

# 从被动边缘到前陆盆地的演化模式 ——兼论前陆盆地的控矿作用

牟传龙

(成都地质矿产研究所)

随着对碰撞带地质作用研究的不断深入,人们已愈来愈重视对前陆盆地的研究,这是因为前陆盆地的沉积充填物主要由造山带侵蚀的碎屑组成,因而记录了造山带向克拉通侵进的过程。仔细研究前陆盆地的沉积特征,无疑对了解碰撞带的造山历史和造山作用具有重要意义。尤其是近年来,在前陆盆地中发现丰富的矿藏,如油气、铅锌、金、铜、盐类及煤等矿床,更激起了人们对其进行详细研究的强烈欲望。Oliver(1986)有关造山带流体的迁移方向及其停积位置的假设,即前陆盆地的矿质来源理论的提出,使人们有了新的思路。显然,系统研究前陆盆地的形成演化、沉积作用特征和控矿作用,不仅具有重大的理论价值,而且对有关矿产的成因探讨和进行成矿远景预测都有重大的实际意义。

## 一、前陆盆地的概念

前陆盆地(*foreland basin*)总是与挤压或汇聚边缘(*convergence margin*)联系在一起。它位于造山带与邻近的大陆之间,是岩石圈在造山带负荷下发生挠曲所形成。根据其形成的位置,可分为弧后前陆盆地和周缘前陆盆地两类。弧后前陆盆地形成于逆冲(仰冲)板块之上,而周缘前陆盆地则形成于俯冲的大陆板块上。

1. 弧后前陆盆地或称弧背盆地(*retro-arc foreland basin*)位于大陆克拉通与岩浆弧之间,相对于大陆来说为陆前盆地,相对于岩浆弧而言则为弧后盆地。但它与真正边缘海中的弧后盆地有着本质的区别:(1)弧后前陆盆地的基底为陆壳,而后者是建立在洋壳基础之上的;(2)弧后前陆盆地的弧侧有与弧平行并向弧后(向大陆)逆冲的褶皱冲断带存在,从而导致盆内的应力状态通常是挤压的或中性,而真正边缘海中的弧后盆地则通常是初期为挤压状态,后期则转变为拉张状态,即弧后扩张;(3)前陆盆地中物源主要为再旋回造山带,其次为陆块,而弧后盆地的物源则是岛弧(岩浆弧)和陆块。

弧后前陆盆地通常是由于大陆板块边缘沿陆内俯冲带进入到岩浆弧下引起岩石圈的挠曲和褶皱冲断岩片的构造负载引起的均衡沉降作用导致盆地的沉降。这种盆地可以是在已褶皱的原有的边缘海盆或被动边缘沉积岩系的基底之上发展起来的继承性盆地。

2. 周缘前陆盆地(*peripheral foreland basin*)又称为边缘、周边或外围盆地。它位于毗邻主缝合线的褶皱冲断带与大陆基底上,通常是大陆与大陆之间的碰撞作用所形成。有人则建议

将周缘前陆盆地称为缝合盆地(suture basin)(Cherver, 1986),以强调沿缝合带分布并由缝合作用所形成的盆地。这种盆地的形成可能是在地壳碰撞的发展过程中,由于大陆块周缘的部分俯冲作用使大陆岩石圈下弯所形成。盆地的沉降作用可能由褶皱冲断带的构造负载以及早期的沉积物的负载所引起,使盆地相对于造山带继续沉降,接受造山后的沉积。

## 二、从被动边缘到前陆盆地的演化模式

从被动边缘到前陆盆地的转变是通过两个板块之间的碰撞、拼合作用来完成的。在这一转化的过程中,被动边缘的形态对前陆盆地的形成演化及其整个沉积格局的展布均有很大的影响。如果在发生碰撞的过程中,被动边缘是比较规则的或平整的,那么前陆盆地的形成通常是通过下述的模式演化而成(图1):

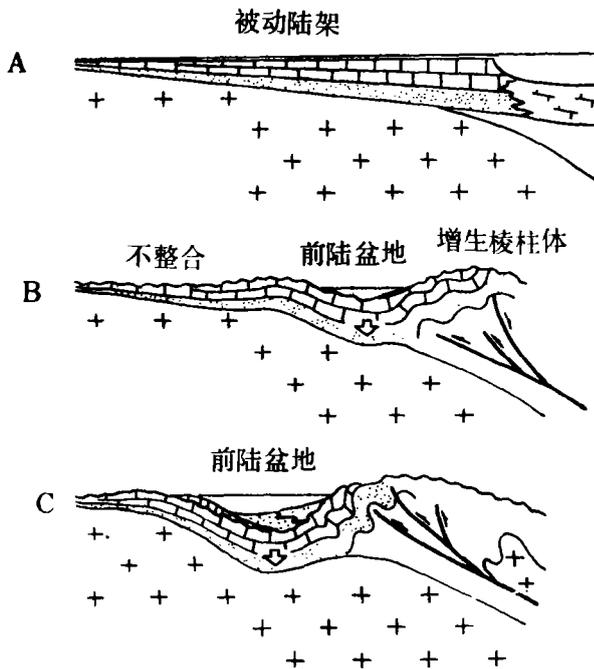


图1 规则被动边缘到前陆盆地的演化模式

1. 原始沉积阶段,在被动边缘上通常发育一套碳酸盐沉积(图1-A)。

2. 由于碰撞造山作用,导致被动边缘地区处于强烈的挤压状态,从而使岩石圈及被动边缘上的沉积岩层发生弯曲和部分上隆,形成微突出和凹地形的锥形,并伴随一系列的不整合面的形成(图1-B)。此阶段为前陆盆地的早期形成阶段。

3. 随着挤压和造山作用的不断持续地进行,在第二阶段的基础上,由于造山带的负荷以及沉积负载的影响,前陆盆地进一步下沉,接受造山后的沉积充填物(图1-C),最终完成了从被动边缘到前陆盆地的演变。沿被动边缘的走向,其沉积格局不发生很大的变化,整个被动边缘地区基本上同时遭受碰撞作用,同步演化成前陆盆地。

上述的演化模式是建立在规则的被动边缘和正向碰撞的基础上。实际上,绝大多数情况

下,被动边缘的形态是不规则的,而且碰撞还可能是斜向的。因此,当被动边缘与另一板块发生碰撞时,不同的地段,发生碰撞、拼合的时间是不同的,从而沿被动边缘走向,前陆盆地的演化是逐渐进行的,在不同的时期,其沉积格局的展布也是不一样的。Lash(1988)研究了阿巴拉契亚造山带中部的奥陶系前陆盆地的早期演化特征,阐明了前陆盆地沿不规则被动边缘走向的演化历程(图2)。这个例子告诉我们,被动边缘的形态对前陆盆地的形成和演化起着决定性的作用。结果表明,在被动边缘向前陆盆地的演化过程中,最早的变化起始于被动边缘的凸出部位。当凸出部位遭受碰撞开始隆起和暴露,进而形成不整合和前陆盆地时,而凹进部分因未受到碰撞的影响,仍然接受沉积,形成残余盆地沉积。随着碰撞、挤压的持续进行,前陆盆地的范围愈来愈大,不断在新的地方形成前陆盆地。当碰撞效应最终波及到被动边缘的凹进部分时,导致这一部分地区也隆起、暴露,进而在逆冲构造负载下演化成前陆盆地,完成了从被动边缘到前陆盆地的演变。

### 三、前陆盆地的沉积模式

通常,对于若干前陆盆地来说,初期的深水沉积后,继之为晚期的浅水沉积是一种常见的沉积模式(Miall, 1978)。这一演化序列直接反映了造山带从生长阶段到稳定阶段的演化。Michael Covey(1986)研究了台湾西部前陆盆地的沉积模式表明上述模式的正确性。台湾西部前陆盆地初期为较深水沉积,晚期为浅水沉积。从早到晚经历了近海环境、浅海环境、三角洲以及河流环境的变迁。近海环境是以悬移质的泥或粉砂的沉积为特征,沉积物堆积时大多数受到穴居生物的改造。浅海环境以风暴沉积为主,局部伴生羽状交错层理、槽状交错层理、压扁层理和波状层理,指示沉积期间以潮汐作用为主。

在某些前陆盆地中,早期深水沉积阶段具有巨厚的复理石(浊流)沉积。虽然台湾西部前陆盆地的沉积缺乏浊流沉积层序,但它仍然代表了从深水到浅水,从海相到陆相的前陆盆地的沉积演化模式。几乎所有的前陆盆地都具有浅水阶段,台湾西部前陆盆地中厚层的浅海和河流沉积物是在盆地达到稳定状态之后堆积的(M. Covey, 1988)。同时,与上述的模式相反,某些前陆盆地缺少早期阶段的深水沉积,而只具有晚期阶段的浅水沉积或只有陆相沉积。英国早白垩世 Cordilleran 前陆盆地则全由陆相沉积所充填(P. G. Decelles, 1986)。根据 P. G. Decelles(1986)的研究, Cordilleran 前陆盆地早白垩 Kootenai 组主要由河流相,湖泊相的沉积所组成。

除上述的沉积模式外,还有一种早期向上变深、晚期向上变浅的前陆盆地沉积模式。阿巴拉契亚 Virginia 前陆盆地(中奥陶世)的沉积演化史就证明了这种模式的存在。中奥陶世 Virginia 前陆盆地是在早期(寒武-奥陶纪)被动碳酸盐陆棚(大西洋型陆棚)的基础上,通过隆升、变形和侵蚀发育而成。它的沉积演化经历了早期的向上变深和晚期的浅滩化序列,包括碳酸盐缓坡,盆地和陆屑充填等阶段(Read, 1980)。扬子板块东南缘的前陆盆地也具有这种沉积旋回(吴应林等,见本刊)。早泥盆世时,由于华南板块与扬子板块的碰撞造山,导致扬子板块东南缘开始形成前陆盆地,往后为一套向上变深序列,历经泥盆、石炭,二叠达到最深阶段,进入三叠纪,这些前陆盆地开始向上变浅,形成一套向上变浅旋回,最终由印支运动结束了这些前陆盆地的海相沉积历史,变为以河流相、湖泊相沉积的磨拉石建造为特征的陆相盆地,结束了扬子板块东南缘前陆盆地的演化历史。

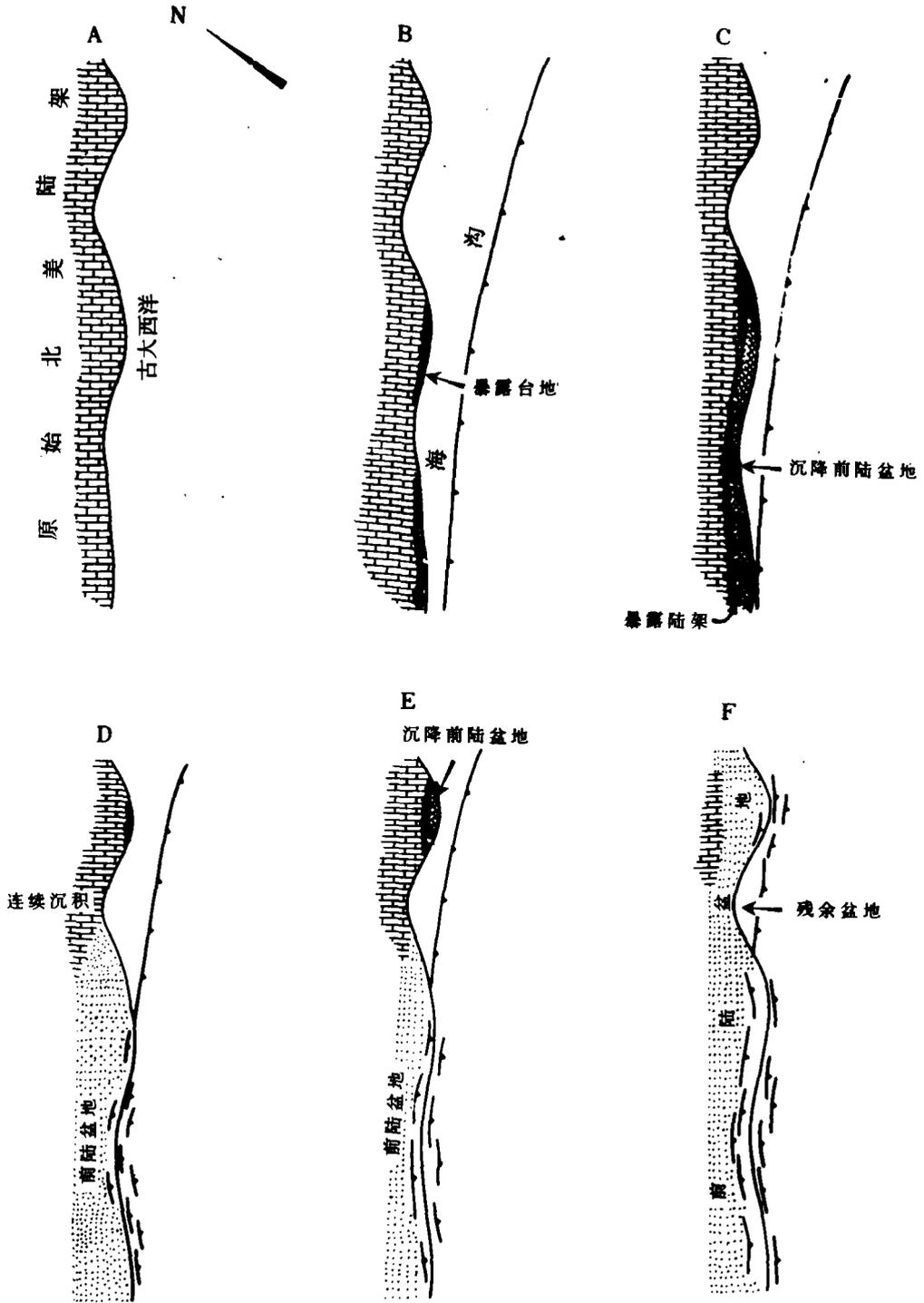


图2 阿巴拉契亚造山带中部奥陶系前陆盆地沿不规则被动边缘走向的演化历程(据 Lash 简化,1988)  
 A-早催马多期(Early Tremadocian),B-南威尔期(Llanvirnian),C-早南得利期(Early Llandeileian),D-中南得利期(Middle Llandeilian),E-早卡拉多期(Early Caradocian),F-中卡拉多期(Middle Caradocian)

## 四、前陆盆地的控矿作用

从近年来所发现的矿床实例来看,前陆盆地是许多矿产,包括油气、铅锌、铜、金、盐类矿床及煤等的良好栖息场所。这是因为前陆盆地不仅有丰富的矿质组分来源,而且有大量的储集空间,即控矿构造。因此,仔细研究前陆盆地的矿质组分的来源方式及控矿作用对寻找矿床大有好处。

### 1. 前陆盆地中的矿质组分来源

前陆盆地的形成是通过碰撞作用来完成的。两个板块在碰撞的过程中,一部分边缘沉积物将埋藏于逆冲片之下。这些沉积物开始形成时,具有很多的孔隙,并被流体(fluids)——通常是海水,包括含大量矿物——所充填。当它们被埋藏于逆冲片之下时,一部分流体由于上覆岩体的挤压而从孔隙,矿物中挤出来,有的是从浅部,有的来自于较大的深度。这些被挤出来的流体,有的是热的,而有的则是冷的。它们一部分向上穿刺形成矿脉或岩脉;一部分将形成热泉;一部分流体将沿着应力薄弱带流入前陆盆地和台地的渗透层中(图3)。这些流体含有矿质、石油或石油的组分和热量进入前陆盆地或进入陆中区(mid continent)。在它们运行时,会使前陆盆地中的沉积物加热并使之活化。当它们在沸腾或冷却时,就会在适当的地段形成矿床,流体中的碳水化合物将停积在圈闭构造中而形成油气矿床。

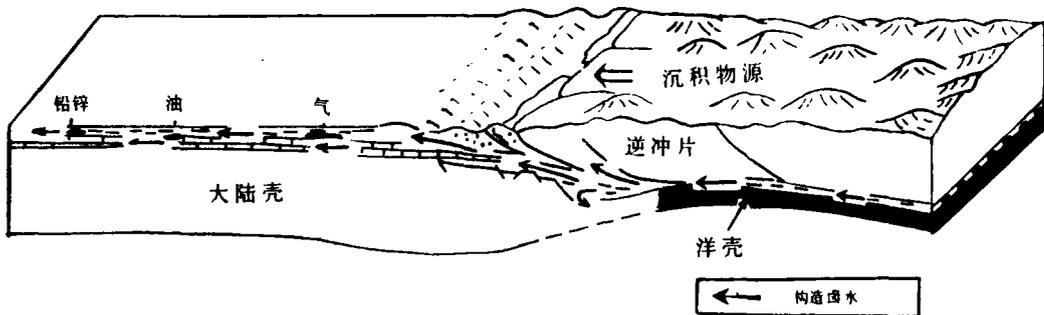


图3 造山带构造流体(卤水)的迁移方向和某些矿床形成的相对位置 (据 Oliver 简化, 1986)

上述的前陆盆地的矿质组分来源理论,可以从很多的实例中得到证实。Wilkerson(1982)编制了美国及其附近地区的油气分布图(图4),表明所有的油气田都分布在构造带一侧。在阿巴拉契亚地区,天然气通常出现在造山带附近,而油田则离造山带有一段距离,这是由于构造流体(tectonic fluids)在进入前陆盆地时,流体中温度分配所造成的。在 Cordilleran 造山带地区,石油储藏在 D-K 的岩石中,它与阿巴拉契亚地区一样,是通过搬运,迁移而沉积下来的。Demasion(1977)认为,具有三角洲沉积的前陆盆地中的油气是通过长距离的搬运后才停积下来的。同时,在 Cordilleran 造山带地区,天然气靠近造山带,而油则离造山带相对较远。这就说明构造流体机制是形成这些油气田的一种成因机制。不仅如此,通过煤的变质程度的变化也可以看出。通常随着远离造山带,煤的变质程度降低。这是因为在造山带附近埋藏较深,温度也高。当构造流体从造山带运移到前陆盆地时,由于大气水的作用导致远离造山带地热梯度升高,逆冲带(造山带)附近地热梯度较低,即与构造流体搬运方向相反的方向,将有助于煤的变质并被构造流体所强制。

构造流体不仅含有大量的石油组分,而且还可以搬运矿质组分。Leach 等(1984)和

Rowan 等(1980)报道了 Missouri、Kansas、Arkansas 和 Oklahoma 地区的流体包裹体的古温度和化学资料,表明向造山带方向,水平热梯度和温度是逐渐增高的。图 5 展示了美国东部和

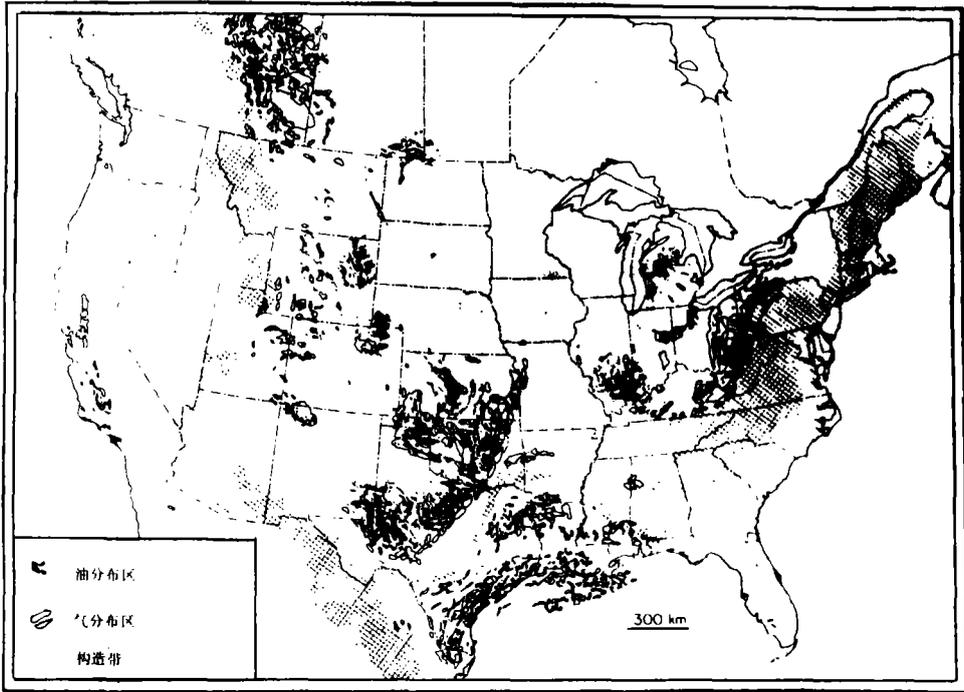


图 4 美国及其相邻地区油气分布图(引自 Oliver, 1986)

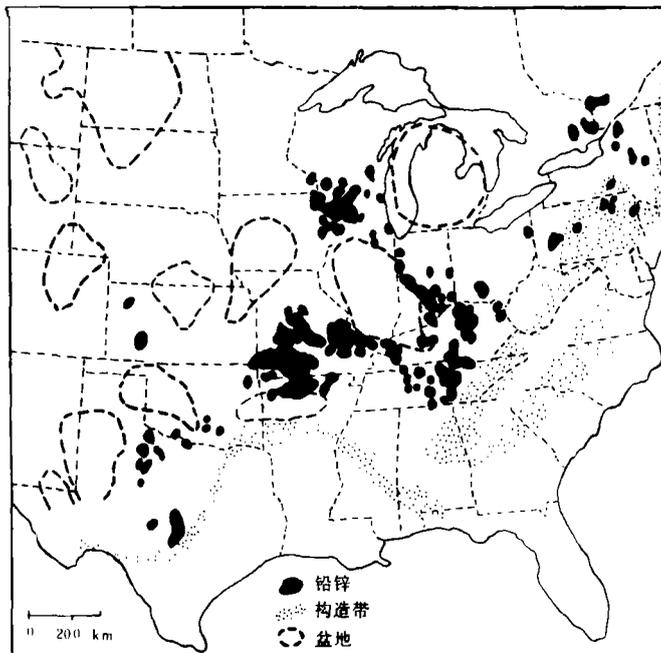


图 5 美国东部和中部铅锌矿床分布图(引自 Oliver, 1986)

中部的铅锌矿的产状。他们的分布图象与烃类分布格式十分相似,只不过前者是沉积在前陆盆地之间的陆中区,而后者就停积在前陆盆地中。这些前陆盆地对铅锌矿的形成和分布起着明显的控制作用。Leach等(1984)证实,从Ouachita前陆盆地被挤出来的流体扩展到陆中区(流体的温度为200—300°C)并形成世界闻名的密西西比型铅锌矿床。

## 2. 前陆盆地的一种控矿构造

前陆盆地不仅具有丰富的矿质来源,而且也有良好的控矿构造。除了沉积层本身(因前陆盆地中可发育大量的三角洲沉积)可作为油气或金属矿床的储层空间外,不整合也是一种重要的控矿构造。这些不整合面是烃类和金属矿床的良好储层空间。大家知道,在被动边缘向前陆盆地演化的早期,由于受碰撞挤压的影响,导致被动边缘上的岩石一部分隆起,暴露和褶皱,形成一系列的不整合。它通常是平行不整合,但局部可以是角度不整合关系,而且横向可变成整合关系。这些不整合不仅是金属矿产的栖息场所,也是烃类储集的空间,所以仔细辨认这些不整合特征,具有十分重要的实际意义。

(1)古地形特征:由于受多种因素的影响,导致不整合面呈凹凸不平,形成一些古高地。它们通常以变薄的或尖灭的后期地层为标志。高地相邻的沉积相通常为潮下地层。一些不整合高地可以形成被潮缘沉积层所包围的“孤岛”。

(2)落水洞、灰岩坑(sinkhole)的碳酸盐碎屑充填特征:不整合面由于受地下水的化学溶蚀,形成灰岩坑或落水洞,其后被碳酸盐碎屑充填。主岩层与充填物之间的接触关系是突变的和不规则的。充填物通常由碳酸盐角砾组成,角砾之间为杂基支撑、少数为碎屑支撑。值得提出的是,在某些落水洞中的充填物是由含化石灰质砂和泥所组成,只存有少量的碳酸盐角砾。

(3)层内角砾岩:在不整合形成的过程中或形成以后,石灰岩层由于受地下水的溶蚀作用,从而垮塌形成层内角砾岩。这些角砾岩体呈透镜状、顺层状,与上覆岩层的接触界面为不规则状,而与基底岩层则呈突变的接触关系。它们通常由碳酸盐角砾组成,碎屑支撑,分选差和缺乏粒序。角砾呈棱角状,基质通常为中至粗粒的白云岩或粗钙质和白云质胶结物。

这种角砾岩,一些学者有不同的看法。有的认为这种角砾岩是与构造造山带相联系,称之为构造角砾岩;有的学者则认为是碳酸盐层通过暴露,受淡水溶蚀所形成;也有形成于大气水与海水混合带的观点。

本文编成后经吴应林研究员审阅,提出了许多宝贵的建议,在此,作者深表谢意!

## 主要参考文献

- 刘肇昌,1985,板块构造学,四川科学技术出版社。  
 金性春,1984,板块构造学基础,上海科学技术出版社。  
 Covey, M. 1986, The evolution of foreland basin to steady state; evidence from the western Taiwan foreland basin, *Foreland Basin*, pp. 77-90.  
 Decelles, P. G., 1986, Sedimentation in a tectonically partitioned, non-marine foreland basin; The Lower Cretaceous Kootenai Formation, southern Montana, *Geological Society of America Bulletin*, Vol. 97, NO. 8.  
 Lash, G. G., 1988, Along-strike variations in foreland basin evolution; Possible evidence for continental collision along an irregular margin, *Basin Research*, Vol. 1, NO. 2.  
 Mussman, W. J. and Read, J. F., 1986, Sedimentology and development of a passive-to convergent-margin unconformity; Middle Ordovician Knox unconformity, Virginia Appalachians, *Geological Society of America Bulletin*, Vol. 97, pp. 282-295.  
 Oliver, J., 1986, Fluids expelled tectonically from orogenic belts; Their role in hydrocarbon migration and other geologic phenomena, *Geology*, NO. 2.