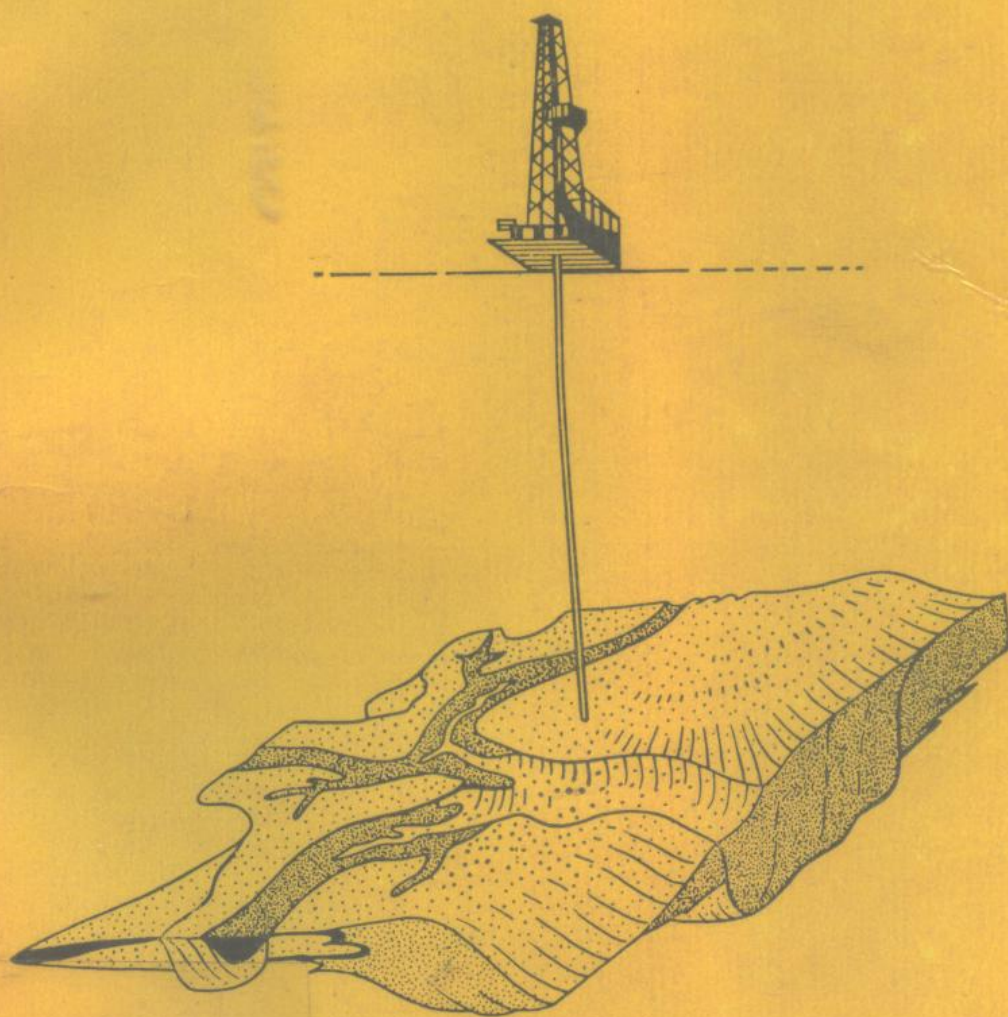


[美] W.E. 盖洛韦 D.K. 霍布德 著

陆源碎屑沉积体系

在石油、煤和铀勘探中的应用



石油工业出版社

(13)

4

陆源碎屑沉积体系

——在石油、煤和铀勘探中的应用

[美]W.E.盖洛韦 D.K.霍布德 著

顾晓忠 顾家裕 高延新 译

陈 景 山 校

石 油 工 业 出 版 社

内 容 提 要

本书共十四章。作者综合成因地层学、水文学、地球化学和大地构造学等方面的新理论和新方法,对各种陆相沉积体系进行了系统的论述;作者强调了盆地水文学,指出只有把成因相和地下水流体系结合起来,才能有效地勘探和开发石油、煤和铀等矿床;最后作者详细地讨论了沉积体系及盆地水文学研究在石油、煤和铀勘探中的应用,内容丰富,确具指导意义。

可供从事石油、煤及铀勘探开采的工程技术人员、有关院校师生参考,也可用作有关专业课程的教材。

原书第一、二、三、六、七、八章顾家裕译;第五、十一~十四章顾晓忠译;第四、九、十章由高延新、顾家裕合译。全书由陈景山统校。

W. E. Galloway D. K. Hobday
**TERRIGENOUS CLASTIC DEPOSITIONAL
SYSTEMS—Applications to Petroleum,
Coal, and Uranium Exploration**
Springer-Verlag New York Inc.
1983

陆源碎屑沉积体系
——在石油、煤和铀勘探中的应用
〔美〕 W. E. 盖洛韦 D. K. 霍布德 著
顾晓忠 顾家裕 高延新 译
陈景山 校

石油工业出版社出版
(北京安定门外安华里二区一号楼)
地质出版社印刷厂排版
北京顺义燕华营印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行



787×1092毫米 16开本 23 $\frac{1}{2}$ 印张 575千字 印 1—2,000
1989年11月北京第1版 1989年11月北京第1次印刷
ISBN 7-5021-0326-0/T·E·319
定价: 5.85元

前 言

即使根据最悲观的预测，大自然所赋存的燃料矿物的储量或可采部分，在不久的将来——21世纪内，仍足以供应世界上所需要的大部分能源。但为了保持并且（如果可能的话）增加这种储备，就必须采用日益先进的勘探理论和技术。世界上大部分燃料矿物资源蕴藏在沉积岩中，因此，一切有助于描述、了解和预测主要沉积单元的外部几何形态和内部特征的方法和理论，都会有助于煤、铀和石油的发现和开发。

虽然人类渴望重力、风或太阳能提供可再生的、又无污染性的能源，但是，广泛地利用这些能源体系还很遥远，所以，即使常规的非再生燃料矿物资源的相对意义会随时间发生变化，我们还是必须充分认识其重要经济意义。例如，十年前对铀的预言毫无例外都是乐观的，但在十年后的80年代初期铀的前景已十分暗淡，当然也未必会保持永久的萧条。铀能否达到初期预料的水准尚需继续观察。另外，仍然存在着核废料处理问题和公众认可问题。虽然在发电方面核聚变反应堆最终可能排除对铀的需求，但在今后的几十年中，已有的和即将投产的核电站仍将继续需要用铀作燃料。

本书在某种程度上是一本综合性的著作。其对象是从事实勘探和开发的地质工作者，他们必然是某种意义上的多面手。然而，由于本书侧重于过程和原理，所以也可以作为资源地质学课程一本合适的教科书。

我们人为地把煤、铀和油气归为一组似乎是不合适的。但是，我们的基本前提是这三种燃料矿物具有共同的成因特征，而且控制它们分布的沉积学原理也基本相似。我们两人都从事过这三种燃料矿物的地质工作。我们已发现的重要因素包括沉积过程和沉积环境及其形成的成因相，沉积体系内部成因相之间的关系，由循环地下水引起的沉积后早期变化，以及在沉积盆地受大地构造和区域水文的控制而演化时，在深处发生的变化。

在许多例子中，古环境因素明显地控制着燃料矿物的分布。泥炭的生成以及同生铀和砂矿铀的形成都与沉积环境有直接的关系。泥炭随后在盆地的正常演化过程中因埋藏和受热而变成煤。

但是，把燃料矿床仅仅与成因相组合联系起来的许多尝试，成败参半。明显地具有赋存燃料矿物全部必要条件的沉积相，通常竟是无矿的；而有些富矿却在表面上不利的容矿相内，这向传统的解释提出了挑战。这些例外的情况表明还需要考虑另外的一些附加因素，其中有的在静态相要素内不可能得到反映。例如，30年前曾认识到沉积期后的地下水流在砂岩型铀的矿化作用中是至关重要的。水文背景在泥炭形成中是重要的，而且对泥炭保存并转化成煤也起关键作用，它甚至影响了前寒武纪早期威特沃特斯兰德型藻席中砂矿铀的分布。因而，成因相似的砂岩中铀的矿化作用的差异，可以用地形、构造或气候控制所产生的地下水循环的差异性加以解释。这种差异性还可以解释在一个沉积盆地的不同部分，煤和后生铀在同时代和同类型的相中的分布为什么是相互排斥的。为此，我们总结了大型沉积盆地中地下水流动的规律并探索它对燃料矿物形成的意义。

许多优秀的教科书和其它书刊都着重论述沉积相，沉积环境和沉积过程，这反映了地质学家在这些领域兴趣盎然和研究的进展。从燃料矿物的地理分布、区域地质背景、容矿

岩组合以及开发它们的经济和工程方面论述燃料矿物的文献，近来也相应增加了。本书力图在沉积岩的有关作用的研究和煤、铀、油气等工业矿床的传统经济地质学之间架起桥梁。适当地注意地下勘探技术，并与露头资料相结合，就能非常真实地重建成因地层，从而最大限度地为勘探服务。在回顾了沉积体系及其所包含的成因相（着重其野外及地下识别）以后，我们还探讨了地下水流体系——它们是如何相对于不同的构造格局、固结作用、气候状况和补给区地形演化的。这就能根据古环境背景、所处的位置和随后的转化作用，说明共生燃料矿物的形成阶段。

我们自己的经验必然会使我们的观点具有偏向性，但我们力求公正评价盆地分析目前的主要技术水平。论述石油与碎屑沉积体系关系的书籍为数众多，所以本书只能是概述性的。但是，我们论述了在勘探程度高的油气区所作的重要研究，这些成果能为勘探程度低的盆地的勘探工作提供十分有用的模式。与石油的情况不同，煤和沉积铀只是在最近才引起沉积学家同样仔细的注意，虽然也存在少数明显的例外。这种情况的部分原因是早期主要以石油作为燃料，煤暂时黯然失色，以及铀在最近才崭露头角；或许也是由于过分强调了描述地层学，特别是在含煤盆地中。发展中的沉积铀矿研究目前已开始停滞不前，这使我们有可能进行相当全面的综合。虽然人们从上世纪以来已经了解了成煤的一般环境，但只有在首先从密西西比河开始详细地研究了现代河流和三角洲环境以后，才建立了预测性的模式。现在这些成煤模式正经历着重要的精加工。我们描述的那些模式在勘探和采矿中都已显示其经济效益。

在燃料矿物的质量和开采方面，沉积相的意义也正在得到更广泛的重视。例如，煤层顶底板性质，基本上取决于亚相的特征。沉积骨架和伴生的流体流以及工程特性的有关知识，在油气生产中一直是重要的。随着储量的消耗，在成因预测模拟中输入越来越复杂的地质资料的趋势可能会增加。

编写一本旨在论述世界各地的地质和矿床的书，必然会面临度量单位问题。对于不同国家或同一国家的不同时期，或者对不同物品，采用的英制和公制单位的复杂问题没有现成的解决办法。我们尽量设法引用它们原来的度量单位，并在括号内注明其相应的等量值。原为数值为整数的地方，换算数值也取其整数。事实上，在将来的一段时间里资源地质学家还必须继续熟悉公制和英制这两种度量单位。

W.E.盖洛韦

D.K.霍布德

目 录

第一章 燃料矿物资源基本情况	(1)
引言	(1)
第二章 成因地层分析方法	(4)
第一节 引言	(4)
第二节 沉积构型	(4)
第三节 相的定量制图	(7)
第四节 电缆测井记录	(8)
第五节 地震地层学分析	(11)
第六节 识别沉积体系的一个实例	(13)
第七节 相模式——基点	(18)
第八节 成因地层综合分析	(20)
第三章 冲积扇体系	(22)
第一节 引言	(22)
第二节 作用于冲积扇的过程	(23)
第三节 湿地(河控)冲积扇	(30)
第四节 旱地冲积扇	(33)
第五节 扇三角洲	(35)
第六节 盆地充填几何形态	(40)
第四章 河流体系	(45)
第一节 引言	(45)
第二节 沉积作用过程	(46)
第三节 河流相	(48)
第四节 河流沉积体系的序列	(59)
第五节 盆地分析和河流体系演化	(66)
第六节 古代河流体系	(68)
第五章 三角洲体系	(69)
第一节 引言	(69)
第二节 三角洲作用的格架	(69)
第三节 三角洲体系的作用分类	(77)
第四节 河控三角洲	(79)
第五节 浪控三角洲	(86)
第六节 潮控三角洲	(90)
第七节 古代三角洲体系的识别和解释	(94)
第六章 碎屑海滨带体系	(98)

第一节	引言	(98)
第二节	沉积作用	(101)
第三节	海滨带相	(104)
第四节	盆地分析中的海滨带体系	(120)
第五节	地质时期的海滨带体系	(121)
第七章	陆源陆架体系	(123)
第一节	引言	(123)
第二节	陆架作用	(124)
第三节	陆架相	(129)
第四节	陆架体系序列	(137)
第八章	陆源陆坡和盆地体系	(143)
第一节	引言	(143)
第二节	陆坡作用	(144)
第三节	重力块体搬运	(144)
第四节	深海潮流	(149)
第五节	远洋沉积	(150)
第六节	陆源陆坡和盆地体系的主要类型	(150)
第七节	陆坡楔地层学	(154)
第九章	湖泊体系	(158)
第一节	引言	(158)
第二节	湖泊作用	(159)
第三节	湖相	(162)
第四节	湖泊体系的几何形态、鉴别特征和演化模式	(170)
第十章	风成体系	(173)
第一节	引言	(173)
第二节	结构	(173)
第三节	风成底形和构造	(174)
第四节	沙丘间相	(182)
第五节	风成体系的规模和组合	(183)
第十一章	沉积体系和盆地水文学	(191)
第一节	引言	(191)
第二节	地下水流动的基本原理	(191)
第三节	含水层基质的性质	(194)
第四节	盆地水文地质学	(198)
第五节	大气水流动状态	(202)
第六节	压实和温压体系	(210)
第七节	沉积体系的水文学	(215)
第八节	结论: 古水文学	(218)
第十二章	煤	(219)

第一节	引言	(219)
第二节	成煤环境	(221)
第三节	煤化作用	(224)
第四节	煤的类型	(225)
第五节	煤盆的构造背景	(228)
第六节	含煤旋回和古环境	(230)
第七节	影响煤层分布的一般因素	(231)
第八节	与三角洲类型有关的煤	(232)
第九节	含煤三角洲相	(234)
第十节	河成煤	(244)
第十一节	河流三角洲的进积层序	(248)
第十二节	冲积扇的煤	(250)
第十三节	古环境对煤中矿物质的控制	(253)
第十四节	古环境对煤矿顶板条件的控制	(254)
第十五节	煤盆的几何形态和演化	(255)
第十六节	煤炭资源的估计	(258)
第十三章	沉积铀	(260)
第一节	引言	(260)
第二节	铀的循环及其产物	(262)
第三节	同生的石英砾岩矿床	(267)
第四节	同生成岩含铀湖相和树沼矿床	(273)
第五节	后生的砂岩铀矿床	(277)
第六节	在资源评价、勘探和开发中的应用	(296)
第十四章	石油	(301)
第一节	引言	(301)
第二节	石油在时间和空间上的分布	(301)
第三节	沉积体系与油气的勘探和开发	(303)
第四节	石油在沉积体系中的分布	(312)
第五节	实例：克拉通内盆地的沉积体系和油气分布	(324)
第六节	实例：湾岸盆地北部的弗里奥沉积体系	(332)
参考文献		(340)

第一章 燃料矿物资源基本情况

引言

大量可用的非再生能源限于重氢和干地热能。而大规模的再生能源是太阳能和大气电能 (Moody, 1978)。这四种能源被认为是最终的能源, 但至少在以后几十年中, 它们未必会在整个能源预算中占重要的比例。人造燃料已经开始生产, 但由于经济和环境的原因, 使这种燃料的大批生产受到阻碍和限制。风、水和生物能所起的作用, 虽然今后将会越来越大, 但现在还较小。因此, 只有煤、铀、石油能立刻满足眼前能源的大量需求。

煤的利用可以追溯到几千年前——把煤作为火葬燃料的铜器时代。古希腊和古罗马、美国的印第安人、中国和欧洲国家都先后使用过煤。在这些地区, 煤逐渐取代动物能、风、水和木材而成为主要能源, 并刺激和促进了工业革命。虽然, 煤在本世纪被石油所取代, 但自70年代早期以来, 煤大有东山再起之势, 而且正在上升。人类利用石油也有悠久的历史, 公元前500年石油用于战争和作为防腐剂, 随后又用于医药和街道照明。早在公元前211年, 中国四川就有油田了 (Halbouty, 1980), 但只是在1859年, 泰特斯维尔油田的发现才真正是现代石油工业的先兆。西方国家在动态和静态能源上对石油的依赖程度, 通过1973年石油输出国组织 (OPEC) 的石油禁运便得到了明显的反映。相比之下, 铀的利用历史却不超过50年, 由于第二次世界大战原子武器的研制, 以及1968~1973年期间对燃料矿物的需求, 加快了铀的消耗。

勘探这三种燃料矿物, 会遇到不同类型的障碍 (Clarke, 1978)。对石油来说, 难关是在勘探阶段的理论研究和技術条件, 以及如何从储集层中有效地采油; 铀的难关是在能量转换阶段对环境污染的担忧; 煤的障碍是在开采阶段。

一般认为, 以现在的消耗水平, 煤的储量至少在今后300年是足够的, 但当前的用量好象在成倍地增加。关于煤的资源量或储量, 意见很不一致, 不同国家在估算时经常使用不同的标准。根据King Hubbert (1969) 的曲线 (图1-1), 在今后的500年中, 煤应该是

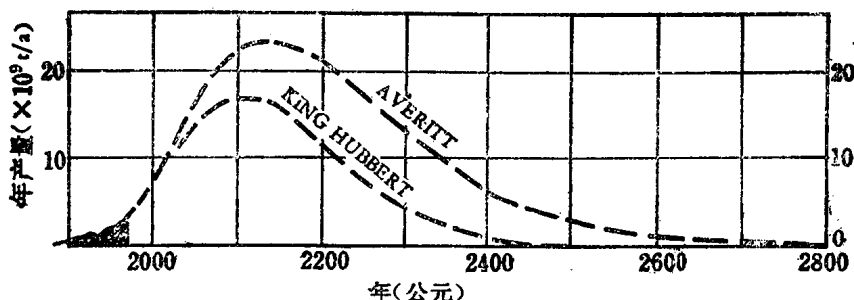


图 1-1 根据 Averitt (1969) 和 King Hubbert (1969) 的估计预测世界煤产量的变化 (据 Fettweis, 1979)

主要的能源。Averitt (1969) 的数字甚至更乐观。煤的利用预计在2100~2200年期间达到顶峰, 年产量是现今的6~9倍, 大致到2800年才下降到不重要的水平。1974年世界能源会议估计全世界的煤资源 11×10^{12} 吨。但只有 0.6×10^{12} 吨是详尽了解过的, 并认为在当时经济和技术条件下是可以开采的, 因此这个数值就是煤的可采储量 (Fettweis, 1979, 第19页)。1977年估计是 12.9×10^{12} 吨, 其中6%被认为是可采储量。Clarke (1979) 根据需求量增加的估计值, 并考虑到随其它能源供应的减少, 煤的价格会增长, 从而导致开采量的增加, 预测世界的煤储量将增加到 $5 \sim 6 \times 10^{12}$ 吨。

根据惯用的原始资料, 估计原油储量约为 2000×10^9 桶^① (图1-2)。其中约 375×10^9 桶已被开采, 余下大约 725×10^9 桶为探明储量, 约 900×10^9 桶是未发现的可采总储量或潜在储量。世界原油产量预计在今后十年内达到顶峰, 但每年将需要额外探明 24×10^9 桶以补足消耗的储量 (Grivetti, 1981)。

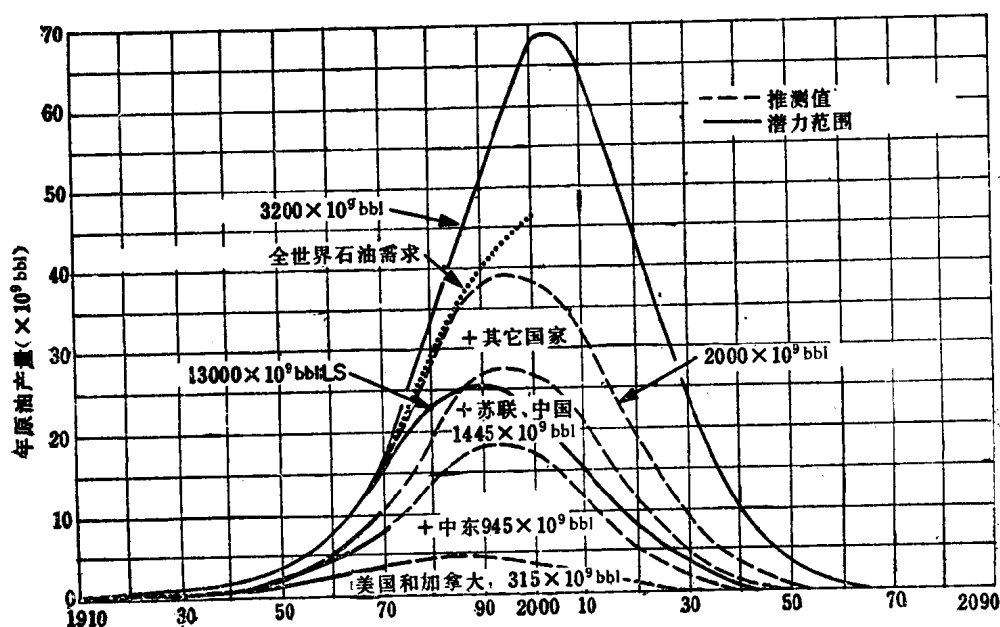


图 1-2 根据 2000×10^9 桶估计储量推测原油年产量 (据 Moody, 1978)

天然气资源估计为 $5 \sim 12 \times 10^{12}$ 立方英尺 ($0.14 \sim 0.37 \times 10^{12}$ 立方米), 其中大部分在中东和东方集团国家。但是, 即使在美国, 也还有大量的天然气未探明, 自从1978年以来美国加速了对天然气的勘探。在确定油气储量时, 价格是个关键因素。例如, 在过去几年中, 油价的上涨马上使一些成熟油田的储量增加。稍长远点看, 价格的上涨刺激了勘探活动, 从而使储量增长。

铀储量的数值变化, 更明显地受价格波动的影响。铀资源的多少, 仅受成本因素的限制, 因为这种元素以低浓度广泛分布。即使如此, 如果不管核子发电能力将降低的预测, 那么, 当前铀的供应暂时短缺, 大概是由目前在勘探方面存在的不景气造成的。

① 1 桶 (美) = 0.15898806 立方米。

表 1-1 现今世界矿物能源资源分布的粗略估计^①

	油和液态天然气	气	焦油	油页岩	煤	铀	总计
苏联、中国等	1	—	1	—	26	无资料	28
美国	—	—	—	2	18	15	35
加拿大	—	—	1	—	—	9	10
中东	1	—	无资料	—	—	—	1
其它	1	—	—	1	4	18	24
世界	4	1	2	3	49	41	100

^①据Moody(1978)。

表1-1所总结的世界能源资源的分布，使人颇感惊奇。中东油田的石油资源仅占世界总能源资源的1%左右，而全部石油资源仅占世界总能源资源的4%。天然气、焦油和油页岩同样也只占百分之几。绝大部分是煤和铀，两者占总能源资源的90%。美国全部的能源资源占世界能源资源的三分之一以上。

第二章 成因地层分析方法

客观世界是一个极其复杂的连续体。因此,任何孤立的片断都只是客观世界在人们主观意识中的一种反映。这里,重要的问题是如何将客观世界中有意义的部分提取出来,加以研究。为此,一方面所提取的每一部分都必须足够复杂……,这样,研究它们才会产生有意义的和有用的结果;另一方面,为了便于理解和研究,每一部分又必须尽量地简单。

Chorley 和 Kennedy (1971, 第1页)

第一节 引言

在资源的勘探、评价和开发中,应用成因相解释所碰到的最困难的一项课题就是确定沉积单元的范围和规模。对成因相分析来说,沉积单元既要有足够的范围,其规模又要恰到好处。沉积盆地限定了沉积层堆积的边界和一般条件。后面各章论述的沉积体系,提供了盆地充填的“有意义的部分”。应用适当的作用—反应模式,对它们的识别和圈定能为相的区分和制图建立起一个骨架。人们通常从相的角度去寻找和分析矿源层、流体运移通道(盆地的通道系统)、潜在的容矿岩或储集层以及圈闭的形状。

在大多数沉积盆地中,能源矿物的勘探和开发越来越取决于对地下资料的获取和分析。沉积特征的详细描述,是成因地层解释的基础,但需要出露的露头,因此,其用途充其量也十分有限。当然,全部用金刚石钻头取心是极其昂贵的,因此,通常只在盆地充填的局部地区和少数层段中采用。然而,沉积体系这个概念意味着:组分相是具有空间联系的三维体,用通常获得的地下资料就可以很容易地描述它们,在有可能的情况下应增加岩心或露头剖面的描述。这种相分析方法在很大程度上依赖于盆地形态和层理构型的恢复、总体岩性的确定、骨架砂岩几何形态的定量描述、垂向和侧向序列及一般相组合的识别。下面几节以地下资料为重点讨论三维相分析的方法,并评述一些基本的沉积学概念,这些概念对发展灵活多变的作用—反应相模式是很重要的。

第二节 沉积构型

岩性单元内部和岩性单元之间的层理几何形态和空间关系,是组成盆地充填物的成因地层层序的基本特征。在区域和局部这两种规模上描绘“层理型式”(bedding style)或“沉积构型”(depositional architecture)能为沉积过程和可能的沉积体系或沉积环境提供大量的资料。

盆地无论大小,在其边缘或底部都可有沉积作用发生。垂向加积作用是盆地垂向上的充填过程。从盆地边缘向内的充填,如果沉积物被冲入盆地称为进积作用;如果在盆地内运动的沉积物优先靠在盆地边缘上堆积,则称为侧向加积(图2-1)。这三种机制各自形成特征的层理构型,且各自以一个一般性的结构剖面为特征(图2-1)。垂向加积层理没有固定的、系统的结构趋势,相反,每一层的结构和成分都可不同。进积和侧向加积都产生横

剖面为S形结构的沉积单元。然而，通过对比其结构层序，区分它们是不难的：进积层序向上变粗，而侧向加积则产生向上变细的层序。在进积和侧向加积这两种情况下，层序在单个成因增量内的侧向上重现，当连续的成因增量一个叠在另一个上时，层序在垂向上重现。

侧向加积、垂向加积和进积这三种沉积背景可以相邻存在于同一沉积体系中。例如，一条废弃河道可能被相邻流水河道在洪泛期冲来的沉积物沿一侧进积所充填，而流水河道中点坝以侧向加积形式生长。与此同时，由洪水形成的漫滩沉积物使泛滥平原发生垂向加积或沉积。整个沉积体系可能以进积为主（三角洲体系），或以垂向加积为主（冲积扇体系），侧向加积更常见于较大型沉积体系的局部环境中。

除层理型式外，大部分碎屑沉积体系的特点还具有特殊的几何形态和特殊的沉积物分散过程。几乎所有推移质搬运过程都留下沉积物分散体系运移途径的沉积记录。这一规律的主要例外是在有些体系中，粗粒沉积物在重力作用下顺坡而下的重新运动，产生了重要的推移质沉积物旁通带。确定推移质（砂）骨架的几何形态或大型成因单元的沉积骨架，是解决沉积物分散途径的基础，并进而为阐明沉积过程和可能的沉积环境提供十分有用的资料。

倾向补给和走向补给的沉积物分散体系之间有着根本的区别。

在倾向补给体系，如河流体系中，沉积物的搬运主要是顺坡而下进入沉积盆地的。相反，在走向补给体系，如障壁沙坝体系中，推移质沉积物平行于盆地边缘运动。在许多沉积体系中，倾向补给和走向补给的沉积单元都有。倾向补给单元和走向补给单元的相对体积、垂向分布和区域分布，以及横剖面的几何形态，是成因地层解释的几个最有效的标志。而且，这些参数根据地下资料是不难确定的。

沉积幕

Frazier (1974) 根据墨西哥湾沿岸盆地（以下简称湾岸盆地）第四纪沉积体系中大量三维地层学的研究，提出了一个概念模式，它综合了盆地充填物的主要组成单元。这个模式，通过对在不同构造背景和水深状况的盆地中引入的几何形态变化的适当识别，为大型海相或湖相盆地充填物内成因地层单元的识别提供了依据。

这个模式 (Frazier, 1974) 以下列沉积学原理为基础：(1) 陆源碎屑沉积物是外来的，因此，必定主要是由河流搬运到盆地边缘的。(2) 经过沉积和非沉积时期的反复交替，盆地被碎屑物所充填。在任何一个沉积时期，活跃的沉积作用总是集中于盆地的一定

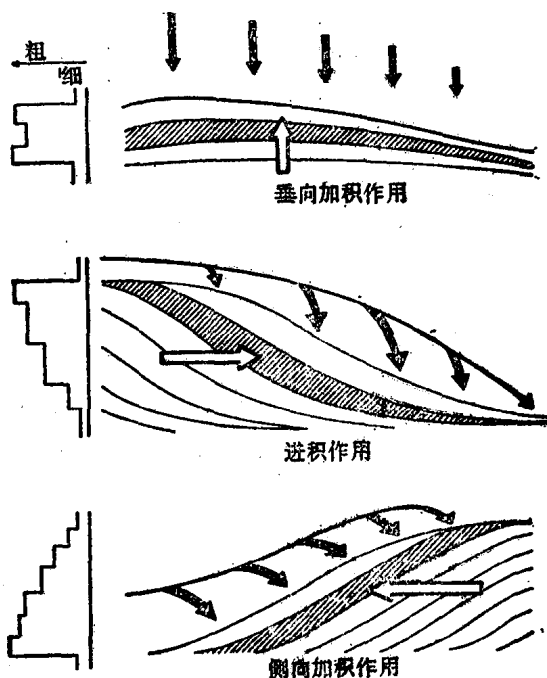


图 2-1 盆地充填的三种基本形式和它们所形成的层理几何形态及垂向结构层序 (据 Galloway 等, 1979, 修改)

区域内,而其它地方沉积物的堆积量极小。因此,沉积单元之间由基本无沉积的间歇或间断所分隔。(3) 间断及由间断产生的地层界面所代表的时间间隔各处不一,但至少有一条等时线贯穿这一界面的整个范围。所以,进积层系之下的间断面代表着朝盆地方向时间逐渐增长的间隔。相反,位于进积层段之上的陆上间断面则表示时间间隔向陆方增长。(4) 一个简单的沉积事件由三个相组成,它是一种局部性的沉积脉动,由间断间隔同下伏层和上覆层隔开。**进积相**沉积物逐渐充填盆地,形成一个通常向盆地内变厚的楔状沉积体。同期的**垂向加积相**沉积物覆盖在进积台地上,一般朝陆地方向变厚。沉积物输入的减少或终止以及盆地的不断沉降,导致改造过的**海侵相**薄层沉积物沉积在沉积单元向盆地的部分上。这样,每个沉积事件就产生一个相序列,记录着开始时的进积、准同期的垂向加积和最终的海侵。

如图2-2的时间—距离示意图所示,多个沉积事件组合在一起,就构成了一个大型的物理成因地层单元,称为**沉积幕**。这种沉积幕是许多相序列的复合体,它们来源于盆地边缘一带的共同物源区,而且是在相对基准面稳定期或大地构造稳定期沉积的(Frazier, 1974)。每个沉积幕向盆地方向都以具有区域或全球意义的主要海侵事件和间断间隔(和它们产生的间断面)为界(图2-2)。另外,沉积幕还包含广泛的陆上间断面,其时间间隔朝陆地方向增大。具分界意义的海侵可能是构造沉降或均衡沉降的产物,或者是世界性海平面升降引起基准面变化的产物。在最大海侵岸线的向陆地地方,沉积幕之间的边界是很难确定的。正如Frazier所指出的那样,常规的地层单元与沉积幕可能是一致的。然而,海侵相(它们是一个沉积幕所产生的地层层序的成因组分)往往被赋予单独的地层状态,或者与上覆沉积幕的地层合并。

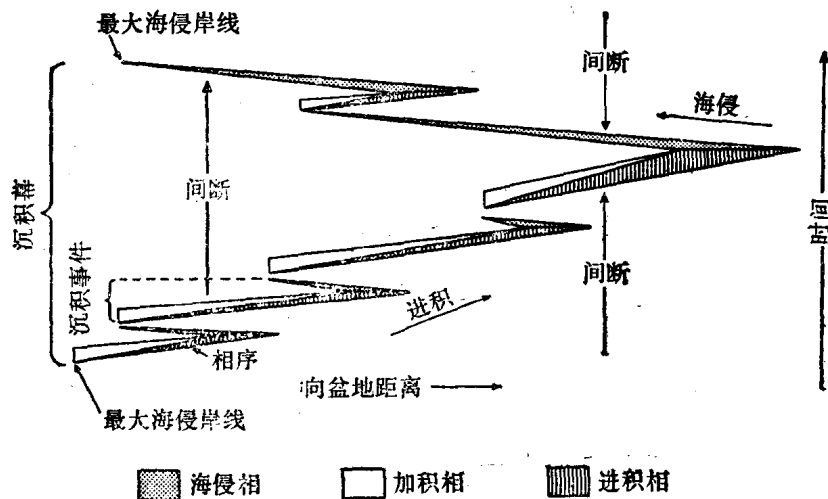


图 2-2 表示一个沉积幕及其各组分沉积事件相的时空关系的时—距示意图

在盆地的任何部位,只有图中加花纹的区域才代表活跃的陆源沉积区间。沉积幕以外间断面为边界,并且包含一个主要的内部间断面(据Frazier, 1974, 修改)

识别沉积幕及其组分沉积事件有两个用途。首先,它们组成了区域性和地方性两种成因地层单元,如果要使相的定量制图产生有意义的模式,就必须识别和对比这些成因单元。其次,这个模式将各种层理型式与其在盆地充填物中的优先位置联系起来了。

海侵相和间断面都能提供地层对比的物理标志,用以确定成因单元的分界。然而,与

间断面不同，海侵单元未必体现等时线（图2-2）。代表长时间基本上无陆源碎屑沉积的外部间断面由各种侧向连续的薄层表示，它们包括：（1）泥灰岩和石灰岩层；（2）富含海绿石或磷酸盐的砂和泥；（3）含化石或潜穴扰动的深海泥；（4）海水改造过的残留砂、粉砂或泥薄层。如果这些薄层中有碳酸盐和其它化学组分存在，则反映表层沉积物和上覆水柱接触的时间较长。化学的或生物成因的物质，在地下测井剖面上可能作为相对致密的、低孔隙度的、高电阻率的和（或）含放射性物质的薄层显示出来。相反，基本纯净的深海泥层，在电测曲线上则由最小电阻率带显示出来。因此，最有用的成因分界层一般是根据它们的测井曲线及其侧向连续性来辨别的。

另一方面，间断面也可能以海蚀面的形式出现（Dietz, 1963）。海蚀作用产生的切割、峡谷的切蚀，以及盆地底部的夷平作用和伴随的垂向加积作用，在反射地震资料中相当明显（Brown 和 Fisher, 1980）。

内部间断面可能是侵蚀面或成土面，也可能表现为泥炭沉积。虽然这些层的化学和物理特性很少用于对比和划分成因地层单元，但它们也可能产生特殊的测井反应。不过其侧向连续性一般比在更均一的水下条件下形成的相应的盆地沉积物要差得多。

总之，盆地充填的沉积构型解释——主要沉积幕及其分界层的范围和性质的确定，它们所包含的层理型式和骨架砂相总的几何形态的确定，能为主要沉积体系及其共生相的早期识别打下坚实的基础。

第三节 相的定量制图

绘制定量的地质图是能源资源地质中的常规方法。除了基本的构造等高线图和等厚线图外，等岩性图（诸如净砂岩或煤的等厚图）以及比率图（包括砂岩百分比图和砂、页岩比率图）也可以确定储层或其它有经济意义的岩性的区域分布范围并预测其厚度。

在陆源沉积碎屑体系中，把成因层段等厚图，净砂岩等厚图，如果层段厚度变化明显，则还可把砂岩百分比图或比率图结合起来使用，对成因地层的解释特别有用。这样的一套图勾画出了所有沉积物的沉积中心和推移质部分的沉积中心，并展示骨架砂相的区域分布趋势和分布型式。此外，骨架相和非骨架相的分布都与基底及层内构造有关，也与盆地形态有关。

具体砂体详细的几何形态一般是不清楚的，因为即使单个沉积事件的相序也是由几个在不同环境中沉积的、部分重叠的砂单元组成的。但骨架砂相的沉积地势控制着等值线的型式。甚至在包含几个或几百个独立沉积旋回的厚层序中，如果盆地迅速沉降，保持垂向上沉积环境稳定，也可使类似的相叠加并保持其骨架的趋势。虽然这样的垂向叠加免不了会降低图的分辨力并损害骨架几何形态细节，但其主要特性，如沉积中心的位置、侧向补给和走向补给两种砂体的相对丰度、成因单元内骨架砂的区域分布和地层分布、同生构造对砂体分布的影响等还是明显的。

如果在画等值线时引入基本的沉积学原理和成因模式，就可进一步提高图件的效用。例如，除水下斜坡环境中重力的重新活动外，在陆源碎屑体系中，很少有全部推移质沉积物的旁通。因此，沉积物分散体系的每一部分都可能以一系列相互连接的砂体形式保存下来，这些砂体的走向反映了沉积物搬运的方向。然而孤立的透镜状砂体和叶状砂体是很少

见的。

、画等值线，与其说是强调砂沉积物的孤立性，还不如说是比较适当地突出其连续性。但例外的情况对解释沉积过程和沉积体系有着重要的意义。同样，画等值线应该设法区别和突出所出现的特征，如不连续带、放射状分流冲积裙或大致平行的透镜体。等值线的型式、疏密或走向出现区域性系统变化，可能反映了重要的相变。

除基本的层段厚度图、等岩性图和砂层百分比图外，几种派生的相图在相的圈定和解释中也是有用的 (Forgotson, 1960)。最厚砂体的厚度图或该层段内不连续砂体的数量图，可以迅速地得出对相趋势的一般认识，也可以提供相分布的补充资料。三组分图表示多种岩性（如砂岩、泥岩和石灰岩）的成分比例。一个成因层序内沉积物的垂向位置可以用重心制图技术加以测定和表示 (Forgotson, 1960)。如果用电子计算机来处理数据，可以从数学上推导出梯度或趋势面，并可用它来消除区域梯度。这样，根据背景趋势就能更好地解决详细的骨架几何形态 (Wermund 和 Jenkins, 1970)。

第四节 电缆测井记录

各种电缆测井记录是分析地下地质最常用的地质资料。结合钻井岩屑，这些测井记录可提供所钻穿地层的岩性、岩石物理性质、孔隙流体成分等一组基本的资料。

电缆测井不能直接测定岩性或粒度。因此，岩性和结构的解释，是根据测井响应对岩心或其它独立岩性资料的校准，利用岩性与实测的电测井特性之间假定的对比，或者根据几种测井曲线的比较。详细的测井解释已超出本书的范围。测井装置以及测井解释方面的假设、技术和理论在许多石油工程教科书和参考手册中都有论述。然而，利用测井曲线很容易取得定性的岩性资料，并可为相的识别和制图提供三维的基础资料。

一、测井类型

岩相解释通常用两种类型的测井：电测井和自然伽马测井。前者有许多不同的名称，如电阻率测井、感应测井和侧向测井，一般用两条基本曲线表示，即自然电位曲线和电阻率曲线。左边的测井曲线是自然电位曲线，它参照地面电极的固定电位来测定井孔和地层流体间的相对电位。自然电位能间接反映渗透率，但电位的方向、幅度和测井曲线的偏移也是井孔和地层流体间电化学差异的函数。深井中井孔流体含盐度一般比地层水低，因此，在多孔的可渗透岩层（如砂岩）中，自然电位曲线就偏向基线左边（表示负的电流通量）；在浅层遇到含淡水层时，自然电位的反应就不太稳定。

电阻率曲线直接测定或通过计算测定岩石基质及其所含孔隙流体的电阻率。同一次测井往往记录到几种类型的电阻率测量值。由于沉积物或岩石基质的电阻率比咸水或半咸水的电阻率要高，因此所测定的电阻率基本上是孔隙流体化学的函数，而不是岩性的函数。但是，如果孔隙度和渗透率低，例如在胶结致密或高度压实的、结构成熟度低的岩层中，电阻率曲线可能偏向基线的右侧，记下基质的高电阻率这样，电阻率曲线可用来确定和测量淡水带中的砂体或粒间孔隙度非常低的相序中砂体的厚度。

伽马测井可测定地下岩层中自然伽马的放射性。这种放射性主要是由粘土矿物中所含的放射成因钾产生的。在硅质碎屑混合层序中，伽马曲线能很方便地用于区分砂岩和页岩。而且，曲线的偏移度是层段中“页岩含量”的标志。此外，伽马测井对识别和对比富

含有机质的海相页岩也特别有用。这种黑色页岩的铀含量通常特别高，因而在高灵敏度的油井伽马测井中容易得到反应。如果砂岩中含有少量其它放射性物质，如含铀的重矿物、磷酸盐或海绿石颗粒或者碎屑云母等，则在应用伽马测井曲线时就会产生一些问题。可能与砂岩和页岩互层的纯碳酸盐岩层，同样也以低伽马值为特征。

对于岩性的定量技术（如确定一个成因单元内净砂层的总数）来说，须通过确定一个已知的或假设的、含有厚层净砂层和泥层的层段内典型端页岩性的测井反应，来作为测井曲线的内标。由端页岩性产生的连续偏移曲线，限定了砂层和页岩的基线，据此基线可将测井曲线分门别类。中等偏移度表示互层或结构混杂的岩性。在实际工作中，可以采用对页岩基线的最小偏移比（如 $1/2$ 或 $1/3$ ）作为截止点来确定砂层。利用电测井或伽马测井，结合岩心和样品资料就能更精确地确定岩性。

电测井和伽马测井对分辨薄层都有一定的底界限度。当层厚小于这个限度时，曲线就不再偏移。例如，砂、泥岩薄互层段产生的曲线偏移可能介于页岩基线和砂岩基线之间。在砂层厚度和层数相对于互层泥岩向上增加，故而粒度向上变粗的进积层序中，自然电位曲线和伽马测井曲线均理想地逐渐由泥岩基线偏向砂岩基线，反映了可渗透砂层比例的增加和放射性粘土层的减少。同样，砂层结构成熟度的垂向变化，在这两种测井曲线上也能得到明显的反映。虽然在理论上，粒度变化引起的渗透率变化在自然电位上应该有所反映，但是砂级沉积物中结构的变化，却很少能在测井曲线上显示出来。

一种不很常用的电缆测井——地层倾角测井，对解释地下相好象很有潜力。虽然它原始设计作为测定构造倾角的工具，但高度专门化的地层倾角读数经过高度专门化的处理后，可以提供成因层序内沉积倾向和倾向在垂向上的变化（层理构型）的资料（Selley, 1978b）。将地层倾角测井解释用于沉积体系分析，为进一步的研究和实验开拓了一个有美好前景的领域。

二、测井曲线图型的解释

测井曲线图型用于下列三个方面：（1）确定垂向层序和层理构型；（2）测井相的识别和制图；（3）解释沉积环境。除确定基本岩性外，电缆测井早期最明显的用途之一就是解释垂向层序。在电测曲线和伽马测井曲线上，容易辨认出垂向加积、进积和侧向加积的层理几何形态各自特有的、不规则的、向上变粗和向上变细的结构型式。图2-3中互为延续的电测曲线段表示一个向上变粗的进积层序，它在自然电位和电阻率曲线上都有反映（井段a），或者仅在自然电位曲线上有反映（井段c）。电测曲线于“d”处开始出现的块状形态是富砂垂向加积层段的特征。电测井段的上部是以泥质为主的、偶夹砂岩层的垂向加积层序（e），其中许多砂岩层具有发育不好的向上变细的顶部（表示砂单元内的侧向加积层）。另外，块状曲线段的垂向加积砂层单元（b）也可看作为最下部厚层进积层段的顶。

除识别简单的垂向层序外，通过对一个成因地层单元的许多测井曲线的对比，可以识别再现的图型或测井图形。这种图形或测井相可能具有特征的垂向层序、单元规模、主要岩性成分、或者不同曲线在相同或不同的测井记录上的相当的响应，而且可以检验它们在区域上、侧向上和垂向上是否有系统分布型式。例如，图2-3地层剖面的下半部，主要是由一系列厚的、简单到复合的进积单元组成的。剖面的上半部由下部的垂向加积砂质相、中部的厚层垂向加积或难以归类的泥质单元，以及上部的垂向加积砂泥混合层序组成。总之，整个层序表明了从下而上由进积到垂向加积的沉积构型的系统变化，孔隙度和渗透率