

俞贵平, 徐涛, 刘俊彤等. 2020. 胶东地区晚中生代伸展构造与金成矿:短周期密集台阵背景噪声成像的启示. 地球物理学报, 63(5):1878-1893, doi:10. 6038/cjg2020N0446.

Yu G P, Xu T, Liu J T, et al. 2020. Late Mesozoic extensional structures and gold mineralization in Jiaodong Peninsula, eastern North China Craton: an inspiration from ambient noise tomography on data from a dense seismic array. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 63(5):1878-1893, doi:10. 6038/cjg2020N0446.

胶东地区晚中生代伸展构造与金成矿: 短周期密集台阵背景噪声成像的启示

俞贵平^{1,3}, 徐涛^{1,4*}, 刘俊彤^{2,3}, 艾印双^{2,3,4}

1 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

2 中国科学院地质与地球物理研究所, 中国科学院地球与行星物理重点实验室, 北京 100029

3 中国科学院大学, 北京 100049

4 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101

摘要 晚中生代以来, 华北克拉通东部经历了以岩石圈减薄作用为主要特征的大规模岩石圈破坏. 在此背景下, 位于华北克拉通东部的胶东地区形成了大规模的伸展构造、广泛发育的花岗岩类侵入体和巨量的金矿化. 为揭示胶东地区控矿构造在上地壳层次的发育特征及其与金成矿之间的联系, 本文基于跨胶东半岛的 NWW-SEE 向短周期密集地震台阵剖面, 开展了背景噪声成像研究, 获得了胶东地区 8 km 以浅的上地壳 S 波速度结构, 其主要特征为: (1) 胶东地区沉积层较薄, 基底平均深度为 1~2 km 左右; (2) 垂向速度梯度显示胶西北基底/浅层高速间断面错断特征显著, 与主要拆离断层对应关系良好, 且相对速度扰动显示沿主要拆离断层发育 SE 倾向的条带状低速异常; (3) 牟乳成矿带下方 S 波速度具有横向分块特征, 与五莲—烟台等控矿断裂的陡倾特征吻合, 且东部苏鲁造山带上地壳平均速度较胶西北地区明显偏高. 综合本文成像结果及已有地质、地球物理资料, 我们认为胶西北成矿带的控矿构造深部以大规模拆离断层为主要特征, 而东部牟乳成矿带则以高角度的脆性(走滑)断裂为主, 故控矿断裂构造的差异可能是胶东成矿区域性差异的主要控制因素.

关键词 胶东地区; 金成矿作用; 伸展构造; 短周期密集地震台阵; 背景噪声成像

doi:10. 6038/cjg2020N0446

中图分类号 P315

收稿日期 2019-12-16, 2020-03-16 收修定稿

Late Mesozoic extensional structures and gold mineralization in Jiaodong Peninsula, eastern North China Craton: an inspiration from ambient noise tomography on data from a dense seismic array

YU GuiPing^{1,3}, XU Tao^{1,4*}, LIU JunTong^{2,3}, AI YinShuang^{2,3,4}

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

2 Key Laboratory of Earth and Planetary Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

3 University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China

4 CAS Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Beijing 100101, China

Abstract Research suggests that since the late Mesozoic, the eastern North China Craton has

基金项目 国家重点研发计划项目(2016YFC0600101)和国家自然科学基金(41522401, 41474068)联合资助.

第一作者简介 俞贵平, 男, 1991 年生, 博士生, 主要从事地震学研究. E-mail: yuguiping14@mail.iggcas.ac.cn

*** 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

experienced large-scale lithospheric destruction characterized by lithospheric thinning. Under this context, large-scale extensional structures, widespread granitoid intrusions and massive gold deposits have been formed in Jiaodong Peninsula in the eastern North China Craton. In order to reveal the characteristics of ore-controlling structures in upper crust and their genetic linkage with gold mineralization, we probe the fine S-wave velocity structure of the shallow crust above 8km by using ambient noise tomography from a NWW-SEE trending linear short-period dense seismic array across Jiaodong Peninsula. Results show that (1) the sedimentary layer in Jiaodong Peninsula is generally thin, with an average basement depth about 1~2 km. (2) The vertical velocity gradient image shows that the dislocation of basement/shallow high-velocity discontinuity in northwest Jiaodong is significant, corresponding well to the main detachment faults, and the relative velocity disturbance image exhibits several banding low-velocity anomalies with SE tendency along the main detachment faults. (3) The S-wave velocity under the Muru metallogenic belt has a block feature in horizontal direction, which is consistent with the steeply dipping feature of ore-controlling faults such as the Wulian-Yantai fault zone, and the average velocity of upper crust in the Sulu orogenic belt is significantly higher than that in northwest Jiaodong. Based on the imaging results of this paper and other geological and geophysical data available, we suggest that northwest Jiaodong is mainly controlled by large-scale detachment faults represented by the Zhaoping fault, while the Muru metallogenic belt in the east is mainly controlled by steep brittle (strike-slip) faults with a relatively low degree of extension. And the differences of ore-controlling structures may be the main reason for regional differences of gold mineralization in Jiaodong Peninsula.

Keywords Jiaodong Peninsula; Gold mineralization; Extensional structure; Short-period dense seismic array; Ambient noise tomography

0 引言

胶东地区是我国最大的黄金基地,其探明黄金储量约占全国总储量的 1/4(Fan et al., 2003; Yang et al., 2003). 研究业已表明,胶东巨量金富集成矿发生于华北克拉通东部破坏和岩石圈减薄的背景下,与伸展构造时空关系密切(Qiu et al., 2002; Mao et al., 2008; Deng et al., 2014; Li et al., 2015; Song et al., 2015; Yang and Santosh, 2015). 比如,造山型金矿的提出者 Goldfarb 和 Santosh(2014)指出,胶东金矿与古老的前寒武纪陆块边缘陆内伸展构造有关,而非典型的显生宙造山型金矿;朱日祥等(2015)将胶东金矿归属为克拉通破坏型,并认为其与造山型金矿的本质区别在于其成矿的伸展构造背景. 众所周知,构造是矿床,特别是热液矿床形成的重要控制因素. 尽管前人从区域成矿构造背景、区域构造样式与构造过程、矿田构造等方面对胶东构造控矿作用进行过有益的探索(卢冰等, 1995; 杨金中等, 2000; 李洪奎等, 2012),但毋庸置疑,与金矿床成因方面的研究相比,这些研究不论是深度上还是广度上

均较为薄弱,特别是深部构造对成矿的控制及其与浅部构造的关系方面. 因此,开展胶东地区地壳精细结构,特别是 10 km 以浅的上地壳结构研究,有助于查明控矿构造的规模、深部延伸及构造样式等,对认识构造控矿规律及指导深部找矿等均具有重要价值.

目前,许多学者在胶东及其邻区已经开展了大量壳幔深部结构成像研究. 马杏垣等(1991)利用宽角反射/折射地震探测技术获得了跨苏鲁造山带和鲁西隆起的地壳二维 P 波速度结构,并讨论了华北块体的克拉通化与克拉通破坏. 潘素珍等(2015)同样利用宽角反射/折射地震探测技术获得了跨胶东半岛的地壳二维 P 波速度结构,并发现五莲—烟台断裂带两侧存在明显的地壳结构差异. Zhang 等(2018)则利用大地电磁测深技术获得了跨胶东半岛的地壳电阻率模型,发现上地壳高导异常与地表出露的主要断裂对应良好,此外还发现中地壳存在高导层. Yang(2002)开展了跨苏鲁造山带的深反射地震研究,揭示了三叠纪华南板块与华北克拉通陆-陆碰撞的深部动力学过程,但剖面较短,并未北延至胶北地体. Li 等(2018)和孟亚锋等(2019)分别利用国家固定台网的数据开展了宽频带背景噪声成像研

究,并分别获得了胶东地区和郯庐断裂带中南段地区的三维 S 波速度结构,其中 Li 等(2018)还发现下地壳和上地幔顶部低速异常与新生代玄武岩浆活动相关,但由于台站稀疏,横向分辨率较低。此外, Ai 和 Zheng(2003)、Chen 等(2006)和 Zheng 等(2008)还开展了跨郯庐断裂带和鲁西隆起的接收函数研究,并讨论了岩石圈减薄与克拉通破坏问题。上述研究为认识胶东及邻区的构造背景和深部动力学过程提供了有力的地球物理学证据,但成像结果主要是面向地壳和岩石圈尺度,上地壳尺度的分辨率不足。此外,该地区还开展了部分重磁异常研究(霍光辉和罗卫, 1993; 张宝林等, 2017),尽管横向分辨率较高,但垂向分辨率有限。而以浅层地震勘探为代表的高分辨率主动源成像方法由于成本高,测线一般较短,且主要布设在矿区内部(Yu et al., 2018; 李威等, 2019)。基于短周期密集台阵的被动源地震成像方法是近年来发展的一种新技术,它结合了短周期台站的轻便性和被动源地震成像不依赖于震源的特点,具有高分辨率和低成本的优势,可以弥补浅层地震勘探和深部地球物理探测各自在经济性和分辨率上的不足,目前已经有很多成功的案例(Fang et al., 2015; Li et al., 2016a, 2016b; Roux et al., 2016)。

基于上述原因,我们沿 NWW-SEE 向布设了一条跨胶东半岛的线性短周期密集台阵,开展了被动源地震探测,期望获得胶北隆起、胶莱盆地和苏鲁造山带等构造单元的深部结构特征,并讨论控矿构造特征及其对区域性成矿差异的影响。

1 地质背景

胶东地区位于华北克拉通东缘(图 1),西部以郯庐断裂带为界,是一个中生代构造与岩浆强烈发育的内生热液金矿成矿集中区(Qiu et al., 2002; Mao et al., 2008)。胶东地区由胶北隆起、胶莱盆地和苏鲁造山带三个构造单元组成(李金良等, 2007; 李洪奎等, 2012),其中胶北隆起和胶莱盆地属于华北克拉通,而苏鲁造山带则是华北和华南陆-陆碰撞形成的造山带,属性上更近于华南块体(Zhou et al., 2008)。

胶北隆起是典型的热隆伸展构造(伸展穹窿/变质核杂岩),主要以太古宙变质岩和中生代花岗岩为主,发育大规模 NE-NNE 向拆离断层,包括三山岛、焦家、招平和栖霞等四条断裂在内的重要控矿断裂。胶北隆起发育胶西北和栖霞福两个金矿集中区,其中胶西北矿集区主要以蚀变岩型与石英脉型金矿均

发育为特征,而栖霞福矿集区则以石英脉型金矿为主(杨立强等, 2014; 宋明春, 2015)。胶莱盆地则是早白垩世伸展背景下形成的断陷盆地(Zhang et al., 2003; 周建波等, 2016),主要由白垩纪陆相火山-沉积地层(莱阳群、青山群和王氏群)组成。胶莱盆地本身金矿化较差,目前仅在胶莱盆地与变质基底的结合部位发现有小规模的构造角砾岩型和砾岩型金矿床(点)(杨立强等, 2014; 宋明春, 2015)。苏鲁造山带是秦岭-大别造山带的东延,是典型的超高压变质岩带(Li et al., 1993; Yin and Nie, 1993; Xu et al., 2009),主要由新元古代含榴辉岩的花岗质片麻岩和中生代花岗岩组成,并以五莲-烟台断裂带为界与其北部的胶北地体(包括胶北隆起和胶莱盆地)相接。造山带内牟乳成矿带主要沿五莲-烟台断裂带和金牛山断裂(牟平-乳山断裂)发育石英脉型金矿和蚀变砾岩型金矿,但矿床规模较胶西北地区明显偏小(杨立强等, 2014; 宋明春, 2015)。五莲-烟台断裂带地表表现为一条晚中生代以来的脆性走滑断裂带(翟明国等, 2000; 林伟等, 2003; 张岳桥等, 2007),并经历了晚侏罗世左行走滑挤压、早白垩世(金成矿期)拉张和晚白垩世-古近纪右行走滑等活动。空间上,五莲-烟台断裂带可以分为西段的五莲-青岛断裂带和东段的青岛-烟台断裂带,而东段实际上主要由桃村、郭城、牟平和海阳等四条断裂组成。五莲-烟台断裂带以东出露大规模高压-超高压变质岩,所以目前一般将其视为华北与华南陆-陆碰撞在苏鲁地区的边界(钟增球等, 2001; Yang, 2002; Zhou et al., 2008)。

中生代以来,胶东地区经历了大规模岩浆作用,岩浆岩出露面积占胶东地区陆域总面积的 1/3 以上,主要包括大规模的花岗岩类侵入岩、广泛分布的中基性-酸性脉岩和沿裂陷盆地发育的火山岩。其中,花岗岩类侵入岩则以晚侏罗世(160~150 Ma)地壳重熔型花岗岩和早白垩世(130~105 Ma)壳幔混合型花岗岩为主(吴福元等, 2007; 张田和张岳桥, 2007);中基性-酸性脉岩主要有煌斑岩脉、闪长玢岩脉、二长岩脉和花岗斑岩脉等;火山岩主要以早白垩世中酸性火山岩(青山群等)为主,另有少量新生代玄武岩分布于胶东西部(宋明春等, 2018)。

2 数据与方法

2.1 数据选取

2017 年 3 月至 4 月,我们在胶东地区,跨胶北

隆起、胶莱盆地和苏鲁造山带布设了一条 NWW-SEE 向的短周期密集台阵剖面(图 1). 该剖面西起三山岛,东至乳山,全长 170 km,共计 340 个台站,平均台间距 500 m,获得了连续 35 天的三分量地震记录,原始数据采样率为 100 Hz. 所采用的便携式地震仪包括集成化的数字采集系统和拐角频率为 2.5 Hz 的检波器.

2.2 背景噪声预处理

本文采用地震背景噪声分析方法提取台站对间的面波经验格林函数信号. 理论和实际应用都表明,台站对之间的经验格林函数(Empirical Green's Function, EGF)可通过对长时间叠加的噪声互相关函数求导获得,可以简单表述如下(Sabra et al., 2005; Campillo and Roux, 2015):

$$\begin{aligned} \frac{dC_{AB}(t)}{dt} &= -\hat{G}_{AB}(t) + \hat{G}_{BA}(-t) \\ &\approx -G_{AB}(t) + G_{BA}(-t), \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $C_{AB}(t)$ 、 $\hat{G}_{AB}(t)$ 和 $G_{AB}(t)$ 分别表示 A、B 两个台站对间的背景噪声互相关函数、经验格林函数(EGF)和真实的格林函数. 本文将采用垂直分量互相关,提取 Rayleigh 面波信号.

在进行数据互相关之前,首先要进行数据预处理,我们参照 Bensen 等(2007)的经典处理流程,将各台站的 Z 分量原始数据截成时间长度为 1 个小时的数据文件,再将数据降采样为 20 Hz,经去仪器响应、去均值、去倾斜分量,带通滤波(0.2~10 s),以及基于滑动绝对平均方法的时域归一化和频谱白噪化等预处理. 连续数据经上述预处理后,就可以对任意

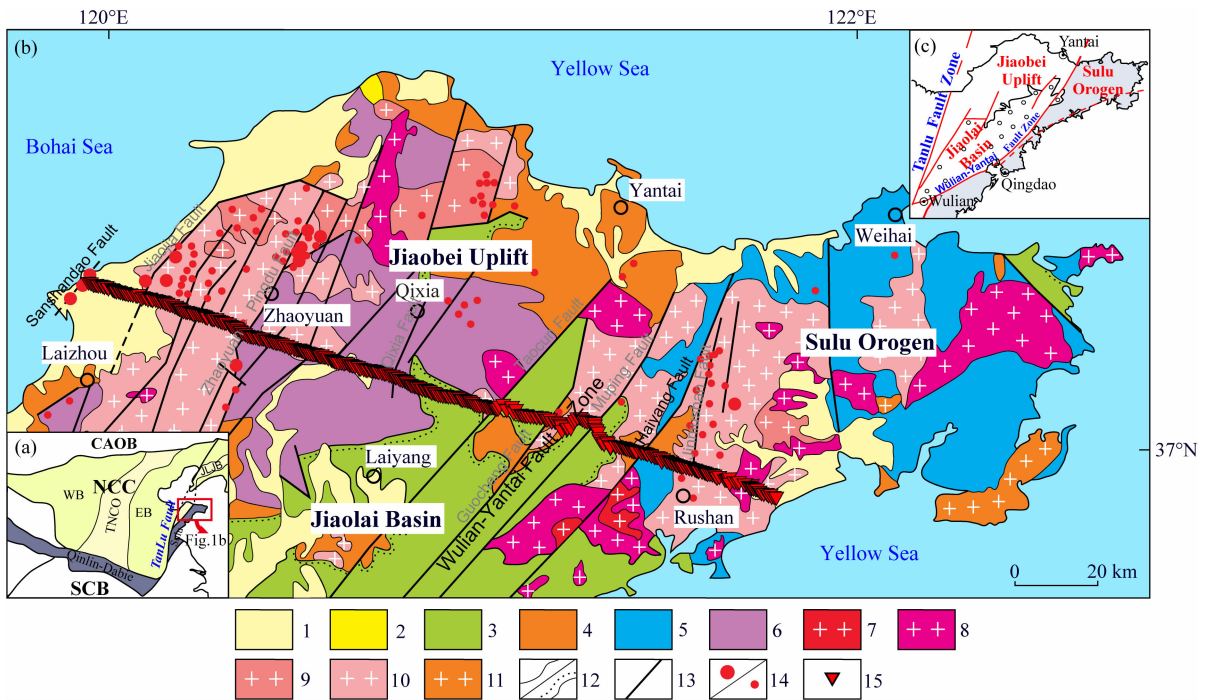


图 1 胶东地区地质简图(修改自 Song et al., 2015)与地震台站分布

1 第四纪松散沉积物; 2 古近纪-新近纪陆相火山沉积地层; 3 白垩纪陆相火山沉积地层; 4 古元古代-新元古代滨浅海相地层; 5 新元古代榴辉岩花岗质片麻岩; 6 太古宙花岗岩绿岩带; 7 白垩纪崂山花岗岩; 8 白垩纪伟德山花岗岩; 9 白垩纪郭家岭花岗岩闪长岩; 10 侏罗纪花岗岩; 11 三叠纪花岗岩类; 12 确认的/不确认的边界; 13 断层; 14 大-超大型金矿/中型金矿; 15 短周期地震台站(共 340 个). CAOB: 中亚造山带; NCC: 华北克拉通; SCB: 华南板块; WB: 西部陆块; EB: 东部陆块; TNCO: 中部造山带; JLJB: 胶辽吉构造带. 左下角内插图(a)和右上角内插图(c)分别示意研究区位置和构造略图.

Fig. 1 Simplified map showing the geology of Jiaodong region and the distribution of seismic stations

1 Quaternary loose sediments; 2 Paleogene-Neogene terrestrial volcanic-sedimentary strata; 3 Cretaceous continental volcanic-sedimentary strata; 4 Paleoproterozoic-Neoproterozoic shore-shallow marine facies strata; 5 Neoproterozoic with eclogite granitic gneiss; 6 Archean granite-greenstone belt; 7 Cretaceous Laoshan granite; 8 Cretaceous Weideshan Granite; 9 Cretaceous Guojialing granodiorite; 10 Jurassic granite; 11 Triassic granitoids; 12 conformity/ unconformity; 13 fault; 14 large to super-large gold deposit/ medium gold deposit; 15 short period seismic station. CAOB: Central Asian orogenic belt; NCC: North China Craton; SCB: South China Block; WB: Western Block; EB: Eastern Block; TNCO: Trans-North China Orogen; JLJB: Jiao-Liao-Ji Belt. The bottom-left illustration (a) and the top-right illustration (c) respectively indicate the location and the simplified tectonic map of the study area.

台站对每个小时的 Z 分量进行互相关, 最后将同一台站对不同小时的互相关函数归一化后线性叠加, 得到台站对之间最终的互相关函数. 图 2a—c 展示了 008 号台站与相邻台站之间的互相关函数, 在 0.5~5 s、1~2 s 和 2~5 s 三个频带内均可以看到明显的 Rayleigh 面波信号, 且信号能量主要集中在 3 s 左右.

已有研究表明, 在日本九州岛存在一个由火山震颤引起的单一持续噪声源, 其频率范围为 0.07~0.12 Hz、传播速度约 $2.7 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ (Zeng and Ni, 2011; 王伟涛等, 2012). 该噪声源可能会在互相关函数的零时刻附近形成较强的零点噪声, 从而影响频散曲线提取的可靠性. 结果显示(图 2a—c), 互相关函数零点噪声整体较弱, 仅在 2~5 s 频段有微弱信号, 可能是由于我们关注的信号频段(0.5~5 s)与噪声源信号的主频具有一定的偏差. 为此, 我们主要挑选了台间距较大的台站对($\geq 5 \text{ km}$), 从而尽可能使得零点噪声与面波信号分离, 同时考虑到实际数据的信噪比, 将最大台间距控制在 60 km 范围内. 最终, 仅对台间距 5~60 km 范围内的台站对进行了互相关计算.

2.3 频散曲线测量

将互相关函数正支(因果信号)和负支(非因果信号)信号对称求平均(Yang et al., 2007), 再对其时间变量求一阶导可以得到 EGF, 然后基于基阶面波格林函数的时间域谐波远场近似, 利用图形转换

技术(Yao et al., 2006)由 EGF 提取 Rayleigh 面波相速度频散曲线. 考虑到实际数据的信噪比, 提取了 0.5~4 s 范围内的频散曲线, 且采样周期为 0.1 s, 并将最大台间距控制在 45 km 以内. 在挑选频散曲线时, 综合考虑了远场近似(台间距大于 2 倍波长)、信噪比(大于 5)、频散曲线的连续性以及相邻台站对之间频散曲线的相似性. 此外, 还参考了前人在胶东及邻区研究结果(Li et al., 2018; 孟亚锋等, 2019)的短周期数据特征, 将频散曲线的绝对值约束在 $2.0 \sim 3.5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内. 然后进一步开展了频散曲线质量控制, 仅保留相速度随周期变化时梯度值在 $-0.15 \sim 0.45 \text{ km} \cdot \text{s}^{-2}$ 范围内的频散曲线. 最后, 针对不同周期之间频散数量差异较大的问题, 我们对部分数据予以了随机剔除, 使得在基本不影响数据覆盖的情况下频散曲线的数量随周期的增加是平稳变化的.

经挑选, 最终获得了 15839 条高质量的 Rayleigh 波相速度频散曲线, 结果如图 3a 所示. 其平均值从 0.5 s 处的 $2.6 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 缓慢变化到 4 s 处的 $3.1 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 相速度整体偏高, 符合胶东地区沉积层较薄、基岩大范围出露的地表地质特征. 图 3b 是各周期混合路径频散的射线路径数统计, 其中 2.6 s 的射线路径最多, 共 12685 条, 0.8 s 的射线路径最少, 共 1307 条. 通过研究某一地区的平均频散曲线, 可以获得该地区的平均速度结构特征. 为了简单分析胶北隆起、胶莱盆地和苏鲁造山带三大构造单元的平均速度结构特

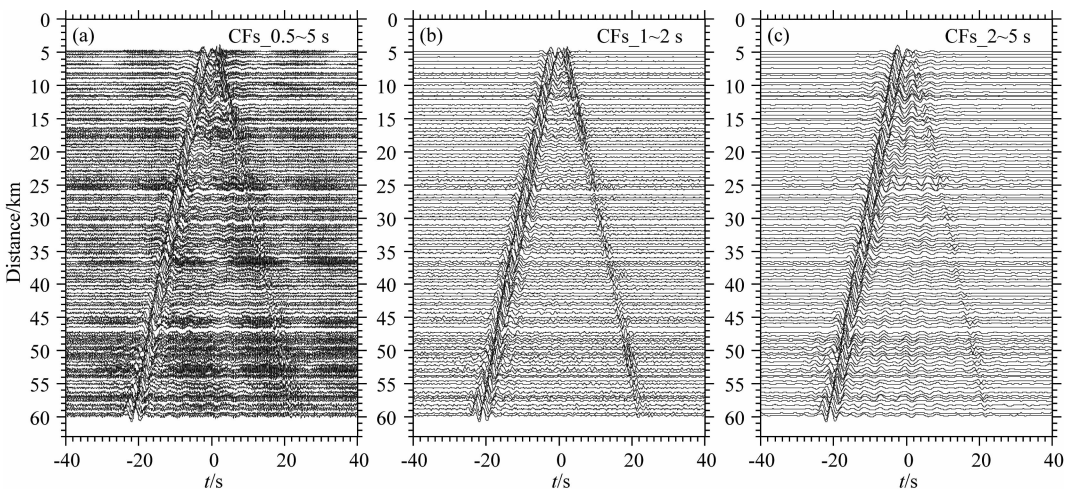


图 2 垂直分量互相关函数

仅以 008 号台站与相邻台站间的互相关函数为例, 台间距被限定在 5~60 km 范围内,

(a)、(b)和(c)分别对应的频带范围为 0.5~5 s、1~2 s 和 2~5 s.

Fig. 2 Cross-correlation functions of vertical component

Only cross-correlation functions between station 008 and its adjacent stations are taken as examples, and the distance between stations is limited in the range of 5~60 km. The frequency ranges of (a), (b), and (c) are 0.5~5 s, 1~2 s, and 2~5 s, respectively.

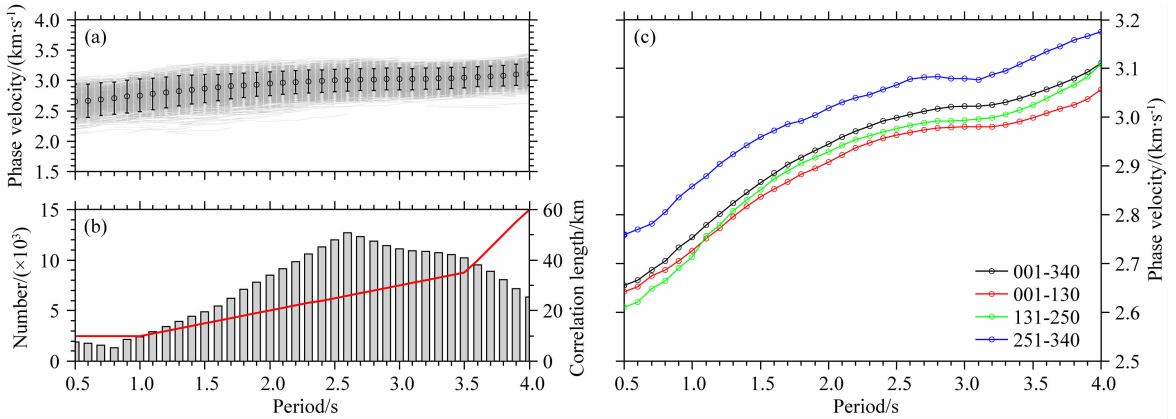


图 3 从互相关函数提取的相速度频散曲线

(a) 灰色实线为频散曲线, 共计 15839 条, 周期范围为 0.5~4 s; 圆圈和误差棒分别表示每个周期的平均相速度值及其 2 倍标准差; (b) 灰色条带表示每个周期相速度频散测量值的数量, 红色折线表示实际反演时该周期的各向同性相关长度; (c) 测线上不同台站区间 (001-340, 001-130, 131-250 和 251-340) 的平均频散曲线。

Fig. 3 Dispersion curves extracted from cross-correlation functions

(a) The gray solid lines denote dispersion curves, with a total number of 15839 in the frequency range of 0.5~4 s; the yellow circle and error bar denote the average phase velocity value and its twice standard deviation for each period, respectively; (b) The gray bar denotes the number of phase velocity dispersion measurements for each period, and the red solid line denotes the isotropic correlation length in the actual inversion; (c) Average dispersion curves for different station sections (001-340, 001-130, 131-250 and 251-340) on the survey line.

征, 我们将 340 个台站相应的分为三组, 其中 001~130 台代表胶北隆起 (范围: 119. 96°E—120. 12°E), 131~250 台代表胶莱盆地 (范围: 120. 12°E—121. 30°E), 251~340 台代表苏鲁造山带 (范围: 121. 30°E—121. 78°E)。各组台站的平均频散曲线如图 3c 所示, 结果显示 001-130 组与 131-250 组相当, 而 251-340 组的频散曲线明显偏高, 表明苏鲁造山带上地壳速度明显高于胶北地体 (包括胶北隆起和胶莱盆地)。

2.4 相速度结构成像

台站对之间的混合路径频散曲线是对所经路径介质速度结构的平均响应。本文采用基于连续模型空间的广义反演方法 (Montagner and Nataf, 1986; Tarantola and Valette, 1982; Yao et al., 2010) 反演 0.5~4s 周期的 Rayleigh 面波相速度分布图。由于是线性台阵观测系统, 方位分布不均匀, 因此本文不做方位各向异性反演。反演过程中将自动舍弃部分偏差较大的频散数据。所有反演参数中, 各向同性参数的相关长度影响最大, 一般波长越小对小尺度异常的分辨能力越高, 选用的相关长度可以较小; 同时, 信噪比越高, 选用的相关长度也可以较小, 其最小值通常要求大于 1/3 倍波长。本文综合考虑了不同周期的波长、数据信噪比、检测板测试结果以及区域地质问题的尺度等来确定每个周期的相关长度, 如图 3b 中红色实线所示。采用 $0.04^\circ \times 0.04^\circ$ 的模型参数化网格。图 4b 为测线下方相速度分布

图, 其中五莲—烟台断裂带以东, 从 0.5 s 至 4 s 相速度均明显高于断裂带以西, 表明苏鲁造山带上地壳速度较胶北地体 (胶北隆起和胶莱盆地) 要明显偏高。

2.5 S 波速度结构反演

经相速度反演后, 获得了每个网格点的相速度分布图, 再通过插值可以获得每个台站下方的纯路径频散曲线。对于层状地球模型, 不同周期的 Rayleigh 面波相速度与 P 波速度、S 波速度和密度有关, 它们均是层厚的函数 (Schwab 和 Knopoff, 1972), 其中 S 波速度影响最大。本文采用 Herrmann 和 Ammon (2002) 发展的迭代阻尼最小二乘反演方法, 基于 CPS330 程序包 (Herrmann, 2013) 反演 S 波速度结构。在 S 波速度反演时, 将地壳设定成层厚为 0.5 km 的均匀模型。由于在均匀半空间的泊松体介质中, 瑞雷波相速度 c 与 S 波速度 V_s 的关系 (Shearer, 2009) 为

$$c = 0.92V_s. \quad (2)$$

据此可以近似估计 1/3 倍波长深度处的 S 波速度为 1.1 倍的相速度 (Fang et al., 2015)。基于所有台站对的平均频散曲线和上述经验关系, 构建了一个初始速度模型, 如图 5a 红色虚线所示。其中, 0~4 km 为基于平均频散曲线和经过适当平滑后的估计值, 7 km 以下采用固定值 $3.6 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 4~7 km 为平滑过渡。波速比为 1.7, 密度按 $2.8 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 进行初值处理, 反演过程中 V_p/V_s 保持不变, 密度按 Nafe-

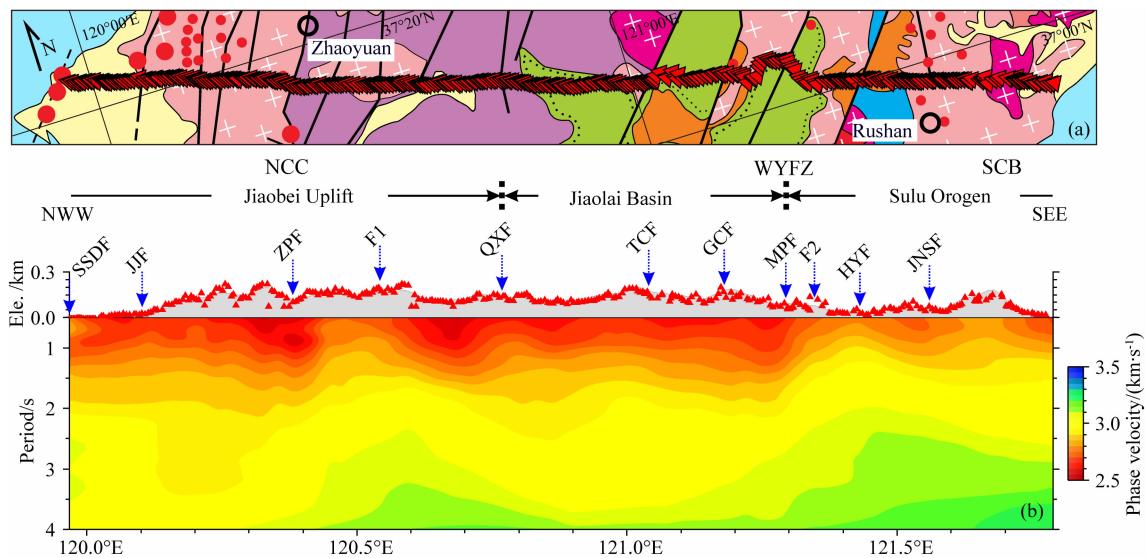


图4 相速度成像结果

(a) 地质简图; (b) 相速度剖面. NCC: 华北克拉通; SCB: 华南板块; SSDF: 三山岛断裂; JJF: 焦家断裂; ZPF: 招远—平度断裂; QXF: 栖霞断裂; TCF: 桃村断裂; GCF: 郭城断裂; MPF: 牟平断裂; HYF: 海阳断裂; JNSF: 金牛山断裂.

Fig. 4 Phase velocity imaging result

(a) Simplified geological map; (b) Phase velocity profile. NCC: North China Craton; SCB: South China Block; SSDF: Sanshandao fault; JJF: Jiaojia fault; ZPF: Zhaoping fault; QXF: Qixia fault; TCF: Taocun fault; GCF: Guocheng fault; MPF: Muping fault; HYF: Haiyang fault; JNSF: Jinniushan fault.

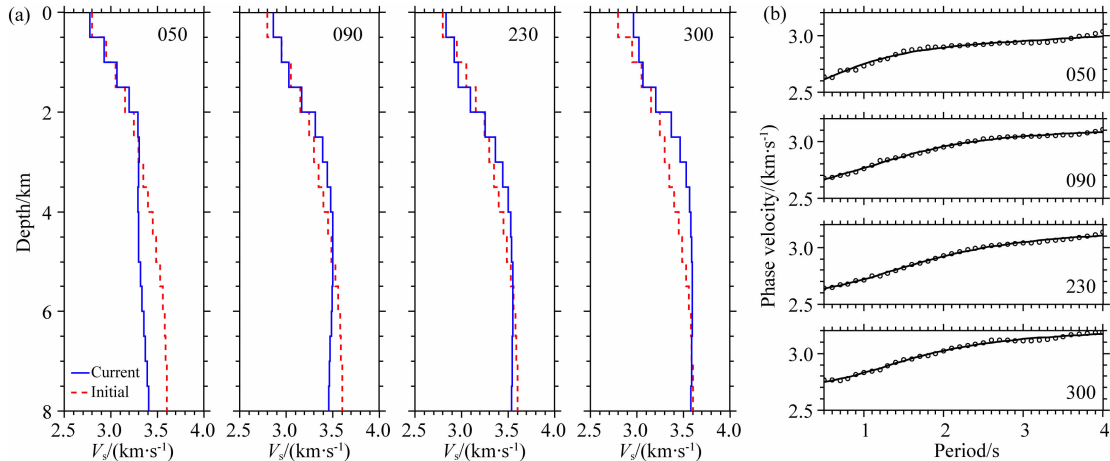


图5 部分台站 S 波速度反演结果

(a) 初始速度模型(红色虚线)和反演结果(蓝色实线); (b) 反演结果的频散曲线(黑色实线)与原始频散曲线(黑色圆圈)拟合情况.

050、090、230 和 300 四个台站的经度分别为 120.22°E、120.43°E、121.19°E 和 121.56°E.

Fig. 5 Inversion results of some example stations

(a) The initial velocity models (red dotted lines) and inversion results (blue solid lines); (b) The observed dispersion curves (black circles) and synthetic dispersion curves (black solid lines). Longitude of station 050, 090, 230 and 300 is 120.22, 120.43, 121.19, and 121.56, respectively.

Drake关系式进行更新. 图5a—b为部分台站的S波速度反演结果和频散曲线拟合情况, 整个剖面下方的S波速度结构如图6b所示. 反演过程中, 为保证反演的稳定性, 我们将反演深度设为15 km, 但如无特别说明, 一般仅展示0~8 km的反演结果.

3 结果

3.1 上地壳 S 波速度结构

基于S波速度反演, 我们获得了剖面下方的S

波速度结构(图 6b). 同时,为了突出 S 波速度的横向和垂向变化特征,我们又分别计算了相对 S 波速度扰动(图 6c)(每个网格点的速度相对于每一层平均速度的百分比)和垂向 S 波速度梯度(图 6d). 绝对 S 波速度图像显示,胶东地区沉积层普遍较薄,在约 1~2 km 深度处速度迅速增加;垂向 S 波速度梯度进一步清晰刻画了这一高速间断面,如图 6d 黄色虚线所示. 该间断面的主要特征与深地震测深的结果基本一致(潘素珍等, 2015). 推测该高速间断面可能是浅层沉积层、花岗岩风化层或太古宙基底风化层与深部致密基岩之间的速度间断面.

无论是相速度、S 波速度还是相对 S 波速度扰动,均清晰地显示五莲—烟台断裂带以东的苏鲁造山带上地壳速度整体偏高,与断裂带以西的胶北地体(包括胶莱盆地和胶北隆起)形成鲜明对比. 胶北隆起及其周缘存在一些呈铲状且高低速相间的异常条带(图 6c),并整体表现为 SE 倾向,与地表三山岛断裂和招平断裂为代表的主要拆离断层的倾向基本一致. 尽管由于分辨率的限制,速度异常条带较宽,

无法与实际拆离断层和地质体一一对应,但是 S 波垂向速度梯度显示(图 6d),胶西北地区基底/浅层高速间断面错断显著,且错断位置与地表断层出露位置吻合良好,这在一定程度上说明了本文反演结果的可靠性. 而五莲—烟台断裂带及其以东的苏鲁造山带,S 波垂向速度梯度未显示基底/浅层高速间断面有明显错断,但相速度、绝对 S 波速度、相对速度扰动均表现为显著的横向分块特征,且不同于胶西北地区倾斜的条带状速度异常. 此外,本文测线还经过了胶莱盆地,但仅位于盆地边缘,沉积层特征不显著,胶莱盆地上地壳的平均速度与胶北隆起相当. 但值得注意的是,栖霞断裂(QXF)和 F2 断裂下方的速度异常体倾向分别为 SE 和 NW(图 6c—d),其整体形态与胶莱盆地的凹陷特征对应,可能是盆地边缘的低角度拆离断层造成的.

3.2 反演结果的不确定性分析

由于本文采用的是线性台阵数据,因此无法开展标准的检测板试验. 但台阵近垂直于主要构造走向(NE-NNE),射线路径受速度结构横向非均匀性

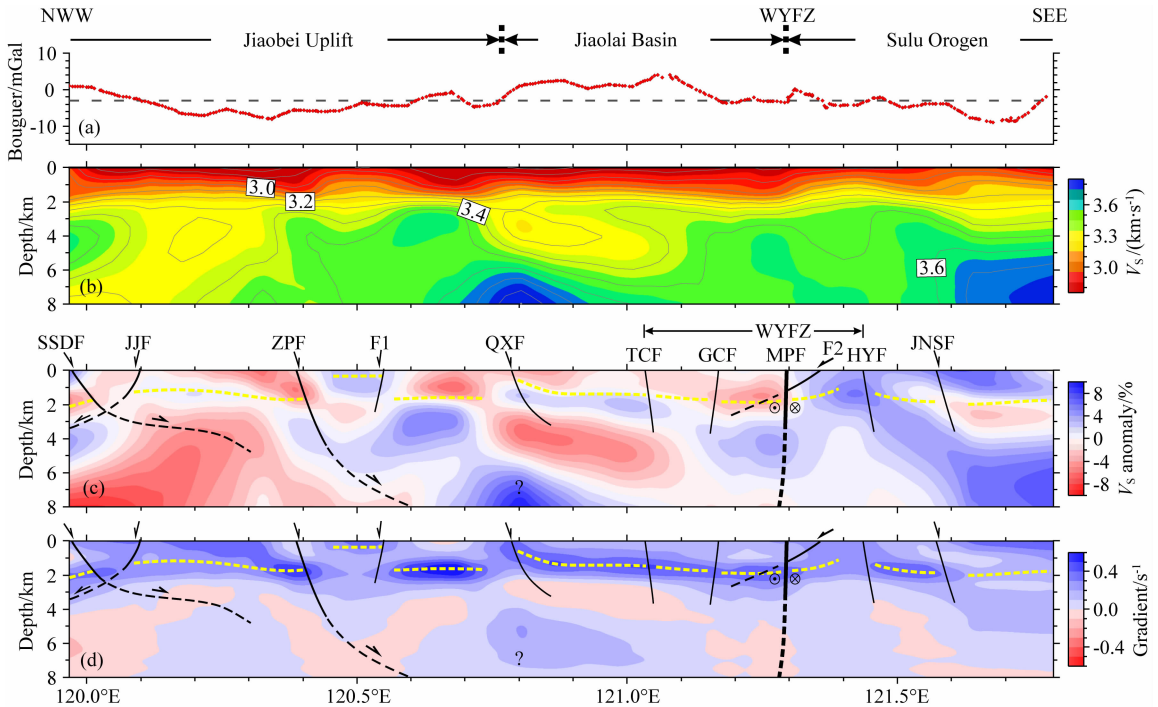


图 6 S 波速度成像结果

(a) 布格重力异常,数据来自 EGM2008 全球重力场模型,灰色虚线为平均值;(b) S 波速度剖面;(c) S 波速度扰动;(d) S 波垂向速度梯度,其中黑色实线表示地表观测到的主要断层,黑色虚线表示推测的断层,箭头表示拆离断层的运动方向,黄色虚线表示高速间断面.

Fig. 6 S-wave velocity imaging results

(a) Bouguer gravity anomalies using data from the EGM2008 global gravity model. Gray dashed line denotes the average value; (b) S-wave velocity profile; (c) S-wave velocity disturbances; (d) S-wave vertical velocity gradient profile. The black solid line denotes the main fault observed on the surface; the black dotted line denotes the predicted fault; the arrow denotes the movement direction of the detachment fault, and the yellow dashed line denotes the high-velocity discontinuity.

的影响较小,因此开展面波层析成像是可以保证测线下方速度结构受到有效约束的.为了分析本文线性台阵的横向分辨率,开展了如图7所示的检测板试验,检测板异常幅值为5%,异常条带为NE走向,与实际构造走向相近,且所有反演参数均与实际资料反演参数相同.检测板试验结果表明,0.5 s、1.5 s、2.5 s和3.5 s的相速度反演分别对 0.14° 、 0.17° 、 0.23° 和 0.31° 的异常有较好的分辨能力,尽管异常的走向无法有效约束,但测线下方的速度结构均得到了较好地恢复.由于S波速度是基于每个网格点的纯路径频散曲线反演得到的,因此S波速度反演与相速度反演的横向分辨率是相当的.S波相对速度扰动图像(图6c)显示,特征稳定的异常其最小横向尺度从浅至深一般在15~30km之间,因此我们的反演结果对主要异常的识别是满足分辨率要求的.

此外,为了分析初始速度模型对反演结果的影响,构建了三种不同的初始模型(图8a),分别是均一模型M1、线性变化模型M2和基于平均频散曲线估计的模型M3,并以090号台站为例,采用相同的反演参数进行反演.S波速度反演结果和频散曲线拟合情况如图8b—c所示,结果表明短周期面波信号反演对初始模型依赖较小,不同初始模型反演结果的相对误差基本在2%以内(仅在7.5 km以下,相对误差约3%),而主要异常体的相对速度扰动一般在2%以上(图6c),因此初始速度模型的选取基本不影响对主要速度异常体的反演和识别.

面波的垂向分辨率一般较低,且与频率有关,频

率越低则垂向分辨率越低.图9b为基于反演后的平均S波速度(图9a蓝色实线)计算的不同周期的Rayleigh波相速度敏感核函数.本文采用的相速度最长周期为4 s,敏感核函数显示该周期对5 km左右的地壳结构最敏感,5 km以下的分辨能力将随深度增加而逐渐降低.因此,初始速度模型如果存在系统性偏低或偏高的情况,可能会直接影响反演结果的特征.在当前相速度频带范围内(0.5~4 s),为进一步明确初始模型是从什么深度开始显著影响反演结果的,我们开展了如图10所示的Test1和Test2测试.为了便于分析,图10a展示了0~15 km的速度结构.在Test1中,真实模型在4 km以下为均一速度($3.6 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$),初始模型系统性偏低($3.4 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$),反演结果显示8 km以下速度开始呈下降特征;在Test2中,真实模型同Test1,但初始模型系统性偏高($3.8 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$),反演结果显示10 km以下速度开始呈上升特征.但无论初始模型偏低或偏高,5~8 km的速度结构均得到了较好的约束,因此本文提供8 km以浅的速度结构是合理的.此外,为了分析当深部确实存在高速异常体时反演结果的分辨能力,我们开展了如图10所示的Test3测试.在Test3中,6 km以下突变为高速,而初始模型系统性偏低,反演结果显示在6~8 km这一高速特征可以得到恢复,但由于面波分辨率有限,高速异常体的形态会变得比较平滑.综合考虑S波反演问题的上述各种不确定性后,本文将仅解释深部与浅部有较好连续性且规模较大的速度异常,对5 km以下突然出现的速度异常和剖面两端的速度异常均不做解释.

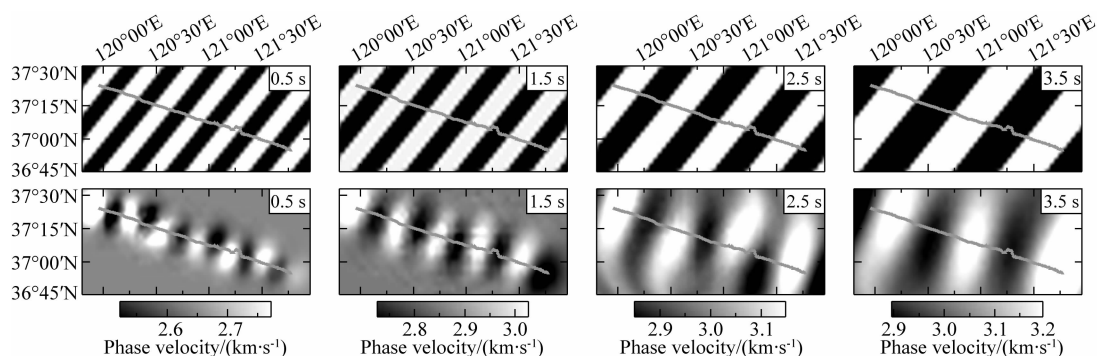


图7 相速度反演检测板试验

上面四幅图对应不同周期的输入模型,下面四幅图对应不同周期的输出模型.其中0.5 s、1.5 s、2.5 s和3.5 s周期对应的条带状异常的宽度分别为 0.14° 、 0.17° 、 0.23° 和 0.31° .灰色三角形表示台站.

Fig. 7 Checkboard resolution tests for phase velocity inversion

The above four maps correspond to input models of different periods, and the following four maps correspond to the output models. The width of banding anomalies of period 0.5 s, 1.5 s, 2.5 s and 3.5 s is 0.14° , 0.17° , 0.23° and 0.31° , respectively. Gray triangle denotes station.

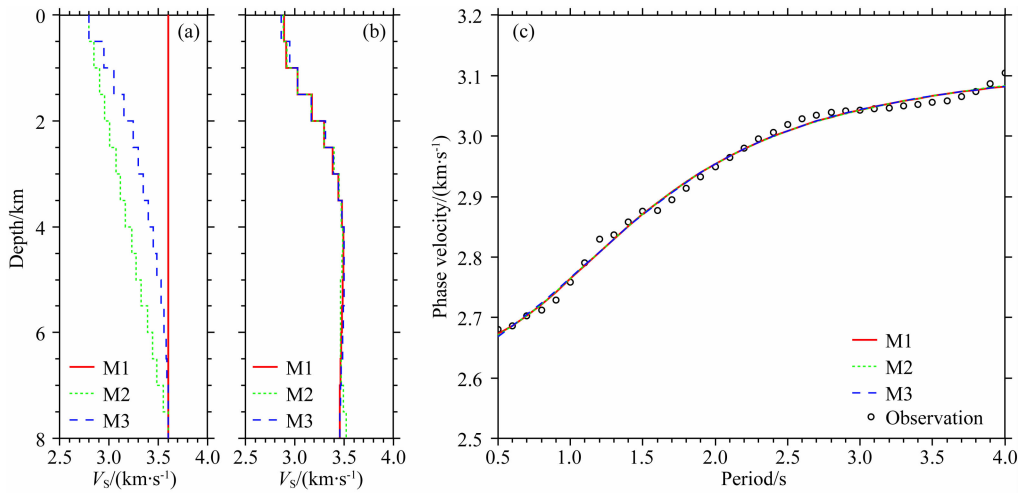


图 8 不同初始模型的反演结果比较

以 090 号台站为例。(a) 三种初始模型 M1、M2 和 M3；(b) 反演得到的速度模型；(c) 反演结果的频散曲线与原始频散曲线的拟合情况。

Fig. 8 Comparison of inversion results of different initial models

Station 090 is taken as an example. (a) Three different initial models M1, M2 and M3; (b) Corresponding inversion results;

(c) The observed dispersion curve and synthetic dispersion curves.

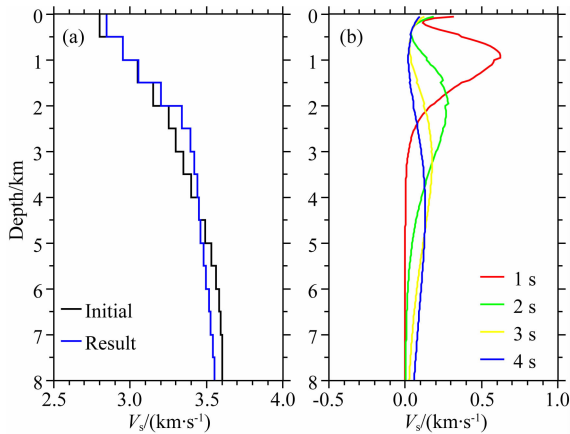


图 9 平均速度结构与敏感核函数

(a) 基于整个测线段的平均频散曲线估计得到的初始速度模型(黑色实线)和所有台站反演结果的平均速度模型(蓝色实线)；(b) 基于反演后的平均速度模型计算的不同周期的 Rayleigh 波相速度敏感核函数。

Fig. 9 Average velocity structure and sensitive kernel function

(a) The initial velocity model (black solid line) obtained based on an average dispersion curve of the whole survey line and the average velocity model of inversion results (blue solid line). (b) Sensitive kernels of Rayleigh wave phase velocities at different period based on the average velocity model of inversion results.

4 讨论

4.1 与前人研究结果对比

胶东及邻区已开展了许多壳幔深部结构成像研

究,但跨主要矿集区的测线较少,主要以宽角反射/折射地震探测(潘素珍等, 2015)和大地电磁测深(Zhang et al., 2018)剖面为代表. 尽管这些剖面的分辨率十分有限,但其所揭示的浅层地壳结构与地表地质的观测结果是一致的,具有重要参考意义. 其中宽角反射/折射地震探测结果表明,胶东地区地表速度整体偏高,基底埋深普遍较浅,从东到西呈逐渐变浅趋势,且苏鲁造山带上地壳 P 波速度较胶莱盆地和胶北隆起偏高. 这些特征与本文基于短周期密集台阵的背景噪声成像结果是一致的,其区别主要在于宽角反射/折射地震探测方法是基于初至波层析成像来获得浅地表的平均速度结构,横向分辨率有限,无法精细刻画断层两侧速度结构的快速横向变化,而本文利用短周期面波成像具有横向分辨率高的特点,并通过求取垂向 S 波速度梯度,清晰地刻画了主要断层附近基底/浅层高速间断面的起伏变化,对于识别断层的位移特征以及进一步区分断层的伸展拆离性质或走滑性质具有重要意义. 大地电磁测深结果则建立了胶东地区中上地壳的电阻率模型,其近地表的高导异常与三山岛、焦家、招平、栖霞、五莲—烟台等主要断裂带对应关系良好,并且电阻率剖面显示这些断层最终均汇聚到中地壳高导层. 大地电磁测深方法对高导体比较敏感,其对主要断层的识别与本文的成像结果是一致的,但由于垂向分辨率有限,难以刻画基底形态等.

高分辨率的地壳结构成像以跨三山岛、焦家和招平等断裂带的反射地震剖面为代表(Yu et al.,

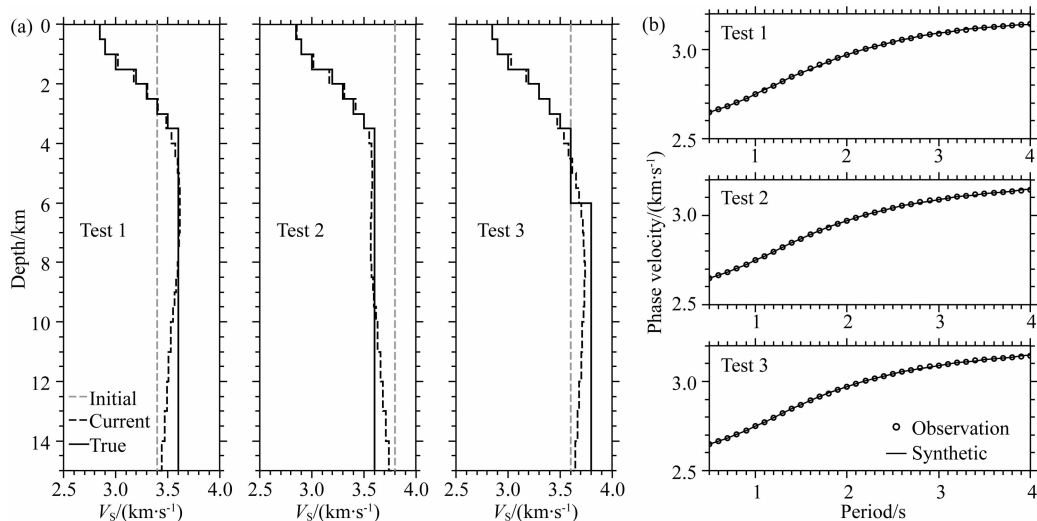


图 10 5 km 以下的深部结构分辨率测试

(a) 真实模型(黑色实线)、初始反演模型(灰色虚线)和反演结果(黑色虚线); (b) 反演结果的频散曲线(黑色实线)与原始频散曲线(黑色圆圈)的拟合情况. Test1、Test2 和 Test3 分别对应三种不同的真实模型和初始模型的组合.

Fig. 10 Resolution test of deep structures below 5 km

(a) The real models (black solid lines), initial models for inversion (gray dotted lines) and inversion results (black dotted lines).
(b) The observed dispersion curves (black circles) and synthetic dispersion curves (black solid lines). Test1, Test 2 and Test 3 correspond to three different combinations of real and initial models, respectively.

2018), 成像结果表明三山岛断裂和招平断裂带为 SE 倾向, 焦家断裂为 NW 倾向, 其中三山岛断裂和焦家断裂在深部倾斜相交, 玲珑岩体浅层发育大量 X 状共轭断层, 并与深部超壳走滑断层相连接. 上述认识与本文的成像结果是一致的, 但由于地震勘探方法成本高, 测线仅限于胶西北矿集区. Li 等(2018)基于宽频固定台站数据和背景噪声成像方法, 已经获得了胶东地区 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 分辨率的 S 波速度结构, 并主要揭示了蓬莱和沂沭断裂带新生代玄武岩下方的下地壳和上地幔顶部低速异常特征, 但受限于台站分布(平均台间距 50 km 左右), 浅地表分辨率较低.

4.2 胶东 S 波速度结构与控矿构造

如前所述, 胶东地区存在胶西北与牟乳两个成矿集中区, 其中胶西北矿集区内大型—超大型金矿主要沿三山岛、焦家、招平等主要断裂带分布, 而牟乳成矿带内矿床则主要沿五莲—烟台断裂带和金牛山断裂发育. 地质研究业已证明, 这些断裂均是岩浆和成矿热液上涌的通道, 为金的运移、富集和沉淀提供了有利空间(宋明春, 2015; 宋明春等, 2018). 然而, 这一认识主要基于地表地质与钻孔资料及少量的浅层地震勘探资料, 对控矿断裂的深部延伸与发育情况尚不明确.

本文的 S 波速度结构显示, 胶西北地区的断裂倾角均较小, 并以 SE 倾向的三山岛断裂和招平断

裂为代表(NW 倾向的焦家断裂缺乏数据覆盖), 断层上下盘的基底/浅层高速间断面位错显著, 表明这些断层为大规模的伸展拆离断层. 同时, S 波速度结构还显示胶西北下方存在缓倾斜的条带状低速异常, 我们将其解释为低角度断层构造. 这一解释也得到前人大地电磁剖面中相同位置处高导异常(Zhang et al., 2018)的支持. 我们推测, 造成 S 波局部低速异常的原因可能是断层在伸展背景下的岩石破碎或流体蚀变等. 此外, 浅部拆离断层有向中地壳继续延伸和倾角变缓的趋势. 地质研究表明, 拆离断层一般发育在中地壳脆韧性过渡带(Davis, 1983), 大地电磁资料也显示这些拆离断层向深部达到中地壳高层. 因此我们推测以招平断裂为代表的大型拆离断层可能最终汇聚于脆韧性过渡带, 在晚中生代为中下地壳的岩浆和成矿热液上涌提供了重要通道. 另外值得注意的是, 胶西北地区的 S 波速度结构非均一性很强, 在以 SE 倾向为主体的背景下还存在大量 NW 倾向的次级构造, 特别是在胶西北矿集区的玲珑金矿田内部及周围, 并整体表现为横剖面上的 X 状共轭断层, 与反射地震的浅层结构特征一致(Yu et al., 2018).

牟乳成矿带浅部地壳结构特征与胶西北地区明显不同, 主要表现在两个方面. 一是五莲—烟台断裂带两侧, 基底/浅层高速间断面无显著错断, 即主要断裂(包括桃村断裂、郭城断裂、牟平断裂和海阳断

裂)的上下盘无明显位错;二是基底/浅层高速间断面以下,速度结构具有显著的横向分块特征.对于前者,我们认为可能是早白垩世胶莱断陷盆地形成之后,五莲—烟台断裂带仅经历了小规模的右行走滑作用(晚白垩世—古近纪),因此现今的浅地表仍保持了相对稳定的沉积盆地特征.对于后者,即沉积层以下速度结构的横向分块特征,推测可能是晚侏罗世左行走滑(大倾角)造成的横向岩性差异或苏鲁造山带与胶北地体块体拼贴前原有岩性差异(超高压变质岩与前寒武纪变质岩之间的差异)的反应.综合本文成像结果及前人有关地质地球物理资料,我们认为五莲—烟台断裂带在牟乳成矿带地区主要表现为一条具有走滑性质的断裂带.此外,成像结果(图 6c—d)还模糊地刻画出以 F2 为代表的拆离断层(该断层是蓬家乔金矿的低角度控矿拆离断层,位于胶莱盆地与变质基底结合部位),但其规模很小.

我们的研究结果还表明,胶东地区的速度结构存在着区域性差异,表现为五莲—烟台断裂带以东的苏鲁造山带的 S 波速度比其西侧的胶北隆起明显偏高.导致这一区域性速度差异的原因可能主要有两个方面.首先是两个地区地质体的性质不同.由于速度一般与密度呈正相关,所以胶北隆起浅部地壳 S 波速度整体偏低,可能暗示该隆起上岩石的密度整体比苏鲁造山带岩石低.这一结论与胶北隆起布格重力异常较苏鲁造山带明显偏低(图 6a)的事实是吻合的.地质研究表明,尽管胶北隆起和苏鲁造山带均大范围出露中生代花岗岩(图 1),但前者还出露大规模的前寒武基底,而后者发育高压—超高压变质岩类.与前寒武纪其他类型变质岩相比,以榴辉岩为代表的高压—超高压变质岩具有更高的密度(Zhao et al., 2011),亦即具高的 S 波速度,因此苏鲁造山带发育的大规模高压—超高压变质岩可能是造成其上地壳 S 波速度整体偏高的主要原因之一.其次,构造差异可能是两个地区 S 波速度差异的另一控制因素.胶西北地区拆离断层的规模及其引起的破碎带的规模,可能要远大于苏鲁造山带的走滑断层及其破碎带的规模,因此胶北隆起的 S 波速度比苏鲁造山带整体偏低.

4.3 对区域性成矿差异的启示

作为我国最大的黄金基地,胶东地区的金矿化极不均匀,存在着明显的区域性差异.以本文短周期密集台阵剖面横跨的胶西北矿集区和牟乳成矿带为例,前者中金矿床数量多、规模大,总体矿化高度集中,其探明金矿储量占胶东金矿总储量的 2/3 以上

(Fan et al., 2003; 宋明春, 2015),而后者不论是矿床数量、规模还是金矿储量方面均明显偏小、偏少.尽管地质学家已经从围岩、岩浆、流体和构造等角度对胶东金成矿开展了大量研究(卢冰等, 1995; Qiu et al., 2002; Fan et al., 2003; Yang et al., 2003; Mao et al., 2008; Deng et al., 2014; Li et al., 2015; Song et al., 2015; Yang and Santosh, 2015),但目前对这一区域性成矿差异的原因并不十分清晰.

研究业已表明,胶西北矿集区和牟乳成矿带具有相同的成矿构造背景,即两者均处于西太平洋活动大陆边缘,其中的金矿床均形成于早白垩世(130~120 Ma),同时成矿过程与华北克拉通破坏过程中的岩石圈减薄作用具有高度的时空耦合关系(Yang et al., 2003; 朱日祥等, 2015),因此两者的成矿动力学机制也应该是相同或相似.另一方面,两个矿集区均经历了中生代强烈的岩浆活动,且岩浆作用的规模和类型也是相同或相似的,即两地区均发育大规模中生代花岗岩类侵入体及煌斑岩脉,其中的花岗岩类均主要形成于两个阶段:晚侏罗世地壳重熔型花岗岩和早白垩世壳幔混合型花岗岩(吴福元等, 2007; 张田和张岳桥, 2007);这些岩浆岩类,特别是煌斑岩脉被认为与金成矿具有密切的时空及成因联系(刘辅臣等, 1984; 季海章等, 1992; 罗振宽等, 2001; 申玉科等, 2005).胶西北与牟乳两个矿集区的上述共性,表明成矿大地构造背景与岩浆作用可能并不是导致胶东地区成矿区域性差异的主要原因.

矿床学研究揭示,胶西北与牟乳两个矿集区的金矿化也存在一定的差异.一方面,两地区的金矿化类型存在差别.胶西北矿集区以蚀变岩型矿化与石英脉型矿化并存且以蚀变岩型为主,而牟乳矿集区(带)则以石英脉型矿化为主要特征,蚀变岩型矿化几乎不发育(Li et al., 2015; Song et al., 2015).另一方面,两地区的控矿断裂性质与产状存在明显差异.胶西北地区金矿床主要受控于中低角度的韧性剪切带(拆离断层),尽管也有部分金矿床(如东部的珑玲金矿)受控于中高角度的脆性断裂,而牟乳成矿带金矿床则受控于高角度的脆性断裂(杨立强等, 2014; 宋明春, 2015).这一特征与本文浅层地壳结构的成像结果所揭示的两地区控矿断裂深部发育特征相吻合,即胶西北地区发育大规模拆离断层,且倾角向深部有更缓的趋势,并可能与中地壳脆韧性过渡带相连;东部的牟乳成矿带控矿的主要高角度脆

性断裂在深部仍具有高角度发育特征,并没有变缓的趋势(图 6).此外,我们的成像结果反映,在牟乳成矿带尽管也发育低角度正断层,但其规模很小(如胶莱盆地北缘的层间滑脱带),对成矿的贡献可能不大.再者,两个矿集区的变质岩类型也存在一定的差异.胶西北地区的变质岩类为以太古代胶东群为代表的角闪岩相或麻粒岩相变质岩(Liu et al., 2013),而牟乳矿集区则发育以早中生代榴辉岩相为主的高压—超高压变质岩.

尽管上述这些不同之处均可能造成胶东地区两个主要矿集区成矿的区域性差异,但我们认为两者控矿构造的差别应该是主控因素.这主要有两方面的原因.一是矿化类型的不同是断裂带内赋矿空间多样化的表现.蚀变岩型矿化以成矿流体充填弥散型空间(裂隙)为特征,交代蚀变作用强烈,故形成浸染状-细脉浸染状矿石,而石英脉型矿化则以成矿流体充填大的连续空间(裂隙)为特色,充填作用主导下形成石英脉型矿石.实际上,赋矿空间的差异又是构造作用的产物,换言之,金矿化类型的不同同样是受构造作用控制的.第二,控矿断裂的规模及产状直接控制着破碎蚀变带的规模及产状.研究与勘探实践均表明,在胶东地区,尽管石英脉型矿石的品位总体上要比蚀变岩型高,但是后者的规模巨大,故其储量在胶东地区占主导地位.我们的成像结果及前人研究共同表明,胶西北矿集区大规模的矿床均主要产于三山岛、焦家和招平三条大规模低角度拆离断层带中,且均以蚀变岩型矿化为主,而牟乳成矿带的矿床主要产在高角度走滑断裂带内,以石英脉型矿化为主.这些特征清楚地说明,两者控矿构造差异直接控制着两地区的成矿差异性.

至于两个矿集区变质岩类型的差异对胶东地区成矿差异性的贡献,我们认为应该非常有限,因为大量的研究表明胶东金矿床与晚中生代的花岗岩类侵入体和煌斑岩脉等有成因关系(刘辅臣等, 1984; 季海章等, 1992; 罗振宽等, 2001; 申玉科等, 2005; Mao et al., 2008; Li et al., 2015; Yang and Santosh, 2015),是混合成因流体直接作用产物,与变质岩的类型及变质相没有直接关系.需要说明的是:胶东巨量金成矿的形成机制非常复杂,本文仅尝试从矿集区浅部地壳结构所揭示的构造产状、规模和类型等与金矿分布的关系宏观角度做了粗浅探讨,具体机理尚需地质地球化学与地球物理学等多学科的进一步综合研究.

简言之,胶东地区上地壳 S 波成像结果所揭示

的胶西北和牟乳两个矿集区控矿构造的不同应该是造成两地区存在成矿差异性的主控因素.

5 结论

基于短周期密集台阵背景噪声成像研究,我们获得了胶东地区的上地壳 S 波速度结构,得出了以下初步结论:

(1)胶东地区沉积层普遍较薄,基底平均深度为 1~2 km 左右,垂向 S 波速度梯度显示基底/浅层高速度断面错断位置与主要断层出露位置基本一致,且其位错特征有助于区断层的性质.

(2)胶西北地区主要受控于以三山岛断裂和招平断裂为代表的低角度拆离断层,S 波相对速度扰动显示沿主要拆离断层发育以 SE 倾向为主的条带状低速异常,可能与拆离断层在伸展背景下的岩石破碎或流体蚀变有关.

(3)牟乳成矿带主要受控于五莲—烟台断裂带和金牛山断裂,该成矿带及其以东的苏鲁造山带 S 波速度整体表现为横向分块特征,指示主要控矿断裂为高角度的走滑断裂;苏鲁造山带平均速度偏高,可能与高压—超高压变质岩的分布和伸展程度相对较低有关.

(4)相比牟乳成矿带的高角度脆性控矿断裂,胶西北地区低角度的大型拆离断层的规模更大,更有利于形成大规模的蚀变岩型矿化;控矿构造的不同可能是造成胶东成矿区域性差异的主控因素.

致谢 感谢中国科学院地质与地球物理研究所短周期地震实验室的野外数据采集工作;感谢中国科学院地质与地球物理研究所郑天愉研究员、杨进辉研究员、陈凌研究员、林伟研究员、苗来成研究员,以及合肥工业大学朱光教授的指导和建设性意见,稿件水平得以很大提升.

References

- Ai Y S, Zheng T Y. 2003. The upper mantle discontinuity structure beneath eastern China. *Geophysical Research Letters*, 30(21): 2089, doi: 10.1029/2003GL017678.
- Bensen G D, Ritzwoller M H, Barmin M P, et al. 2007. Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements. *Geophysical Journal International*, 169(3): 1239-1260.
- Campillo M, Roux P. 2015. Crust and lithospheric structure- Seismic imaging and monitoring with ambient noise correlations.

- Treatise on Geophysics* (Second Edition), 1: 391-417, doi:10.1016/B978-0-444-53802-4.00024-5. Chen L, Zheng T Y, Xu W W. 2006. A thinned lithospheric image of the Tanlu fault zone, Eastern China: constructed from wave equation based receiver function migration. *Journal of Geophysics Research: Solid Earth*, 111(B9): B09312, doi: 10.1029/2005JB003974.
- Davis G H. 1983. Shear-zone model for the origin of metamorphic core complexes. *Geology*, 11(6): 342-347.
- Deng J, Liu X F, Wang Q F, et al. 2014. Origin of the Jiaodong-type Xinli gold deposit, Jiaodong Peninsula, China: Constraints from fluid inclusion and C-D-O-Sr isotope compositions. *Ore Geology Reviews*, 65(3): 674-686, doi: 10.1016/j.oregeorev.2014.04.018.
- Fan H R, Zhai M G, Xie Y H, et al. 2003. Ore-forming fluids associated with granite-hosted gold mineralization at the Sanshandao deposit, Jiaodong gold province, China. *Miner. Depos.*, 38: 739-750. <https://doi.org/10.1007/s00126-003-0368-x>.
- Fang H J, Yao H J, Zhang H J, et al. 2015. Direct inversion of surface wave dispersion for three-dimensional shallow crustal structure based on ray tracing: methodology and application. *Geophysical Journal International*, 201(3): 1251-1263.
- Goldfarb R J, Santosh M. 2014. The dilemma of the Jiaodong gold deposits: Are they unique? *Geoscience Frontiers*, 5(1): 139-153.
- Herrmann R B, Ammon C J. 2002. Surface waves, receiver functions and crustal structure, in *Computer Programs in Seismology*. Saint Louis University.
- Herrmann R B. 2013. Computer programs in seismology: An evolving tool for instruction and research. *Seismological Research Letters*, 84(6): 1081-1088.
- Huo G H, Luo W. 1993. A discussion on the structural features of the Jiaonan terrain based on the geophysical data. *Geology of Shandong* (in Chinese), 9(2): 45-51.
- Ji H Z, Zhao Y Y, Lu B, et al. 1992. On the relation of lamprophyre to gold ore in the Jiaodong area. *Geology and Prospecting* (in Chinese), 28(2): 15-18.
- Li C, Yao H J, Fang H J, et al. 2016a. 3D near-surface shear-wave velocity structure from ambient-noise tomography and borehole data in the Hefei Urban Area, China. *Seismological Research Letters*, 87(4): 882-892, doi: 10.1785/0220150257.
- Li C L, Chen C X, Dong D D, et al. 2018. Ambient noise tomography of the Shandong province and its implication for Cenozoic intraplate volcanism in eastern China. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 19(9): 3286-3301, doi: 10.1029/2018GC007515.
- Li H K, Zhuo C Y, Gen K, et al. 2012. Study on tectonic background of gold mineralization in Jiaodong area. *Shandong Land and Resources* (in Chinese), 28(1): 5-13.
- Li J L, Zhang Y Q, Liu Z Q, et al. 2007. Sedimentary-subsidence history and tectonic evolution of the Jiaolai basin, eastern China. *Geology in China* (in Chinese), 34(2): 240-250.
- Li L, Santosh M, Li S R. 2015. The 'Jiaodong type' gold deposits: Characteristics, origin and prospecting. *Ore Geology Reviews*, 65(2): 589-611, doi: 10.1016/j.oregeorev.2014.06.021.
- Li S G, Xiao Y L, Liou D L, et al. 1993. Collision of the North China and Yangtze Blocks and formation of coesite-bearing eclogites: timing and processes. *Chemical Geology*, 109(1-4): 89-111.
- Li W, Ma F S, Lu X P, et al. 2019. Analysis of geological structure of submarine mining area based on 3D seismic exploration. *Gold Science and Technology* (in Chinese), 27(4): 530-538.
- Li Z W, Ni S D, Zhang B L, et al. 2016b. Shallow magma chamber under the Wudalianchi Volcanic Field unveiled by seismic imaging with dense array. *Geophysical Research Letters*, 43(10): 4954-4961, doi: 10.1002/2016GL068895.
- Lin W, Faure M, Wang Q C. 2003. Mesozoic geometry and kinematics in the Jiaodong peninsula and its tectonic evolution. *Chinese Journal of Geology* (in Chinese), 38(4): 495-505, 518.
- Liu F C, Lu Z X, Fan Y X, et al. 1984. On the relation between intermediate-basic dykes and mineralization in Linglong gold ore field. *Earth Science—Journal of Wuhan College of Geology* (in Chinese), 9(4): 37-46.
- Liu J H, Liu F L, Ding Z J, et al. 2013. The growth, reworking and metamorphism of early Precambrian crust in the Jiaobei terrane, the North China Craton: Constraints from U-TH-Pb and Lu-Hf isotopic systematics, and REE concentrations of zircon from Archean granitoid gneisses. *Precambrian Research*, 224: 287-303.
- Lu B, Hu S X, Zhou S Z. 1995. Terrane tectonics and tectonic setting of gold deposits in the Shandong peninsula. *Geological Review* (in Chinese), 41(1): 7-14.
- Luo Z K, Guan K, Miao L C. 2001. Discussion on relationship between lamprophyre veins and mineralization in the Linglong gold field, eastern Shandong. *Gold Geology* (in Chinese), 7(4): 15-21.
- Ma X Y, Liu C Q, Liu G D. 1991. Xiangshui (Jiangsu province) to Mandal (Nei Mon-GGOL) geoscience transect. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), (3): 199-215.
- Mao J W, Wang Y T, Li H M, et al. 2008. The relationship of mantle-derived fluids to gold metallogenesis in the Jiaodong Peninsula: Evidence from D-O-C-S isotope systematics. *Ore Geology Reviews*, 33(3-4): 361-381, doi: 10.1016/j.oregeorev.2007.01.003.
- Meng Y F, Yao H J, Wang X Z, et al. 2019. Crustal velocity structure and deformation features in the central-southern segment of Tanlu fault zone and its adjacent area from ambient noise tomography. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 62(7): 2490-2509, doi: 10.6038/cjg2019M0189.
- Montagner J P, Nataf H C. 1986. A simple method for inverting the azimuthal anisotropy of surface waves. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 91(B1): 511-520.
- Pan S Z, Wang F Y, Zheng Y P, et al. 2015. Crustal velocity structure beneath Jiaodong Peninsula and its tectonic implications. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 58(9): 3251-3263,

- doi: 10.6038/cjg20150920.
- Qiu Y M, Groves D I, McNaughton N J, et al. 2002. Nature, age, and tectonic setting of granitoid-hosted, orogenic gold deposits of the Jiaodong Peninsula, eastern North China Craton, China. *Mineralium Deposita*, 37(3): 283-305, doi: 10.1007/s00126-001-0238-3.
- Roux P, Moreau L, Lecointre A, et al. 2016. A methodological approach towards high-resolution surface wave imaging of the San Jacinto Fault Zone using ambient-noise recordings at a spatially dense array. *Geophysical Journal International*, 206(2): 980-992.
- Sabra K G, Gerstoft P, Roux P, et al. 2005. Extracting time-domain Green's function estimates from ambient seismic noise. *Geophysical Research Letters*, 32(3): L03310, doi: 10.1029/2004GL021862.
- Schwab F A, Knopoff L. 1972. Fast surface wave and free mode computations. *Methods in Computational Physics: Advances in Research and Applications*, 11: 87-180.
- Shearer P M. 2009. Introduction to Seismology. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press.
- Shen Y K, Deng J, Xu Y B. 2005. Geological significance of lamprophyre during gold mineralization in the Linglong ore field. *Geology and Prospecting* (in Chinese), 41(3): 45-49.
- Song M C. 2015. The main achievements and key theory and methods of deep-seated prospecting in the Jiaodong gold concentration area, Shandong Province. *Geological Bulletin of China* (in Chinese), 34(9): 1758-1771.
- Song M C, Li S Z, Santosh M, et al. 2015. Types, characteristics and metallogenesis of gold deposits in the Jiaodong Peninsula, Eastern North China Craton. *Ore Geology Reviews*, 65(3): 612-625, doi: 10.1016/j.oregeorev.2014.06.019.
- Song M C, Song Y X, Ding Z J, et al. 2018. Jiaodong gold deposits: essential characteristics and major controversy. *Gold Science and Technology* (in Chinese), 26(4): 406-422.
- Tarantola A, Valette B. 1982. Generalized nonlinear inverse problems solved using the least squares criterion. *Review of Geophysics*, 20(2): 219-232.
- Wang W T, Ni S D, Wang B S. 2012. Studies on a persistent localized microseism source that produces precursors on noise correlation function observed using stations in central-eastern China. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 55(2): 503-512, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2012.02.013.
- Wu F Y, Li X H, Yang J H, et al. 2007. Discussions on the petrogenesis of granites. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 23(6): 1217-1238.
- Xu Z Q, Yang W C, Ji S C, et al. 2009. Deep root of a continent-continent collision belt: Evidence from the Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) deep borehole in the Sulu ultrahigh-pressure (HP-UHP) metamorphic terrane, China. *Tectonophysics*, 475(2): 204-219.
- 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 Reviews*, 23(3-4): 125-152.
- Yang L Q, Deng J, Wang Z L, et al. 2014. Mesozoic gold metallogenic system of the Jiaodong gold province, eastern China. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 30(9): 2247-2467.
- Yang Q Y, Santosh M. 2015. Early Cretaceous magma flare-up and its implications on gold mineralization in the Jiaodong Peninsula, China. *Ore Geology Reviews*, 65: 626-642, doi: 10.1016/j.oregeorev.2014.01.004.
- Yang W C. 2002. Geophysical profiling across the Sulu ultra-high-pressure metamorphic belt, eastern China. *Tectonophysics*, 354(3-4): 277-288, doi: 10.1016/S0040-1951(02)00386-4.
- Yang Y J, Ritzwoller M H, Levshin A L, et al. 2007. Ambient noise Rayleigh wave tomography across Europe. *Geophysical Journal International*, 168(1): 259-274.
- Yao H J, Van Der Hilst R D, De Hoop M V. 2006. Surface-wave array tomography in SE Tibet from ambient seismic noise and two-station analysis-I. Phase velocity maps. *Geophysical Journal International*, 166(2): 732-744.
- Yao H J, Van Der Hilst R D, Montagner J P. 2010. Heterogeneity and anisotropy of the lithosphere of SE Tibet from surface wave array tomography. *Journal of Geophysics Research: Solid Earth*, 115(B12): B12307, doi: 10.1029/2009JB007142.
- Yin A, Nie S Y. 1993. An indentation model for the North and South China collision and the development of the Tan-Lu and Honam Fault Systems, eastern Asia. *Tectonics*, 12(4): 801-813.
- Yu X F, Shan W, Xiong Y X, et al. 2018. Deep structural framework and genetic analysis of gold concentration areas in the northwestern Jiaodong Peninsula, China: A new understanding based on high-resolution reflective seismic survey. *Acta Geologica Sinica*, 92(5): 1823-1840.
- Zeng X F, Ni S D. 2011. Correction to "A persistent localized microseismic source near the Kyushu Island, Japan". *Geophysical Research Letters*, 38(16): L16320, doi: 10.1029/2011GL048822.
- Zhai M G, Guo J H, Wang Q C, et al. 2000. Division of petrological-tectonic units in the Northern Sulu ultra-high pressure zone: An example of thick-skin thrust of crystalline units. *Scientia Geologica Sinica* (in Chinese), 35(1): 16-26.
- Zhang B L, Su Y P, Zhang G L, et al. 2017. Predicting method of typical ore-bearing tectonic lithofacies zones by integrated geological-geophysical information and its prospecting practice in eastern Shandong, China. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 24(2): 85-94.
- Zhang K, Lü Q T, Yan J Y, et al. 2018. Crustal structure beneath the Jiaodong Peninsula, North China, revealed with a 3D inversion model of magnetotelluric data. *Journal of Geophysics and Engineering*, 15(6): 2442-2454.
- Zhang T, Zhang Y Q. 2007. Geochronological sequence of Mesozoic intrusive Magmatism in Jiaodong Peninsula and its tectonic constraints. *Geological Journal of China Universities* (in Chinese), 13(2): 323-336.
- Zhang Y Q, Dong S W, Shi W. 2003. Cretaceous deformation

- history of the middle Tan-Lu fault zone in Shandong Province, eastern China. *Tectonophysics*, 363(3-4): 243-258, doi: 10.1016/S0040-1951(03)00039-8.
- Zhang Y Q, Li J L, Zhang T, et al. 2007. Late mesozoic kinematic history of the muping-jimo fault zone in Jiaodong Peninsula, Shandong Province, East China. *Geological Review* (in Chinese), 53(3): 289-300.
- Zhao Z, Niu Y, Christensen N I, et al. 2011. Delamination and ultra-deep subduction of continental crust: constraints from elastic wave velocity and density measurement in ultrahigh-pressure metamorphic rocks. *Journal of Metamorphic Geology*, 29(7): 781-801.
- Zheng T Y, Zhao L, Xu W W, et al. 2008. Insight into modification of North China Craton from seismological study in the Shandong Province. *Geophysical Research Letters*, 35(22): L22305, doi: 10.1029/2008GL035661.
- Zhong Z Q, Suo S T, Zhang H F, et al. 2001. Major constituents and texture of the Tongbai-Dabie collisional orogenic belt. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences* (in Chinese), 26(6): 560-567.
- Zhou J B, Wilde S A, Zhao G C, et al. 2008. SHRIMP U-Pb zircon dating of the Wulian complex: Defining the boundary between the North and South China Cratons in the Sulu Orogenic Belt, China. *Precambrian Research*, 162(3-4): 559-576, doi: 10.1016/j.precamres.2007.10.008.
- Zhou J B, Han W, Song M C. 2016. The exhumation of the Sulu Terrane and the forming of the Tancheng-Lujiang Fault: Evidence from detrital zircon U-Pb dating of the Mesozoic sediments of the Laiyang Basin, Central China. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 32(4): 1171-1181.
- Zhu R X, Fan H R, Li J W, et al. 2015. Decratonic gold deposits. *Science China Earth Sciences*, 58(9): 1523-1537, doi: 10.1007/s11430-015-5139-x.
- 质结构分析. 黄金科学技术, 27(4): 530-538.
- 林伟, Faure M, 王清晨. 2003. 胶东半岛中生代构造演化的几何学和运动学. 地质科学, 38(4): 495-505, 518.
- 刘辅臣, 卢作祥, 范永香等. 1984. 玲珑金矿中基性脉岩与矿化关系探讨. 地球科学—武汉地质科学院学报, 9(4): 37-46.
- 卢冰, 胡受奚, 周顺之等. 1995. 山东半岛的地体构造及金矿成矿的区域地质背景. 地质评论, 41(1): 7-14.
- 罗镇宽, 关康, 苗来成. 2001. 胶东玲珑金矿田煌斑岩脉与成矿关系的讨论. 黄金地质, 7(4): 15-21.
- 马杏垣, 刘昌铨, 刘国栋. 1991. 江苏响水至内蒙古满都拉地学断面. 地质学报, (3): 199-215.
- 孟亚锋, 姚华建, 王行舟等. 2019. 基于背景噪声成像方法研究郯庐断裂带中南段及邻区地壳速度结构与变形特征. 地球物理学报, 62(7): 2490-2509, doi: 10.6038/cjg2019M0189.
- 潘素珍, 王夫运, 郑彦鹏等. 2015. 胶东半岛地壳速度结构及其构造意义. 地球物理学报, 58(9): 3251-3263, doi: 10.6038/cjg20150920.
- 申玉科, 邓军, 徐叶兵. 2005. 煌斑岩在玲珑金矿田形成过程中的地质意义. 地质与勘探, 41(3): 45-49.
- 宋明春. 2015. 胶东金矿深部找矿主要成果和关键理论技术进展. 地质通报, 34(9): 1758-1771.
- 宋明春, 宋英昕, 丁正江等. 2018. 胶东金矿床: 基本特征和主要争议. 黄金科学技术, 26(4): 406-422.
- 王伟涛, 倪四道, 王宝善. 2012. 中国中东部地震台阵噪声互相关函数中面波前驱信号的分析研究. 地球物理学报, 55(2): 503-512, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2012.02.013.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉等. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题. 岩石学报, 23(6): 1217-1238.
- 杨立强, 邓军, 王中亮等. 2014. 胶东中生代金成矿系统. 岩石学报, 30(9): 2447-2467.
- 翟明国, 郭敬辉, 王清晨等. 2000. 苏鲁变质带北部的岩石构造单元及结晶块体推覆构造. 地质科学, 35(1): 16-26.
- 张宝林, 苏艳平, 张国梁等. 2017. 胶东典型含矿构造岩相带的地质-地球物理信息预测方法与找矿实践. 地学前缘, 24(2): 85-94.
- 张田, 张岳桥. 2007. 胶东半岛中生代侵入岩浆活动序列及其构造制约. 高校地质学报, 13(2): 323-336.
- 张岳桥, 李金良, 张田等. 2007. 胶东半岛牟平—即墨断裂带晚中生代运动学转换历史. 地质评论, 53(3): 289-300.
- 钟增球, 索书田, 张宏飞等. 2001. 桐柏—大别碰撞造山带的基本组成与结构. 地球科学—中国地质大学学报, 26(6): 560-657.
- 周建波, 韩伟, 宋明春. 2016. 苏鲁地体折返与郯庐断裂活动: 莱阳盆地中生界碎屑锆石年代学的制约. 岩石学报, 32(4): 1171-1181.
- 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.

(本文编辑 汪海英)

附中文参考文献

- 霍光辉, 罗卫. 1993. 应用地球物理资料对胶南地体构造特征的探讨. 山东地质, 9(2): 45-51.
- 季海章, 赵懿英, 卢冰等. 1992. 胶东地区煌斑岩与金矿关系初探. 地质与勘探, 28(2): 15-18.
- 李洪奎, 嵇传源, 耿科等. 2012. 胶东金矿成矿构造背景探讨. 山东国土资源, 28(1): 5-13.
- 李金良, 张岳桥, 柳宗泉等. 2007. 胶莱盆地沉积-沉降史分析与构造演化. 中国地质, 34(2): 240-250.
- 李威, 马凤山, 卢湘鹏等. 2019. 基于三维地震探测的海底矿区地