

国家自然科学基金资助项目

(~~晕耀园园园园~~, ~~源藏园园~~, ~~源缘园园~~) 研究成果

华北和华南岩石圈 热状态、流变学特征与地壳成分

汪摇摇洋摇摇著

地质出版社

· 摇摇北摇摇京摇摇 ·

管如此，我对下列人士还要致以衷心的感谢，感谢他们在工作中给予本人的帮助。他们是：中国科学院地质与地球物理研究所汪集旻院士、滕吉文院士、熊亮萍研究员、胡圣标博士、张旗研究员，国土资源部中国地质调查局发展研究中心袁学诚教授，中国科学院原长沙大地构造研究所陈国达院士、杨心宜研究员，中国科学院广州地球化学研究所李献华研究员，中国地质信息院肖庆辉研究员，成都理工大学朱介寿教授、曹家敏教授。

除国家自然科学基金 ~~项目~~项目外，在研究过程中还先后得到国家自然科学基金项目“南海北部边缘地壳成分及其非均匀性研究”（~~项目~~）、中国博士后科学基金、中国科学院王宽诚博士后奖励基金、中国科学院南海海洋研究所边缘海地质与古环境开放室基金课题（~~项目~~）和国土资源部国际合作与科技司科技发展专项计划“中国岩石圈三维结构及其演化”的资助。

汪摇洋

目 录

前 言	
第一章 绪 论	(页)
第二章 华北和华南地区岩石圈热状态	(源)
摇第一节 摇热流数据分布概貌	(源)
摇第二节 摇中国大陆热流值与构造-热事件时代的关系	(远)
摇第三节 摇地幔热流值	(怨)
摇第四节 摇岩石圈热状态	(员)
摇第五节 摇关于华北和华南地区岩石圈根的讨论	(圆)
第三章 华北和华南地区岩石圈流变学特征	(圆)
摇第一节 摇研究方法及数据简介	(圆)
摇第二节 摇岩石圈流变学特征	(圆)
摇第三节 摇岩石圈三维流变学模型	(猿)
摇第四节 摇岩石圈流变学空间非均匀性对活动构造变形的制约	(猿)
第四章 华北和华南地区地壳成分的大地热流制约	(猿)
摇第一节 摇原理、方法和数据	(源)
摇第二节 摇中国大陆地壳平均生热率的上限估计	(源)
摇第三节 摇对现有中国大陆区域地壳和岩石圈成分模型的检验	(源)
摇第四节 摇应用热流值和地下流体氦同位素比值约束地壳成分	(缘)
摇第五节 摇应用 配煤流反演 反演方法研究地壳平均生热率	(缘)
摇第六节 摇华北和华南地区地壳成分的基本特征	(远)
第五章 华北和华南东部地区新生代岩石圈热演化	(苑)
摇第一节 摇方法与模型简述	(苑)
摇第二节 摇华北和华南东部新生代热演化史	(苑)
摇第三节 摇华北和华南东部新生代热演化的动力学意义	(苑)
第六章 主要认识与结论	(愿)
参考文献	(愿)

第一章 摇绪摇摇论

本书研究所涉及的地域范围包括华北、华南地区和秦岭—大别—苏鲁一带，其中，华北地区范围是除朝鲜半岛和阿拉善地块以外的“中朝准地台”区域，而华南地区包括扬子克拉通、华南褶皱带（包括华夏地块和东南沿海褶皱带）和云南西部的兰坪—思茅地区。

华北和华南地区经历的地质演化历史漫长。其中华北是发现有最古老的古太古代（猿愿圆葬）岩石记录的地区，而华南的扬子克拉通则有 猿愿圆葬 的古老陆核。在经历漫长的演化后华北和扬子先后形成统一的克拉通；而华夏陆块则于加里东期之后与扬子克拉通拼合，组成古华南地块。在印支期华北和华南最终在秦岭—大别—苏鲁一线发生碰撞，开始形成统一的中国东部大陆。中生代时期华北和华南地区经历了构造—岩浆活动的改造。在华北地区，统一的地台开始分化，西部鄂尔多斯地区主体一直保持相对稳定的发展，而东部卷入印支期大陆碰撞造山系统中；华南地区东部受古太平洋板块俯冲作用的影响形成陆缘沟、弧、盆体系。新生代以来，华北地区东部大陆裂谷型的构造发育，发育有大量玄武岩，形成裂谷盆地；而华南东部的浙闽粤琼沿海地区也有玄武岩活动，西部的四川西部和云南中部、西部地区则卷入印度—亚洲碰撞造山系统（程裕淇，猿怨圆）。

华北和华南是我国地质学研究程度最高的地区（程裕淇，猿怨圆），也是我国地球物理测深资料最为密集的地区（袁学诚，猿怨圆），其中地学断面（猿怨圆）有缘条。包括 猿怨圆 在内的人工地震测线在华北和华南地区各有 猿怨圆 多条。地球物理探测的其他方法，如重、磁、大地电磁等亦积累了丰富成果（袁学诚，猿怨圆）。

华北和华南地区的区域地球化学研究在我国开展得也最早。近年来，采用当前国际通用的以人工地震波速岩性解释为基础的区域地球化学研究方法的基础上，已经先后发表了关于秦岭褶皱带（猿怨圆，猿怨圆；张本仁等，猿怨圆）、华北克拉通（鄢明才和迟清华，猿怨圆；迟清华和鄢明才，猿怨圆；猿怨圆，猿怨圆）、扬子克拉通（猿怨圆，猿怨圆）和华东南地块（鄢明才和迟清华，猿怨圆）的地壳成分模型。此外，黎彤及其合作者（猿怨圆，猿怨圆，猿怨圆，猿怨圆）也发表有涉及华北和华南地区地壳或岩石圈的成分模型。这些成分模型中给出丰度值的元素数量都达数十种。因此，华北和华南地区是目前我国地壳成分研究得最为充分和详细的区域。

在大地热流数据方面，华北和华南地区的实测热流值数量占中国大陆热流观测值总数的 猿怨圆 左右（汪集旻和黄少鹏，猿怨圆；胡圣标和汪集旻，猿怨圆；猿怨圆，猿怨圆；猿怨圆，猿怨圆；猿怨圆，猿怨圆），而且其地理分布基本覆盖全区，从而为开展深入的深部地热学研究提供了重要的数据基础。在深部地热学研究方面，汪集旻院士及其研究集体先后研究了华北盆地、东南沿海地区和云南地区等地的深部地热问题（汪集旻，猿怨圆；汪缙安等，猿怨圆；胡圣标和汪集旻，猿怨圆），同时编制发表了中国大陆 猿怨圆 温度图、热岩石圈厚度图等（猿怨圆，猿怨圆）。

20世纪 80年代后期以来,对华北和华南地区的深部地热学研究大为减少。许多人认为深部地热学工作的研究方法简单,所得到的深部信息有限。事实是否真的如此?我们认为这种看法是不正确的。一方面,大陆动力学是 20世纪 80年代以来国际固体地球科学的一个重要研究领域^①。岩石圈流变学特征是理解大陆岩石圈变形的关键——“对于大陆变形研究而言,最关键的制约因素并非计算能力或是我们的想象力,而是对大陆岩石圈流变学结构不均匀性的认识”(蔡其华, 1995),大陆岩石圈流变学研究得到越来越多的重视(参见 刘建波, 1995)。由于岩石圈热状态是制约其流变学特征的最重要因素,因此根据地热学研究,探索岩石圈热状态演化及其对岩石圈流变学特征的制约,进而探讨其对大陆变形过程的影响,是当前理论地热学研究中的前沿课题。另一方面,当前国际上对大陆地壳成分的研究方兴未艾,陆壳成分是研究地球历史中大陆生长演化的主要基础数据,也是探索地幔成分演化的重要数据(陈建生, 1995; 陈建生, 1995; 吴福元, 1995)。由于大地热流观测值可以提供对地壳中铀、钍、钾等放射性生热元素丰度的直接制约,因而热流数据在地壳成分研究中受到了相当大的重视(陈建生, 1995; 陈建生, 1995)。同时,对地震波速的岩性解释需要进行温度校正(陈建生, 1995),因此根据地热学研究得到地壳的温度分布对地壳成分模型研究而言也是重要的。所以,大地热流数据和深部地热学研究可以为地壳成分研究这一地球化学领域的重要课题做出其应有的贡献。因此,地热学是连接地球物理和地球化学学科的桥梁,是联系地球物质成分研究与变形过程研究的纽带。

作者攻读博士学位期间,在中国大陆和海域以及邻区大地热流实测值汇编资料的基础上,编制完成了中国及邻区 1:100万热流分布图和中国及邻区大地热流图(1:100万网格精度),并对中国大陆主要沉积盆地的岩石圈热结构和流变学强度进行了研究(汪洋, 1995; 辛其华, 1995)。发现了受岩石圈热状态制约的中国大陆岩石圈流变学强度空间非均匀性,并且认识到这种流变学非均匀性是影响中国大陆现今构造变形格局的重要因素(汪洋, 1995; 辛其华, 1995)。同时,根据对中国大陆热流空间分布的小波变换分析,发现 1000~10000 尺度的上地幔对流胞(陈建生, 1995)是影响中国大陆及邻区热流分布的重要深部动力学因素(汪洋, 1995)。因此,深入发掘大地热流资料所携带的深部信息的工作并没有完成,深部地热学研究过去是,现在是,将来仍然是我们探索岩石圈深部与温度相关的固体地球科学信息的主要途径。

对中国大陆东部地区而言,最引人注目的地质现象是:华北克拉通东部地区自燕山期以来大陆岩石圈明显的减薄,丢失了 1000~10000 厚的岩石圈地幔,但扬子克拉通主体却未发生大规模的岩石圈减薄过程;华北地区东部和华南东部地区陆壳厚度也明显减薄。因此,华北和华南地区现今岩石圈的三维结构存在强烈的非均匀性。这种非均匀性必然体现在各种地球物理场的横向变化中,岩石圈热状态即是这种非均匀性的一种重要表现。对华北和华南地区处于不同热状态下的内部构造单元岩石圈流变学特征的研究,有助于阐明当地现今岩石圈流变学特征的空间非均匀性,从而为理解现今华北东部发育活动构造,和扬子克拉通主体与鄂尔多斯地区相对保持稳定这种复杂的大陆构造变形格局提供重要线索。为深入探讨华北地区东部新生代以来的构造-岩浆活动及其深部动力学起源,也有必要开

① 李晓波,肖庆辉等译,1995,美国大陆动力学研究的计划,中国地质矿产信息研究院。

展对岩石圈流变学结构的研究。同时，岩石圈结构剧烈变化所伴随的构造运动必然导致对地壳成分的改造，研究经过改造的华北东部地壳与未经改造的华北西部和扬子克拉通地壳在成分上的异同，将了解克拉通地壳成分的空间非均匀性及其演化提供难得的实例。因此，在华北和华南地区的固体地球科学研究中，岩石圈热状态、岩石圈体系（包括地壳和岩石圈地幔）的成分特征以及它们的演化是不可或缺的重要组成部分。

研究工作以华北和华南地区大地热流资料为基础，以新的研究思想为指导，通过有针对性地对地采用新的研究方法，将地质模型的定性分析与计算模拟等定量研究相结合，着重探讨前人尚未加以关注或很少予以关注的一些与深部地热学密切相关的重要固体地球科学问题，主要包括：①华北和华南地区岩石圈一维稳态热结构的计算、热岩石圈厚度的求取；②华北和华南地区岩石圈稳态温度场模型的建立；③根据岩石矿物物理性质实验成果，结合计算得到的热岩石圈厚度和岩石圈温度分布，探讨扬子克拉通地区上地幔高导层埋深与低速层埋深不一致的可能原因；④华北和华南地区岩石圈流变学特征的研究和岩石圈有效弹性层厚度（ L_{eff} ）的计算；⑤华北和华南地区岩石圈流变学强度三维模型的建立；⑥华北和华南地区岩石圈流变学强度横向非均匀性的构造动力学意义；⑦大地热流资料对区域地球化学研究得到的地壳成分模型的铀、钍、钾丰度值的检验；⑧根据大地热流资料研究中国大陆地区的地壳平均生热率及相关的铀、钍、钾元素丰度的上限约束；⑨利用地壳平均生热率推算地壳整体的 ^{238}U 含量；⑩在大地热流资料基础上应用 $Q = \rho C_p \Delta T / \Delta t$ 法反演地壳平均生热率和地幔热流值；⑪华北和华南东部地区新生代热演化导致的岩石圈粘度、流变学强度特征演化，及其对构造变形形式和宏观地貌形成的制约。

第二节 中国大陆热流值与构造-热事件时代的关系

热流数据的统计显示,大陆热流值随地质体经历的最后一次构造-热事件年龄的增加而呈现降低的趋势(悦真身葬造孕缘,孕缘;孕缘;孕缘;孕缘;孕缘)。构造单元的构造热事件年龄定义为其经历的构造活化事件或构造-岩浆活动事件的年龄。在表圆-员中我们列出了中国大陆各构造单元经历的主要构造-热事件的年代。其中主要构造事件时代对盆

表圆-员 中国大陆主要构造区平均热流值及其构造、岩浆作用时代

表圆-员 中国大陆主要构造区平均热流值及其构造、岩浆作用时代

构造单元	匝	最新岩浆活动时代	主要构造事件时代	基底形成时代
盆地:				
准噶尔	缘	—	圆-猿	圆-猿
吐哈	源	—	圆-猿	圆-猿
塔里木	源	—	圆-猿	圆-猿
海拉尔	远	—	员-圆	圆-猿
松辽	苑	猿-缘	圆-猿	圆-猿
柴达木	缘	—	圆-猿	圆-猿
鄂尔多斯	远	员-圆	员-圆	圆-猿
汾渭地堑	远	—	员-缘	圆-猿
华北	远	猿-缘	猿-缘	圆-猿
南华北	源	—	员-圆	圆-猿
南阳	缘	—	员-圆	圆-猿
苏北	苑	猿-缘	员-圆	圆-猿
四川	缘	—	员-圆	圆-猿
江汉及其周边	缘	缘-远	员-圆	圆-猿
兰坪-思茅	远	猿-缘	员-圆	圆-猿
楚雄	苑	猿-缘	员-圆	圆-猿
造山带及其他构造单元:				
阿尔泰	源	—	缘-远	缘-远
北山	缘	—	圆-猿	圆-猿
兴蒙	缘	圆-缘	员-源	圆-猿
燕山-阴山	缘	—	员-圆	圆-猿
祁连山	远	—	约缘	源
秦岭	远	—	员-圆	圆-猿
大别山	缘	—	员-圆	圆-猿
苏鲁	苑	—	员-圆	圆-猿
藏北	源	圆-远	员-圆	圆-猿
康滇构造带	苑	猿-缘	员-猿	圆-猿
扬子地台中部	源	—	员-圆	圆-猿
下扬子地区	远	猿-缘	圆-猿	圆-猿
华南造山带	苑	圆-缘	圆-猿	圆-猿
藏南-滇西	愿	圆-缘	约缘	圆-猿

摇摇注:匝:平均热流值,单位为皂宰·皂^圆;各种地质作用时代的含义参见正文,单位为配葬*指白垩纪构造-热事件(据叶加仁等,圆-猿)。

第三纪以来的多期火山岩（邓万明和孙宏娟，1992）。其原因应当是：该地区稀少的大地热流值来自非常浅表的钻孔的测温资料，浅表温度梯度受气候变化的影响大，而又未经校正，深部热流值本身不能代表该地区来自深部的传导热流。

中国大陆主要构造单元平均热流值与其经历的最新一次构造-热事件的时代之间存在的相关关系表明，中国大陆大地热流的总体空间分布格局受制于新生代的大尺度构造动力学过程，东部地区高热流值的成因受太平洋板块俯冲影响，而西部则同青藏高原的形成和发展有关。

刁恩等（1990）根据他们对中国大地热流实测值的统计认为，中生代和新生代的构造活动是影响中国热流值高低的主要事件。我们认为，只有新生代的构造-热事件才是影响中国大陆热流值高低的关键，刁恩等（1990）的观点值得商榷。

刁恩等（1990）在热流值和构造-热事件的统计中，采用大地构造图确定各个热流实测值所在背景的构造-热事件年代，据此做各个实测值与构造-热事件时代的图解。在他们的统计图中，最新构造-热事件时代为燕山期和新生代的平均热流值均在 $200 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上（刁恩等，1990）。由于中国大陆实测热流值的空间分布十分不均匀，华北和华南地区热流值数据多，其中华南褶皱带的数据量是较多的。因此刁恩等（1990）的这种统计方法导致了由于数据的地理分布不均匀而带来的偏差。在刁恩等（1990）的统计中，华南褶皱带又细分为内陆的“华南带”和沿海的“浙闽带”，并且认为“浙闽带”所经历的最新一次构造-热事件的时代是燕山期。实际上，从浙江经福建到广东和海南，新生代以来发育幔源玄武质岩浆活动（刘若新等，1992）。同样地，刁恩等（1990）认为川滇西部的康滇构造带和楚雄盆地所经历的最新一次构造-热事件的时代为中侏罗世，而实际当地在新生代受印度-亚洲碰撞作用的影响，发生强烈的活动构造变形和幔源玄武质岩浆作用（刘若新等，1992）。由于他们统计的“浙闽带”和川滇西部的实测值数量分别有 15 和 18 个之多，超过其统计的热流值总数的 1/3，而相应的平均热流值分别达 $200 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $200 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ 。因此，采用刁恩等（1990）的统计方法易于得出中生代也是影响中国热流值高低的构造-热事件活动时代的观点。

刁恩等（1990）的“华南带”的平均热流值为 $200 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ ，热流观测值数量为 18 个，而当地经历的最新一次构造-热事件的时代为燕山期。按其所给出的“华南带”所有实测热流值的分布位置，可以确定其所有观测值所在的大地构造位置是武功-诸广褶皱带（程裕淇，1992）。如何理解“华南带”所具有的高热流值？我们认为，这主要是由于当地的地壳成分与华北和华南地区以及中国大陆其他构造单元相比具有特殊性，其地壳平均生热率可能明显高于其他地区。同位素地球化学研究表明，华东南地区武功-诸广褶皱带与其东侧的武夷-云开褶皱带 [即刁恩等（1990）的“浙闽带”的内陆部分]，其表壳沉积岩、变质岩和岩浆岩所反映的地壳成分和地壳增生演化特征是一致的，在地球化学上属于同一“同位素地球化学省”（陈江峰和江博明，1992）。对岩浆岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值（ μ ）的统计结果表明，武功-诸广褶皱带和武夷-云开褶皱带（华夏陆块）的 μ 值高于华夏陆块东侧的浙江和福建两省的沿海地区的 μ 值（陈江峰和江博明，1992）。同时，在华夏陆块上发育大量杂型花岗岩，而在东南沿海地区以隕型花岗岩为主（程裕淇，1992）。这些均暗示华夏陆块的地壳成分较浙闽沿海地区富含壳源组分，即前者地壳的强不相容元素（包括放射性元素）的丰度高。我们在本专著第四章指出，东南沿海褶皱带

的地壳平均生热率的上限是 $1.5 \times 10^{-6} \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{s}$ ，其可能的数量级为 $1 \sim 2 \times 10^{-6} \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{s}$ 左右，而武夷山地区的上限为 $1.5 \times 10^{-6} \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{s}$ 。因此，如果华夏陆块地区地壳平均生热率为 $1 \sim 2 \times 10^{-6} \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{s}$ ，取华东南地区地区地壳厚度为 35 km ，可以估算出华夏陆块的地壳热流将比东南沿海地区高出 $1 \sim 2 \times 10^{-6} \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{s}$ 。根据本书第四章的研究结果，华北和华南地区大部分构造单元的地壳平均生热率在 $1 \times 10^{-6} \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{s}$ 以下，中国大陆西部地区的地壳生热率还远低于东部。华夏陆块区的高生热率导致其地壳热流值较中国大陆其他“正常”的构造单元高出 $1 \sim 2 \times 10^{-6} \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{s}$ 。因此，刁文等 (1990) 的“华南带”的高热流值与其地壳成分的特殊性有关。由于刁文等 (1990) 的“华南带”中的实测热流数据有 15 个，这些数据加上壳幔所述及的浙闽带和川滇西部的 12 个数据，就导致了刁文等 (1990) 所认为的中生代构造-热事件也是影响中国热流值高低的重要因素的观点。

上面的分析表明，刁文等 (1990) 对某些地区最新一次构造-热事件时代的估计与统计得出的观点有值得商榷之处。我们采用各构造单元的平均值进行中国大陆热流值与构造-热事件时代的统计，显然有助于克服由于各构造单元的实测热流值的数量相差较大所带来的数据空间分布的非均匀性的影响。例如：川滇西部地区我们将其划分为康滇构造带和楚雄盆地两个单元处理，因此统计量就由刁文等 (1990) 的 15 个减少为 10 个；“浙闽带”作为一个单元 (华南褶皱带) 参与统计和作图，统计量由刁文等 (1990) 的 12 个减少到 1 个。所以，我们的统计结果应该比刁文等 (1990) 的结果更为客观和准确。

总之，中国大陆具有高热流值 ($1.5 \times 10^{-6} \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{s}$) 的绝大部分构造单元，其经历的最新一次构造-热事件的时代为新生代，而非中生代及其以前的时期。只有新生代的构造-热事件才是影响中国大陆热流值高低的主要因素。

第三节 摇地幔热流值

华北地区东部以及华南的东南沿海等地新生代以来广泛发育玄武质岩浆活动 (刘若新等, 1990)。陈建生等 (1990)、刘若新等 (1990) 根据玄武岩及其所含地幔包体的研究，提出华北东部新生代时期岩石圈减薄、软流圈顶面抬升的深部动力学模型。地热学研究和其他地球物理探测结果均表明，现今华北地区东部和华南东南沿海一带的岩石圈厚度薄，往往小于 100 km (参见表 1-1)。因此，华北地区东部和华南东南沿海地区必然存在深部的热扰动，这将导致地幔热流值的增高。显然正确估计这些地区的地幔热流值对岩石圈热状态和热演化的研究具有重要意义。

表 1-1 华北和华南主要构造单元平均热流值和深部地热特征参数

构造单元	热流值 q	地幔温度 T_m	地幔热导率 k	地幔热流 q_m	地幔热流 q_m	地幔热流 q_m	地幔热流 q_m
盆地：							
鄂尔多斯	1.0×10^{-6}	1500	0.025	2.5×10^{-6}	2.5×10^{-6}	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-6}
汾渭地堑	1.0×10^{-6}	1500	0.025	2.5×10^{-6}	2.5×10^{-6}	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-6}
华北	1.0×10^{-6}	1500	0.025	2.5×10^{-6}	2.5×10^{-6}	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-6}

续表

构造单元	匠	匠 _壳	贼 _壳	贼 _壳	匀 _壳	匀的误差 _壳
南华北(江淮)	源 _壳 (源 _壳)	源 _壳	源 _壳	源 _壳	源 _壳	源 _壳
南阳	缘 _壳 (缘 _壳)	缘 _壳	缘 _壳	缘 _壳	缘 _壳	缘 _壳
苏北	苑 _壳 (苑 _壳)	苑 _壳	苑 _壳	苑 _壳	苑 _壳	苑 _壳
四川	缘 _壳 (缘 _壳)	缘 _壳	缘 _壳	缘 _壳	缘 _壳	缘 _壳
江汉及其周边	缘 _壳 (缘 _壳)	缘 _壳	缘 _壳	缘 _壳	缘 _壳	缘 _壳
兰坪-思茅	远 _壳 (远 _壳)	远 _壳	远 _壳	远 _壳	远 _壳	远 _壳
楚雄	苑 _壳 (苑 _壳)	苑 _壳	苑 _壳	苑 _壳	苑 _壳	苑 _壳
造山带及其他 构造单元：						
燕山-阴山	缘 _壳 (缘 _壳)	缘 _壳	缘 _壳	缘 _壳	缘 _壳	缘 _壳
秦岭	远 _壳 (远 _壳)	远 _壳	远 _壳	远 _壳	远 _壳	远 _壳
大别山	缘 _壳 (缘 _壳)	缘 _壳	缘 _壳	缘 _壳	缘 _壳	缘 _壳
苏鲁	苑 _壳 (苑 _壳)	苑 _壳	苑 _壳	苑 _壳	苑 _壳	苑 _壳
康滇构造带	苑 _壳 (苑 _壳)	苑 _壳	苑 _壳	苑 _壳	苑 _壳	苑 _壳
湘中地区	源 _壳 (源 _壳)	源 _壳	源 _壳	源 _壳	源 _壳	源 _壳
下扬子地区	缘 _壳 (缘 _壳)	缘 _壳	缘 _壳	缘 _壳	缘 _壳	缘 _壳
华南造山带	苑 _壳 (苑 _壳)	苑 _壳	苑 _壳	苑 _壳	苑 _壳	苑 _壳

摇摇注：匠：平均热流值，单位为 $\text{毫瓦} \cdot \text{皂}^{\text{原}}$ ，括号内数字为构造单元内热流观测值的数目；匠_壳为壳幔热流比值；贼_壳为源_壳深度温度；贼_壳为缘_壳深度温度；匀为热岩石圈厚度。

根据中国大陆沉积盆地的氦同位素比值与壳幔热流比值的相关关系估算了其地幔热流值(汪洋, 1994)。其中华北与华南地区的地幔热流值在东侧地区为 $100 \text{毫瓦} \cdot \text{皂}^{\text{原}}$ 以上；而西部则较低(参见图 圆-猿中的十字符号)，但以地幔热流值 $100 \text{毫瓦} \cdot \text{皂}^{\text{原}}$ 计，其高低地区之间的分界与大兴安岭-太行山-武陵山重力梯度带并不重合。根据本书第四章第五节对华北和华南地区主要构造单元地幔热流值和地壳生热率的配煤_壳_壳反演，求得的地幔热流值及其误差显示在图 圆-猿中(参见第四章表 源-员)。根据本书第四章第五节的认识，配煤_壳_壳反演结果得到的华北和华南地区地幔热流值是其下限值。从图 圆-猿来看，配煤_壳_壳反演结果在华北和华南地区大部分构造单元均低于利用氦同位素组分资料求得的结果。对于华北盆地，由于氦同位素比值确定的地幔热流值是几个内部构造单元的平均值，而配煤_壳_壳反演采用的是比较典型地区的深部参数进行计算，所以结果有一定的偏差。兰坪-思茅盆地根据氦同位素比值资料求得的地幔热流值为 $100 \text{毫瓦} \cdot \text{皂}^{\text{原}}$ ，而配煤_壳_壳反演得到的数值为 $100 \text{毫瓦} \cdot \text{皂}^{\text{原}}$ 左右，比根据氦同位素资料求得的地幔热流值明显偏低(图 圆-猿。第四章第五节表 源-员中给出的地幔热流值是配煤_壳_壳反演样本的算术平均值；而若采用配煤_壳_壳反演样本的众数，则兰坪-思茅盆地的反演热流值为 $100 \text{毫瓦} \cdot \text{皂}^{\text{原}}$ 左右(参见图 源-员)，与根据氦同位素比值资料求得的地幔热流值相近。具体情况还有待进一步研究。同理，若采用反演样本的众数，则东南沿海造山带的地幔热流反演值为 $100 \text{毫瓦} \cdot \text{皂}^{\text{原}}$ (参见图 源-愿)，与根据氦同位素比值资料求得的地幔热流值

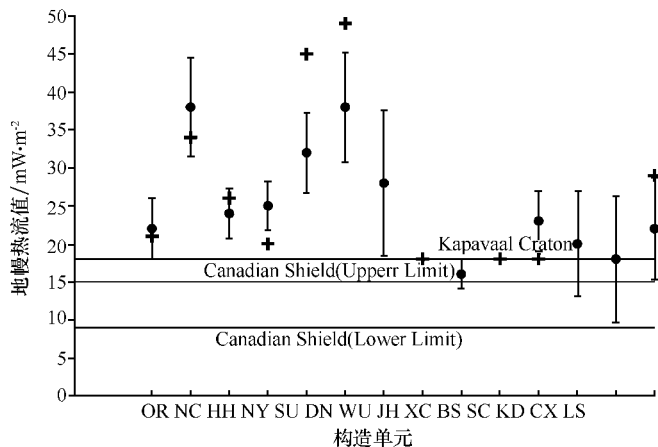


图 1 华北和华南地区主要构造单元地幔热流值

图 1 华北和华南地区主要构造单元地幔热流值。十字代表根据氦同位素比值计算的地幔热流值；圆圈代表根据地幔热流反演得到的地幔热流值的算术平均值；竖线代表误差范围。OR—百色盆地；NC—楚雄盆地；HH—东南沿海；NY—河淮盆地；SU—江汉盆地及其周边；DN—康滇构造带；WU—兰坪—思茅盆地；JH—华北盆地；XC—南阳盆地；BS—鄂尔多斯盆地；SC—四川盆地；KD—苏北盆地；CX—武夷山；LS—湘中地区；OR—加拿大地盾地幔热流值下限；NC—加拿大地盾地幔热流值上限；HH—克拉通地幔热流值。

相近。苏北盆地根据地幔热流反演的地幔热流值众数为 $15 \sim 18 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ （参见图 1-10），小于氦同位素比值资料求得的地幔热流值，其原因应当与该盆地存在的平流热传递因素有关，详情参见第五章的相关分析。对于四川盆地和南阳盆地而言，正如我们在本章第五节所分析的那样，其岩石圈地幔中存在较多的挥发分，从而导致根据地幔热流反演得到的上地幔高导层的埋深的温度比根据地幔热流反演得到的埋深温度小，而在第四章第五节中根据地幔热流反演中各地均采用根据地幔热流反演得到的埋深温度为 $1500 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ，导致氦同位素资料求得的地幔热流值结果与根据地幔热流反演结果不太一致。我们分析的反演计算结果显示，若采用 $1500 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 在这两地作为根据地幔热流反演得到的上地幔高导层的温度，则四川盆地根据地幔热流反演的地幔热流值为 $15 \sim 18 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ ，南阳盆地则为 $15 \sim 18 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ ，这就同氦同位素比值资料所得到的结果相符了。

综上所述，华北和华南地区的不同构造单元之间的确存在地幔热流值方面的明显差异。以华北盆地、苏北盆地和东南沿海褶皱带等新生代以来受到明显的构造-热事件影响的地区的地幔热流值为高，超过 $20 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ ；而鄂尔多斯、南华北、南阳和江汉、四川盆地等地的地幔热流值低于 $15 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ ，其中四川盆地的地幔热流值与典型的克拉通地盾区的地幔热流值在同一个数量级，也暗示该地区岩石圈热状态与克拉通地区非常相似，为“冷”岩石圈，存在厚的克拉通型岩石圈根。

我们注意到，华北和华南地区在大兴安岭-太行山-武陵山重力梯度带两侧的构造单元其地幔热流值存在有 $15 \sim 18 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ 的差异，这同笔者的博士学位论文^①的第三章根据

① 汪洋，2002，中国大陆大地热流分析，博士学位论文，中国科学院地质与地球物理研究所。