

# 前陆盆地勘探

塔里木石油勘探开发指挥部  
中国石油天然气集团公司石油信息研究所

# 前陆盆地勘探

主 编：王益清

副主编：龚福华 池秋鄂

塔里木石油勘探开发指挥部  
中国石油天然气集团公司石油信息研究所  
一九九八年九月

# 前 言

前陆盆地是一种含油气资源较丰富的沉积盆地系列,但因经历了陆壳板块从离散到聚敛拼合的全过程,地层变化大,构造运动复杂,因此系统的分析前陆盆地发育的构造背景、构造演化、形成机制、沉积演化及油气资源特点,是前陆盆地研究的重要任务。

《前陆盆地勘探》是塔里木石油勘探开发指挥部与石油信息研究所共同合作出版的一本文集,共收集了34篇国外近年发表的优秀论文,论文涉及到世界前陆盆地的构造风格、沉积层序、油气聚集及地球物理勘探技术等方面。该文集旨在介绍世界前陆盆地先进的勘探经验,为我国的前陆盆地勘探提供参考与借鉴。

由于时间仓促及水平有限,在选题、翻译和编辑过程中难免有许多不足,恳请广大读者批评指正。

编者

1998.9

# 目 录

前陆盆地系统 .....	(1)
前陆盆地的概念及特征 .....	(16)
三角带的形态、术语和运动学特征 .....	(25)
前陆基底卷入构造 .....	(40)
斯瓦尔巴群岛斯匹次卑尔根岛中部第三系褶皱	
- 冲断带中基底卷入和薄皮构造作用的相互影响 .....	(69)
拉腊米收敛期间麦迪逊山北部(蒙大拿)基岩和盖岩的	
变形作用及对新生代盆地地层的影响 .....	(90)
喜马拉雅山脉西南部、巴基斯坦的苏莱曼活动褶皱	
冲断带的地震资料、几何形态、构造演化与缩短作用 .....	(108)
美国犹他 - 爱达荷向斜 - 弧后前陆盆地内中侏罗统	
沉积过程的构造控制因素 .....	(123)
阿尔伯达前陆盆地上白垩统岩石圈挠曲对地层几何型态	
和相分布的控制作用 .....	(140)
中国西部的碰撞继承盆地 -- 构造继承对砂层组份的影响 .....	(148)
库尔勒盆地活动的冲积系统: 一种复杂的前陆盆地沉积 .....	(173)
瑞士中部波尔多期上部海相磨拉石组的沉积层序、地震相、	
沉降分析和演变 .....	(178)
肯塔基和弗吉尼亚州上中 - 上奥陶统前陆盆地高分辨率	
地表及地下层序地层学研究 .....	(196)
前陆盆地沉积层序的一些控制因素——以阿尔伯达盆地为例 .....	(222)
单个沉积序列的层序地层分析: 加拿大阿尔伯达前陆盆地	
Mannville 群海相 / 非海相沉积物分离及纵向搬运的影响 .....	(236)
前陆盆地热作用史的地球物理模拟 .....	(248)
落基山地区油气藏上方的浅层地温异常 .....	(254)
古生代安特勒前陆盆地俯冲作用的运动学研究 .....	(266)

前陆盆地深部地震资料解释: 来自新西兰塔拉纳基盆地的实例 .....	(281)
明尼苏达中东部佩诺凯恩造山带重磁力资料的滑动窗泊松分析 .....	(287)
斯瓦尔巴群岛西斯匹次卑尔根褶皱带急剧上升的冲断层前缘的地震模拟 ..	(297)
南意大利亚平宁山脉(阿尔卑山)的一个复杂的三维勘探工作 .....	(305)
利用层析成象 - 基准面拉平法对逆掩地区地震资料的成象: 实例研究 .....	(315)
地势崎岖地区近地表反射剖面野外静校正的改进 .....	(333)
复杂地形陆上数据的叠前处理 .....	(339)
布罗德托普逆冲岩席 - 阿巴拉契亚中部一种宽延的隐蔽逆冲断层 .....	(351)
巴布亚新几内亚的近代三角带变形 .....	(365)
阿尔伯达南部罗斯内斯特挠曲附近落基山冲断前缘的地震资料解释 .....	(374)
科迪勒拉前陆冲断带的地震反射剖面解释 .....	(387)
智利南部麦哲伦前陆冲断褶皱带前缘区的形态及其演化 .....	(405)
复杂的阿尔卑斯式逆掩断裂地区的深部 VSP 研究 .....	(418)
挤压大地构造指明了更多的天然气储量 .....	(429)
寻找大型油气田的位置: 安第斯前陆的实例 .....	(434)
喀尔巴阡等地区逆冲断层带的油气勘探 .....	(442)



# 前陆盆地系统

Peter G. DeCelles 等

鲁 兵 译

**摘 要** 前陆盆地系统定义为：(a)形成于收缩的造山带与相邻克拉通之间陆壳上的、一个狭长的潜在沉积物可容空间区域，其主要与由俯冲作用造成的边缘或弧后冲断-褶皱带的地球动力学过程有关；(b)由四个可分离的沉积带组成，即：楔顶、前渊、前隆和隆后沉积带。每个带中的沉积物多少取决于其沉积时的位置，而不是其与冲断带最终的几何关系；(c)前陆盆地系统的纵向范围大概与冲断-褶皱带的长度相等，不包括溢出至残留洋盆地或大陆裂谷(碰撞造山)内的沉积物。

楔顶沉积带是沉积在造山楔前缘顶端之上的沉积块体，包括“背驮”式和“冲断顶”式盆地。楔顶沉积朝内陆逐渐变窄，其特征是沉积物粒度极粗，具多个构造不整合面和渐进变形的特点。前渊沉积带由冲断带构造前缘与前隆近源侧翼间的沉积物组成。这类沉积物向着冲断带的前缘一般迅速变厚，与楔顶沉积带的远端部分相连。前隆沉积带是前渊和隆后沉积带之间广阔的潜在挠曲抬升区。隆后沉积带是聚集在前隆沉积带朝着克拉通潜在挠曲下降一侧浅而宽广地带的沉积块体。这种范围更广的前陆盆地系统的定义比以前通用的定义更确切。以前的定义常常忽略了沉积在造山楔顶部和前隆带向克拉通一侧的那些来源于冲断带的大量沉积块体。

以往关于前陆盆地的定义认为，沉积物可容空间仅由前陆盆地内的沉积负荷和冲断带的地形负荷引起的挠曲沉降造成的。同样或更重要的是，在某些前陆盆地系统中，俯冲负荷(在边缘前陆盆地系统中)和远源沉降效应是由俯冲板块与位于上覆陆块(弧后系统)外侧下面的幔-楔物质之间的黏性藕合作用引起的。楔顶沉积带的形成受到因造山楔的增生以及造山楔负荷和(或)上覆负荷引起的区域挠曲沉降所造成的抬升的明显影响。而前渊沉积带沉积物可容空间的绝大部分是由地形、沉积物和俯冲负荷引起的挠曲沉降的结果。许多隆后沉积带拥有比预想的由脆性大陆圈层挠曲作用造成的沉积充填大一个数量级的厚度。隆后沉积带的沉积物可容空间主要是由加积到平衡泄水剖面(地表系统)或基准面(水淹系统)的过程形成的。在前隆沉积带通常不整合面发育，常见缓慢沉积剖面 and 地层变薄及断层控制的局部沉积中心。在海洋系统中，常见碳酸盐岩台地。

把楔顶沉积带包括在前陆盆地系统中，则要求在横剖面上将地层模式的几何形态表述为两个锥状的棱柱体，而不是大多数模式所采用的典型“门档式”楔状体。同样原因，前陆盆地系统中的层序地层模式需要承认系统近源边缘可能发育 I 型不整合面。常常被忽略的是前隆和隆后沉积带均包含大量有关造山带和俯冲体系尺度的构造作用的信息。

## 一、引言

本文讨论有关前陆盆的现有概念(图 1a, b)，包括其定义、适用范围、沉积充填模式、结构、沉降机制和盆地充填中地层特征的构造含义。目的是指出当今前陆盆地概念的不完整性，进而提出了一个更完善的定义，并阐明这一扩展定义中的某些特征。

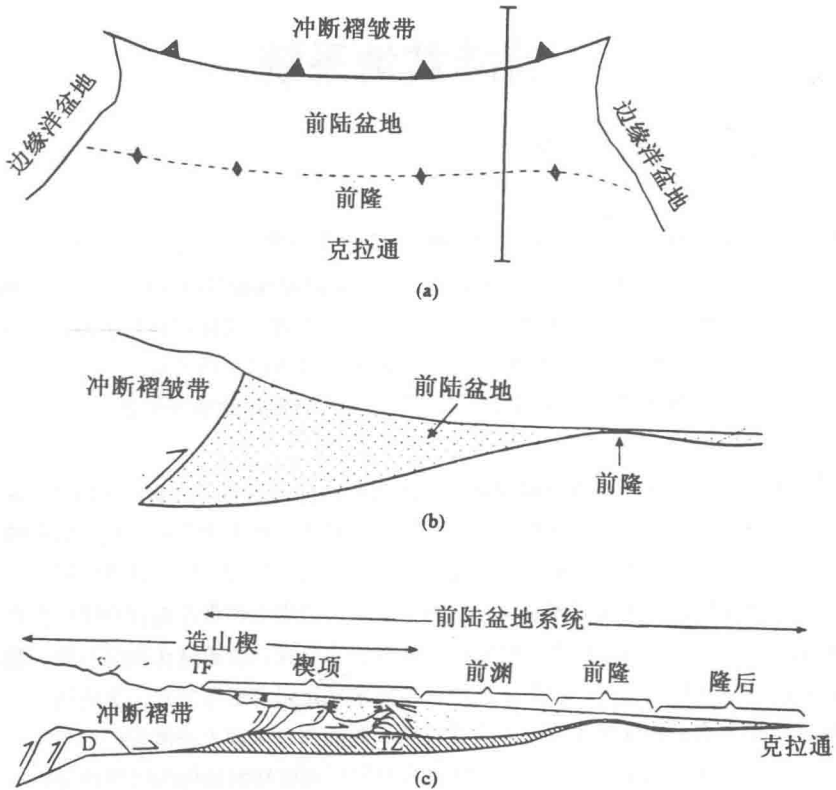


图 1 (a) “典型”前陆盆地的示意图。两侧边界为边缘洋盆地，未注明比例尺，应为  $10^2 \sim 10^3$  公里数量级。右侧的垂线指示了与(b)相似的横剖面方位；(b)一般被接受的前陆盆地横剖面几何形态概念。注意冲断带与盆地间的边界几何形态不是真实的，垂直比例尺放大了 10 倍；(c)经修正后的前陆盆地概念的横剖面示意图，具有楔项、前渊、前隆和隆后沉积带，接近似真实比例显示。冲断带的地形前缘用 TF 表示。前陆盆地用黑点表示，斜线区表示卷进图左侧冲断褶皱带中的先存的冒地槽地层(图中未表示出来)。双重构造 D 位于造山楔的内陆部分，前缘三角带 TZ 和渐进变形(与冲断尖端有关的三角带 TZ 之上的扇形区)也显示在楔项沉积带中。注意，造山楔前缘与前陆盆地系统间有大范围的叠置

前陆盆地通常定义为形成于线性收缩造山带和稳定克拉通间的狭长槽地。这主要是由造山带中的冲断席负荷引起的挠曲沉降形成的(图 1a, b)。术语“前渊”过去曾和“前陆盆地”通用。在文献中同样引用的重要辅助概念是：(1)前陆盆地沉积充填在横剖面上呈楔状，其最厚部分直接与冲断带相邻或部分位于其下(图 1b)；(2)前陆盆地沉积物主要来源于相邻的冲断带，少数来源于该盆地的克拉通一侧；(3)挠曲隆起或前隆，可能把前隆盆地的主要部分与克拉通分开。尽管某些著名的前陆盆地(如亚马逊前陆和阿尔卑斯前陆；Sengor 的“碰撞造山带”)干扰了高角度指向造山带的张性盆地，而实际工作中多数学者认为盆地的一侧被冲断带所限制，另一侧被未变形的克拉通限制。纵向上，前陆盆地通常消失于边缘洋盆地或残留洋盆地中(图 1a)或弧后扩张盆地中。Dickinson(1974)划分出了边缘前陆盆地和弧后前陆盆地。前者形成于冲断方向与俯冲方向相同的冲断带前缘中的俯冲板块上；后者发

育在大陆边缘岩浆弧和与之有关的逆俯冲方向冲断带内侧的仰冲板块上。尽管对此差别已进行了二十年的研究，直到最近才认识到二者在地球动力学上的差别，从而识别出了两类基本性质不同的前陆盆地。

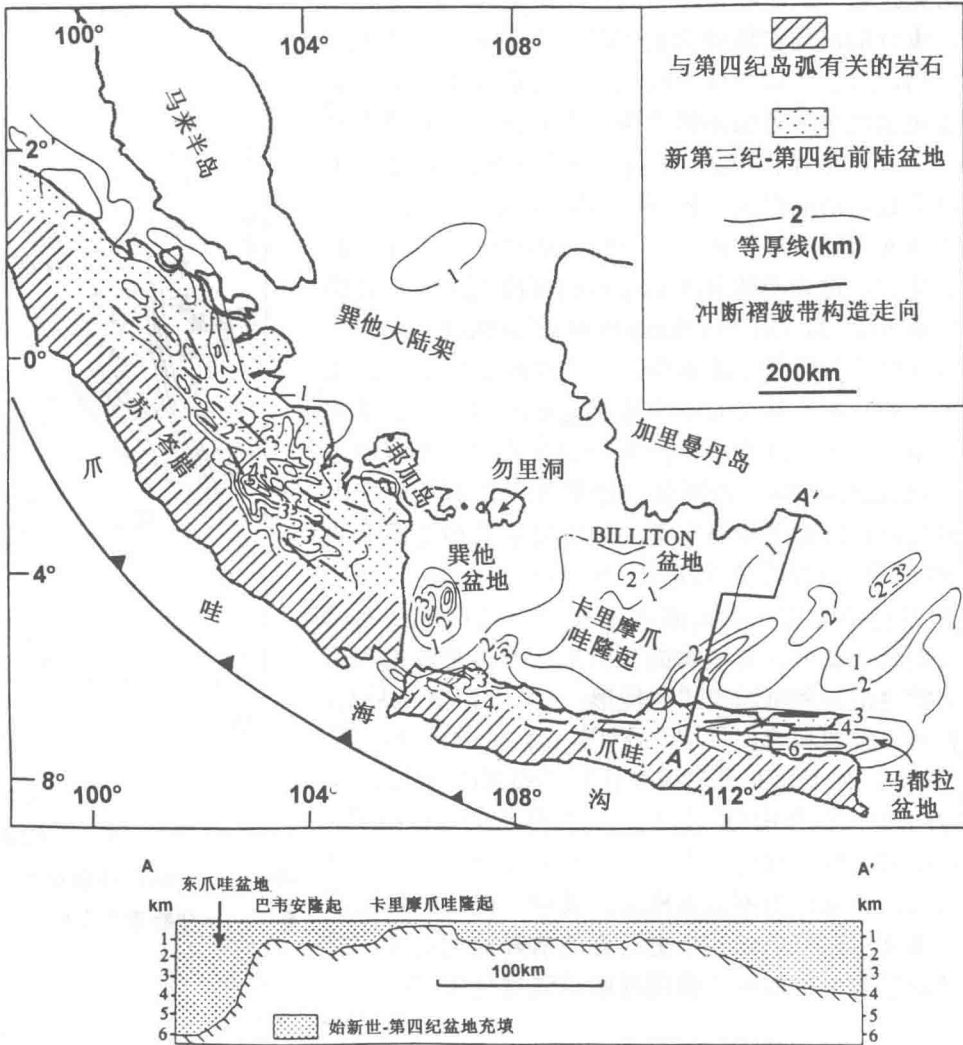


图 2 巽他大陆架和印度尼西亚造山体系的综合图(据 Ben Avraham 和 Emery(1973); Hamilton(1979))。沿着苏门答腊-爪哇岩浆弧及其有关冲断-褶皱带的北部和东北部存在一个复合的弧后前陆盆地系统。等厚线表示渐新统沉积物的厚度(公里)。注意剖面 A-A' 中巴韦安和卡里摩爪哇隆起地区的宽阔抬升区，其分隔了一个明显的前渊沉积带和小而宽广的沉降区

上面概括的前陆盆地的概念有两方面的不足。首先，现代和古代的许多前陆盆地背景是一目了然的，即来自于冲断带、前陆区和克拉通的沉积物以及盆地内碳酸盐岩台地的沉积物，可能沉积在远远超出主要挠曲沉降带的区域内(即从前陆到克拉通边缘)。这方面的例子包括与科迪勒拉(Cordilleran)，亚马逊(Amazonian)和印度尼西亚(Indonesian)造山带有关的沉积物，它们的分布延伸到了各自主要挠曲沉降边界之外数百公里处(图 2)。另一方面，一些前陆背景中的沉积物，像瑞士的磨拉石盆地、台湾前陆盆地和波-亚得里亚(Po-Adriatic)



前陆盆地，分布范围非常窄，被限制在主要的挠曲沉降带内。这就导致可能存在前陆盆地未充满、充满或过充满状态的概念。然而事实上，在文献中对于延伸到挠曲隆起之外克拉通的盆地充填部分，未给予足够的重视。关键的问题是何种因素引起了广泛的沉积可容空间和朝向克拉通一侧前陆脊部的沉积物聚集。

此外，流行的前陆盆地概念也忽略了大量来源于造山楔顶端的沉积物，这些沉积物通常被认为是可能或不可能从前陆盆地主要充填物中区分出来的“背驮”式或“冲断顶”式盆地充填。尽管一些背驮式盆地在某一时期的确可从地形上被分开，但多数活动的楔顶沉积物与前陆盆地完全是连在一起的。美国西部内陆前陆盆地上白垩统充填物的等厚线在盆地两侧是连续的，这表明朝向冲断带充填厚度变薄，且在横剖面上不呈楔形(图 3)。Ori 和 Friend(1984)引证的波—亚得里亚前陆地带典型的背驮式盆地实例，完全埋藏了厚逾 3 公里的沉积物之下的与冲断有关的下伏基底地形(图 4)；在盆地的非海相部分中，发源于北亚平宁冲断带的支流穿过平缓的冲积平原直达现代波(Po)河。冲断带的地貌界限沿着亚平宁山脉前缘，但与隐伏冲断及褶皱有关的地震显示其向北或东北延伸至少 50 公里。古冲断带顶部之上区域性分布的巨厚同造山期沉积物也已被证实。若前陆盆地充填中包括这些充填物，正如我们所承认的，充填物的几何形态不再是过去常用以模拟前陆盆地沉降和沉积模式的楔形。相反，在横剖面上，盆地充填物向克拉通和造山带均变薄(图 1c)，且不对称的楔形体若存在的话，则是沉积期后构造作用的结果(主要是冲断层削截)，而不是沉积作用与沉降型式相互作用的直接结果。

目前前陆盆地模拟和野外研究中存在的几个问题可以追溯到上述有关前陆盆地的不完善概念，其中一些实例将在本文中讨论。本文下面将提出一个更综合的前陆盆地定义，并讨论该定义对于我们根据构造作用理解前陆盆地地层的某些意义。

## 二、前陆盆地系统定义

上述讨论强调了一个事实，即“前陆盆地”是几何形态复杂的一个整体，并包括以不同形式组合的离散部分。这样便引伸出了“前陆盆地系统”的概念。(1)前陆盆地系统是形成于收缩的造山带与相邻的克拉通之间、陆壳上狭长的潜在沉积可容空间区域，其主要与造山带及相关俯冲体系的地球力学过程有关。(2)前陆盆地系统可分为四个沉积带，它们是：楔顶、前渊、前隆和隆后沉积带(图 1c)。每个带中的沉积物多少取决于其沉积时的位置(图 5)，沉积带之间的边界随时间横向迁移。在一些前陆盆地系统中，前隆和隆后沉积带可能不发育或缺失。(3)前陆盆地系统的纵向范围大概与相邻的冲断-褶皱带的长度相同，不包括纵向上溢出到残留洋盆(例如，孟加拉和印度的海下扇)或裂谷中的沉积物，因为它们不直接受造山带地球动力学作用的控制。该定义省略了特殊的沉降机制，因为四个沉积带中每个沉

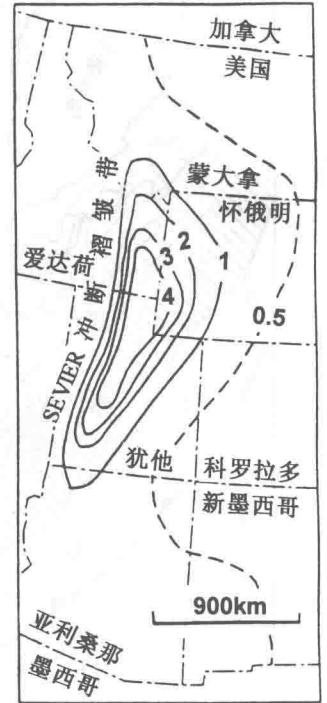


图 3 美国西部内前陆盆地系统中上阿尔布阶—桑托阶的等厚图(据 Cross,1986)。注意盆地充填朝着 Sevier 冲断带和克拉通变薄

主要机理是响应于造山带负荷和沉积物负荷的挠曲作用，但这种挠曲作用在每一带中表现程序有所不同。

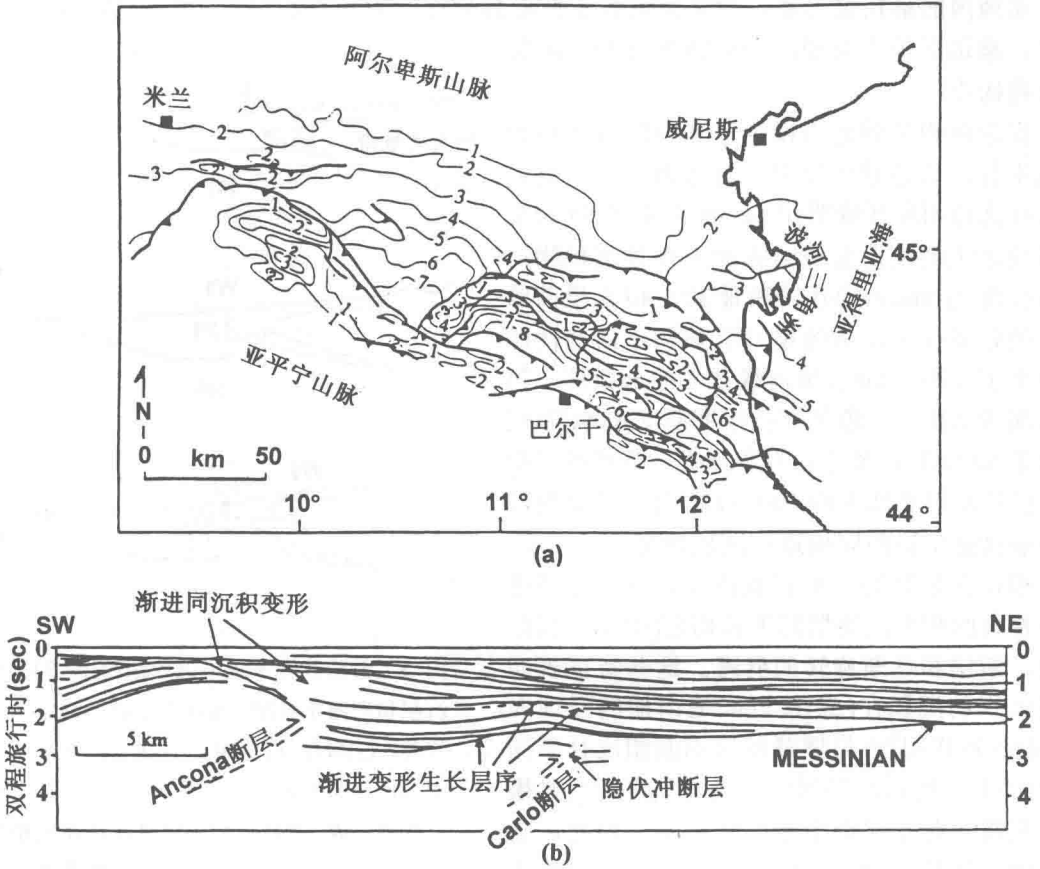


图 4 (a)意大利北波河冲积平原之下 Messinian 期后沉积物的等厚图和隐伏冲断层，一个活动性边缘前陆盆地系统(据 Pieri, 来自 Bally, 1983)。亚平宁山脉北段的地形前缘走向为北西西，沿 Bologna 坡以南分布。注意冲断带南缘 50 公里以上被埋在 8 公里厚的楔顶沉积物下，波河三角洲向东前积到亚得里亚海北部，是该体系的海相部分；(b)波-亚得里亚前陆盆地系统中意大利 Conero 海岸外亚得里亚海北部的地震解释剖面(据 Ori 等, 1986)。亚平宁冲断带的地貌前缘位于剖面的左侧。注意造山楔前缘顶之上的渐新统-第四系沉积物的渐进变形(生长断层传递褶皱)。还应注意盆地的海底部分，目前正接受浅海相沉积物

### 1. 楔顶沉积带

在许多大陆冲断带中，明显的地形界线远在前缘冲断层的后方，且大量的同造山期沉积物覆盖在冲断-褶皱带的前缘部位(图 4)。这是因为前缘冲断层一般是隐伏的，且消失在断层传递背斜的核部、三角带或者地下双重构造的被动顶板内。而许多大型的拖曳断弯和断层传递褶皱则发育在进一步向陆的较大构造斜坡和双重构造之上(图 1c)。此外，沿着冲断带前缘的变形岩石通常较年轻且松软，而老的且通常更硬的岩石暴露在内陆区。沉积在造山楔前缘顶上的沉积物构成了楔顶沉积带(图 1c)。它朝向前陆的范围被定义为与下伏造山楔

前端有关的变形界限。这包括背驮式或冲断带一顶和“卫星”盆地、冲断带地质体内大型的补给峡谷充填物、与局部的后冲断层和时间难定的或者同期冲断层有关的沉积物以及位于朝向前陆的年轻构造及地形之前区域性展布的水系沉积物。在地表环境中，这些沉积物包括盆地内的最粗粒物质，通常为沉积于地形高附近的冲积相和河流相沉积物；在水下环境中，楔顶沉积由典型的块体流和细粒的陆架沉积物构成。

楔顶沉积带朝造山楔变窄并与区域构造走向线平行，长达数十公里。这方面的例子有：广布在犹他州和怀俄明州 Sevier 冲断带 75 公里前缘顶之上的上白垩统一古新统楔顶沉积物；覆盖在南 Pyrenean 隐伏冲断带 30~40 公里前缘之上的始新统一渐新统楔顶沉积物；活动性的北亚平宁冲断带 50 公里前缘之上的渐新统一第四系楔顶沉积物；覆盖在扎格罗斯(Zagros)隐伏冲断带 50 公里前缘之上的渐新统一第四系沉积物；巴基斯坦北部大约 100~150 公里活动性冲断带前缘被年轻的同构造期沉积物覆盖。

楔顶沉积物的主要识别特征是具有许多进积不整合面和不同类型的生长构造(图 4b)，包括褶皱、断层和逐渐旋转的劈理。这些特征表明楔顶沉积物沉积在(或)接近同造山期的侵蚀面和(或)沉积作用面(与埋藏较深的面相反且不同于地面上)，然后发生形变。当它发生形变时楔顶沉积带实际上是造山带的一部分；因此，它对于确定楔状体的运动学史是有用的。在造山楔的前缘部分未发生形变期内，陆上广泛的冲积裙或者浅海陆棚沉积物通常披覆在造山楔的上界面之上。造山楔的内部可能有大型的长期发育的补给型峡谷和峡谷充填。

楔顶沉积物的前缘可因下伏造山楔的特性变化而发生横向移动，这样，它就难以与古前陆盆地系统中的近源前渊沉积带区分。楔顶沉积带的主要识别特征包括：渐进变形、多个局部或不整合面、朝造山楔一侧的沉积厚度区域性变薄和沉积物成分及结构极不成熟。来自前缘前背斜山脊内陆一侧的沉积物可回填到内陆盆地中，局部的湖泊相沉积物可发育在地形上分开的背驮式盆地中。理论上讲，楔顶沉积带应向其与前渊沉积带的分界线方向增厚(图 1c)，但沉积期后变形和楔顶沉积物的混合掺杂会使这一简单的概念模糊化。然而在没有严重侵蚀的造山带内，楔顶和前渊沉积物的区别是十分明显的。

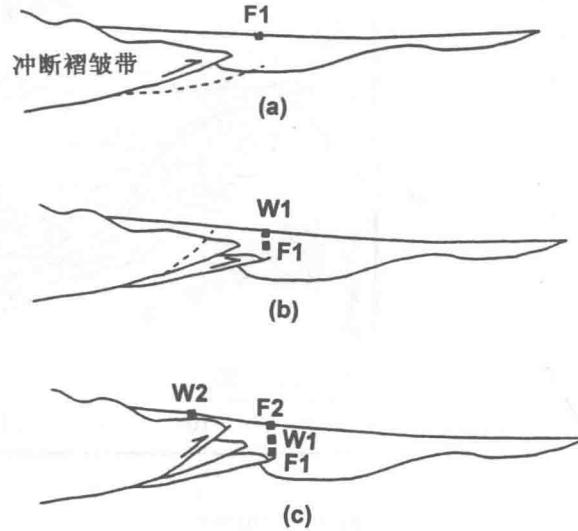


图 5 前陆盆地系统中沉积颗粒(黑方块)的沉积和埋藏示意图。虚线表示活动前缘冲断带位移。(a)颗粒 F<sub>1</sub> 沉积、埋藏在前渊沉积带中。(b)冲断带朝前陆阶进，F<sub>1</sub> 归并到造山楔上盘中，W<sub>1</sub> 颗粒沉积、埋藏在现在的楔顶沉积带中，位于 F<sub>1</sub> 之上。(c)冲断带背向内陆(层序外)阶进；F<sub>2</sub> 颗粒位于前渊沉积带中，而 W<sub>2</sub> 颗粒沉积在楔顶沉积带中。除非这些颗粒遭受造山楔的侵蚀并进入有效的沉积机制中，否则颗粒将保留原始沉积带的特征。这样，楔顶与前渊沉积带的边界随时间相继朝前陆方向迁移。类似地，沉积在前隆和隆后沉积带中的颗粒最终将被前渊颗粒掩埋

## 2. 前渊沉积带

前渊沉积带是沉积在造山楔前缘边部与前隆之间的沉积体，由朝克拉通边缘变薄的楔状沉积体组成，通常是大多数前陆盆地研究的焦点。典型的前渊沉积带宽 100~300 公里，厚 2~8 公里。据大量的文献记载，陆上前渊沉积带接受来自于纵、横向分布的河流和冲积扇沉积体系内的沉积物，而水下前渊由其范围包括从三角洲、浅海陆棚到浊积扇的浅湖、浅海相沉积物体系构成，对边缘前渊沉积带的大量研究已证明，存在一个由早期的深海沉积(复理石相)到晚期的粗粒、非海相和浅海沉积(磨拉石相)的过渡期。这种过渡期很可能反映了这样的事实：边缘前陆盆地系统起源于海沟，当陆壳卷入俯冲带后就变成了浅海或非海相。现代陆壳上的水下前渊以浅海陆棚沉积为特征，水深通常不足 200 米(图 2，图 4b 和图 6)。现代陆上前陆盆地系统的前渊沉积带中发育有大型河流冲积扇以及源于冲断带和克拉通的支流补给的主干河流。陆上前渊凡沿构造走向线变为海下环境的地方，便有大型三角洲发育在过渡带上(图 4a)。

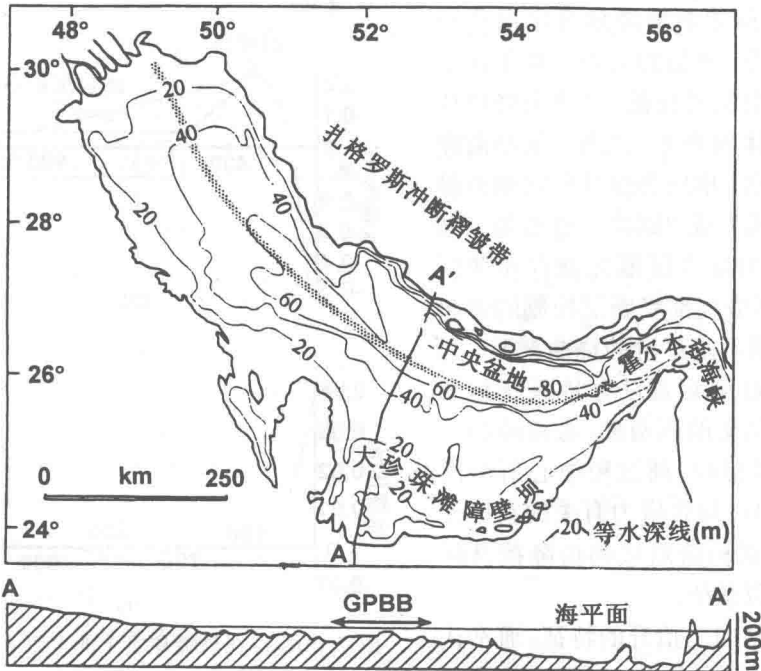


图 6 波斯湾的等水深图和横剖面。其为沿扎格罗斯碰撞造山带西南侧的边缘前陆盆地的浅海部分。阴影线表示扎格罗斯冲断褶皱带大致的前缘和现代的楔顶沉积带。大珍珠滩障壁坝(横剖面上为 GPBB)是与前隆抬升有关的广阔的碳酸盐岩浅滩(据 Kessler, 1977)

前渊沉积物主要来源于冲断—褶皱带，少量来自于前隆和克拉通。在前渊沉积带内的沉积速率朝造山楔快速增大。对许多模式的研究表明：因为由陆壳变厚及造山加载引起的高沉降速率和大量的沉积物供给，在前渊轴部应缺乏不整合面。然而，必须记住，在与远源楔顶沉积带合并的近源前渊中，过水区冲刷侵蚀和广泛发育的不整合面是常见的特征。

### 3. 前隆沉积带

前隆沉积带由沿前渊的克拉通一侧的潜在挠曲抬升区组成(图 1c)。当把前陆盆地看作是塑性幔垫上的薄弹性板挠曲模型时,前隆具有一个与加载轴垂直的  $\pi a$  (无限大板)或  $3/4 \pi a$  (破裂板)的水平宽度,这里  $a$  为挠曲参数,其大小主要取决于岩石圈的挠曲刚度和地幔与盆地充填物间的密度差。若挠曲刚度为  $10^{21} \sim 10^{24} \text{Nm}$ ,密度差为  $800 \text{kg/m}^3$  时的  $a$  变化范围为 26~150 公里,这样,基本的挠曲方程预示:在充填前隆顶的典型挠曲盆地中,前隆带的宽度应为 60~470 公里,高度为数十米到数百米(图 7)。破裂板块和低挠曲刚度板块的前隆比无限大板块和脆性板块的高而窄。

实际上,很难识别前陆盆地系统的前隆,尤其是在古代的这种体系中。原因之一为:前隆为正向地形且具易迁移的特征,迁移时可能遭受区域侵蚀而只剩下一个不整合面。模型研究表明:在来源于冲断带的沉积物前积至前隆抬升区向克拉通一侧的盆地中,附加的沉积负荷干扰了由造山带负荷引起的挠曲,使得前隆隐伏而表现不出具体的形态。此外,某些前隆不能稳定地移动,相反会保持长时期的静止,然后“跳离”或“跳向”造山带。如果在向上挠曲的陆壳区原先就存在薄弱地带,那么可形成局部受断层控制的隆起和沉积中心,而不是平滑的挠曲剖面。与苏门答腊和爪哇弧后前陆盆地系统相邻的现代巽他大陆架的西南部,被前隆抬升区内复杂的隆起和局部沉积中心所分离(图 2)。已证明在与张应力有关的新地壳和重新活动的老构造造成的前隆抬升区内存在张性断裂系统。

由于前隆具向上抬升的特征,通常认为其为非沉积区或侵蚀带,所形成的不整合面常常用来追溯其地史时期的位置。前隆迁移形成的不整合面的主要特征包括:向克拉通方向前渊地层渐次上超在不整合面上,在前隆靠前渊一侧上,地层间断向克拉通方向增大,且数百米厚的原有地层剖面的区域倾角很低( $1^\circ$ )。

沉积物进积至前隆区的前陆盆地系统暗示着此带也可成为大量沉积物聚集的场所。例如, Holt 和 Stern(1994)指出大约 400 米厚的渐新统一中新统的浅海相沉积物沉积在新西兰塔纳拉基(Taranaki)前陆盆地的

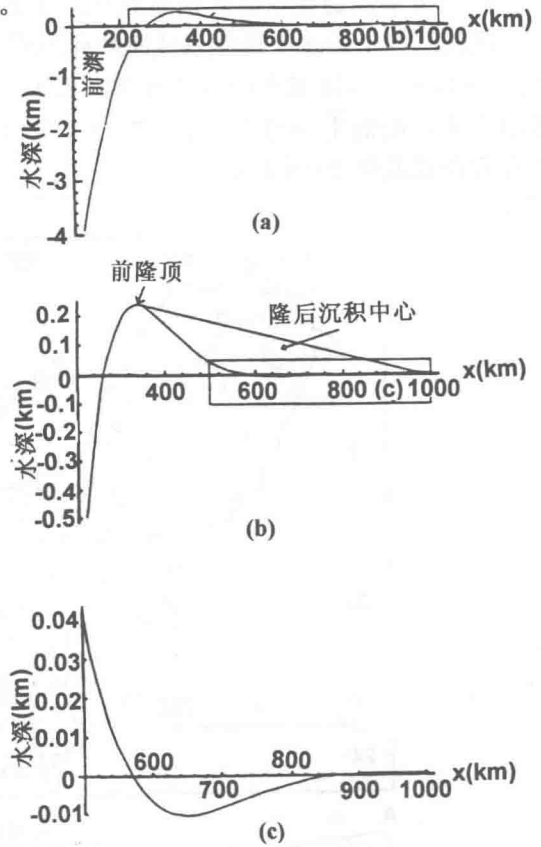


图 7 (a)漂浮在软流层之上的无限大、薄弹性板块的挠曲剖面,其承受住左侧未标出的 100 公里宽、2.5 公里高的矩形地形负荷以及前渊充填到前隆高度的沉积物负荷。负荷密度是  $2650 \text{kg/m}^3$ ,盆地充填物密度是  $2400 \text{kg/m}^3$ ,挠曲参数为 97.6 公里。框出的区域在(b)中进行了放大;(b) (a)中所示的前隆和隆后区的放大图,注意垂向比例的变化。前隆顶部的斜线代表连接冲断带和未变形前陆的指数加积剖面的线性近似。该剖面上的加积将造成厚逾 100 米的沉积,框出区域的细节见图(c)

前隆区中(图 8)。来源于苏门答腊—爪哇弧后冲断—褶皱带和岩浆弧的始新统一第四系沉积物向北东延伸到前渊沉积带界限以外数百公里处(图 2)。美国蒙大拿(图 9a)和犹他州(图 9b)西部内陆的前陆盆地内的下白垩统非海相沉积岩特征表明,沿着线性带地层明显地减薄(但未完全消失),减薄区宽约 50~100 公里,平行于 Sevier 冲断带前缘,这暗示着发育有被同造山期河流相沉积物覆盖的前隆。来自秘鲁和玻利维亚的现代亚安第斯冲断褶皱带的沉积物正在远远超过前渊主体沉降带的区域内沉积,这暗示着有一个埋藏的前隆存在。

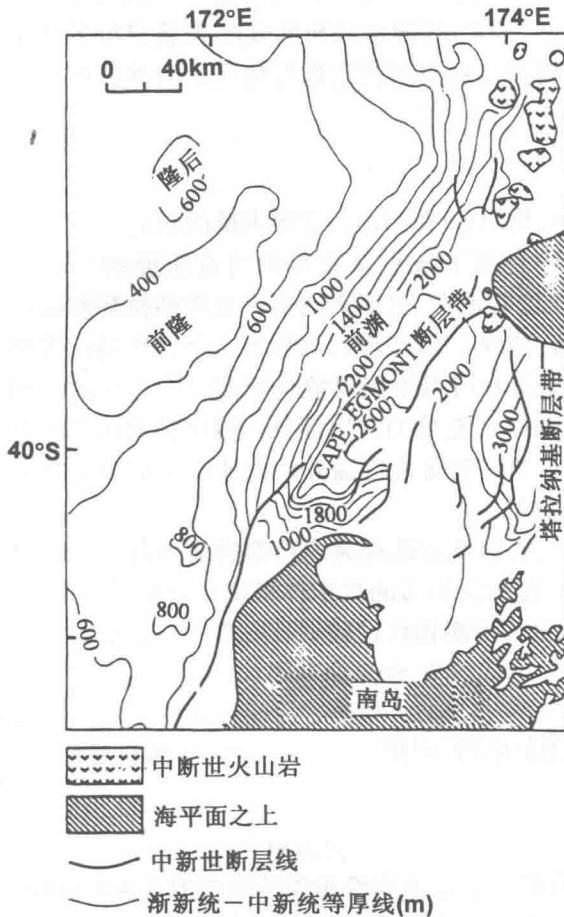


图 8 新西兰塔纳拉基弧后前陆盆地的等厚图(据 Holt 和 Stern, 1994)。注意发育良好的渐新统一中新统前渊、前隆和隆后沉积带

在沉积物未充填至前隆顶的水下前陆盆地系统中,前隆沉积带内可发育局部碳酸盐岩台地。广布的前隆碳酸盐岩台地和斜坡能把前渊沉积带与隆后沉积带和克拉通连接起来。如沿波斯湾海沟西南大珍珠滩障壁坝,几乎全部是面积纯碳酸盐岩沉积物。障壁坝上的水深

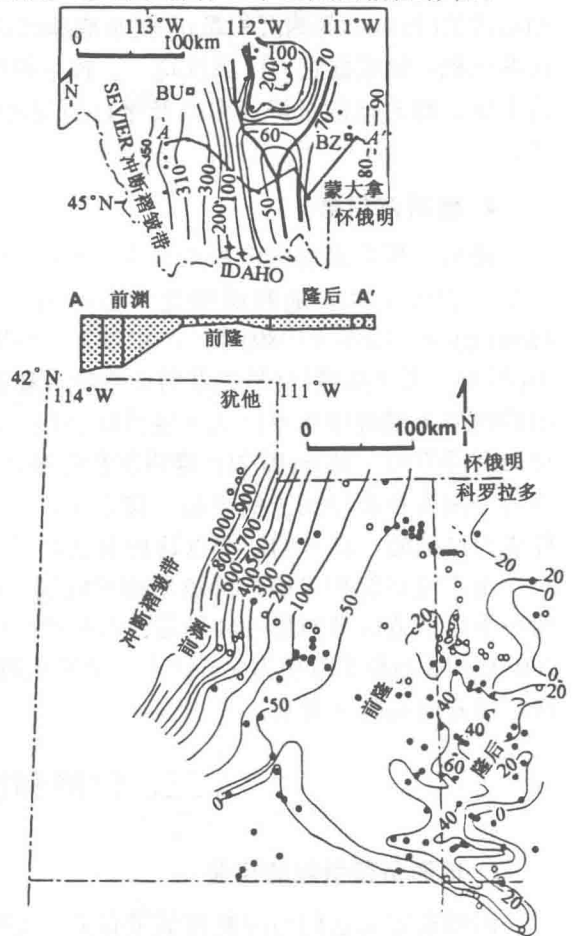


图 9 显示与美国西部内陆前陆盆地中向东倾的 Sevier 弧后冲断—褶皱带有关的前白垩统河流相、湖泊相沉积体系中推测前渊、前隆和隆后沉积带等厚图(单位为米)。(a)美国蒙大拿南部的 Kootenai 组,展现了分叉的前隆轴(黑体 Y 形线)和广阔的隆后沉积带的证据;(b)美国犹他州中东部的 Cedar 山组。零厚度线是侵蚀线而非沉积尖灭的结果。注意隆后区的不规则厚度区(侵蚀削截之前)。黑圆点代表 Currie(1994)和 Craig(1955)的地面剖面资料。空心圆代表 Currie(1994), Craig(1955)和 Sprinkel(1994)的井数据



大约为 10 米，朝着扎格罗斯前渊(最大水深为 80 米)和阿拉伯陆块增加(图 6)，暗示有被削平的前隆地貌形态。在古老的前陆盆地系统中，大型碳酸盐岩沉积体被认为不是前陆盆地系统的一部分，但它们的地层几何形态明显受与冲断褶皱有关的挠曲作用的影响，并可提供区域沉降史的关键参数。

在前渊沉积物未充填至前隆顶的陆上前陆盆地系统中，前隆区应为一侵蚀带，水流流向和流离造山带。若来自冲断带的沉积物前积到前隆沉积带，则形成一个极期缓慢沉积的相对薄的(相对于前渊沉积带)广阔水成和风成沉积区(图 9)。这些沉积物通常被认为是远源前渊沉积，但根据它们区域性均一、较小的厚度、岩相(远源水成和风成)、发育良好的大量古土壤、相对低的沉降速率以及平行的层内时间面等标志可把它们与传统的前渊沉积物分开。

#### 4. 隆后沉积带

隆后沉积带由前隆沉积带与克拉通间的沉积物组成(图 1c)。尽管大量沉积物来源于造山带，但源于克拉通和碳酸盐岩台地的沉积物对海下沉积体系可能具有重要的贡献。Flemings 和 Jordan(1989)称此沉积带为“外围次生盆地”，已证实的实例有塔纳拉基前陆盆地(图 8)、巽他陆棚区(图 2)及科迪勒拉前陆盆地(图 9)。这些隆后沉积的主要特点是：等厚图的图形为围绕中央厚区的区域性闭合线，表明沉积可容空间可能包括前隆向克拉通一侧挠曲沉降带的一部分(图 7)。隆后沉积带被认为是盆地充填的溢出部分，但这种说法是不合理的，因为存在空间上的矛盾，按定义，如果它伸展到盆地范围外，盆地溢出部分又是怎样成为盆地的一部分的？所以这种用法是不可取的。

由于隆后沉积带中沉降速率相对较低，所以地层单元比前渊沉积带的要薄得多，时间面在垂直于造山带的数百公里范围内是亚平行。隆后沉积带的沉积体系以浅海相(水深小于 200 米，图 2)和非海相为主。由于远离造山物源区，沉积物粒径较细。局部粗粒沉积物可出现在抬升的前隆区翼部。

### 三、沉降和沉积可容空间

#### 1. 地形负荷引起的挠曲

因根据定义它们与冲断褶皱带有关，故所有的前陆盆地均受相邻冲断带的“地形负荷”的影响，一般地讲，即在前陆板块中横向几百公里的范围内产生挠曲响应(图 10)。地形负荷引起初始挠曲响应是一个挠曲深槽(前渊沉积带)、前隆与隆后区内极小(一般挠曲刚度约为 10 米)的挠曲沉降区(图 7)。模型研究表明沉积物和水体负荷可通过抑制前隆并促使挠曲进一步扩展到克拉通上，以此来改变这种初始挠曲响应。挠曲沉降速率也可大大地超过造山带前缘抬升速率，由此造就楔顶沉积物的可容空间(图 1c)。

#### 2. 俯冲负荷引起的挠曲

许多前渊沉积带的沉降范围要比明显的地形负荷以及占据盆地的沉积物和水体的范围大和(或)广阔。例如，波一亚得里亚前渊沉积带的相应深度比亚平宁冲断一褶皱带的相应深度大 3~4 倍；该前陆盆地内的挠曲沉降主要是由亚平宁山脉之下 50~150 公里深处密度较大的大洋俯冲板块的下拉作用造成的。因为处在俯冲板块上，所以任何边缘前陆盆地均可能受到大洋岩石圈“俯冲负荷”的影响(图 10a)。然而，随着大陆碰撞以及大陆壳或过渡壳

部分持续俯冲，俯冲负荷的影响将减弱，地形负荷将控制净沉降剖面。

### 3. 动力俯冲板块引起的挠曲

与边缘前陆盆地相反，弧后前陆盆地位于俯冲板块之上的大陆板块上，可能受不规则的、与俯冲板块有关的远场沉降的影响。Mitrovica 等(1989)和 Gurnis(1992)曾指出，俯冲板块会引起快速的长波长(离海沟 1000 公里远)沉降以及上覆大陆板块出现约 1 公里数量级的抬升。这种“动力板块驱动”效应起因于大陆板块底部与由俯冲板块下拉所致的循环慢—楔物质间的黏滞耦合作用(图 10b)。由于这种效应在长波长范围上运作，所以，它能够解释远离由造山—冲断楔所致的主挠曲沉降带的克拉通区内异常广布的浅海相与非海相沉积物沉积的原因。一个可能正在经历短波长冲断驱动沉降和长波长动力板块驱动沉降的现代弧后前陆区的实例是爪哇和苏门答腊东北部的巽他陆棚区，那里浅海覆盖了位于活动的弧后冲断褶皱带和两个群岛上的巨厚(3~6 公里)新第三纪前渊沉积带间陆壳的大部分区域(图 2)。Gurnis 认为太平洋盆地北部与西部浅海、洪水覆盖的广阔陆壳是动力板块驱动沉降的结果；几位学者最近解释了前陆盆地系统远源部分的异常均一沉降是类似过程的结果。

### 4. 挠曲响应的干扰作用

地形、俯冲和动力板块负荷的挠曲响应应以不同的波长运作，因此，它们既能相长干涉也能相消干涉。例如，Royden(1993)证实：与西欧阿尔卑斯山脉有关的前陆盆地系统的沉降是地形负荷剖面与俯冲负荷驱动剖面相互干扰的直接结果。阿尔卑斯前渊沉积带的深度比预料由地形负荷造成的浅，这大概与俯冲负荷所引起的前隆抬升和阿尔卑斯山脉地形负荷所引的前渊沉降的相互干扰有关。类似地，动力板块负荷的长波长挠曲响应可与地形负荷所

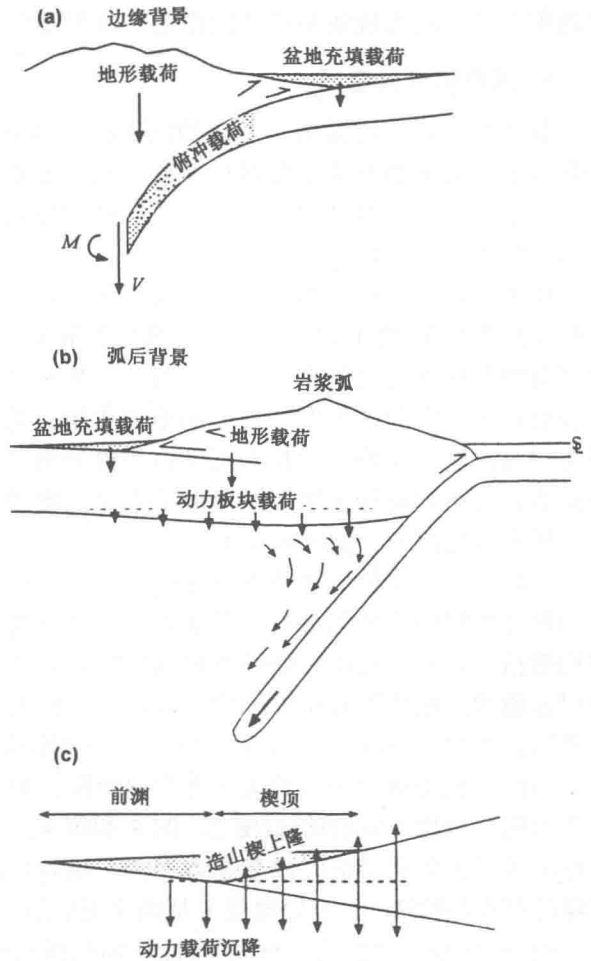


图 10 (a)边缘前陆盆地系统中主要负荷示意图。除地形负荷和沉积负荷外，由垂直剪切力(V)和俯冲板块末端的弯曲力矩(M)造成的俯冲负荷可能存在于 50~200 公里深度处(Royden, 1993)；(b)弧后前陆盆地系统包括地形负荷和沉积负荷以及俯冲板块和上覆慢—楔物质与仰冲大陆板块底面之间的黏滞耦合作用引起的动力板块负荷(Mitrovica 等, 1989; Gurnis, 1992)；(c)楔顶沉积带中的沉积是在区域性负荷驱动的沉降(下指箭头)和造山楔响应于地壳缩短和增厚(上指箭头)所致局部抬升的相互作用影响下发生的。

引起的短波长挠曲响应相干扰。Lawton(1994)指出, 苏门答腊近海的 Tin 群岛(邦加岛和勿里洞岛; 图 2)均是印度板块向下俯冲时动力板块负荷所引起的前隆。苏门答腊弧后区以低幅度的开阔褶皱带随少量地壳缩短和增厚为特征, 海拔高度小于 2 公里的区域地形负荷, 不足以解释厚的上第三系弧后前渊沉积(局部 3~6 公里)。此外, 巽他陆棚为一宽阔的浅海相大陆架, 它的沉没可能是俯冲板块造成的。因此, 认为苏门答腊弧后区域内的挠曲沉降是地形负荷与动力板块负荷共同作用的结果是合理的。

## 5. 沉积物可容空间

如上所述, 前陆盆地系统内的沉积物可容空间主要受挠曲沉降控制。局部的构造隆起和基准面或海平面升降变化对前陆盆地系统中地层所记录的可容空间信号也有贡献。每一个沉积带都应以自身特定的沉降方式和可容空间为特征, 因为它们分别响应于造山带和俯冲体系中的特定过程。

楔顶沉积带中的可容空间是区域负荷驱动沉降与区域和局部抬升(地壳增厚或均衡回弹)互相作用的结果(图 10c)。此外, 局部沉积的楔顶沉积物也可能起因于冲断褶皱带前缘山麓中背斜脊的抬升造成的构造上拱作用。在海水通道边缘的楔顶沉积带中, 海平面的升降变化也会对可容空间的发育和破坏起重要作用。通常, 造山楔的周期性缩短和抬升以楔顶沉积带中与冲断有关的同沉积变形及由于侵蚀和沉积物冲刷到前渊沉积带所引起的不整合面为标志。造山楔前缘未缩短阶段的标志是, 楔顶沉积带中发育连续的不整合面和随后的未同沉积变形的沉积物的区域性上超。

正如以往大量研究成果所证实的那样, 前渊沉积带中的沉积物可容空间主要是由相邻造山楔及其侵蚀物质的负荷以及地表负荷造就的。前渊沉积带也受到造山体遭剥蚀时的区域均衡抬升以及与造山冲断楔前移或前隆向后迁移有关的抬升的影响。海平面的相对变化会引起前渊沉积物可容空间的增大或减少。例如, 整个波斯湾前渊沉积带, 其目前正处于有效的沉积背景(图 6), 在更新世低水位期曾出露地表, 被河道深切。

前隆沉积带通常为—地表出露和侵蚀区, 但许多现代和古代的前陆盆地系统包含有被同造山期沉积物埋藏的前隆(图 2, 图 8 和图 9)。必须指出的是, 与近期的模拟研究相反, 等厚图模式表明构造前隆确实是存在的, 尽管它被来自冲断带的沉积物掩埋。这样, 即使前隆的存在在构造上和(或)地层上是确实无疑的, 但它的地形表现可能缺少或者被夷平。前隆沉积带中的沉积物可容空间的可能起因包括由动力板块引起的区域性长波长的沉降(弧后系统中)和加积到基准面或穿过前隆顶部的平衡泄水剖面的加积作用所引起的沉降。在现代的波斯湾海沟中, 由于现代海平面相对较高, 沉积物还在沿着预测的大珍珠滩障壁坝的前隆抬升区中沉积(图 6)。

对隆后沉积带中沉积物可容空间的形成和保存机制, 目前尚了解得不够。简单的挠曲理论预示了在隆后沉积带中有大范围的小幅度沉降, 其宽度与前隆沉积带(典型的挠曲刚度时是 10 米; 图 7b, c)大致相当。然而, Flemings 和 Jordan(1989)的模拟结果表明, 当沉积物前积至前渊靠克拉通一侧时, 前渊之后区域中的挠曲剖面应是基本平坦的。前渊向克拉通一侧中存在源于冲断带的沉积物(过分充填的盆地)不一定反映二次挠曲沉降区域的存在, 这是因为沉积物可以直接溢出到克拉通一侧的前渊沉积带中。然而, 以凸出的前隆为界的离散的隆后沉积带在海相和非海相前陆盆地系统中均已被证实, 它们拥有厚度达数十米到 600 米以上的沉积物(如图 8 和图 9)。如果可容空间只是由挠曲沉降引起的, 那么这些厚度将比预想的要大一个数量级(图 7)。