

# 东亚地幔流动速度研究

程先琼 朱介寿 蔡学林

(成都理工大学信息工程学院, 四川 成都 610059)

**提要:**用高分辨率地震体波速度成像以及相关的地球物理资料,计算地幔垂直和切向流动形式及流动速度,得到东亚及西太平洋大体分为 3 个区域物质流动大致方式:东亚边缘裂谷系和西太平洋边缘海为下部会聚上部扩散的地幔上升流,尤其对于南海来说,大致勾勒出南海地区构造特征——从上到下的大体结构可能是上部呈“工”字型结构、中间为圆柱型、底部呈发散形的地幔上升流;西伯利亚地幔物质上部会聚下部扩散的“人”字型下降流;青藏高原—缅甸—印度尼西亚特提斯俯冲带上部会聚下部扩散的“人”字型地幔下降流。东亚西太平洋分为 3 个区域地幔对流与地表的西太平洋构造域、古亚洲构造域和特提斯构造域相吻合。东亚中部的物质在地幔深部无明显流动趋势。地幔上升流起源于核幔边界,主要表现在下地幔和上地幔下部,到上地幔顶部和地表与现代热点位置符合。地幔垂流动速度每年 1~4 cm,切向速度为每年 1~10 cm。

**关键词:**地震体波层析成像;东亚地幔流动;垂流动速度;切向流动速度

**中图分类号:** P315.2      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-3057(2006)04-0896-10

## 1 引言

自原始地球形成以后,其内部一直进行着大规模化学分异和动力学演化,地幔深部的化学分异及物质流动是地球演化与发展的基本动力来源,也是决定地球外形和自转、地球磁场及重力场分布,以及板块运动的根本因素。从上世纪 80 年代以来,全球先后已发表了十多个用不同资料不同方法获得的三维地幔速度模型,其横向分辨率从早期的数千米逐渐发展为近几年的数百千米,使笔者对地球内部非均匀性及物理状态有了较深刻的认识。尤其近十年来,由于对高分辨率地震体波及面波三维层析成像的研究,而建立起全球或区域性较精确的地幔三维速度结构,为研究地幔垂流动奠定了坚实的基础<sup>[1,2]</sup>。最近,Becker 等<sup>[3]</sup>将这些模型进行了对比,并对各个模型的在同一深度横向变化进行了调和与分析。综合这些数据,用统计方法计算了全球地幔 P 波及 S 波的高分辨率综合三维速度模型 Pmean 及 Smean。这一模型较为稳健,它能清晰反映地幔俯冲带及大洋中脊等地幔物质上升图像。地幔中的速度横向变化,反映了地幔流引起的物质扰动,因此地幔三维速度成像是当前地幔流动的一个快照。但是层析成

像模型仅仅给出速度分布图像,没有解决地幔对流规模问题。为了更进一步了解地球内部动力学过程,利用地震层析成像结果来研究地幔的流动趋势以及速度具有很重要的意义。

随着观测数据日益增多、观测精度提高以及计算技术的飞速发展,地幔对流的研究已从单纯的理论研究迈向实用化阶段。Hager 等<sup>[4-6]</sup>在描述对流运动的方程组中,将密度差异项直接作为流动的源项来处理,而不涉及其热起源,这一方法使得能量方程与动量方程解耦,使问题大大简化;Forte<sup>[8-12]</sup>利用这一原理,采用一种新的粘滞流理论计算地幔流,做出了一系列研究地幔对流的工作;傅容珊等<sup>[13-15]</sup>在利用层析成像研究地幔对流方面也做了大量深入细致的工作。利用地震波层析成像研究地幔对流一个最基本假设,就是速度异常反映了由热对流过程引起的瞬态横向温度变化,这一假设允许把地震波速度异常转换为等效密度扰动,并导出驱动地幔对流的浮力分布<sup>[9]</sup>。

笔者用 pmean 速度模型,采用大地水准面(<http://cddisa.gsfc.nasa.gov/926/egm96/>)、动力学核幔边界<sup>[9]</sup>、板块运动<sup>[17]</sup>、动力学地表地形(<http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/>)

收稿日期:2005-12-27; 改回日期:2006-05-10

基金项目:国家自然科学基金重点项目(49734150、40234047);国土资源部专项计划(2001010206);油气藏地质及开发工程国家重点实验室、地球探测与信息技术教育部重点实验室联合资助。

作者简介:程先琼,女,1974 年生,博士,讲师,从事地震波层析成像、地球动力学等方面的研究与教学工作;E-mail:chxq@cdu.edu.cn。

seltopo.html)的研究成果,作为与地幔对流有关的表面观测资料,得到东亚地幔垂直和切向流动速度结构。从而了解地球内部物质与能量交换的趋势,这对研究各圈层的相互作用及深部动力过程有重要意义。

## 2 研究地幔流动速度的计算方法

Hager<sup>[7]</sup>最早提出根据地震层析成像得到地震波速度异常研究地幔的流变性,并假定波速异常与密度异常呈线性关系,将密度差异项作为源项,不涉及对流的热起源,该方法简单实用,取得较好的效果,但是没有考虑地幔压缩性和自重的影响。由于地震层析成像模型成功地预测了与对流有关的地表观测数据,因而激发了一系列基于层析成像的地幔对流研究工作。Forte 等<sup>[11]</sup>在 Hager 的基础上考虑地幔自重及压缩性,用一种新的粘滞流理论计算地幔流,得到的对流模型能较好解释地球物理观测数据。笔者依据最近发表的长波长地震体波层析成像模型 Pmean, 用得到的地球物理核函数来预测地幔对流过程,以及现在能观测到的地球物理表征。全球规模的观测量包括:非静水力学的大地水准面、构造板块运动、核幔边界地形以及地表地形。这些地球物理观测量对推测动力学稳态地幔起着重要的约束作用,笔者将用这些观测量得到一个特殊的粘度模型,根据这一粘度模型能合理解释这些观测量。

Forte<sup>[11]</sup>提出重力一致的地幔粘滞流模型,这个模型考虑了密度和粘度分层所产生的重要影响,这些模型的公式具有很大的通用性,它们可以包括任意的径向密度/粘度变化,以及任意数目的间断面。最终得到表示径向流耦合的一阶常微分方程组。

$$\frac{dU^o}{dr} = -\frac{1}{r} \left( 2+r \frac{\rho_0^{\kappa}}{\rho_0} \right) U^o + \frac{\Omega_1}{r} U^p \tag{1a}$$

$$\frac{dU^p}{dr} = -\frac{2\Omega_1}{r} U^o + \frac{1}{r} U^p + \frac{\eta_0}{\eta} T^p \tag{1b}$$

$$\frac{dT^o}{dr} = \frac{4}{r^2} \left( 3+r \frac{\rho_0^{\kappa}}{\rho_0} \right) \frac{\eta}{\eta_0} U^o - \frac{6\Omega_1}{r^2} \frac{\eta}{\eta_0} U^p + \frac{\Omega_1}{r} T^p + \frac{3}{2l+1} \frac{\rho_0^{\kappa}}{\rho} \varphi_1 + \frac{\rho_1}{\Delta \rho} g(r) \tag{1c}$$

$$\frac{dT^p}{dr} = -\frac{4\Omega_1}{r^2} \left( 3+r \frac{\rho_0^{\kappa}}{\rho_0} \right) \frac{\eta}{\eta_0} U^o + \frac{2}{r^2} (\Omega_2^2 + 3\Omega_1^2) \frac{\eta}{\eta_0} U^p - \frac{2\Omega_1}{r} T^o - \frac{3}{r} T^p \tag{1d}$$

$$\frac{d\varphi_1}{dr} = g_1 \tag{1e}$$

$$\frac{dg_1}{dr} = \frac{2}{r} g_1 + \frac{l(l+1)}{r^2} \varphi_1 - (2l+1) \left( \frac{d}{R_0} \right) \frac{\rho_1}{\Delta \rho} \tag{1f}$$

式中无因次标量变量  $U^o(r)$ ,  $U^p(r)$ ,  $T^o(r)$ ,  $T^p(r)$ ,  $\varphi_1(r)$ ,  $g_1(r)$  分别表示垂直流动速度、切线流动速度、垂直(正)应力、剪切应力、扰动重力势能和扰动重力加速度的球谐函数系数。 $\rho_0$  头上的圆点表示对半径的微分;在(1a-f)中流动变量都依赖于相同的球谐阶数和度数  $m$ , 这些流动变量都是无因次;定义

为常数的  $\eta_0, \Delta \rho$  和  $d$  分别用来无因次化径向粘度值  $\eta(r)$ 、密度扰动  $\rho_1(r)$  (它们都间接依赖于  $\lambda$  和  $m$ ) 和地幔半径  $r$ ,  $d=2888$  km 为地幔厚度;  $\Delta \rho=0.1$  由热引起的密度扰动典型值;  $\eta_0$  为参考粘度; (1c) 中的  $\bar{\rho}$  表示地幔平均密度 ( $\bar{\rho}=5.515$ ), 在(1a-d)中有  $\Omega_1=[l(l+1/2)^{-1/2}]$ ,  $\Omega_2=[(l-1)(l+2)/2]^{-1/2}$ , 在(1f)中  $R_0$  表示地球平均半径。

根据 Forte<sup>[11]</sup>得到内部物质边界条件、拟和边界条件、核幔边界条件以及地表边界条件,采用解初值问题的 Bulirsch-Stoer 外推法<sup>[18]</sup>,对方程组(1)积分,得到联系表面观测值与地幔内密度扰动的核函数。核函数把表面观测值(比如大地水准面和地表板块散度)与地幔密度横向变化联系起来。根据 Forte<sup>[11]</sup>对核函数定义

$$(\nabla_H \cdot u)_1^m(r=a) = \frac{g_0}{\eta_0} \int_b^a S_l(r) (\rho_1)_1^m(r) dr \tag{2a}$$

$$(Ge)_1^m(r=a) = \frac{3}{2l+1} \frac{1}{\bar{\rho}} \int_b^a G_l(r) (\rho_1)_1^m(r) dr \tag{2b}$$

$$(\delta a)_1^m = \frac{1}{\Delta \rho_{ms}} \int_b^a A_l(r) (\rho_1)_1^m(r) dr \tag{2c}$$

$$(\delta b)_1^m = \frac{1}{\Delta \rho_{cm}} \int_b^a B_l(r) (\rho_1)_1^m(r) dr \tag{2d}$$

其中  $(\nabla_H \cdot u)_1^m$  为预测的水平散度球谐系数;  $(Ge)_1^m$  为预测的非静水力学大地水准面球谐系数;  $(\delta a)_1^m$  为预测的地表地形球谐系数;  $(\delta b)_1^m$  为预测的 CMB 地形球谐系数;  $(\rho_1)_1^m$  为密度径向扰动球谐系数;  $S_l(r)$  为无单位的水平散度核函数;  $G_l(r)$  为无单位的大地水准面核函数;  $A_l(r)$  为无单位的地表地形核函数;  $B_l(r)$  为无单位的核幔边界(CMB)地形核函数,笔者采取球谐阶数  $l \leq 31$ , 球谐度数  $m=0,1,2,\dots,l$ 。

粘度反演是由一简单的两层粘度值开始,其特征是上地幔粘度为  $10^{21}$  Pas, 下地幔是  $2 \times 10^{21}$  Pas。而地表观测量分别采用大地水准面、动力学核幔边界、板块运动、动力学地表地形,然后对 4 种反演粘度结果进行平均,得到最终的地幔径向粘度结构。

上面求核函数时只考虑密度在  $r=r'$  处扰动,而在地幔其他地方密度不扰动,实际上地幔密度扰动形式如  $\rho_1(r)$ ,也就是在每个深度地幔密度都有可能扰动,就要求得这种扰动情况下的流动变量  $V(r)$ 。方程组(2)表示密度扰动由地震层析成像结果得到时,每个与地幔对流有关的核函数与流动变量的关系表达式。根据 Press 等<sup>[19]</sup>给出的边界条件,采用计算得到的径向粘度结构,积分流动方程(1)就得到各个深度相应的流动变量。

## 3 东亚地幔流动速度的结果与讨论

东亚有世界上最丰富多彩的地质构造单元,青藏高原是特提斯构造域发育最完整的一段,东部是研究太平洋板块、欧亚板块、澳洲板块最好地段,具有古亚洲构造域不同时期的大陆增生带及沟、弧、盆体系。同时,发生在亚洲的地幔下降流,是古生代以来太平洋板块向西俯冲,特提斯板块向北东俯冲,多个板块或地块拼合过程的产物。经历了数亿年的板

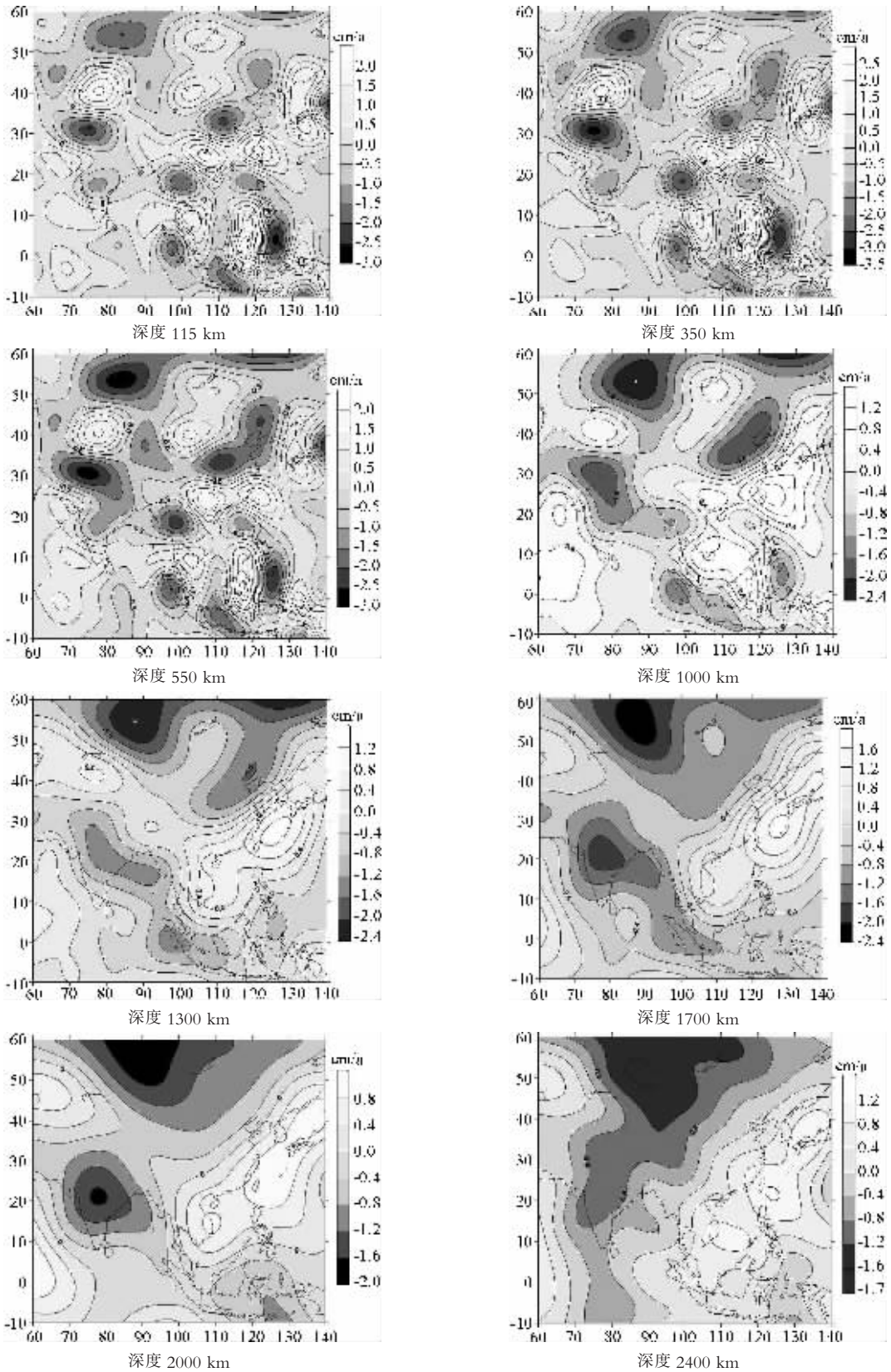


图 1 不同深度东亚地区地幔垂直流动速度图

Fig.1 Map of the vertical mantle flow velocity at various depths in East Asia

块俯冲,由于大面积的物质下沉形成的地表板块运动,使漂浮的岩石圈向这一区域聚集,使东亚及中亚岩石圈增厚,并形成挤压的山链和高原。东亚地表丰富多彩的结构与地幔深部关系一直是研究的热点,笔者从径向和切向地幔流动速度出发,探讨地幔深部动力学过程对地表的影响。

### 3.1 东亚地幔垂直流动速度的结果与讨论

为了更清晰了解中国及邻区地幔对流情况,笔者利用层析成像模型 PMEAN、粘度模型 new03,做了经度范围 60°E~140°E,纬度范围 10°S~60°N,深度分别为上地幔的 115 km、350 km 和 550 km 共三个深度,下地幔的 1 000 km、1 300 km、1 700 km、2 000 km、2 400 km 共 5 个深度的地幔垂直流动速度平面图;沿纬度 30°N 和 0°两个纬度剖面图;沿经度 60°E、120°E 两个经度剖面图。所有的图中浅色表示地幔上升流,深色表示地幔下降流。

西西伯利亚、印度和爪哇海沟都从上地幔俯冲到下地幔,西太平洋边缘海地区(2 400~1 300 km)—南海均表现地幔上升流,越到深部,整个东亚地区会聚成几乎以西太平洋边缘海为界的两大区域,一是边缘海以西的俯冲块体在地幔深部 1 000~2 800 km 逐渐集成一体向下俯冲,另外日本海—东海—南海在地幔深部约 2 400 km 大范围上升,到下地幔中上部逐渐分成几个上升块(图 1)。

印度洋中脊表现为地幔物质从核幔边界上涌至地表,在

2 000 km 左右上涌速度最快,达到 2 cm/a 左右,印度尼西亚表现为地幔物质向下俯冲,其俯冲深度在 2 000 km 左右,俯冲速度最快是 1 000 km 左右,速率达到 2.4 cm/a(图 2a)。

位于西亚的阿富汗、青藏高原以及上扬子都表现为地幔物质向下俯冲,其俯冲深度接近核幔边界,在 600~1 000 km 俯冲速度最快,达到 3.5 cm/a,东海地幔物质从核幔边界上涌至地表,上涌速度最快在 1 500~2 000 km,速率为 1.8 cm/a(图 2b)。

印度洋中脊—阿拉伯海地幔物质从核幔边界上涌至地表,在下地幔中下部的 1 500~2 500 km 上涌速度最快,达到 1.2 cm/a,从下至上范围逐渐减小;在阿富汗—西西伯利亚地幔物质呈整体状向下流动(图 3a)。

南海—华南的北缘地幔物质从核幔边界上涌,趋势是靠近核幔边界和地表上涌速度快,上涌范围大,在华北—蒙古兴安岭—西伯利亚地幔物质俯冲到下地幔,其中 500~1 500 km 深度范围内俯冲速度最快,最快可达到 3.5 cm/a(图 3b)。

对于中国及邻区来说,综合图 1~3,笔者认为南海周边大体呈环状构造,在 115~1 000 km 最明显,在这个环状构造中间部分基本上是上升区域,周边下降,包括印度—澳大利亚向北俯冲、菲律宾向西俯冲,华南向南俯冲,因此认为南海形成倾向于受地幔上升流所引起的,这个上升流形成以后又受周边构造所控制,蔡学林等<sup>[19,20]</sup>通过东亚西太平洋岩石圈

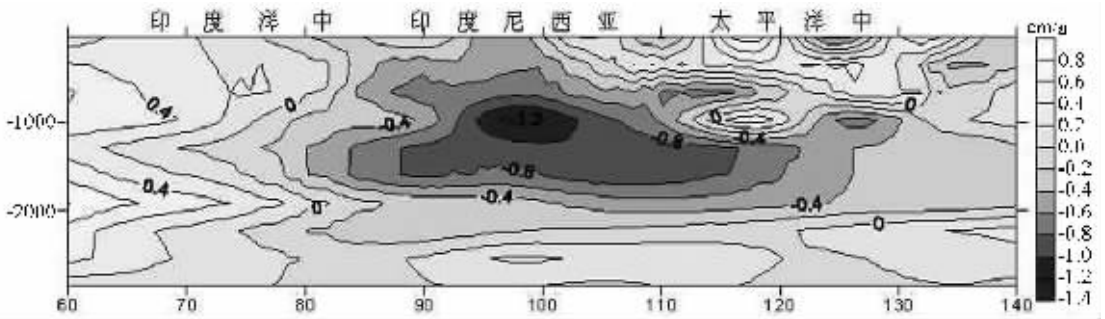


图 2a 东亚地区地幔垂直流动剖面图(纬度=0°)

Fig.2a Vertical mantle flow velocity section in East Asia (equator)

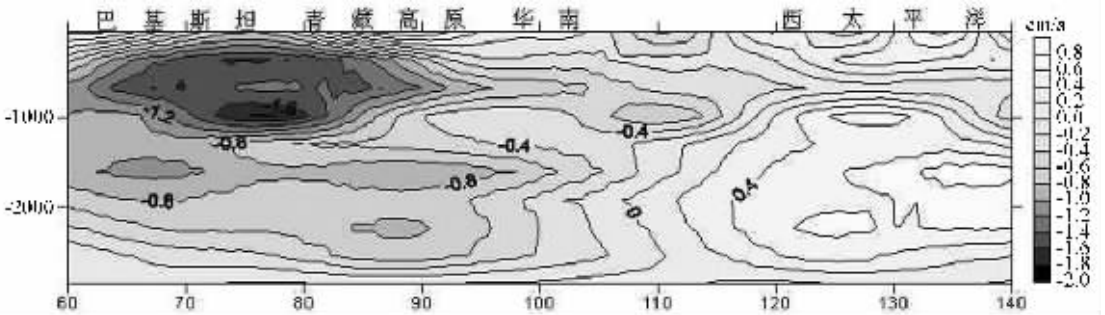


图 2b 东亚地区地幔垂直流动剖面图(纬度=30°N)

Fig.2b Vertical mantle flow velocity section of East Asia (latitude 30°N)

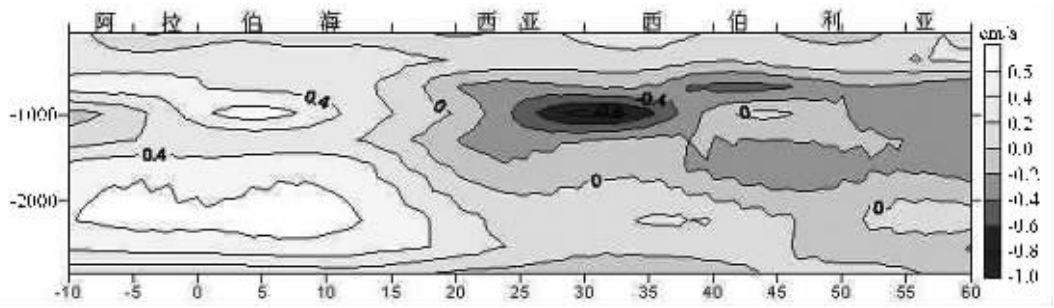


图 3a 东亚地区地幔垂直流动剖面图(经度=60°E)

Fig.3a Vertical mantle flow velocity section of East Asia (longitude 60°E)

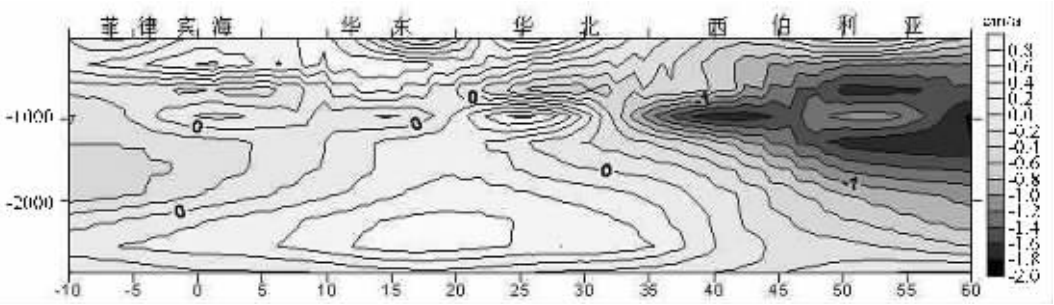


图 3b 东亚地区地幔垂直流动剖面图(经度=120°E)

Fig.3b Vertical mantle flow velocity section of East Asia (longitude 120°E)

和软流圈面波层析成像三维  $V_s$  速度结构的构造解析发现,南海地区软流圈存在巨大的“工”字型低速异常带。这个“工”字型低速异常带南北延伸 3 000~3 500 km 以上,东西宽 2 000~2 500 km,分布范围大体在南海中央西侧地带内。认为这个“工”字型低速异常带形成的动力学原因:在中生代至新生代早期形成东亚大陆巨型裂谷体系,南海正好位于巨型裂谷体系南端,南海减薄型碎块状岩石圈下软流圈内发育近南北向的低速异常带。在新生代晚期 17~15 Ma 以来,在西面的印度洋板块与东部的菲律宾板块和北部的欧亚板块与澳大利亚板块相向俯冲碰撞作用下,南海海盆停止扩张,转变为相对挤压构造环境,此时该区软流圈也处于挤压构造环境,当周围岩石圈高速块体继续俯冲、断离到软流圈中,形成对软流圈内低速异常带中部的挤压变形,上下部分侧向拉张扩展,形成“工”字型低速异常带。当上述构造作用继续进行,引起软流圈物质不规则上涌,穿过岩石圈地壳,形成南海周边的基性岩浆喷出活动。

就垂直方向运动来说,东亚及西太平洋大体分为 3 个区域:东亚边缘裂谷系和西太平洋边缘海为上升流,这一上升地幔流从 2 400 km 开始上升到 550 km,底部在 2 000 km 以下呈盾形,直径大约为 1 000 km 左右;西伯利亚地幔深度表现为物质下降流,反映深部速度高,从地表下降到下地幔下部;青藏高原—缅甸—印度尼西亚特提斯俯冲带地幔下降流,从

上地幔中部 300 km 到下地幔下部 2 000 km 都有表现。

### 3.2 东亚地幔切向流动速度的结果与讨论

与垂直流动类似,笔者利用层析成像模型 PMEAN、粘度模型 new03,做了经度范围 60°E~140°E,纬度范围 10°S~60°N,深度分别为上地幔的 115 km、350 km 和 550 km 共 3 个深度,下地幔的 1000 km、1300 km、1700 km、2000 km、2400 km 共 5 个深度的地幔水平流动速度平面图;沿纬度 30°N、0°两个纬度剖面图;沿经度 60°E、120°E 两个经度剖面图。所有的图中深色(负值)表示地幔物质发散运动,浅色(正值)表示地幔物质汇聚运动。

研究图 4 可知东亚地幔物质水平运动大体分为 4 个区域:印度板块—印度洋边界以西的阿拉伯海—印度洋中脊区域从地表 20 km 附近到上地幔边界 600 km 左右物质向四周离散,在印度洋中脊离散速率最大,达到 4 cm/a,而在 600 km 至核幔边界这一区域地幔物质向中心汇聚,仍然在印度洋中脊会聚速率最大,大约为 4 cm/a;在印度板块—印度洋边界东北方向即喜马拉雅造山带—爪哇海沟以东地幔物质切向速度方向呈相反趋势,即从地表 20 km 附近到上地幔边界 600 km 左右物质水平离散,而在 600 km 至核幔边界这一区域地幔物质向板块中心汇聚;南海周边在地壳至 600 km 左右水平离散运动,在下地幔表现为水平会聚运动;西伯利亚至中国大陆整体上是上地幔向西伯利亚水平会聚,而在下

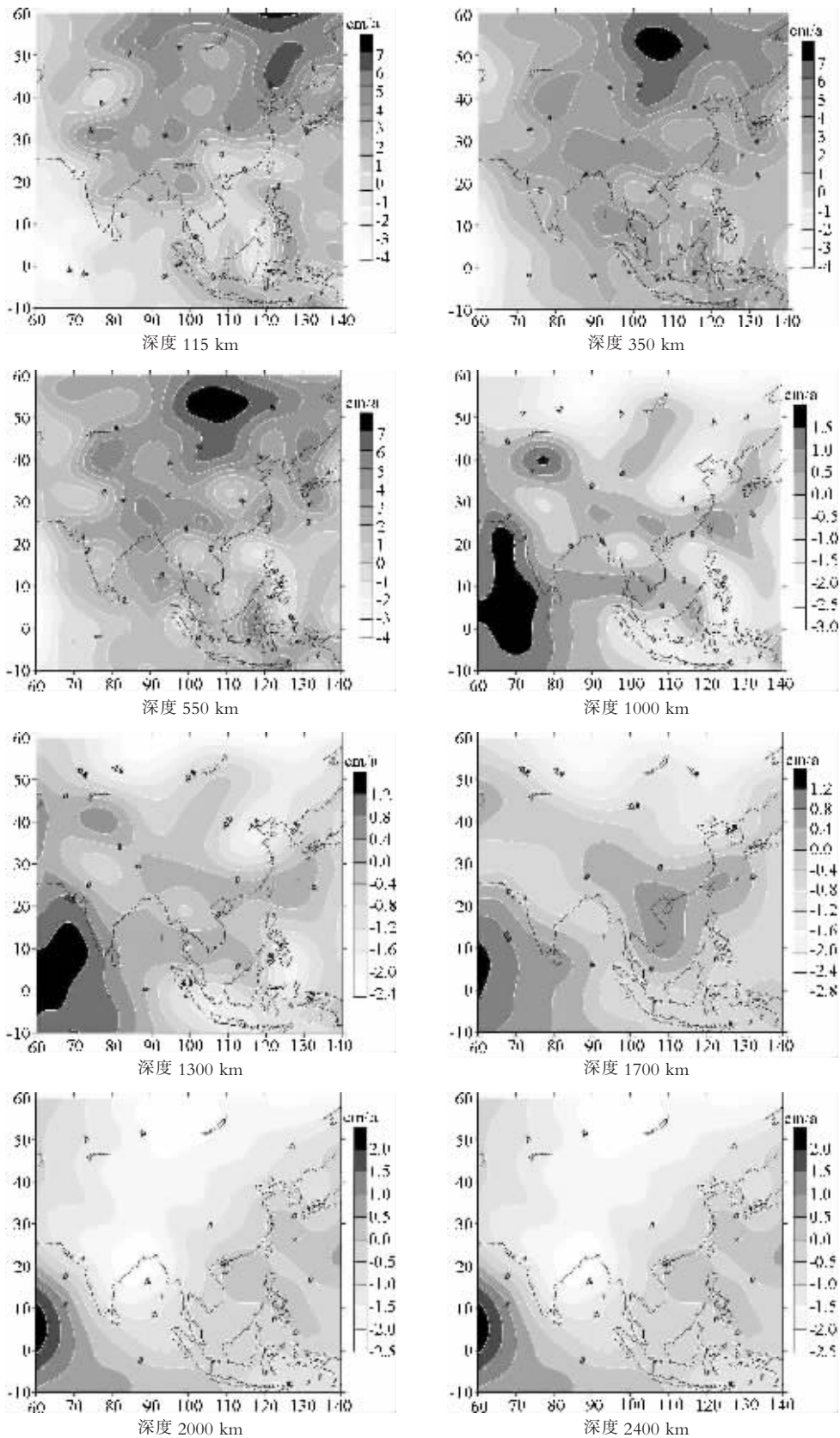


图 4 不同深度东亚地区地幔切向流动速度图

Fig.4 Map of the tangential mantle flow velocity at various depths in East Asia

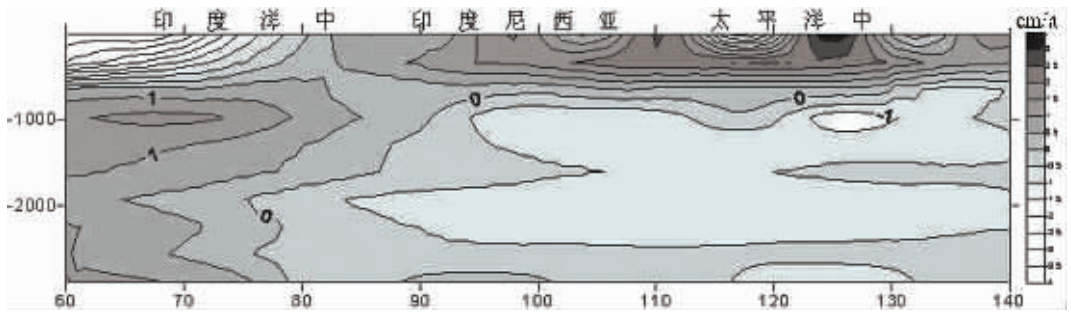


图 5a 东亚地区地幔切向流动剖面图(纬度=0)

Fig.5a Tangential mantle flow velocity of East Asia (equator)

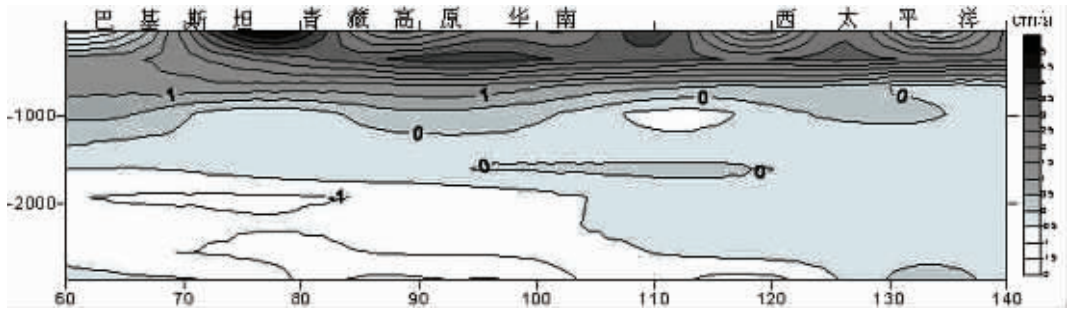


图 5b 中国及邻区地幔切向流动剖面图(纬度=30°N)

Fig.5b Tangential mantle flow velocity section of China and its adjacent regions (latitude 30°N)

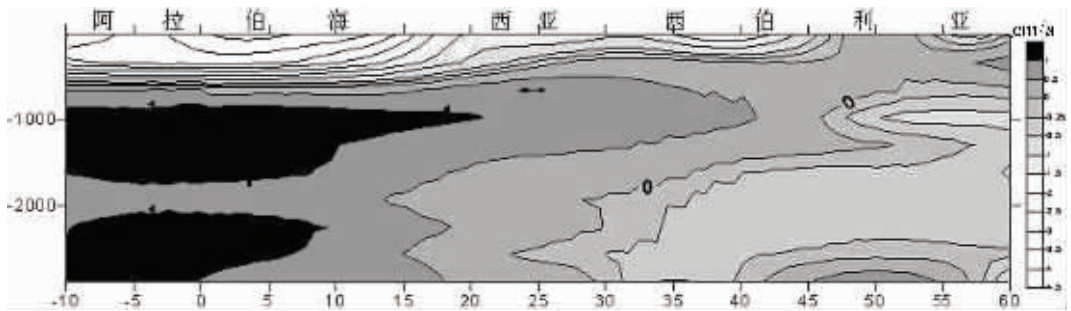


图 6a 中国及邻区地幔切向流动剖面图(经度=60°E)

Fig.6a Tangential mantle flow velocity section of East Asia (longitude 60°E)

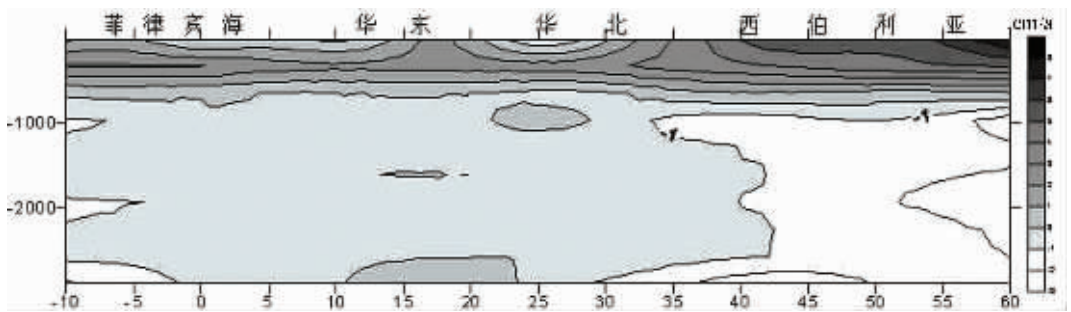


图 6b 中国及邻区地幔切向流动剖面图(经度=120°E)

Fig.6b Tangential mantle flow velocity section of East Asia (longitude 120°E)

地幔由西伯利亚向四周扩散运动。说明在地表至 600 km 左右,印度洋中脊是由两边的物质在上地幔拉张形成,而在下地幔洋中脊两边的物质发生汇聚;青藏高原—缅甸—印度尼西亚特提斯带地表至上地幔向北俯冲,而到下地幔转为向印度洋方向运动;西太平洋边缘海的日本海沟—伊豆—小笠原海沟—马里亚纳海沟向西北方向俯冲到下地幔;东亚至西太平洋之间的 NNE 巨型裂谷系在 20~300 km 表现明显。

印度洋板块中部在上地幔表现为向板块四周发散运动,其发散速率最大约为 4.0 cm/a, 而到下地幔至核幔边界附近,其水平运动方向逐渐变为汇聚,深度 1 000 km 附近汇聚速率最大达到 4.0 cm/a; 印度尼西亚至菲律宾板块则在上地幔表现为汇聚,在下地幔为发散运动,但相对印度洋板块发散速率来说要低一些,在 1 000 km 附近最大约为 1.0 cm/a (图 5a)。

在地表至 1 300 km 深度左右,地幔物质的向板块中心汇聚,其汇聚速率逐渐减小,其中巴基斯坦东部—青藏高原下部在上地幔汇聚速率最快,达到 5 cm/a; 整个剖面在 100 km 左右至核幔边界表现为向板块四周发散运动,其中巴基斯坦东部在 2 000 km 深处以及青藏高原下部在 2 300 km 至核幔边界段发散速率最快,最大达到 2 cm/a (图 5b)。

西印度洋—印度洋中脊在地表至 600 km 左右向板块边界离散,最大离散速率达到 4.0 cm/a,在 600 km 至核幔边界水平运动方向转而为向板块中心汇聚,最大汇聚速率在下地幔中下部,达到 1.0 cm/a; 位于西亚的伊朗地块—图兰地块在地表至约 300 km 离散运动,在 300 km 至核幔边界向中心汇聚运动 (图 6a)。

研究发现该剖面上整体是在上地幔物质向板块中心汇聚,其最大汇聚速率在蒙古—北加尔—大兴安岭地块东部下面,达到 8.0 cm/a,在下地幔物质向四周扩散,同样在蒙古—北加尔—大兴安岭地块东部下面扩散速率达到最大,为 8.0 cm/a (图 6b)。

综合分析图 4~6,可以发现东亚下面的物质从地表至核幔边界水平速度几乎在连续变化,其中在上边界运动速率最大,上下界面水平运动方向相反,表明存在着顶、底反向的环流。在上地幔欧亚大陆整体是由西向东运动,在下地幔逐渐转为由东向西运动,其绝对运动速率从地表至核幔边界逐渐变小。青藏高原—缅甸—印度尼西亚特提斯俯冲带整体在上地幔向北俯冲,在下地幔向南运动。

## 4 结论

笔者根据地震层析成像得到地震波速度异常,假定波速异常与密度异常呈线性关系,并考虑地幔自重及压缩性,用粘滞流理论计算地幔流。计算地幔垂直流动形式及流动速度,获得全球垂直地幔流运动模式。得到的对流模型能较好地解释大地水准面、板块运动、核幔边界地形以及地表地形等地球物理观测数据。

根据东亚地幔垂直和切向流动速度研究,可以发现东亚及西太平洋大体分为 3 个区域物质流动方式:东亚边缘裂谷系和西太平洋边缘海为下部会聚上部扩散的地幔上升流,尤其对于南海来说,研究结果表明<sup>[19-24]</sup>,南海地区构造特征——从上到下的大体结构是上部呈“工”字型结构、中间为圆柱型、底部呈发散形的地幔上升流;西伯利亚地幔物质上部会聚下部扩散的“人”字型下降流;青藏高原—缅甸—印度尼西亚特提斯俯冲带上部会聚下部扩散的“人”字型地幔下降流。东亚西太平洋分为 3 个区域地幔对流与地表西太平洋构造域、古亚洲构造域和特提斯—喜马拉雅构造域相吻合。东亚中部的物质在地幔深部无明显流动趋势。地幔上升流起源于核幔边界,主要表现在下地幔和上地幔下部,到上地幔顶部和地表与现代热点位置符合。

## 参考文献(References):

- [1] 朱介寿, 曹家敏, 蔡学林, 等. 东亚及西太平洋边缘海高分辨率面波层析成像 [J]. 地球物理学报, 2002, 45(5): 646~664.  
Zhu Jieshou, Cao Jiamin, Cai Xuelin, et al. High resolution surface wave tomography in east Asia and west Pacific marginal sea [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2002, 45(5): 679~698.
- [2] 朱介寿. 下地幔及核幔边界结构及地球动力学 [J]. 地球科学进展, 2000, 15(2): 139~142  
Zhu, Jieshou. Structure of lower mantle and core-mantle boundary region and its geodynamics [J]. Advance in Earth Sciences [J]. 2000, 15(2): 139~142 (in Chinese with English abstract).
- [3] Becker T W, Lapo Boschi. A comparison of tomography and geodynamic mantle model [J]. Geochemistry Geophysics Geosystems, 2002, 3: 2001GC000168.
- [4] 石耀霖. 地幔对流研究的一些新进展 [J]. 地球科学进展, 2001, 16(4): 496~500.  
Shi Yaolin. Advances in mantle convection study [J]. Advance in Earth Sciences, 2001, 16(4): 496~500 (in Chinese with English abstract).
- [5] 叶正仁, Hager B H. 全球地表热流的产生与分布 [J]. 地球物理学报, 2001, 44(2): 171~179.  
Ye Zhengren, Hager B H. Generation and distribution of global heat flow [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2001, 44(2): 171~179 (in Chinese with English abstract).
- [6] 叶正仁. 地幔对流的数值模拟及其与表面观测的关系 [J]. 地球物理学报, 1993, 36(1): 27~36.  
Ye Zhengren. The numerical modelling of mantle convection and its relationship to surface observations [J]. Chinese Journal of Geophysics, 1993, 36(1): 27~36 (in Chinese with English abstract).
- [7] Hager B H. Subducted slabs and the geoid: Constraints on mantle rheology and flow [J]. J. Geophys. Res., 1984, 89: 6003~6015.
- [8] Forte A M, Mitrovica J X. Deep-mantle high-viscosity flow and thermochemical structure inferred from seismic and geodynamic data [J]. Nature, 2001, 410: 1049~1056.
- [9] Forte A M. Seismic-geodynamic constraints on mantle flow:



- implications for layered convection, mantle viscosity, and seismic anisotropy in the deep mantle [J]. *Geophysical Monograph* 2000,117: 3~36.
- [10] Forte A M, Dziewonski A M. Aspherical structure of the mantle, tectonic plate motions, non-hydrostatic geoid, and topography of the core-mantle boundary [J]. *Geophysical Monograph*, 1993, 72: 135~166, AGU.
- [11] Forte A M, Peltier W R. Viscous flow models of global geophysical observables, 1 Forward problems [J]. *J.Geophys. Res.*, 1991, 96:20 131~20 159.
- [12] Forte A M, Peltier W R. Plate tectonics and aspherical earth structure: The importance of poloidal-toroidal coupling [J]. *J Geophys Res*, 1987,92:3645~3679.
- [13] 傅容珊, 黄建华, 董树谦, 等. 利用地震层析成像数据计算地幔对流新模型的探讨[J]. *地球物理学报*, 2003,46(6):772~778.  
Fu Rongshan, Huang Jianhua, Dong Shuqian, et al. A new mantle convection model constrained by seismic tomography data [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2003,46 (6):772~778 (in Chinese with English abstract).
- [14] 傅容珊, 郑勇, 常筱华, 等. 地震层析成像板块构造及地幔演化动力学[J]. *地球物理学进展*, 2001,16(4):85~95.  
Fu Rongshan, Zheng Yong, Chang Youhua, et al. Seismic tomography and the evolution of the earth's mantle [J]. *Progress in Geophysics*, 2001, 16(4): 85~95(in Chinese with English abstract).
- [15] 傅容珊, 黄建华. 利用多种地球物理观测资料直接反演地幔对流模型[J]. *地球物理学报*, 1993,36(3):298~307.  
Fu Rongshan, Huang Jianhua. Inversion of mantle convection model using several geophysical data [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1993,36(3):298~307(in Chinese with English abstract).
- [16] Boschi L, Dziewonski A M. Whole Earth tomography from delay times of P, PcP, and PKP phases: Lateral heterogeneity in the outer core or radial anisotropy in the mantle? [J]. *J.Geophys.Res*, 2000, 105:13 675~13 696.
- [17] De Mets C R , Gordon R G. Current plate motions [J]. *Geophys. J. Int.*, 1990,101:425~478.
- [18] Press W H, Flannery B P, Teukolsky S A, et al .*Numerical Recipes* [M]. Cambridge University Press, 1986.
- [19] 蔡学林, 朱介寿, 曹家敏, 等. 东亚西太平洋巨型裂谷体系岩石圈与软流圈结构及动力学[J]. *中国地质*, 2002. 29(3): 234~245.  
Cai Xuelin, Zhu Jieshou, Cao Jiamin, et al. Structure and dynamics of lithosphere and asthenosphere in the gigantic East Asian-West Pacific rift system [J]. *Geology in China*, 2002,29 (3):234~245 (in Chinese with English abstract).
- [20] 蔡学林, 朱介寿, 程先琼. 南海地区软流圈“工”字型低速异常带特征及构造意义[A]. *中国地球物理学会年刊*. 2002,247~247.  
Cai Xuelin, Zhu Jieshou, Cheng Xianqiong. The characteristics and Implication of “工” Type low velocity zone in astheosphere of South China Sea [A]. *Annual of the Chinese Geophysical Society*, 2002, 247~247(in Chinese with English abstract).
- [21] 王嘹亮, 吴能友, 周祖翼, 等. 南海西南部北康盆地新生代沉积演化史[J]. *中国地质*, 2002,29(1):96~102.  
Wang Liaoliang, Wu Nengyou, Zhou Zuyi, et al. History of the Cenozoic sedimentary evolution of the Beikang Basin, southwestern South China Sea [J]. *Geology in China*, 2002,29(1): 96~102(in Chinese with English abstract).
- [22] 刘海龄, 阎贫, 孙岩, 等. 南沙微板块的层块构造 [J]. *中国地质*, 2002,29(4):374~381.  
Liu Hailing, Yan pin, Sun Yan, et al. Layer-block tectonics of the Nansha microplate [J]. *Geology in China*, 2002,29(4): 374~381 ( in Chinese with English abstract).
- [23] 姚伯初, 万玲, 吴能友. 大南海地区新生代板块构造活动 [J]. *中国地质*, 2004,31(2):113~122.  
Yao Bochu, Wan Ling, Wu Nengyou. Cenozoic Plate Tectonic Activities in the Great South China Sea Area [J]. *Geology in China*, 2004,31(2):113~122(in Chinese with English abstract).
- [24] 于兴河, 张志杰. 南海北部陆坡区新近系沉积体系特征与天然气水合物分布的关系[J]. *中国地质*, 2005,32(3):470~476.  
Yu Xinghe, Zhang Zhijie. Characteristics of Neogene depositional systems on the northern continental slope of the South China Sea and their relationships with gas hydrate [J]. *Geology in China*, 2005,32(3):470~476 (in Chinese with English abstract).

## Mantle flow velocity of East Asia

CHENG Xian-qiong, ZHU Jie-shou, CAI Xue-lin

(Department of Geophysics, School of Information Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu, 610059, Sichuan, China)

**Abstract:** Based on the high-resolution body wave tomographic images and relevant geophysical data the authors calculated the form and vertical and tangential velocities of mantle flow. Mantle flow in East Asia and the Western Pacific may fall into three patterns: (1) in the East-Asia marginal rift system and western Pacific marginal seas the mantle flow is marked by an upwelling mantle flow, characterized by flow convergence in the lower mantle and divergence in the upper mantle, especially for the South China Sea, where the structure of the upwelling mantle flow may be roughly outlined as a “工” shape in the upper mantle, a column shape in the middle and a divergent shape at the bottom; (2) in Siberia there is a “人”-shaped downwelling mantle flow, characterized by mantle material convergence in the upper mantle and divergence in the lower mantle; and (3) in the Qinghai-Tibet Plateau-Burma-Indonesia Tethys subduction zone, there is a “人”-shaped downwelling mantle flow, which is also characterized by flow convergence in the upper mantle and divergence in the lower mantle. The three regions of mantle convection beneath East Asia and the Western Pacific are in agreement with Western Pacific, Paleo-Asiatic and Tethyan tectonic domains. The material in the central part of East Asia shows no trend of flow in the deep interior of the mantle. The upwelling mantle flow originates from the core-mantle boundary and is mainly manifested in the lower mantle and lower part of the upper mantle. At the top of the upper mantle and at the surface, its location coincides with that of modern hot spots. The rate of vertical mantle flow is about 1 to 4 cm per year and the tangential rate is 1 to 10 cm per year.

**Key words:** seismic body wave tomography; mantle flow in East Asia; vertical flow velocity; tangential flow velocity

---

**About the first author:** CHENG Xian-qiong, female, born in 1974, doctor and lecturer; engages in studies of seismic wave tomography and geodynamics; E-mail: chxq@cdut.edu.cn.