

## 继 2009 年在辽宁岫岩县发现我国首个陨石坑并被国际认可后，中科院广州地化所团队在黑龙江依兰县开启陨石坑钻探并发现冲击变质诊断性证据

# 陈鸣：在世界陨石坑地图上点亮“中国吻痕”

本报记者 赵征南



依兰陨石坑是一个呈碗状的撞击坑，南部边缘缺陷可能与古冰川作用有关。

“如果说宇宙中固态星球有什么共同点的话，毫无疑问，都存在陨石坑算是其中之一。”采访伊始，中科院广州地化所研究员陈鸣做了个小小科普。近日，国际期刊《陨石学与行星科学》封面文章发表了有关依兰陨石坑的论文。论文由中科院广州地化所与奥地利维也纳大学的科学家联合撰写，陈鸣为第一作者。

陨石坑是许多固态星球表面广泛分布的一类环形地质构造，经由星球之间的超高速碰撞形成“吻痕”。迄今地球上共发现并证实了 190 多个陨石坑。

我国自上世纪 80 年代开始了陨石坑的调查，其间，有多地报告发现了陨石坑，但是在世界的陨石坑“地图”上，长期没有中国陨石坑的记载。

直到 2010 年，国际权威学术期刊《地球与行星科学通讯》发表了陈鸣等人有关岫岩陨石坑中柯石英发现的论文，国际陨石坑科学界最具影响力的学术机构 PASSC（地球撞击数据库）收录岫岩撞击坑，使其成为地球第 179 个获得证实的陨石坑。这意味着，国内首个被严格证实的陨石坑获得国际科学界的肯定，中国人在国际陨石坑地图上点亮属于中国的那盏灯。

许多人劝他激流勇退，但他依然执着地坚持艰苦的探索。这几年，他又为寻找依兰陨石坑的证据南北奔波。

“我不是一个非常聪明的人，只是集中精力做了一件事情。研究过程没有捷径，也曾遇到过很多问题，幸好，我都坚持下来了。”谈及 15 载的寻“坑”之旅，陈鸣说。

### 陨石只是陨石坑研究辅助证据？

关于陨石坑的采访，从依兰县去年春天筹备专业钻探算起，陈鸣推迟了一年多。即便是团队论文《依兰陨石坑：我国东北部一个新发现的撞击构造》已在《科学通报》上发表，他依然十分谨慎。

直到最近，陈鸣给出肯定答复：“现在可以说，依兰陨石坑研究基本成功。”

位于黑龙江省依兰县迎兰乡低山丘陵的陨石坑，外观呈现为一座十分壮观的巨大环形山，直径 1850 米，坑缘高出地表 150 米，坑体总体呈现为碗状形态，部分坑缘缺失。之前，有一些国内陨石坑爱好者认为这里可能是陨石坑，但一直未被科学地证实。

陨石坑是不是找到陨石就可以证实了呢？

“在较大规模陨石坑中要找到陨石难度极大。陨石撞击释放出来的巨大能量、超高温超高压的环境导致撞击体发生强烈破碎、熔融与气化，即使当初有少量碎片残存，但它们也会在漫长的地质岁月中，由于物理和化学风化作用而不复存在或难以寻找。”陈鸣说。

而且更为重要的是，在陨石坑研究中，陨石通常不是作为关键证据，而是辅助证据而存在。

“即便幸运地发现了陨石，也不能简单判定它就是因为撞击在此处残留下来的，还要排除其他自然或人为原因。”他进一步解释，陨石坑是中文的翻译，在学术界一般被称为“撞击坑”，经由天体之间超高速碰撞形成，且有一定的规模，根据“陨石超高速撞击事件可以在靶区岩石和矿物冲击效应中得到体现”这一理论，撞击坑与其他非撞击成因环形地质构造的最重要区别就在于前者体现了岩石和矿物的冲击变质特征，岩石震裂锥以及冲击变质三大诊断性证据（矿物面状变形页理、矿物高压多形和矿物击变玻璃）是证实陨石坑的关键，矿物冲击变质特征一定存在于

所有陨石坑。陈鸣团队前期将陨石坑冲击变质特征研究重点放在了对石英面状变形页理（PDFs）的调查，石英中 PDFs 形成要求冲击压力达到 10—35 GPa，相当于 10—35 万个大气压，在地表这种条件只会由天体撞击中产生。

依兰陨石坑的侏罗纪基底岩为碱性长石花岗岩，花岗岩的石英含量约占 35%。丰富的石英含量为调查撞击产生的冲击波效应提供了理想的样品。在 130 个地表岩石碎屑样品制作的薄片中，54 个薄片发现了含有石英面状变形页理（PDFs）的石英颗粒。

找到了这一关键证据，陈鸣仍不满足，“只要发现冲击变质三大诊断性证据之一，就基本可以肯定地质构造成因与地外天体梯级撞击事件有关。那我要是全部找到，或者找到更多呢？”他决定打破砂锅问到“底”，到碗状陨石坑的碗底去寻找更多证据——与依兰陨石坑规模大小相似的陨石坑中的强烈冲击变质物质，通常大量产出在坑底撞击角砾岩单元的底部位置。他决定启动科学钻探。

“撞击后，依兰陨石坑曾形成一个湖，经过 14C 年龄测定，湖泊在约 1 万年前消失。我们通过钻探，找到了湖相沉积物的下伏物质——角砾堆积。堆积层非常厚，超过了 300 米，也非常破碎，钻头在松散的沙层和砾石层里打转，钻孔有坍塌的危险。这些都表明当时的撞击能量很大。”陈鸣说，“在比预想的更深更碎的角砾堆积中钻探，有喜也有忧，喜的是这一步证明了导致深坑形成的威力，忧的是钻探很难进展以及影响岩芯取样，取不了样就难以找到更多的证据。”

“结合钻探研究揭示，约 4.9 万年前，撞击冲击波将超 4 亿立方米花岗岩体瞬间撕成碎片并形成巨大凹坑，真实深度约 579 米，这或许是地球近十万年发生的最大规模撞击事件。”陈鸣说。

### 大学学“机密专业”为何入“坑”？

在拥有放射性地质知识背景的科技工作者中，很多都选择核工业作为研究方向，陈鸣却最终走上了陨石坑研究这条路。

他出生在广东省封开县。恢复高考后，由于已是中共党员，在志愿栏里又填写了服从分配，他被当时政治要求极严的成都地质学院的“机密专业”提前批录取了。

等到了学校，他才知道，所学习的是核工系的“放射性地质专业”。1992 年，他获得中国科学院地球化学研究所博士学位，师从谢先德院士——在我国首次地下核试验场的选定及爆后效应研究，以及我国首次地面核试验的地质效应研究中做出重要贡献，并在国内率先开展天体矿物学和动态超高压矿物学研究的科学家。

1996 年，在谢先德的指导下，陈鸣提出了对自然界巨大撞击事件导致矿物岩石物质组成和结构变化与撞击引起的压力和温度条件之间关系的新解释，修正了国际上统领了几十年的冲击变质压力温度模型。

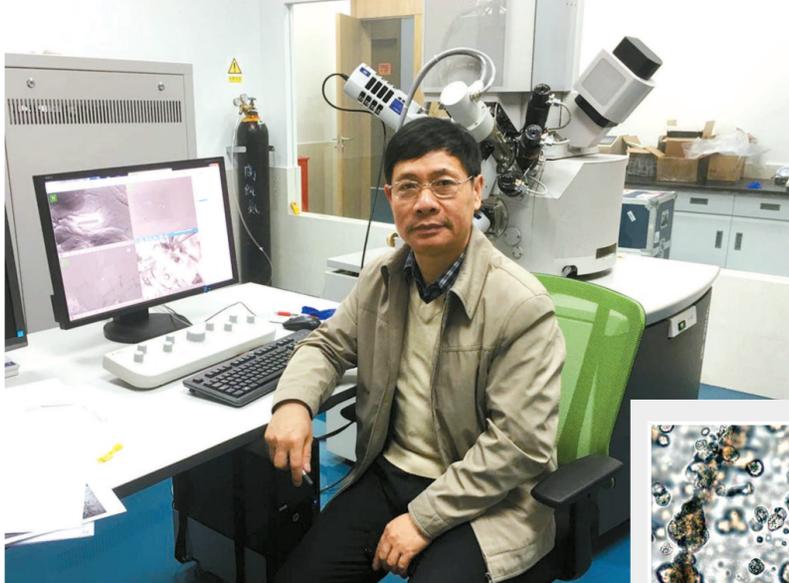
陈鸣的研究引起了美籍华裔地质学家赵景德的注意。老人毕业于西南联大，是国际冲击

变质科学的主要奠基人之一，曾通过石英的高压多形——柯石英的发现，促使世界上第一个陨石坑——美国巴林杰陨石坑被科学界公认。

2002 年，赵景德邀请正在美国卡内基地球物理实验室开展合作研究的陈鸣到家中做客。“进入 21 世纪，随着科学和社会的发展，中国的撞击坑研究需要尽快取得一个合理的结果，一个能让国际科学界接受的答案，要力争取得研究的进展和突破。中国是地质大国，如果陨石坑研究一直没有突破，在世界上说不过去。你不是考虑一下，回去以后做做这个工作？”

赵景德的话对陈鸣触动很大。陈鸣虽然参与过陨石冲击变质领域的研究，但这只是与陨石坑研究主题相关的一些其他内容，他也不太愿意放弃当时不断取得新进展的冲击变质领域研究。

第二年，赵景德再次邀请陈鸣到家中做客，老人问他：“这一年考虑得怎么样？不再做，到你 50 岁的时候可能就不行了。”经过三年的长考，陈鸣决定必须面对“这在中国是个空白，科学上有必要也有义务去做”，他用一年把手头的研究工作收尾，2006 年开始入“坑”。



在岩石薄片里大海捞针，陈鸣经常在显微镜下观察十几个小时。

### 地质大国一个陨石坑也没发现？

我国国土面积辽阔，有多样类型的大地构造单元，这让人们对于中华大地的陨石坑分布状况有着极大的遐想空间。一直没有证实，让国际地球与行星学界对中国能否发现陨石坑感到好奇。他们问陈鸣：“中国是一个地质大国，怎么一个陨石坑也没发现？”“这件事情必须做，而且要由中国人来做。”陈鸣向自己灌输这个信念。

2006 年，他正式开始满中国“找坑”的日子。他首先要通过地质调查和分析，划定“靶区”。

地球上已经被发现的陨石坑，比较集中地分布在克拉通地区。避免了被侵蚀、破坏和改造，也就是说地壳上的长期稳定地区比较有利于陨石坑的保存。因此，长期稳定+环形凹坑便成为陈鸣心中的靶区地质构造条件。除此之外，综合考虑规模大小、交通条件之后，他选择了辽宁省岫岩县罗圈沟里的环形凹坑，当时又被称为“罗圈坑”。

确定靶区的决定性一步，还在于要排除与撞击坑地质构造矛盾的现象。通过野外地质踏勘，陈鸣基本排除了火山作用、风化侵蚀、地陷等地球内动力导致的凹坑形成可能。

一年后，陈鸣正式将重心放在罗圈坑冲击变质证据探索中。

1.8 公里直径的圆，陈鸣留下了成千上万个无功而返的驻点，但踏勘没有捷径，他只能一步一步脚印，仔细地在坑缘、坑底、山脊和山谷等地表出露的各种岩石中，寻找和分析任何可能与撞击事件有关的证据。最终，在东北坑缘内侧一处山坡底部水沟旁，他发现了两个撞击冲击波作用遗留的物理变化线索：其一是原位产出的强烈变形和碎裂的结晶基底岩石，并在其中发现了少量与震裂锥十分相似的变形岩石碎块；其二是数米远处的坑内方向，发现角砾状岩石。

有面状变形微结构，这是他一直期待着的撞击起源初步证据——石英面状变形页理。

由于地处坑缘，再加上风化侵蚀，这些冲击波作用线索较为微弱。与此同时，还有一些国内外同行给出了不同意见：“坑缘冲击能量太低，不可能触发面状变形页理”“报告的关键证据不够典型，仅发育有一组晶面方位，缺乏多组面状变形页理”“页理纹”没有切穿整个石英颗粒，页理面发育得不够清晰和平直”……

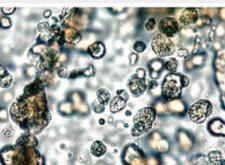
为避免对后续工作产生不利影响，陈鸣挨个对专家所提出的问题进行分析，证明了“局部位置发生一定程度的冲击变质”“发育微弱的面状变形页理”是可能出现的，消除了各方的疑虑。

但是，这离最终证实还有相当长的距离。此时，唯一可行的“进一步”工程技术途径就是在坑内进行岩芯地质钻探，一方面能在坑中央底部找到更强烈的证据，另一方面，还能对地表物质分析结果进行再验证，完善证据链。

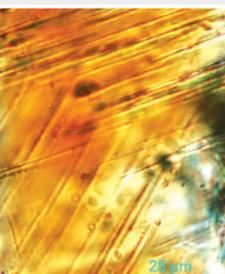
“由于经费紧张，我在研究所的支持下向中科院当时的主管领导递交了一份特殊的研究报告。”中科院有关领导对陈鸣提出的陨石坑研究十分重视，破例给陈鸣“院长基金”支持。谢先德院士也坚定地支持和鼓励陈鸣，使他更加坚定了信心和决心。

通过钻探，陈鸣在坑底 260—290 米处发现了冲击变质程度较高、岩石和矿物冲击变质现象十分丰富的撞击角砾岩，还发现了岩石熔体玻璃、超高压矿物柯石英以及多组面状变形页理的石英颗粒等。由此，通过宏观地形地貌、深部的地质构造、撞击岩石类型，以及典型的矿物冲击变质特征等方面的证据，一致支持罗圈坑的撞击成因起源。

“岫岩陨石坑”得以正名。



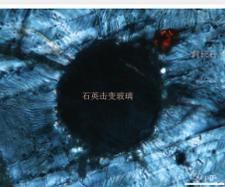
光学显微镜下的柯石英。



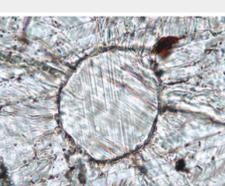
正交偏光显微镜下，依兰陨石坑石英面状变形页理的彩色照片。



陨石坑撞击角砾岩。



石英击变玻璃。



显微镜下矿物冲击变形微结构痕迹。

由于国内科学界之前公布的大量陨石坑研究成果并未得到国际承认，中国的陨石坑研究必须接轨国际学术标准，走向国际化。

“不是天天坐在电脑前，盯着卫星地图找‘圆’，就能证实陨石坑。”除了日复一日的踏勘，陈鸣的另一个杀手锏便是夜以继日地显微，一个靠脚，一个靠眼。

他的实验室常用工具是普通光学显微镜，透过镜头在岩石薄片中大海捞针，找到可能的证据——这对研究者的体力和耐心都是极大的挑战，年轻的学生们在显微镜前连续看两个小时可能就已经是极限，但陈鸣往往一看就是十多个小时，“没有捷径可走，就是靠经验去靠，如果能看到一点点苗头，就不会觉得时间过得很慢。”陈鸣表示，依兰陨石坑最初找到的冲击变质痕迹，就是在实验室显微镜下反复看了 15 天后，在凌晨 3 点发现的。

随着依兰陨石坑研究的逐步明朗，很多人关心，它何时能成为第二个被国际科学界认可的陨石坑？

“随着依兰陨石坑研究论文在国际陨石学会主办的学术期刊上发表，纳入国际陨石坑版图已水到渠成。”陈鸣表示，之前的“岫岩经验”让这一段“被认可”之路更顺畅。

2009 年于国内主流期刊上发表岫岩陨石坑相关论文后，在有关部门的支持下，陈鸣一直努力让研究成果走上国际舞台，接受国际科学界的检验，但这条路蜿蜒曲折。

他坚持着岫岩陨石坑的系统研究，并陆续发现石英高压多形“柯石英”、锆石高压多形“莱氏石”、镁铁矿高压相“毛河光矿”、金红石高压多形等超高压矿物或高压相，并提出了金刚石的形成新机制。

其中，岫岩柯石英的发现，获得了国际科学界的高度重视。2010 年 7 月，国际知名刊物《地球与行星科学》发表了柯石英的相关成果，12 月，国际陨石坑科学界最具影响力的学术机构 PASSC（地球撞击数据库）中收录岫岩撞击坑，使其成为地球第 179 个获得证实的陨石坑。

“我也算是迂回出击了。”陈鸣笑着说，做好自己能做的，一切都会水到渠成。

“天体碰撞可以瞬间产生极高的温度和压力，撞击的温度和压力达到上百万大气压，温度成千万度，这个条件就完全可以比拟地球深部的状态。”陈鸣认为陨石坑对研究地球的形成和演化、地质历史上与星球碰撞有关的重大环境变迁和灾变事件、地球深部物质行为以及矿产资源等均具有重要意义。

他还希望，有更多的人选择冲击变质科学，也有更多力量加入陨石坑科学研究。

在依兰陨石坑坑体南部，缺失了一段长度达 2 公里的坑缘，占坑缘总长度约三分之一，同时体积超过 2000 万立方米的坑缘岩石被移除，陈鸣推测南部坑缘的大规模侵蚀和移除很可能与冰川作用有关。这意味着中国东北地区可能存在低海拔冰川历史的新证据，但 1 万年前我国东北是否存在大规模的冰川作用尚存疑问，仍需专业工作来回答。

“如今回头再看当初的选择，以你的专业背景，‘找坑’而不去‘找矿’，会不会后悔？”

采访最后，面对记者的问题，陈鸣坚定地回答：“不会。‘找坑’已成执念，是我一生的信仰！”

只盯着卫星地图找坑为何不行？

