中国科学: 地球科学 2023 年 第 53 卷 第 12 期: 2937 ~ 2952
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文

胶东成矿省巨量金成矿模型: 来自地壳速度结构的约束

侯爵[1,2,5], 徐涛[3,6*], 艾印双[4,6], 俞贵平[7], 杨英杰[8], 许博[9], 王庆飞[9†]

1. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081;
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. 中国科学院地质与地球物理研究所矿产资源研究重点实验室, 北京 100029;
4. 中国科学院地质与地球物理研究所地球与行星物理重点实验室, 北京 100029;
5. 中国科学院大学, 北京 100049;
6. 中国科学院地球科学研究院, 北京 100029;
7. 桂林理工大学地球科学学院, 桂林 541004;
8. 南方科技大学地球与空间科学系, 深圳 518055;
9. 中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083
* 通讯作者, E-mail: xutao@mail.iggcas.ac.cn
† 通讯作者, E-mail: wqf@cugb.edu.cn

收稿日期: 2023-01-29; 收修改稿日期: 2023-07-20; 接受日期: 2023-08-22; 网络版发表日期: 2023-11-03
国家重点研发计划项目(编号: 2019YFA0708602、2016YFC0600101)和国家自然科学基金项目(批准号: 42130807)资助

摘要 为理解地壳结构对超大规模造山型金成矿系统的控制作用, 布设了一条NWW-SEE向穿越胶东金成矿省的宽频带流动台阵, 通过噪声成像获得地壳S波速度结构. 结果显示, 在金矿省12~20km深度处存在一个显著的低速带(LVZ), 可能为与成矿作用有关的热液蚀变带; 在矿化规模和强度更大的成矿省西部下方8~12km处发育高速异常体, 可能含有大量斜长角闪岩类组分, 为金成矿提供部分物质来源. 此外, 成像结果还显示, 在成矿省西部和东部分别发育犁式断层系统和陡倾斜断层系统. 结合地壳速度结构特征及区域上金矿化与镁铁质岩脉有密切时空关系的地质事实, 文章提出了基于地震学约束的胶东地区金成矿过程模型: 镁铁质岩浆的积聚和脱气导致大规模成矿之前在中地壳形成热液蚀变带(LVZ); 后来, 随着上升流软流圈的加热, 壳内蚀变带释放出含金流体, 在犁式断层系统向上运移的过程中又可能从上地壳斜长角闪岩等岩石中萃取出部分金等成矿物质, 形成富金流体; 随后, 富金流体继续沿不同的断层系统向上运移并因条件改变而发生矿质沉淀, 在西部以韧-脆性为主的犁式断层系内形成大规模的蚀变岩型矿石, 而在东部陡倾斜脆性断层系内形成规模相对较小的石英脉型矿石.

关键词 胶东金矿省, 成矿流体, 噪声成像, 地壳速度结构

中文引用格式: 侯爵, 徐涛, 艾印双, 俞贵平, 杨英杰, 许博, 王庆飞. 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, doi: 10.1360/SSTe-2023-0019
英文引用格式: Hou J, Xu T, Ai Y, Yu G, Yang Y, Xu B, Wang Q. 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, https://doi.org/10.1007/s11430-023-1173-6

© 2023 《中国科学》杂志社

1 引言

地壳构造对形成大规模成矿系统具有关键作用, 包括流体和金属的潜在来源、流体的运移网络以及最终成矿圈闭(Hou等, 2015, 2021; Hoggard等, 2020). 关于地壳结构对斑岩-矽卡岩成矿系统的控制作用, 前人已进行了很好的研究(Henley和Berger, 2013; Xu等, 2021; Large等, 2021), 特别是通过地球物理方法描述壳内岩浆转运系统(Yu等, 2022). 然而, 针对供应全球约30%金的巨型造山型金矿床, 目前尚很少开展此类研究. 这是因为与斑岩-矽卡岩成矿系统相比, 造山型金成矿系统的成矿物质及流体来源和运移系统更难以追踪且存在争议.

胶东金成矿省位于华北克拉通东南缘, 黄金储量超过5000吨, 是中国最大的黄金生产基地. 前人对胶东金矿床进行了大量的研究, 并在成矿时间、成矿地质环境和地球动力学等方面取得重要进展(Fan等, 2003; Yang等, 2003a; 朱日祥等, 2011, 2015; Song等, 2015; Deng等, 2020c, 2022; 邓军等, 2023). 研究显示, 胶东金矿床形成于约120Ma, 主要受发育在前寒武纪高级变质地体和中生代花岗岩体内的断裂控制; 矿化呈现典型的造山型金矿床特征, 尽管流体来源尚存有争议; 金矿床形成于伸展构造体制, 与同时代软流圈上涌和克拉通破坏导致的镁铁质岩脉广泛侵位有关(Deng等, 2014; 朱日祥等, 2015; Deng和Wang, 2016).

然而, 该区大规模金成矿的关键因素, 特别是其流体和金属的来源仍然是未解之谜. 一种观点认为, 成矿流体主要来源于新太古代绿岩, 伴生的金矿化与前寒武纪绿岩的变质作用密切相关, 类似于全球其他古老克拉通的"绿岩型"或"造山型"金矿床(Groves等, 1998; Goldfarb等, 2001). 另一种观点认为, 成矿流体来源于侵入前寒武纪变质基底的中生代花岗质岩浆(Yang等, 2003b; Tan等, 2012; Cai等, 2013; Ma等, 2013). 然而, 这两种观点都难以解释一个重要的事实, 即金矿化发生比进入变质作用过程中的流体释放要晚约1800Ma, 也比容矿花岗岩体的侵位晚约10Ma. 此外, 还有研究者认为, 成矿流体最有可能来自俯冲的中生代洋壳和/或上覆沉积物(Goldfarb等, 2007; Goldfarb和Santosh, 2014), 或来自交代地幔(Wang等, 2020). 然而, 地幔流体如何向上迁移数十公里进入地壳尚不清楚. 尽管最近有研究表明, 来自交代地幔的同时代镁铁质岩脉可能是成矿流体的主要来源(Wang等, 2022), 但分米-厘米级宽的镁铁质岩脉不太可能为规模如此巨大金富集提供足够的流体. 需要指出, 在上述三种观点中, 金等成矿物质均被认为与成矿流体具有相同的来源. 此外, 胶东群中的斜长角闪岩类被认为是金等成矿物质的主要来源, 但其在胶东地壳中分布及规模目前并不清楚.

另一个重要问题是关于金成矿系统的构造控制作用. 以前的研究大多局限于单个矿床(Yang等, 2018), 但对地体尺度的构造控矿作用则知之甚少. 例如, 胶东金成矿省已识别出三个矿集区(图1); 西部矿集区以细脉-浸染脉矿化为主, 金储量规模大, 而中部和东部矿集区以石英脉型矿化为特征, 储量规模要小得多. 造成上述金储量规模和成矿方式差异的原因虽然被归因于构造控矿作用(Deng等, 2020c; 俞贵平等, 2020), 但具体如何控制, 特别是控矿构造的深部特征目前尚不清楚.

在过去的二十年里, 人们对胶东半岛岩石圈结构进行了多次地球物理探测(侯爵等, 2022), 包括地震层析成像获得3D岩石圈P波(Xu等, 2002; 胥颐等, 2009; Zhao等, 2012; 苏道磊等, 2016)和S波(Li等, 2018; 孟亚锋等, 2019)速度结构、二维深地震测深(Ma等, 1991; Jia等, 2014; 潘素珍等, 2015)、深反射地震(Yang, 2002)和接收函数成像(Chen等, 2006; Zheng等, 2008)等. 然而, 由于受台站分布或成像分辨率的限制, 这些地球物理研究主要集中在主要构造边界上, 很少关注地壳的精细结构. 为探测胶东金成矿省地壳几何特征及横向结构差异, 近五年新开展了一些地球物理工作, 包括部署短周期密集阵列(Yu等, 2020; 俞贵平等, 2020)和反射地震剖面(Yu等, 2018)等, 但地壳结构与成矿要素之间的成因联系仍未完全确立.

为了揭示胶东金成矿省精细的地壳结构及其与成矿要素(如流体源、金属来源、流体通道和圈闭)的联系, 我们利用宽频带地震密集台阵及固定台网数据(图1)进行了环境噪声成像, 并结合地质观测, 提出一个涵盖流体衍生、潜在金来源、控矿断层网络等的成矿系统结构及成因模型, 对认识胶东成矿省金巨量富集的深部背景具有重要意义.

2 地质背景

胶东金成矿省西以郯庐断裂为界, 主要由胶北隆

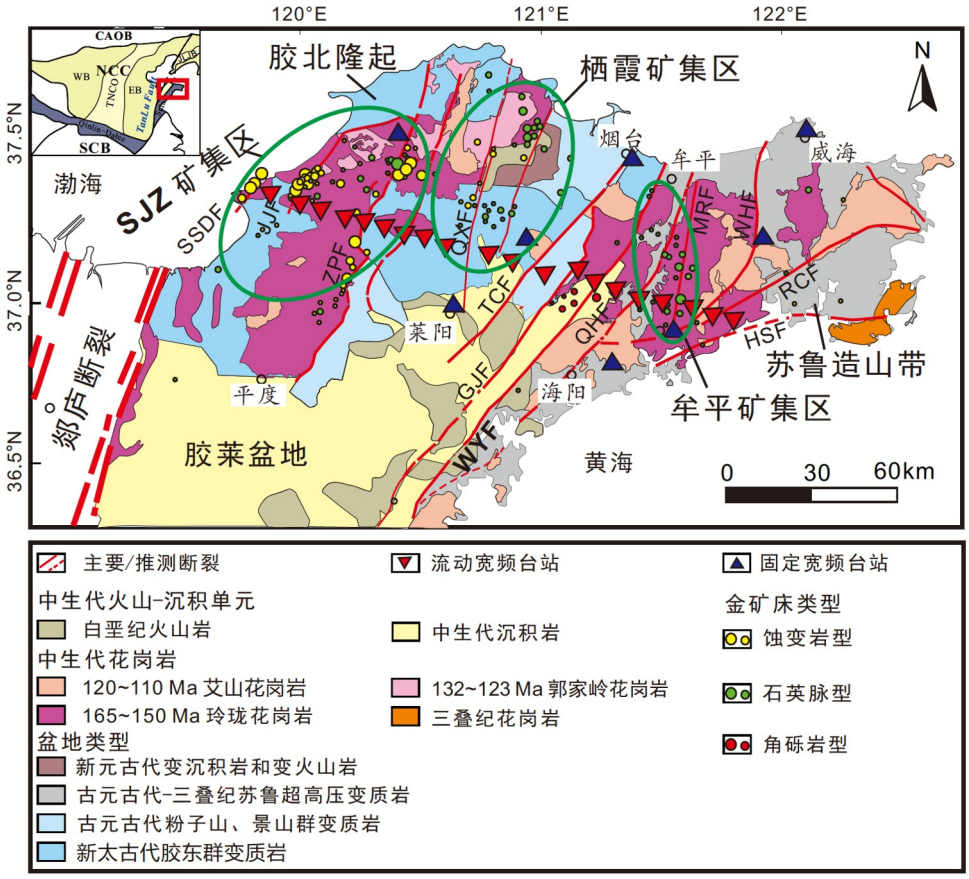


图 1　**胶东金成矿省地质图**

红色三角形为流动宽频台站, 深蓝色三角形为固定台站. 绿色椭圆标记的矿集区: 三山岛-焦家-招平(SJZ)矿集区、栖霞矿集区以及牟平矿集区. JJF, 焦家断裂; ZPF, 招平断裂; QXF, 栖霞断裂; TCF, 桃村断裂; GJF, 郭城-即墨断裂; WYF, 五莲-烟台断裂; QHF, 青岛-海阳断裂; MRF, 牟平-乳山断裂; WHF, 威海断裂; RCF, 荣成断裂; HSF, 海阳-石岛断裂. 改自Deng等(2020a)

起、胶莱盆地和苏鲁造山带三个构造单元组成(图1; Chough等, 2000; Deng等, 2020a). 胶北隆起和胶莱盆地构成胶北地体, 由五莲-烟台断裂与苏鲁造山带隔开(WYF; Tang等, 2008). 胶北隆起以前寒武纪高级变质岩为主, 被大量中生代花岗岩和镁铁质岩脉侵入(图1; Deng等, 2020b, 2020c). 胶北地体前寒武纪岩石主要包括太古代TTG(tonalite-trondhjemite-granodiorite)片麻岩与胶东群变质岩、古元古代粉子山群与荆山群角闪岩相到绿片岩相的变沉积岩和中-新元古代蓬莱群变沉积岩等(Tang等, 2008; Zhao等, 2016). 其中的早前寒武纪岩石在约2.5Ga和约1.8~1.9Ga经历了两次主要的变质事件(Ames等, 1996; Tang等, 2008; Tam等, 2011; Wan等, 2011). 胶东群斜长角闪岩的原岩是拉斑玄武岩, 形成于~2.5Ga的俯冲环境(Shan等, 2015). 苏鲁造山带由华北克拉通与扬子地块在三叠纪碰撞造山作用形成, 主要由新元古代花岗片麻岩、含柯石英榴辉岩、石英岩和片岩组成, 被三叠纪花岗岩侵入(Huang等, 2006; 张岳桥等, 2012; Liu等, 2018). 胶莱盆地主要由白垩纪河流、三角洲和湖相沉积岩组成, 夹有中酸性火山岩和火山碎屑岩及玄武质岩等(Wang等, 2016; Zhao等, 2018).

胶东半岛广泛分布中生代花岗岩(图1). 早中生代花岗岩(225~205Ma)位于其东部边缘(图1; 郭敬辉等, 2005). 晚中生代花岗岩包括黑云母花岗岩和白云母花岗岩(165~150Ma; 侯增谦等, 2007; Yang等, 2012)、花岗闪长岩(132~123Ma; Zhao等, 2018)和二长花岗岩(120~110Ma; Goss等, 2010). 此外, 该地区发育有年龄为135~115Ma的幔源镁铁质岩脉(刘成忠等, 2009; Cai

等, 2013; Deng等, 2017; Liang等, 2018), 其中部分岩脉显示出OIB的地球化学特征(Deng等, 2020a). 自侏罗纪晚期以来, 由于岩石圈减薄, 胶东金成矿省经历了构造侵蚀, 并存在晚白垩世和古近纪两个主要的隆升阶段(朱日祥等, 2011; Zhao等, 2018).

胶东金成矿省可划分为3个主要的金矿集区, 自西而东分别是三山岛-焦家-招平(SJZ)、栖霞和牟平金矿集区. 三山岛-焦家-招平(SJZ)和栖霞两个金矿集区发育于胶北隆起, 而牟平金矿集区则发育于苏鲁造山带内(图1). 区域内金矿床受一系列NNE-NE向切割前寒武纪基底和中生代花岗岩类侵入体的断裂控制(图1; Yang等, 2015, 2018; Deng等, 2020a). 这些断裂包括SJZ矿集区中的三山岛、焦家和招平等断裂, 栖霞矿集区中的栖霞和桃村等断裂, 以及牟平矿集区的五莲-烟台断裂及其次级断裂(如青岛、海阳和牟平断裂等)(图1). 研究表明, 沿招平和桃村断裂带的地壳伸展和韧性变形发生在130~115Ma, 与区域金成矿作用同时(Charles等, 2013; Meng和Lin, 2021), 且招平韧性剪切带与变质核杂岩构造有关(Charles等, 2013; Lin和Wei, 2018). 地震资料显示, 胶北隆起的三山岛、焦家、招平和栖霞等断裂多表现为犁式断层特征, 垂向上与中下地壳尺度的构造相连(Song等, 2015; Yu等, 2018; Wang等, 2022). 五莲-烟台断裂实际上为一多期活动的断裂系统, 以晚侏罗世大规模左旋走滑、早白垩世伸展和晚白垩世小规模右旋走滑为特征(Zhang等, 2007).

胶东金成矿省金矿床有两种主要的矿化(石)类型, 即细脉-浸染状矿化和石英脉型矿化. 细脉-浸染状矿化主要发育在三山岛-焦家-招平(SJZ)矿集区, 主要产于破碎带内, 钾长石化、绢云母化和硅化蚀变普遍, 表明其以强烈的水-岩反应为主导的成矿作用; 而石英脉型矿化主要发育在牟平矿集区, 主要产于次级脆性断裂中, 仅发育窄的蚀变晕, 表明以流体充填作用为主的成矿过程(Deng等, 2020a). 就储量规模而论, 前者约占全区金储量的80%, 后者仅占约20%. 此外, 就矿化类型与控矿断裂的级别而论, 在主控矿断裂带(如三山岛、焦家、招平等)内部主要发育细状-浸染状矿化, 而在离其较远的次级断裂内则主要发育石英脉型矿化(见图1). 测年数据表明, 无论是何种矿化类型, 胶东成矿省的金矿床均集中形成于约120Ma(Deng等, 2020b; 张明辉等, 2020), 说明它们形成于同一金成矿系统.

3 数据和方法

3.1 地震噪声数据

2017年9月至2018年9月, 我们在胶东地区的三山岛-焦家-招平(SJZ)、栖霞和牟平矿集区中布设了NWW-SEE走向的宽频带地震台阵(图1, 红色三角形), 共20个台站, 总长度约为170km, 跨越胶北和牟平两个矿集区, 记录了大约一年的连续三分量地震数据, 原始采样率为40Hz. 此外, 为改善射线覆盖路径, 同时收集了8个相邻宽频带固定台站(图1, 蓝色三角形)记录的连续地震数据.

3.2 数据处理

我们计算了背景噪声数据的*Z*分量的互相关, 并获得瑞利波. 在进行互相关计算之前, 首先对单个台站记录的连续噪声数据进行预处理, 包括截取连续背景噪声记录的长度至一天, 降采样到10Hz, 去除仪器响应、均值和线性趋势, 并进行0.5~30s的带通滤波. 之后, 进行时间域归一化以及频谱白化(Bensen等, 2007). 预处理后, 计算了各台站对每天*Z*分量的互相关函数(CCF), 并进行线性叠加, 获得最终的CCF. 为了提高信噪比, 将CCF的正负半轴叠加得到对称的互相关波形, 用于接下来的频散曲线提取.

如图2所示, 互相关排列在1~25和5~15s两个滤波周期内均显示出清晰的瑞利波信号. 值得注意的是, 在5~15s周期带内, 在零时刻附近出现了体波信号. 由于该信号只对台间距在30~50km范围内的面波信号有影响(图2), 因此我们测量台间距大于50km的CCF的频散曲线.

3.3 频散曲线测量

采用Yao等(2006)提出的图像转换技术, 我们进行相速度频散曲线的提取, 要求台间距大于两个波长(Yang等, 2007; Yao等, 2011; Luo等, 2015), 并保留信噪比大于5的频散数据. 考虑到站间距和台阵范围, 我们仅测量在1~20s的周期范围内的相速度频散曲线, 最后得到了376条高质量的瑞利波相速度频散曲线(图3a), 平均速度从1s的2.8km/s缓慢变化到20s的3.5km/s. 射线路径数量在3.5s最多, 共234条; 在20s最少, 共16条, 如图3b所示. 胶东地区的平均频散曲线特征与邻区(郯庐断裂带中段)已有研究获得的平均频散曲线特征

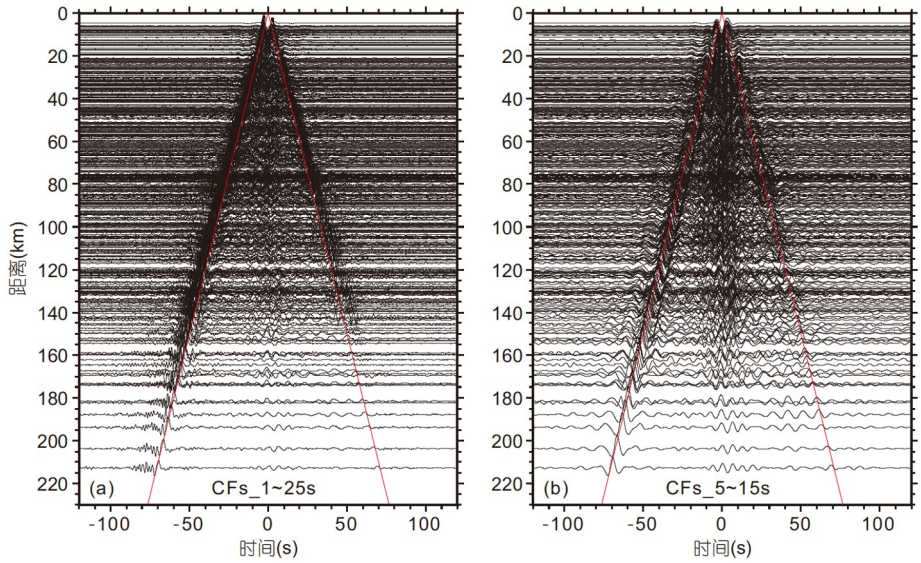


图 2　地震台站之间垂直分量的互相关函数

进行了1~25和5~15s带通滤波, 红色线指示波列的速度为3.0km/s

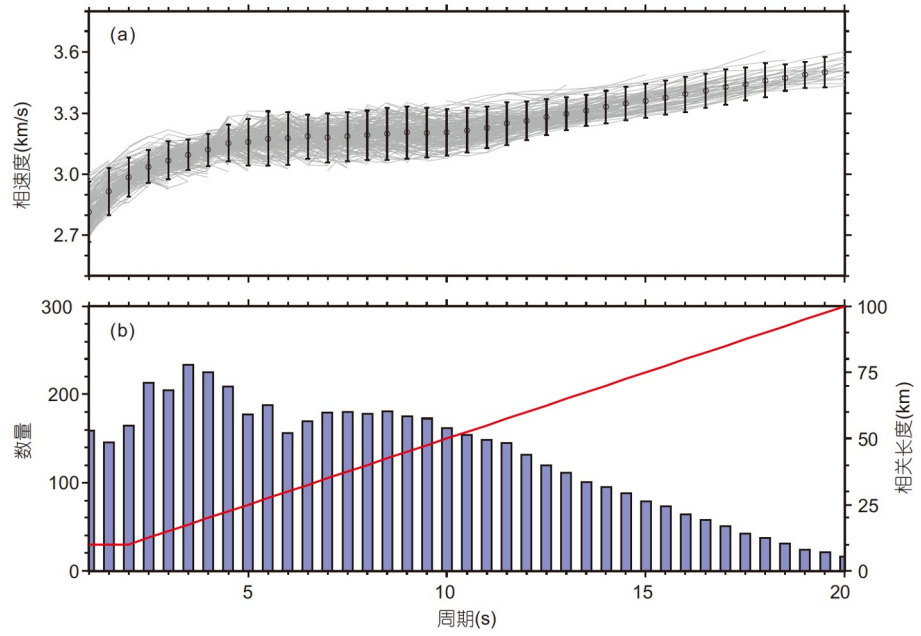


图 3　相速度频散曲线及射线路径数量变化

(a) 相速度频散曲线, 黑色圆圈和误差条代表所有频散曲线的平均相速度及其2倍标准差; (b) 直方图表示在每个周期为层析成像保留的相速度测量值的个数, 红线表示层析成像使用的相关长度

非常接近(Luo等, 2022), 表明了本项研究数据的可靠性. 需要说明的是, 5~10s周期内的频散曲线存在一些局部抖动, 这与该频段的零时刻体波信号、数据信噪比等因素有关, 但对反演结果的整体特征影响较小.

3.4　相速度剖面

台站对之间的混合路径频散曲线是沿路径介质速度的平均响应. 本文利用基于连续模型空间的广义反演方法(Tarantola和Valette, 1982; Montagner和Nataf,

1986; Yao等, 2010)来反演各个台站下方的纯路径频散曲线. 在反演中去除误差大于两倍偏差的频散数据. 相关长度(图3b中的红色实线)是平衡分辨率和反演稳定性的关键参数, 本文综合考虑不同周期的波长、数据的信噪比、检测板测试结果和区域地质问题规模等因素确定相关长度. 反演模型的网格节点为0.1°×0.1°.

对1到20s各个周期进行相速度层析成像, 并插值得到密集台阵各台站下方的纯路径相速度频散曲线, 即相速度剖面, 如图4所示.

3.5 S波速度结构反演

每个网格点的纯路径相速度频散曲线反映了各个网格点下方的相速度结构. 基于CPS330程序包, 我们采用Herrmann和Ammon(2002)开发的迭代阻尼最小二乘反演方法(Herrmann, 2013)来反演S波速度结构. 由于瑞利波的相速度对V_S比对V_P和密度更敏感, 因此V_P和密度是根据V_S和V_P/V_S计算的. V_P/V_S比率固定为1.76, 密度根据Nafe-Drake关系进行计算(Ludwig等, 1970; Brocher, 2005).

在反演过程中, 初始模型的地壳层厚为0.5km. 依照经验关系, 在具有均匀半空间的泊松介质中, 瑞利波1/3波长深度处的S波速度约为相速度的1.1倍(Shearer, 2009; Fang等, 2015), 通过将纯路径频散曲线(图5中的灰色虚线)转换为V_S来构建初始速度模型. 其中, 根据平均频散曲线, 我们估算了0~20km深度的初速度模型, 20~33km深度的初速度模型参照区域平均地壳厚度线性过渡给定(潘素珍等, 2015; Yu等, 2020), 上地幔速度为4.3km/s.

4 结果

4.1 地壳S波速度结构

沿密集台阵得到的V_S剖面如图6a所示. 同时, 为了突出V_S结构的横向和垂直变化特征, 计算了V_S速度扰动(图6b)和V_S速度变化的垂向梯度(图6c). V_S速度扰动定义为每个网格点下方的V_S与相同深度的平均V_S的偏差. 考虑到频散数据的周期为1~20s, 我们主要讨论25km以上的地壳结构.

成像结果中, 中地壳存在一个低速带(LVZ), 平均V_S约为3.4km/s. 该低速带中速度最低的区域位于胶北隆起下方, 深度最浅的区域位于栖霞矿集区之下. 在8~12km深度有两个不连续的高速体: 一个位于三山岛-焦家-招平(SJZ)矿集区下方, 另一个位于栖霞矿集区以东. S波速度扰动(图6b)进一步突出了V_S结构的横向变化. 上地壳高、低速异常的过渡区域与招平、栖霞、五莲-烟台等主要断裂带具有较好的一致性(见图6b).

通过进一步分析垂直速度梯度(图6c), 我们追踪了低速区的顶部和底部界面. 根据负梯度的最大值估计低速区的顶部界面约为10~13km, 正速度梯度的出现则定义了底部深度范围约为16~21km.

此外, 速度扰动图像(图6b)显示, 三个矿集区之间存在明显的结构差异. 栖霞和牟平两个矿集区以五莲-烟台断裂带为界, 断裂带两侧的速度扰动具有明显的横向间断特征; 三山岛-焦家-招平与栖霞两个矿集区

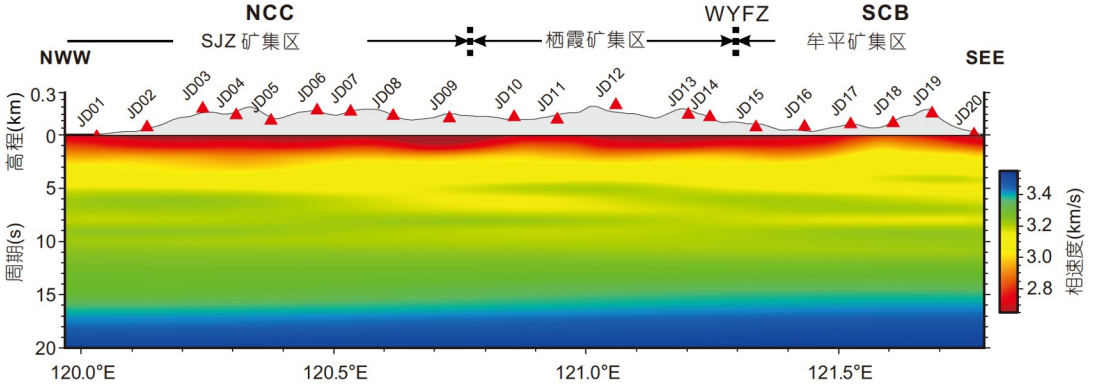


图 4 相速度剖面

NCC, 华北克拉通; SCB, 华南块体; WYFZ, 五莲-烟台断裂带

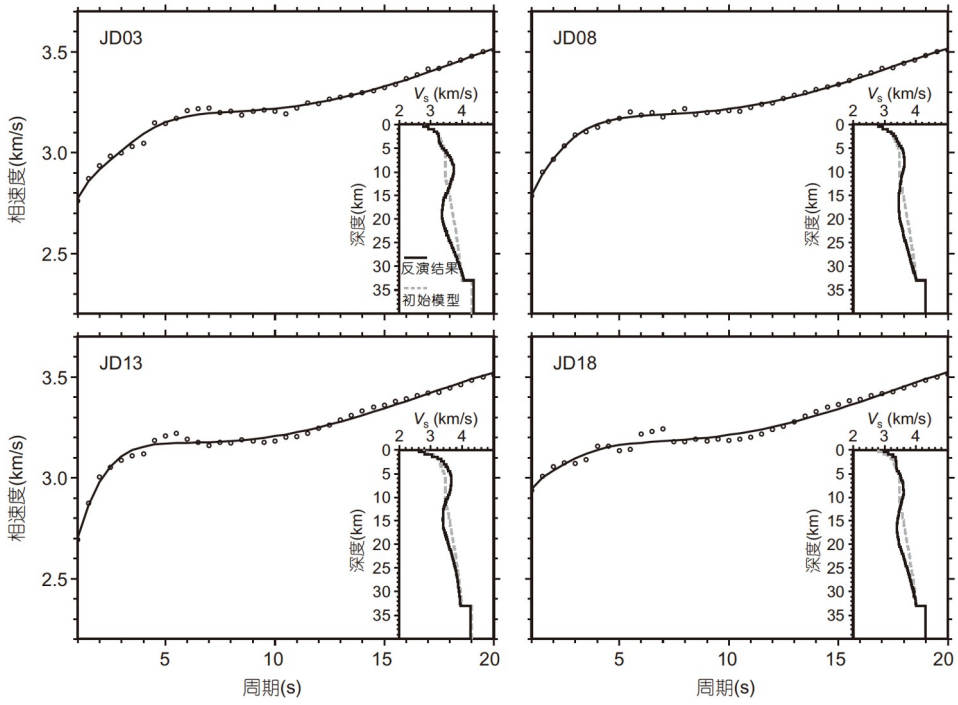


图 5　四个台站V_S反演示例

黑色圆圈代表观测到的频散曲线, 黑色实线代表根据V_S反演结果计算的合成频散曲线

之间的过渡较为平滑，其交界处的上、中地壳呈现向SE倾斜的带状速度异常，与地表出露的招平断裂带吻合较好.

4.2　分辨率分析

本文成像结果主要基于线性流动台阵数据，以及少量固定台站资料，因此分辨率受限于线性台阵覆盖的区域. 考虑到流动台阵几乎垂直于主要构造线的走向(NE-NNE), 测线两侧速度的非均质性对测线方向成像结果的影响可以忽略, 因此, 我们认为反演结果可以很好的约束测线下方的速度结构. 为了分析成像结果的横向分辨率，进行了棋盘格测试，异常大小设置为0.4°×0.4°(图7a、7e). 此外，还测试了带状模型，带状异常的走向与主要构造线的走向几乎平行，异常幅度设置为±5%，反演参数与实际数据反演参数相同，2、7和13s测试结果分别如图7f~7h所示.

测试结果表明, 2、7和13s的相速度反演(图7e~7h)对0.28°、0.42°和0.64°的带状异常具有良好的横向分辨率. 但是, 我们也注意到, 对于棋盘格测试, 只有沿测线的速度异常具有较好的分辨率，而不沿测线的异常分辨率较差，这与反演过程使用的地震台站分布不均匀有关. 由于我们主要对沿测线的V_S剖面感兴趣，因此测线以外区域的分辨率较低对我们的结果没有影响.

此外，面波反演的垂直分辨率与面波的周期有关, 反演后基于平均V_S(图8a蓝色实线)计算得到的不同周期的瑞利波相速敏感核函数如图8b所示. 本文使用的相速度的最长周期为20s，其敏感核函数表明，它对~20km深度的地壳结构最为敏感，20km以下的分辨率随着深度的增加逐渐减小. 因此，初始速度模型(尤其是20km以下)的选择可能会影响反演结果. 为了更好地选择合适的初始模型，评估初始模型对反演结果的影响，我们以JD08台的频散数据为例，对不同的初始速度模型进行了测试.

为了分析地壳速度系统性偏离真实模型时反演结果的差异，我们设计了四个模型，分别命名为M1、M2、M3和M4，如图9a所示. M1是本文中使用的初始模型. M2在地壳顶部和底部的速度与M1相同, 但速度从地壳顶部到底部随深度呈线性变化. M3和M4的速度在各个深度系统性地分别低于或高于M2的速度. 除

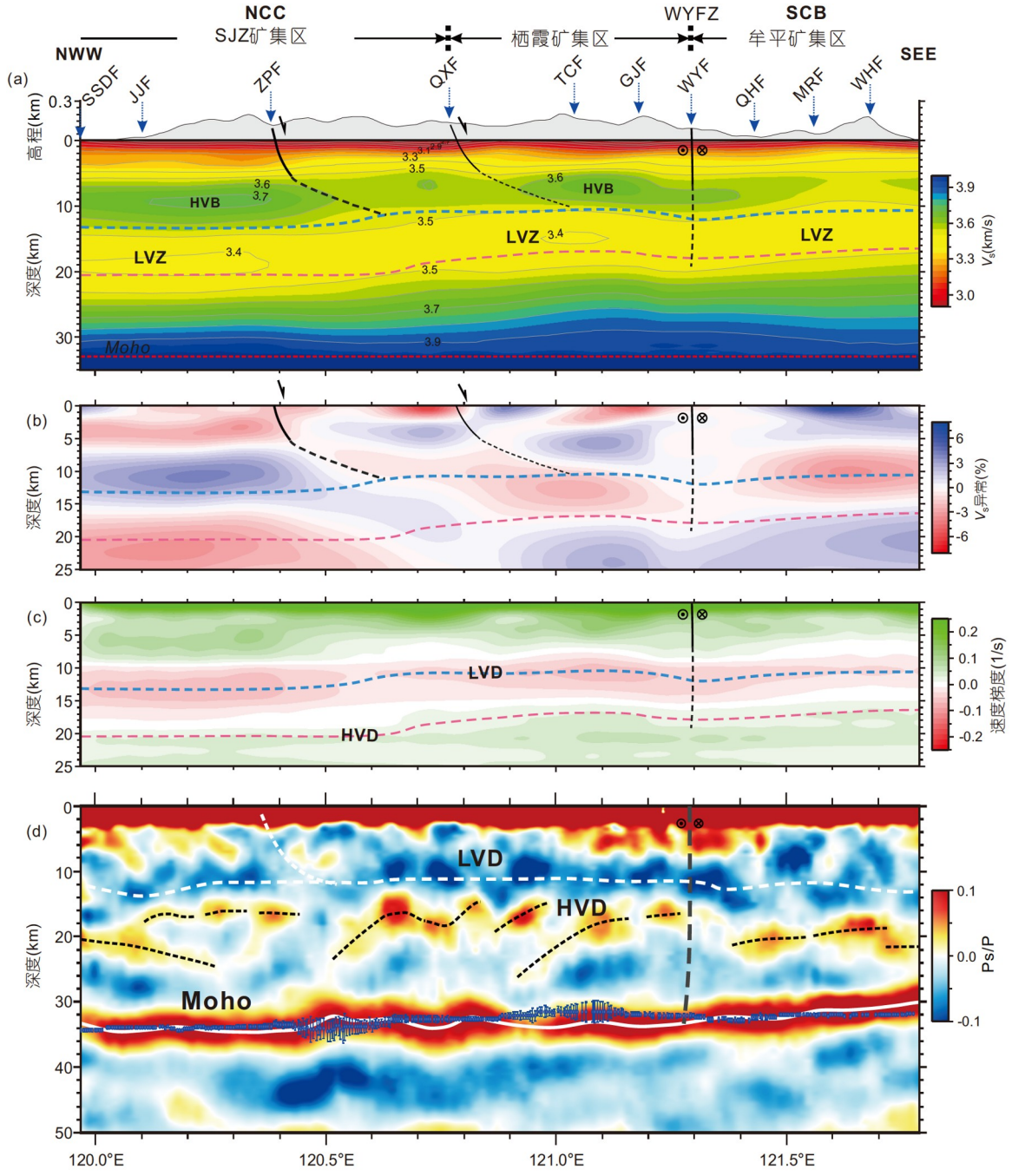


图 6　S波速度剖面

(a) 绝对速度V_S; (b) 相对于同一深度平均V_S值的速度扰动; (c) 垂直速度梯度, 黑色实线代表地表观察到的主要断裂, 黑色虚线表示推断的深部断层, 箭头表示滑脱断层的运动方向, 蓝色虚线和红色虚线分别代表低速层的顶界面和底界面; (d) 修改自远震P波接收函数的CCP图像(Yu等, 2020). SSDF, 三山岛断裂; JJF, 焦家断裂; ZPF, 招平断裂; QXF, 栖霞断裂; TCF, 桃村断裂; GJF, 郭城-即墨断裂; WYF, 五莲-烟台断裂; QHF, 青岛-海阳断裂; MRF, 牟平-乳山断裂; WHF, 威海断裂; LVZ, 低速带; HVB, 高速体; LVD, 低速不连续面; HVD, 高速不连续面

此之外, 上述四个模型的V_P/V_S、莫霍面深度和地幔速度相同. 测试结果(图9b)表明, 地壳初始速度对反演结果影响不大, 仅对27km至Moho界面深度范围有一定影响.

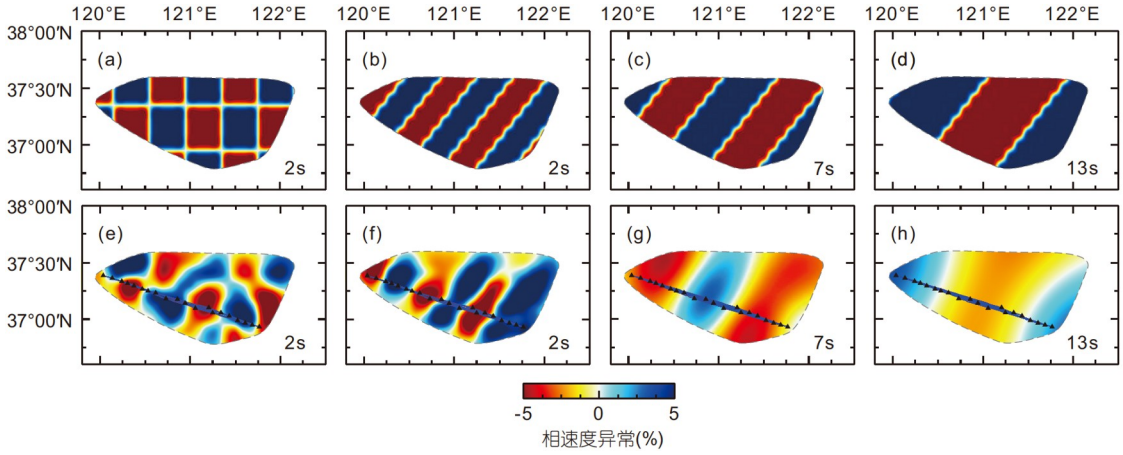


图 7　相速度反演的分辨率测试

(a)~(d)不同周期分辨率测试的相速度输入模型，其中(a)为标准检测板模型，异常尺寸为0.4°×0.4°，(b)~(d)为条带异常模型，异常宽度分别为0.28°、0.42°和0.64°. 2、7和13s周期的平均相速度分别为2.99、3.18和3.30km/s. (e)~(h)对应于(a)~(d)中绘制的输入模型的分辨率测试的反演结果

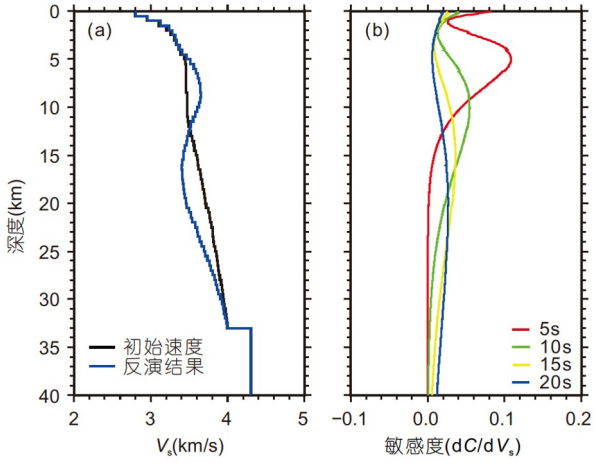


图 8　平均速度剖面和敏感核函数

(a) 初始速度模型(黑色实线)和所有频散曲线反演结果的平均速度模型(蓝色实线); (b) 瑞利波在5、10、15和20s时的相速度敏感核函数

5　讨论

5.1　地壳异常速度结构可能成因

本文成像结果的最显著特征之一是胶东金成矿省普遍发育中地壳低速带(LVZ; 图6a). 该低速带与以往的地震成像结果(Zheng等, 2008; Jia等, 2014; 潘素珍等, 2015; 孟亚锋等, 2019; Yu等, 2020; Luo等, 2022)一致, 其底部界面与接收函数共转换点叠加图像中约16~20km处确定的高速不连续面(HVD)重合(图6d; Yu等, 2020). 实际上, 这种地壳内低速区可能有多种成因, 至少可归因于脆韧转换带、部分熔融区和蚀变带等三种可能性(Kozlovsky, 1986; Marquis和Hyndman, 1992; Hacker等, 2014; Diaferia和Cammarano, 2017; Flinders等, 2018). 地质观测表明, 胶东金成矿省自晚白垩世以来发生了累积8km的地壳剥蚀, 且地壳伸展最强烈时期约为140~120Ma(Zhao等, 2018). 因此, 被认为是拆离带标志(Yu等, 2020)的高速不连续面(HVD)也应在约140~120Ma时形成. 这意味着虽然胶东低速带(LVZ)目前底部深度约为16~20km, 但考虑到上述地壳剥蚀量, 其初始形成时应大体位于24~28km深度. 这个深度范围远远超出了脆韧性转变深度的下限(约18km深度)(Sleep和Blanpied, 1994), 所以, 胶东低速层不太可能是脆韧转换带的记录.

地壳部分熔融可以导致大规模低速层区的发育, 这已被在青藏高原的观测所证实. 研究揭示, 在青藏高原中地壳内存在大规模低速带区, 其最小V_S介于2.9和3.3km/s之间, 被解释为在中地壳存在部分熔融(Yang等, 2012; Hacker等, 2014). 但是, 根据胶东的情况, 我们认为胶东低速层不太可能是部分熔融的结果所致, 因为胶东低速带V_S主要在3.4~3.5km/s, 最低值在3.3~3.4km/s, 远高于青藏高原下方, 仅略低于全球各大洲中地壳平均速度(~3.6km/s; Diaferia和Cammarano, 2017). 此外, 虽然胶东低速层与中地壳高导层对应良好(Zhang等, 2018), 但其绝对电阻率值和地表热流值

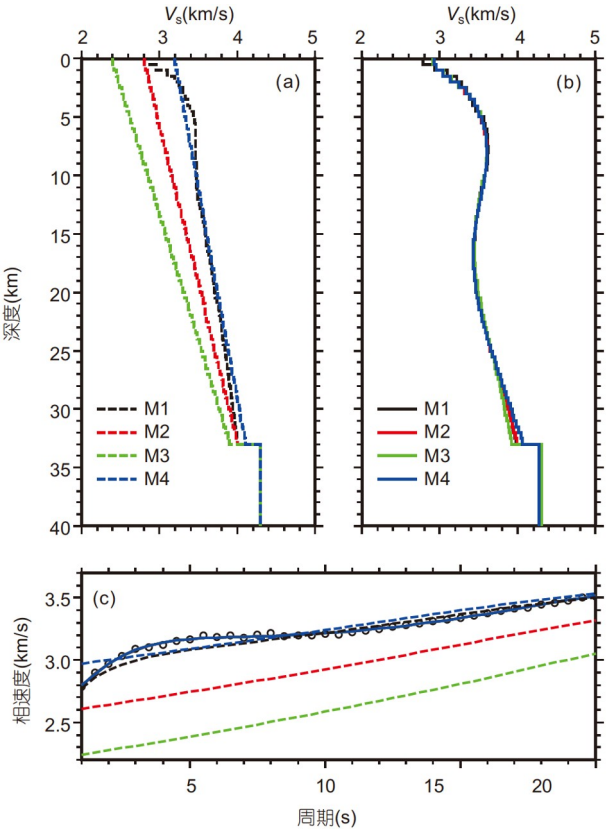


图 9　JD08台站不同初始模型V_S反演试验

(a) 不同地壳速度结构的初始模型, 其中M1为本文实际资料反演采用的初始模型, M2、M3和M4为不同速度梯度的线性模型; (b) V_S反演结果, 图例与相应的初始模型相同; (c) 理论合成的频散曲线与观测值的拟合情况, 频散曲线的颜色和线型与相应的初始模型和反演结果一致

与全球大陆平均值(Martyn, 2003)和中国大陆平均值(Jiang等, 2019)相当. 因此, 部分熔融也不太可能是产生胶东低速层的主要原因. 排除上面两种可能性, 那么胶东中地壳低速带(LVZ)由蚀变引起的解释似乎就比较合理了. 的确, 蚀变带表现为低速特征是不容置疑的, 因为蚀变带是水-岩反应的产物, 因此相比未蚀变的岩石, 蚀变岩的密度相对较低, 故蚀变带表现出相对低速特征. 另外, 当前的富含水层(与熔融体相似)也可能造成中地壳低速层, 但是我们认为胶东中地壳低速层不可能是现今仍存在的液态流体层的结果, 原因有二: 一是如果是现今的富流体层, 那么其低速异常特别是V_S异常将会十分显著, 但如前所述目前所观测到的低速带的低速异常并非如此; 二是胶东目前所探测到的低速带处于中地壳(16~20km), 即使沿着断裂带, 现今的地下水也很难下渗到这一深度. 所以, 我们认为胶东中地壳低速层(LVZ)最可能是化石流体层, 即蚀变带. 需要指出, 胶东成矿省壳内这一低速层, 即蚀变带很可能是沿着壳内薄弱面发育而成.

横波速度V_S结构图像显示, 在上地壳8~12km深度处有两个不连续的板状高速体: 一个在三山岛-焦家-招平矿集区下方, 另一个在栖霞矿集区下方(图6a). 这种高速体通常被解释为具有更多铁镁矿物的地壳成分(Christensen和Mooney, 1995). 在胶东半岛, 地表出露的太古宙胶东群构成了上地壳的主体(Zhang等, 2018), 其镁铁质岩石主要由前寒武系斜长角闪岩类组成. 因此, 我们将这两个高速体解释为地壳中存在较高比例斜长角闪岩类岩石的结果.

V_S扰动图像(图6b)显示在SJZ下方存在一条向SE倾斜速度边界, 发育于西北部高速体和东南部低速体之间, 大致对应于招平断裂. 根据该速度边界延伸趋势与招平断裂地表主要表现以中等角度向东倾斜的正断层特征(Deng等, 2020a), 推测招平断裂呈犁式或铲状, 向下与壳内低速带相连通. 栖霞矿集区下方还存在一条西北低速、东南高速的速度边界, 大体与栖霞断裂相对应(见图6b). 该速度边界的形状与招平断裂下方的形状相似, 故推测栖霞断裂也呈铲状, 并与下伏低速带相连. 此外, 我们观察到栖霞和牟平矿集区结合部下方的速度不连续性(图6b), 与地表的五莲-烟台断裂和牟平断裂相对应. 该图像表明, 五莲-烟台断裂几乎近直立状, 并穿过上地壳和中地壳, 表现出典型走滑断裂的产状特征, 与五莲-烟台断裂地表表现为高角度左旋走滑的特征(Yu等, 2020)相吻合.

5.2　胶东金成矿作用启示

V_S剖面揭示胶东地壳构造以中地壳蚀变带和上覆富镁铁质岩的上地壳为特征. 下面的详细综合分析表明, 地壳构造不仅作为金成矿流体的运移管道网络, 而且控制了金矿的矿化样式, 同时地壳本身也为成矿系统贡献部分金等成矿物质.

5.2.1　金成矿系统流体来源及运移网络

胶东成矿省金成矿系统的成矿流体来源仍是个谜, 也一直是争议颇大的问题. 尽管地壳V_S速度结构也难以确定成矿流体直接来源, 但它可以揭示成矿流体在壳内的运移网络, 因为流体运移过程中将发生强

烈的水/岩反应等蚀变作用，因此它表现为低速异常带. 胶东成矿省中地壳低速带是水/岩反应蚀变作用的结果，但流体成因来源有多种可能，包括变质流体、大气水和岩浆流体等. 首先, 前寒武纪变质岩(胶东群)变质过程中释放流体被认为是潜在的来源，并在世界其他古老克拉通地区的绿岩型或造山型金矿中被证实(Groves等, 1998; Goldfarb等, 2001). 然而, 对于胶东金矿床，这种可能性是非常小，因为胶东前寒武纪变质岩的变质作用发生于前寒武纪，远远早于该区晚中生代金矿作用(Deng等, 2014). 其次, 大气水的参与是有限的，因为LVZ的深度一般大于上地壳大气水的循环范围(Whitmeyer和Wintsch, 2005). 大气水可以沿着断裂带下渗很深，但不太可能形成遍布整个胶东金成矿省的蚀变带. 因此，最可能流体来源的选项是中生代的岩浆流体, 但这种岩浆既包括花岗质岩浆(如郭家岭型花岗闪长岩)，也包括幔源镁铁质岩浆(如矿田内煌斑岩等基性脉岩; Wang等, 2022). 这些中生代岩浆释放的流体可能在中地壳薄弱带中聚集，并发生流体混合作用与强烈水/岩反应，形成中地壳层次的LVZ. 在胶东金成矿省，早白垩世花岗闪长岩(~125Ma)与镁铁质岩脉(ca. 135~115Ma)就位与区域金矿化(ca. 120~115Ma)的时间一致性和金矿床流体地球化学资料(Deng等, 2020b, 2020c)均支持上述认识.

前已述及，V_S扰动图像(图6b)显示在SJZ下方和栖霞矿集区下方各存在一条向SE倾斜速度边界，分别大致对应于招平断裂与栖霞断裂(见图6b)，并暗示这些断裂可能呈铲状与下伏低速带相连. 同时，栖霞和牟平两个矿集区结合部下方的速度不连续面，与地表的五莲-烟台断裂和牟平断裂相对应(图6b)，可能说明五连-烟台断裂近直立状穿过上地壳和中地壳. 这些断裂带与金矿床(田)之间存在着密切的空间关系，因此我们认为这些速度结构特征揭示了胶东成矿省控矿断裂深部的产状及结构特征，亦即成矿流体运移网络的总体特征.

5.2.2　潜在金的源区

与成矿流体来源一样，胶东金矿床的金来源也同样存在争议. 基于金成矿与镁铁质岩脉的密切关系, 有地质学家提出镁铁质岩浆可能提供了部分金等成矿物质(Yang等, 2003a; Tan等, 2012; Cai等, 2013; Ma等, 2013; Deng等, 2020b). 另一方面, 中生代花岗岩类锆石Hf同位素填图表明, 大部分金矿位于新太古代地壳域, 暗示金为古老地壳来源(Deng等, 2020c). 基于V_S图像, 我们提出有关金来源的新见解.

胶东成矿省成矿流体的岩浆来源也预示着金等成矿物质部分来源于幔源岩浆或壳源岩浆. 这已被花岗岩与矿床同位素示踪研究所证实(Yang等, 2003a; Ma等, 2013; Deng等, 2020b, 2020c). 除此之外，胶东成矿省上地壳高速体中的斜长角闪岩类岩石可能是另一个金的来源. 前人研究表明，胶东群斜长角闪岩类的原岩形成于古俯冲带环境, 富含金等成矿物质(Hou等, 2015, 2021). 尽管部分金等成矿物质可能在太古代变质过程中经历过迁移或流失, 但后期的流体循环仍然可以从其中萃取出大量的金. 从空间位置看，这些斜长角闪岩类呈高速体位于低速区(LVZ)的上方，因此汇集于低速带的成矿流体向上运移时，不可避免地与富含斜长角闪岩类的地壳发生反应, 通过水-岩反应将Au析出，从而使成矿流体更加富含金. 浅表地壳在伸展和拆离过程中的脆性破裂会进一步加剧这种水岩反应. 因此，我们认为高速体中的斜长角闪岩为胶东金成矿系统提供了部分金的来源(图10).

5.2.3　金矿化类型的构造控制

胶东金矿化类型呈现出区域差异性. 本文数据表明，控矿断裂及其地质环境的差异是造成空间上矿化类型不同的原因.

正如横波速度V_S图像所示(图6)，三山岛-焦家-招平(SJZ)矿集区主要受大规模滑脱断层系统控制. 低速区(LVZ)的发育可能是铲式断层深部在近水平滑脱断层处发育的重要触发因素(Selverstone等, 2012). 这一推论由铲式断层收敛到低速区的现象所证实(图6). 该滑脱体系以可渗透的小裂缝和孔隙为主, 成矿流体以渗流形式沿缓倾断层运移. 强烈的水岩反应和由此产生的硫化作用形成大量的浸染状和细脉-网脉状矿化，进而形成规模较大的蚀变岩型矿(石)化(Deng等, 2020a). 相反，牟平矿集区主要受高渗透率、高角度脆性断层控制, 成矿流体沿断层以通道流形式向上运移, 并在断裂带内合适的部位直接结晶沉淀成较宽的脉体，形成吨位数相对较小的石英脉型矿(石)化(Yang等, 2014; Li等, 2015; Song等, 2015; Song, 2015). 此外，与SJZ相似，栖霞矿集区也受滑脱断层

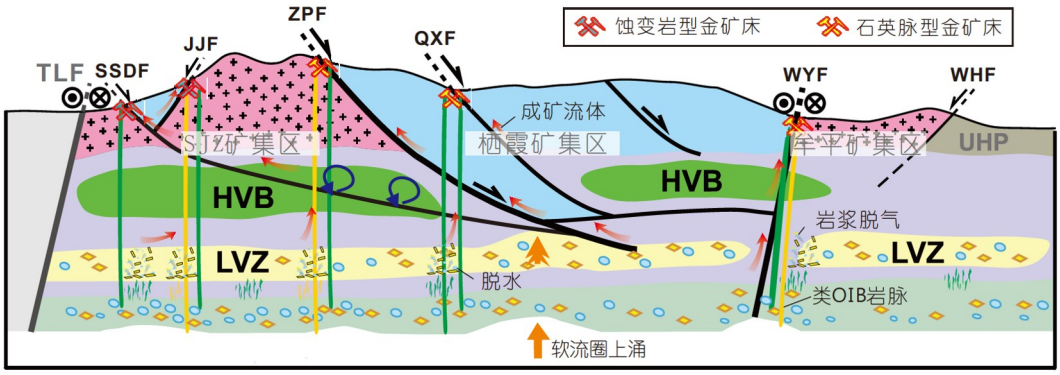


图 10　胶东金成矿省成矿模式示意图

LVZ, 低速区; HVB, 高速体; TLF, 郯庐断裂; SSDF, 三山岛断裂; JJF, 焦家断裂; ZPF, 招平断裂; QXF, 栖霞断裂; WYF, 五莲-烟台断裂; UHP, 超高压变质带; WHF, 威海断裂

控制, 但该矿集区下伏可能没有富斜长角闪岩层, 而主要为其他类型变质岩, 因此Au储量较少. 同时, 低速区隆起(图6b)表明, 上地壳的垂直丘状隆升和水平拉伸导致更多的裂缝型通道并提高了渗透率, 从而形成了该矿集区同时发育石英脉型与蚀变岩型两种矿(石)化类型.

5.3　胶东金矿省成矿模型

本文获得的胶东金成矿省地壳结构, 为金矿床成因研究提供了新的约束和见解. 基于上述讨论, 初步提出一种新的成因模型, 阐明流体和金的来源以及对金矿化样式的结构控制(图10).

在早白垩世(约135~120Ma)的成矿作用发生时, 胶东软流圈上涌引发的交代地幔和中下地壳的部分熔融, 分别产生镁铁质和酸性岩浆(Niu, 2005; Menzies等, 2007; Zhu和Zheng, 2009; 朱日祥等, 2015). 这些岩浆在上侵过程中释放出含金流体和挥发份(H_2O、CO_2、Cl), 并在中地壳薄弱带(LVZ)汇集, 同时与围岩发生反应; 当这些流体或挥发份继续向上运移, 不可避免地与上地壳, 特别是与具古岛弧岩浆成因的斜长角闪岩类岩石发生反应, 并萃取出其中的金等成矿物质, 使成矿流体更富含金. 这些富含金的流体沿不同的控矿断裂系统最终被运移到地壳浅部, 除持续与围岩发生反应外, 由于温度、压力降低或与大气水混合等影响, 金等成矿物质最终沉淀下来而成矿. 同时, 因控矿断裂的产状、性质及地质环境等不同, 产生了前述不同类型的金矿化型式.

6　结论

(1) 噪声成像结果揭示了胶东金成矿省下方12~20km深壳内低速区(LVZ), 可能为与成矿有关的热液蚀变带, 是早白垩纪岩浆在中地壳聚集、结晶和脱气过程中水-岩反应而形成的蚀变带, 也解释为胶东成矿省大规模成矿流体作用的记录.

(2) 成像结果显示上地壳8~12km深度高速体, 对应于三山岛-焦家-招平(SJZ)矿集区, 反映其上地壳富含新太古代斜长角闪岩类岩石; 这些岩石通常富含金等成矿物质, 而这些成矿物质在水/岩相互作用过程中有可能被淋滤萃取出来, 并进入含矿流体, 从而为金成矿系统提供部分成矿物质. 这可能是胶东金成矿省西部地区存在金属大吨位数(储量规模大)现象的主要原因.

(3) 成像结果显示三山岛-焦家-招平矿集区发育缓倾拆离断层系, 而牟平矿集区中则发育陡倾断层系; 地壳结构差异性可能控制了胶东金成矿省矿化样式的区域性变化特性.

(4) 基于噪声成像获得的速度结构和已有地质成果, 建立了基于地震学约束的金成矿系统模型, 主要解释了成矿流体与成矿物质来源和断裂网络对金成矿样式的控制作用.

致谢　祝融峰上又清秋, 雁低飞, 湘水流. 张忠杰老师离开我们十周年之际, 谨以此文表达我们的崇高敬意和深切缅怀. 感谢地震台阵实验室以及NCISP9观测团队在野外数据采集过程中的辛勤工作. 感谢国家地震台网中心

提供的固定台阵数据. 感谢郑天愉、苗来成、杨进辉、陈凌和林伟研究员的建设性意见.

参考文献

邓军, 王庆飞, 张良, 薛胜超, 刘学飞, 杨林, 杨立强, 邱昆峰, 梁亚运. 2023. 胶东型金矿成因模型. 中国科学: 地球科学, 53: 2323–2347

郭敬辉, 陈福坤, 张晓曼, Siebel W, 翟明国. 2005. 苏鲁超高压带北部中生代岩浆侵入活动与同碰撞-碰撞后构造过程: 锆石U-Pb年代学. 岩石学报, 21: 1281–1301

侯爵, 武澄泷, 俞贵平, 徐涛, 艾印双. 2022. 胶东金矿集中区深部结构研究进展. 地球物理学进展, 37: 952–963

侯增谦, 潘小菲, 杨志明, 曲晓明. 2007. 初论大陆环境斑岩铜矿. 现代地质, 21: 332–351

刘成忠, 尹维青, 张婧, 曾莲花, 欧阳克贵. 2009. 武夷山成矿带锡铜多金属矿床控矿条件和找矿预测标志. 矿产与地质, 23: 124–128

孟亚锋, 姚华建, 王行舟, 李玲利, 冯吉坤, 洪德全, 汪小厉. 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: 2490–2509

潘素珍, 王夫运, 郑彦鹏, 段玉玲, 刘兰, 邓晓果, 宋向辉. 2015. 胶东半岛地壳速度结构及其构造意义. 地球物理学报, 58: 3251–3263

苏道磊, 范建柯, 吴时国, 陈传绪, 董晓娜, 陈时军. 2016. 山东地区地壳P波三维速度结构及其与地震活动的关系. 地球物理学报, 59: 1335–1349

胥颐, 李志伟, 郝天珧, 刘劲松. 2009. 黄海的地壳速度结构与中朝-扬子块体拼合边界. 地球物理学报, 52: 646–652

俞贵平, 徐涛, 刘俊彤, 艾印双. 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: 1878–1893

张明辉, 武振波, 马立雪, 郑凡, 解桐桐, 郑孟杰, 侯爵, 刘有山, 张永谦, 徐涛, 白志明. 2020. 短周期密集台阵被动源地震探测技术研究进展. 地球物理学进展, 35: 495–511

张岳桥, 董树文, 李建华, 崔建军, 施炜, 苏金宝, 李勇. 2012. 华南中生代大地构造研究新进展. 地球学报, 33: 257–279

朱日祥, 陈凌, 吴福元, 刘俊来. 2011. 华北克拉通破坏的时间、范围与机制. 中国科学: 地球科学, 41: 583–592

朱日祥, 范宏瑞, 李建威, 孟庆任, 李胜荣, 曾庆栋. 2015. 克拉通破坏型金矿床. 中国科学: 地球科学, 45: 1153–1168

Ames L, Zhou G, Xiong B. 1996. Geochronology and isotopic character of ultrahigh-pressure metamorphism with implications for collision of the Sino-Korean and Yangtze cratons, central China. Tectonics, 15: 472–489

Bensen G D, Ritzwoller M H, Barmin M P, Levshin A L, Lin F, Moschetti M P, Shapiro N M, Yang Y. 2007. Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements. Geophys J Int, 169: 1239–1260

Brocher T M. 2005. Empirical relations between elaticwavespeeds and density in the Earth's crust. Bull Seismol Soc Am, 95: 2081–2092

Cai Y C, Fan H R, Santosh M, Liu X, Hu F F, Yang K F, Lan T G, Yang Y H, Liu Y. 2013. Evolution of the lithospheric mantle beneath the southeastern North China Craton: Constraints from mafic dikes in the Jiaobei terrain. Gondwana Res, 24: 601–621

Charles N, Augier R, Gumiaux C, Monié P, Chen Y, Faure M, Zhu R. 2013. Timing, duration and role of magmatism in wide rift systems: Insights from the Jiaodong Peninsula (China, East Asia). Gondwana Res, 24: 412–428

Chen L, Zheng T, Xu W. 2006. A thinned lithospheric image of the Tanlu Fault Zone, eastern China: Constructed from wave equation based receiver function migration. J Geophys Res, 111: B09312

Chough S K, Kwon S T, Ree J H, Choi D K. 2000. Tectonic and sedimentary evolution of the Korean peninsula: A review and new view. Earth-Sci Rev, 52: 175–235

Christensen N I, Mooney W D. 1995. Seismic velocity structure and composition of the continental crust: A global view. J Geophys Res, 100: 9761–9788

Deng J, Liu X, Wang Q, Pan R. 2014. Origin of the Jiaodong-type Xinli gold deposit, Jiaodong Peninsula, China: Constraints from fluid inclusion and C–D–O–S–Sr isotope compositions. Ore Geol Rev, 65: 674–686

Deng J, Liu X, Wang Q, Dilek Y, Liang Y. 2017. Isotopic characterization and petrogenetic modeling of Early Cretaceous mafic diking—Lithospheric extension in the North China craton, eastern Asia. GSA Bull, 129: 1379–1407

Deng J, Qiu K F, Wang Q F, Goldfarb R, Yang L Q, Zi J W, Geng J Z, Ma Y. 2020b. *In situ* dating of hydrothermal monazite and implications for the geodynamic controls on ore formation in the Jiaodong gold province, eastern China. Econ Geol, 115: 671–685

Deng J, Wang Q. 2016. Gold mineralization in China: Metallogenic provinces, deposit types and tectonic framework. Gondwana Res, 36: 219–274

Deng J, Wang Q, Santosh M, Liu X, Liang Y, Yang L, Zhao R, Yang L. 2020a. Remobilization of metasomatized mantle lithosphere: A new model for the Jiaodong gold province, eastern China. Miner Depos, 55: 257–274

Deng J, Wang Q, Liu X, Zhang L, Yang L, Yang L, Qiu K, Guo L, Liang Y, Ma Y. 2022. The Formation of the Jiaodong gold province. Acta Geol Sin-Engl Ed, 96: 1801–1820

Deng J, Yang L Q, Groves D I, Zhang L, Qiu K F, Wang Q F. 2020c. An integrated mineral system model for the gold deposits of the giant Jiaodong province, eastern China. Earth-Sci Rev, 208: 103274

Diaferia G, Cammarano F. 2017. Seismic signature of the continental crust: What thermodynamics says. An example from the Italian

Peninsula. Tectonics, 36: 3192–3208

Fan H R, Zhai M G, Xie Y H, Yang J H. 2003. Ore-forming fluids associated with granite-hosted gold mineralization at the Sanshandao deposit, Jiaodong gold province, China. Miner Depos, 38: 739–750

Fang H, Yao H, Zhang H, Huang Y C, van der Hilst R D. 2015. Direct inversion of surface wave dispersion for three-dimensional shallow crustal structure based on ray tracing: Methodology and application. Geophys J Int, 201: 1251–1263

Flinders A F, Shelly D R, Dawson P B, Hill D P, Tripoli B, Shen Y. 2018. Seismic evidence for significant melt beneath the Long Valley Caldera, California, USA. Geology, 46: 799–802

Goldfarb R J, Groves D I, Gardoll S. 2001. Orogenic gold and geologic time: A global synthesis. Ore Geol Rev, 18: 1–75

Goldfarb R J, Santosh M. 2014. The dilemma of the Jiaodong gold deposits: Are they unique? Geosci Front, 5: 139–153

Goldfarb R J, Hart C, Davis G, Groves D. 2007. East Asian gold-deciphering the anomaly of Phanerozoic gold in Precambrian cratons. Econ Geol, 102: 341–345

Goss S C, Wilde S A, Wu F, Yang J. 2010. The age, isotopic signature and significance of the youngest Mesozoic granitoids in the Jiaodong Terrane, Shandong Province, North China Craton. Lithos, 120: 309–326

Groves D I, Goldfarb R J, Gebre-Mariam M, Hagemann S G, Robert F. 1998. Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. Ore Geol Rev, 13: 7–27

Hacker B R, Ritzwoller M H, Xie J. 2014. Partially melted, mica-bearing crust in Central Tibet. Tectonics, 33: 1408–1424

Henley R W, Berger B R. 2013. Nature's refineries—Metals and metalloids in arc volcanoes. Earth-Sci Rev, 125: 146–170

Herrmann R B. 2013. Computer programs in seismology: An evolving tool for instruction and research. Seismol Res Lett, 84: 1081–1088

Herrmann R B, Ammon C J. 2002. Computer programs in seismology: Surface waves, receiver functions and crustal structure, version 3.30. Saint Louis: Saint Louis University

Hoggard M J, Czarnota K, Richards F D, Huston D L, Jaques A L, Ghelichkhan S. 2020. Global distribution of sediment-hosted metals controlled by craton edge stability. Nat Geosci, 13: 504–510

Hou Z Q, Xu B, Zheng Y C, Zheng H W, Zhang H R. 2021. Mantle flow: The deep mechanism of large-scale growth in Tibetan Plateau. Chin Sci Bull, 66: 2671–2690

Hou Z Q, Duan L F, Lu Y J, Zheng Y C, Zhu D C, Yang Z M, Yang Z S, Wang B D, Pei Y R, Zhao Z D, McCuaig T C. 2015. Lithospheric architecture of the Lhasa terrane and its control on ore deposits in the Himalayan-Tibetan orogen. Econ Geol, 110: 1541–1575

Huang J, Zheng Y F, Zhao Z F, Wu Y B, Zhou J B, Liu X. 2006. Melting of subducted continent: Element and isotopic evidence for a genetic relationship between Neoproterozoic and Mesozoic granitoids in the Sulu orogen. Chem Geol, 229: 227–256

Jia S X, Wang F Y, Tian X F, Duan Y H, Zhang J S, Liu B F, Lin J Y. 2014. Crustal structure and tectonic study of North China Craton from a long deep seismic sounding profile. Tectonophysics, 627: 48–56

Jiang G Z, Hu S B, Shi Y Z, Zhang C, Wang Z T, Hu D. 2019. Terrestrial heat flow of continental China: Updated dataset and tectonic implications. Tectonophysics, 753: 36–48

Kozlovsky Y A. 1986. The Superdeep Well of the Kola Peninsula. Berlin: Springer Verlag

Large S J E, Buret Y, Wotzlaw J F, Karakas O, Guillong M, von Quadt A, Heinrich C A. 2021. Copper-mineralised porphyries sample the evolution of a large-volume silicic magma reservoir from rapid assembly to solidification. Earth Planet Sci Lett, 563: 116877

Li C, Chen C, Dong D, Kuponiyi A P, Dosso S E, Su D. 2018. Ambient noise tomography of the Shandong province and its implication for Cenozoic intraplate volcanism in eastern China. Geochem Geophys Geosyst, 19: 3286–3301

Li L, Santosh M, Li S R. 2015. The 'Jiaodong type' gold deposits: Characteristics, origin and prospecting. Ore Geol Rev, 65: 589–611

Liang Y, Deng J, Liu X, Wang Q, Qin C, Li Y, Yang Y, Zhou M, Jiang J. 2018. Major and trace element, and Sr isotope compositions of clinopyroxene phenocrysts in mafic dykes on Jiaodong Peninsula, southeastern North China Craton: Insights into magma mixing and source metasomatism. Lithos, 302-303: 480–495

Liu L, Liu F, Liu P, Wang W, Ji L, Wang F, Cai J. 2018. Petrology, geochemistry and geochronology of the meta-mafic rocks in the North Sulu ultrahigh-pressure belt: Implications for their petrogenetic diversity and complex tectonic evolution. Precambrian Res, 316: 127–154

Lin W, Wei W. 2018. Late Mesozoic extensional tectonics in the North China Craton and its adjacent regions: A review and synthesis. Int Geol Rev, 62: 811–839

Ludwig W, Nafe J, Drake C. 1970. Seismic Refraction. In: Maxwell A E, ed. The Sea: Ideas and Observations on Progress in the Study of the Sea. New York-London-Sydney Toronto: Wiley Interscience, John Wiley & Sons

Luo S, Yao H, Zhang Z, Bem T S. 2022. High-resolution crustal and upper mantle shear-wave velocity structure beneath the central-southern Tanlu fault: Implications for its initiation and evolution. Earth Planet Sci Lett, 595: 117763

Luo Y, Yang Y, Xu Y, Xu H, Zhao K, Wang K. 2015. On the limitations of interstation distances in ambient noise tomography. Geophys J

Int, 201: 652–661

Ma L, Jiang S Y, Hou M L, Dai B Z, Jiang Y H, Yang T, Zhao K D, Pu W, Zhu Z Y, Xu B. 2013. Geochemistry of Early Cretaceous calc-alkaline lamprophyres in the Jiaodong Peninsula: Implication for lithospheric evolution of the eastern North China Craton. Gondwana Res, 25: 859–872

Ma X Y, Liu C Q, Liu G D. 1991. Xiangshui (Jiangsu province) to Mandal (Nei Mon-GGOL) geoscience transect. Acta Geol Sin, 3: 199–215

Marquis G, Hyndman R D. 1992. Geophysical support for aqueous fluids in the deep crust: Seismic and electrical relationships. Geophys J Int, 110: 91–105

Martyn U. 2003. Studying continental dynamics with magnetotelluric exploration. Earth Sci Front, 10: 25–38

Meng L, Lin W. 2021. Episodic crustal extension and contraction characterizing the Late Mesozoic tectonics of East China: Evidence from the Jiaodong Peninsula, East China. Tectonics, 40: E2020TC006318

Menzies M A, Xu Y G, Zhang H F, Fan H R. 2007. Integration of geology, geophysics and geochemistry: A key to understanding the North China Craton. Lithos, 96: 1–21

Montagner J P, Nataf H C. 1986. A simple method for inverting the azimuthal anisotropy of surface waves. J Geophys Res, 91: 511–520

Niu Y L. 2005. Generation and evolution of basaltic magmas: Some basic concepts and a hypothesis for the origin of the Mesozoic-Cenozoic volcanism in eastern China. Geol J China Univ, 11: 9–46

Selverstone J, Axen G J, Luther A. 2012. Fault localization controlled by fluid infiltration into mylonites: Formation and strength of low-angle normal faults in the midcrustal brittle-plastic transition. J Geophys Res, 117: B06210

Shan X, Zhai M G, Oliveira E P, Santosh M, Wang F. 2015. Convergent margin magmatism and crustal evolution during Archean-Proterozoic transition in the Jiaobei terrane: Zircon U-Pb ages, geochemistry, and Nd isotopes of amphibolites and associated grey gneisses in the Jiaodong complex, North China Craton. Precambrian Res, 264: 98–118

Shearer P M. 2009. Introduction to Seismology. Cambridge: Cambridge University Press

Sleep N H, Blanpied M L. 1994. Ductile creep and compaction: A mechanism for transiently increasing fluid pressure in mostly sealed fault zones. Pure Appl Geophys, 143: 9–40

Song M C. 2015. The main achievements and key theory and methods of deep-seated prospecting in the Jiaodong gold concentration area, Shandong Province. Geol Bull China, 34: 1758–1771

Song M, Li S, Santosh M, Zhao S, Yu S, Yi P, Cui S, Lv G, Xu J, Song Y, Zhou M. 2015. Types, characteristics and metallogenesis of gold deposits in the Jiaodong Peninsula, Eastern North China Craton. Ore Geol Rev, 65: 612–625

Tam P Y, Zhao G, Liu F, Zhou X, Sun M, Li S. 2011. Timing of metamorphism in the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji Belt: New SHRIMP U-Pb zircon dating of granulites, gneisses and marbles of the Jiaobei massif in the North China Craton. Gondwana Res, 19: 150–162

Tan J, Wei J, Audétat A, Pettke T. 2012. Source of metals in the Guocheng gold deposit, Jiaodong Peninsula, North China Craton: Link to early Cretaceous mafic magmatism originating from Paleoproterozoic metasomatized lithospheric mantle. Ore Geol Rev, 48: 70–87

Tang J, Zheng Y F, Wu Y B, Gong B, Zha X, Liu X. 2008. Zircon U-Pb age and geochemical constraints on the tectonic affinity of the Jiaodong terrane in the Sulu orogen, China. Precambrian Res, 161: 389–418

Tarantola A, Valette B. 1982. Generalized nonlinear inverse problems solved using the least squares criterion. Rev Geophys, 20: 219–232

Wan Y, Liu D, Dong C, Liu S, Wang S, Yang E. 2011. U-Th-Pb behavior of zircons under high-grade metamorphic conditions: A case study of zircon dating of meta-diorite near Qixia, eastern Shandong. Geosci Front, 2: 137–146

Wang J, Chang S C, Lu H B, Zhang H C. 2016. Detrital zircon provenance of the Wangshi and Laiyang groups of the Jiaolai basin: Evidence for Early Cretaceous uplift of the Sulu orogen, Eastern China. Int Geol Rev, 58: 719–736

Wang Q F, Yang L, Zhao H S, Groves D I, Weng W J, Xue S C, Li H J, Dong C Y, Yagn L Q, Li D P, Deng J. 2022. Towards a universal model for orogenic gold systems: A perspective based on Chinese examples with geodynamic, temporal, and deposit-scale structural and geochemical diversity. Earth-Sci Rev, 224: 103861

Wang Q F, Zhao H S, Groves D I, Deng J, Zhang Q W, Xue S C. 2020. The Jurassic Danba hypozonal orogenic gold deposit, western China: Indirect derivation from fertile mantle lithosphere metasomatized during Neoproterozoic subduction. Miner Depos, 55: 309–324

Whitmeyer S J, Wintsch R P. 2005. Reaction localization and softening of texturally hardened mylonites in a reactivated fault zone, central Argentina. J Metamorph Geol, 23: 411–424

Xu B, Hou Z Q, Griffin W L, Zheng Y, Wang T, O'Reilly S Y. 2021. Cenozoic lithospheric architecture and metallogenesis in south-eastern Tibet. Earth-Sci Rev, 214: 1–26

Xu P, Liu F, Ye K, Wang Q, Cong B, Chen H. 2002. Flake tectonics in the Sulu orogen in eastern China as revealed by seismic tomography. Geophys Res Lett, 29: 23-1–23-4

Yang J H, Chu M F, Liu W, Zhai M G. 2003b. Geochemistry and

petrogenesis of Guojialing granodiorites from the northwestern Jiaodong Peninsula, eastern China. Acta Petrol Sin, 19: 692–700

Yang J H, Wu F Y, Wilde S A. 2003a. A review of the geodynamic setting of large-scale Late Mesozoic gold mineralization in the North China Craton: An association with lithospheric thinning. Ore Geol Rev, 23: 125–152

Yang L Q, Deng J, Wang Z L. 2014. Mesozoic gold metallogenic system of the Jiaodong gold province, eastern China. Acta Petrol Sin, 30: 2247–2467

Yang L, Zhao R, Wang Q, Liu X, Carranza E J M. 2018. Fault geometry and fluid-rock reaction: Combined controls on mineralization in the Xinli gold deposit, Jiaodong Peninsula, China. J Struct Geol, 111: 14–26

Yang L, Wang Q, Liu X. 2015. Correlation between mineralization intensity and fluid-rock reaction in the Xinli gold deposit, Jiaodong Peninsula, China: Constraints from petrographic and statistical approaches. Ore Geol Rev, 71: 29–39

Yang W. 2002. Geophysical profiling across the Sulu ultra-high-pressure metamorphic belt, eastern China. Tectonophysics, 354: 277–288

Yang Y, Ritzwoller M H, Levshin A L, Shapiro N M. 2007. Ambient noise Rayleigh wave tomography across Europe. Geophys J Int, 168: 259–274

Yang Y J, Ritzwoller M H, Zheng Y, Shen W S, Levshin A L, Xie Z J. 2012. A synoptic view of the distribution and connectivity of the mid-crustal low velocity zone beneath Tibet. J Geophys Res, 117: B04303

Yao H J, Gouédard P, Collins J A, McGuire J J, van der Hilst R D. 2011. Structure of young East Pacific Rise lithosphere from ambient noise correlation analysis of fundamental- and higher-mode Scholte-Rayleigh waves. Comptes Rendus Geosci, 343: 571–583

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. Geophys J Int, 166: 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. J Geophys Res, 115: B12307

Yu G P, Xu T, Ai Y S, Chen L, Yang J H. 2020. Significance of crustal extension and magmatism to gold deposits beneath Jiaodong Peninsula, eastern North China Craton: Seismic evidence from receiver function imaging with a dense array. Tectonophysics, 789: 228532

Yu N, Wang E, Wang X, Kong W, Li D, Li R. 2022. The influence of the Ailaoshan-Red River shear zone on the mineralization of the Beiya deposit on the southeastern margin of the Tibetan Plateau revealed by a 3-D magnetotelluric survey. J Geophys Res-Solid Earth, 127: E2021JB022923

Yu X, Shan W, Xiong Y, Geng K, Sun Y, Chi N, Guo B, Li D, Li H, Song Y, Yang D. 2018. Deep structural framework and genetic analysis of gold concentration areas in the northwestern Jiaodong Peninsula, China: A new understanding based on high-reslution reflective seismic survey. Acta Geol Sin-Engl Ed, 92: 1823–1840

Zhang K, Lü Q, Yan J, Hu H, Fu G M, Shao L. 2018. Crustal structure beneath the Jiaodong Peninsula, North China, revealed with a 3D inversion model of magnetotelluric data. J Geophys Eng, 15: 2442–2454

Zhang Y Q, Li J L, Zhang T. 2007. Late Mesozoic kinematic history of the Muping-Jimo fault zone in Jiaodong Peninsula, Shandong Province, East China. Geol Rev, 53: 289–300

Zhao R, Wang Q, Liu X, Santosh M, Yuan W, Wang W. 2018. Uplift history of the Jiaodong Peninsula, eastern North China Craton: Implications for lithosphere thinning and gold mineralization. Geol Mag, 155: 979–991

Zhao R, Wang Q F, Liu X F, Wang W, Pan R G. 2016. Architecture of the Sulu crustal suture between the North China Craton and Yangtze Craton: Constraints from Mesozoic granitoids. Lithos, 266-267: 348–361

Zhao Z, Zhao Z X, Xu J R. 2012. Velocity structure heterogeneity and tectonic motion in and around the Tan-Lu fault of China. J Asian Earth Sci, 57: 6–14

Zheng T Y, Zhao L, Xu W W, Zhu R X. 2008. Insight into modification of North China Craton from seismological study in the Shandong Province. Geophys Res Lett, 35: L22305

Zhu R X, Zheng T Y. 2009. Destruction geodynamics of the North China craton and its Paleoproterozoic plate tectonics. Sci Bull, 54: 3354–3366

(责任编委: 姚华建)