

56-24087

01342

002857



北京大学地质学系地热研究室

地热资源勘探译文集

地质出版社

83

地 热 资 源 勘 探

译 文 集

北京大学地质学系地热研究室

地 质 出 版 社

地热资源勘探

译文集

北京大学地质学系地热研究室

•

地质部书刊编辑室编辑

地质出版社出版

(北京西四)

地质印刷厂印刷

(北京安德路47号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

•

开本: 787×1092 1/16 印张: 14 5/8 字数: 353,000

1980年4月北京第一版·1980年4月北京第一次印刷

印数1—2,540册·定价3.00元

统一书号: 15038·新459

译者序

目前,我国人民正在为实现四个现代化而奋勇前进。要实现四个现代化,在能源工业方面非要有一个极大的而且是迅速的发展不可。这就要求在大力开发各种常规能源的同时,还要积极地去探索、研究和开发新能源。

地热能是一种很有潜力的新能源,它的总量非常大,它对环境的污染程度比较小,而且易于控制。因此,地热资源已经引起世界各国的重视。国外有人估计,全世界地热发电装机容量在本世纪末有可能发展到几亿到几十亿千瓦;目前世界上有关地热资源的评价和开发利用的研究活动十分活跃。

我国自六十年代末以来,先后有二十多个省、市和自治区开展了地热普查、勘探、地热发电和综合利用等项试验工作,取得了一定的成绩。目前在实现四个现代化的进程中,我国地热资源的勘探、开发和利用必将有一个很大的发展。为了学习和借鉴外国的有益经验,结合我国目前地热资源勘探和开发中的实际需要,我们选编了这个译文集。

本文集共收十九篇,个别文章翻译时有删节。

本译文集由北京大学地质学系地热研究室佟伟、张知非、廖志杰、朱梅湘、过帼颖和中国科学院自然资源综合考察委员会章铭陶翻译,佟伟统一校对。对于译、校中不当之处,敬请读者指正。

一九七八年十二月

目 录

地热资源和现代造山活动	H.G.温德利希 (1)
大陆会聚带的温度模式	M.N.托克绥茨 P.伯德 (8)
间歇喷泉	J.S.来因哈特 (16)
地震间歇泉及它与国立黄石公园间歇泉、热泉发生和发展的关系	G.D.马勒 D.E.怀特 (30)
黄石公园的水热爆炸穴	L.J.P.穆夫勒 D.E.怀特 A.H.特鲁斯德尔 (46)
水热区的地表热测量勘探方法	G.E.K.汤普森 C.J.班韦尔 G.B.道森 D.J.迪金森 (61)
火山气体与水热活动气体的采样和分析	J.B.芬雷森 (75)
地下温度的地球化学温标——第一部分：基本假设	R.O.福尼埃 D.E.怀特 A.H.特鲁斯德尔 (87)
地下温度的地球化学温标——第二部分：温度和混有冷水的热水份额的估算	R.O.福尼埃 A.H.特鲁斯德尔 (91)
利用溶解态二氧化硅-焓的图解方法估算混合水中热水成分的温度	A.H.特鲁斯德尔 R.O.福尼埃 (100)
天然水的Na-K-Ca经验地热温标	R.O.福尼埃 A.H.特鲁斯德尔 (104)
热水地热系统含水层的化学计算	A.H.特鲁斯德尔 W.辛格尔斯 (120)
新西兰怀拉开水热蚀变岩石中的粘土矿物	A.斯坦纳 (129)
日本九州大岳地热区的水热蚀变	林正雄 (147)
美国黄石公园的间歇泉泉华：非生物成因“叠层石”一例	M.R.沃尔特 (173)
地热井孔的钻井泥浆	F.法布里 M.维达里 (185)
地热钻井的水泥和固井	F.法布里 A.吉奥温诺尼 (195)
根据井口观测资料的水热系统估算方法	汤原浩三 (207)
控制钻孔特性的某些因素	R.詹姆斯 (214)

地热资源和现代造山活动

H.G.温德利希

热流量的富集现象

天然热流现象到处都有，但正常热流量一般并不具有生产上的重要意义。现以铜、铅为例，几乎到处都有小量的铜与铅，但采矿工业要求矿石的金属富集程度是一般量的 10^5 数量级。有经济价值的地热资源也需要某种富集过程，它至少要二倍或三倍于大地平均热流量。主要有三种地质过程能够以工业要求的速率富集地热能。第一种是通过具有特殊热导率的岩类（如岩盐）来汲取额外的地热能，或者通过透水性特别好的，如像第三纪大型自流水盆地内没有完全压紧的沉积物来聚积升上来的地下热水或热卤水；第二种过程是火山活动，这是一种最奇特的过程，它是下部熔融物质通过断裂和稳定断块山区的地堑（亦即著名的地球裂谷系统和大洋中脊）所形成的通道，穿透地壳上升到地表的一种地质过程。这种火山热能在冰岛已经大规模利用了40多年。所有这样的火山区，不论它出现在世界何处，都可能具有这种地热资源。

不幸的是，活火山并不都是工业厂矿的好邻居。因此我们不得不去寻找另外一种热量富集机制，这种机制虽然不那么引人注目，但是却具有比较小的破坏性。这种地质过程可能就是造山活动。在造山活动的发展过程中，所有阿尔卑斯型造山带的内部区域都经历过高温阶段。人们可以在山系的内核找到这种高温阶段的迹象，如区域前进（热）变质产生的新生斑状变晶的存在，后来通过深切侵蚀又暴露到地表上来。最后，在某种意义上说，所有造山活动看来都可能和地热能有联系，也就是说，造山活动会增加热能的传送量以及它在上地幔和较深地壳内的积累。

除了火山作用和岩石的不同热导率以及透水能力以外，造山活动是能够影响地球热量分配的重要因素之一。

今日的造山活动

无须乎说，只有年青的或者一直在活动的造山带才能给人们以机会去利用它的地热能。但是，怎么才能认识目前正在活动的造山带呢？造山活动是最慢的地质活动之一。人们肯定不能直观地证认实际的造山带。但是有另外一些迹象使我们能够推断该造山带目前是否还在活动。

首先，我们应该看看重力分布图。年青的造山带通常显示出强烈的负重力异常。除此之外，人们也很容易区别出处于造山活动不同阶段的造山带，譬如，活动处于终了阶段的造山带，负重力异常（等值线）总是和山系的等高线相符；而处于初始阶段的其它地带，

负重力异常总是向外侧的前陆方向转移,也就是说,向山系或岛弧凸侧的外缘深拗陷方向推移。作者曾比较过意大利北部亚平宁山脉和阿尔卑斯山脉,认为北亚平宁山脉比阿尔卑斯山脉发育要晚一些*,它的发育还不完全,也就是说,阿尔卑斯要比亚平宁老好几百万年,因而与亚平宁相比,阿尔卑斯处于超前态。

实际上我们已经知道,北亚平宁山脉的托斯卡纳后陆地区是欧洲最著名的高温地带之一。早在1904年,就出现了世界上第一次地热发电利用。这个地区的天然热流量比正常区域强6倍。39万千瓦的装机容量是一个重大经济因素,特别是对于缺少其它能源的地区更是如此。

如同北亚平宁(南亚平宁亦然)山脉那样,年青活动造山带前锋的一个显著特点是,它总是通过一种特征的途径来改变正常的热流量分配图式。一般来说,在这些实际上活动的造山带的前陆,热流量总是比较低,而在前锋的后面,热流量发生富集。火山活动也往往出现在造山带的内侧,这种火山在德国地质文献里叫做后陆火山作用。在这种地区,除了超前造山带前锋挤压带内的逆掩断层和褶皱以外,还伴随有丰富的断裂构造。但是在北亚平宁造山带前锋和托斯卡纳高温带,尽管第三纪后陆火山作用已经熄灭了一百多万年,但天然热流量依然十分强大。位于它们后面的大喀尔巴阡弧和匈牙利高温带,热流中心区与第三纪火山作用之间很少甚至根本没有关系。看来后陆火山作用很可能是超前造山带前锋增温的结果,而不是产生高热流量值的原因,它往往和后陆各种断裂相结合。当然,大潘诺宁(匈牙利)盆地很一般的高热流量是未出露地表的第三纪沉积岩具有很高的透水性和上升热水溶液处于类似自流水升力作用的结果。

现在,让我们再回到重力分布问题,并且深入地考虑一下,目前正在活动的年青造山带前锋的强烈重力负异常为什么会向外向前陆的方向推移。

大约在50年以前,当瑞士阿尔卑斯山区开始重力测量研究的时候,A.海姆就认为巨大山体的重量是引起当时发现的、瑞士南部山区产生强大负布伽异常的原因。后来,一些地球物理和地质学家找寻所谓的山根,认为它是引起重力变化的一个原因。海姆为了解释重力分配,除了假想的山根以外,还认为山体的重量和与该山脉等高线重合的重力异常有联系。但是,也有一些山系的重力分配与山体等高线并不符合,如印度尼西亚和加勒比岛弧的情况就是如此。

除上面已经说过的南北亚平宁山系以外,欧洲南部和地中海的南喀尔巴阡山、赫伦尼得斯以及从伯罗奔尼撒斯到克里特和罗得斯(在爱琴海)的岛弧等地区,负重力异常(自由空间异常或法亚异常以及布伽异常等)多多少少都有向外转移的现象。将这些造山带的地质情况作一番比较就可以得出结论:如果造山活动一直持续到现在,负重力异常的推移现象就比较明显。

因此,年青的或者正在活动的造山带的负重力异常常常并不和山岳地壳的高度相符合,而是或多或少占有前陆深海沟的位置。不论是地壳均衡原理,或者是由于壳上山体的重量而嵌入壳下和地幔亚层的山根学说,都不能解释重力分配的显著迁移现象,尤其是存在一种根本就没有山脉的“山根”,其负异常高达-180毫伽,甚至-200毫伽,它并不存在均衡抬升,相反,却存在反均衡沉降。

* 原文为earlier, 可能有误,译文已根据下半句意思改正——译者注。

因此我们不得不假定，所谓阿尔卑斯型山根是一种原来就存在于前缘深海沟内的由非均衡沉降形成的东西，它是在地壳以下的造山力作用下积累起来的年青而又未完全压紧的沉积物质。由于造山带前锋是超在前陆之前，负重力异常和山岳高度将越来越叠合在一起，发展到最后，它们将象阿尔卑斯那样，彼此完全重合。

换句话说，年青山系或者岛弧前陆的这种重力异常推移现象说明造山活动一直到今天还在继续。它们标志未来的进一步造山活动的方向和强度，它有助于圈定现代造山活动的位置。可以预料，地热资源存在的部位是造山带的后陆，即山系的凹侧。通过迁移的重力异常线，可以把山弧或岛弧的内侧和造山活动前陆地区清楚地区别开来。

可能及肯定存在的造山活动成因地热资源的分布情况

现在让我们根据已知的或者可几程度很高的、向外向前陆方向转移的负重力异常现象，来分析一下整个世界的年青造山带的情况。先从地中海开始（图1）。在整个第三纪，地中海地区一直进行着造山活动。有些地方一直持续到更新世，甚至全新世。已知亚平宁南部与北部，都存在强烈的负重力异常向外转移的现象，这种现象在东、南喀尔巴阡

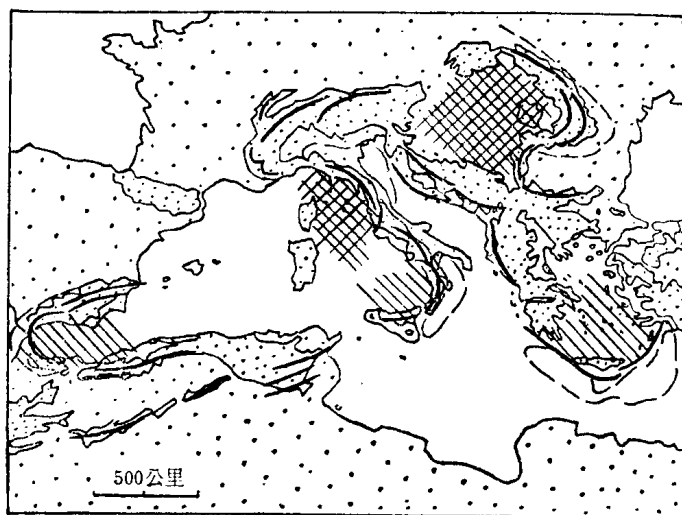


图1 地中海造山带和热流量高异常区
(十字格影线区：实测高热流区；斜线部分：推断热异常区)

山，特别是在伯罗奔尼撒斯、克里特、卡尔帕托斯、罗得斯和安那托利亚大陆之间的岛弧的南部前陆地区更为明显。另外，直布罗陀山弧的前陆西端也发现有转移的重力分配现象。

北亚平山脉的后陆地区已经实测到异常高的热流量(托斯卡纳高热流区)。另外，位于喀尔巴阡弧后面的潘诺宁后陆深盆地(匈牙利高热流区)也是实测到的高热流区(图1十字格影线部分)。将来很有可能找到地热资源的其它远景区是亚平宁山弧南端的北部第勒尼安盆地附近，爱琴海和克里特岛弧北的群岛，以及西班牙和摩洛哥之间直布罗陀山弧后面的阿尔波拉宁海槽。看来，造山活动导致的热流量富集程度与有关山弧或岛弧的曲率有正比关系。地中海地区由于持续造山活动而产生的，可能存在的地热资源区域在图1中都

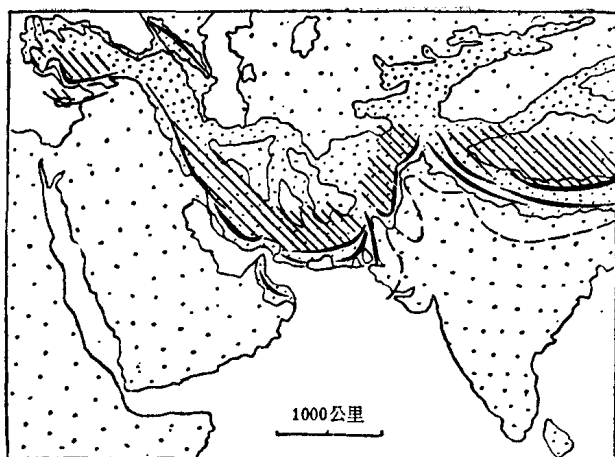


图2 中东造山带和推断的高热流区域

和工业发展中一个决定性的和受人欢迎的因素。

在远东（图3），早在1930年，就有荷兰著名地球物理学家F.E.温宁·梅尼兹在印度尼西亚岛链南部的海上做过重力测量，并发现有重力异常迁移现象。在这个地区以内，我们可以假定存在以熄灭火山甚至还在活动的火山为代表的高温区。在亚洲大陆的东坡（图4），我们可以看到某些由山脉和岛弧组成的复杂体系，它们有些是古老的，有些甚至是目前还在活动的造山带前锋的遗迹，这些弧有一部分向大陆超前，部分则向大洋超前，也

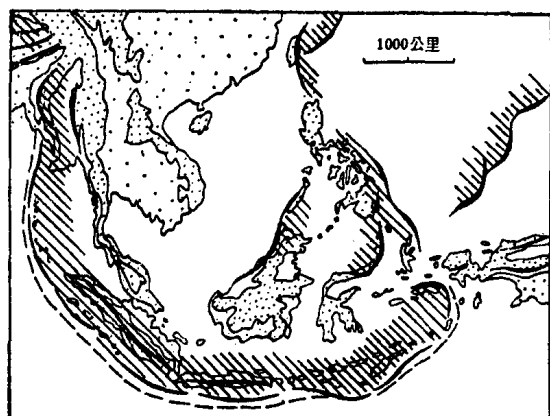


图3 印度尼西亚附近的活动造山带以及与其毗邻的地热区



图4 东亚岛弧和造山成因高温带

就是说向东面的太平洋或向南面的印度洋超前，这些现象都可以通过弧线的曲率、重力分配以及地质环境在时间和空间上的演变得得到确证。环太平洋的这许多岛弧都具有重力异常迁移现象，有强烈的地震活动，有剧烈的后陆火山活动。因此我们确信，这些岛弧正是一些正在强烈活动着的造山带前锋。这些岛弧的造山成因高温区（图上斜线部分）位于岛弧的内侧，凹侧，也就是在岛弧弧形造山带轮廓线的西侧。这些岛屿的绝大多数都是由熔岩

物质，火山碎屑物质或者其它火山派生物质所组成，根据火山或者岩浆的性质也会很容易地得出以上推论。如同上面所指出的那样，在亚洲东部，我们能够把向大陆方向超前的造山带前锋（如中国台湾省、库页岛和堪察加等向陆前锋）和向大洋前陆超前的造山带前锋（如琉球群岛、马里亚纳、千岛群岛和阿留申群岛等向洋前锋）区别开来。与这些相反的方向相对应，造山成因高温带有时也可能出露于岛弧的不同部位。

东亚和北美（图5）由阿留申岛弧相连接。阿留申是一个最特征的造山带前锋线，在它的南面大约有100公里处，有一个深海沟，是一个向南迁移的强烈负重力异常带、地震带和火山带。

至于南美洲（图6）的情况，则不论在南美或北美的西坡附近，主要造山山系的造山



图5 北美洲西部科迪勒拉山区的造山带和地热带

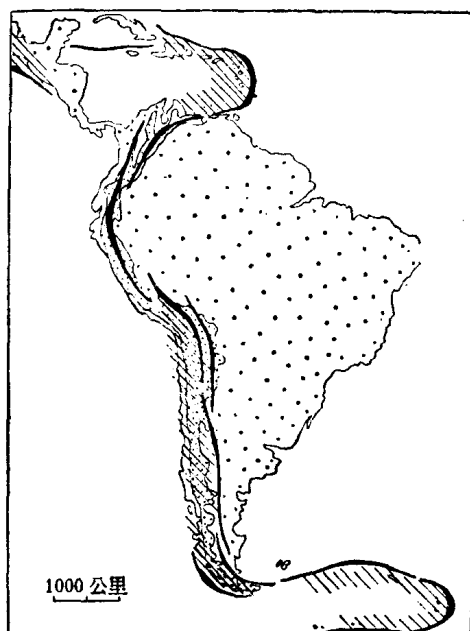


图6 南美洲西部安第斯山区的造山带和地热活动带

带前锋在地质历史时期中都具有向东，亦即向陆缘方向或向洋方向超前的特点。在北美，据我们所知，超前运动在第三纪的早期就已经停顿下来，而在南美洲的西部，却一直持续到晚第三纪。因此看来，北美洲的高温地热带的强大程度未必比得上更年青的造山地带的后陆地热区。

如同海岸上的海浪受到上升海滩的阻挡一样，当造山带的前锋碰到在构造上处于高位的大陆地块（如具有造山外缘抬升现象的陆缘地台或地盾）时，也会多多少少地猝然停顿下来，超前的造山带前锋需要有前陆海槽的沉降。如果这个沉降受到大陆抬升的抗衡，则造山带前锋将处于后置地位。只是在南美与北美洲之间以及南美洲与南极洲之间，造山带前锋以东的前陆的大陆台块完全缺失。我们可以从这两个地方看到，如果没有干扰性大陆的破坏，造山带前锋究竟可以超前到多么远（图6）。

但是，现在还有一个相反的情况，亦即向西，前锋超前的方向是以深海沟型式和重力分配，尤其是以地震震源的深度由西向东逐渐增深的特点来标志。这种情况在南加利福尼亚与南美洲南角之间尤为明显。看来，这种新的，方向朝西的造山带前锋的超前现象是当

相反方向受到稳定的大陆台块的阻挡时就已经开始的。

环太平洋年青造山带还有两个重要的区域与地热条件有密切关系，这就是南极半岛及其邻近地区，新赫布里底-斐济和汤加-克马德克-新西兰北部区域（图7与图8）。南极半岛及其邻近地区是一个可儿的活动造山带前锋，它具有十分离奇的曲率，新赫布里底-斐济等地区形成一个十分显著的双造山带，它的超前造山带前锋具有反时针倾向。南极附近可能存在的地热资源在将来可能会引起特殊的兴趣。后者，即西南太平洋造山带是和非常著名的新西兰北岛高温地热区相连的。新西兰北岛的地热发电装机容量已经达到20万千瓦左右。

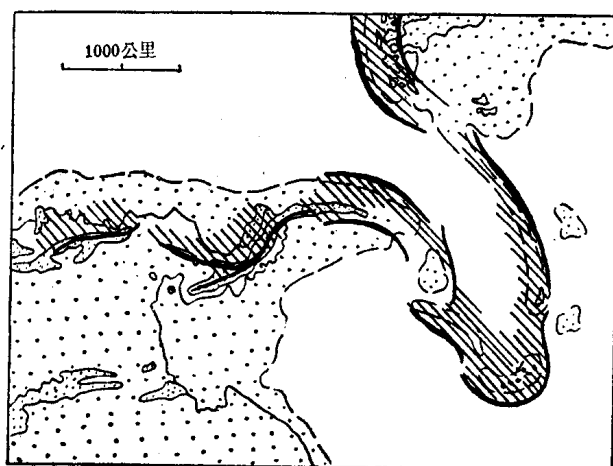


图7 连接南美（与北美）和南极大陆的南安第斯弧的造山带和地热活动

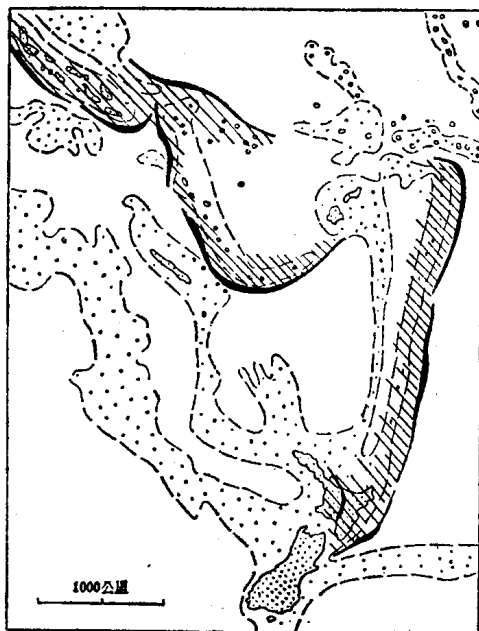


图8 赫布里底-斐济-克马德克-汤加岛弧-新西兰北岛的造山活动和地热活动

造山热富集作用的可能原因

为什么热流量分配会受到造山带前锋的影响？造山运动的机制是什么？这在目前还没有完全弄清楚。但可以肯定，有许多因素控制造山带内热量的传输。第一个因素是，与相邻的山脉和岛脊的抬升相反，前陆海沟（以及山间盆地或后陆盆地）发生大幅度沉降；第二个因素是，由于成岩压紧和构造（侧向）挤压作用，使年青的深埋沉积物中的热水溶液、热卤水和气体被挤出来；第三个因素是，一方面，加热最近沉降下来的冷沉积物要消耗热量，另一方面，由于抬升作用，把原来比较热的岩体从很深的深处带到地表，岩体发生冷却而放出热量；第四个因素是，叶理或片理垂直于层理这种构造组起渗透面的作用，适宜于热能的传输；最后一个因素是，放射性矿物相当多的花岗岩类岩体的密集和向地表的暴露，气成溶液甚至水热溶液的上升等等。但是，也是最后一个因素，我们必须假定在所有活动造山带下面的地幔里，存在着原始的原生热富集过程，因为只有这样才能解释：为什么大型稳定地盾（克拉通）比造山地带稳定，而活动带就不这样，为什么活动造山

带前锋和湍流介质中的涡旋构造极其相似，才能解释造山带前锋的后面存在着深埋的后陆火山作用。

地幔里的或者是较深地壳里的这种原生热富集过程可能起源于壳下物质的各种运动（热对流或其它对流），或者，可能起源于各种热传导以及（特别是在较深的深处）热辐射，亦即热能的交互发射和吸收。岩体的热辐射强度随着深度的增加而增加。如果上部地壳的热传导作用不足以把地幔热辐射产生的热能全部带走，结果便是使局部受热并接近熔点甚至超过熔点，从而导致构造上的流动性。

译自：Geothermics (1970)，Special Issue 2, p.1226—
1230

大陆会聚带的温度模式

M.N.托克绥茨 P.伯德

引言

大陆岩石圈板块会聚时,不能像大洋那样靠简单的消减使岩石圈消失。低密度的大陆壳具有浮力,因而不能消减到很大的深度。消减作用受到阻碍时地壳就得缩短,褶皱、逆掩和造山作用等就会发生。伊朗的扎格罗斯带、喜马拉雅、阿尔卑斯、阿巴拉契亚、乌拉尔和格林威尔山脉就代表岩石圈消减所导致的一般造山过程的连续的几个阶段。

造山带和板块构造之间的关系虽然已经得到公认,但是这个过程的定量模式现在还刚刚开始研究。托克绥茨等人注意到了大陆消减作用的热效应。伯德等人对扎格罗斯区的模式也进行过详细的研究。本文的目的是设计一个能够代表大陆消减过程各个阶段的热模型。我们的模型按照发展成熟的程度,分别代表扎格罗斯、喜马拉雅和阿尔卑斯几个造山作用和演化过程。另外,我们还模拟了中国西藏的特点,它的特点主要是由于一个大洋岩石圈消减到加厚的大陆岩石圈之下产生的。

大陆碰撞之前发生的大洋岩石圈消减作用的热效应对会聚带的演化和岩浆活动起重要作用。火山岩和深成岩为这些会聚带的热历史提供了大量的证据。

模拟技术

本文提出的热模型是用有限差分法按 41×41 点网计算的。在每次计算的每一时步中,温度都按板块运动的特定方向通过格点;每一点都考虑了放射成因热、相变热、绝热压缩热以及摩擦生热等,新的温度值是按照交替方向隐式有限差分算法求得的。详细计算方法请参看米尼尔、托克绥茨和伯德等人的著作。本工作对计算方法的唯一变动是包括了大陆会聚带各种类型板片移动特点的规格。

每种情况下的初始大陆地盾的地热等温线是按照沙茨和西蒙斯的橄榄石热导率定律计算的,地幔热流量则调整到使120—140公里深度能给出 1350°C 的温度值。对于含有1—2%的水的橄榄岩地幔的部分熔融来说,这是一个合理的温度。地幔热流量和所要求的地表热流量(52毫瓦米^{-2})之间的差值分摊给整个地壳,因为平均放射性热产率为 0.57微瓦米^{-3} 。

演化模型

扎格罗斯期

大陆与海沟相撞并开始消减时,消减带的热状态在短期内尚能保持大洋板块的热状

态。大陆地盾岩石圈比较厚，所含有的放射性物质也比大洋的多，但是这些差异对于大陆边缘消减所需要的短时间来说都是无关紧要的（图1）。在含石英的大陆壳开始出现错位蠕变之前，断裂带的剪切应变生热是主要热源，这个热源起调节温度的作用，并使岩石圈的温度升高，但此时的温度不会超过450℃。

伊朗的扎格罗斯山脉代表会聚旋回的早期阶段。山脉东北边缘的挤压带是一个大陆缝合线，它在晚上新世或更新世就完成了历史使命。现在挤压带中的超基性岩体已经断定为老白垩纪的海底。很清楚，扎格罗斯区仅有的强烈火山活动的遗迹是出现在缝合线东北的安山岩质火山山脉，始新世出现的这一火山弧是由于特提斯大洋板片向东北俯冲，把矿化水带到深处，并像形成太平洋岛弧那样，使下插到深部的板块基底消熔而产生的。扎格罗斯带仅有的其它侵入体是挤压带中局部存在的年青花岗岩体。

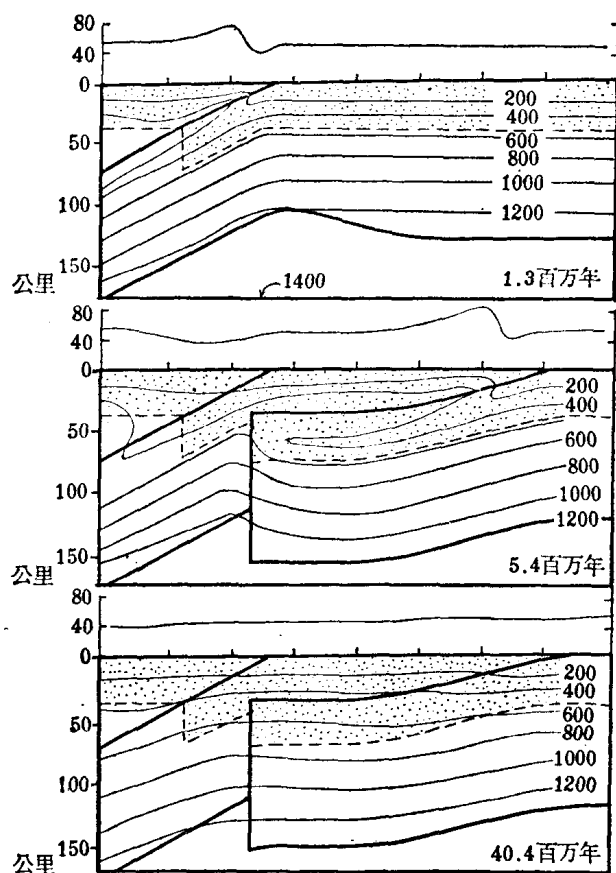


图1 从大洋盆地闭合开始的大陆会聚带三个历史阶段。在1.3百万年时，大陆壳边缘（图上点描部分）随大洋板块以5厘米年⁻¹的速度消减。然后，板块边缘下插，右侧开始消减，经过4.1百万年以后地壳厚度增加一倍。估计经过35百万年便不再作进一步的活动。温度取摄氏，每个剖面上部的地表热流量单位取毫瓦米⁻²；横向上的短线符号每格为50公里

在扎格罗斯模型中，我们曾假定覆于阿拉伯板块之上的一部分侏罗系—中新统厚层灰岩消减于挤压带中。这一现象遵从斯密特的灰岩弱流动定律，其结果是使消减带中地壳部分的温升不超过300℃（图2）。显然，当蠕变限制了剪切应力时，它本身的摩擦生热并

不能为熔融作用提供足够的热量。

假如剪切应变生热不足以导致熔融，这些花岗岩的主要热源将是软流圈热。因为在伊朗下面的班尼奥夫带缺乏地震，我们推论特提斯海板片不再存在。当大洋板片分开以后，来自软流圈的热侵入体可能和大陆壳直接接触。这些问题将在下一节中作进一步的讨论。

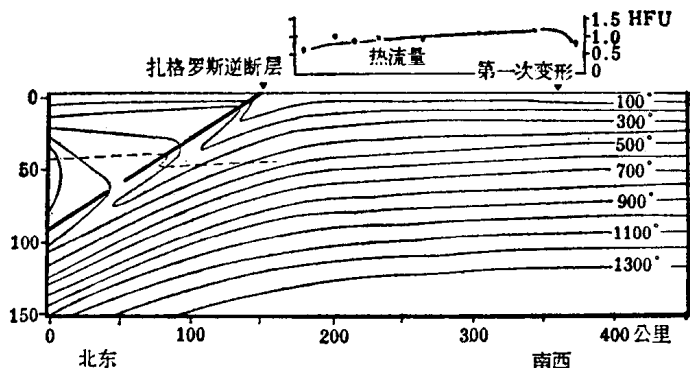


图2 扎格罗斯山脉为满足热流量数据（顶部曲线）所需要的热构造。扎格罗斯逆掩断层与见于波斯湾的第一个变形点之间的地壳由于逆掩作用而缩短并加厚。它使莫霍面（点线）和等温面下凹，下凹量由重力资料限定。此模型假定阿拉伯地盾的正常热流量为47毫瓦米⁻²，消减带的温度受石灰岩中蠕动的控制

挤压带的西南（扎格罗斯褶皱带）没有发现侵入体，山脉中的热流量低于阿拉伯地盾的热流量（图2）。本带令人感兴趣的特征是强烈的逆掩断裂和地壳增厚，其证据是地震、断层面解、重力异常和地形特征等。在图2的热模型中，我们已经考虑到地壳增厚这个新阶段，并且发现，热流量与等温面由于地壳增厚而发生下弯，下弯量超过了摩擦热所造成的上凸量。从这个资料可以看出，热流量向北东方向（平行于地壳增厚的方向）上呈线性下降。模型的左下角假定性很大，如果那里的大洋板片已经分离，就会比模型热得多。

扎格罗斯期的岩石学特征是从缝合线后的安山岩火山活动过渡到缝合线前的酸性深成侵入活动。构造上，它包括古老大洋板片的分离和地壳内俯冲作用的开始。这意味着大陆会聚过程的下一阶段即喜马拉雅期的到来。

喜马拉雅期

在消减板块中形成一个新断层以后，大陆壳本身远远地俯冲到原始缝合线。这个阶段表示在图1的第2部分，它也大体上代表了喜马拉雅期的现状。本阶段的消减长度可以通过主中央冲断层两侧的综合地层对比和公认的喜马拉雅地壳厚度超过60公里等现象判断出来。我们假定地壳基底中的逆掩面在逐渐变平，主要理由是在莫霍面的温度条件下，含石英的地壳岩石的蠕变强度低。这个模型得到了重力资料的证实。古老会聚带（如乌拉尔和阿巴拉契亚等）经深切侵蚀而外露的地幔组分无暗色岩层，这个事实更进一步地证实了我们的假设。

在我们的模型中，消减地壳向下位移的总量仅30公里，因此，莫霍面上的绝热温升小于8°K（计算时花岗岩的比热取 7.95×10^2 焦耳公斤⁻¹K⁻¹，热膨胀率取 2.4×10^{-6} K⁻¹）。消减过程中的放射性自热作用也无关紧要，因为它在图1中的量值不会超过11°K百万年⁻¹。

在整个4.1百万年内（俯冲速率要求5厘米年⁻¹）总的温升约45°K。

除了剪切应变生热起重要作用的地带以外，地壳基本上保持了它的原始温度。在消减期，这个带的宽度相当于热传导距离的两倍（ $d = (\kappa t)^{\frac{1}{2}}$ κ 为热扩散率），或者说，当速度为5厘米年⁻¹时，宽度约为25公里。如果板块运动速度恒定：则通过剪切带的总热产率正比于剪切应力，剪应力必定与地壳热岩体的摩擦和蠕变性质有关。这种蠕变由于受热而活化，从而剪切带的温度会很快地达到一个稳定的极限值。对于有代表性的地壳岩石（含30%石英，并按照帕里什推导的定律发生形变）来说，其平衡温度为450—550°C，维持这一温度的剪应力分别为500—100千巴。在这个深度上的花岗岩最低熔融温度是670°C，由此看来，不可能存在由于剪切应变生热导致的熔融作用。如果这些带中存在水弱化机制，则温度可能更低。可是，这种实验室结果也许不可以外推到地质环境。如果蠕变受到某种抑制，则应力将上升到1—3千巴，这时部分地壳将会发生熔融作用。

喜马拉雅、乌拉尔和扎格罗斯都发现同造山期的深成花岗岩体。如果蠕变阻碍剪切熔融，则形成这些深成岩体的唯一热源就只能存在于软流圈深部流动的岩体中。如果这些部分熔融的超铁镁质热岩体与地壳底部接触，它们会很快冷却，地壳则会被传来的热量所熔化。在喜马拉雅期的开始阶段，当地壳从正在继续下沉的下伏岩石圈中分离出来之时，就有可能通过上述途径生成深成岩体。如果这个机制是正确的话，我们就可以预料：在喜马拉雅期的结束阶段，当另一个地壳层被带入并切断热源的时候，就不会再生成花岗岩体。喜马拉雅地区显然已经出现过这种现象，在那里，逆掩断裂活动虽然仍在继续，却没有出现过小于9百万年的花岗岩体。

阿尔卑斯期

在阿尔卑斯那样复杂的地质情况下，也能辨认出造山作用的同样基本构造模式。伊夫里亚带是一个老的板块边界，它曾经是特提斯洋的一部分，由于消减作用而向南消失。大约在40百万年以前（始新世），特提斯洋闭合，这次碰撞以后，变形作用迁入欧洲板块内部。由于发生仰冲，导致双地壳的形成，为阿尔卑斯期的变质活动提供了必要的压力和部分温升。奥克斯博等人通过计算，认为阿尔卑斯期的变质活动如同形成喜马拉雅花岗岩一样，也需要来自地幔的侵入体热源。如今经过几千万年的均衡抬升和侵蚀活动之后，在佩奈恩阿尔卑斯，我们能够见到残留的仰冲层，在东阿尔卑斯可以见到海拔较高的推覆体。西阿尔卑斯的地质情况十分复杂，它反映在上覆板片的围压和500°C左右温度条件下发生的错位蠕变，已经使以前的沉积物和基底物质完全流体化。

但是在这次形变以后，西阿尔卑斯便长期处于相对不活动状态。所谓阿尔卑斯期，我们定义为消减作用已经结束到上覆逆掩断片受到侵蚀破坏之前的一段时期。在这段时期中，双地壳的放射性自热作用和热屏蔽作用可能很重要。图1的最后一个剖面就代表本期的情况，但是由于存在大量的未知数，所以这个模型与阿尔卑斯的实际情况进行认证时，必须特别谨慎。在此，我们还进行了没有岩体运动情况下的35百万年的热状态计算。我们发现山根带的等温面位置仍然稍深于它的正常深度。

如果上部地壳能够保存它的全部放射成因热，则由地壳放射性产生的热量将能使上部地壳产生400°C的温升。考虑到传导效应的计算解表明，莫霍面上的最高温度只有700°C。这个温度可能太低，可能不足以使下地壳里可能存在的混合岩和辉长岩发生局部熔融。这

个模型预示地表热流量为 $44-52$ 毫瓦米 $^{-2}$ ，它显著地低于冯·哈根等人报导的瑞士阿尔卑斯的实测值（ $67-113$ 毫瓦米 $^{-2}$ ）。这可能是我们的模型所没有考虑到的稳定侵蚀的结果。大多数热流量数据测自更新世冰川刨蚀作用十分强烈的冰川湖沉积层。

这个简单模型与米勒提出的阿尔卑斯热结构模型相当吻合。他的模型的等温面也出现下凹，而且与莫霍面的下凹一致。更精确的模型需要有阿尔卑斯的放射性强度、消减速率和侵蚀历史的资料。从大陆会聚（地壳放射性物质是主要热源）阿尔卑斯期的初步计算结果得到的最主要结论是：这里只可能存在变质活动，而没有明显的熔融现象。

大洋板片效应：中国西藏期

当板块缝合线消减侧发生上述过程时，下潜板片中进行着另一个独立但又相关的热演

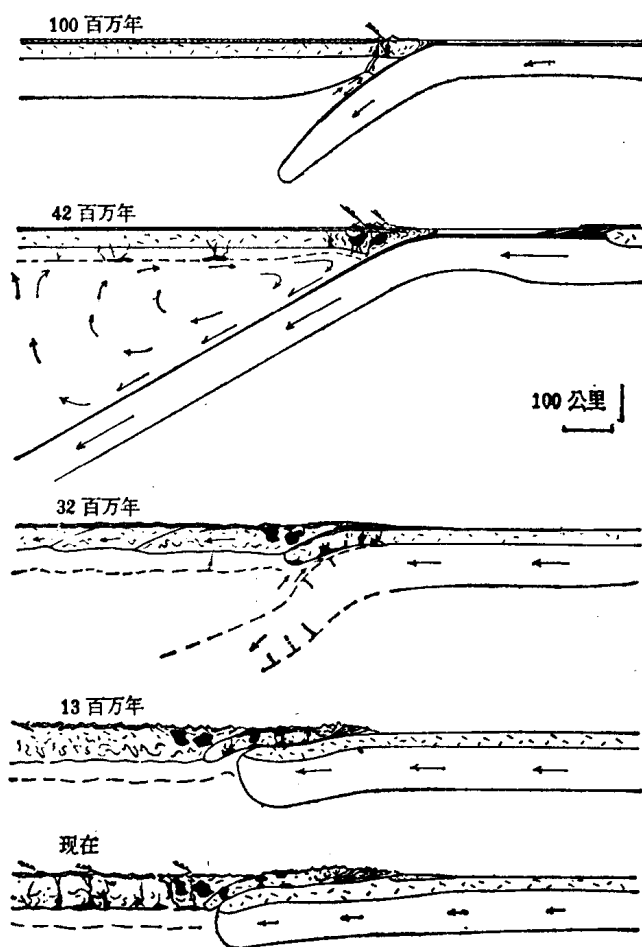


图3 西藏—喜马拉雅地区由白垩纪至今的地质发展史示意图

西藏的北缘固定于图的左侧。在白垩纪时，大洋消减作用开始形成念青唐古拉火山弧。始新世晚期的迅速消减导致软流圈的对流循环，并从下面加热西藏大陆板块。40百万年前的大陆碰撞只造成很小的消减，但是使西藏地壳强烈缩短。嵌入深部地幔的大洋板片折断，使上升的侵入体熔融部分喜马拉雅地壳，并形成花岗岩体。到中新世中期，来自西藏的逐步增强的阻抗迫使喜马拉雅地壳发生仰冲作用，形成山脉和恒河盆地。由晚中新世到现在，西藏地壳开始熔融，造成大面积的火山活动