

<http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>

# 下扬子区岩石圈双层脆韧性过渡带叠置的流变学证据

李成 王良书 杨春

南京大学地球科学系, 210093

**内容提要** 下扬子区岩石圈流变学特征分析表明,流变学剖面具有典型的大陆拉伸构造特征,即“三层状”结构,3个脆性层之间夹有2个韧性层。浅层脆韧性过渡带与下地壳的低速高导层对应,深层脆韧性过渡带与 Moho 面对应。岩石圈强度在 $1.7 \times 10^{11} \sim 4.3 \times 10^{11}$  N/m 之间,是一个非常特殊的低强度岩石圈类型。岩石圈流变学特征反映的地球动力学意义与下扬子区中生代以来的构造演化特征是一致的。

**关键词** 下扬子区 岩石圈 流变学

关于大陆岩石圈的研究,前人已做了大量的工作(张文佑等,1983;马杏垣等,1984;马杏垣,1987;万天丰等,1988;邵建国等,1991;王绳祖,1993;郑建平等,1999;付永涛等,2000)。而根据大陆岩石圈流变学的概念,建立的大陆动力学模型,相当成功地解释了地球物理和地球动力学的许多现象(Ranalli et al., 1987; Bodri et al., 1991; Liu et al., 1993)。下扬子区岩石圈构造演化经历了多次构造运动的作用,形成了复杂的地质构造和其独特的构造特征,岩石圈流变学性质决定了岩石圈演化的特征。根据岩石圈流变学的研究结果,分析岩石圈动力学过程,为解释下扬子区构造演化提供了重要的理论基础。

## 1 岩石圈流变学性质

流变学是研究物体变形和流动现象的学科。组成固体地球物质的变形和流动作用,包括岩石圈板块构造及大陆构造的形成和演化,都是受不同层次岩石力学性质(如各种强度)及变形的物理环境(如温度、压力、应变速率等)这两个基本因素控制。

岩石处在低压和低温条件下,岩石应变呈脆性。根据线性摩擦剪切破裂准则(Sibson, 1974):

$$(\sigma_1 - \sigma_3) \geq \alpha \rho g z (1 - \lambda) \quad (1)$$

式中  $\sigma_1$  和  $\sigma_3$  分别表示最大和最小主应力,  $g$  为重力加速度,  $z$  为深度,  $\rho$  为  $z$  以上岩石的平均密度,  $\lambda$  为孔隙流体系数(孔隙流体应力与盖层压力的比值),  $\alpha$  为数值系数,取决于断层类型。由式(1)可知,岩石摩擦剪切破裂准则只与压力及岩石类型相关,而与温

度无关。

岩石处在高温和高压状态下,岩石的应变行为逐渐由脆性向韧性转变。岩石处在韧性变形状态(流体压力保持稳态应变率)下,其蠕变强度是温度和岩石类型的函数。韧性变形时流体应力(Ranalli et al., 1987; Liu et al., 1993):

$$\sigma = (\epsilon/A)^{1/n} \exp(E/nRT) \quad (2)$$

式中  $\epsilon$  和  $\sigma$  分别表示应变速率和应力,  $A$  为与岩性相关的常数,  $n$  为与变形机制和物质成分相关,与应力和温度不相关的参数,  $E$  为蠕变活化能(activation energy for creep),  $T$  为绝对温度,  $R$  为气体常数。岩石圈流变学性质决定了它对构造力的反应,它是岩性、结构、温度和压力(深度)及应变速率的函数。

岩石的脆性变形的特征是形成破裂滑动断层,摩擦滑动所必需的偏应力(deviatoric stresses)随压力的增加而增加。岩石的韧性变形所需的偏应力随温度的增加而呈指数的减少。岩石在某一深度的流变学性质是脆性的还是韧性的,由岩石的摩擦剪切强度和韧性应变强度的相对大小而定。如果摩擦滑动的临界应力差(式(1))低于韧性应变强度(式(2)),岩石以摩擦滑动为主,表现为脆性变形。反之,岩石以蠕变为主,表现为韧性变形。

在某一深度上,韧性变形所需的偏应力等于脆性变形的偏应力时,这一深度定义为脆韧性转换带。实际上,脆韧性转换带可能是渐变而不是突变的。如果将岩石圈作为一个整体确定岩石圈流变学特征,可以用岩石圈总强度表示。岩石圈总强度(total

注:本文为江苏省自然科学基金项目(编号 BK99023)的成果。

收稿日期:2000-06-11;改回日期:2001-01-21;责任编辑:郝梓国。

作者简介:李成,男,1957年生。博士,教授,构造地质学专业。通讯地址:210093,南京大学地球科学系。

lithospheric strength) 定义为岩石圈垂直向上的屈服(应力)强度(yield strength)的积分(Lynch et al., 1987), 对于给定的地壳厚度和成分, 岩石圈的强度随热流的增加而减少; 而对于给定的地热, 由于酸性岩石比超基性岩石更软, 所以一般地壳厚的岩石圈比地壳薄的岩石圈强度低。

## 2 下扬子区岩石圈流变学特征

HQ-13 地学断面是下扬子区的一条区域性地质、地球物理综合剖面(陈沪生等, 1993), 该断面构造位置见图 1。根据 HQ-13 地学断面的岩石圈结构研究(陈沪生等, 1993), 下扬子区岩石圈分 3 层: 上地壳为花岗岩层, 下地壳为基性岩层, 壳下岩石圈为超基性岩层。因此, 岩石圈流变学分析采用 3 层流变学模型。表 1 给出 3 层流变学参数。下扬子区岩石圈流变学的研究在模拟计算了其二维温度场的基础上<sup>①</sup>, 根据式(2)可以分析计算 6 个块体的岩石圈流变学特征。HQ-13 地学断面 6 个块体的岩石圈屈服强度分布特征见图 2, 岩石圈和地壳强度见表 2。

表 1 下扬子区岩石圈流变学参数

Table 1 Parameter of lithosphere rheology in the Lower Yangtze

| 岩石类型 | $A$         | $n$ | $E(\text{kJ/mol})$ |
|------|-------------|-----|--------------------|
| 花岗岩  | $10^{-8.8}$ | 3.2 | 123                |
| 玄武岩  | $10^{-3.7}$ | 3.2 | 260                |
| 橄榄岩  | $10^{3.28}$ | 3.5 | 420                |

注: 据 Ranalli et al., 1987; Liu et al., 1993。

表 2 下扬子区 HQ-13 地学断面岩石圈强度

Table 2 Lithosphere strength of HQ-13 geoscience transect in the Lower Yangtze

| 地区      | 地壳强度( $10^{11} \text{ N/m}$ ) | 岩石圈强度( $10^{11} \text{ N/m}$ ) |
|---------|-------------------------------|--------------------------------|
| 灵璧块体    | 1.7                           | 3.2                            |
| 海胶地体    | 2.0                           | 3.9                            |
| 盱眙—天长块体 | 2.0                           | 4.2                            |
| 扬州—镇江块体 | 2.1                           | 4.3                            |
| 无锡—苏州块体 | 2.1                           | 4.2                            |
| 昆山—上海块体 | 1.9                           | 3.6                            |

下扬子区岩石圈流变学剖面具有典型的大陆拉伸带构造类型的特征(Ranalli et al., 1987), 即流变学剖面为“三层状”结构, 两层软的韧性层夹在三层较硬层之间(图 1)。上地壳一般以脆性变形为特征, 大约在 60 km 深度以下, 均以韧性变形为特征, 岩石圈屈服强度快速下降。浅部的脆韧性过渡带大约出现在 15~18 km 的深度, 深部的脆韧性过渡带埋深

为 28~32 km。局部地温高的地区, 脆韧性过渡带的埋深相对较浅, 地温低的地区, 脆韧性过渡带的埋深相对较深, 脆韧性过渡带埋深的特征与地温场的分布特征对应一致(Li et al., 1995)。

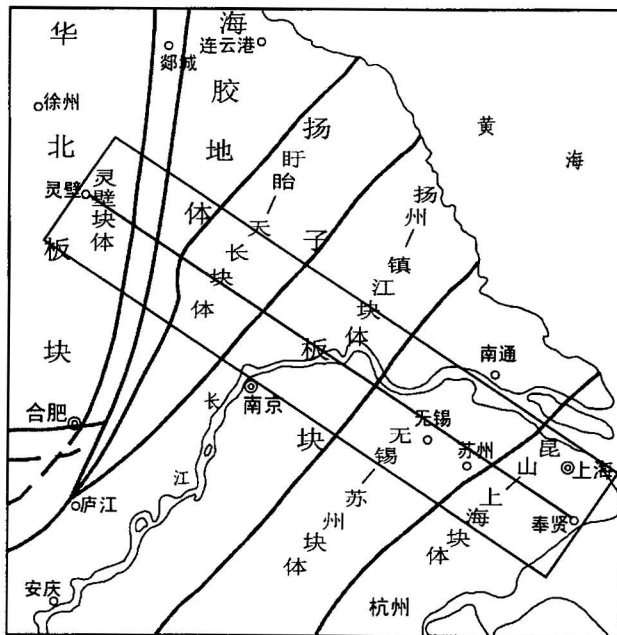


图 1 HQ-13 地学断面构造位置图

Fig. 1 Tectonic setting of HQ-13 geoscience transect

## 3 岩石圈流变学的地球动力学意义

实验岩石学表明(宋鸿林等, 1992), 假设孔隙流体压力均匀分布的条件下, 同一种岩石在围压逐渐增高的条件下, 其强度逐渐增大, 而在温度递增的情况下其韧性变形的能力增强。因此, 从地表向下, 在温度和围压逐渐增高的条件下, 岩石的破裂强度将首先向下逐渐增大, 直到逐渐增高的温度使岩石能发生显著的韧性变形的地带, 其上的岩石破裂达到最大值, 其下的岩石则发生韧性变形而松弛。如果不同性质的岩石组成岩石圈, 由于不同类型岩石的脆韧性过渡带形成的差异, 大陆岩石圈流变学特征与深度的相关关系不是一个简单的单峰曲线, 而是一个峰值随深度递增的多峰曲线。通常岩石圈脆韧性过渡带与低速层、高导层的分布, 震源深度的分布, 构造活动特征层的分布具有明显的对应关系, 岩石圈强度控制着构造演化特征。因此, 岩石圈流变学特

① 李成. 1988. 下扬子区岩石圈热-流变学分层及其地球动力学特征. 南京大学博士论文。

征具有重要的地球动力学意义。

下扬子区岩石圈强度在 $1.7 \times 10^{11} \sim 4.3 \times 10^{11}$  N/m 之间,相对较低,根据岩石圈强度的理论估计值(Ranalli et al., 1987; Liu et al., 1993),大约接近并明显低于大陆岩石圈中的盆地和造山带类型的岩石圈强度,是一个非常特殊的低强度岩石圈类型。构造作用力(tectonic forces)一般在 $1.0 \times 10^{12} \sim 5.0 \times 10^{12}$  N/m 之间(Lynch et al., 1987),显然下扬子区岩石圈强度低于构造作用力。

下扬子区岩石圈强度偏低可能有两个原因:首先,下扬子区的区域地温场较高,HQ-13线的大地热流值平均在 $66 \sim 68$  mW/m<sup>2</sup>之间(王良书等,1995),

明显高于全球大陆地区热流平均值 $60.2$  mW/m<sup>2</sup>,地温场高的地方,岩石圈强度相对较低。其次,下扬子区深部存在两层韧性层,而且在大约 $60$  km 深的壳下岩石圈,岩石圈屈服强度快速下降趋近于零。如果岩石圈强度明显低于构造作用力,则岩石圈在构造作用下发生变形,产生构造运动时,岩石圈的构造作用主要表现为拉张和造山作用。因此,下扬子区中新世以来,下扬子板块与周缘板块碰撞过程中,在周缘形成造山带的同时,区内发育了一系列的推覆构造和随后的拉张断陷和断隆,与下扬子区岩石圈强度偏低是直接相关的。下扬子区岩石圈流变学的特征为解释构造演化提供了地球动力学的理论依

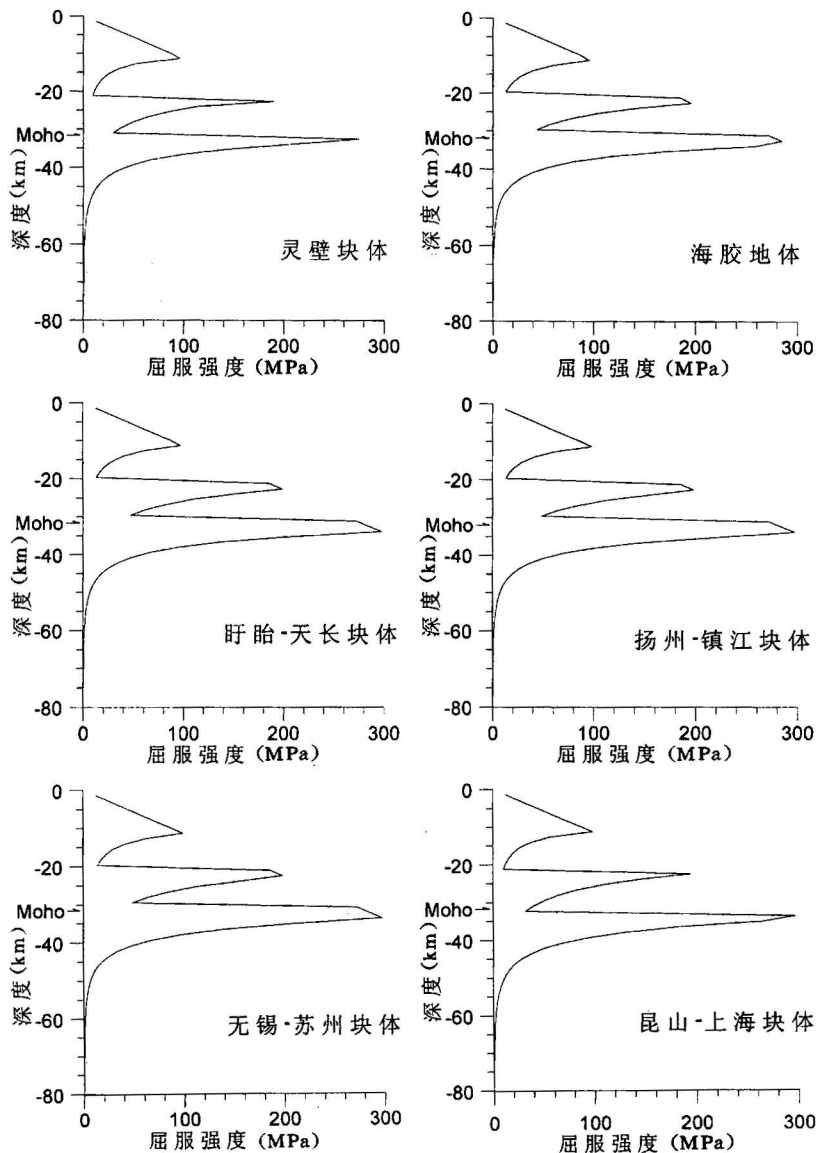


图2 下扬子区HQ-13地学断面岩石圈流变学剖面

Fig. 2 Lithosphere rheology cross-section of HQ-13 geoscience transect in the Lower Yangtze

据,表明岩石圈流变学特征反映的地球动力学意义与下扬子区中新世以来的构造演化特征是一致的。

塔里木盆地岩石圈强度的研究(王良书等, 1996)也为下扬子区岩石圈强度的研究提供了一个很好的对比例证。塔里木盆地岩石圈强度在 $6.4 \times 10^{12} \sim 11.4 \times 10^{12} \text{N/m}$ 之间,这一特征是由塔里木盆地自晚古生代以来就开始进入稳定的“冷盆”热演化所决定的。在新生代期间印度板块与欧亚板块碰撞过程中,由于塔里木盆地岩石圈强度相对较大,在板块周缘形成造山带,而在板块内部则表现为整体沉降,构造表现具有明显的刚性变形的特征。岩石圈流变学特征反映的地球动力学意义与其构造演化特征也是非常吻合的。

下扬子区 HQ-13 线的速度结构和电性结构的研究(陈沪生等, 1993)表明,在下地壳存在塑性构造层,即低速高导层,其深度在 18km 左右。该塑性构造层与岩石圈流变学剖面(图 2)浅部的脆韧性过渡带一致,在此脆韧性过渡带以上的岩层发育了规模不等的断裂构造,一般逆冲推覆构造都收敛于此界面,上地壳的复杂变形及推覆构造终止于此脆韧性过渡带而不能再延伸至下地壳。而在此脆韧性过渡带以下,岩石圈变形构造则表现为岩层间的滑动构造。另一个深部脆韧性过渡带的深度在 28~32 km 之间,地质解释剖面上与壳幔界面一致,其物理意义代表岩石圈不同层圈之间物质成分的变化。

### 参 考 文 献

- 陈沪生,周雪清,李道祺,贺绍英. 1993. 中国东部灵璧—奉贤(HQ-13)地学断面图(说明书). 北京:地质出版社.
- 付永涛,李继亮,周辉,王义天,吴运高,吴峻. 2000. 大陆岩石圈有效弹性厚度研究综述. 地质论评, 46(2): 149~159.
- 马杏垣,索书田. 1984. 论滑覆及岩石圈内多层次滑脱构造. 地质学报, 58(3): 205~213.
- 马杏垣. 1987. 中国岩石圈动力学概要. 地质学报, 61(2): 113~125.
- 邵建国,张小平. 1991. 论上部岩石圈的偏应力值. 地质论评, 37(4): 289~299.
- 宋鸿林,单文琅,傅昭仁. 1992. 论壳内韧性流层及其构造表现. 现代地质, 6: 494~503.
- 王良书,李成,施央申,汪屹华. 1995. 下扬子区地温场和大地热流密度分布. 地球物理学报, 38: 469~476.
- 王良书,李成,杨春. 1996. 塔里木盆地岩石层热结构特征. 地球物理学报, 39: 794~803.
- 王绳祖. 1993. 亚洲大陆岩石圈多层构造模型和塑性流动网络. 地质学报, 67(1): 1~18.
- 万天丰,褚明记,陈明佑. 1988. 福建省岩石圈的热状态与地热资源的远景评价. 地质学报, 62(2): 178~189.
- 郑建平,路凤香, O'Reilly S Y, Griffin W L, 张明. 1999. 华北地台东部古生代与新生代岩石圈地幔特征及其演化. 地质学报, 73(1): 47~56.
- 张文佑,张抗,赵永贵,蔡新平,王信和,徐贵忠,吴海威,韩贝传,曾湘山. 1983. 华北断块区中、新生代地质构造特征及岩石圈动力学模型. 地质学报, 57(1): 33~40.

### References

- Bodri B, Izuka S, Hayakawa M. 1991. Geothermal and rheological implications of intracontinental earthquakes beneath the Kanto-Tokai region, central Japan. Tectonophysics, 194: 337~347.
- Fu Y T, Li J L, Zhou H, Wang Y T, Wu Y G, Wu J. 2000. Comments on the effective elastic thickness of continental lithosphere. Geological Review, 46(2): 149~159(in Chinese).
- Li Cheng, Wang Liangshu, Shi Yangshen. 1995. Thermal structure of the lithosphere in geoscience transect of Lingbi-Fengxian (HQ-13), East China. Scientia Geologica Sinica, 4: 381~387.
- Lynch H D, Morgan P. 1987. The tensile strength of the lithosphere and the localization of extension. In: Coward M P, Dewey J F, Hancock P L, ed. Continental Extensional Tectonics. Geol. Soc. London, Spec. Publ., 28: 53~66.
- Liu M, Furlong K P. 1993. Crustal shortening and Eocene extension in the south-eastern Canadian Cordillera: Some thermal and mechanical consideration. Tectonics, 12: 776~786.
- Ma X Y, Suo S T. 1984. On gliding nappes and multi-level detachment structures in the lithosphere. Acta Geologica Sinica, 58(3): 205~213(in Chinese with English abstract).
- Ma X Y. 1987. Summary of the lithospheric dynamics in China. Acta Geologica Sinica, 61(2): 113~125(in Chinese with English abstract).
- Ranalli G, Murphy D C. 1987. Rheological stratification of the lithosphere. Tectonophysics, 132: 281~295.
- Shao J G, Zhang X P. 1991. Magnitude of deviatoric stress in the upper lithosphere. Geological Review, 37(4): 289~299(in Chinese with English abstract).
- Sibson R H. 1974. Frictional constraints on thrust, wrench, and normal faults. Nature, 249: 542~544.
- Wan T F, Chu M J, Chen M Y. 1988. Thermal regimes of the lithosphere and geothermal resources potential in Fujian Province. Acta Geologica Sinica, 62(2): 178~189(in Chinese with English abstract).
- Zhang W Y, Zhang K, Zhao Y G, Cai X P, Wang X H, Xu G Z, Wu H W, Han B C, Zeng X S. 1983. The Mesozoic and Cenozoic Geotectonic characteristics and dynamical model of the lithosphere in North China Faultblock region. Acta Geologica Sinica, 57(1): 33~40(in Chinese with English abstract).
- Zheng J P, Lu F X, O'Reilly S Y, Griffin W L, Zhang M. 1999. Comparison between Palaeozoic and Cenozoic lithospheric mantle in the eastern part of the North China Block. Acta Geologica Sinica, 73(1): 47~56(in Chinese with English abstract).

## Rheological Evidence for Superimposition of Double Brittle-Ductile Transitional Zones of the Lithosphere in the Lower Yangtze Region

LI Cheng, WANG Liangshu, YANG Chun

*Department of Earth Sciences, Nanjing University, 210093, Nanjing, PRC*

### Abstract

Analysis of the rheological features of the lithosphere in the Lower Yangtze region indicates that the rheological section has the typical characteristics of continental extensional structures, i. e. the "three-layered structure" marked by two ductile layers intercalated between three brittle layers. The shallow brittle-ductile transition zone, 15~18 km in depth, corresponds with the low-velocity, high-conductive layer of the lower crust, while the deep brittle-ductile transition zone, 28~32 km in depth, corresponds with the Moho. The lithospheric strength ranges between  $1.7 \times 10^{11}$  and  $4.3 \times 10^{11}$  N/m, so the lithosphere is a very special low-strength lithosphere type. The geodynamic significance reflected by the rheological features of the lithosphere is consistent with the features of tectonic evolution since the Meso-Cenozoic in the Lower Yangtze region.

**Key words:** Lower Yangtze; lithosphere; rheology

---