

石油地质学进展

(一)

G. D. 霍布森 编

石油工业出版社

7806

石油地质学进展

(一)

G. D. 霍布森 编



00262125

S272/10



200367334

石油工业出版社

目 录

第一章	板块构造的一些基本理论与油气勘探的关系	
	[美] M. F. 奥斯马斯顿 (1)	
第二章	有机地球化学研究成果在油气勘探中的应用	
	[法] B. 蒂索特 (51)	
第三章	石油的运移与聚集.....[加] K. 马加拉 (78)	
第四章	沉积岩中最高古温度的测定.....[英] B. S. 库珀 (117)	
第五章	作为储集岩的砂岩	
	[英] J. G. M. 泰勒 V. G. 伊林等 (135)	
第六章	三角洲相与石油地质学.....[英] R. G. 塞利 (183)	
第七章	深海砂.....[英] J. R. 帕克 (210)	
第八章	利用地震资料推断岩石性质	
	[美] R. E. 谢里夫 (225)	
第九章	“亮点”技术.....[美] G. B. 斯通 (256)	
第十章	页岩密度的研究及其应用	
	[美] W. H. 费尔特 (272)	

第一章 板块构造的一些基本理论与油气勘探的关系

[英] M. F. 奥斯马斯顿

摘 要

板块构造的解释基础，特别是对油气勘探问题的解释做了仔细地推敲和进一步地扩充。现在发现地震低速带全部分布在板块之中，因此板块的厚度和刚度要比过去所公认的大得多。这就十分明显地影响到地表和地表附近发生的一些现象，特别是对盆地形成的解释方面有了重要的进展，这些盆地无论是位于造山带中，在海洋边缘上，还是在大陆之内都是如此。显然，地块和盆地的地壳嵌合的具有持续的和分阶段的差异造陆运动表现出的特征各种盆地复合体，它们是由较早期（甚至早在晚前寒武纪）的有限板块分离作用所形成的。在那时分离的岛状内围层（微型大陆）提供了对油气聚集有重要意义的潜伏构造高。极精确的（~5公里）构造重塑有可能实现。

板块刚度使板块边缘的造陆运动影响到很远，并常常引起弯曲破坏，板内裂谷作用，板内火山作用和进一步的造陆运动。厚板块增强热力造陆作用，使蛇绿岩冲断片的陆架侵位能够在早期分离过程中发生，解释消减作用的某些特征以及阐明板内火山作用的发生机制和岩石成因机制。对板块热力造陆作用的正确分析表明，先前那种认为收缩/膨胀作用完全是在垂直方向上进行的看法是错误的。

现以西北欧显生宙板块构造和中东古生代以后的板块构造，作为例子进行讨论。

随着确切性和精确性的大大增加，板块构造分析在油气勘探中显然起了有价值的解决细节问题的作用，有助于直接精确勾划基底构造轮廓，并对后来的构造演化、沉积作用和热演化进行说明。

引 言

油气藏勘探需要详细应用高度发展的技术和推理的专门知识。然而，目前板块构造只不过起到一种极吸引人的基本情况，而对于直接应用来说，其详细程度还远远不够。板块边界显得不清楚，在特定变动事件中，即使对引起运动的原因是清楚的，但板块运动的意义仍模糊不清，由此而产生的地质后效也有明显不同，显然也不能由此及彼地进行预测。这些问题仅是属于新学科领域在萌芽时出现的问题，还是由于基础理论应用到经济领域时产生的混乱呢？具体地说，板块构造能以足够的精度和综合性对沉积盆地的构造，沉积和热演化的详细解释（和预测？）作出贡献吗？

由于勘探费用极高，使得这些问题极为重要。本章将对板块构造的某些公认特征应进行根本性的重新评价，这样做的结果不仅根据板块构造所做的解释可以扩大其应用范围，而且也为提高它们的精度和经济效用提供一种可能的方法。为此就需要我们力图解释浅部效应之外去看看深部的地球物理情况。

板块构造作为一个研究领域是以两个重大发现为基础的。其一，地球的岩石圈^①是由少数大板块所组成的，显然，这些板块具有统一的力学性质，其轮廓由板块间相互作用的地带勾划出来^[1,2]；其二，这种相互作用包括大规模的分离运动和相同规模的靠近运动（approximative motion）^②，分离运动包含岩石圈的产生，而靠近运动使岩石圈消亡或板块边缘变形^[3,4]。

关于岩石圈大规模生长和消亡这一基本过程的彻底了解是板

① 术语“岩石圈”在这里是按板块构造常用的含义来使用的，包括两部分：地壳和在流动一蠕变以上的地幔物质的厚度。流动一蠕变是施加的应力以板块运动特有的速度所产生的主要特征。——原注

② 靠近运动是作为分离运动在运动学上的反义语，这一术语比常用的会聚（convergent）更好些。因为“会聚”一词是模棱两可的话；也有几何学上的含义，在板块构造中应用这一词时，要适当限制。否则在讨论会聚（几何学上）边缘的会聚（运动学上）时有可能混淆。——原注

块构造研究的中心问题，也是作为与勘探有关细节解释的方法。

板块大规模生长为大洋板块演化的基本机制提供广泛的线索。特别是，资料的一致性使人置信不疑地认为，由于板块本身内部热量的逐渐消失和密度增加，致使洋底随着时间增加而下沉（3公里多），从而强调了在长期造陆运动中板块构造的直接作用。同时指出，实际上，板块下面的作用（例如对流）除了显示为板块本身运动以外，在地表可能没有直接的表现。另一方面，包括消减作用在内的一些证据，虽然支持在贝尼奥夫（Benioff）面上由于剪切产生热而导生钙—碱性火山作用的一般看法，但在细节上似乎大大不如洋底资料的一致性，其部分原因可能由于这里有两个板块的相互作用，每个板块有不同的经历及其所形成的构造。

洋底大部分的主要特征，似乎不同于复杂板块的碎裂作用和重组作用，而在另外一些地方（例如阿尔卑斯带、东亚边缘或西欧），板块相互作用就以碎裂作用和重组作用为特点，因此所产生的盆地和隆起的嵌合就容易用板块构造来说明。然而，在充分探索“正常”类型的板块生长和消亡的复杂相互作用的各种可能性之前，要讨论一些完全不同的板块相互作用过程似乎为时过早。在有些地区，重要的是记住板块之间的相互作用，大概是以典型的板块相对速度（5厘米/年或每5百万年250公里）进行的，所以现在看来似乎已是连续的相互作用，原来也可能是被后效作用的迭加，弄得模糊不清的许多不连续的快速阶段。在后面的讨论中可以看到，这一点可以在加里东—阿巴拉契亚造山带中得到证实。关于板块运动不是突然开始和突出终止的看法起源于毫无约束的对流假说，但是这样的假说可能不正确，特别是在运动受到板块障碍物所支配或限制的情况下。

对于盆地分析者来说，关键问题在于板块相互作用后效的持续时间和性质，特别是在分离作用时尤其如此。确切地说，板块相互作用后效的初始，主要是与板块边界上相互作用的性质有关，这就使有些地质学家们感到：在远离板块边界地区的地质事

件几乎与板块构造无关。然而，现在比前几年更清楚地了解到：岩石圈生成的后效，活动的时期更长而且传播得更远。因为这些后效的主要特征是热作用、造陆运动和沉积作用，并对断层位置起重要控制作用，它在多方面影响着油气分布。

我们首先讨论与板块厚度和结构变化有关的各种证据，这些厚度和结构的变化又将如何影响到地表上的剩余活动性（有时密切相关）。这对真正是板块分离起源的盆地[裂陷盆地（Chasmic basin）]的论述提供了依据，并为这类盆地也是大陆上的普遍特征提出了有力的论据。注意到不同构造环境对裂陷盆地的可能的长期演化过程的影响，并注意到与分离起源的模式有关的边缘效应和其他效应。最后，我们将考虑到当板块处在靠近运动时所发生的情况，包括了消减作用和碰撞作用。有大量的实际例子引导我们去建立这种解释基础。

板块厚度及其含义

板块厚度对于板块分离起源的盆地演化来说有直接的意义，因为，正如下面所讲的，当所产生的板块很厚时，随后发生下沉的幅度就较大，持续时间也较长。有关的效应是，当岩浆从板块底部侵入时，传入厚板块的热量就比较大，在地表发生的造陆运动较大，范围较广。厚度影响板块的弯曲刚度，因此也影响到造陆作用的水平距离，而发生在板块中的密度异常能影响到造陆运动的性质。

在板块构造理论出现之前，大陆漂移的拥护者认为构造运动只涉及大陆地壳，但是目前大多数人认为，在大洋下面板块厚度是50~100公里，这种观点以来自四种不同种类研究所得的显然相互吻合的资料为依据。然而，现在看来有可能这种一致性还有着另外的解释，而且板块厚度比这一数字可能要大得多。下面将概述其理由。

关于板块厚度的现有概念

在大洋盆地下面，平均深度大约为 70 公里处，地震剪切波低速(LF)带有十分确定的顶面，当把这一低速带解释为一个部分熔融带时^[6]，它就很快地被作为构造板块底面的标志。岩石成因方面的研究^[6~8]显然支持这种观点，认为像大量出现在大洋岛屿的岩浆岩是从 60~80 公里深处地幔物质最初分离出来的产物。另一类标志是根据大洋中脊的轴部热物质向两侧连续增长而生成板块的理论研究提出来的。这些假说认为在增长板块物质中的热量通过洋底逐渐向上而散失，其结果使板块密度逐渐变大而下沉，明显地成为洋脊的倾斜两翼。来自洋底的地质年龄资料、热流数据和沉降资料都一致地表明：由 50~100 公里厚物质组成的岩板的逐渐冷却过程^[9~14]。最后，曾经发现：在贝尼奥夫带附近地震波传播时间勾划出一个舌状的相对冷却的下沉岩石圈，它的最初厚度也大致与上述情况相同。

所有这些关于板块厚度的明显标志有可能弄错吗？

厚板块的模式

首先要注意：岩石圈厚度和板块厚度之间可能有重要区别，因为岩石圈是与处于特殊物理状态的物质有关，而板块则与一起运动物质的整个厚度有关；如果岩石圈下面的物质被差异运动的物质所强烈席卷，则岩石圈厚度与板块厚度相似。情况是否到处如此还不清楚。

至少在大陆部分的板块可能很厚的证据长期以来就提出来了。1961 年伯纳尔^[18]指出这样的事实：某些贝尼奥夫带延伸深达 700 公里左右，这标志着低速带仅仅构成“夹心面包片中的酱”，而其整体可以遭受裂开作用。自从 1960 年以来，已经积累了这样的证据资料：至少在延伸到 400 公里深处^[19~25]，大陆和大洋下面的地球物理性质是不同的，根据火山作用的证据，地球化学的差异同样延伸到 400 公里深处^[26]；所有这些意味着：至

少在大陆下面到这一深度的物质与大陆上面的有着一定联系。特别要注意到在这一深度中，充裕地包含了整个大陆下面的低速带。近来，摩根^[27]设想大洋板块厚度为150公里，这样便包括了他所考虑的软流圈物质的实际厚度。

主要问题关系到低速带的物理意义。事实上，如果流体以类似于粒间薄膜形式出现^[28,29]，而不是像伯奇^[30]以前所设想的以液滴形式出现，则仅有0.1%到1%的流体含量就足以产生所观察到的地震速度和衰减性质。因此，它刚好比自由挥发分多一点^[31]，而不是实质性的熔融体，这些是观察到的。这种解释十分有利于另外一些考虑。低速带并不是在各处一样出现，而是仅在热流向上经过有关深度其值超过（0.7热流单位）的区域才能充分显示；这些地区包括海洋和活动造山带，但并不包括许多地盾区（在那里的总热流，其中包括地壳所提供的在内，有时并不超过这一数值）。最近在太平洋的工作结果说明^[32,33]：在冷却过程中，低速带逐渐变深，在最初30百万年时深度为55公里，在100百万年时慢慢地变深为85公里。而且，在低速带上面的“顶盖”中地震速度指示有一温度梯度^[30]，这表示在低速带上达到接近固相线的温度。

至今仍被忽视之点，即空隙流体的增加将使导热率明显降低，特别是，有挥发分做为气相出现时，这一点埃格勒^[34]曾指出很可能是有 CO_2 存在。当低速层厚度为100~250公里时，低速层的热阻抗在很大程度上控制了通过它的热流。在层中流体含量影响到热阻抗的情况下，将对热流起强烈稳定作用；在层内的任何冷却作用都会降低层中流体含量（因为按照定义，层的顶部温度接近于固相线），由于整个热阻抗的降低将阻止热流下降。洋底热流和洋底下沉的研究表明：大洋低速带顶部流出的热量显然为一常数，但麦肯齐^[13]把它看作是对流体把热量转移的有力证明。然而，看来完全与板块连成整体的低速带可能具有相同的性质。

从上述论证也得出：在低速带中地热将按照恒定液体含量

(或者更精确说是恒定导热率) 线来分布, 这就可以阐明为什么在任一地方, 地震剪切速度 V_s 只是缓慢地通过整个低速层。像在大陆下面所见到的情况, 随着板块年代变老, 冷却作用最后会使层中流体含量降低, 并使 V_s 升高。低速层的底界有可能由深部升高的 (固体) 导热率所确定, 这会使温度梯度展平。当地热斜率太低, 以至任何深度上都不能产生空隙流体时, 低速层将最后消失。一种可能的地热序列在图 1 上简要地表示出来。

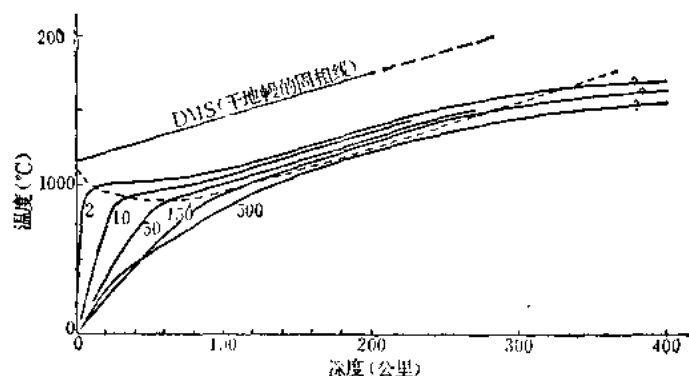


图 1 当对厚板块在垂直方向稳定冷却的情况下, 推测的地热序列, 表示它们与初始熔融区 (低速带) 的关系在地热线上的数字表示该部分板块生成以来的年代 (以百万年计)。

地热线为 500 百万年的假定其顶部已形成了大陆壳。虚线表示空隙流体含量为 0.3% (地幔中 H_2O 含量假定为 0.05 重量百分率)。低速带位于地热这条线以上的位置。

低速带深度采用参考文献[32]和[33]。

DMS 为干地幔的固相线。在 500°C 左右二辉微榄岩中最小导热率的效应 (见参考文献[174]) 已被忽略

所提出的板块模式表明其厚度至少延伸到低速层的 (如该处出现的话) 底面, 其深度大于 300 公里。低速层是由于空隙自由挥发分和初期的熔融作用造成的, 这就得知流体含量可能大于 1%, 并且如上所述能使传送的热流稳定下来。如果沉积岩是有任何定向的话, 这种低的流体含量对物质结构的完整性几乎不起

作用。另一方面，其温度几乎无疑地暗示磁化率的蠕变。尽管如此，在下面几节里将要谈到的结论却是：实际上下部物质相对于上部不仅没有普遍的位移，而且基本上物质对整个板块刚度起作用，使板块在大距离上（达 1000 公里）长时间（几千万年）内传递弯曲作用的应力。

这些结论对于发生在过去 80 百万年以来板块地区下沉型式和沉积演化的解释几乎没有什么差别，因为这一时期内板块物质的冷却作用主要是发生在低速层之上。这些与贝尼奥夫带上地震所观察到的舌状冷却效应相一致，对于在板块中较深部物质的冷却，在地震记录上几乎没有显示。然而，对于板块分离起源的年代较老的盆地来说有着重大意义，因为在板块中的低速层和更深一些的物质冷却较缓慢，需要增加很长时间来使板块继续下沉并接受沉积物。近来洋底资料证实了这一缓慢过程的第一部分，在 80 百万年和 140 百万年之间以明显的缓慢方式下沉（总数为 0.5 公里）^[14, 32, 35]。因此，我们的结论是^[36]：许多长期下沉的大陆盆地是符合于很早时期内板块分离作用的数量。在下面我们谈这一点。

从厚板块角度论板内火山作用

板内火山作用或侵入作用对一个地区的远景有着重要影响，所以了解什么因素控制其发生就极为必要。板内火山作用常常发生在离板块相互作用带较远的地方，这一事实就需要找出分离的原因并补充板块构造的基本概念。在这方面，对大量火山岩分布提出了从下地幔来的穿透性的热柱假说，这是用一种流行的、“张冠李戴”的假定，去完全代替可能为局部熔融来源的低速带。实际上，热柱假说受到强烈地反对，特别是将这一假说应用到大陆地区时^[26, 38]。另外有人想利用发育不全的构造张裂作用来作为一种控制作用。厚板块概念将为这一问题提供新的解决途径。

例如由于板块弯曲作用或冷却收缩，穿过板块形成垂直裂缝并稍稍张开，使得物质从板块底部进入裂缝。因为板块底部必然

有一种粘性渐变过程，进入裂缝最早的物质可能曾位于板块的下部。如果裂缝垂直延伸较远，其中上升物质将增加局部熔融程度。由于密度和有效粘度降低，将使物质柱上升的能力增加。当裂缝壁和上升物质之间的温差达到足够大时，热量就向围岩快速散逸，使得不熔的块体变大而塞满裂缝，或者冷却在壁上阻止分离出的岩浆继续上升。

我们曾推测地震低速层的特征是低的（但仍是超绝热的）热梯度，在低速层以上不远就变为较陡的梯度（图1）。因此，在裂缝中上升的任何局部熔融物质具有从低速层冒上来时的温度，到了裂缝壁中将急剧下降，所以当再上升几公里时将发生强裂的岩浆分凝作用。因此，如前所述，大洋岛屿岩浆似乎在60~70公里深度上已经分凝，这显然与大洋地区有关的厚板块模式十分一致。奥哈拉^[39,40]论述了岩石成因背景，由于裂缝壁增长使斑晶迁移，在岩浆演化中起了重要作用，但没有将它应用到最初的岩浆分凝作用中去。我们的模式说明了为什么分凝作用主要发生在特定的深度和产生的性质不同的岩浆。显然，这种解决岩浆成因的途径能够最后去指导估计板块的厚度，其依据是：物质能够在裂缝中具有必须的熔融程度，在岩浆达到分凝作用水平之前能上升到足够高的地方。

概括地来谈一下关于大陆板块内部的火山作用。有许多证据，其中有一部分是有关岩石成因性质的，但主要是来自深源结核(nodules)^①的岩石学研究得到的证据，在这一类别中有些岩浆（例如，金伯利岩）从200~300公里深处快速运送上来^[41~43]。有可能，在低速带不明显或缺失的地方，各处都没有足够陡的温度梯度提供一个有利于高熔点或未熔组分凝结的层位。在这些岩浆中，高的和可变的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比率导致布鲁克斯等^[26]推测，长期作为板块组成部分的物质中的衍生作用，它正好符合所提出的成因模式。

① 指深成岩浆的结核，如橄榄岩结核等。——译者

总起来说，厚板块更容易说明板内火山作用和火山熔体的一些特征。板块的裂缝作用是完全必须的。有五种主要机制来发育产生裂缝的应力，这五种机制可以分别起作用或者联合起作用，它们是：

(a) 在板块深部的水平热收缩作用；

(b) 由于水平热膨胀产生的拉张作用这是发生在同一板块的另一地区；

(c) 在不均一板块中的差异均衡调整，这是长期冷却作用所引起的差异密度变化和收缩造成的；

(d) 非直线边界的平移断层作用；

(e) 由于板块的相互作用，当板块边缘上升时，板块中发生构造破坏。

当裂缝张开太慢或深度太小时，将发生侵入作用，而不是明显的火山作用。

大洋中脊上厚板块的成因

如果上述厚板块模式成立的话，则板块的年轻边沿必然要以其形成时已经十分厚了，要么就是比过去想像的快得多的增加速度来增加其有效厚度。不论在哪一种情况下，原则上都是使大洋中脊下面新侵入的地幔物质冷却而充分地降低其中流体含量值，以使物质在构造上作为板块的组成部分。然而，似乎有这样的可能，在新侵入物质中熔融体总量在形成地壳的组分离开它之后只占百分之几，那么就可以立刻达到有效的构造整体，或者仅在稍微冷却之后就可以达到。因此，厚板块可能就这样在具有近于垂直的侧面的轴部侵入带上建造起来，其中主要的作用是裂缝壁的增长。

由于板内火山作用和早期板块分离作用 引起的热造陆作用

在洋脊附近洋底生成之后，由于洋底下面板块物质中热量变

化引起了整个洋底的造陆变化(>3 公里), 严格地考虑到各种可能性之后, 可以认为除了地表载荷变化(侵蚀、沉积、海平面变化、火山喷发等)所引起的造陆运动外, 所有的造陆运动都有类似的起源^[36]。

板内火山作用和早期的板块分离作用都包括从板块底部上升的物质, 其中大部分或全部侵入到较老和较冷的岩石圈之间。这是关于造陆作用的重要推论, 其中有些问题过去曾讨论过^[36, 44]。板块越厚来源物质越热, 在裂缝张开或板块分离中需要的充填物也越多。因此, 比方说, 板块厚度增加一倍, 则促使从新物质侧向传入相邻岩石圈时所须的过剩热量超过两倍向地表运移的岩浆将进一步补充这种热量。奥斯马斯顿^[36]将这样所发生的热扩散称为横向热流动(lateral heat frush)。这种热会将向两旁和向上扩散, 沿组合热梯度的流动减弱, 这种组合热梯度是由水平梯度和垂直梯度叠加而产生的。水平梯度是由侵入带产生, 而垂直梯度是原始岩石圈中早已存在的。在所包括的原始岩石圈已经完全冷却, 并且有低的垂直梯度的地方, 横向热流动(来自一定体积的侵入物质)将更为明显, 并在这一过程中在较大的水平距离内影响岩石圈的温度。横向热流动的热异常的水平范围, 也受到沿横向热流动沿新侵入物质的席状体或柱状体发源的影响, 起源越深的上升时水平扩散就越远, 横向热流动散失所用的时间也越长。因此, 厚板块也对这些方面起了增强作用。最后, 大陆壳相对低的热导率意味着热在向上散失之前, 在大陆壳之下会传播更远。

这种散热方式中将会使密度降低和使板块隆起, 这些已在别处讨论过^[36, 44]。这里如说出如下的情况就够了, 比如说在大陆壳底部温度上升 400°C , 在地表和在 200 公里深处线性地减少到零, 这时所产生的均衡调整上升最小为 1.5 公里^[44]。当然, 任何侵蚀作用都可能趋向于为进一步的均衡响应所补偿。

根据这些论证, 板内火山作用的造陆伴生物, 如地盾区的穹窿作用所标明的情况^[45], 好像是横向热流动引起的。如果板块并

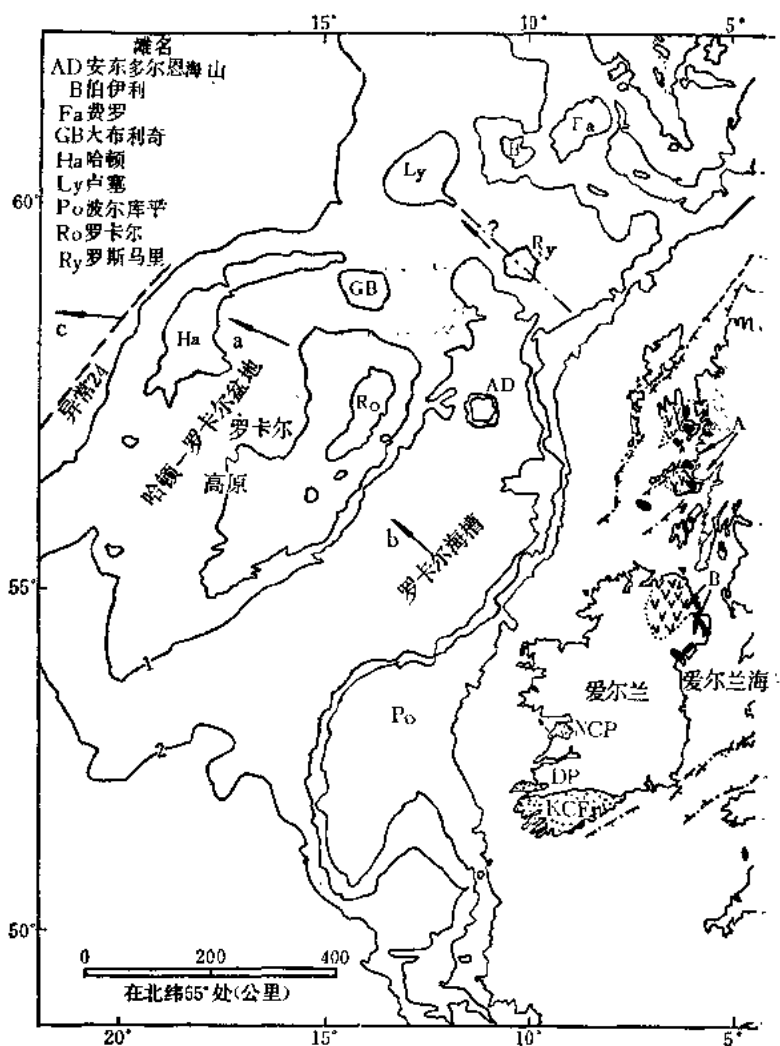
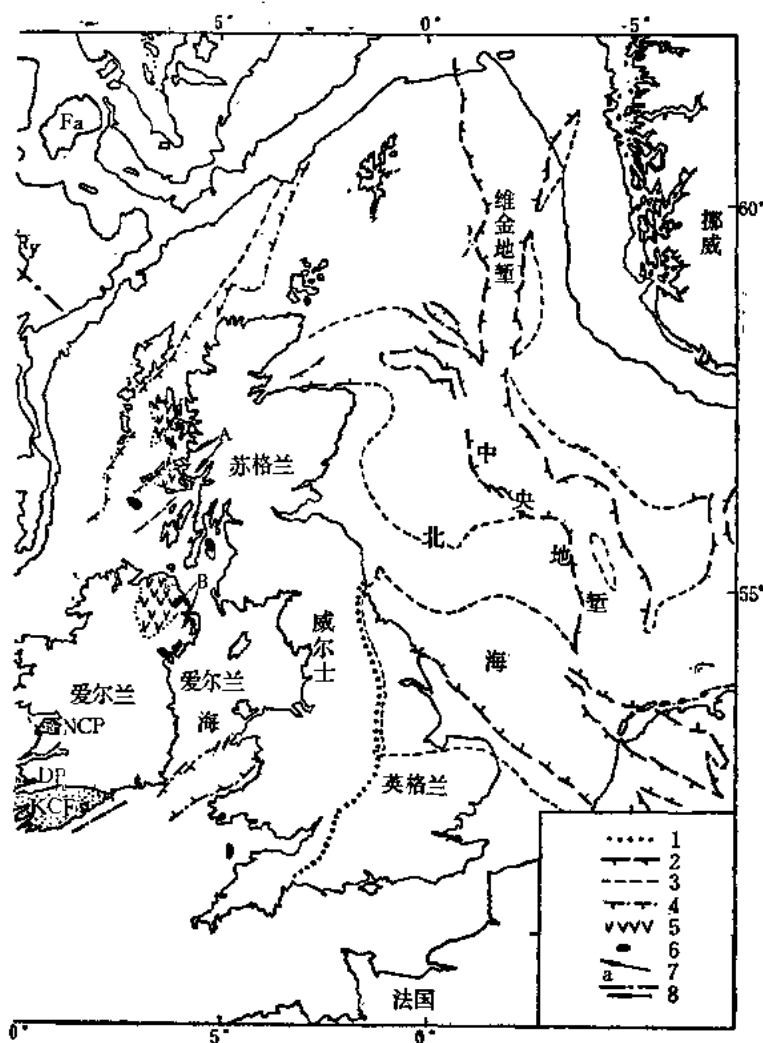


图 2 北海和不列颠爱尔兰的构造特征(可图例)

1—被侵蚀所揭露出来的深部构造东界；2—维金地堑和中央地堑的后的断层运动；5—早第三纪玄武岩；6—早第三纪深成岩中心；槽张开时，推测的转换断层爱尔兰以西的抵斜岩块；KCF—克里-科三纪岩墙群，在 A 和 B 处转向近南北向。海洋测深(100 米，500 构造主要根)



能与大西洋分离期的横向热流动作用有关)

隐伏断层; 3—北海地区其他盆地的轮廓; 4—大不列颠以西白垩纪
7—板块分离方向 (a 和 b 是推测的, c 是已知的); 8—当罗卡尔海
克褶皱带; DP—丁格尔半岛; NCP—北克莱尔高原。北东走向的第
米, 1公里和2公里的等深线), 据 D.G. 罗伯茨(私人通讯)。北海
据布奈尔^[166]

不十分厚时，对于作这种解释来说，热的供应量肯定是太小了。另一方面，板块分离作用明显地提供了大量的过剩热源。这就提示了从分离边缘来的横向热流动最后可以在水平方向上传播，并降低了板块的密度，这种在水平方向上传播的距离可以与板块厚度相类比。由于拱曲作用进行得太快，以致不能区别是由于这种原因所产生，还是由于另一种有更多人相信的原因所产生。后一种原因（根据克洛斯模式）认为穹窿作用早于板块分离作用，而不是晚于板块分离作用。然而，需要小心，因为由传导作用进行的热传播速率是很慢的，即使在深度超过100公里时有辐射传导作用的帮助时也是极慢的。据简单的计算表明：热流的“羽状边沿”型式在50百万年中从母源到“羽状边沿”为稍远于100公里，在150百万年中为170公里。因此，造陆作用可以延伸得比这一距离更远得多，这里必然还有其他因素。

实际上，有两种情况存在着横向热流动。其中之一，是以阿拉伯红海边缘始新世后的隆起为代表，隆起宽度大于700公里，必然是由于红海附近所引起的浮力与相当大的板块弯曲刚度结合起来，引起了大规模的掀斜作用。

另一种情况，是以不列颠群岛为代表，其中加里东和海西构造现在已经从距离大陆架边缘600公里处揭露出来（图2），在北大西洋这一地区从开始分离以来，横向热流动能够扩散这一距离三分之一以上同样是不可思议的。然而，在这种情况下肯定不能用板块刚度来解释，因为在爱尔兰海和赫布里底地区广泛出现单独的垂直运动^[46~49]。爱尔兰海的变动是与早第三纪火山作用的南北带位于同一线上，其延伸是从西北苏格兰到布里斯托尔海峡（图2），在罗卡尔高原以西500~1100公里以外，在新的分离期开始以后几百万年（距今60百万年以前）中达到高峰。作者认为：在新板块边缘附近热流动引起的浮力发生弯曲运动，是以便板块沿着以前存在的脆弱线（如泥盆纪以后的盆地链）发生破裂，引起火山作用和重新发生断裂作用。岩墙群的强度暗示有相当大的热流注入，可以认为这是由于横过英格兰的侵蚀揭露区的拉张