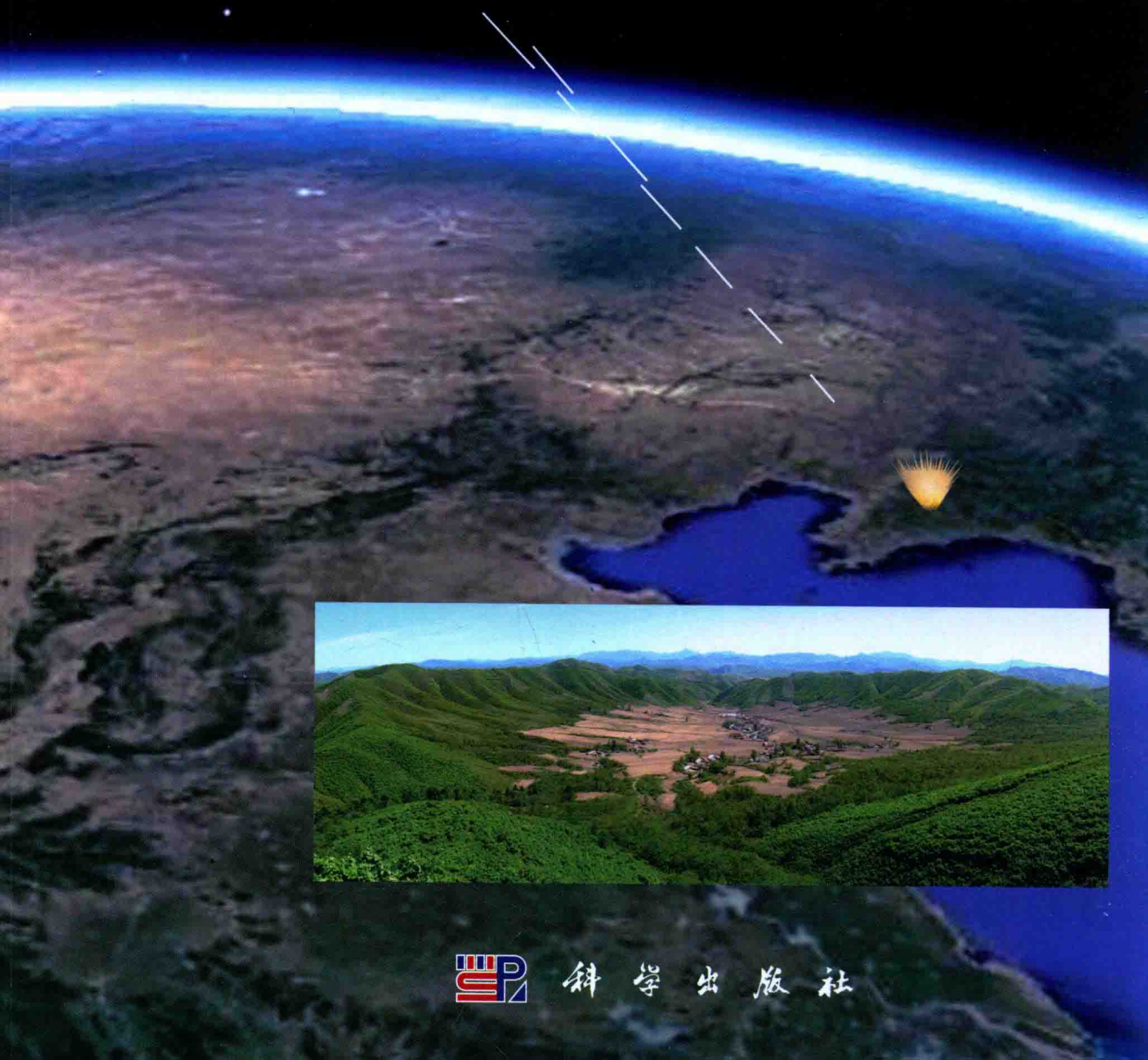


岫岩陨石坑 星球撞击遗迹

陈 鸣 著



科学出版社

岫岩陨石坑 星球撞击遗迹

陈 鸣 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

陨石坑是太阳系中许多不同大小固态星球表面常见的一种经由星球之间超高速碰撞而形成的环形地质构造和宇宙地质奇观。岫岩陨石坑是我国领土上第一个得到国际陨石坑科学界承认的该类型星球撞击遗迹。本书在概述宇宙中星球撞击和陨石坑的一些基本知识基础上,对岫岩陨石坑的地理位置、基本特征、撞击证据、形成和演化,以及特色等方面作了简要介绍,让读者通过岫岩陨石坑这个例子加深对陨石坑基本知识的了解。本书通过对陨石坑及其相关知识的介绍和讨论,阐述了如何去确定一个陨石坑等一些社会公众普遍关心的问题。本书是一本介于科普和学术之间的读物。作者力图以浅显易懂的文字和适量的图片来诠释岫岩陨石坑及其相关知识。

本书适合地球与行星科学爱好者、大学生和中学生阅读,也可供相关学科的研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

岫岩陨石坑星球撞击遗迹/陈鸣著. — 北京: 科学出版社, 2016.1

ISBN 978-7-03-046429-3

I. ①岫… II. ①陈… III. ①陨石坑—普及读物 IV. ①P68-49

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第278177号

责任编辑: 王 运 / 责任校对: 赵桂芬

责任印制: 张 倩 / 封面设计: 耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年1月第 一 版 开本: 787 × 1092 1/16

2016年1月第一次印刷 印张: 6 1/2

字数: 155 000

定价: 68.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



前言

我国东北辽东半岛有一处珍贵的星球撞击遗迹，那就是岫岩陨石坑。陨石坑是太阳系中许多固态星球表面常见的一类环形凹坑或环形地质构造，一种经由星球之间超高速碰撞形成的宇宙地质奇观。目前在地球上已经发现了不少陨石坑，但这一类星球撞击遗迹在辽阔的中国领土上仍然十分罕见。

星球碰撞事件贯穿于太阳系的整个形成和演化过程，对包括地球在内的许多星球的形成和演化历史起着重要的作用和影响。星球碰撞不但是星球表面陨石坑形成的原因，在当今科学界还存在着许许多多与星球碰撞相关的假说和理论。例如，太阳系原始物质之间经过碰撞和吸积逐渐形成了现在的星球体系，月球起源于地球早期发生的一次星球大碰撞事件飞离的物质，地球在与其他含水星球的碰撞过程中捕获了丰富的水资源，地球历史上多次因为星球大碰撞事件出现了灾难性的环境突变等。星球碰撞这种宇宙自然现象给人们带来了许多神秘的故事和无尽的遐想。

现在，陨石坑已经成为广大社会公众所熟知的一种宇宙地质现象。在许多人的记忆中，有关陨石坑的强烈印象可能与现代深空探测的发展密切相关，月球和其他地外星球的探测结果给广大民众带来了许多有关陨石坑的知识。地球陨石坑的发现，更使得人类在地球上就可以直接观察到这种宇宙地质构造形迹，从而深入地了解其特征和形成机制。地球陨石坑研究具有多方面的重要意义，内容涉及星球地质特征以及形成和演化历史、地球历史上与星球撞击事件相关的重大环境及生物突变事件，以及岩石和矿物在极端高压和高温条件下的特征和行为等许多基础科学领域。更值得指出的是，一部分地球陨石坑与某些矿产资源在成因上或空间上具有密切的联系，陨石坑矿产资源的开发利用已经为人类带来了巨大的经济效益，并日益显示出重要的经济价值和开发前景。地球陨石坑在科学知识和经济价值方面的重要意义是世界各地人民和许多国家研究陨石坑以及寻找未知陨石坑的努力一直没有停止过的主要原因和动力。

地球已经有了大约 46 亿年的历史，在漫长的地质年代里与许多不同大小的地外小天体发生过碰撞，形成过不少的陨石坑。地球又是一个活跃的星球，自形成以来的地



质活动一刻也没有停止过，在地质演化过程中在地表塑造或雕刻出了许许多多与星球撞击事件无关的环形地质构造。地球活跃的内动力和外动力地质作用也会使得许多形成在地球表面的陨石坑不断遭受侵蚀和破坏，一些或被埋藏于地表以下，一些或被改造变得面目全非甚至残迹无存。因此，陨石坑具有哪些基本特征，如何才能在地球上发现或证实这些星球撞击的遗迹，这是许多人都比较关心的问题。世界陨石坑的研究历史表明，要查明一个陨石坑，或将陨石坑与其他非撞击成因的环形地质构造区分开来，或在纷杂的地表地质环境下正确鉴别出那些遭受了严重侵蚀和破坏的陨石坑遗迹，这些都是富有挑战性的工作。

然而，任何一种自然现象都有其本质的特征，陨石坑也不例外。尽管地球上不同陨石坑的规模大小相差极大，撞击坑地质构造保存状态千差万别，但几乎所有陨石坑都存在一个共同的特点，那就是或多或少地保存着岩石和矿物在冲击波作用下发生变形和相变的痕迹，这些痕迹被称为冲击变质特征。如果靶区被撞击岩石和矿物中的冲击变质特征在后期地质作用下完全消失了，也就难以获得这个地质构造撞击成因的可靠证据；如果在一个地质构造中不能找到冲击变质证据，那么其成因就可能出现不确定性和多解性。国际科学界一百多年来的陨石坑探索历史和经验告诉我们，查明一个陨石坑或非陨石坑地质构造最可行和最有效的方法就是靶区岩石和矿物的冲击变质效应调查，陨石坑最可靠的判别标志就是岩石和矿物的冲击变质特征，这也是本书希望通过岫岩陨石坑这个例子来诠释的主要内容之一。

岫岩陨石坑是华夏大地上第一个获得证实的撞击坑地质构造，而且是一个保存得比较完整的陨石坑。尽管它在陨石坑家族中仅仅属于一个规模相对较小的简单型陨石坑，但它的撞击坑证据和特征都十分典型。它除了具有清晰的环形地质地貌特点以外，坑区岩石和矿物中发育的冲击变质现象丰富多样，是人们了解陨石坑基本特征的一个理想场所。目前我国发现的陨石坑数量还比较少，能够亲眼目睹这种星球撞击遗迹也许是许多人的愿望。岫岩陨石坑的发现和证实为我国广大民众、海外华侨华人和外国友人提供了一个了解陨石坑的好去处。岫岩陨石坑坐落在我国东北一个自然和生态环境都十分优越的地方，非常便于人们的造访。现在，国人不出国门也能够在家乡的土地上看到这种星球撞击遗迹的真容。岫岩陨石坑不但是一个重要的地质名胜，一个重要的陨石坑科学研究基地，而且还将在相关科学知识传播上体现出重要的价值。

在过去几十年中，有关我国领土上陨石坑的话题与探索事例从学术界到社会大众一直持续不断。在数年前岫岩陨石坑获得证实之后，作者不断地接到国内许多科技人员和科学爱好者的来信、来电和来访，询问和讨论陨石坑及其相关的科学问题，特别是有关陨石坑的特征和判别标准的问题。作者长期以来一直从事与宇宙矿物、陨石、

陨石坑相关的研究工作，近年来重点开展了对我国岫岩陨石坑基本特征、形成原因和演化历史的科学论证，很乐意与关心陨石坑的读者们分享和交流我们取得的一些研究成果和经验。

本书是一本介于科普和学术之间的读物。作者力图以浅显易懂的文字和适量的图片来诠释岫岩陨石坑及其相关知识，让读者进一步了解陨石坑这种星球撞击遗迹的一些基本特征。本书在概述星球撞击和陨石坑的一些基本知识基础上，对岫岩陨石坑的地理位置、基本特征、撞击证据、形成和演化，以及特色等方面的内容作了简要介绍，这无论对非专业人员还是专业人员或许都会有所裨益。为了有助于读者对陨石坑基本特征和研究意义的了解，本书还在附录中简要介绍了地球上其他一些与岫岩陨石坑类型相同而且保存状态较为完好的碗形陨石坑的基本情况，并介绍了世界陨石坑研究历史中的一些重大事件和重要发现。期待读者能够通过岫岩陨石坑这个例子，加深对陨石坑知识的了解。更希望本书能为那些拟进一步了解陨石坑或造访岫岩陨石坑的读者提供一些基本的资料介绍。如果读者想了解有关岫岩陨石坑的更详细研究结果和资料数据，可参阅作者与合作者近年来发表的相关专业研究论文和书籍。书中难免存在问题或错误，敬请各位读者批评指正。

中国科学院、国家自然科学基金委员会和中国科学院广州地球化学研究所对本书涉及的岫岩陨石坑研究给予了资助，曹裕波、肖万生、谭大勇、尹锋、颜文昌、谢先德、沈承德、Christian Koeberl 等参加了部分研究工作，岫岩满族自治县人民政府对研究工作给予了大力支持，作者在此表示衷心的感谢。

作 者

2015 年 11 月于广州



目 录

前言

第一章 星球撞击与陨石坑 /1

第一节 星球碰撞 /1

第二节 陨石坑 /3

第三节 撞击与成坑 /5

第四节 冲击变质作用 /6

第五节 陨石坑分类 /8

第六节 地球陨石坑 /11

第七节 地球陨石坑判别标志 /15

第八节 陨石坑研究意义 /18

第二章 岫岩陨石坑概况 /20

第一节 陨石坑及撞击事件 /20

一、岫岩陨石坑 /20

二、撞击与成坑事件 /21

第二节 地理特征 /23

一、地理位置 /23

二、岫岩满族自治县 /25

三、道路交通 /27

第三节 陨石坑今昔 /28

一、陨石坑变迁 /28

二、发现经过 /29

三、陨石坑名称 /34

第三章 岫岩陨石坑地质特征 /35

第一节 地貌形态 /35

一、区域地形地貌 /35

二、陨石坑地形地貌 /37

第二节 地表地质 /46

一、区域地质 /46

二、坑区地质 /47

第三节 陨石坑地质构造 /51

一、地质剖面 /51

二、坑体形态演化 /53

第四节 陨石坑年龄 /54

第四章 岫岩陨石坑撞击证据 /56

第一节 概述 /56

第二节 撞击角砾岩 /57

一、撞击角砾岩特征和作用 /57

二、撞击角砾岩类型及分布 /57

第三节 含熔体玻璃多岩性撞击角砾岩 /58

第四节 震裂锥 /60

第五节 超高压矿物 /61

一、柯石英 /61

二、莱氏石 /64

三、 TiO_2 -II 相 /65

第六节 矿物面状变形页理 /67

一、石英面状变形页理 /67

二、长石面状变形页理 /70

三、方解石面状变形页理 /71

第七节 矿物击变玻璃 /72

一、石英击变玻璃 /72



二、长石击变玻璃 /74

第五章 岫岩陨石坑特色 /76

第一节 中国陨石坑地质奇观 /76

一、我国第一个被证实的陨石坑 /76

二、一个保存较为完整的丘陵地区
陨石坑 /78

三、优越的地理与生态环境 /78

四、陨石坑名胜 /80

第二节 中国陨石坑科学研究基地 /80

一、丘陵地区陨石坑的典例 /80

二、矿物冲击变质证据的宝库 /84

附录 /86

附录 1 岫岩陨石坑相关出版物目录
/86

附录 2 地球上保存比较完整的碗形
陨石坑 /87

附录 3 地球陨石坑的若干重要记事
/93



第一章 星球撞击与陨石坑

第一节 星球碰撞

宇宙中物质之间的碰撞是一种自然现象，小到比原子更小的微粒之间的碰撞，大到星球之间和星系之间的碰撞。星球之间的碰撞是一种宇宙地质作用形式，它不但会导致星球环境的巨大变化，也可以毁灭一个星球、扩大一个星球或催生出新的星球。星球碰撞事件贯穿于太阳系各类天体的形成和演化过程。

根据太阳系形成的星云假说，太阳星云是形成太阳系内各天体的原始物质，太阳系是由处于混沌状态的原始星云演化而来的，经历了一个从无序到有序的过程。太阳星云通过凝聚和吸积形成了太阳系中的各类天体，在这个过程中，宇宙物质之间的碰撞对太阳系的形成和演化起到了重要的作用。太阳星云中的尘埃聚集成尘粒团簇，这些尘粒团簇接着经由碰撞形成直径达千米级的星子。星子进一步通过相互吸引与碰撞长大形成直径达到上百千米到数千千米的原行星或胚胎行星，原行星进一步演化成为行星。由此可知，不同大小的星球是通过物质之间的碰撞和堆积而增生的。太阳系内现在仍然存在着一些星子大小的物质，比如那些体积较小的小行星和彗星。谷神星、智神星和灶神星等体积较大的小行星则属于原行星之列。

太阳系包括由太阳、行星及其卫星、小行星、彗星、流星和行星际物质等构成的天体系统及其所占有的空间区域。太阳系大家族包括八大行星和外围的柯伊柏带（Kuiper belt）。此外还有一个假设包围着太阳系的球体云团，即奥尔特云（Oort cloud）。小行星带和柯伊柏带是小天体分布较为集中的两个区域（图 1.1）。小行星带是介于火星和木星轨道之间的区域，小行星的尺度从尘埃大小到数百千米都有，已被观测到的小行星数以十万计。谷神星是一颗矮行星，它是小行星带中最大的天体，直径达 950km。小行星带中的小天体被认为是在太阳系的形成过程中由于受到木星引力扰动而未能聚合的残余物质，主要是由碳质、硅酸盐和金属等不易挥发的物质组成，最近在谷神星上发现了水的存在。柯伊柏带位于海王星轨道之外，是距离太阳 30~50AU [地球到太阳的平均距离为一个天文单位 (AU)， $1\text{AU} = 149597870700\text{m}$] 的一条宽阔环带，存在许多冰冻的小行星、彗星和矮行星等天体。现已在该区域内发现了上千个较大的天体，这些天体主要由岩石和凝结成冰的水、甲烷、氨、二氧化碳等物质组成。冥王星就是柯伊柏带中的较大天体之一，直径达 2370km。柯伊柏带也被认为是短周期彗星（绕日运行周期小于 200 年的彗星，如哈雷彗星等）的主要来源地。假设中的奥尔特云是一个包围着太阳系的球体云团，布满大量彗星，距离太阳约



50000~100000AU。奥尔特云被认为是长周期彗星的主要来源地。现已查明，彗星是由大量的冰物质和尘埃等混合而成，冰物质中除大部分是水冰之外，还有一氧化碳冰、二氧化碳冰（干冰）、氨冰和甲烷冰等物质。

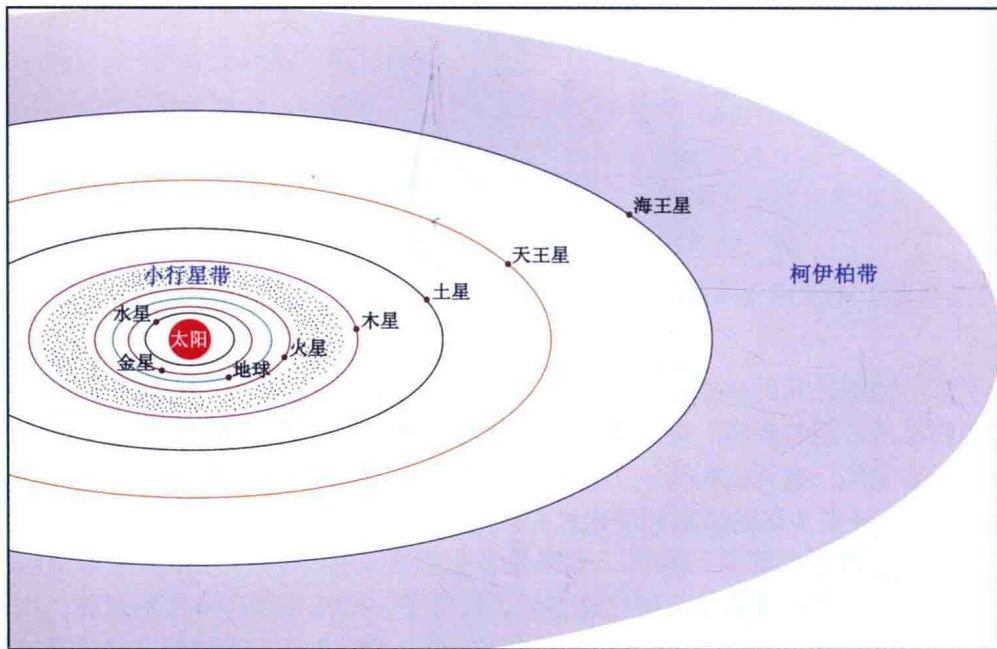


图 1.1 太阳系结构示意图

广义的太阳系结构从里向外包括太阳、水星、金星、地球、火星、小行星带、木星、土星、天王星、海王星和柯伊柏带。在柯伊柏带之外，还有一个假设包围着太阳系的球体云团——奥尔特云。小行星带是位于火星轨道和木星轨道之间的小行星密集区域。柯伊柏带是位于海王星轨道之外的一条宽阔环带，存在许多冰冻的小行星、彗星和矮行星等天体

太阳系中所有行星和绝大部分其他天体都遵循着一定的轨道以逆时针方向围绕着太阳公转，极少数天体则以顺时针方式围绕着太阳旋转。天体的运行轨道并不局限在一个平面内，有的天体运行轨道接近于地球绕太阳公转的轨道平面（即黄道面），有些则倾角较高。当小行星、彗星和流星体等较小天体受到其他较大星球引力摄动时，其运行轨道和运行速度有可能发生一定的变化，一旦它们的运行轨道与其他星球的运行轨道相交，则有可能发生相互碰撞（图 1.2）。在太阳系形成之后的早期阶段，星球之间的碰撞事件相对较为频繁。随着时间的推移，太阳系中星球撞击事件频率逐渐降低，但直至今今天仍时有发生，今后也还会出现。从古至今，地外小天体撞击地球的事件持续不断地发生。从地球上现在已经发现的 180 多个陨石坑的形成年龄数据资料可以了解到，形成这些陨石坑的星球撞击事件发生时间从距今 24 亿年前一直延续到了今天。流星体闯入地球大气层以及陨石降落到地表的事件更是频繁发生，从未中断。

人类直接观察到太阳系中的一次最大规模星球碰撞事件发生在 1994 年 7 月 16 日至 22 日。一颗原来围绕着太阳公转的苏梅克 - 利维 9 号彗星（Shoemaker-Levy 9, SL9, D/1993 F2）早前被木星的引力捕获，成为一颗围绕木星公转的彗星。这颗彗星在距离木星表面大约 4 万 km 时由于受到木星强大引力的影响而分裂成为 21 个碎块，其中最大的碎块直径约为 2km，这些碎块以 60km/s 的速度连珠炮一般坠入木星大气层，撞向木星南半球并释放出巨大的能量，形成了彗星撞击木星的天文奇观。

目前,人类已经观察到大量的近地小天体,这些近地小天体包括数以千计的近地小行星、正在接近的彗星和流星体等,它们的主要来源地是小行星带和柯伊伯带等区域。这些近地小天体的轨道与地球轨道相交,因而存在着将来与地球发生碰撞的可能性。

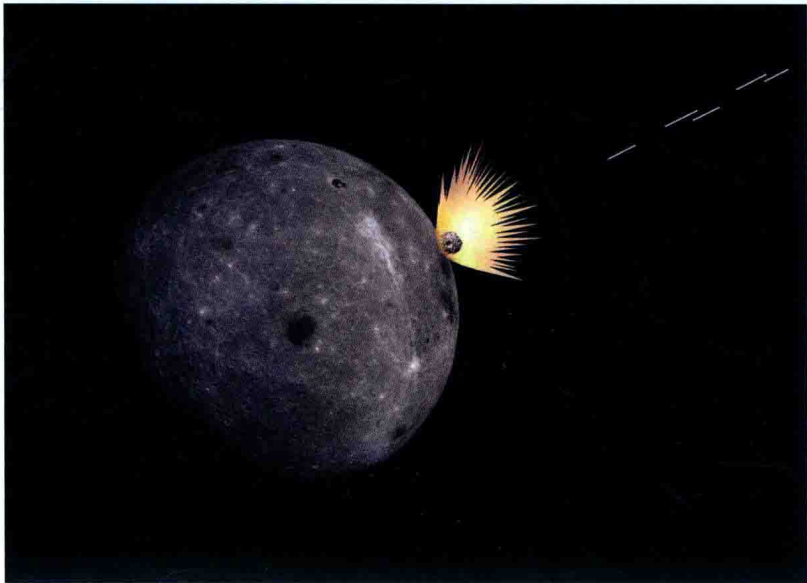


图 1.2 太空中星球碰撞示意图

当小行星、彗星和流星体等较小天体受到其他较大星球引力摄动时,其运行轨道有可能发生改变并引发星球碰撞

第二节 陨 石 坑

在太阳系中,大小不同的天体都在太阳的引力作用下以一定的速度围绕着太阳运行。当两个质量和体积相差较大的固态星球发生超高速碰撞时,较小星球会在撞击中毁灭,而较大星球表面则会留下撞击的疤痕,出现一个环形凹坑或环形地质构造。这种星球碰撞遗迹通常被称为陨石坑,也称为撞击坑,或陨石撞击坑。因此,陨石坑的概念一般被定义为:宇宙中小行星、彗星或流星体等小天体与其他星球之间发生超高速碰撞,在较大星球表面形成的环形凹坑或环形地质构造。

人们对太阳系中发生的星球碰撞现象与陨石坑之间关系的认识是一个渐进过程。自从 17 世纪初意大利天文学家和物理学家伽利略·伽利莱 (Galileo Galilei) 发现了月球表面存在大量的环形山以后,科学界在很长一段时间里将这种环形凹坑描述为火山口,即一种类似于地球表面由于火山喷发而形成的地质地貌。有关太阳系中星球表面环形凹坑的撞击成因假说最早出现于 19 世纪后期,英国天文学家理查德·安东尼·普罗克特 (Richard Anthony Proctor) 提出了月球表面环形山形成可能是月球在吸积周边其他不同大小的星子过程中发生碰撞的结果。尽管这个假说与现在理解的陨石坑成因机制完全不一致,这是有关陨石坑科学理论的萌芽。现代陨石坑科学理论的最终建立很大程度上归因于 19 世纪末期以后地球陨石坑的研究结果以及 20 世纪 50 年代到 70 年代期间月球探测计划的成果。20 世纪 60 年代地球陨石坑成因研究的一系列突破性进展,特别是美国巴林杰 (Barringer) 陨石



坑和德国里斯（Ries）陨石坑的证实，为了解太阳系固态星球表面陨石坑的特征和撞击成因机制提供了关键的证据和理论支持。

现代深空探测获取的大量地外天体表面地质形貌影像资料，特别是那些布满陨石坑的月球或其他星球表面图像，给人们留下了有关太阳系中星球之间碰撞历史的深刻印象（图 1.3）。在距今 41 亿 ~38 亿年前的太阳系历史早期，在太阳和小行星带之间的内太阳系发生了强烈而且密集的星球碰撞事件，在月球上形成了大量留存至今的陨石坑，同时也对地球、水星、金星及火星造成了重要影响。这个猛烈的星球轰炸时期很可能为地球带来了丰富的水资源，并为孕育地球生命诞生提供了条件，地球生命几乎是在这个剧烈星球碰撞时期结束之后才得以出现。这个星球碰撞时期的主要证据来源于 20 世纪 60~70 年代美国阿波罗工程（Project Apollo）采集的月球表面撞击熔岩的年龄测试结果，这些岩石样品的形成年龄数据主要分布在 41 亿 ~38 亿年前这一时间段内。由于这个猛烈的星球碰撞时期发生在太阳系刚形成的 5 亿 ~6 亿年之后，因此被称为“后期重轰炸期”（Late Heavy Bombardment），又名“月球灾难”。尽管有关这一时期发生的密集星球碰撞事件的原因解释现在仍然处在假说阶段，但月球表面陨石坑的星球撞击起源已是不争的事实，反映了太阳系早期的一段真实历史。

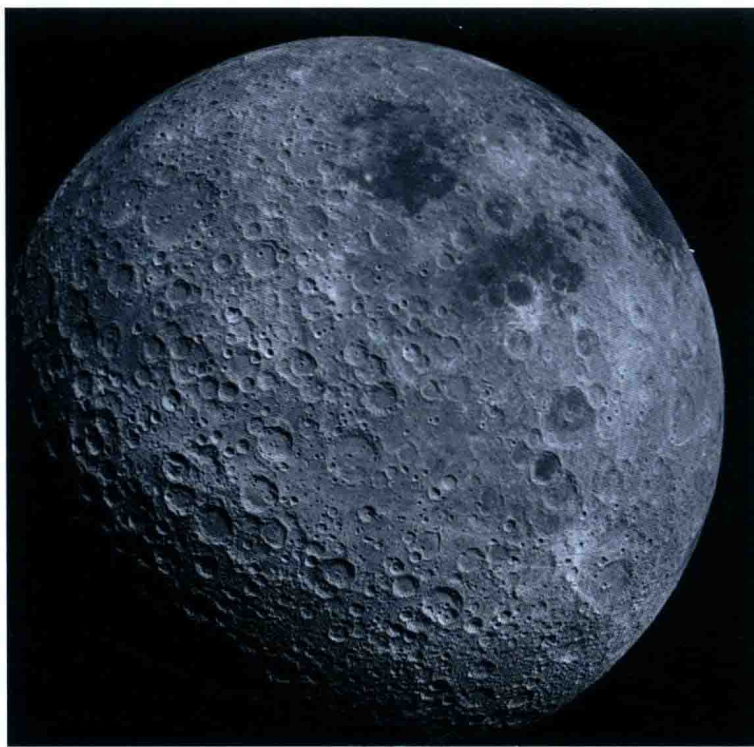


图 1.3 月球表面的陨石坑

月球表面布满了大量经由星球之间碰撞而形成的环形陨石坑遗迹，这是 1972 年 4 月美国阿波罗 16 拍摄的月球背面图像（AS16-3021，Lunar and Planetary Institute）

陨石坑与火山口是太阳系固态星球表面可能出现的两种不同环形地质构造类型。陨石坑是一种宇宙地质作用产物，它的形成与星球之间的碰撞事件有关，与星球本身的大小规模和地质活跃程度无关，可以形成在不同大小的固态星球表面。火山活动与星球本身的内

动力地质作用有关，火山口主要出现在一些体积较大和地质活跃的星球上，体积较小和地质不活跃的星球通常缺乏火山口。因此，陨石坑在许多星球表面的分布要比火山口等其他地质构造更为广泛，属于一类常见的宇宙地质构造形迹。现代深空探测结果表明，太阳系内几乎所有具有固体表面的星球都存在陨石坑，包括我们人类栖息的地球，以及水星、金星、火星、月球、冥王星、木星卫星、土星卫星、天王星卫星、小行星和彗核等地外星球。太阳系星球表面发育的陨石坑规模大小不一样，已观察到的陨石坑直径从数米到数千千米不等。

第三节 撞击与成坑

太阳系中天体的公转速度与太阳的万有引力成正比，天体距离太阳越远其公转速度越小。地球绕太阳的运行速度约为 30km/s，火星公转速度为 24km/s，木星公转速度为 13km/s。位于火星与木星之间小行星带中的小行星的公转速度一般介于火星与木星的公转速度之间，比如灶神星公转速度为 19km/s。太阳系中天体之间一旦发生碰撞，它们之间的相对速度通常可以达到每秒十多千米到每秒数十千米。

根据经典物理学的动能公式： $KE=1/2 mv^2$ （ KE = 动能， m = 物体质量， v = 速度），具有一定质量的物体之间发生超高速碰撞，可在瞬间释放出巨大的能量。撞击体质量和撞击速度越大，碰撞释放出来的能量也就越大。星球之间的超高速碰撞会引发爆炸效应，这是超高速撞击在靶岩和撞击体中引起强烈的冲击波和紧接其后的稀疏波（释放波）作用的结果。自然界中常见的爆炸形式有闪电爆炸和火山爆发，撞击爆炸是一种在起因和效应上完全不同于其他爆炸形式的天然事件。

两个固态物体之间发生超高速碰撞，在撞击界面两边的介质中产生两个传播方向相反的冲击波，波阵面分别向靶体前方和撞击体背后方向传播。冲击波是一种非线性波，波阵面以超音速向周围介质传播。冲击波在固体介质中传播时，会使得介质的压力、密度和温度等状态参量发生急剧的变化。冲击波在扩展过程中强度不断衰减，使得其能量和速度随着传播距离的增加而发生迅速下降。当冲击波传播到达撞击体背部界面时会发生反射，形成稀疏波。固态物质的冲击压缩是一个热动力学的不可逆过程，而稀疏波引起被冲击物质的绝热膨胀是热动力学的可逆过程。稀疏波是一种在被压缩物质中以声速传播的压力波。稀疏波比冲击波移动得更快，它将逐渐追赶上冲击波阵面，导致压力的释放。两个固态星球之间发生超高速碰撞，靶区岩石在冲击压缩下达到的压力可高达数百万大气压，导致岩石和矿物发生破碎、变形、相变等变化；而稀疏波则使得被压缩岩石的压力释放和放热，温度高达上万摄氏度，导致岩石和矿物的熔融和气化。

动能公式表明，物体之间碰撞产生的能量与速度的平方成正比，可见速度的变化会对动能产生较大影响。在物理学上，超高速一般是指大于 3km/s 的速度，固态物质在超高速撞击之下一般会发​​生不可逆的变形或相转变。不同物质出现超高速撞击效应需要达到的速度有一定差异，导致地球岩石和矿物出现超高速撞击效应的速度一般大于 4km/s。当小天体以超高速与其他较大体积固态星球发生碰撞时引发剧烈爆炸，小天体在撞击中毁灭，较大星球表面受撞击的靶区岩石物质在冲击波和稀疏波的作用下发生抛射并形成环状凹坑。因



此，星球之间发生超高速碰撞是形成陨石坑的必要前提条件。陨石坑的规模大小主要取决于撞击释放出来的能量大小，与撞击体的质量和速度密切相关。爆炸产生的陨石坑的直径一般可达到撞击体大小的十多倍到数十倍。

如果一个小天体以较低的速度与其他固体星球发生碰撞，撞击释放的能量不足以在靶岩中引起强烈的冲击波作用，不会引起强烈的爆炸效应，也不会导致岩石和矿物发生不可逆的变形或相转变，碰撞产生的坑穴一般不被称为撞击坑或陨石坑。尽管一块陨石在进入地球大气层之前可能具有较高的运行速度，如果陨石质量较小，陨石在坠落过程中会因为大气阻力的原因而不断减速，陨石到达地面发生碰撞时的速度可能会降低至每秒数百米以下，在这个碰撞速度之下一般不会形成科学定义的陨石坑。在我国新疆阿勒泰地区青河县，曾于 1898 年和 2011 年先后发现单体重量分别达 28t（被称为“银骆驼”）和 18t 的铁陨石，以及大量的铁陨石碎片，但目前在该地区并没有发现陨石坑，据此分析陨石很可能是以较低的速度坠落到地表。当一个质量较大的小天体进入地球大气层时，它受到的减速作用是有限的。据估计，当陨石质量达到千吨以上时，大气层难以对它起到明显的减速作用。如果一个高速撞向地球的小天体不在高空发生空中解体 and 发生明显减速，它将有可能导致撞击成坑事件发生并形成陨石坑。

当陨石以较低的速度坠落到地表时，尽管不会引发爆炸，但陨石仍然有可能通过机械作用力的方式贯入到地表以下一定深度，形成直径略大于陨石体的坑穴，这种凹坑一般被称为“陨石渗透坑”。1976 年 3 月 8 日发生在我国吉林省吉林市郊区的陨石雨就是一次形成“陨石渗透坑”的典型事件，陨石母体坠落时在大气层发生了大幅度减速并发生了空中解体，其中一块直径约 1m、重量达 1770kg 的最大陨石碎片在坠落地表时穿过地表冻土层，形成了一个直径 2m 深度 6m 的陨石渗透坑。

第四节 冲击变质作用

冲击变质理论创立于 20 世纪 60 年代，这是现代地球与行星科学和陨石科学的最新基础理论之一。1960 年美国巴林杰陨石坑中撞击成因超高压矿物柯石英等的发现开启了冲击变质科学的大门，使得许多天然物质的冲击变质现象获得了理论上的支持，柯石英的主要发现者赵景德（Edward Ching-Te Chao）成为了这一科学领域的主要奠基人之一。冲击变质理论的建立极大地促进了世界陨石坑科学和陨石科学的发展。

冲击变质作用是指岩石和矿物在撞击引起的高压、高温和强拉伸环境下发生的一系列物理和化学变化。太阳系固态星球之间的超高速碰撞引起的冲击波作用可导致撞击点及其附近岩石的结构和构造以及矿物结构和成分发生变化，出现变形、相变、熔融、重结晶和气化等冲击变质现象。冲击变质作用属于宇宙地质作用范畴，它与地球上任何其他地质作用的机制和结果有着明显的区别。冲击变质理论是陨石坑科学的核心基础理论之一，特殊的岩石和矿物的冲击变质现象可为地球陨石坑鉴别提供指纹证据。

冲击变质作用具有以下主要特点：

（1*）作用时间极为短暂。星球碰撞产生的冲击波通过岩石的时间一般为微秒级或更短，千米级以上大小的撞击体产生的高压脉冲持续时间可达秒级。一个巨大的陨石坑可在数秒

时间内形成。相比之下，地球的地质作用时间通常以百万年为计算单位。

（2）峰值压力大。撞击产生的最高压力可达数百万大气压，而发生在地球表面附近的地质作用压力一般低于 2 万个大气压。

（3）温度高。撞击产生的最高温度可达上万摄氏度，而发生在地壳的地质作用温度一般低于 1000℃。

（4）物理和化学的不平衡状态。由于作用时间短暂，受撞击物质一般不易达到物理和化学的平衡状态，常发生淬火效应。一般地质作用由于延续时间较长，各种物质可以达到或接近物理和化学的平衡状态。

（5）爆炸效应。星球之间的超高速碰撞引发爆炸效应，并在星球表面形成环形凹坑或环形地质构造。

（6）冲击效应。岩石和矿物在冲击波作用下发生高压、高温和强拉伸等冲击效应，导致其物理和化学性质的变化。

当星球碰撞事件发生时，冲击波从撞击点向周围岩石中传播，岩石经受的冲击压力和冲击温度随着与撞击点距离的增加而逐渐降低，岩石的冲击变质作用强度不断减弱并相应出现不同的冲击变质效应（图 1.4）。随着与撞击点距离的增加，冲击波最后衰减为地震波，以弹性波的形式继续向外传播，但由这种地震波引起的岩石和矿物变形不作为撞击证据。

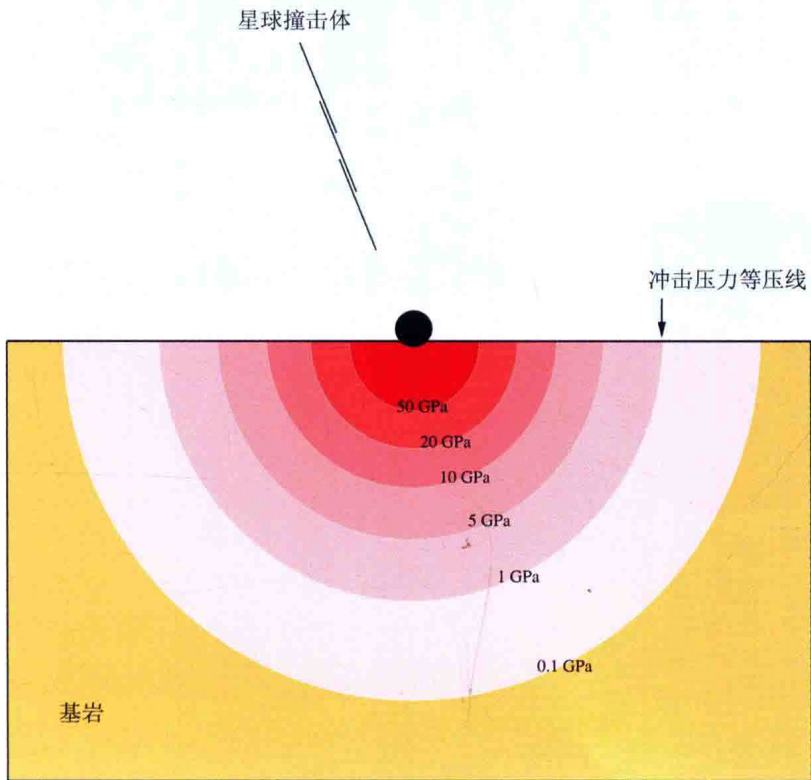


图 1.4 撞击点周围冲击压力分布示意图

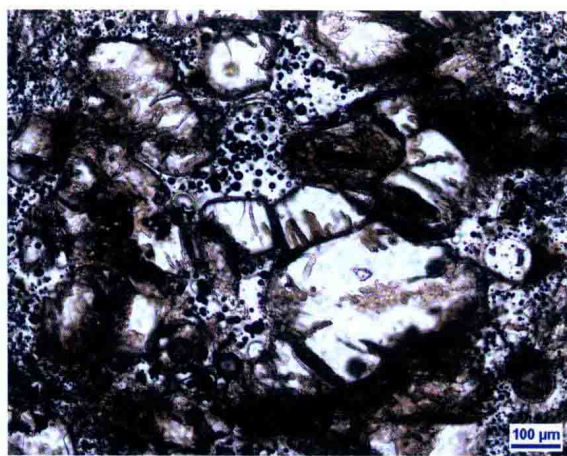
地外天体与地球表面发生碰撞产生强烈的冲击波，冲击波从撞击点向周围岩石介质中传播。由于冲击波在扩展过程中强度不断衰减，靶区岩石经受的冲击压力随着与撞击点距离的增加而不断降低，岩石发生的冲击变质程度也不断减弱。冲击波最后衰减为地震波，以弹性波的形式继续向外传播



对于一个直径千米以上的陨石坑，受到上万个大气压以上冲击压力作用的岩石体积可能达到上亿立方米，而且这类受冲击波作用影响的岩石分布范围较广。那些直径达数十千米的陨石坑受强烈冲击波作用的岩石体积更为巨大，分布更为广泛。因此，一处星球撞击遗迹中受到强烈冲击波作用岩石的大量存在为寻找和发现地球陨石坑提供了充足的物质来源和研究对象。即使一个陨石坑在漫长的地质岁月中遭受了强烈的风化侵蚀，仍可根据残留的一些冲击变质岩石中存在的撞击证据来证实这个星球撞击遗迹。与未发生冲击变质的岩石相比较，许多冲击变质岩石会显示出结构、构造和组成等一系列物理和化学变化，两者之间的特征差异十分明显（图 1.5）。只要分析技术和方法得当，可为地球陨石坑鉴别提供关键的证据。



未发生冲击变质的变粒岩



发生冲击变质的变粒岩



变粒岩

图 1.5 未发生冲击变质岩石与发生冲击变质岩石的组成和结构对比

左下图是产出在岫岩陨石坑地区的主要岩石类型之一“变粒岩”。岩石薄片的光学显微镜图像表明，未发生冲击变质的变粒岩由结晶度良好的长石和石英等矿物组成（左上图，正交偏光图像）。一种发生了强烈冲击变质的变粒岩由气孔状硅酸盐玻璃和含有超高压矿物柯石英的二氧化硅玻璃组成，原来的长石发生了全部熔融并淬火成为气孔状玻璃，原来的石英则转变为含有柯石英的二氧化硅玻璃，样品经受的冲击压力峰值达 50GPa 以上（右上图，单偏光图像）

第五节 陨石坑分类

陨石坑在形态特征上一般都呈现为一个环形凹坑或环形地质构造。当撞击体的运行轨迹与靶岩平面之间以较大角度（ $30^{\circ} \sim 90^{\circ}$ ）相交发生碰撞时，形成的陨石坑一般接近于一个正圆形，绝大部分陨石坑都会呈现出这一形态特征。如果撞击体以低角度（ $<30^{\circ}$ ）与靶岩发生碰撞，所形成的陨石坑就可能近似于椭圆形或泪滴状。位于阿根廷中部科尔多瓦省的里奥夸尔托（Rio Cuarto）陨石坑群就呈现为泪滴状形态（附录 3）。椭圆形或泪滴状陨

石坑在自然界都比较少见。

根据形态发育特征，一般可将陨石坑划分为简单型和复杂型陨石坑两大类型，其中复杂型陨石坑还可以根据中央隆起构造的发育特点进一步划分为具有中央峰构造的和具有环状中央隆起构造（或环形撞击盆地）的两种亚类。月球表面保存了许多形态特征比较完美的陨石坑，图 1.6 展示了月球上的简单型陨石坑和具有中央峰构造的复杂型陨石坑图像，图 1.7 表明了月球上具有环状中央隆起构造的复杂型陨石坑图像。

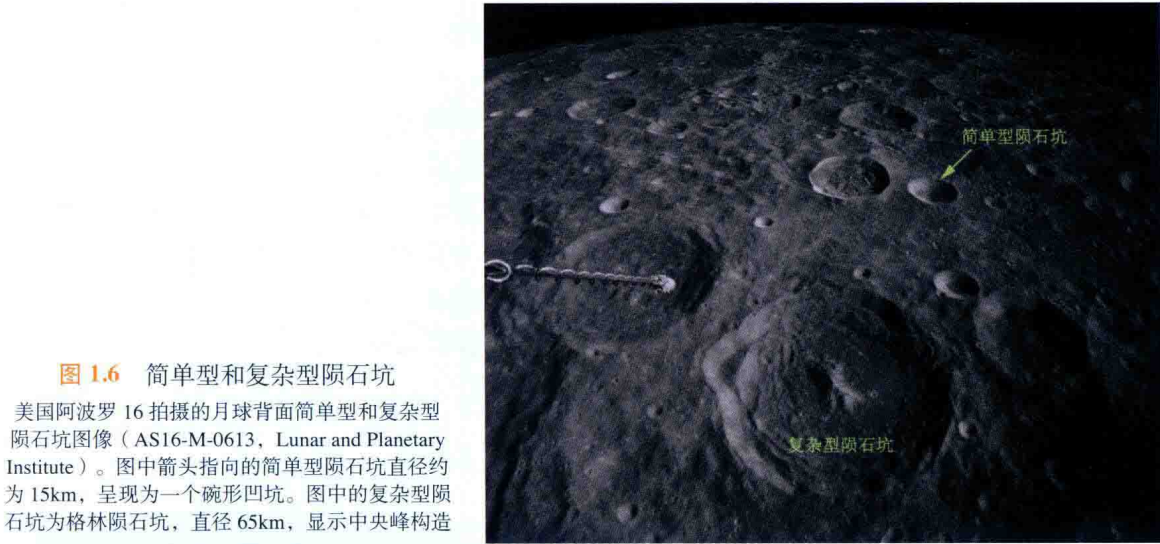


图 1.6 简单型和复杂型陨石坑

美国阿波罗 16 拍摄的月球背面简单型和复杂型陨石坑图像（AS16-M-0613, Lunar and Planetary Institute）。图中箭头指向的简单型陨石坑直径约为 15km，呈现为一个碗形凹坑。图中的复杂型陨石坑为格林陨石坑，直径 65km，显示中央峰构造



图 1.7 具有环状中央隆起构造的复杂型陨石坑

这是 1967 年 5 月美国月球轨道器 IV 拍摄的月球东海撞击盆地图像（Lunar Orbiter IV Frame 4187, Lunar and Planetary Institute），这是一个由四个环状中央隆起构成的多环状撞击盆地，这些环的直径分别为 900km, 620km, 480km 和 320km

陨石坑的形态特征一般与撞击速度、撞击体大小、靶岩性质以及重力条件等因素有关。撞击释放的能量越大，陨石坑的规模就越大。简单型陨石坑的规模一般小于复杂型陨石坑；在复杂型陨石坑当中，具有环状中央隆起的陨石坑规模一般也大于具有中央峰构造的陨石坑。在地球上，从简单型陨石坑过渡到复杂型陨石坑的直径大小在沉积岩地区约为 2km，