

国外地质科技资料选集

第二十二集

22

地质矿产部南京地质矿产科学研究所

1983年3月 南京

国外地质科技资料选集

(第二十二集)

- 关于东太平洋洋隆热水喷出的发现……………K. C 麦克唐纳 B. P. 普亨戴克 (1)
- 远成热液层控矿床形成的构造条件……………B. Б. Д.Рбыалов В. Архангельская (23)
- 在广义矿石成因理论范畴内试论黑矿型矿床的形成……………Frederick J. Sawkins (31)
- 有色金属和金的层状矿床的研究现状及任务
……………B. M. 波波夫 Y·阿萨纳利也夫 Л. Ф·纳尔克林 (40)
- 岛湾蛇绿杂岩的岩浆房剖面……………J. F. Casey J. A. Karson (47)
- 圣海伦斯火山泥石流搬运和直立掩埋的树根给我们的启示……………威廉 J. 弗里兹 (57)
- 关于海洋地质的一些新认识……………Tjeerd H. von Andel (61)
- 线状碎屑滨线……………R. C. Selley (63)

关于东太平洋洋隆热水喷出的发现

K. C 麦克唐纳 B. P. 鲁亨戴克

摘 要

在用潜水艇调查东太平洋洋隆北端时,发现自海底的一部分有热水喷出,而且在其周围生息着异常奇特的生物。这项调查就新地壳是怎样形成的问题阐明了许多事实。

东太平洋洋隆*是属于世界上最长的山脉——大洋裂谷系的一部,而裂谷系就象棒球缝合线一样绵延 75000 公里以上包围着地球。这一裂谷系的大部分地区,也包括东太平洋洋隆都淹没在海洋中。该裂谷系就是人们称之为以网格状相连接的大洋中脊。该裂谷系在系统地建立地质学原理的板块构造理论方面,起着特别重要的作用。每一个裂谷都是一条一条狭窄的裂缝,在该裂缝处运载着海洋地壳的板块断断续续地裂开或者拉开。就在这样的海底扩张轴处,熔融的岩浆自地球的地幔中喷涌出来,随之填满了裂谷而形成新的海洋地壳,那个海洋地壳犹如放置在很宽的传送带上,向外侧移动。

海底扩张的概念阐明许多地质学上观察到的事实。然而,就裂谷系而言,尚有若干重要问题仍然未能解决。在海洋底部拍摄的照片和采集的岩石都表明在大洋中脊上存在有新的火山活动,同时表明在大洋中脊轴部下面存在有岩浆库(magma reservoir),即启示着下面存在有熔融的岩浆储集处。这样的岩浆库能永恒存在吗?假若真的存在,其深度又有多么大呢?自大洋中脊轴部开始能扩张到多么远的地方?岩浆具有怎样的物理和化学性质呢?由于火山活动形成新的地壳时,自地球内部能散失多么大的热量呢?随着这些问题和其他类似疑问的解答,就能更好地认识地壳的构造和组成吧。不管如何说,至少组成地壳70%以上的部分都是由大洋中脊形成的。

最近时期,我们和协作组沿东太平洋洋隆的顶部进行了调查,那里虽然是一个极其狭窄的地区,但是在其旁侧很快地确定了调查地点。而且,由于这一探险工作,就沿洋隆轴的顶部存在有岩浆库,岩浆库上面存在狭窄而明显的地壳形成地带问题,获得了重要的证据。最为激动人心的证据,就是借助于小型潜水艇潜到2500米以上的深度,用人们的肉眼直接观察而取得的证据。在沿洋隆顶部的若干地点上,集中出现了热水喷出孔,自喷出孔喷出了含有溶解矿物质呈现黑色的热水,因为热水同岩浆库附近的岩石接触,温度变得异常高。已经查明,热水喷出孔不仅对裂谷系的地球物理学特征给予很大的影响,而且也大大地改变了大洋化学组成的平衡。这些热水喷出孔维持着异常奇特的生物群,它们是完全不依赖于光合作用能源而生存的唯一生物群。

* 洋隆(日文为海膨,相当于rise或Swell),即两侧具有平缓而平滑的,比高数百米、宽数百公里的深海底隆起,如东太平洋洋隆,西北太平洋洋隆等——译者

板 块 构 造

板块构造理论就是研究岩石圈的运动。所谓岩石圈就是比较坚硬的地球外侧的一层，包括所有的地壳及其下面地幔的一部分。这一层被分成大小各种形状的板块，其块数有数十块之多。一般地说，这些板块是相对地运动着，大洋中脊就是板块的边界之一，在大洋中脊，新的岩石圈物质自下面涌贯上来。而且，板块离开中脊的活动过程中，犹如滑行似的移动于岩石圈底部的较柔软层（软流圈）的上面。

一般地说，地球大小是不会改变的，如果由大洋中脊形成新的岩石圈（洋壳），就意味着在其他别的地方有大体上同样数量的岩石圈物质在消亡。这个破坏场就是另一种类板块的边界，也就是俯冲带（Subduction Zone）。在俯冲带上，一个板块向另一个板块边缘下俯冲，最后，又聚敛于地幔中。虽然在两种板块边界上都伴随有断层系、地震、火山作用，然而在两种板块的边界上观察到的地质活动则炯然不同。

海底扩张说在板块构造理论创立之前就提出来了。这一假说主要是普林斯顿大学的赫斯（Harry H. Hess）于1960年初明确阐述的。该假说虽然从根本上论述了大洋底的生成和破坏，但是，没有阐明坚硬岩石圈板块的存在。不过现在这一假说已直接地被证实了。那就是后来在海洋地壳记录上发现了地磁场周期性倒转，由普林斯顿的凡因（J. Vine）和马休斯（D. H. Matthews）对这过程作了说明，当今，一般已为人们所接受。

在大洋中脊下面岩浆上升、冷却凝固时，强磁性矿物在地球磁场的方向上发生磁化，于是，地磁场的极性方向就保留在磁化了的火山岩内。而且，由于磁场倒转的结果，便形成与裂谷轴相平行的地磁条纹。这样一来，海洋地壳就起了记录地球磁场历史的磁带作用。地磁场倒转的时期可以独立地求出来，因为条带模样的条纹与条纹之间的界线同磁场倒转的时期是相对应的，所以条纹的宽度就成为表示海底扩张速度的尺子。然而从每一万年到数百万年，地球磁场究竟发生了什么样的倒转呢？其详细情况仍然是地质学上的一个大谜。

根据海底扩张理论，地表上看到的各种十分有趣的地质现象，在海洋底也应该被观察到。近年来，由于深海载人潜艇的发展，进行了上述现象的研究。特别是美国的科学研究，用潜水艇阿尔芬号（Alvin）已成为研究海洋底层的重要手段。地质学家乘坐沃兹霍尔海洋研究所的阿尔芬号上，能够进行岩石样品采集，详细描述岩石产状。这样，海洋地质学家同陆上地质学家一样，能着手绘制出高精度的海底地图。

1973年开始工作了，在阿尔芬号的初期工作中，在海洋底部调查的最后阶段使用潜水艇获得了最有价值的成果。能在海底滞留的时间很短（最长达6小时），需要一些费用。阿尔芬号上所用的遥控照像机、高分辨力音频测深仪及其他测地装置等，还有海底地形图的测制和所有的手段都可事先着手充分准备，从地质学观点来看所谓“就地定点”的调查阿尔芬号都能做到。如此说来，如果使用节省费用的阿尔芬号，就能收集到丰富的现场情报。在过去的7年间，应用阿尔芬号潜水艇作了沿大西洋中脊火山活动周期和地磁倒转图型（Pattern）的调查。还应用阿尔芬号研究了出露于牙黑加附近的海沟裂谷系的地壳剖面。1977年阿尔芬号沿位于厄瓜多尔海面的加拉帕戈斯扩张轴作潜水调查时，首次

观察了热水涌出口及其相伴生的异常奇特生物。

我们在此处所做的报告是根据阿尔芬号潜水艇在距加拉帕戈斯潜水地点北西约3000公里的东太平洋洋隆顶部获得的最新调查结果。我们使用潜水艇和海上船舶拖航的仪器,测定了地壳岩石的磁化率和电导率,洋隆下面地震波的传播速度和洋隆上重力异常的大小等。

上述这些特性如果都存在于裂谷下面,就能敏感地测出人们推测的中轴岩浆库的性质。我们发现了迄今为止在海洋里找到的温泉中的最热海底温泉,乃是这次探险活动的高潮。

探 查 准 备

我们选择的潜水地点是靠近东太平洋洋隆的北端,稍微向北东前进,就进入加利福尼亚湾。洋隆本身延续到海湾中部,同圣安德烈斯断层相毗连。在海湾的外侧,东太平洋洋隆构成太平洋板块和利贝拉板块边界的一部分,利贝拉板块是更大的北美洲板块分开的断块。

我们所研究地区的裂谷平均每年以6厘米的速度扩张着。这个速度大体上等于人类指甲每年的生长速度。在该处的扩张速度为大西洋中脊扩张速度的三倍,但是,不超过迄今为止所发现的最大扩张速度的三分之一(最大扩张速度在东太平洋洋隆的另一地方,就是在复活节岛观察到的扩张速度)。提出该地区的理由之一,就是因为考虑到该地区是典型中间速度的扩张轴,另一点则是因为已经取得了有关该地区相当数量的详细情报。

关于海底扩张轴的地质学上的格局和全部规范,我们根据以前的航海资料,已掌握了颇为清晰的图象。所用的磁性、照片、音频探查的研究,是根据斯科克利布斯海洋研究所的深海拖曳式探测仪(Deep-Towed Instrument Package)的无人操作装置进行的。根据该项研究,充其量只知道这一地区的扩张轴为1—2公里。而且,将扩张轴的水深图和地质图综合起来进行研究,决定了调查的目标。平均潜水深度达到2600米以上。

潜水计划的第一阶段是由法国、美国、墨西哥的研究队进行的。研究队的领导人是布尔塔尼海洋学海洋生物学中心的冉·弗朗歇托(Jean Francheteau)。首先乘坐法国潜水艇西安娜号的12人小队集中力量于地质学的调查。为此目的,在可观察到的岩石露头和其他构造的地方,多么需要直接用人们的肉眼进行观察。紧接着就进行了下一阶段的计划。该项计划由于是地球物理学实验,就使用比较大而稳定的潜水艇阿尔芬号,于1979年开始了工作。

用西安娜号潜水的调查人员发现了海底扩张轴是由四个地质地带组成。第一个地带位于扩张轴地带之中轴的正上面,是宽度约一公里非常年轻的火山带。在扩张轴地带形成的新的火山物质几乎全部都见于喷出在这一狭窄地带上。在该处见到的玄武质熔岩流大体上具有海底喷出特征,就是形成枕状熔岩。而且,在熔岩流上面实际上也不存在任何沉积物。那些熔岩流由于新鲜而显示出类似玻璃光泽,因为海水反应引起的蚀变现象也较少。

在这个新火山带的近外侧,新形成的地壳一面开始向水平方向移动,一面在扩张速

度。那种移动在扩张轴地带的外侧，一直以每年3厘米的最大值进行着。在第二地带的这一地区内，地壳的延伸裂缝正在活动着。小裂缝呈东北向排列，这与洋隆总的方向平行，与扩张方向成直角。位于中轴带两侧这一裂缝地带的宽度为1.5~2公里。

即使越过了第二地带，地壳扩张的速度似乎还在增加，但是当进入次一地区的第三地带时，则可能发育巨大的“正”断层。断层几乎是垂直的，好像是巨大的阶梯。这是在主应力拉伸的地点上突然发生上下方向的活动而形成的。由于沿断层的滑动，经常发生地震，其震级为里希特震级5.5左右。正在出露断层面的断层崖，存在于扩张轴的一方，其高度达70米。到离扩张轴约10公里的第四地带的地区时，活断层急剧尖灭。恐怕地壳移动的加速也终止了。

由于1978年西安娜号的潜水调查，大致查明了特殊熔岩和矿床的形成。发现凝固了的熔岩湖，这可能是熔岩流的急剧流出而形成的吧！若干个熔岩湖长度为数百米，深度在5米以上。熔岩湖的表面到处都有沉陷，形成崩塌孔洞。在熔岩湖的顶端有玄武岩柱和岩壁，在岩柱和岩壁上可看到急剧冷却了的玄武岩质玻璃形成的条带。这种条带可以视为熔岩高度变动的记录。也就是说，也许是熔岩向熔岩湖外溢时，抑或是在向下部岩浆库倒流下降时，因熔岩湖的“水位”下降而形成的吧！

热 水 地 带

在第一地带和第二地带的边界附近，发现了高数米的小山形成山链。根据以赫基年（Roger HeKinian）为首的地球化学小组的意见，认为这些小山是由锌、铁、铜以及少量银的硫化物组成的。而且认为这类硫化物小山可能就是海底热水喷出形成的。此外，还有三个事实表明该地区的热水活动是重要的。

1974年和1977年在扩张轴地带上再次检测了百分之几的温度异常，还测定了浓度异常高 He_3 。一般认为这种 He 同位素是显示热水活动确实存在的元素。乘用西安娜号潜水艇的调查人员进一步观察了同在加拉帕戈斯热水喷出孔见到的同样大的瓣鳃类。但是，在北方的这一地方则未生长瓣鳃类，虽然是偶然的，但这时西安娜号曾经到过距后来阿尔芬号发现的喷出孔数百米的地方。

1979年，阿尔芬号在赴现场之前，曾在西安娜号潜水点的西南，进行了扩张轴地带中轴地图的测制和照片摄影的简单调查。我们的目的是，调查沿扩张轴的地质构造变化，并特别注意追索热水活动的征兆。这种尝试并非徒劳无益。在斯克利布什（Scripps）海洋研究所的斯皮斯（Ferd N. Spiess）的指导下，根据侧向扫描声纳（Side-Scanning Sonar）测出了地形剖面图，向南西延长了测深图，为了描绘扩张轴的轮廓，曾使用了深海拖曳式测定仪。

也把装备有坚固照像容器的称为安加斯的温度探测装置放置于海底，于起伏很大的火山地形的数百米上面，反复数次通过相当的距离。根据沃斯霍尔海洋研究所的巴拉德（Robert D. Ballard）的操作，安加斯检测了若干地点的温度上升情况，其情报被传送到了海上指令船。我们立即收回照像机，迫不及待地等待显像胶片。敏捷地观看显像胶片，在数十张照片上发现了拍摄的各种海底生物。那些底栖生物和二年前在加拉帕戈斯扩张轴发现的生物都是同样的底栖生物。加拉帕戈斯的热热水喷出孔和与之相伴生的生

物群似乎不是唯一无二的。

因为这种证据是非常印象的证据,所以,我们把已确定的潜水计划改变向南西方向的计划。而且在潜水小分队中又增加了来自美国、法国、墨西哥的12个地质学家和地球物理学家。我们三人也加入了该小分队。首先在第一地带象三角形那样布置了三台海底地震仪。海底地震仪的位置则是根据置放于海底频应答器(acoustic transpodre)发回的中继信号正确决定的。根据阿尔芬号潜水艇数的音次预备性潜水查明了地震和重力的测定是良好的。而且在第三次潜水,B. P. 由弗兰休特和鲁亨戴克(笔者之一)亲自目睹了热水喷出孔。

经历如此特殊的经验是非常难能可贵的。最初是在几乎完全黑暗中度过两个多小时。这就是向海底下潜2500米以上的的时间。在阿尔芬号的直径不足2米冰冷而不自由的圆形密封室内勉强乘载了三人。一接近海底,打开潜水艇上的探路灯,就看到水被光照呈现的暗绿色。数分钟后见到了海底。阿尔芬号一到达海底,就立即将自己的位置报告给指挥船。然后被指示向海底目标的前进道路。以每小时500米的速度缓慢地前进在闪烁的火山岩上面。在这个时间过程内研究者们自舷窗目不转睛地注视着只能见到10~15米范围的外面漆黑世界。

新的生态系统

这次潜水,我们一边进行火山岩地区的重力测量,一边向热水地区迫近。在那里见到的光景犹如从昔日的恐怖电影中出现的离奇古怪的现象一样。在该处,从沿火山地带轴部分布的枕状熔岩中间冒出闪耀微光的水。还有约30厘米的白色瓣鳃类躺卧在黑色熔岩枕之间,白蟹任意乱爬在火山带上面。

其中也生长有最具剧戏性的生物,有时生息着把长达3米的巨大管状物作为巢穴的生物(管状蠕虫)群。我们见到了这样一些不由地有点令人毛骨悚然的生物,它们围绕喷气孔,在2℃到20℃的水中,好象形成密集的群落而生息着。Vestimentiferan类Pogonophorans动物的这种生物,无精打采地摇动于热水中。鲜红的舌状突起物自白色保护管中长长地伸长出来。这种动物的舌状突起和双壳结构的红颜色都是因为哪一种血液中存在有氧化的血红蛋白(hemoglobin)的缘故。白蟹有时爬上这种管状物,那恐怕是由于要攻击这种动物的舌状部吧!

在那次考察以后,阿尔芬号的潜水活动一直是根据安加斯确定了的已经是一个热水喷出地区进行的。那里就是我们最初曾经调查过的喷出孔西南部。在该处见到的光景是最为有趣的。由硫化物的沉淀物变成黑色温度极高的流体,自高10米、宽40厘米左右的酷似烟筒的喷出孔向上喷出。我们将这种喷气孔取名为“黑烟筒”(black-Smoke)。那类烟筒中的每一根都是由硫化物沉淀的小山集中冒出堆积形成的。去年西安娜号发现的“奇特构造物”恐怕就是这种已变古老的“黑烟筒”吧。

我们最初进行的黑色流体温度测定的尝试是以失败而告终。截至那时,在海洋底记录的温度中之最高的温度为21℃。那只是两个月前在加拉帕戈斯扩张轴测定的温度。我们所用的温度计只能指示到32℃的刻度。当将那一温度计插入到该烟筒时,指针立即甩开。而且,当拉回温度计指针时,就能在安装温度计指针的塑料棒上见到有熔化的痕

迹。如是，我们在海上赶制了温度计，改正了温度计上指针的刻度，同时测定了若干地点的温度。所测到的温度至少为 350°C 。推测温度到后来曾经由其它潜水班作了更为详细的记录。他们制作了适合于所测那种温度范围的改正温度计。 350°C 这一温度的水未沸腾，是因为喷出孔深度的水压约为大气压的275倍。

热水喷出孔沿洋隆顶部显现出相当大的变化。当向东北方向前进时，喷出孔的水就比较清澈。水的温度也比较低（低于 20°C 的低温），因为通过岩石间隙而缓慢地分散了。这一地带就是生物群达到最密集的地方。向西南方向前进时，喷出孔矿物沉淀的地方正喷出很高温度的水。水流出的比例也随着向西南方向前进而增加，在壮观的“黑烟筒”的地方达到最大。所见到的这种有规律过渡关系的地方，人们认为也许是对沿扩张轴部的火山和热水活动的强度表现出周期性的规律。

我们遇到的生物群同1977年在加拉帕戈斯扩张轴发现的生物群非常类似。在加拉帕戈斯见到的类似于具有茶色特征的斧足类的贝壳在此处则未发现，但是见到的海葵、沙蠹科的海蜈蚣、腰折虾、蟹的同类、巨大的双壳和巨大的管状生物似乎都是同类生物。各个生物群落大体上占有宽30米，长100米左右的地方。那些生物不是由于水温高而聚集起来，而是因为那里提供有浓缩了的食物它们才集中起来。喷出孔附近地区与其周围的水相比较，前者比后者营养成分浓缩了几百倍。

这种特殊的生态系的食物链，由斯克布斯的海洋研究所的Robert R. Hessler和沃兹霍海洋研究所的J. Frederick Grassle以及其他研究人员进行了研究。在食物链的底边存在有化学性细菌（Chemosynthetic bacteria）*，这些细菌氧化了自喷出孔喷出的硫化氢，从而生成硫黄和各种硫酸盐。细菌为了在有机物中吸取 CO_2 就利用了由于氧化作用而被放出的能。大体上讲，大型生物都以过滤的细菌为饵料吧！或者同细菌处于共生关系中而生活着。某种生物可能既是被食者，又是捕食者。

这种生物群集与光合作用和太阳能完全无关。它们的生存是依靠从地球内部放出的热能。这种生物群集发现于加拉帕戈斯扩张轴和距该处约300公里的东太平洋洋隆顶部两侧，这一事实暗示着沿分布于世界各地的裂谷系中都可能存在有这种生物群。由于偶发性火山周围的热热水喷出孔时开时闭，这种生物群就必须置身于危险的生活之中。实际上，双壳相连的瓣鳃类的沉积就雄辩地证明存在有区域性的生物大量死亡。

地球化学意义

在太平洋两个扩张轴地带发现喷出孔的事实，赋予关于海洋化学平衡的理论以革命性的影响。迄今为止，人们都认为，海水中各种元素的供给过程（主要有河川流水）和亏损过程沉积物的沉积及海底与海水之间的低温化学反应之间保持着平衡。随着关于矿物存在量，以及关于低温海水和沉积、火山岩之间反应知识的增加，人们弄清了关于某种元素的“差额”不相符合的道理。例如，自河川供给的镁离子和硫酸离子的数量要比因沉积作用、形成粘土、玄武岩风化而自海洋失去的数量大得多，而在海洋底部正在聚集的锰又比河流供给的数量多。

沿海底裂谷系的海水热水循环正成为导入新的因素。那种因素就是流体和固体之间

* 原文可能有误——译者

的高温化学置换反应。根据麻萨诸塞理工学院的 John M. Edmond 的资料, 溶解的硫酸盐置换为硫酸盐矿物和硫化物矿物。根据同样的反应, 自海水中失去而被固定在热水粘土中。根据这样的反应, 高温的海水变为还原了的酸性溶液。那种反应就把钙、硅、锰、铁、锂以及其他阳离子从岩石中溶解出来, 而供给海洋。这样一来, 热水系统就使海水的主要组成离子“收支”平衡。此外, 根据热水循环的观点, 还能说明很多微量和极微量组成离子的浓度和分布。

Edmond 曾经发现, 在加拉帕戈斯系流出的热水上升到火山岩的间隙时往往同海水混合起来。由于混合使流体的温度下降, 其结果是, 在岩石中沉淀矿物的同时, 海底中出现温泉的化学组成也发生变化。东太平洋洋隆观测点温泉高的温度及其化学组成, 表明在该处热水出现在海底之前并没过多地同冷海水混合。因此可以说, 这种流体显示出海洋化学循环热水的真正供给。自喷出孔涌出的水是一度自海底下降到接近岩浆库, 又自该处返回的水。

东太平洋洋隆观测点的未稀释的热水由于同海底冷的碱性海水接触, 就形成铁、锌硫化物的细小沉淀物而黑浊。根据斯科利布斯研究所的海曼 (Rachel Haymon) 和卡斯特纳 (Miriam Kastner) 的初步分析, 喷出孔周围的小山和烟筒几乎都是锌、铁和铜的硫化物及钙和镁的硫酸盐形成的。矿物形成机制的细节和矿物沉积的速度, 热水系的各个部分有关水和岩石的比率等, 现今, 在地球化学家之间正在激烈的争论。然而, 考虑海洋化学模式时, 这些喷出孔将起中心作用, 是毫无疑问的。

地球物理学实验

我们的地球物理计划是为了取得推测的洋底扩张轴下的岩浆库同构造、火山和热水活动之间的关系的许多知识而进行的。我们能够在热水活动很活跃的地区做实验是很幸运的。为了在洋隆顶部搞清其地下的地层构造, 进行了地震波传播速度、地震活动、重力异常、电导率、正反磁化等的观测。这次探险工作最为深刻的印象就是发现了现今正在进行活动的热水喷出孔, 这不仅对地球物理学家、而且对地球化学家和生物学家都是如此。大洋中脊上的那种热水循环, 虽然是15年前作为一种理论提出的, 但是人们认为该项研究是困难的。

新形成的岩石圈根据热传导能够计算出进行冷却的理论速度。该计算在另一方面指出, 通过大洋中脊而流出的热流量应该成为何种程度的数值呢? 然而, 在洋隆顶部附近, 如果将测定的纯粹的热传导而传输的热流量同理论模式取得的值相比较, 则取得了几乎小一个数量级的数值。难道模拟算错了吗? 或者是接近于冰点温度的海水, 循环于新形成的热的地壳中, 由于热对流的热传输而急剧地冷却了地壳的缘故吗? 海水浸透的海洋地壳究竟达到多么大的深度? 而热水带有多么大的宽度呢? 由于水的循环而受影响的地壳化学组成是怎样的呢? 什么样的矿物在沉淀呢? 这一系列问题中的一个关键性的地球物理学问题, 就是存在于扩张轴岩石中的裂隙和裂缝究竟达到多么大的深度。

通过海底传导的热流量的测定和根据岩石圈冷却模型的推测值之间存在很大差异, 大洋中脊的热损失至少为三分之一, 根据非传导手段, 那种状况大概是由于热水循环的缘故吧! 在加拉帕戈斯扩张轴上, 最早就观察到了热水活动, 但是到了热流量计算时,

在该处由于热水循环发生在很广阔的面积上，所以推算结果与实测不符。可是，东太平洋洋隆观测点的条件颇为适合以上所述的测定。

根据仔细深刻观察喷出孔电影胶片和电视录象带，可以推算流动的速度。如果以平均流出速度为每秒2~3米来计算，则自一个喷出孔每秒可流出6000万卡的热量。这个数值相当于沿大洋中脊长一约公里、向大洋中脊两侧宽30公里的部分放出的理论上热流量3到6倍的值。在我们研究地区的西南部，至少发现有12个主要烟筒，所以整个的热流量是非常巨大的。实际上，由于热的损失非常之大，喷出孔的寿命恐怕是较短的。喷出孔的寿命大部分可能为几年。

所见到的喷出孔，分布局限在新火山地带中的宽数百米，长6公里左右的狭窄线状地区。根据照象确定在这个带状地区内，已知存在有12个温度异常。而且其中有8个喷出孔是由阿尔芬号调查的。一般地说，在向东北方向温度略低的喷出孔周围，生成加拉帕戈斯型的生物群集。即使在西南端附近的最热的喷出孔也见到变化了生物，而该处的动物都在离喷出孔数米远的某一安全地带生活着。

地震观测

为了确定沿洋隆顶部分布的岩石裂隙和裂缝的深度，由奥克特(John A. Orcutt)和麦克唐纳(本文作者之一)设计了精度非常高的实验。我们提议测量上部地壳内地震波的速度，作为深度的函数。在海面上爆炸火药，波的能量就以球形扩散开来，由于受周围地形性质的影响而发生反射，就减少了地壳表层1000米范围内地震观测的分辨能力。因此，为了在该处克服这种困难，就必须对弹性体的波源和检波器两个方面在海洋底的设置方法很下功夫。此外，为了进行实验还必须以毫秒的精度来测定震波的时刻。阿尔芬号为解决这两个问题提供了方法。由于深海高压，火药爆炸实际上不起作用，所以我们在阿尔芬号上安装了水压式落锤震源作为地震波的震源。为了做到精确计时，阿尔芬号还行驶到各海底地震仪2米以内的地方，为检查地震仪的计时装置锤击海底面，锤击振动不仅通过地震仪接受到，而且还通装载在阿尔芬号上检波器把它记录下来。潜水艇在潜水结束时，还驶回到各个地震仪，进行了同样的检测。

在第四次潜水时，我们完成了平行于扩张轴长1000米部分和横切扩张轴800米部分的折射地震波剖面测量。虽然数据分析尚未结束，但是根据简单的走时计算，初步地确定了平行于扩张轴的、地壳表层部分地震波的速度。我们虽然取得3.3公里这一数值作为地震波的速度，但是这一数值比在实验室用同样压力的玄武岩取得的数值(每秒约5.5公里)还慢得多。这一低速度的原因是由于岩石存在有大量的裂隙和孔洞。大断层和裂缝虽然没有通过，但是在枕状熔岩中观察到了象毛发那样的无数细小裂隙和空隙。为了说明这种观察，在做出必要的裂隙和空隙的详细结论时，必须等待岩石物性的测定和完成最广泛范围的地震分析。特别有意义的是，人们认为在地震波的速度具有比每秒5公里还大的深度上，如此深处的裂缝都是闭合的。

根据初期折射地震波实验结果，了解到热水地区地下2—3公里深处的地方可能有岩浆库。在初期实验中，固然精度不高，可是因为规模很大，所以在离开成三角形放置海底地震仪之最大60公里的海面船只上爆炸了火药。然后，观测到了海底下深2公里处的

纵波低速度带，这一事实表明在该处存在有熔融了的岩石。此外，查明了距扩张中心轴10公里地点上的地震波速度同大洋玄武岩不但不相同，反而比该速度略快一点。因此，可以认为岩浆库集中在扩张轴附近的宽20公里的地方。

地震与火山活动

存在于扩张轴部的岩浆库的第二个证据，就是根据由地震发生的横波传播的测量而取得的。在岩浆库熔融岩石的地方，横波显著减弱。奥克特、里德（Lan Reid）、普罗瑟罗（Willan A. Prothero）三人发现了沿扩张轴的测量线地震纵波明显减弱，但是在离开扩张轴仅10公里的地方，就发现传播纵波就不那么显著减弱。这种发现虽然是间接的，却是扩张轴下面较浅地方存在有宽度狭窄岩浆库的明显证据。

阿尔芬号采集的玄武岩样品，由斯克利布斯研究所的霍金斯（James W. Hawkins）作了分析。岩石的性质也表明存在有浅面狭长的岩浆库。沿新形成的火山地带6公里的剖面线上采集的玄武岩样品，只表示某种限度范围内的变化，这些岩石来自同一岩浆源，在压力比较低的条件下，橄榄石和斜长石分别结晶的结果形成玄武岩。这一结果同存在于6公里较浅的岩浆库颇为吻合。岩浆库顶部的厚度只有2~3公里。在岩浆库顶部的地层中分布有大量的裂隙和裂缝，海水渗透到深处，至少加热到350℃。

海水在多么大的深度进行循环呢！作为海底地震观测的继续，去年夏季我们回到了观测点，进行了热水地带微地震的观测。为了表示喷出孔的位置，借助于以前固定留置的音频发射器，将7台地震仪布置在正确的位置上。若是热水流动，给我们送来地震观测需要的任何“信号”的话，就能知道水流达到何种深度。截至目前，我们正在取得有希望的结果。这一地带地震震源深度至多为2—3公里较浅的部位。这个问题与前面指出的岩浆库顶部较薄的说法颇为一致，也可以表示地壳中裂隙深入部分深度的上限。

在我们所布置的地震仪阵列的记录波相上，有一种称之为谐波颤动（harmonic tremor）的仪器，其特点就是能测量微小地震。去年伴随圣海伦斯火山大喷发曾进行了观测，这种仪器能把火山活动很快就要喷发的情况，或者刚刚喷发过的情况，准确地指示给人们以信号。圣海伦斯火山喷发时，从喷发前到喷发高潮时，颤动次数逐渐变频繁，最后几乎变为连续颤动。我们在东太平洋洋隆记录的颤动似乎也同圣海伦斯一样，一小时内竟发生数百次。总之，洋隆的这一部分究竟是活跃的火山活动处于终了期呢？抑或是进入活动呢？则要看它在哪一阶段所起作用的事实。

重力异常

在阿尔芬号由斯皮和鲁亨戴克（作者之一）作了与地震观测直接有紧密关系的一系列重力测量。同地震波的情况一样，该地区的地震场，是随着由于裂缝有无、浅岩浆库存在与否而引起地壳密度的变化而变化。因为估计的重力异常是比较小的，所以自海面测量其重力异常是困难的。为什么这样说，因为从震源到检测有颇大的距离，所以船上检测收到的信号是视加速信号。可是，阿尔芬号解决了这个问题。阿尔芬号停留海底时，在该处测量的重力场具有减少视加速度的效果。而且，如果靠近场源的地方测量，

用重力仪记录的信号则变强。

重力测量是沿从第一地带到第三地带穿过7公里的狭长剖面上进行的,在新火山地带的上面发现了明显的负重力异常。那就表明该地区是比平均密度还低的低密度地区,也许就是存在地壳的裂缝,抑或浅处存在岩浆库造成的缘故吧。根据地质学上的观察,第二地带裂缝最为集中,但是重力异常则集中于第一地带,查明该处裂缝比较少。这样做的观察(但不能说是充分的证据),启示我们重力异常是存在于地下浅处岩浆库引起的。

若是岩浆库的形状为具有平行于大洋中脊轴的水平方向的圆筒状,其重心存在于表示重力最小值地方的正下面的话,根据重力数据,就可算出圆柱体的中心存在于海洋底部地下大约1000米的地方。而且,假定岩浆库被熔化的玄武岩所充填,那么岩浆库的密度比周围岩石一立方厘米0.21克的密度还要小。在这种推测中,一般圆柱体的上端存在于海底以下大约600米的地方。假若岩浆库的岩浆和其周围岩石之间的密度差小,则岩浆本体就要大,而且达到靠近地壳表层的地方都是必要的。

根据地震结果来看,主要的岩浆库非常之大,而且似乎显示存在于更深的地方。如果根据地质学的理由,岩浆库的主要不变部分存在海底下2~6公里的地方,可能具有其深度2—3倍的宽度。根据重力数据,已搞清岩浆库本体的顶部存在有较小的、一时形成的即类似钟状构造的细长穹丘。那样的穹丘占据第一地带的全部,可能就是它把岩浆供给在该地带见到的熔岩流中的吧!

负重力异常的大小,相当于扩张轴下每深1米就缺少9000万公斤的质量。若是在扩张轴的地壳具有均衡—平衡(重力和浮力处于均衡状态)的话,那么在海底面的某一地方应当存在着深部缺少质量和为保持平衡的剩余质量。第一地带宽约一公里,同周围地区相比较,在地形上大致抬起20~30米左右。如果是那样,为了在扩张轴达到地壳均衡只需要该地带的抬起部分一米左右的高度。关于缺少质量,必定是由于远离扩张轴地方其他构造地形所起平衡作用来补偿,抑或是断层面磨擦引起仅浮力把中心区的块体往下拖所起的平衡作用,二者必居其一。

重力异常的测量也可以海底地形上部100米部分视密度来确定。沿洋隆顶部的视密度一般为每立方厘米2.6克。另一方面,根据在海底采集的90块岩石中求出的值为每立方厘米2.9克。这种差别显示出地形中存在有大致15%的空隙。

电 法 测 量

关于地壳岩石中存在有水的问题,能够根据水的电导率直接测知。为了在更深的地方探寻扩张轴地下的岩浆库,还可以利用电导率,那是因为岩浆比固体的玄武岩具有较高的电导率的缘故。为了达到这一目的,由斯克利布斯海洋研究所的考克斯(Charles S. Cox)发明了新的电法勘探技术。实验工作下了很大的功夫。因而获得了关于海水渗透到地壳中的情况,裂隙深度、岩浆库的水平方向等方面的许多情报。在那以前,这样的测量方法完全没有尝试过,有关测量海洋底部地壳电导率的技术也完全没有掌握。

带有正负两极的800米天线由斯克利布斯海洋研究所的研究船梅尔维尔号拖航逼近到大洋底的地方。天线传播电信到海洋和地壳中去,其所选择的频率数到海洋中立即被吸收,但是在地壳中却能透过很大的深度。而且,三个信号接受器被安放在中脊扩张轴附近的海底。在这项实验中,要把大而易损坏的天线拖航到临近海底的地方,因为是初次尝试,所以避开了第一地带那种锯齿状,地形电法勘探是在扩张轴西方10~15公里的地区,即30~40万年前的地区实施的。

电法勘探达到的深度大致是海底下8公里。从导电率图上看,距扩张轴地带中轴10~15公里地方的岩浆库的厚度小于200米。这一发现,表明更加提高了狭长轴部岩

浆库地震观测结果的可信度。由于在西安娜号上实施了观察,关于地壳中的活动断层,在距扩张轴10~12公里的地方较少。岩浆库的宽度恐怕就是控制中、高速扩张轴上面活动构造断层的宽度吧。电法实验的另一个发现就是接近海底表层的电导率比较低。这一事实表明海水渗透到地壳中的最大深度为2—4公里。

磁 性 反 转

其他一系列的潜水就是我们在略微偏离中脊轴部的地方,对显示最年轻磁性反转条纹的西北端实施了调查。因为人们认为,那种边界的几何学,对于沿扩张轴形成新的海洋地壳,可能给我们提示新的情报。自从瓦因马休斯(Vine-Matthews)所倡导的模式20年以来,究竟形成了什么样的条纹,尚不能充分理解。人们曾经一度广泛相信,伴随总的磁化强度反转的磁信号,只限于海洋地壳表层500米以内的范围。然而,根据到达地壳深部的深海钻探情况来看,在深处得到的结果同海面上观察测到的线状磁性条带并不相似,并查明具有各种不同极性和强度的磁化岩石很复杂地掺合在一起。

在这项研究的初期,我们总结用深海拖曳磁力仪(deep-towed magnetometer)进行初步观测,研制了磁化反转边界的三次方程数学模型。根据这种数学模型,我们计算出磁化反转边界为极近似于直线的一条狭窄地带,其宽度在1.4公里以下。但是,为了获得稳定的解释,需要筛选数据进行很好的讨论,而且我们在探讨过程中,曾经诧异地想过,是否能真正弄清楚磁化反转的边界。实际上,为了查明相互反转的磁化条纹在海底是怎样排列的,我们曾经在阿尔芬号上装置了灵敏度很高的磁力仪。这种装置能测量磁场的三个分量,还能测量磁场的垂向梯度。我们用横截磁化反转边界的5个地点的潜水,确定了250个以上玄武岩露头的清晰的磁化极性。磁性的测量结果是非常惊人的。通向离开磁化反转边界相当距离的横剖面线的各自磁化正反为正确的正反,亦即弄清了同用深海拖曳磁力仪探明的区域磁化条纹具有相同的正反。这种观察在边界新的一侧都未发现特别惊人的事实。因为正是被我们预料的,新的地壳,即磁化了的(具有与现在地球磁场方向同样磁化的地壳)浮载于老地壳,即负磁化了的(具有与现在地球磁场方向相反磁化的地壳)之上。惟独惊人的事实是,在比磁化反转更古老的一侧,完全没有出露新地壳的部分。

用阿尔芬号调查的磁化反转边界,同根据深海拖曳仪收集的数据用计算求出的边界位置相比较,自扩张轴向西北尚移动了约500米。由计算求出的边界就是在某种深度地壳剖面上磁化反转的平均位置。在海洋底地图上所表示的边界比计算求出的平均位置向西北移动500米的这一事实,说明新的玄武岩溢出到了具有负磁化的古老地壳之上。

不管是根据阿尔芬号取得的数据,还是以前测出的数据,都显示磁化条纹形成在非常狭窄的地带。由于断层的地壳延伸,即使考虑到磁场反转需要一定时间,那么形成地壳的地带,最大的宽度也只能是由500米到1000米左右。用阿尔芬号和西安娜号所完成的这一成果同有关第一地带宽度的地质学上的观察非常一致。第一地带的宽度在现在扩张轴400米到1200米的范围内。

因此,能够极为准确地确定现在和70万年以前的地壳形成的地点。那一地带至多为一公里的宽度。如果考虑到太平洋板块和北美北板水平方向的大小,其直径竟达数千公里,但是它们之间存在的扩张轴,却如此之狭窄,如此之稳定,这是非常令人惊奇的。

怎样才能把深海钻进岩心中观察到的复杂的磁化层序同很有次序排列的磁性条纹加以吻合呢?在海洋地壳中钻进500米以上而取得的岩心全部为大西洋海盆中的物质,在该处扩张速度较慢。如果进行统计研究,我们就会清楚在上述扩张速度迟缓的地方,宽度数千米较广阔的地壳形成带,产生磁化复杂地壳剖面的道理。扩张速度加快,使地壳形成地区更趋狭窄(如在东太平洋洋隆常见的条件),磁化条纹具有磁性均一的倾向,磁

化条纹的边界具有更为明显的倾向。

根据上述理由,就在大西洋形成新地壳的物理过程和在大西洋形成的物理过程而论,可以说具有很大的差异。为了解释主要的物理和化学过程,需要做特殊的现场观测的努力。在那个时候,人们乘坐的潜水艇仍然起主要的作用。我们研究当中的最有价值的成果之一,就是把海洋学中许多完全不同的领域综合起来了。

关于东太平洋洋隆热水喷出的发现 (附图说明)

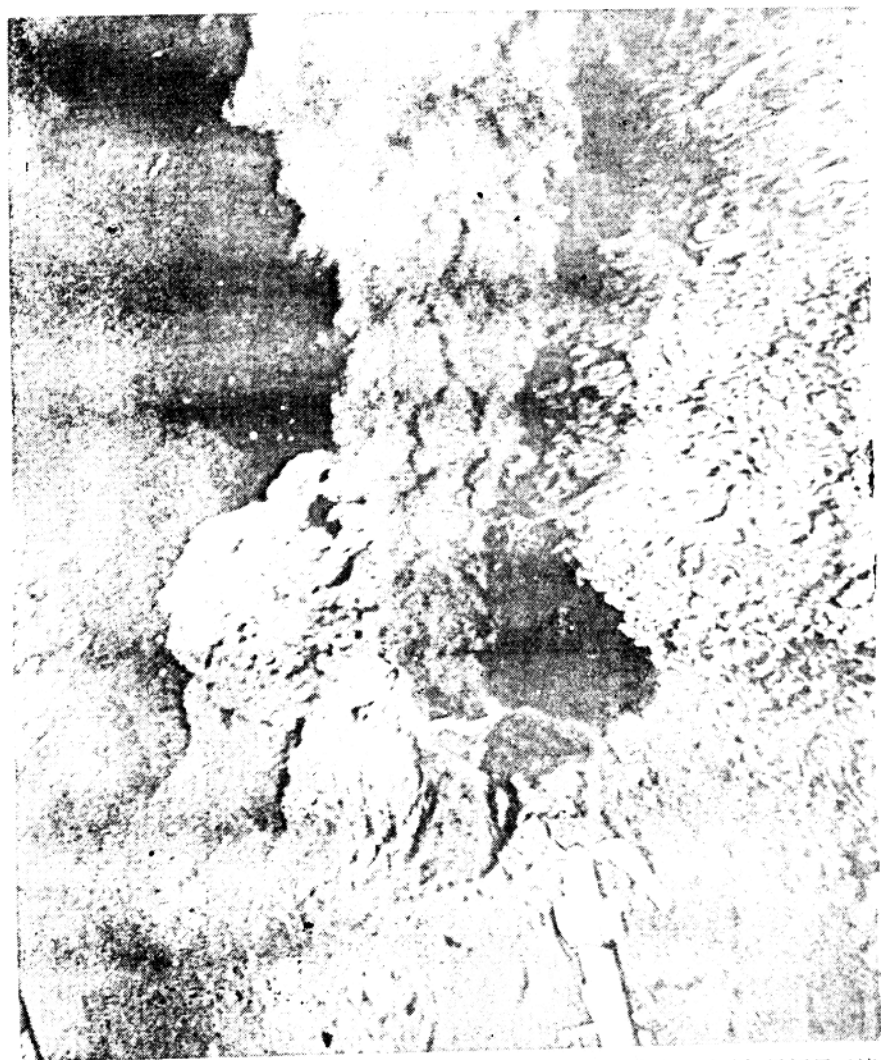


图1 被硫化物混浊成黑色的热水。被硫化物混浊成黑色的热水,是从加利福尼亚湾附近的东太平洋洋隆顶部的黑色烟囱中喷出的。这张照片是从研究用载人潜水艇阿尔芬号上拍摄的,其水深为2650米。照片下边见到的工具为潜水艇采样器具的一部分。东太平洋洋隆乃是地球的岩石圈(包括岩石地壳的层)的两个板块正在拉开的边界之一。在两个板块的边界上,冷海水向比较薄的地壳中渗入,在扩张轴的下面同熔化了了的岩石、涌上来的岩浆接触而变热。自喷出口涌出的热水温度达350℃。热水含有矿物质,为生物群的聚集提供营养。1979年在这一观测点上潜水调查的为本文作者二人同美国、法国、墨西哥组成的19人研究者团体。本照片系伍兹霍尔海洋研究所的Dudley Foster拍摄的。

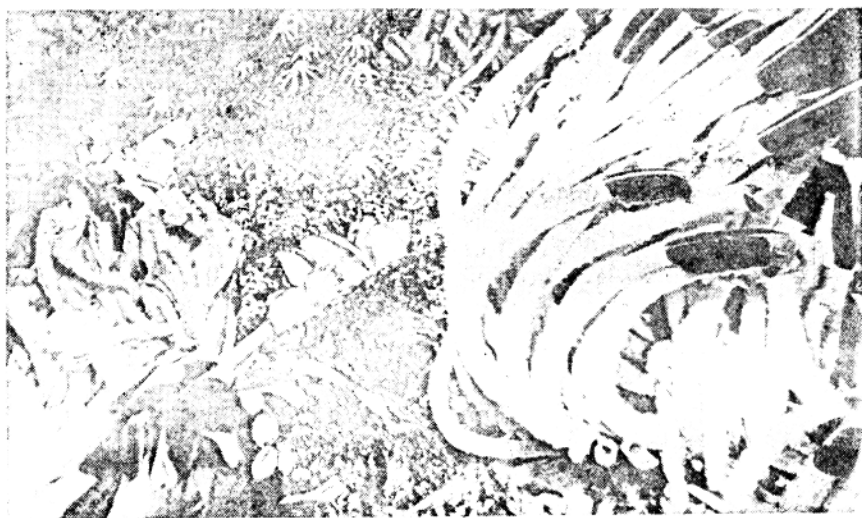


图2 **奇特的生物**。东太平洋洋隆上的热水喷出口周围栖息着变异了的生物。多数生物与两年前在加拉帕戈斯扩张轴探险中首次发现的生物相同。这张照片是从阿尔芬号潜水艇上拍摄的。以巨大的管状物作为巢穴的管状寄生虫 (tube worm) 的密集, 说明在不太热(20°C) 的热水流动中存在有动荡的地方。在该处热水并未被矿物混染成黑色。属于 Vestimentiferan 类的 Pogonophorans 动物的这种生物的特征是从白色保护管中伸出红色舌状突出物。作为其他生物见到的有瓣鳃类和白蟹。在食物链的底边存在有化学性细菌, 这种生物群集同太阳能无关。本照片的摄影为美国地质调查所的 William R. Normark 拍摄的。

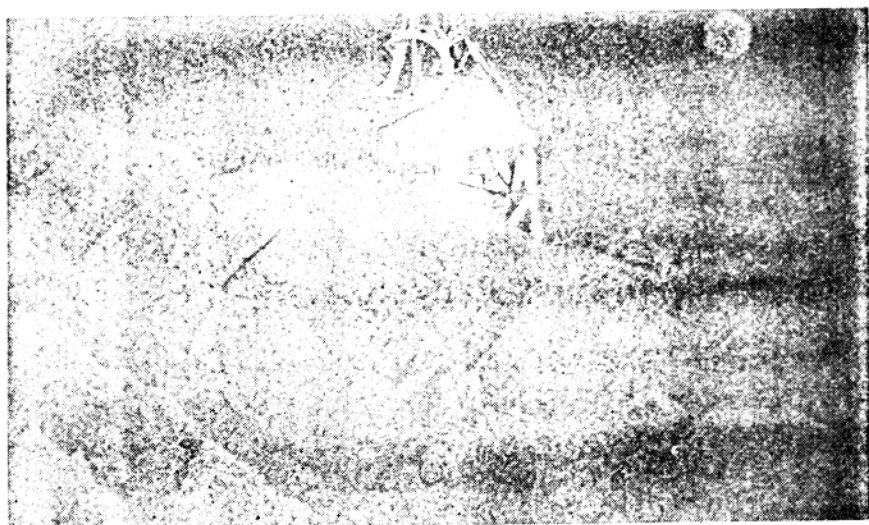


图3 **枕状熔岩**。热水喷出孔海底的大部分覆盖着枕状熔岩。枕状熔岩的形态是通过地壳裂隙发生的火山喷出而流溢出的熔岩急剧冷却形成的。在照片内可见到海底地震仪。照片摄影, 据斯克利布海洋研究所的 John A. Orcutt。

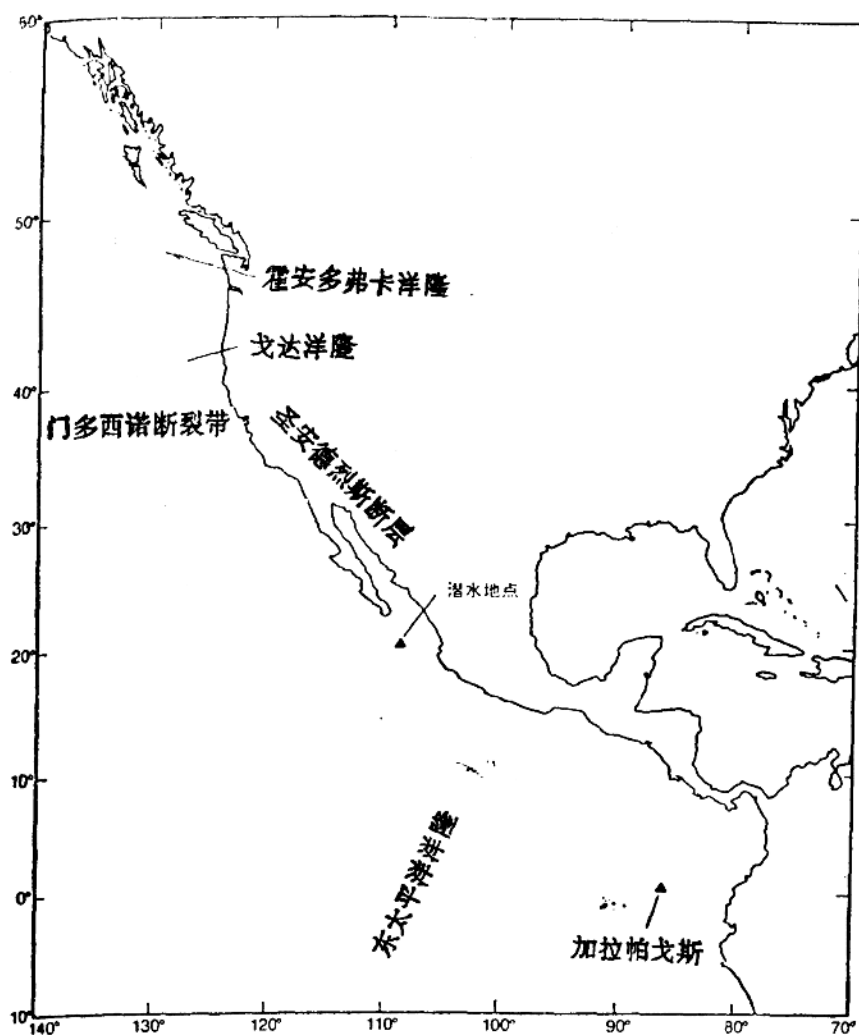


图4 调查地区。东太平洋洋隆在远离墨西哥西岸的洋面上构成太平洋板块和里贝拉板块（北美板块的部分断块）的界线。在该处选定了作为调查地区。黑三角形表示东太平洋洋隆计划和以前进行的远离秘鲁洋面的加拉帕戈斯扩张轴探查的潜水点。两个地点的海洋地壳每年约以6厘米的速度进行扩张。记入数字的线为海洋地壳的等年线，单位为百万年。这张略图是根据W.Pitman R.Larson E.Herron制作的图和美国地质学会出版的海图编制的。

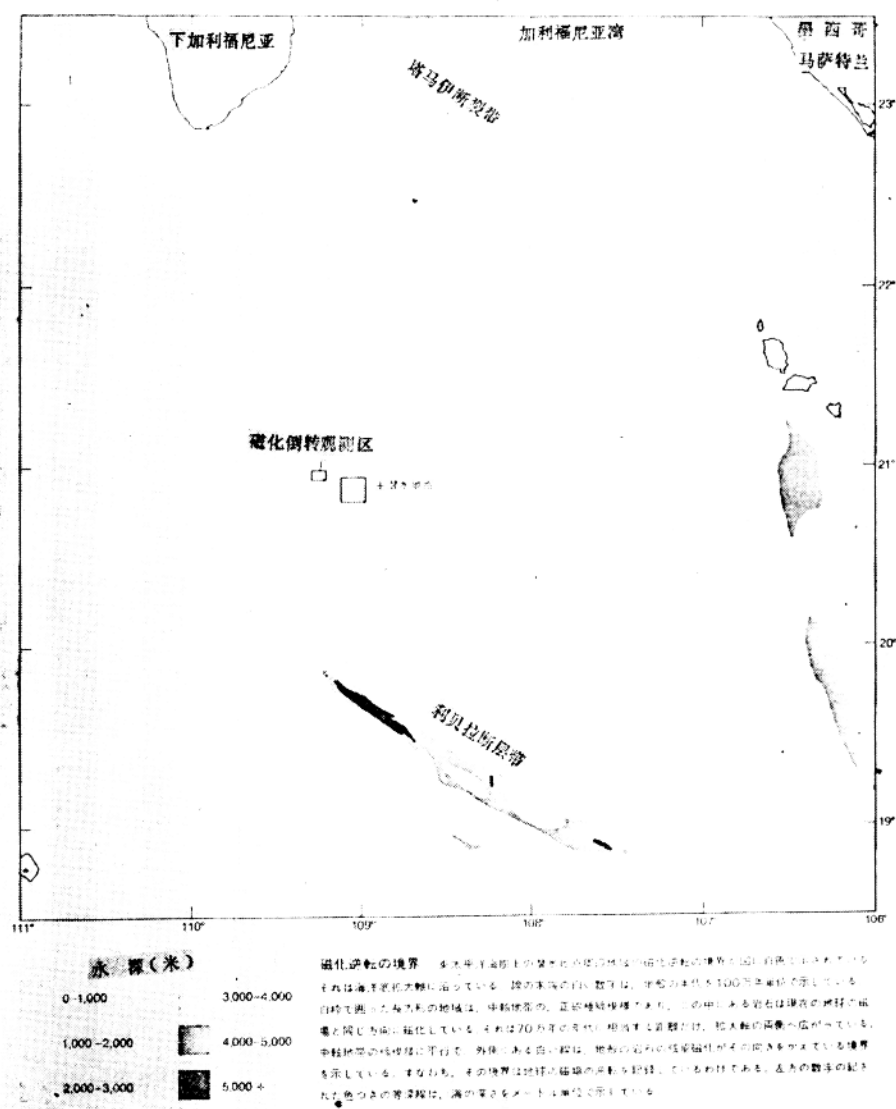


图5 磁化反转的边界。在图上用白色显示东太平洋洋隆上潜水地点周围地区磁化反转的边界。那一边界线沿洋底扩张轴而存在。线的末端的白色数字是以百万年为单位表示的地壳年代。用白框圈划的长方形地区为中轴地带的正磁的条带。其中存在的岩石同现代地球磁场为相同的方向的磁化。这些条带只限于相当70万年的年代间隔内向扩张轴的两侧扩张。平行于中轴地带条文的外侧白线表示地壳岩石剩余磁化反转其方向的边界线。换言之，其边界线就是记录地球磁场的反转。左方记入数字的着色等深线，系以米为单位表示的海深度。