

## 中国东部下地壳是中性的吗?

王纪庆, 汪 洋

(中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083)

**摘 要:**采用 Li 等和 Gao 等归纳的中国东部主要构造单元地壳速度结构研究中国东部下地壳组分特征。对下地壳的岩性推测通过两个方面展开:①通过实测地壳 P 波波速与 Christensen 等实测的不同岩性 P 波波速进行对比;②采用 Hasterok 等提出的 P 波波速-密度转换方法,将下地壳速度结构转化为密度结构,并采用 Monte Carlo 法对密度的误差进行估算。结果表明:中国东部各构造单元下地壳 P 波波速与基性岩类相当,绝大多数构造单元下地壳密度大于  $3\ 000\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,该密度范围对应的岩性是基性岩类。因此,中国东部下地壳是基性的。

**关键词:**下地壳;地震波速;密度;基性岩;岩石物理;岩性;华北;中国东部

**中图分类号:**P313.3 **文献标志码:**A

## Is There an Intermediate Lower Crust Beneath the Eastern China?

WANG Ji-qing, WANG Yang

(School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Based on crustal velocities of the main tectonic units in the eastern China summarized by Li *et al.* and Gao *et al.*, the lower crustal composition beneath the eastern China was discussed. Predictions of the lower crustal composition have two aspects: comparing the observed P-wave velocities between the crust and the various rocks measured by Christensen *et al.*; transferring the lower crustal velocity model to density model, according to the relationship between P-wave velocity and density proposed by Hasterok *et al.*, and the errors of density are estimated by Monte Carlo method. The results show that P-wave velocities of the lower crust of the main tectonic units in the eastern China correspond with those of mafic rocks; most of the densities of the lower crust are greater than  $3\ 000\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , which belong to mafic rocks. Therefore, the lower crust beneath the eastern China is suggested to mafic in composition.

**Key words:** lower crust; seismic wave velocity; density; mafic rock; petrophysics; lithology; North China; the eastern China

## 0 引 言

了解大陆地壳的成分有助于更好地认识大陆地壳的形成和演化过程,其中下地壳的组分特征是认识壳幔交换和地壳生长的关键<sup>[1-5]</sup>。出露地表的能够代表大陆下地壳剖面的麻粒岩岩体以及火山岩中

的下地壳包体为下地壳研究提供了直接的样品,但是这些样品在地表出露很少,而且往往不具有空间代表性<sup>[2-3,6-7]</sup>。目前推断下地壳成分主要是利用地震波速的岩性解释来实现的。由于岩石的物理性质取决于成分、温压条件等多种因素,加之不同学者归纳的地震波速模型存在差异,所以波速的岩性解释方

收稿日期:2016-05-30

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金项目(2652013021)

作者简介:王纪庆(1991-),女,吉林松原人,工学硕士研究生,E-mail:wjqiing1001@163.com。

通讯作者:汪 洋(1969-),男,浙江杭州人,教授,理学博士,E-mail:allen\_thalassa@sina.com。

法也各不相同,得到的结果也不尽相同。Rudnick 等通过地壳常见岩石 P 波波速( $V_P$ )和密度( $\rho$ )的实测值<sup>[8-9]</sup>,结合地震速度模型对全球大陆地壳成分进行推测,提出大陆下地壳由基性成分组成;Hacker 等基于岩石成分的相平衡模拟结果推断的岩石物理性质,认为很多区域的下地壳成分是中性的<sup>[5]</sup>。

Gao 等将中国大陆下地壳分为上、下两部分<sup>[10]</sup>,对观测的 P 波波速进行温度压力校正到统一的参考标准(600 MPa、20 °C)<sup>[11]</sup>后,将其与试验得到的岩石 P 波波速进行对比。中国大陆东部地区下地壳上部 P 波波速为  $6.7 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ,属中性成分,下地壳下部 P 波波速为  $7.1 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ,为基性成分;由于下地壳上部厚度大,所以中国东部下地壳整体为中性组分,推断  $\text{SiO}_2$  含量(质量分数,下同)为 58%<sup>[10]</sup>。Wang 等根据中国大陆东部 P 波波速结构,认为中国东部下地壳比文献<sup>[10]</sup>估计的更偏基性<sup>[12]</sup>。Li 等总结了我国主要构造区的 P 波波速结构,对地壳的岩性做了简单推断<sup>[13]</sup>。近年来,许多学者对中国大陆地壳厚度和地震波速结构进行了归纳<sup>[14-24]</sup>,但没有对地壳成分做详细研究。

本文以 Christensen 等的岩石 P 波波速与密度实测值<sup>[9]</sup>为基础,结合 Gao 等和 Li 等归纳的中国东部 P 波波速结构<sup>[10,13]</sup>,通过对比实测 P 波波速与不同岩性的 P 波波速实测值,推测中国东部下地壳的岩性组成;采用 Hasterok 等提出的 P 波波速-密度转换方法<sup>[25]</sup>,将 P 波波速结构转化为密度结构,并与不同岩性的密度实测值对比,推测中国东部下地壳的岩性组成。

## 1 基于地壳 P 波波速与岩石波速试验对比推测下地壳岩性

本文选择 Christensen 等的地壳岩石 P 波波速试验的中性岩与基性岩(黑云母片麻岩、长英质麻粒岩、闪长岩、葡萄石绿纤石相玄武岩、沸石相玄武岩、辉绿岩、辉长岩-苏长岩-橄长岩、铁镁质麻粒岩、绿片岩相玄武岩、角闪岩、石榴石基性麻粒岩)的 P 波波速<sup>[9]</sup>,与中国东部各主要构造单元的 P 波波速进行对比,从而筛选出符合下地壳波速特征的岩性组合。因为中国东部的平均热流值介于  $60 \sim 70 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$  之间<sup>[26]</sup>,所以采用 Christensen 等基于中地温梯度的岩石 P 波波速试验值<sup>[9]</sup>。

中国东部不同构造单元的地壳 P 波波速剖面柱是依据 Gao 等的总结(图 1)<sup>[10,13]</sup>。这些地壳速度结构源自地学断面以及其他深部探测研究项目所完

成的地震折射剖面,而构造单元划分则依据传统的大地构造学方案,相关具体细节请参考文献<sup>[10]</sup>和<sup>[13]</sup>。值得注意的是,Gao 等的结果<sup>[10]</sup>是各大地构造单元的整体平均地壳速度结构,而 Li 等给出的地壳 P 波波速剖面柱<sup>[13]</sup>则代表了相关大地构造单元中布设有多条地震折射剖面区域的典型速度结构。虽然文献<sup>[10]</sup>和<sup>[13]</sup>归纳地壳 P 波波速结构的方法有所不同,但是其总体特征具有可比性(如 Li 等的华南地区柳州和东南沿海地区泉州地壳速度结构<sup>[13]</sup>与 Gao 等的华南造山带地壳速度结构<sup>[10]</sup>、Li 等的鄂尔多斯盆地和华北盆地沧县隆起、河北凹陷地壳速度结构<sup>[13]</sup>与 Gao 等的华北克拉通地壳速度结构<sup>[10]</sup>)。两者可以相互印证,因此,这些柱状图所反映的地壳速度结构具有代表性。

在 Li 等总结的中国东部 7 个构造区地壳 P 波波速剖面<sup>[13]</sup>中,鄂尔多斯盆地地壳厚度薄,P 波波速高于石榴石基性麻粒岩及辉长岩-苏长岩-橄长岩[图 2(a)];华北盆地沧县隆起的下地壳 P 波波速较低,与辉绿岩值相当[图 2(b)];华北盆地河北凹陷的下地壳 P 波波速对应的岩性从下地壳顶部的长英质麻粒岩或葡萄石绿纤石相玄武岩逐渐变化为闪长岩、辉绿岩,其下地壳底部 P 波波速对应的岩性是铁镁质麻粒岩或角闪岩,河北凹陷地壳最下部还有一薄的高 P 波波速( $7.5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ )层,波速介于石榴石基性麻粒岩与基性榴辉岩之间[图 2(c)];华东扬子地区的下地壳 P 波波速相当于铁镁质麻粒岩或角闪岩[图 2(d)];华中地区湖北的下地壳 P 波波速接近石榴石基性麻粒岩或辉长岩-苏长岩-橄长岩[图 2(e)];华南地区柳州以及东南沿海地区泉州的下地壳 P 波波速均介于铁镁质麻粒岩、角闪岩,与石榴石基性麻粒岩、辉长岩-苏长岩-橄长岩之间[图 2(f)、(g)]。

Gao 等总结的中国东部 P 波波速结构将下地壳分为上、下两层(秦岭构造区除外)<sup>[10]</sup>。从图 3 可以看出:Gao 等总结的华北克拉通和华南造山带的下地壳上部 P 波波速<sup>[10]</sup>介于闪长岩与辉绿岩之间,下地壳下部 P 波波速介于铁镁质麻粒岩、角闪岩,与石榴石基性麻粒岩、辉长岩-苏长岩-橄长岩之间[图 3(a)、(b)];内蒙古—黑龙江造山带下地壳上部 P 波波速接近辉绿岩,下地壳下部 P 波波速略高于石榴石基性麻粒岩[图 3(c)];秦岭造山带下地壳 P 波波速相当于铁镁质麻粒岩或角闪岩[图 3(d)];桐柏—大别—苏鲁造山带下地壳上部 P 波波速略高于辉绿岩,下地壳下部 P 波波速介于铁镁质

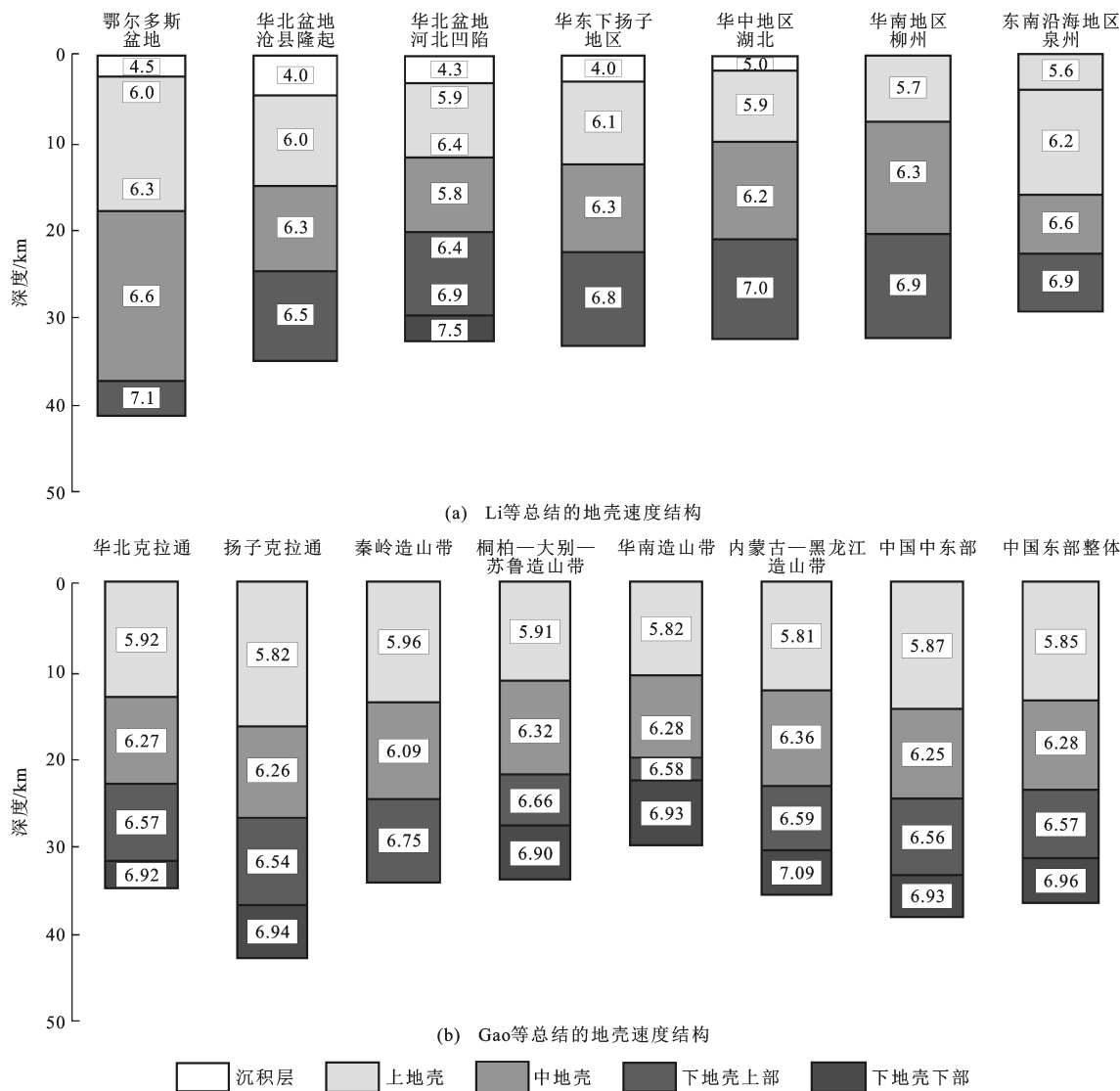
图(a)引自文献[13];图(b)引自文献[10];柱状图中数值为P波波速,单位为km·s<sup>-1</sup>

图 1 中国东部主要构造区的 P 波波速-深度关系

Fig. 1 Relationships Between P-wave Velocity and Depth of the Main Tectonic Units in the Eastern China

麻粒岩、角闪岩,与石榴石基性麻粒岩、辉长岩-苏长岩-橄长岩之间[图 3(e)];扬子克拉通下地壳上部 P 波波速介于闪长岩与辉绿岩之间,下地壳下部 P 波波速相当于辉长岩-苏长岩-橄长岩或石榴石基性麻粒岩[图 3(f)];Gao 等根据面积加权得到的中国中东部(华北克拉通、扬子克拉通、秦岭造山带与桐柏—大别—苏鲁造山带)和中国东部整体的下地壳上部 P 波波速均介于闪长岩与辉绿岩之间,下地壳下部 P 波波速相当于辉长岩-苏长岩-橄长岩[图 3(g)、(h)]<sup>[10]</sup>。

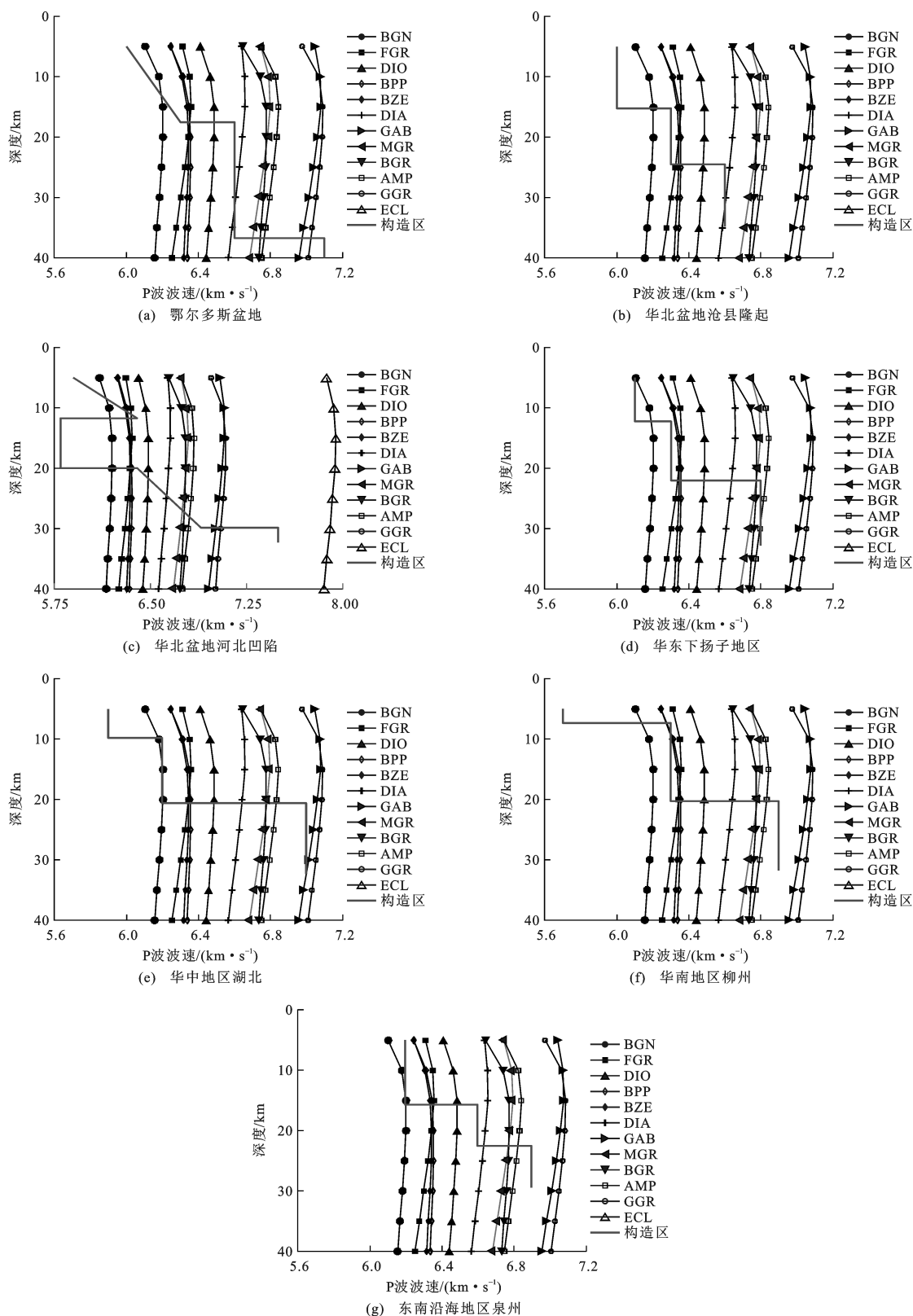
综上所述,Gao 等归纳的中国东部大部分构造单元速度剖面的下地壳 P 波波速与基性岩类(辉绿岩、辉长岩-苏长岩-橄长岩、铁镁质麻粒岩、角闪岩、石榴石基性麻粒岩和基性榴辉岩)相当<sup>[10,13]</sup>,仅华

北等少数地区下地壳偏上部部位的 P 波波速与中性岩(闪长岩)接近。因此,P 波波速限定的中国东部下地壳岩性以基性为主。

## 2 根据 P 波波速-密度转换关系推测下地壳岩性

### 2.1 P 波波速-密度转换

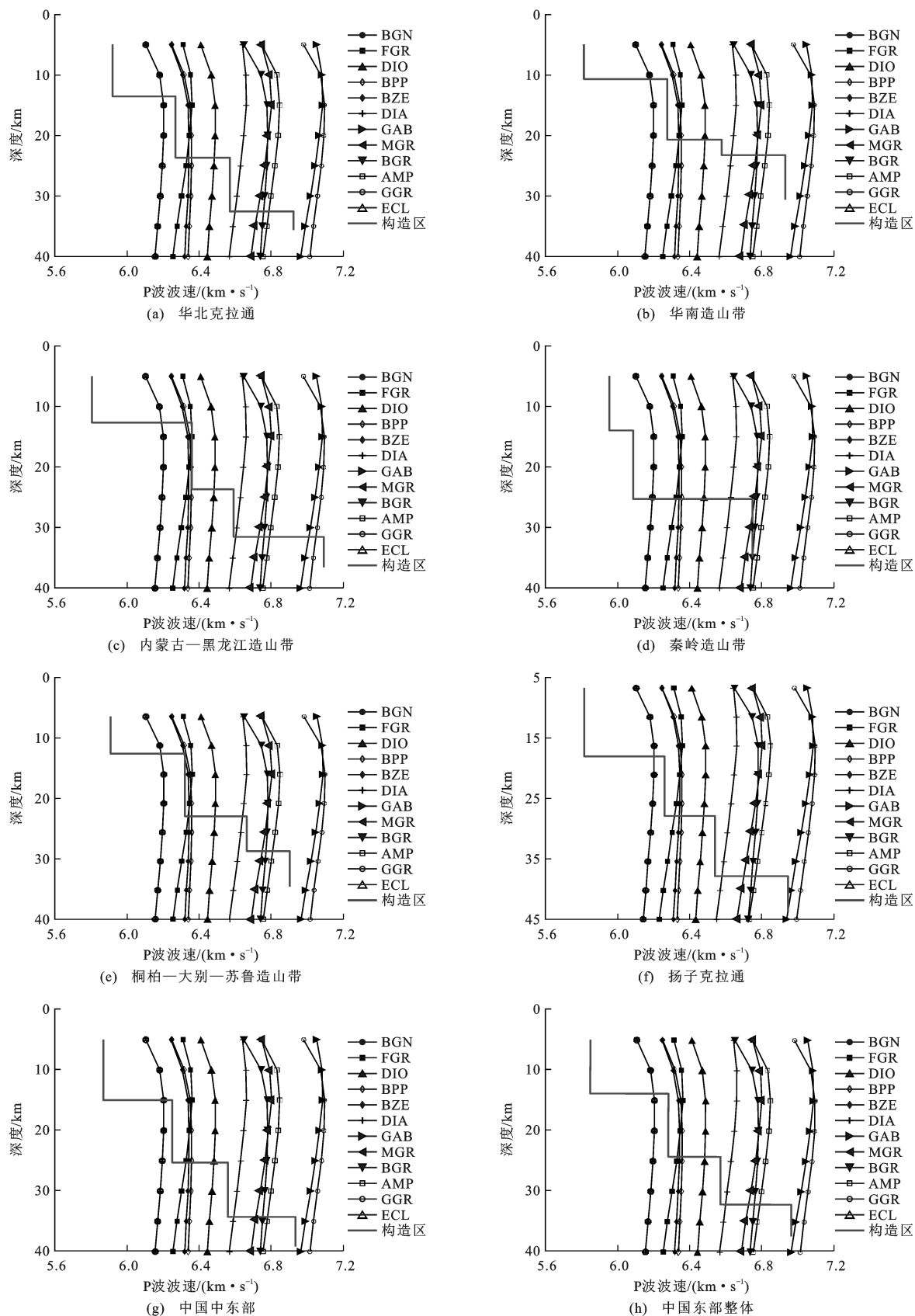
岩石密度是决定其地震波速的重要物理参数之一。Christensen 等研究显示,在地壳深度范围内基于 P 波波速-密度线性关系预测的岩石密度优于采用非线性的 P 波波速-密度关系预测的结果<sup>[9,25]</sup>。根据 Christensen 等在地壳温压范围内的实测岩石密度和 P 波波速<sup>[9]</sup>,可以得到 P 波波速-密度线性关系式为



BGN 为黑云母片麻岩; FGR 为长英质麻粒岩; DIO 为闪长岩; BPP 为葡萄石绿纤石相玄武岩; BZE 为沸石相玄武岩; DIA 为辉绿岩; GAB 为辉长岩-苏长岩-橄长岩; MGR 为铁镁质麻粒岩; BGR 为绿片岩相玄武岩; AMP 为角闪岩; GGR 为石榴石基性麻粒岩; ECL 为基性榴辉岩; 中国东部 7 个构造区地壳速度结构 P 波波速引自文献[13]; 实测的岩石 P 波波速引自文献[9]

图 2 中国东部 7 个构造区地壳速度结构 P 波波速与实测的岩石 P 波波速对比

Fig. 2 Comparisons of P-wave Velocities Between Crustal Velocity Model of the 7 Tectonic Units in the Eastern China and the Rocks Observed



中国东部地壳平均速度引自文献[10];实验室岩石平均速度引自文献[9]

图 3 中国东部地壳平均速度和实验室岩石平均速度对比

Fig. 3 Comparisons of the Average Velocities Between the Crusts in the Eastern China and the Rocks in Laboratory



$$\rho = a + bV_p \quad (1)$$

岩石 P 波波速和密度受制于温度 ( $T$ )、压力 ( $P$ ) 条件, 即

$$V_p(P, T) = V_{p0} + (T - T_0) \frac{\partial V_p}{\partial T} + (P - P_0) \frac{\partial V_p}{\partial P} \quad (2)$$

$$\rho(P, T) = \rho_0 + (P - P_0) \frac{\partial \rho}{\partial P} \quad (3)$$

式中:  $a$ 、 $b$  为拟合系数;  $V_{p0}$ 、 $\rho_0$ 、 $T_0$ 、 $P_0$  分别为标准状态条件下的 P 波波速、密度、温度和压力;  $\frac{\partial V_p}{\partial P}$  为 P 波波速的压力偏导数;  $\frac{\partial V_p}{\partial T}$  为 P 波波速的温度偏导数;  $\frac{\partial \rho}{\partial P}$  为密度的压力偏导数。

若已知特定深度的温度、压力, 利用上述偏导数值以及公式 (2)、(3) 即可求得对应条件下特定岩石 P 波波速和密度。根据 Christensen 等对地壳中常见的 19 种岩石在不同温度、压力条件下的 P 波波速和密度实测值<sup>[9]</sup>, 可以通过最小二乘法拟合特定温度、压力条件下地壳中常见岩石 P 波波速-密度线性关系的  $a$ 、 $b$  值<sup>[25]</sup>。在此基础上, 结合地壳内不同深度的温度、压力值, 就可以依据地震剖面获得的地壳 P 波波速推测对应的岩石密度。

在拟合 P 波波速-密度线性关系时, 排除了地壳深部不常见的 (新鲜) 喷出岩和单矿物岩石数据, 采用与 Christensen 等一致的 19 种岩性 (即变质杂砂岩、花岗岩-花岗闪长岩、花岗片麻岩、千枚岩、黑云母片麻岩、长英质麻粒岩、副麻粒岩、板岩、闪长岩、葡萄石绿纤石相玄武岩、云母石英片岩、沸石相玄武岩、辉绿岩、辉长岩-苏长岩-橄长岩、铁镁质麻粒岩、绿片岩相玄武岩、角闪岩、石榴石基性麻粒岩、基性榴辉岩) 的偏导数值拟合系数  $a$  和  $b$ <sup>[9, 25]</sup>。

当压力小于 0.5 GPa 时, 岩石的裂隙导致其 P 波波速降低, 导致利用上述 P 波波速-密度线性关系得出的密度偏大。因此, 若采用式 (1) 计算的密度小于  $2\,500\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  时, 可以应用 Nafe-Drake 曲线<sup>[27]</sup>进行 P 波波速-密度转换<sup>[25]</sup>, 即

$$\rho = 1.661\,2V_p - 0.047\,12V_p^2 + 0.067\,1V_p^3 - 0.004\,3V_p^4 + 0.000\,106V_p^5 \quad (4)$$

## 2.2 温压估计

拟合 P 波波速-密度线性关系需要对 P 波波速、密度进行温度和压力校正, 本文采用 Chapman 提出的一维稳态地温线模型<sup>[28]</sup>进行。该模型已被广泛

应用于大陆地温的研究中<sup>[25, 29-30]</sup>, 同时也是 Gao 等研究中国东部地区地壳组成时所采用的地温线模型<sup>[10]</sup>。Chapman 地温线模型将地表热流按 60% 的比例折合为剩余热流 ( $q_r$ ), 代表来自上地壳之下的热流值<sup>[28]</sup>; 其余 40% 地表热流值属于上地壳的放射性生热, 上地壳内的生热率以指数形式衰减, 衰减到  $0.4\text{ }\mu\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$  或者深度到达 16 km (上、下地壳分界面) 后, 生热率保持稳定 ( $0.4\text{ }\mu\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$ ) 直至地壳底部; 地幔岩石圈的生热率取  $0.02\text{ }\mu\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$ 。地壳和地幔的热传导率 ( $K$ ) 为温度和压力的函数。具体的计算参数见文献<sup>[25]</sup>、<sup>[28]</sup>和<sup>[29]</sup>。

根据 Wang 的研究<sup>[20]</sup>, 中国东部各构造单元热流值分别取值为: 鄂尔多斯盆地为  $60\text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ , 华北盆地沧县隆起为  $67\text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ , 华北盆地河北凹陷为  $67\text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ , 华东下扬子地区为  $65\text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ , 华中地区湖北为  $57\text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ , 华南地区柳州为  $60\text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ , 东南沿海地区泉州为  $72\text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ 。Gao 等统计的中国东部地区各构造单元的热流值<sup>[10]</sup>按文献<sup>[10]</sup>表 1 所给热流值数据取值。

根据 Hasterok 等的研究结果<sup>[25]</sup>, 采用 1 GPa/35 km 的固定压力梯度计算地壳深部压力。

## 2.3 误差估计

在利用 P 波波速-密度线性关系计算地壳密度时, 采用 Monte Carlo 法对计算参量分别给予随机扰动, 通过多次计算 ( $1.0 \times 10^5$ ) 获得密度的估算误差<sup>[25]</sup>。具体做法是: 地壳各层厚度赋予实测值在  $\pm 10\%$  以内的随机扰动值, P 波波速赋予实测值在  $\pm 3\%$  以内的随机扰动值, P 波波速-密度线性关系的  $a$ 、 $b$  拟合值分别赋予  $\pm 50$  和  $\pm 8$  范围内的随机扰动值。

## 2.4 计算结果

根据上述 P 波波速-密度线性关系, 应用地壳 P 波波速转换得到中国东部地区地壳密度 (表 1、2)。全地壳平均密度是根据上、中、下地壳的密度, 利用地壳各分层厚度加权计算得出的; 其误差是平均值计算中的标准偏差值 ( $1.0 \times 10^5$ )。

从表 1、2 可以看出, 中国东部地区大多数构造单元的下地壳密度大于  $3\,000\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 只有根据 Li 等归纳的地震剖面<sup>[13]</sup>计算得出的华北盆地沧县隆起下地壳密度为  $(2\,929 \pm 35)\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 根据 Gao 等归纳的地震剖面<sup>[10]</sup>得出的华北克拉通整体下地壳密度为  $(2\,975 \pm 28)\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

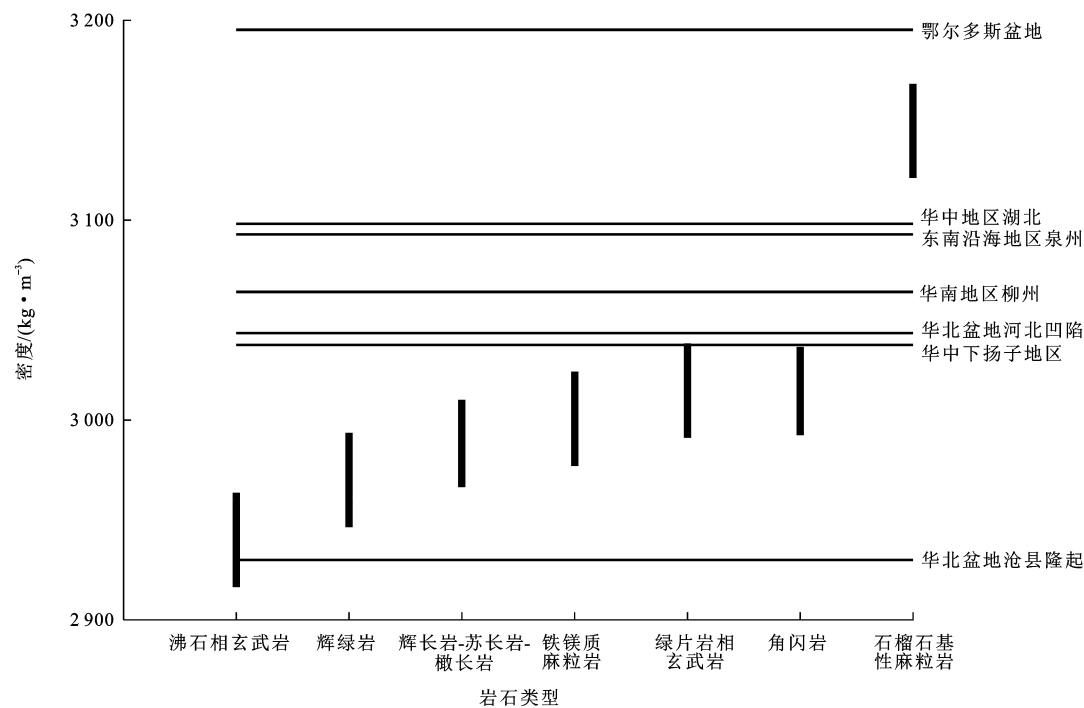
将根据 P 波波速-密度线性关系得到的中国东部地区下地壳密度与 Christensen 等实测的基性岩密度<sup>[9]</sup>相对比 (图 4、5), 根据 Li 等归纳的地震剖面<sup>[13]</sup>

表 1 依据文献[13]地震剖面计算得出的中国东部 7 个构造区地壳密度

地区	沉积层密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	上地壳密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	中地壳密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	下地壳密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	全地壳密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
鄂尔多斯盆地		$2\,763 \pm 28$	$2\,938 \pm 32$	$3\,195 \pm 50$	$2\,870 \pm 20$
华北盆地沧县隆起		$2\,711 \pm 29$	$2\,821 \pm 32$	$2\,929 \pm 35$	$2\,761 \pm 16$
华北盆地河北凹陷		$2\,770 \pm 30$	$2\,633 \pm 29$	$3\,043 \pm 33$	$2\,805 \pm 17$
华中下扬子地区		$2\,750 \pm 29$	$2\,816 \pm 31$	$3\,038 \pm 34$	$2\,829 \pm 17$
华中地区湖北		$2\,684 \pm 29$	$2\,772 \pm 30$	$3\,098 \pm 35$	$2\,850 \pm 19$
华南地区柳州		$2\,609 \pm 26$	$2\,812 \pm 30$	$3\,064 \pm 34$	$2\,856 \pm 19$
东南沿海地区泉州		$2\,733 \pm 22$	$2\,939 \pm 36$	$3\,093 \pm 38$	$2\,865 \pm 17$

表 2 依据文献[10]地震剖面计算得出的中国东部各构造区地壳密度

地区	上地壳密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	中地壳密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	下地壳上部密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	下地壳下部密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	下地壳密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	全地壳密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
内蒙古—黑龙江造山带	$2\,643 \pm 26$	$2\,836 \pm 32$	$2\,938 \pm 35$	$3\,178 \pm 44$	$3\,030 \pm 28$	$2\,838 \pm 17$
扬子克拉通	$2\,644 \pm 26$	$2\,802 \pm 32$	$2\,928 \pm 34$	$3\,127 \pm 41$	$3\,002 \pm 27$	$2\,817 \pm 16$
华北克拉通	$2\,680 \pm 26$	$2\,799 \pm 31$	$2\,925 \pm 34$	$3\,123 \pm 56$	$2\,975 \pm 28$	$2\,812 \pm 16$
秦岭造山带	$2\,693 \pm 27$	$2\,730 \pm 30$			$3\,009 \pm 35$	$2\,793 \pm 18$
华南造山带	$2\,648 \pm 26$	$2\,805 \pm 31$	$2\,922 \pm 62$	$3\,088 \pm 38$	$3\,046 \pm 30$	$2\,828 \pm 17$
桐柏—大别—苏鲁造山带	$2\,679 \pm 27$	$2\,819 \pm 31$	$2\,957 \pm 38$	$3\,088 \pm 40$	$3\,023 \pm 26$	$2\,844 \pm 16$
中国中东部	$2\,662 \pm 26$	$2\,794 \pm 31$	$2\,927 \pm 35$	$3\,117 \pm 44$	$2\,994 \pm 27$	$2\,814 \pm 16$
中国东部整体	$2\,656 \pm 26$	$2\,806 \pm 31$	$2\,930 \pm 35$	$3\,124 \pm 43$	$3\,007 \pm 27$	$2\,821 \pm 16$



数据基于 Li 等归纳的地震剖面<sup>[13]</sup>

图 4 中国东部 7 个构造区下地壳密度与基性岩类密度的对比

Fig. 4 Comparison of Densities Between the Lower Crust of 7 Tectonic Units in the Eastern China and Several Mafic Rocks

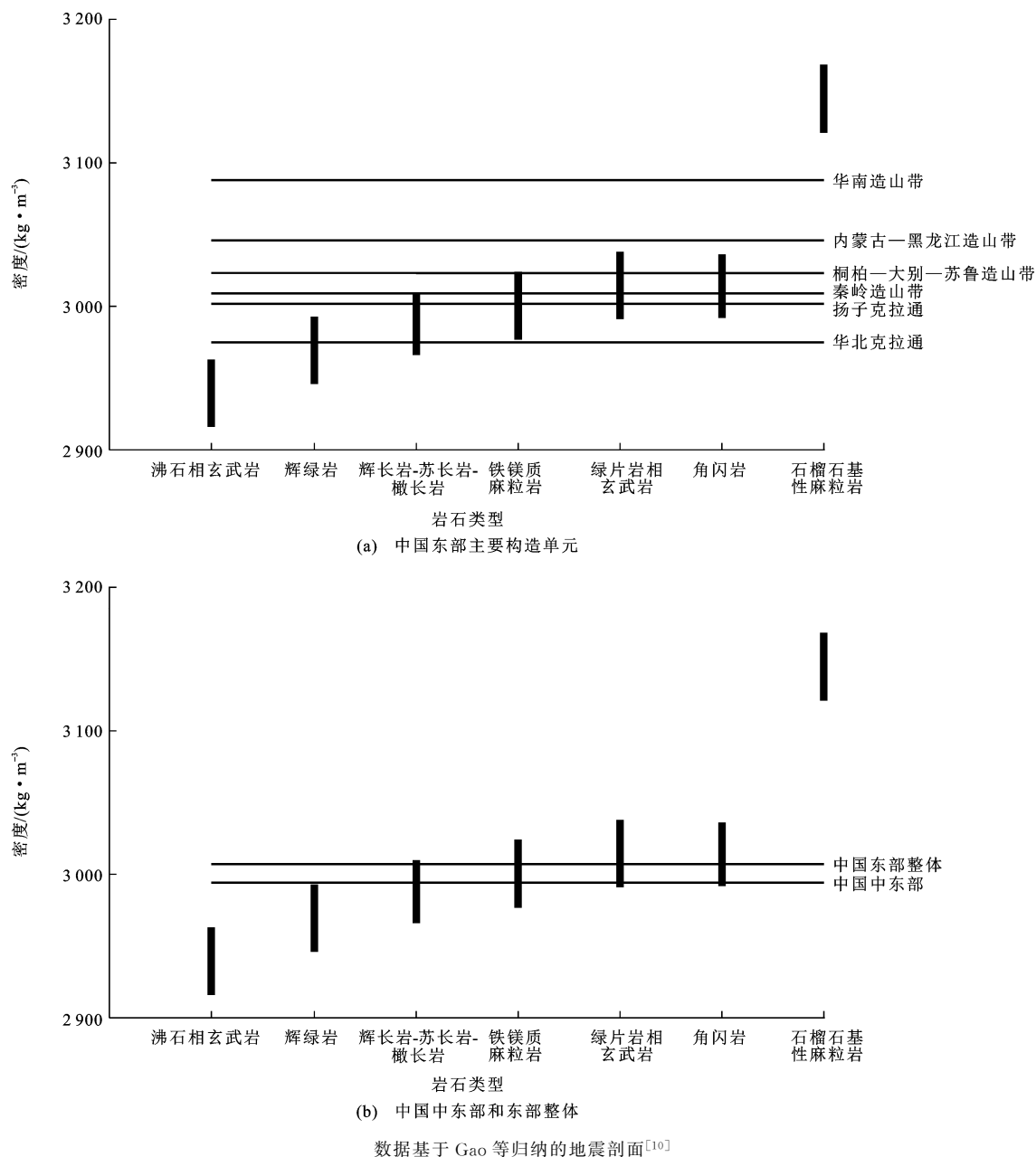


图 5 中国东部主要构造单元、中国中东部和东部整体的下地壳密度与基性岩类密度的对比

Fig. 5 Comparisons of Densities Between the Lower Crust of the Major Tectonic Units, the Central-eastern China and the Eastern China, and the Several Mafic Rocks

计算得出的中国东部各构造单元中,除华北盆地沧县隆起外,其余各地区下地壳密度介于基性侵入岩(辉绿岩、辉长岩-苏长岩-橄长岩)、浅变质基性岩(沸石相玄武岩、绿片岩相玄武岩)、中高级基性变质岩(角闪岩、铁镁质麻粒岩)与含石榴石高级变质基性岩(石榴石基性麻粒岩)的密度之间(图 4),根据 Gao 等归纳的地震剖面<sup>[10]</sup>计算得出的中国东部各构造单元中,华北克拉通下地壳密度对应于基性侵入岩(辉绿岩、辉长岩-苏长岩-橄长岩)的密度,扬子克拉通、秦岭造山带、桐柏—大别—苏鲁造山带下地

壳密度介于基性侵入岩(辉长岩-苏长岩-橄长岩)与变质基性岩(绿片岩相玄武岩、角闪岩、铁镁质麻粒岩)的密度之间,内蒙古—黑龙江造山带和华南造山带下地壳密度介于中高级基性变质岩(角闪岩、铁镁质麻粒岩)与含石榴石高级变质基性岩(石榴石基性麻粒岩)的密度之间[图 5(a)]。Gao 等根据面积加权得到的中国中东部和东部整体下地壳地震剖面<sup>[10]</sup>计算得出的密度约为  $3\,000\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,介于基性侵入岩(辉绿岩、辉长岩-苏长岩-橄长岩)与变质基性岩(绿片岩相玄武岩、角闪岩、铁镁质麻粒岩)的



密度之间[图 5(b)]。因此,根据 P 波波速-密度线性关系得到的下地壳密度限定了中国东部下地壳是以基性岩类为主的岩性组合。

### 3 结 语

(1)依据 Christensen 等对地壳常见岩石的 P 波波速、密度的试验数据<sup>[9]</sup>,将 Gao 等和 Li 等归纳的中国东部地区 P 波波速结构<sup>[10,13]</sup>进行岩性对比,发现中国东部各构造单元下地壳 P 波波速与基性岩类相当。

(2)采用 Hasterok 等提出的 P 波波速-密度转换方法<sup>[25]</sup>,依据 Christensen 等的试验数据<sup>[9]</sup>,本文将 Gao 等和 Li 等归纳的 P 波波速结构<sup>[10,13]</sup>转换为密度结构。计算结果显示,中国东部地区绝大多数构造单元下地壳密度大于  $3\,000\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,仅华北盆地下地壳密度介于  $2\,900\sim 3\,000\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  之间,且对应于基性岩类的密度。由此推断中国东部下地壳整体属于基性成分,与 Wang 等的研究结果<sup>[12]</sup>相同,而非高山等推测的中性成分<sup>[6,10]</sup>。

中国地质大学(北京)吴小林、薛翻琴在研究工作中提供了帮助,在此一并致谢。

#### 参 考 文 献 :

#### References :

- [1] RUDNICK R L. Making Continental Crust[J]. *Nature*, 1995, 378: 571-578.
- [2] RUDNICK R L, GAO S. Composition of the Continental Crust[M]// HOLLAND H D, TUREKIAN K K. *Treatise on Geochemistry Volume 3: The Crust*. Amsterdam: Elsevier, 2003: 1-64.
- [3] RUDNICK R L, GAO S. Composition of the Continental Crust[M]// HOLLAND H D, TUREKIAN K K. *Treatise on Geochemistry Volume 4: The Crust*. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2014: 1-45.
- [4] LEE C T A. Physics and Chemistry of Deep Continental Crust Recycling [M]// HOLLAND H D, TUREKIAN K K. *Treatise on Geochemistry Volume 4: The Crust*. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2014: 423-456.
- [5] HACKER B R, KELEMEN P B, BEHN M D. Continental Lower Crust[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2015, 43: 167-205.
- [6] 高山, 骆庭川, 张本仁, 等. 中国东部地壳的结构和组成[J]. *中国科学: D 辑, 地球科学*, 1999, 29(3): 204-213.  
GAO Shan, LUO Ting-chuan, ZHANG Ben-ren, et al. The Structure and Composition of the Eastern Chinese Crust[J]. *Science in China: Series D, Earth Sciences*, 1999, 29(3): 204-213.
- [7] 高山, 刘勇胜. 大陆地壳深部结构与组成[M]// 郑永飞. *化学地球动力学*. 北京: 科学出版社, 1999: 168-201.  
GAO Shan, LIU Yong-sheng. *Structure and Composition of Continental Crust* [M]// ZHENG Yong-fei. *Chemical Geodynamics*. Beijing: Science Press, 1999: 168-201.
- [8] RUDNICK R L, FOUNTAIN D M. Nature and Composition of the Continental Crust: A Lower Crustal Perspective[J]. *Reviews of Geophysics*, 1995, 33(3): 267-310.
- [9] CHRISTENSEN N I, MOONEY W D. Seismic Velocity Structure and Composition of the Continental Crust: A Global View[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1995, 100(B6): 9761-9788.
- [10] GAO S, ZHANG B R, JIN Z M, et al. How Mafic Is the Lower Continental Crust? [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1998, 161(1/2/3/4): 101-117.
- [11] KERN H, GAO S, LIU Q S. Seismic Properties and Densities of Middle and Lower Crustal Rocks Exposed Along the North China Geoscience Transect [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1996, 139(3/4): 439-455.
- [12] WANG Y, CAO J M, ZHU J S. Seismic Velocity Structure and Composition of the Continental Crust of Eastern China[J]. *Acta Geologica Sinica: English Edition*, 2004, 78(1): 291-297.
- [13] LI S L, MOONEY W D, FAN J C. Crustal Structure of Mainland China from Deep Seismic Sounding Data [J]. *Tectonophysics*, 2006, 420(1/2): 239-252.
- [14] 李廷栋. 中国岩石圈的基本特征[J]. *地学前缘*, 2010, 17(3): 1-13.  
LI Ting-dong. Principal Characteristics of the Lithosphere of China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(3): 1-13.
- [15] 熊小松, 高 锐, 张兴洲, 等. 深地震探测揭示的华北及东北地区莫霍面深度[J]. *地球学报*, 2011, 32(1): 46-56.  
XIONG Xiao-song, GAO Rui, ZHANG Xing-zhou, et al. The Moho Depth of North China and Northeast China Revealed by Seismic Detection[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2011, 32(1): 46-56.
- [16] ZHANG Z J, TENG J W, ROMANELLI F, et al. Geophysical Constraints on the Link Between Cratonization and Orogeny: Evidence from the Tibetan Plateau

- and the North China Craton[J]. *Earth-science Reviews*, 2014, 130:1-48.
- [17] 叶卓, 李秋生, 高锐, 等. 中国大陆东南缘地震接收函数与地壳和上地幔结构[J]. *地球物理学报*, 2013, 56(9):2947-2958.
- YE Zhuo, LI Qiu-sheng, GAO Rui, et al. Seismic Receiver Functions Revealing Crust and Upper Mantle Structure Beneath the Continental Margin of South-eastern China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(9):2947-2958.
- [18] 李文辉, 高锐, RANDY K, 等. 华北克拉通北缘(怀来—苏尼特右旗)地壳结构[J]. *地球物理学报*, 2014, 57(2):472-483.
- LI Wen-hui, GAO Rui, RANDY K, et al. Crustal Structure of the Northern Margin of North China Craton from Huailai to Sonid Youqi Profile[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(2):472-483.
- [19] 李英康, 高锐, 姚聿涛, 等. 华北克拉通北缘—西伯利亚板块南缘的地壳速度结构特征[J]. *地球物理学报*, 2014, 57(2):484-497.
- LI Ying-kang, GAO Rui, YAO Yu-tao, et al. Crustal Velocity Structure from the Northern Margin of the North China Craton to the Southern Margin of the Siberian Plate[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(2):484-497.
- [20] 李英康, 高锐, 高建伟, 等. 秦岭造山带的东西向地壳速度结构特征[J]. *地球物理学进展*, 2015, 30(3):1056-1069.
- LI Ying-kang, GAO Rui, GAO Jian-wei, et al. Characteristics of Crustal Velocity Structure Along Qinling Orogenic Belt[J]. *Progress in Geophysics*, 2015, 30(3):1056-1069.
- [21] 熊小松, 高锐, 张季生, 等. 四川盆地东西陆块中下地壳结构存在差异[J]. *地球物理学报*, 2015, 58(7):2413-2423.
- XIONG Xiao-song, GAO Rui, ZHANG Ji-sheng, et al. Differences of Structure in Mid-lower Crust Between the Eastern and Western Blocks of the Sichuan Basin[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(7):2413-2423.
- [22] 李英康, 高锐, 姚聿涛, 等. 大兴安岭造山带及两侧盆地的地壳速度结构[J]. *地球物理学进展*, 2014, 29(1):73-83.
- LI Ying-kang, GAO Rui, YAO Yu-tao, et al. The Crust Velocity Structure of Da Hinggan Ling Orogenic Belt and the Basins on Both Sides[J]. *Progress in Geophysics*, 2014, 29(1):73-83.
- [23] 危自根, 储日升, 陈凌. 华北克拉通地壳结构区域差异的接收函数研究[J]. *中国科学:地球科学*, 2015, 45(10):1504-1514.
- WEI Zi-gen, CHU Ri-sheng, CHEN Ling. Regional Differences in Crustal Structure of the North China Craton from Receiver Functions[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2015, 45(10):1504-1514.
- [24] 董树文, 李廷栋, 陈宣华, 等. 深部探测揭示中国地壳结构、深部过程与成矿作用背景[J]. *地学前缘*, 2014, 21(3):201-225.
- DONG Shu-wen, LI Ting-dong, CHEN Xuan-hua, et al. SinoProbe Revealed Crustal Structures, Deep Processes, and Metallogenic Background Within China Continent[J]. *Earth Science Frontiers*, 2014, 21(3):201-225.
- [25] HASTEROK D, CHAPMAN D S. Continental Thermal Isostasy: 1. Methods and Sensitivity[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2007, 112(B6):623-626.
- [26] WANG Y. Heat Flow Pattern and Lateral Variations of Lithosphere Strength in China Mainland: Constraints on Active Deformation[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2001, 126(3/4):121-146.
- [27] BARTON P J. The Relationship Between Seismic Velocity and Density in the Continental Crust: A Useful Constraint[J]. *Geophysical Journal International*, 1986, 87(1):195-208.
- [28] CHAPMAN D S. Thermal Gradients in the Continental Crust[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1986, 24:63-70.
- [29] CHAPMAN D S, FURLONG K P. Thermal State of the Continental Lower Crust[C] // FOUNTAIN D, ARCULUS R, KAY R W. *Continental Lower Crust*. Amsterdam: Elsevier, 1992:179-199.
- [30] FURLONG K P, CHAPMAN D S. Heat Flow, Heat Generation, and the Thermal State of the Lithosphere[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2013, 41(7):385-410.