

# 岩石圈地幔结构及其对中国大型盆地的演化意义

宋晓东<sup>1,2</sup>, 李思田<sup>3</sup>, 李迎春<sup>2</sup>, 郑斯华<sup>1</sup>, 解习农<sup>3</sup>

1. 中国地震局分析预测中心, 北京 100036

2. 美国伊利诺斯大学地质系, 美国伊利诺斯州

3. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

**摘要:**  $P_n$  波是通过莫霍面下方的上地幔顶部的地震波. 由于  $P_n$  波的速度随温度和物质成分而变化, 以及  $P_n$  波各向异性可以反映地幔变形的历史. 因此  $P_n$  波的速度以及各向异性成为探索岩石圈结构的重要工具. 中国岩石圈地幔的  $P_n$  速度的特征是很高速的异常区和很低速的异常区呈镶嵌状出现, 反映了地质结构的不均匀性. 西部大型盆地(塔里木、准噶尔、吐哈、柴达木和四川盆地)具有较高的  $P_n$  速度和较弱的各向异性, 反映出这些盆地的岩石圈是冷的和坚硬的, 其变形较小. 大面积的华北地区, 在太古代的基底下具有明显的  $P_n$  波低速度. 研究结果表明与这些地区裂谷、岩石圈减薄和地幔上涌区相一致.  $P_n$  波各向异性与在最新(和目前正在进行)的大规模变形期间, 岩石圈地幔沿 NNE 向右旋简单剪切相一致. 华北的金矿藏以及华北和松辽盆地的石油储藏的位置明显地与该区的低  $P_n$  波速度区相吻合, 表明该区金属成矿和油储的形成与中、新生代以来在岩石圈地幔中的热活动, 以及壳幔之间的相互作用过程密切相关.

**关键词:** 岩石圈地幔结构; 中国大型盆地;  $P_n$  波.

中图分类号: P542

文章编号: 1000-2383(2004)05-0531-08

收稿日期: 2004-05-25

## Structure of Lithospheric Mantle and Its Implications for the Evolution of Major Basins in China

SONG Xiao-dong<sup>1,2</sup>, LI Si-tian<sup>3</sup>, LI Ying-chun<sup>2</sup>, ZHENG Si-hua<sup>1</sup>, XIE Xi-nong<sup>3</sup>

1. Center of Analysis and Prediction, China Seismological Bureau, Beijing 100036, China

2. Geology Department, University of Illinois at Urbana-Champaign, USA

3. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

**Abstract:** Seismic  $P_n$  waves sample the top of the upper mantle right beneath the Moho. Because  $P_n$  velocity varies with changes in temperature and material composition and  $P_n$  anisotropy may indicate the history of mantle deformation,  $P_n$  velocity and anisotropy have become an important tool to probe lithospheric structure. The lithosphere mantle  $P_n$  velocities of China are characterized by a mosaic of very fast and very slow anomalies, mirroring the heterogeneity of geology at surface. The major basins in the west (Tarim, Junggar, Tuha, Qaidam, and Sichuan basins) have high  $P_n$  velocities and small  $P_n$  anisotropy, which suggests that the lithosphere of these basins is cold and strong with little deformation. A large area of North China shows prominent low  $P_n$  velocities beneath the Archean basement. Our observations are consistent with rifting, lithospheric thinning, and mantle upwelling in the region. The  $P_n$  anisotropy is consistent with a dextral simple shear in the NNE direction in the lithosphere mantle during the last (and ongoing) major deformation period. The locations of gold ore deposits in North China and oil deposits in North China and Songliao basins correlate remarkably well with low  $P_n$  velocities of the region, suggesting the metallogenesis and oil formation of the region may be closely related to magma and thermal activity in lithospheric mantle and crust-mantle interaction since Mesozoic and Cenozoic.

**Key words:** structure of lithospheric mantle; major basins in China;  $P_n$  wave.

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 40274012).

作者简介: 宋晓东(1964—), 男, 美国伊利诺斯大学(Urbana-Champaign 分校)地质系副教授, 中国地震局分析预报中心客座研究员, 长期从事地震学和地球内部结构研究. E-mail: xsong@uiuc.edu

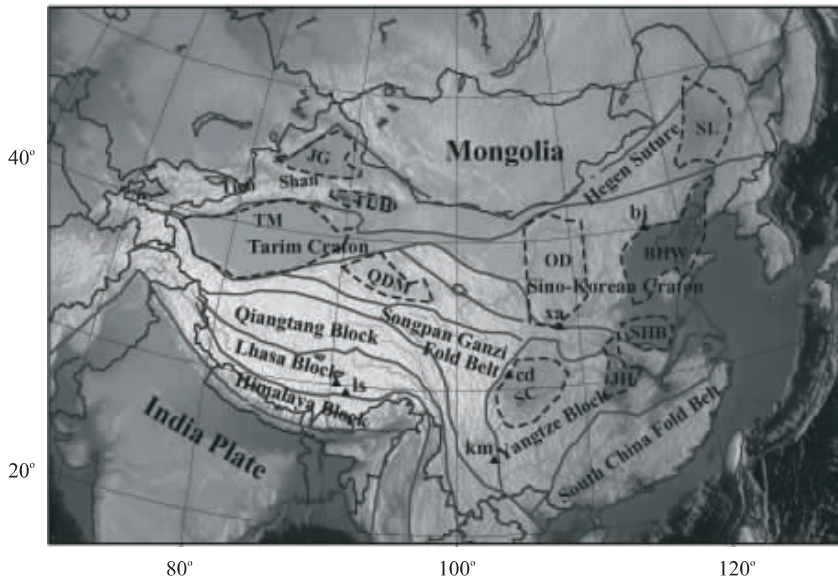


图 1 中国主要地壳单元划分[据 Liang *et al.* (2003)修改]

Fig. 1 Main crust units in China

背景上画上了地形的变化。主要盆地的轮廓用虚线表示,由西向东分别为:塔里木(TM),准噶尔(JG),吐哈(TUH),柴达木(QDM),四川(SC),鄂尔多斯(OD),江汉(JH),南华北(SHB),渤海湾(BHW)和松辽(SL)。为了确定位置,图中也标出了少量的城市:北京(bj),西安(xa),成都(cd),昆明(km),拉萨(ls)

中国大陆由前寒武地台及其周缘不同时期增生体和褶皱带所组成,在地质结构上极不均匀(Wang and Mo, 1995; Wang and Li, 2004)(图 1)。一个最显著的不均匀性表现是中国西部的印度板块与欧亚板块碰撞形成的平均高达 5 km 的青藏高原(Yin and Harrison, 2000),与东部的中朝和扬子地台形成明显的反差。由于地球深部的不可入性,在过去的几十年中,地震成像成为理解各种地表地质基本过程及其内部动力学的重要工具。

在中国已开展了很多利用面波散射资料或者走时资料开展层析成像的研究(Liu *et al.*, 1990; Liu and Jin, 1993; Xu *et al.*, 2000; Sha *et al.*, 2001; Xu *et al.*, 2001; Zhu *et al.*, 2002; Lei *et al.*, 2002; Huang *et al.*, 2002; Xu *et al.*, 2002; Huang *et al.*, 2003a),在国际上也有不少研究成果发表(Beckers *et al.*, 1994; Zhang and Lay, 1996; Wu *et al.*, 1997; Ritzwoller and Levshin, 1998; Curtis *et al.*, 1998; Griot *et al.*, 1998; Mahdi and Pavlis, 1998; Lebedev and Nolet, 2003; Sun *et al.*, 2004)。

近年来,也有一些利用  $P_n$  波走时反演中国上地幔的速度和各向异性以及地壳厚度的研究(Zhao and Xie, 1993; McNamara *et al.*, 1997; Wang *et al.*, 2002; Pei *et al.*, 2002; Xu *et al.*, 2003; Wang

*et al.*, 2003; Huang *et al.*, 2003b; Liang *et al.*, 2003)。 $P_n$  波被认为是在莫霍面下沿上地幔顶部传播的首波(图 2)。 $P_n$  波的速度随温度和物质成分而变化。 $P_n$  波各向异性反映出地幔的形变历史(Bamford, 1977; Hearn, 1996)。因此, $P_n$  波速度及各向异性成为探索岩石圈结构和动力学的重要工具(Hearn, 1996; Silver, 1996)。最近关于中国  $P_n$  波的研究表明,地幔岩石圈的特征与地表地质具有明显的相关性(Liang *et al.*, 2003)。本文试图阐明我们最近得到的岩石圈结构与中国大型盆地结构和形成,以及与华北区沉积盆地的矿产和石油资源之间的可能联系。

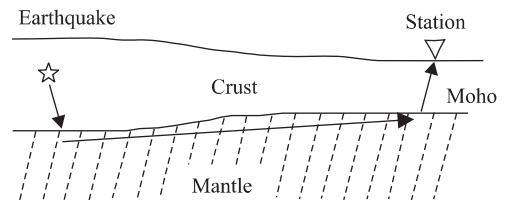


图 2  $P_n$  波的传播

Fig. 2 Sketch of  $P_n$  wave transmit

$P_n$  波在莫霍面临界折射。射线路径分为与震源、接受器和地幔相关联的 3 段。作者层析反演求解的是在地壳中与地震和台站相关联的静态延迟时间,以及在射线经过的地幔顶部的横向速度变化和速度各向异性

# 1 P<sub>n</sub> 速度和各向异性反演

首先简要地回顾用来获得 P<sub>n</sub> 波速度和各向异性的方法. P<sub>n</sub> 波反演的基本方法可以参见 Hearn (1996) 的文章. P<sub>n</sub> 波的走时是在地壳中地震波从震源到莫霍面和从莫霍面到接受器的走时, 以及沿上地幔顶部传播的首波的走时的总和 (图 2). 我们将研究区沿经度和纬度划分二维网格, 那么, P<sub>n</sub> 波的走时残差 (观测的走时减去对应于参考模型的预测走时) 可以表述为下式:

$$\Delta t_{ij} = \Delta t_i^{eq} + \Delta t_j^{st} + \sum_{k=1}^N d_{ijk} \Delta s_k + \sum_{k=1}^N d_{ijk} \cos(2\phi_{ijk}) a_k + \sum_{k=1}^N d_{ijk} \sin(2\phi_{ijk}) b_k. \quad (1)$$

式中:  $t_{ij}$  为第  $i$  次地震到第  $j$  个台站的走时;  $t_i^{eq}$  和  $t_j^{st}$  分别是第  $i$  次地震到莫霍面和从莫霍面到  $j$  个台站的走时. 地震滞后时间  $\Delta t_i^{eq}$  和台站滞后时间  $\Delta t_j^{st}$  描述了地震波在地壳中实际的走时与预测走时之间的差, 这种差异可能来自地壳的速度或地壳的厚度, 或者两者相对于参考模型的偏离. 地震滞后时间  $\Delta t_i^{eq}$  也受地震深度误差的影响. 在上地幔中的走时挠动可分解为 2 部分, 即速度 (慢度) 挠动的贡献 ( $\sum_{k=1}^N d_{ijk} \Delta s_k$ )

和各向异性挠动的贡献 ( $\sum_{k=1}^N d_{ijk} \cos(2\phi_{ijk}) a_k + \sum_{k=1}^N d_{ijk} \sin(2\phi_{ijk}) b_k$ ), 其中,  $d_{ijk}$  为第  $i$  次地震到第  $j$  个台站的射线, 在地幔中第  $k$  个网格内的长度 (如果射线  $ij$  没有穿过第  $k$  个网格, 则  $d_{ijk}$  为 0);  $s_k$  为第  $k$  个网格中的慢度 (1/velocity);  $a_k$  和  $b_k$  为第  $k$  个网格中各向异性参数;  $\phi_{ijk}$  为第  $i$  次地震到第  $j$  个台站的射线在第  $k$  个网格中的方位角;  $N$  为网格的总数. 假定 P<sub>n</sub> 波具有横向各向异性的形式, 它的方位变化可以用正弦函数来描述 (Backus, 1965). 在第  $k$  个网格中各向异性的程度用  $(a_k^2 + b_k^2)/2$  给出, 而快波传播方向相对于正北方向的角度, 则由  $\arctan(b_k/a_k)/2$  给出.

线性方程组 (1) 可以等价地写成矩阵形式:

$$d = Gm, \quad (2)$$

式中:  $d$  为数据矢量, 其元素为射线  $\Delta t_{ij}$  的观测走时残差, 元素的个数等于射线的个数; 解矢量  $m$  由要求解的所有的模型参数组成: 地震和台站滞后时间 ( $\Delta t_i^{eq}$  和  $\Delta t_j^{st}$ )、P<sub>n</sub> 波的慢度挠动  $\Delta s_k$  和每个网格的各向异性参数  $a_k$  和  $b_k$ ; 矩阵  $G$  叫做数据核, 它把数

据 (观察残差) 和模型参数联系起来, 并依赖于射线的覆盖状况, 是一个大而稀疏的矩阵 (大量的元素为 0). 因此, P<sub>n</sub> 波反演问题等价于求解一个大型稀疏线性方程组.

求解像方程 (2) 那样的线性方程组的方法已有很多讨论 (Nolet, 1987), 本文使用 LSQR 运算法则作为前处理 (Paige and Sanders, 1982a, 1982b). 同时, 我们对于解施加了由 Lees and Crosson (1989) 描述的平滑约束, 这样, 在解释反演结果时, 可以更集中于大波长结构, 而忽略局部小尺度的变化.

本文的 P<sub>n</sub> 到达时间的数据取自中国地震年度报告 (1985—1997)、云南地震局和四川地震局的汇报 (1980—1997), 以及国际地震中心汇报 (1964—1997). 由于使用了大量的台站, 以及中国大陆和邻区的地震分散分布的特点, 因此, 即使经过严格的数据质量控制, 也可以确保研究区有非常密集的射线覆盖. 分辨率检验表明, 本项研究的解的分辨率约为  $2^\circ \sim 3^\circ$ . P<sub>n</sub> 波速度和各向异性的反演结果见图 3. P<sub>n</sub> 波速度误差除边界地区外均小于 0.05 km/s.

# 2 成果对认识大型盆地深部结构和成因的意义

研究区 P<sub>n</sub> 波速度的变化范围从小于 7.7 km/s 到大于 8.3 km/s. 总体来看, 中国西部 P<sub>n</sub> 波速度大于中国东部. 研究结果表明与地表地质具有很好的相关性. P<sub>n</sub> 波速度最明显的特征是很高速的异常区和很低速的异常区交替出现, 它提供了中国地质不均匀性的一个镜像. 大型盆地具有明显不同的 P<sub>n</sub> 异常, 西部盆地具有高的 P<sub>n</sub> 速度, 渤海湾盆地则具有低的 P<sub>n</sub> 速度. 鄂尔多斯盆地较为特殊, 盆地东部 (特别是东北部) P<sub>n</sub> 的速度低于平均值 (8.0 km/s), 但盆地西部则高于这一平均值. 东部鄂尔多斯的各向异性比西部的弱.

## 2.1 西部大型盆地

以昆仑山或天山、秦岭等大型造山带为边界的大型盆地 (塔里木西部、准噶尔、吐哈、柴达木和四川盆地) 的轮廓被明显的高 P<sub>n</sub> 波速度 (8.1 ~ 8.3 km/s) 勾画得十分清楚. 这些盆地在构造上是稳定的, 地表变形较弱, 地震和火山活动较少. 在这些大型盆地 (四川、塔里木、准噶尔盆地) 的 P<sub>n</sub> 波速度异常高速区有着各向异性较弱的倾向, 表明这些稳

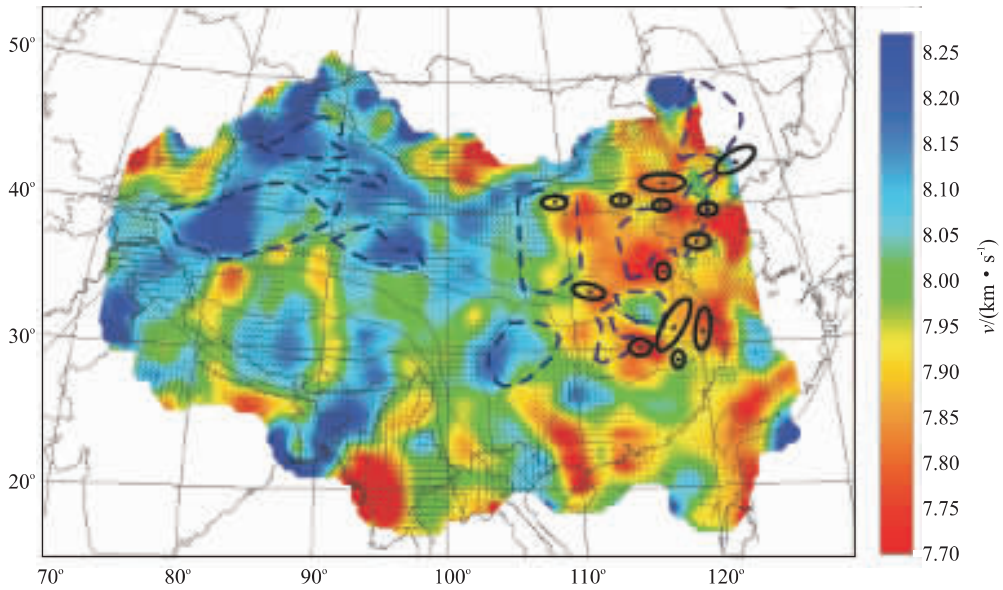


图 3  $P_n$  波速度(用颜色表示)和各向异性(用短线表示)的反演结果

Fig. 3 Inversion results of  $P_n$  velocity and anisotropy

红色和蓝色分别代表最低速 7.7 km/s 和最高速 8.3 km/s。短线指出  $P_n$  波快波的方向,短线的长度与各向异性的程度成正比,短线最长代表 4% 的各向异性。图中仅标出大于 1% 的各向异性。图中大型盆地轮廓用虚线表示,华北大型金矿富集区用椭圆形表示。大型盆地轮廓引自 Wang and Li(2004),大型金矿藏分布引自 Zhai *et al.* (2002)和翟裕生等(2002)

定地区地幔岩石圈变形也很小。因此,高  $P_n$  波速度可能标志着这些盆地基底是刚性的和较冷的。

尽管这些西部大型盆地具有较高的  $P_n$  波速度,但盆内速度异常并不是均匀的。盆地西部  $P_n$  波速度一般高于东部,其中塔里木盆地最明显,其东部的  $P_n$  波速度为 8.0~8.1 km/s,仅仅接近于或略高于平均值。此外,四川盆地和准噶尔盆地的高  $P_n$  波速度异常,相对于盆地的地表位置向西偏移了 100~200 km。

沉积盆地可分为裂陷类(伸展)盆地和挠曲类盆地。前者由于岩石圈伸展变薄出现裂谷沉降,并伴随有热衰减沉降;后者是在挤压背景下由逆冲岩片负载效应导致的沉降(Watson *et al.*, 1987)。中国西部盆地大多属于挠曲类盆地,东部属于伸展类盆地(Watson *et al.*, 1987),在华中(包括四川)的盆地较为复杂(Korsch *et al.*, 1997),但 Watson *et al.* (1987)认为四川盆地是挠曲盆地。盆地充填趋向于向俯冲板片方向增厚而呈楔形(Watson *et al.*, 1987)。一个向龙门山俯冲断裂增厚的楔形四川盆地,明显与观测到的盆地中的地壳厚度变化、盆地的地表位置及高  $P_n$  波速度向西的偏移相一致。

在中国中部有一组近南北向展布的强各向异性带,其东边以断块为主,其西边为稳定的四川盆地

(图 3)。该区域也许是四川盆地的东边界的深部响应标志。如果印度板块向北碰撞、楔入导致大陆一些块体向东挤出(Tapponier *et al.*, 1982),那么四川盆地以东很明显是一个重要边界。在青藏高原东南缘下面, $P_n$  波各向异性的快波方向显示出明显的旋转样式,从西藏中东部的东西向变为云南西部为南北向,在缅甸南部变为东西向,在缅甸西部则为南北向。这些观测结果与地质调查(Burchfiel and Wang, 2003)、GPS 测量(Chen *et al.*, 2000)和数值模拟(Royden *et al.*, 1997)相一致,表明青藏高原东南缘的地壳变形包含了围绕东喜马拉雅地的轴顺时针旋转。

## 2.2 华北区大型盆地——渤海湾盆地

华北大部分地区为中—朝地台基底,由太古代和元古代变质岩和火成岩组成(Zhang *et al.*, 1984;Griffin *et al.*, 1998)。很多地区直至三叠纪印支运动一直保持着稳定,发育完整的沉积地层。然而,自中生代以来,这些地区构造上强烈活动,发育大量裂陷盆地和广泛火山作用(Gilder *et al.*, 1991;Li *et al.*, 1995;Menzies and Xu, 1998;Ren *et al.*, 2002)。渤海湾盆地热流值平均为 80 mW/m<sup>2</sup>,最高达 100 mW/m<sup>2</sup>(Ma *et al.*, 1984;Liu, 1987)。该地区也是世界上大陆内部地震最活跃的地

区之一。在最近的地震大爆发期(1966—1976)的10年中,共发生4次大型破坏性地震( $M > 7$ ) (邢台、渤海、海城和唐山)(Ma *et al.*, 1990)。

在本文的模型中,华北是非常突出的。华北大部分地区显示了明显低的 $P_n$ 波速度和在整个中国大陆中最薄的地壳。这与业已发现的在古克拉通和稳定地块之下为高速现象(如加拿大地盾和中国西部地块)形成了鲜明的对比。此外,我们也观测到,在东海边缘、冲绳海槽和台湾岛之下为低的速度异常,而在琉球海槽之下则为高速异常,后者可能与菲律宾板块向欧亚板块之下俯冲有关。

已有的深地震剖面研究(Zhang *et al.*, 2002)和笔者的反演结果均表明中国大陆地壳最薄处位于渤海湾盆地。华北地壳沿NNE延伸的等深线形态,与沿NNE延伸的渤海湾和松辽盆地形态非常吻合,也与大兴安岭和太行山脉地区地壳向西增厚相一致。沿大兴安岭和太行山脉的边界地壳厚度的突变带,大致与布格重力异常重要梯度带相吻合(Teng *et al.*, 1983; Griffin *et al.*, 1998)。

有关这些异常的成因及其动力学机制尚不清楚。大部分观察结果,如盆地演化、火山作用、高热流、低地幔速度和薄地壳,都与关于该地区自晚中生代以来一直处在伸展和裂隙状态的相一致(Ren *et al.*, 2002)。此外,高热流、新生代火山作用和低 $P_n$ 波速度可能表明热的地幔隆升。地球物理资料显示这些盆地具有很薄的岩石圈(50~120 km)(Liu, 1987)。然而,地幔捕虏体表明克拉通下面为200 km厚的太古代岩石圈(Griffin *et al.*, 1998),这说明它在古生代被新的岩石圈所取代(Gao *et al.*, 2002)。因此,在晚中生代和新生代裂隙期间地幔岩石圈通过伸展和地幔隆升对流有可能使之减薄了80~150 km。

迄今为止,还没有华北以及东亚边缘地区裂隙和地幔隆升的定量模型。关于机理的推测(Liu, 1987; Barry and Kent, 1998; Griffin *et al.*, 1998; Ren *et al.*, 2002)往往借助于来自印度洋板块与欧亚板块碰撞所产生的远场效应的伸展作用,和与太平洋板块向欧亚板块俯冲相联系的弧后伸展和地幔隆升。沿东亚边缘的伸展是由于印度洋板块与欧亚板块碰撞导致地块向东挤出的拉分效应(Molnar and Tapponnier, 1975; Tapponnier *et al.*, 1982)。然而, Northrup *et al.* (1995)认为伸展作用与自古新世到中中新世太平洋板块与欧亚板块的汇聚速率

减慢有关。

一个必须用现实的模型说明的重要观察事实是:根据大地震的断层滑动所确定的华北地区现今的主应变,至少在中地壳和下地壳,并不是纯张性的,而是沿NNE方向的郯庐断裂右旋简单剪切(Chen and Nabelek, 1988)。Zeng *et al.* (1995)认为:浅部地壳(6~8 km)是由伸展和正断层过程所控制,而深部地壳则是由走滑断层所控制。应力状态随深度变化可用岩浆从上地幔侵入到中地壳来解释。

关于华北和东北地区 $P_n$ 波各向异性的结果是相当复杂的。在渤海湾盆地南华北一带具有极低的 $P_n$ 波速度,但没有观测到明显的各向异性。然而,在太行山北部、燕山和大兴安岭南端之下观测到了很强的 $P_n$ 波各向异性,其快波方向大致为NNE到NS,它似乎与地幔岩石圈中在NNE方向的右旋简单剪切相一致。

### 3 对于矿床和石油形成的意义

中国金矿床类型在西部和东部明显不同(李兆薰和王碧香, 1997)。西部的金矿床与沿地块边缘的火成岩共生,它是由元古代以来地块运动所形成的,金矿床沿着地块边缘山脉呈线状展布。在东部金矿床则与穿过前寒武系基底的中生代和新生代火成岩共生。

华北东部以胶东地区为代表,富集大量大型金矿床群(李兆薰和王碧香, 1997; 翟裕生等, 2002; Zhai *et al.*, 2002),其金矿储量占全国的一半以上,虽然华北东部克拉通的面积还不及全国面积的20%。我们的观测表明,这些大型金矿床几乎都分布在华北的 $P_n$ 波低速异常区内(图3)。在中国的东半部,极少有金矿床分布于 $P_n$ 波的高速区内。金矿床与低 $P_n$ 波速度之间的相关性显示了在东部地幔上涌、地壳与地幔的相互作用,与其金矿床形成之间的直接联系,这种联系与地质和地球化学资料相符。含金矿物的年代学分析表明华北大型金矿床的主成矿期为中生代极短的时间段(110~130 Ma),成矿物质的同位素资料也说明在成矿作用过程中出现地壳和地幔混合作用(Zhai *et al.*, 2002; Zhou *et al.*, 2003)。

华北和东北地区的油气聚集同样可能与 $P_n$ 波速度密切相关。渤海湾盆地和松辽盆地是中国最大

的伸展盆地也是石油最富集的地区,如前所述渤海湾盆地的演化除受控于裂隙作用外,还伴之有右旋走滑效应。如上所述,这 2 个盆地之下均为华北地区的  $P_n$  波低速异常区,这与已初步查明的岩石圈减薄、软流层上隆的深部背景相吻合。值得注意的是,与渤海湾盆地广阔的  $P_n$  波低速区相比,面积相对较小的南华北盆地群(合肥盆地等)并没有显示出  $P_n$  波的低异常(图 3)。  $P_n$  速度相对较高的区域清楚地勾画出盆地位置和轮廓。经过多年的勘查,该地区一直没有重要发现,但  $P_n$  波反映的深部特征表明其深部背景与渤海湾盆地明显不同。另一方面,位于南华北盆地之南,穿过秦岭—大别山的江汉盆地和泌阳盆地具有丰富的油田。该盆地下的  $P_n$  波速度同样也是低的。因此,在华北主要油田形成可能与中生代和新生代以来岩石圈减薄和地幔中的热活动密切相关。

#### 4 结论

中国岩石圈地幔  $P_n$  波速度最明显的特征是很高速的异常区和很低速的异常区呈镶嵌状出现,反映出地质结构的不均匀性。西部大型盆地(四川、柴达木、塔里木、吐哈和准噶尔盆地)具有高的  $P_n$  波速度和较小的  $P_n$  各向异性,表明这些盆地的岩石圈是较冷的和刚性的。

华北和东北大部分地区在太古代基底具有明显的低  $P_n$  波速度,也是中国大陆地壳最薄的地区,其中最薄处位于渤海湾和松辽盆地。本项研究的结果与该地区的裂隙作用、岩石圈变薄和地幔上涌相一致。 $P_n$  波的各向异性与最近的(或正在进行的)大型构造变形期间岩石圈地幔沿 NNE 向右旋简单剪切相吻合。华北的金矿床、渤海湾盆地和松辽盆地大型油田的形成可能与中生代和新生代岩石圈地幔的减薄和热活动密切相关。因此,岩石圈和深部地幔的高分辨率成像,不仅是研究区域构造演化的关键,而且可以应用于金属矿藏和石油资源的预测。

作者十分感谢与曾融生教授和翟明国教授的有益讨论。

#### References

Backus, G. E., 1965. Possible forms of seismic anisotropy of the uppermost mantle under oceans. *J. Geophys. Res.*, 70:3429—3439.

- Bamford, D., 1977.  $P_n$  velocity anisotropy in a continental uppermost mantle. *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 49:29—48.
- Barry, T. L., Kent, R. W., 1998. Cenozoic magmatism in Mongolia and the origin of Central and East Asia basalts. In: Flower, M. F. J., Chung, S. L., Lo, C. H., et al., eds., *Mantle dynamics and plate interactions in East Asia. Geodynamics*, 27:347—364.
- Beckers, J., Schwartz, S. Y., Lay, T., 1994. The velocity structure of the crust and upper mantle under China from broad-band P and PP waveform analysis. *Geophys. J. Int.*, 119:574—594.
- Burchfiel, B. C., Wang, E. C., 2003. Northwest-trending, Middle Cenozoic, left-lateral faults in southern Yunnan, China, and their tectonic significance. *J. Structural Geology*, 25(5):781—792.
- Chen, W. P., Nabelek, J., 1988. Seismogenic strike-slip faulting and the development of the North China basin tectonics. *Tectonics*, 7(5):975—989.
- Chen, Z., Burchfiel, B. C., Liu, Y., et al., 2000. Global positioning system measurements from eastern Tibet and their implications for India/Eurasia intercontinental deformation. *J. Geophys. Res.*, 105(B7):16215—16227.
- Curtis, A., Trampert, J., Snieder, R., et al., 1998. Eurasian fundamental mode surface wave phase velocities and their relationship with tectonic structures. *J. Geophys. Res.*, 103:26919—26947.
- Gao, S., Rudnick, R. L., Carlson, R. W., et al., 2002. Re-Os evidence for replacement of ancient mantle lithosphere beneath the North China craton. *Earth Planet Sci. Lett.*, 198:307—322.
- Gilder, A. A., Keller, G. R., Ming, L., et al., 1991. Timing and spatial-distribution of rifting in China. *Tectonophysics*, 197:225—243.
- Griffin, W. L., Zhang, A. D., O'Reilly, S. Y., et al., 1998. Phanerozoic evolution of the lithosphere beneath the Sino-Korean craton. In: Flower, M. F. J., Chung, S. L., Lo, C. H., et al., eds., *Mantle dynamics and plate interactions in East Asia. Geodynamics*, 27:107—126.
- Griot, D. K., Montagner, J. P., Tapponnier, P., 1998. Phase velocity structure from Rayleigh and Love waves in Tibet and its neighboring regions. *J. Geophys. Res.*, 103:21215—21232.
- Hearn, T. M., 1996. Anisotropy  $P_n$  tomography in the west United States. *J. Geophys. Res.*, 101:8403—8414.
- Huang, J. L., Zhao, D. P., Zheng, S. H., 2002. Lithospheric structure and its relationship to seismic and volcanic ac-

- tivity in southwest China. *J. Geophys. Res.*, 107(B10), 2255, doi:10.1029/00JB00137.
- Huang, J. L., Song, X. D., Wang, S. Y., 2003b. Fine structure of  $P_n$  velocity beneath Sichuan-Yunnan region. *Science in China (Series D)*, 46(Suppl.):201-209.
- Huang, Z. X., Su, W., Peng, Y. J., et al., 2003a. Rayleigh wave tomography of China and adjacent regions. *J. Geophys. Res.*, 108 ( B2 ), 2073, doi: 10.1029/2001JB001696.
- Korsch, R. J., Mai, H. Z., Sun, Z. C., et al., 1997. Evolution and subsidence history of the Sichuan basin, Southwest China. In: Liu, B. J., Li, S. T., eds., Basin analysis, global sedimentary geology and sedimentology. *Proc. 30th Int. Geol. Congress*, 8:208-221.
- Lebedev, S., Nolet, G., 2003. Upper mantle beneath south-east Asia from S velocity tomography. *J. Geophys. Res.*, 108(B1), 2048, doi:10.1029/2000JB000073.
- Lees, J. M., Crosson, R. S., 1989. Tomographic inversion for three-dimensional velocity structure at Mount St. Helens using earthquake data. *J. Geophys. Res.*, 94:5716-5728.
- Lei, J. S., Zhou, H. L., Zhao, D. P., 2002. 3-D velocity structure of P-wave in the crust and upper-mantle beneath Pamir and adjacent region. *Chinese J. Geophys.*, 45(6): 852-861.
- Li, S. T., Mo, X. X., Yang, S., 1995. Evolution of circum-Pacific basins and volcanic belts in East China and their geodynamic background. *J. China Univ. Geosci.*, 6(1):4-10.
- Li, Z. N., Wang, B. X., 1997. The map of gold mineral resources in lava areas of China. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Liang, C. T., Song, X. D., Huang, J. L., 2003. Tomographic inversion of  $P_n$  travel-times in China, submitted to *J. Geophys. Res.*.
- Liu, F. T., Jin, A., 1993. Seismic tomography of China. In: Iyer, H. M., Hirahara, K., eds., Seismic tomography theory and practice. Chapman and Hall, New York, 299-318.
- Liu, F. T., Wu, H., Liu, J. H., et al., 1990. 3-D velocity images beneath the Chinese continent and adjacent regions. *Geophys. J. Int.*, 101(2):379-394.
- Liu, G., 1987. The Cenozoic rift system of the North China plain and the deep internal process. *Tectonophysics*, 133:277-285.
- Ma, X., Liu, G., Su, J., 1984. The structure and dynamics of the continental lithosphere in north-northeast China. *Ann. Geophys.*, 2:611-620.
- Ma, Z. J., Fu, Z. X., Zhang, Y. Z., et al., 1990. Earthquake prediction; Nine major earthquakes in China. Seismological Press, Beijing and Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Mahdi, H., Pavlis, G. L., 1998. Velocity variations in the crust and upper mantle beneath the Tien Shan inferred from Rayleigh wave dispersion; Implications for tectonic and dynamic processes. *J. Geophys. Res.*, 103:2693-2703.
- McNamara, D. E., Walter, W. R., Owens, T. J., et al., 1997. Upper mantle velocity structure beneath Tibet plateau from  $P_n$  travel time tomography. *J. Geophys. Res.*, 102: 493-505.
- Menzies, M. A., Xu, Y. G., 1998. Geodynamics of the North China craton. In: Flower, M. F. J., Chung, S. L., Lo, C. H., et al., eds., Mantle dynamics and plate interactions in East Asia. *Geodynamics*, 27:155-165.
- Molnar, P., Tapponnier, P., 1975. Cenozoic tectonics of Asia: Effects of a continental collision. *Science*, 189:419-426.
- Nolet, G., 1987. Seismic tomography with application. In: Global seismology and exploration geophysics. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland.
- Northrup, C. J., Royden, L. H., Burchfiel, B. C., 1995. Motion of the Pacific plate relative to Eurasia and its potential relation to Cenozoic extension along the eastern margin of Eurasia. *Geology*, 23:719-722.
- Paige, C., Saunders, M. A., 1982a. LSQR: An algorithm for sparse linear equations and least squares problems. *ACM Transactions on Mathematical Software*, 8(1): 43-71.
- Paige, C., Saunders, M. A., 1982b. LSQR: Sparse linear equations and least squares problems. *ACM Transactions on Mathematical Software*, 8(2):195-209.
- Pei, S. P., Xu, Z. H., Wang, S. Y., et al., 2002.  $P_n$  velocity tomography of Xinjiang, China and adjacent region. *Chinese J. Geophys.*, 45 (2):217-224.
- Ren, J. Y., Tamaki, K., Li, S. T., et al., 2002. Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in eastern China and adjacent areas. *Tectonophysics*, 344(3-4): 175-205.
- Ritzwoller, M. H., Levshin, A. L., 1998. Eurasian surface wave tomography: Group velocities. *J. Geophys. Res.*, 103:4839-4878.
- Royden, L. H., Burchfiel, B. C., King, R. W., et al., 1997. Surface deformation and lower crustal flow in eastern

- Tibet. *Science*, 276: 788—790.
- Sha, J. A., Liu, F. T., Chen, H., 2001. Seismic tomography of the northwest Pacific and its geodynamic implications. *Prog. Nat. Sci.*, 11(1): 46—48. JAN.
- Silver, P. G., 1996. Seismic anisotropy beneath the continents; Probing the depths of geology. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 24: 385—432.
- Sun, Y. S., Li, X., Kuleli, S., et al., 2004. Adaptive moving window method for 3-D P-velocity tomography and its application in China. *Bull. Seism. Soc. Am.* (in press).
- Tapponnier, P., Peltzer, G., Ledain, A. Y., et al., 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia; New insights from simple experiments with plasticine. *Geology*, 10: 611—616.
- Teng, J. W., Wang, Q. S., Liu, Y. L., et al., 1983. Geophysical field characteristics, distribution and formation of hydrocarbon-bearing basins of East China. *Chinese J. Geophys.*, 26(4): 319—330.
- Wang, H., Li, S. T., 2004. Tectonic evolution of China and its control over oil basins. *Journal of China University of Geosciences*, 15(1): 1—8.
- Wang, H., Mo, X., 1995. An outline of the tectonic evolution of China. *Episodes*, 18: 6—16.
- Wang, S. Y., Hearn, T., Xu, Z. H., et al., 2002. Velocity structure of uppermost mantle beneath China continent from  $P_n$  tomography. *Science in China (Series D)*, 45(2): 143—150.
- Wang, S. Y., Xu, Z. H., Pei, S. P., 2003. Velocity structure of uppermost mantle beneath North China from  $P_n$  tomography and its implications. *Science in China (Series D)*, 46(Suppl.): 130—140.
- Watson, M., Hayward, A. B., Parkinson, D. N., et al., 1987. Plate tectonic history, basin development and petroleum source rock deposition onshore China. *Marine and Petroleum Geol.*, 4: 205—225.
- Wu, F. T., Levshin, A. L., Kozhevnikov, V. M., 1997. Rayleigh wave group velocity tomography of Siberia, China and the vicinity. *Pure Appl. Geophys.*, 149: 447—473.
- Xu, G. M., Li, G. P., Wang, S. E., et al., 2000. The 3-D structure of shear waves in the crust and mantle of east continental China inverted by Rayleigh wave data. *Chinese J. Geophys.*, 43(3): 395—406.
- Xu, P. F., Liu, F. T., Wang, Q. C., et al., 2001. Slab-like high velocity anomaly in the uppermost mantle beneath the Dabie-Sulu orogen. *Geophys. Res. Lett.*, 28(9): 1847—1850.
- Xu, Y., Liu, F. T., Liu, J. H., et al., 2002. Crust and upper mantle structure beneath western China from P wave travel time tomography. *J. Geophys. Res.*, 107(B10): 2220, doi:10.1029/2001JB000402.
- Xu, Z. H., Wang, S. Y., Pei, S. P., et al., 2003. Lateral variation of  $P_n$  velocity beneath northeastern marginal region of Qinghai-Xizang plateau. *Acta Seismologica Sinica*, 16(1): 26—33.
- Yin, A., Harrison, T. M., 2000. Geological evolution of the Himalayan-Tibetan orogen. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 28: 211—280.
- Zeng, R. S., Wang, C. Y., Zhang, D. N., 1995. On the dynamics of extensional basin. *Pure Appl. Geophys.*, 145(3—4): 579—603.
- Zhai, M. G., Yang, J. H., Fan, H. R., et al., 2002. A large-scale cluster of gold deposits and metallogenesis in the eastern North China craton. *Inter. Geol. Rev.*, 44: 458—476.
- Zhai, Y. S., 2002. Metallogenic system in the margin of paleo-continent. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Zhang, C. K., Zhang, X. K., Zhao, J. R., et al., 2002. Study and review on crust-mantle velocity structure in Bohai Bay and its vicinity. *Acta Seismologica Sinica*, 15(4): 447—455.
- Zhang, Y. S., Lay, T., 1996. Global surface wave phase velocity variations. *J. Geophys. Res.*, 101: 8415—8436.
- Zhang, Z. M., Liu, J. G., Coleman, R. G., 1984. An outline of the plate tectonics of China. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 95: 295—312.
- Zhao, L. S., Xie, J. K., 1993. Later variation in compressional velocities beneath the Tibetan plateau from  $P_n$  travel-time tomography. *Geophys. J. Int.*, 115: 1070—1084.
- Zhou, X. H., Yang, J. H., Zhang, L. C., 2003. Metallogenesis of superlarge gold deposits in Jiaodong region and deep processes of subcontinental lithosphere beneath North China craton in Mesozoic. *Science in China (Series D)*, 46(Suppl.): 14—25.
- Zhu, J. S., Cao, J. M., Cai, X. L., et al., 2002. High resolution surface wave tomography in East Asia and West Pacific marginal seas. *Chinese J. Geophys.*, 45(5): 679—698.

#### 附中文参考文献

- 翟裕生, 2002. 古陆边缘成矿系统. 北京: 地质出版社.
- 李兆霖, 王碧香, 1997. 中国火山岩地区金矿资源图. 北京: 地质出版社.