

陨石撞击构造作用的研究现状与前景

游振东, 刘 嵘

(中国地质大学(武汉)地球科学学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 当陨石撞击地球表面时, 它所引起的瞬时(1 秒至 1 微秒)动态高压(数十至数百个吉帕)和高温(大于 1500°C), 必然导致陨石撞击坑(astroblems)的生成并使周围岩石发生变质作用, 这便是撞击变质作用(impact metamorphism)。目前关于撞击构造(impact tectonics)作用研究的主要进展涵盖如下四个方面: 1. 撞击坑的构造形貌及形成机制; 2. 撞击变质作用及撞击变质岩; 3. 撞击作用的数值模拟和实验研究; 4. 撞击作用的经济地质意义。陨击作用研究不仅具有学术意义, 还具有实际的经济地质意义。南非的 Vredefort-Witwatersrand 是最老的撞击构造, 它以丰富的金铀矿床而闻名; 加拿大的肖德贝里(Sudbury)以同撞击作用期的大型铜镍矿床著称; 如今北美、中美不少地区正在探索与陨击期后构造有关的油气储集。此外, 许多陨击变质岩可以供作建筑材料。不少撞击坑已经辟为旅游胜地, 如德国的 Nordlingen Ries 撞击坑。我国撞击构造的研究已有不少进展。20 世纪 90 年代初发现了海南白沙陨击坑, 此外内蒙古的多伦、江苏的太湖和辽宁的岫岩罗圈里等地也发现有限击构造的证迹, 不过, 都尚待进一步的工作予以证实。全球撞击构造研究经验可以借鉴的是, 在长期构造稳定区较易于发现陨击坑; 不少撞击构造被隐伏在第四纪或更老的沉积物之下, 所以采用人造卫星发回资料解译地球表面的照片, 加上地球物理勘探, 可以有效地确定研究靶区, 在此基础上再加强岩石学、构造学研究予以确认。

关键词: 撞击构造; 撞击变质作用; 陨击岩; 陨击作用标志; 经济地质意义

中图分类号: P512 $^{\circ}$ 6

文献标识码: A

0 引言

从嫦娥一号等发回的数据解译出来的照片, 可以明显地看出月球表面布满大大小小的陨石撞击坑(impact crater)。当星际运行的小天体(小行星、流星体等)陨落行星或其卫星的表面时, 必然因摩擦而产生瞬时高温($> 1500^{\circ}\text{C}$)和动态高压(可达数百 GPa), 其强大的动能使行星的表面开掘出陨石撞击坑(impact crater)。地球也是一个行星, 不同于月球, 她的表面有厚约 1000 km 的大气层, 这就使陨落的小天体进入大气层后, 因强烈的摩擦而烧

收稿日期: 2008-02-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(40272032)资助

作者简介: 游振东(1928-), 男, 教授, 岩石学专业, 长期从事变质地质学研究. E-mail: zdyou@tom.com

©1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.

毁, 这便是通常所说的流星。月球因为没有大气层, 所以即使微小的宇宙尘也会在其表面撞击出微小的撞击坑, 这在月岩的样品中能看出来。显然, 大气层的存在和它的屏蔽是地球表面比月球较少发现撞击坑的原因。另一方面, 由于大气层存在, 地球表面一直受表生作用的影响, 因而地质历史较老的撞击坑往往受到风化侵蚀以及构造作用的叠加所破坏; 许多陨石坑被埋藏在陨击后期的沉积层之下, 而难以发现。现今地球上已发现的陨石撞击坑有 160 个以上, 从 1960 年代起陨石撞击构造的研究, 已受到科学界的关注。目前, 撞击构造的研究包括以下四个方面: 1) 陨石撞击坑的形貌和形成机制; 2) 撞击变质作用 (impact metamorphism) 及变形变质效应; 3) 撞击作用的数值模拟和实验研究; 4) 撞击作用的经济地质意义。

陨石撞击变质作用是一种极端条件下的变质作用, 不同于一般变质作用, 它的热源并非来自地球内部, 也与板块的运动无关^[1], 是一种非内力的地质作用。撞击变质作用及其产物——撞击变质岩, 是识别陨石撞击变质作用的重要标志。陨石撞击变质作用对于地球无疑是一种灾变, 可是多数陨石撞击坑却具有经济价值。而中国撞击构造的研究虽然已有一定的进展, 海南白沙陨击坑已成旅游景点, 内蒙古的多伦, 江苏太湖和辽宁的岫岩罗圈里等地已经发现有限击构造的证迹, 但都有待进一步的证实。本文旨在介绍撞击坑的形成机制及构造形态、撞击变质作用及撞击变质岩, 以及撞击变质作用的经济地质意义, 并针对如何在中国进一步发现和深入研究撞击构造等问题, 发表一点看法。

1 陨石撞击坑的形成机制

若一个直径为 1km 的铁陨石 (设其密度为 $8.0\text{g}/\text{cm}^3$), 以每秒 25km 的速度撞击地表, 其动能是 $E = 1/2mv^2 = 1.31 \times 10^{21}$ 焦耳。这一动能相当于 3.12×10^{11} 吨 TNT 炸药的爆炸能^①; 而 2004 年印尼 8.9 级地震能量只有 184×10^{16} 焦耳。所以巨型陨石撞击地球是一种大的灾变, 中生代末发生的恐龙和许多物种的灭绝, 据分析, 墨西哥的 Chicxulub 撞击事件是罪魁祸首^[2]。陨石撞击成坑过程可大致分为: 压缩挤压、开掘成坑和成坑后的调整等三个阶段^[3]。在压缩阶段所形成的高压瞬态压缩波, 可称冲击波。设陨击的速度为每秒 10km, 则冲击波的压力可达几百 GPa, 当冲击波压力达 $1 \sim 30\text{GPa}$ 时靶岩发生破裂, 超过 30GPa 花岗岩质岩石选择性部分熔融, $> 60\text{GPa}$ 则花岗岩质岩石蒸发变成气体。冲击波的后面是稀疏波 (release wave), 它起减压的作用, 所有的陨石碎片、熔融物和蒸发物都沿着冲击波和稀疏波之间的界面高速喷射出来, 开掘成坑。同时, 溅射出的岩石物质在坑沿堆积起来形成沉积层, 沉积层的层序与陨石撞击靶区的地层相反, 上层的抛出物在下, 下层的反而在上。陨石撞击坑成坑之后会受到重力和岩石力学性质的影响, 发生种种调整和变形, 首先, 由于撞击作用的反弹坑的中部常常出现隆起; 继则重力作用使坑壁垮塌, 碎屑抛射于坑内, 形成坑内充填角砾岩; 最后, 因隆起而出现放射状、同心状的裂隙等等。据模拟实验, 这三个阶段经历时间很短。压缩挤压阶段不过数秒; 开掘成坑阶段要长一些, 取决于坑的大小: 设开掘流 (excavation flow) 速度为 $1\text{km}/\text{s}$, 直径 1km 的陨击坑, 如 Meteor Crater, 需时 6s, 直径 200km 的陨击坑需时 90s, 最后的调整阶段, 时间大约几分钟至几小时^[3,4]。

① 欧强. 全球陨击构造信息系统 (EMISIS) 的开发及在罗圈里研究中的应用 (中国地质大学硕士学位论文, 2001, 33~34)

©1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

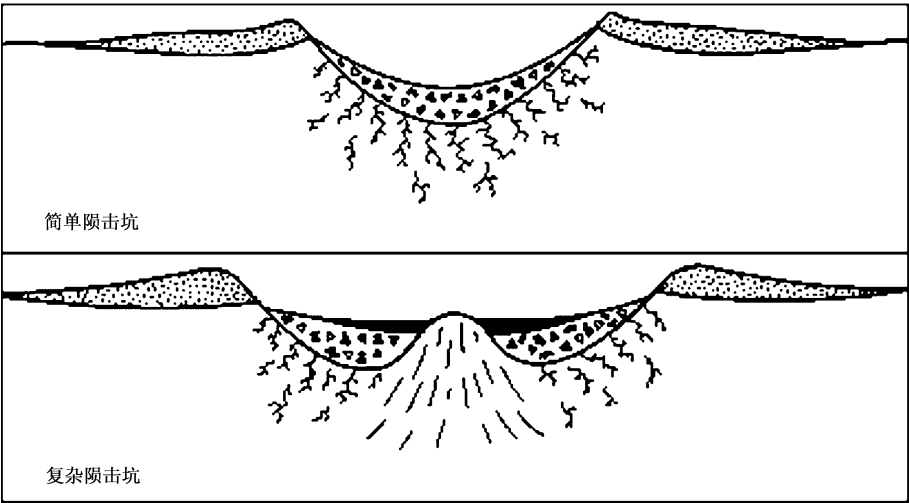


图1 简单陨石撞击坑（上）和复杂陨石撞击坑（下） 细点：抛出物；小三角：碎块堆积；黑色：熔岩；不规则细纹：坑底的裂隙（据 Hamilton, 2001）^[5]
Fig.1 Simple impact crater (upper) and complex impact crater (lower) (after Hamilton, 2001)^[5]



图2 美国 Arizona 州 Meteor crater（航空照片 NASA 2005）^[6]
Fig.2 Meteor crater in Arizona, United States (aero-photograph from NASA 2005)^[6]

2 陨石撞击坑的形貌和构造

在无大气层屏蔽的行星或卫星（例如月球）上，微小的宇宙尘都能在其表面撞击出微坑，例如月岩的样品上即可观察到小至 0.1 μ m 的微陨石坑。地球的大气层厚达千公里，一些直径较小的陨流星在进入大气层时，因摩擦产生的高温和瞬时高压爆裂、燃烧气化，不到一秒钟就消失了。所以地球表面能够找到的多是直径比较大的，常常散布在某一地区，通称

陨石雨。例如：吉林陨石雨（1976）、湖北随州陨石雨（1986）等，但是这些陨石个体较小，未能造成大的破坏，只有那些个体较大的能够在地球表面撞击成坑。按照陨石撞击坑的形貌和构造，可大致分为简单和复杂两类（图 1）：简单陨石撞击坑的形貌，深度/直径=1/5~1/4，作浅碗状，有抛出物堆积成的坑沿，抛出物沉积的范围是撞击坑直径的 2 倍，抛出物的粒度随远离坑沿而减小。典型实例，美国 Arizona 州 Meteor crater，撞击作用时代：49 万年，直径 1.2 公里，深 100 米（图 2）。复杂陨石撞击坑的形貌特点：撞击坑的直径视靶区的地质情况而不同。如果靶区为沉积地层，则撞击坑直径 > 2km；如果靶区是个结晶岩发育区则撞击坑直径 > 4km。深度/直径比很小，约为 1/10~1/20。复杂陨石撞击坑的构造：坑底常有中心隆起，坑围有塌陷、断裂。中心隆起的成因有二：（1）坑底靶区岩石因减压而反弹；（2）撞击坑开掘后物质坍塌所造成。复杂陨石撞击坑常常诱发岩浆活动，撞击回落的角砾岩层，常常覆盖于熔岩之下。典型实例：加拿大的肖德贝里（Sudbury）巨型陨石撞击坑直径 140km，面积达 15000km²，包括整个肖德贝里岩浆杂岩（SIC=Sudbury Igneous Complex）和底盘岩石破裂而成的底盘角砾岩（floor breccia）。肖德贝里陨石撞击构造正位于元古宙休伦超群和太古宙基底之间的界面上。北部和东部为太古宙基底岩石，SIC 以南为元古宙的表壳岩石休伦超群。陨击角砾岩、泥岩和杂砂岩（whitewater 群）均覆盖在 SIC 之上。整个 SIC 周围 17km 以内，都能找到陨石撞击的构造标志冲击锥（shatter cone）；SIC 周围均有 suevite、pseudotachylite 等撞击变质岩的分布（图 3），显然属于陨石撞击构造的外环。在不少地方，陨击角砾岩还成为 Cu-Ni-PGE（铂族元素）矿床的围岩。

除了少部分年轻的撞击构造之外，大多数都要受到撞击作用后期构造的破坏。以西伯利亚 Anabar 地盾的 Popigai 撞击构造为例，撞击作用后期构造的破坏十分明显。它表现为一系列不同宽度、不同垂向运移的断块状（图 4），断块间的界限可以从线状水系和陨击岩中线

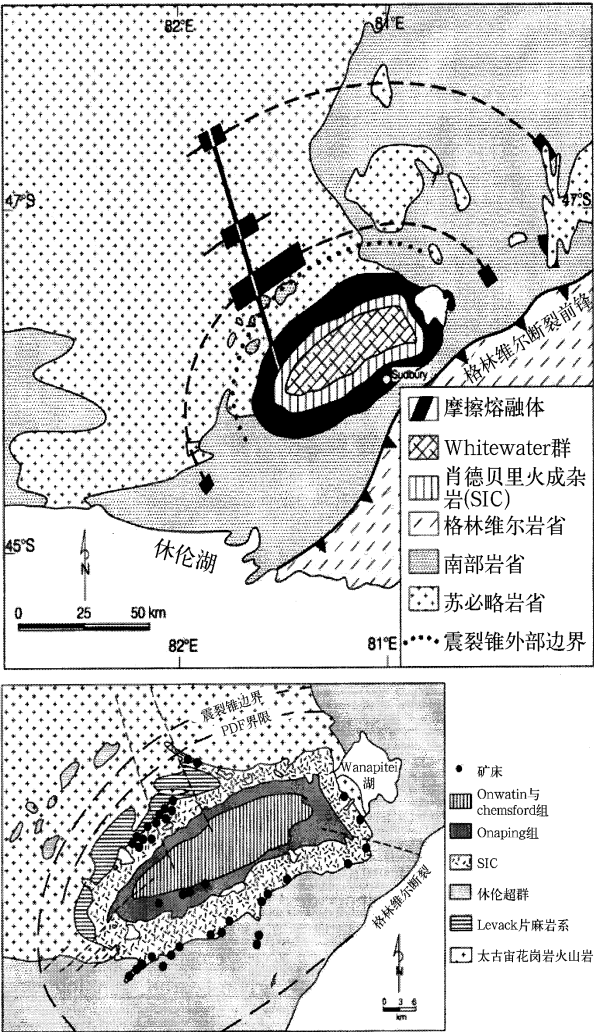


图 3 加拿大的肖德贝里（Sudbury）巨型陨石撞击坑。上图：陨石撞击构造及撞击变质岩的分布；下图：主要矿床的分布（据 Reimold, 2005, Fig. 8）^[7]
Fig 3 Sudbury large scale impact crater. upper: impact tectonics and the distribution of impactites; lower: distribution of major ore deposits (after Reimold, 2005, Fig. 8)^[7]

陨击角砾岩、泥岩和杂砂岩（whitewater 群）均覆盖在 SIC 之上。整个 SIC 周围 17km 以内，都能找到陨石撞击的构造标志冲击锥（shatter cone）；SIC 周围均有 suevite、pseudotachylite 等撞击变质岩的分布（图 3），显然属于陨石撞击构造的外环。在不少地方，陨击角砾岩还成为 Cu-Ni-PGE（铂族元素）矿床的围岩。

除了少部分年轻的撞击构造之外，大多数都要受到撞击作用后期构造的破坏。以西伯利亚 Anabar 地盾的 Popigai 撞击构造为例，撞击作用后期构造的破坏十分明显。它表现为一系列不同宽度、不同垂向运移的断块状（图 4），断块间的界限可以从线状水系和陨击岩中线

状断崖的发育而得以识别。有时可以看到后撞击沉积物增厚的线性沉积带。有些断裂表现为断裂两侧地质构造的突变或陨击岩厚度的剧变。从图 4 可以看出两类断裂系统：（1）前撞击构造（因撞击作用而再活化）和同撞击构造所构成的放射状和同心状的断裂系统，它们决定了现今 Popigai 凹陷内的同心型、放射型水系的发育；（2）北西向、南西向的后撞击作用期的断裂。这是 Anabar 地盾新近纪—第四纪区域性隆升构造所诱发。放射状断裂多近直立，主要记录走滑运动；而同心状断裂均为高角度的，记录中心块体的上下运动。由于后期的侵蚀作用，这些后撞击作用期的断裂，决定着各类陨击岩的空间分布。陨击坑的南部和西部靠近 Anabar 地盾，抬升最高，多出露陨击熔岩和自生角砾岩；中心凹陷和环形槽，石质角砾岩厚度最大，代表着块体沉降最低的部分；陨击坑中部和北部出露碳酸盐岩、铁质角砾岩和辉绿岩，代表块体隆升中等的部分。

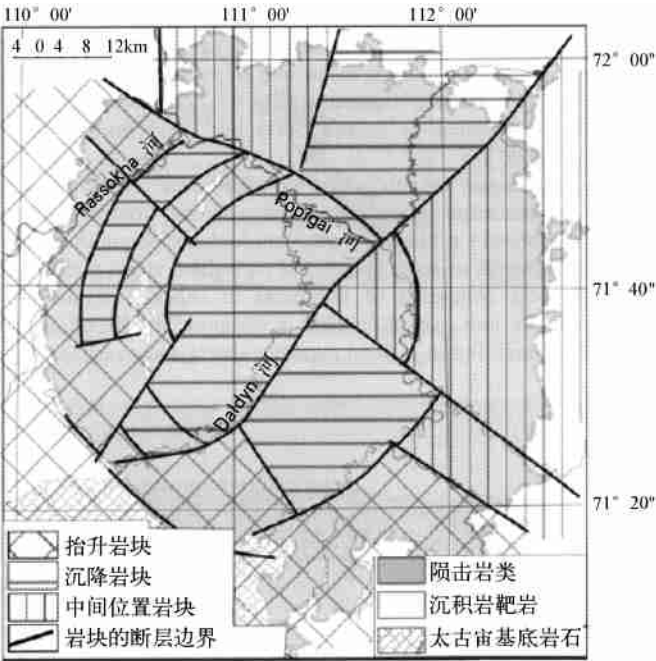


图 4 Popigai 陨石坑后撞击作用期的构造图。不同的断块的规模大小、隆升高度均不相同（据 Maschak and Naumov, 2005）^[8]

Fig. 4 Popigai post-impact tectonics. Different fault blocks with various sizes and heights of uplift (after Maschak and Naumov, 2005)^[8]

3 陨石撞击坑的后期改造

陨石撞击坑既经形成，首先要受到后期表生作用的侵蚀和破坏，然后就是后期构造作用的叠加和再造。陨石撞击坑后期改造过程包括：滑坡、侵蚀、充填还有火山作用和均衡调节等。所以时代较老、规模小的陨石撞击坑常常难以保存。地球上直径 20km 的撞击坑，6 亿年仍可辨识，10km 的撞击坑 3 亿年仍可辨识，1km 的撞击坑，百万年后即面目全非。所以，对于那些深受侵蚀又被掩埋在后撞击作用的巨厚沉积层之下的陨石撞击坑，发现起来更是十分困难。波罗的海北部瑞典芬兰地区，常简称其为瑞芬地区（svecofennian），基底年代为 1.9Ga，其相邻的年轻造山带 1.5~1.8Ga，总面积 $1.56 \times 10^6 \text{ km}^2$ （156 万平方公里），据 Puura and Plado (2005) 报道^[9] 该区已经发现并确认的陨石撞击坑 22 个，可能的陨石撞击坑 7 个，还有十来个推测的撞击构造，这些陨石撞击坑都经过漫长的地质时期反复侵蚀而幸存下来。在瑞芬地盾结晶岩之上以及俄罗斯地台上的沉积层，甚至陆表海之下的沉积岩层中都找到过中一小规模的陨石撞击坑（图 5），它们完全或部分地受到侵蚀和破坏。在撞击坑的时间周期中，早古生代是一个陨击事件的多发期，有许多残存的陨石撞击坑，这就说明该区存在不均匀的侵蚀作用史，并有许多隐伏（埋藏）的陨击构造。可以预测在第四纪沉积之下，可能

还有部分侵蚀的陨石撞击坑，有待发现。Puura and Plado 根据瑞芬地区研究成果^[9]，将陨石撞击坑按照其保存程度分为 7 级（表 1）。

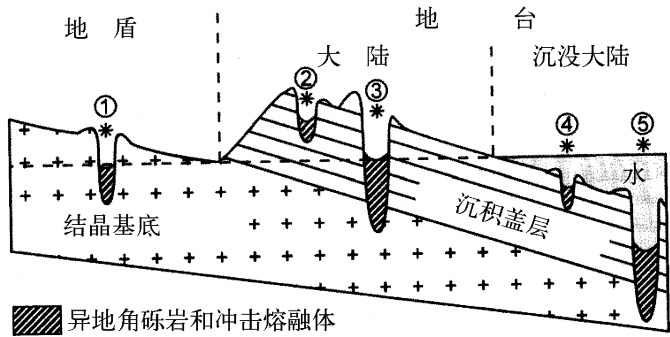


图 5 瑞芬地盾和地台区陨石撞击坑的分布剖面图（据 Puura and Plado, 2005）^[9]

①~③为大陆区撞击坑，④~⑤为沉没区水下撞击坑；①撞击发育于结晶岩区；②和④陨石撞击于沉积岩区；③和⑤陨石撞击进入沉积岩和结晶岩区

Fig 5 Typical impact geological settings in the Svecofennian domain (after Puura and Plado, 2005)^[9]

①~③ Impact craters in the continent; ④~⑤ Subaqueous impact craters in sunken areas. ① Impact occurred in the crystalline basement; ② and ④ Meteorites impacted sedimentary cover; ③ and ⑤ Meteorite impacts occurred in sedimentary and crystalline terrains

表 1 瑞芬地区陨石撞击坑保存程度分级（据 Puura and Plado 2005）^[9]

Table 1 Preservation level of impact craters in the Svecofennian crustal domain (after Puura and Plado, 2005)^[9]

保存度	特征标志	代表性撞击构造及时代	其他标志
1	抛射物大部保存	—	—
2	抛射物部分保存	Kaaliyarv Q ₂ Kardla O ₃	撞击坑明显 隐伏，盖层中有坑沿引发的背斜
3	抛射物消失，坑沿部分保存	Dobele C ₂ -P ₁ Vepriai C-P ₁	隐伏 隐伏
4	坑沿大部侵蚀，坑内充填物保存	Dellen K ₂ Logoisk Pa ₂ 中古近纪	凹坑，角砾岩、部分保存熔体 夷平、隐伏
5	撞击坑充填物部分保存	Lappajarvi K ₂ Mishina gora C-P	凹坑，部分保存角砾岩、熔体 夷平，部分保存角砾岩、熔体
6	保存撞击坑充填物，残余撞击坑露底	Iso-Naakkima Pt ₂	冰川刻蚀成坑
7	撞击坑底和基底构造暴露	Siljan D-C ₁	夷平，冰川刻蚀，环型地堑

瑞芬地区陨石撞击构造研究经验说明：识别可能存在的陨石撞击构造，首要掌握陨击构造的岩石标志，对于已经夷平而上覆沉积层的隐伏的撞击构造全面的地质地球物理研究是关键。

4 陨击变质作用及产物

陨击变质作用是指冲击波所引发的各种矿物岩石的成分和结构上的变异。主要变质因素

有三方面：(1) 高压效应，(2) 高温效应，(3) 高应变速率所引发的变化。这些效应作用于岩石必然引起各式各样的变化。陨击变质作用是一种极端条件下的变质作用，它的 PT 范围及其与正常变质作用的比较见图 6。从中看出：陨击变质作用的温度随压力而增高，在高温影响下岩石发生熔融，甚至气化。

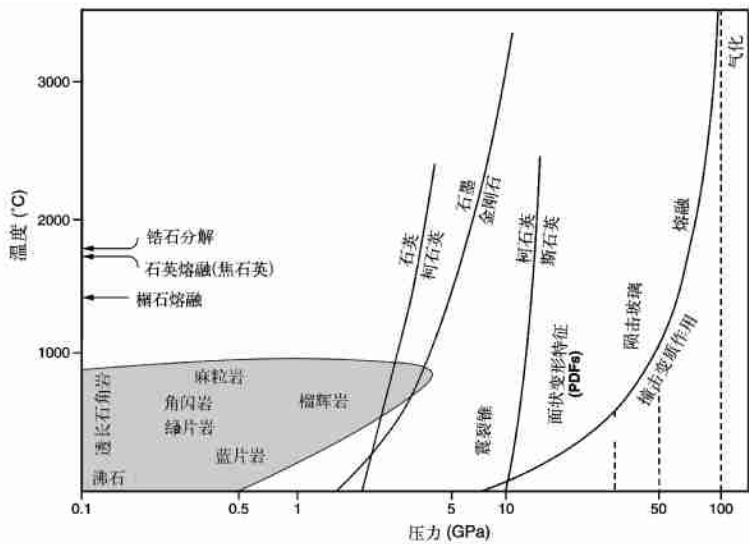


图 6 陨击变质作用范围及各类陨击效应的 P-T 范围，阴影区为正常变质作用变质相的 PT 范围（据 French，2003）^[3]

Fig. 6 PT field of impact metamorphism and various impact effects as compared with normal metamorphism (shaded area) (after French，2003)^[3]

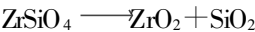
4.1 矿物相的转变

4.1.1 石英变成柯石英。在自然界，柯石英常见于超高压变质的岩石中，这在近几年已有许多报道。不过最先在自然界发现的，却是在美国 Arizona 州的 Meteor crater。赵景德（Chao，1967）^[10] 在重砂样品中淘洗出柯石英。最近，在德国 Ries 陨击坑高度冲击的石英冲击玻璃中发现了柯石英（图版图 A）。在冲击变质岩中，柯石英常呈微粒出现于其他氧化硅物相中，因为冲击变质后的余热仍高达摄氏数百度，所以原先高压下形成的柯石英极易退变为鳞石英和方石英。

4.1.2 斯石英（Stishovite）。其形成压力比柯石英还要高，大致> 10GPa，在冲击变质岩中多呈细小颗粒与柯石英共生。斯石英密度大（4.35）折射率高。特征 X 光衍射峰 $d=2.96, 1.53$ ，是较简便的检测方法。斯石英也极易退变质，很难保存所以难以发现。

4.1.3 焦石英（Lechatelierite）。这是一种硅酸玻璃，形成温度极高（达 1710℃），高于一般火山喷出的熔体，著名产地是北非的利比亚沙漠玻璃（LDG= Libyan Dessert Glass）。这种玻璃质析离体（Schlieren）状构造，其中焦石英和斜锆石呈陨击变质熔融矿物的残余而存在。利比亚沙漠玻璃的成因历来争议不断。最近有人在利比亚埃及边界线附近，通过卫星照片发现了两个陨石撞击坑（BP 和 Oasis 撞击坑），支持了陨石撞击成因。

4.1.4 斜锆石（baddleyite）。为单斜晶系的 ZrO_2 ，是锆石加热分解的产物：



在冲击变质过程中锆石被斜锆石和 非晶质氧化硅的集合体所假象交代，保持锆石原来晶形。

需对含锆石的冲击变质岩样品切制一系列的磨光片, 利用斜锆石的强反射率加以识别。

此外, 在冲击玻璃或冲击岩中还可见到铁镍球粒、滴状钛铁矿、金红石、假板钛矿, 说明其形成温度当在 1500°C 以上。

4.2 矿物的变形

冲击变质过程中矿物的变形, 主要涉及晶体结构的转变, 包括:

4.2.1 在石英、斜长石等矿物中出现多组密集型面状显微构造 (PDFs=Planar deformation features), 特点是矿物颗粒中出现许多小的板片 (图版图 B 和图 C), 矿物的折射率和双折率都普遍降低, 其中有的板片甚至已转变成非晶质体; 在强烈冲击情况下, 长程有序的晶体结构受到破坏, 出现晶格不平行域或镶嵌构造, 在偏光镜下亦表现为波状消光, 但与一般的构造应力所引起的不同, 它在 X 光衍射胶片中谱线变宽, 且出现星芒现象。

4.2.2 石英、长石选择性或全部转变成固态硅酸玻璃或斜长石玻璃, 一称熔料玻璃。而与之共生的暗色矿物则仍维持结晶质。相邻矿物之间无反应现象。极高压下所形成的柯石英、斯石英等都呈细小包裹物出现于玻璃质的基质中。

4.2.3 出现高密度的玻璃即冲击玻璃 (diaplectic glass)。它的成分与原岩相同。原岩中氧化物矿物如磁铁矿等都完全熔融。这种高密度玻璃是岩石遭受陨击变质作用的铁证。

4.3 陨击变质岩类 (Impactites)

包括在一个冲击事件中产生的所有岩石, 包括石质角砾岩 (lithic breccia)、陨击角砾岩 (suevite) 和陨击熔融物 (impact melt)。

4.3.1 石质角砾岩 (lithic breccia)。主要是指撞击坑内及其底面以下受冲击波影响而不同程度破裂的角砾岩, 角砾的成分多是准原地的靶区岩石, 基质成分为靶区岩石的碎粉。是陨击变质岩中, 变质程度最低的一种。

4.3.2 陨击角砾岩 (suevite)。由陨击玻璃胶结的角砾岩。出现范围很广, 从坑内充填直至坑沿的抛射物。角砾成分可以是准原地的也可以是异地的坑内充填物。基质除碎粉外还有陨击玻璃, 按玻璃质的含量可以区分: 含熔体的角砾岩—陨击角砾岩—陨击熔融角砾岩等。图版图 D 为 Ries 陨石坑的一个陨击角砾岩, 其中有鲕状灰岩的碎屑。

4.3.3 陨击熔融物 (impact melt): 假玄武玻璃 (Pseudotachylite)。一般构造变形岩石中也可以产生假玄武玻璃, 陨击变质产生的假玄武玻璃常含有陨击变形矿物的残余, 陨击熔融物出现的规模是极不相同的, 可以是毫米级的和厘米级的细脉或不规则充填基质。从德国 Ries 陨击坑陨击花岗岩薄片 (图版图 E), 可见假玄武玻璃基质中有长石残余。偶尔也有数十米厚的假玄武玻璃, 其成因尚有待探讨^[4]。它们通常呈脉状或不规则的充填物充填在破碎的岩石裂隙之间 (图版图 F)。

5 陨石撞击构造的鉴别标志

前已述及, 陨击坑形成之后常常受到后期的侵蚀作用和构造破坏。要在现今地表发现陨击构造, 需要多学科的共同探索。尤其是对于地质历史久远的陨击坑, 其形貌已难以完全恢复, 不少老陨击构造已经隐伏在沉积层之下, 有的甚至隐没在海底。岩石学、遥感地质学和地球物理方法相结合, 才能有效发现它们。从地质方面来看, 主要依靠如下鉴别标志:

1. 陨石的残块。对于较年轻的陨击坑, 常常可以找到陨石的残块。采集坑内及坑沿沉积物样品, 仔细淘洗, 分析研究其中的重组分, 以期发现铁镍球粒陨石等更确切的判据。

2. 地表形貌。年轻的陨击坑的形貌，航空照片就能发现。其主要特征是具有环状隆起坑沿，坑周的抛射物的层序与陨击坑原来的地层层序相反；此外还伴生因巨型碎块轰击而出现的次生坑。对于复杂的陨石撞击坑，有中心隆起和多个环形隆起。

3. 陨击变质产物。最常见的是陨击角砾岩和陨击熔融物的假玄武玻璃，一些大型复杂陨击构造具有多个假玄武玻璃带。

4. 冲击锥 (shatter cone)，又称震裂锥。在地表受陨击的岩石破裂面上有明显条纹状锥形构造。条纹长度从不足 1cm 至数米，条纹从锥顶向侧翼分散作马尾状 (图 7)，冲击锥的出现说明冲击波的压力可达 2 ~ 25GPa。受到核爆炸的岩石，也有因冲击波造成的冲击锥。系统测量统计冲击锥顶的指向，可以判定冲击波发射的中心。



图 7 震裂锥：加拿大 Houghton 撞击构造细粒石灰岩中的震裂锥。具分散型马尾状条纹，角顶向上，图宽 10cm (据 French, 2003)^[3]

Fig 7 Shatter cone in fine-grained limestone of the Houghton impact structure, Canada. Note the dispersed horse tail-like striae with apices pointing upward. Width 10cm (after French, 2003)^[3]

6 我国陨石撞击构造的研究前景

地球上已经发现的 160 个陨击构造中，几乎都有一定的经济地质意义^[7]。南非 Vredefort Witwatersrand 和加拿大 Ontario 省的肖德贝里 Sudbury 都是开发历史达百年以上的著名矿区。Vredefort 以铜—铀矿床闻名，而 Sudbury 则一向认为是岩浆型铜—镍矿床。只是到了 1961 年，Dietz RS. 在他的论文《Vredefort ring structure: meteorite impact scar ?》中才正式提出 Vredefort 的穹窿属于陨石撞击构造的论点。次年，他指出 Sudbury 也是一个陨石撞击坑，他的观点被后来的发现所证实。与金属矿产有关的陨击构造参见附录 1。最近，发现不少陨石

撞击构造与油气藏有成因联系(附录 2)。例如加拿大 Alberta 的 Steen River (91 ± 7 Ma), 是个潜在的巨型油气藏(附录 2); 美国 Oklahoma 的 Ames, Texas 的 Sierra Madera (< 100 Ma) 等都已经试采出油(附录 2)。据估算, 北美陨击构造碳氢资源每年已能提供 50 ~ 160 亿美元的产值。另外一些陨石撞击构造则是非金属矿产资源的所在地, 例如俄罗斯西伯利亚的 Anabar 地盾 Popigai 撞击构造的陨击金刚石^[11](附录 3); 德国南部 Nordlingen Ries 陨石撞击坑经济价值更大, 它不仅发现了陨击金刚石, 它的陨击角砾岩是很好的建筑材料, 更何况 Ries 陨石撞击坑现在已经成为旅游参观的胜地(附录 3)。

我国在陨击构造与陨击变质作用研究方面, 已经报道的有海南白沙^[12]、江苏太湖^[13]、河北涿鹿矾山盆地、香港九龙、内蒙古的多伦^[14]和辽宁岫岩罗圈里^[15, 16]等产地。这些盆地地形、地貌上具陨击坑特征。但有一些因投入工作量不足, 以致未能被确认。海南、广东、广西诸省久已熟知有雷公墨(tektite)分布, 朱照宇等(2001)研究认为华南原生玻璃陨石的层位, 可以作为距今 0.7 ~ 0.8 Ma 事件的标志层^[17], 看来这一事件是与海南白沙陨击坑的时代相当。同样马来西亚、菲律宾和澳洲南部地区也都有发现, 雷公墨(tektite)是酸性成分的陨击玻璃, 因此应当是地壳受冲击, 破碎并玻璃化后溅落物, 其构造意义尚有待深入研究。环顾我们的邻国: 蒙古国发现 20 个陨击坑, 其中 11 个已被证实, 俄罗斯西伯利亚 Anabar 地盾的 Popigai 和哈萨克斯坦 Zhamanshin 都是已经确认的较大的陨击坑(附录 3)。

陨击坑在全球的分布约 160 个, 其中大部分是在地台或稳定地块中找到的, 活动带较少, 这可能与地壳稳定区比较容易保存有一定关系。在时代上, 据不完全统计, 0 ~ 100 Ma 的陨击坑占 41%^[18]。中生代末是全球陨击作用最活跃的时期, 导致生物种群特别是恐龙的灭绝。陨击坑研究经验证明: 一些外形轮廓近圆形的火山岩、侵入杂岩的发育区, 很可能就是陨击构造的所在, 所涉及的岩浆作用往往即陨击作用所诱发。大型的陨击构造往往有多个环形山, 如同一块石头落入静水水面, 会同时产生许多同心状的涟漪。

经验证明, 许多大型陨击构造的确定, 都经历过数十年的反复探索。如南非 Vredefort, 1937 年就有人提出属陨击成因, 直至 1962 年才得到确认。针对我国目前陨石撞击构造研究的现状, 从已知资料出发, 对已发现线索地区加强综合研究, 加大岩石学、构造学、遥感地质和地球物理研究的力度, 必能在短期内有更多的发现。

致谢 本文在编写过程中获中国地质科学院地质研究所张泽明研究员主持的国家自然科学基金项目(40272032)的资助。中国地质大学(武汉) Roger Mason 教授提供了 Ries 陨石坑冲击岩的显微照片, 特表谢忱。

参 考 文 献

- [1] Mason R, Sang Longkang. Metamorphic Geology [J]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2007. 139~150.
- [2] Sharpton VI et al. Chicxulub multiring impact basin: size and other characteristics derived from gravity analysis [J]. Science, 1993, 261: 1564~1567.
- [3] French BM. Traces of Catastrophe: a handbook of shock-metamorphic effect in terrestrial meteorite impact structures [10/7/2003], <http://www.lpi.usra.edu/publications/books/CB>.
- [4] Melosh HJ. Impact cratering: a Geological Process [M]. New York: Oxford University Press, 1989.
- [5] Hamilton CJ. Terrestrial Impact Craters, 2001, <http://www.solarviews.com/eng/tercrate.htm>.
- [6] NASA Near Earth Object Program: Images of meteor crater. [23 Aug. 2005], <http://neo.jpl.nasa.gov/images/meteorcrater>.

Html.

- [7] Reimold WU. Economic mineral deposits in impact structures: a review. In: Koeberl C, Henkel H (eds), *Impact Tectonics* [M]. New York: Springer, 2005. 479~552.
- [8] Mashchak MS, Naumov MV. Late modification-stage tectonic deformation of the Popigai impact structure, Russia. 2005 *ibid.* 191~210.
- [9] Puura V, Plado J. Settings of meteorite impact structures in the Svecofennian crustal domain, 2005 *ibid.* 211~245.
- [10] Chao ECT. Shock effects in certain rock forming minerals [J]. *Science*, 1967, 156 (3772): 192~202.
- [11] Vishnevsky SA, Afanasiev VP, Argunov KP, Pal'chik NA. Impact diamonds: their features, origin and significance, Novosibirsk. RAS Siberian Branch, SPC UIGGM. 53, 1997.
- [12] 王道经. 海南白沙陨石坑 [M]. 海南省: 海南出版社, 1997.
- [13] 王尔康, 万玉秋, 施央申. 太湖泽山岛冲击变质石英的发现与意义 [J]. *科学通报*, 1992, 38 (20): 1875~1878.
- [14] 吴思本. 多伦陨石坑的研究进展 [J]. *中国地质*, 1996, (8): 14~16.
- [15] 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.
- [16] 覃功炯, 卢登蓉, 欧强, 储雪蕾. 罗圈里撞击坑铂族元素异常及粗铂矿的发现及其意义 [J]. *地学前缘*, 2001, 8 (2): 333~338.
- [17] 朱照宇, 周厚云, 乔玉楼, 等. 华南玻璃陨石的原生层位及其事件地层学意义 [J]. *地质力学学报*, 2001 (4): 296~302.
- [18] Marakushev AA (ed). *Impactite*, Isdatelstva [M]. Moscow: University, 1981. 236.

RESEARCH ON IMPACT TECTONICS AND IMPACTITES: STATUS AND PROSPECTS

YOU Zhen-dong, LIU Rong

(School of Earth Science, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: Transient (within 1 second) dynamic high pressures (*ca* tens of to up to one hundred GPa) and high temperatures ($> 1500^{\circ}\text{C}$) caused by the impact process will eventually result in the development of an astrobleme when a large meteorite impacts the earth's surface, and the surrounding rocks must undergo a special kind of metamorphism called impact metamorphism. The studies of impact tectonics include the following four topics: 1. structure and morphology of the impact crater and its formation mechanism; 2. impact metamorphism and impact metamorphic rocks; 3. numerical simulation and experimental calculation of impact tectonics; and 4. economic benefits of impact tectonics. The studies of impact tectonics not only have academic significance but also have actual economic benefits. Vredefort-Witwatersrand in South Africa is one of the oldest impact tectonics and is also famous for its gold-uranium deposits. The Sudbury impact structure in Canada is famous for occurrence of a large syn-impact Cu-Ni deposit. Now oil and gas reservoirs related to post-impact tectonics are being explored for in a number of areas of North America and Central America. In addition, many impactites are used as building materials and many astroblemes become famous resort places, such as the Ries crater in Nordlingen, Germany. Much progress has been made in impact studies in China since the end of the 20th century. The Baisha crater found in Hainan in the early 1990s is known to the world and there are reports on possible craters such as Taihu in Jiangsu, Duolun in Inner Mongolia and Luoquanli near Xiuyan in

(下转第 21 页)

附录 1 世界著名含金属矿床的陨击构造

Appendix 1 Impact structures in world-famous metal deposits

陨击坑名	纬度	经度	所在国家/地区	直径 /km	年代/Ma	经济地质意义
Beyenchime-Salaatin	71°00'N	21°40'E	[俄]	8	40±20	黄铁矿（少量）
Carswell	58°27'N	109°30'W	[加] Saskatchewan	39	115±10	铀
Chalevoix	47°32'N	70°48'W	[加] Ontario	3.8	396±26	钛铁矿
Crooked creek	37°50'N	91°43'W	[美] Missouri	7	320±80	Pb-Zn
Decarterville	37°54'N	92°43'W	[美] Missouri	7	< 300	Pb-Zn
Kara	69°06'N	64°09'E	[俄]	65	70.32±2	黄铁矿（小）金刚石
Karla	54°55'N	48°02'E	[俄]	10	5±1	汞
Kentland	49°45'N	87°24'W	[美] Indiana	1.3	97	Pb-Zn
Morokweng	26°28'S	23°32'E	南非	70	145±1	Ni/PGE 矿化
Puchez-Katunki	56°58'N	43°43'E	[俄]	80	167±3	陨击金刚石，汞，沸石
Serpent Mound	39°02'N	82°32'W	[美] Ohio	8	> 320	Pb-Zn
Siljan	01°02'N	14°52'E	瑞典	65	362±1	Pb-Zn，冬季运动场
Sudbury	46°36'N	81°11'W	[加] Ontario	250	1850±3	Cu-Ni，PGE，陨击金刚石
Temovka	49°01'N	33°05'E	乌克兰	11	280±10	铁，铀，陨击金刚石
Vredefort	27°00'S	27°30'E	[南非] Witwatersrand	250/300	2020±5	金，铜-铀

附录 2 世界著名与碳氢资源有关的陨击构造

Appendix 2 World-famous impact structures related to hydrocarbon resources

陨击坑名	纬度	经度	所在国家/地区	直径 /km	年代/Ma	经济地质意义
Ames	36°15'N	98°12'W	[美] Oklahoma	16	470±30	油，气
Avak	71°15'N	150°18'W	[美] Alaska	14	~ 460	气
Boltysk	48°15'N	32°10'E	乌克兰	24	65.2±0.6	油，气，磷块岩
Chicxulub	21°21'N	89°30'E	墨西哥	180	65±0.05	陨击金刚石，油，气
Cloud Creek	43°10.6'N	106°42.5'W	[美] Wyoming	~ 7	~ 190±20	油
Marquez dome	36°17'N	96°18'W	[美] Texas	12.7	58±2	气
New porte	48°58'N	101°58'W	[美] N. Dakota	3.2	< 500	
Obolon	49°35'N	32°55'W	乌克兰	20	169±7	油页岩
Red-wing creek	47°36'N	103°33'W	[美] N. Dakota	9	200±15	
Rotmistovka	49°00'N	32°00'E	乌克兰	2.7	120±7	油页岩，伴生建材
Sierra Madera	30°36'N	102°55'W	[美] Texas	13	< 100	
Steen River	59°30'N	117°30'E	[加] Alberta	25	91±7	
Tookoonooka	27°07'S	142°50'E	澳洲	55	128±5	潜在碳氢资源
Viewfield	49°35'N	103°04'W	[加] Saskatch	2.5	190±20	

附录3 世界著名具非金属矿产资源及其他经济效益的陨击构造

Appendix 3 World-famous impact structures where there are nonmetallic mineral resources and other economic benefits

陨击坑名	纬度	经度	所在国家/地区	直径/km	年代/Ma	经济地质意义
白沙	19°12'N	109°30'E	中国海南	3.7	0.70	旅游
Bosumtwi	06°30'N	01°25'W	加纳	10.5	1.07	水库, 教育, 休闲, 渔业, 玛瑙
Brent Crater	46°05'N	78°29'W	[加] Ontario	3.8	395±20	陨击坑沉积物
Chesapeake Bay	37°17'N	76°01'W	[美] Virginia	80	35.5±0.3	
Dellen	61°48'N	16°48'E	瑞典	19	89.0±2.7	冬季/夏季运动场, 水电站
Gardnos	60°39'N	09°00'E	挪威	5	500±10	装饰用角砾岩
Ilyenits	49°07'N	29°06'E	乌克兰	8.5	378±5	玛瑙
Kaluga	54°30'N	36°12'E	[俄]	15	380±5	水
Kara	69°06'N	64°09'E	[俄]	65	70±22	陨击金刚石, 黄铁矿(小型)
Lake St Martin	51°47'N	98°32'W	[加] Manitoba	40	220±32	石膏, 硬石膏
Lappajarvi	63°12'N	23°42'E	芬兰	23	73.3±5.3	冬季/夏季运动场, 教育, 建材
Logosk	54°12'N	27°48'E	白俄罗斯	15	42±1	地下水, 琥珀, 磷块岩
Lonar	19°58'N	76°31'E	印度	1.8	0.05±0.01	天然碱, 陨击后期蚀变
Manicouagen	51°23'N	68°42'W	[加] Quebec	100	214±1	水库, 电站
Manson	42°35'N	94°33'W	[美] Iowa	35	73.8±0.3	表生矿化
Meteor Crater	35°02'N	111°01'W	[美] Arizona	1.2	0.0498±0.003	硅, 博物馆
Popigai	71°39'N	111°11'E	[俄] Anabar	100	35.7±0.2	陨击金刚石
Puchezh-Kutunki	56°58'N	43°43'E	[俄]	80	167±3	陨击金刚石, 汞, 沸石
Ragozinka	58°44'N	61°48'E	[俄]	9	46±3	硅藻土
Ries	48°53'N	10°37'E	[德] Nordlingen	24	15.1±0.1	陨击金刚石, 建材, 褐煤, 博物馆
Rochechouart	45°50'N	00°56'E	[法]	23	214±8	建材, 休闲, 教育, 博物馆
Saaksjarvi	61°24'N	22°24'E	芬兰	6	Ca. 560	玛瑙, 休闲, 冬/夏季运动场
Steinheim basin	48°41'N	10°04'E	[德]	3.8	15±1	博物馆
Sudbury	46°36'N	81°11'W	[加] Ontario	Ca250	1850±3	Cu-Ni/PGE, 陨击金刚石
Temovka	49°01'N	33°05'E	乌克兰	11	280±10	铁矿, 陨击金刚石, 铀
Tswaing	25°24'N	28°05'E	南非	1.13	0.22±0.05	天然碱, 休闲, 博物馆
Vepriai	55°05'N	24°35'E	立陶宛	8	160±10	水库
Vredefort	27°00'S	27°30'E	南非	250	2020±5	金铀, 教育/休闲, 班脱岩
Zapadnaya	49°44'N	29°00'E	乌克兰	8.2	165±5	陨击金刚石
Zhamanshin	48°24'N	60°58'E	哈萨克斯坦	14	0.9±0.1	铝土

图版

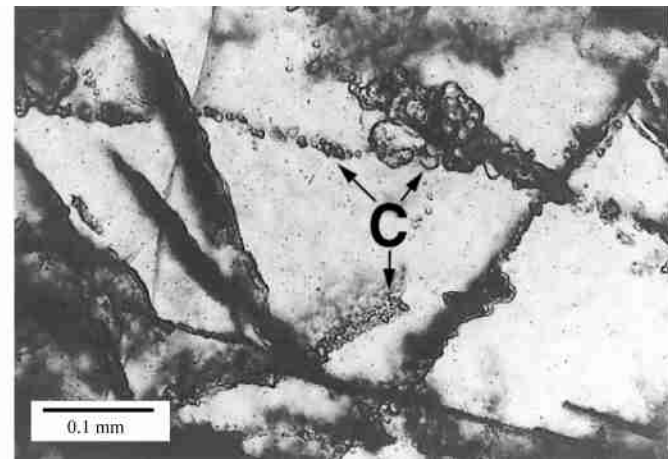


图 A 德国 Ries 陨击坑石英冲击玻璃中的柯石英 (C) 沿裂隙分布 (据 French, 2003)^[3]
Fig A Coesite inclusions (C) along fractures in quartz diaplectic glass from Ries, Germany (after French, 2003)^[3]

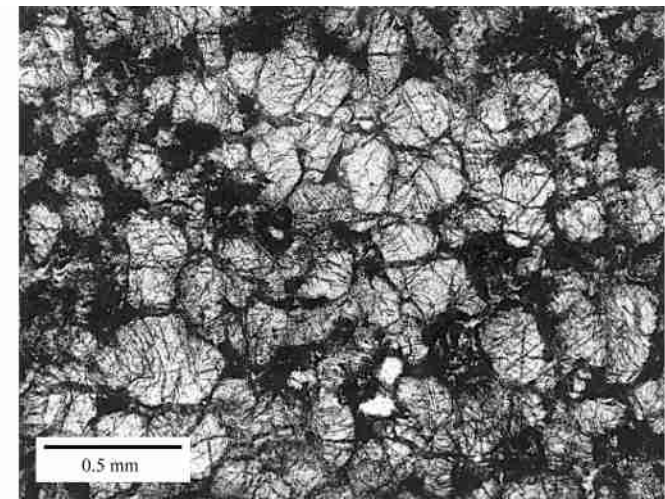


图 B 美国 Meteor crater 受撞击的 cocconino 砂岩石英颗粒布满面状变形构造 (据 French, 2003)^[3]
Fig B Impacted Cocconino quartzite in the Meteor crater, Arizona. Quartz grains are full of PDFs (after French, 2003)^[3]

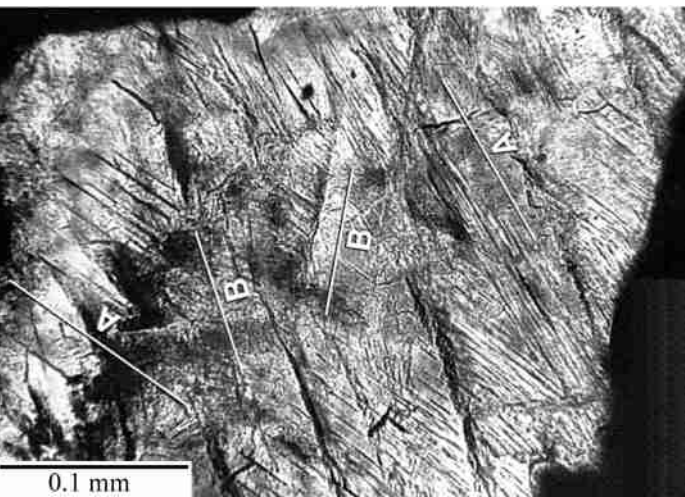


图 C Ries 撞击花岗岩中石英中多组的 PDFs: A {1013} 或 {0113}, B {1011} 或 {0111} (据 French, 2003)^[3]
Fig C Multiple sets of PDFs in quartz from impacted granite, Ries Germany: A [1013] or {0113}. B { 1011} or {0111} (after French, 2003)^[3]

图版

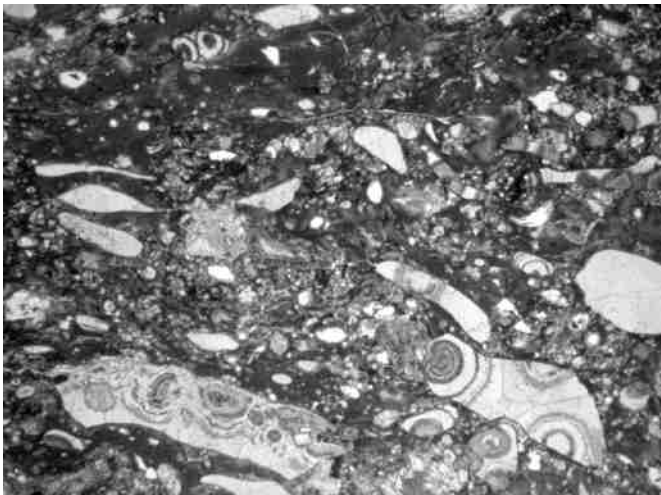


图 D 德国 Ries 陨击坑的陨击角砾岩，除了长石、石英之外还有鲕状灰岩的残片，视域直径 3.8mm (R 梅森教授提供)

Fig D Suevite from the Ries Crater, Besides feldspar and quartz there are fragments of oolitic limestone. Field width 3.8mm (on courtesy of Prof. R Mason)

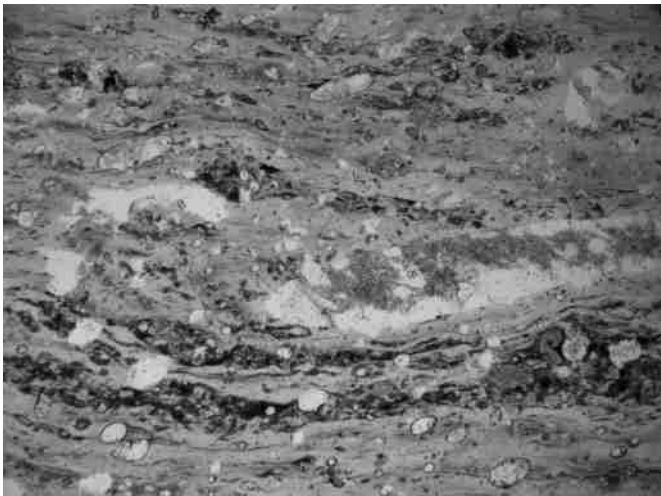


图 E 德国 Ries 陨击坑陨击花岗岩中的陨击熔融体，视域直径 3.8mm (R 梅森 教授提供)

Fig E Impact melt in impact granite, Ries crater. FW = 3.8mm (on courtesy of Prof. R Mason)



图 F 假玄武玻璃（露头照片）充填于破碎的石英岩角砾之间。Sudbury. 右上地质锤表示比例尺（据 Trench, 2003, Chapter 5）^[3]

Fig F Pseudotachylite glass (outcrop) filled in a fractured quartzite. Hammer at the upper right corner of the picture denotes the scale (after French, 2003, Chapter 5) ^[3]

- geochemistry and Nd-Sr isotope systems [J]. *Precambrian Research*, 2000, 102: 279 ~ 301.
- [53] Jian P, Yang W, Zhang Z. $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ zircon dating of the Huangtuling hyperthengamet-biotite gneisses from the Dabie Mountains, Luotian County, Hubei Province, China: New evidence for early Precambrian evolution [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1999, 73 (1): 78 ~ 83.
- [54] Chen Y, Ye K, Liu J, Sun M. Multistage metamorphism of the Huangtuling granulite, Northern Dabie Orogen, eastern China: implications for the tectonometamorphic evolution of subducted lower crustal crust [J]. *Metamorphic Geology*, 2006, 24: 633 ~ 654.
- [55] Smith DC. A tectonic mélange of foreign eclogites and ultramafics in the basal gneiss region, Western Norway [J]. *Nature*, 1980, 287: 366 ~ 368.

METAMORPHIC COLLISIONAL MÉLANGE IN THE DABIE MOUNTAINS, EASTERN CHINA

XU Shu-tong¹, WU Wei-ping¹, LIU Yi-can², WANG Hua-ming¹

(1. *Institute of Geology of Anhui Province, Hefei 230001, Anhui, China;*

2. *University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China*)

Abstract: The Dabie Mountains are a collisional orogen between Sino-Korean and Yangtze continents. It is characterized by thin-skin tectonics as revealed by the seismic reflection profile. The rocks forming a detachment (thrust shear) zone between the two collisional continents are collisional mélanges. The detachment can only be defined by recognizing collisional mélanges in the Dabie Mountains because the overriding wedge has been completely removed by erosion and the ultrahigh-pressure (UHP) metamorphic belt exposed extensively. This is a necessary step to perform a geometric analysis of the Dabie Mountains. The Dabie collisional mélanges may be divided into two parts: the northern part consists of a banded gneiss-ultramafic rock assemblage and the southern part a mica plagiogneiss-eclogite assemblage. Both assemblages have mostly undergone UHP metamorphism. Their common features are the presence of “giant mortar texture” due to pervasive shearing and mixing of rocks from various tectonic settings. The so-called “Luotian dome” was a huge duplex anticline formed in the early stage of orogeny, which finally formed a dome formed by superimposed contraction in an east-west direction in the late stage of the orogeny.

Key words: Dabie Mountains; metamorphic collisional mélange; duplex structure; thin-skinned tectonics

(上接第 32 页)

Liaoning. However these structures remain to be further confirmed. The studies of global impact tectonics show that long-term stable cratons are favorable to discovering impact craters and many craters are hidden beneath Quaternary and older sediments. So satellite-borne photography and geophysical exploration will be effective in determining targets, and on that basis, through strengthening petrological and structural studies, impact craters may be confirmed.

Key words: impact tectonics; impact metamorphism; impactite; indicator of impact cratering; economic geology significance