届国际地质大会论文集. 北京: 地质出版社, 1999.
- [25] Dietz R S. Sudbury Structure as an Astrobleme [J]. Journal of Geology, 1964, 72: 412-434.
- [26] 覃功炯, 欧强, 常旭. 国内外对天体撞击地球的撞击构造研究的新进展 [J]. 地学前缘, 2001, 8(2): 345-352.
- [27] 姚德, 张丽洁, Wiltshire J, 等. 中国内蒙古白云鄂博 Fe-Nb-REE 矿床地质特征与陨石撞击成因 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 1998, 18(4): 87-96.
- [28] 陈颛, 史培军. 自然灾害 [M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2007.
- [29] 夏丹. 来自太空的撞击 [J]. 中国国家地理, 2003(12): 24-40.
- [30] Dypvik H, Jansa L F. Sedimentary Signatures and Processes During Marine Bolide Impacts: a Review [J]. Sedimentary Geology, 2003, 161(3): 309-337.
- [31] Glass B P, Huber H, Koerber C. Geochemistry of Cenozoic Mi-Croektites and Clinopyroxene-bearing Spherules [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2004, 68: 3971-4006.
- [32] Lodders K, Fegley B. Lanthanide and Actinide Chemistry at High C/O Ratios in the Solar Nebula [J]. Earth Planet, 1993, 117: 125-145.
- [33] 侯涓, 谢鸿森. 陨石矿物种类的研究进展和矿物表 [J]. 地球科学进展, 2000, 15(2): 228-236.
- [34] Carlisle D B, Braman D R. Nanometre-Size Diamonds in the Cretaceous/Tertiary Boundary Clay of Alberta [J]. Nature, 1991, 352: 708-709.
- [35] Hough R M, Gilmour I, Pillinger C T, et al. Diamonds from the Iridium-Rich K-T Boundary Layer at Arroyo el Mimbre, 1 Tam-Aulipas, Mexico [J]. Geology, 1997, 25: 1019-1022.
- [36] Gostin V A, Keays R R, Wallace M W. Iridium Anomaly from the Acraman Impact Ejecta Horizon: Impact Can Produce Sedimentary Iridium Peaks [J]. Nature, 1989, 340: 542-544.