

# 青藏高原物质东流的岩石层力学背景探讨

熊 熊<sup>1,2)</sup> 许厚泽<sup>1)</sup> 滕吉文<sup>2)</sup>

(1) 中国科学院测量与地球物理研究所, 武汉 430077  
(2) 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100101

**摘 要** 利用地表大地热流观测资料、岩石生热率及热导率数据研究了三江和四川盆地 6 个地区的岩石层平均温度结构及强度分布。结果表明, 整个三江地区岩石层温度较高, 而四川盆地温度较低; 在岩石层强度分布上, 四川盆地为高强度区, 而三江地区则为低强度区; 整个三江地区构成了一条青藏高原物质东流的低强度通道; 由于四川盆地高强度块体的阻挡, 青藏高原向东的物质流在此转向近南向, 沿三江地区流逸; 不同岩石层块体的强度差异可能是控制高原物质流动态势的重要力学背景之一。

**主题词** 岩石层温度 岩石层强度 青藏高原 物质东流

## INVESTIGATION ON LITHOSPHERIC MECHANICAL BACKGROUND OF EASTWARD MASS FLOW OF TIBETAN PLATEAU

Xiong Xiong<sup>1,2)</sup> Xu Houze<sup>1)</sup> Teng Jiwen<sup>2)</sup>

(1) *Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077*  
(2) *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101*

### Abstract

The averaged lithospheric thermal and strength structure of six tectonic units in Sanjiang region and Sichuan Basin is investigated by using the surface heat flow data, rock heat generation rate and thermal conductivity. It is shown that the lithospheric temperature is high in Sanjiang region, while low in Sichuan Basin. As to the lithospheric strength, it is high in Sichuan Basin, while low in the Sanjiang region. The eastward mass flow of Tibetan Plateau turns to the near southern direction, and moves along Sanjiang region due to the resistance of high-strength blocks of Sichuan Basin. The results suggest that the difference of

[收稿日期]: 2000-07-18; 修回: 2000-09-30

[基金项目]: 国家自然科学基金(49734015 和 49874005)项目

[作者简介]: 熊熊, 男, 1965 年生, 理学博士, 现主要从事地球动力学研究。

lithospheric strength of various blocks is one of the important roles which control the mass flow pattern of the Tibetan Plateau.

**Key words:** lithospheric temperature, lithospheric strength, Tibetan Plateau, eastward mass flow

## 1 引言

青藏高原动力学的关键问题之一是高原物质的东流(图 1)<sup>[1]</sup>。从板块构造观点来看,青藏高原处于一个非常特殊的构造背景之下,其南部受印度板块碰撞、挤压及持续北漂的强烈作用,北面受远及俄罗斯、西伯利亚地台的阻挡。在这种构造格局下,高原一方面通过自身的地壳缩短、增厚来吸收部分南北向的强烈挤压作用;另一方面,则在东西两向寻求物质流逸的通道。由图 1 可见,高原物质向东南方向流逸,在遭遇四川盆地阻挡后转为向南流动。现在的问题是,为什么高原“物质东流”呈现图 1 的态势?为什么在四川盆地高原物质流动方向发生变化,由东南向转为近南向,进入三江地区?其蕴涵的岩石层力学背景是什么?本文拟利用地表大地热流观测资料、岩石生热率及热导率数据研究三江地区和四川盆地岩石层温度及强度结构。基于不同岩石层强度的特点,探讨青藏高原现今物质东流态势的岩石层力学背景。

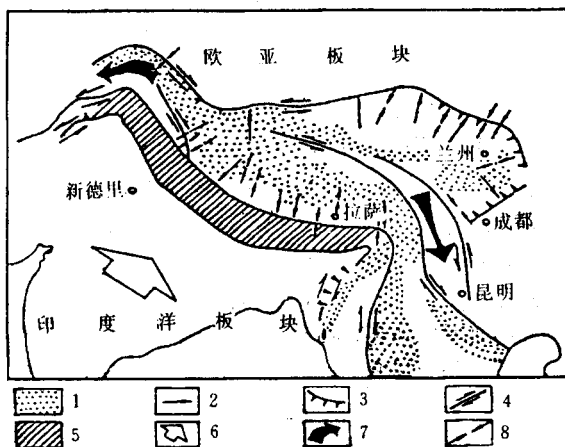


图 1 青藏高原及川滇地带壳—幔物质受强烈挤压后向外“展流”与向南南东方向运动示意图<sup>[1]</sup>

1. 压缩变形区; 2. 压力作用方向; 3. 逆冲断层带;
4. 走滑断层; 5. 碰撞挤压过渡带; 6. 板块运动方向;
7. 物质优势运动方向; 8. 震源主压应力轴方向

## 2 模型

不计及岩石层介质的流体循环,地幔岩石层二维稳态热结构可通过求解热传导方程

$$\nabla(\lambda \nabla T) + A(x, z) = 0 \quad (1)$$

获得。式中  $\lambda$  为热传导系数 ( $\text{wm}^{-1}\text{k}^{-1}$ ),  $T$  为温度,  $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial z)$ ,  $A$  为放射性元素生热率 ( $\text{wm}^{-3}$ )。由于二维模型结果与一维相差不大<sup>[2]</sup>,至少在定性的意义上,两者的符合程度是相当好的,所以为了简化问题,我们采用一维热传导方程的解析解来获取若干热流测量点上的温度沿深度的分布结构。如生热率为常数,则

$$T(z) = T_0 + (q_0/\lambda)z + (A/2\lambda)z^2 \quad (2)$$

当  $A$  呈指数分布时

$$T(z) = T_0 + (q_0 - AD) \frac{z}{k} + AD^2 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{z}{D}\right) \right] / \lambda \quad (3)$$

式中  $z$  为深度,  $q_0$  为地表热流值,  $T$  为温度;  $T_0$  为地表温度,在本文中取  $17^\circ\text{C}$ <sup>[7]</sup>;  $D$  为生热率随

深度的对数减量(15 km)。

大陆岩石层的强度可由岩石变形机制的4种状态来描述,即地壳及地幔的脆性破裂和塑性流动<sup>[3]</sup>。脆性强度由Byerlee<sup>[4]</sup>给出的摩擦滑移律得到:

$$\sigma_b = B \cdot z \quad (4)$$

式中 $\sigma_b$ 为脆性强度, $B$ 为岩石材料参数。塑性强度则由指数律给出<sup>[5]</sup>:

$$\sigma_d = \left( \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right)^{\frac{1}{n}} \cdot \exp \left[ \frac{Q^* + 0.293z}{3RT} \right] \quad (5)$$

式中 $\sigma_d$ 为塑性强度, $\dot{\epsilon}$ 为应变率,通常取为 $10^{-15} \text{ s}^{-1}$ , $R$ 为普适气体常数( $8.314 \text{ J mol}^{-1}$ ), $n$ 、 $\dot{\epsilon}_0$ 、 $Q^*$ 为岩石材料常数。

显然,由(2)和(3)式得到温度场分布后,我们很容易通过式(4)、(5)计算岩石层强度随深度分布的图象。文中所采用的岩石参数列于表1,地表大地热流观测值和上、下地壳,地幔岩石层的生热率及热传导系数取自文献[6~9]。

表1 本文采用的岩石参数

| 层 次   | 脆性常数 $B/\text{kPa m}^{-1}$ |    | $\epsilon_0/\text{Mpa}^{-n} \text{ s}^{-1}$ | $n$ | $Q^*/\text{kJ mol}^{-1}$ |
|-------|----------------------------|----|---------------------------------------------|-----|--------------------------|
|       | 张性                         | 压性 |                                             |     |                          |
| 上 地 壳 | 16                         | 80 | $1.0 \times 10^{-8}$                        | 3   | 140                      |
| 下 地 壳 | 16                         | 80 | $1.0 \times 10^{-3}$                        | 3   | 250                      |
| 地幔岩石层 | 16                         | 80 | 103                                         | 3   | 550                      |

### 3 计算结果

图2显示了三江地区和四川盆地川西北拗陷热流测量点。考虑研究点的构造代表性和拥有资料的实际状况,我们选取昆明、丽江、腾冲、澜沧、普洱和四川盆地川西北拗陷等6个地区作为代表区域来研究其岩石层温度及强度分布,其中前5个属三江构造带。

图3显示了6个地区岩石层温度随深度变化的图象。温度分布状态与地表地质、地球物理现象有较好的相关性。昆明、丽江、腾冲地区温度较高,是典型现代构造活动区的地热特征<sup>[7]</sup>,而四川盆地川西北拗陷属稳定地质构造区特征,澜沧、普洱则呈现过渡区特征。

根据图2所示的温度场,我们计算了6个地区岩石层的张性和压性强度结构(图4)。曲线所包围的面积即为岩石层平均整体强度。最大强度区为四川盆地川西北拗陷,而最小区为腾冲、昆明、丽江地区,其它地区的强度介于两者之间,但明显小于四川盆地。由图可见,在岩石力学参数相同的情况下,岩石层的强度取决于两个因素,即岩石层的温度分布和地壳的厚度。需要指出的是,目前关于三江地区地壳厚度的一些结果有些出入,我们采用文献[7]中给出的结果。如按文献[10]的结果计算,则三江地区的岩石层强度会更小。

岩石层的强度分布与地震活动性有较好的相关性<sup>[11]</sup>。强度最大的四川盆地,记录的地震数目很少,而强度最小的腾冲地区却是中国大陆著名的地震带,丽江等岩石层强度较小的地区也为地震多发区,震源深度较浅,多位于图3所示的上部脆性层。

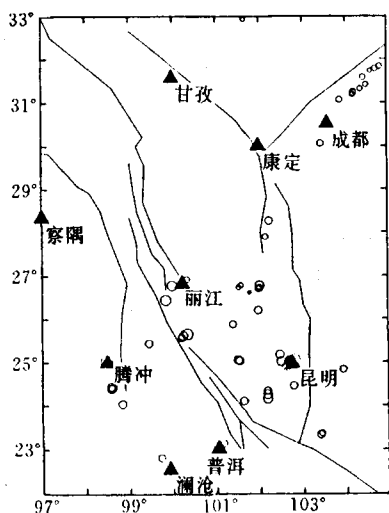


图2 三江地区和川西北拗陷热流测量点位示意图

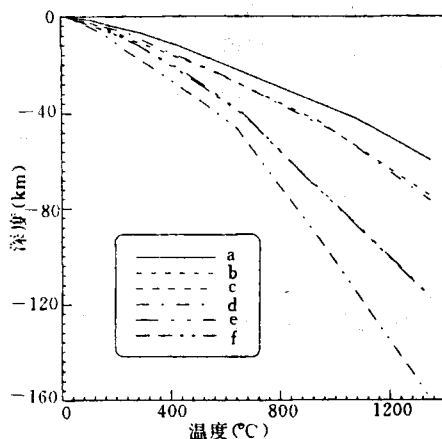


图3 三江地区和四川盆地热流测点下岩石层的平均温度沿深度分布图

a. 腾冲; b. 昆明; c. 丽江; d. 澜沧; e. 普洱; f. 川西北拗陷

## 4 结论与讨论

受地形积累的巨大势能作用,青藏高原势必对高原内部和周边地区产生水平应力作用,导致高原物质向周围运移。但在南北方向,高原受到巨大的板块挤压作用,难以拓展,因此,物质东西向的流动势成必然。

从力学上考虑,导致物质流动有两个因素是必不可少的。一为作用力,显然,青藏高原所积累的巨大重力势能、全球板块构造应力场<sup>[13]</sup>和地幔对流产生的作用于岩石层底面的应力场<sup>[14]</sup>足以提供高原及周边块体物质运移的驱动力。另一个因素是岩石层的强度,对一定的力学作用,不同强度的岩石层块体其力学响应是不同的。强度低的块体物质显然更易流动。由计算结果和分析可知,岩石层的总体强度在力学参数相同的情况下取决于两个因素,即温度和地壳厚度。温度高、地壳厚度大,则强度低,反之,强度高。青藏高原主体厚度巨大,其岩石层温度较高,导致高原岩石层强度较低,具备了物质流动的必要条件。就高原东部邻区而言,由上面的计算可知,整个三江块体由于岩石层温度较高,导致岩石层强度较弱。而隶属于扬子板块的四川盆地则相反,岩石层强度较大。事实上,四川盆地是中国大陆一个长期处于稳定状态的构造区,在地热上则可称之为是一个“冷盆”<sup>[9]</sup>。因此,受西太平洋板块向西俯冲的作用,四川盆地在一定程度上阻碍了青藏高原物质的进一步东流。高原物质在此转而向强度较低的三江地区运移。

尽管我们很难确定岩石层强度与物质流动之间存在的确切定量关系,但从物理上考虑,物质更易于将弱强度区域选取为流动的优势方向。因此,我们也就不难理解青藏高原东流物质在遭遇高强度四川盆地的阻挡后,将弱强度的三江地区作为优势流动方向,并向其发展的机理了。

需要提及的是,我们上面得到的岩石层温度和强度结构只是目前岩石层结构的一个瞬时状态,我们无法据此唯一地推断高原物质东流在时间域内的进程。换言之,我们无法仅根据目前的结果推断到底是三江地区的岩石层强度状态导致了青藏高原物质流动的现今态势,还是

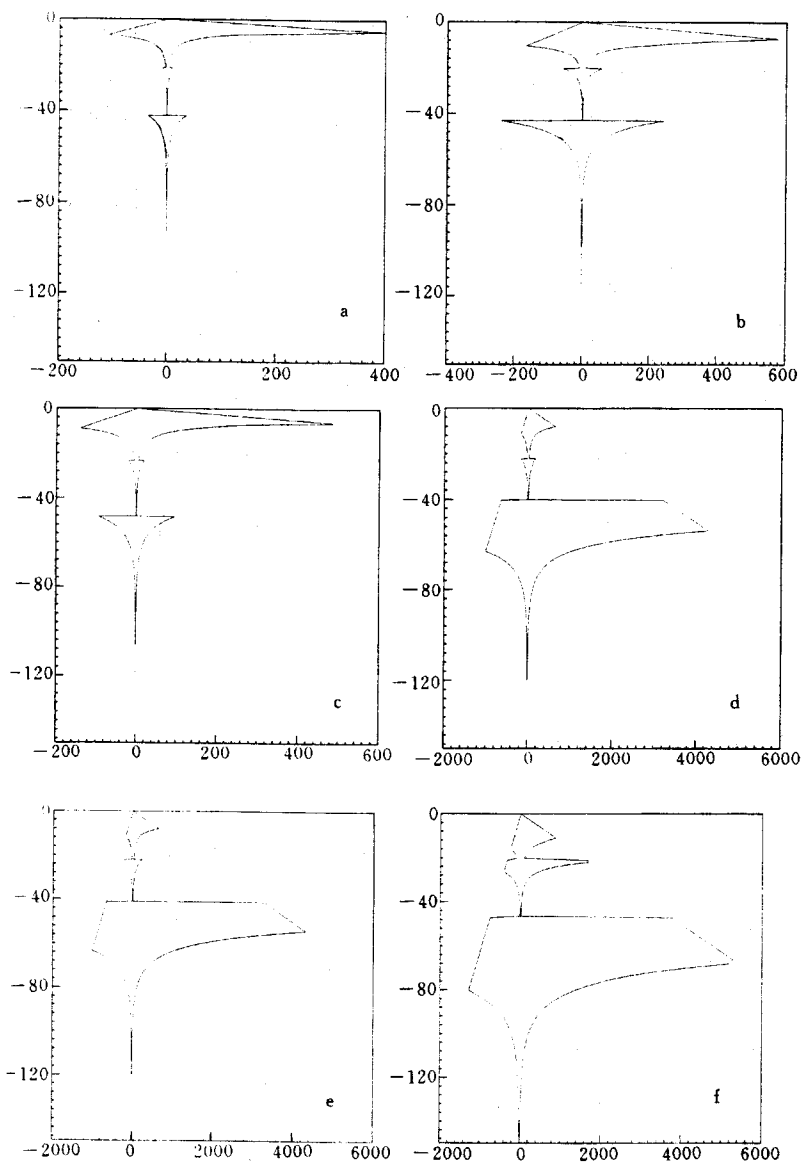


图4 三江地区和四川盆地岩石层强度分布图(纵坐标为深度,单位:km;横坐标为强度,单位:MPa)

a. 腾冲; b. 昆明; c. 丽江; d. 澜沧; e. 普洱; f. 川西北拗陷

高原物质东流改变了三江地区的岩石层力学结构,并转而进一步促进其在三江地区的流动。但是,至少我们可以认为无论是哪种因素导致了三江块体的低岩石层强度分布,它都构成了高原物质东流现今态势重要的物理、力学基础。

必须指出的是,本文对岩石层温度的确定主要是基于公式(3),即不考虑对流因素的热传导方程,因此,这也限定了我们所能计算的深度范围,即地球上部的热传导层,通常取为岩石层<sup>[16]</sup>。对于更大深度的地幔介质,其传热机制主要为热对流,因此(3)式不再适用。同样,对强度的确定也仅局限于岩石层内<sup>[16]</sup>。

由于内在的复杂性,地表大地热流资料可能是我们拥有的最为粗糙的地表地球物理观测

量之一。通常,我们对观测大地热流值需进行诸如地形、古气象、地表剥蚀、沉积和地下水流动等因素的改正。但是,由于我们对大地热流值产生影响的过程和因素了解有限,因此,所做的改正也不十分精确,这种不确定程度通常为 20%<sup>[15]</sup>。此外,我们对地球内部各圈层物质岩石热传导率和放射性热生成率等热学参数的确定亦很粗糙。所以,由此得到的岩石层温度及强度结构并不具有精确意义下的定量意义。但尽管如此,基于本文结果,我们至少可以得到以下定性意义的结论:

(1) 三江地区总体上为高温、低强度块体,四川盆地则为低温、高强度块体。

(2) 在其他物理、力学参数相同的情况下,岩石层的强度取决于地壳的厚度和岩石层的温度分布。地壳厚度大、温度高,则岩石层强度低;反之,强度高。

(3) 高强度的四川盆地对青藏高原东流物质起到阻挡作用,而相对低强度的三江块体则为高原物质东流提供了一条“低强度通道”,其综合效应使青藏高原的东流物质将三江块体作为物质运移优势方向,改变了物质流动的方向。

(4) 不同块体岩石层强度分布的差异可能与作用力一起构成了控制物质流动态势的重要力学因素。

## 参 考 文 献

- 1 滕吉文. 康滇构造带岩石圈物理与动力学. 北京: 科学出版社, 1994.
- 2 胡圣标, 汪集旻, 汪屹华. 黑水—泉州地质断面东段深部温度与岩石层厚度. 地球物理学报, 1994, 37(3): 330~337.
- 3 Wdowinski S, Bock Y. The evolution of deformation and topography of high elevated plateaus, I. Model, numerical analysis, and general results. J. G. R., 1994, 99(B4): 7103~7119.
- 4 Byerlee J. Friction of rocks, Pure and Applied Geophysics, 1978, 116, 615~626.
- 5 Lynch H D, Morgan P. The tensile strength of the lithosphere and the localization of extension, in Continental Extension Tectonics, edited by M. P. Coward, J. F. Dewey and P. L. Handcock, Geol. Soc., Spec. Publ., London, 1987, 28, 53~65.
- 6 汪集旻, 黄少鹏. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第二版). 地震地质, 1990, 12(4): 351~366.
- 7 汪缉安, 徐青, 张文仁. 云南大地热流及地热地质问题. 地震地质, 1990, 12(4): 367~377.
- 8 吴乾藩, 祖金华, 谢毅真, 等. 云南地区地热基本特征. 地震地质, 1988, 10(4): 177~183.
- 9 黄少鹏, 汪集旻. 四川盆地川西北拗陷几个深孔热流测试. 科学通报, 1990(10): 773~776.
- 10 袁学诚. 中国地球物理图集. 北京: 地质出版社, 1996.
- 11 马杏垣. 中国岩石圈动力学地图集. 北京: 中国地图出版社, 1996.
- 13 Liu H. Geophysical basis for crustal deformation under the Tibetan Plateau, Phys. of Earth and Planet Interiors, 1985, 41, 170~185.
- 14 黄培华, 傅容珊. 中国岩石层底面地幔对流状态的探讨. 地球物理学报, 1983, 26(1): 39~47.
- 15 Powell W G, Chapman D S, Balling N, et al. Continental heat flow density, in handbook of terrestrial heat-flow density determination. edited by R. Haenel, L. Rybach and L. Stegena, Kluwer Academic, Hingham, Mass., 1988, 167~222.
- 16 Zeyen H, Fernandez M. Integrated lithospheric modeling combining thermal, gravity and local isostasy analysis: Application to the NE Spanish Geotranssect. J. G. R., 1994, 99(B9): 18089~18102.