

被动大陆边缘地质

马文璞

(北京大学地质学系)

大陆边缘代表地壳的基本不连续,大陆壳在这里与大洋壳相邻接,是研究大洋与大陆相互作用的关键场所。这里含有大陆形成过程的线索,因为越来越多的事实已证明,大多数山系是作为大陆边缘开始自己的历史的。被动大陆边缘(Passive continental margins)亦称大西洋型大陆边缘,是三种大陆边缘基本类型之一,是在拉张应力场下地壳减薄,大幅度沉陷的产物。以生成巨厚的沉积聚集为特征,岩浆活动弱,基本上不变形,与主动大陆边缘适成对照。粗略的估算表明,全世界新于两亿年的沉积岩体积中,一半以上是联合古陆(Pangea)自早中生代破裂以来在大西洋型边缘上堆积下来的。从而这些岩石就提供了相应大洋与毗邻大陆构造和演化的独一无二的连续的记录。由于含有主要的油气资源,各种研究手段的投入更加速了这一领域资料的积累。本文拟根据八十年代以来发表的一些新成果对稳定大陆边缘的形态、结构、演化及古代边缘的鉴别作一简要介绍。

形态与结构

北美东侧的大西洋是约一亿八千万年前拉开的,正在发育中的现代稳定大陆边缘,由于寻找油气资源的需要,七十年代以来投入了大量的地球物理和钻探工作,研究程度很高,可作为典型实例。

美国东海岸外大西洋中存在着一系列的长条形盆地,单个盆地长超过350km,宽度在50km以上,总的位于大陆架外侧至陆坡上部,长轴与岸线一致(图1)^[1]。这些盆地以名为东海岸磁异常的正磁异常条带为外界,里面堆积了厚度7~12km的未变形、大致水平的侏罗系到第三系堆积。各地层界面在多通道反射地震剖面上可以识别出来并加以追踪,配合磁、重力测量及钻孔取样,最后得出如图2所示的构造。

图2是北美大西洋边缘中从大陆到大洋壳最窄和最简单的过渡带——卡罗来纳坳槽的地质和地壳结构解释剖面。与一般的盆地形态不一样,反射地震剖面揭示出来的为一向海加厚、覆盖在一明显不整合上的沉积楔状体,厚达12km,似水平状产出,未遭受构造变动。楔状体前缘为巨厚的珊瑚礁体,外侧就止于标志着大陆与大洋壳界线的东海岸高磁异常带前。楔状体内的中生界为浅水相和陆相,礁体外侧迅速过渡成深海沉积。不整合面以下是变质基底和地堑型三叠系陆相粗碎屑堆积,里面含有富碱基性火山岩,厚度可达5~6km,已变形。

沿反射地震剖面计算出来的重力模型表明,地壳厚度在大陆边缘有急剧的变化,可据



图 1 美国东海岸沿大陆边缘分布的盆地
Fig.1. Basins distributed along the continental margins on the eastern coasts of the U.S.A.

早中生代地槽型陆相盆地自西向东由裸露地表逐渐为海岸平原及海水所覆盖。海相盆地自北向南依次为乔治滩盆地、巴尔的摩峡谷海槽、卡罗来纳海槽和布莱克高原盆地。
(据Grow J.A., 1981, 有修改)

沿USGS32线横穿卡罗来纳海槽的地壳剖面解释

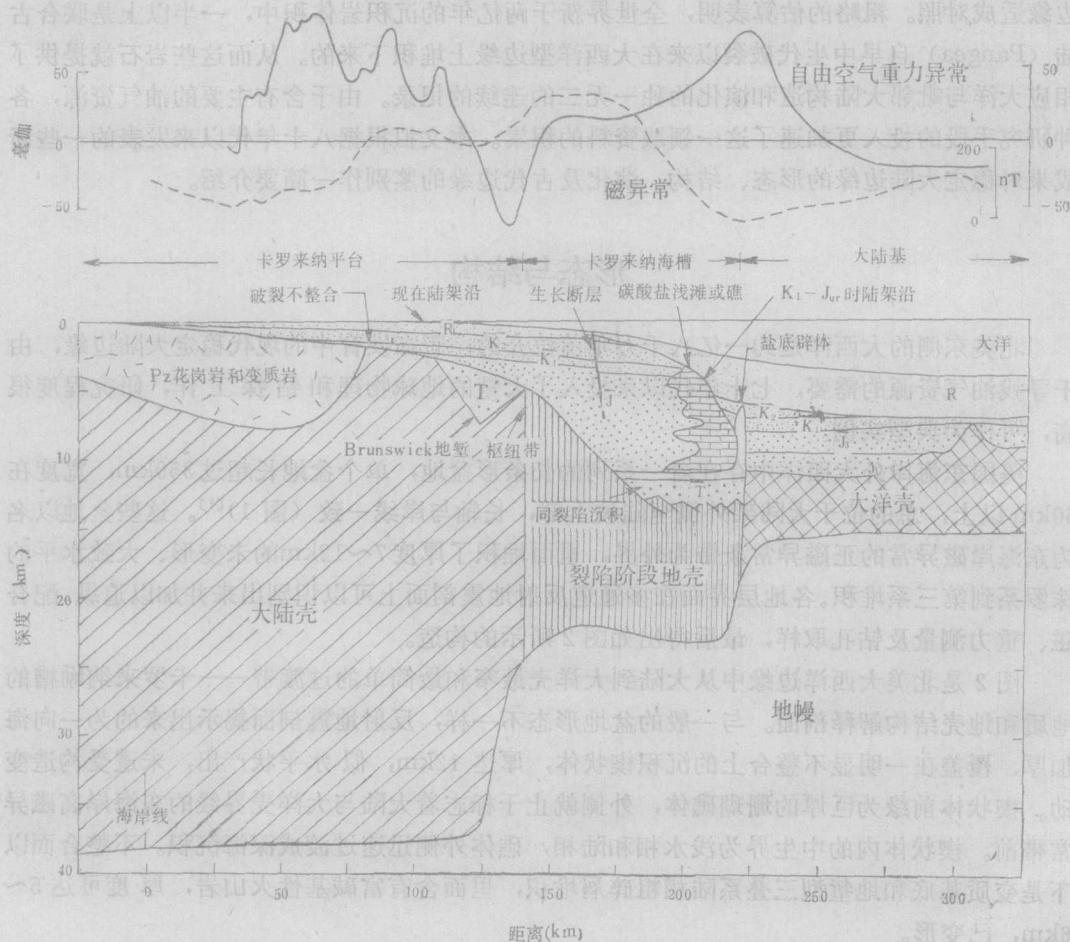


图 2 横穿卡罗来纳海槽的地壳剖面解释 (据Grow, J. A. 1981)
Fig. 2. Interpretation of the crust section transecting the Carolina trough.

枢纽带和东海岸磁异常带分成三段: 枢纽带向大陆一侧地壳厚度大于 35km, 为相对正常的大陆壳; 东海岸磁异常带向大洋一侧地壳厚度等于或小于 15km, 为相对正常的大洋壳; 两者之间莫霍面深度 20~25km, 称之为“裂陷阶段地壳”, 代表北美与非洲之间海底扩展开始以前拉伸裂陷与岩浆侵入联合作用的产物, 为一厚度大大减薄、被改造了的过渡性地壳。巨厚的沉积楔状体就选加在它上面。

如上所述, 下述要素对于识别一个被动大陆边缘的空间部位和恢复它的演化历史是非常重要的。

在剖面上, 一个被动大陆边缘的沉积记录由两部分组成, 中间为不整合所隔开。下部称裂陷系 (Rifting sequence)^[2], 是一套含火山物质的陆相粗碎屑堆积, 多位于半地堑、即箕状盆地中。由于地堑群的阻隔效应, 向洋一侧有些远离陆源物质补给的下陷盆地就会淀积膏盐等蒸发岩建造。裂陷系是地壳遭受拉伸、断陷但还未断开阶段的产物。上部称移离系 (Drifting sequence), 为巨厚的海相沉积楔状体, 岩性受当时的大陆形态和气候控制, 可以是碳酸盐, 如巴哈马台地; 也可以是碎屑岩, 如尼日尔三角洲; 但都以扩积层系为最大的特点, 即由于物质来源丰富所造成的超补偿状态, 一方面海岸线不断向内陆侵袭、超复; 另一方面浅水沉积体又不断向大洋中心方向进占, 可以从海岸平原、大陆架、大陆坡一直推进与大洋壳的交界处, 距离超过 150km。W. Dickinson 称之为大陆提岸^[3]。中间的不整合称为破裂不整合 (breakup unconformity), 其年代就代表大陆壳被断开, 新的洋底在其间生成, 两侧大陆开始移离的时间。

空间上裂陷只发生在枢纽带与前沿之间的异常过渡性地壳部分, 相当于移离系盆地所处部位。枢纽带和异常地壳外界在现代地球物理场上分别表现为磁异常的低点和峰值 (图 2), 在地质记录中, 异常地壳与大洋壳的交界处往往以一系列盐丘底辟体顺磁异常的峰脊分布为标志, 一般认为是由于裂陷系中的盐类堆积受侧向挤压, 遇到大洋壳前沿后上升生成的。枢纽带是相对未伸展的正常大陆壳与广泛减薄、受热地壳之间的力学和热力学界面, 沉积盆地底盘坡度的一个转折点。平面上与大陆侵蚀/堆积线相平行, 剖面上往往靠近大陆架前沿, 但两者并不总是一致。在地质记录中, 移离系地层厚度的最大梯度带往往标示着古枢纽带的位置^[4]。在古被动大陆边缘的再造中把它识别出来具有重要的意义。

演 化

世界各地古地理研究中长期存在的一个问题是有些碎屑岩地层是源自海岸外目前是大洋的地区。苏格兰西北就是一个例子。那里岩性酷似北美洲相应层位的早寒武纪石英砂岩, 根据详细的古地理再造, 证明系来自西北方向。可是那里现在却是浩瀚的大西洋! 那些位于现代大陆边缘外面的高地是如何消失的? 海拔高度的变化在这里并不是唯一、更不是主要的问题, 主要的是地壳结构和厚度的改变, 原来的大陆壳已为大洋壳所代替。

上述北美东侧被动大陆边缘厚达 12km 的侏罗纪至第三纪沉积几乎全由砂岩和页岩组成, 含有煤和褐煤, 生物地层研究也表明它们全部是在浅海和陆相条件下生成。说明那里的地壳曾经发生过大幅度的沉陷, 而且沉积加载并不是沉陷的主要原因。破裂不整合以下的三叠系半地堑型盆地由内陆向外, 由裸露地表到为海岸平原覆盖, 最后深埋在巨厚海相

移离系下面也说明了同样的问题。沉积盆地所在地区下伏的地壳结构表明, 这个沉陷在成因上与深部地壳的拉伸、减薄密切相关, 在时间上两者则是前后相继的。

为了解释这些现象, 近三十年来已提出了不只一种假说。早期的如别洛乌索夫的大洋化, J. Gilluly 的壳下侵蚀等假说由于未受到实践证实而未获得多数人的支持。七十年代提出了沉陷是由于地壳减薄作用导致的热收缩假说, 这种减薄可以通过隆起和地面侵蚀

(Sleep, 1971)^[5], 可以通过地壳的拉伸与颈化 (Mckenzie, 1978)^[6], 也可以来自普遍的岩墙侵入 (Royden, 1980)^[7]。而所有这些都与下伏异常地幔的上涌有关。这一假说目前受到了普遍的接受, 因为它符合被动大陆边缘地质演化历史的实际, 也与根据移离系的厚度资料所得出的构造拗陷曲线理论模式一致。

A. B. Watts 等人自七十年代后期开始发展并逐步完善了一种称之为逐层回溯 (backstripping) 的方法来处理沉积地层的厚度资料^[8]。他们把地层的实测剖面厚度先按不同具体岩性, 加上孔隙度以把它们回复到石化前原始堆积时的体积与密度 (这时的厚度显然要大于实测剖面厚度)。然后从中扣除掉由于沉积加载及水深变化、海面升降等因素所附加产生的厚度值。最后得出纯构造拗陷值。整个过程完全由计算机操作。经过这样处理所得出的被动大陆边缘移离系的累积拗陷曲线成指数曲线形式 (图3), 即初始沉陷非常快, 然后逐渐变慢。这与受热岩石圈的冷却理论模式一致。这一方法在理论上的最大意义还在于它提供了一条恢复大陆拉张历史的

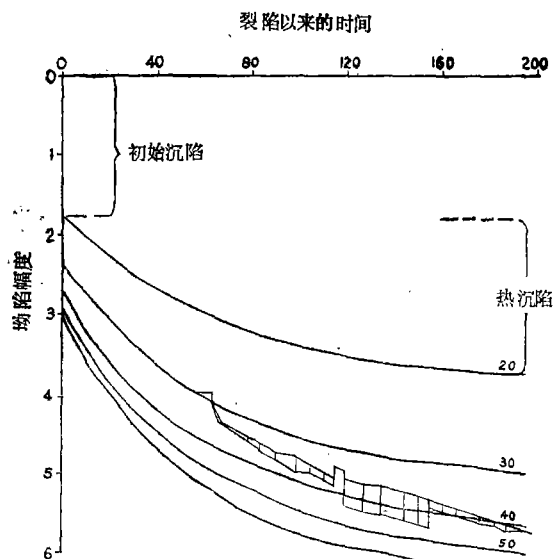


图3 巴尔的摩峡谷海槽中COST-2钻孔资料用逐层回溯方法得出的构造拗陷曲线 (图中直纬花纹部分)

Fig. 3. Curves of structural depressions in the Baltimore trough valley gained by use of the method of layer-by-layer retracing of the data of COST-2 hole.

把它放在Mckenzie理论曲线形态最相似的部分 (在本图中位于伸展率 $\beta = 3.0$ 和 4.0 的部分), 说明剖面所在部位的大陆壳拉伸了200—300%。 (据A. B. Watts, 1981)

新的途径: 大陆壳断开的应在外推曲线至时间等于零处。

归纳大多数的看法, 大西洋型大陆边缘的演化总的可划分成三个阶段:

(一) 裂陷

异常地幔形成并上涌, 使地温梯度变陡, 深处的局部熔融进一步降低了岩石圈的密度, 使之受热上拱。这种初始上拱意味着地表的区域抬升, 遭受侵蚀, 从而消灭掉原有盆地残迹, 如果它曾经存在过的话。早中生代时的华北东部可能就是这种情况, 晋陕地区巨厚的三叠系红层到那里为含大量火山物质的双泉组小粗砾质杏面口组^[9]局部堆积所代替, 反映了当时广泛的区域上隆^[10]。热拱曲期间生成的富碱基性火山岩沿张裂带走向呈串珠状分布, 集中在横宽数百公里的宽阔穹状隆起顶部^[11]。拱起区域的进一步伸展才在

地表形成复杂的地堑和半地堑系,里面堆积了来自毗邻高地的扇砾岩、洪泛平原和湖相沉积,在有利条件下也会形成膏盐盆地。

(二) 移离开始

裂陷的最高峰以大洋中脊的出现为标志。来自地幔的熔岩沿裂隙上升,铺设了新出现的海底,并最终建造起了正常厚度的大洋壳。大洋壳在缺口中的出现表明大陆岩石圈最终断开,并随着海底扩展作用而向两侧移离。移离开始的时间相当于毗邻大陆的最老大洋壳的年龄,在地质剖面中则由破裂不整合的年龄所代表。

大洋中脊是上涌地幔离地表的最近出口处,那里的热流值也最高。热流的向上和侧向传导使得横过刚刚断开的大陆尾缘的温差也最大,并导致边缘形成热隆起。理论计算表明,隆起在裂陷开始4百万年后出现,在16百万年后到最高点,隆起幅度可达500m,64百万年以后才逐渐消失。由于油气资源的生成除生油和储油条件外,还需要考虑成油条件,Pusey(1973)提出^[12],液相或油相形成在1~5km深度75°~150℃之间的条件下(取决于热梯度)。根据这个指标,裂陷开始后几百万年到40百万年期间生成的沉积物,其温度对于生成石油都是合适的^[8]。这就为寻找勘探目的层从理论上提出了新的标准。

(三) 主移离阶段

大陆岩石圈从扩展中心的外移意味着逐渐远离高热流中心而不断冷却、沉陷,导致巨厚的沉积在其上生成。其沉陷速度又是从移离作用开始成指数式地衰减。典型情况下由于补给条件良好,盆地范围可一直向洋侧推进,迫使其前缘的珊瑚礁不断向外生长,并最终被碎屑沉积所埋葬。由于岩石圈的挠曲刚度随着不断冷却而增大,后期地层可以更向内陆方向超复。

由裂陷到移离的转化可以很快,如大西洋,也可以经历很长时间,甚至夭折,如东非裂谷和莱茵地堑。红海是初始移离阶段的现代典型实例,那里最近24百万年期间的扩展速度为0.9cm/a,盆地轴部已出现大洋壳。加尼福尼亚湾在过去4百万年期间才出现一个轴向盆地,那里的两个相距10km的深海钻孔一个底部为花岗岩基底,代表变薄了的大陆壳,另一个则为大洋玄武岩,可见从大陆到大洋的急剧过渡(Hsu, 1982)^[13]。

古被动大陆边缘的识别

上述现代大陆边缘由于主体部分位于海面以下,研究主要是依靠地球物理等间接手段。对于已石化了的古大陆边缘来说,地貌及大部分当时的地球物理场已经消失,鉴别必须主要依靠地质手段。现以中大西洋早中生代古被动大陆边缘为例来加以说明。

图4是早中生代时中大西洋张开以前的再造^[14],北美和非洲西北部还紧挨着。已查明有三十个以上的岸上和滨外盆地沿两侧分布。盆地类型与所处的空间部位,即接近板块边界的程度有关。早期还有广泛的火山活动。按演化顺序,一个古稳定大陆边缘应含有下述三个方面的地质产物。

一、同裂陷火成活动

大量资料表明,被动大陆边缘的拉伸和“颈化”过程是在岩浆活动的参予下进行的,表现为岩墙群的贯入和地面火山喷发。岩浆来自上涌的异常地幔,所以成因是幔源的。岩石化学上主要属拉斑玄武岩系,但富碱。也有碱性玄武岩,其中的钾含量可高达10%。火山活动的时间通常出现在大陆破裂以前20~50百万年前^[15]。

由于化石贫乏,特别是缺少海相生物化石,这些孤立的早中生代陆相红层盆地之间的对比曾被认为是个困难的问题。但是对大西洋两侧火山岩的研究却表明,它们的演化具有

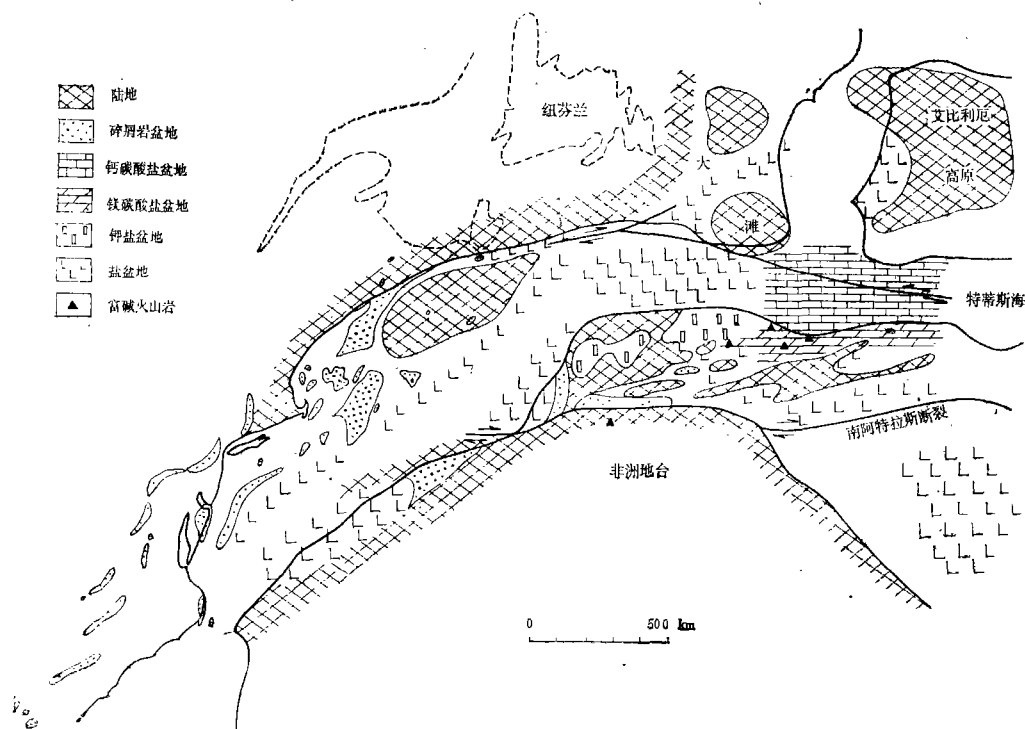


图4 早中生代北美与非洲移离前的再造 (据W. Manspeizer, 1981)

Fig. 4. Reconstruction of the early Mesozoic North America and Africa prior to their separation and drift.

广泛的一致性。如北美一侧的拉斑玄武岩有四种主要类型,由老到新分别是标准杆栏石型、标准高 TiO_2 石英型、标准低 TiO_2 石英型和标准高 Fe_2O_3 石英型。这个顺序在整个阿帕拉阡山各盆地中都是一致的,可以根据一个盆地中的情况预测下一个盆地的。北非最老的火山岩是富钾碱性玄武岩,同位素年龄211百万年,上面立即为含拉丁阶Anoplophora动物群的地层所覆盖,仅见于摩洛哥,北美未见到。向上,标准杆栏石和石英拉斑玄武岩,196百万年,位于含中卡尼克阶Minutosaccus—Patinosporites组合的粗碎屑堆积之上。最年轻的层位为下碱性石英拉斑玄武岩,186百万年,与蒸发岩互层。可以看出,总的顺序与北

美是一致的。火山活动的上述时间——地层对北强烈说明地壳裂陷期间广阔地域上构造活动的一致性。

Martin在1972年^[16]分出了一类代表拉张产物的非造山火山岩组合,主要是拉斑质或碱性杆栏玄武岩,常含有流纹质、粗面质或响岩质的分异物或侵入体。它的最大特点在于缺乏中性组份岩石,在按 SiO_2 含量标示的频率直方图上成双峰值分布。Зоненшайн 1976年把这一组合称为双模式岩系(bimodel Series)^[17],提出除上述岩性组合外,还以低的 $^{86}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值:0.7028~0.7064为特征,是裂谷成因产物。

二、裂陷系的相序列

地壳在裂陷阶段产生的地堑、半地堑盆地按填充物质总的可分两类,一类为粗碎屑堆积,空间上位于近大陆一侧;一类为碳酸盐—蒸发岩盆地,总的位于远离大陆一侧。

碎屑岩盆地平面上长条状,长100~200km,走向与大陆边缘一致,横剖面强烈不对称,一侧为同沉积断层(生长断层)所围限,即通称的箕状盆地,里面填充陆相粗碎屑红层夹火山岩,厚度可达5~6km。由于裂陷以前热隆起阶段的侵蚀,往往不整合在下伏老得多的基底之上。典型情况下可区分出三种相带(图5);边界断层相,位于盆地近断裂一侧,以红褐色粗砾质冲积扇砾岩为主,向中心出现暗色深水湖相粉砂岩和页岩的夹层。

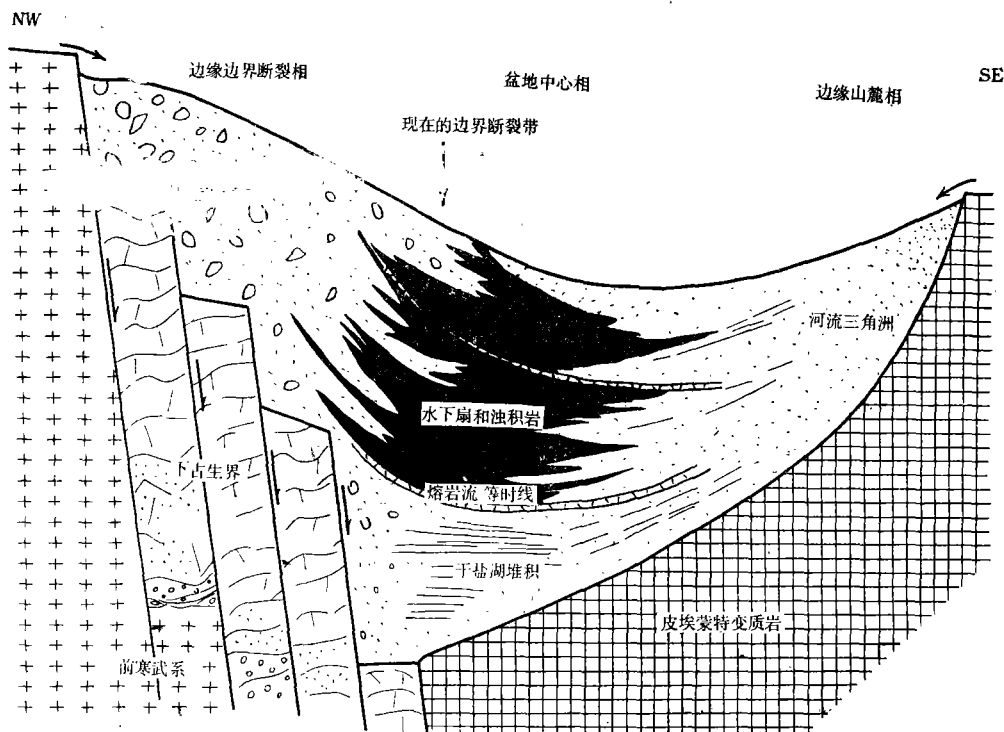


图5 半地堑型裂陷系的相分布

Fig.5. Distribution of the facies in the rift system of semigraben type.

由于同沉积断裂的不断活动,保持着地形高差,进入盆地的物质分选差,往往是新鲜的棱角状岩屑;边缘山前相,位于盆地对侧边缘,主要是河流—三角洲砂、砾岩,常年性低曲度水流产物,碎屑多已深度风化,整体成楔状,厚度向盆地中心方向增大,多为长石质砂岩,在那里与湖相及干盐沼堆积成指状交互;盆地中心相,深色细粒层纹状页岩和粉砂岩,含煤、鱼和节肢动物,与蒸发岩、风成砂及硝土的干盐沼红色泥岩交替,其中还夹有熔岩夹层。

半地堑的边界断裂带有几公里宽,由一系列阶梯状下掉的正断层组成,断层倾角上陡下缓,成凹面向上的铲状,故称之为铲式断裂(Listric fault)。它的形态在反射地震剖面上清晰可辨。断层的这种几何性质要求上盘地块沿断面运动时要发生转动,而且转动量向阶梯状断层的下掉方向增大。这种断裂的一个显著特点是同沉积活动,长期发育,使得盆地始终保持浅水状态,造成断层上盘的地层厚度依次大于下盘的。特征的地层倾角上倾收敛(updip convergence)现象(图6剖面右侧)则是它与后期断裂错动相区别的主要标志。铲式断裂在自然界的普遍存在为脆性上地壳、在韧性下地壳和上地幔上的伸展提供了易于解释的机制。因为有资料表明,一些铲式断裂向深处是合并到基底滑脱面中去的^[2]。半地堑的边界断层尽管其垂直位移据分析可达7~9km,但断面上水平擦痕的普遍存在却又反映出始终伴随有定向滑动分量。

陆架型碳酸盐—蒸发岩盆地为红黄色白云岩、泥晶灰岩夹砂、页岩。空间上可相变成盐、石膏和页岩组成的蒸发岩相。厚度相对较小,约1~4km。也夹有玄武岩层,边缘也受断裂控制。

三、移离系及其构造坳陷曲线的再造

移离系的形态及物质组成前面已介绍了,相当于一般所说的冒地槽沉积。对于发育成熟的古大陆边缘来说,重要的是要证明同一地层空间上由正常大陆壳向外,由滨岸浅水相到大洋深水相的存在,以及它在枢纽带和大洋壳边界附近厚度和岩相的变化。北美洲西侧



图6 同生断裂造成的地层倾角上倾收敛现象(自上而下代表三个发展阶段)

Fig.6. Upward tilting and convergence of the dip angle of the strata caused by contemporaneous fractures. Three stages of evolution are presented in descending order.

加拿大境内科迪勒拉的工作已查明,那里的晚前寒武和早古生界由北美克拉通向西是由碳酸盐浅滩过渡到页岩盆地,再变为浊积岩等深水沉积的。它们都属于北美地台的原地堆积,代表当时的大陆架和大陆坡。由浊积岩出露的 purcell 山再往西到太平洋海岸之间约

500km的整个西海岸带,从阿拉斯加到加利福尼亚湾,就全由存疑地体(Suspect terrane)组成了。普遍认为是在不同时期由岛弧、海底山、洋壳,甚至是先存的大陆壳碎片连同混杂堆积经碰撞后拼贴到北美大陆上来的^[18]。

对移离系地层厚度计算所得出的构造坳陷累积曲线则可独立提供出大陆裂陷的开始时期。

近年来不少国外同行们发表文章,提出包括我国在内的亚洲大陆是由不同地体(Terrane)自晚前寒武纪以来持续迭接和对接而成的复合大陆^[19-21],横贯大陆内部的褶皱带就是地史期间的板块结合带。弄清这些结合带所代表的大陆边缘类型和空间格局,以及它们在不同地质历史阶段的转化,对于说明我国大陆的发展历史、进行成矿区域规划无疑都是十分重要的。

参 考 文 献

- [1] Grow J. A. 1981, Structure of the Atlantic Margin of the United States, AAPG Education Course Note Series No. 19
- [2] Bally A. B. 1981, Atlantic-Type Margins, AAPG Education Course Note Series No. 19
- [3] Dickinson W. R. 1974, Plate Tectonics and Sedimentation, Soc, Econ. paleo and mine. Special Publication 22 1—27
- [4] Bond G. C. et al, 1984, Construction of tectonic subsidence curves for the early Paleozoic miogeocline, Southern Canadian Rocky Mountains; Implications for subsidence mechanisms, age of breakup, and crustal thinning, Geol. Soc. Amer. Bulletin, 95 165—173
- [5] Sleep N. H. 1971, Thermal effects of the formation of Atlantic continental margins by continental breakup, Geophys. J. Roy. Astr. Soc, 24, 325—350
- [6] McKenzie D. P. 1978, Some remarks on the development of sedimentary basins, Earth planet. Sci, Lett, 40, 25—32
- [7] Royden L, et al. 1980, Continental margin subsidence and heat flow: important parameters formation of petroleum hydrocarbons, AAPG Bulletin 64, 173—187.
- [8] Watts A. B. 1981, The U. S. Atlantic continental margin: subsidence history, crustal structure and thermal evolution, AAPG Education course Note Series No. 19
- [9] 宁岩、姚青春, 1980, 北京西山杏石口组时代归属问题的探讨, 北京地质, 第2期。
- [10] 马文璞、刘昂昂, 1984, 北京西山——一个早中生代古大陆裂谷的一部分, 地质科学。
- [11] Le Bas M. J. 1971, Nature phys, Sci, 230, 85—86.
- [12] Pusey W. C. 1973, How to evaluate potential gas and oil source rocks, World Oil, 176, 5, 71—75
- [13] Hsü K. J. 1982, Thirteen years of deep-sea drilling, Ann. Rev. Earth Planet Sci. 109—128
- [14] Manspeizer W. 1981, Early Mesozoic basins of the central Atlantic passive margins, AAPG Education course Note Series, No. 19
- [15] Burke K. 1976, Development of graben associated with the initial ruptures of the Atlantic Ocean, Tectonophysics 36, 93—112
- [16] Martin R. F. et al. 1972, Magmatism and tectonic settings JGR 77, 26, 4966—4975
- [17] Зоненшайн Л. П. 1976, Глобальная Тектоника, Магматизм и Металлогения, «Недра»
- [18] Jones D. L. et al, 1982, The growth of western North America, Scientific America 247, 5, 70—

- [19] McElhinny M. W. et al 1981, Fragmentation of Asia in the Permian, *Nature* 293, 5829, 212—216
- [20] Klimetz M. P. 1983, Speculations on the Mesozoic plate tectonic evolution of eastern China, *Tectonics*, 2, 2, 139—166
- [21] Kerr R. A. 1983, Suspect terranes and continental growth, *Science*, 222, 4619, 36—38

GEOLOGY OF PASSIVE CONTINENTAL MARGINS

Ma Wenpu

Abstract

According to the main achievement published in "AAPG Education Course Note Series No. 19" and other works, this paper systematically introduces the geology of passive continental margins, including its geometric pattern, structure and evolution and the identification of its ancient counterparts. The regional uplift of eastern North China in the Early to Middle Triassic, followed by vast volcanic eruption and deposition of red coarse clastic rocks in the Jurassic along the graben system, indicates that there had been a northeast rift extending from northern Shanxi through Hebei, Liaoning and Jilin provinces to Shikhoté-Alin in the early Mesozoic. Considering that more and more articles point out that the structural framework of the whole of China could be regarded as a composite composed of several continental blocks and various terranes progressively accreting from the late Precambrian to the Cenozoic, it is very important to clarify the nature of the ancient continental margins which now transect the continent and their history of transformation.