

<http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>

地壳和地幔分界面*性质的评述

王若华

(中国地质科学院地质研究所)

直到本世纪初,人们才认识到地球有几个圈层。根据卅年代布伦(K. E. Bullen)的计算和划分,地球可以粗略地分为三个圈层。其最外部是地壳,最内是地核,两者之间是地幔。此三圈层之间各有一分界面。本文只论述地壳和地幔之间的分界面,以下简称“分界面”

一、研究“分界面”的现实意义

早在50年代末,拉甫林(J. F. Lovering)就曾提出“分界面”上温度的变化能引起地壳底部辉长岩与地幔上部榴辉岩之间的相互转变。在转变过程中伴随着体积的巨大改变,从而引起地壳的上升和下降⁽¹⁾。到七十年代初林伍德(A. E. Ringwood),又重申了拉甫林的论点⁽²⁾。这一假说对探索地震的起因开拓一广阔思路。

近年来据一些统计资料查明,在“分界面”深度突然变化的地段,往往是地表地震密集和地震活跃区。像我国华南地区“分界面”的深度约为30—35公里。川滇这一狭长地带两侧地壳厚度的变化分别为10—15公里、20—25公里。而在两个阶梯式突然变化的地段,在地表上正是地震频繁地段^{(1),(2)}。

这些统计资料,引起人们更大的兴趣来探讨“分界面”的性质。

二、“分界面”的发现

1909年10月8日巴尔干半岛的克罗地亚地区(Croatia)发生地震。52岁的南斯拉夫地震学家莫霍洛维奇(Andrija Mohorovicic)在距震中几百公里的天文台(距萨格拉布约40公里)处研究地震波曲线时,观察到两个P波(纵波)和两个S波(横波),而距震中200余公里以外的地方,最先到达的纵波跟靠近震中地方最先到达的纵波不同。还见到大陆地区纵波的进程时间(travel-time)³⁾为6.2公里/秒,横波的进程时间为3.6公里/秒,而当地震波到达一定

深度时(约50公里处),纵波、横波的进程时间分别骤增到8.1公里/秒和4.7公里/秒。经过多次观测,发现这个现象是全球的。他把这个现象解释成:地表以下有两个圈层,一个是地壳,地震波在其中进程时间较长;其下是地幔,地震波在地幔里的进程时间较短。至于两个纵波和两个横波的出现,则是地震波在地壳中传播,进入地幔时,发生折射的结果(MHP Bott 1971)⁽³⁾。

这个分隔地壳和地幔的分界面,被称作莫霍洛维奇不连续面或莫氏面(Moho),本文统称“分界面”。

三、“分界面”的性质

关于“分界面”的性质从廿年代以来一直在探索研究。因为“分界面”在地表下具有相当的深度,有关其性质,迄今还是根据各种参数推断的。随着科学技术的发展,大量数据的取得和积累,有关“分界面”性质的假说逐渐增多,主要归纳成三种:

1. “分界面”是岩相转变的界限说

持这种假说的人认为“分界面”是指地壳底部辉长岩和地幔上部榴辉岩互相转变的分界面,也是代表晶体结构变化的“分界面”,而不是化学成分变化的分界面。关于岩相变化的概念,林伍德认为最早是福默(L. L. Forster 1912)提出的。实际福默是根据地壳均衡说提出“超深成壳”(Infra-plutonic shell)的存在。所谓超深成壳系指在地壳相当深度内,有一

* 现多译为“莫霍洛维奇不连续面”,为明确易懂,故改此名。又按新数据,“分界面”实为有厚度的层,应称“分界层”但“面”使用已久,暂仍沿用。

1) 根据滕吉文同志(1978)

2) 航测队物探实验站所测数据与之略有出入,参阅图6。

3) travel-time, 较早有人译“走时”,后又有人译“传播时间”,朱夏同志译“进程时间”,本文从朱译。

高度石榴石化的圈壳。此超深成圈壳可以因为压力和温度的变化,转化成非石榴石的深成相⁽⁴⁾。我们可以看出,在福默的论文中既没有明确提出莫氏不连续面,也没有提近年来经常讨论的玄武岩—榴辉岩转变作用。尽管如此,相转变的概念,还是福默首先提出的。

以后约十年荷姆斯(A. Holmes, 1926)在《大陆构造》一文中提出“在某一不知有多深的地方,榴辉岩向深部逐渐转变成纯橄岩。这样的设想可跟地震的、岩石的和均衡假说的证据吻合”。次年他在《地球物理的若干问题》论文从大陆平衡的论点提出,地表下陷控制因素之一是“(岩石)相的转变”。例如岩浆的固结或者岩石低压相转变为高压相,引起体积上的差异和收缩,他也与福默一样,只提出了相转变的论点,并没有把相变与“分界面”的关系联系起来⁽⁵⁾。

1953年,莉斯(G. M. Lees)在《收缩的地球演化作用》一文中写道:“……把三十五公里深的、地震波进程时间达到8.1公里/秒的莫氏面解释成花岗质层转变成橄岩层,从而导出大陆均衡原理的假说。”他接着写道:“在那里(指“分界面”)不可能有这样类型的层状分布;而且人们所见到的挤压构造,不可能在这么薄的地壳内终止。对这种地震曲线的不连续,从地质证据上说,把它解释成具有更大密度和弹性特点的临界压力层上相变所引起的,是更容易使人接受的。地表见到挤压的同一型式的岩石壳虽然向下随深度的增加而加深其变质程度,应该延续数百公里,没有理由推测在化学成分上有重大的改变,即使在较深的地方……”他还不同意地壳里有“硅铝层”和“硅镁层”的分布,他确认地壳和地幔的分界面不可能是硅镁物质和化学成分不同的超硅镁物质之间的化学分界面⁽⁶⁾。

1956年博伊德等人(F. R. Boyd & J. L. England)在《高压下相的平衡》一文从霞石相变曲线,讨论了地幔上部物质有向更上部,即地壳的底部相变的可能性⁽⁷⁾。

1957年罗伯斯顿(E. C. Roberston)等人从实验室硬玉转变作用的稳定数据探讨“分界面”是玄武岩—榴辉岩转化作用引起的。可惜他们的实验并没有取得成果⁽⁸⁾。1976年林伍德和格林(D. H. Green)在引证他的论点时,误以为他已取得成果。

1958年拉甫林根据地球构造与假设的陨石所作对比,提出:“地球的上地幔有相当大的部分是由玄武岩成分的硅酸盐物质所组成。所以“分界面”不是把玄武岩质的地壳跟超基性岩质的上地幔物质分隔开的分界面,而是标出一分界的过渡圈壳。在此圈壳里玄

武质物质转变成高压下的榴辉岩为代表的榴辉岩类型”⁽¹⁾。

1959年肯尼迪(G. C. Kennedy)通过“分界面”下边岩石地震波速度和岩石的密度,设想该岩石比正常玄武质成分更富于铁和镁,所以称之为超硅镁质。他还对比了麦克唐纳(G. J. F. MacDonald, 1959)的榴辉岩和戴利(R. A. Daly, 1933)¹⁾的高原玄武岩,认为在化学成分上,两者几乎是同样的,而在矿物学方面则是显著不同的。榴辉岩不含长石而代之以硬玉质辉石和石榴石。榴辉岩的平均密度为3.3克/立方厘米而辉长岩的为2.95克/立方厘米。榴辉岩只产于高压下。在500℃温度下,压力小于10千巴时,玄武玻璃结晶成辉长岩,主要的矿物组分是长石。当压力大于10千巴时,其温度为500℃时,长石含量减少,最后,玄武玻璃直接结晶成主要由硬玉辉石组成的岩石。相的性质是用X—光鉴定的。这10千巴的压力,500℃的温度是近于大陆地区“分界面”的压力和温度的。所以他认为“分界面”代表的是相变“分界面”,而不是化学成分变化的分界面⁽⁹⁾。

2. “分界面”是化学界限假说

这种假说认为“分界面”以上岩石(即地壳)成分与其下(即地幔)岩石成分截然不同。一般认为地壳是玄武岩,地幔是榴辉岩。还有人认为地壳是蛇纹岩,地幔是橄岩(赫斯, H. H. Hess, 1955)也有人认为地壳是玄武岩,地幔是纯橄岩。

1951年亚当斯(L. H. Adams)在《地壳物质的弹性性质》一文中建议用硅铝层、硅镁层物质代表地壳的成分,超硅镁层物质代表地幔的最上部成分。他写道:“硅镁层可解释为岩石的化学成分中硅酸盐含量是中等程度的,相当于辉长岩成分,而硅铝层的硅酸盐含量较多,超硅镁层的硅酸盐含量较少”⁽¹⁰⁾。因此,地壳是由硅铝层和硅镁层物质所组成。最低限度,地幔的上部是由超硅镁岩石所组成。由此可以推论出:“分界面”是化学成分不同的两个圈层的界限。

1955年,赫斯在“大洋壳”一文中指出大洋壳里,“分界面”上面是玄武岩,下边是橄岩。他是根据大洋火山岩中有橄岩的包体和橄岩中地震波进程—时间近于8公里/秒,以及在“分界面”附近橄岩的密度估算为3.31克/立方厘米提出的。赫斯提出四个标准样品的密度为3.348克/立方厘米 ± 0.005 。这就近于戴利(1946)引用的室内温度和压力下,橄岩的密度是3.35克/立方厘米,而在1500℃和30千

1) Igneous Rocks and depth of the Earth

巴压力下,其密度是3.28克/立方厘米等数据估算出地表下40公里处,即相当于“分界面”的地方,橄榄岩的密度应该是3.31克/立方厘米。这样赫斯就设想“分界面”的下面是橄榄岩。这里他还论证了一些岩石,像榴辉岩或陨石也具有类似的地震波进程-时间(8公里/秒)。但是在大洋火山岩中却从没有榴辉岩或陨石的包体。同一文章,他又指出:“由于地球内部挥发组分渗透到地表,形成蛇纹岩,从而导出:海洋下面(分界面)是地壳的蛇纹岩,与地幔为橄榄岩的界限⁽¹¹⁾。”

1958年瓦格(L. R. Wager)在《地壳之下》一文中写道:“莫氏不连续面是玄武岩向橄榄岩或某些超基性岩的成分变化所引起的”。⁽¹²⁾他就明确地提出“分界面”是地壳和地幔间化学成分不同的界限。

1960年,哈里斯和罗韦勒(P. G. Harris & J. A. Rowell)从球粒陨石和地球成分的对比入手,又从地质观点讨论玄武岩与榴辉岩转变作用。他们的结论是:“地质证据表明上地幔是橄榄岩质的。虽然在地球内有榴辉岩的稳定性,但是没有证据证明“分界面”就是转变成榴辉岩的转变界限”换句话说,“分界面”是代表两种不同化学成分物质的界限。他们又接着写道:“把莫氏面解释成玄武岩质到超基性物质之间的分界,更容易解释在地质、地球物理和地球化学各方面的证据”。⁽¹³⁾

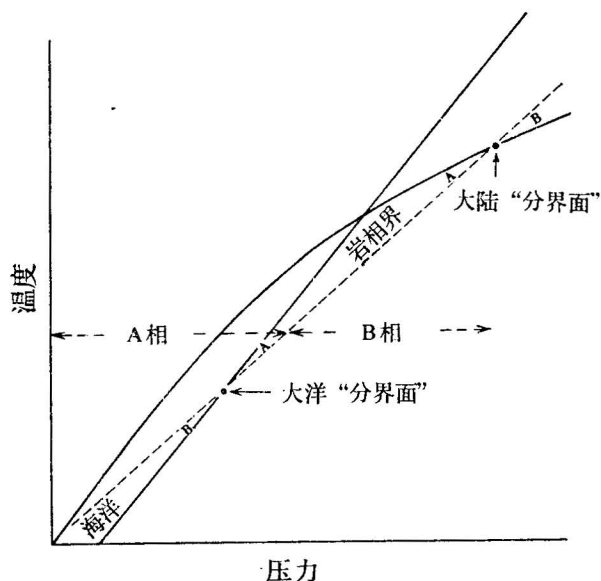


图1 海洋和大陆下面温度-深度曲线跟假设代表“分界面”的相界线的交叉。

图形的起伏表明在大洋下和大陆下面岩相的变化是反向延伸的。(根据 M H P Bott, 1971)

1961年,布拉德和格里格斯(E. C. Bullard & D. T. Griggs)在《莫氏不连续面的性质》一文中,从三个方面论证“分界面”不是岩相的过渡界面,而是化学成分不同的两介质间的界限。他们从三个方面论证:1.从稳定性上看,大陆地区和海洋地区莫氏面下边并不都是较重的物质;2.莫氏面深度的微小变化用热流不能解释。他们根据海洋顶部和大陆顶部的平均温度梯度是大致相同的,但海洋壳为被近于5公里深的水所覆盖,海洋壳与地幔“分界面”(约11公里)上某一点比大陆壳与地幔“分界面”上相同深度、相同压力的某一点要凉一些。而在大陆壳里由于放射性活动范围的高度集中,减少了地壳底部的温度梯度,就导致大陆壳“分界面”上某一点比海洋壳的“分界面”上、相同深度、或相同压力的某一点要凉一些。这样温度-深度的剖面线势必在某处介于两个莫氏面深度线之间交叉。如果大陆壳和海洋壳的“分界面”都是代表相的变化界面,那末,其中一个,例如沿大陆的温度-深度曲线向深部变化时,岩石是由致密的B相变成稀疏的A相。若沿海洋温度-深度曲线向深部变化时,则由稀疏的A相向致密的B相变化(图1)。在逻辑上,这是不可避免的结论,当然也是不可调和的矛盾。因此,或者说大陆壳下面的“分界面”与大洋壳下面的“分界面”性质有差别,或者说“分界面”不可能是相变界面。

他们的第二个论点的依据是“分界面”深度和温度与从热流值推算出来的数据不相同。这一论点到1964年为林伍德和格林的实验所证实(下面再详细讨论)。

他们的第三个论点是一个相变的“分界面”应该有一个深度范围,而不能是一个轮廓清晰的界面⁽¹⁴⁾。

1964年林伍德和格林对布拉德和格里格斯提出的第二论点,作了实验室的检验。很久以来,相变假说之所以得不到发展的主要原因是缺乏相转变作用性质的各种数据。林伍德和格林所取得的高压、高温下,玄武岩-榴辉岩转变过程中的实验数据,也就把布拉德和格里格斯的第二论点置于一个经得起考验的实验基础之上了。林伍德和格林探索了玄武岩与榴辉岩在1100℃时的转变作用,并明确了转变作用时温度和压力之间的依赖关系。以澳大利亚东、西两部热流值的不同作了对比研究:如澳大利亚东部大面积的平均热流约为1.9微卡/平方厘米/秒,约相当于西部前寒武纪地盾平均热流的两倍,后者的平均热流为1.0微卡/平方厘米/秒(图2)。这就暗示地表下,在30—40公里深处,东部

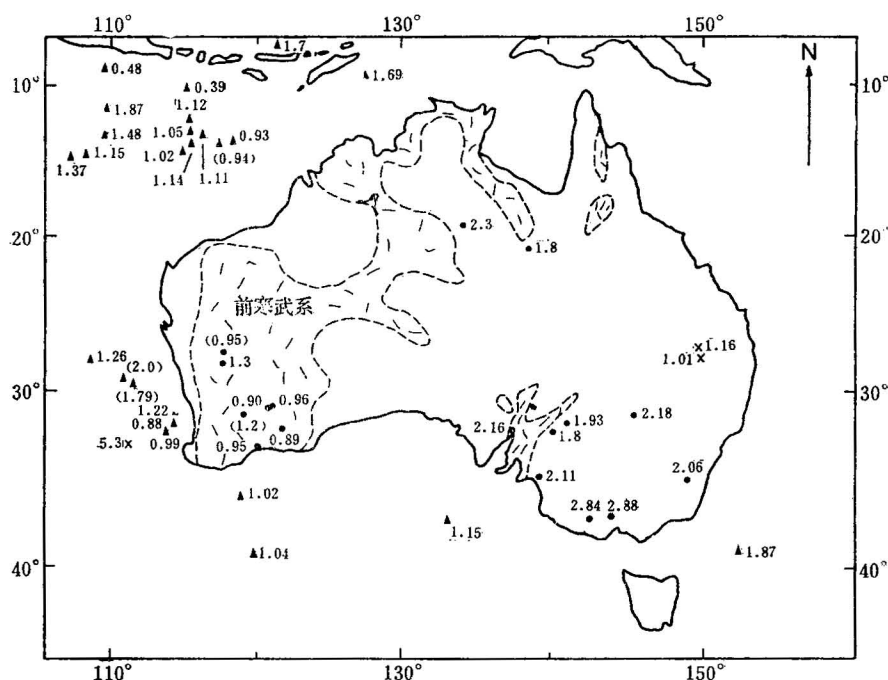


图 2 澳大利亚东部、西部的热流值
(根据 Lee & Uyeda 1955)

的温度至少高出 200°C ，假若澳大利亚下面地壳和地幔的“分界面”不是化学分界面而是相变界面的话，那么，从实验室确定的相变界面的压力-温度关系表明澳大利亚东部的“分界面”至少比西部的深 5 公里，也就是说东部的地壳要比西部的厚 5 公里。因为温度增高，过渡带的压力也增高。但是实际上澳大利亚东西两部地壳的厚度是近于相等的，当然谈不上相差 5 公里了。所以地壳和地幔的“分界面”不应是相变界面而是化学“分界面”^[15]。

1966 年林伍德和格林对玄武岩、榴辉岩的稳定场又作了进一步的实验观察（也就是从实验室的角度检验布拉德和格里格斯两人关于莫氏面性质论述的第二论点）。他们用各种成分的玄武岩在高温和高压下合成榴辉岩。在 1100°C 的温度下，转变作用发生的压力范围是 3—12 千巴，即相当于深度为 10—40 公里的“分界面”的温度和压力的状态。转变作用的温度和压力表明榴辉岩在整个大陆壳是稳定的。那么，地壳的玄武岩和辉长岩就必需是准稳定平衡。林伍德和格林的结论有 2：第一，在地壳里，近于正常的温度和压力状态下，榴辉岩是稳定堆积；第二，玄武岩向深部转变为榴辉岩的作用是发生于中等粒度的矿物堆积中，其范围深度可达 15 公里，这就与地震波记录的地

壳和地幔“分界面”为一轮廓清晰界面的证据不吻合。因之他们两人认为：无论海洋下面或大陆下面的“分界面”都不会是辉长岩和榴辉岩之间的相变界面。他们认为：地壳和地幔之间的“分界面”是化学界面。“分界面”之上是玄武质成分，其下是橄榄岩成分^[15]。

1971 年，布特 (Martin H P Bott) 根据林伍德和格林的实验数据提出：在大陆下面的“分界面”是地壳底部的酸性—中性麻粒岩与地幔顶部超基性岩之间的化学“分界面”。海洋下面的“分界面”是地幔顶部的富橄榄岩质物质与位于地壳底部其水解产物蛇纹岩之间的岩相分界面。简言之，大陆下面，“分界面”是化学成分的分界面，而海洋下面“分界面”则是化学成分相同的一种岩石转变成另一种岩石的相变界面^[16]。

1975 年林伍德重申 1966 年林伍德和格林对他们所作辉长岩—榴辉岩转变的实验研究的结果，他认为在稳定的大陆地区和深海盆地，地壳与地幔的“分界面”是地壳底部岩石和地幔顶部超镁铁质岩石（橄榄岩之间）的化学分界面，而不是辉长岩与榴辉岩之间岩相转变的分界面。对于活动地区下面的“分界面”性质则没有论及^[2]。

3. 两种“分界面”并存的假说

这种假说又可以分为两种论点。其一是认为“分界面”既有化学分界面，也有岩相转变的分界面。此论点以威利 (P. J. Wyllie) 为代表。

1963年，威利提出：“分界面”既有化学分界面，也有岩相转变的界面，两者是更叠出现的，并不互相排斥。他设想地壳的下面有两个不连续界面即：a) 全球性的介于地壳底部玄武质成分物质和上地幔顶部的长石质橄榄岩之间的化学分界面。b) 另一个不连续面（其深度取决于地热梯度）是个相变界面。这两个界面的任一个界面靠近地表时，都能被地震波所测出，当作了地壳和上地幔的分界面⁽¹⁷⁾。

1971年伊藤和肯尼迪 (K. Ito & G. C. Kennedy) 的《玄武岩—石榴石麻粒岩—榴辉岩转变试验》一文中也曾提出两个“分界面”的概念。他们写道：“拉斑玄武岩重结晶成石榴石麻粒岩，条件适宜时再结晶成石榴岩榴辉岩，实验中达到的温度范围是从 800°C 到岩相曲线”，因而得出两个不连续面。一个是相平衡的界线，另一个是波程 (rate-process) 边界。但是到 70 年代末期，他们对“分界面”的性质究竟是化学界面还是相变分界面仍没有作出明确论述，也是采取一种兼容并包的说法。他们写道：“我们的偏见，认为在世界上某些地方，莫氏面是明显的化学分界面。然而我们也强烈相信。在这个世界上，特别是在构造区域，莫氏面是一个相变面，它代表局部的玄武岩转变成石榴石麻粒岩或石榴石麻粒岩转成榴辉岩”⁽¹⁸⁾。

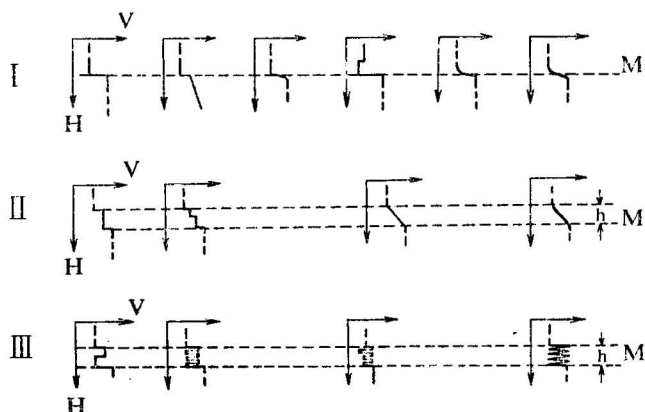


图 3 对地壳地幔“分界面”的认识的三个阶段的模式
(根据 Davydova 等人, 1972)

无论威利的论点或是伊藤和肯尼迪的论点都还是一种兼容并包的论点，也可以说是一种更谨慎的假说。但是这种假说，还没有引起更多人的关注，评述是较少的。

四、“分界面”有无厚度

地壳的下面是不是紧接着就是地幔？还是在地壳和地幔之间有一个过渡带？也就是说地壳和地幔之间的分界面不是一个理想的、没有厚度的曲面或平面，而是有一定的厚度的。

关于这个问题，许多人作了探讨。人们对“分界面”有无厚度的认识，可以大致分为三个阶段。截至 1660 年为止，人们认为“分界面”仅是地震波速度从 1.0 到 1.5 公里/秒的跳跃而已，图 3—I。到 1964 年以后，逐渐认识到从地壳到上地幔有一相当薄的分界面薄壳。此薄壳具有明显的速度梯度，地震波速度在此壳的上部和下部有微弱的跳跃，图 3—II。像奈克莫拉 (Y. Nakamura) 和豪威尔⁽¹⁹⁾ (B. F. Howell) 就对其厚度作了更详细的估计。他们从对折射光谱的分析推断在稳定地区“分界面”厚度不大于 0.5 公里。同年，林伍德和格林也推断过某些构造活动区下面，地壳和地幔之间没有一个明显的分界面，而是一个过渡区间 (图 4)。1976 年以后，更多人认为“分界面”里是由许多薄层构成有弹性性质更叠的转变带。图 3—III⁽²⁰⁾。由于地震波于其中进程时间不同亦可谓“分界面”是由许多低速层和高速层所组成。

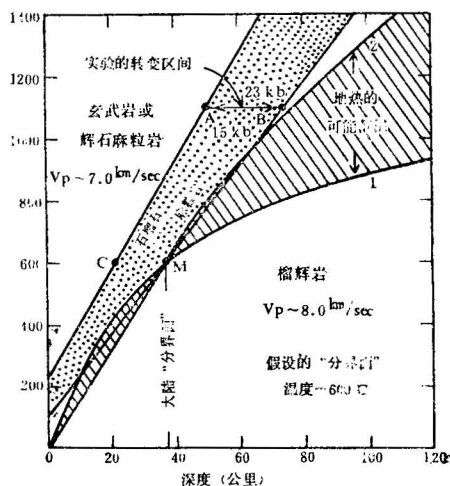


图 4 玄武岩、石榴石、麻粒岩和拉斑玄武岩成分的榴辉岩相变图
(根据 A. E. 林伍德和 D. H. 格林 1964)

根据这些较新数据，回顾1958年拉甫林和1961年布拉德和格里格斯的第三个论点所提出的“分界面”应该有一个过渡区间（圈壳）的论点是吻合的。

1975年，肯特（C. Kent, Condi）推算认为在海洋下面“分界面”的厚度约为0.1公里，而大陆稳定地区为0.5公里以上⁽²¹⁾。

五、“分界面”的温度

“分界面”的温度也是根据其他数据间接推断的。肯特认为海洋下面“分界面”的温度是150℃到200℃，而大陆下面“分界面”的温度是500℃—700℃⁽²¹⁾。

林伍德和格林根据他们的实验数据推算的“分界面”温度为600℃。

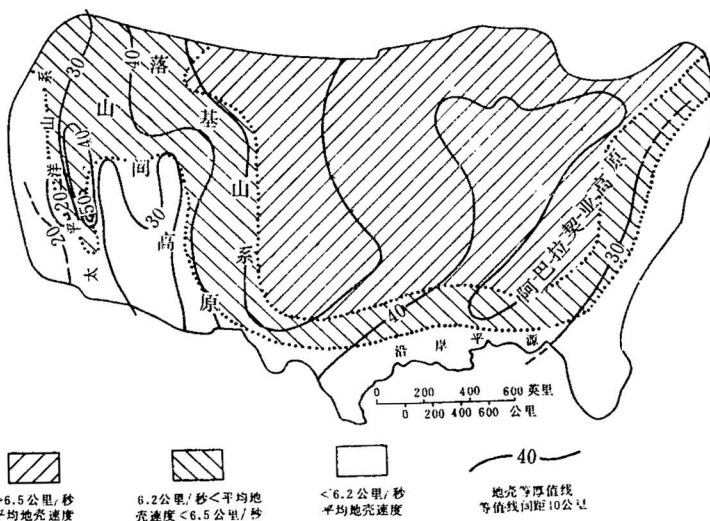
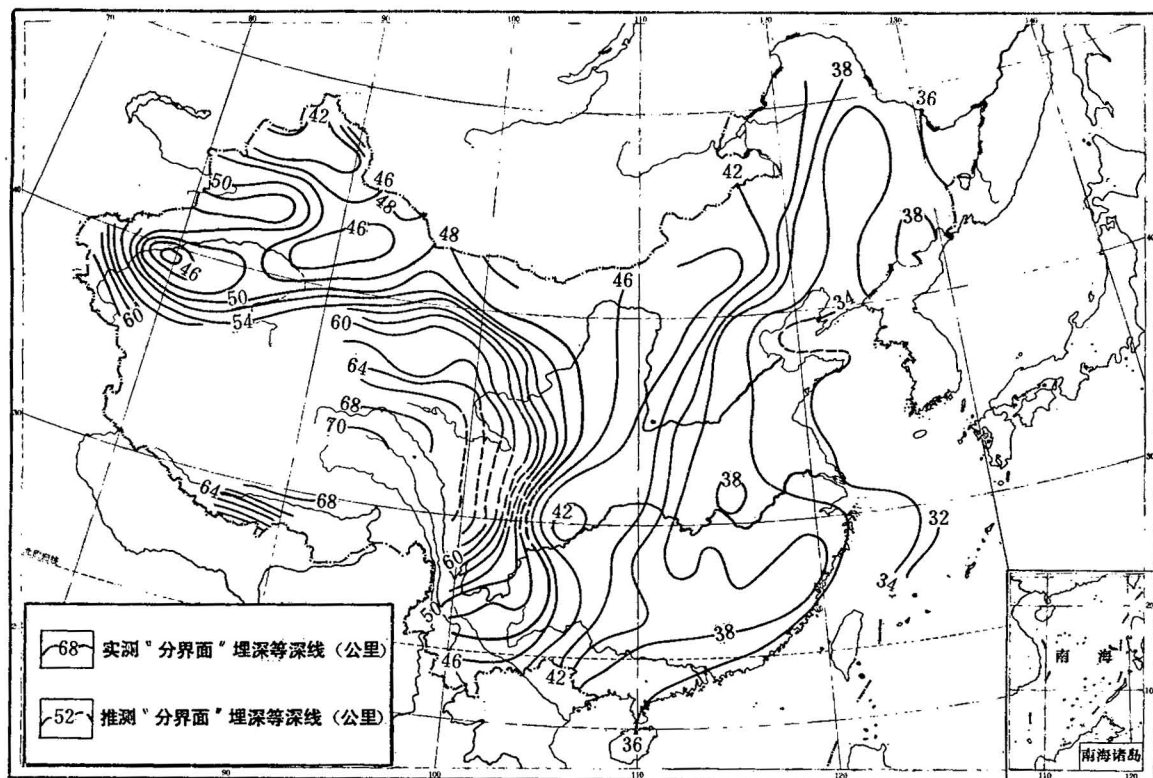


图5 美国“分界面”等深线示意图
美国平均地层厚度和地壳中部波平均速度
(根据 L. C. Pakiser and J. S. Steinhart, 1964)



根据航测队物探实验站图 (1978) 略加简化

图6 中国地壳地幔“分界面”等深线示意图

这些推断的数据, 还需要作更进一步的证实和校正, 到目前为止, 这还是一个莫衷一是的数据。

六、“分界面”的形态

地壳和地幔的分界面并不是一个光滑平坦的界面。许多国家已编制了“分界面”的等深线图, (图5^[22]、图6、图7)。

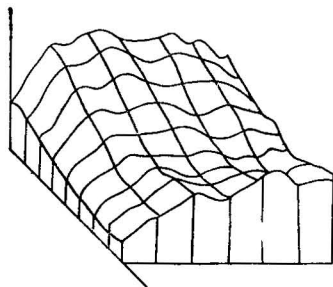


图7 “分界面”形态示意图
(根据 N. I. Davydova 1972
等人图略加简化)

总之地壳和地幔之间有一“分界面”, 它不是一个没有厚度、平坦光滑的理想的面, 而是一个具有厚度, 凹凸不平的圈壳。此圈壳又是由许多具有弹性的薄圈层构成的。有关“分界面”的性质有三种

假说: 较早的一种假说认为“分界面”是同化学的岩相转变面。一两年以后更多人趋向于化学成分不同的化学分界面假说, 这第二种假说有实验基础, 因而为更多人所支持。第三种假说又可分为两个观点, 一个是认为大陆稳定地区和深海盆地下面“分界面”是化学分界面, 而在活动地区分界面不明显, 很可能是相变界面。另一个是认为“分界面”既有化学分界面, 也有岩相变界面, 两个界面同时存在, 哪一个靠近地表时, 都会为地震波所测出, 当作了地壳和地幔的分界面。

参 考 文 献

- [1] Lovering, J. F., 1958, The nature of the Mohorovičić discontinuity, Trans. Am. Geophys. Union, vol. 39, No. 5, pp. 947—955.
- [2] Ringwood, A. E., 1975, Composition and Petrology of the Earth's Mantle, pp. 60, McGraw Hill Book Company, New York.
- [3] Bott, MHP, 1971, Interior of the Earth, pp. 9, London, Edward Arnold.
- [4] Fermor, L. L., 1914, The relationship of isostasy, earthquakes and volcanicity to the earth's infraplutonic shell. Geol. Magazine, vol. 51, pp. 65—67.
- [5] Holmes, A., 1927, Some problems of physical geology and the earth's thermal history. The Geological Magazine, vol. LXIV, pp. 253—278.
- [6] Lees, G.M., 1953, The evolution of a shrinking earth. Quart. J. Geol. Soc. London 109, pp. 217—257.
- [7] Boyd, F. R. and J. L. England., 1956, Phase equilibria at high pressure. Carnegie Inst. Wash. Yearbook 55, pp. 154—157.
- [8] Robertson, E. C., F. Birch, and G. J. F. MacDonald., 1957, Experimental determinations of jadeite stability relations to 25,000 bars, Am. J. Sci., 255, pp. 115—137.
- [9] Kennedy, G. C., 1959, The origin of continents, mountain ranges and ocean basins. Am. Scientist 47, pp. 491.
- [10] Adams, L. H., 1951, Elastic properties of materials of the earth's crust. "Internal constitution of the earth." (B. Gutenberg, ed.) 2nd ed. pp. 50—80. Dover, New York.
- [11] Hess, H. H., 1955, The oceanic crust. J. Marine Res., 14, pp. 423—439.
- [12] Wager, L.R., 1958, Beneath the earth's crust. Advance. of Sci., 15, pp. 31—45.
- [13] Harris, P. G. and J. A. Rowell., 1960, Some Geochemical aspect of the Mohorovičić discontinuity. J. Geophys. Res., 65, pp. 2443—2495.
- [14] Bullard, E. C. and D. T. Griggs., 1961, The nature of Mohorovičić discontinuity. Geophys. J. R. Astr. Soc., 6, pp. 118—123.
- [15] Ringwood, A. E. and D. H. Green., 1964, Experimental investigations bearing on the nature of the Mohorovičić discontinuity. Nature, London, 201, pp. 566—567.
- [16] Ringwood, A. E., 1966, An experimental investigation of the gabbro-eclogite transformation and some geophysical implications. Tectonophysics, 3, pp. 383.
- [17] Wyllie, P. J., 1963, The nature of the Mohorovičić discontinuity. A compromise, J. Geophys. Res., 68, pp. 4611.
- [18] Keisuke Ito and G. C. Kennedy., 1971, An experimental study of the basalt-garnet granulite eclogite transition. In: "The structure and physical properties of the earth's crust, pp. 303—314, Am. Geophys. Union, Geophys. Monograph, 14.
- [19] Nakamura, Y. and B. F. Howell., 1964, Marine seismic experiment: Frequency spectra of refracted arrivals and the nature of the Mohorovičić discontinuity. Bull. Seismol. Soc. Am. 54, pp. 9—18.
- [20] Dovydova, N. I. et al., 1972, Models of the earth's crust and M-boundary. Zeitschrift für Geophysik, Band 38, Seite 369—393, Physica-Verlag, Würzburg.
- [21] Kent C. Condie., 1976, Plate tectonics and crustal evolution. pp. 23, New York Pergamon.
- [22] Pakiser, L. C. and J. S. Steinhart., 1964, Explosion seismology in the Western hemisphere, in Research in Geophysics, edited by High Odishaw, Vol. 2, chapter 5, MIT Press, Cambridge, 1964.