

# 中国及邻近陆海地区软流圈三维结构 及其与岩石圈的相互作用

蔡学林<sup>1</sup> 朱介寿<sup>1,2</sup> 曹家敏<sup>1</sup> 程先琼<sup>1</sup>

(1. 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059;  
2. 成都理工大学油气藏地质与开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610059)

**提要:**通过中国及邻近陆海地区天然地震面波层析成像三维  $V_s$  速度结构的系统地质构造解析, 笔者论述了中国及邻近陆海地区软流圈三维结构特征, 发现该区软流圈内既有高速块体, 又有低速异常体, 显示软流圈内存在纵向与横向上的不均匀性, 研究软流圈内低速异常体三维几何结构表明, 南海低速异常体呈复蘑菇状, 结合地幔体波层析成像研究显示, 南海地区存在巨型复蘑菇状地幔低速柱头。笔者还探讨了软流圈对岩石圈结构的影响及其相互作用问题。

**关键词:**软流圈; 岩石圈; 面波层析成像; 构造解析; 高速块体; 复蘑菇状低速异常体; 三维结构; 中国  
**中国分类号:** P544      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-3657(2006)04-0804-12

软流圈是地球上地幔地震波速度相对较低的圈层部分, 又称低速带或上地幔低速层, 它界于岩石圈与固结圈之间。研究软流圈对认识岩石圈三维结构具有特殊的重要意义, 很多学者对它进行过地球物理特征<sup>[1-6]</sup>和地球化学性质<sup>[7,10]</sup>研究。笔者通过中国及邻近陆海地区天然地震面波层析成像三维  $V_s$  速度结构( $2^\circ \times 2^\circ$  网格)的系统构造解析, 在编制出软流圈厚度分布图和  $V_s$  速度分布图以及构造解析断面的基础上, 结合构造地质学和岩石地球化学等标志, 首次系统论述了中国及邻近陆海地区软流圈三维结构特征。研究结果显示, 中国及邻近陆海岩石圈之下普遍发育  $V_s$  速度相对较低的软流圈, 在软流圈内部既有低速异常体, 又有高速块体, 由此表明, 软流圈内部结构存在纵向和横向上的不均匀性, 反映研究区软流圈内部温度、物质组成和结构等方面有明显的差异。关于面波  $V_s$  速度资料来源、天然地震面波层析成像原理与方法、分辨率等方面的内容, 笔者<sup>[1,2,8,11,12]</sup>发表的学术论文中已有详细论述。本文主要根据层析成像  $V_s$  速度分布众多剖面构造解析的结果, 论述软流圈三维结构特征及其与岩石圈的相互作用。

## 1 中国及邻近陆海软流圈三维几何结构

### 1.1 软流圈顶底界面判别标志

在克拉通型、增厚型和太平洋型岩石圈中<sup>[13]</sup>, 一般将面波

$V_s$  速度 4.45 km/s 左右作为岩石圈底界面, 或软流圈顶界面的判别标志<sup>[11,14]</sup>。由于减薄型岩石圈<sup>[13]</sup>  $V_s$  速度整体较小, 在划分减薄型岩石圈底界面或软流圈顶界面时,  $V_s$  速度应视整个岩石圈上地幔  $V_s$  速度变化而定, 一般均小于 4.45 km/s, 多为 4.35~4.40 km/s<sup>[8,11]</sup>(图 1)。而软流圈底界面, 一般将面波  $V_s$  速度值定在 4.45~4.50 km/s<sup>[8]</sup>, 以此作为划分软流圈底界面或固结圈<sup>[13]</sup>的判别标志。

根据上述判别标志, 在  $60^\circ \sim 160^\circ \text{E}$ ,  $10^\circ \text{S} \sim 60^\circ \text{N}$  范围内, 按  $2^\circ \times 2^\circ$  读出每条面波速度分布的地质构造解析剖面上软流圈顶、底界面埋深, 软流圈内  $V_s$  速度最低值, 并计算出软流圈厚度值, 以软流圈构造分区为单位计算出平均值, 括弧内数代表参加平均的数据数(表 1)。这些众多数据为探讨中国及邻近陆海地区软流圈三维结构提供了重要依据。

### 1.2 软流圈顶界面埋深变化趋势

根据上述判别标志, 可知软流圈顶界面或岩石圈底界面起伏变化极大, 一般在 55~195 km, 变化幅度高达 130~140 km, 其中, 塔里木地块软流圈顶界面埋深平均值为 170 km, 青藏高原软流圈顶界面埋深平均值为 165 km, 华北地块软流圈顶界面埋深平均值仅有 77 km, 西太平洋地区软流圈顶界面埋深平均值为 76 km(表 1)。

### 1.3 软流圈底界面埋深变化趋势

从天然地震面波层析成像  $V_s$  速度结构的构造解析表

收稿日期: 2005-12-27; 改回日期: 2006-04-07

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(49734150, 40234047)和国土资源部重点科技专项计划项目(20001010206)联合资助。

作者简介: 蔡学林, 男, 1935 生, 教授, 从事构造地质学和深部地质研究; E-mail: Cai Xuelin 1935@sohu.com。

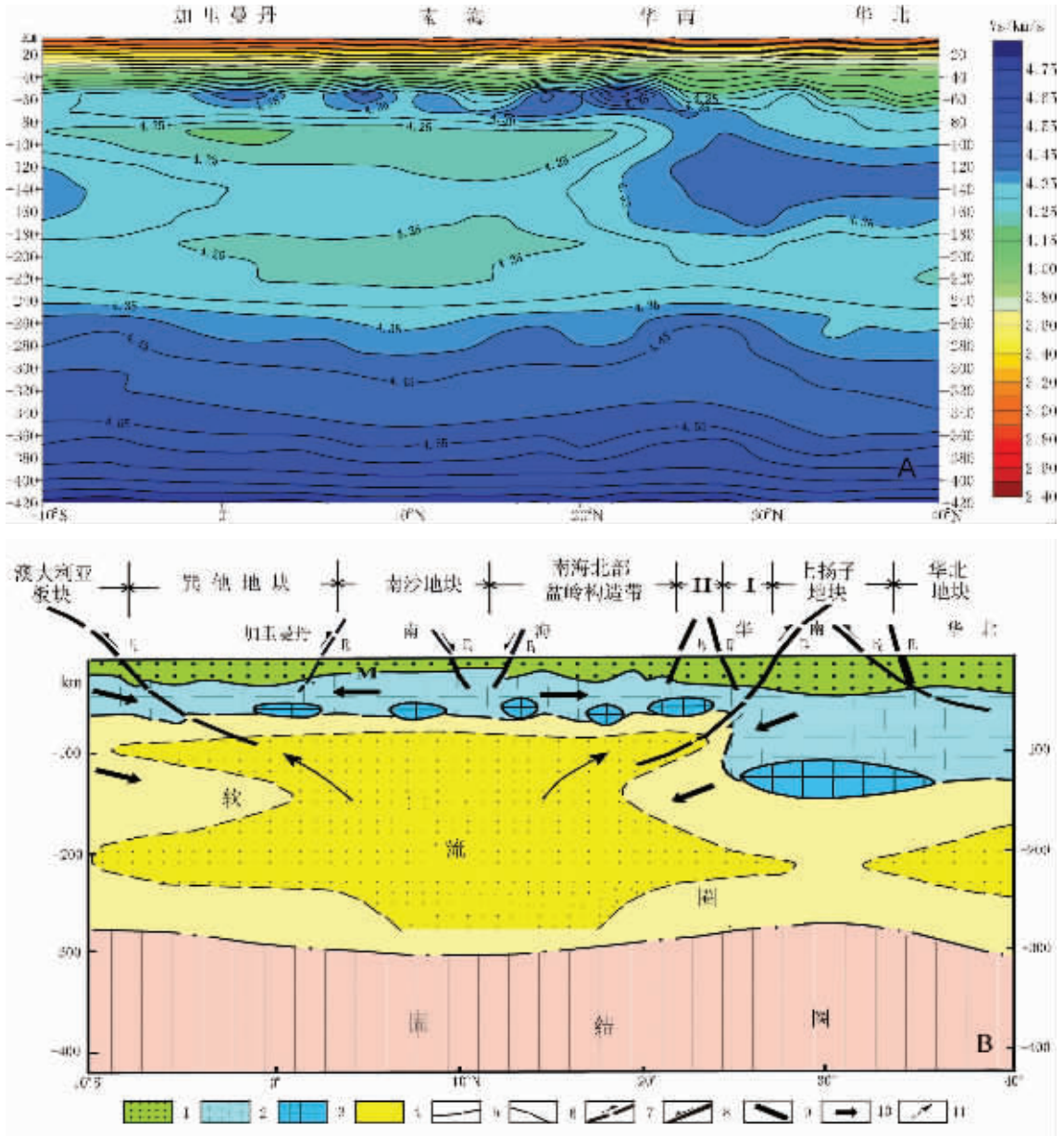


图 1 南海—华北地区岩石圈及软流圈结构与动力学模式

A—面波层析成像  $V_s$  速度剖面 ( $112^\circ\text{E}$ ); B—构造解析剖面: 1—岩石圈地壳; 2—岩石圈上地幔; 3—岩石圈中下部高速块体或幔块构造; 4—软流圈内低速异常体; 5—岩石圈底界面; 6—软流圈底界面; 7—俯冲碰撞带及大型逆冲断裂带; 8—伸展断裂带; 9—碰撞缝合带; 10—板块及块体运移方向; 11—软流圈内物质流动方向。 I—赣湘桂构造带; II—云开地块。 M—莫霍面;  $F_1$ —苏门答腊俯冲带;  $F_2$ —武吉米辛俯冲带;  $F_3$ —西南海盆南缘伸展断裂带;  $F_4$ —西南海盆北缘伸展断裂带;  $F_5$ —南海北缘断裂带;  $F_6$ —宁化—大湾断裂带;  $F_7$ —溆浦—黔阳逆冲断裂带;  $F_8$ —青峰逆冲断裂带;  $F_9$ —桐商碰撞缝合带

Fig.1 Lithospheric and asthenospheric structures and dynamic model in the South China Sea-North China region

A— $V_s$  velocity section ( $112^\circ\text{E}$ ) of surface wave tomographic imaging; B—Section of structural analysis: 1—Lithospheric crust; 2—Lithospheric upper mantle; 3—High-velocity block or mantle block tectonics in the middle and lower lithosphere; 4—Low-velocity anomaly in the asthenosphere; 5—Base of the lithosphere; 6—Base of the asthenosphere; 7—Subduction-collision zone or large thrust zone; 8—Extensional fault zone; 9—Collisional suture zone; 10—Direction of plate and block motion; 11—Direction of material flow in the asthenosphere; I—Jiangxi-Hunan-Guangxi tectonic zones; II—Yunkai block. M—Moho;  $F_1$ —Sumatera subduction zone;  $F_2$ —Wujimixin subduction zone;  $F_3$ —Extensional fault zone on the southern margin of the Southwest Sea basin;  $F_4$ —Extensional fault zone on the northern margin of the Southwest Sea basin;  $F_5$ —Northern South China Sea marginal fault zone;  $F_6$ —Ninghua-Dawan fault zone;  $F_7$ —Xupu-Qianyang thrust zone;  $F_8$ —Qingfeng thrust zone;  $F_9$ —Tong-Shang collisional suture zone

明,软流圈底界面起伏变化较明显,一般在埋深 260~325 km,平均变化幅度达 70 km。在亚洲北部和西部,软流圈底界面埋深较浅,一般在 260~280 km,例如,塔里木盆地软流圈底界面埋深平均值为 268 km,在亚洲东部、东南亚地区和西太平洋地区软流圈底界面埋藏最深,平均值为 290~320 km,其中鄂霍茨克海地区软流圈底界面埋深平均值为 318 km,西太平洋软流圈底界面埋深平均值为 308 km(表 1)。与岩石圈底界面或软流圈顶界面比较,软流圈底界面起伏变化较小,这一现象表明,软流圈由底部到顶部的不均匀性更加明显。

#### 1.4 软流圈厚度分布趋势

笔者在构造解析时,根据上述判别标志,标出每条面波层析成像  $V_s$  速度结构剖面中软流圈顶和底界面,按  $2^\circ \times 2^\circ$  网格读出软流圈顶和底界面埋深,计算出软流圈厚度,共获得 3 495 个数据,首次编制出东亚西太平洋地区软流圈厚度分

布图(图 2),该图显示东亚西太平洋地区普遍发育软流圈,但软流圈厚度变化是很大的,显示该区软流圈西薄东厚和北薄南厚的变化趋势。在亚洲大陆西部软流圈厚度较薄,一般为 100~150 km,例如,塔里木克拉通型岩石圈下软流圈厚度平均值仅有 98 km,在青藏增厚型岩石圈以下软流圈厚度亦较小,为 140~160 km,从亚洲大陆西部到亚洲大陆东部逐渐增厚到 150~200 km,在华南减薄型岩石圈东缘软流圈厚达 230~250 km(图 3),鄂霍茨克海软流圈平均厚度最大,为 254 km,西太平洋海域软流圈厚 200~250 km(表 1),总之,从亚洲西部到西太平洋软流圈厚度有由薄变厚的变化趋势(图 2)。亚洲大陆北部软流圈厚度较薄,一般为 120~140 km,其中西伯利亚地块软流圈为 123 km,向南到蒙古西部至华北一线软流圈厚度在 150~210 km,向南到青藏高原及邻区软流圈又有减薄的趋势,为 140~160 km,在北印度洋至东南亚软流圈厚

表 1 中国及邻近陆海地区软流圈构造分类

Table 1 Types of asthenospheric structures in China and its adjacent land and sea areas

软流圈构造分区	地壳厚度平均值(km)	地壳 $V_p$ 速度平均值(km/s)	岩石圈 $V_s$ 速度平均值(km/s)	软流圈顶界面埋深(km)	软流圈厚度平均值(km)	软流圈 $V_s$ 速度平均值(km/s)	软流圈底界面埋深(km)	实例
北亚高速区	40(80)	6.18(80)	4.58(80)	182(80)	123(80)	4.33(80)	304(80)	西伯利亚
中 南 亚 高 速 区	46.77(335)	6.29(335)	4.62(28)	170(28)	98(28)	4.36(28)	268(28)	塔里木和上 扬子地区
青藏高速区	63.09(216)	6.29(216)	4.60(58)	165(58)	141(64)	4.34(64)	304(64)	青藏地区
东亚大陆边缘带 低速区	34.18(442)	6.24(442)	4.37(25)	77(25)	240(135)	4.26(135)	301(135)	东北、华北、 华南及东亚 大陆边缘海
西太平洋低速区	11.93(225)	5.44(225)	4.79(225)	76(225)	231(225)	4.28(225)	308(225)	西太平洋

注: 括弧内数字为参加的平均数。

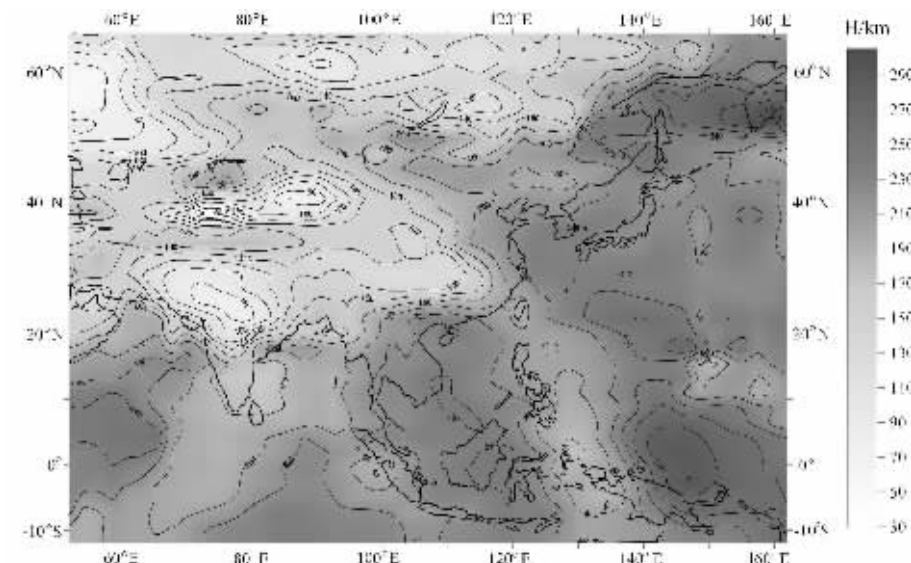


图 2 东亚西太平洋地区软流圈厚度分布图

Fig.2 Asthenospheric thickness distribution in the East Asia-western Pacific region

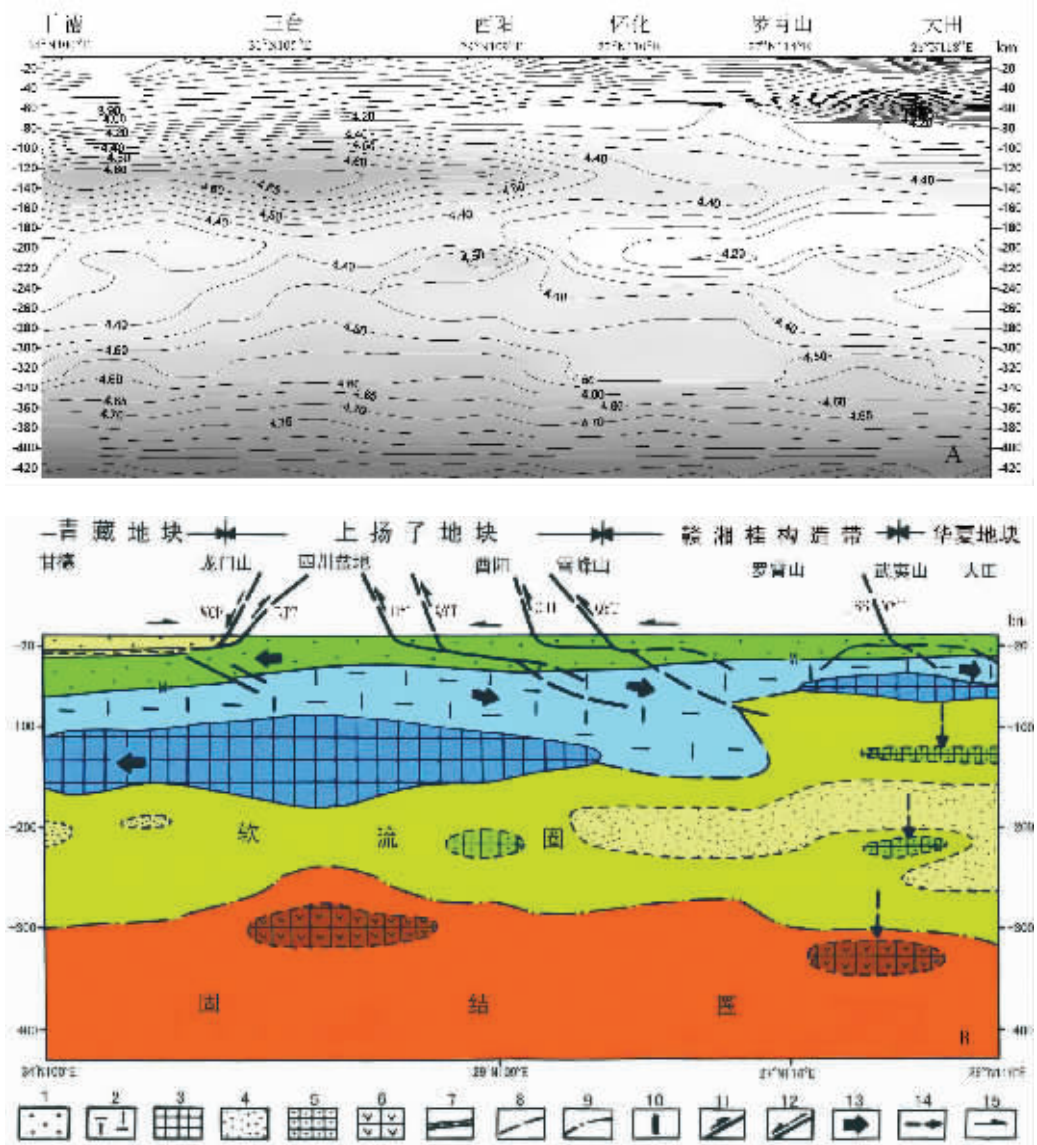


图 3 龙门山—雪峰山—武夷山岩石圈及软流圈结构构造与大陆动力学模式

A—面波层析成像 Vs 速度剖面(甘德—大田);B—构造解析剖面:1—岩石圈地壳;2—岩石圈上地幔;

- 3—青藏地块、上扬子地块及华南地块岩石圈中下部高速块体或幔块构造;4—软流圈内部低速异常带;5—软流圈内部高速块体;
  - 6—固结圈内部高速块体;7—壳内低速层;8—岩石圈底界面;9—软流圈底界面;10—古板块俯冲碰撞缝合带;11—大型逆冲断裂带;
  - 12—逆冲断裂带或伸展断裂带;13—板块及块体相对运移方向;14—岩石圈、软流圈高速块体下沉方向;15—地壳表层岩块运移方向;
- M—莫霍面;WCF—汶川断裂带;BJT—北川—九顶山逆冲断裂带;HYT—华盖山逆冲断裂带;QYT—七曜山逆冲断裂带;CHT—慈利—花垣逆冲断裂带;XQT—溱浦—黔阳逆冲断裂带;JSS—江山—绍兴俯冲碰撞缝合带;WYT—武夷山逆冲断裂带

Fig.3 Lithosphere and asthenosphere structures and continental dynamic model for the Longmenshan-Xuefengshan-Wuyishan area  
A—Vs velocity section of surface wave tomographic imaging (Gande-Daitian); B—Section of structural analysis: 1—Lithospheric crust; 2— Lithospheric upper mantle; 3—High-velocity block or mantle block tectonics in the middle and lower lithosphere beneath the Qinghai-Tibet block, Upper Yangtze block and South China block; 4—Low-velocity anomaly in the asthenosphere; 5—High-velocity block in the asthenosphere; 6—High-velocity block in the stereosphere; 7—Low-velocity layer in the crust; 8—Base of the lithosphere; 9—Base of the asthenosphere; 10—Subduction and collisional suture of Palaeo-plate; 11—Large thrust zone; 12—Thrust fault zone or extensional fault zone; 13—Relative motion direction of plates and blocks; 14—Subsidence direction of high-velocity blocks in the lithosphere and asthenosphere; 15—Motion direction of supracrustal blocks. M—Moho; WCF—Wenchuan fault zone; BJT—Beichuan-Jiulingshan thrust zone; HYT—Huayingshan thrust zone; QYT—Qiyaoshan thrust zone; CHT—Cili-Huayuan thrust zone; XQT—Xupu-Qianyang thrust zone; JSS—Jiangshan-Shaoxing collisional suture zone; WYT—Wuyishan thrust zone

度又增加到 200~230 km (图 1),总的来看,从亚洲北部到印度洋地区软流圈厚度有由薄→厚→薄→厚的变化趋势 (图 2)。软流圈厚度较小表明该区为一低热梯度区,岩石圈不易发生构造变形;软流圈较厚的地区是一高热梯度区,岩石圈受热发生构造变形,岩石圈表层中新世代岩浆侵入和火山活动较发育。

## 2 中国及邻近陆海软流圈速度结构特征

为了分析软流圈面波  $V_s$  速度分布规律,探讨其内部结构特征,根据天然地震面波层析成像  $V_s$  速度剖面的构造解析,按  $2^\circ \times 2^\circ$  读出每个结点的软流圈  $V_s$  速度最低值,共 3 495 个数据,编制出东亚西太平洋软流圈速度分布图(图 4)。从图 4 看出亚洲西部和北部软流圈  $V_s$  速度较高,而在亚洲东部及边缘海最低,西太平洋地区软流圈  $V_s$  速度介于上述两者之间。根据软流圈面波  $V_s$  速度大小,结合软流圈厚度分布特征,可将研究区软流圈大体划分为 4 个构造:北亚高速区、中南亚高速区、东亚大陆边缘带低速区和西太平洋低速区(图 4)。这些特征为分析研究区岩石圈构造变形及动力学提供了重要依据。

### 2.1 北亚软流圈 $V_s$ 高速区结构

北亚地区软流圈  $V_s$  速度值较高,一般软流圈  $V_s$  速度  $\sigma$  为 4.30~4.38 km/s,西伯利亚地块和哈萨克斯坦地块软流圈  $V_s$  平均速度为 4.33 km/s (表 1),而东欧地块软流圈  $V_s$  平均速度最高,达 4.38 km/s(图 4)。面波  $V_s$  速度相对较高的软流圈,其热力学活动性较差,相应岩石圈厚度与  $V_s$  平均速度较高(表 1),岩石圈构造变形相对较弱。

### 2.2 中南亚软流圈 $V_s$ 高速区结构

从青藏高原软流圈  $V_s$  速度结构分析表明, $V_s$  速度值相对较高(图 4)。例如,青藏地块东北段软流圈  $V_s$  平均速度为 4.33 km/s,而东段软流圈  $V_s$  平均速度为 4.34 km/s (图 3),中段软流圈  $V_s$  平均速度为 4.36 km/s,西段软流圈  $V_s$  平均速度为 4.38 km/s。青藏地块软流圈  $V_s$  平均速度整体为 4.34 km/s (表 1)。因此,青藏高原软流圈  $V_s$  平均速度与邻区克拉通型岩石圈下的软流圈  $V_s$  平均速度相似(图 4),这些特征表明,青藏高原增厚型岩石圈上地幔和软流圈整体是一低热梯度区,它为形成青藏高原提供了较好的构造环境,当今青藏高原新生代较强的构造变形和岩浆活动主要反映在岩石圈中上部壳幔过渡带和地壳中。

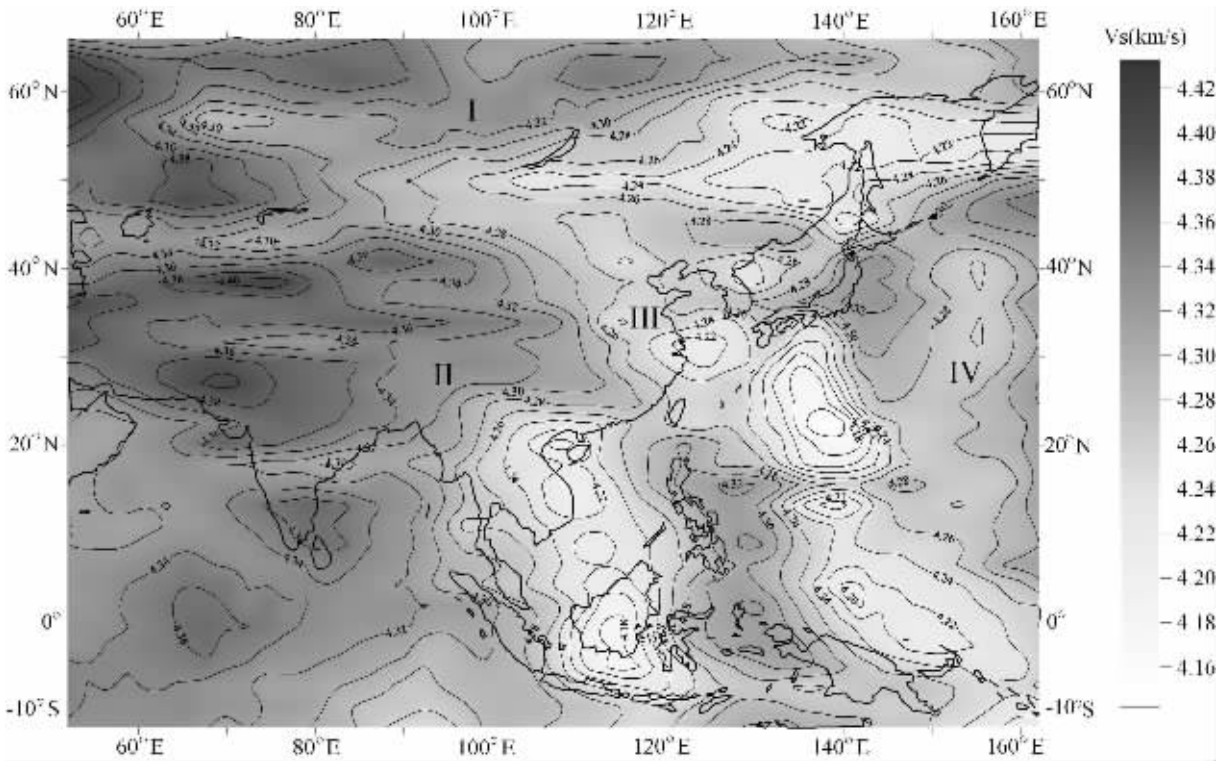


图 4 东亚西太平洋地区软流圈速度分布图

I—北亚高速区; II—中南亚高速区; III—东亚大陆边缘带低速区; IV—西太平洋低速区

Fig.4  $V_s$  Velocity distribution of the asthenosphere in East Asia and the western Pacific region

I—High-velocity region of North Asia; II—High-velocity region of Central-South Asia; III—Low-velocity region of the continental margin of East Asia; IV—Low-velocity region of the western Pacific

### 2.3 东亚大陆边缘带软流圈 Vs 低速区结构

东亚大陆边缘带岩石圈属减薄型岩石圈,岩石圈中上部发育全球最大的夭折的巨型裂谷体系,笔者<sup>[9]</sup>曾作过系统论述。其下的中国东部软流圈 Vs 速度值普遍比邻区低,多为 4.15~4.28 km/s (图 4),吉黑地块软流圈 Vs 平均速度为 4.24 km/s,华北地块和华南地块软流圈 Vs 平均速度为 4.25 km/s,边缘海软流圈 Vs 平均速度更低,鄂霍茨克海软流圈 Vs 平均速度为 4.24 km/s,东海地区软流圈 Vs 平均速度为 4.25 km/s,南海及婆罗洲地区 Vs 速度值最低为 4.10~4.22 km/s。这些速度特征显示该区为一软流圈高热梯度区,易引起岩石圈受热发生构造变形<sup>[9]</sup>,以及地表中生代岩浆活动的广泛发育<sup>[17-22]</sup>。根据新生代碱性玄武岩包体反映的地幔组成,在矿物和化学上明显不同于典型克拉通地区或本区古生代时期的软流圈上地幔,而是属于大洋型软流圈上地幔<sup>[20]</sup>。

### 2.4 西太平洋软流圈 Vs 低速区结构

西太平洋地区软流圈 Vs 平均速度值相对较低,平均值为 4.28 km/s (表 1),西太平洋西部边缘软流圈 Vs 平均速度更低(图 4),夏洛林海盆软流圈 Vs 平均速度仅有 4.24 km/s,菲律宾海板块软流圈 Vs 平均速度为 4.25 km/s。从整体来说,西太平洋软流圈内 Vs 速度大于东亚大陆边缘带软流圈 Vs 速度值,小于北亚和中南亚软流圈 Vs 速度,其 Vs 速度在横

向上变化较小。

## 3 软流圈内高速块体及形成方式

通过中国及邻近陆海软流圈厚度与速度分布特征论述可知,软流圈结构在横向上与纵向上是极不均匀的,其中软流圈内存在形态不同和组合方式不同的高速块体是这一不均匀性的重要表现形式之一。

### 3.1 软流圈内高速块体特征

笔者在构造解析中将面波 Vs 速度值均高于周围软流圈内面波 Vs 速度值的区域称为高速块体<sup>[9]</sup>(图 3)。软流圈内部的高速块体具有如下特征:(1)软流圈内部的高速块体面波 Vs 速度均高出周围软流圈内部的 Vs 速度值,而且高出很多。例如,在龙门山—武夷山天然地震面波层析成像 Vs 速度结构剖面中,显示软流圈内存在面波 Vs 速度较高的高速块体<sup>[8,23]</sup>(图 3)。这种高速块体中心面波 Vs 速度高达 4.60~4.65 km/s,由中心向边缘 Vs 速度逐渐降低,一般为 4.40~4.50 km/s,高速块体之外 Vs 速度均小于 4.40 km/s。(2)软流圈内部高速块体的规模较小,特别是亚洲大陆和边缘海地区软流圈内部高速块体长度多在 100~500 km,厚度一般在 30~50 km,形似透镜状(图 3)。在西太平洋地区软流圈内部高速块体较大,其长度多在 500~1000 km,厚度多为 50~80 km,呈似层状或扁平状

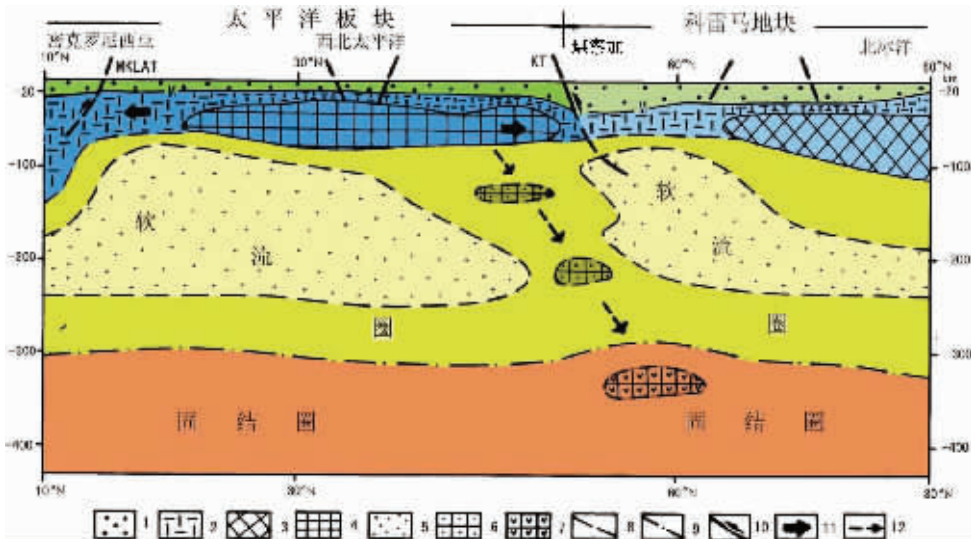


图 5 密克罗尼西亚—西北太平洋—北冰洋地区岩石圈及软流圈结构略图

面波层析成像地质解析剖面(160E):1—岩石圈地壳;2—岩石圈上地幔;3—科雷马地块岩石圈中下部高速块体(幔块构造);4—太平洋板块岩石圈中下部高速块体;5—软流圈内低速异常带;6—软流圈内高速块体;7—固结圈内高速块体;8—岩石圈底界面;9—软流圈底界面;10—俯冲碰撞带;11—板块或块体移移方向;12—上地幔高速块体移移方向;M—莫霍面;MKLAT—密克罗尼西亚俯冲带;KT—千岛俯冲带

Fig.5 Lithospheric and asthenospheric structures in the Micronesia—northwestern Pacific—Arctic Ocean region

Section of geological analysis of surface wave tomographic imaging (160E):1—Lithospheric crust;2—Lithospheric upper mantle;3—High-velocity block or mantle block tectonics in the middle and lower lithosphere beneath the Kolyma massif;4—High-velocity block in the middle and lower lithosphere beneath the Pacific plate;5—Low-velocity anomaly in the asthenosphere;6—High-velocity block in the asthenosphere;7—High-velocity block in the stereosphere;8—Base of the lithosphere;9—Base of the asthenosphere;10—Subduction-collision zone;11—Motion direction of plates and blocks;12—Motion direction of high-velocity blocks in the upper mantle. M—Moho; MKLAT—Micronesia subduction zone; KT—Kurile subduction zone

(图5)。(3)软流圈内部高速块体多以单体分布于软流圈中,在华南地区软流圈内部高速块体比较发育,并呈斜列式排列在软流圈和固结圈中(图3)。通常在东亚大陆边缘及边缘海和西太平洋地区软流圈内部高速块体比较发育,特别是东亚及西太平洋边缘海地区软流圈内部高速块体最发育。克拉通地区或青藏地块软流圈内部高速块体发育较少,仅在边缘带有少数高速块体发育,例如,上扬子地块边缘软流圈仅有个别高速块体分布(图3)。

### 3.2 软流圈内高速块体形成方式

软流圈内小型高速块体的形成方式可能是多种成因的,根据笔者<sup>[23]</sup>对华南地区软流圈内部高速块体的研究,高速块体形成方式作如下两种推断:软流圈内部高速块体的一种形成方式,可能是古板块岩石圈向软流圈俯冲和断离到软流圈中,因此,它们是古板块俯冲留下的岩石圈的残留体,上扬子地块软流圈和固结圈中的高速块体可能是这种方式形成的(图3),太平洋板块岩石圈向北西北向俯冲和断离时,这些岩石圈俯冲断片在软流圈和固结圈中构成十分壮观的斜列式排列(图5)。另一种形成方式可能是岩石圈底部发生拆离作用或去根作用,在重力作用下,岩石圈底部的高速块体沉陷到软流圈内所致,相应地引起软流圈上升。华南地块软流圈内的小型高速块体可能是这种作用形成的<sup>[23]</sup>,该区在中生代燕山期以来曾发生大规模岩石圈去根作用,因此,大陆根或岩石圈根消失,其中一部分沉陷到了软流圈中(图3)。

## 4 软流圈内低速异常体特征及其分布规律

### 4.1 软流圈内低速异常体特征

通常软流圈内部面波  $V_s$  速度,低于上覆岩石圈底部的面波  $V_s$  速度,亦低于下伏固结圈的面波  $V_s$  速度,为了便于进一步分析软流圈的结构特征和不均匀性,笔者将软流圈内部面波  $V_s$  速度小于 4.30 km/s 的区域称为低速异常体<sup>[8,11,23]</sup>,并将它划分出来,以便分析它在软流圈中的分布规律及其对岩石圈变形的影响。软流圈内低速异常体具有如下特征:(1)软流圈内部低速异常体  $V_s$  速度值最低,变化范围为 4.10~4.30 km/s。菲律宾海板块内马里亚纳海槽低速异常体  $V_s$  速度为 4.15~4.18 km/s,婆罗洲低速异常体  $V_s$  速度为 4.17~4.20 km/s,南海西部北部湾至越南昆嵩地区低速异常体  $V_s$  速度为 4.19~4.22 km/s(图1、4),鄂霍次克海和东海等地区低速异常体  $V_s$  速度为 4.20~4.22 km/s,这些软流圈内部低速异常体  $V_s$  速度最低的上覆岩石圈地壳多数是现今构造最活跃的地区之一。(2)通常规模较大,分布范围较广。研究表明,除克拉通地区和青藏高原软流圈内部低速异常体不发育外,在东亚大陆边缘至西太平洋地区软流圈内低速异常体十分发育,华南地区软流圈内,面波  $V_s$  速度小于 4.30 km/s 的低速异常普

遍发育,在剖面范围内不仅延伸长达 1000 km 以上,而且厚度大,为 50~100 km (图3),相应面波  $V_s$  速度值较低,为 4.15~4.30 km/s。在东经 150°以东的太平洋板块软流圈内部从南到北均发育低速异常体,延伸长达 8 000 km 以上,但厚度仅为 50~150 km (图6)。低速异常体的发育为岩石圈的构造变形提供了物性和热动力条件。(3)三维空间形态较复杂。有层状低速异常体、似层状低速异常体、透镜状低速异常体、似柱状低速体和复蘑菇状低速异常体等。

### 4.2 南海复蘑菇状低速异常体及其构造意义

通过东亚西太平洋地区岩石圈与软流圈  $2^\circ \times 2^\circ$  面波层析成像  $V_s$  速度结构的构造解析显示,南海地区软流圈存在巨大的“工”字型低速异常体<sup>[24]</sup>(图1),全球地幔体波层析成像<sup>[11,25]</sup>研究地球三维结构时,推断南海地区地幔存在深达 2 000 km 以上的巨型地幔低速异常柱,从地幔整体结构来看,南海地区软流圈内巨大的“工”字型低速异常体<sup>[24]</sup>,可能为南海巨型地幔低速柱的柱头<sup>[26]</sup>。与一般地幔柱头呈蘑菇状型式<sup>[6,7]</sup>或球状头部不同,该区地幔低速柱的柱头在南海及邻区岩石圈以下的软流圈上地幔中呈复蘑菇状柱头型式(图1)发育。从东经 100°~122°的南北向面波层析成像  $V_s$  速度剖面上(图1),以及从南纬 6°至北纬 20°的东西向面波层析成像  $V_s$  速度剖面上,低速异常体均表现为复蘑菇状柱头型式,复蘑菇状柱头东西宽为 1 800~2 500 km,南北宽 2 500~2 800 km。平面形态呈椭圆形,近南北向延伸,与南海平面形态近似。柱头的中心大体在南海中部北纬 6°~16°,东经 110°~116°的区域内,复蘑菇状柱头顶界面埋深较浅,一般在 68~80 km,其中越南昆嵩地区埋深仅 65 km 左右,雷琼地区埋深 67 km 左右。复蘑菇状柱头内面波  $V_s$  速度值很低,通常比软流圈内  $V_s$  速度平均值低很多,均在 4.30 km/s 以下(图1)。进一步分析复蘑菇状柱头内面波  $V_s$  速度分布规律发现, $V_s$  速度最低值并不完全与柱头的中心一致,而是在两侧不同部位。通常柱头下蘑菇体的  $V_s$  速度最低值在柱头中心线及附近, $V_s$  值为 4.18~4.23 km/s;柱头的上蘑菇体的  $V_s$  速度最低,多分布在柱头两侧,在北纬 18°以南  $V_s$  最低,多分布在西侧, $V_s$  值在 4.17~4.22 km/s;北纬 18°以北, $V_s$  最低分布在东西两侧,其值在 4.20~4.24 km/s。复蘑菇状地幔低速柱头的这些特征,为南海的扩张与演化和玄武岩热点的发育提供了物性和热动力条件,亦为雷琼和昆嵩地区晚新生代玄武岩的发育提供了软流圈构造动力学背景。

## 5 软流圈与岩石圈相互作用探讨

### 5.1 软流圈结构对岩石圈变形的控制与影响

从前论述中可知,将中国与邻近陆海地区软流圈结构划分为北亚软流圈高速区、中南亚软流圈高速区、东亚大陆

①蔡学林,朱介寿,曹家敏.东亚西太平洋软流圈三维结构与动力学特征,2001.

②程先琼.地震层析成像与地幔对流研究.成都理工大学博士学位论文,2004,1~127.

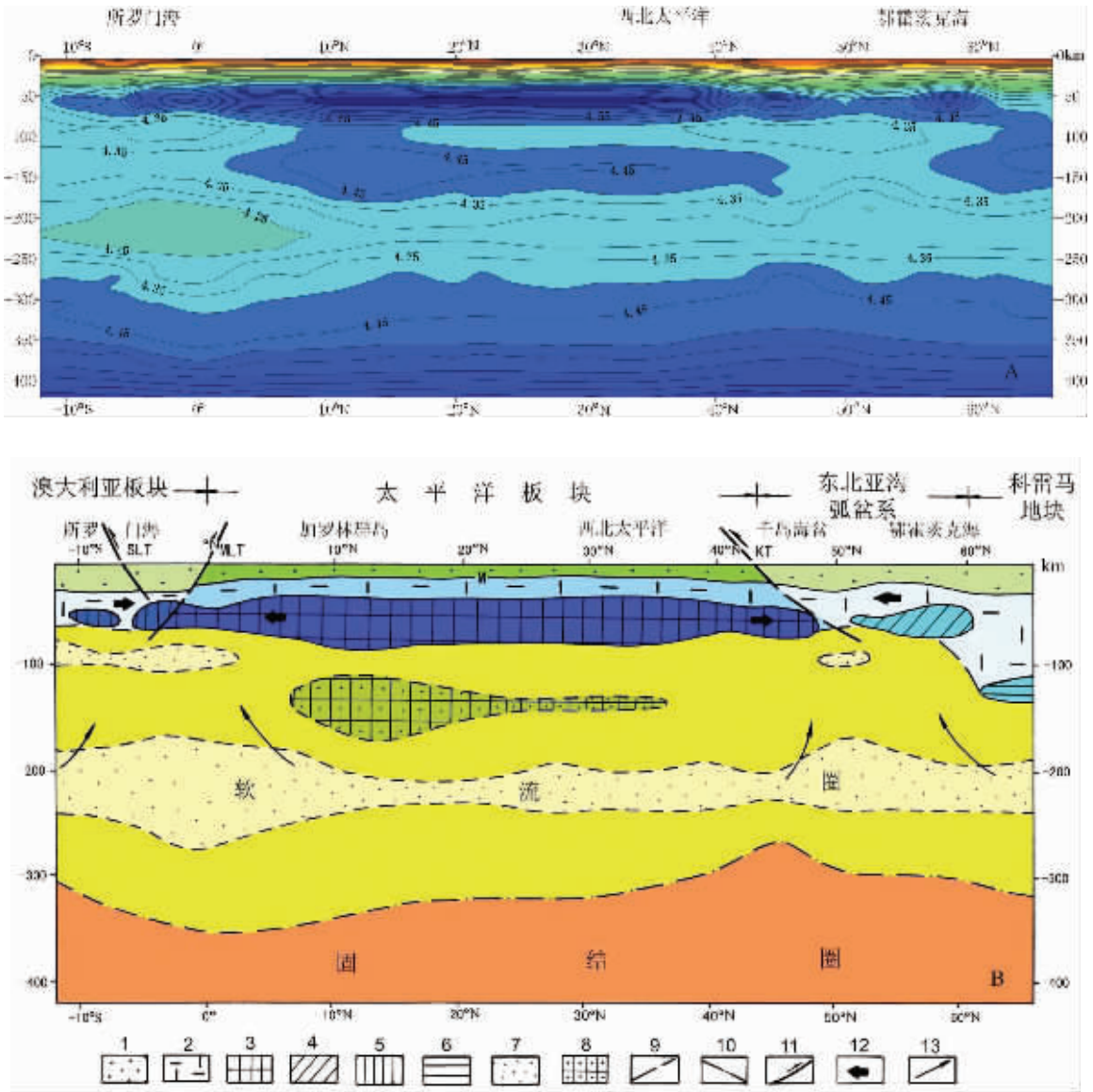


图 6 所罗门海—西北太平洋—鄂霍次克海地区岩石圈与软流圈结构略图

A—面波层析成像  $V_s$  速度结构剖面 ( $150^\circ\text{E}$ ); B—构造解析剖面; 1—岩石圈地壳; 2—岩石圈上地幔; 3—太平洋板块岩石圈中下部高速块体或幔块构造; 4—东北亚海弧盆系岩石圈中下部高速块体或幔块构造; 5—澳大利亚板块岩石圈中下部高速块体或幔块构造; 6—科雷马地块岩石圈中下部高速块体或幔块构造; 7—软流圈内部低速异常带; 8—软流圈内部高速块体; 9—岩石圈底界面; 10—软流圈底界面; 11—俯冲碰撞带或大型逆冲断裂带; 12—板块及块体运动方向; 13—软流圈物质流变方向; M—莫霍界面; SLT—所罗门俯冲带; MLT—美拉尼西亚俯冲带; KT—千岛俯冲带

Fig.6 Lithospheric and asthenospheric structures in the Solomon Sea-northwestern Pacific-Okhotsk Sea region

A— $V_s$  velocity section ( $150^\circ\text{E}$ ) of surface wave tomographic imaging; B—Section of structural analysis; 1—Lithospheric crust; 2—Lithospheric upper mantle; 3—High-velocity block or mantle block tectonics in the middle and lower lithosphere beneath the Pacific plate; 4—High-velocity block or mantle block tectonics in the middle and lower lithosphere beneath the Northeast Asian trench-arc-basin system; 5—High-velocity block or mantle block tectonics in the middle and lower lithosphere beneath the Australian plate; 6—High-velocity block or mantle block tectonics in the middle and lower lithosphere beneath the Kolyma block; 7—Lower-velocity anomaly in the asthenosphere; 8—High-velocity block in the asthenosphere; 9—Base of the lithosphere; 10—Base of the asthenosphere; 11—Subduction-collision zone or large thrust zone; 12—Motion direction of plates and blocks; 13—Flow direction of asthenospheric material. M—Moho; SLT—Solomon Sea subduction zone; MLT—Melanesia subduction zone; KT—Kuril subduction zone



边缘带软流圈低速区和西太平洋软流圈低速区等 4 个构造区,前 3 个软流圈构造区正好对应、黄汲清等<sup>[24]</sup>划分的古亚洲、特提斯—喜马拉雅和西太平洋三大构造域控制与影响了中生代以来的构造作用、岩浆作用和成矿作用。因此,研究软流圈三维结构对认识中国及邻近陆海地区岩石圈及地壳结构构造有特殊的重要意义。

## 5.2 大陆岩石圈伸展拆沉作用与软流圈底侵作用

天然地震面波层析成像  $V_s$  速度结构剖面的构造解析表明,东亚西太平洋边缘海岩石圈在中生代中期以来发生了大规模伸展拆沉作用,从而引起东亚大陆岩石圈发生如下大规模剧烈变化:(1)由于岩石圈大规模强烈伸展拆沉作用,使东亚大陆边缘带岩石圈厚度减小了 100~150 km,目前岩石圈厚仅有 60~80 km(表 1),从深源包体岩石地球化学和岩浆作用演化研究结果证实,东亚大陆边缘带岩石圈存在明显的减薄现象,华北地区岩石圈从晚白垩世到古近纪岩石圈急剧变薄到 60 km 左右<sup>[28-30]</sup>。这一巨厚的岩石圈物质跑到哪里去了呢?软流圈内存在的若干小型高速块体,可能是岩石圈中下部高速块体由于岩石圈拆沉作用,在重力作用下沉入到软流圈中所致(图 3),这仅仅是岩石圈高速块体丢失的一小部分。另一大部分岩石圈高速块体到那里去了呢?梁春涛<sup>①</sup>通过东亚及邻区地幔体波层析成像研究表明,东亚大陆边缘在 1 500~2 000

km 深的下地幔中,存在一规模较大的体波  $V_p$  高速块体(图 7)。从而证实东亚大陆边缘丢失的巨厚岩石圈高速块体,可能是由于拆沉作用已经沉陷到下地幔中,从中生代燕山运动 150 Ma 以来,初步测算,该高速块体每年大约下沉 1 cm 左右。(2)由于软流圈物质快速上涌与底侵,引起东亚大陆边缘岩石圈的加热与强烈减薄,以及软流圈急剧增厚达 200~250 km。因软流圈物质上涌使岩石圈受热软化,引起局部熔融,从而出现东亚大陆边缘地区岩石圈浅层形成全球较特殊的巨型岩浆—成矿构造带,发育大规模中酸性岩浆喷出活动和巨型花岗岩侵入以及大规模成矿作用。软流圈的底侵作用及物质上涌与岩石圈底部物质混合交代及分异作用,使一部分软流圈物质加入到岩石圈底部,形成年轻的岩石圈<sup>[29-31]</sup>。因此,岩石圈局部稍有增厚。新近纪以来,华北地区岩石圈—软流圈界面下降,岩石圈地温下降,使软流圈来源的碱性—强碱性玄武岩加入到岩石圈底部,局部增加岩石圈的厚度<sup>[29-30]</sup>,另一部分侵入到岩石圈地壳中,直至喷出到地表。

## 5.3 大陆岩石圈俯冲碰撞作用与软流圈物质流变运移

在研究青藏高原及邻区岩石圈与软流圈三维  $V_s$  速度结构时发现,欧亚板块岩石圈中下部的高速块体(或幔块构造)与印度板块岩石圈中下部的高速块体(或幔块构造)在青藏高原中段正在发生俯冲碰撞作用<sup>[3]</sup>,而青藏高原东段印度板

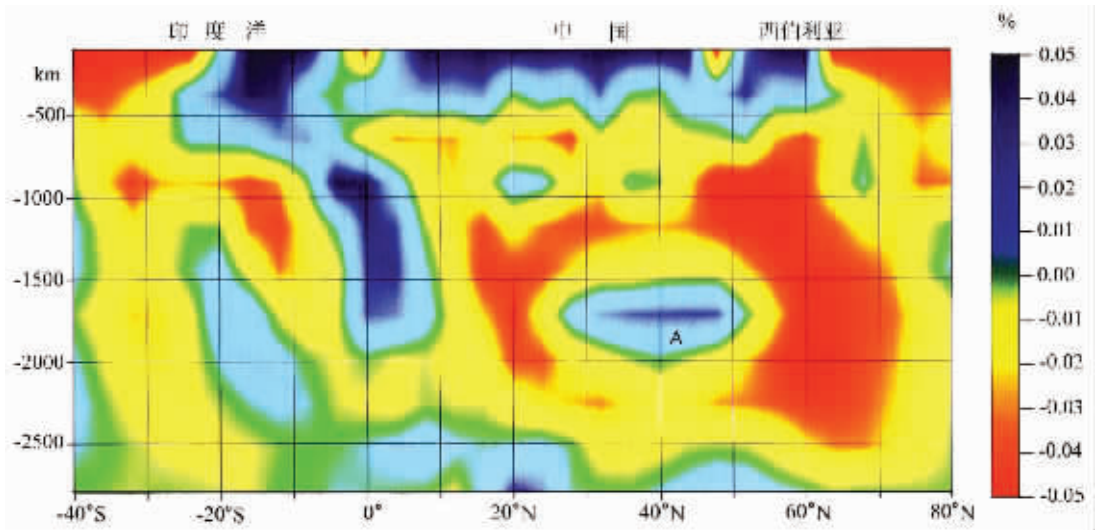


图 7 印度洋—中国—西伯利亚地幔体波层析成像  $V_p$  速度结构(东经 110 度)<sup>②</sup>

A—下地幔高速块体

Fig.7  $V_s$  velocity section of body wave tomographic imaging in the Indian Ocean—China—Siberia region (longitude 110°E)<sup>②</sup>

A—High-velocity block in the lower mantle

①梁春涛,东亚及邻区地幔体波层析成像,成都理工大学硕士学位论文,2001.

②蔡学林,朱介寿,曹家敏,东亚西太平洋软流圈三维结构与动力学特征,2001.

块与欧亚板块岩石圈中下部两高速块体已经发生碰撞作用。碰撞后青藏高原岩石圈迅速增厚,厚达 180~200 km,而且岩石圈中下部  $V_s$  速度增大(图 1),这可能是大陆岩石圈碰撞增厚的最重要方式之一。岩石圈在碰撞增厚过程中,软流圈物质如何运移?研究表明,岩石圈中下部两高速块体向软流圈顶部俯冲并相向运移和碰撞过程中,高速块体将占据软流圈的部分空间,此时,软流圈物质可能出现两种运移方式:一种是软流圈物质侧向流变运移,当不同板块或地块的岩石圈中下部高速块体在软流圈中上部发生相向碰撞时,引起软流圈物质向下或向两侧流变运移,印度板块与欧亚板块岩石圈中下部高速块体在青藏高原发生碰撞增厚时,青藏高原软流圈向外侧流变运移,推测可能主体是向亚洲东部运移,其次向亚洲东南部运移<sup>[11-13]</sup>,运移结果引起青藏高原软流圈减薄,邻区软流圈加厚。另一种是软流圈物质垂向流动运移,在碰撞过程中一部分软流圈物质向上运移<sup>[33-34]</sup>,与岩石圈发生混合作用,在碰撞后这些软流圈残余物质加入到岩石圈中。钟大赉等<sup>[33]</sup>在研究三江地区岩石圈结构后指出,部分软流圈上涌体的物质加入到岩石圈中,成为岩石圈组成部分,并继续向岩石圈中上部流变运移,发生分异并与岩石圈地壳物质混合与加热伸展,引起地壳物质密度降低、温度升高、地壳加厚以及火山岩的喷出活动,从而造成现今“壳热幔冷”和“壳厚幔厚”的岩石圈结构特征,它很可能是青藏高原隆升机制深部大陆动力学最基本的条件与原因之一。

## 6 结 论

(1)根据软流圈厚度与  $V_s$  速度结构特征,将中国及邻近陆海地区软流圈划分为 4 个构造区:北亚软流圈高速区;中南亚软流圈高速区;东亚大陆边缘带软流圈低速区和西太平洋软流圈低速区。

(2)通过中国及邻近陆海地区软流圈  $V_s$  速度三维分布的几何结构解析表明,南海地区上地幔存在的巨型复蘑菇状地幔低速柱头,它为南海的扩张与演化以及油气形成提供了地幔动力学背景。

(3)东亚大陆边缘岩石圈大规模伸展拆沉减薄作用,软流圈物质上涌加热作用与青藏高原岩石圈大规模多向碰撞增厚作用,是东亚大陆中生代以来大陆动力学最基本的表现形式,从而形成全球最大的青藏高原和全球最大的东亚大陆巨型裂谷体系。

## 参考文献 (References):

[1] 朱介寿, 严忠琼, 徐思聪. 上地幔低速层顶界面埋深图[A]. 见: 袁学诚主编. 中国地球物理图集 [C]. 北京: 地质出版社, 1996. 85~87. 178~179.  
Zhu Jieshou, Yan Zhongqiong, Xu Sicong. Depth of the low-velocity layer in upper mantle [A]. In: Yuan Xuecheng (ed). Atlas of Geophysics in China [C]. Beijing: Geological Publishing House,

1996. 85~87. 186~188.  
[2] 朱介寿, 曹家敏, 李显贵, 等. 中国及邻近区域地球三维结构初始模型的建立[J]. 地球物理学报, 1997, 40(5): 627~648.  
Zhu Jieshou, Cao Jiamin, Li Xiangui, et al. A preliminary three-dimensional Earth's model of China and adjacent regions and its implications[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1997, 40(4): 499~518 (in English).  
[3] 滕吉文, 张中杰, 白武明, 等. 岩石圈物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2004. 813~861.  
Teng Jiwen, Zhang Zhongjie, Bai Wuming, et al. Geophysics of Lithosphere[M]. Beijing: Science Press, 2004. 813~861 (in Chinese).  
[4] 刘福田, 刘建华. 体波地震层析成像[A]. 见: 袁学诚主编. 中国地球物理图集[C]. 北京: 地质出版社, 1996. 174~175.  
Liu Futian, Liu Jianhua. Seismic velocity at depths of 45~110 km, 110 km, 220 km, 400 km, 600 km (China and its adjacent area)[A]. In: Yuan Xuecheng (ed). Atlas of Geophysics in China [C]. Beijing: Geological Publishing House, 1996. 69~79, 180~182.  
[5] 张禹慎, 马石柱. 全球地震面波相速度变化及其大地构造学意义[J]. 地球物理学报, 1997, 40(2): 181~192.  
Zhang Yushen, Ma Shizhuang. Global surface wave phase velocity variations and their tectonic implications [J]. Chinese Journal of Geophysics, 1997, 40(2): 181~192 (in Chinese with English abstract).  
[6] Fukao Y, Maruyama S, Obayashi, et al. Geologic implication of the whole mantle P-wave tomography [J]. Jour. Geol. Soc. Japan, 1994, 100(1): 4~23.  
[7] Maruyama S. Plume tectonics [J]. Jour. Geol. Soc. Japan, 1994, 100(1): 24~49.  
[8] 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): 234~235.  
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).  
[9] 路凤香, 赵磊, 郑建平. 与金伯利岩相关的地幔流体及软流层地球化学[A]. 见: 杜乐天主编. 地幔流体与软流层(体)地球化学[C]. 北京: 地质出版社, 1996. 97~153.  
Lu Fengxiang, Zhao Lei, Zheng Jianping. Geochemistry of mantle fluids and asthenosphere, related with kimberlites[A]. In: Du Letian (ed.). Geochemical Studies of Mantle Fluids and Asthenosphere [C]. Beijing: Geological Publishing House, 1996. 97~153 (in Chinese with English abstract).  
[10] 邓晋福, 赵海玲, 罗照华, 等. 玄武岩反演软流层地球化学与地幔流体[A]. 见: 杜乐天主编. 地幔流体与软流层(体)地球化学[C]. 北京: 地质出版社, 1996. 58~96.  
Deng Jinfu, Zhao Hailing, Luo Zhaohua, et al. Asthenosphere geochemistry and mantle fluids deduced from basaltic [A]. In: Du Letian (ed.). Geochemical studies of Mantle Fluids and Asthenosphere [C]. Beijing: Geological Publishing House, 1996. 58~96 (in Chinese with English abstract).  
[11] 朱介寿, 曹家敏, 蔡学林, 等. 东亚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, Cal Xuelin, et al. High resolution surface wave tomography in East Asia and west Pacific marginal seas [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2002, 45 (5): 646~664 (in Chinese with English abstract).
- [12] 朱介寿, 曹家敏, 蔡学林, 等. 中国及邻近陆域海域地球内部三维结构及动力学研究[J]. 地球科学进展, 2003, 18(4): 497~503.
- Zhu Jieshou, Cao Jiamin, Cai Xuelin, et al. Study for three-dimensional structure of Earth interior and geodynamics in China and adjacent Land and Sea regions [J]. Advance in Earth Sciences, 2003, 18(4): 497~503 (in Chinese with English abstract).
- [13] 蔡学林, 朱介寿, 曹家敏, 等. 中国及邻区岩石圈三维结构样式[A]. 见: 张中杰, 等主编. 中国大陆地球深部结构与动力学研究[C]. 北京: 科学出版社, 2004. 563~578.
- Cai Xuelin, Zhu Jieshou, Cao Jiamin, et al. Three dimension tectonic style of the lithosphere in China and adjacent region [A]. In: Zhang Zhongjie, et al (eds.). The Study of Deep Structure and Dynamics in the China Continent [C]. Beijing: Science Press, 2004. 563~578 (in Chinese with English abstract).
- [14] 杨文采. 后板块地球内部物理学导论 [M]. 北京: 地质出版社, 1999. 26~104.
- Yang Wencai. Introduction to Earth Interior Physics of Post-Plate Tectonics [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999. 26~104 (in Chinese).
- [15] 毛桐恩, 刘新美, 赵明, 等. 地球内部层-圈耦合作用研究进展[J]. 科学导报, 1999, 6: 28~30.
- Mao Tongen, Liu Xinmei, Zhao Ming, et al. Progress in the research of coupling action between the layer and sphere in the earth interior [J]. Sciencs and Technology Review, 1999, 6: 28~30 (in Chinese).
- [16] 林传勇, 徐义刚, 张小鹏, 等. 中国东部上地幔岩石变形特征、流体的作用及软流层(体)初步探讨[A]. 见: 杜乐天, 等主编. 地幔流体与软流层(体)地球化学[C]. 北京: 地质出版社, 1996. 312~340.
- Lin Chuanyong, Xu Yigang, Zhang Xiaoou, et al. Deformation of upper mantle, fluids and asthenosphere in the East China [A]. In: Du Litian, et al (eds.). Geochemical Studies of Mantle Fluids and Asthenosphere [C]. Beijing: Geological Publishing House, 1996. 312~340 (in Chinese with English abstract).
- [17] 曾维军, 李振五, 吴能友, 等. 南海区域的上地幔活动特征及印支地幔柱[A]. 见: 南海地质研究(9)[C]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997. 1~19.
- Zeng Weijun, Li Zhenwu, Wu Nengyon, et al. The upper mantle activation in south China Sea and the Indosinian santle plume [A]. In: Geological Research of South China Sea (9) [C]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1997. 1~19 (in Chinese with English abstract).
- [18] Lee T Y, Lo C H, Chung S L, et al.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating result of Neogene basalts in Vietnam and its tectonic implication [A]. In: Flower M F J (ed). Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia [C]. Geophys Geodynamics Ser. 27, Washington, DC: AGU, 1998, 317~330.
- [19] 樊祺诚, 孙谦, 李霓, 等. 琼北火山活动分期与全新世岩浆演化[J]. 岩石学报, 2004, 20(3): 533~544.
- Fan Qicheng, Sun Qian, Li Ni, et al. Periods of volcanic activity and magma evolution of Holocene in North Hainan Island [J]. Acta Petrologica Sinica, 2004, 20(3): 533~544 (in Chinese with English abstract).
- [20] 梁德华, 李扬. 南海宪北海山玄武岩中超镁铁质岩包体 [A]. 见: 南海地质研究(4)[C]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1991. 122~133.
- Liang Dehua, Li Yang. The ultramafic inclusions of basaltu of the Xianbei Haishan in Sorth China Sea [A]. In: Geological Research of South China Sea (4) [C]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1991. 122~133 (in Chinese with English abstract).
- [21] 李兆麟, 丘志力, 秦社彩, 等. 南海海山玄武岩形成条件研究[J]. 矿物学报, 1991, 11(4): 325~333.
- Li Zhaolin, Qiu Zhili, Qin Shecai, et al. A study on the forming conditions of the South China Sea [J]. Acta Mineralogica Sinica, 1991, 11(4): 323~333 (in Chinese with English abstract).
- [22] 赵海玲, Frey F A, Hang Shichun, 等. 东南沿海地区第四纪大陆岩石圈地幔的特征[J]. 现代地质, 2002, 16(4): 347~352.
- Zhao Hailing, Frey FA, Hang Shichun, et al. The mantle characteristics Quaternary continental lithosphere, southeast coast of China [J]. Geoscience, 2002, 16(4): 347~352 (in Chinese with English abstract).
- [23] 蔡学林, 朱介寿, 曹家敏, 等. 四川黑水-台湾花莲断面岩石圈与软流圈结构[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2004, 31(5): 441~451.
- Cai Xuelin, Zhu Jieshou, Cao Jiamin, et al. Structures of lithosphere and asthenosphere in Heishi of Sichuan-Hualian of Taiwan profile [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2004, 31(5): 441~451 (in Chinese with English abstract).
- [24] 蔡学林, 朱介寿, 曹家敏, 等. 南海地区软流圈“工”字型低速异常带特征及构造意义[A]. 见: 中国地球物理学会年刊(2002)[C]. 北京: 地震出版社, 2002. 247.
- Cai Xuelin, Zhu Jieshou, Cao Jiamin, et al. The characteristics and implications of “工” type low velocity zone in asthenosphere of Soutg China Sea [A]. In: Annual of the Chinese Geophysical Society (2002) [C]. Beijing: Seismological Press, 2002. 247 (in Chinese).
- [25] 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-muntle boundary region and its geodynamics [J]. Advance in Earth Sciences, 2000, 15(2): 139~142 (in Chinese witg English abstract).
- [26] 蔡学林, 朱介寿, 程先琼. 南海复蘑菇状地幔柱的发现及其动力学意义[A]. 见: 中国地球物理学会年刊(2005)[C]. 长春: 吉林大学出版社, 2005. 396.
- Cai Xuelin, Zhu Jieshou, Cheng Xianqun. et al. Discovery and Geodynamics significance of the compound mushroom mantle plumes of South China Sea [A]. In: Annual of the Chinese Geophysicd Society 2005 [C]. Changchun: Jilin of University Press,

- 2005, 396(in Chinese).
- [27] 任纪舜, 王作勋, 陈炳蔚, 等. 从全球看中国大地构造 [M]. 北京: 地质出版社, 1999. 1~38.
- Ren Jisun, Wang Zuoxun, Chen Bingwei, et al. The Tectonics of China From a Global View—A Guide to the Tectonic Map of China and Adjacent Regions [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999. 1~32(in English).
- [28] 徐义刚. 拉张环境中的大陆玄武岩浆作用: 性质及动力学过程 [A]. 见: 化学地球动力学[C]. 北京: 科学出版社, 1999. 119~167.
- Xu Yigang. Basaltic magmatism in the continent of stretching setting: Quality and dynamics processes [A]. Geodynamis of Chemistry [C]. Beijing: Science Press, 1999. 119~167 (in Chinese with English abstract).
- [29] 徐义刚, 黄小龙, 颜文, 等. 南海北缘新生代构造演化的深部制约 (I) 幔源包体[J]. 地球化学, 2002, 31(3): 230~242.
- Xu Yigang, Huang Xiaolong, Yan Wen, et al. Constraints on Cenozoic tectonic evolution of northern South China Sea (I) : Mantle-derived xenoliths[J]. Geochimica, 2002, 31(3): 230~242(in Chinese with English abstract).
- [30] Menzies A M, Xu Yigang. Geodynamics of the north China craton [A]. In: Flower MFJ (ed). Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia[C]. Geophys Geodynamics Ser. 27, Washington D C: AGU, 1998. 155~165.
- [31] 徐夕生, 蔡元峰, 周新民. 中国东南部新生代岩石圈地幔研究[J]. 南京大学学报(自然科学), 2000, 36(6): 773~779.
- Xu Xisheng, Cai Yuanfeng, Zhou Xianmin. Studies of the Cenozoic lithospheric mantle beneath southeast China [J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 2000, 36 (6): 773~779(in Chinese with English abstract).
- [32] 蔡学林, 朱介寿, 曹家敏, 等. 东亚西太平洋岩石圈与软流圈相互作用探讨[A]. 见: 中国地球物理学会年刊(2002)[C]. 北京: 地震出版社, 2002. 306~307.
- Cai Xuelin, Zhu Jieshou, Cao Jiamin, et al. Interaction of lithosphere and asthenosphere in east Asia and west Pacific [A]. In: Annual of the Chinese Geophysical Society [C]. Beijing: Seismological Press, 2002. 306~307(in Chinese).
- [33] 钟大赉, 等. 滇川西部古特提斯造山带 (M). 北京, 科学出版社, 1998. 9~20.
- Zhong Dalai, et al. Paleo-Tethys orogenic belt in the western Yunnan and Sichuan [J]. Beijing: Science Press, 1998. 9~20 (in Chinese).
- [34] 金翔龙, 高金耀. 西太平洋卫星测高重力场与地球动力学特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2001, 25(1): 1~8.
- Jin Xianglong, Gao Jinyao. The satellite altimetry gravity field and the geodynamic feature in the west Pacific [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2001, 25 (1): 1~8 (in Chinese with English abstract).

## 3D structure of the asthenosphere beneath China and adjacent land and sea areas and its interaction with the lithosphere

CAI Xue-lin<sup>1</sup>, ZHU Jie-shou<sup>1,2</sup>, CAO Jia-min<sup>1</sup>, CHENG Xian-qun<sup>1</sup>

(1. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China;

2. State Key Laboratory of Petroleum Accumulation Geology and Development Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China)

**Abstract:** This paper discusses the 3D structure features of the asthenosphere beneath China and adjacent land and sea areas based on a systematic tectonic analysis of the 3D velocity structure by using seismic surface wave tomographic imaging. Both high-velocity blocks and low-velocity anomalies were discovered in the asthenosphere of the region, indicating the existence of vertical and lateral heterogeneities in the asthenosphere. Study of the 3D geometric structure of the low-velocity anomalies in the asthenosphere suggests that the anomaly beneath the South China Sea asthenosphere is composite mushroom-shaped. According to this finding, combined with the mantle body wave tomographic image, it is concluded that a giant composite mushroom-shaped low-velocity mantle plume might occur at over 2000 km depth in the region. In addition, this paper approaches the problem related to the impact of the asthenosphere on the lithospheric structure and their interaction.

**Key words:** asthenosphere; lithosphere; surface wave tomographic image; structural analysis; high-velocity block; composite mushroom-shaped low-velocity anomaly; 3D structure; China

**About the first author:** CAI Xue-lin, male, born in 1935, professor, mainly engages in the study of structural geology and deep-geology; E-mail: caixuelin1935@sohu.com.