

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

中国东部上地幔热结构

——由岩石学模型推导

邓晋福 赵海玲

(中国地质大学, 北京)

中国东部新生代玄武岩中丰富的超镁铁岩包体, 是玄武岩浆喷出地表时取出的上地幔岩石标本。本文汇集了 405 个超镁铁岩中辉石的温压数据, 提出了更为精确的新的辉石地温。它所代表的上地幔平均地温梯度为 $3.3^{\circ}\text{C}/\text{km}$, 远小于由传导热模型推导的地温梯度(约 $14^{\circ}\text{C}/\text{km}$), 暗示了对流热传输占有重要位置。粗略估算表明, 对流热传输与传导热传输的贡献分别为 79% 与 21%。上地幔热结构的扰乱是新生代中国东部发育大陆裂谷构造与强烈玄武岩火山活动这一构造热事件的重要表现。基于辉石地温与地表热流值推导的现代地温场的对比, 提出了 Moho 可能是一个次级的热边界层, 中国东部现代地温场与岩石圈热结构, 可能仍主要反映了晚第三纪—第四纪构造热扰乱事件的结果, 或者说岩石圈的冷却才刚刚开始。



一、前言

温度是地球内部最重要的物理参数之一。地球内部岩石的物理性质与温度分布密切相关。因此, 在讨论岩石圈动力学过程中, 温度分布是一个不可缺少的重要参数。中国东部晚第三纪—第四纪玄武岩中, 含有丰富的上地幔超镁铁岩包体。包体以橄榄岩为主, 辉石岩极少。这些包体是玄武岩岩浆喷出地表时, 取出的上地幔岩石标本。利用辉石地质温压计计算上地幔岩石的温压数值, 可获得晚第三纪—第四纪上地幔的地温分布。自 1980 年我们提出中国东部第一条辉石地温曲线^[1]以来, 有关这方面的资料已有大量积累。本文汇集了 405 个辉石温压数据^[1-6], 其中橄榄岩与辉石岩中的辉石分别为 358 和 47 个, 提出更为精确的辉石地温分布(图 1)。我们^[1,7]曾提出, 中国东部新生代上地幔热状态相当于大洋型地温。地温分布的趋势(trend)可能是上地幔底辟作用的表现。东部陆壳下面这种“过热”状态, 可能是新生代构造活化的深部原因。这里我们将依据本文提出的更精确的辉石地温, 进一步讨论上地幔热结构, 热传输方式及其构造含义, 并与由地表热流值推导的现代地温场进行比较。

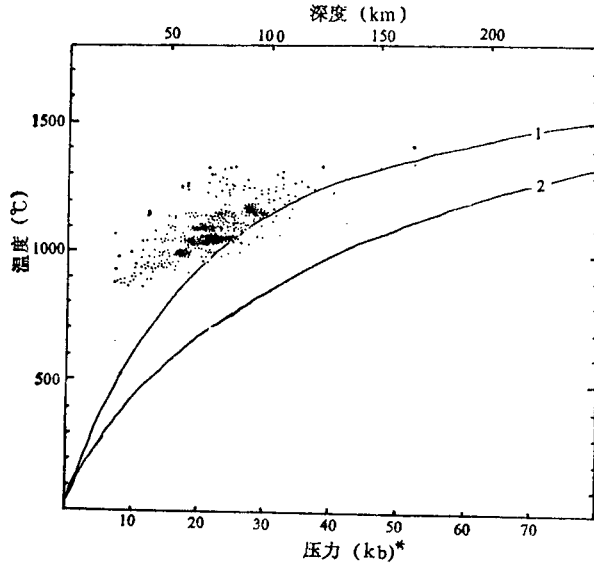


图 1 中国东部上地幔辉石地温(据 405 个辉石; 橄辉岩中 358 个, 辉石岩中 47 个)^[1-4]

* 按法定计量单位, kb 应被 Pa (1GPa = 10kb) 取代, 以下同

Fig. 1 The upper-mantle pyroxene-geotherm in eastern China (Data: 405 pyroxene; 358 in peridotite, 47 in pyroxenite)^[1-4]

1. 大洋地温 (oceanic geotherm); 2. 地盾地温 (shield geotherm)^[2]

二、辉石地温与热传输方式

图 2 表示了我国东部上地幔辉石地温分布的平均趋势, 其显著的特征之一是随深度变浅, 地温曲线偏离典型的大洋地温愈大, 它所代表的上地幔地温的平均梯度约为 $3.3^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 。这一梯度与无水条件下橄榄岩熔融的固相线的梯度 (约 $4^{\circ}\text{C}/\text{km}$) 类似。这样小的地温梯度是怎样形成的? 它又代表了何种热传输方式占优势?

从全球尺度看, 岩石圈是地球内部的热向地表传输的一个热边界层。其热传输 (heat transfer) 的方式, 以传导作用 (conduction) 为主, 典型的地温梯度 (geothermal gradient) 范围为 $10\text{--}50^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ^[8]。岩石圈下面的地幔, 以对流 (convection) 热传输为主, 其地温随深度的变化很小, 相当于绝热梯度 (adiabatic gradient)。典型的绝热梯度 $\leq 0.5^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ^[9,10]。Pollack 等^[11]基于热传导作用, 提出了大陆岩石圈热结构的全球模型。基于这个模型, 根据已知的大陆岩石圈厚度, 可大致预测岩石圈内的平均地温梯度。岩石学研究表明, 中国东部晚第三纪—第四纪岩石圈厚度为 $60\text{--}85\text{ km}$ ^[1]。如果我们取其平均厚度为 75 km , 依据 Pollack 的全球模型, 其平均地温梯度则为 $14^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 。据汪集咏同志面告 (1989), 基于传导热模型, 中国东部平均地温梯度约 $15^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 。中国东部新生代上地幔的地温梯度, 远小于由传导热引起的地温梯度, 它暗示了对流热传输占有重要位置。基于对流热传输的地温, 相当于绝热地温 ($\leq 0.5^{\circ}\text{C}/\text{km}$), 以及由 Pollack 模型推

1) 邓晋福、赵海玲, 1989, 中国东部新生代上部软流圈性质及其变迁历史。1989 年地球物理综合学术讨论会论文摘要集, 中国地球物理学会。

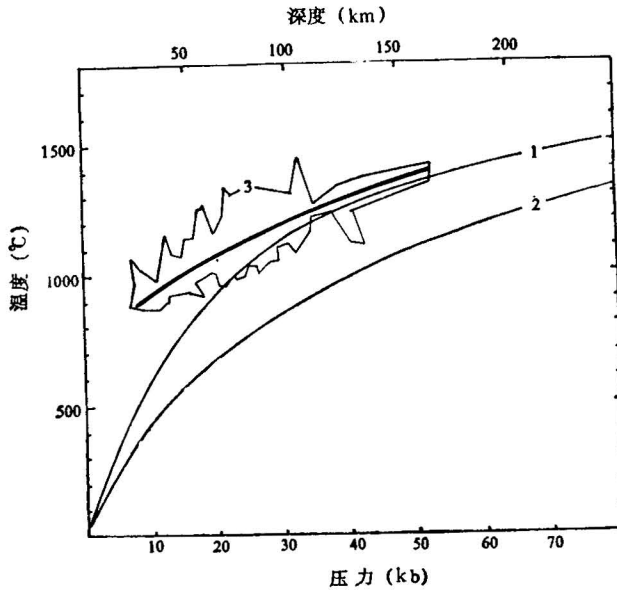


图 2 中国东部上地幔平均辉石地温

Fig. 2 The average pyroxene-geotherm of the upper mantle in eastern China

1. 大洋地温 (oceanic geotherm); 2. 地盾地温 (shield geotherm)^[9]; 3. 辉石地温分布, 粗线为地温趋势 (pyroxene-geotherm distribution; heavy line shows geothermal trend)

导的传导热传输的平均地温 ($14^{\circ}\text{C}/\text{km}$), 就可能粗略地估算, 对流热传输对形成东部上地幔 $3.3^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 的地温梯度的贡献约占 79%, 而传导热只占约 24%。

Morgan^[8] 指出, 岩石圈的热传输主要为传导方式, 但在活动的构造作用与岩浆作用时期内, 或称构造热事件 (tectonothermal event) 中, 热传输则以对流作用占优势, 这种现象称为岩石圈热结构的扰乱 (perturbation)。这样, 东部上地幔热结构的扰乱 (以对流作用热传输为主), 是新生代中国东部发育大陆裂谷构造与强烈的玄武岩火山活动这一构造热事件的重要表现。岩石学研究^[3,7,12]表明, 在新生代中国东部广泛发育固体上地幔的底辟作用、塑性变质变形作用、流体交代作用、岩石圈的拉伸减薄作用、局部熔融作用、软流圈的底辟上隆作用, 以及玄武岩岩浆的上升喷发作用等。看来, 这些作用是实现对流热传输的主要途径。

三、热流值的推算与比较

Pollack 的大陆岩石圈热结构全球模型^[11], 建立了岩石圈厚度与地表热流值之间的依赖关系。我们将依据这个模型, 从岩石圈厚度推导地表热流值, 进而与地表热流的测定值之间进行比较。新生代原生玄武岩岩浆来自软流圈顶部, 根据无水的岩浆模型估算的原生玄武岩岩浆的起源深度, 早第三纪与晚第三纪—第四纪分别为 50—55 km 和平均 70 km^[3,7], 它们分别代表了 2 个时期的岩石圈厚度。当岩浆中含水时, 其温度与 SiO_2 活度均降低, 因而, 与干岩浆体系相比, 含水岩浆的起源深度加大。采用含水岩浆模型, 早第三纪与晚第三纪—第四纪原生玄武岩岩浆的起源深度, 分别为 55—60 km 以及平均的

75 km¹³⁾。这样, 依据 Pollack 的全球模型可粗略地估算, 早第三纪东部岩石圈平均厚度约 55—60 km, 对应的地表热流值约为 80—85 mW/m²; 晚第三纪—第四纪岩石圈平均厚度约 75 km, 对应的地表热流值约 65 mW/m²。根据已有的现代地表热流测定值^[13-16], 中国东部大陆裂谷区的平均值约为 64 mW/m², 辽河地区在早第三纪, 古热流值为 84 mW/m^{2[14]}。两种不同途径独立地获得的地表热流值的一致性表明, 本文提出的热结构的岩石学模型是合理的。

按照 Pollack 的经验公式^[11], 地幔热流值 q^* 与区域平均地表热流值 \bar{q}^0 的关系为, $q^* = 0.6 \bar{q}^0$ 。依据岩石学模型推导的晚第三纪—第四纪的平均地表热流值 $\bar{q}^0 = 65 \text{ mW/m}^2$, 可推知地幔热流值 $q^* = 39 \text{ mW/m}^2$ 。这与汪集旻等采用由地表“剥层”法得到的地幔热流值为 $q^* = 41 \text{ mW/m}^2[14]$ 是大致吻合的。这从另一个侧面支持了我们提出的热结构的岩石学模型。

四、Moho 次级热边界层

如上所述, 如果新生代中国东部上地幔热结构的形成, 主要来自对流作用热传输的贡献, 那末, 它暗示了在 Moho 附近大部分的热, 仍应回到上地幔中, Moho 可能是岩石圈内一个重要的次级热边界层。取 Moho 平均深度为 32 km, 根据辉石地温(图 1, 2), 可知 Moho 的温度为 930°C。如果假设没有 Moho 次级热边界层, 地壳内为传导热传输, 取地壳岩石平均热导率 (K) 为 2.5 W/m^{2[11]}, 依照 $q = K \frac{\Delta T}{\Delta Z}$, 则可求出地幔热流值 [q^*] = 65 mW/m², 与其对应的地表热流值 [\bar{q}^0] = 108 mW/m²。显然, 由此推导出的 [q^*] 与 [\bar{q}^0] 太大, 与由热流测定值以及上面的岩石学模型推导的 q^* , \bar{q}^0 相比较差别很大。它表明无 Moho 次级热边界层的模型是不合理的。上述模型计算, 暗示了上地幔对流热传输的存在和 Moho 可能是一个次级的热边界层。如果我们假设 Moho 热边界层的合理厚度为 1—2 km (ΔZ), 以传导作用方式, 把此边界层的下界面的地幔热传输到该边界层的上界面, 亦即地壳的底界面, 取平均热导率为 2.5 W/m^{2[11]}, 依照 $q = K \frac{\Delta T}{\Delta Z}$ 的公式, 根据上述岩石学模型得到的 $q^* = 39 \text{ mW/m}^2$, 可求出 $\Delta T = 16 - 32^\circ\text{C}$ 。这表明, 达 Moho 边界层下界面的对流上升的地幔降温约 16—32°C, 就可提供 39 mW/m² (q^*) 热流给予上覆的地壳的底界面 (即 Moho 边界层的上界面)。这样, 如果上升的地幔热流的温度为 930°C 的话, 则重新返回上地幔的下降的热流的温度将为 914—898°C。依 Moho 次级热边界层模型的粗略计算, 支持了上地幔以热对流作用为主的模型。

五、壳-幔热结构及其构造含义

如果我们假设地壳部分以传导热为主, 则可推测, 中国东部壳-幔的地温不是一条平滑的曲线, 而是一条折线(图 3)。图 3 中上地幔的地温据图 1, 2, 地壳底界温度取典型的华北裂谷区的平均值 670°C^[15], Moho 边界层很薄, 由于比例尺太小, 近似一条水平线, 实

1) 邓晋福、赵海玲, 1989, 中国东部新生代上部软流圈性质及其变迁历史。1989 年地球物理综合学术讨论会论文摘要集, 中国地球物理学会。

实际上它是一条很缓的斜线。这样,本文提出的中国东部壳-幔的热结构由 3 部分构成。下

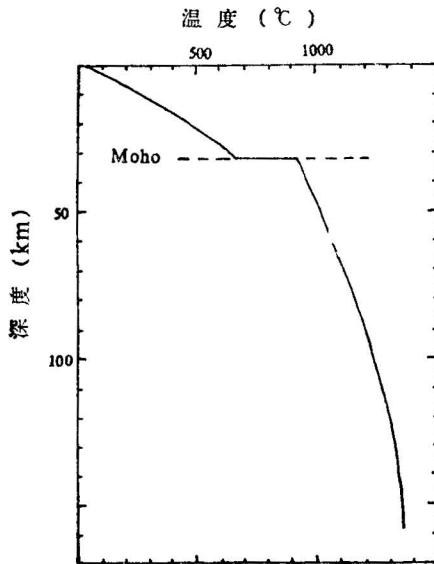


图 3 中国东部上地幔-地壳的热结构

Fig. 3 The thermal structure of crust-upper mantle in eastern china

部为以对流为主的上地幔和上部以传导热为主的地壳。地壳是岩石圈的一级热边界层,它们之间有一个次一级的 Moho 热边界层。它们分别对应于图 3 折线状地温的下部、上部的斜线状地温分布,以及中部的近水平状的地温分布。看来,中国东部壳-幔热状态是一种被扰乱了的热结构,符合于在新生代发育大陆裂谷作用以及强烈的玄武岩火山喷发的构造热事件。

现代地温场与晚第三纪-第四纪地温场的类似,暗示了现代中国东部壳-幔热结构,仍主要反映了晚第三纪-第四纪大陆裂谷作用发育的构造热扰乱事件的结果。或者说,从地质学的时间尺度来看,岩石圈的冷却可能才刚刚开始,要恢复到大陆岩石圈平衡的热状态,还需要经历相当长的地质时间。

参 考 文 献

- [1] 邓晋福、鄂莫岚、路风香,1980,中国东部某些地区碱性玄武岩中包体的温度、压力计算。地质论评,26卷第2期,第112-120页。
- [2] 鄂莫岚、赵大升主编,1987,中国东部新生代玄武岩及深部岩石包体。科学出版社。
- [3] 池际尚主编,1988,中国东部新生代玄武岩及上地幔研究(附金伯利岩)。中国地质大学出版社。
- [4] 刘岩新、杨美娥、胥怀济、郭金娣、王文湖,1981,华北地区新生代碱性玄武岩中超镁铁质捕虏体的初步研究。地震地质,3卷,第3、4期,第1-16,39-48页。
- [5] 邓晋福、路风香、鄂莫岚,1988,汉诺坝玄武岩中超镁铁岩包体及其推导的上地幔性质。矿物学岩石学论丛,4,第18-30页。
- [6] 赵海玲,1990,东南沿海地区晚第三纪-第四纪大陆裂谷型火山作用及深部作用过程。中国地质大学出版社。
- [7] 邓晋福、鄂莫岚、路风香,1987,中国东北地区上地幔组成、结构及热状态。岩石矿物学杂志,6卷,第1期,第1-10页。
- [8] Morgan, P., 1984, The thermal structure and thermal evolution of the continental lithosphere. Phys. & Chem. Earth, Vol. 15, pp. 107-194.
- [9] Ringwood, A. E., 1975, Composition and Petrology of the Earth's Mantle. McGraw-Hill, Inc.
- [10] Jeanloz, R. and Morris, S., 1988, 地壳和地幔中的温度分布。地球物理学进展, Vol. 3. No.1, pp. 12-22.
- [11] Pollack, H. N. and Champman, D. S., 1977, On the regional variation of heat flow, geotherm, and lithosphere thickness. Tectonophysics, Vol. 38. No. 3/4, pp. 279-296.
- [12] 邓晋福、鄂莫岚、路风香,1985,东北地区新生代玄武岩及其与大陆裂谷构造的关系。国际交流地质学术论文集——为27届国际地质大会撰写, No. 3, 第13-22页,地质出版社。
- [13] 中国科学院地质研究所地热组,1979,中国第一批大地热流数据。地震学报,1卷,第1期,第91-107页。
- [14] 汪集场、汪缙安,1986,辽河裂谷盆地地幔热流。地球物理学报,29卷,第5期,第450-459页。
- [15] 吴乾善、谢毅真、祖金华、王都,1985,华北大地热流与地震活动性。现代地壳运动研究,第1期,第133-141页,地震出版社。
- [16] 万天丰、童永福、郑蔚雯,1987,福建岩层的热结构。现代地质,1卷,第3/4期,第412-423页。

THE THERMAL STRUCTURE OF THE UPPER MANTLE IN EASTERN CHINA —INFERRED FROM THE PETROLOGICAL MODEL

Deng Jinfu and Zhao Hailing

(China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract

Cenozoic basalt in eastern China contains abundant ultramafic xenoliths which are specimens of pyrolites taken during basalt eruption. A total of 405 P-T data of pyroxene in the ultramafic rocks have been collected, which present a more precise pyroxene geotherm. The average geothermal gradient in the upper mantle represented by the pyroxene geotherm is about $3.3^{\circ}\text{C}/\text{km}$, which is much less than that derived from the conductive thermal model ($\approx 14^{\circ}\text{C}/\text{km}$), implying the significance of convective heat transfer. The calculation shows that the contributions of convective and conductive heat transfers are 79% and 21%, respectively. The perturbation in the thermal structure of the upper mantle is an important manifestation of the tectonothermal event that the Cenozoic continental rifting and intensive basaltic volcanism occurred in eastern China. Based on the pyroxene geotherm and its comparison with the current geothermal field derived by the measurements of the surface heat flows, it is suggested that the Moho may be a secondary thermal boundary. The current geothermal field and the thermal structure of the lithosphere in eastern China may mainly reflect the result of the tectonothermal disturbance in the Neogene-Quaternary, in other words, the lithosphere has just begun to cool.

作者简介

邓晋福,生于1935年2月,1956年毕业于北京地质学院地质系,长期从事火成岩岩石学与岩石物理化学研究,发表有岩石相平衡与岩石成因,大陆裂谷与深部过程和上地幔组成、结构及热状态等方面的专著和论文。现任中国地质大学(北京)岩石矿物地球化学系主任、教授、博士生导师。通讯处:北京市学院路29号,邮政编码100083。