

尹锋.陨石坑及其判别标志[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2021, 36(1):10-16. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.01.002

YIN F. Meteorite Impact Craters and Their Identification Features [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 36(1):10-16. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.01.002

陨石坑及其判别标志

尹锋*

(湖南科技大学 页岩气资源利用湖南省重点实验室,湖南 湘潭 411201)

摘要: 陨石坑是固体星球表面最常见的地质构造。陨石坑在厘定星体表面年龄、地球地质历史上的灾变事件、矿物岩石冲击变质等研究中具有不可替代的作用。陨石撞击过程具有高温高压的特点,能在矿物岩石中留下独特的标志,从而为判定陨石坑提供依据。地球上识别陨石坑的线索可以分为地貌标志、矿物岩石标志和地球化学标志3大类,但只有矿物岩石中的冲击变质特征才能最终判定是否是陨石坑。迄今为止,地球上已发现190余个陨石坑,其中174个发育了冲击变质特征。文章首先介绍了陨石坑的类型和形成过程,然后详细论述了陨石坑的判别标志,最后总结了国内的陨石坑研究现状。

关键词: 陨石坑;冲击变质;判别标志

中图分类号:P691

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2021)01-0010-07

Meteorite Impact Craters and Their Identification Features

YIN Feng

(Hunan Provincial Key Laboratory of Shale Gas Resource Utilization,
Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Meteorite impact craters are the most common geological structures on the surface of celestial bodies. Meteorite impact craters play an irreplaceable role in the studies of the age of planetary surface, catastrophic events in the geological history of Earth, and shock effects in minerals and rocks. The significant characteristics of impact process are high pressure and high temperature which can produce unique features in minerals and rocks and these features provide evidences for identifying impact craters. Clues for the identification of meteorite impact craters on Earth fall into three categories: geomorphology, mineralogy and petrology, and geochemistry. However, only shock effects in minerals and rocks can finally determine whether a crater is impact origin. So far, more than 190 impact craters on Earth have been confirmed and 174 of them show shock effects in minerals and rocks. Here meteorite impact craters and their formation processes were firstly introduced, then the identification features of meteorite impact craters were discussed, and finally the recent researches of meteorite impact craters in China was concluded.

Keywords: meteorite impact crater; shock metamorphism; identification features

陨石坑是小行星、流星体或彗星等超高速撞击固体星球表面而形成的凹坑或环状地质构造,在太阳系

收稿日期:2018-03-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41503062);湖南省自然科学基金资助项目(2016JJ6039);湖南科技大学博士启动基金(E51504)

* 通信作者, E-mail: fengite@hotmail.com

的类地行星和月球等卫星表面广泛发育. Shoemaker^[1]曾指出“陨石撞击是类地行星上最基础的地质作用”. 月球的形成^[2]、生命在行星之间的传播^[3]以及地球上的生物大灭绝^[4]可能都和撞击事件有关. 陨石撞击过程和常规地质作用过程的差别, 主要体现在2个方面: 一是作用时间短, 二是巨大能量释放. 常规地质作用过程动辄数百万年, 而陨石撞击成坑过程仅有几十秒^[5-6]. 陨石撞击释放的能量能产生极端高温高压 ($P > 50 \text{ GPa}$, $T > 1\,500\text{ }^{\circ}\text{C}$), 远超地球上其他地质作用的温压范围^[5-6]. 迄今为止, 地球上已经证实的陨石坑有190个, 直径从0.1~300.0 km, 年龄从十余年到22亿年, 分布在除南极洲之外的各大洲^[7]. 陨石坑研究囊括了地球科学的诸多方面, 如陨石撞击引起的环境灾变效应、矿物岩石的冲击变质效应、陨石坑密度与星体表面年龄、陨石撞击与成矿等, 这些研究对认识行星演化过程和内部物质状态具有重要的指示意义. 本文首先简要阐明了陨石坑的类型及形成过程, 然后详细介绍了陨石坑的判别标志, 最后总结了国内的陨石坑研究现状, 希望能对野外一线地质调查工作者判别陨石坑以及对有志于从事陨石坑研究的研究者提供一些参考.

1 陨石坑类型及形成过程

1.1 陨石坑类型

根据对月球、火星、金星、水星以及地球等天体上诸多陨石坑形态和构造特征的研究, 陨石坑可划分为3类: 简单坑、复杂坑、多环盆地^[5-6]. 简单坑平面呈圆形, 剖面似碗状(见图1), 坑内充填撞击成因的岩石碎屑和熔融物; 撞击产生的溅射物主要堆积在坑缘附近, 造成坑缘高于周边地表; 地球上简单坑的直径一般小于4 km. 复杂坑直径较大, 具有中央隆起, 但由于深度/直径比小, 整个坑较为平坦(见图1); 复杂坑内也充填着岩石碎屑和熔融物, 而且在陨石坑中心附近还会出现熔岩席. 撞击多环盆地是巨型陨石坑(直径>100 km)的形态, 其特征是一片平坦的地形被一些环形山围绕, 地球上目前仅发现5个, 即 Vredefort(250~300 km), Sudbury(250~300 km), Chicxulub(180 km), Manicouagan(100 km), Popigai(100 km)^[5].

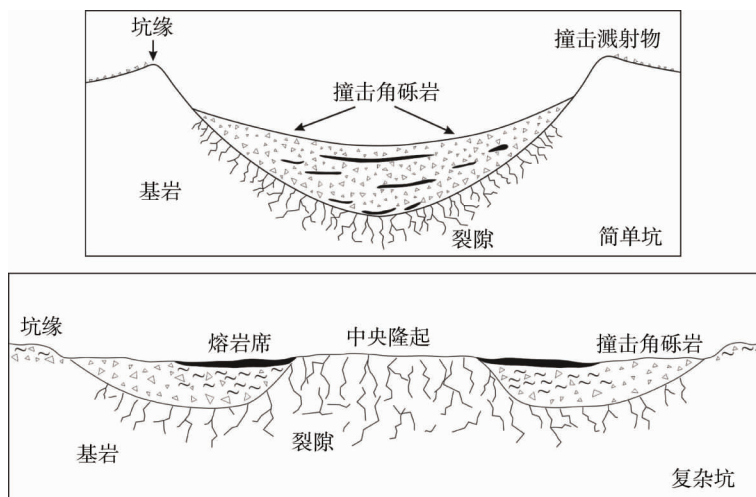


图1 简单坑(改自 Grieve 1987^[8])和复杂坑(改自 French 1998^[5])剖面

1.2 陨石坑形成过程

陨石撞击成坑过程分为3个阶段: 压缩 (contact/compression)、挖掘 (excavation) 和改造 (modification)^[9-12]. 压缩阶段: 陨石撞击地表, 能量以冲击波的形式往周围释放; 本阶段持续时间和撞击体的大小与速度有关 ($t = 2d/v$, t 为持续时间, d 为陨石直径, v 为陨石速度); 对地球上已发现的陨石坑来说, 95%以上陨石坑在该阶段的持续时间都不到1 s. 挖掘阶段: 撞击点附近一定深度内的物质被挖掘溅射出来, 形成瞬间陨石坑; 挖掘深度不超过1/3瞬间坑深度或1/10瞬间坑直径; 该阶段作用时间为 $\sqrt{H_t/g}$ (H_t 为瞬间坑深度; g 为重力加速度). 改造阶段: 瞬间坑形成后, 坑缘堆积物质在重力作用下垮塌回填到坑里或坑中心岩石卸压反弹形成中央峰等; 此阶段以撞击抛射到空中的物质全部落回到地面作为结束时间, 持续时间数分钟. 陨石坑形成后, 后期的风化、剥蚀、沉积等地质作用都会改变其形貌特征.

2 陨石坑的指示和判定标志

陨石坑的指示和判别标志可分为地貌、矿物岩石、地球化学 3 类,其中矿物岩石标志是关键性判定标志,而地貌和地球化学标志只是辅助性指示标志。

2.1 地貌标志

陨石坑最初形成时候的地貌都是环形凹坑,但后期地质作用会破坏或掩埋陨石坑.如直径 22 km 的德国 Ries 陨石坑,现在的地貌是一片略有起伏的准平原;地球上已发现的 190 个陨石坑,只有 128 个出露于地表^[13].此外,环形凹坑地貌的成因具有多解性,火山喷发、地表塌陷等也能形成这种地貌.因此,地貌标志只能作为寻找陨石坑的线索,不是判定标志。

2.2 岩石标志

陨石撞击过程产生的高温高压会在岩石中留下特殊的变形变质特征,如角砾岩化、岩石熔融、震裂锥等.岩石冲击变质特征比较宏观,手标本上即可识别,是野外寻找陨石坑的指示标志。

2.2.1 角砾岩化

撞击角砾岩(impact breccia)是陨石坑特有的岩石类型,分布在陨石坑里面和坑缘附近.坑里的撞击角砾岩呈透镜体分布,中心厚,往坑缘变薄;坑外的撞击角砾岩呈层状分布,但以坑缘处最厚,远离陨石坑变薄^[14].撞击角砾岩按照是否含有熔融物,可以分为石质角砾岩和含熔体角砾岩。

2.2.2 岩石熔融

撞击产生的高温让岩石发生熔融,熔融物分布在陨石坑内外,产状类似火成岩,以席状、脉状产出.在全球广泛分布的玻璃陨石,就是撞击过程溅射出来的熔融物冷却形成.在某些大型陨石坑出现的假玄武玻璃^[15],也是岩石熔融物.岩石熔融物可以作为陨石坑判定标志,但要注意与火山成因熔融物、地震成因假玄武玻璃区分。

2.2.3 震裂锥

震裂锥(shatter cone)是判定陨石坑的标志,常产出在简单陨石坑底部或复杂陨石坑中央隆起.发育较好的震裂锥一般呈圆锥状,单个锥体大小从数厘米到数米不等;锥面上布满了纵向分叉的沟槽,沟槽自锥顶沿锥面向下发散,呈马尾状构造^[16-17](见图 2).3 大类岩石均能形成震裂锥,但以微晶灰岩或白云岩中的震裂锥最完整^[18].震裂锥的成因还无定论,有研究者认为震裂锥是一种形成于卸压阶段的张裂隙^[17]。



锥面上布满纵向分叉的沟槽,沟槽从锥顶沿锥面向下发散,形成马尾状构造(图片由作者在德国 Steinheim 陨石坑考察时拍摄)

图 2 发育震裂锥的岩石标本

2.3 矿物标志

矿物冲击变质特征包括面状构造、高压矿物、击变玻璃、熔融等,必须在偏光显微镜下才能被识别,是判定陨石坑的关键证据。

2.3.1 面状构造

面状构造可以分为 2 类:面状裂隙(Planar Fractures,简称 PFs)和击变面状页理(Planar Deformation Features,简称 PDFs).石英、长石、方解石、锆石等受到冲击波作用都能产生这类特征.尤其以石英 PFs 和

PDFs 最典型,因为石英具有分布广、抗风化能力强、晶体结构简单等特性^[19-20],故被用作陨石坑最主要的判定标志。

PFs 是平行排列的面状破裂,宽约 3~10 μm ,间距约 15~20 μm ,一般不贯穿整个晶体;平行于特定的结晶学方位,如(0001), $\{10-10\}$ 等^[20],单个石英颗粒可以发育不同方位的多组 PFs(见图 3a)。PFs 的形成压力较小,最高不超过 10 GPa^[20]。

PDFs 是密集平行排列的面状页理,厚度小于 1 μm ,间距约 2~5 μm ;平行于特定的结晶学方位,如(0001), $\{10-12\}$, $\{10-13\}$ 等,单个石英颗粒可发育多组 PDFs(见图 3b)。有研究指出^[21],PDFs 本质上是高度密位错,或微晶石英,或非晶质。PDFs 形成压力为 10~30 GPa,不同方位形成压力不同,其中 $\{10-12\}$ 方向需要 20 GPa 以上^[19]。PDFs 只能通过冲击作用形成,也只产出在陨石坑。地球上已发现陨石坑的 90.5%都有发育石英 PDFs。

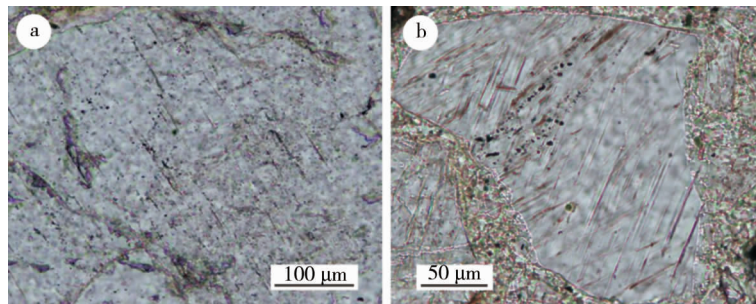


图3 岫岩陨石坑中发育一组 PFs 的石英颗粒(a)和两组 PDFs 的石英颗粒(b)(单偏光)

2.3.2 高压相

陨石撞击产生的高温高压使矿物发生相变、分解、熔融等变化,从而形成高压矿物(相)。迄今为止,在陨石坑发现的高压矿物:柯石英^[22]、斯石英^[23]、金刚石^[24]、莱氏石(reidite)^[25]、 $\text{TiO}_2\text{-II}$ ^[26]、akaogiite^[27]、毛河光矿^[28]。高压矿物是岩石经历高压变质的强有力证据,但是金刚石、柯石英、 $\text{TiO}_2\text{-II}$ 等矿物也在超高压变质岩和蛇绿岩^[29-31]被发现,故利用高压矿物判断陨石撞击坑的时候,应注意区分矿物的产状。

2.3.3 击变玻璃

有些矿物(如长石和石英)在较高的压力下(>35 GPa)会直接转变成非晶质,这种通过固-固相变形成的非晶质叫击变玻璃(diaplectic glass)^[20,32]。击变玻璃保留原始矿物的外形,不具有流动构造,据此可以和熔融淬火玻璃区别。击变玻璃是陨石坑的判定标志,但容易被后期的变质作用和水热蚀变破坏。

2.3.4 矿物熔融

在陨石撞击过程,撞击点附近的冲击残余温度超过 1 500 $^{\circ}\text{C}$,导致矿物岩石熔融^[18]。熔融产物可以作为陨石坑的判定标志,也可以用于测定撞击年龄^[33-34]。陨石坑最常见的矿物熔融是石英玻璃和长石玻璃,前者常保持其原始矿物外形产出,后者通常具有流动构造,甚至以气泡状产出^[35-36]。如果矿物发生熔融后不经历淬火过程,则会重结晶形成原矿物。重结晶成因的矿物常出现球状、粒状等外形特征^[37]。陨石坑中已经发现的熔融重结晶矿物:石英、硫化物矿物或硫酸盐矿物、碳酸盐矿物。

2.4 地球化学标志

陨石撞击过程伴随巨大的能量释放,除了仅在十余个直径小于 1 km 的陨石坑回收到陨石外,其他陨石坑的陨石撞击体已完全熔融或气化并混入撞击靶岩。分析靶岩是否含有陨石组份的地球化学指标有 3 个:铂族元素(PGEs)、Re/Os、Cr 同位素($^{53}\text{Cr}/^{52}\text{Cr}$)^[38]。PGEs 以 Ir 最具有代表性,陨石的 Ir 丰度是 400~800 ppb,而大陆地壳岩石的 Ir 丰度只有 0.02~0.03 ppb^[39]。全球多个地方 K-T 界线附近的 Ir 异常,被认为和 Chicxulub 陨石坑有关^[4]。陨石 Os 丰度比地壳岩石高 $10^2 \sim 10^5$ 数量级,而且具有富 Os 贫 Re 的特征。陨石的 Re/Os ≤ 0.1 ,地壳岩石的 Re/Os > 10 。对加纳 Bosumtwi 陨石坑相关岩石的分析表明,象牙海岸玻璃陨石源于 Bosumtwi 撞击坑^[40](见图 4)。相比地球样品,陨石 Cr 同位素会出现正异常或负异常,而且不同类型陨石的 Cr 同位素存在差异,由此可以判断出陨石类型。对 Clearwater East, Morokweng 和 Bosumtwi 陨

石坑的 Cr 同位素研究表明,撞击体是普通球粒陨石^[41].

总的来说,地球化学特征在判别陨石坑的过程中只能作为辅助工具,而不能作为决定性证据.在地球上已发现的 190 个陨石坑中,只有 45 个被证实有陨石组份的存在^[42].

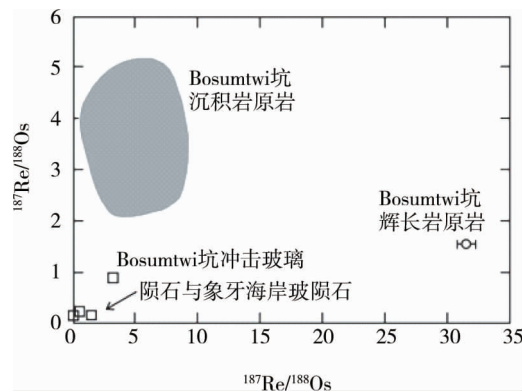


图 4 象牙海岸玻璃陨石与 Bosumtwi 陨石坑原岩的 Os 同位素^[40]

3 我国陨石坑研究现状

我国有关陨石坑的研究始于 20 世纪 90 年代,曾先后报道过一批陨石坑,如海南白沙陨石坑、江苏太湖陨石坑、内蒙古多伦陨石坑、内蒙古海拉尔陨石坑等^[43-46].但由于缺少关键的冲击变质证据,这些陨石坑一直未获科学界广泛认可.国内目前被认可的陨石坑有 2 个,即辽宁岫岩陨石坑和黑龙江依兰陨石坑,均由陈鸣等人通过石英 PDFs 证实^[47-48].岫岩陨石坑和依兰陨石坑都是简单碗形坑;前者形态完整,直径约 1 800 m;后者部分坑缘缺失,直径约 1 850 m.对岫岩陨石坑的钻探表明,坑内充填物由上部 107 m 厚的湖泊沉积物和下部 188 m 厚撞击角砾岩堆积组成.而依兰陨石坑的钻探工作尚在进行中.迄今在岫岩陨石坑发现了多种冲击变质特征,如撞击角砾岩、含面状构造的石英和长石、矿物熔融(石英、长石、角闪石)、多种高压矿物(柯石英、TiO₂-II、莱氏石、金刚石、毛河光矿)等.此外,国内还有研究者采用遥感手段辨识其他星体上的陨石坑,以及通过计算机模拟陨石坑形成过程.如 Xin xin 等^[49]开发了一种从高精度图像中自动识别火星表面撞击坑的方法,其陨石坑识别率达 84.5%,正确率达 86.9%.岳宗玉等^[50]采用数值模拟研究了月球哥白尼陨石坑的形成过程,认为其中央峰上的橄榄石和尖晶石可能是陨石撞击体本身残留的,而不是来自月幔.苟盛等^[51]统计发现谷神星有 29 219 个直径≥1 km 的陨石坑,并对它们的形貌和分布进行了研究.

尽管国内在陨石坑研究方面已经取得了较大发展,但还面临诸多问题.一是如何寻找新的陨石坑.Hergarten 和 Kenkmann^[13]最近的研究推算出地球表面至少还有 350 个 0.25~6.00 km 的陨石坑尚未被发现.我国国土面积广大,肯定还有很多陨石坑未被发现,但目前缺少相关线索.二是对已发现的陨石坑深入细致研究还不够.岫岩陨石坑仅在中心完成一个钻孔,不能精确限定陨石坑结构,也无法获取更多撞击角砾岩样品.三是研究队伍薄弱.目前国内从事陨石坑研究的人员仅有十余人,属于地质的边缘方向.随着新陨石坑的发现,以及中国空间探测的兴起,相信会有越来越多的研究者加入陨石坑研究队伍.

参考文献:

- [1] Shoemaker E M. Why study impact craters [M]// Impact and explosion cratering. New York: Pergamon Press, 1976: 1-10.
- [2] Hartmann W K, Davis D R. Satellite-sized planetesimals and lunar origin [J]. Icarus, 1975, 24(4): 504-515.
- [3] Chyba C F, Thomas P J, Brookshaw L, et al. Cometary delivery of organic molecules to the early Earth [J]. Science, 1990, 249(4967): 366-373.
- [4] Alvarez L W, Alvarez W, Asaro F, et al. Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction - Experimental results and theoretical interpretation [J]. Science, 1980, 208(4448): 1095-1108.

- [5] French B M. Traces of catastrophe: A handbook of shock-metamorphic effects in terrestrial meteorite impact structures [M]. Houston: Lunar and Planetary Institute, 1998.
- [6] Melosh H J. Impact cratering: A geologic process [M]. New York: Oxford University Press, 1989: 253.
- [7] 加拿大新不伦瑞克大学地球陨石坑数据库 University of New Brunswick Earth Impact Database [DB/OL]. [2020-9-20]. <http://www.passc.net/earthimpactdatabase/index.html>.
- [8] Grieve R A F. Terrestrial impact structures [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 1987, 15: 245-270.
- [9] Potter R W K. Investigating the onset of multi-ring impact basin formation [J]. Icarus, 2015, 261: 91-99.
- [10] Potter R W K. Numerical modelling of basin-scale impact crater formation [D]. London: Imperial College London, 2012.
- [11] Collins G. Numerical modelling of large impact crater collapse [D]. London: University of London, 2002.
- [12] Pierazzo E, Melosh H. Understanding oblique impacts from experiments, observations, and modeling [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2000, 28(1): 141-167.
- [13] Hergarten S, Kenkmann T. The number of impact craters on earth: Any room for further discoveries? [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2015, 425: 187-192.
- [14] Dressler B, Reimold W. Order or chaos? Origin and mode of emplacement of breccias in floors of large impact structures [J]. Earth-Science Reviews, 2004, 67(1): 1-54.
- [15] Reimold W U, Gibson R L. "Pseudotachylites" in large impact structures [M]//Impact tectonics. Springer, 2005: 1-53.
- [16] Fackelman S P, Morrow J R, Koeberl C, et al. Shatter cone and microscopic shock-alteration evidence for a post-paleoproterozoic terrestrial impact structure near Santa Fe, New Mexico, USA [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2008, 270: 290-299.
- [17] Wieland F, Reimold W, Gibson R. New observations on shatter cones in the Vredefort impact structure, South Africa, and evaluation of current hypotheses for shatter cone formation [J]. Meteoritics & Planetary Science, 2006, 41(11): 1737-1759.
- [18] French B M, Koeberl C. The convincing identification of terrestrial meteorite impact structures: What works, what doesn't, and why [J]. Earth-Science Reviews, 2010, 98(1/2): 123-170.
- [19] Grieve R, Langenhorst F, Stöffler D. Shock metamorphism of quartz in nature and experiment: II. Significance in geoscience [J]. Meteoritics and Planetary Science, 1996, 31: 6-35.
- [20] Stöffler D, Langenhorst F. Shock metamorphism of quartz in nature and experiment: I. Basic observation and theory [J]. Meteoritics, 1994, 29: 155-181.
- [21] 谢先德, 赵景德. 冲击变质石英的光学常数变化范围和微页理分布特征[J]. 矿物学报, 1982, 2: 81-92.
- [22] Chao E C T, Shoemaker E M, Madsen B M. First natural occurrence of coesite [J]. Science, 1960, 132(3421): 220-222.
- [23] Chao E C T, Fahey J J, Littler J, et al. Stishovite, SiO₂, a very high pressure new mineral from Meteor crater, Arizona [J]. Journal of Geophysical Research, 1962, 67(1): 419-421.
- [24] Koeberl C. Diamonds everywhere [J]. Nature, 1995, 378(6552): 17-18.
- [25] Glass B P, Liu S B. Discovery of high-pressure ZrSiO₄ polymorph in naturally occurring shock-metamorphosed zircons [J]. Geology, 2001, 29(4): 371-373.
- [26] El Goresy A, Chen M, Dubrovinsky L, et al. An ultradense polymorph of rutile with seven-coordinated titanium from the Ries crater [J]. Science, 2001, 293(5534): 1467-1470.
- [27] El Goresy A, Dubrovinsky L, Gillet P, et al. Akaogiite: An ultra-dense polymorph of TiO₂ with the baddeleyite-type structure, in shocked garnet gneiss from the Ries crater, Germany [J]. American Mineralogist, 2010, 95(5/6): 892-895.
- [28] Chen M, Shu J, Xie X, et al. Maohokite, a post-spinel polymorph of MgFe₂O₄ in shocked gneiss from the Xiuyan crater in China [J]. Meteoritics & Planetary Science, 2019, 54(3): 495-502.
- [29] Yang J, Dobrzynetskaya L F, Bai W, et al. Diamond and coesite-bearing chromitites from the Luobusa ophiolite, Tibet [J]. Geology, 2007, 35(10): 875-878.
- [30] Hwang S L, Shen P, Chu H T, et al. Nanometer-size α -PbO₂-type TiO₂ in garnet: A thermobarometer for ultrahigh-pressure metamorphism [J]. Science, 2000, 288(5464): 321-324.
- [31] Chopin C. Coesite and pure pyrope in high-grade blueschists of the Western Alps: A first record and some consequences [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1984, 86(2): 107-118.

- [32] Stöffler D. Deformation and transformation of rock-forming minerals by natural and experimental shock processes. I- Behavior of minerals under shock compression [J]. *Fortschritte der Mineralogie*, 1972, 49: 50-113.
- [33] Jourdan F, Renne P, Reimold W. An appraisal of the ages of terrestrial impact structures [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 286(1/2): 1-13.
- [34] Schmieder M, Kring D A. Earth's impact events through geologic time: alist of recommended ages for terrestrial impact structures and deposits [J]. *Astrobiology*, 2020, 20(1): 91-141.
- [35] Chen M, Xiao W, Xie X. Coesite and quartz characteristic of crystallization from shock-produced silica melt in the Xiuyan crater [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 297(1/2): 306-314.
- [36] Ferrière L, Koeberl C, Reimold W U. Characterisation of ballen quartz and cristobalite in impact breccias: New observations and constraints on ballen formation [J]. *European Journal of Mineralogy*, 2009, 21(1): 203-217.
- [37] Belkin H E, Horton Jr J W. Silicate glasses and sulfide melts in the ICDP-USGS Eyreville B core, Chesapeake Bay impact structure, Virginia, USA [J]. *Special Paper of the Geological Society of America*, 2009, 458:447-468.
- [38] Tagle R, Hecht L. Geochemical identification of projectiles in impact rocks [J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2006, 41(11): 1721-1735.
- [39] Koeberl C. Identification of meteoritic components in impactites [J]. *Geological Society of London Special Publications*, 1998, 140(1): 133-153.
- [40] Koeberl C, Shirey S B. Detection of a meteoritic component in Ivorycoast tektites with Rhenium-Osmium isotopes [J]. *Science*, 1993, 261(5121): 595-598.
- [41] Shukolyukov V, Lugmair G. Extraterrestrial matter on Earth: Evidence from the Cr isotopes [C]// Austria: University of Vienna, 2000.
- [42] Koeberl C. The geochemistry and cosmochemistry of impacts [M]// *Treatise on geochemistry*. Elsevier, 2007, 1(28): 1-52.
- [43] 肖荣阁, 杨帆, 李娜, 等. 内蒙古海拉尔发现陨石坑及科研意义[J]. *化工矿产地质*, 2012, 34(2): 95-102.
- [44] 王鹤年, 谢志东, 钱汉东. 太湖冲击坑溅射物的发现及其意义[J]. *高校地质学报*, 2009, 15(4): 437-444.
- [45] 吴思本. 多伦陨石坑的研究进展[J]. *中国地质*, 1996, 8: 14-16.
- [46] 王道经, 李健. 海南岛白沙陨石坑的遥感图像解译与验证[J]. *中国地质*, 1993, 5: 23-24.
- [47] 陈鸣, 肖万生, 谢先德, 等. 岫岩陨石撞击坑的证实[J]. *科学通报*, 2009, 54(22): 3507-3511.
- [48] 陈鸣, 谢先德, 肖万生, 等. 依兰陨石坑: 我国东北部一个新发现的撞击构造[J]. *科学通报*, 2020, 65(10): 948-854.
- [49] Xin X, Di K, Wang Y, et al. Automated detection of new impact sites on Martian surface from HiRISE images [J]. *Advances in Space Research*, 2017, 60(7): 1557-1569.
- [50] Yue Z, Johnson B C, Minton D A, et al. Projectile remnants in central peaks of lunar impact craters [J]. *Nature Geoscience*, 2013, 6: 435-437.
- [51] Gou S, Yue Z, Di K, et al. A global catalogue of Ceres impact craters ≥ 1 km and preliminary analysis [J]. *Icarus*, 2018, 302: 296-307.