

滕吉文, 赵金仁, 徐涛等. 2026. 满都拉-铜川-涪陵超长宽角反射/折射地震剖面: 多元盆山耦合基底起伏与矿产资源效应. 地球物理学报, 69(3): 1155-1174, doi: 10.6038/cjg2025T0313.

Teng J W, Zhao J R, Xu T, et al. 2026. Mandula-Tongchuan-Fuling ultra-long seismic profile: undulating crystalline basement of basins-mountain coupling chains and mineral resources. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 69(3): 1155-1174, doi: 10.6038/cjg2025T0313.



# 满都拉-铜川-涪陵超长宽角反射/折射地震剖面: 多元盆山耦合基底起伏与矿产资源效应

滕吉文<sup>1</sup>, 赵金仁<sup>2</sup>, 徐涛<sup>1</sup>, 白志明<sup>1</sup>, 范振宇<sup>2</sup>,  
闫雅芬<sup>1</sup>, 宋向辉<sup>2</sup>, 马策军<sup>2</sup>

1 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

2 中国地震局地球物理勘探中心, 郑州 450002

**摘要** 满都拉-铜川-涪陵超长宽角反射/折射地震剖面全长 1700 km, 自北向南穿越阴山造山带、鄂尔多斯盆地、秦岭造山带直抵四川盆地南缘等多元盆山体系. 该剖面的上地壳速度结构成像结果厘定了: (1) 秦岭-大巴造山带属同一基底, 盆-山地带基底起伏强烈、有序, 系多元盆-山相串的耦合链; (2) 剖面所经过的两大盆地发育断裂切割较深的凹陷沉积, 其结晶基底深度可达 4.0~6.0 km (鄂尔多斯盆地) 及 6.0~10.0 km (四川盆地); (3) 剖面经过的两造山带为成矿带, 两沉积盆地为油气的成藏、成储区 (或富集区).

**关键词** 超长剖面; 盆山耦合; 沉积地层; 结晶基底起伏; 矿产资源和能源

中图分类号 P315

收稿日期 2025-05-25, 2026-01-05 收修定稿

DOI: 10.6038/cjg2025T0313

CSTR: 32084.14.cjg2025T0313

## Mandula-Tongchuan-Fuling ultra-long seismic profile: undulating crystalline basement of basins-mountain coupling chains and mineral resources

TENG JiWen<sup>1</sup>, ZHAO JinRen<sup>2</sup>, XU Tao<sup>1</sup>, BAI ZhiMing<sup>1</sup>, FAN ZhenYu<sup>2</sup>,  
YAN YaFen<sup>1</sup>, SONG XiangHui<sup>2</sup>, MA CeJun<sup>2</sup>

1 Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2 Geophysical Exploration Center, China Earthquake Administration, Zhengzhou 450002, China

**Abstract** The Mandula-Tongchuan-Fuling ultra-long seismic profile spans a total length of 1700 km, traversing from north to south through the Yin Mountains Orogenic Belt, the Ordos Basin, the Qinling Orogenic Belt, and extending to the southern edge of the Sichuan Basin near Fuling, with a diverse interlacing of basin and mountain systems. Based on the upper crustal velocity structure image using the refraction seismic data of this profile, our study has confirmed that: (1) The Qinling-Daba Orogenic Belt belongs to the same crystalline basement. The basin-mountain zone basement is highly undulating and orderly, forming a coupled chain of diverse basin-mountain sequences; (2) The two major basins have thick depressions cut by faults, with the crystalline basement layers whose depth reaching 4.0~6.0 km (Ordos Basin) and 6.0~10.0 km (Sichuan Basin); (3) Along the profile, the southern two orogenic belts are metallogenic belts, while the two sedimentary basins

are areas for the accumulation and storage of oil and gas (or enrichment areas).

**Keywords** Ultra-long profile; Basin-mountain coupling; Sedimentary strata; Crystalline basement undulation; Mineral resources and energy

## 0 引言

数十年来中国大陆华北克拉通的生长、形成和破坏过程,其与周缘板块的拼贴关系、伴生的构造-岩浆-成矿作用等一直是地学研究的热点(如陈衍景等, 1998; 朱日祥等, 2012, 2015; 翟明国, 2019; 侯增谦等, 2020). 华北克拉通在太古宙古陆核基础上经过多期次构造运动、变质和混合岩化作用,最终在古元古代末期形成结晶基底. 其组成和形态特征是观察地壳形成与发展、板块碰撞和区域构造活动、矿产资源分布的重要指标; 结晶基底的组成和属性反映了基底早期形成过程,然而中新生代构造运动、深部热活动等,可能导致结晶基底岩石发生变质作用,改变其原有矿物组成、结构和岩石类型; 而地壳的升降、褶皱和断裂等活动,则会直接改变结晶基底的原始起伏状态、导致结晶基底隆起和凹陷.

自 20 世纪末叶和 21 世纪初以来,在华北克拉通和扬子克拉通不同的地段曾进行过人工源地震、天然地震、大地电磁测深、重力场和磁力场的观测与研究(江为为等, 2000; 马杏垣等, 1988; 阮小敏等, 2011; 胡国泽等, 2014; 刘昌铨等, 1991; 李祥等, 1987; 江钊等, 1990; 王光杰等, 2004; 王谦身等, 2005, 2013a, b; 王涛等, 2007; 丁燕云, 2000; 滕吉文等, 2008b; 张永谦等, 2011; 张学民等, 2004; 胡家富等, 1996; 段永红等, 2002; 熊绍柏等, 2002; 赵金仁等, 2017), 并获得了华北克拉通结构与边界的重要认识,然而对南、北两大克拉通及其所包括的盆-山构造体系的耦合关系却仍然欠缺有序的连接和解释.

中生代以来强烈的地质运动(如燕山运动、喜山运动、新特提斯洋关闭、及古太平洋俯冲等)奠定了中国大陆现今构造和地理格局. 内蒙古高原-阴山造山带-鄂尔多斯盆地-秦岭造山带-四川盆地等经历了漫长的地史变迁和多期次构造运动(滕吉文等, 2010b), 是观察中国大陆不同地体构造体制和变形的宝贵窗口, 了解该剖面结晶基底组成和形态特征对于认识该区多元盆山耦合过程的动力学响应及相应的成岩、成矿和成储效应具有重要意义.

为此, 本文利用宽角反射/折射 Pg 波走时数据, 通过精细反演刻画了沉积建造与结晶基底的结构, 厘定其沿剖面的起伏与构造变化特征, 探究其成山、成盆、成岩、成矿的深层过程和动力学响应.

## 1 人工源地震结晶基底折射波场探测

### 1.1 剖面位置

地震探测剖面位于中国大陆的中东部地区, 北起中蒙交界的满都拉、跨越了内蒙古褶皱带与阴山, 中部穿越了鄂尔多斯盆地中心地域及秦岭-大巴造山带, 南抵四川盆地的东南缘, 基本沿满都拉、固阳、达拉特旗、榆林、铜川、宁陕、涪陵等地一线覆盖了多元构造体系.

由于满都拉-铜川-涪陵剖面穿越多元盆-山构造体系(图 1), 而对其结晶基底以上沉积建造在成山、成盆、成岩、成矿过程与背景的勘察研究十分重要, 在探测方法上采用人工爆炸源激发地震波场、在超长探测剖面中利用折射波场 Pg 震相对基底进行高分辨成像.

### 1.2 地震波场观测系统

该剖面近南北走向, 全长约 1700 km(包括叠掩剖面段), 沿线布设 18 个爆炸点(1.3 ~ 3.8 t TNT, 井深 70 m 左右)激发地震波场, 爆炸点间距大多在 60.0 ~ 80.0 km, 观测点距平均为 2.0 km 左右. 沿剖面采用多重相遇和追踪系统进行高分辨率数据采集(图 2).

在沿剖面的观测中共布设 712 台三分量数字地震仪、记录了来自地下结晶基底以上沉积层介质的波场信息, 采集了反映基底结构的高质量 Pg 波震相数据集.

## 2 结晶基底的折射波(首波)震相特征

地震记录上来自结晶基底的折射波(首波或弱回折波)震相 Pg 为初至波, 其震相特征反映了沿剖面不同构造体系的结构特性.

### 2.1 基底折射波场 Pg 震相的基本属性

#### (1) Pg 震相的基本属性

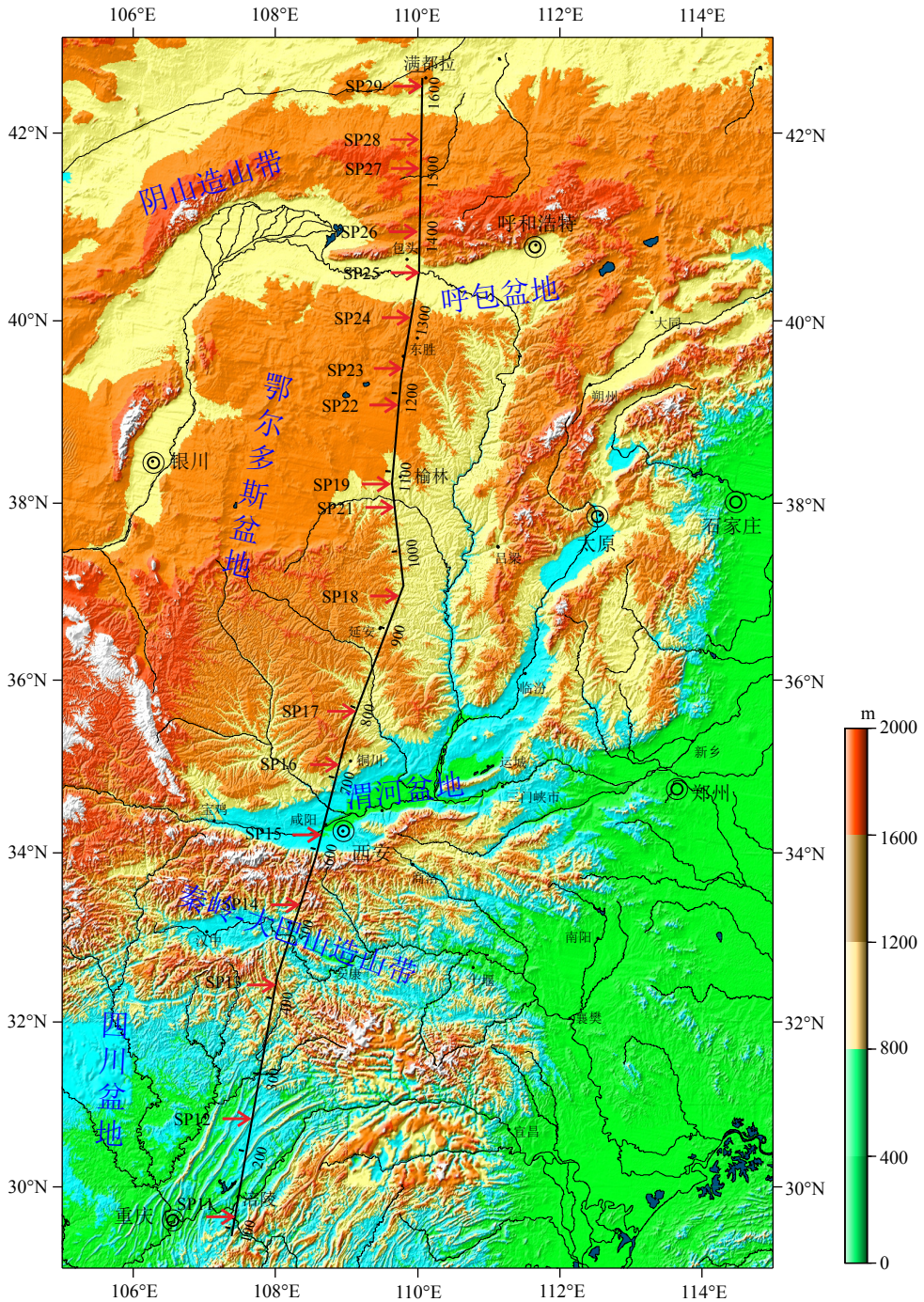


图 1 满都拉-铜川-涪陵探测剖面位置图

Fig. 1 Location map of the Fuling–Yulin–Mandula seismic profile

Pg 是在地震记录上最先出现的初至波, 此乃结晶基底以上沉积建造中传播的折射波, 其追踪距离主要在 0.0 ~ 140 km 区间. 由于 Pg 震相为初动, 对沉积建造和基底的起伏变化既敏感、亦直观易辨, 是研究基底结构变异的唯一波组, 其传播视速度主要分布在 5.50 ~ 6.10 km·s<sup>-1</sup>.

(2) Pg 震相走时反应特征

基于本剖面超长、又跨越多元构造体系, 故在

各爆炸 (分支) Pg 波地震记录图的折合走时曲线上呈现出明显的走时波动 (或跳跃), 即呈现出的标志是: 在沉积盆地中 (或拗陷区) 到时滞后、视速度亦低, 能量 (振幅) 随距离亦衰减较快; 在隆起区或造山带的基岩出露地带 (如阴山造山带) 其到时超前明显, 振幅亦强, 追踪距离较远, 且视速度偏高.

基于 Pg 波震相清晰易辨, 追踪距离较远, 震相可表现出明显的超前与滞后、能量强弱亦变化明显

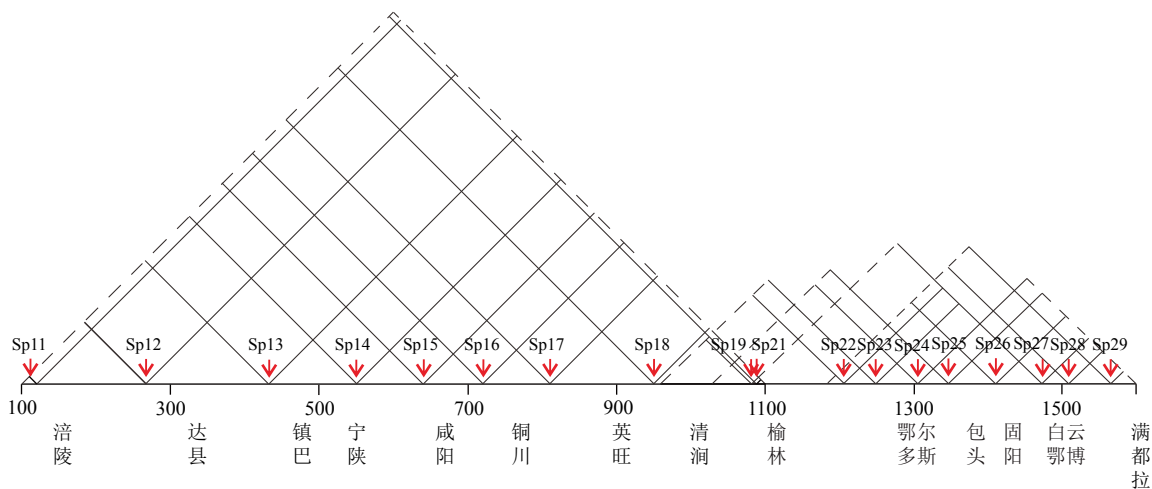


图2 满都拉-铜川-涪陵探测剖面观测系统图

Sp11 ~ Sp29,为爆破点位置;剖面桩号为100~1600.

Fig. 2 Observation system diagram of the Fuling-Yulin-Mandula seismic profile

Sp11 ~ Sp29, denotes shot position; 100 ~ 1600 denotes profile position.

等特征,而且因为追踪距离的长短不仅对基底的起伏与盆、山结构的变化关切,且与断裂构造带的判识密切相关。

为了对沿剖面基底结构特性的分析起见,将分为:南部的榆林-咸阳-涪陵和北部的鄂尔多斯盆地-阴山造山带两部分,且分别对两区段的各大地构造单元分别进行阐述,以突出研讨华北克拉通-秦岭造山带-扬子克拉通之间的耦合响应。

## 2.2 南部榆林-咸阳-涪陵地带 Pg 震相波场

沿剖面在这一地带不同地质构造单元 Pg 震相的记录时间和所反映的基底起伏变化差异甚大(图3)。

### (1) 南鄂尔多斯盆地的 Pg 震相波场

由图3可见,在鄂尔多斯盆地南部以爆炸点 SP18 为中心的地震记录向北可追踪 130.0 km,向南可追踪 120.0 km(图3a),它所反映的是延安-榆林区段的基底结构,其折合走时多在 1.0 s 左右变化,视速度主要分布在  $6.00 \sim 6.20 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$  之间,即表明这一地带基底结构相对平稳,在榆林以南亦变化平缓(图3b),这些地震学现象表征其地层结构为一强速度梯度层。

### (2) 秦岭-大巴造山带 Pg 波场特点

此区段是华北克拉通与南部扬子克拉通之间的一个极为重要的特殊地带,地震记录显示不同爆炸点激发的波场差异明显(图3c、d)。SP14 炮点位于秦岭山中,向南(左支)的追踪距离可达 110.0 km、向北约 70.0 km。这里极为突显的是秦岭北缘的渭河盆地(地堑),实际上它应视为秦岭-大巴造山带北缘

的山前盆地,而其向北因受渭河盆地的阻隔,基底埋深整体浅、且向南倾,并为与扬子克拉通的界带。秦岭造山带与渭河断陷盆地的 Pg 波震相到时与振幅衰减幅度均差异甚大,渭河断陷盆地 Pg 波能量衰减快,到时滞后显著,视速度低(约为  $5.50 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ ),明显低于南北两侧,反映出渭河断陷盆地的基底深与沉积建造厚而窄的形态特征。

### (3) 四川盆地东北部地带的 Pg 震相波场

在 SP12 的 Pg 波记录中,以爆炸点为中心向北可追踪 130.0 km,视速度为  $5.55 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ ,向南可追踪 140.0 km(图3e),总体上北侧比南侧变化强烈,而这里即为秦岭-大巴造山带与其以南的扬子克拉通的过渡地带,故 Pg 波到及振幅均变化较大。

## 2.3 鄂尔多斯盆地-阴山造山带 Pg 震相特征

在这一地段进行了六次爆炸激发地震波场,而鄂尔多斯盆地北部与呼包盆地、阴山造山带及其以北地带的震相 Pg 波震相特点各不相同、差异明显,结晶基底以上沉积建造介质的 Pg 波视速度为  $6.00 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$  左右。

### (1) 鄂尔多斯盆地中北部

在此区段 Pg 波震相显示出速度随深度变异的特征,结晶基底界面清晰、向北变浅,而其走时曲线具有回折波的传播特征,在鄂尔多斯盆地北部的一些地震记录图上、即近爆炸点处可分辨出基底顶界面的反射波震相(图4a),而 Pg 波的走时特性表明该地段沉积层较厚、其结构相对稳定。

### (2) 呼包断陷盆地

Pg 波震相在近爆炸点处的走时曲线呈“弧形上

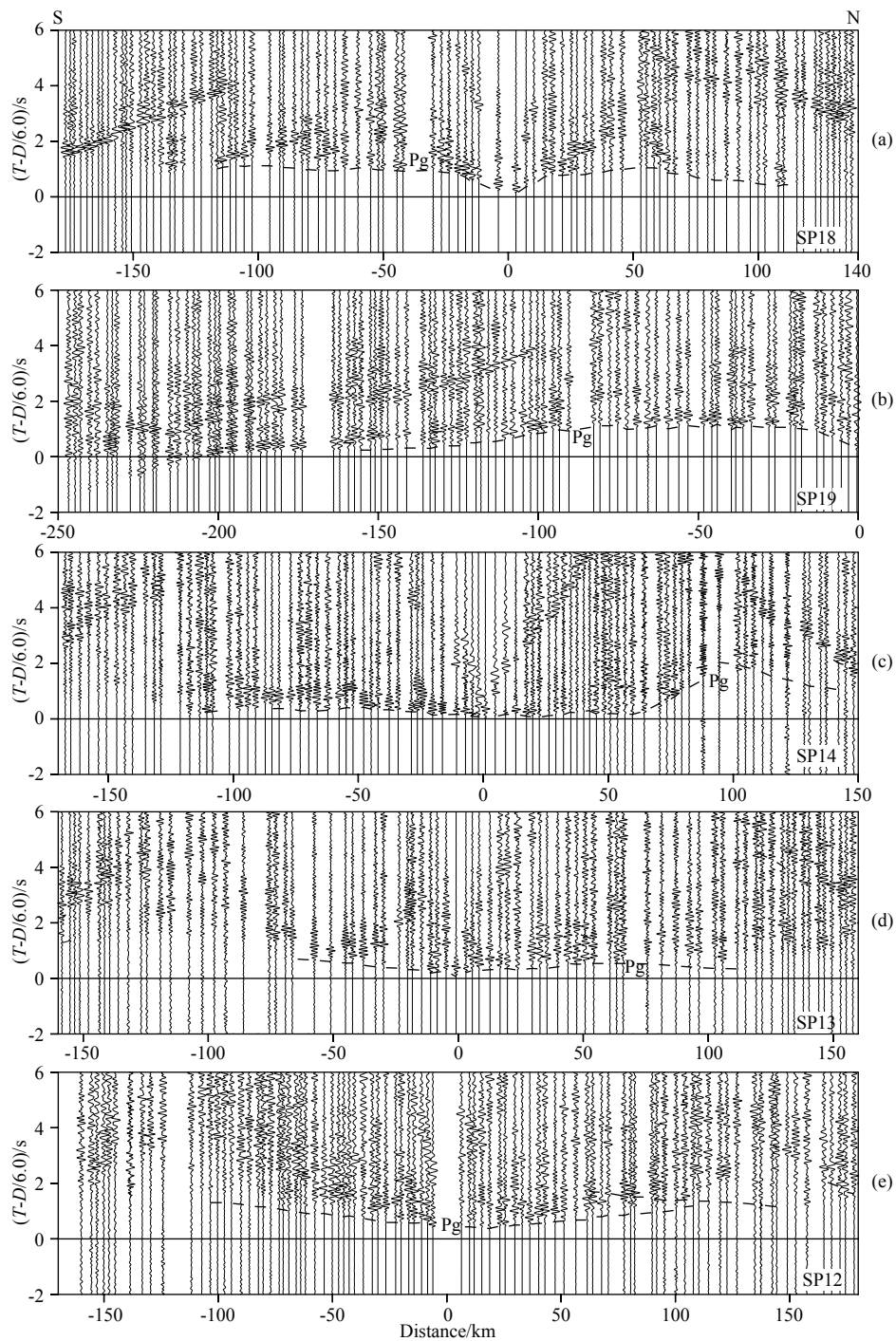


图 3 榆林-咸阳-涪陵区段 Pg 波典型地震波场记录

(a) 南鄂尔多斯盆地 (SP18) 的 Pg 波; (b) 鄂尔多斯盆地中部 (SP19) 的 Pg 波; (c) 秦岭造山带 (SP14) 的 Pg 波;  
(d) 大巴弧形山系地带 (SP13) Pg 波; (e) 四川盆地东北部 (SP12) 的 Pg 波。

Fig. 3 Typical seismic wavefield records of Pg Waves of the Fuling–Yulin–Mandula seismic profile

(a) Pg waves in the South Ordos Basin; (b) Pg waves in the central part of the Ordos Basin; (c) Pg waves in the Qinling Orogenic Belt;  
(d) Pg waves in the arc-shaped system of Dabashan; (e) Pg waves in the northeastern part of the Sichuan Basin.

凸”状,在其南支、北支体现呼包盆地基底结构特点的 Pg 波追踪距离均有限、仅 25.0 km 左右,远爆炸点记录的 Pg 波视速度大于  $6.00 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 。在呼包盆地中 Pg 波到时滞后幅度明显,而其南支最大折合走时

延迟为 1.70 s,北支最大折合走时约为 2.79 s,且波形简单、稳定,初至清晰 (图 4b)。在盆地南、北两侧分别进入鄂尔多斯盆地北缘和阴山造山带后, Pg 波到时明显超前,其波组震相特征揭示了呼包断陷盆地

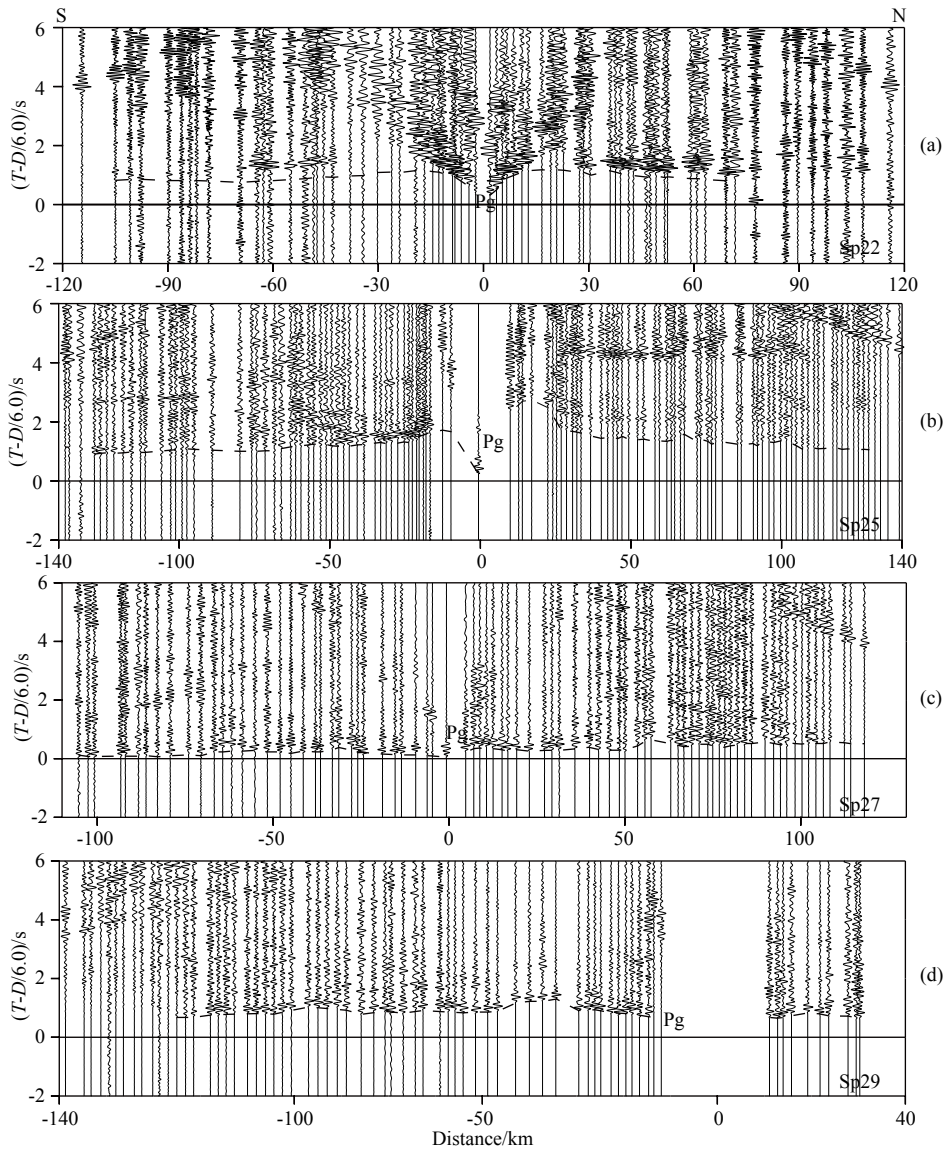


图 4 延川-包头-满都拉区段 Pg 波典型地震波场记录

(a) 鄂尔多斯盆地北部 (SP22) 的 Pg 波; (b) 呼包断陷盆地 (SP25) 的 Pg 波; (c) 阴山造山带 (SP27) 的 Pg 波; (d) 内蒙古高原 (SP29) 的 Pg 波。

Fig. 4 Typical seismic wavefield records of Pg Waves of the Yanchuan–Baotou–Mandula seismic profile

(a) Pg waves in the northern part of the Ordos Basin; (b) Pg waves in the Hohhot–Baotou Basin; (c) Pg waves in the Yin Mountains Orogenic Belt; (d) Pg waves in the Inner Mongolia Plateau.

盖层的厚度,其速度偏低,且呈现出南浅、北深的格局。而远爆炸点记录的 Pg 波震相走时趋势揭示出鄂尔多斯盆地与阴山造山带结晶基底在结构上的差异。

### (3) 阴山造山带地带

阴山区域的 Pg 波震相特点表现为初至超前,清晰可靠,能量强,且可远距离追踪,近爆炸点走时曲线上凸段很小或几乎消失,折合到时延迟小。自爆炸点向北远距离的 Pg 波走时曲线呈阶状起伏或锯齿形展布,其视速度为  $6.00 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 。显然,山区内 Pg 波走时整体超前明显,走时延迟小,即使在山间

盆地亦不大于  $0.6 \text{ s}$ ,且波形相对复杂、振幅亦变化较大。而向南则视速度增大到  $6.20 \sim 6.40 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ ,即表明、阴山造山带区段结晶基底的基岩已出露,并且视速度明显增大(图 4c)。在其南侧与呼包盆地相衔接处 Pg 波震相到时急剧变化,表明结晶基底的抬升和下陷极为陡峭。

### (4) 阴山造山带以北内蒙古高原地带

自阴山向北已进入内蒙古高原、临近中蒙边界。在剖面北端 SP29 爆炸点激发的 Pg 震相波场在近距离的走时曲线呈上凸状、长度约  $10.0 \text{ km}$ ,远爆炸点折合走时延迟不大于  $0.9 \text{ s}$ ,波形相对复杂,振

幅变化亦较大(图 4d), 显示出内蒙古高原地带沉积盖层的不均匀性和结晶基底起伏特征。

### 3 Pg 波震相走时与射线覆盖密度

在基底结构研究中, Pg 波走时是计算求取其波组震相传播介质结构的基本数据, 射线的覆盖密度反映了所反演速度结构的可靠度, 而速度分布是区分介质属性、结构变异的核心。只有记录 Pg 震相的精细走时数据采集、高覆盖率的 Pg 波射线路径和速度约束, 方能可靠的厘定结晶基底的起伏和结构变化。

### 3.1 Pg 震相走时拟合

1700 km 长的满都拉-铜川-涪陵地震探测剖面共进行了 18 次爆炸激发, 利用 712 台数字地震仪的记录地震波场, 沿剖面实现了多元的追逐和多次相遇的观测系统、以此进行探测和互换对比厘定了来自各爆炸点记录的清晰、可靠的 Pg 震相地震记录图(图 3、图 4)。

基于沿此超长剖面获取了一系列初至折射波 Pg 震相的到时数据集, 而绘制了各炮的拾取走时与计算走时图(图 5), 这是反演和精细刻画剖面基底起伏的依据。

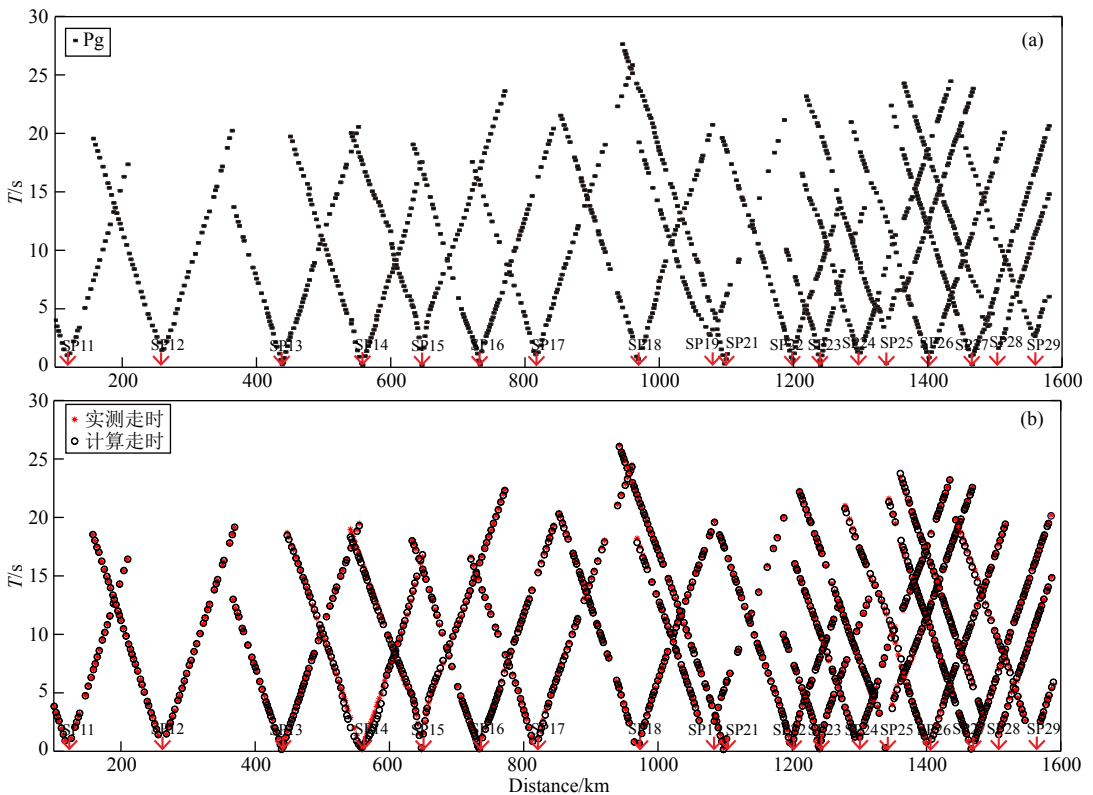


图 5 涪陵—榆林—满都拉剖面 Pg 波走时曲线和理论与实测到时拟合图

(a) 全剖面 Pg 波走时曲线图; (b) 全剖面 Pg 波理论与实测到时拟合图。

Fig. 5 Pg wave travel-time curve and fitting of measured and theoretical travel time curves of the Fuling-Yulin-Mandula seismic profile

(a) Pg wave travel time curve diagram of the whole profile; (b) Pg wave travel-time fitting of measured and theoretical travel time curves of the Fuling-Yulin-Mandula seismic profile.

### 3.2 地震波射线覆盖密度与分辨率

在基底结构的反演中, Pg 地震波场的射线覆盖密度直接影响基底与沉积建造介质属性和结构模型的重建, 即地震波射线沿剖面必须有一定的密度覆盖率方可获得高分辨的基底结构模型。

(1) Pg 地震波场沿剖面射线穿透深度

沿涪陵—榆林—满都拉超长剖面 Pg 震相的射

线分布密度可见, 在不同地块射线的穿透深度与覆盖密度亦有所不同(图 6), 在四川盆地、渭河盆地、呼包盆地的射线穿透深度均大, 最深可达 10.0 km, 鄂尔多斯盆地的穿透深度多为 5.0~8.0 km, 而在秦岭-大巴与阴山造山带的穿透深度却仅为 1.5~3.0 km(图 6)。

(2) Pg 地震波场沿剖面射线覆盖密度

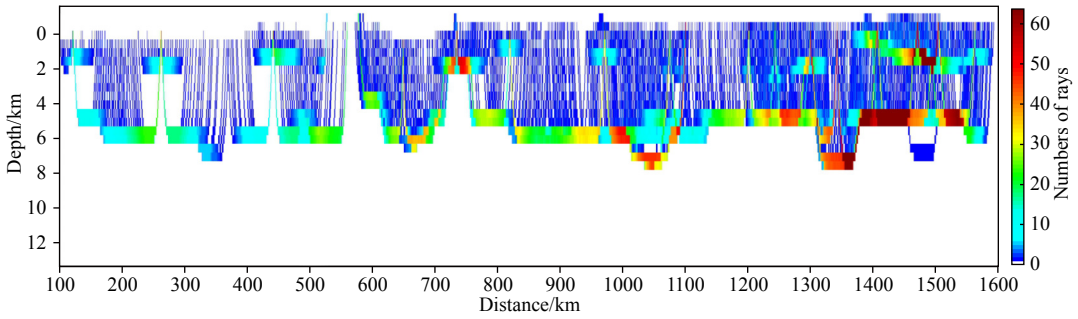


图6 涪陵-榆林-满都拉剖面Pg波地震射线分布图

Fig. 6 Seismic ray coverage of the Fuling-Yulin-Mandula seismic profile

沿剖面在四川盆地、秦岭-大巴造山带、渭河盆地、鄂尔多斯盆地、呼包盆地、阴山造山带和内蒙古高原地带的Pg波射线覆盖密度基本上是均匀的,平均射线覆盖条数多为30~40条。整条剖面基本上达到射线全部覆盖、即不存在空白区,而仅在个别地段射线的分布密度和穿透深度略显不足、即较稀疏和穿透深度尚浅,而沿剖面速度结构模型计算的理论走时与实际观测走时曲线却得以很好的拟合与极小误差的重叠。

以上表明,本研究获取了超长剖面丰富的基底折射波到时数据,高密度的射线覆盖率保证了所反演速度分布的可靠性,从而揭示出多元盆-山耦合链的多种结构变化特征。

### (3) Pg震相层析成像及结晶基底厘定

为厘定沿剖面结晶基底以上沉积建造介质的物理属性、结构差异和断裂分布及其间的耦合响应需反演剖面地壳速度分布和变化特征。本文基于程函方程的有限差分方法求值以供基底折射波的走时反演和对复杂结构与断裂的辨识。同时亦采用时间

项反演方法获取基底界面形态与速度值,以此对比与互验(Vidale, 1990; Hole, 1992; 段永红等, 2002; 滕吉文等, 2008b, 2014; 徐涛等, 2014; 赵金仁等, 2017; 林吉焱等, 2020; 杨敬松等, 2024; 闫浩飞和刘国峰, 2024)。

在高分辨率Pg波走时数据采集、高密度地震波射线穿越覆盖和精细速度计算的前提下,经30次迭代反演计算,通过对数据模型的速度-深度换算,求得了沿剖面辖区不同构造特征地带的结晶基底和其以上沉积建造在纵向与横向的速度结构(图7),并利用时间项方法反演刻划了结晶基底的埋深起伏形态(图8)。

剖面结晶基底是其上部低速沉积层的底界、也是其下部火山岩或变质岩的顶部界面,其速度一般为 $(5.60 \pm 0.1) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ,故拟定 $5.60 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 为沿剖面地带的结晶基底速度界带(熊绍柏等, 2002; 贾进斗等, 1997; 邓军等, 2005; 王椿镛等, 1997; 徐朝繁等, 2006; 滕吉文等, 2008b, 2014)。显见,沿剖面取得的上地壳高分辨率速度图像反映出不同构造区段的沉积建造变化和结晶基底的起伏细节,如、凹陷盆地、

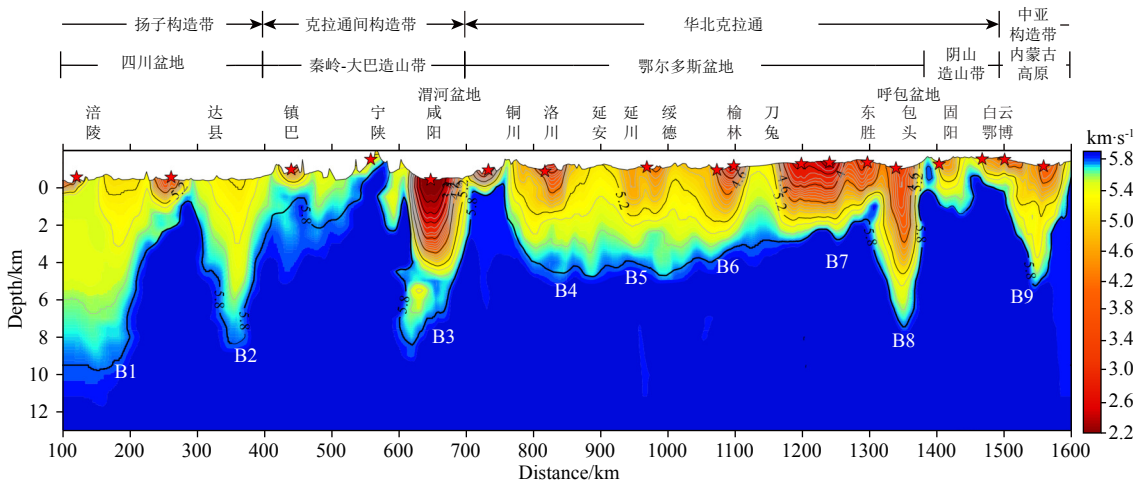


图7 涪陵-榆林-满都拉剖面Pg波二维速度分布与基底结构模型

Fig. 7 Two-dimensional velocity distribution and basement structure model of the Fuling-Yulin-Mandula seismic profile from the Pg waves



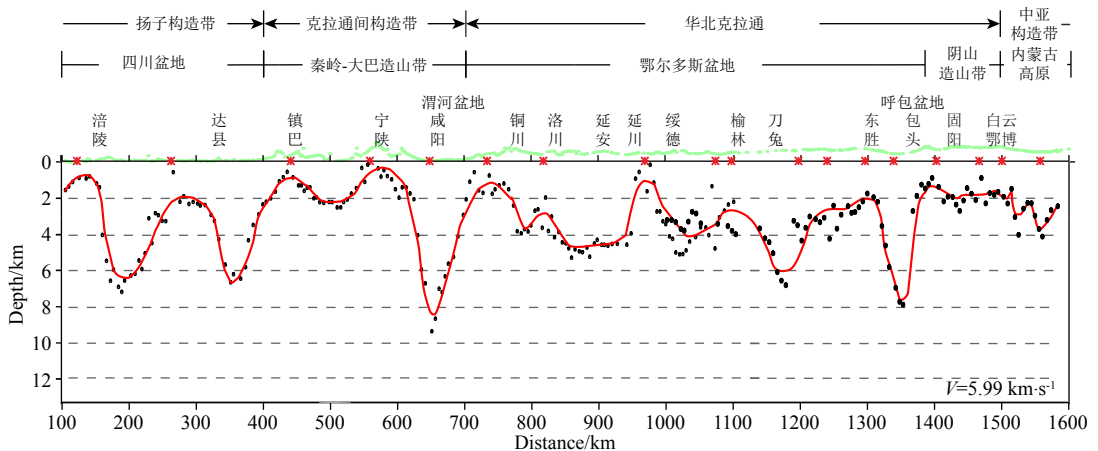


图 8 涪陵-榆林-满都拉剖面 Pg 波时间反演基底埋深形态

Fig. 8 The basement buried pattern of Fuling-Yulin-Mandula seismic profile from the Pg wave time inversion

向斜构造、基底断裂等,它们在速度上均表现为低速分布,而在山地、较大背斜、火山岩侵入体和结晶基底抬升处则通常表现为高速区,在古老造山带的地表和近地表速度变化相对较大。

#### 4 沉积建造、结晶基底起伏与构造分区

该剖面跨越华北和扬子两大克拉通,覆盖阴山造山带、鄂尔多斯盆地、秦岭-大巴造山带和四川盆地。成像结果对剖面覆盖区盆、山构造相间的格局中其结晶基底特征进行了直观清晰的刻画,下面详细讨论论区结晶基底起伏和沉积建造特征。

##### 4.1 盆山构造分区和结晶基底特征

本超长剖面由南向北,起自四川盆地-大巴、秦岭造山带-鄂尔多斯盆地-阴山造山带-内蒙古高原,再向北乃古亚洲洋造山带,相应沉积建造和结晶基底在纵向和横向地层分布是极不均匀的,且各具特色(图 7,图 8)。在总体上可分为四大区块,即四川盆地、秦岭-大巴造山带、鄂尔多斯盆地和阴山造山带,而各大区块内部又发育局部盆山体系,各自结构特征差异明显。

##### (1) 四川盆地

四川盆地是扬子克拉通北部的一个广阔且沉积建造厚的凹陷盆地。该盆地由剖面南端的涪陵附近(剖面桩号 100.0 km)向北经垫江、达县等地延伸至大巴山前,在 32°N(桩号 400.0 km)附近由大巴山弧形断裂所分隔。盆地内沉积建造厚度分布很不均匀,基底深度在 4.0~10.0 km 内变化, Pg 波速度分布在 4.60~6.00 km·s<sup>-1</sup> 之间。自古生代、中生代至今沉积厚度均大,在基底速度图像的南部区段其基底

凹陷形态显示的较为清晰(图 7—图 9)。

四川盆地内以镇巴为界,其南部与北部各有一沉积厚度可达 6.0~10.0 km 的凹陷盆地,即镇巴-达县附近开江之间的通江-万源盆地(B2)和开江南-涪陵之间的川东北盆地(B1),其沉积层均可厚达 8.0~10.0 km。推测在四川盆地中央地带、即达县附近的开江-梁平之间的基底隆起归因于走向 NNE 的相互平行的华蓥和明月山斜向插入所致。

四川盆地的成盆是在南部将扬子克拉通向北推挤、而秦岭-大巴阻隔与在结晶基底抬升的同时、山系隆起。四川盆地之所以成盆是与秦岭-大巴造山过程中、物质侧向流动关切,即其沉积物的巨厚堆积是与该造山带燕山期壳内造山活动、岩浆活动及构造运动密切相关。

##### (2) 秦岭-大巴造山带

秦岭-大巴造山带、并包括渭河断陷盆地,山区沉积极薄,其基底几乎出露地表,而渭河盆地沉积巨厚、基底埋藏深。

##### (a) 渭河地堑乃为与华北克拉通的界带

这一狭窄的断陷盆地却发育较厚沉积(基底深度 8.0±2.0 km)、且速度低,即由浅表的 2.20 km·s<sup>-1</sup> 向深部延伸到 (8.0±2.0) km 处,则速度值增大至 5.80 km·s<sup>-1</sup>,而渭河这一断陷盆地、或称其地堑乃为秦岭-大巴造山带与华北克拉通的界带。

##### (b) 秦岭-大巴造山带属同一结晶基底

剖面跨越商-丹缝合带和勉-略缝合带(分别形成于早古生代和晚古生代,表征扬子板块向华北克拉通下方俯冲形成秦岭造山带)。地形地貌上秦岭-大巴造山带是一片宽阔延绵的山地,而两者的规模及构造活动并非一个等级,而是差之甚大。由于两者

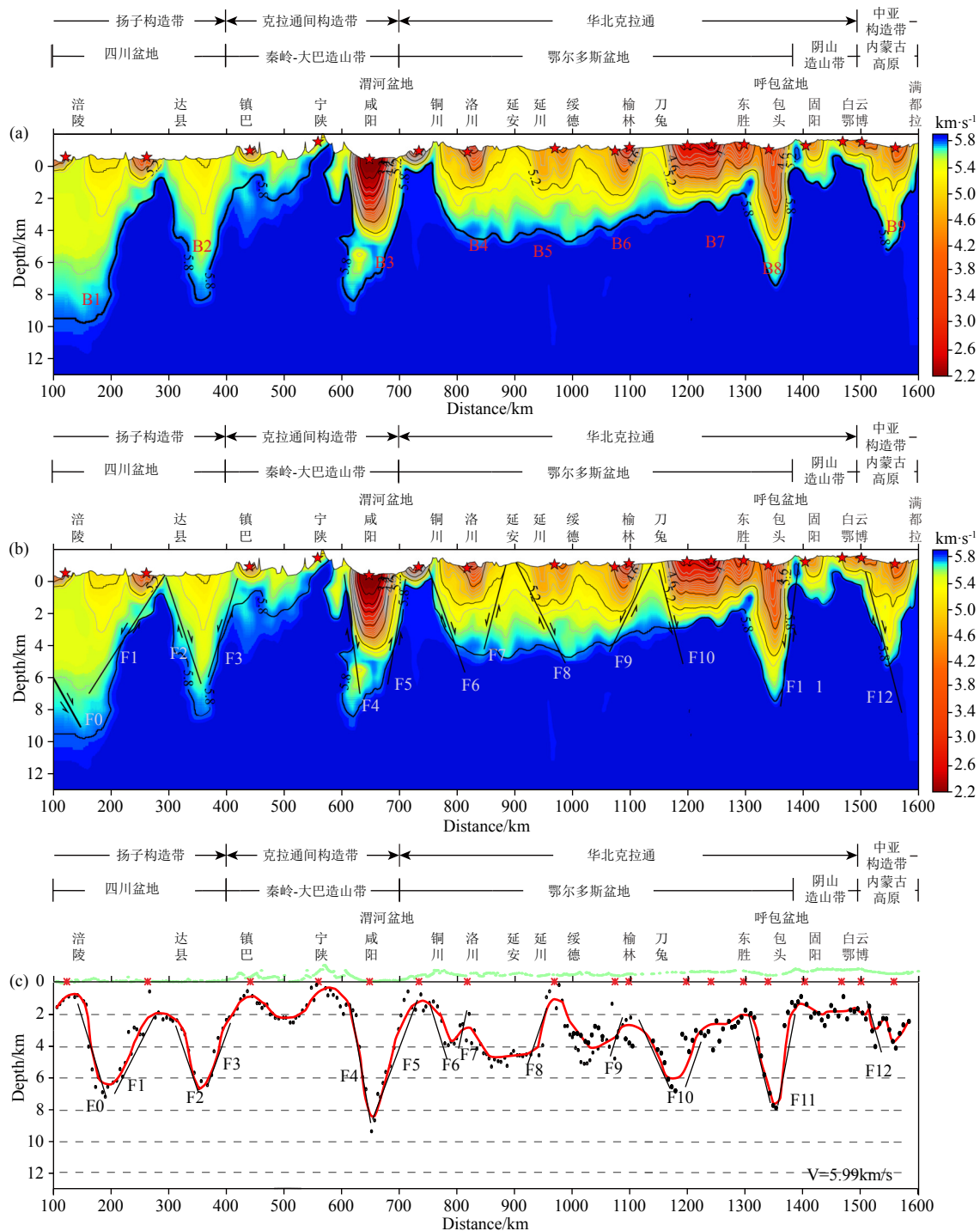


图 9 涪陵—榆林—满都拉剖面盆山体系统层析成像与结晶基底起伏

(a) Pg 波反演求得的盆山构造体系速度分布与基底展布形态; (b) 沿剖面盆山体系统与断裂构造分布; (c) Pg 波时间项反演与结晶基底深度分布.

Fig. 9 Tomography of basin-mountain system and undulation of the crystalline basement of Fuling-Yulin-Mandula seismic profile

(a) The velocity distribution and basement distribution pattern of the basin-mountain tectonic system obtained by Pg wave inversion; (b) Distribution of basin-mountain system and fault structure along the profile; (c) Pg wave time term inversion and crystalline basement depth distribution.

之间在地表有一汉水河穿越, 即似乎这被浅层断裂切割的河谷将两者分离. 但究其基底却证实两者应属于统一连续的基底. 这便表明, 秦岭与大巴山在深部是连续体, 而非各自独立的成山过程.

(c) 秦岭-大巴造山带的抬升与南北两缘沉积盆地的耦合

秦岭-大巴造山带地处华北克拉通与扬子克拉通之间, 同时受到周边远程和近程块体运动行为与

轨迹和动力过程的作用, 驱使秦岭-大巴造山带深部物质重新分异、调整, 物质与能量进行着强烈交换, 故导致秦岭-大巴这一陆内复合造山带的突起(图 10), 结晶基底出露至地表附近. 同时还应清晰的认识, 青藏高原东北缘壳、幔物质东移受到鄂尔多斯盆地西南缘的阻隔, 而迫使其部分物质沿秦岭-大巴造山带向东运移. 又由于四川盆地“刚性”东北角向北顶

进, 不仅造成了在中秦岭处南北向挤压下成为该造山带最窄的“瓶颈”, 且迫使秦岭-大巴造山带岩浆活动与上涌和物质的运移(图 11). 显见, 秦岭-大巴造山带在南北向挤压、东西向物质楔入下, 即在这一错综的动力过程中抬升, 故导致了其南北两缘凹陷区持续的沉积、形成了均匀展布的巨厚沉积盆地.

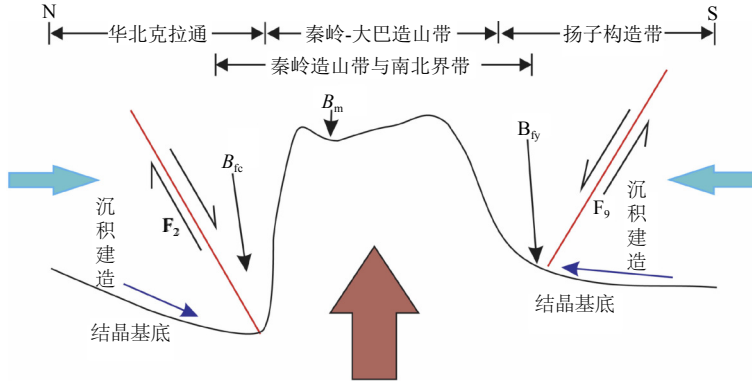


图 10 秦岭-大巴造山带结晶基底与山体隆升的概念性模型

$B_{rc}$ -渭河盆地,  $B_{ry}$ -扬子陆缘盆地,  $B_m$ -山间盆地.

Fig. 10 Conceptual uplift model of crystalline basement and mountain in Qinling-Daba orogenic belt

$B_{rc}$ -Weihe Basin,  $B_{ry}$ -Yangtze Marginal Basin,  $B_m$ -Intermountain Basin.

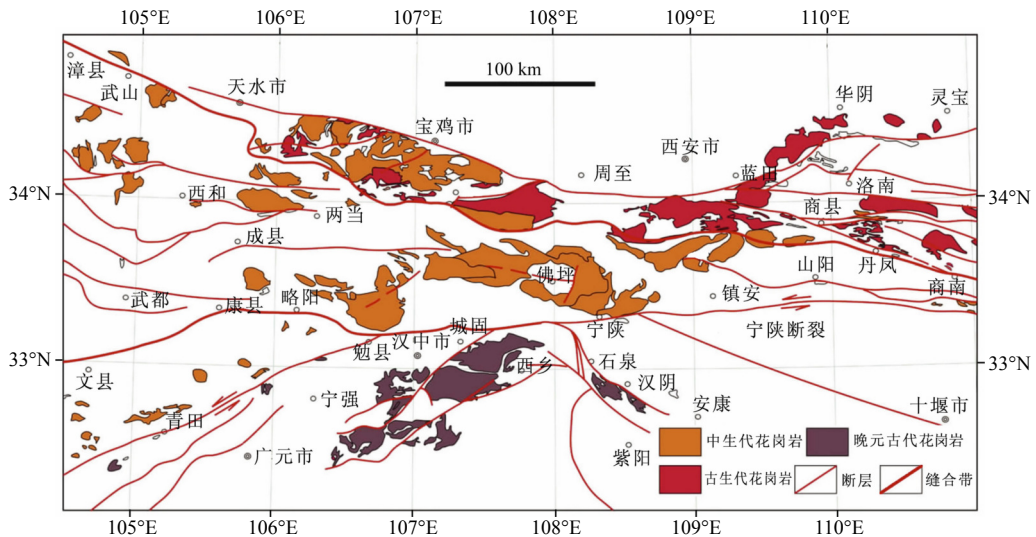


图 11 秦岭造山带不同构造单元花岗岩分布图(胡健民等, 2011)

Fig. 11 Granite distribution map of different tectonic units in Qinling orogenic belt (Hu et al., 2011)

### (3) 鄂尔多斯盆地

以秦岭造山带以北的华北克拉通内的鄂尔多斯盆地不论在沉积建造展布和沉积层厚度均不尽一致(图 7、图 8), 它东以吕梁山为邻, 南近秦岭, 西隔贺兰山、六盘山, 北以阴山为界. 鄂尔多斯盆地是一个广阔而平缓的黄土高原与沙漠展布的平原地域. 盆地内沉积建造、结晶基底分布相对均匀, 即属多

元的盆凹体系. 结晶基底主体深度为 4.0 ~ 6.0 km, 最深可达  $(8.0 \pm 2.0)$  km, 在其浅部呈高、低速物质相间的展布.

#### ① 鄂尔多斯盆地中的系列凹陷

在南起铜川以南地带向北经黄陵、延安、绥德西、榆林、刀兔、东胜、达拉特旗, 北抵包头, 即由五大沉积凹陷组成: 即、鄂尔多斯盆南缘的洛川凹陷

(B4), 向北依次为清涧凹陷 (B5)、榆林凹陷 (B6)、伊金霍洛旗凹陷 (B7) 和呼包凹陷 (达拉特旗凹陷) (B8). 前三个沉积凹陷之间均有相对高速 (5.20 ~ 5.60) 的物质结构体相间.

### ② 洛川、清涧、榆林凹陷

这三个凹陷区不论是沉积建造、结晶基底分布较为均匀, 其南北向宽度大约 100.0 km 左右, 沉积厚度为  $(5.0 \pm 1.0)$  km, 速度在  $4.00 \sim 6.00 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$  之间, 刀兔以北的伊金霍洛旗凹陷南北宽度较大 (180.0 + 10.0) km, 沉积层厚度可达  $(6.0 \pm 2.0)$  km, 且向北逐渐减薄, 近地表速度为  $2.60 \sim 3.00 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 、向深处延伸大约 2.0 km 左右速度逐渐升高至  $5.40 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ .

### ③ 呼包凹陷盆地 (B8)

这是鄂尔多斯盆地最北缘的一个宽度仅 (70.0 ± 10.0) km、而沉积建造可深抵近 8.0 km、速度为  $3.60 \sim 5.60 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$  的沉积凹陷盆地. 该盆地是鄂尔多斯盆地中最窄、且又最深的基底凹陷带, 它与阴山造山带相邻, 亦可视其为阴山造山带的前陆盆地. 这一断陷盆地的物源应为阴山造山带抬升过程中快速沉积和山体结晶基底以上沉积物剥落的沉积相物质.

### ④ 阴山造山带与内蒙古高原

这是沿本剖面我国境内最北部的疆域, 即由包头向北经固阳、白云鄂博抵满都拉以北. 由于阴山造山带的隆升凸起, 其基底几乎出露近地表, 宽达 100.0 ~ 150.0 km, 其北缘为内蒙古高原. 这里却为白云鄂博-满都拉之间的一个巴音花凹陷区, 盆地形态上宽下窄, 结晶基底深度可达  $(5.0 \pm 1.0)$  km, 速度分布由浅表向下为  $4.60 \sim 5.60 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ . 阴山造山带的隆起造就了白云鄂博北侧的巴音花沉积凹陷盆地 (B9) 的形成、并提供了物源.

### (4) 阴山造山带与内蒙古高原

阴山造山带的部分地段结晶基底已出露地表, 而在其北侧却形成了巴音花窄而深的沉积凹陷区, 基底深度亦可达  $(6.0 \pm 2.0)$  km, 速度分布为  $4.80 \sim 5.80 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ .

## 4.2 断裂分布

沿剖面的多元沉积盆地均为断陷盆地, 基底抬升与造山的隆起反映了深部物质与能量交换的复杂过程. 图 9b 中所示的 13 条 (F0 ~ F12) 断裂带分别向南与向北倾斜的基底断裂构成了沿剖面盆-山之间在纵向与横向的耦合响应, 即两者是相辅相承的机制.

秦岭-大巴造山带和阴山造山带均系有一定宽度的造山体系, 即其南、北宽度可达  $(180.0 \pm 20.0)$  km 和  $(120.0 \pm 10.0)$  km. 这两个造山带的抬升和一系列断

陷沉积盆地的形成构成了沿剖面盆、山相串的构造链.

Pg 震相时间项反演求得的结晶基底界面形态和断裂展布与 Pg 震相层析成像得到的结果基本一致, 在纵向延深、横向伸展上的局部地段存有差异, 如洛川凹陷、清涧凹陷、巴音花凹陷等, 而亦明显显示出其迹象, 总体表明, 基于反演求得的结晶基底起伏形态、深度分布和一系列断陷盆地的形成及断层系列确为沿剖面多元盆、山耦合形成的有序相串构造链的展布.

## 5 多元盆、山耦合链与资源和能源

沿该超长剖面多元盆山体系的成山、成盆、成岩、成矿和成灾的过程主要体现在两造山带地域的成矿、即金属矿产资源, 两大沉积盆地中系列断陷盆地的油气成储此乃该超长剖面辖区极为重要的研究内涵.

### 5.1 造山带与相邻地域的金属矿床

金属矿成矿与造山带地区的热岩浆活动关系密切. 它们是在构造力系作用下深部物质重新分异、调整和岩浆上涌与围岩交炽蚀变、变质, 且在浅部适宜岩相处、即金属元素聚集成矿、成藏. 沿该超长剖面的金属矿床、矿带主要集中在秦岭-大巴造山带和阴山造山带 (滕吉文等, 2009b) 地域.

(1) 阴山造山带和内蒙古高原的金属矿床成矿、成储.

阴山造山带和内蒙古高原北与中亚造山带相连, 实属中亚造山带的组成部分. 中亚造山带乃增生性造山带, 带内存储着丰富的、多类型的金属矿产资源, 其中包括世界级的金矿、铜矿等, 故被誉为可与环太平洋成矿域和特提斯成矿域并列的全球三大成矿区域. 另有世界著名的超大型矿床、其稀土矿产资源约占到我国稀土矿产总量的 90%、世界稀土资源总量的 20%. 剖面北段跨越 Solonker 缝合带 (中晚二迭世古亚洲洋向华北克拉通及西伯利亚克拉通下方双向俯冲产物), 测区广泛发育古生代-中生代的花岗岩 (图 12) (邓晋福等, 2008), 为成矿成储提供了宝贵地质条件.

### (2) 秦岭-大巴造山带的金属矿床

秦岭-大巴造山带属中央造山带的主要组成部分, 在地质构造上它包括华北克拉通南缘、商丹构造带、秦岭、勉略构造带和扬子克拉通的北部地域, 乃我国内陆内重要的贵金属和有色金属的成矿带 (图 13),

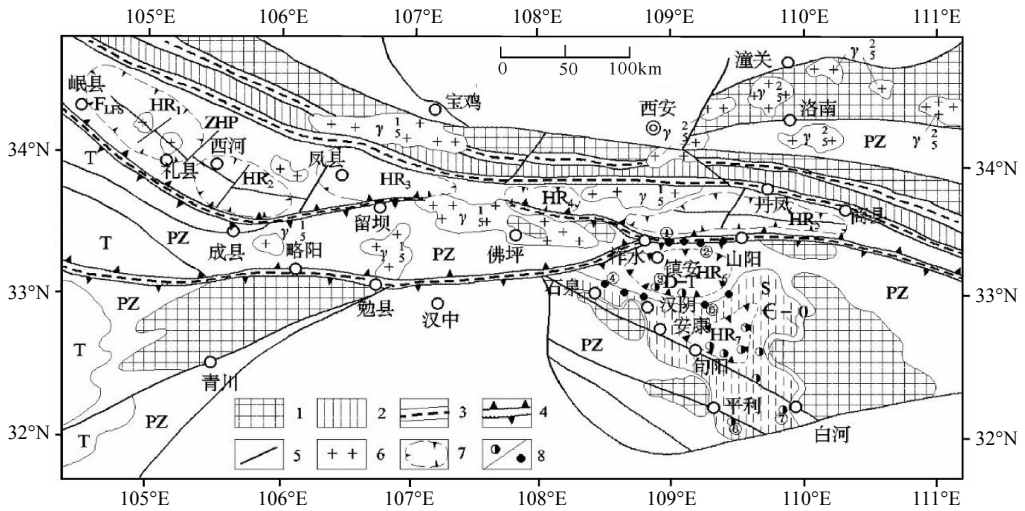


图 12 中亚造山带构造分区和金属矿床分布简图 (邓晋福等, 2008)

Fig. 12 The tectonic division of Central Asian orogenic belt and the distribution of metal deposits (Deng et al., 2008)

其中多数金属矿床的区域成矿元素组合往往受到特定构造运动及其多期次构造运动叠加成矿环境与成矿建造的控制(陈刚等, 2005; 陆松年等, 2005)。同时, 又受到印支或燕山晚期构造运动和岩浆热液作用改造, 即多数矿床最终归位主要受到区域晚期造山构

造岩浆活动的制约。秦岭-大巴造山带内的金属矿床成矿物质多来自地壳深部, 且为多元成矿时代和多期次叠加、以及矿床影响作用错综复杂等共性作用, 而这一地带的逆冲推覆断裂系却为深部热源物质上涌提供了通道与聚集的场所(图 10)。

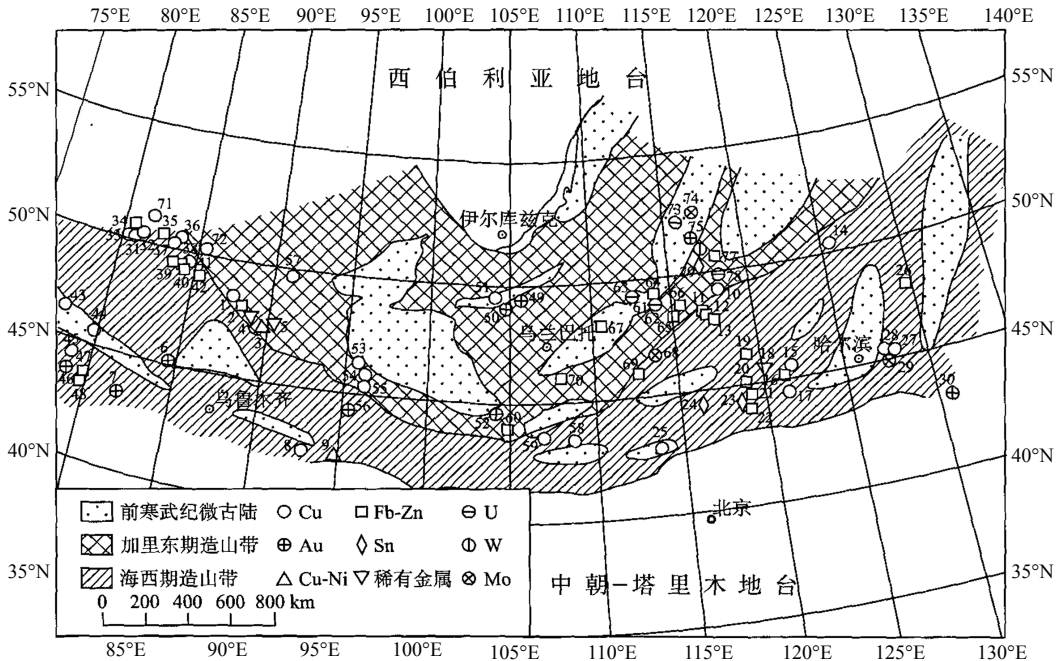


图 13 秦岭造山带构造格架及代表性金属矿床分布略图(杨宗让, 2012)

Fig. 13 The tectonic framework of Qinling orogenic belt and the distribution of representative metal deposits (Yang, 2012)

秦岭-大巴造山带地域矿床种类繁多, 现已发现各种金属矿床达数百种, 其中金、银、钼、锌、铝、铜、汞、铋等矿产资源均占优势, 有着较大的开采潜力。这一地带的金属矿床主要属于热水喷流沉积铅-锌矿床、火山喷发型块状硫化物斑岩-砂卡岩型

(钨) 矿床、卡林一类卡林型金矿床、岩浆热液型金属矿和低温热液改造型锡矿床(朱赖民等, 2008)。这便表明, 秦岭-大巴造山带成矿的深层过程和成矿机制存在着空间上的耦合响应, 是扬子克拉通与秦岭造山带碰撞过程中壳幔物质与能量强烈交换的产物。

### (3) 强化两造山带地域第二深度空间金属矿的勘探与发现

当前围绕这两个造山带成矿域近地表已出露岩体、结晶基底、岩相和诸多类型矿床的发现、开采尚均属第一深度空间(地表-500 m 深度范围内)。要新发现大型、超大型矿床或多床矿集,在这两个造山带与其相邻地域则应强化第二深度空间(500~2000 m)的勘探和开发(滕吉文, 2006; 滕吉文等, 2009b, c), 有望发现新的矿产资源富集区。

这两个造山带地域均为在南北受力作用下, 受到强烈挤压和山体抬升、且断裂丛生并驱动着深部物质与能量的强烈交换和运移。显然两者均具有在第二深度空间发现大型、超大型和多金属矿集的深部成藏、成储的物质和构造环境。

### 5.2 沿超长剖面的沉积盆地与油气藏

沿剖面造山带与沉积盆地之间具有十分密切的内在成因的联系。它们的形成与演化属于统一的深层动力过程, 在空间上相互制约、物源上相互补偿、演化上相互交织、动力上相互转化, 具有多要素的时空耦合效应(刘少峰和张国伟, 2005; 刘少峰等, 2010; 李瑞保等, 2010)。该超长人工源地震探测剖面的结晶基底埋深为这两大盆地第二深度空间( $\geq 5000 \sim 10000$  m) 勘探开发提供了科学依据(滕吉文, 2017b, 2021, 2023)。

#### (1) 深部动力过程的制约与已发现油气田分布

盆山耦合的深层动力过程在宏观上控制着相邻盆地的形成与演化, 并驱使其成烃、成藏和差异成储。

在这两个大型沉积盆地中所辖各个沉积凹陷与其周边地带已发现了诸多的各种类型的、且大小各异的油气田(刘池洋, 2005; 刘池洋等, 2006; 金强等, 2013; 马永生等, 2005, 2022; 魏国齐等, 2013; 肖安成等, 2011; 郭忠铭等, 1994; 郭旭升等, 2022; 戴金星等, 2015, 2021; 赵文智等, 2012, 2020, 滕吉文等, 2022; 滕吉文, 2023)。

鄂尔多斯盆地的北部、南部、西部、东部应为煤炭、金属铀矿区, 而油、气藏却主要集中在盆地中央部位, 且“北气、南油”分布(图 14)。四川盆地已发现的油气田主要集中在盆地中央部位、西部和东北部, 然而在盆地南部、东南部、特别是盆地周边的裂隙盆地(如盆地西缘的龙门山、盐源裂隙盆地; 北部的南秦岭裂隙盆地; 东缘的赣湘贵裂隙盆地以及东北部的下扬子裂隙盆地等)尚缺乏较详细的勘探(图 15)。可见, 这两个沉积盆地中尚有不少空间有待勘察、发现和开发(滕吉文等, 2022; 滕吉文, 2023)。

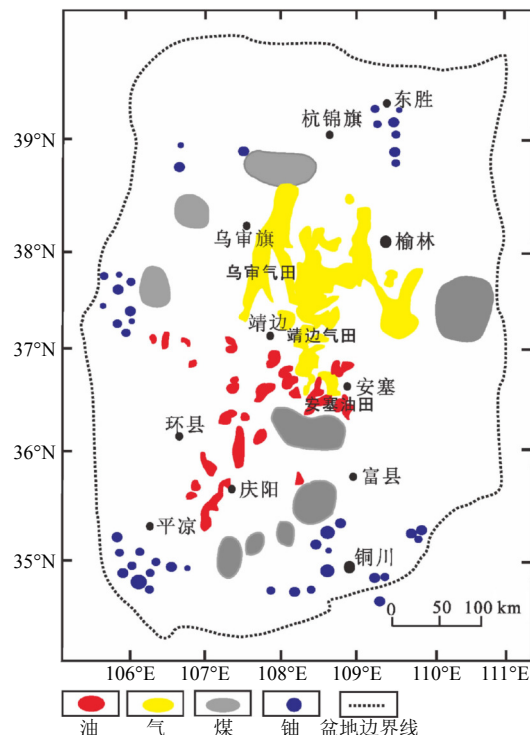


图 14 鄂尔多斯盆地多种能源矿产平面分布图  
Fig. 14 Planar distribution map of various energy minerals in Ordos Basin

#### (2) 强化第二深度空间的油气勘探势在必行

两大沉积盆地的形成与油气成藏、成储是沿剖面辖区盆-山耦合与深层物质与能量交换的产物。两大盆地石油、天然气的已有发现标志着其成烃、成藏的稳定性与多元性。基于当今已有多口油、气钻井深超过 5000m 以上的成效, 强化第二深度空间的油、气勘探和开发势在必行(滕吉文, 2023)。在鄂尔多斯盆地、四川盆地与其所含盖局域各断陷沉积盆地的油、气乃属多元产生, 关键是两个盆地中沉积建造厚、分布均匀且广泛, 确具第二深度空间勘探、开发和研究的基础与优势前景(何登发等, 2019; 李剑等, 2019; 李阳等, 2020; 赵文智等, 2020; 郭旭升等, 2022; 滕吉文等, 2007, 2008a, 2010a; 滕吉文和杨辉, 2013)。

① 两大盆地的天然气为多元产出。在两大沉积盆地中的天然气多种多样, 即有常规气、致密砂岩气、页岩气、煤层气、还有火山岩成气等, 而是否存在无机生成的油、气呢(滕吉文等, 2010a, 2017)? 在鄂尔多斯盆地、四川盆地尽管各种成因气不尽相同, 而其剩余可采量都是潜能巨大的(图 16)。

#### ② 多时期、多岩相盛产油气

鄂尔多斯盆地和四川盆地均广泛分布陆相和厚层海相碳酸盐。与国外的储集层形成与分布均不

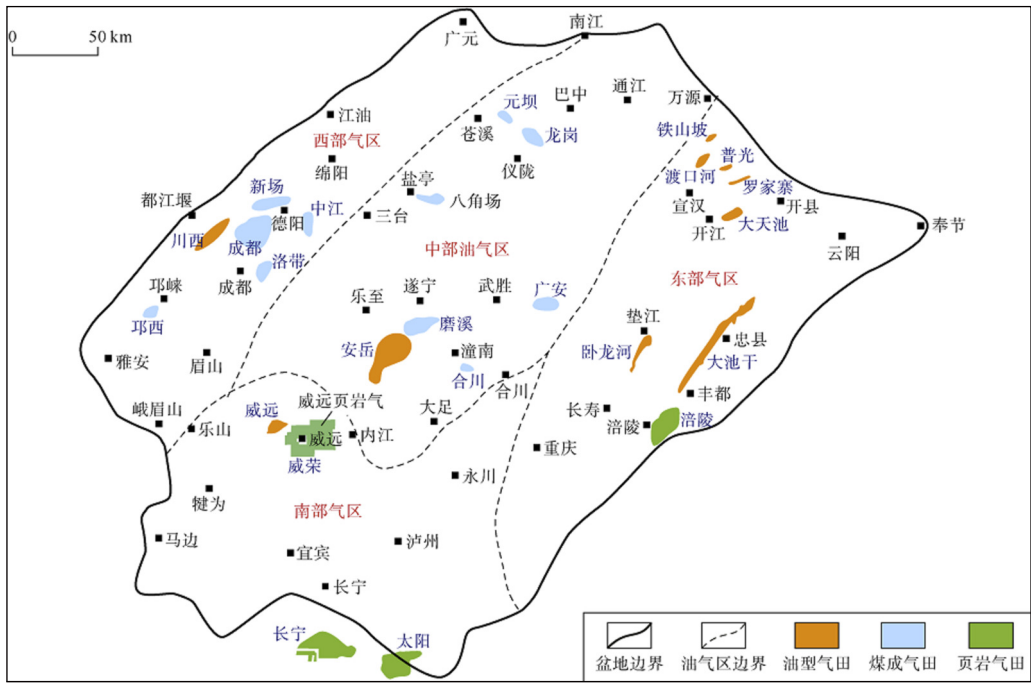


图 15 四川盆地大气田分布图 (戴金星等, 2021)

Fig. 15 Distribution map of large gas fields in Sichuan Basin (Dai et al., 2021)

相同, 中国大陆的海相碳酸盐岩多发育于古生界和中生界下部的沉积层序中, 位于双相沉积盆地(陆相和海相)深部(滕吉文等, 2010a, 2017): 如鄂尔多斯盆地地下奥陶统、四川盆地古生界和三叠系等, 均经历了多旋回构造运动的叠加和改造, 具备沉积类型多、年代古老、时期跨度大, 埋藏与成岩历史漫长及复杂等特点. 因此这两个盆地成烃、成藏、成储环境好, 潜力大, 埋藏深(结晶基底埋深达  $(8.0 \pm 2.0)$  km), 为多元油气成藏、成储极具前景的油气资源沉积盆地.

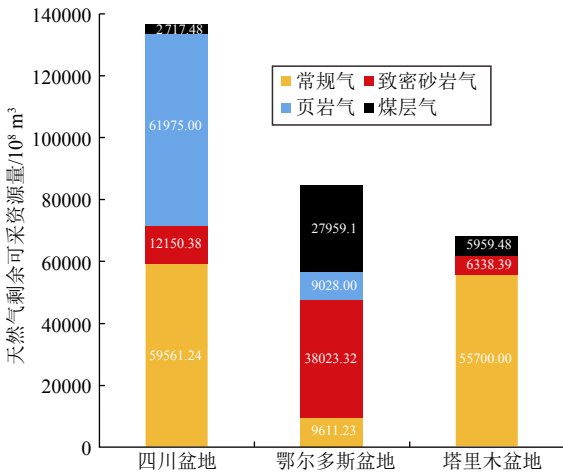


图 16 四川盆地、鄂尔多斯盆地和塔里木盆地天然气剩余可采资源量对比 (戴金星等, 2021)

Fig. 16 Comparison of remaining recoverable resources of natural gas in Sichuan Basin, Ordos Basin and Tarim Basin (Dai et al., 2021)

以四川超级沉积盆地为例, 成油、成气时代是多期的, 即由侏罗系到震旦纪均有藏储(图 17), 当前地质资源储量可观, 展示了未来发现丰富油、气资源前景.

### 6 结束语

在我国陆内布署和实施这一长达 1700.0 km 的

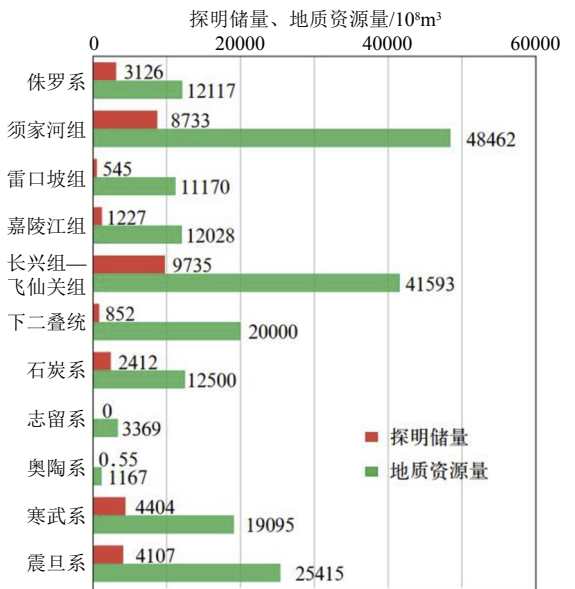


图 17 四川盆地常规天然气资源量层系分布图 (据李阳等, 2020)

Fig. 17 Distribution map of conventional natural gas resources in Sichuan Basin (According to Li et al., 2020)

超长人工源深部地震探测剖面尚属首次,其初至波到时成像结果揭示了剖面速度结构、辖区盆地与造山带结晶基底起伏特征,显示出区域成山、成盆、成岩、成矿之间的耦合关系。

该剖面北起蒙古高原,向南经阴山造山带、鄂尔多斯盆地、秦岭造山带、大巴山等延伸至四川盆地东南缘。多期次构造运动形成南、北克拉通内巨厚沉积盆地、一系列切割盆地的深大断裂、及克拉通之间显著隆起的造山带。阴山造山带部份地段及秦岭-大巴造山带的结晶基底隆升凸起,几乎出露地表;而鄂尔多斯盆地、渭河地堑及四川盆地均发育较厚沉积,其结晶基底主体深度分别为 4.0 ~ 6.0 km、 $8 \pm 2.0$  km 及 6.0 ~ 10.0 km。

该超长剖面精细速度分布与基底结构图像有助于深化认识横跨华北及扬子克拉通的多元盆-山体系之间的构造运动和相互作用,强烈起伏的结晶基底刻画了地史上盆地与造山带在物质、结构和动力演化上复杂的耦合关系。本研究对理解该区深部岩浆和热物质作用,探索不同类别矿产资源的成藏、成储及聚集的构造环境、引领开发多类别矿产资源具有战略导向意义。

## References

- Chen G, Li X P, Zhou L F, et al. 2005. Ordos basin tectonics relative to the coupling coexistence of multiple energy resources. *Earth Sci. Front.* (in Chinese), 12(4): 535-541.
- Chen, Y., Guo, G., & Li, X. (1998). Metallogenic geodynamic background of Mesozoic gold deposits in granite-greenstone terrains of North China Craton. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 41(2), 113-120.
- Dai J X, Wu W, Fang C C, et al. 2015. Exploration and development of large gas fields in China since 2000. *Natural Gas Industry* (in Chinese), 35(1): 1-9.
- Dai J X, Ni Y Y, Liu Y Q, et al. 2021. Sichuan super gas basin in southwest China. *Petroleum Exploration and Development* (in Chinese), 48(6): 1081-1088.
- Deng J, Wang Q F, Huang D H, et al. 2005. Basement evolution of the Ordos basin and its constraint on cap rock. *Earth Sci. Front.* (in Chinese), 12(3): 91-99.
- Deng J F, Teng J W, Peng C, et al. 2008. Characteristics of the Geophysical Fields, Deep Geology and Mineralizing Processes in China (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House.
- Ding Y Y. 2000. Structural characteristics of northern Ordos basin reflected by aeromagnetic data. *Geophysical and Geochemical Exploration* (in Chinese), 24(3): 197-202.
- Duan Y H, Zhang X K, Fang S M. 2002. Three-dimensional finite-difference tomography of velocity structure of the upper crustal in North China. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 45(3): 362-369.
- Guo X S, Zhao Y Q, Shen B J, et al. 2022. Marine shale gas exploration theory in Southern China: review and prospects. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 96(1): 172-182.
- Guo Z M, Zhang J, Yu Z P. 1994. The evolutionary characteristics of structure of the oil and gas bearing areas in Ordos massif. *Petroleum Exploration and Development* (in Chinese), 21(2): 22-29.
- He D F, Ma Y S, Liu B, et al. 2019. Main advances and key issues for deep-seated exploration in petroliferous basins in China. *Earth Sci. Front.* (in Chinese), 26(1): 1-12.
- He F Q, Xu B W, Shao L K. 2022. On philosophy and innovative thinking of oil & gas exploration and development: commemoration of the first oil well on land in China, Well-Yan1. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development* (in Chinese), 12(2): 265-273.
- Hole J A. 1992. Nonlinear high-resolution three-dimensional seismic travel time tomography. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 97(B5): 6553-6562.
- Hou M T. 2011. Consideration of ore-prospecting in the Qinling orogenic belt (Shaanxi). *Geology of Shaanxi* (in Chinese), 29(2): 1-10.
- Zengqian H, Zhiming Y, Rui W, et al. 2020. Further discussion on porphyry Cu-Mo-Au deposit formation in Chinese mainland. *Earth Science Frontiers*, 27(2): 20.
- Hu G Z, Teng J W, Ruan X M, et al. 2014. Magnetic anomaly characteristics and crystalline basement variation of the Qinling orogenic belt and its adjacent areas. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 57(2): 556-571, doi: 10.6038/cjg20140220.
- Hu J F, Zhang Z J, Zhang H, et al. 1996. The 3-D shear wave velocity structure of lithosphere beneath the plateau of Nei Mongol and its adjacent regions of China. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 11(4): 20-33.
- Hu J M, Meng Q R, Chen H, et al. 2011. Tectonic evolution and implication of Ningshan fault in the central part of Qinling orogen. *Acta Petrol. Sin.* (in Chinese), 27(3): 657-671.
- Hu Z Q, Yin W, Wu X H, et al. 2012. Petroleum accumulation systems of clastic strata and their distribution in the four large-sized basins in Central-Western China. *Oil & Gas Geology* (in Chinese), 33(4): 561-570.
- Jia C Z. 2020. Development challenges and future scientific and technological researches in China's petroleum industry upstream. *Acta Petrol. Sin.* (in Chinese), 41(12): 1445-1464.
- Jia J D, He G Q, Li M S, et al. 1997. Structural feature of basement in the Ordos basin and its control to Paleozoic gas. *Geological Journal of China Universities* (in Chinese), 3(2): 144-153.
- Jiang W W, Hao T Y, Song H B. 2000. Crustal structure and geological and geophysical features of Ordos basin. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 15(3): 45-53.
- Jiang Z, Sun J, Xu C F, et al. 1990. Preliminary study on the conductivity structure of the crust and upper mantle: third report on the geoscience transect from Xiangshui, Jiangsu, to Mandal, Nei Mongol. *Seismology and Geology* (in Chinese), 12(3): 193-206.
- Jin Q, Huang Z, Li W Z, et al. 2013. Sedimentary models of Ordovician source rocks in Ordos basin and their hydrocarbon generation potential.



- Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 87(3): 393-402.
- Li J, She Y Q, Gao Y, et al. 2019. Onshore deep and ultra-deep natural gas exploration fields and potentials in China. *China Petroleum Exploration* (in Chinese), 24(4): 403-417.
- Li R B, Pei X Z, Liu Z Q, et al. 2010. Basin-mountain coupling relationship of foreland basins between Dabashan and northeastern Sichuan—the evidence from LA-ICP-MS U-Pb dating of the detrital zircons. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 84(8): 1118-1134.
- Li X, Bao D J, Chen Y P, et al. 1987. The layered structure of the crust and mantle medium in central inner Mongolia. *North China Earthquake Sciences* (in Chinese), 5(4): 58-65,84.
- Li Y, Xue Z J, Cheng Z, et al. 2020. Progress and development directions of deep oil and gas exploration and development in China. *China Petroleum Exploration* (in Chinese), 25(1): 45-57.
- Lin J Y, Tang G B, Xu T, et al. 2020. P-wave velocity structure in upper crust and crystalline basement of the Qinhang and Wuyishan Metallogenic belts: constraint from the Wanzai-Hui'an deep seismic sounding profile. *Chinese J Geophys.* (in Chinese), 63(12): 4396-4409, doi: 10.6038/cjg202000158.
- Liu C Q, Jia S X, Du G H. 1991. Result of seismic refraction sounding along the transect from Xiangshui, Jiangsu, to Mondula, Nei Mongol. *Seismology and Geology* (in Chinese), 13(3): 193-204.
- Liu C Y, Zhao H G, Gui X J, et al. 2006. Space-time coordinate of the evolution and reformation and mineralization response in Ordos basin. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 80(5): 617-638.
- Liu C Y, Zhao H G, Tan C Q, et al. 2006. Occurrences of multiple energy mineral deposits and mineralization/reservoiring system in the basin. *Oil Gas Geol.* 27(2): 131-42.
- Liu S F, Zhang G W. 2005. Fundamental ideas, contents and methods in study of basin and mountain relationships. *Earth Sci. Front.* (in Chinese), 12(3): 101-111.
- Liu S F, Wang P, Hu M Q, et al. 2010. Evolution and geodynamic mechanism of basin-mountain systems in the northern margin of the middle-upper Yangtze. *Earth Sci. Front.* (in Chinese), 17(3): 14-26.
- Lu S N, Chen Z H, Li H K, et al. 2005. Two magmatic belts of the Neoproterozoic in the Qinling orogenic belt. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 79(2): 165-173.
- Ma X Y, Wang J, Li S Q, et al. 1988. A report of geological observations on northern segment (Baotou to Mondula) of the geoscience transect from Xiangshui, Jiangsu, to Mandula, Nei Mongol. *Seismology and Geology* (in Chinese), 10(4): 45-50.
- Ma Y S, Cai X Y, Li G X. 2005. Basic characteristics and concentration of the Puguang gas field in the Sichuan basin. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 79(6): 858-865.
- Ma Y S, Cai X Y, Zhao P R, et al. 2022. Geological characteristics and exploration practices of continental shale oil in China. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 96(1): 155-171.
- Ruan X M, Teng J W, An Y L, et al. 2011. Analysis of magnetic anomaly and crystalline basement of the Yinshan orogen and the northern Ordos basin regions. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 54(9): 2272-2282, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.09.010.
- Teng J W. 1994. Lithosphere Physics and Dynamic for Technical Belt of Sichuan and Yunnan (in Chinese). Beijing: Science Press.
- Teng J W. 2001. The exchange of substance and energy, different sphere coupling and deep dynamical process within the earth. *Earth Sci. Front.* (in Chinese), 8(3): 1-8.
- Teng J W. 2003a. Introduction to Solid Geophysics (in Chinese). Beijing: Seismological Press.
- Teng J W. 2003b. Dynamic process of substance and energy exchanges in depths of the earth and formation of mineral resources. *Geotectonica et Metallogenia* (in Chinese), 27(1): 3-21.
- Teng J W. 2005. The exchange of substance and energy and dynamic process in the earth interior. //The 100 Crossing-Subject Problems in 21st Century (in Chinese). Beijing: Science Press, 327-338.
- Teng J W. 2006. Strengthening geophysical exploration and exploitation of metallic minerals in the second deep space of the crustal interior. *Geological Bulletin of China*, 25(7): 767-771.
- Teng J W. 2007. Development prospect and independent innovation of petroleum geophysical prospecting in China. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 46(3): 213.
- Teng J W. 2023. Potential, supply and demand prospect of natural gas in the second deep space of Yangtze Craton and its peripheral basins. *Mineral Exploration* (in Chinese), 14(8): 1317-1341.
- Teng J W, Li S L, Zhang Y Q, et al. 2014. Seismic wave fields and dynamical response for Qinling orogen and sedimentary basins and crystalline basement. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 57(3): 770-788, doi: 10.6038/cjg20140308.
- Teng J W, Liu Y S, Qiao Y H. 2017a. Study and exploration of the mixed-origin theories of organic and inorganic oil and gas. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 60(5): 1874-1892, doi: 10.6038/cjg20170522.
- Teng J W, Ma X Y, Dong X P, et al. 2017b. An analysis of the accumulation and potential of oil and gas resources in the second deep space(5000 ~ 10000 m). *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 60(8): 3191-3214, doi: 10.6038/cjg20170825.
- Teng J W, Ruan X M, Zhang Y Q, et al. 2009a. Theoretical concept for sedimentary basin, crystalline basement and the origin of oil and gas and its exploration and exploitation in the second deep space. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 52(11): 2798-2817, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.11.015.
- Teng J W, Ruan X M, Zhang Y Q. 2010a. Geophysical exploration for oil and gas in the second deep space (5000-10000 m) in crust: the only way for the development of fossil energy. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 25(2): 359-375, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2010.02.001.
- Teng J W, Si X, Wang Y C. 2021. Potential and future of fossil fuel exploration and development in China. *Geophysical Prospecting for Petroleum* (in Chinese), 60(1): 1-12.
- Teng J W, Tian Y, Liu C, et al. 2008a. Dual-phase sedimentary basins and old crystalline basement in China and deep oil and gas reservoirs in northeast China. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)* (in Chinese), 38(4): 527-552.
- Teng J W, Wang F Y, Zhao W Z, et al. 2008b. Velocity distribution of upper crust, undulation of sedimentary formation and crystalline basement

- beneath the Ordos basin in North China. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 51(6): 1753-1766.
- Teng J W, Yang H, Zhang X M. 2010b. Development direction and task of the geodynamical research in China. *Acta Petrol. Sin.* (in Chinese), 26(11): 3159-3176.
- Teng J W, Yang H. 2013. Deep physical and dynamical process for the formation and accumulation of oil and gas resources in the second deep space (5000-10000 m). *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 56(12): 4164-4188, doi: [10.6038/cjg20131220](https://doi.org/10.6038/cjg20131220).
- Teng J W, Yang L Q, Liu H C, et al. 2009b. Geodynamical responses for formation and concentration of metallic minerals in the second deep space of lithosphere. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 52(7): 1734-1756, doi: [10.3969/j.issn.0001-5733.2009.07.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.0001-5733.2009.07.008).
- Teng J W, Yao J J, Jiang C Z, et al. 2009c. Magmatic rock mass and information for large and superlarge mineral deposits and its ore-prospecting effect in deep crust. *Acta Petrol. Sin.* (in Chinese), 25(5): 1009-1038.
- Teng J, Xue, G, Song M. 2022. Theory on exploring mineral resources in the second deep space and practices with electromagnetic method. *Chinese Journal of Geophysics*, 65(10): 3975-3985.
- Vidale J E. 1990. Finite-difference calculation of traveltimes in three dimensions. *Geophysics*, 55(5): 521-526.
- Wang C Y, Zhang X K, Ding Z F, et al. 1997. Finite-difference tomography of upper crustal structure in Dabieshan Orogenic belt. *Chinese Journal of Geophysics* (*Acta Geophysica Sinica*) (in Chinese), 40(4): 495-502.
- Wang G J, Wang Q S, Teng J W, et al. 2004. The special Bouguer gravity fields and the deep structure in Yinshan-Daqingshan mountains. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 19(3): 602-607.
- Wang Q S, Teng J W, Wang G J, et al. 2005. The region gravity and magnetic anomaly fields and the deep structure in Yinshan mountains of inner Mongolia. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 48(2): 314-320.
- Wang Q S, Teng J W, Zhang Y Q, et al. 2013a. Discussion on the special gravity field across the north part of middle Qinling Mt. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 56(3): 792-798, doi: [10.6038/cjg20130308](https://doi.org/10.6038/cjg20130308).
- Wang Q S, Teng J W, Zhang Y Q, et al. 2013b. Discussion on gravity anomalies and crustal structure of the middle Qinling mountains. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 56(12): 3999-4008, doi: [10.6038/cjg20131206](https://doi.org/10.6038/cjg20131206).
- Wang T, Xu M J, Wang L S, et al. 2007. Aeromagnetic anomaly analysis of ordos and adjacent regions and its tectonic implications. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 50(1): 163-170.
- Wei G Q, Shen P, Yang W, et al. 2013. Formation conditions and exploration prospects of Sinian large gas fields, Sichuan basin. *Petroleum Exploration and Development* (in Chinese), 40(2): 129-138.
- Xiao A C, Wei G Q, Shen Z Y, et al. 2011. Basin-mountain system and tectonic coupling between Yangtze block and south Qinling orogen. *Acta Petrol. Sin.* (in Chinese), 27(3): 601-611.
- Xiong S B, Liu H B, Wang Y X, et al. 2002. A study on velocity distribution in upper crust and tectonics of basement and cover in South China. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 45(6): 784-791.
- Xu C F, Zhang X K, Duan Y H, et al. 2006. Fine upper crustal structure of Jiashi strong earthquake swarm region in Xinjiang inferred from high resolution seismic refraction profile data. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 28(1): 60-69.
- Xu T, Zhang M H, Tian X B, et al. 2014. Upper crustal velocity of Lijiang-Qingzhen profile and its relationship with the seismogenic environment of the  $M_{5.6.5}$  Ludian earthquake. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 57(9): 3069-3079, doi: [10.6038/cjg20140932](https://doi.org/10.6038/cjg20140932).
- Yan H F, Liu G F. 2024. Application of active and passive source seismic exploration in mineral exploration. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 39(5): 1810-1823, doi: [10.6038/pg2024II0336](https://doi.org/10.6038/pg2024II0336).
- Yan Q R, Wang Z Q, Yan Z, et al. 2009. Timing of the transformation from seafloor spreading on the south margin of the North China block to subduction within the north Qinling orogenic belt. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 83(11): 1565-1583.
- Yang J S, Liao F, Li Z T, et al. 2024. Real time picking algorithm for natural seismic wave first arrival based on Delaunay triangulation. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 39(5): 1788-1799, doi: [10.6038/pg2024HH0458](https://doi.org/10.6038/pg2024HH0458).
- Yang W L, Wang Y, Wang C G, et al. 2010. Distribution and co-exploration of multiple energy minerals in Ordos basin. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 84(4): 579-586.
- Yang Y, Wang Z C, Wen L, et al. 2022. Sinian hydrocarbon accumulation conditions and exploration potential at the northwest margin of the Yangtze region, China. *Petroleum Exploration and Development* (in Chinese), 49(2): 238-248.
- Yang Z R. 2012. Studies on the mineralization system of large ore-cluster areas in Qinling Orogenic Belt [Ph. D. thesis](in Chinese). Xi'an: Chang'an University.
- Yao Z H, Zhang M S, Zeng L B, et al. 2003. Analysis of the faults in the northern Ordos basin, northwest China. *Petroleum Exploration and Development* (in Chinese), 30(2): 20-23.
- Zhang X H, Chen C, Huang J, et al. 2019. The discovery of middle Permian Guangyuan-Bazhong extensional trough in the Sichuan basin and its petroleum geological significance. *China Petroleum Exploration* (in Chinese), 24(4): 466-475.
- Zhang X M, Diao G L, Shu P Y. 2004. Study on shear wave velocity structure and velocity ratio under the Ordos plate and its southeastern marginal areas. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 20(1): 53-63.
- Zhang Y Q, Teng J W, Wang F Y, et al. 2011. Structure of the seismic wave property and lithology deduction of the upper crust beneath the Yinshan orogenic belt and the northern ordos block. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 54(1): 87-97, doi: [10.3969/j.issn.0001-5733.2011.01.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.0001-5733.2011.01.010).
- Zhao J R, Liu B J, Duan Y H, et al. 2017. High resolution velocity structure of the North China Craton basement by explosion seismic sounding—results from Dafeng-Baotou refraction profile. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 60(7): 2628-2640, doi: [10.6038/cjg20170711](https://doi.org/10.6038/cjg20170711).
- Zhao W Z, Shen A J, Hu S Y, et al. 2012. Geological conditions and distributional features of large-scale carbonate reservoirs onshore China. *Petroleum Exploration and Development* (in Chinese), 39(1): 1-12.

Zhao W Z, Wang Z C, Jiang H, et al. 2020. Exploration status of the deep Sinian strata in the Sichuan basin: formation conditions of old giant carbonate oil/gas fields. *Natural Gas Industry* (in Chinese), 40(2): 1-10.

Zhu L M, Zhang G W, Li B, et al. 2008. Main geological events, genetic types of metallic deposits and their geodynamical setting in the Qinling orogenic belt. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry* (in Chinese), 27(4): 384-390.

Zhu R X, Xu Y G, Zhu G, et al. 2012. Destruction of the North China craton. *Science China Earth Sciences*, 55(10): 1565-1587.

Zhu R X, Fan H R, Li J W, et al. 2015. Decratonic gold deposits. *Science China Earth Sciences*, 58(9): 1523-1537.

## 附中文参考文献

- 陈刚, 李向平, 周立发等. 2005. 鄂尔多斯盆地构造与多种矿产的耦合成矿特征. *地学前缘*, 12(4): 535-541.
- 陈衍景, 郭光军, 李欣. 1998. 华北克拉通花岗岩绿岩地体中生代金矿床的成矿地球动力学背景. *中国科学(D辑)*, 28(1): 35-40.
- 戴金星, 吴伟, 房忱琛等. 2015. 2000年以来中国大气田勘探开发特征. *天然气工业*, 35(1): 1-9.
- 戴金星, 倪云燕, 刘全有等. 2021. 四川超级气盆地. *石油勘探与开发*, 48(6): 1081-1088.
- 邓军, 王庆飞, 黄定华等. 2005. 鄂尔多斯盆地基底演化及其对盖层控制作用. *地学前缘*, 12(3): 91-99.
- 邓晋福, 滕吉文, 彭聪等. 2008. 中国地球物理场特征及深部地质与成矿. 北京: 地质出版社.
- 丁燕云. 2000. 鄂尔多斯盆地北部航磁反映的构造特征. *物探与化探*, 24(3): 197-202.
- 段永红, 张先康, 方盛明. 2002. 华北地区上部地壳结构的三维有限差分层析成像. *地球物理学报*, 45(3): 362-369.
- 郭旭升, 赵永强, 申宝剑等. 2022. 中国南海相页岩气勘探理论: 回顾与展望. *地质学报*, 96(1): 172-182.
- 郭忠铭, 张军, 于忠平. 1994. 鄂尔多斯地块油区构造演化特征. *石油勘探与开发*, 21(2): 22-29.
- 何登发, 马永生, 刘波等. 2019. 中国含油气盆地深层勘探的主要进展与科学问题. *地学前缘*, 26(1): 1-12.
- 侯增谦, 杨志明, 王瑞等. 2020. 再论中国大陆斑岩 Cu-Mo-Au 矿床成矿作用. *地学前缘*, 27(2): 20-44.
- 胡国泽, 滕吉文, 阮小敏等. 2014. 秦岭造山带和邻域磁异常特征及结晶基底变异分析. *地球物理学报*, 57(2): 556-571, doi: 10.6038/cjg20140220.
- 胡家富, 张中杰, 张慧等. 1996. 中国内蒙古高原及周边地带岩石圈三维速度结构. *地球物理学进展*, 11(4): 20-33.
- 胡健民, 孟庆任, 陈虹等. 2011. 秦岭造山带内宁陕断裂带构造演化及其意义. *岩石学报*, 27(3): 657-671.
- 贾进斗, 何国琦, 李茂松等. 1997. 鄂尔多斯盆地基底结构特征及其对古生界天然气的控制. *高校地质学报*, 3(2): 144-153.
- 江为为, 郝天珧, 宋海斌. 2000. 鄂尔多斯盆地地质地球物理场特征与地壳结构. *地球物理学进展*, 15(3): 45-53.
- 江钊, 孙洁, 徐常芳等. 1990. 江苏响水—内蒙古满都拉地壳上地幔电性结构初探——地学断面研究报告之三. *地震地质*, 12(3): 193-206.
- 金强, 黄志, 李维振等. 2013. 鄂尔多斯盆地奥陶系烃源岩发育模式和天然气生成潜力. *地质学报*, 87(3): 393-402.
- 李剑, 余源琦, 高阳等. 2019. 中国陆上深层—超深层天然气勘探领域及潜力. *中国石油勘探*, 24(4): 403-417.
- 李瑞保, 裴先治, 刘战庆等. 2010. 大巴山及川东北前陆盆地盆地物质耦合——来自 LA-ICP-MS 碎屑锆石 U-Pb 年代学证据. *地质学报*, 84(8): 1118-1134.
- 李祥, 包东健, 陈原平等. 1987. 内蒙古中部地区的壳幔介质分层结构. *华北地震科学*, 5(4): 58-65, 84.
- 李阳, 薛兆杰, 程喆等. 2020. 中国深层油气勘探开发进展与发展方向. *中国石油勘探*, 25(1): 45-57.
- 林吉焱, 唐国彬, 徐涛等. 2020. 钦杭-武夷山成矿带上地壳速度结构与基底特征: 万载-惠安宽角反射/折射地震剖面约束. *地球物理学报*, 63(12): 4396-4409, doi: 10.6038/cjg202000158.
- 刘昌铨, 嘉世旭, 杜官恒. 1991. 江苏响水—内蒙古满都拉地学断面地震折射测深结果. *地震地质*, 13(3): 193-204.
- 刘池洋, 赵红格, 谭成任等. 2006. 多种能源矿产赋存与盆地成藏(矿)系统. *石油与天然气地质*, 27(2): 131-142, doi: 10.3321/j.issn:0253-9985.2006.02.001.
- 刘池洋, 赵红格, 桂小军等. 2006. 鄂尔多斯盆地演化-改造的时空坐标及其成藏(矿)响应. *地质学报*, 80(5): 617-638.
- 刘少峰, 张国伟. 2005. 盆地关系研究的基本思路、内容和方法. *地学前缘*, 12(3): 101-111.
- 刘少峰, 王平, 胡明卿等. 2010. 中、上扬子北部盆地-山系统演化与动力学机制. *地学前缘*, 17(3): 14-26.
- 陆松年, 陈志宏, 李怀坤等. 2005. 秦岭造山带中两条新元古代岩浆岩带. *地质学报*, 79(2): 165-173.
- 马杏垣, 王楫, 李双庆等. 1988. 有关内蒙古地质构造的一线之见——江苏响水至内蒙古满都拉地学断面北段研究报告之一. *地震地质*, 10(4): 45-50.
- 马永生, 蔡勋育, 李国雄. 2005. 四川盆地普光大型气藏基本特征及成藏富集规律. *地质学报*, 79(6): 858-865.
- 马永生, 蔡勋育, 赵培荣等. 2022. 中国陆相页岩油地质特征与勘探实践. *地质学报*, 96(1): 155-171.
- 阮小敏, 滕吉文, 安玉林等. 2011. 阴山造山带和鄂尔多斯盆地北部磁异常场与结晶基底特征研究. *地球物理学报*, 54(9): 2272-2282, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.09.010.
- 滕吉文. 2005. 地球内部物质与能量交换和动力学过程. //21世纪100个交叉科学难题. 北京: 科学出版社, 327-338.
- 滕吉文. 2006. 强化开展地壳内部第二深度空间金属矿产资源地球物理找矿、勘探和开发. *地质通报*, (07): 767-771.
- 滕吉文. 2007. 石油地球物理勘探的发展空间与自主创新. *石油物探*, (03): 213-225 + 13.
- 滕吉文. 2023. 扬子克拉通与周缘各盆地第二深度空间天然气潜能与供需前景. *矿产勘查*, 14(8): 1317-1341.
- 滕吉文, 李松岭, 张永谦等. 2014. 秦岭造山带与沉积盆地和结晶基底地震波场及动力学响应. *地球物理学报*, 57(3): 770-788, doi: 10.6038/cjg20140308.
- 滕吉文, 刘有山, 乔勇虎. 2017a. 石油双机(有机+无机)混合成因的研究与探索. *地球物理学报*, 60(5): 1874-1892, doi: 10.6038/cjg20170522.
- 滕吉文, 马学英, 董兴朋等. 2017b. 第二深度空间(5000-10000m)油、气

- 成藏和潜力分析. *地球物理学报*, 60(8): 3191-3214, doi: 10.6038/cjg20170825.
- 滕吉文, 阮小敏, 张永谦等. 2009a. 沉积盆地、结晶基底和油、气成因理念与第二深度空间勘探和开发. *地球物理学报*, 52(11): 2798-2817, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.11.015.
- 滕吉文, 阮小敏, 张永谦. 2010a. 地壳内部第二深度空间 (5000 ~ 10000 m) 石油与天然气地球物理勘探: 化石能源发展的必由之路. *地球物理学进展*, 25(2): 359-375, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2010.02.001.
- 滕吉文, 田有, 刘财等. 2008a. 中国双相沉积盆地、古老结晶基底与东北地区深层潜在油气藏. *吉林大学学报 (地球科学版)*, 38(4): 527-552.
- 滕吉文, 王夫运, 赵文智等. 2008b. 鄂尔多斯盆地上地壳速度分布与沉积建造和结晶基底起伏的构造研究. *地球物理学报*, 51(6): 1753-1766.
- 滕吉文, 杨辉, 张雪梅. 2010b. 中国地球动力学研究的方向和任务. *岩石学报*, 26(11): 3159-3176.
- 滕吉文, 杨辉. 2013. 第二深度空间 (5000 ~ 10000 m) 油、气形成与聚集的深层物理与动力学响应. *地球物理学报*, 56(12): 4164-4188, doi: 10.6038/cjg20131220.
- 滕吉文, 杨立强, 刘宏臣等. 2009b. 岩石圈内部第二深度空间金属矿产资源形成与集聚的深层动力学响应. *地球物理学报*, 52(7): 1734-1756, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.07.008.
- 滕吉文, 姚敬金, 江昌洲等. 2009c. 地壳深部岩浆岩岩基体与大型、超大型金属矿床的形成及找矿效应. *岩石学报*, 25(5): 1009-1038.
- 滕吉文, 司芾, 王玉辰. 2021. 我国化石能源勘探、开发潜能与未来. *石油物探*, 60(01): 1-12.
- 滕吉文, 薛国强, 宋明春. 2022. 第二深度空间矿产资源探查理念与电磁法找矿实践. *地球物理学报*, 65(10): 3975-3985.
- 王椿镛, 张先康, 丁志峰等. 1997. 大别造山带上部地壳结构的有限差分层析成像. *地球物理学报*, 40(4): 495-502.
- 王光杰, 王谦身, 滕吉文等. 2004. 阴山大青山山系特异重力场与深部构造. *地球物理学进展*, 19(3): 602-607.
- 王谦身, 滕吉文, 王光杰等. 2005. 内蒙古阴山地区特异区域重磁场与深部构造. *地球物理学报*, 48(2): 314-320.
- 王谦身, 滕吉文, 张永谦等. 2013a. 中秦岭北侧特异重力场及其探榷. *地球物理学报*, 56(3): 792-798, doi: 10.6038/cjg20130308.
- 王谦身, 滕吉文, 张永谦等. 2013b. 中秦岭地带重力异常特征及地壳结构的探榷. *地球物理学报*, 56(12): 3999-4008, doi: 10.6038/cjg20131206.
- 王涛, 徐鸣洁, 王良书等. 2007. 鄂尔多斯及邻区航磁异常特征及其大地构造意义. *地球物理学报*, 50(1): 163-170.
- 魏国齐, 沈平, 杨威等. 2013. 四川盆地地震旦系大气田形成条件与勘探远景区. *石油勘探与开发*, 40(2): 129-138.
- 肖安成, 魏国齐, 沈中延等. 2011. 扬子地块与南秦岭造山带的盆山系统与构造耦合. *岩石学报*, 27(3): 601-611.
- 熊绍柏, 刘宏兵, 王有学等. 2002. 华南上地壳速度分布与基底、盖层构造研究. *地球物理学报*, 45(6): 784-791.
- 徐朝繁, 张先康, 段永红等. 2006. 新疆伽师强震群区上部地壳细结构的高分辨折射地震探测研究. *地震学报*, 28(1): 60-69.
- 徐涛, 张明辉, 田小波等. 2014. 丽江—清镇剖面上地壳速度结构及其与鲁甸  $M_s6.5$  级地震孕震环境的关系. *地球物理学报*, 57(9): 3069-3079, doi: 10.6038/cjg20140932.
- 闫浩飞, 刘国峰. 2024. 主被动源地震勘探在金属矿勘查中的应用. *地球物理学进展*, 39(5): 1810-1823, doi: 10.6038/pg2024I0336.
- 张学民, 刁桂琴, 束沛镛. 2004. 鄂尔多斯块体及其东南缘剪切波速度结构与波速比研究. *中国地震*, 20(1): 53-63.
- 张永谦, 滕吉文, 王夫运等. 2011. 阴山造山带及鄂尔多斯盆地北部地区上地壳的地震波属性结构及岩性推断. *地球物理学报*, 54(1): 87-97, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.01.010.
- 赵金仁, 刘保金, 段永红等. 2017. 利用爆破地震揭示华北克拉通基底的高分辨速度结构——大丰-包头折射剖面的探测结果. *地球物理学报*, 60(7): 2628-2640, doi: 10.6038/cjg20170711.
- 赵文智, 沈安江, 胡素云等. 2012. 中国碳酸盐岩储集层大型化发育的地质条件与分布特征. *石油勘探与开发*, 39(1): 1-12.
- 赵文智, 汪泽成, 姜华等. 2020. 从古老碳酸盐岩大油气田形成条件看四川盆地深层震旦系的勘探地位. *天然气工业*, 40(2): 1-10.
- 朱赖民, 张国伟, 李彝等. 2008. 秦岭造山带重大地质事件、矿床类型和成矿大陆动力学背景. *矿物岩石地球化学通报*, 27(4): 384-390.
- 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, 徐义刚, 朱光等. 2012. 华北克拉通破坏. *中国科学: 地球科学*, 42(8): 1135-1159.

(本文编辑 张正峰)