

地壳上地幔地震波速度结构和岩石学解释综述*

彭 聪¹ 邓晋福² 邱瑞照³

(1 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 2 中国地质大学, 北京 100083;

3 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037)

摘 要 文章归纳了地壳上地幔各种岩石矿物的速度特征。长英质岩石的上地壳具有较低的 P 波速度; 各类花岗质岩石到云英闪长质片麻杂岩组成的中部地壳 P 波速度为 6.4~6.6 km/s; 由石榴石、角闪石、辉石或橄榄石组成的下地壳 P 波速度最大, 达到了 6.8~7.0 km/s, 当 P 波速度大于 7.3 km/s 时则应有相当高的榴辉岩和超镁铁岩的高速组分。在地壳下面的岩石圈地幔主要由橄榄岩质岩石(超镁铁岩)组成, 地震波纵波速度达到 8.0 km/s 以上。

关键词 地震波速度 岩石矿物 地壳上地幔 综述

过去数十年地震研究的成果对大陆地壳的认识起了关键性的作用。常用的地震纵波速度(v_p)数据及其反演是确定陆壳结构组成的重要依据。地震剪切波层析成像提供了深部构造几何形态的信息。影响大陆岩石地震波 P 波速度的主要因素是矿物成分及其化学成分, 因而被用以判断地壳的岩石和化学组成。无论从地壳分层角度或岩石学角度看, 它们和地震波速度都有很好的对应关系。一般来说, 上地壳速度低于 6.30 km/s。中地壳速度在 6.30~6.70 km/s 之间。下地壳速度在 6.70~8.00 km/s 之间。

利用地震波速度和地层的关系进行地壳分层和用岩石学获得地震波速度的统计关系进行岩性划分。可以参考欧洲地学断面资料(Mengel et al., 1990b; 图 1 至图 6 和表 1)。

1 地壳的地震波速度及其岩石学解释

长英质的上地壳岩石具有较低的 P 波速度, 许多地震剖面地震波显示出中地壳具有中等的 P 波速度(6.4~6.6 km/s), 各类花岗质岩石到云英闪长质片麻杂岩组成的中部地壳, 由于速度变化不大, 没有明显的反射而呈现“透明状”。而下部地壳常常增大到 6.8~7.0 km/s 以上。P 波速度对镁铁质组分的含量比较敏感, 随镁铁质的增加而显著增大, P 波速度对斜长石、辉石和石榴石组分的相对比例也很敏感, 从辉长质岩石转变到高级变质的石榴石麻粒岩和榴辉岩时 P 波速度亦显著增加。在下地壳, P 波速度值达到 6.8~7.0 km/s 以上, 表明含有相当数量的石榴石、角闪石、辉石或橄榄石。当 P 波速度大于 7.3 km/s 时则应有相当高的榴辉岩和超镁铁岩的高速组分。反射性下地壳常与无反射的“透明”性上地幔相伴生。主要发育于伸展构造和(或)造山后伸展崩落区, 反映它是新生事件的产物, 与晚期伸展事件有关。它不仅表明下地壳往往比中、上地壳年轻, 而且下地壳呈塑性状态存在, 完全可以充当岩石圈内的拆离面, 从而产生了层滑构造, 同时反射性下地壳发育区的高热流多与深部岩浆作用有关, 反映深部岩浆的垂向加入是地壳生长的一种重要机制。

*本文得到地质大调查综合研究项目“中国成矿体系与成矿评价”(K1.4)的资助

第一作者简介 彭 聪, 女, 1954 年生, 研究员, 从事地球物理与成矿作用综合研究。

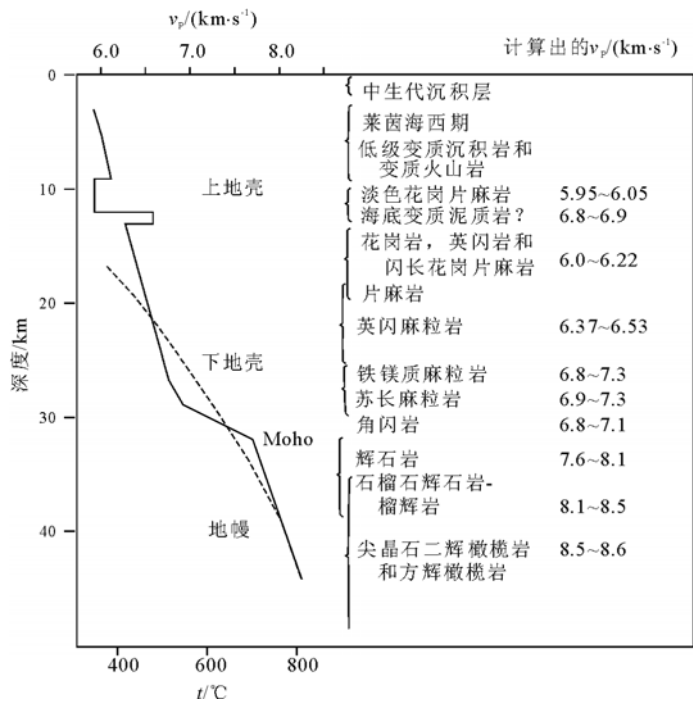


图 1 根据岩石学解释在北黑森凹陷下面的地震速度结构 (Aichroth et al., 1992)
基于捕掳体组分、试验和计算地震数据建立的模型 (Mengel et al., 1990a)。地壳上部 10 km 的信息来自地表出露体。虚线表示 65 mW/m² 的地表热流密度温度-深度分布曲线

Fig.1 Interpretation of the seismic velocity structure beneath the NHD (Aichroth et al., 1992) in terms of crustal lithology

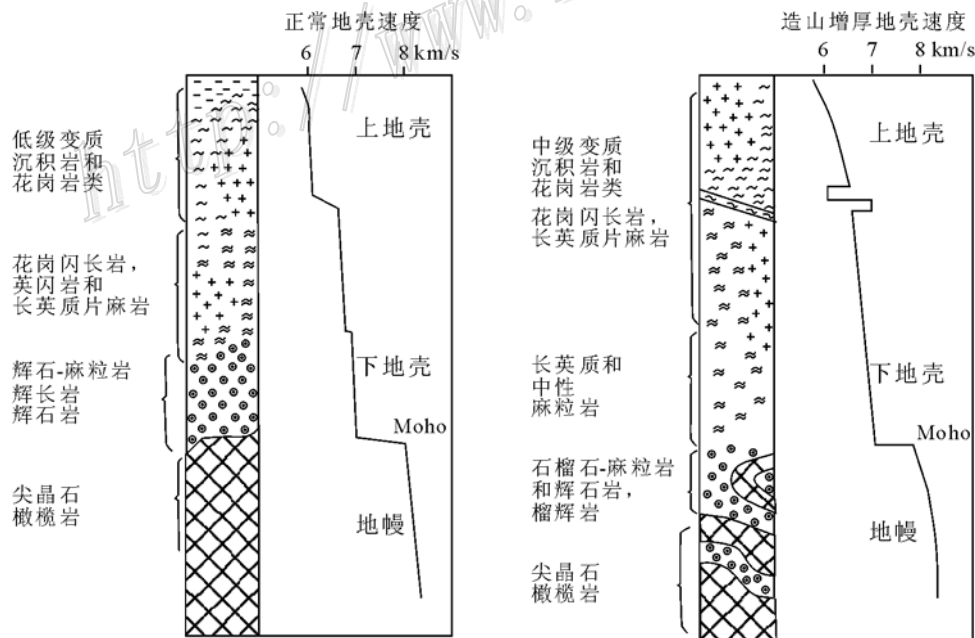


图 2 正常大陆地壳 (左图) 和造山增厚形成的地壳 (右图) 的岩石学剖面 and 地震速度结构

Fig.2 Lithological profile and seismic velocity structure of a 'normal' continental crust (left) and a crustal segment formed by orogenic crustal thickening (right)

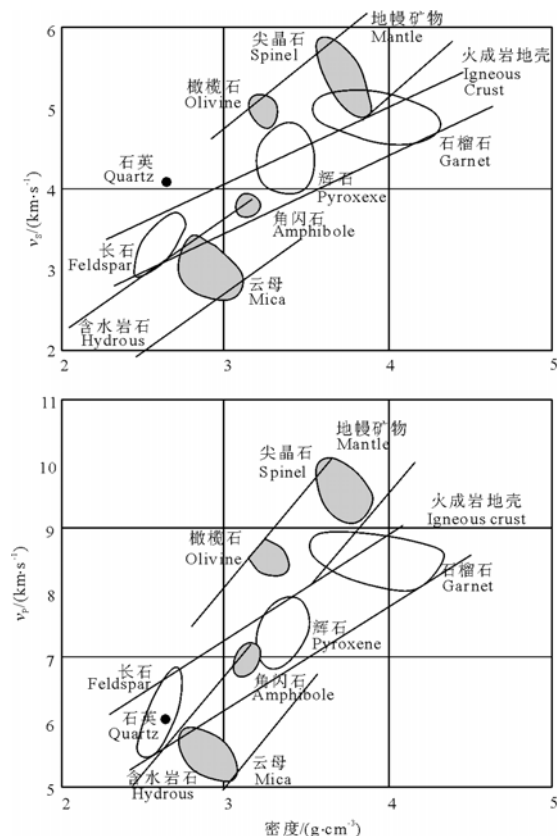


图 3 造岩矿物的速度-密度关系 (Henkel et al., 1990)

Fig. 3 Plot of seismic velocity versus density for rock-forming minerals

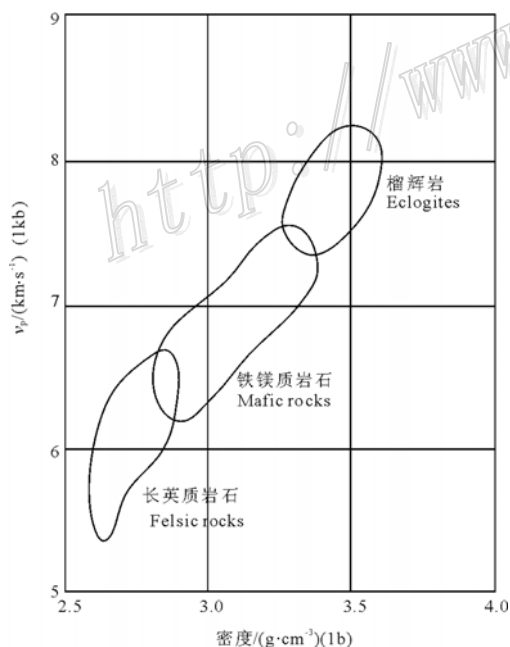


图 5 火成岩和榴辉岩产生的 P 波速度关系变化图象 (Henkel et al., 1990)

Fig. 5 Plot of generalized P-wave velocity and density variation of igneous rocks and eclogite

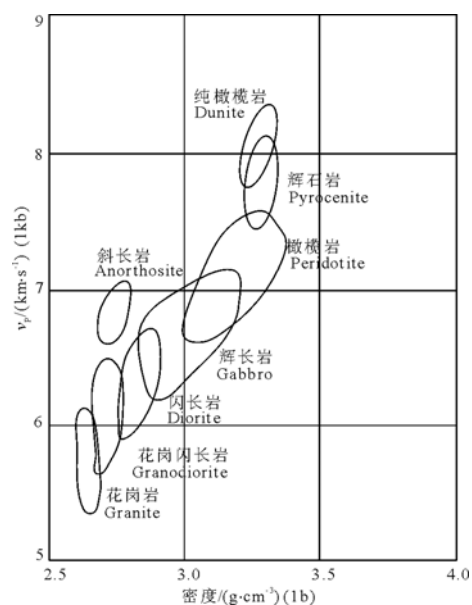


图 4 深成岩产生的 P 波速度关系变化图象 (Henkel et al., 1990)

Fig. 4 Plot of generalized P-wave velocity and density variation of plutonic rocks

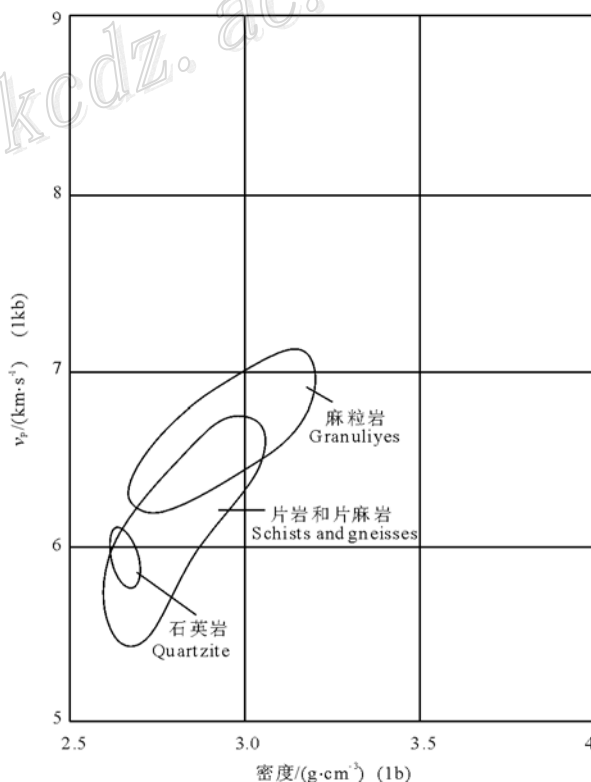


图 6 变质岩产生的 P 波速度关系变化图象 (Henkel et al., 1990)

Fig. 6 Plot of generalized P-wave velocity and density variation of metamorphic rocks

大陆岩石圈和大洋岩石圈相比有很多特点。大陆壳密度低,主要由英安质岩石组成,上部岩石密度为 2.7 g/cm^3 ,下部为 $2.85\sim 3.0 \text{ g/cm}^3$,而大洋壳则以玄武岩和角闪岩相变玄武岩为主,密度较大 ($2.85\sim 3.0 \text{ g/cm}^3$);大陆的岩石,在一些地区年龄达 $3\ 000\sim 4\ 000 \text{ Ma}$,而大洋最古老的岩石仅仅是 200 Ma 。

在地壳下面的岩石圈地幔主要由橄榄岩质岩石(超镁铁岩)组成,密度大约为 3.3 g/cm^3 ,地震波纵波速度达到 8.0 km/s 以上,而地壳的纵波速度均小于 8.0 km/s 。

在正常地壳内部 Moho 和岩石学壳/幔边界一致(从铁镁质转变到超铁镁质)。然而,在造山增厚地壳内部,由于麻粒岩高的密度和榴辉岩相的组合,一个主要的间断面(Moho)是在长英质和铁镁质麻粒岩之间。注意,形成地壳的物质已经混入到地震定义的地壳底部之下,铁镁质转变到超铁镁质尖晶石也没有地震速度的跳跃间断。

2 矿物的速度特征

含水岩石矿物云母,其速度 $5.08\sim 5.92 \text{ km/s}$,密度 $2.72\sim 3.08 \text{ g/cm}^3$ 。火成岩地壳的矿物包括长石、角闪石、辉石和石榴石。长石速度 $5.46\sim 6.86 \text{ km/s}$,密度 $2.46\sim 2.74 \text{ g/cm}^3$ 。角闪石速度 $6.70\sim 7.24 \text{ km/s}$,密度 $3.05\sim 3.22 \text{ g/cm}^3$ 。辉石速度 $6.82\sim 7.94 \text{ km/s}$,密度 $3.20\sim 3.52 \text{ g/cm}^3$ 。石榴石速度 $8.02\sim 8.96 \text{ km/s}$,密度 $3.52\sim 4.34 \text{ g/cm}^3$ 。石榴石是地壳下部地幔顶部矿物,所以速度和密度都很高。地幔矿物有橄榄石和尖晶石。橄榄石速度 $8.26\sim 8.84 \text{ km/s}$,密度 $3.14\sim 3.29 \text{ g/cm}^3$ 。尖晶石速度 $9.08\sim 10.10 \text{ km/s}$,密度 $3.56\sim 3.90 \text{ g/cm}^3$ 。

3 岩石的速度特征

深成岩包括花岗岩、花岗闪长岩、闪长岩、辉长岩、斜长岩、橄榄岩、辉石岩和纯橄榄岩。花岗岩速度 $5.34\sim 6.12 \text{ km/s}$ 。花岗闪长岩速度 $5.64\sim 6.48 \text{ km/s}$ 。闪长岩速度 $5.90\sim 6.71 \text{ km/s}$ 。辉长岩速度 $6.18\sim 7.14 \text{ km/s}$ 。斜长岩速度 $6.60\sim 7.06 \text{ km/s}$ 。橄榄岩速度 $6.60\sim 7.58 \text{ km/s}$ 。辉石岩速度 $7.44\sim 8.12 \text{ km/s}$ 。纯橄榄岩速度 $7.75\sim 8.36 \text{ km/s}$ 。

火成岩包括长英质岩石、铁镁质岩石和榴辉岩。长英质岩石速度 $5.36\sim 6.69 \text{ km/s}$ 。铁镁质岩石速度 $6.16\sim 7.56 \text{ km/s}$ 。榴辉岩速度 $7.34\sim 8.25 \text{ km/s}$ 。

变质岩包括石英岩、片岩和片麻岩、麻粒岩。石英岩速度 $5.43\sim 6.74 \text{ km/s}$ 。片岩和片麻岩速度 $5.76\sim 6.12 \text{ km/s}$ 。麻粒岩速度 $6.20\sim 7.12 \text{ km/s}$ 。

4 结论与讨论

大陆地壳可大体概括为 3 层:被花岗岩侵入于沉积物中的上部地壳,以混合岩化为主的角闪岩相的中部地壳,及由高变质级的火成岩和变质岩组成的麻粒岩的下部陆壳。

地壳上地幔地层、岩石矿物地震波速度参数整理自欧洲地学断面,综述于表 1 中。

表 1 地壳上地幔地层、岩石矿物地震波速度参数表 (Henkel et al., 1990)

Table 1 Generalized P-wave velocity of rock-forming minerals in the crust and the upper mantle					
地域	岩石矿物	$v_p/(km \cdot s^{-1})$	地域	岩石矿物	$v_p/(km \cdot s^{-1})$
上地壳	基底隆起		地盾岩石	地盾沉积岩	
	花岗岩基	6.15		花岗岩	
	闪长岩	6.25, 5.90~6.71		片麻状花岗岩	
	淡色花岗岩片麻岩	5.95~6.05		辉长岩	
	英闪和闪长花岗岩片麻岩	5.60~6.30		花岗岩类	
	花岗闪长岩	5.64~6.48		片麻岩	
	斜长岩	6.60~7.06		绿岩	
中地壳	长英质片麻岩 (长英质片麻岩的火 山岩母体可再分为淡色花岗岩, S型花岗岩和英闪/闪长岩)、麻 粒岩	6.30~6.70	深成岩	花岗岩	5.8
	英闪麻粒岩	5.36~6.69		花岗闪长岩	6.2
	片岩和片麻岩	5.76~6.12		闪长岩	6.4
	英闪麻粒岩	6.37~6.53		辉长岩	6.7
	石英岩	5.43~6.74		橄榄岩	7.3
			堆积岩	斜长岩	6.82
下地壳	铁镁质	6.2~7.5(平均值6.9)		辉石岩(下地壳)	7.4~8.1(平均值7.8)
	铁镁质麻粒岩	6.8~7.3		纯橄榄岩(地幔)	7.8~8.3 (平均值8.1)
	苏长麻粒岩	6.9~7.3	变质岩	石英	5.95
	角闪岩	6.20~7.12		片岩和片麻岩	5.50~6.80(平均值6.2)
	橄榄岩	6.8~7.1		麻粒岩	6.20~7.15(平均值6.6)
	榴辉岩	6.8~7.6(平均值7.2)		榴辉岩	7.60~8.00
	辉石岩	7.4~8.2(平均值7.8)	区域场	Conrad界面(上地壳/下地壳; 长英质/ 铁镁质)	6.4~6.6
	辉长岩	7.6~8.1, 7.44~8.12		下地壳	6.8~7.2
上地幔	最上部地幔	8.2	Moho界面(壳/幔转换带; 铁镁质/超铁 镁质)		
	纯橄榄岩	7.8~8.3(平均值8.1)			
	榴辉岩	7.34~8.60			
	尖晶石、二辉橄榄岩	8.5~8.6			
	尖晶石方辉橄榄岩	7.70~8.60			

参考文献

- Aichroth B, Prodehl C and Thybo H. 1992. Crustal structure along the central segment of the EGT from seismic-refraction studies[J]. *Tectonophysics*, 207(1-2): 43~64.
- Mengel K and Hoefs J. 1990a. Li- $\delta^{18}O$ -SiO₂, systematics in volcanic rocks and mafic lower crustal granulite xenoliths[J]. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 101(1): 42~53.
- Mengel K and Kern H. 1990b. Petrologic versus seismic Moho and crustal root mysteries of the hercynian orogen[A]. In: Freeman R, Giese P and Mueller st., ed. *The European geotraverse: integrative studies*[C]. European Science Foundation, Strasbourg, France. 169~176.
- Henkel H, Lee M K and Lund C E. 1990. An integrated geophysical interpretation of the 2 000 km FENNOLOGRA section of the Baltic Shield. The European geotraverse: integrative studies. [A]. In: Freeman R, Giese P and Mueller st., ed. *The European geotraverse: integrative studies*[C]. European Science Foundation, Strasbourg, France. 1~47.

Seismic Wave Velocity Structure of Crust and Upper Mantle and Petrological Interpretation

Peng Cong¹, Deng Jinfu² and Qiu Ruizhao³

(1 Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China; 2 Chinese University of Geosciences, Beijing 100083, China;

3 Institute of Geology, CAGS, Beijing 100037, China)

Abstract

The authors sum up the P-wave velocities of rock-forming minerals in the crust and the upper mantle. The felsic rocks that compose the upper crust have lower P-wave velocity, the P-wave velocity of the granitic and greisen-dioritic gneiss complexes that compose the middle crust is 6.4~6.6 km/s, and the lower crust rocks composed of garnet, amphibole, pyroxene and olivine have the highest P-wave velocity: 6.8~7.0 km/s. When P-wave velocity is higher than 7.3 km/s, there must exist high velocity components like eclogites and ultramafic rocks. The velocity of peridotite that makes up lithosphere mantle (ultramafic rocks) is higher than 8.0 km/s.

Key words: seismic velocity, rock-forming minerals, crust and mantle

<http://www.kcdz.ac.cn/>