中国科学: 地球科学 2014 年 第 44 卷 第 7 期: 1488 ~ 1497
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

论 文

岫岩陨石坑的成坑过程与形貌特征研究

王心源[①③], 骆磊[①②③*], 郭华东[①③], 牟伶俐[④], 李超[①②③], 吉玮[①], 蔡蘅[①②③]

① 中国科学院遥感与数字地球研究所数字地球重点实验室, 北京 100094;
② 中国科学院大学, 北京 100049;
③ 联合国教科文组织国际自然与文化遗产空间技术中心, 北京 100094;
④ 中国科学院国家天文台, 北京 100012
* 联系人, E-mail: luolei@radi.ac.cn

收稿日期: 2013-06-21; 接受日期: 2013-11-11; 网络版发表日期: 2014-06-20
国家自然科学基金项目(批准号: 60972141)和国家高技术研究发展计划项目(编号: 2010AA122202)资助

摘要 利用陨石撞击形态学理论与撞击推演模型, 基于遥感影像、数字高程模型, 钻孔资料, 区域地质图与野外观测等多元数据, 对岫岩陨石坑的撞击形成过程与形貌特征等进行了研究. 模拟计算表明, 岫岩陨石坑撞击成坑瞬时直径为(1406±12) m, 瞬时坑深为(497±4) m; 撞击完成后最终坑的直径约为(1758±15) m, 坑深为(374.5±3.5) m, 角砾岩堆积透镜体厚度为(188.5±0.5) m, 与前人钻孔揭示的数据基本一致. 初步估算出形成岫岩陨石坑的陨石直径: 若为铁陨石, 直径为 55 m 左右; 若为石陨石, 直径为 115 m 左右. 基于数字高程模型数据揭示了岫岩陨石坑的侵蚀与退化特征: 坑深/坑径的比值为 0.143, 与 Meteor 撞击坑的特征值相似, 从而定量地刻画了该坑属于简单坑的特征; 坑缘轮廓的圆度值为 0.884, 表明该坑已受到了一定程度的风化与侵蚀作用. 高分辨率 SPOT 彩色影像解译得到岫岩陨石坑坑内裂隙分布特征, 放射状裂隙在 NW-SE 和 WNW-ESE 方位上表现出优选性, 裂隙控制坑内水系的发育与演化.

关键词
岫岩陨石坑
撞击成坑
陨石直径
坑缘
裂隙

陨石撞击坑是小行星或彗星高速撞击行星及其卫星表面形成的凹坑或环状地质构造, 对探索地球的形成和演化、古生物变迁、成岩成矿以及地球深部物质状态等领域具有重要意义(Covey 等, 1990; Toon 等, 1997; 欧阳自远, 1997; Kring, 2000; 方建军等, 2008). 地球上撞击坑一般可分为简单坑、复杂坑和撞击盆地, 这与撞击事件参数如地表的重力加速度、靶岩性质和撞击速度等有关(Grieve 和 Shoemaker, 1994; 林文祝, 1998). 到目前为止, 地球上已发现的陨石撞击坑数目为 179 个, 分布在世界上 33 个国家(http://www.unb.ca/passc/ImpactDatabase/index.html), 岫岩陨石坑是被录入世界陨石坑版图的中国唯一被证实的陨石撞击坑(陈鸣, 2007; 陈鸣等, 2009).

目前, 对于地球和其他类地行星与卫星的陨石撞击构造与形貌的研究已有很多. Gault 等(1968, 1970)对陨石撞击机理与撞击构造的研究; McGetchin 等(1973)和 Schultz(1992)对弹射物厚度的研究; Shoemaker 等(1974)对 Meteor 陨石坑的地质学研究; Roddy(1978)对 Meteor 陨石坑撞击前后的形貌与构造特征等研究; Pike(1980), Melosh(1989)和 Collins 等(2005)给出了整个撞击成坑的过程与形态特征关系等. 王杰等(2001), 王心源等(2012)对月表陨石坑形

中文引用格式: 王心源, 骆磊, 郭华东, 等. 2014. 岫岩陨石坑的成坑过程与形貌特征研究. 中国科学: 地球科学, 44: 1488–1497
英文引用格式: Wang X Y, Luo L, Guo H D, et al. 2013. Cratering process and morphological features of the Xiuyan impact crater in Northeast China. Science China: Earth Sciences, 56: 1629–1638, doi: 10.1007/s11430-013-4695-1

貌与构造特征进行了研究.

2009 年, 陈鸣等(2009)对罗圈里环形构造实施了 307 m 的科学钻探, 在 107~149 m 深度发现一系列冲击波所产生的冲击变质效应: 含岩石熔体玻璃的多相角砾岩, 石英击变面状页理和陨击玻璃等, 从而使岫岩罗圈里陨石坑得到了证实. 对于岫岩陨石坑的研究还较少, 学者们主要集中在对岫岩陨石坑的构造地质学、地球化学与矿物学研究(陈鸣, 2007, 2011; 陈鸣等, 2009, 2012; 樊计昌等, 2010; 赵成彬等, 2011; 尹锋和陈鸣, 2012), 尚缺少对岫岩陨石坑的成坑过程与形貌特征研究. 本文利用遥感影像、数字高程模型(DEM), 钻孔资料, 区域地质图与野外观测等多元数据, 结合目前主要的陨石撞击推演理论, 对岫岩陨石坑撞击形貌特征以及撞击陨石的属性、大小等进行初步研究.

1　陨石坑概况与数据源

1.1　岫岩陨石坑概况

岫岩陨石坑位于我国辽宁省鞍山市岫岩满族自治县, 地理坐标为 40°21′55″N, 123°27′34″E(图 1(a)), 坐落在辽东半岛北部低山丘陵地区, 夹于大洋河的两条支流牤牛河与哨子河之间, 距离县城东北方向直线 16 km(陈鸣等, 2009)(图 1(b)). 陨石坑形态呈碗状(图 1(c)), 直径约为 1800 m, 坑底与坑唇山脊高差为 135~230 m,平均 150 m, 坑底中央区海拔高度约 140 m(赵树明, 2004; 陈鸣, 2007; 陈鸣等, 2009).

岫岩陨石坑形成在下元古界辽河群里尔峪组变

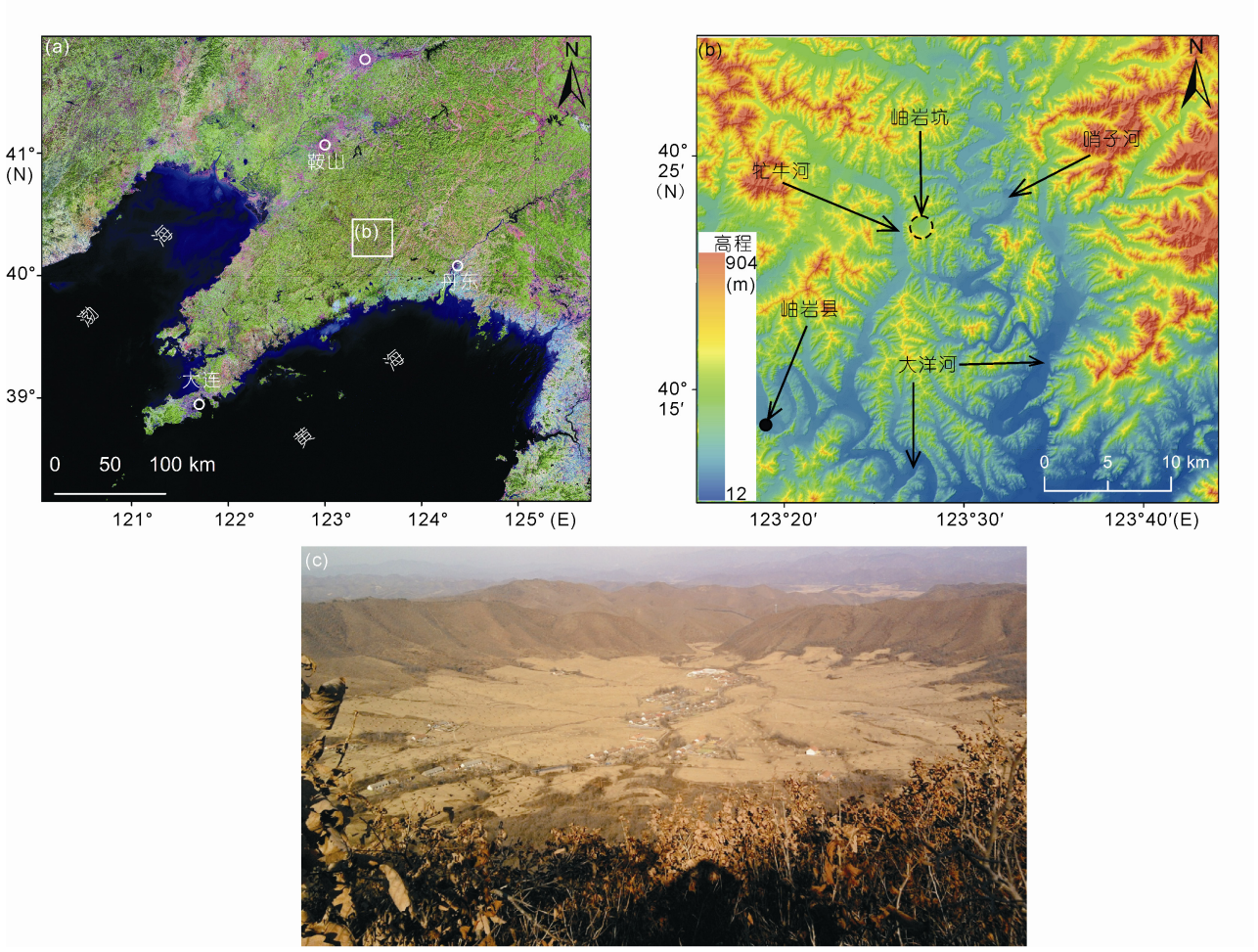

图 1　岫岩陨石坑

(a) 辽东半岛 Landsat ETM+影像图(7, 4, 2 波段); (b) 岫岩陨石坑及其周围区域彩色地形晕渲图(范围为图(a)白色方框); (c) 岫岩陨石坑照片(面向 NE 方向拍摄)

质岩系中, 该岩系由浅粒岩、角闪岩、大理岩、片麻岩和变质玄武岩等组成(覃功炯等, 2001; 陈鸣等, 2009). 坑唇顶部和两侧山坡普遍被厚度达数米的残积、坡积物和土壤层覆盖, 局部有零星基岩(主要为浅粒岩)出露. 坑底现为耕作农田与居民区, 坑内壁为野生柞蚕灌木林等植被所覆盖. 在坑的内侧坑壁存在向坑中心呈放射状裂隙发育, 形成冲沟并发育为坑内小河流, 经东北缘的缺口流入哨子河.

1.2 数据源及预处理

研究所用的基本数据为数字高程模型(DEM)、Landsat ETM+影像、SPOT5 影像、野外实地考察数据以及区域地质图等. 基于这些多元数据, 对岫岩陨石坑成坑过程进行形态参数推演计算与形貌特征研究, 并对这些特征及其产生的地理现象进行分析. 数字高程模型(DEM)数据主要是描述研究区区域地貌形态的空间分布, 像元大小为 2.5 m(图 1(b)). SPOT5 影像 2.5 m 的全色波段和 10 m 的多光谱波段进行融合, 得到空间分辨率为 2.5 m 的彩色融合影像.然后以分幅矢量地形图为标准坐标空间选择控制点, 采用共线方程进行空间几何位置变换, 用三次卷积法进行灰度重采样, 最后得到精度 2.5 m 彩色融合影像. 本研究于 2011 年 11 月进行野外实地考察获得包括高程、坑体结构参数以及岩层性质与产状等数据.

2 岫岩陨石坑撞击成坑反演

2.1 陨石坑直径与坑深的推算

通常而言, 简单坑是一个碗状的负地形, 坑周边为一构造隆起、翻转的坑唇区, 直径一般不超过 2 km (靶岩为沉积岩)和 4 km(靶岩为结晶岩)(Grieve 和 Shoemaker, 1994; 林文祝, 1998). 基于岫岩陨石坑 DEM 数据, 空间统计分析得到该坑的最高点 P1 位于西南方的坑唇山脊上, 高程为 344 m; 最低点 P2 位于东北缺口附近, 高程为 120 m, 野外实地测得 P1 点高程值为 344.1 m, P2 点高程值为 120.3 m, 两者基本一致(图 2); 其平面形态实际更接近于六边形(图 2 白线), 而不是五边形(陈鸣, 2007). 借助 ESRI ARC-INFO V.10 的 3D 分析功能, 在 DEM 上每间隔 2°采集一条过坑底中心点的剖面曲线, 共获得 90 条剖面曲线. 每条剖面曲线 P 对应一个坑唇直径 D_r, 岫岩陨石坑的直径 D 为 $\frac{1}{90}\sum_{i=1}^{90}D_{r_i}$, 计算得到岫岩陨石坑的直径约为 1804 m; 同样, 每条剖面曲线 P 对应两个坑唇山脊高度 H_r, 岫岩陨石坑的坑深 h 为 $\frac{1}{180}\sum_{i=1}^{180}(H_{r_i}-120)$, 计算得到岫岩陨石坑坑深约为 149 m.

对于前面获得的 90 条剖面曲线, 这里选取 N-S, NE-SW, E-W 与 NW-SE 四条剖面线来表达岫岩坑的坑体结构参数(图 3). 岫岩陨石坑在 N-S, SW-NE, W-E 与 NW-SE 方向对应的陨石坑直径分别为 1832, 1810, 1794 和 1777 m, 平均直径约为 1803 m; 坑唇山脊海拔高度为 220~344 m, 平均海拔高度约为 269 m; 坑底与坑唇山脊高差为 100~224 m,平均坑深约为 149 m(表 1). 东北部的坑壁山体在漫长的演化过程中由于侵蚀等作用形成缺口.

2.2 坑体结构参数反演

陨石撞击坑的形成大致可以分为压缩挤压、开掘成坑和成坑后调整三个阶段(Melosh, 1989). 在撞击作用下靶岩发生破裂、冲击加热、震动和岩石熔融与蒸发, 开掘成坑形成瞬时坑; 随后受重力和岩石力学性质等的影响, 发生调整和变形并形成最终坑. 由于撞击作用的反弹在坑的中部常常出现隆起; 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. 同时大量的岩石碎片被抛射到撞击坑周围的地表, 在坑缘附近形成连续的弹射物覆盖层. 岫岩陨石坑属于简单坑, 其二维成坑理想模型如图 4 所示.

这里, D_{tr} 为瞬时坑(transient crater)的坑唇山脊间距离, D_{tc} 为瞬时坑在撞击平面(pre-impact surface)上的直径, d_{tc} 为瞬时坑从撞击平面到坑底的深度, h_{tr} 为

表 1 岫岩陨石坑 8 方向坑体结构参数 a)

方向	直径(m)	坑唇山脊高度(m)	坑深(m)
N	1832	260	140
S		280	160
NE	1810	n.a.	n.a.
SW		344	224
E	1794	260	140
W		240	120
NW	1777	280	160
SE		220	100
平均	~1803	~269	~149

a) n.a.表示此处不适用

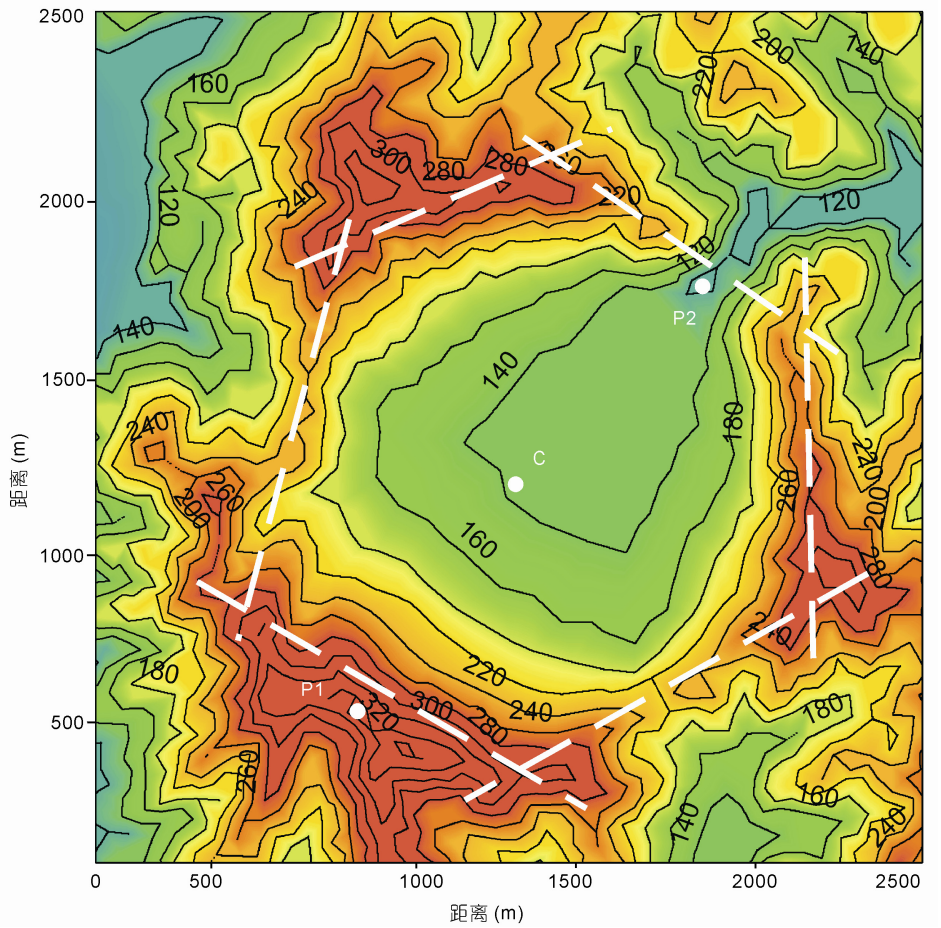

图 2　岫岩陨石坑地形示意图

C 点, 陈鸣等(2009)钻孔位置点

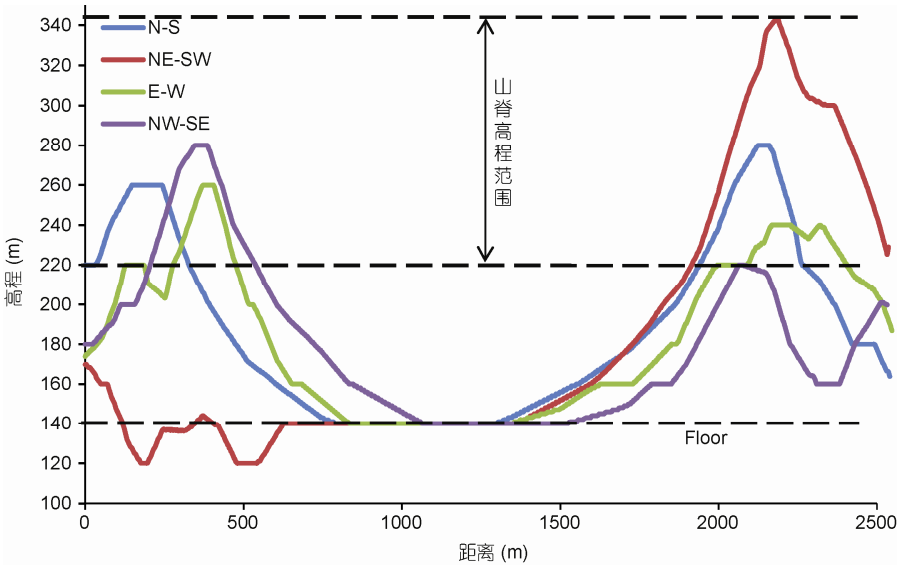

图 3　岫岩陨石坑 8 方向剖面曲线图

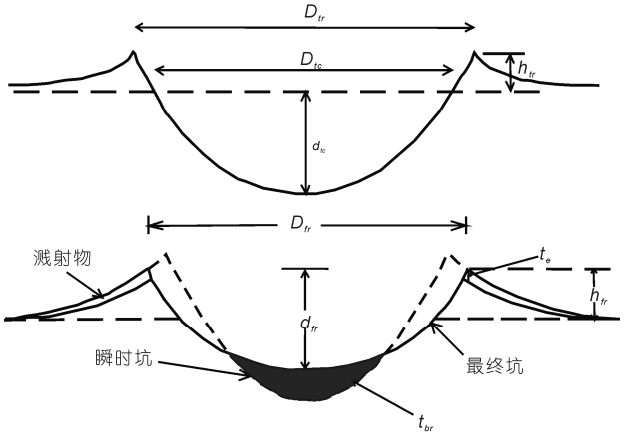

图 4　岫岩陨石坑撞击成坑特征示意图

据 Melosh(1989)与 Collins 等(2005)修改

瞬时坑的坑唇山脊与撞击平面间的距离, 可以得到瞬时撞击坑从坑唇山脊到坑底(rim-to-floor)的深度为 d_{tc}+h_{tr}; D_{fr} 为最终坑(final crater)的坑唇山脊间(rim-to-rim)距离, d_{fr} 为最终坑从坑唇山脊到坑底的深度, h_{fr} 为最终坑的坑唇山脊与撞击平面间的距离, t_{br} 为角砾岩堆积透镜体的厚度, t_e 为撞击弹射物的厚度.

Collins 等(2005)的地球陨石坑(简单坑)撞击成坑推演模型和 Grant(1999)提出的地球陨石撞击坑(简单坑)形成的形态学理论, 在 Meteor 陨石坑的简单坑成坑过程推演上得到了很好的验证. 前文推演得到岫岩陨石坑坑唇到坑底的平均深度约为 149 m, 加上厚度为 107 m 的湖相沉积(陈鸣等, 2009), 深度与直径的比值为 0.143, 与同属于简单坑的 Meteor 陨石坑比值特征相似(深度为 175 m, 直径为 1200 m(Kring, 2007), 深度直径比为 0.146). 据此特征, Collins 等(2005)撞击成坑模型同样适用于岫岩陨石坑. 本研究结合实测数据来重建岫岩陨石坑的形成过程. 根据 Collins 等(2005)给出的简单坑形态特征参数的多重关系, 如式(1)~(9)所示:

$$D_{fr} \approx 1.25 D_{tc}, \tag{1}$$

$$D_{tr} = D_{tc}\sqrt{\frac{d_{tc}+h_{tr}}{d_{tc}}}, \tag{2}$$

$$d_{tc} = D_{tc}/(2\sqrt{2}), \tag{3}$$

$$d_{fr} = d_{tc} + h_{tr} - t_{br}, \tag{4}$$

$$h_{fr} = 0.07\frac{D_{tc}^{\ 4}}{D_{fr}^{\ 3}}, \tag{5}$$

$$h_{tr} = D_{tc}/14.1, \tag{6}$$

$$t_{br} = 2.8V_{br}\left(\frac{d_{tc}+h_{tr}}{d_{tc}D_{fr}^{\ 2}}\right), \tag{7}$$

$$V_{br} \approx 0.032 D_{fr}^{\ 3}, \tag{8}$$

$$t_e = \frac{h_{tr}}{8}\left(\frac{d_{tr}}{r}\right)^3, \tag{9}$$

式中, r 为弹射堆积物与陨石坑中心的径向距离. 根据 Roddy(1978)的研究表明 Meteor 坑当前坑径为最终坑坑径 D_{fr} 的 1.017~1.035 倍, 结合利用 DEM 90 条剖面线得到的岫岩陨石坑目前坑径大小 1804 m, 估算出岫岩陨石坑 D_{fr} 的大小为(1758±15) m. 基于以上数据, 推演计算得到岫岩陨石坑在撞击作用后的瞬时坑(Transient Crater)形态特征值和最终坑的形态特征值, 结果如表 2 所示.

这里, D_r 为坑唇山脊间距离, D_c 为陨石坑在撞击平面上的直径, d_r 为坑唇山脊到坑底的深度, d_c 为撞击平面到坑底的深度, d_{fr} 为最终坑从坑唇山脊到坑底的深度, h_r 为坑唇山脊与撞击平面间的距离, t_{br} 为角砾岩堆积透镜体的厚度, $t_e|_{r=1000}$ 为径向距离 1000 m 内撞击弹射物的厚度.

由表 2 可知, 岫岩陨石坑在撞击瞬时时刻的坑深为(497±4) m, 后由于在重力和岩石力学的共同作用下, 发生了抛射物回落与坑唇壁岩屑滑落回填等动力学过程(French, 1998), 此时撞击坑深度为(374.5±3.5) m,

表 2　岫岩陨石坑撞击成坑坑体结构参数

	岫岩陨石坑						
	D_r(m)	D_c(m)	d_r(m)	d_c(m)	h_r(m)	t_{br}(m)	$t_e\|_{r=1000}$(m)
测量值 a)	1800	n.a.	150	n.a.	n.a.	188	0~4
修正值 b)	1804	n.a.	256 c)	n.a.	<50	n.a.	n.a.
最终坑 b)	1758±15	1645±14	374.5±3.5	324±3	50.5±0.5	188.5±0.5	32±1
瞬时坑 b)	1540±13	1406±12	596.5±4.5	497±4	99.5±0.5	0	n.a.

a) 根据陈鸣(2007)与陈鸣等(2009)得到; b) 本研究得到; c) 为对计算的 149 m 加上 107 m 湖泊沉积后的修正值

同时形成了厚度约为(188.5±0.5) m 的角砾岩堆积透镜体层. 钻探得出的岫岩陨石坑角砾岩堆积透镜体层厚度约为 188 m(陈鸣等, 2009), 比较可以看出, 模拟计算值接近于真实值.

2.3 撞击陨石直径估计

对于地球而言, 小行星撞击体一般以 12~20 km s^{-1} 的速度进入大气层(Bottke, 1994; Grant, 1999), 典型撞击速度为 20 km s^{-1}, 与撞击切平面成 45°撞击地球表面(Shoemaker, 1962). 岫岩陨石撞击坑的撞击靶岩是下元古界的一套变质碎屑岩建造(陈鸣等, 2009; 覃功炯, 2001), 靶岩密度约为 2500 kg m^{-3}. 铁陨石密度约为 8000 kg m^{-3}(Bottke 等, 1994); 一般石陨石密度为 2700 kg m^{-3}(Hilton, 2002).

利用 Collins 等(2005)给出的地球上简单坑直径与撞击体进入大气层时的属性(直径、密度、速度和撞击角度)以及地表属性(靶岩密度、重力加速度)的数学关系, 如式(9)所示, 并结合前文岫岩陨石坑坑体结构参数反演数据, 可以模拟计算出撞击陨石的直径范围:

$$D_{tc}=1.161\left(\frac{\rho_i}{\rho_t}\frac{\rho_i}{\rho_t}\right)^{1/3}L_0^{\,0.78}V_0^{\,0.44}g_E^{\,-0.22}\sin^{1/3}\theta, \quad (10)$$

式中, L_0(m)是撞击体进入大气层时的直径, V_0(m s^{-1})是撞击体进入大气层时的速度, ρ_i(kg m^{-3})为撞击体的密度, ρ_t(kg m^{-3})是靶岩密度, g_E(值取 10 m s^{-2})为地球重力加速度, θ(°)是撞击体轨道运行方向与地表撞击切平面得夹角.

本文 2.1 节根据 DEM 确定的岫岩陨石坑直径为 1804 m, 考虑流水侵蚀、风化和剥蚀等地质作用, 采用表 2 的最终坑坑唇直径(1758±15) m. 作为参考值, 分别模拟铁陨石、石陨石撞击形成岫岩陨石坑最终坑的坑径、坑深大小以及角砾岩堆积透镜体厚度来推测陨石的尺寸大小: (1) 当铁陨石直径介于 50~55 m 时, 最终坑坑唇直径介于 1620~1810 m, 平均直径为 1715 m 角砾岩堆积透镜体厚度介于 159~178 m, 平均厚度约为 169 m; (2) 当铁陨石直径介于 55~60 m 时, 最终坑坑唇直径介于 1810~1990 m, 平均直径为 1900 m 角砾岩堆积透镜体厚度介于 178~196 m, 平均厚度约为 187 m; (3) 当石陨石直径介于 110~115 m 时, 最终坑坑唇直径介于 1650~1790 m, 平均直径为 1720 m 角砾岩堆积透镜体厚度介于 163~177 m, 平均厚度约为 170 m; (4) 当石陨石直径介于 115~120 m 时, 最终坑坑唇直径介于 1800~1920 m, 平均直径为 1860 m 角砾岩堆积透镜体厚度介于 177~190 m, 平均厚度约为 184 m(如表 3 所示).

通过综合考虑最终坑坑唇直径的大小和角砾岩堆积透镜体厚度值, 初步估算形成岫岩陨石坑的陨石直径范围: 若为铁陨石, 直径当为 55 m 左右; 若为石陨石, 直径当为 115 m 左右.

3 坑缘形貌特征与裂隙构造特征

3.1 坑缘形貌特征

靶岩形变是陨石撞击最为主要的特征之一, 包括开掘成坑, 抬升的坑缘以及抛射形成的与撞击靶区地层相反的弹射物沉积层(Dence 等, 1977; Kumar, 2005; Kumar 和 Kring, 2008). 地球上的陨石坑在形成后,由于剥蚀作用和沉积作用等地质作用,都有可能导致陨石坑被湮没, 或被较年轻沉积物覆盖, 使古老陨石坑不易辨认或已消失(Grieve, 1980; Grieve 和 Shoemaker, 1994). 陨石坑原始的形态特征会随着时间的推移产生渐变, 尤其是其坑缘的变化.

本研究基于 DEM 数据提取了岫岩陨石坑坑唇所

表 3 岫岩陨石坑陨石直径范围

撞击参数	参考数据	计算值					
		铁陨石			石陨石		
陨石直径(m)	n.a.	50	55	60	110	115	120
陨石密度(kg m^{-3})	n.a.	8000	8000	8000	2700	2700	2700
陨石撞击速度(km s^{-1})	n.a.	20	20	20	20	20	20
最终坑深度(m)	>256[a)]	344	385	423	352	382	411
最终坑坑唇直径(m)	<1804	1620	1810	1990	1650	1800	1920
角砾岩堆积透镜体厚度(m)	188[b)]	159	178	196	163	177	190

a) 坑底被厚度为 107 m 的湖泊相沉积覆盖; b) 根据陈鸣(2007)与陈鸣等(2009)得到

有的最高点, 这些最高点在一起构成了陨石坑的坑缘轮廓线, 并获得了坑缘剖面图. 岫岩陨石坑在北、东、南、西四个方向上平均坑缘高度分别为 280, 260, 320 和 220 m. 西南向坑唇的最高点的高程值~344 m, 而西向坑唇最高点的高程值~220 m, 造成了坑缘线呈现锯齿状, 这一特征反映了陨石坑沿坑缘的侵蚀与后退现象(图 5).

在 SPOT 影像上叠加显示表明, 坑缘轮廓线与山脊线有很好的吻合(图 6). 一般说, 陨石坑形成年代越近, 其平面形态特征越接近于圆, 常用圆度指数表示(Adler 和 Salisbury, 1969). 圆度指数(Circularity Index, CI)计算公式为 4π×面积/周长 ^{2}. 计算得到岫岩陨石坑圆度约为 0.884, 平面形态为近圆形, 表明该坑自形成以来已受到一定程度的风化与侵蚀作用.

3.2 裂隙构造特征及其意义

陨石坑会形成一些与撞击有关的裂隙(断裂)构造(Kumar, 2005). 岫岩陨石坑在北部和东部坑唇内侧坡地, 形成了许多向坑中心方向延伸的放射状沟谷, 相间排列的放射状山梁和山谷形成了特殊的地貌特征(陈鸣, 2007).在撞击成坑过程中, 因隆起使得在坑唇壁上形成了不同类型的裂隙(Kumar 和 Kring, 2008).

利用分辨率为 2.5 m 的 SPOT5 彩色融合影像(图 6), 并结合岫岩陨石坑 SPOT 彩色影像与地质图绘制出该坑坑壁的裂隙分布图(图 7(a)), 该坑的裂隙主要呈现放射状, 由于岫岩陨石坑的地表植被覆盖度高与土层覆盖后, 基岩暴露现象不明显, 同心圆状裂隙不易观测到. 岫岩陨石坑放射状裂隙的分布有明显的方位优势, 主要呈现 NW-SE 和 WNW-ESE 分布(图 7(b)).

撞击成坑之后, 岫岩陨石坑在坑内壁形成了一种封闭式受坑壁裂隙控制的向心水系(图 7(a)). 岫岩陨石坑一度形成封闭的湖泊盆地, 流水不断地侵蚀与搬运坑壁岩石并最终形成湖泊沉积物(陈鸣, 2007; 陈鸣等, 2009). 随着时间的推移, 在内外力作用(重力作用、风化作用以及流水作用等)下, 坑壁被厚度达数米的残积、坡积物和土壤层覆盖,并生长有柞蚕灌木林植被. 坑东北部由于侵蚀作用形成缺口, 导致湖水外泄. 此后, 流水作用开始对坑底沉积物进行侵蚀、切割形成坑底冲沟与坑底小河流, 成为新水系系统的重要组成部分. 至此, 原先的封闭式向心水系演化为一种半封闭式的水系系统(图 6).

4 讨论与结论

岫岩陨石坑是中国首个被证实撞击起源的陨石撞击坑, 该坑为碗状撞击坑, 属于简单坑.平面形态呈现近六边形. 利用简单坑撞击成坑模型, 结合遥感、DEM、钻孔与野外考察等多元数据, 对岫岩陨石坑的撞击成坑过程与形貌特征进行了研究.

根据简单坑撞击成坑模型推演出岫岩陨石坑在撞击成坑不同阶段的坑径与坑深的大小, 瞬时坑坑

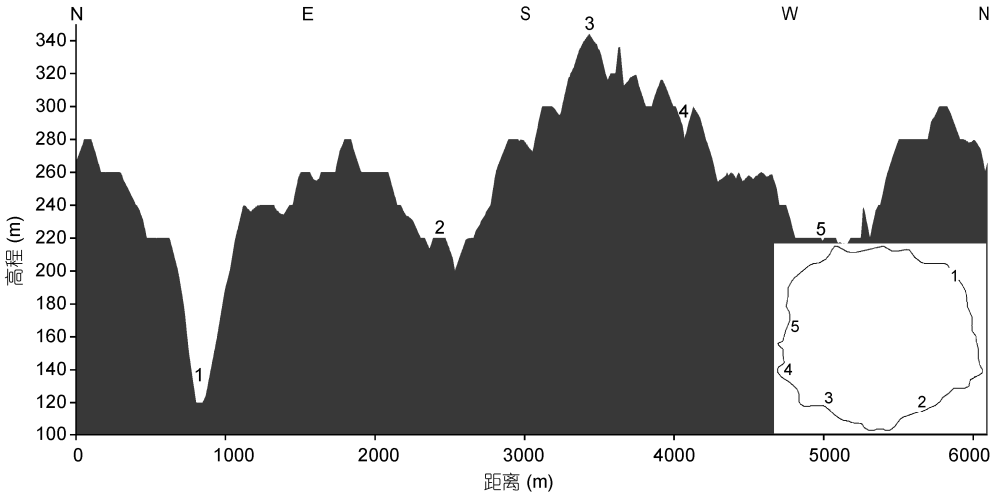

图 5 岫岩陨石坑坑缘剖面图

位置 1, 流水侵蚀作用形成的东北部缺口; 位置 2, 东南部存在小缺口,与侵蚀作用存在一定关系; 位置 3, 陨石坑最高点(~344 m); 位置 4, 由于流水侵蚀作用形成的 V 形凸起; 位置 5, 平坦的西部坑缘

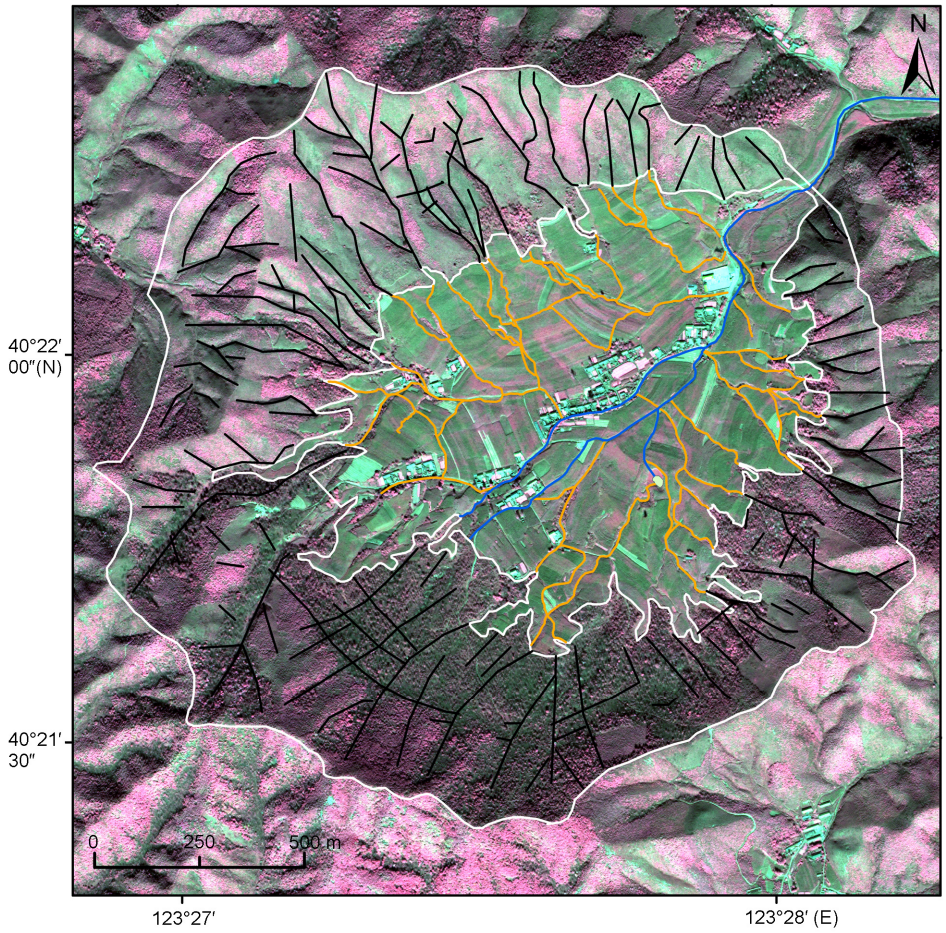

图 6　岫岩陨石坑 SPOT5 影像及其水系系统解译图

黑色曲线为坑壁裂隙, 黄色曲线为坑底冲沟, 蓝色曲线为坑底小河流, 白色为内外边界

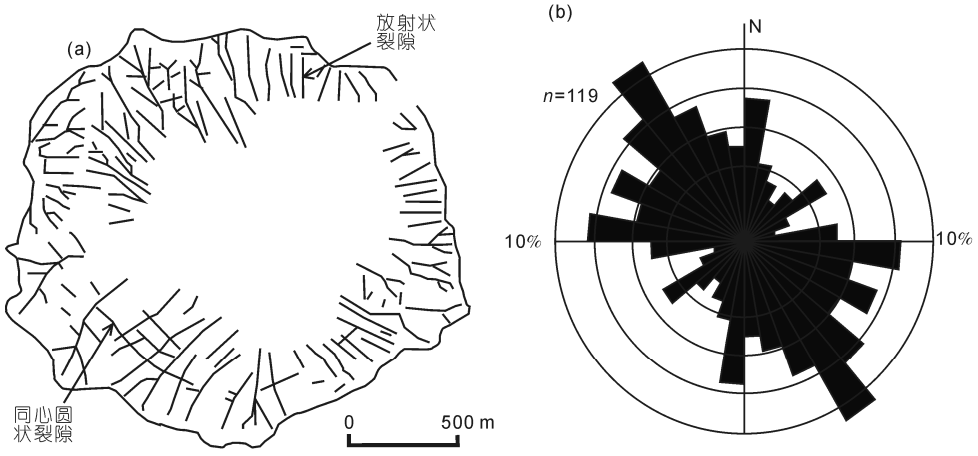

图 7　岫岩陨石坑裂隙构造

(a) 基于 SPOT 影像解译的岫岩陨石坑坑壁裂隙分布图; (b) 放射状裂隙方位分布双向玫瑰图, n 为裂隙总数

径为(1406±12) m, 瞬时坑坑深为(497±4) m; 撞击完成后最终坑的坑径为(1758±15) m, 坑深为(374.5±3.5) m, 角砾岩堆积透镜体厚度为(188.5±0.5) m, 与科学钻孔数据揭示的 188 m 基本一致. 初步研究确定形成岫岩陨石坑的陨石直径范围: 若为铁陨石, 其直径为 55 m 左右; 若为石陨石, 其直径为 115 m 左右; 若为石铁陨石直径应该不足百米.

基于 DEM 数据研究了岫岩陨石坑目前的形貌特征与坑体结构特征. 研究表明, 岫岩陨石坑当前坑径约为 1804 m, 坑深约为 149 m, 坑唇到角砾岩堆积透镜体层顶端的距离与坑唇直径的比值为 0.143, 与典型简单坑 Meteor 陨石坑的比值特征相似. 岫岩陨石坑坑缘轮廓的圆度值为 0.884, 近圆状特征, 表明该坑已遭受一定程度的剥蚀与侵蚀作用. 坑缘剖面揭示了陨石坑的侵蚀与退化特征, 尤其是东北部侵蚀已经形成缺口. 岫岩坑坑底覆盖在撞击角砾岩层上, 厚度约为 108 m 的湖泊相沉积表明岫岩陨石坑在撞击成坑后曾被水体淹没, 形成封闭式的湖泊.

裂隙(断裂)是撞击坑主要的构造特征. 基于高分辨 SPOT 彩色影像解译得到的坑壁裂隙主要呈现放射状, 其分布特征在 NW-SE 和 WNW-ESE 方位上表现出优选性, 这一特征与撞击前基岩上的裂隙分布特征具有密切的联系. 坑壁上的裂隙是坑内水系的重要控制因素, 岫岩陨石坑的水系系统由原先的封闭式演化为如今的半封闭式, 也表明了流水作用对陨石坑形貌的改造.

致谢 研究过程中得到了付碧宏研究员的指导和帮助, 野外考察工作得到了沈阳应用生态研究所胡远满研究员、沈阳大学张志全教授和李虹副教授的大力支持, 审稿人提出诸多建设性意见, 在此一并表示感谢.

参考文献

陈鸣. 2007. 岫岩陨石坑: 撞击起源的证据. 科学通报, 52: 2777–2780
陈鸣, 肖万生, 谢先德, 等. 2009. 岫岩陨石撞击坑的证实. 科学通报, 54: 3507–3511
陈鸣. 2011. 岫岩陨石坑石英的冲击变质特征. 矿物学报, 2: 161–165
陈鸣, 肖万生, 谢先德, 等. 2012. 岫岩陨石坑撞击成因的矿物学证据. 矿物学报, S1: 51
樊计昌, 刘明军, 赵成彬, 等. 2010. 岫岩陨石坑三维 Q 值层析成像. 地球物理学报, 10: 2367–2375
方建军, 王建强, 邱欣卫, 等. 2008. 陨星撞击的地学意义与撞击构造的判识标志.地球科学与环境学报, 30: 234–239
林文祝. 1998. 应用地球物理方法研究撞击坑. 地质地球化学, 1: 63–68
欧阳自远. 1997. 小天体撞击与古环境灾变: 新生代六次撞击事件的研究. 武汉: 湖北科学技术出版社. 15–21
覃功炯, 卢登蓉, 欧强, 等. 2001. 罗圈里撞击坑铂族元素异常及粗铂矿的发现及其意义. 地学前缘, 8: 333–338
王杰, 曾佐勋, 岳宗玉, 等. 2011. 月球主要构造特征: 嫦娥一号月球影像初步研究. 空间科学学报, 31: 482–491
王心源, 吉玮, 李超, 等. 2012. 基于"嫦娥一号"数据的月表撞击坑特征的多参数统计分析. 地理研究, 31: 369–376
尹锋, 陈鸣. 2012. 岫岩陨石坑菱铁矿角砾岩的特征及成因. 地球化学, 6: 538–544
赵成彬, 刘明军, 樊计昌, 等. 2011. 岫岩陨石撞击坑结构高精度地震探测研究. 地球物理学报, 6: 1559–1565
赵树明. 2004. 在辽东半岛中部岫岩满族自治区内发现一撞击构造——陨石坑. 国土资源遥感, 3: 27
Adler J E M, Salisbury J W. 1969. Circularity of lunar craters. Icarus, 10: 37–52
Bottke W F J, Nolan M C, Greenberg R, et al. 1994. Collisional lifetimes and impact statistics of near-Earth asteroids. In: Gehrels T, ed. Hazards Due to Comets and Asteroids. Tucson: University of Arizona Press. 337–357
Collins G S, Melosh H J, Marcua R A. 2005. Earth impact effects program: A Web-based computer program for calculating the regional environmental consequences of a meteoroid impact on Earth. Meteorit Planet Sci, 40: 817–840
Covey C, Ghan S J, Walton J J, et al. 1990. Global environmental effects of impact-generated aerosols: Results from a general circulation model. In: Sharpton V S, Ward P D, eds. Global Catastrophes in Earth History. Boulder: Geological Society of America. 263–270
Dence M R, Grieve R A F, Robertson P B. 1977. Terrestrial impact structures: Principal characteristics and energy considerations. In: Roddy D J, Pepin R O, Merrill R B, eds. Impact and Explosion Cratering. New York: Pergamon. 247–275
French B M. 1998. Traces of Catastrophe: A Handbook of Shock-metamorphic Effects in Terrestrial Meteorites Impact Structure. Houston: Lunar and Planetary Institute. 23–29
Gault D E, Quaide W L, Oberbeck V R. 1968. Impact cratering mechanisms and structures, In: French B M, Short N M, eds. Shock Metamorphism of Natural Materials. Baltimore: Mono Book Corporation. 87–100

Gault D E. 1970. Impact cratering. In: Greeley R, Schultz P H, eds. A Primer in Lunar Geology. California: NASA Ames, Moffett Field. 137–175
Grant J A. 1999. Evaluating the evolution of process specific degradation signatures around impact craters. Int J Impact Eng, 23: 331–340
Grieve R A. 1980. Impact bombardment and its role in proto-continental growth on the early earth. Precambrian Res, 10: 217–247
Grieve R A, Shoemaker E M. 1994. The record of past impacts on Earth. In: Gehrels T, ed. Hazards Due to Comets and Asteroids. Tucson: University of Arizona Press. 417–462
Hilton J L. 2002. Asteroid masses and densities. In: Bottke W F J, Cellino A, Paolicchi P, et al., ed. Asteroids III. Tucson: University of Arizona Press. 103–112
Kumar P S. 2005. Structural effects of meteorite impact on basalt: Evidence from Lonar Crater, India. J Geophys Res, 110: 1–10
Kumar P S, Kring D A. 2008. Impact fracturing and structural modification of sedimentary rocks at Meteor Crater, Arizona. J Geophys Res, 113: 1–17
Kring D A. 2000. Impact events and their effect on the origin, evolution, and distribution of life. GSA Today, 10: 1–7
Kring D A. 2007. Guidebook to the Geology of Barringer Meteorite Crater, Arizona. LPI Contribution No. 1355
Melosh H J. 1989. Impact Cratering. New York: Oxford University Press. 245
McGetchin T R, Settle M, Head J W. 1973. Radial thickness variation in impact crater ejecta: Implications for lunar basin deposits. Earth Planet Sci Lett, 20: 226–236
Pike R J. 1980. Control of crater morphology by gravity and target type: Mars, Earth, Moon. 11th Lunar and Planetary Science Conference. 3: 2159–2189
Roddy D J. 1978. Pre-impact geologic conditions, physical properties, energy calculations, meteorite and initial crater dimensions and orientations of joints, faults, and walls at Meteor crater, Arizona. 9th Lunar Planetary Science Conference. 3891–3930
Schultz P H. 1992. Atmospheric effects on ejecta emplacement. J Geophys Res, 97: 623–662
Shoemaker E M. 1962. Interpretation of lunar craters. In: Kopal Z, ed. Physics and Astronomy of the Moon. New York: Academic Press. 283–359
Shoemaker E M, Kieffer S W. 1974. Guidebook to the geology of Meteor crater, Arizona. Arizona: Arizona State University Press. 17–66
Toon O B, Zahnle K, Morrison D, et al. 1997. Environmental perturbations caused by the impacts of asteroids and comets. Rev Geophys, 35: 41–78