

榴辉岩的地震波性质：对苏鲁超高压变质带地壳成分和折返机制的探讨*

王勤¹ 嵇少丞² 许志琴³ Matthew H. SALISBURY⁴ 夏斌⁵ 潘明宝⁶
WANG Qin¹, JI ShaoCheng², XU ZhiQin³, Matthew H. SALISBURY⁴, XIA Bin⁵ and PAN MingBao⁶

1. 南京大学地球科学系, 南京 210093
 2. Département des Génies Civil, Géologique et des Mines, École Polytechnique de Montréal, Montréal, Québec, H3C 3A7, Canada
 3. 中国地质科学院地质研究所, 中国大陆科学钻探中心, 北京 100037
 4. Geological Survey of Canada-Atlantic, Bedford Institute of Oceanography, P. O. Box 1006, Dartmouth, Nova Scotia, B2Y 4A2, Canada
 5. 中国科学院广州地球化学研究所边缘海地质实验室, 广州 510640
 6. 江苏省地质调查研究院, 南京 210018
1. Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China
2. Département des Génies Civil, Géologique et des Mines, École Polytechnique de Montréal, Montréal, Québec, H3C 3A7, Canada
3. Chinese Continental Scientific Drilling Center, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China
4. Geological Survey of Canada-Atlantic, Bedford Institute of Oceanography, P. O. Box 1006, Dartmouth, Nova Scotia, B2Y 4A2, Canada
5. Laboratory of Marginal Sea Geology, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China
6. Geological Survey of Jiangsu Province, Nanjing 210018, China
- 2005-01-20 收稿, 2005-03-02 改回.

Wang Q, Ji SC, Xu ZQ, Salisbury MH, Xia B and Pan MB. 2005. Seismic properties of eclogites: implications on crustal composition and exhumation mechanism of the Sulu ultrahigh-pressure metamorphic belt. *Acta Petrologica Sinica*, 21(2):451-464

Abstract Laboratory-derived P- and S-wave velocities for three types of eclogites are summarized. Combined with seismic properties of other lithologies, the results are helpful to interpret seismic data from the Dabie-Sulu orogenic belt. The interfaces between eclogites (high velocity and density) and almost all other lithologies such as felsic gneisses, marble, quartzite, amphibolite, mafic granulite, and serpentinized peridotite show large values of reflection coefficient (>0.1) and are thus able to produce strong seismic reflections. If crustal materials subducted and preserved in the lithospheric upper mantle as eclogites interlayered with felsic gneiss, garnet-jadeite quartzite, marble and serpentinized peridotite, they could be a good candidate for regional seismic reflections beneath orogenic belts. Based on a refraction profile in the Chinese Continental Scientific Drilling area, the crustal composition beneath the Sulu UHP belt is estimated to test different exhumation models of UHP rocks. Although eclogites are widely exposed in the surface and drill holes, they may not exist in the today's deep crust of the Sulu terrane, implying that these UHP rocks are tectonic slices that exhumed along a series of shear zones and finally thrust over an UHP-free middle-lower crust.

Key words Eclogite, Seismic velocity, Seismic anisotropy, Ultrahigh-pressure metamorphism, Sulu orogenic belt

摘要 本文总结了榴辉岩的高温高压弹性波速测量结果,并将其应用于苏鲁超高压变质带地震资料的解释。由于榴辉岩具有高密度和高波速,它们和长英质片麻岩、大理岩、石英岩、角闪岩、麻粒岩、蛇纹石化橄榄岩的界面可以产生强反射。如果俯冲的陆壳物质以榴辉岩与围岩互层的形式在上地幔保留下来,就可能在造山带的上地幔产生地震反射。根据 CCSD 孔区地震剖面所建立的地壳成分模型表明:苏鲁超高压带地壳浅部的高速层可归因于夹在花岗质片麻岩、副片麻岩、角闪岩等岩

* 本研究得到加拿大自然和工程研究基金、科技部 973 项目(2003CB716502)和南京大学人才培养基金资助项目的联合资助。

第一作者简介:王勤,女,1974年生,博士,讲师,主要从事岩石物理和深部构造方面的研究, E-mail: qwang@nju.edu.cn

石中的榴辉岩和超基性岩;中地壳主要由中酸性片麻岩、斜长角闪岩和副片麻岩组成;下地壳以中基性麻粒岩为主。在该超高压变质带现今的深部地壳,榴辉岩含量很少或几乎没有。因此,折返的超高压变质岩是以构造岩片的形式沿一系列剪切带逆冲并覆盖在正常的中下地壳之上,深部榴辉岩的缺乏可能与下地壳折沉作用无关。

关键词 榴辉岩;地震波速;地震波各向异性;超高压变质作用;苏鲁造山带

中图法分类号 P588.348; P315.31

1 引言

由于矿物组成、岩石结构、压力、温度、流体等因素对岩石地震波速的影响,地震资料的解释常常是不唯一的。岩石的地震波性质是建立深部地壳物质组成和结构模型的基础,无论在区域构造研究还是浅部地震勘探中都有广泛的应用。对岩石地震波性质的认识基于两方面:(1)以弹性理论为基础,根据岩石的矿物组成、显微结构和组成矿物的弹性参数进行波速计算(Crosson and Lin, 1971; Ji and Mainprice, 1988; Mainprice and Humbert, 1994);(2)高温高压条件下的单晶体(Bhagat *et al.*, 1992)、人工矿物集合体(Wang and Ji, 2001)或天然岩石(Birch, 1960; Christensen, 1974; Kern, 1982)的实验室波速测量。四十余年来的研究已积累了丰富的P波和S波速度及各向异性数据(见Ji *et al.*, 2002的总结),大大深化了人们对深部地壳和上地幔的地震波性质、物质组成和动力学的认识(Fountain and Christensen, 1989; Rudnick and Fountain, 1995; Christensen and Mooney, 1995)。

大别-苏鲁造山带是世界上规模最大的超高压变质带,广泛出露的柯石英榴辉岩及其它超高压变质岩代表了曾俯冲至100公里以下的大陆地壳物质(Wang *et al.*, 1989; Wang and Liou, 1991; Xu *et al.*, 1992; Liou *et al.*, 1998; Zheng *et al.*, 2003)。位于南苏鲁超高压带的中国大陆科学钻探(CCS D)工程于2005年1月在江苏东海完钻,在除超基性岩外的各类岩石(片麻岩、榴辉岩和斜长角闪岩)中普遍发现柯石英,进一步证明扬子板块的巨量陆壳物质曾俯冲至华北板块之下的上地幔(Liu *et al.*, 2001; 刘福来等, 2004)。作为超高压变质岩的代表性岩石,榴辉岩的地震波性质一直受到研究者的关注(Birch, 1960; Christensen, 1974; Manghnani *et al.*, 1974; Rao *et al.*, 1974; Kern and Richter, 1981; Kern and Tubia, 1993; Fountain *et al.*, 1994; Kern *et al.*, 1999, 2002; Mauler *et al.*, 2000; Bascou *et al.*, 2001; Gao *et al.*, 2001; Ji *et al.*, 2003a)。新鲜的榴辉岩主要由石榴石和绿辉石组成,波速很高,各向异性较低。但是超高压变质作用过程中基性岩的榴辉岩化及折返过程中的退变质作用又会改变榴辉岩的矿物组成,并影响其地震波性质。

本文通过总结高温高压下榴辉岩的波速测量结果,研究大别-苏鲁造山带地震反射层的成因,对横穿南苏鲁超高压带CCSD孔区的地震折射剖面进行地壳成分解释,并探讨超高压变质岩的折返机制,为建立该地区的三维构造和动力学模型提供理论和实验依据。

2 榴辉岩的地震波性质

2.1 压力对波速和各向异性的影响

为了解岩石的地震波各向异性,实验时需要根据岩石的面理和线理发育情况测量多个方向的弹性波速。一般选择三个方向:X平行拉伸线理,Y平行面理但垂直于拉伸线理方向,Z垂直于面理(图1)。从图2和图3可见,波速V随着围压P的增加先快速增高,然后在某一临界压力(P_c)之上V缓慢增加。这一波速-压力关系可归因于随着围压的增高,岩石中的孔隙和微裂隙逐渐关闭,岩石从多孔弹性体(poroelastic)演变为纯弹性体(elastic)。常见的地壳岩石的临界压力在300 MPa左右,而榴辉岩和橄榄岩的临界压力在500~600 MPa,因此只有高压下得出的波速-压力线性关系才可外延至深部地壳和上地幔,用于深部地球物理资料的解释。Wang *et al.* (2005a)提出了一个新的经验公式描述岩石波速在低压下的非线性变化:

$$V = a(\ln P)^2 + b \ln P + c \quad (P \leq P_c) \quad (1)$$

其中a和b是描述临界压力之下孔隙关闭的两个参数,c等于一个压力单位(1 MPa)下的岩石波速。在临界压力之上,随着压力增高,波速线性增长:

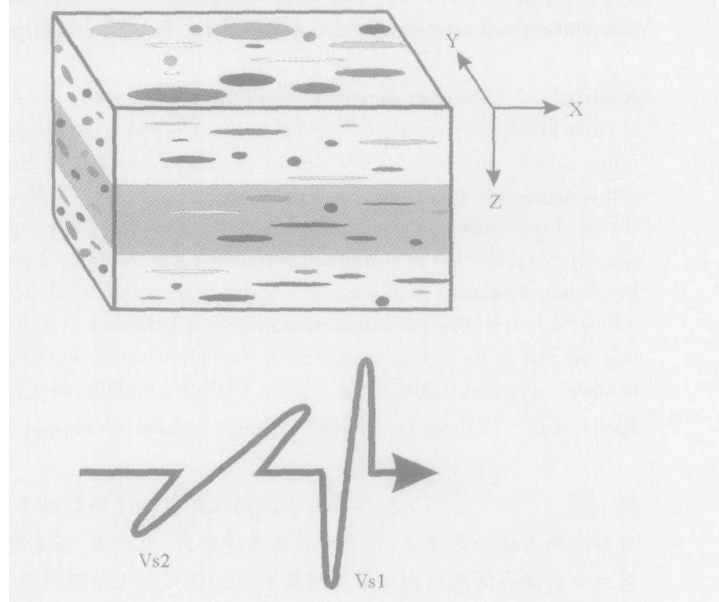


图1 岩石结构与S波分裂示意图

Fig. 1 Simplified diagram showing rock fabric and shear wave splitting

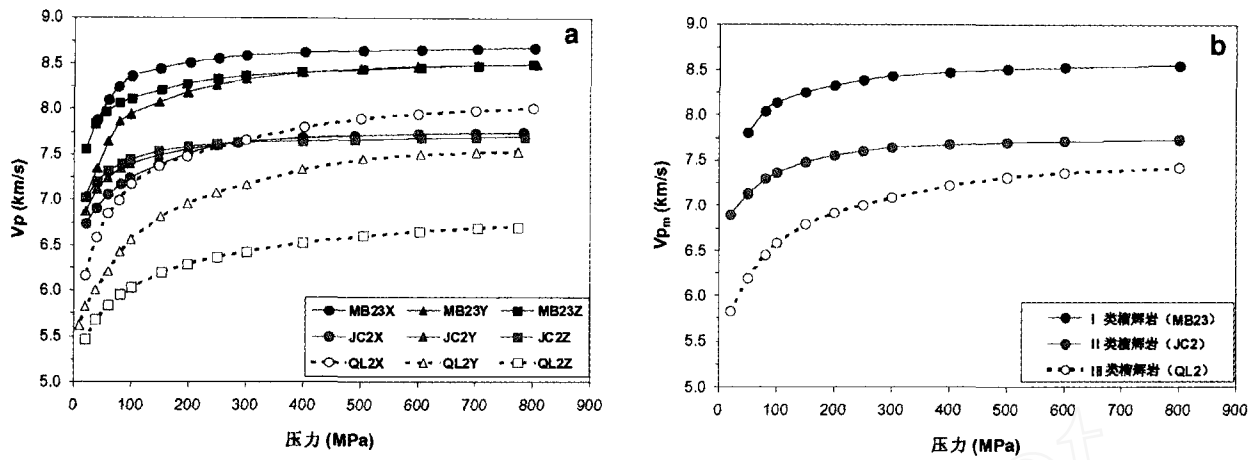


图2 苏鲁超高压带三个典型榴辉岩的 P 波速度-压力曲线

(a) 沿 X, Y, Z 三个方向的 P 波速度; (b) 平均 P 波速度(数据来自 Wang *et al.*, 2005a)

Fig. 2 P-wave velocities versus pressure for three typical eclogite samples from the Sulu UHP terrane. (a) P-wave velocities in the X, Y and Z directions; (b) Mean P-wave velocities (data from Wang *et al.*, 2005a).

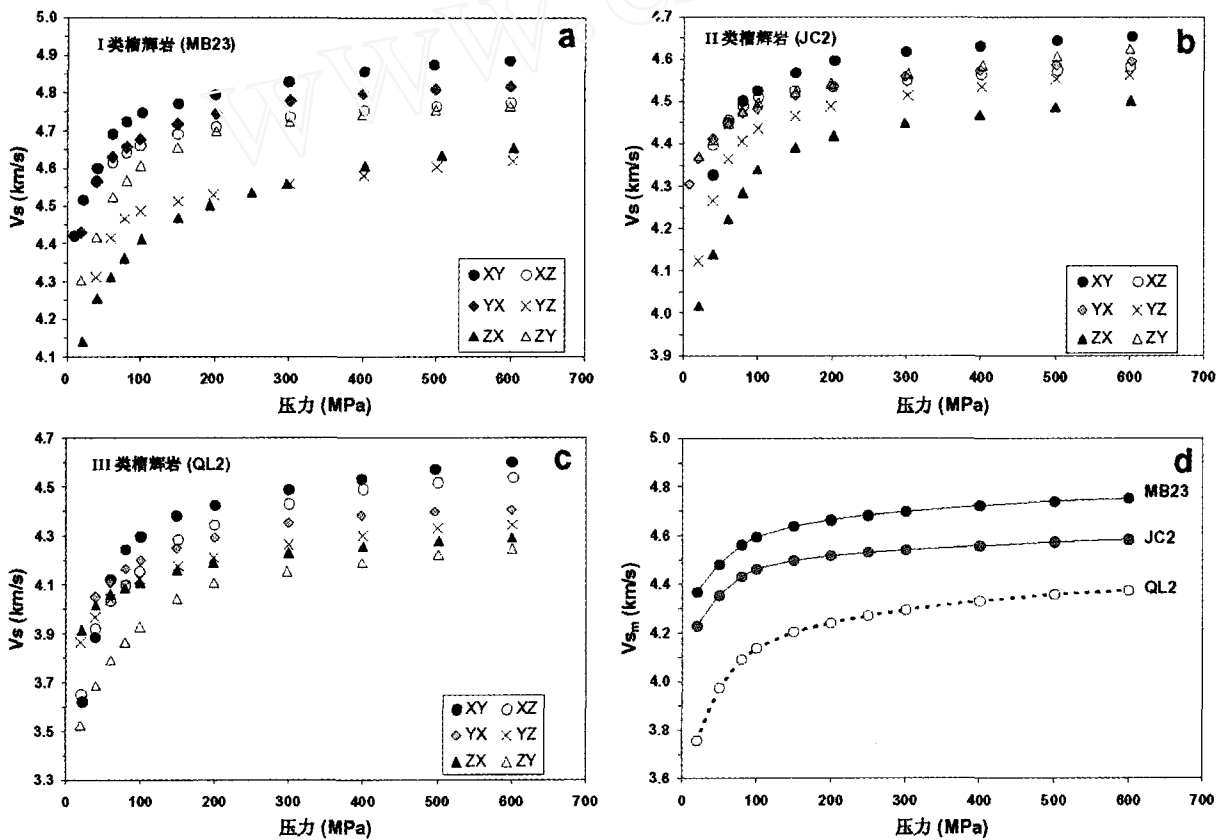


图3 苏鲁超高压带三个典型榴辉岩的 S 波速度-压力曲线

(a) I 类榴辉岩 MB23; (b) II 类榴辉岩 JC2; (c) III 类榴辉岩 QL2; (d) 三个榴辉岩的平均 S 波波速(数据来自 Wang *et al.*, 2005b).

Fig. 3 Shear wave velocities (V_s) versus confining pressure for three typical eclogites from the Sulu UHP terrane;

(a) Type-1 eclogite MB23, (b) Type-2 eclogite JC2, (c) Type-3 eclogite QL2, and (d) mean shear wave velocities of the three samples (data from Wang *et al.*, 2005b).

$$V = V_0 + DP \quad (P \geq P_c) \quad (2)$$

其中 V_0 是无孔隙岩石在零压力下的波速, D 是岩石波速的本征压力梯度, 反映了岩石的弹性性质。波速梯度 V' 则可表示为:

$$V' = \begin{cases} (2a \ln P + b)/P & (P \leq P_c) \\ D & (P \geq P_c) \end{cases} \quad (3)$$

波速在临界压力 P_c 处连续, 且一阶导数连续, 即

$$(2a \ln P_c + b)/P_c = D。$$

公式(1) - (3)有解的条件是

$$a < 0 \text{ 和 } b \geq \sqrt{-4a(V_0 - c)}。$$

因此, a , b 和 $(V_0 - c)$ 是描述孔隙对波速影响的重要参数, 由岩石中孔隙的密度、形状和分布决定。

图 4a 为苏鲁毛北榴辉岩 MB23 的 V_p - P 曲线回归结果。以临界压力 520 MPa 为界, V_p 随压力的变化由公式

$$V_p = -0.0966(\ln P)^2 + 1.302 \ln P + 4.059 \text{ 和} \\ V_p = 8.343 + 1.815 \times 10^{-4} P \text{ 分别描述。}$$

从 1 MPa 至 P_c 之间的波速非线性增加由两部分组成: 由于孔隙关闭而产生的波速增加 $(V_0 - c)$ 和由于晶格压缩而产生的波速增加 $(V_c - V_0)$ 。波速梯度 V_p' 在 520 MPa 之下为一快速递减曲线, 逐渐逼近岩石波速的本征压力梯度 D , 反映了波速在低压下的快速增加和高压下的线性增加(图 4b)。我们对 200 余条实验室观测的波速-压力曲线进行了回归分析, 绝大多数结果的吻合度 $R^2 > 0.95$ 。

岩石的各向异性 A 定义为:

$$A = (V_{\max} - V_{\min})/V_m \times 100\% \quad (4)$$

对于 P 波, $V_m = (V_x + V_y + V_z)/3$, 是沿 X, Y, Z 三个方向传播的 P 波速度的平均值。即使对于各向异性很大的岩石, 用这一方法计算的 V_m 也基本上可以代表岩石的平均波速(Christensen and Ramanantoandro, 1971; Ji *et al.*, 2003b)。在各向异性的介质中, S 波传播时会分裂成为两个振动方向相互垂直、波速不同的 S 波(快波 V_{s1} 和慢波 V_{s2}), 称为 S 波分裂(图 1)。因此, 沿 X, Y, Z 三个方向, 会观测到 $V_{s_{xy}}$, $V_{s_{xz}}$, $V_{s_{yx}}$, $V_{s_{yz}}$, $V_{s_{zx}}$, $V_{s_{zy}}$ 六个 S 波, 下标第一个字母指示 S 波的传播方向, 第二个字母指示 S 波的偏振方向。对于样品的 S 波各向异性, 公式(4)中的

$$V_m = (V_{s_{xy}} + V_{s_{xz}} + V_{s_{yx}} + V_{s_{yz}} + V_{s_{zx}} + V_{s_{zy}})/6。$$

沿某一传播方向 λ (X, Y 或 Z), S 波分裂 $(\Delta V_s)_\lambda$ 分别定义为: $(\Delta V_s)_x = V_{s_{xy}} - V_{s_{xz}}$, $(\Delta V_s)_y = V_{s_{yx}} - V_{s_{yz}}$ 和 $(\Delta V_s)_z = V_{s_{zx}} - V_{s_{zy}}$ 。可见各向异性 A 是岩石中最快的 (V_{\max}) 和最慢 (V_{\min}) 波速之间的相对差异, 与波的传播方向无关, 而 S 波分裂反映了样品中某一方向各向异性大小。

因为岩石的本征压力梯度 D 通常很小 ($10^{-4} \sim 6 \times 10^{-4} \text{ km s}^{-1} \text{ MPa}^{-1}$), 对沿 X, Y, Z 三个方向的波速测量, 假设 P_{\max} 是最大的临界压力, 则公式(4)可近似为:

$$A = \frac{V_{01} - V_{02} + (D_1 - D_2)P}{V_{0m} + D_m P} \times 100\% \\ \approx \frac{V_{01} - V_{02}}{V_{0m}} \times 100\% \quad (P \geq P_{\max}) \quad (5)$$

其中下标 1, 2 对应于样品中最快的和最慢波速的方向, m 指样品的平均波速。因此, 各向异性在低压下受孔隙率, 孔隙的几何形状、密度和分布, 成分层和矿物的定向排列等因素的影响, 随压力增加表现出复杂的变化; 而在 P_{\max} 之上, 所有孔隙已关闭, 各向异性只由岩石的组构控制并趋于一常数(图 5)。

2.2 三类榴辉岩的地震波性质

我们在高压下测量了大别-苏鲁造山带, 主要是南苏鲁造山带出露的超高压变质岩的波速, 发现根据颗粒径、退变质程度和波速特征可区分出三类榴辉岩(Wang *et al.*, 2005a, b)。I 类榴辉岩由粗颗粒的石榴石和绿辉石组成, 几乎未经退变质作用, 代表在超高压峰期形成于金刚石稳定区的榴辉岩; II 类榴辉岩主要由细粒石榴石和绿辉石组成, 是折返过程中在石英-柯石英相变边界的温压条件下经过位错蠕变-动态重结晶的榴辉岩, 代表剪切后的榴辉岩; III 类榴辉岩为角闪岩化榴辉岩, 角闪石、绿帘石、云母、绿泥石、石英、斜长石等矿物的含量可超过 30%, 反映了超高压榴辉岩折返到地壳后经历的角闪岩相退变质作用(Ji *et al.*, 2003a)。

图 2 和图 3 分别为苏鲁地区典型的三类榴辉岩的高压 P 波和 S 波速度测量结果, 从 I 类、II 类到 III 类榴辉岩, 波速逐渐降低, 这一变化趋势可由组成矿物的地震波性质解释。如图 6 所示, 石榴石波速很高, 各向异性很低, 近于弹性各向同性体; 而绿辉石的波速略低, 各向异性较大。因此超高压榴辉岩的各向异性主要归因于绿辉石的优先定向(Bascou *et al.*, 2001; Ji *et al.*, 2003a), 随着石榴石含量的减少, 榴辉岩的波速递减(图 7)。由于角闪石、斜长石、云母和石英等退变质矿物的波速远低于石榴石和绿辉石, 角闪岩相退变质作用可显著地降低榴辉岩的波速, 并提高其各向异性。如图 7 所示, 苏鲁白云母榴辉岩 YK98-11(Kern *et al.*, 2002) 和 QL2(Wang *et al.*, 2005a, 2005b) 的 P 波和 S 波速度均显著偏低, 各向异性大于 10%, 与斜长角闪岩相当。总体上, I 类和 II 类榴辉岩的地震波各向异性 $< 5\%$, 但成分层发育和经历了退变质的榴辉岩可表现出较高的各向异性(如图 5 中的 I 类榴辉岩 MB23, III 类榴辉岩 QL2), 因此在解释下地壳和上地幔, 尤其是俯冲带的地震波各向异性和 S 波分裂时, 不应忽略榴辉岩的贡献。

图 8 总结了 600 MPa 和室温条件下 54 块榴辉岩样品的波速和泊松比: $V_p = 8.023 \pm 0.468 \text{ km/s}$, $V_s = 4.567 \pm 0.268 \text{ km/s}$, $V_p/V_s = 1.757 \pm 0.044$, 泊松比 $\sigma = 0.259 \pm 0.018$ 。三类榴辉岩的平均泊松比相差不大, 但从 I 类、II 类到 III 类榴辉岩, 泊松比的标准偏差逐渐加大(图 8b)。因为石榴石的泊松比为 0.265 ~ 0.275(Wang and Ji, 2001), 绿辉石的泊松比为 0.248(Bhagat *et al.*, 1992), 所以新鲜榴辉岩的平均泊松比为 0.26。石英($\sigma = 0.08$)含量的增加会显著降低榴辉岩的泊松比, 而角闪石($\sigma = 0.287$)、斜长石($\sigma \approx 0.29$)和黑云母($\sigma = 0.288$)则会增加榴辉岩的泊松比(Christensen, 1996)。在榴辉岩折返过程中, 石英是常见的

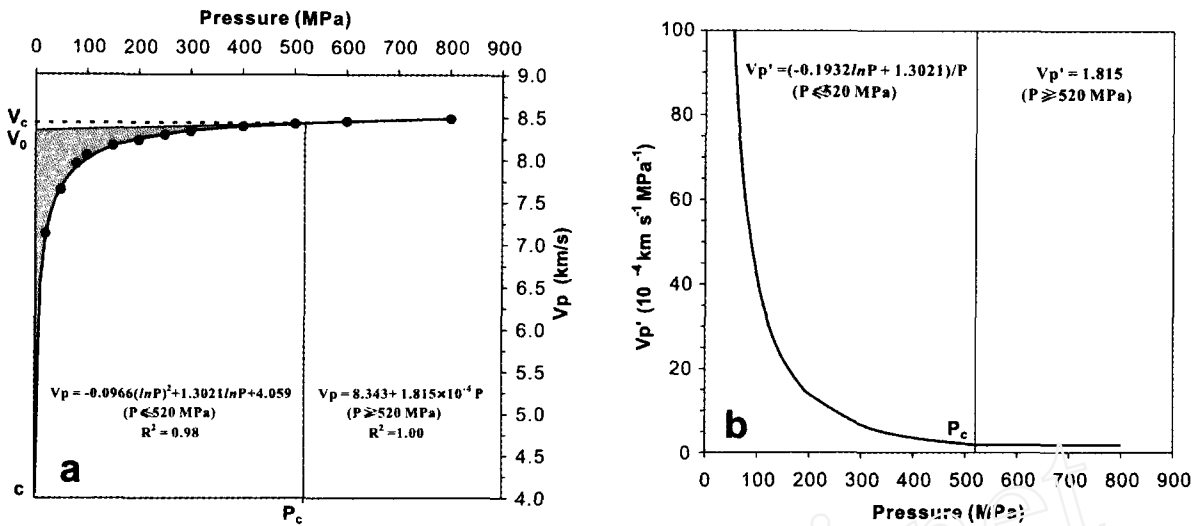


图4 苏鲁毛北榴辉岩 MB23 的 V_p - P 曲线回归和 V_p' 随压力的变化(数据来自 Wang *et al.*, 2005a)
 Fig.4 (a) Regression results of a laboratory-derived V_p - P curve for Sulu eclogite MB23 and (b) pressure derivative (V_p') as a function of pressure (data from Wang *et al.*, 2005a).

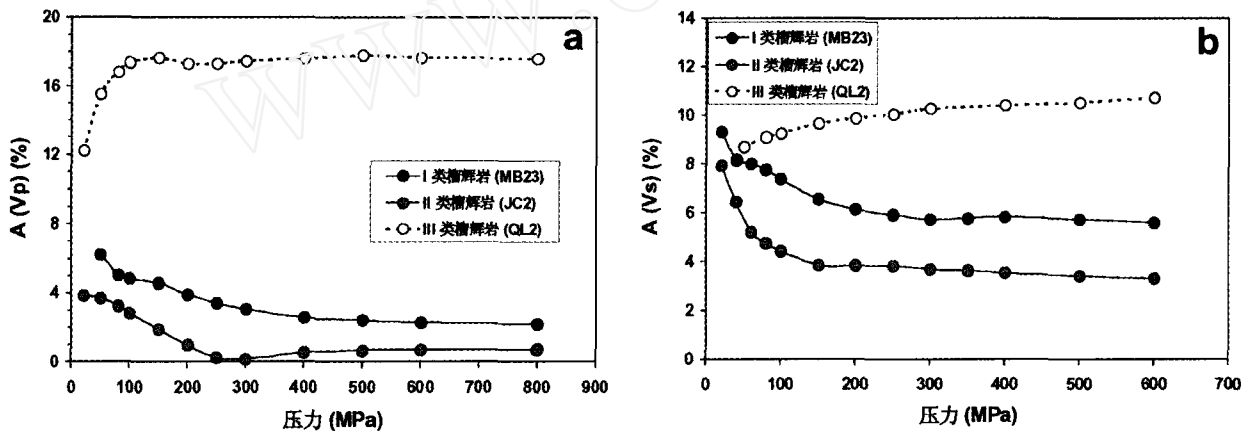


图5 苏鲁超高压带三个典型榴辉岩的 P 波和 S 波各向异性(数据来自 Wang *et al.*, 2005a - b)
 Fig.5 P- and S-wave anisotropy of three typical eclogites from the Sulu UHP terrane (data from Wang *et al.*, 2005a, b)

退变质矿物,一些榴辉岩中甚至出现了石英脉,从而降低了样品的泊松比;但部分低 SiO_2 的退变榴辉岩表现较高的泊松比(图 8b)。

2.3 岩石波速-深度剖面

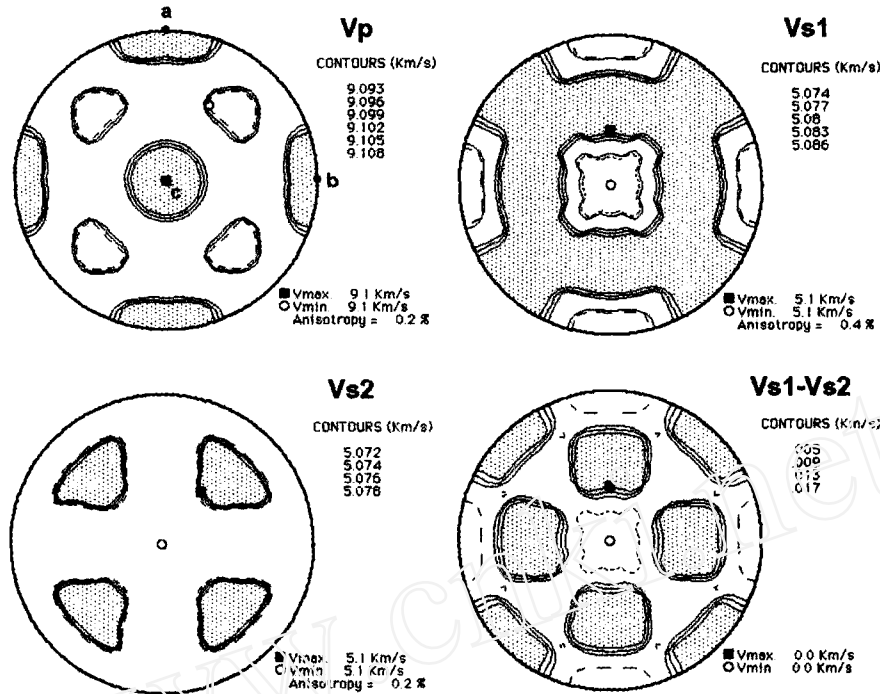
当计算岩石在地下原位波速时,除了考虑正的压力偏导数(dV/dP)外,还要考虑负的温度偏导数(dV/dT)的影响。由公式(1)和(2),岩石波速随深度的变化为:

$$V(z) = \begin{cases} a(\ln P)^2 + b \ln P + c + (dV/dT)T & (P \leq P_c) \\ V_0 + DP + (dV/dT)T & (P \geq P_c) \end{cases} \quad (6)$$

其中 z 是深度, $P = \rho g z$, 假设地壳的平均密度为 2.85 g/cm^3 , 上地幔的平均密度为 3.3 g/cm^3 , 温度随深度的变化采用稳态热传导方程 $\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = -\frac{Ar}{k}$, Ar 是岩石生热率, k 是岩石

热导率。根据干燥样品的高压实验数据 ($P \geq 600 \text{ MPa}$) 以及 600 MPa 下高温波速测量数据(见 Ji *et al.*, 2002 的总结; Wang *et al.*, 2005a, 2005b), 我们总结了三类榴辉岩及其它常见岩石的平均波速-压力关系以及 600 MPa 下弹性波的温度偏导数 dV/dT (表 1)。对于来自火山岩的捕虏体, 由于实验压力不足以完全关闭所有裂隙以及微裂隙内玻璃质的存在, 实验测得的波速通常大大低于理论计算值, 所以统计中没有包括捕虏体的波速数据。变质的泥质岩石可分为两类: 角闪岩相富云母副片麻岩和麻粒岩相富石榴石变质泥岩 (Rudnick and Fountain, 1995)。富石榴石变质泥岩一般具有比较大的密度和波速, SiO_2 含量低于富云母副片麻岩(表 1)。由于目前还没有副片麻岩的高温波速数据, 其 P 波和 S 波速度的温度偏导数暂用变质泥岩的数据。需要注意的是, 当矿物发生相变时, 表 1 中的参数就不适用于估算岩石的原位波速。

(a) 镁铝榴石 Pyrope ($Mg_3Al_2Si_3O_{12}$)



(b) 绿辉石 Omphacite (Di 30 mol%, Jd 58 mol%)

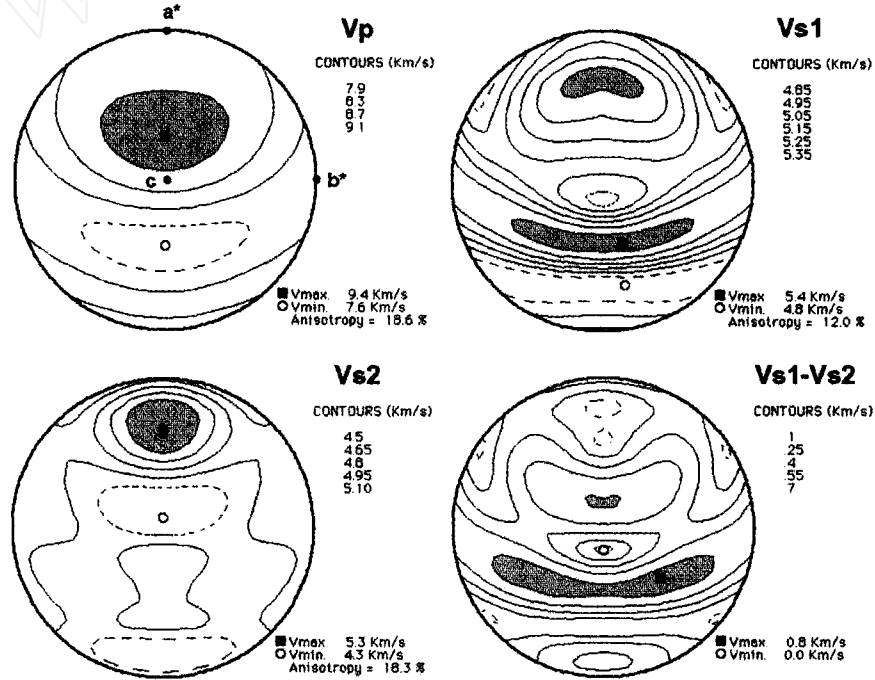


图6 镁铝榴石和绿辉石的 Vp, S波快波 Vs1, S波慢波 Vs2, 以及 S波分裂 (Vs1 - Vs2) 的等面积赤平投影图。

a, b, c 是矿物的三个结晶轴, a* 和 b* 分别垂直于(100) 和(010) 面。

黑色正方形标明矿物中最大波速方向, 空圆圈为最小波速方向, 阴影为高波速区(据 Ji et al., 2002)。

Fig. 6 P- and S-wave properties of (a) pyrope and (b) omphacite. The P-wave velocities (Vp, up-left), the fast S-wave velocities (Vs1, up-right), the slow S-wave velocities (Vs2, low-left), and the shear wave splitting (Vs1-Vs2, low-right) are shown in equal area stereographic projection with respect to the crystallographic orientations of a, b, c, a* and b*, where a* and b* are the directions normal to (100) and (010) planes, respectively. The maximum velocity (in km/s) is marked by a solid square and the minimum by an open circle. Shaded areas correspond to directions of high P- or S-wave velocities. (from Ji et al., 2002)

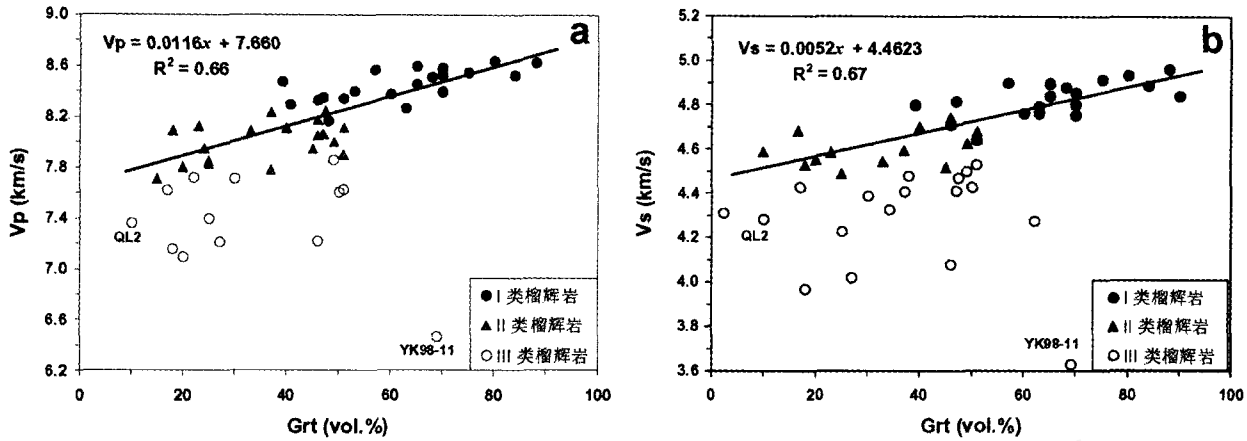


图7 600 MPa 下榴辉岩的 P 波和 S 波波速和石榴石含量的关系

数据来自: Birch (1960), Christensen (1974), Manghnani *et al.*, (1974); Kern and Tubia (1993); Fourtina *et al.* (1994), Kern *et al.* (1999, 2002) and Wang *et al.* (2005a, 2005b)。最小方差回归线显示了 I 类和 II 类榴辉岩的波速与石榴石 (Gr) 含量的相关性。

Fig. 7 P- and S-wave velocities of eclogites at 600 MPa as a function of garnet content. Data from Birch (1960), Christensen (1974), Manghnani *et al.*, (1974); Kern and Tubia (1993); Fourtina *et al.* (1994); Kern *et al.* (1999, 2002) and Wang *et al.* (2005a, 2005b). Solid line is the least squares fit to the correlation between velocity and garnet (Gr) content of Type-1 and Type-2 eclogites.

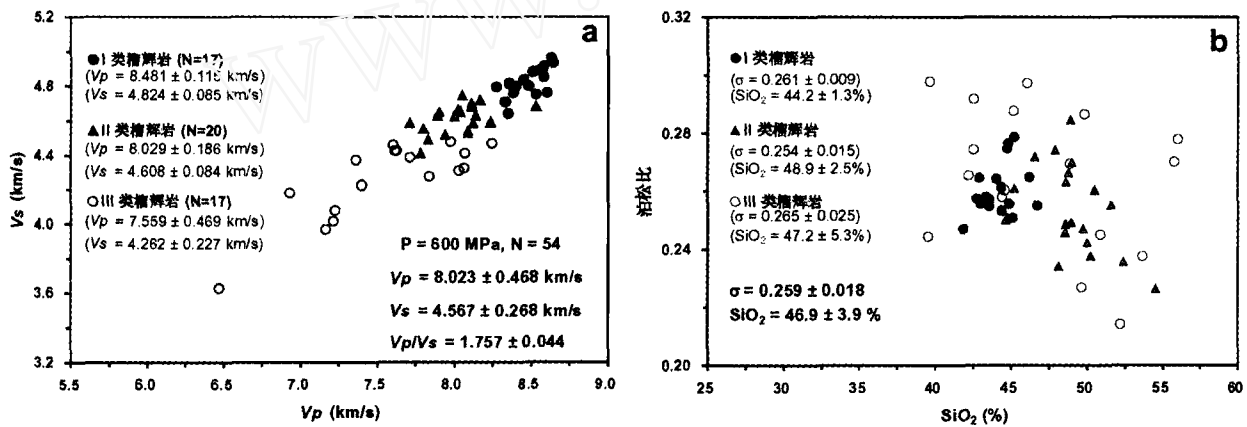


图8 600MPa 下榴辉岩的 Vp、Vs、泊松比和 SiO₂ 含量

数据来自 Manghnani *et al.* (1974), Kern and Richter (1981), Kern and Tubia (1993), Kern *et al.* (1999, 2002), Gao *et al.* (2001), Wang *et al.* (2005a, b)。

Fig. 8 Seismic properties of eclogites: (a) Vp versus Vs at 600 MPa, (b) Poisson's ratio at 600 MPa versus SiO₂ content. Data from Manghnani *et al.* (1974), Kern and Richter (1981), Kern and Tubia (1993), Kern *et al.* (1999, 2002), Gao *et al.* (2001), Wang *et al.* (2005a, b)。

图9 为根据表 1 计算的苏鲁超高压带各主要岩石的波速-深度剖面。结果表明从波速上可以很容易地区分榴辉岩与常见地壳岩石,但是榴辉岩的密度和波速与橄榄岩比较接近,单独根据 P 波或 S 波资料难以区别它们。表 1 中橄榄岩和榴辉岩具有相近的 dV/dP ,但橄榄岩的 dVs/dT 远大于榴辉岩。在上地幔,随着温度的增加,I 类和 II 类榴辉岩的泊松比稳定在 0.24 ~ 0.25,橄榄岩的泊松比为 0.28 ~ 0.29,而蛇纹石化橄榄岩的泊松比可达到 0.3 ~ 0.31,这使得在地震折射剖面中区分上地幔的榴辉岩和橄榄岩成为可能。

3 在地震资料解释中的应用

3.1 地震反射层

地震反射同时受岩石波速和密度的控制,当不同岩性界面的反射系数 R_c (reflection coefficient) 的绝对值大于 0.1 时,岩性界面可以产生强反射 (Warner and McGeary, 1987)。图 10 为 50 MPa 和 600 MPa 下三类榴辉岩及其常见围岩的 V_p - ρ 投影,波速基本上与密度呈线性关系。对榴辉岩而言,

表1 常见岩石的地震波速参数和 SiO₂ 含量

Table 1 Average parameters describing variations of P- and S-wave velocities with pressure and temperature and average silica contents of common lithologies

岩性	ρ (g/cm ³)	SiO ₂ (%)	P_c (MPa)	$V = a(\ln P)^2 + b \ln P + c$			$V = V_0 + DP$		dV/dT (-10 ⁻⁴ km s ⁻¹ °C ⁻¹)
				a (km s ⁻¹ MPa ⁻²)	b (km s ⁻¹ MPa ⁻¹)	c (km s ⁻¹)	V_0 (km s ⁻¹)	D (10 ⁻⁴ km s ⁻¹ MPa ⁻¹)	
P 波波速									
I 类榴辉岩	3.56	44.2	544	-0.0504	0.7603	5.680	8.392	1.455	1.348
II 类榴辉岩	3.46	48.9	567	-0.0172	0.3639	6.403	7.921	1.702	2.553
III 类榴辉岩	3.35	47.2	525	-0.0182	0.4019	5.791	7.444	2.829	2.127
橄榄岩	3.30	41.2	586	-0.0651	0.9317	5.004	8.164	2.431	3.860
蛇纹石化橄榄岩	3.15	41.3	494	-0.0252	0.4612	5.286	7.011	3.439	8.506
基性麻粒岩	3.15	48.2	416	-0.0205	0.4385	5.155	6.907	3.534	3.446
斜长角闪岩	3.01	49.8	399	-0.0563	0.8290	3.889	6.715	3.228	2.011
中性片麻岩	2.84	62.8	387	-0.0329	0.5122	4.585	6.352	2.982	3.160
花岗质片麻岩	2.71	72.9	390	-0.0307	0.4913	4.396	6.118	2.980	2.986
副片麻岩	2.78	65.0	391	-0.0284	0.4572	4.570	6.161	3.333	4.501
变质泥岩	2.95	54.0	314	-0.0176	0.3757	5.065	6.518	3.950	4.501
大理岩	2.85	5.1	398	-0.0608	0.8455	3.947	6.729	2.610	6.471
花岗岩	2.67	72.7	345	-0.0558	0.7222	3.877	6.095	2.873	2.964
S 波波速									
I 类榴辉岩	3.56	44.2	458	-0.0154	0.2651	3.758	4.743	1.341	0.813
II 榴辉岩	3.46	48.9	533	-0.0035	0.1243	3.956	4.521	1.455	1.523
III 类榴辉岩	3.35	47.2	449	-0.0148	0.2527	3.283	4.221	1.209	1.420
橄榄岩	3.30	41.2	589	-0.0312	0.4670	2.953	4.605	1.030	2.463
蛇纹石化橄榄岩	3.15	41.3	401	-0.0081	0.1711	3.042	3.727	1.242	3.529
基性麻粒岩	3.15	48.2	381	-0.0055	0.1531	3.179	3.842	1.338	2.128
斜长角闪岩	3.01	49.8	402	-0.0193	0.3067	2.718	3.810	1.320	2.014
中性片麻岩	2.84	62.8	328	-0.0117	0.2005	2.923	3.652	1.163	1.323
花岗质片麻岩	2.71	72.9	317	-0.0233	0.3291	2.491	3.581	1.067	0.802
副片麻岩	2.78	65.0	377	-0.0143	0.2358	2.816	3.663	1.276	2.235
变质泥岩	2.95	54.0	317	-0.0058	0.1476	3.123	3.733	1.489	2.235
大理岩	2.85	5.1	387	-0.0365	0.4480	2.350	3.702	0.768	4.350
花岗岩	2.67	72.7	278	-0.0213	0.2903	2.698	3.631	1.018	1.423

50 MPa 下, $V_p = 3.209\rho - 3.598$, $R^2 = 0.58$; 600 MPa 下, $V_p = 2.951\rho - 2.187$, $R^2 = 0.66$, V_p 的单位是 km/s, 密度 ρ 的单位是 g/cm³。高压下由于排除了孔隙对波速的影响, 波速与密度的相关性更好。

根据表 1 中的波速参数, 我们计算了在苏鲁地区的温压条件下, 不同岩石界面在 2 km 和 30 km 的反射系数(表 2)。由于榴辉岩, 尤其是 I 类榴辉岩, 具有高密度和高波速, 它们

和花岗质片麻岩、副片麻岩、角闪岩等岩石界面的反射系数都远大于 0.1, 可以产生强反射, 与过中国大陆科学钻探工程 (CCSD) 主孔的地震反射剖面(赵志新等, 2004) 对比良好。同时, I 类榴辉岩与退变质榴辉岩的界面也可产生反射(表 2 的上矩阵)。表 2 的上、下矩阵分别为 2 km 和 30 km 的反射系数, 结果近似, 可见虽然深度的增加可以提高岩石波速, 但对反射系数的影响不大。如果俯冲的陆壳物质以榴辉岩和

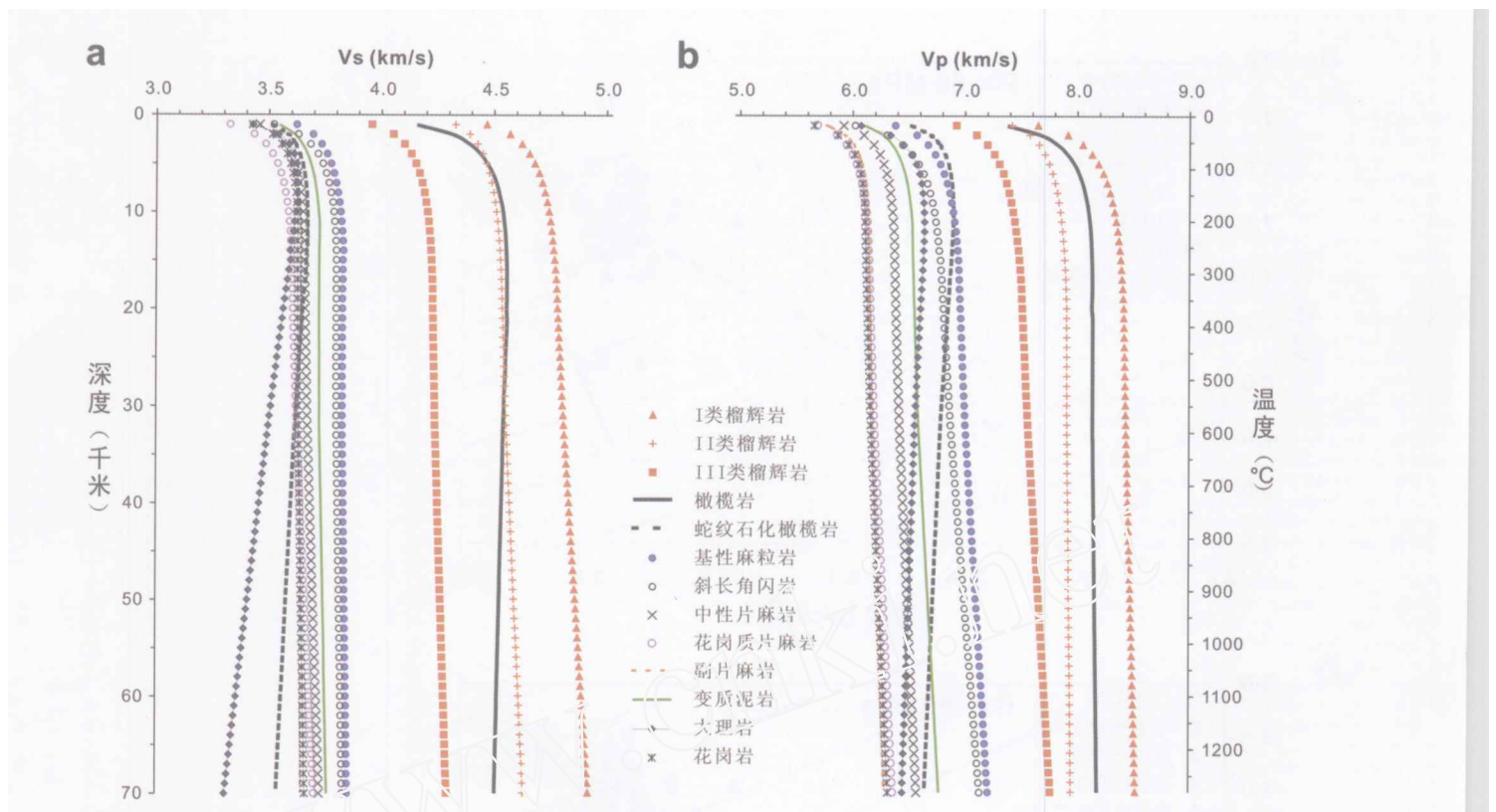


图9 苏鲁地区主要岩石的S波和P波速度随深度的变化

Fig.9 Calculated in situ (a) S-wave velocities and (b) P-wave velocities with depth for major rock types in the Sulu terrane.

表2 苏鲁地体不同岩性界面在2 km和30 km的反射系数

Table 2 Reflection coefficients at possible lithological interfaces in the Sulu terrane at depths of 2 km and 30 km

岩性	I类榴辉岩	II类榴辉岩	橄榄岩	III类榴辉岩	蛇纹石化橄榄岩	基性麻粒岩	斜长角闪岩	变质泥岩	大理岩	中性片麻岩	副片麻岩	花岗质片麻岩	花岗岩
I类榴辉岩		0.04	0.05	0.08	0.14	0.15	0.20	0.21	0.22	0.24	0.26	0.28	0.29
II类榴辉岩	(0.05)		0.02	0.05	0.11	0.12	0.16	0.17	0.19	0.20	0.23	0.24	0.25
橄榄岩	(0.06)	(0.01)		0.03	0.09	0.10	0.14	0.16	0.17	0.19	0.21	0.23	0.24
III类榴辉岩	(0.09)	(0.04)	(0.03)		0.06	0.07	0.11	0.13	0.14	0.16	0.18	0.20	0.21
蛇纹石化橄榄岩	(0.17)	(0.12)	(0.11)	(0.08)		0.01	0.05	0.07	0.08	0.10	0.12	0.14	0.15
基性麻粒岩	(0.15)	(0.11)	(0.10)	(0.07)	0.01		0.04	0.06	0.07	0.09	0.11	0.13	0.14
斜长角闪岩	(0.18)	(0.14)	(0.13)	(0.10)	(0.02)	(0.03)		0.01	0.03	0.05	0.07	0.09	0.10
变质泥岩	(0.21)	(0.17)	(0.16)	(0.13)	(0.05)	(0.06)	(0.03)		0.01	0.03	0.06	0.08	0.08
大理岩	(0.23)	(0.19)	(0.18)	(0.15)	(0.07)	(0.08)	(0.05)	(0.02)		0.02	0.04	0.06	0.07
中性片麻岩	(0.24)	(0.20)	(0.19)	(0.16)	(0.08)	(0.10)	(0.06)	(0.03)	(0.01)		0.02	0.04	0.05
副片麻岩	(0.27)	(0.23)	(0.22)	(0.19)	(0.11)	(0.12)	(0.09)	(0.06)	(0.04)	(0.03)		0.02	0.03
花岗质片麻岩	(0.28)	(0.24)	(0.23)	(0.20)	(0.12)	(0.14)	(0.10)	(0.07)	(0.05)	(0.04)	(0.01)		0.01
花岗岩	(0.29)	(0.25)	(0.24)	(0.21)	(0.13)	(0.15)	(0.11)	(0.08)	(0.06)	(0.05)	(0.02)	(0.01)	

注：反射系数(Rc)根据岩石的平均密度和2 km(上矩阵)和30 km(下矩阵)下的波速计算，

加黑的数值表明 Rc > 0.1, 岩性界面可以产生强反射。

Rc derived from average densities at ambient conditions and velocities at 2 km (the upper matrix) and 30 km (the lower matrix), respectively.

The bold numbers refer to possible lithologic interfaces that may generate strong seismic reflections.

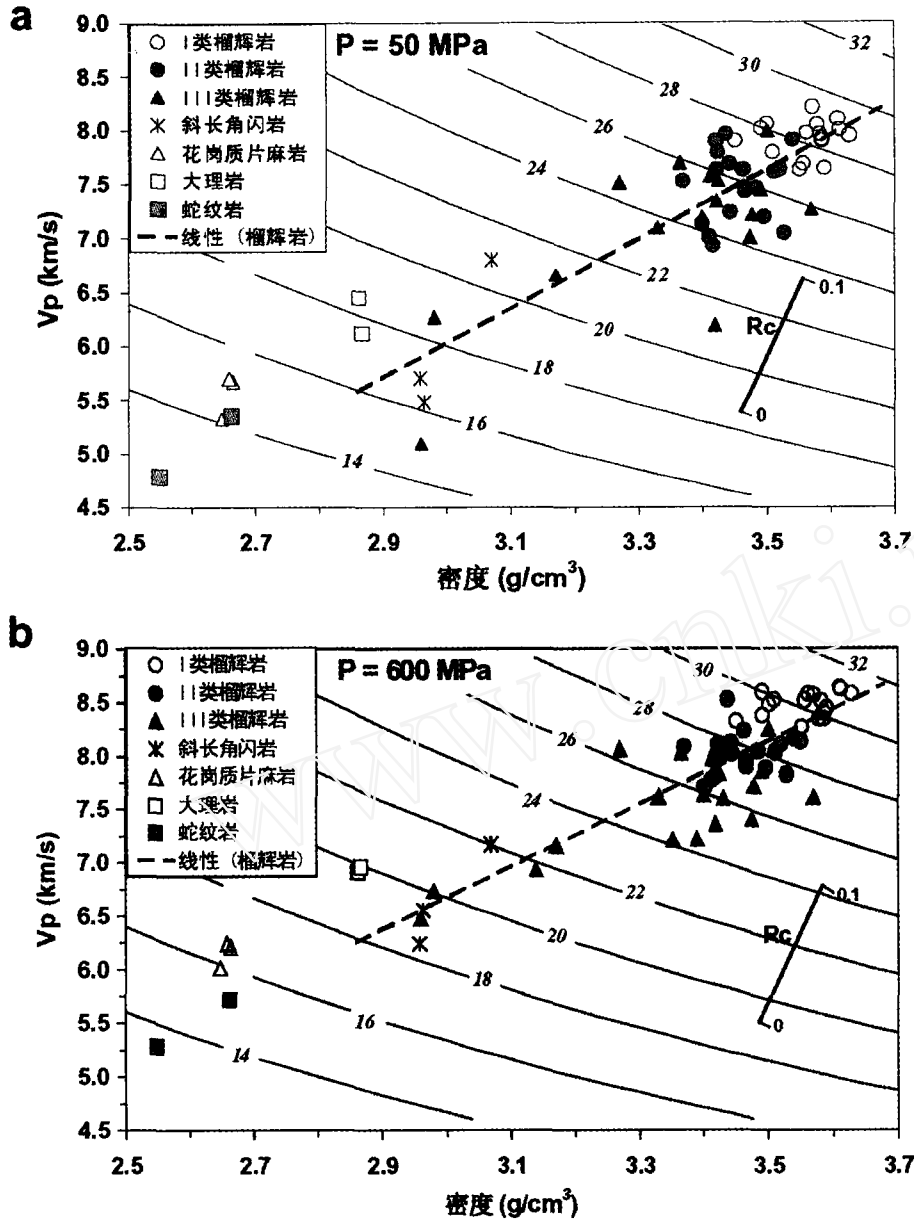


图 10 榴辉岩与围岩的密度与 50 MPa 和 600 MPa 下 P 波速度的投影

虚线为所有榴辉岩样品的波速与密度的最小方差回归,实线为波阻抗等值线,数据来源同图 8.

Fig. 10 Densities of eclogites and country rocks versus P-wave velocities at (a) 50 = MPa and (b) 600 = MPa.

Solid line is for V_p - ρ relationship of all eclogite samples. Also shown are lines of constant acoustic impedance and a floating reflection coefficient (Rc) scale. References are the same as in Fig. 8.

长英质片麻岩、石榴石-硬玉石英岩、大理岩、蛇纹石化橄榄岩互层的形式在上地幔保留下来,就可能在造山带的上地幔产生地震反射。例如在大别-苏鲁造山带观测到的上地幔反射(Yang, 2002, 2003),在加拿大 Abitibi - Opatca 造山带(Calvert *et al.*, 1995)和 Northwest Territories 地区(Cook *et al.*, 1999)的上地幔反射可能就是俯冲后残留在上地幔的地壳物质。

3.2 苏鲁超高压变质带的地壳成分

将波速和泊松比结合起来有助于减少地震资料的多解性,杨文采等(2004)给出了苏鲁超高压带地壳的 P 波速度和泊松比,为建立更可靠的地壳物质结构模型提供了依据。为确定榴辉岩是否是现今深部地壳的主要组成岩石,我们使用了含榴辉岩(模型 1)和不含榴辉岩(模型 2)的两种岩石组合反演地壳的物质组成,然后由各岩石的密度和 SiO₂ 含量

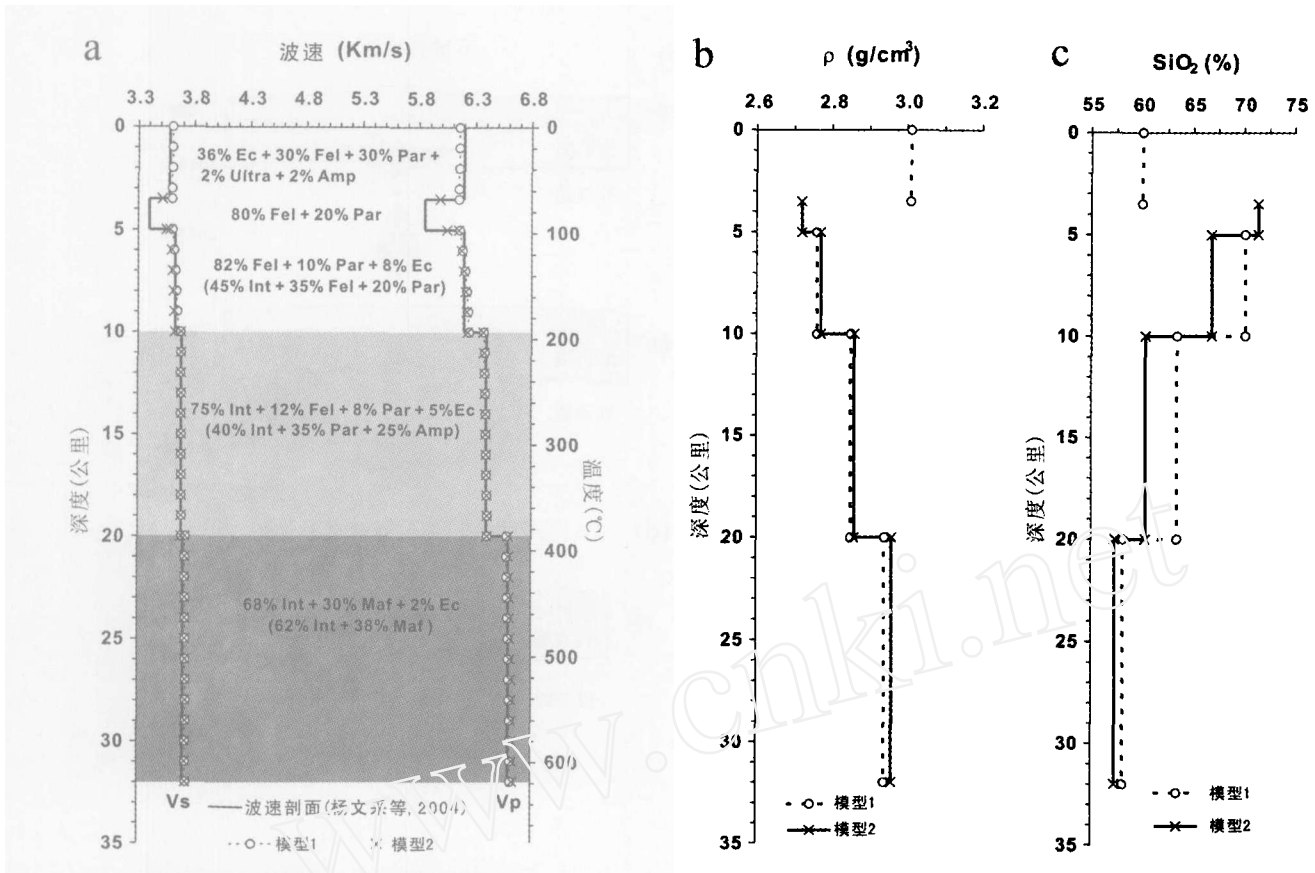


图 11 苏鲁超高压变质带的地壳成分模型

(a) CCSD 主孔下含榴辉岩(模型 1)和不含榴辉岩(模型 2)的地壳成分模型; (b) 模型 1 和模型 2 的密度随深度的变化; (c) 模型 1 和模型 2 的 SiO₂ 含量随深度的变化. Amp: 斜长角闪岩; Ec: 榴辉岩(30% I 类榴辉岩 + 30% II 类榴辉岩 + 40% III 类榴辉岩); Fel: 花岗质片麻岩; Par: 副片麻岩; Int: 中性片麻岩; Maf: 基性麻粒岩; Ultra: 超基性岩.

Fig. 11 (a) Inferred crustal composition beneath the CCSD main hole assuming an eclogite-bearing model (Model 1) and an eclogite-free model (Model 2); (b) Density variation with depth and (c) SiO₂ content with depth, calculated using Model 1 and Model 2. Lithology abbreviations: Amp: amphibolite; Ec: a mixture of 30% Type-1, 30% Type-2 and 40% Type-3 eclogites; Fel: granitic gneiss; Par: paragneiss; Int: intermediate gneiss; Maf: mafic granulite; Ultra: ultramafic rocks.

(表 1) 估算地壳各层的平均密度和 SiO₂ 含量。根据地表露头 and 钻孔资料(许志琴, 2004), 将 30% 的 I 类榴辉岩, 30% 的 II 类榴辉岩和 40% 的 III 类榴辉岩的复合体作为在地壳中折返的榴辉岩来参与计算。与其它平均方法相比, 几何平均在估算多相体系的成分时误差较小(Ji *et al.*, 2003b), 使用该方法得到的岩石体积百分比的误差小于 3%。

图 11 是根据 CCSD 孔区的波速剖面(杨文采等, 2004) 反演的地壳成分模型。在沉积盖层之下, V_p > 6.05 km/s 的高速带已由 CCSD 证实由超高压榴辉岩和退变质榴辉岩(36%), 副片麻岩(30%), 花岗质片麻岩(30%) 以及少量蛇纹石化橄榄岩(2%) 和斜长角闪岩(2%) 组成。这一超高压岩片的平均密度为 3.01 g/cm³, 对应于 CCSD 孔区的观测到的布格重力异常(Yang, 2002)。高速带下盘为一强反射层, 波速较低(V_p = 5.80 ~ 5.85 km/s), 可能是超高压岩片折返时的韧性剪切带, 由大约 80% 花岗质片麻岩和 20% 副片麻岩组成, 平均密度 2.72 g/cm³。在 3.5 ~ 5 km 计算的波

速明显高于观测值, 说明该剪切带比较破碎, 裂隙比较发育。上地壳 5 ~ 10 km 的波速特征可由 82% 花岗质片麻岩, 10% 中性片麻岩和 8% 榴辉岩(模型 1), 或 45% 花岗质片麻岩和 20% 副片麻岩(模型 2) 拟和。两个模型都给出 2.76 ~ 2.77 g/cm³ 的密度值, 而含榴辉岩的模型 1 给出的 SiO₂ 含量为 70%, 略高于模型 2 的 67%。

苏鲁超高压带 10 ~ 22 km 表现为正常的中地壳波速和泊松比, 可能由 40% 中性片麻岩, 27% 斜长角闪岩, 18% 花岗质片麻岩和 15% 副片麻岩组成(模型 2)。如果含榴辉岩, 则中性片麻岩可占 70 ~ 80%, 另有 12% 左右的花岗质片麻岩, 8% 副片麻岩和 5% 榴辉岩。二种岩石组合的平均密度都为 2.85 g/cm³, 但模型 1(SiO₂ = 63%) 比模型 2(SiO₂ = 61%) 略偏酸性一些。

苏鲁超高压带的下地壳(22 ~ 32 km) 波速较低, 温度较高, 由 68% 中性片麻岩/麻粒岩, 30% 基性麻粒岩和 2% 榴辉岩组成的模型 1, 与由 62% 中性片麻岩/麻粒岩和 38% 基性

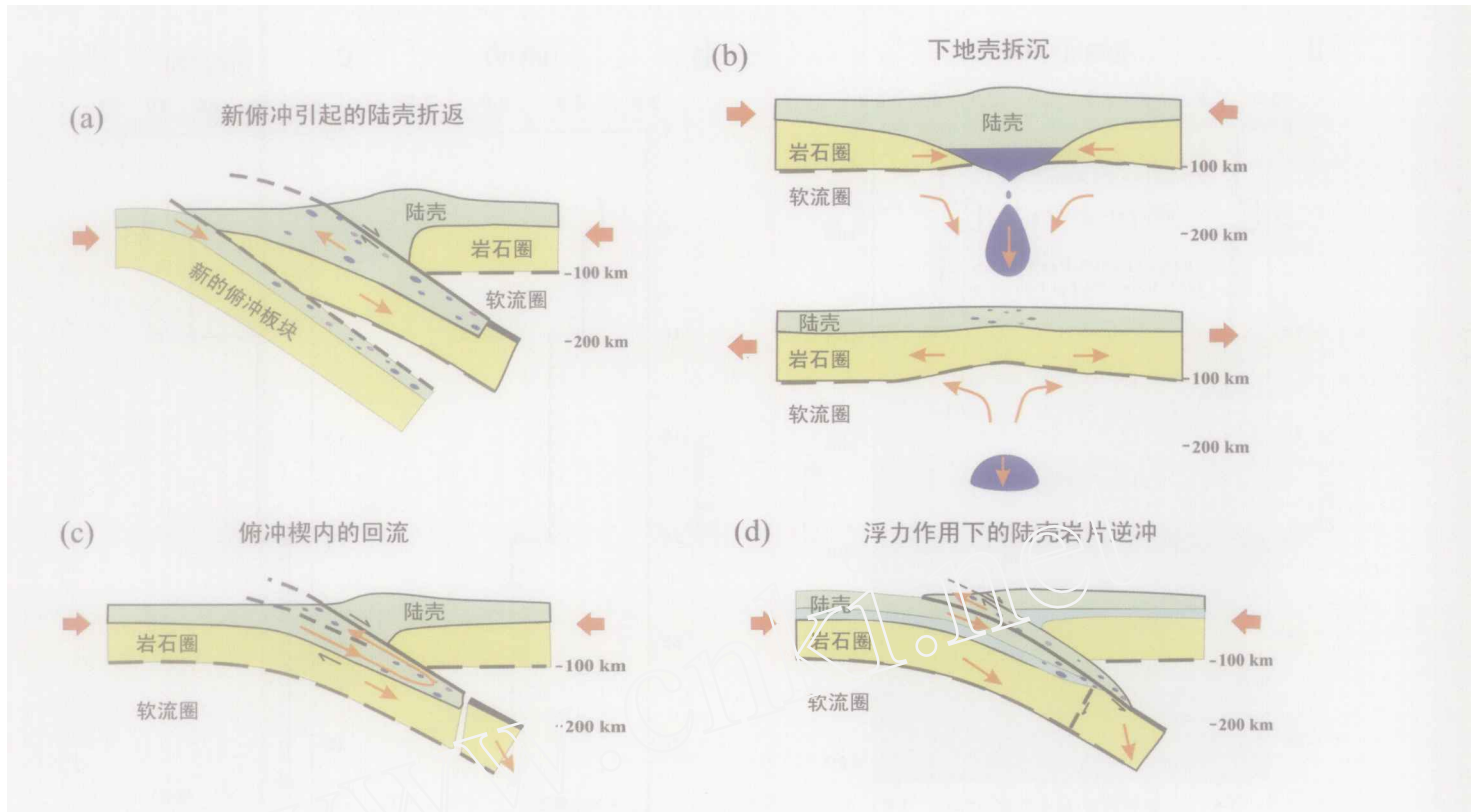


图 12 陆壳物质俯冲和折返模式示意图

Fig. 12 Schematic representation of four exhumation models. (a) New subduction-triggered exhumation; (b) Lower crustal delamination (Kay and Kay, 1991; Kern *et al.*, 1999); (c) Forced flow in a subduction channel (e. g., Cloos, 1982; Gerya and Stöckhert, 2002); (d) Buoyancy-driven exhumation of upper crustal slices (e. g., Chemenda *et al.*, 1995; Ernst and Peacock, 1996).

麻粒岩组成的模型 2 都可满足 CCSD 孔区下地壳的波速特征,得到的平均密度是 $2.94 \sim 2.96 \text{ g/cm}^3$, SiO_2 含量为 $57 \sim 58\%$ 。考虑到反演时的计算误差,而且研究区的新生代火山岩捕虏体内没有发现榴辉岩(杨文采等,2004),我们认为不含榴辉岩的模型 2 更符合苏鲁超高压带中-下地壳的岩石组成。

4 讨论

对俯冲带超高压变质岩的折返已有多种解释(图 12)。

(1) 新俯冲模式:在俯冲板块的后方产生一新的俯冲带,持续的挤压作用将早期俯冲到上地幔深度的陆壳物质挤出(图 12a)。对大别-苏鲁造山带含柯石英锆石的 U-Pb 定年揭示该地区曾发生了多期板块俯冲事件(杨经绥等,2003),这一模式可能可以解释早古生代超高压变质岩的折返,却无法解释印支期超高压变质岩快速俯冲与折返的历史(Li *et al.*, 1999; Zheng *et al.*, 2003; 刘福来等,2004),而且目前还没有确切的地球物理资料证明本地区存在双俯冲带。

(2) 下地壳拆沉模式(Kay and Kay, 1991):陆陆碰撞导致地壳增厚并使下地壳的基性岩榴辉岩化,在重力作用下高

密度高强度的榴辉岩从低强度的塑性下地壳拆沉,引起岩石圈减薄和地壳伸展,使残余的榴辉岩出露地表(图 12b)。Gao *et al.* (1998)和 Kern *et al.* (1999)认为大别-苏鲁造山带下地壳的榴辉岩已拆沉到上地幔,导致中性的下地壳。但是,图 11b 表明折返的含榴辉岩的超高压变质岩体(模型 1)可以和不含榴辉岩的正常地壳(模型 2)达到重力平衡,如果地表已出露了榴辉岩,那么新的板块俯冲或下地壳拆沉引起的折返作用会使榴辉岩在深部地壳内也有一定的分布,这与我们反演的地壳成分模型不一致。

(3) 管道流(channel flow)模式(Cloos, 1982; Gerya and Stöckhert, 2002):地壳沿一楔形通道俯冲,随着通道向下变窄,上下边界层对通道内物质的挤压应力逐渐加大,产生回流,将俯冲物质挤出(图 12c)。

(4) 浮力模式(Chemenda *et al.*, 1995; Ernst and Peacock, 1996):俯冲板块由高强度的上地壳、低强度的塑性下地壳和高强度的岩石圈上地幔组成,随着俯冲深度的增加,当压力超过上地壳的屈服强度时会在地壳内产生断裂,从而使低密度的陆壳物质在浮力的作用下沿断裂逆冲折返(图 12d)。无论是回流还是浮力引起的折返,俯冲的陆壳物质最后都逆冲在没有经过超高压变质作用的下地壳之上,也就是说,榴辉岩只分布在地壳浅部,与图 11a 揭示的苏鲁造

山带的榴辉岩分布一致,也符合根据区域地质构造、岩石学和年代学研究得到的苏鲁超高压带折返模型(Faure *et al.*, 2003; 许志琴等, 2003)。

因此,榴辉岩在现今造山带浅部富集、深部缺乏这一结果表明苏鲁超高压带由从深部折返的扬子陆壳岩片构成,中性下地壳的形成可能与下地壳折沉作用无关。在同碰撞折返过程中,含榴辉岩的超高压变质岩沿着一系列扬子板块和华北板块间的剪切带逆冲到正常的中-下地壳之上。

5 结论

榴辉岩的地震波性质与其显微组构及变质历史有关,角闪岩相退变质作用会显著降低榴辉岩的波速并提高其各向异性。研究折返过程中的退变质作用对榴辉岩地震波性质的影响有助于更好地解释超高压变质带的地震波速、各向异性和反射层。由于榴辉岩具有高密度和高波速,它们和围岩的界面是大别-苏鲁超高压变质带地震反射层的主要来源。根据地震折射剖面反演得到的CCSD孔区地壳成分模型表明:榴辉岩集中分布在地壳浅部,苏鲁超高压带由含榴辉岩的超高压变质岩片沿着一系列剪切带逆冲到正常的中-下地壳之上,折返过程与下地壳折沉作用无关。

References

- Bascou J, Barruol G, Vauchez A, Mainprice D, Egydio-Silva M. 2001. EBSD-measured lattice-preferred orientations and seismic properties of eclogites. *Tectonophysics*, 342: 61 - 80
- Bhagat S, Bass JD, Smyth J. 1992. Single-crystal elastic properties of omphacite-C2/c by Brillouin spectroscopy. *J. Geophys. Res.*, 97: 6843 - 6848
- Birch F. 1960. The velocity of compressional waves in rocks to 10 kilobar, Part I. *J. Geophys. Res.*, 65: 1083 - 1102
- Calvert AJ, Sawyer EW, Davis WJ, Ludden JN. 1995. Archean subduction inferred from seismic images of a mantle suture in the Superior Province. *Nature*, 375: 670 - 674
- Chemenda AI, Mattauer M, Malavieille J, Bokun AN. 1995. A mechanism for syn-collisional deep rock exhumation and associated normal faulting: results from physical modeling. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 132: 225 - 232
- Christensen NI. 1974. Compressional wave velocities in possible mantle rocks to pressures of 30 kilobars. *J. Geophys. Res.*, 79: 407 - 412
- Christensen NI. 1996. Poisson's ratio and crustal seismology. *J. Geophys. Res.*, 101: 3139 - 3156
- Christensen NI, Mooney WD. 1995. Seismic velocity structure and composition of the continental crust: a global view. *J. Geophys. Res.*, 100: 9761 - 9788
- Christensen NI, Ramanantoandro R. 1971. Elastic moduli and anisotropy of dunite to 10 kilobars. *J. Geophys. Res.*, 76: 4003 - 4010
- Cloos M. 1982. Flow mélange: numerical modeling and geologic constraints on their origin in the Franciscan subduction complex, California. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 93: 330 - 345
- Cook FA, van der Velden AJ, Hall KW. 1999. Frozen subduction in Canada's Northwest Territories: Lithoprobe deep lithospheric reflection profiling of the western Canadian Shield. *Tectonics*, 18: 1 - 24
- Crosson RS, Lin JW. 1971. Voigt and Reuss prediction of anisotropic elasticity of dunite. *J. Geophys. Res.*, 76: 570 - 578
- Ernst WG, Peacock SM. 1996. A thermotectonic model for preservation of ultrahigh-pressure phases in metamorphosed continental crust. In: *Subduction top to bottom. Geophysical Monograph*. 96, AGU, Washington, pp. 171 - 178
- Faure M, Lin W, Moni P, Le Breton N, Poussineau S, Panis D, Etienne D. 2003. Exhumation tectonics of the ultrahigh-pressure metamorphic rocks in the Qinling orogen in East China: new petrological-structural-radiometric insights from the Shandong Peninsula. *Tectonics*, 22: 1018, doi: 10.1029/2002TC001450
- Fountain DM, Boundy TM, Austrheim H, Rey P. 1994. Eclogite-facies shear zones - deep crustal reflectors? *Tectonophysics*, 232: 411 - 424
- Fountain DM, Christensen NI. 1989. Composition of the continental crust and upper mantle: A review. *Memoir -Geological Society of America*, 172: 711 - 742
- Gao S, Kern H, Jin ZM, Popp T, Jin SY, Zhang H, Zhang B. 2001. Poisson's ratio of eclogite: the role of retrogression. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 192: 523 - 531
- Gao S, Zhang BR, Jin ZM, Kern H, Luo TC, Zhao ZD. 1998. How mafic is the lower continental crust? *Earth Planet. Sci. Lett.*, 161: 101 - 117
- Gerya TV, Stöckhert B. 2002. Exhumation rates of high pressure metamorphic rocks in subduction channels: the effect of rheology. *Geophys. Res. Lett.*, 29; doi:10.1029/2001GL014307
- Ji SC, Mainprice D. 1988. Natural deformation fabrics of plagioclase: implications for slip systems and seismic anisotropy. *Tectonophysics*, 147: 145 - 163
- Ji SC, Saruwatari K, Mainprice D, Wirth R, Xu ZQ, Xia B. 2003a. Microstructures, petrofabrics and seismic properties of ultrahigh-pressure eclogites from the Sulu region, China: Implications for rheology of subducted continental crust and origin of mantle reflections. *Tectonophysics*, 370: 49 - 76
- Ji SC, Wang Q, Xia B. 2002. Handbook of Seismic Properties of Minerals, Rocks and Ores. Montreal: Polytechnic International Press. 630 p
- Ji SC, Wang Q, Xia B. 2003b. P-wave velocities of polymineralic rocks: comparison of theory and experiment and test of elastic mixture rules. *Tectonophysics*, 366: 165 - 185
- Kay RW, Kay SM. 1991. Creation and destruction of lower continental crust. *Geol. Rundsch.*, 80: 259 - 278
- Kern H. 1982. P- and S-wave velocities in crustal and mantle rocks under the simultaneous action of high confining pressure and high temperature and the effect of the rock microstructure. In: *High-Pressure Research in Geosciences*. Schreyer, W. (Ed.). Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, pp. 15 - 45
- Kern H, Gao S, Jin Z, Popp T, Jin S. 1999. Petrophysical studies on rocks from the Dabie ultrahigh-pressure (UHP) metamorphic belt, central China; implications for the composition and delamination of the lower crust. *Tectonophysics*, 301: 191 - 216
- Kern H, Jin Z, Gao S, Popp T, Xu ZQ. 2002. Physical properties of ultrahigh-pressure metamorphic rocks from the Sulu terrain, eastern central China; implications for the seismic structure at the Donghai (CCSD) drilling site. *Tectonophysics*, 354: 315 - 330
- Kern H, Richter A. 1981. Temperature derivatives of compressional and shear wave velocities in crustal and mantle rocks at 6 kbar confining pressure. *J. Geophys.*, 49: 47 - 56
- Kern H, Tubia JM. 1993. Pressure and temperature dependence of P- and S-wave velocities, seismic anisotropy and density of sheared rocks from Sierra Alpujata massif (Ronda peridotites, southern Spain). *Earth Planet. Sci. Lett.*, 119: 191 - 205
- Li SG, Jagoutz E, Lo CH, Chen YZ, Li QL, Xiao YL. 1999. Sm/Nd, Rb/Sr, and ⁴⁰Ar/³⁹Ar isotopic systematics of the ultrahigh-pressure metamorphic rocks in the Dabie-Sulu Belt, central China: a retrospective view. *Int. Geol. Rev.*, 41: 1114 - 1124
- Liou JG, Zhang RY, Ernst WG, Rumble D, Shigenori M. 1998. High-pressure minerals from deeply subducted metamorphic rocks. In

- Ultra-high-pressure mineralogy; physics and chemistry of the Earth's deep interior. Reviews in Mineralogy. Hemley, R. J. (Ed.). Washington, D. C.: Mineralogical Society of America. 37, pp. 33-96
- Liu FL, Xu ZQ, Katayama I, Yang JS, Maruyama S, Liou JG. 2001. Mineral inclusions in zircons of para- and orthogneiss from pre-pilot drillhole CCSD-PP1, Chinese Continental Scientific Drilling project. *Lithos*, 59: 199-215
- Liu FL, Xu ZQ, Yang JS, Zhang ZM, Xue HM, Li TF. 2004. Geochemical characteristics and UHP metamorphism of granitic gneisses in the main drilling hole of Chinese Continental Scientific Drilling Project and its adjacent area. *Acta Petrologica Sinica*, 20: 9-26 (in Chinese with English abstract)
- Mainprice D, Humbert M. 1994. Methods of calculating petrophysical properties from lattice preferred orientation data. *Surveys in Geophysics*, 15: 575-592
- Manghni MH, Ramanantoandro R, Clark SP. 1974. Compressional and shear wave velocities in granulite facies rocks and eclogites to 10 kilobars. *J. Geophys. Res.*, 79: 5427-5445
- Mauler A, Burlini L, Kunze K, Philippot P, Burg JP. 2000. P-wave anisotropy in eclogites and relationship to the omphacite crystallographic fabric. *Physics Chem. Earth*, A25: 119-126
- Rao M, Ramana YV, Gogte BS. 1974. Dependence of compressional velocity on the mineral chemistry of eclogites. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 23: 15-20
- Rudnick RL, Fountain DM. 1995. Nature and composition of the continental crust: A lower crustal perspective. *Rev. Geophys.*, 33: 267-309
- Wang Q, Ji SC, Salisbury M, Pan M, Xia B, Xu ZQ. 2005a. Pressure dependence and anisotropy of P-wave velocities in ultrahigh-pressure metamorphic rocks from the Dabie-Sulu orogenic belt (China): implications for seismic properties of subducted slabs and origin of mantle reflections. *Tectonophysics*, 398: 67-99
- Wang Q, Ji SC, Salisbury M, Xia B, Pan M, Xu ZQ. 2005b. Shear wave properties and Poisson's ratios of ultrahigh-pressure metamorphic rocks from the Dabie-Sulu orogenic belt, China: implications for the crustal composition. *J. Geophys. Res.*, in press
- Wang XM, Liou JG. 1991. Regional ultrahigh-pressure coesite-bearing eclogite terrane in central China: evidence from country rocks, gneiss, marble and metapelite. *Geology*, 19: 933-936
- Wang XM, Liou JG, Mao HK. 1989. Coesite-bearing eclogites from the Dabie Mountains in central China. *Geology*, 17: 1085-1088
- Wang ZC, Ji SC. 2001. Elasticity of six polycrystalline silicate garnets at pressure up to 3.0 GPa. *Amer. Mineral.*, 86: 1209-1218
- Warner M, McGeary S. 1987. Seismic reflection coefficients from mantle fault zones. *Geophys. J. Royal Astro. Soc.*, 89: 223-230
- Xu ST, Okay AI, Ji S, Sengor AMC, Su W, Liu Y, Jiang L. 1992. Diamond from the Dabie Shan metamorphic rocks and its implication for tectonic setting. *Science*, 256(5053): 80-82
- Xu ZQ. 2004. The scientific goals and investigation progresses of the Chinese Continental Drilling Project. *Acta Petrologica Sinica*, 20: 1-8 (in Chinese with English abstract)
- Xu ZQ, Zhang ZM, Liu FL, Yang JS, Li HB, Yang TN, Qiu HJ, Li TF, Meng FC, Chen SZ, Tang ZM, Chen FY. 2003. Exhumation structure and mechanism of the Sulu ultrahigh-pressure metamorphic belt, central China. *Acta Geologica Sinica*, 77: 433-450 (in Chinese with English abstract)
- Yang JS, Liu FL, Wu CL, Wan YS, Zhang JX, Shi RD, Chen SY. 2003. Two ultrahigh pressure metamorphic events recognized in the central orogenic belt of China: evidence from the U-Pb dating of coesite-bearing zircons. *Acta Geologica Sinica*, 77: 463-477 (in Chinese with English abstract)
- Yang WC. 2002. Geophysical profiling across the Sulu ultra-high-pressure metamorphic belt, eastern China. *Tectonophysics*, 354: 277-288
- Yang WC. 2003. Flat mantle reflectors in eastern China: possible evidence of lithospheric thinning. *Tectonophysics*, 369: 219-230
- Yang WC, Yang WY, Jin ZM, Cheng ZY. 2004. Lithospheric seismic fabrics of Sulu ultrahigh-pressure metamorphic belt. *Science in China (Ser. D)*, 34: 307-319 (in Chinese with English abstract)
- Zhao ZX, Xu JR, Yang WC, Cheng ZY. 2004. Simulations of reflection seismic profile of borehole area of Chinese Continental Scientific Drilling site. *Acta Petrologica Sinica*, 20: 139-148 (in Chinese with English abstract)
- Zhang YF, Fu B, Gong B, Li L. 2003. Stable isotope geochemistry of ultrahigh pressure metamorphic rocks from the Dabie-Sulu orogen in China. Implications for geodynamics and fluid regime. *Earth Sci. Rev.*, 62: 105-161

附中文参考文献

- 刘福来, 许志琴, 杨经绥, 张泽明, 薛怀民, 李天福. 2004. 中国大陆科学钻探工程主孔及周边地区花岗质片麻岩的地球化学性质和超高压变质作用标志的识别. *岩石学报*, 20(1): 9-26
- 许志琴, 张泽明, 刘福来, 杨经绥, 李海兵, 杨天南, 邱海峻, 李天福, 孟繁聪, 陈世忠, 唐哲民, 陈方远. 2003. 苏鲁高压-超高压变质带的折返构造及折返机制. *地质学报*, 77(4): 432-450
- 许志琴. 2004. 中国大陆科学钻探工程的科学目标及初步成果. *岩石学报*, 20(1): 1-8
- 杨经绥, 刘福来, 吴才来, 万渝生, 史仁灯, 陈松永. 2003. 中央碰撞造山带中两期超高压变质作用: 来自含柯石英锆石的定年证据. *地质学报*, 77(4): 463-477
- 杨文采, 杨午阳, 金振民, 程振炎. 2004. 苏鲁超高压变质带岩石圈的地震结构. *中国科学(D)*, 34(4): 307-319
- 赵志新, 徐纪人, 杨文采, 程振炎. 2004. 中国大陆科学钻探孔区反射地震剖面的数值模拟与分析. *岩石学报*, 20(1): 139-148