

中华人民共和国地质矿产部

地质专报

五 构造地质 地质力学 第14号

亚东—格尔木岩石圈地学断面综合研究

青藏热流和地体构造热演化

中国科学院地质研究所主编

沈显杰 张文仁 杨海贞 管桦 金旭 张南明 江维安 沈维英 张晋鑫

地质出版社

中华人民共和国地质矿产部

地 质 专 报

五 构造地质 地质力学 第14号

亚东—格尔木岩石圈地学断面综合研究
青藏热流和地体构造热演化

中国科学院地质研究所 主编

沈显杰 张文仁 杨淑贞 管 焘 金 旭

张菊明 汪缉安 沈继英 张容燕

(国家自然科学基金资助项目)

地 质 出 版 社

项目总序

“亚东—格尔木岩石圈地学大断面综合研究”是我国参加的“国际岩石圈计划”中的重要项目“全球地学大断面计划 (GGT)”内的一项。亚东—格尔木岩石圈地学大断面也是我国所承担的大断面中最先完成的一条。

“国际岩石圈计划”原是国际地学界在 80 年代之前进行过的“上地幔计划”和“地球动力学计划”的基础上，为使固体地球研究更向地球内部深入，并进一步探讨一些重大的地质学问题而拟定的。计划本身即标志着地球科学发展的前缘和它的多学科性与全球性。为此，在固体地球科学的两个国际联合会，即国际地质科学联合会 (IUGS) 和国际大地测量和地球物理学联合会 (IUGG) 的共同要求下，国际科学联合会理事会 (ICSU) 于 1980 年建立了国际岩石圈委员会来负责组织进行这项计划。

岩石圈的研究涉及面广，计划的内容几乎包括了岩石圈研究的全部内容，以期能通过这项计划解决地质学中的一些重大问题。岩石圈委员会于 1985—1986 年间重新将其内部组织和任务加以调整。目前共有 6 个工作组和 7 个协调委员会。“全球地学大断面计划”是由其中的第七协调委员会负责执行的。

该项计划是参照“北美地质学陆—洋断面 10 年计划”的模式提出的。因为它包括了岩石圈计划的许多基本原则，所以被认为是最能体现国际岩石圈计划的精神的。它的目标是：综合有关的地质、地球物理、地球化学和大地测量的资料和数据，作出横切地球上具有关键性的地质和构造地区，如火山带、地堑、沉积盆地和容易遭受地震、火山等灾害的地区的岩石圈断面，以达到能够进行直接对比研究的要求。为此，对地学大断面的编制就需要有一个统一的规范性要求。目前已在全球范围内部署了 175 条这样的地学断面，同时希望能够在这些关键性地带的地学断面所提供的基本资料基础上，检查有关岩石圈性质和演化的各种假说，并且发现需要在下一步用先进手段深入进行工作的地区或地段。

“亚东—格尔木地学大断面综合研究”项目的完成，标志着我国地学研究已进入一个新的阶段。特别是对于地质条件特殊、举世瞩目的青藏高原这个具有重要意义的地区来说，由于它的系统地质—地球物理工作起步较晚，而如今能在较短的时间内跃居世界固体地学研究的前缘，确实难能可贵。所以当这项成果的初稿于 1989 年在美国华盛顿第 28 届国际地质大会上展示时，便立即得到国际上知名专家的高度评价。以后又吸取了一些专家的意见加以充实和提高，同时国际岩石圈委员会也决定出版作为国际交流的第一批成果。现在，项目的综合研究报告和其中 11 个课题和专题报告的出版，除了反映这条大断面本身的研究成果之外，无疑也将促进我国岩石圈研究的加速前进。

值得注意的是这批报告，尤其是许多课题和专题报告的内容，不仅反映了工作成果，而且也包括所运用的深部地球物理方法和技术方面的新成果。由于深部研究的特点，取得第一性数据的手段和方法以及数据的处理和解释也需要不断地针对实际情况加以改进和提高。在这方面提供的材料和经验也是具有重要意义的。

目前国际地学界关注的一个问题是：由于各分支学科的快速发展，各自运用了许多新

技术、新方法，而且不断吸取其它基础学科方面的新成就，致使各分支学科之间的了解增加了困难。一方面某学科的成就不易及时被相邻的分支学科了解和利用，另一方面又使某一学科内还未成熟的新成果被相邻学科当作已被公认的东西来使用。多学科之间的相互了解和协作是促进本来是一个整体的地球科学的健全而快速发展的必由之路。希望这批报告的出版能在增进我国地质学和地球物理学之间在探讨深部问题时的相互了解、相互促进方面起到积极的作用。

人类对自然界的认识是无止境的，对青藏高原的地球科学研究也绝不是一次能够完成的。《亚东—格尔木地学大断面综合研究》系列专著中提出的若干观点当然还有待于今后多方面的检验、充实和修正。由于实际情况的限制，地球化学资料还显得不足，这应是今后需要大力补充的一个方面。

中华人民共和国地质矿产部
科学技术高级咨询中心主任
中国科学院地学学部委员
国际地质科学联合会副主席

张炳熹

1991年7月

目 录

引言	1
第一章 青藏热流分布与壳幔热结构	4
一、青藏热流测量结果及剖面分布特征	4
二、青藏高原壳幔热结构的南北不均一性	8
第二章 地体综合构造热演化过程的模型研究方法概论	13
一、模型研究的意义和任务	13
二、模型设计的指导原则和依据	14
三、模型研究的步骤和方法	17
第三章 地体构造变形演化的板块运动学模型	20
一、构造演化模型定量化处理的重要性	20
二、青藏高原构造演化的板块汇聚速度模型	21
三、拉萨-冈底斯地体变形运动学方程的推导	25
四、喜马拉雅地体变形运动学方程的推导	50
五、运动学方程中应用的参数	59
第四章 构造诱发的热作用过程及其模拟计算方法	60
一、构造诱发的热作用过程	60
二、热过程的模拟方法及模型参数	70
第五章 地体综合构造热演化模型研究的结果和讨论	73
一、稳态温度场模拟的主要结果	73
二、非稳态模拟结果展示的壳幔温度演化趋势	75
三、拉萨-冈底斯地体南部的壳幔热历史	78
四、喜马拉雅地体北缘的壳幔热历史	80
五、青藏地体的现代壳幔温度分布	80
六、青藏高原变形地体地表热流的演化趋势	83
几点结论	86
参考文献	87
英文摘要	90

Contents

Introduction	(1)
Chapter 1 Heat flow distribution and crust-mantle thermal structure of the Qinghai-Tibet Plateau	(4)
1.1 Results of heat flow measurements and its distributive pattern along transect on the Qinghai-Tibet Plateau.....	(4)
1.2 North-South heterogeneity of crust-mantle thermal structure of the Qinghai-Tibet Plateau.....	(8)
Chapter 2 Introduction to the model study of integrated tectono-thermal evolution process of terranes	(13)
2.1 Significance and task of model study	(13)
2.2 Guidelines and foundations for model designing	(14)
2.3 Steps and method of model study	(17)
Chapter 3 Plate kinematic model of tectonic deformation-evolution of terranes	(20)
3.1 Importance of quantification of the tectonic evolution model	(20)
3.2 Plate converging velocity model of tectonic evolution of the Qinghai-Tibet Plateau	(21)
3.3 Derivation of kinematic equations of deformation of the Lhasa-Gangdise Terrane	(25)
3.4 Derivation of kinematic equations of deformation of the Himalaya Terrane	(50)
3.5 Parameters used in the kinematic equations	(59)
Chapter 4 Tectonically induced thermal processes and the method of their simulation	(60)
4.1 Tectonically induced thermal processes.....	(60)
4.2 Method for simulating thermal processes and the model parameters	(70)
Chapter 5 Results and discussions of model study of the integrated tectono-thermal evolution of terranes	(73)
5.1 Main results of steady-state simulation of temperature field ...	(73)
5.2 General trend of crust-mantle temperature evolution demonstrated by the results of transient simulation	(75)
5.3 Crust-mantle thermal history of the southern part of the Lhasa-Gangdise Terrane	(78)

5.4 Crust-mantle thermal history of the northern periphery of the Himalaya Terrane	(80)
5.5 Contemporary crust-mantle temperature distribution in terranees of the Qinghai-Tibet Plateau	(80)
5.6 Evolution trend of surface heat flow in deforming terranes of the Qinghai-Tibet Plateau.....	(83)
Some conclusions	(86)
References	(87)
English abstract.....	(90)

引言

迄今为止,有关青藏高原的地质研究大多集中于高原隆升^[1-3]、厚壳特征^[4,5]、碰撞造山^[6]、拼合成陆^[7,8]等构造演化方面的探讨。诚然,通过地震波速传导特性、重磁和电性测量的综合分析,已揭示了高原中南部具有热地壳的地球物理场属性,从而提供了许多有关壳幔深部热状态的间接信息;然而,喜马拉雅地热带存在和藏南的高热流^[9,10]则直接展示了青藏高原另一项重要的地质特征——厚壳与热壳相容并存。这表明,进行与青藏高原构造演化相关的壳幔物质热学过程的研究,或综合的构造热演化研究是不可缺少的。可惜,到目前为止,有关青藏高原的热学研究尚十分稀少^[11-13]。

青藏高原存在平均约70 km的巨厚地壳,其主要证据来自地震测深^[14-16]、面波资料^[17,18]和重力反演^[19,20],但这些证据多集中在高原南部的西藏境内。1983年格尔木至沱沱河段的地震测深资料^[5]表明,厚壳结构可延至高原北部。至此,较均一的厚壳结构加上甚为均匀的原面海拔高度,便强调了巨厚高隆经拼合形成的青藏陆块的完整性和一体性。与此同时,在青藏高原南部,至少在雅鲁藏布江缝合带两侧的拉萨-冈底斯地体的大部 and 喜马拉雅地体的北部,加厚的地壳同时又是热的,这方面既有间接的,也有直接的证据。间接的证据来自多种地球物理资料,因而令人信服,它们包括:(1)西藏境内多散布的浅震,整个中下地壳为地震间歇带^[21];(2)地壳中存在不止一个低速层^[22]和电性高导层^[23];(3)地震能量的强烈吸收和衰减, Q 值低^[24,25];(4)远震P波和S波出现较大的走时差^[26];(5)天然地震波谱中缺失 L_g 震相或震相不明显^[27,28];(6)地磁剖面资料圈出雅鲁藏布江两侧存在有低磁区^[29];(7)出现区域规模的重力负异常,并在高原中南部有圈闭式的极值区^[30]等等。直接证据包括地表地热显示和热流测量结果两个方面。首先,以横跨雅鲁藏布江南北的喜马拉雅地热带为中心,地表地热显示广泛出露^[31],羊八井^[32,33]、羊应乡、那曲、朗久等高温地热田的相继勘探和开发,以及1988年至今在西藏境内钻孔中获得(201—210)℃的高温热液^①,凡此种种说明,喜马拉雅地热带是属于非现代火山成因的一种类型独特的高温地热带,它的形成与年青的碰撞汇聚带的构造热演化有密切的成因联系。在巨厚地壳的浅部存在活跃的现代岩浆的浅成侵位,岩浆源区可能存在于中下地壳^[31]。然而,更直接的证据则来自热流测量本身。在藏南两个湖区所测得的青藏高原首批热流值(羊卓雍湖和普莫雍湖的平均热流分别为146 mW/m²和91 mW/m²)^[9,10,34],以高热流异常和相邻湖区热流剧变两项显著特征,雄辩地说明了地热异常的浅源特性^[35,36]。进一步的一维非稳态热传导计算,则阐明了下地壳深融型岩浆源区和中地壳局部熔融型低速高导层形成的构造热作用机制和时序^[36],而用有限分布的二维板状热源模型的有限单元反演,则对实测热流进行了成功的拟合^[37],最终尝试性地提出了藏南多层次异常壳幔热结构模型^[36,37]。

藏南湖区热流测量虽然为青藏地热学研究提供了重要的基础数据,但要全面论述青藏

① 1988年10月西藏自治区高温地热资源论证会信息及随后的新闻报道。

高原的热属性,则很有必要将大地热流测量和研究工作向北推进,直至跨越整个青藏高原,在取得全面资料的基础上,检验和论证在藏南热流研究中得出的推论在多大程度上可以适用于藏北青南等不同地体,进而系统地阐明具有不同构造热演化历史的青藏高原各部分的热结构、热状态和热演化历史。

1986年始在藏北开展了钻孔热流测量^①,在雅鲁藏布江缝合带和拉萨-冈底斯地体的南部取得了青藏地区的首批钻孔热流数据^[38,39];自1987年起,“热流测量和地壳热结构分析”被列为“亚东-格尔木岩石圈地学大断面(GGT)综合研究”项目^②的一个专题,使青藏热流测量和研究进入了新阶段。一方面,单项的热流测量进化为综合地球物理测量,乃至地质-地球物理综合研究的有机组成部分;另一方面,区域热流测量进化为以地体为单位的南北热流剖面研究。这两项变化使得解释热流数据时能最大限度地参考其它地球物理和地质研究成果,成为研究地体综合构造热演化的重要依据。

热流测量和研究的三个阶段在地域上由藏南扩及藏北,最后延伸至青海南部的唐古拉山区乃至高原以北的柴达木盆地,从而为进行纵贯青藏高原的热学研究奠定了资料基础。

亚东-格尔木岩石圈地学断面综合研究不仅学科齐全,且研究深及莫霍面和上地幔高导层深度,从而提供了多学科相互印证的、较深层次的新的间接地热信息^③。同时也向地热研究提出了重要的研究课题:通过大地热流测量提供直接的地热证据,一方面检验印证各种间接的地热-地球物理信息;另一方面用统一的地球物理场-热场观点,阐明各地体的地壳和上地幔热结构和深部热状态的异同,及其与各自构造演化环境和过程的成因联系,进而推论各个地体构造热演化过程中具有专属性的各种热作用机制。

概括起来,青藏地区地热研究的中心课题可归结为以下三个方面:(1)提出一种较为满意的热壳与厚壳相容并存的地热解释模型;(2)在青藏高原南北跨度范围内,阐明各大地体在热流分布、深部热状态、壳幔热结构等方面存在横向不均一性的程度、分区性及相应的成因机制;(3)通过定量的模型计算,大体再现各个地体构造热演化的轮廓性历史过程。

本书的章节编排即按照上述三个方面依次进行,全书共分五章十八节。第一章首先系统报道沿亚东-格尔木地学断面的热流测量结果,热流的剖面分布特征以及热流与综合地球物理数据所阐明的壳幔热结构的南北不均一性。第二章系统论述综合构造热演化模型研究的意义和任务、模型的设计和论证、模型参数的选值和论证以及模拟计算的方法和步骤。第三章基于全青藏高原适用的板块汇聚速度模型,应用多项运动学参数、物性参数和特征常量,分别推导出拉萨-冈底斯地体的三维变形和喜马拉雅地体的二维变形运动学方程,作为青藏南部地体构造演化的模型概括。第四章对地体构造变形诱发的多项深部热作用机制逐一作出模式概括或说明,并推导出非稳态非线性二维热传导方程中各热源项的数学表达式。第五章首先对稳态和非稳态模型得到的岩石圈温度分布进行对比,进而阐明各项深部热过程对壳幔温度演化的动态影响,最后概括出青藏高原自印度-欧亚碰撞40 Ma来的壳幔温度场和地表热流演化的总趋势。本书最后列出的几点结论,旨在阐明青藏岩石圈综合构造热演化过程的总特点。

① 国家自然科学基金资助项目“藏北大地热流测量及青藏地壳演化热过程研究”。

② 国家自然科学基金资助项目和地矿部“七五”重点科研课题。

③ 亚东-格尔木岩石圈地学断面综合研究项目多次内部学术交流会成果。

在执行两项基金课题所进行的多次野外热流测量期间，我们得到了西藏地矿局地热地质大队、地质五队、地质二队、青海地矿局物探队、地质水文一队、地质五队、地质八队、探矿队，以及地矿部中南石油第四普查大队等多方的热诚支持，在此一并表示深切的感谢。

本书作者对国家自然科学基金会和地矿部科技司对本项目的经费资助和所给予的信任和支持致以崇高的敬意。

第一章 青藏热流分布与壳幔热结构

一、青藏热流测量结果及剖面分布特征

表 1 中以地体为单位,列出了自 1982 年迄今在青藏高原 13 个测区所取得的热流数据及相应的热流类型和质量分级。其中普莫雍湖 ($n=5$)、羊卓雍湖 ($n=4$) 和伦坡拉盆地 ($n=2$) 所列的数据是 n 个测量值的平均值。相应平均值的经纬度代表测区内各测点中心的大致位置。其它测区均只有单一的热流测量数据。由表 1 可见,13 个热流数据中的绝大部分 (10 个) 属传导型热流,但三个带有对流组分的热流值对阐明地壳热结构最上层的热源配置,以及喜马拉雅地热带的热源性质十分有意义。

表 1 青藏高原各地体实测热流数据汇总表

Table 1 Summarization of observed heat flow values in different terranes of the Qinghai-Tibet Plateau

地体	测区	东经	北纬	井号	线性温度段 (m)	dT/dz ($\frac{^{\circ}\text{C}}{100\text{ m}}$)	k ($\frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$)	q ($\frac{\text{mW}}{\text{m}^2}$)	热流类型	质量分级
喜马拉雅	普莫雍湖	90°25.4'	28°35.6'	$n=5$				91	C ^①	A
	羊卓雍湖	90°43.0'	28°57.5'	湖底热流测量 $n=4$				146	C	A
	罗布莎	91°59.0'	29°15.0'	ZK 938	160—260	1.45	4.165	60	C	A
拉萨-冈底斯	拉萨北郊	90°05.9'	29°40.5'	Geoth-1	240—600	2.43	2.711	66	C	A
	马区	90°48.8'	29°54.4'	Geoth-2	460—530	3.56	2.972	106	C	B
	羊八井	90°28.2'	30°06.6'	ZK 308	1030—1410	4.65	2.320	108	C	B
	羊应乡	90°19.0'	29°49.7'	ZK 201	140—190	23.05	1.578	364	C-C ^②	B
	拉多岗	90°38.7'	30°15.2'	ZK 203	70—140	12.48	2.712	338	C-C	B
	那曲	92°03.0'	31°29.9'	ZK 903	140—390	9.93	3.213	319	C-C	A
	伦坡拉盆地	89°44.5'	32°01.9'	NU-3	110—620	5.55	2.506	140	C	A
羌塘-巴颜喀拉	沱沱河	92°24.3'	34°10.8'	TU-1	100—160	341	1.386	47	C	A
昆仑	东昆仑北麓	94°51.0'	36°15.4'	GU-49	150—157	1.33	3.121	42	C	C
柴达木盆地	锡铁山	95°33.7'	37°18.9'	142-01	90—140	1.22	3.280	40	C	B

注: ① C——传导型热流; ② C-C——带有对流组分的热流

为了评价实测钻孔热流值的可靠程度,通常对数据进行逐个的定性质量分级,共分为 A、B 和 C 三个等级,分别代表可靠的、较可靠的和供参考的热流数据。据以评价热流质

量等级的指标包括：(1) 温度-深度曲线的稳定性，这是一项关键性的质量指标，为此热流测量应尽量在长期闲置的钻孔中进行；(2) 线性温度段的长度和深度，一般而言，线性段越长和埋深越大，离地表干扰源就越远，则数据的质量就越高，反之则否；(3) 用作热导率测量的样品数量，实际上比样品绝对数量更重要的是考虑地层不均一性或沉积韵律发育程度的样品代表性或采样密度；(4) 经统计回归分析得出线性段的温度梯度 dT/dz 的相关系数和热导率 k 各类平均值的离散度；(5) 分段(次)热流计算值之间的相符性等。上述各项质量指标都具有独立的评定价值，但在对热流数据进行综合的质量总评时，还必须考虑多项指标的配套性。根据上述原则，表1列出的13个热流值中，属A级的7个，属B级的5个，可见，可靠的和较可靠的热流数据占绝大多数。东昆仑北麓的热流值由于温度测量段甚短，虽通过多次上行和下行的重复加密测温和仔细的统计处理和分析使可信度有所提高，且热导率样品多，平均值离散性极小，但其综合的数据质量仍评为C级，不过考虑到该测点位于青藏高原北缘的关键部位，具有贯通南北的重要参考价值，特予采用。

图1给出了沿亚东—格尔木地学断面走廊域及其邻近地区的热流测点平面分布图。由图可见，热流数据较集中地分布在雅鲁藏布江两侧和拉萨—冈底斯地体的南部；罗布莎、伦坡拉盆地和锡铁山矿区三个热流测点已超出了走廊域的范围。总体而言，南北延伸近1300km的剖面上仅13个热流数据，加之上述北疏南密极不均匀的测点分布，将会给热流的剖面解释带来一定的困难。虽然在1985—1988年期间曾连续四次组织野外热流测量，但限于地质勘探规模及气候交通等条件限制，青藏热流数据相对稀少的基本局面近期内恐仍难改观。尽管如此，在“地球第三极”建成的这条布局虽不完美的近南北

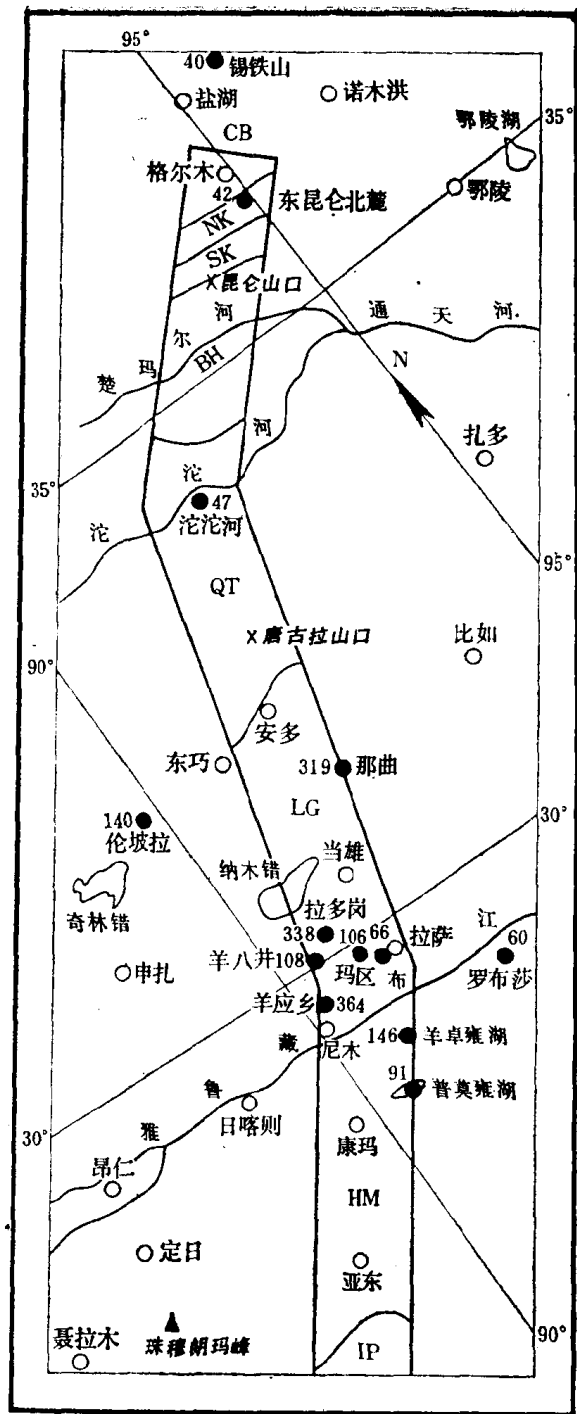


图1 沿亚东—格尔木地学断面走廊域热流测点分布图

○—城镇；●—146—热流测点及热流值 (mW/m^2)；▲—山峰；×—山口；IP—印度板块 (其它地体代号见图2)
Fig. 1 Location map of heat flow sites along Yadong—Golmud transect corridor
○—Cities and towns; ●—146—Heat flow sites and heat flow values in mW/m^2 ; ▲—mountain peak; ×—mountain pass; IP—Indian Plate.
(Other terrane abbreviations are the same as in Fig. 2)

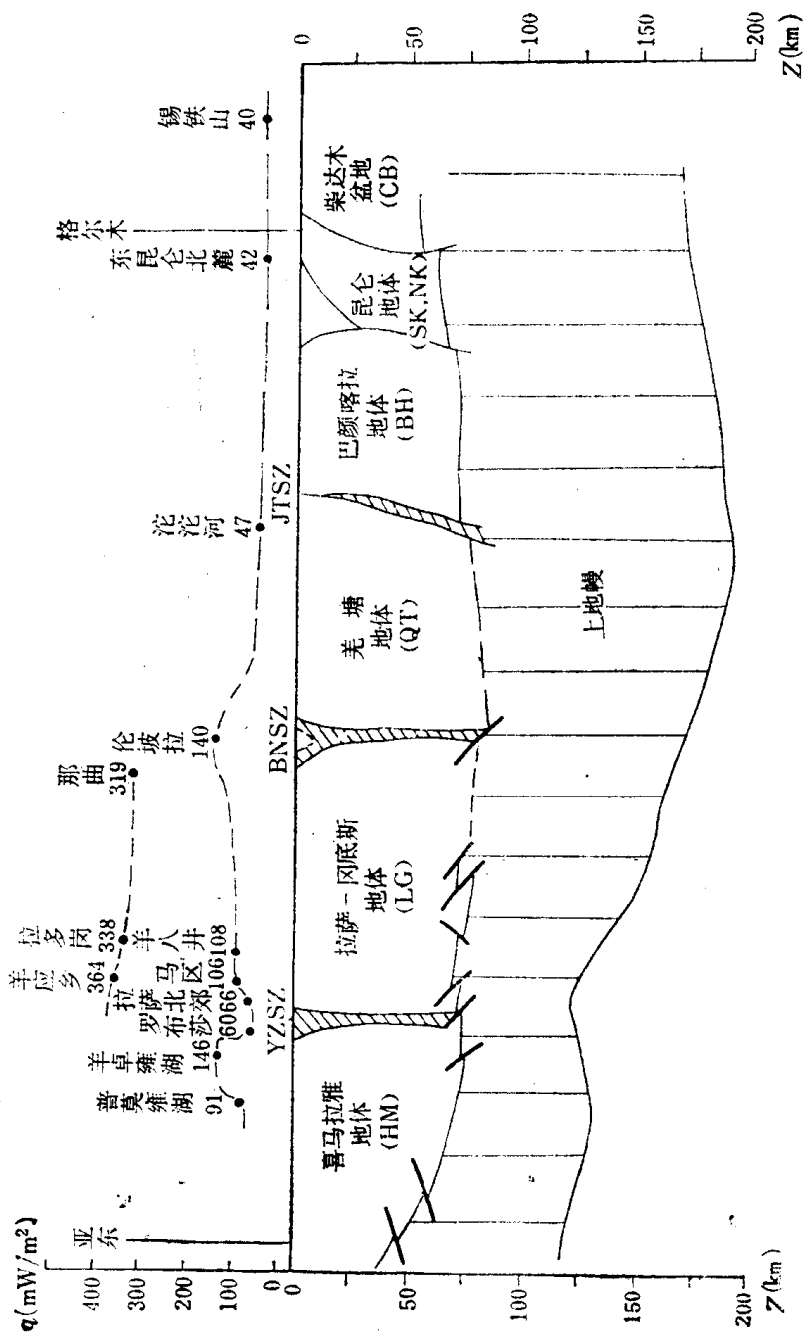


图 2 沿亚东—格尔木地质断面的热流分布

YZSZ—雅鲁藏布江缝合带; BNSZ—班公—怒江缝合带; JTSZ—金沙江—通天河缝合带

Fig. 2 Heat flow distribution along Yadong—Golmud geoscience transect

YZSZ—Yarlung-Zangbo Suture Zone; BNSZ—Bangong-Nuijiang Suture Zone; JTSZ—Jinshajiang-Tongtianhe Suture Zone. HM—Himalaya terrane; LG—Lhasa-Gangdisse terrane; QT—Qiangtang terrane; BH—Bayan Har terrane; SK, NK—Kunlun terrane; CB—Qaidam Basin

热流剖面, 仍然是近年来在青藏地热学研究方面的一个突出进展。

图 2 是经简化的穿过青藏高原的热流分布南北剖面。剖面上方标出等纬度投影于亚东—格尔木主断面线的实测热流数据, 用实心圆点表示; 连接圆点的虚线表示热流分布趋势, 上面一条代表带有对流组分的热流, 下面一条代表传导型热流的剖面分布趋势。可以归纳出以下各项热流分布特征:

1. 以班公—怒江缝合带为界, 实测热流发生南北剧变, 据此可将青藏高原分为北部古老稳定冷地体和南部年青活动热地体两大部分, 它们的实测热流值可有近一个数量级的巨大差异。

2. 北部羌塘、巴颜喀拉和南北昆仑四个老地体拼合而成的地块, 具有“厚壳—厚幔”型层圈结构, 以稳定而极低的热流为特征, 并有向北缓慢递减的趋势, 至北部的柴达木盆地, 热流仅 40 mW/m^2 , 是完全固化的地质构造单元特征而又具有偏低的热流值。

3. 南部的拉萨—冈底斯和喜马拉雅两个地体显示了明显的热壳特征, 其热流值高且大幅度变化, 波动于 $(66—364) \text{ mW/m}^2$ 之间; 热流的变化不限于数值的大小, 还包括热流类型的转换, 这表明热流异常的场源深度既是壳源的, 又是多层次的。这两个地体极有可能是集中展示所有构造诱发热作用的空间域。

4. 位于雅鲁藏布江缝合带内的罗布莎超基性岩体上测得的正常量级—— 60 mW/m^2 的热流值, 以其明显区别于南北高热流区的一系列地热属性, 诸如低温度梯度、高热导率、极低的放射性生热率和正常的热流量级等, 形成了一个热状态独特并分割拉萨—冈底斯地体和喜马拉雅地体的热演化边界。与此同时, 考虑到超基性岩由于极低的放射性生热率而对地表热流的贡献甚微, 因而 60 mW/m^2 地表热流中的地幔 (或深部) 热流分量仍然是明显偏高的。这似乎表明, 狭长的雅鲁藏布江缝合带正经历着来自两侧热地体深部自下向上传播的深源热同化过程。

5. 位于高原中南部的拉萨—冈底斯地体, 是一个既不同于北部老地体, 又有别于南部喜马拉雅新地体的构造热地体。热流类型的转换和热流数值的大幅变动, 正是该地体, 尤其是其南部深部热状态和复杂的地壳和上地幔热结构的客观反映。根据藏南高热流解释的经验^[35,36]推论, 拉萨北郊热流达 66 mW/m^2 , 属正常略偏高的热流, 可能受地壳中部广泛分布的局部熔融层的控制, 量级上接近于区域背景热流值; 从马区、羊八井到伦坡拉盆地 $(106—140) \text{ mW/m}^2$ 的传导型热流变化, 可能反映类似于藏南羊卓雍湖区浅部热源层的地表响应^[37]; 至于羊应乡、拉多岗和那曲三个地热区测得的高于 300 mW/m^2 的带对流组分的高热流异常^[38-42], 则显然体现了在喜马拉雅地热带内地热区沿断裂通道的热液在近地表对流时对传导型地表热流所产生的影响^[43]。藏南喜马拉雅地体热流异常的场源机制与此类似, 但越向南热源层次越趋于简单。由此可见, 由于青藏高原处于独特的构造热演化环境, 可能存在莫霍面、地壳中部局部熔融层、上地壳热源层、和近地表水热对流层等 4 个垂向叠覆型地表热流场源控制层结构。

6. 上述一系列热流分布特征, 即北部老地体热流低, 南部年青地体热流高 (北冷南热) 和雅鲁藏布江缝合带所起的热边界作用, 以及地表热异常的多层次垂向控制结构等, 有力地支持了大陆漂移、边缘俯冲、碰撞造山和拼合增生造陆等全球板块运动模式。此外, 热流的剖面分布特征还提供了青藏高原壳幔热结构存在横向不均一性的直接地热证据, 这种不均一性与不同地体地壳岩层的波速、密度、磁性和电性的不均一性是基本一致

的,体现了热场与多种地球物理场的内在联系。因此,青藏高原一方面以厚壳和高程较均匀的原体完整性为重要标志;另一方面又以其分割为壳幔热结构不同、构造热特性以及热演化历史迥异的地块或地体为主要特征。

二、青藏高原壳幔热结构的南北不均一性

青藏高原各部分地热属性的横向不均一性既可归因于不同地质构造单元在演化阶段上存在巨大的时间差异;又可来源于不同地体的差异性构造变形环境,以及不同的壳内热源配置制式,其中尤以剪切摩擦生热项与变形的方式和条件密切相关。正如图3所示,就构造热特性而言,青藏高原可分为北部、中部和南部三个不同部分,即老地体拼合的北部稳定冷地块,挤压变形形成的中部拉萨-冈底斯构造热地体,和向南扩展的活动性喜马拉雅加热地体。三者的构造变形环境、热源配置和壳幔热结构都不同。

论证青藏壳幔热结构不均一性的构造热成因机制涉及构造演化、热演化和地球物理场特征。前两者是指演化过程,具有动态特征;后者则是过程演化至今的结果或状态,代表一种静止态势。种种迹象表明,青藏高原的构造演化和热演化密不可分,是一种同步或伴生的统一构造热演化过程。更确切地说,青藏地区新生代壳幔热过程,包括地壳浅部至莫霍面,乃至岩石圈-软流圈界面等不同层次的深源热作用,均是构造诱发成因的,要受到喜马拉雅造山期陆壳汇聚型挤压构造变形的形式、环境和机制的制约。

然而,实际的研究进程通常是由状态来推论其过程。首先,从系统收集地球物理数据开始,并逐一阐明波速、密度、磁性和电性等物性特征,进而对以温度分布为表征的热场开展独立研究,然后根据地球物理场和热场的综合特征,推论相应深部热作用的可能程度、规模和作用机制,最后,结合地质研究成果,探讨喜马拉雅动力构造带的应力环境、构造运动方式和变形的边界条件等驱动性构造运动的基本特征。在构造动力变形条件下,地表热流 q 的地幔热流分量 q_m 和地壳放射性生热贡献 q_c 均会随构造变形而发生深刻的变化,而且使热源结构趋于多源化,尤其是伴随构造变形的摩擦剪切生热,可能形成构造动力带所特有的新热源。现就图3给出的青藏高原概念性壳幔热结构模型,分别论述其北部、中部和南部的构造变形环境和边界条件,诱发的热作用过程引起的热源配置制式的演变,以及最终形成的壳幔热结构类型和相应的地球物理场特征。

(一) 北部拼合冷地块

羌塘、巴颜喀拉、南北昆仑地体先后经历了海西、印支、燕山等构造运动期,经长途水平漂移拼合成陆^[6,7,44],形成固化的刚性联合地块,它在喜马拉雅运动时期,因南部的推挤力大于北部的抵抗力而整体北移^[45],并伴随规模有限的走向滑动变形。对该地体来说,前喜马拉雅造山期的构造热事件已趋于止息,喜马拉雅运动在此未形成显著的热冲击,数度的抬升-侵蚀已将最富含放射性生热元素的近地表岩层搬出区外。因此这一地块的地热属性以低地表生热率、低地幔热量分量和极低的地表热流为特征,具有常规的垂向增温厚壳厚幔型壳幔热结构。地球物理场以中度重力异常带和低分异性的磁性分块结构为特征^[29,30];地震和磁大地电流测深一致圈定的上地壳低速高导层^[23,46],可能具有继承性发展的壳内含水溶液构造滑脱层起源,从而不具有热成因性质。莫霍面之上断续分布的低速梯度带则可能代表构造活动高峰期壳幔物质交换或高温高压相变、但目前已渐趋稳定的

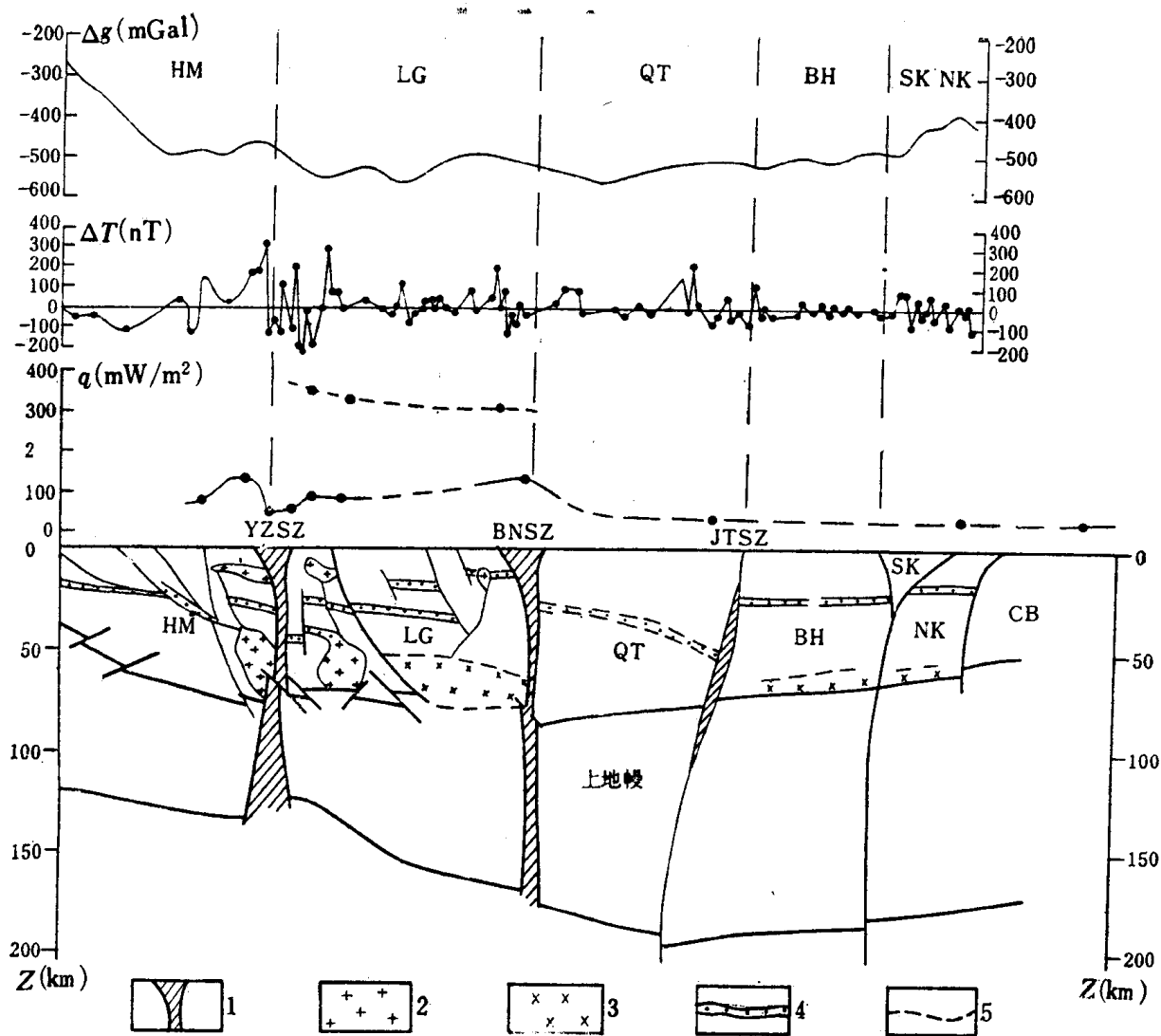


图 3 沿亚东—格尔木地学断面的重力异常 (Δg)、磁异常 (ΔT) 和热流 (q) 分布及示意性壳幔热结构

1—相应缝合带内的蛇绿岩带；2—地壳深融区和浅成侵位的岩浆房；3—莫霍面之上可能的壳幔混合层；4—壳内局部熔融层或部分岩浆或水溶液贯入的构造滑脱层；5—推测的界面。(图中英文代号的含义同图 2)

Fig. 3 Gravity anomalies (Δg), magnetic anomalies (ΔT), heat flow (q) distribution and schematic crust-mantle thermal structure along Yadong-Golmud geoscience transect

1—ophiolite belts in corresponding suture zones; 2—crustremolten region or magmatic chambers of hypabyssal emplacement; 3—possible crust-mantle mixture above the Moho Discontinuity; 4—intracrustal partially melting layer or structural decollement layer with partial magma and/or liquid injection; 5—inferred boundaries. (Other abbreviations are the same as in Fig. 2)

壳幔混合或过渡层的残迹^[46]。

(二) 中部拉萨—冈底斯构造热地体

作者应用“构造热地体”这一名称旨在强调，拉萨—冈底斯地体既是一个活动的构造地体，又是一个深源的热地体，两者之间存在紧密的驱动-诱发式成因联系，从而形成了独特的厚壳与热壳相容并存的地球物理场特征^[37]。

首先，拉萨—冈底斯地体的变形是在近似圈闭而又以南北挤压应力为主的边界条件下进行的^[47]，以印度板块向北推挤为原驱动力和北部欧亚大陆的阻力形成近南北向的主

应力场。在此构造动力框架作用下，拉萨-冈底斯地体消纳了自印度和欧亚碰撞以来约(1500—2000)km的地壳缩短量^[45,48]，是一个经历了急剧缩短，大幅增厚，强烈剥蚀和严重质量亏损的三维变形域，其特点是，(1)首先通过碰撞初期的俯冲-北移组合，随后通过地体整体剪切应变的陆内消减方式，实现近南北向的地壳缩短^[49]；(2)通过地层褶皱、板片逆冲叠覆，使地壳同步增厚，并且伴随有双项地壳质量亏损，即一方面向上增厚导致原面抬升，同时遭受剥蚀而使部分质量亏损；另一方面向下增厚使部分地壳质量回返上地幔；(3)在近南北向主应力场的强大作用下，部分岩石圈物质通过西藏中北部配套的走向滑动断层^[50]，主要向东南方向进行横向扩张型质量迁移。概略的质量平衡估算^[13]表明，拉萨-冈底斯地体增厚地壳的质量约占碰撞前初始地壳质量的(27—32)%；约(29—27)%的质量经剥蚀移出区外，其余约(44—41)%的质量消耗于向东南的拉伸扩张和走滑迁移，形成高原东部一系列弧形构造带。

其次，地体的三维强烈变形在不同壳幔深度层次上使热源配置制式发生相应的变异：

1. 最大的影响表现为壳内放射性生热元素的重新分布。表2中所列是对采自不同地

表2 青藏高原各地体不同岩类的放射性生热率A和Th/U比值实验测定结果汇总表

Table 2 Summarization of experimental results of A values and Th/U ratios for diverse rock types in different terranes of the Qinghai-Tibet Plateau

地 体	岩 类 和 采 区		n	A ($\mu\text{W}/\text{m}^3$)	Th/U
喜马拉雅地体	藏南花岗岩体		12	3.2 ± 1.5	4.4 ± 2.7
	雅鲁藏布江超基性岩类		(9) ^①	0.11 ± 0.05	1.1 ± 0.2
拉萨-冈底斯地体	藏北花岗岩体		24	2.6 ± 1.6	4.5 ± 1.4
	冈底斯-藏北火山岩类	玄武岩	3	0.22	4.7
		凝灰岩	(5)	1.1 ± 0.5	3.8 ± 1.7
		安山岩	2	3.0	5.8
		流纹岩	2	4.4	10.6
	藏北碎屑沉积岩类	羊应乡	(15)	5.8 ± 1.1	2.1 ± 0.3
		拉多岗	(21)	3.1 ± 0.9	5.8 ± 1.9
		那 曲	(6)	2.1 ± 0.5	1.8 ± 0.2
		伦坡拉	(17)	1.4 ± 1.0	2.1 ± 0.8
	班公-怒江带超基性岩类		3	0.25 ± 0.34	0.04—37.0
羌塘-巴颜喀拉地体	沱沱河第三系碎屑沉积岩		(17)	1.8 ± 0.6	4.3 ± 1.6
昆仑地体	东昆仑花岗岩		(12)	0.74 ± 0.12	3.8 ± 1.2
	东昆仑变质岩		(6)	2.7 ± 1.1	2.7 ± 1.9

① 括号内数字表示采自钻孔的岩心样品数。

Figures in parentheses stand for the number of core samples.