

海底地壳热流与板块构造

喻 普 之

(中国科学院海洋研究所)

火山喷发、熔岩溢流、雾气腾腾的温泉，这些宏伟壮观、迷人的景色，长期以来就吸引着人们去探索地球内部的奥秘。人们在陆地上经过几个世纪的探险和摸索，对地球内部热状态的认识积累了丰富的知识。但是应当说这还是不深刻的。近二十年来，海洋地壳热状态研究的迅速发展，取得了丰硕的成果，大大地丰富了人类对地球本质的认识，给古老的地热学增添了新的活力。一提起地热，大家就自然的想到地下热能。是的，地球内部蕴藏着巨大的热能，初步估计地热能的总储量约为地球上全部煤炭储量的一亿七千万倍，可谓是“得地独厚”的能源了。当今科学技术的发展又为人类广泛开发利用地热能开辟了广阔的前景，地热发电便是地热能的主要用途之一，这是大陆地热学的一个重要内容。海洋有广阔的水域，地壳薄，缺失花岗岩层等特点，因此，海洋地壳的热性质可以说是比较直接地反映了地球深部的热性质。地球深部的热性质（温度、热导率、比热、熔点及膨胀系数等）是地球的重要属性，与地球的起源和发展有密切的关系，是地壳运动的主导因素之一。对海洋地壳热性质的研究是我们认识地球及其发展的重要途径，特别对阐明地壳运动的模式具有很重要的意义。同时也对海底工程、海底矿产的调查和勘探具有明显的实际效果。近十多年来盛行的海底扩张与板块构造学说，就是在广泛研究海洋地壳热性质及其它地球物理和海洋地质资料之后建立起来的。海底热性质数据是海底扩张与板块运动模式的重要论据之一。

海底热流及其测量

“万物生长靠太阳”。太阳向地球表面辐射

的热量的数量是相当可观的，每秒钟达 4.12×10^{13} 千卡，相当于燃烧 550 万吨煤产生的热量。火山和融熔的岩浆直接告诉我们地球内部的温度是相当高的，然而大地并不是灼热的，甚至温度很低。这是因为地球表面的固体岩石地壳传导热量的能力远较空气差，把大部分地热封闭在地下的缘故。从太阳来的热量和地球内热在地表的损失比率大约是二万分之一。就是说，在地表从地球内部来的热量损失大大小于来自太阳的热量。太阳热到地表后大部分又被辐射返回空间，只有极少部分穿透地表下很浅的深度。因此，太阳热是改变地表温度的决定因素。在地表几百米深度以下，就可以完全忽略地表温度的日变化和年变化的影响。这时地下温度随深度的增加而增高，温度的这种上升率叫做温度梯度。在陆地，温度梯度约为 $0.1 - 0.01^\circ\text{C}/\text{米}$ ；在深海底约为 $0.04 - 0.08^\circ\text{C}/\text{米}$ 。过去人们了解地球的热状态主要是测定各地的温度梯度，这并不能表达地球各地的热量的大小与方向的变化，于是，人们就建立了热流的概念。所谓热流，就是在单位时间内通过单位面积的热量，它总是由高温向低温流动，与梯度方向相反，大小成比例。即：

$$\bar{Q} = -K \cdot \frac{dT}{dZ}$$

\bar{Q} 为热流量， T 为温度， Z 为深度， K 为热导率，即岩层传递热量的能力。所以测得一个地点的温度梯度和岩层的热导率，便可求得通过该点的热流量，计量单位是微卡/厘米²·秒（简称为 HFU）。

在陆地测量地壳热流量，通常是在深矿坑或钻井中进行。过去认为在大洋中也要这样的条件，实在困难。后来，一些学者发现深海底

部的温度保持不变，在大范围内是均一的，几乎不随时间而发生变化。这意味着在深海的沉积物中可以直接测量从地球内部来的热流。这样就为在海洋大量开展地壳热流的调查研究提供了一个比陆地更为方便有利的条件。近20年来，海底热流测量的迅速发展，全球地壳热流数据有四分之三来自海洋，不是没有本身的内在原因的。

在深海底测定地壳热流也和陆地一样，测量一个地点的温度梯度和岩层的热导率，二者之积便是该点的热流量。

海底温度梯度的测量，是将一根温度探针依其自重插入深海沉积物之中，测量不同深度的温度，经过对测点的水下地形、水温等校正后，求得该点的温度梯度。所谓温度探针就是在—根2米至5米长度不等的不锈钢管，直径为15—30毫米，在内部不同长度位置上装有三个很敏感的热敏电阻，各自与记录器相连。当温度探针插入沉积物中，各热敏电阻便测出相应深度的温度，记录器自动记录下此数值。对热敏电阻的精度要求很高，在0.001°C以上。图1是目前经常使用的一种温度探针，它还带有现场测量热导率的装置。

热导率的测定，海上现场测量，或是在测定温度梯度的同时采取泥样在实验室内测量热导率，通常都是采用探针法。因为对饱和水的软的海洋沉积物，使用探针法简便、误差较小。这种方法就是在一个长度比直径大得多的不锈钢管（探针）内，装有热源和热敏电阻，插入样品中，当热源加热时，极似一个无限介质中的线源加热。于是，几秒钟之后，探针温度随时间呈自然对数上升的速率与热导率成正比。根据下列关系式求得热导率的近似值。

$$K = \frac{Q}{4\pi(T_1 - T_2)} \ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right)$$

t_1, t_2 为测定时间， T_1, T_2 为其相应的温度， Q 为热源单位长度的发热量， K 为热导率。在实验室中探针的直径是1毫米；在海上现场测量用探针的直径是3—4毫米。采用这种方法重要的是防止样品中水分的损失、有机物的分

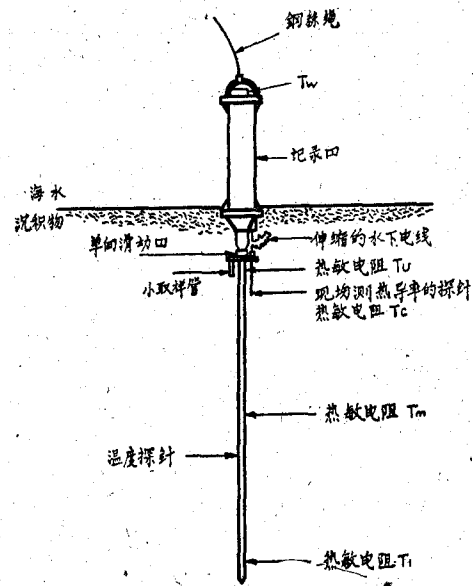


图1 海底温度探针

T_w ——测水温的热敏电阻； T_c ——测沉积物热导率的热敏电阻； T_u, T_m, T_1 ——测沉积物温度的热敏电阻。

解和硫化物的氧化，因此要求尽快的测定样品的热导率。另外，海上取样时要使用对沉积物压缩小的活塞柱状采泥器。否则将大大影响热导率的精度。

海底地壳热流的分布与板块构造

目前全世界有四千多个热流数据，有三千多个是在深海底测得，其中又有70%是在太平洋。由此看出，地壳热流值的分布是不均匀的。表1是大陆与海洋热流的平均值。

表1中最明显的特点是全球热流量的平均值和所有大陆或所有海洋的热流量的平均值几乎相等。这是一个很有趣的问题，是巧合呢，还是具有更深刻的意义呢，直到现在还是一个被许多学者重视的问题。当然对这样一个问题的解释也是众说不一的。一般认为是海陆热源不同所致。在海洋，一般只有5—7公里厚的玄武岩层，缺失富含放射性元素的花岗岩层。高温的上地幔是海洋地壳的主要热源。高温的上地幔物质从洋中脊涌出，向其两侧扩张，至

表 1

地区	单独值			等面积平均值*		
	N ^①	\bar{q}_1 ^②	S.D. ^④	N	\bar{q}_2 ^③	S.D. ^④
全球	3,127	1.63	1.07	673	1.47	0.74
大陆	597	1.45	0.57	95	1.46	0.46
海洋	2,530	1.67	1.15	591	1.47	0.78
太平洋	1,308	1.70	1.24	310	1.50	0.84
大西洋	436	1.47	1.14	126	1.34	0.57
印度洋	358	1.36	0.95	108	1.32	0.52

*等面积为 9×10^4 平方海里或相当赤道上 $5^\circ \times 5^\circ$ 的面积。

注：1. N——数据的数目；2. \bar{q}_1 ——单独数据的平均值（微卡/厘米²·秒）；3. \bar{q}_2 ——等面积平均值再取平均值（微卡/厘米²·秒）；4. S.D.——由平均值得出的标准偏差（微卡/厘米²·秒）。

海沟又插入上地幔，完成上地幔与地壳的物质对流过程，同时也完成地壳热流由高到低的循环。这样，上地幔的热状态便是驱动海洋地壳扩张的动力。在大陆，热流量主要来自厚30—70公里的花岗岩层。花岗岩比玄武岩及橄榄岩都富含放射性元素（表2）。放射性元素是产生巨大热量的热源。一克花岗岩每年约产生300尔格的热能，20公里厚的花岗岩层大约产生 10^{28} 尔格的热能。这个数量比每年地震释放的能量大1,000倍，比一个一百万吨级核爆炸的能量大25万倍，何况大陆地壳花岗岩层的厚度还不只20公里。大陆地区的热流量是来自花岗岩层。

表1还告诉我们，海洋中的热流值的分布也是有差别的。表3列出世界海洋中主要热流值的分布。

从表3看出，世界各大洋内地壳热流值的

表 2

岩石类型	放射性元素总量(ppm)			产生热总量 (尔格/克/年)
	铀	钍	钾	
花岗岩	4	13	4	300
玄武岩	0.5	2	1.5	50
橄榄岩	0.02	0.06	0.02	1

分布具有明显的分区特征。

广阔的大洋盆地，热流值均匀分布，大致有由洋中脊向海沟、由高到底变化的特点。全部热流的平均值约为1.3—1.4HFU。

在各大洋的洋中脊上，热流值的分布是复杂的。洋中脊的峰顶出现高热流值，平均热流值是2.5—3.0HFU，高热流值达8—9 HFU。在洋中脊的两侧斜坡处却出现一个低热流带，平均热流值为1.2HFU。图2是研究较详细的东太平洋洋中脊的热流分布图。在脊峰顶部出现8 HFU的热流值；在西坡出现低热流值，

表 3

地区	测点数	热流平均值 (微卡/厘米 ² ·秒)	标准偏差
太平洋	1,568		
海盆	842	1.59	1.01
东太平洋洋中脊	206	2.26	1.71
东太平洋洋中脊的 斜坡	95	1.50	0.79
海沟	59		
中美海沟	9	1.49	0.93
秘鲁智利海沟	6	0.44	0.35
波多黎哥海沟	3	0.93	
阿留申海沟	5	1.39	0.92
千岛海沟	5	0.96	0.37
日本海沟	2	1.13	0.02
伊豆一小笠原海沟	2	1.40	0.01
汤加—克马德克海 沟	2	0.95	1.06
爪哇海沟	5	1.12	0.70
苏门答腊海沟	20	1.23	0.88
边缘海	366		
白令海	21	1.54	0.52
鄂霍茨克海	51	2.05	0.73
日本海	184	2.23	0.52
中国东海	3	4.33	4.02
菲律宾海	26	1.42	0.72
苏拉威西海	5	2.31	1.69
珊瑚海	3	1.61	0.21
斐济海	63	1.76	1.52
塔斯曼海	8	1.02	0.44

地 区	测点数	热流平均值 (微卡/厘米 ² ·秒)	标准偏差
帝汶海	1	1.69	
佛罗勒斯海	1	1.70	
大西洋	555		
海盆	207	1.24	0.36
洋中脊	148	1.50	1.37
洋中脊斜坡	96	1.03	0.69
墨西哥湾	27	1.00	0.47
加勒比海	36	1.35	0.39
地中海	41	1.42	0.95
印度洋	491		
海盆	219	1.41	0.79
洋中脊	155	1.46	1.30
洋中脊斜坡	93	1.08	0.84
红海	10	3.66	2.21
亚丁湾	8	3.95	1.36
北极海盆	39	1.35	0.47
南极海盆	5	0.73	0.41

约为0.8HFU。

在海沟一边缘海地区，海底热流值起伏变化很大。图3清楚地表明这一地区热流值变化

的特点。在日本海沟内很窄的地带出现小于1 HFU的低热流带；日本本土是热流值由低到高的过渡带，日本海却是一个高热流区，热流值大于2 HFU。亚洲大陆与西太平洋之间的边缘海，包括我国的东海都具有大于2 HFU的高热流的特点。

海底地壳热流值分布具有这样的特点，绝非偶然，它展现出了海底热流与海底地质构造间的相关性，揭示了海底地壳运动的某些本质。根据海底扩张与板块构造的概念，海洋板块的运动模式如图4所示。

上地幔物质从洋中脊溢出，向其两侧移动扩张，至海沟向下俯冲重新回到上地幔。洋中脊是大洋中的活动带。那里有频繁的浅地震，有明显的张裂谷，广布新鲜的玄武岩。显然，高温的上地幔物质从洋中脊上升造成了脊峰的高热流值。上升物质由洋中脊向两侧不断扩张，随着时间的推移，和洋中脊的距离越来越远，海底地壳的年龄在增长，温度在下降，海底热流值在减小。海底热流受海洋地壳的扩张、冷却过程的支配。根据计算，海底地壳由9 HFU高热流值下降到1 HFU的低热流值，

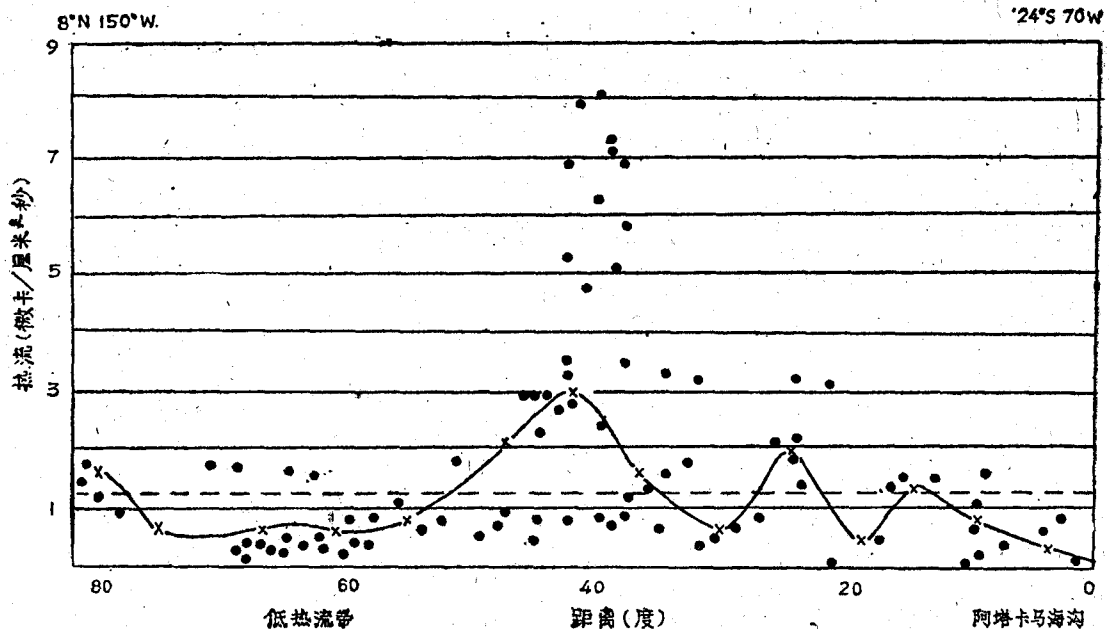


图2 东太平洋热流剖面

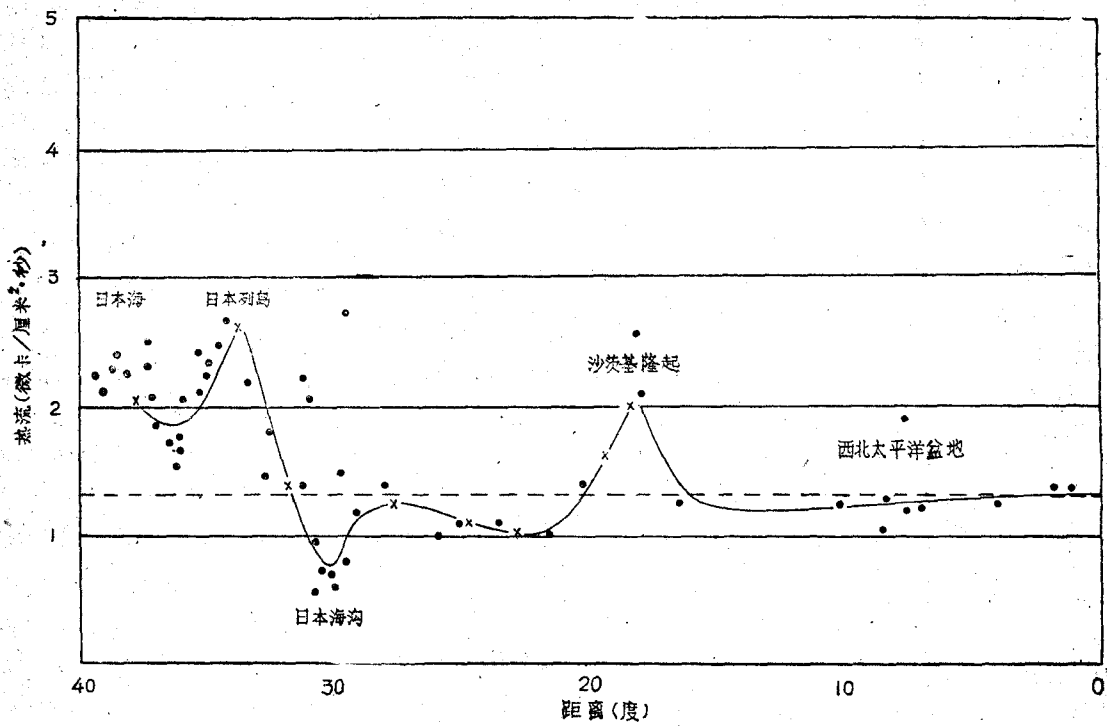


图3 西北太平洋热流剖面

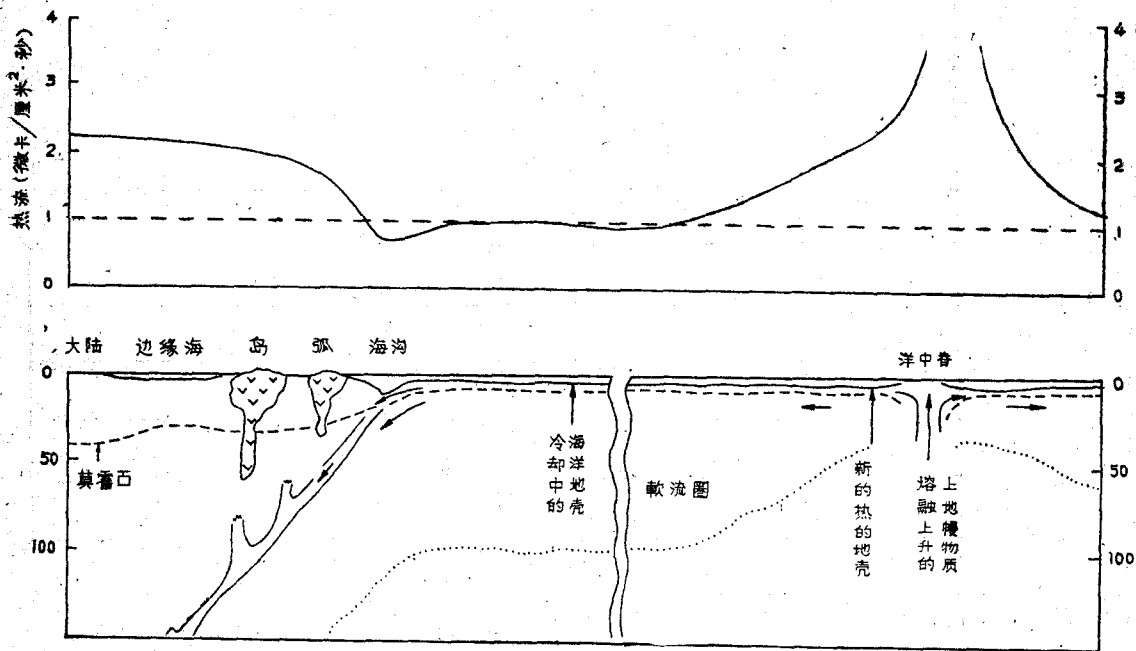


图4 热流异常与海洋地壳运动的关系示意图

大约需要1亿年左右的时间。所以大洋盆地
即板块内部，地壳热流值的变化是均匀的。

图5表示了大西洋洋中脊的热流、地磁与海

底地壳年龄的关系，在图上的一个重要特点是
在1,000万年处地磁和热流都发生明显的变化。

(下转第34页)

六、问题与结论

1. 问题

从表2、表3可以看出,经典化学分析法本身最大误差为0.5—2%,电极法本身最大误差为1—3%,电极法与经典化学分析法误差为0—3%。在个别情况下,由于操作不慎,电极法与经典化学分析法误差可高达7—8%。碘电极对同一被测液的测定电位常常差1毫伏左右,这样就使测定结果出现误差。

电极、酸度计的质量高低是造成实验误差大小的重要因素,如有条件应选择较好的电极、酸度计进行实验。

操作过程中,温度控制不好,电磁搅拌速度不一,读数不准确都会造成误差。特别要注意在测定了高浓度被测液后,电极、烧杯必需充分洗涤后,才能测低浓度的被测液。如有条件更换一支新电极则更好。

有些电极的实际斜率与理论斜率有一定误差,计算时应按实际斜率。所加入的0.5毫升

标准被测液的碘离子浓度最好是海带浸液或灰化滤液碘离子浓度的100倍左右,在计算时0.5毫升的体积可以忽略不计。

以适当的倍数稀释海带浸液或灰化滤液,可以降低干扰成份的影响,提高测定的准确度。

海带中的碘以无机碘和有机碘两种形式存在,高温焙烧使海带中的有机碘转化为无机碘,但浸泡不能达到以上的效果。我们以优选法中双因素循环寻优的方法,对在不同浸泡条件下风干海带碘的浸出测得率进行了多次实验,结果表明,如果所加水的重量为风干海带的18倍,浸泡15分钟时浸出测得率最高。

2. 结论

通过以上实验证明,应用离子选择性电极测定海带碘含量,设备简单,测定迅速,测定的结果和经典法基本一致,这给海带养殖单位及研究部门初选高碘海带,对海洋化工厂测定海带浸液的碘含量都是很适用的。而且,随着电极、酸度计质量的提高和操作技术的完善,准确度必将进一步提高。

(上接第16页)

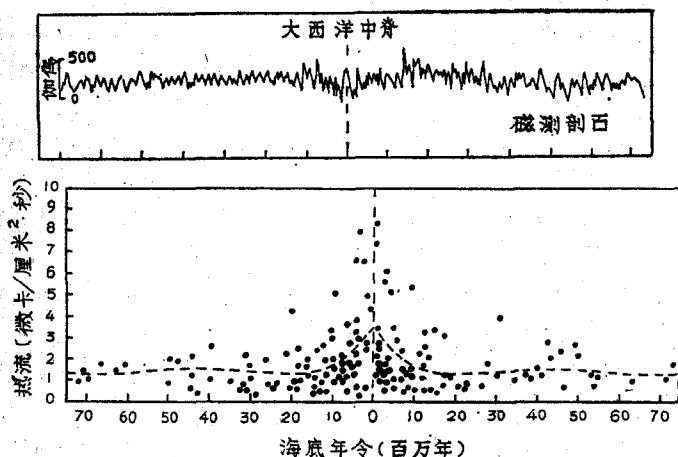


图5 大西洋中脊的热流、地磁与海底地壳年龄的关系

海沟是两个冷的板块相碰撞下插俯冲的消亡带。那里有强烈的地震。在海沟向陆一侧常伴有岛弧、火山和中酸性的熔岩。两个板块相碰时,在海洋的一侧,压力大,岩石的导热率低,板块向下移动使等温面同时下降,因而在海沟内

很窄的地带出现低热流带。板块下冲,与上板块摩擦产生发热过程,在边缘海出现高热流带。

板块构造学说比较多的解释了现今海底地壳热流的一些现象,但还是有很多争论的,如对上地幔的热状态;洋中脊斜坡带的低热流;边缘海的高热流值等问题的解释还是很不够的。把地壳运动的原动力归结为是地幔与地壳物质的热对流,似乎是有些过于夸大了。目前国外对海底地壳热流的调查投入巨大的力量,

深入到世界各大洋,海底地壳热流的调查仪器已为海洋调查船的常备仪器了。显然板块构造学说的发展和完善也有待地壳热流、地震、地磁、重力等海洋地球物理学及海洋地质学的深入调查研究。