

# 第一章 绪 论

熟知中国陆上石油工业发展历程的人都知道，针对侏罗系的勘探已有近半个世纪的历史。五六十年代在背斜找油理论的指导下，我国陆上的大部分油气勘探工作都集中于西北地区，其中有相当多的井都是针对侏罗系钻探的，可称作是针对侏罗系勘探的第一个高潮。这一阶段的勘探在准噶尔盆地南缘、塔里木盆地库车、吐哈盆地火焰山背斜带与潮水盆地相继发现了齐古、依奇克里克、胜金口与青土井等小油田。勘探虽然见了多个出油点，但却无大的发现，侏罗系给地质学家留下了不够朋友的印象。从 60 年代开始，由于松辽盆地油气勘探会战和大庆油田的发现，针对侏罗系的油气勘探在随后近 30 年里几乎近于停滞。从 1989 年开始，伴随着我国陆上第一口科学探索井——台参 1 井在吐哈盆地侏罗系获得日产  $25\text{m}^3$  的工业油流，随后的评价钻探迅速拿下了鄯善—丘陵大油田以来，针对侏罗系的勘探有了突飞猛进的发展。在短短的 10 年间，相继在吐哈盆地、准噶尔盆地、塔里木盆地、焉耆盆地和柴达木盆地北缘等地区发现了一系列侏罗系自生自储或以侏罗系为油源层，以白垩—第三系为储盖层的次生油气藏，探明加控制油气当量近 7.0 亿 t，出现了针对侏罗系油气勘探的第二个高潮。伴随着一系列侏罗纪油气田的发现，源岩地球化学与油 / 气源对比评价研究也取得了突破性进展，突出的表现是认为煤系作为一种源岩，不仅可以生成天然气，而且可以形成大型油气田。这一理论性突破不仅给人们带来认识上的飞跃，也拓宽了油气勘探的领域。在昆仑山—秦岭以北的我国北方地区广泛分布着侏罗纪煤系沉积组合，对其寻找油气的前景，在普遍抱有乐观评价的前提下，存在两种不同的观点：一种认为煤系作为一种生烃源岩已被实践证明，今后应在所有存在侏罗纪煤系的盆地中开展油气勘探工作，以便发现更多的侏罗系油气田；另一种观点则认为，煤系作为一种生烃源岩已经肯定，但要生烃成藏却需要一定的组合条件。换言之，并不是所有的煤系都能形成商业性的油气聚集，煤系油气田的形成和分布是一定的石油地质条件在三度空间组合匹配的产物。

应该说，本专著的作者直接参与了过去 10 年当中，针对侏罗系油气勘探的实践和石油地质综合研究，深深感到侏罗系确实有着丰富的油气资源和发现新储量的巨大潜力。但是侏罗纪煤系油气田只能在特定的构造、沉积、生油与运移条件皆能共生发育的地区形成。可归纳为四大地质条件：一是原盆地的存在；二是煤系沉积时有相对低洼的地形条件与潮湿气候；三是煤系沉积后要有后续盆地的继承发育，以促使源岩进入成熟状态；四是适度的构造挤压，既为煤系所生油气运离母体提供动力，又为油气聚集提供场所。本专著将总结作者在过去几年中对侏罗纪原型盆地恢复研究的成果，特别要对侏罗纪煤系油气田的形成起主导作用的原型盆地与演化进行专门介绍，读者既可以从了解我国西北地区侏罗纪原型盆地的基本特征与分布，又可从中了解原型盆地研究与恢复的技术思路和方法。

## 一、煤系特征与形成环境

在进入正文之前，先介绍何谓煤系及其特征与形成环境，这是一个需要交待，然而在正文的具体介绍中又不宜过多叙述的概念。

煤系( coal measunes 或 coal seam)，有人也称煤系地层，而我们认为煤系已包含了地层的含义。它是指由煤层(或煤线)、炭质泥岩、高炭泥岩与砂泥岩构成的地层组合。既然是组合，就有不同的类型：一种是煤岩与砂砾岩互层占主导的组合，第一种则是煤岩、炭质泥岩、高炭泥岩与泥岩和砂岩为主的沉积组合，第三种则是煤岩、高炭泥岩和泥岩与砂砾岩沉积所占比例大致相当的组合，还有其他的类型，诸如大套砂泥岩剖面中零星夹有煤线。不论将其称为含煤地层或煤系，都是本专著讨论应包含的内容。

地史中的聚煤作用受到古构造、古植物、古气候与古地理环境等多重因素的控制，因而形成煤系的环境虽然相对来说，主要发育在地壳相对稳定和缓慢下沉且气候温暖潮湿，宜于植被繁盛发育的各类沼泽盆地中。但是由于所处古地理位置不同，形成的煤系在岩性组合、煤质与所含生烃组分的数量与质量上又都有很大不同。

广义地讲，沼泽按形成环境可以分为内陆沼泽、近海沼泽与滨海沼泽三种类型。其中我国北方地区侏罗—白垩纪发育的沼泽属于内陆沼泽，也是本专著着重介绍的类型。近海沼泽顾名思义就是在近海的沿岸地带发育的沼泽，包括滨海平原和三角洲平原，如现代的北美大西洋沿岸与墨西哥湾沿岸的滨海平原以及著名的密西西比河三角洲平原等。由于地势低平，又有频繁而大面积的海水侵入和退出，沼泽水体盐度较高，生长着大片森林和近岸芦苇、菅茅等植物，易于形成大面积的泥炭沼泽。聚集的泥炭一般灰分、硫分含量较低。而滨海沼泽则发育在热带-亚热带的滨海浅滩地带，在涨潮时为海水淹没、退潮时又大部分露出水面的带状区域。在那里生长着耐盐的红柳林。在海湾沙坝的后侧，则常常有潟湖，与之伴生的是红柳林沼泽。

内陆沼泽则泛指在广大的内陆地区，受地形和气候的双重作用而形成的沼泽，视气候潮湿程度与降雨量充沛程度和次数、地形起伏程度与土质构成而有草本植物为主、木本植物为主与草木本植物共生等不同的沼泽形成。当气候条件适宜时，植被的分布是广泛的，沉积区与剥蚀区都会有植被的覆盖。但是，由于所处地理位置不同，植被死亡后被保存下来的有机残质构成有很大不同。图 1—1 给出了一个从相对为汇水占据的低洼盆地到相对抬起的边坡和高地的环境中植被生长的示意图。在洼地的边坡和高地部分，生长着茂密的木本植物，它们每年都会开一次花，结一次果，落一次叶。这些落在地下的残果败叶，除了被氧化掉的以



图 1—1 吐哈盆地煤相模式图

(据 Teichmuller, 1982 修改)

外，大部分都会被地表径流带到汇水区，并被沉积物所掩埋，应该说这是生烃较好的物质。而在边坡和高地部位死亡的树干，一般都保存较多的高纤维木质成分，它们被埋藏以后形成的煤岩则富含惰质组分，对生烃是不利的。在汇水的低洼区，除了原地生长的植被而外，还额外地接收了来自边坡和高地区大量有机物的输入。因此，煤系沉积的煤质构成和生烃潜力与边坡和高地区的煤系有着很大的差别。

正因为不同地理位置堆积的煤系不仅在岩性组合与煤质构成上有很大不同，而且在生烃潜力和生油生气能力上也有区别，我们对内陆沼泽按其发育的地理位置不同划分出了高位沼泽与低位沼泽两大类型。

所谓低位沼泽，就是在原始沉积体系的偏低洼部位形成的沼泽。由于是沼泽沉积体系最低洼的区域，在大部分时间里都为汇水所占据，所以往往形成湖沼相占主体的沉积组合，在岩性上表现为泥岩、炭质泥岩与煤层的互层。剖面上夹有的砂岩多为三角洲入湖形成的水下沉积体（图 1—2）。在低位沼泽形成的沉积组合里，发育有三类生烃源岩，一类是常规的湖相泥质生烃泥岩，另一类是高炭泥岩，还有一类就是炭质泥岩和煤岩。湖相泥质岩的生烃特征与评价标准已有多部专著和教材给予论述，并作为陆相石油地质理论的重要组成部分，丰富了石油地质学的理论宝库。后两种生烃源岩则属新类型，是伴随着煤成油气藏的发现而兴起的生烃成藏理论研究分支。按照传统的石油地质理论，煤岩的形成环境是一种相对富氧的开放环境，有机质在埋藏之前，遭受了较还原环境强得多的氧化作用，一些生油组分大部分都遭受了破坏，保留下来的主要是惰性有机质，生烃潜力很差。新的研究成果显示，煤系源岩，包括煤岩和高炭泥岩具有生成商业性油气聚集的潜力。单位源岩生成石油的潜力由于母质类型较差，总的来说不如湖相和海相源岩好，但煤系源岩因量大而在总生烃规模上不比湖、海相源岩小。尤其对于低位沼泽区形成的煤系源岩来说，其自身环境宜于富生烃母质的堆积和保存。另外，偏于高地部位生长的植被随着一年四季的变化，要落叶、结果，这部分残果败叶会随地表径流逐渐被携带到低洼区堆积起来，就加大了低位沼泽区生油组分的丰度。煤岩有机地球化学研究表明，煤系源岩的主要生烃母质是基质镜质体、木栓质体、角质体、壳质体与树脂体。这些组分主要来自于植物皮层，叶片、果核与植物体内渗出物，以及木质纤维在生化阶段经厌氧细菌的强烈降解作用。它们使环境中的脂族成分加入，使得煤岩显微组分富氢，增大了生油的潜力。

另外，低位沼泽区形成的煤系除了源岩的生烃条件好之外，还发育比较理想的生储盖组合。原因是在与汇水湖盆邻接的沼泽区，随着季节的变化与盆地整体抬升和沉降的波动，湖水进退造成三角洲砂体与煤系和湖相泥岩在剖面上多次的进退与平面上的侧向交替，极易形成生储盖三位一体的配置，对于油气聚集成藏是有利的。

高位沼泽指的是在偏于原始沉积体系的边坡和高地部位，由于植被的覆盖和死亡而形成的沼泽相沉积组合，一般以河沼相占主体。在气候温湿的条件下，植被覆盖极其广泛，水系也十分发育。伴随着水系的摆动和迁移，水系岸边的植被便被埋藏。其中的果核、叶片和皮层与渗出物部分被氧化，部分被流水带走，而高大的树干则被埋藏下来形成煤层。这样水系周而复始的迁移和变化，就形成了剖面上砂岩与煤层的互层，并夹少量泥质岩沉积。其中的砂岩多为三角洲水上部分或河流相、洪积相。间夹的泥岩一般不纯，封盖性能也较差（图 1—2, 1—3）。作为生烃母质的煤岩显微组分构成，惰质组分占很高比例，富氢组分含量较低。因而生油潜力较差，且生储盖配置不理想。

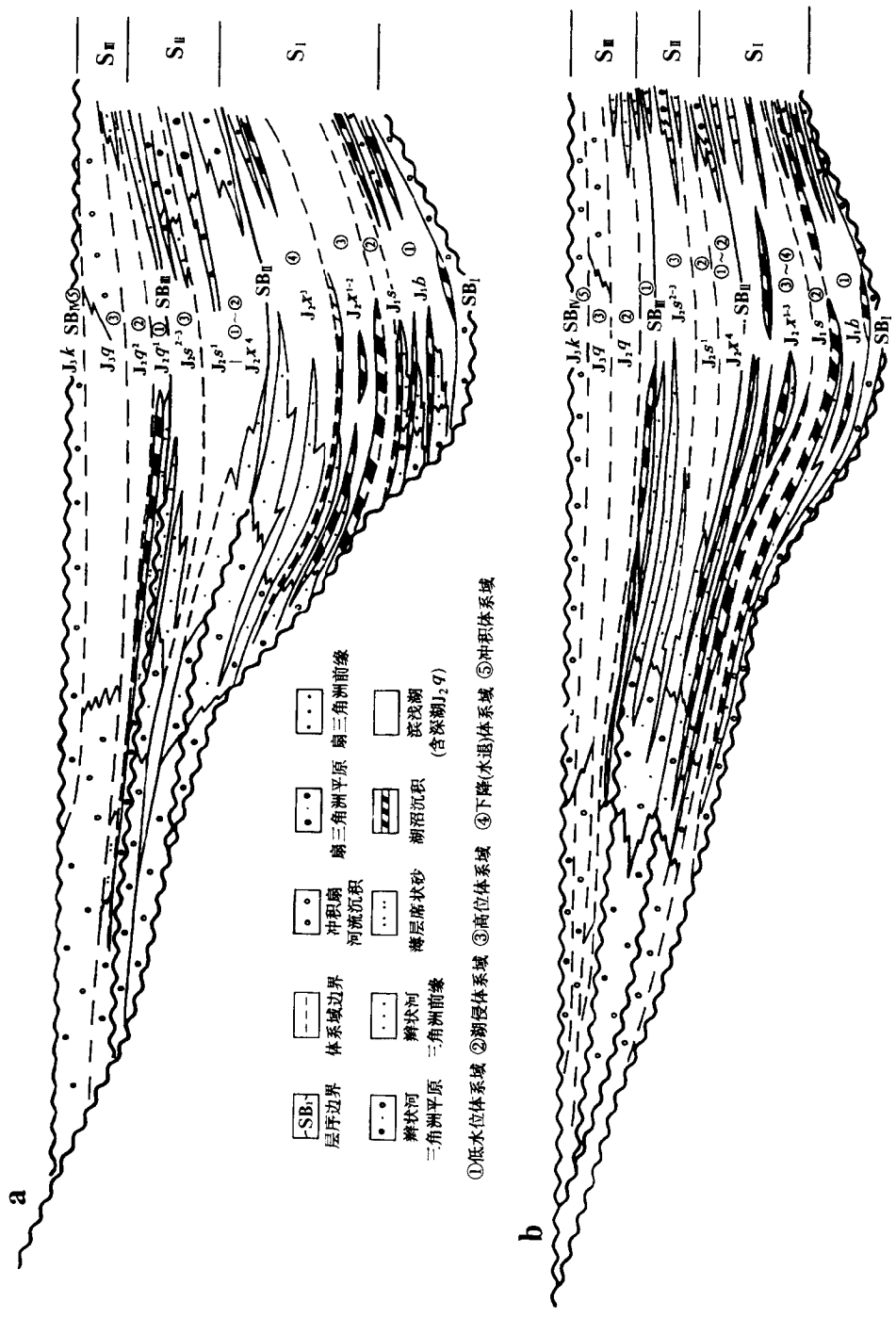


图 1-2 吐哈盆地台北凹陷侏罗纪层序地层模式

(据薛叔浩, 1998)

a. 台北凹陷东部地区; b. 台北凹陷西部地区

沼泽类型	典型岩性组合	沉积旋回 沼泽河	地势与水动力环境	植被组合	生烃显微组合	生烃潜力 ( $S_1+S_2$ ) ( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ )	氢指数 $I_H/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	实例
河成沼泽			潜水面以上的高位斜坡区	蕨类植物 少于 裸子植物	1. 镜质组平均占65%，其中结构镜质体占60%±，基质镜质体占10%~20% 2. 惰质组平均占30% 3. 壳质组占5%	50~100	< 200	洽密拗陷
湖成沼泽			潜水面以下的低位洼地	蕨类植物 多于 裸子植物	1. 镜质组平均占81%，其中结构镜质体占10%~20%，基质镜质体占80%~90% 2. 惰质组平均占10% 3. 壳质组平均占10%	100~400	200~500	吐鲁番拗陷台北地区

图 1—3 吐哈盆地侏罗纪不同成煤沼泽环境的煤质成烃性比较

## 二、原型盆地的含义与研究方法

### (一) 原型盆地含义

本专著的中心议题是中国西北地区侏罗纪原型盆地恢复与演化分析。所以在绪论中就原型盆地的含义提出了作者自己的认识，并基于多年研究经验，就原型盆地的研究方法提出粗浅看法，与读者共同切磋。

原型盆地 original basin 或 prototype basin 系指在原始沉积阶段于特定的构造环境中形成的并在整个盆地发育的大部分时间或以最大的频次为汇水所占据和侵漫的负向区域；地形上包括了低洼盆地及相关沉积体系所能涉及的广大边坡区。原型盆地的概念是相对于大量盆地被改造而提出的。盆地一旦被改造，一系列原始沉积层系或部分被改造，或部分被保留，成为残留沉积层系。既然是残留沉积，所能保留的部分就不再是完整的沉积体系，那么究竟有无完整的生油岩、储集岩与盖层组合的保留就很难肯定。因此，残留沉积的石油地质条件差异很大。

就残留沉积来说，大致可以从成因上分为两种，一种是原始沉积体系的边缘在整体抬升作用控制下被剥蚀。作为体系的主体，沉积中心仍然被保留，也就是湖盆的主体还存在，因而主要湖区及与之相关形成的生储盖组合或完全或部分存在。我们称这种残留沉积为似原始盆地沉积。另一种则是一个或数个相互叠置的原始沉积层系在挤压或断陷过程中，由于地壳挤压诱发下拗或陷落而被保留下来，被保留部分是原沉积体系的一个部分，或生油岩发育，而储层条件欠缺，或储集岩发育，生、盖岩条件不理想，总之缺少良好的生储盖组合。

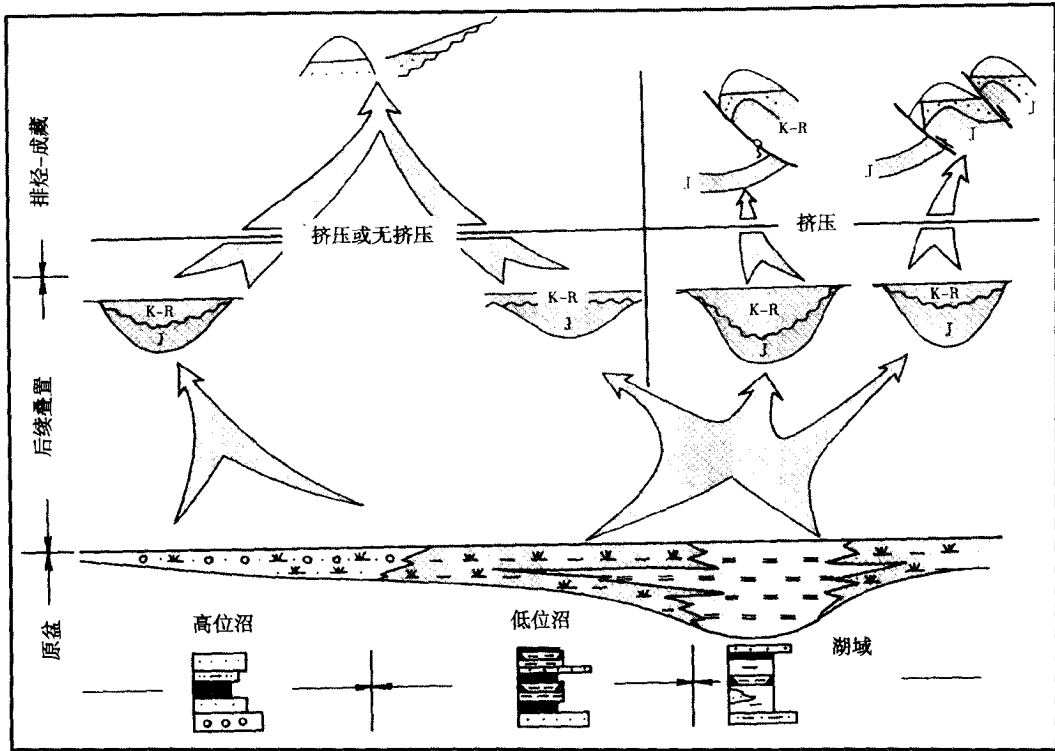


图 1—4 原型盆地及其后续盆地叠加改造与油气成藏示意图

图 1—4 是一张说明原型盆地与被改造后残留盆地内涵的图示。图幅的下半部表示了一期原始的沉积盆地，我们称为原型盆地。这个时期的沉积由于地形影响，汇水深浅不一，可以有一个或数个汇水相对较深、保持时间相对较长的负性洼地。而在边坡部位，形成水上沉积占主体的沉积组合，它是原始沉积体系的一部分，也隶属于原盆地。图幅的中部表示了原型盆地经改造或叠置后产生继承与残留盆地的情况。很显然，那些原始沉积主体部位被后续盆地叠置后，就成为继承叠合盆地，现今盆地面貌基本上反映了原盆地的面貌。而原始沉积的一个部分或因剥蚀残留，或因断陷保存并被后续沉积所覆盖者，就成为改造型盆地或残留叠合盆地。两类盆地的石油地质条件与油气资源潜力有很大差别。

## （二）原型盆地研究方法

原型盆地被继承或被改造以后的石油地质条件差别很大，因此，对于改造型层系开展原型盆地的恢复与演化研究，对于油气勘探的实践来说就显得十分重要。

原型盆地恢复与重建涉及构造运动学、几何学与沉积学的内容，研究的范围涉及露头和地下，需要从多方面进行综合分析。

### 1. 古水流方向的确定

沉积学的研究涉及沉积环境的恢复，其目的是通过环境判明残留沉积在原始沉积体系中所处的地位，是原盆地恢复当中最重要也是最基础的内容。环境判识最基本的工作是通过

露头和井下岩性与沉积相和环境标志特征的识别，综合确定沉积相与环境。很显然，一个点或井孔中的相和环境识别只能反映垂向变化，两个点上的判识和对比，就能建立相和环境在两点连线方向上的变化，而 3 个点以上空间的对比和分析，就可以反映相和环境的平面变化，帮助恢复和确定物源与水系的大致方向与汇水区的可能范围。沉积相与环境的研究方法与判识标准一般在沉积学的教科书和专著中都有介绍和专门讨论，显然不是本专著要刻意介绍的内容。需要特别强调的是，在沉积相和环境空间变化的恢复当中，显然应该把构造的复杂性考虑在内。对于位于大型逆掩或推覆断裂两侧的剖面点之间的沉积相对比与环境变化分析，应该充分考虑构造移位造成的沉积跳相与环境的不连续。

对沉积环境恢复有重要意义的一项野外分析研究工作就是古水流方向的判识。在排除构造变动因素后，能够反映古水流方向的沉积学标志有砾石的排列、层面构造（包括槽模、波痕）与交错层理的真倾向统计。

砾石的定向排列是在牵引水流和定向水流作用下形成的沉积现象。在滨岸地带，由于波浪作用造成了砾石长轴沿岸线平行排列。砾石长轴方向就是岸线的延伸方向，而与之垂直方向就代表了注入水流方向与湖（海）水变深的方向。在河流环境中，砾石长轴的排列趋势或平行于水流方向，或垂直于水流方向。需要借助砾石在剖面上的叠瓦状排列来分析水流流动方向。那些具有长轴又呈扁平状的砾石受单向水流的作用，往往形成叠瓦状排列，砾石的扁平面向着水流的上游方向倾斜，可由此来帮助判明水流的方向。不规则砾石往往以最大的一端固定在沉积物中，细小突出的一端则顺流指向下游（图 1—5）。

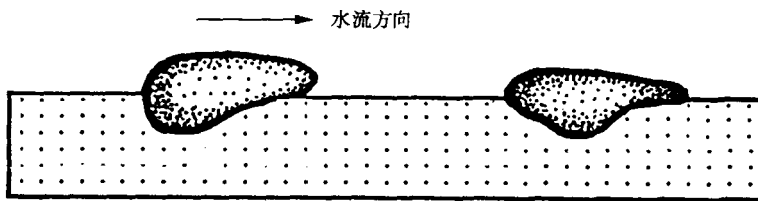


图 1—5 不规则砾石排列对水流方向的指示

同层粗碎屑沉积粒度的平面变化也是帮助判断古水流体系的有效工具。很显然，随着牵引流水系的能量变化，沉积物粒度会表现出递变性，粒度变细的方向应该是水流的推进方向，也就是汇水变深的方向。

通过测量沉积交错层理的倾向也可以判别古水流的方向。在单向水流作用下形成的一组交错层理中，每一个交错层底部与主要岩层界面之间交成一个渐变的锐角，而顶部则呈突变的、交角也略大的方式与岩层界面接触，一系列的交错层的倾斜方向就代表了古水流的方向（图 1—6）。

槽模（flute cast）是水流冲刷岩层表面形成的不对称槽痕（flute mark）被沉积充填后留在上覆沉积底部的突出物。突出物的一端呈不规则图形并收敛，另一端则开放，并自然消失于其他突出物的收敛端或过渡为岩层界面。其中突出物的球形收敛端指向上游，反方向表示了古水流的方向（图 1—7）。

使用砾石排列方向判别古水流流向，必须使用统计数值，以防个别参数造成误导。表达

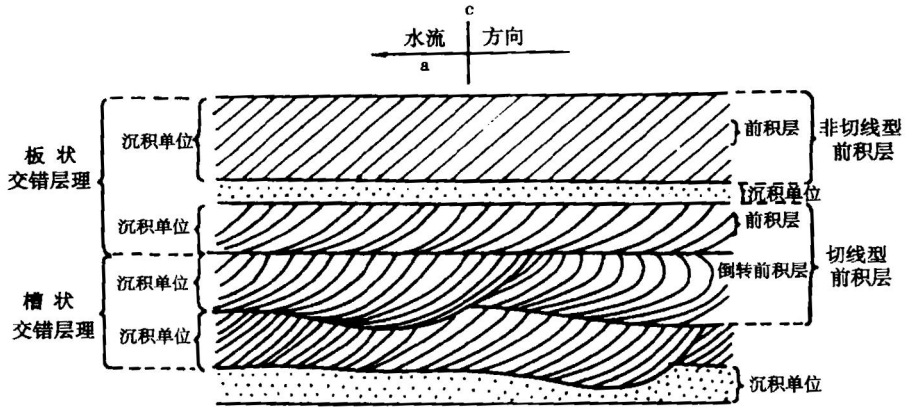


图 1—6 交错层指示古水流方向

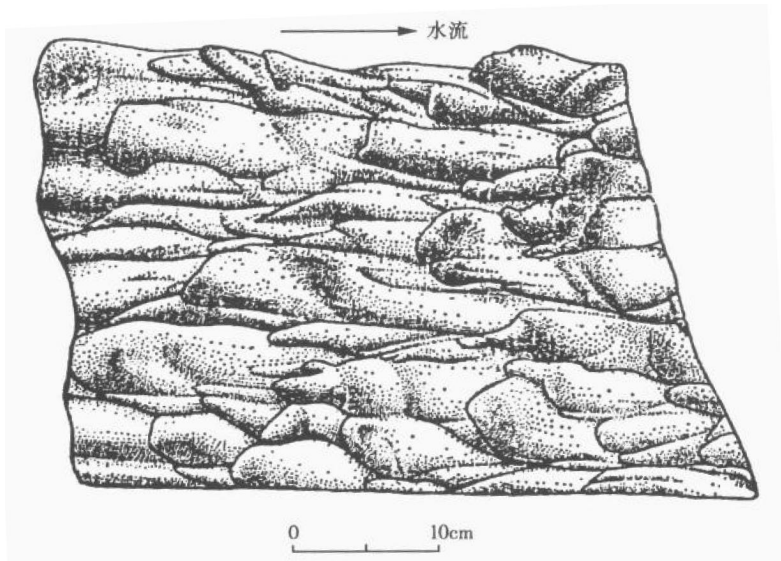


图 1—7 槽模指示古水流方向

的方式是以统计数值为基础，编制玫瑰图，从中确定主体方位。除了一点或一个剖面上多点统计数值的综合使用外，在相同的构造单元上多剖面统计数值的综合使用更能反映古流向的客观性(图 1—8)。

## 2. 原始沉积体系恢复

近年来的油气勘探和研究表明，许多现今为盆地边缘的地区，常常缺少过去盆地某一发育时期的边缘相粗粒沉积，而一些现今起分隔盆地作用的构造隆起带，在过去盆地发展的某一时期则并不存在。这就需要查明当时盆地的沉积范围，恢复其原始沉积体系，为原型盆地的重建提供基础资料。

### (1) 边缘相分析

为了确定盆地的沉积范围，必须识别出盆地沉积时的边缘相。冲积扇沉积代表陆上沉积体系中最粗、分选最差的近源单元；通常在下倾方向上变成细粒、坡度较小的河流体系，然后

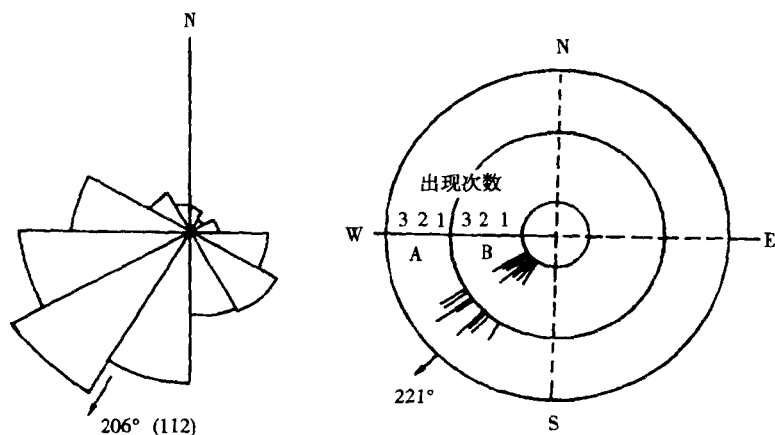


图 1—8 库车河三叠系古水流图

左图为交错层理玫瑰图；右图为沟模、槽模走向，A—槽模；B—沟模

过渡到三角洲或湖沼体系，最后演变为湖泊沉积体系。因此，冲积扇是最可靠的边缘相沉积，冲积扇体系向物源区一侧，大致为原始沉积边界。考虑到可能经受后期侵蚀，某些地方可以进行合理的外推，但外推的范围应是很有限的，因为冲积扇本身就是近源区的沉积。

### (2) 地层接触关系分析

某一地层与下伏和上覆地层的接触关系，反映其沉积背景与后期所经受的改造程度。地层下部的接触情况，可以反映古地貌及早期构造的特点。在沉积盆地内部，地层常为整合接触，反映连续沉积，地势低洼，以垂直升降运动为主。因而，盆地边缘地层间的接触关系是原型盆地研究的重点。盆地边缘地层下部的接触关系多为上超，尤其是当盆地沉积范围扩大时，代表了原始的沉积边界（如经受后期剥蚀，应进行恢复），为恢复原始沉积范围提供了依据。

地层上部的接触关系反映了后期所经受的改造程度。地层上部的接触类型有整合和不整合两种。整合接触反映了地层连续沉积而没有缺失。不整合接触有间断和剥蚀两种。间断表示没有沉积，裸露地表，一般特征是红色粗碎屑、古土壤或根土岩，反映过路沉积或抬升的动力构造情况。剥蚀作用表示地层中的各种沉积相都可能露出地表与上覆地层接触，反映一种沉积后的后期改造作用，因而剥蚀区也是恢复原始沉积体系的重点地区。通过重建残留沉积体系分布，也可以根据保存的地层边界与沉积相带的关系来推测原始沉积边界的位置。

### (3) 构造格架分析

构造格架对沉积有着直接或间接的影响，有时甚至是控制沉积体系分布的主要因素。因此，我们可以用研究较为详尽的盆地或地区的资料来推测相同或相似构造背景下的、资料较少地区的沉积特点，为恢复原始沉积体系提供基础。例如，拗陷型和断陷型盆地就表现出明显不同的盆地几何形态和岩相展布特征，拗陷盆地多表现为整体沉降的特点，显示为连片分布、沉积相带宽缓齐全，原盆地规模较大的特点；而断陷型盆地则表现为分隔性强、成带性差与原盆地规模小的特点，这种构造与沉积的关系为我们恢复原始沉积范围与原始沉积体系提供了有价值的线索。

### 3. 原型盆地三维几何形态的恢复方法

原型盆地经过后期的叠加改造，最主要、最直观的变化是盆地几何形态上的变化，这种变化往往表现为断裂、褶皱和地层剥蚀三个方面的变化。要恢复原型盆地的几何形态，首先要对这三方面的变化进行恢复。现在流行的方法包括平衡剖面技术和古构造恢复技术。平衡剖面技术主要是通过层拉平技术在二维剖面上消除断裂和褶皱所产生的变化；而古构造恢复技术则是在二维剖面恢复的基础上重建三维几何形态。

#### 1) 平衡剖面技术

平衡剖面是将剖面上变形的构造通过几何原则全部复原的剖面。在褶皱和冲断构造中，通过把褶皱的岩层展平和把被断层错断的岩层复位，使所有岩层都恢复到初始的未变形状态。一个构造剖面能否通过几何原则使其复原，是检验剖面正确性的一种手段。Elliot (1983) 对平衡剖面的概念下了一个严格的定义，首先它应该是可以接受的剖面，即剖面上的构造应是在露头上观察到的或者证实是确实存在的，这是从地质学含义上所作的限制；其次它必须是合理的剖面，即能够将剖面恢复到未变形状态。这种既合理又能够被接受的剖面就叫做平衡剖面。

平衡剖面是根据物质守恒定律推出的，也就是说，变形前后岩石总体积应保持不变。对于一条剖面而言，剖面的缩短与加厚是一致的，否则就不能保持剖面面积的守恒。平衡剖面正是根据这一原理提出了一系列几何法则，成为平衡剖面技术的基本原则。

(1) 面积守恒，是指剖面上由于缩短所减少的面积应等于地层重叠所增加的面积（图 1-9）根据这一原理可以计算剖面上的缩短量或滑脱面深度，其前提是应先推算出二者之一。在滑脱面深度未知时，可以用缩短量和剩余剖面来计算（图 1-9）。缩短量可以通过将岩石拉平求得。由于缩短量  $S = L_a - L_c$ ，面积  $A_2 = A_1 = (L_a - L_c) \times$  滑脱面深度，所以滑脱面深度 = 面积  $A_2 / (L_a - L_c)$ 。

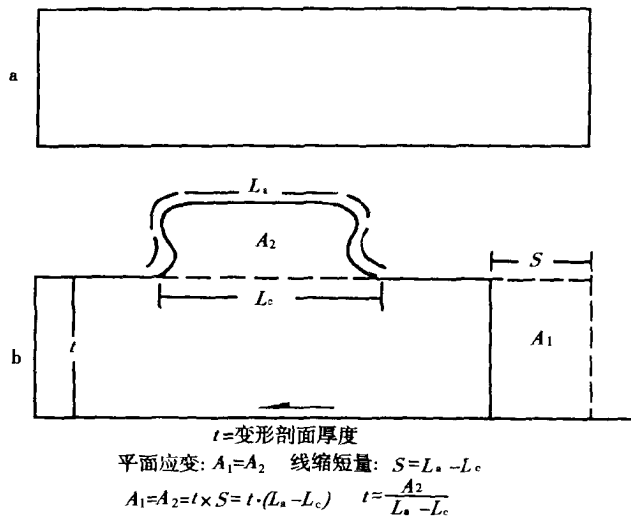


图 1-9 同心褶皱下滑脱面深度计算方法

(据 Dahlstrom, 1970)

(2) 层长守恒，指各层的长度应当一致，也就是说恢复后的层长应当相等。在具体测量层

长时，首先选择参照线，也称固定线或钉线（pin line），只有在两个参照线之间的地段才能保证层长的一致。参照线的选择不应该穿过滑脱面（图 1—10）。

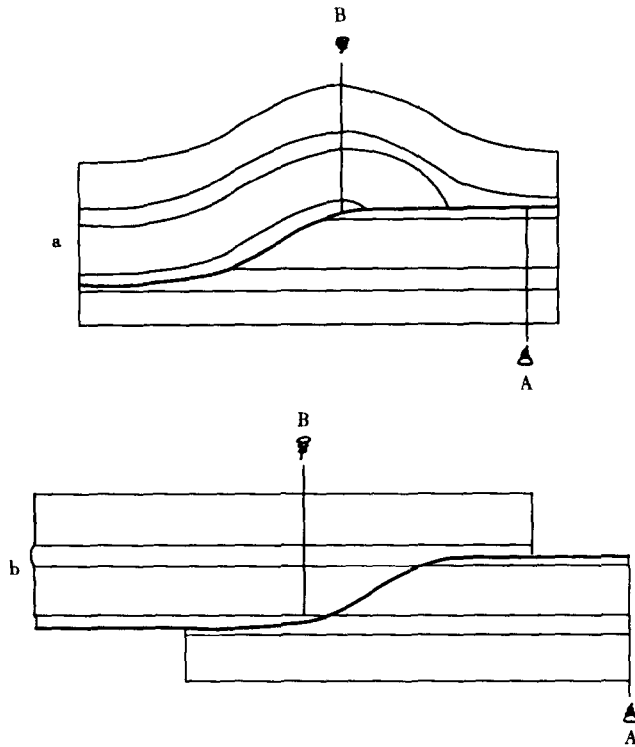


图 1--10 一个简单断坡的复原图

a 变形剖面 ,b. 复原剖面

(3) 位移相等，即沿同一断层各对应层的断距应当一致。断距不一致的情况可以用多种方法来解释，如断层向上发生分叉，这样各分支断层的断距之和应当等于主断层的断距。断层的位移也可以由向上的褶皱所代替。

平衡剖面是一种计算地壳缩短量或伸长量的重要技术方法。通过平衡剖面技术，可以把已经构造变形的地层恢复到变形前的情况。因而，这一技术是原型盆地研究的基本方法之一。

## 2) 古构造恢复技术

构造变形是在三维空间中发生、发展和演化的。经历过多期次地壳运动的地区，叠加了不同期次的构造形迹，形成了错综复杂的构造景观。平衡剖面技术从剖面上确定了解释的合理性，但无法满足人们从平面上及三维空间上认识盆地演化过程的要求，也不能为原型盆地及盆地几何形态的变迁提供直观的依据。古构造恢复技术就是通过编制不同时期古构造图的方法，消除后期构造现象的叠加，恢复某一时期盆地的三维构造特征。运用古构造图编制方法可以将各主要地质时期所形成的断裂、褶皱以及地层剥蚀逐一加以恢复，利用界面长度守恒原则，定量地恢复出盆地的几何形态。

### (1) 古构造恢复的基本思路与工作流程

造成盆地几何形态变化的因素主要有三方面：一是剥蚀作用；二是褶皱作用；三是断裂

作用。古构造恢复的主要内容包括两个方面，其一是地层剥蚀量恢复，其二是地层缩短量恢复，主要包括褶皱缩短量和断层缩短量。因此，古构造恢复的基本思路是选择适当密度的、基本垂直于构造轴向的区域地震剖面建立骨干测网，以大的构造幕对应的时间段为主要界面，采用恢复界面长度守恒原则，对剖面上断裂、褶皱及地层剥蚀进行逐一恢复，通过一系列剖面成图到一套平面成图，建立盆地构造与构造运动的动态对应关系，恢复研究对象的平面原始几何形态。

古构造恢复的工作流程可归结为五步（图 1—11）：

第一步：资料收集及整理。收集各类钻井资料、地震资料和周边露头资料，对地震剖面进行优选、连接、标定。

第二步：全剖面平衡解释和全层位闭合。主测线按统一速度转换成地质大剖面，编制现今构造图和残余等厚图。

第三步：分析挤压方向，确定钉线。

第四步：制作归位恢复剖面。遵循岩层厚度不变、剖面中恢复界面各标志层的长度不变原则，对剖面进行剥蚀量、断层缩短量和褶皱缩短量的恢复。连接人工联络线并对归位恢复剖面进行修改和调整。

第五步：编制各时期古构造图和古厚度图。

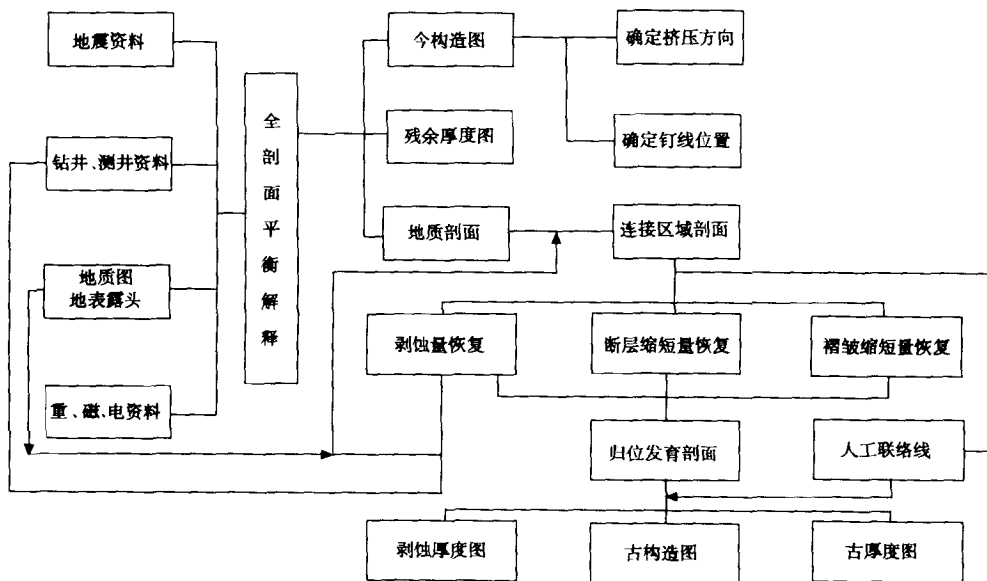


图 1—11 古构造恢复工作流程图

## (2) 古构造恢复的几项重要技术

### 1. 骨干测网地震资料的全层位平衡解释与全区的闭合成图

全层位意指地震剖面可供区域上追踪对比的反射界面，一般为区域不整合面、假整合面或具有标志意义的物性界面（如煤层反射）；解释层位的选择主要决定于认识程度与研究精度。平衡解释是指单剖面上解释层位在二维空间变形量守恒，即在平衡的观点指导下进行变形几何形态解释，力求断层两盘断距守恒（对非同生断裂）与褶皱产生的地层缩短量守恒。在

全区闭合成图方面，用统一速度成图比变速成图效果更好，变速成图对于某些局部构造反映是客观的，而统一速度成图对于考虑区域性的构造面貌与地层变化以及盆地几何形态变化则更有效、更实用。

### Ⅱ. 构造应力方向的判定与古构造恢复钉线的确定

在某一特定的构造演化阶段，应力场是相对统一的。地质人员可以在运用多种方法确定构造应力场的基础上，与地震解释人员合作，通过分析解释剖面上断裂与褶皱的表现形式，对应力性质与方向作出客观的判断。但是，由于局部边界条件的变化，会出现局部变形与区域统一变形不相吻合的现象，从而导致解释和分析上的困难。对这种现象要求技术人员要具体情况具体分析。有了对区域构造应力方向的判定之后，在进行古构造恢复时，尤其是压性古构造恢复时，需要选择一个不动位置，然后将所有变形以此为参照点，作相对的运动学归位。我们将一系列参照点的连线称作钉线。所以古构造恢复的第一步是确定古构造恢复钉线的位置。一般来讲，对于单方向构造变形来说，钉线应设在盆地变形最小或无变形的一侧，原则上应考虑钉线走向与主应力方向垂直，古构造恢复只向各自主应力相反方向归位。对于双方向构造变形，需考虑将钉线设在中间部位，古构造恢复分别向应力相反方向作变形恢复。除非发生以走滑为主的构造变形，一般多方向构造变形的情况不多。

### Ⅲ. 地层剥蚀量恢复

在古构造恢复时，地层剥蚀量恢复难度最大。由于对变形强度与幅度的理解有人为因素的参与，加之资料质量不同，导致地层剥蚀量与平面范围的恢复存在较大变化。在恢复中要采取多种方法进行分析，以便所得结果彼此印证，以求良好效果。常用的地层剥蚀量的恢复方法有以下几种：

#### i. 构造横剖面法

根据地层厚度的变化趋势，在剖面上依势恢复剥蚀量（图 1—12）。

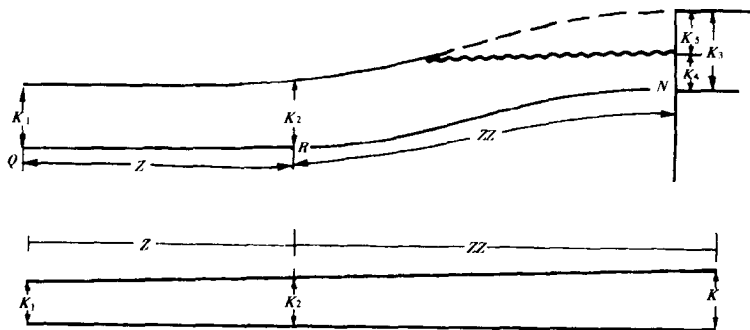


图 1—12 横剖面法恢复地层剥蚀量

从剥蚀情况看，构造高部位遭受剥蚀，但构造低部位地层保存完好，因此可根据向斜部位的原始地层厚度，恢复背斜顶部被剥蚀的地层厚度。

设向斜部位平缓地段  $QR$  的长度为  $Z$ ； $QR$  两点处的地层厚度分别为  $K_1, K_2$ ，背斜顶部  $N$  点距  $R$  点的弯曲段长度为  $ZZ$ ； $N$  点残余地层厚度为  $K_4$ ，则  $N$  点原始地层厚度  $K_3$  和被剥蚀地层厚度  $K_5$  分别为：

$$K_3 = (K_2 - K_1) / Z \times ZZ + K_2$$

$$K_5 = K_3 - K_4$$

由公式可计算剥蚀段上任一点被剥蚀的地层厚度。

#### ii. 成熟度法

成熟度法是基于连续埋藏的剖面上，随着深度加大，温度升高成熟度指标应呈现出线性变化的趋势这一基本原理，将热解和有机质热成熟度资料与深度的关系曲线所表现出的不连续现象引入到古剥蚀厚度恢复的一种方法（图 1—13）。

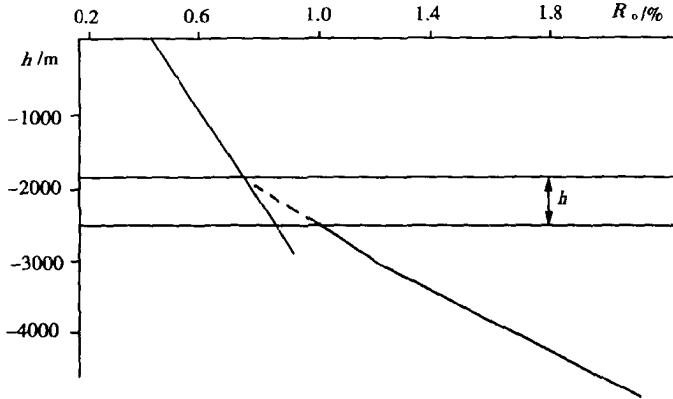


图 1—13 镜质体反射率估算地层剥蚀量

在剥蚀的层面上、下  $R_o$  值会有明显差别。在深度— $R_o$  关系曲线上，会出现明显的斜率差别与数据点的跳跃。对于无剥蚀剖面， $R_o$  是一条连续曲线，故可以将不整合面以下的  $R_o$  曲线按斜率趋势上延，至与上部  $R_o$  曲线相交为止。这时相交点至跳跃点之间的厚度可以近似地看作是剥蚀厚度。

其他用成熟度指标估算剥蚀厚度的方法也与此类似。

#### iii. 压实法

压实法用声波时差或孔隙度突然变化来识别地层的沉积间断，并估算其剥蚀量。其方法与成熟度法相同。

#### iv. 矿物法

磷灰石裂变径迹、锆石裂变径迹、粘土矿物等资料也可以进行剥蚀量的计算。这些参数在地层埋深过程中变化是连续、渐变的。如果出现沉积间断，显然会导致这种连续性的变化，据此可以估算地层剥蚀量。

在实际应用中，对于能够通过地震剖面识别出起始剥蚀点的部位，多采用横剖面法计算剥蚀量，如有条件可以辅以成熟度法及压实法进行验证。对于区域隆升导致的大范围剥蚀，则只能通过后三种方法估算地层剥蚀量。

#### v. 地层缩短量恢复

主要用平衡剖面的方法恢复由断层和褶皱所造成的地层缩短量。

#### (3) 古构造恢复的质量监控

古构造恢复中地层剥蚀量恢复、断层恢复及褶皱恢复三个环节中人为因素较多。所恢复

出的各地质时期盆地的几何形态是否可靠，直接关系到最终结论是否正确，尤其是前一期恢复如果存在较大的误差，会影响到下一期恢复中推覆距离的计算。为此，必须进行恢复效果分析。这里介绍两种方法，分别用在不同的工作环节中进行质量监控，以保证古构造恢复的可靠性。

#### 1. 采用人工联络测线闭合方法，在剖面恢复中进行剥蚀地层恢复量校正

借用常规构造解释中主测线与联络测线相闭合控制追踪同一相位的方法，在剖面恢复阶段作人工联络线，将诸骨干测线恢复结果标注并连接起来。联络测线的方向可以垂直于骨干测线，也可以与骨干测线成一定角度。需要说明的是确定人工联络测线走向应尽量避免构造复杂的区域（段）。如果各临近骨干测线剥蚀地层恢复出现不应有的误差（过量或不足），人工联络测线会显示出协调的起伏。反查联络地震测线就可以判断这种起伏产生的原因是岩相古地理因素还是骨干测线恢复地层误差因素，若是后者，则需重新考虑最初的恢复方案。

#### 1. 采用古断裂组合方式，进行地层缩短量恢复校正

将各时期恢复好的地质剖面进行平面断裂组合，如果同一条断裂在相邻剖面上地层缩短量恢复不合理，古断裂在平面上会出现参差不齐的锯齿状或不规则的弯曲，返回剖面恢复步骤加以调整，直至断层走向符合地质规律。

综上所述，古构造恢复的基本思路、前提条件与基本步骤均具有可操作性，在挤压型含油气盆地综合研究与原型盆地研究中已取得良好的应用效益；但由于各挤压性盆地各自的特殊性，恢复中会出现许多特殊的问题，需加以具体分析，采用不同的对策。

古构造恢复方法可以确定不同时期的古构造形态，从而准确地恢复古构造环境，分析古构造的动力学机制，因此是原型盆地恢复的重要方法之一。

### 4. 盆地类型与形成机制研究

盆地类型与形成机制的研究是原型盆地研究的重要内容之一，它既建立在上述各种分析的基础之上，又有着自己特有的内容与方法。

盆地类型的研究主要建立在盆地分类方案之上。现今的沉积盆地分类主要以板块构造学说为基础，如 Dickinson(1974) Bally(1975)、Kingston(1983)和 Ingersoll(1995)等。有的学者也提出了以工业应用为主导的盆地分类方案，如 Klemme(1980) 但究其基础都是以沉积盆地所在的板块构造位置、地壳类型和盆地形成的地球动力学环境为划分依据的。

中国大陆的构造演化具有长期而复杂的演化历史。特别是中生代以来，中国的主要块体已大多拼合，陆内构造与盆地的演化已成为特色。这种构造既与周边的板块构造演化有重要关系，又受已经形成的中国大陆构造的影响。这也是朱夏等人提出“变格构造”的原因。因此，对中国陆内盆地的分类研究应考虑更多的因素。除了由大陆边缘板块构造运动的远程效应所形成的区域构造应力场外，盆地的基底性质和相对于构造活动带与稳定地块的大地构造位置也对盆地类型和演化有着十分重要的影响。在进行盆地分类研究时，应考虑以下主要内容：

#### (1) 盆地的力学性质

主要受控于当时区域构造应力场的特征，如拉张、挤压和剪切等。剪切因走滑方向的不同又可分为剪切拉分和剪切挤压。

#### (2) 盆地几何形态

它与盆地的力学性质密切相关，主要反映在剖面形态上。如拉张情况下主要为断陷，挤压情况下主要为拗陷（图 1—14）。断陷情况又可根据边界断裂的发育情况分为双断型和单断型（即箕状断陷）。

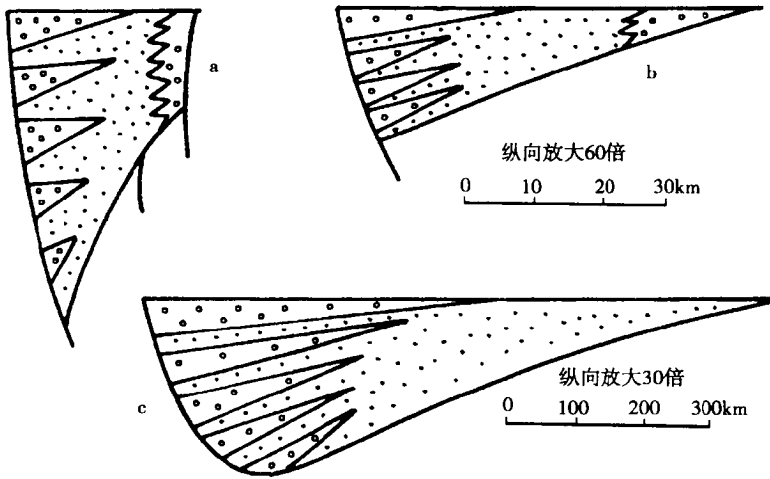


图 1—14 典型盆地剖面形态特征示意图

a. 拉分盆地 ; b. 裂谷盆地 ; c. 前陆盆地

### (3) 盆地所处的大地构造位置

主要指盆地相对于造山活动带和稳定地块的构造位置。一般可分三种情况：位于造山带上、位于稳定地块上以及位于造山带与稳定地块接合部位。

### (4) 盆地的基底性质

与盆地所处的大地构造位置紧密相关，从大陆克拉通化的角度看，主要反映了基底固结时间的差异。古老地块固结的时间要比造山带早得多，而造山带与造山带之间也有褶皱回返早晚的区别，如加里东期形成的造山带与海西期形成的造山带在构造活动性上就存在着差异。

### (5) 地层层序和沉积建造特征

它是以上 4 点的综合反映。

盆地形成机制是盆地原型研究的重要内容之一。盆地的沉降机制是盆地形成的主要驱动力。建立在板块构造学说基础之上的盆地形成主要有三种基本机制：①单一的热机制；②地壳或岩石圈厚度的变化；③岩石圈的加载与卸载作用。

Ingersoll(1995)总结了盆地的成因动力学，通过地质观测和模拟确定了 26 种盆地的沉降机制（图 1—15）。这种研究为盆地类型的划分奠定了基础。

盆地沉降机制的定量研究方法是进行沉降历史的分析和沉降曲线的计算与绘制。

沉降历史分析是盆地分析中的一种重要手段，它包括两种技术：一为“地史分析”，一为“回剥分析”。前者通过一系列校正，如去压实、海平面变化和古水深校正等，绘出总沉降曲线。后者则根据一定的地球均衡模型，在总沉降中去掉沉积负荷所引起的沉降，给出构造沉降的历史。

构造沉降是地壳伸展、挤压、冷却、构造负荷等作用引起的，这些因素也正是盆地形成的

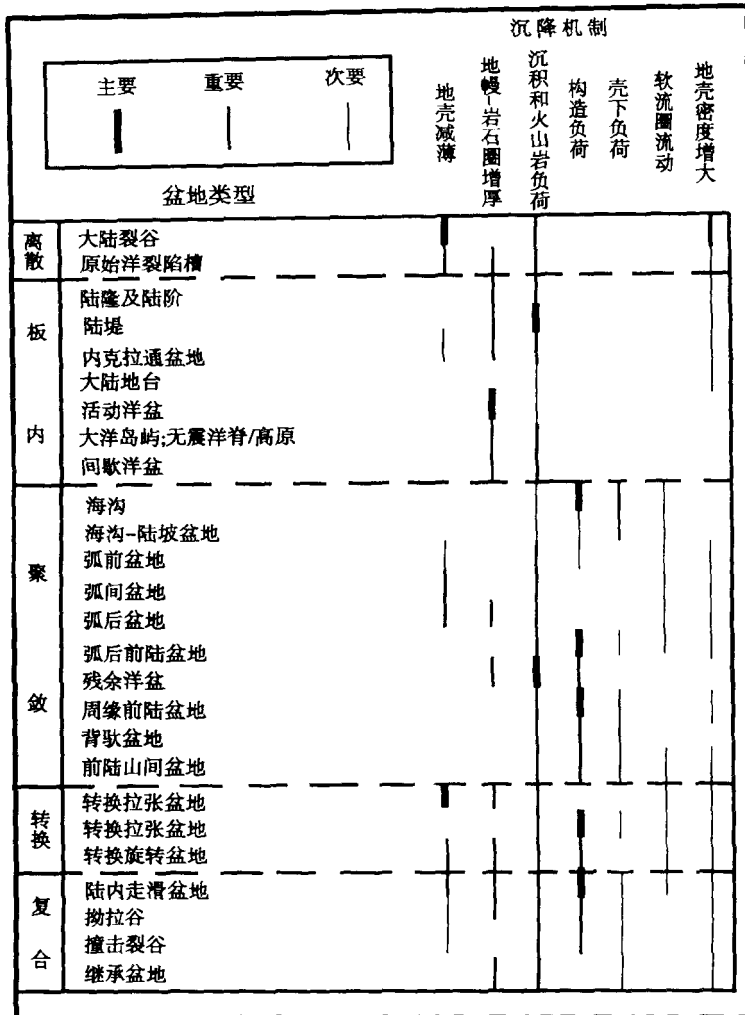


图 1—15 26 种类型沉积盆地的沉降机制

(据 Ingersoll 和 Busby, 1995)

主控因素。因此，构造沉降形成了盆地，构造沉降的阶段性和旋回性反映了成盆作用的期次性。构造沉降曲线可以提供盆地成因的地球动力学信息，因为不同类型的盆地，构造沉降曲线的特征不同。如裂谷型盆地的构造沉降曲线表现为凹面向上的特征，显示了由热冷却引起的沉降成因。又如前陆盆地的构造沉降曲线表现为凸面向上的特征，显示了由挠曲负载所引起的沉降成因（图 1—16）。每一凹面或凸面向上的沉降曲线段都代表了盆地演化发展进程中的一个阶段（Vail 等, 1991）。

原型盆地的研究对油气勘探有着十分重要的意义。众所周知，盆地是油气生成的基本单元。然而油气是一种流动矿产，它是在盆地的形成和演化中生成、运移和聚集起来的。油气盆地的基本条件之一是它在盆地的形成演化中沉积了能生成足够数量油气的烃源岩。因此，不同时期、不同类型的盆地具有不同的烃源岩的沉积与展布特征。早期盆地烃源岩的油气生成和运聚不但依赖于自身盆地的发展，也受控于后期盆地的叠加与改造。现今盆地是最后一