

赵成彬, 刘明军, 樊计昌等. 岫岩陨石撞击坑结构高精度地震探测研究. 地球物理学报, 2011, **54**(6): 1559~1565, DOI: 10.3969/j. issn. 0001-5733. 2011. 06. 015

Zhao C B, Liu M J, Fan J C, et al. High-resolution seismic exploration of Xiuyan impact crater structures. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, **54**(6): 1559~1565, DOI: 10.3969/j. issn. 0001-5733. 2011. 06. 015

岫岩陨石撞击坑结构高精度地震探测研究

赵成彬, 刘明军, 樊计昌, 姬计法, 郭新景, 李春周, 杨利普

中国地震局地球物理勘探中心, 郑州 450002

摘 要 我国的岫岩陨石撞击坑位于辽东半岛北部低山丘陵地区, 直径 1.8 km, 保存完好, 已被多方面的证据证实为陨石撞击坑. 陨石的撞击和此后的沉积作用在坑内形成了特殊的地球物理场, 使坑内与坑外的介质在速度、密度等方面存在差异. 本次通过采用反射和折射地震相结合的探测方法, 利用陨石撞击所形成的岩石的地震波速度和波阻抗差异, 获得了陨石坑的速度结构、地层结构和整体形态. 根据地层反射特征, 直接撞击形成的区域为直径约 1.8 km、深度 800 m 左右的坑体; 受撞击影响的深度约 1.4 km. 撞击坑的结构分为慢速沉积区、快速沉积区和影响区三部分. 根据撞击坑的地震波速度特征, 在撞击坑的中心约 800 m 深度地震波的速度已达到 7.0 km/s, 且速度 7.0 km/s 的等值线与坑体形态一致, 坑的边缘在 500~600 m 深度地震波的速度已达到 7.0 km/s. 坑体的结构和岩石的这些物性参数都进一步证实了岫岩陨石坑的陨石撞击起源.

关键词 陨石撞击坑, 地球物理场, 岫岩, 波阻抗差异, 反射和折射地震探测

DOI: 10.3969/j. issn. 0001-5733. 2011. 06. 015

中图分类号 P315

收稿日期 2010-10-08, 2010-11-25 收修定稿

High-resolution seismic exploration of Xiuyan impact crater structures

ZHAO Cheng-Bin, LIU Ming-Jun, FAN Ji-Chang, JI Ji-Fa,
GUO Xin-Jing, LI Chun-Zhou, YANG Li-Pu

Research Center of Exploration Geophysics, CEA, Zhengzhou 450002, China

Abstract The Xiuyan impact crater with a rim-rim diameter of 1.8 km is located at northern hills in the Liaodong peninsula, Liaoning province, China. It is reserved well and confirmed to be a meteorite impact crater. A special geophysical field resulted from the meteorite impact and subsequent deposit at the crater makes different medium velocity and density between inside and outside of the crater. In the project, velocity structures, stratum structures and whole configuration of the crater are gotten using the differences of seismic velocity and wave impedance from the combined exploration of reflection and refraction. Based on the reflection features, the crater body formed by the direct impact has a diameter about 1.8 km, and a depth about 800 m, and the depth affected by the impact is about 1.4 km. The crater structure is divided into 3 parts, slow deposit area, rapid deposit area and affected area. According to the seismic velocity features, the velocity at the crater center where the depth is 800 m reaches 7.0 km/s, the isoline of 7.0 km/s is consistent with the crater configuration, but the velocity reached 7.0 km/s at the depth of 500~600 m in the edge of the crater. The structure of the crater body and the physical property of rocks confirm further the Xiuyan crater origin from meteorite impact.

Keywords Meteorite impact crater, Geophysical field, Xiuyan, Wave impedance difference, Reflection and refraction exploration

1 引言

撞击构造是陨星(小行星、彗星)撞击行星或卫星所留下的坑形或盆形构造及其组合,也称为陨石坑、陨击坑或撞击坑。撞击坑分两种:简单撞击坑和复杂撞击坑。简单撞击坑的形态为地面上的一个坑,直径一般小于 4 km。复杂撞击坑一般比较大,中央有一个中心山,周围环绕着沟。在地球上由于地壳运动和地壳的风化剥蚀作用,撞击坑的痕迹会逐渐消失或被掩盖。目前在地球上共有 176 个撞击构造得到证实(Earth Impact Database, 2007)^[1],直径最小的为 15 m,最大的为 300 km。撞击构造在地球演化、矿产资源和环境灾害等方面具有重要的研究价值^[2~5]。许多证据表明,早在 65 Ma,一颗直径大约 10 km 的小行星或彗星撞击地球,导致中生代结束,造成全球性灾难,使恐龙及一些生物群体在白垩纪/第三纪之交期间灭绝,这就是地球科学研究中著名的 K/T 界面事件(Alvarez et al, 1980)^[6]。陨星撞击地球可形成多种灾害,包括其诱发的气候变异、地震火山爆发、火灾、海啸等相关灾害。但值得注意的是,许多撞击构造也与成矿作用有关,在这些撞击构造中发现了被撞击构造控制的金属、非金属矿产及油气和地下水资源。

从 20 世纪 80 年代开始,中国学者对中国的陨石坑开展了系列的调查和研究,找到了一批疑似陨石坑的环状地质构造^[7~13],罗圈里撞击坑(也称岫岩陨石坑)发现于 2001 年,是我国第一个被系统深入研究和确认的陨石坑。2001 年覃功炯等^[14]通过地质填图和人工重砂等样品分析,认为该环形构造是一撞击坑构造。2007 年陈鸣等^[15]发现了具有陨石撞击起源诊断性标志的击变面状页理以及震裂锥和冲击角砾岩,使该陨石坑得到了进一步的证实。2009 年陈鸣等^[16]又通过钻探在坑内发现了角砾岩透镜体、岩石熔体玻璃和石英击变面状页理,提供了明确的冲击变质证据,证实了该坑的撞击起源,为陨石坑的确认提供了充分的证据。然而,陨石坑的很多特征,如坑体形态、内部结构、环状和放射状断裂的地下产状和撞击角砾岩透镜体的厚度及分布特征等等还未可知,这是地貌、地表地质、地球化学等工作难以解决的,但是,由于靶岩在陨星的撞击作用下形成

了环状构造和特殊的地球物理场,其岩石的密度、速度特征不同于围岩,因此采用人工地震探测方法,能够通过研究不同岩石地震波速度、密度的差异和不同岩性或断层界面的地震反射波、折射波特征,得到陨石坑的形态和结构特征^[17,18]。本次探测采用高精度地震反射和折射相结合的方法,研究罗圈里陨石坑的形态和内部结构特征,以便为进一步研究其成因提供可靠的基础资料。

2 研究区地貌和地质特征

罗圈里陨石坑位于辽东半岛中部岫岩满族自治县苏子沟乡东南约 6 km 处的罗圈沟,中心地理坐标:东经 123°27'30";北纬 40°21'55"。陨石坑呈圆环状,由垅岗状(堤埂)山脊围成。外径约 1800 m,内径 800 m 左右。坑外缘坡度缓,内缘坡度 35°~40°左右,呈漏斗状或锅底状。坑内的辐射状冲沟为撞击时产生的放射状裂隙,环形山脊的标高从海拔 222.5 m 到 344.1 m,坑底标高为 125~150 m。坑的平均深度为 140 m,陨石坑形态保存良好,总体形态是一封闭式圆形漏斗。因其地貌景观呈圆环状,故得名为“罗圈沟”。在环形山脊东北 45°方向有一个 V 形缺口,沿着该缺口通道可从坑外直接进入坑内底部(图 1)。

陨石坑地层为下元古界辽河群变质岩,由浅粒岩、角闪岩、大理岩、片麻岩和变质玄武岩等组成^[18]。整个坑体表面被小灌木和庄稼等植被所覆盖,坑唇顶部和两侧山坡普遍被厚达数米的风化土壤、残积和坡积物覆盖,局部有零星基岩(主要为浅粒岩)出露,坑底被第四系湖泊相沉积覆盖,其下为较厚的角砾岩透镜体,在角砾岩透镜体中含有硅酸盐熔体玻璃等物质。

3 探测方法和测线位置

本次探测采用高分辨反射和折射相结合的方法。折射探测采用相遇观测系统方法,反射探测采用多次覆盖方法,以便通过折射探测获得陨石坑的地震波速度结构特征,通过反射探测获得陨石坑的地层结构特征,从而得到陨石坑的整体结构和形态。数据采集采用德国 DMT 公司生产的 SUMMIT 高分辨率遥测数字地震仪,激发采用井中炸药爆炸震源。

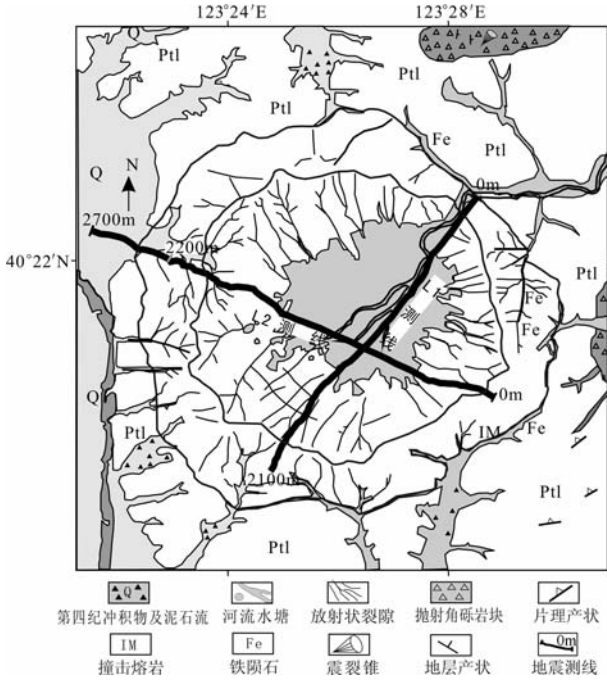


图 1 研究区地质构造和浅层地震测线位置图

Fig. 1 Geological structure and the location of the shallow reflected seismic profile within the studied area

折射探测采用 10 m 道间距,270 道接收;反射探测采用 5 m 道间距,200 道接收,20 次覆盖。

陨石坑形态在平面上似园形,呈碗状,为了探明陨石坑的内部结构及形态,横穿撞击坑布设 2 条相互垂直的浅层地震测线(图 1),进行反射和折射联合探测。L1 测线方向北东—南西,东北端起自罗圈里村东北罗圈沟口,坐标为:东经 123°28'10.0",北纬 40°22'19.7";西南端止于罗圈里村西南部山顶,坐标为:东经 123°27'17.4",北纬 40°21'26.9",全长

2.1 km。L2 测线方向北西—南东,东南端起自罗圈里村东南的山顶,坐标为:东经 123°28'14.0",北纬 40°21'40.9";西北端止于双山子村西北,坐标为:东经 123°26'32.1",北纬 40°22'13.6",全长 2.7 km。

4 岫岩陨石坑的结构特征

4.1 折射剖面速度特征

图 2 为两条折射剖面的走时曲线图和反演解释获得的速度结构图。从图中可以看出,浅部地表介质性横向变化较大,导致浅部地震波速度横向变化较大。这从两条测线上各炮的走时曲线可以看出,炮点在坑内的走时曲线(如 L2 测线 800 m 炮点)的视速度明显低于炮点在坑边的走时曲线(如 L1 测线 1680 m 炮点)的视速度。而炮点在坑侧的两支走时曲线也表现为坑内一支的视速度明显低于坑边一支的走时曲线的视速度,这反映了坑内的速度比坑周边低的特点。另外,根据两条折射剖面走时曲线的形态还可以看出,各炮的走时曲线在远离炮点的位置视速度都较高,其中 SP1 炮点的 1050~2000 m、SP2 炮点的 0~800 m、SP3 炮点的 1200~2700 m、SP4 炮点的 0~400 m 和 1400~2700 m 以及 SP5 炮点的 0~1200 m 走时曲线的视速度都高达 7.0 km/s 以上,均为来自坑底界面的折射,因此反演所得的坑底界面的速度达到 7.0 km/s。

图 2 中的速度剖面是由图 2 上图各炮的走时曲线采用射线追踪方法获得的。根据射线追踪的射线分布,在剖面的中部各炮点之间射线较密(每个点有

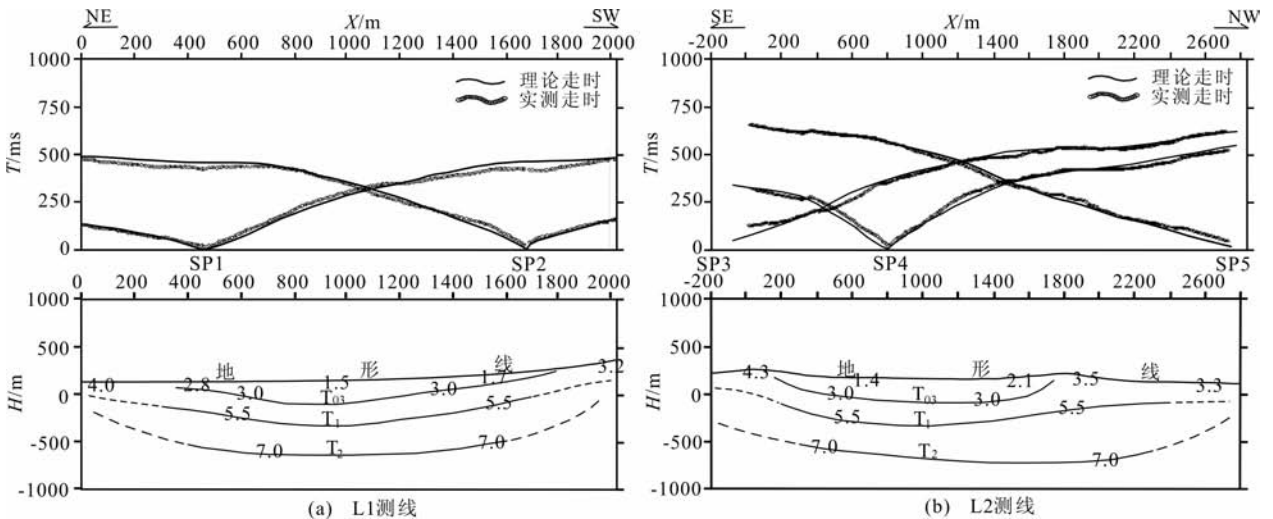


图 2 折射波走时曲线(上)和速度结构(下)(等值线上数字单位为 km/s)

Fig. 2 Time curve (upper) and velocity (lower) of refracted wave

2~3 根射线经过), 所得速度结果精度较高, 速度等值线以实线表示. 在两端剖面的下部射线相对较稀, 因此所得速度结果的精度相对偏低, 速度等值线以虚线表示. 图 2 的速度剖面不仅反映了速度的横向变化而且反映了速度的纵向变化. 横向上坑中间速度较低, 最低约为 1.4 km/s, 坑边沿速度较高, 最高达到 4.3 km/s. 在纵向上, 剖面中部的速度变化范围较大, 从 1.4 km/s 到 7.0 km/s; 两端速度变化范围较小, 从 4.3 km/s 到 7.0 km/s. 其中 3.0 km/s、

5.5 km/s 和 7.0 km/s 的速度等值线分别对应于反射解释深度剖面上的 T_{03} 、 T_1 和 T_2 反射地层界面, 反演所得的深度剖面形态为一坑形, 最深点约在 830m 左右, 坑底速度达到 7.0 km/s 左右.

4.2 反射剖面地层特征

图 3 和图 4 分别为 L1 和 L2 测线的地震反射深度剖面, 该图是由叠后时间偏移剖面经过时-深转换得到的深度剖面. 图中上部反射震相比较多, 能量较强, 反射震相清晰, 连续性较好. 下部反射震相

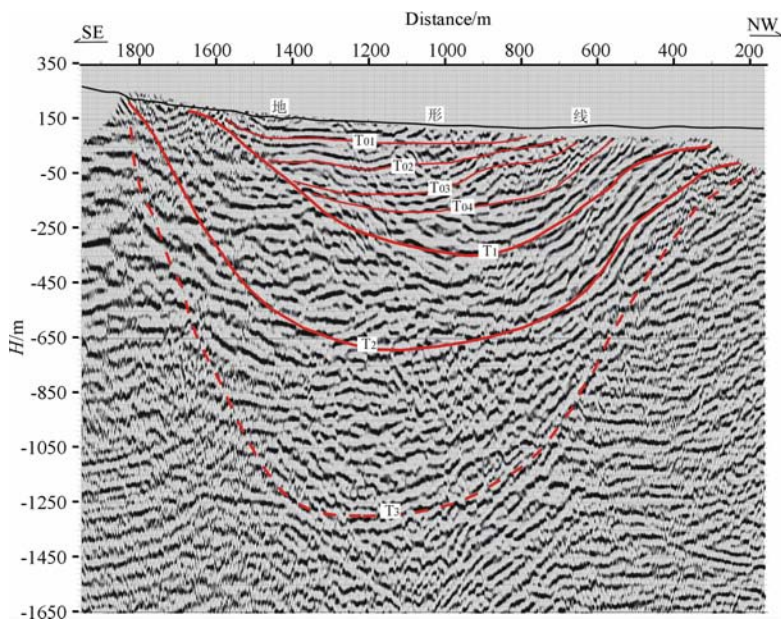


图 3 L1 线地震反射深度剖面

Fig. 3 L1 seismic reflection depth sections

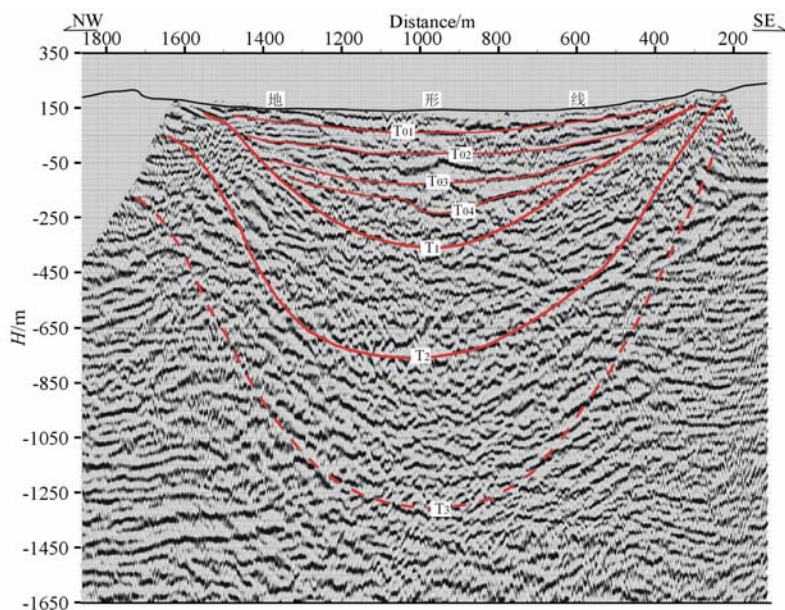


图 4 L2 线地震反射深度剖面

Fig. 4 L2 seismic reflection depth sections

较少,连续性较差. 根据图 3 和图 4 的波组特征和反射震相的组合形态,可以看出在剖面的中部存在一个向下凹的坑形结构,坑的底部以虚线(T_3)为边界. 坑内的波组特征和两侧明显不同,在坑内反射同相轴呈多种形态,有的近于水平,有的倾斜、弯曲或呈弧形,多呈分段连续的形态,但同相轴总体呈两端向中间倾斜的趋势;而在坑的两侧,反射同相轴基本呈水平或单斜形态,连续性相对较好. 根据坑内反射震相的分布特征和组合特点,坑内反射区域以 T_1 和 T_2 为分界面可以分为 3 部分. 第一部分为 T_1 以上区域,反射震相较多,能量较强,同相轴连续性较好,具有典型的沉积地层的特征. 主要存在 4 组反射能量较强、连续性较好的反射震相($T_{01} \sim T_{04}$). 这 4 组反射震相从上到下同相轴倾斜逐渐变大,弯曲形态更加复杂,表现出了坑内沉积地层复杂的结构形态. 第二部分为 T_1 和 T_2 之间的区域,反射震相较少,反射同相轴连续性较差,但仍存在一些倾斜(如图 3 和图 4 的右侧)或水平的(如图 3 的左侧和中部)反射同相轴. 第三部分为 T_2 和 T_3 之间的区域,反射震相更少,反射特征更加不明显,但该区域反射同相轴的总体趋势仍是一个下凹的坑的形态,而且下边界(T_3)比较清晰, T_3 界面上、下的反射具有明显不同的特征,清晰地反映出了坑的边界位置.

图 5 为坑内钻孔柱状图,107 m 以上为湖泊沉积,下面为角砾岩堆积和破碎透闪岩. 图 6 为 2 条测线的解释剖面,它反映出了该陨石坑的结构和形态. 该坑坑口直径约 1800m,下面(以 T_3 界面为界)直

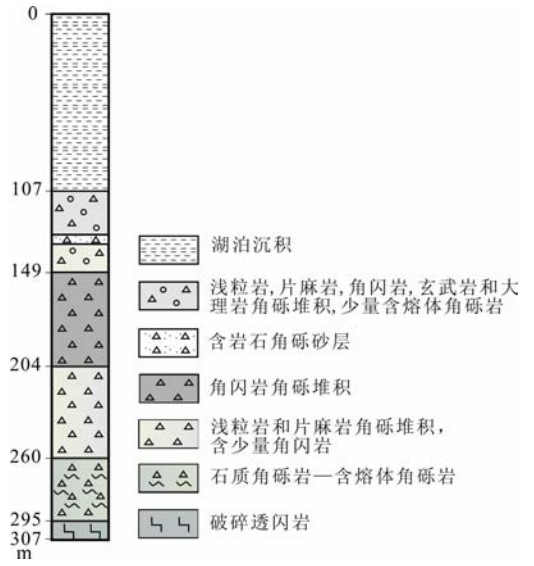


图 5 钻孔柱状图
Fig. 5 Drill column

径约为 1500 m,坑的形态基本呈圆形. 坑的结构分为三部分. 第一部分为 T_1 以上区域,为慢速沉积区. 该部分沉积层位较好,反射震相频率较高,同相轴连续性较好,地层特征明显,可能为晚期沉积的颗粒较细的沉积物. 根据钻孔资料, T_{01} 界面对应于湖泊沉积的底界, T_{03} 界面对应于角砾岩和破碎透闪岩的分界面. 第二部分 T_1 和 T_2 之间的区域为快速沉积区,反射震相频率较低、同相轴连续性较差,该部分地层沉积层位及特征不明显,可能为早期沉积的颗粒较粗的沉积物. 第三部分为撞击影响区. 可能下面的岩层受撞击的影响造成了岩石的性质及结构发

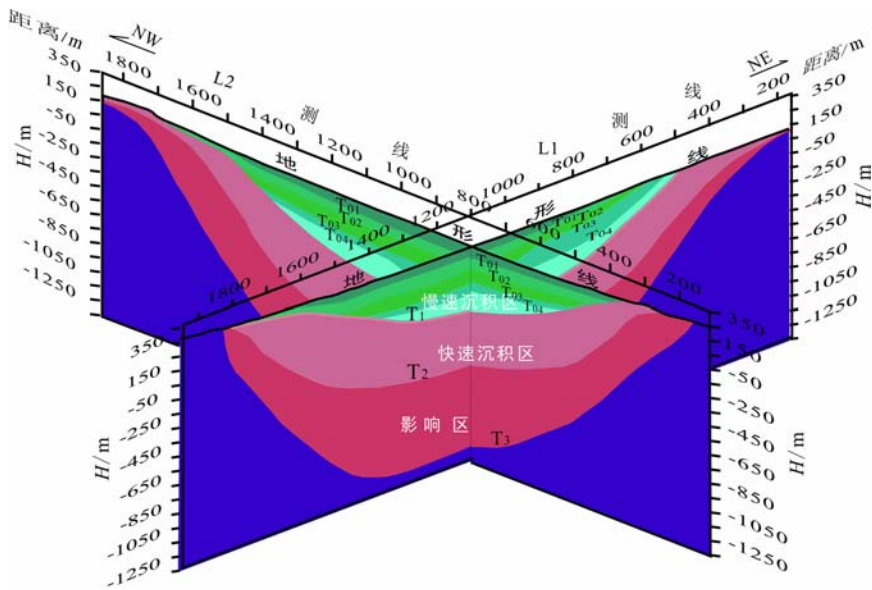


图 6 地震反射剖面解释结果

Fig. 6 The interpretation section of the seismic reflection profile

生了变化,使得所受影响区域的地层性质以及岩石的结构和构造形态与其围岩存在差异,从而造成了反射地震剖面特征的不同。

5 陨石坑的结构形态和演化机制分析

图 6 所揭示的罗圈里陨石撞击坑为碗型坑,主要结构为 3 层。上层(慢速沉积区)的底界位于海拔 $-340\sim-360$ m 左右,埋深约为 470~500 m;中层(快速沉积区)的底界位于海拔 $-680\sim-760$ m 左右,埋深约为 830~900 m;下层(影响区)的底界位于海拔 -1300 m 左右,埋深约为 1400 m。根据撞击坑的形态特征,坑的中心应该在 2 条测线交点的西北部约 200 m 处。根据坑体的地层结构形态,上部慢速沉积区的 $T_{02}\sim T_{04}$ 地层界面(L1 测线)呈由东北向西南倾斜的趋势,表明该时期沉积物源的主要方向应为东北方向,而 T_{01} 地层界面则呈由西南向东北倾斜的趋势,表明后来沉积物源的主要方向发生了改变,应来自西南方向,这可能是由于后来东北方向坑唇的垮塌而造成的。

根据折射剖面所揭示的坑内的地震波速度,上层慢速沉积区(T_1 以上)速度变化较大,为 1.4~5.5 km/s;中层快速沉积区(T_1 和 T_2 之间)速度较高,为 5.5~7.0 km/s;在坑中心约 830 m 向下为下层影响区,速度达到 7.0 km/s 以上,根据地壳内的速度结构特征,在 1 km 以上地震波速度一般都不可能达到如此高的速度,只有经过高温高压的莫霍面附近的熔融物质才能具有如此高的速度,因此认为这可能是陨石撞击地球时所产生的高温高压环境使撞击坑的表层岩石达到熔融状态,改变了围岩的性质,致使围岩速度升高,这也应该是在岫岩坑内除发现有角砾岩透镜体、岩石熔体玻璃和石英击变面状页理等冲击变质证据之外,又一陨石坑的物性特征之一。

致谢 岫岩满族自治县人民政府和苏子沟镇政府对该项研究工作给予了支持和配合,陈鸣教授对该项研究工作给予了帮助,李晓光、曲直协助了部分野外工作,特此一并致谢。

参考文献(References)

[1] Earth Impact Database. <http://www.unb.ca/passc/ImpactDatabase/>[Last Updated;March 20,2009]

[2] 刘明军,李松林,樊计昌.美国 Chesapeake 湾撞击坑研究进展及其启示.地球物理学进展,2006,21(4):1161~1166
Liu M J, Li S L, Fan J C. Advancement and revelation of

studies of Chesapeake impact crater, USA. *Progress in Geophysics*(in Chinese), 2006, 21(4): 1161~1166

[3] 张新琴,夏秀文.月球撞击坑的动力学研究.地球物理学进展,2008,23(6):1797~1801
Zhang X Q, Xia X W. Research dynamics of lunar crater. *Progress in Geophysics*(in Chinese), 2008, 23(6): 1797~1801

[4] Pilkington M, Grieve R A F. The geophysical signature of terrestrial impact craters. *Reviews of Geophysics*, 1992, 30(2):161~181

[5] Masaitis V L. Morphological, structural and lithological records of terrestrial impacts: an overview. *Australian Journal of Earth Sciences*, 2005, 52:509~528

[6] Alvarez L W, Alvarez W, Asaro F, et al. Michel, extraterrestrial cause for the Cretaceous/Tertiary extinction. *Science*, 1980, 208:1095~1108

[7] 傅成义,俞锦标,王赐银等.太湖三山岛击变岩的发现及其意义.地理学报,1990,(2):253~256
Fu C Y, Yu J B, Wang C Y, et al. The discovery of shock metamorphic rocks at Sanshan island of Taihu lake and its significance. *Acta Geographica Sinica*(in Chinese), 1990, (2):253~256

[8] Wu S. The Shanghewan impact crater, China. *Lunar Planet SciConf*, 1988, 19: 1296

[9] 王道经,王秀娟.海南白沙陨石坑及其成坑陨石.地质科技情报,1995,14(4):17~21
Wang D J, Wang X J. The Baisha meteorite-impacted crater and crater-forming meteorite in Hainan island. *Geological Science and Technology Information*(in Chinese), 1995, 14(4):17~21

[10] 向缉熙,许林根,向钊等.中国大别山东南缘首次发现大坝陨坑构造.中国地质,2008,35(5):869~878
Xiang J X, Xu L G, Xiang F, et al. Discovery of the Daba meteorite crater on the southeastern margin of the Dabie Mountains, China. *Geology in China*(in Chinese), 2008, 35(5):869~878

[11] 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.地学前缘,2001,8(2):345~352
Qin G J, Ou Q, Chang X. Review of the recent progress on impact structures in China and abroad. *Earth Science Frontiers*(in Chinese), 2001, 8(2):345~352

[12] 向缉熙,向钊,吴思本等.中国东大别陨疤和岳西陨坑残体的首次发现:东大别山超高压变质岩是陨星撞击的产物.见:宇宙—地球科学(专辑1).北京:中国大地出版社,2005:1~26
Xiang J X, Xiang F, Wu S B, et al. The first discovery of the eastern Dabie astrobleme with relict of Yuexi meteorite crater in China: Meteorite impact had resulted in the ultrahigh pressure metamorphic rocks in Dabie Mountain. In: Xiang J X ed. *Cosmos—Earth Sciences(Series 1)*(in Chinese). Beijing: China Land Press, 2005:1~26.

[13] 马配学,柴之芳,毛雪瑛等.地外撞击作用和地球灾变环境.

- 地质论评,1995,**41**(1):20~27
- Ma P X, Chai Z F, Mao X Y, et al. Extraterrestrial impact events and catastrophic environment of the earth. *Geology Review*(in Chinese), 1995,**41**(1):20~27
- [14] 覃功炯,卢登蓉,欧 强等. 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,2001,**8**(2):333~338
- Qin G J, Lu D R, Ou Q, et al. The discovery of PGE anomaly and platina from Luoquanli impact crater, China. *Earth Science Frontiers*(in Chinese), 2001, **8**(2):333~338
- [15] 陈 鸣. 岫岩陨石坑:撞击起源的证据. 科学通报,2007,**52**(22):2777~2780
- Chen M. Xiuyan meteorite crater: a evidence of impact origin. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 2007, **52**(22):2777~2780
- [16] 陈 鸣,肖万生,谢先德等. 岫岩陨石撞击坑的证实. 科学通报,2009,**54**(22):3507~3511
- Chen M, Xiao W S, Xie X D, et al. Xiuyan crater, China: Impact origin confirmed. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 2009, **54**(22):3507~3511
- [17] 林文祝. 应用地球物理方法研究撞击坑. 地质地球化学, 1998,(1):63~68
- Lin W Z. Research on impact craters with geophysical approaches. *Geology-Geochemistry*(in Chinese), 1998,(1):63~68
- [18] 樊计昌,刘明军,赵成彬等. 岫岩陨石坑三维 Q 值层析成像. 地球物理学报,2010,**53**(10):2367~2375
- Fan J C, Liu M J, Zhao C B, et al. Three-dimensional Q tomography for Xiuyan meteorite impact crater. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, **53**(10):2367~2375

(本文编辑 胡素芳)