贾民强,徐涛,曾庆栋等. 2024. 利用地震反射剖面研究辽东青城子矿集区浅层地壳结构. 地球物理学报,67(10):3781-3795,doi:10.6038/cjg2024S0172.

Jia M Q, Xu T, Zeng Q D, et al. 2024. Studying the shallow crustal structure of the Qingchengzi ore filed in Liaodong by using seismic reflection profile. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese),67(10):3781-3795,doi:10.6038/cjg2024S0172.

# 利用地震反射剖面研究辽东青城子 矿集区浅层地壳结构

贾民强<sup>1,4,5</sup>,徐涛<sup>1,3\*</sup>,曾庆栋<sup>1,3</sup>,苗来成<sup>1,3</sup>,杨进辉<sup>2,3,4</sup> 1中国科学院地质与地球物理研究所,中国科学院矿产资源研究院重点实验室,北京 100029 2中国科学院地质与地球物理研究所,岩石圈演化国家重点实验室,北京 100029 3中国科学院地球科学研究院,北京 100029 4中国科学院大学,北京 100049 5中国石油集团东方地球物理勘探有限责任公司,涿州 072750

摘要 青城子矿集区位于辽东地区中部,发育大量的金及铅锌矿床.尽管前人对矿集区内的矿床进行了大量的地 质研究,但仍存在矿集区控矿构造延深情况不清、浅层地质格架不明的问题,制约了对矿集区成矿作用的认识及下 一步的找矿工作.本文基于青城子矿集区布设的二维反射地震测线,通过偏移成像获得了矿集区9 km 以浅地质构造特 征,结果表明:(1)青城子矿集区的上地壳呈现"双层"结构特征,即古元古代变沉积岩系辽河群覆于太古代基底之上,同 时还反映出该地区辽河群可分为上、中、下三个地层层序,其界面及展布形态等较为清楚,总体厚度 5000~6700 m; (2)矿集区构造格架是以尖山子深大断裂为根带的一个逆冲推覆体系,为分析白云、小佟家堡子金成矿构造样式及 成矿提供了可靠的依据;北西向尖山子断裂为青城子矿集区内一级控矿断裂,可能是区内的导矿构造,控制着青城 子东部地区金矿床的空间展布;(3)在小佟家堡子断裂下盘大石桥组地层内部解译出一个隐伏岩体,推测其可能是 与金成矿有成因关系的印支-燕山期岩体,暗示青城子矿集区深部具有较好金成矿潜力;并在此基础上建立了该区 金成矿模式,为确定深部找矿远景区指明了方向.

 关键词 偏移成像;地壳结构;青城子矿集区;金成矿;成矿模型

 doi:10.6038/cjg2024S0172
 中图分类号 P315

收稿日期 2024-03-12, 2024-08-21 收修定稿

# Studying the shallow crustal structure of the Qingchengzi ore filed in Liaodong by using seismic reflection profile

JIA MinQiang<sup>1,4,5</sup>, XU Tao<sup>1,3\*</sup>, ZENG QinqDong<sup>1,3</sup>, MIAO LaiCheng<sup>1,3</sup>, YANG JinHui<sup>2,3,4</sup>

1 Key Laboratory of Mineral Resources, Institute of Geology and Geophysics. Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2 State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

3 Innovation Academy for Earth Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

4 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

5 BGP INC., China National Petroleum Corporation, Zhuozhou 072750, China

**Abstract** The Qingchengzi ore field is located in the central part of Liaodong region, and contains a large number of gold and Pb-Zn deposits. Although many studies of geology and mineral deposits

**基金项目** 中国科学院先导 A 项目(XDA0430302),国家重点研发计划项目(2016YFC0600101)和国家自然科学基金(42130807,42104102, 42374060)联合资助.

育一作者简介 贾民强,男,1982 年生,博士研究生,主要从事地震学研究. E-mail:jmq2004@126.com

<sup>\*</sup> 通讯作者 徐涛,男,1978年生,研究员,主要从事地震学研究. E-mail:xutao@mail.iggcas.ac.cn

of the ore field have been conducted, the ore-controlling structures and the shallow geological framework have been unclear yet, which hampers our understanding of the mineralization process and the future ore exploration. Based on the two-dimensional seismic profiles in the Qingchengzi ore field, this article conducts tomographic imaging research to obtain shallow geological structural characteristics of the crust above 9km depth beneath the ore field. Our imaging results show that: (1) the general upper crustal structure beneath the Qingchengzi ore field is characterized by a "double-layer" framework, meaning that the Paleoproterozoic metamorphic sedimentary rock series, the Liaohe Group, overlies the Archean basement, and that the Liaohe Group in the area can be divided into three stratigraphic sequences: upper, middle, and lower, with evident interfaces and a total thickness of  $5000 \sim 6700$  m; (2) the structural framework of the ore field is a thrust system rooted from the Jianshanzi reverse deep fault, which provides a reliable basis for analyzing the structural styles and mineralization of the Baiyun and Xiaotongjiapuzi gold deposits; the NWtrending Jianshanzi fault is a first-order fault in the Qingchengzi ore field, which likely acted as the conduit for the ore-forming fluids in the area, controlling the distribution of gold deposits in the eastern part of Qingchengzi; (3) a hidden intrusion was identified within the Dashiqiao Formation on the footwall of the Xiaotongjiapuzi fault, and it is speculated to form during the Indosinian-Yanshanian period and to be genetically related to the gold mineralization, suggesting that the deep part of the ore field has a high potential for gold mineralization. Based on these new results, a gold mineralization model was established for the area, which is helpful for determining the ore-looking for and exploration directions.

Keywords Migration imaging; Crustal structure; Qingchengzi ore field; Gold deposit; Metallogenic model

# 0 引言

辽东半岛位于华北克拉通东北部,与我国最大黄 金生产基地,即胶东半岛隔渤海湾相望(图1).辽东地 区与胶东地区具有相同的成矿大地构造背景和相近 的成矿地质条件,故有研究者提出辽东有望成为我 国"第二个胶东"(朱日祥等,2015,2024),因此辽东 地区找矿突破问题倍受关注(Ma et al., 2022; Zheng et al, 2022, 2024; Xu et al., 2023; Yang et al., 2024a,b).

青城子矿集区位于辽东半岛中部,是辽东地区 三大金矿集区之一(曾庆栋等,2019).与其他两个金 矿集区不同,青城子矿集区实际上是一个金银多金 属矿集区,在区内相继探明有白云、荒甸子、林家三 道沟、小佟家堡子、桃源等众多金矿床,榛子沟、喜鹊 沟、南山、二道沟等大中型铅锌矿床和高家堡子银矿 床;累计探明金储量 300 余吨,铅锌储量 160 余万 吨,银储量 4000 余吨(王玉往等,2017).尽管青城子 矿集区被认为是辽东最具找矿潜力的远景区之一, 但近年来的找矿与勘探工作并未取得重大突破.

对于青城子矿集区,前人已经开展了较多研究

工作,并取得了系列成果(赵广繁和孙立民,1997;刘 国平和艾永富,2001;孙文涛等,2008;张森等,2012; 王玉往等,2017;曾庆栋等,2019;张拴宏等,2020;D et al.,2020;朱日祥等,2024).区内金矿床主要赋存 于古元古代辽河群变质地层中,与印支期-燕山期岩 浆活动有关.矿体主要受断裂构造(包括层间破碎 带)控制,矿化类型蚀变岩型为主,成矿时代为印支-燕山期(田豫才,1999;宋建潮,2011).因此,该区金 矿床成因上被认为是与花岗岩类侵入体有关(孙立 民等,1997).尽管这些矿床受断裂控制明显,但控矿 构造的深部延伸情况并不十分清楚,不同矿床的控 矿构造之间的成因关系也很少涉及.

地球物理探测是揭示深部地壳结构的有效途径.对青城子矿集区,前人也做了一定的地球物理探测及研究工作:如(航空)电磁、重力方法,确定了青城子矿集区岩性分界面和浅表层构造特征(底青云等,2021;程莎莎等,2021),但受方法本身限制,探测深度较小(<1.5 km);短周期密集台阵背景噪声成像结果预测青城子矿集区地下深度 2~5 km 范围内存在多个可能与成矿有关的隐伏岩体(Xie et al., 2021),但受限于速度异常对断裂结构刻画能力不足,没能揭示出控矿断裂的深部结构特征细节.



Fig. 1 Map of the North China Craton and distribution of major gold districts(after Zhu et al., 2015)

另一方面,地表及钻探工程揭示,青城子矿集区发育 地层主要为辽河群,但该群的埋藏深度,或者说矿集 区是否下伏有太古代基底问题,目前尚难回答.这些 问题的存在不仅阻碍了矿集区下一步找矿及勘探突 破,也在一定程度上制约了对成矿过程及矿床成因 的深入认识.

针对上述问题,我们在青城子矿集区实施了浅 层反射地震探测,通过揭示矿集区高分辨率反射结 构图像,来厘清矿集区控矿断裂的发育特征,以期对 区域控矿模式与深部找矿突破提供有力支撑.

# 1 地质概况

青城子矿集区构造位置上处于华北克拉通东北 部辽-吉裂谷带东南缘.辽-吉带则位于龙岗地块与 狼林地块之间(图 2),带内发育有巨厚的辽河群变 质沉积地层,自下而上被划分为浪子山、里尔峪、高 家峪、大石桥及盖县等5个岩组.在青城子矿集区主 要出露高家峪岩组、大石桥岩组及盖县岩组;高家峪 组主要有角变粒岩、互层的片岩和大理岩组成;大 石桥组在区内分布广泛,主要有大理岩、浅粒岩及 片岩组成,是区内铅锌矿床的主要赋矿地层;盖县 组在矿集区范围内出露也较为广泛,主要为片岩 夹薄层透闪透辉变粒岩,是区内金、银矿的主要赋 存地层.

区内发育不同时代的中酸性岩体及各种脉岩. 古元古代岩体包括大顶子、方家隈子、石家岭二长花 岗岩,其中大顶子和方家隈子两个岩体特征相同,距 离较近,可能为同一岩体的两个露头.大顶子岩体锆 石 U-Pb 年龄为 1869 ±16 Ma(Song et al., 2016). 印支期岩体以双顶沟二长花岗岩和新岭花岗斑岩为 代表,岩体的锆石 U-Pb 年龄分别为 224.2 ±1.2 Ma 与 225.3 ±1.8 Ma(Yu et al., 2009).燕山期岩体以 姚家沟花岗斑岩为代表,形成年龄为 167.5 ±0.9 Ma (张朋等,2016;Zhang et al., 2016). 区内还发育不 同类型的岩脉,主要有 NW 向闪长岩脉、NE 向煌斑 岩和花岗斑岩脉等.

青城子矿集区内褶皱、断裂构造发育,主要有 NW与NE向两组断裂,其中NW向断裂主要包括 尖山子断裂和大磨岭断裂等,而NE向有101断裂. 这些断裂控制着金银矿床(点)的空间分布,如区内 主要的金银矿床(白云金矿、小佟家堡子金矿、杨树 金矿、高家堡子银矿)均分布在尖山子断裂与101断 裂围限区域内(栾辉,2014;耿树峰,2023).



图 2 辽吉裂谷构造轮廓示意图及研究区位置(据李基宏,2005)

Fig. 2 Outline diagram of Liaoji Rift Valley structure and research location (after Li, 2005)

2 二维地震数据处理与成像

# 2.1 二维地震数据采集

2019 年 7 月,中国科学院地质与地球物理研究 所在青城子矿集区,开展了二维浅层反射地震探测. 研究区部署了 2 条二维地震测线(图 3),采用炸药 激发、Smart Solo 无线节点接收.具体采集参数为: 滚进滚出式观测系统,20 m 道距(矿集区核心段道 距从 20 m 加密到 10 m,红色段为加密段),100 m 炮间距,炸药震源药量为 6 kg,震源井深至基岩顶 界面下 2 m(最浅不小于 8 m),1 ms采样率,6 s 记 录长度.

## 2.2 地震数据处理

青城子矿集区地貌以山地为主,地表海拔高度 为195~875 m,高程差较大,地形起伏剧烈,山体陡



图 3 青城子矿集区二维地震测线部署图 Fig. 3 Deployment diagram of 2D seismic lines in Qingchengzi ore field

峭;地下非稳定沉积结构,断裂发育,资料存在静校 正问题突出、信噪比低、成像质量差等一系列处理难 点,具体表现在:(1)该区地表起伏剧烈,花岗岩、变 质岩以及砂砾岩出露,折射层不稳定,复杂近地表带 来不可避免的静校正问题,导致反射信号同相轴扭 曲,严重影响成像品质;(2)由于山地激发、接收条件 差,面波、浅层折射、高频干扰、公路干扰等多种类型 的噪声能量强(图 4),原始单炮信噪比较低,原始数 据初叠加剖面成像质量差,干扰波在剖面上反映明 显,主要断裂和构造特征不清晰;(3)研究区内地层 倾角大,构造复杂,地层速度时空变化大,叠加和偏 移成像面临着巨大的挑战.

针对该矿集区断裂发育、沉积地层成层性差、地

层倾角大、地表岩性多样、波场复杂的诸多处理难点 和挑战,本文采取针对性的地震资料处理技术流程 来解决上述问题(图 5),以提高地下成像精度,准确 刻画矿集区地壳结构反射特征为导向,针对性的开 展近地表静校正、多域去噪、速度分析及偏移速度建 模、叠前偏移成像等多方面的精细处理.

(1)综合静校正技术

针对山区内复杂的近地表情况,炮集初至波不 能用简单的线性方程来表达,这种情形下,常规的静 校正方法,很难反演出这种成层性较差的近地表模 型.所以,本文采用系列组合静校正技术:

 ① 常规的射线法反演近地表模型,主要是基于 费马原理来进行折射波成像而获得.但实际上,地震



图 4 青城子矿集区二维地震原始单炮 Fig. 4 Example raw shots of Qingchengzi ore field





波是由有限频率的信号组成,它们会沿着最小走时 的第一菲涅尔带进行传播.为此,本文选取的菲涅尔 带层析反演静校正方法(Mullick and Buske, 2017),将 近地表初始速度模型,在菲涅尔带进行离散化处理, 通过在菲涅尔带内进行走时迭代来建立精确的近地 表模型,解决由于近地表速度空间剧烈变化引起的 长波长静校正问题.

② 再利用基于超级道的地表一致性剩余静校 正技术(张凯等,2013),进一步解决影响反射波成像 的短波长静校正问题,保证资料同相叠加,为提高构 造成像精度和准确性奠定基础.

③ 在地下反射波能量弱、各种环境噪声及相干噪 声的干扰下,很难用模型道相关此类方法来求取剩余 时差.本文使用综合全局寻优静校正技术(包燚等, 2020),通过最大能量法、模拟退火法以及遗传算法,交 替迭代进行剩余静校正计算以摆脱常规剩余静校正对 反射波模型道质量的依赖,以求获得最佳的剩余静校 正量来改善地下反射波成像.该非线性算法与常规剩 余静校正方法相比,更适用于地表速度横向变化剧烈 地区的低信噪比资料,计算的静校正量介于长波长和 短波长静校正量之间,通过长、中、短波长静校正迭代, 最终求取的静校正使剖面质量得到进一步的提升.

如图 6 为综合(菲涅尔带层析静校正、超级道剩 余静校正、全局寻优循环迭代)静校正前、后的单炮 对比,可以看到经过静校正处理后,剖面信噪比得到 明显提升.



图 6 综合静校正应用叠加剖面效果对比 Fig. 6 Stack section comparison of hybrid static correction

(2)叠前多域迭代去噪技术

研究区地震资料为山地激发,接收条件较差,造 成面波、线性干扰、异常能量噪声等多种干扰波发 育.针对不同类型噪声特征,选取合适的叠前去噪方 法,采用渐进、多域的迭代方式,在保真保幅压制噪 声的同时,提高资料信噪比.对比噪声去除前、后的 剖面,去噪前资料信噪比低、同相轴连续性差,通过 多轮迭代的噪声衰减,噪声得到了较好的压制,去噪 后反射信号波组自然,同相轴连续性增强,资料信噪 比较高(图 7).

(3)多聚焦共反射面元叠加技术(MFCRS)

经典地球物理中,假设所有由炮点激发的反射

波,通过共反射点反射后传播回检波器,实际上,检 波点接收的信号是由一系列共反射面反射回的信号 构成.在信噪比较低的区域,通过对共反射面信号进 行叠加,能很好地解决成像困难的问题.

本文采用的多聚焦共反射面元叠加成像技术 (MFCRS),在不利用速度信息的情况下,考虑地下 局部地质构造特征建立形成共反射界面,选取优势 频带内相邻的道集,在射线数最多的第一菲涅尔带 范围内建立超道集来压制噪声以增强地震反射波能 量,并应用加强后的超道集在共反射面内的信号进 行校正叠加,以提高低信噪比地区有效反射波的能 量和信号连续性(臧胜涛等,2018). 经过共反射面叠加的剖面,能够改善用于剩余 静校正的模型数据成像,进而提高剩余静校正计算 精度.剩余静校正后的高精度共中心点道集,能进一 步提高速度解释的精度,更合理地建立偏移速度模 型.叠前偏移后产生的共反射点道集能更精确地进 行叠前 AVO 反演(图 8).

(4)精细速度分析技术

地震波速度的精准度是剖面成像质量优劣的最 为关键的因素,对于低信噪比的山地资料,行之有效 的精细速度分析方法尤为重要.在拾取速度过程中, 考虑区域地层速度变化规律,按照道集平直、能量团 相对集中、小剖面成像好以及相邻点线特征相互参 照等原则进行速度拾取,同时结合速度扫描,通过多 轮速度迭代,获取最终精细叠加速度场(刘立彬等, 2024).

在叠加速度的基础上,对偏移速度反复调整 (图 9),并进行了速度场平滑,然后进行速度内插, 再进行偏移,以得到可信度高的成果剖面.偏移速度 场优化后,陡倾角地层成像效果得到改善,断点归位 清晰,构造形态清楚,断裂组合关系更为合理(图 10).



图 7 L16 线-叠前多域迭代去噪前(a)后(b)剖面对比 Fig. 7 Section comparison of L16 before (a) and after (b) pre-stack de-noising



图 8 MFCRS 应用前(a)后(b)剖面效果对比 Fig. 8 Section comparison before (a) and after (b) MFCRS











### 2.3 地震成像结果

对青城子矿集区二维地震资料,针对性的开展 近地表静校正、速度分析、多域去噪、叠后偏移等方 面处理,得到了高分辨率及高信噪比地震反射成果 剖面,其地层结构、控矿断裂及侵入岩体等成像特征 明显,具体表现为:

L11 测线偏移剖面信噪比较高,反射信号可连续追踪,成像质量较高,地震波组特征清晰,北部的尖山子断裂和白云断裂呈现比较明显的断层特点,断裂位置及其与辽河群地层的组合关系清晰可靠,其中尖山子断裂规模较大,切层较深,陡倾产出,具有逆断层特征,而白云断裂则具有反冲断裂特征;中部及南部也存在多组分支断裂组合(图 11a).分别位于测线中部的新岭岩体和南部的双顶沟岩体内部呈现杂乱弱反射波组特征,与围岩地层接触边界清晰,岩体轮廓整体呈"钟形"(图 11b).

L16 测线偏移成像剖面中,北部的尖山子断裂、

中部的小佟家堡子断裂及南部的朱家堡子断裂、青 城子断裂位置清楚可靠,地层与断裂组合关系清晰, 整体构造特征与测线 L11 相似;其中小佟家堡子断 裂为尖山子断裂派生次级断裂,倾斜度相对较小,切 穿辽河群浅部地层(图 12a);根据地震波组反射能 量强弱的差异及与周围地层不整合接触的特点,清 晰识别已出露地表的大顶子岩体及双顶沟岩体,同 时在小佟家堡子下盘大石桥组地层内解译出隐伏岩 体(图 12b 蓝色虚线所示).

# 3 地质解释与构造控矿模式

基于上述二维地震剖面偏移成像特征,并结合 前人相关研究成果,对矿集区上部地壳结构特征进 行了地质解释,并建立构造控矿模式.

#### 3.1 地层层序特征

辽河群作为青城子矿集区的主要赋矿地层,但

由于缺乏深部地质资料,对其深部地层结构一直认 识不清.本次地震反射结构为认识该问题提供了重 要依据.综合分析 L11、L16 两条地震测线的成像结 果,矿集区上部地壳存在三个地震层序界面(图 11b 和图 12b 中的黄、黑、绿三线),其中最下部的层序界 面(黄线)深度介于 5000~6700 m,被解释为辽河群 与太古代基底间分界面,因为该界面上、下反射震相 特征差异明显,其上强弱波组特征清晰,连续性较 好,类似于沉积地层反射特征,有别于界面以下杂乱 的弱反射特征.上述特征反映出该区浅部地壳总体 上具有"双层"结构,即古元古代辽河群变沉积地层 不整合覆于太古代基底之上.

中部界面(黑线)和上部界面(绿线)被解释为辽 河群内部地层层序界面,也就是说从地震反射波组 特征角度,矿集区辽河群可以分为上、中、下三套"地 层"层序.其中,上部与下部"地层"具有较好的成层 性反射结构,而中部则表现为弱振幅、连续性差的反 射特征.这一"地层"划分方案与前人从地质角度将





图 11 L11 线-偏移成像结果及地质结构特征

(a) 解释成果及构造特征;(b) 偏移成像结果;(c) 白云金矿成矿模式.

Fig. 11 Migration imaging results and geological structure characteristics of line L11

(a) Interpretation result and structure characteristics; (b) Migration imaging results; (c) Metallogenic model of Baiyun Gold Mine.

辽河群自下而上分为5个岩组(浪子山、里尔峪、高 家峪、大石桥和盖县)的方案存在一定差异(曾庆栋 等,2019).结合各岩组的岩性组成及变质程度,我们 认为辽河群下部3个岩组变质程度相对较深,岩性 均以浅粒岩、变粒岩类为主,夹少量片岩-片麻岩类, 导致它们具有相似地震反射特征,因此构成了本文 划分的3套"地层"中的最下部层序.辽河群大石桥 组以大理岩为主,夹少量片岩和变粒岩,通常表现为 弱反射、成层性差的震相特征,因此我们将中部"地 层"解释为大石桥组.盖县组处于辽河群最上部,以 片岩类及变质砂岩为主,故我们将地震剖面上最上 部的强振幅、成层性好、横向连续可对比性强的地震 反射"层"解释为盖县组.

### 3.2 控矿构造样式

地质研究表明,尖山子断裂是区内规模最大的 断裂,其在地震剖面上表现明显,断点位置清晰,向 东陡倾产出,切割辽河群地层,并延伸至基底,总延 深约7~9 km,甚至更深.区内其他断层,如小佟家 堡子断裂、朱家堡子断裂、于上沟断裂、青城子断裂 等,同样断点位置较为清晰,以低角度产状为特征, 发育于辽河群内部,处于尖山子断裂下盘(南西盘), 并在深部相交于与尖山子断裂.因此,我们将尖山子 断裂与这些低角度断裂一起解释为一逆冲推覆构造 系统,其中尖山子断裂为该推覆构造的根带断裂,推 覆方向为自北东向南西.此外,处于尖山子断裂上盘 的白云断裂为一反冲断裂,在深部与尖山子断裂 交汇.

根据前人研究,本区断裂构造具有多期活动的特征.尽管目前断裂活动具体时间尚难以精确确定, 但多数研究者认为青城子矿集区金成矿期主要发生 在印支-燕山期(Yang et al., 2003;刘国平和艾永 富,2002;张连昌等,2018;白阳等,2022),其间的构 造活动以伸展作用为主,代表区域最晚一期构造活 动期(翟明国,2010;Lin et al., 2011;Duan et al., 2014).因此,上述推覆构造的形成于挤压构造背景, 早于金成矿时期或形成于成矿早期阶段.

### 3.3 岩体识别与预测

花岗岩类侵入体平面上通常呈椭圆形,剖面上 呈沙钟状或丘状;在地震相上通常以弱振幅杂乱反 射为特征,因此花岗岩类侵入体相对易于识别.结合 地表出露位置,L11 测线清晰地解译出测线南部的 双顶沟岩体和测线中部的新岭岩体.前人依据遥感 和重磁资料,推测双顶沟岩体和新岭岩体在深部可 能连为一体(李兴伟,2017),但本次地震成像结果揭 示二者在深部并不连通.此外,新岭岩体出露地表面 积较小(约为2km<sup>2</sup>),而主体隐伏于地下,整体呈钟 形.由于新岭岩体形成于印支期(李基宏,2005;刘志 远和徐学纯,2007),因此我们推测它可能为印支期 岩浆沿于上沟断裂上侵就位的结果.

同样,在 L16 测线南部的双顶沟岩体和小佟家 堡子金矿南部的大顶子岩体特征明显.重要的是,在 该条测线上小佟家堡子断裂下盘的大石桥组地层内 部还存在一个弱振幅杂乱反射特征的区域,呈不规 则丘状,与围岩强振幅成层性特征差异明显,因此将 其解释为一隐伏岩体.该隐伏岩体位于小佟家堡子 断裂下盘,推测其可能为与金成矿有关的印支-燕山 期侵入体,暗示深部具较好的找矿潜力.

# 3.4 青城子矿集区金成矿模式

青城子矿集区金矿床以蚀变岩型矿化为主,矿 体主要赋存于辽河群变沉积地层的层间破碎带中. 如白云金矿床(L11 地震测线北部)位于矿集区受控 于近东西向延伸的白云断裂带;该带表现为一逆冲





(a) 解释成果及构造特征; (b) 偏移成像结果; (c) 小佟家堡子金矿成矿模式.

Fig. 12 Migration imaging results and geological structure characteristics of line L16

(a) Interpretation result and structure characteristics; (b) Migration imaging results; (c) Metallogenic model of Xiaotongjiapuzi Gold Mine.

断裂带,主裂面及其上覆地层产状一致,倾向南,倾 角在 30 度左右,呈舒缓波状,大体沿盖县组与大石 桥组的接触带发育,但金矿体主要赋存于附近的盖 县组片岩内,呈层状、似层状、透镜状等形态(王伟 等,2020).再如,青城子矿集区南部的小佟家堡子金 矿(地震测线 L16 经过)产于青城子推覆体滑脱面 东侧,南临大顶子花岗岩体,东靠尖山子断裂.金矿 体同样产于大石桥组上部与盖县组地层过渡部位的 层间滑脱构造带中,呈层状、似层状、透镜状,矿体呈 近东西走向,倾角 20 度左右.容矿岩石主要为变粒 岩、大理岩和片岩等.

前人研究认为青城子矿集区金矿的矿源层主要 为辽河群(孙国强等,2008),但矿床成因上认为与印 支-燕山期岩体有成因关系(李立新,2005;王玉往 等,2017;曾庆栋等,2019).根据本次研究结果,青城 子矿集区的辽河群上覆于太古代基底之上.我们认 为目前侵位于辽河群地层中的花岗岩体不大可能是 辽河群本身重熔的结果,而很可能是下伏太古代基 底发生重熔后侵位的产物,因花岗质岩浆的形成主 要发生于中下地壳层次.也就是说,下伏太古代基底 岩石很可能是该地区金矿的矿源层.实际上,华北克 拉通上的绝大多数金矿床(如胶东地区金矿床)的矿 源层被认为主要是太古代"绿岩",即原岩为基性火 山岩的斜长角闪岩类(侯爵等,2023).尽管目前对青 城子矿集区下伏太古代基底的岩石类型尚不清楚, 但其作为金矿矿源层(岩)的可能性极大.

根据上述地震成像解释成果,并结合青城子矿 集区断裂构造、地层层序、岩体的新认识及白云金矿 床、小佟家堡子金矿床特征(图 11c、图 12c),建立了 青城子矿集区重点金矿床的成矿模式(图 13).该模 式强调:深部含矿热液进一步萃取出太古代基底岩 石中的金等成矿物质,形成富矿热液;富矿热液沿 尖山子导矿断裂运移至浅层地壳,并在次一级断裂 (如白云、小佟家堡子等)的有利构造部位(如与盖县 组与大石桥组地层的交汇部位及其层间破碎带)富 集、沉淀而成矿.

# 4 结论

(1)厘定了青城子矿集区浅层地壳具有"双层结构"特征,即浅层的辽河群与深层的太古代结晶基底,其中前者不整合覆于后者之上;确定辽河群总厚度约5000~6700 m,地震学上可分为上(盖县组)、中(大石桥组)、下(浪子山组+里尔峪组+高家峪





Fig. 13

组)"三套"地层.

(2)查明了青城子矿集区断裂构造整体上以呈 向西南方向的推覆构造样式为特征,其中北西向尖 山子断裂为青城子矿集区内一级断裂,是推覆构造 系统的根带断裂,控制着区内其他低角度逆冲断层 展布及金矿床的空间分布.

(3)揭示出小佟家堡子断裂下盘大石桥组地层 内存在一规模较大的隐伏岩体,推测其极可能是与 金矿有成因关系的印支-燕山期岩体,暗示矿集区深 部具有较好金成矿潜力.

(4)提出矿集区深部发育的太古代基底岩石可 能是区内金成矿的主要矿源岩,同时建立了白云金 矿和小佟家堡子金矿的构造控矿模型,对深入认识 矿床成因及深部找矿工作具有重要参考价值.

感谢中国石油集团东方地球物理勘探有限责 致谢 任公司辽河物探处在野外采集数据中的辛勤工作, 感谢中国科学院地质与地球物理研究所陈林研究 员、白志明和刘有山副研究员对本文的建议和帮助.

#### References

Bai Y, Zhang L C, Zhu M T, et al. 2022. Geological characteristics, sources and controlling factors of the Triassic gold deposits in the northern margin of the North China Craton. Acta Petrologica Sinica (in Chinese), 38(4), 993-1024.

- Bao Y, Lu G D, Wang C. 2020. Super-trace residual static technique application on double-complex mountain region (in Chinese). // SPG/ SEG Nanjing 2020 International Geophysical Conference Proceedings. Beijing, 224-227.
- Cheng S S, Peng L H, Sun D H, et al. 2021. The exploration of deep geological structure in the Qingchengzi ore concentration area and its prospecting significance. Geophysical and Geochemical Exploration (in Chinese), 45(4): 859-868.
- Di Q Y, Xue G Q, Lei D, et al. 2021. Summary of technology for a comprehensive geophysical exploration of gold mine in North China Craton. Science China Earth Sciences, 64(9):1524-1536.
- Di Q Y, Xue G Q, Zeng Q D, et al. 2020. Magnetotelluric exploration of deep-seated gold deposits in the Qingchengzi Orefield, eastern Liaoning (China), usinga SEP system. Ore Geology Reviews, 122: 103501, doi: 10. 1016/j. oregeorev. 2020. 103501.
- Duan X X, Zeng Q D, Yang J H, et al. 2014. Geochronology, geochemistry and Hf isotope of Late Triassic magmatic rocks of Qingchengzi district in Liaodong peninsula, Northeast China. Journal of Asian Earth Sciences, 91: 107-124.
- Geng S F. 2023. Metallogenic regularity and prospecting prediction geological model of Qingchengzi ore concentration area in Eastern Liaoning Province. Geological Survey of China (in Chinese), 10 (5): 43-49.
- Hou J, Xu T, Ai Y S, et al. 2023. A metallogenic model for the supergiant gold system in Jiaodong province: constraints from crustal velocity structure. Science China Earth Sciences, 66 (12): 2898-2913.
- Li L X. 2005. The main ore-controlling factors, deposit type and orefinding direction in Qingchengzi ore field. Mineral Resources and

Geology (in Chinese), 19(1): 39-42.

- Lin W, Wang Q C, Wang J, et al. 2011. Late mesozoic extensional tectonics of the Liaodong peninsula massif: response of crust to continental lithosphere destruction of the North China Craton. Science China Earth Sciences, 54(6): 843-857.
- Liu G P, Ai Y F. 2001. Ore-control structures and ore prospecting in the Qingchengzi Ph-Zn-Ag-Au Orefield, Liaoning Province. *Mineral Deposits* (in Chinese), 20(2): 147-152.
- Liu G P. Ai Y F. 2002. Study on ore-forming epoch of Xiaotongjapuzi Gold deposit, Liaoning Province. *Mineral Deposits* (in Chinese), 21 (1): 53-57.
- Liu L B, Han Z Y, Teng H H, etal. 2024. Application of partial multi-focus stacking to field data with low signal to noise ratio in Junggar Basin. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition) (in Chinese), 21(1): 32-37.
- Liu Z Y, Xu X C. 2007. Synthetic information models and analyses of prospecting perspective of the Qingchengzi polymetal metallogenic mine in eastern Liaoning Province. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)* (in Chinese), 37(3); 437-443.
- Luan H. 2014. Geological characteristics and exploratory direction of gold deposits in east of Qingchengzi. Non-Ferrous Mining and Metallurgy(in Chinese), 30(4): 12-15.
- Ma L X, Xu T, Ai Y S, et al. 2022. Hot Lithosphere beneath the northeastern North China Craton detected by ambient noise tomography. *Tectonophysics*, 839: 229551.
- Mullick N, Buske S. 2017. Fresnel zone imaging of seismic data. Geophysical Journal International, 211(2): 784-796, doi: 10. 1093/gji/ggx320.
- Song Y H, Yang F C, Yan G L, et al. 2016. Shrimp U-Pb ages and Hf isotopic compositions of Paleoproterozoic granites from the Eastern part of Liaoning Province and their tectonic significance. Acta Geological Sinica, 90(10):2620-2636.
- Sun G Q, Sun Q M, Zheng T. 2008. Geological characteristics and mineralization mechanism of Taoyuan gold deposit in Qingchengzi ore field, Liaoning Province. *Gansu Metallurgy* (in Chinese), 30 (6):49-51.
- Sun L M, Sun W T, Zhao G F. 1997. Geological characteristics of Xiaodongjiabaozi gold silver deposit of Qingchengzi ore field and it source of mineralized matter. *Gold* (in Chinese), 18(2): 13-18.
- Sun W T, Sun J G, Sun H Y, et al. 2008. Geology and mineralization of superlarge Yangshuqu AU-AG-PB-ZN deposit in the Qinchengzi mine field. *Geology and Exploration* (in Chinese), 44(4): 24-30.
- Tian Y C. 1999. Geology and metallogenesis of the Xiaotongjiapuzi gold deposit. *Geological Exploration for Non-Ferrous Metals* (in Chinese), 8(5): 264-269.
- Wang K Y, Wang L, Liu Z H, et al. 2008. Characteristics of fluid inclusions and origin of Gaojiapuzi silver deposit, Liaoning Province. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 24(9): 2085-2093.
- Wang W, Li D D, Qiu J Z, et al. 2020. Metallogenic geological model and potential analysis of Baiyun gold deposit in Liaoning Province. *Mineral Exploration* (in Chinese), 11(8): 1592-1602.
- Wang YW, Xie HJ, Li DD, et al. 2017. Prospecting prediction of

ore concentration area exemplified by Qingchengzi Pb-Zn-Au-Ag ore concentration area, eastern Liaoning Province. *Mineral Deposits* (in Chinese), 36(1): 1-24.

- Xie T T, Xu T, Ai Y S, et al. 2021. Imaging the shallow crustal velocity structure of the Qingchengzi ore field on the Liaodong Peninsula, China, with a short-period dense array using ambient noise tomography. *Tectonophysics*, 813:228913, doi: 10.1016/ j. tecto. 2021. 228913.
- Xu T, Ai Y S, Wu C L, et al. 2023. Subduction-induced asthenospheric flow around the Songliao Basin in NE China revealed by shear wave splitting measurements of dense seismic arrays. J. Geophy. Res. Solid Earth, 128, e2022JB026075.
- Yang J H, Wu F Y, Wilde S. A. 2003. A review of the geodynamic setting of large-scale Late Mesozoic gold mineralization in the North China Craton: an association with lithospheric thinning. Ore Geology Review, 23(3-4), 125-152.
- Yang T W, Xu T, Ai Y S, et al. 2024a. Fine crust-mantle structure of the major tectonic boundaries between the North China Craton and Central Asian Orogenic Belt revealed from Rayleigh wave phase velocities and receiver functions. J. Geophy. Res. Solid Earth, 129: e2024JB028857.
- Yang T W, Xu T, Ai Y S, et al. 2024b. Crustal structure and its control on gold mineralization in Wulong Goldfield, Liaodong peninsula of China: Constraints from ambient noise tomography with a short-period dense array. *Pure Appl. Geophys*, doi: 10. 1007/s00024-024-03554-5.
- Yu G, Chen J F, Xue C J, et al. 2009. Geochronological framework and Pb, Sr isotope geochemistry of the Qingchengzi pb-Zn-Ag-Au orefield, Northeastern China. Ore Geology Reviews, 35(3/4): 367-382.
- Zeng Q D, Chen R Y, Yang J H, et al. 2019. The metallogenic characteristics and exploring ore potential of the gold deposits in eastern Liaoning Province. Acta Petrologica Sinica (in Chinese), 35 (7): 1939-1963.
- Zhai M G. 2010. Tectonic evolution and metallogenesis of North China Craton. *Mineral Deposits* (in Chinese), 29(1): 24-36.
- Zhang K, Yin Z, Li Z C, et al. 2013. Wave equation tomographic velocity inversion method based on the Born/Rytov approximation. *Applied Geophysics* (in Chinese), 10(3): 314-322.
- Zhang L C, Bai Y, Zhu M T, et al. 2018. Regional differences of gold deposits on the North China Craton. *Journal of Earth Sciences and Environment* (in Chinese), 40(4):363-380.
- Zhang P, Yang H Z, Li B, et al. 2016. Ore source, ore-forming age and geodynamic setting of Yaojiagou molybdenum deposit in Qingchengzi ore-clustered area, Eastern Liaoning Province. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 46(6):1684-1696.
- Zhang S, Zhang D, Sha D X, et al. 2012. Metallogenic characteristics and genesis of gold (silver) deposits in the Linjiasandaogou Xiaotongjiapuzi area of Liaodong, Liaoning Province. *Journal of Jilin University* (*Earth Science Edition*)(in Chinese), 42(3): 725-732.
- Zhang S H, Hu G H, Li J F, et al. 2020. Ore-controlling structures and metallogenic favorable area prediction in Baiyun-Xiaotongjiabuzi ore

concentration area, eastern Liaoning Province. *Earth Science* (in Chinese), 45(11): 3885-3899.

- Zheng F, Xu T, Ai Y S, et al. 2022. Metallogenic potential of the Wulong goldfield, Liaodong Peninsula, China revealed by highresolution ambient noise tomography. Ore Geol. Rev., 142, 104704.
- Zheng F, Xu T, Ai Y S, et al. 2024. Deep structure of the Wulong goldfield, Liaodong Peninsula, China, revealed by receiver functions: implications for the tectonic and mineralization dynamics. *Front. Earth Sci.*, 12: 1437605.
- Zang S T, Su Q, Wang J H, et al. 2018. Complex mountain regions seismic data processing method. Oil Geophysical Prospecting (in Chinese), 53(S1): 63-67.
- Zhao G F, Sun L M. 1997. Geology and ore forming mechanism of the Xiaotongjiapuzi gold deposit, Qingchengzi. *Geological Exploration* for Non-Ferrous Metals (in Chinese), 6(4); 212-217.
- Zhu R X, Fan H R, Li J W, et al. 2015. Decratonic gold deposits. Science China Earth Sciences, 58(9): 1523-1537.
- Zhu R X, Yang J H, Wang G W, et al. 2024. The genesis and resource potential of gold deposits in the Liaodong Peninsula. *Science China Earth Sciences*, 67(3): 657-672.

### 附中文参考文献

- 白阳,张连昌,朱明田等. 2022. 华北克拉通北缘三叠纪金矿床地 质特征、物质来源与控制因素. 岩石学报,38(4):993-1024.
- 包燚, 卢广达, 王成. 2020. 超级道剩余静校正技术在双复杂山地 资料中的应用. // SPG/SEG 南京 2020 年国际地球物理会议论 文集(中文). 北京:《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限 公司, 224-227.
- 程莎莎,彭莉红,孙栋华等.2021.青城子矿集区深部地质构造探 测及找矿意义.物探与化探,45(4):859-868.
- 底青云,薛国强,雷达等.2021. 华北克拉通金矿综合地球物理探 测研究进展——以辽东地区为例.中国科学:地球科学,51 (9):1524-1535.
- 耿树峰. 2023. 辽东青城子矿集区成矿规律及找矿预测地质模型. 中国地质调查, 10(5): 43-49.
- 侯爵,徐涛,艾印双等.2023.胶东成矿省巨量金成矿模型:来自地 壳速度结构的约束.中国科学:地球科学,53(12):2937-2952.
- 李基宏. 2005. 辽宁青城子铅锌银金矿集区成矿条件与成矿预[博士 论文]. 长春:吉林大学.
- 李立新.2005.青城子矿田主要控矿因素、矿床类型及找矿方向.矿 产与地质,19(1):39-42.
- 李兴伟. 2017. 辽东地区青城子晚三叠世双顶沟-新岭岩体的深部地 质特征及三维建模[硕士论文]. 长春: 吉林大学.
- 刘国平, 艾永富. 2001. 辽宁青城子铅锌银金矿田控矿构造与找矿 方向. 矿床地质, 20(2): 147-152.
- 刘国平,艾永富. 2002. 辽宁小佟家堡子金矿床成矿时代探讨. 矿

床地质,21(1):53-57.

- 刘立彬,韩站一,滕厚华等.2024. 部分多聚焦叠加方法在准噶尔 盆地低信噪比地震资料中的应用.长江大学学报(自然科学 版),21(1):32-37.
- 刘志远,徐学纯.2007.辽东青城子金银多金属成矿区综合信息找 矿模型及找矿远景分析.吉林大学学报(地球科学版),37(3): 437-443.
- 栾辉. 2014. 青城子矿田东部金矿地质特征及找矿方向. 有色矿治, 30(4): 12-15.
- 孙国强,孙启明,郑廷. 2008. 辽宁青城子矿田桃源金矿床地质特征 及成矿机制探讨. 甘肃冶金, 30(6):49-51.
- 宋建潮.2011. 辽东裂谷金属矿床成矿系列与成矿作用研究[博士论 文]. 沈阳:东北大学.
- 孙立民,孙文涛,赵广繁.1997.青城子矿田小佟家堡子金银矿床 地质特征及成矿物质来源探讨.黄金,18(2):13-18.
- 孙文涛,孙吉国,孙红云等. 2008. 青城子矿田杨树区超大型金银 铅锌矿床地质特征及成矿机理.地质与勘探,44(4):24-30.
- 田豫才.1999. 辽东小佟家堡子金矿床地质特征及成矿机理探讨. 有色金属矿产与勘查,8(5):264-269.
- 王伟,李德东,邱金柱等. 2020. 辽宁白云金矿床成矿地质模型及 潜力分析. 矿产勘查, 11(8): 1592-1602.
- 王玉往,解洪晶,李德东等. 2017. 矿集区找矿预测研究——以辽 东青城子铅锌-金-银矿集区为例. 矿床地质,36(1):1-24.
- 减胜涛,苏勤,王建华等.2018.山地复杂构造带地震资料处理方法.石油地球物理勘探,53(S1):63-67.
- 曾庆栋,陈仁义,杨进辉等. 2019. 辽东地区金矿床类型、成矿特征 及找矿潜力. 岩石学报,35(7): 1939-1963.
- 翟明国. 2010. 华北克拉通的形成演化与成矿作用. 矿床地质, 29 (1): 24-36.
- 张凯,尹正,李振春等. 2013. 基于 Born/Rytov 近似的波动方程层 析速度反演方法研究. 应用地球物理 10(3): 314-322.
- 张连昌,白阳,朱明田等. 2018.华北克拉通金矿床区域成矿差异性 分析.地球科学与环境学报,40(4):363-380.
- 张朋,杨宏智,李斌等.2016. 辽东青城子矿集区姚家沟钼矿床成矿物质来源、成矿年代及成矿动力学背景.吉林大学学报(地球科学版),46(6):1684-1696.
- 张森,张迪,沙德喜等. 2012. 辽东林家三道沟一小佟家堡子地区 金(银)矿成矿特征及成因. 吉林大学学报(地球科学版),42 (3):725-732.
- 张拴宏,胡国辉,李建锋等.2020.辽东白云-小佟家堡子矿集区控 矿构造及成矿有利区预测.地球科学,4(11):3885-3899.
- 赵广繁,孙立民. 1997. 青城子矿田小佟家堡子金矿床地质特征及 成因机制. 有色金属矿产与勘查,6(4):212-217.
- 朱日祥,范宏瑞,李建威等. 2015. 克拉通破坏型金矿床. 中国科 学:地球科学,45(8):1153-1168.
- 朱日祥,杨进辉,王功文等. 2024. 辽东地区金矿床成因与资源潜力. 中国科学:地球科学,54(3):677-692.

(本文编辑 张正峰)