

油 气 储 层 地 质

吴元燕 徐 龙 张昌明 等编

石 油 工 业 出 版 社

内 容 提 要

油气储层地质学是近十多年来石油地质学中出现的一个重要分支。本书从油气田发现到开发对储层研究提出的要求出发,从宏观向微观、从定性向定量、从描述到评价,建立储层地质模型,并介绍利用地震、测井、地层测试等资料研究储层的方法。

本书可供油气田勘探、开发地质工作者使用,也可作为石油高等院校教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

油气储层地质 / 吴元燕等编

北京:石油工业出版社, 1996.10

ISBN 7-5021-1559-5

I. 油…

II. 吴…

III. ①储油层石油天然气地质

储气层石油天然气地质

IV. P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 14472 号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里 2 区 1 号楼)

石油工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

850×1168 毫米 32 开 11 印张 289 千字 印 1—1500
1996 年 10 月北京第 1 版 1996 年 10 月北京第 1 次印刷

ISBN7-5021-1559-5/TE·1335

定价: 15.00 元

前 言

油气储层地质学是近年来在石油勘探和开发实践中发展起来的一门应用学科，是石油地质学的一个重要分支。油气储层地质学主要研究石油储层的成因、演化、分布以及各类储层的几何形态、岩性、物性特征及其对油气藏形成、开采的影响。随着储层研究工作的不断深入，尤其是 80 年代中期石油地质基础理论的不完善和边缘学科的发展，为储层地质学成为一门相对独立的应用学科提供了坚实的理论依据，新的勘探方法和分析手段为储层地质学家们提供了丰富的地质、地球物理、地球化学、岩石物理及油藏物理资料，从而为储层地质学的研究创造了条件。

近年来储层地质学发展很快，储层地质学的理论和研究方法逐渐完善。目前国内对储层地质学及其研究方法进行系统和全面介绍的书籍较少，而油田生产单位对此方面的要求不断增加、在这种背景下，作者在各自储层研究实践经验和体会的基础上编成此书。本书侧重于开发储层研究，吸取了近年来国内外储层地质理论和研究方法上的有关成果，针对我国陆相盆地储层的特点，分别就碎屑岩和碳酸盐岩储层的沉积，成岩进行了比较系统和全面的描述，对储层的研究方法进行了概述。

本书共分七章第一章针对不同类型的储层，从沉积体系及沉积模式入手阐述各类储集岩石的成因和几何形态特征，同时讨论了我国主要储层在地层（时间）和地理（空间）的分布规律第二章讨论沉积岩的成岩作用对储层特征（孔隙度、孔隙结构、渗透率等）的影响。第三章介绍构造作用对储层特性的影响，主要讨论与储层有关的断层和裂缝的形成机制，储层中裂缝的识别以及与储层特性有关裂缝参数的估计与计算。第四章和第五章分别就碎屑岩、碳酸盐岩及其它类型储层描述内容做了比较详尽的

介绍。在定性描述的基础上定量刻画储层参数的空间分布规律及储层的非均质特征，从而为油藏模拟提供基础材料，为设计或调整开发方案提供可靠依据。第六章介绍储层研究的基本思路和方法。第七章介绍开发各阶段储层评价的内容以及建立储层地质模型。

本书绪论由湛卓恒编写；第一章第一、二节由张昌明编写，第三节由王泽中编写；第二章第一、二节由徐龙编写，第三节由王泽中编定；第三章由湛卓恒编写；第四章由张昌明编写；第五章第一节由王泽中编写，第二节由徐龙编写，第三节由吴元燕、杨瑞财编写；第六章第一节由徐龙编写，第二、三节由吴元燕、杨瑞财编写，第四节由张昌明编定；第七章由张昌明编写。全书由吴元燕统编。

本书由中国石油天然气总公司勘探开发科学研究院裘怿楠总地质师主审，并对本书的编写内容进行了具体指导，对初稿修改提出了许多宝贵意见。在编写中还得到了石油大学（北京）陈钦雷教授、李德同教授多方面的帮助和指导，在此一并表示感谢。由于作者水平有限，时间紧迫，不妥之外，敬请指教。

作者

1995年7月

目 录

绪论	(1)
第一章 储层沉积作用	(8)
第一节 碎屑岩储层沉积体系	(8)
第二节 中国不同类型盆地的沉积体系与砂体类型	(31)
第三节 碳酸盐岩储层的沉积作用	(49)
第二章 储层成岩作用	(70)
第一节 储层成岩作用的研究方法	(70)
第二节 碎屑岩储层成岩作用和孔隙演化规律	(73)
第三节 碳酸盐岩成岩作用和孔隙演化规律	(103)
第三章 构造作用对储层的影响及其研究方法	(113)
第一节 断裂的一般性理论	(113)
第二节 断裂和裂缝形成的地质背景	(122)
第三节 断裂和裂缝对储层的影响	(126)
第四节 裂缝描述的内容及孔渗特性的估计	(133)
第五节 裂缝的识别和研究	(139)
第四章 碎屑岩储层描述	(152)
第一节 碎屑岩储层描述的内容	(152)
第二节 碎屑岩储层砂体的非均质性	(161)
第三节 储层沉积学描述方法	(166)
第五章 碳酸盐岩及其他类型储层描述	(175)
第一节 碳酸盐岩储层描述	(175)
第二节 火山岩储层描述	(197)
第三节 泥岩裂缝储层描述	(204)
第六章 储层研究方法	(214)
第一节 地震资料在储层研究中的应用	(214)
第二节 测井资料在储层研究中的应用	(232)
第三节 地层测试资料在储层研究中的应用	(257)

第四节 地质统计技术在储层研究中的应用	(290)
第七章 储层评价与储层地质模型	(307)
第一节 开发储层评价	(307)
第二节 储层地质模型	(323)
参考文献	(338)

绪 论

一、储层与储层地质学

油气储层地质学是近年来发展起来的石油地质学的一个重要分支，是以研究石油储层的成因、演化、分布和各类储层的几何形态、岩性、物性特征及其对油气藏形成、开采的影响为主要内容的应用科学。

储层地质学是一门综合性的学科，与许多基础地质学科如沉积岩石学、沉积学、构造地质学以及应用科学如地球物理、岩石物理、地球化学、数学地质、地震地层学、层序地层学等学科联系紧密。

油气储层亦称储层，是指任何具有孔隙性和渗透性、能在适当的条件下储集和渗流油气的岩层。不是所有的岩石都能成为储层，储层最基本的特征之一是它的孔隙性；但作为有效的油气储集岩，除孔隙性外，另一个基本特征是它的渗透性。仅当岩层兼有上述两种特性时，才可能成为油气储层。现今作为油气储层的岩石主要有两大类：一类为碎屑岩，例如砂岩、砂砾岩、粉砂岩等，是人类最早大规模开发的储层。碎屑岩储层在已发现的油气田中占有重要的地位，在已发现的大油气田中 60% 以上的储量来自该类储集岩层。我国以众多的陆相含油气盆地著称于世，碎屑岩储层更具有特殊重要的地位，目前我国已开发的油气田中 90% 以上的储量在碎屑岩中（裘怿楠，1983）。碳酸盐岩，例如白云岩、石灰岩是目前人类认识的另一类主要储集岩认识到碳酸盐储层的重要性大致是在 1925~1930 年间，但大规模从碳酸盐岩中采油是以本世纪 30 年代中东油区的开发和 40 年代美国二叠盆地的油气开发为标志的（F. K. North, 1990）。根据世界上近 50 个主要产油盆地统计资料（Klemme 和 Urmishek, 1991），

以砂岩类碎屑岩为储层的盆地大约占 60%，以碳酸盐岩为储层的盆地约占 20%，另外 20% 的盆地中碎屑岩和碳酸盐岩同时为储层。在时间上储层的类型有以古生代的碳酸盐岩为主逐渐变为新生代以碎屑岩为主的变化趋势，我们目前勘探和开发的主要是这两类储层。

孔隙度及渗透率很小的致密砂岩、泥岩甚至火成岩和变质岩由于岩石内部裂缝发育，亦可作为储层，这类储层称为裂缝性储层。裂缝性储层是指油气的储集空间和渗滤通道以裂缝及其连通的溶孔、溶洞为主的储层。但该类储层的数量及重要性在目前远比起碎屑岩储层和碳酸盐岩储层要小。第一个比较完整和准确地对裂缝性储层下定义的人可能是 R. A. Nalson (1991)，他将天然裂缝性储层定义为由于存在于岩层中的裂缝使得岩层的孔隙度和渗透率得以提高或增强了岩层的非均质渗透率，从而对流体有或可能有重要影响的储层。裂缝性储层与其它储层相比有其独特之处：1) 它虽然可存在于各类岩性中，由于碎屑沉积岩类孔隙普遍发育，裂缝孔隙度的重要性相对要小。而碳酸盐类的后生作用可使其丧失孔隙性，但在适当的条件下碳酸盐类岩石又可发育很好的溶孔和溶洞。此外碳酸盐类岩石脆性较大，岩层中易于形成裂缝，故碳酸盐岩中裂缝性储层比其它岩类更具重要性。2) 裂缝的形成与分布规律，除主要受区域构造应力场和局部应力场控制外，影响因素较多，对裂缝在地下分布规律及其特征研究起来比较困难。3) 由于流体在裂缝中的渗透率比常规孔隙介质中的渗透率大出几个数量级，因此，开发裂缝性油气藏比开发常规油气藏要困难。4) 裂缝性储层非常复杂，目前仍缺乏对地下裂缝识别的有效手段，也缺乏对高度非均质储层进行定量描述和表征的方法。

储层成为目前的面貌，一般来说经历了三种地质作用，沉积作用、成岩作用和构造作用。其中沉积作用是起决定性作用的因素，而成岩作用和构造运动是对沉积物改造的作用，而且在一定程度上受沉积作用制约。因此，研究沉积作用，从成因的角度来

认识储层的形成与分布是储层研究的主要内容。实践表明，不同沉积环境下的砂体在注水开发中表现出不同的油水运动特点和开发效果，在后生作用和构造作用影响较小的条件下，储层物性主要受沉积作用控制（李德生，1989），沉积相的横向变化是造成储层非均质性的直接原因，通过深入研究储层的沉积特征及储层沉积相的分布特征，建立储层地质模型，可大大提高对储层空间变化规律的预测能力。因此，通过细分沉积相以及对含油砂体的成因研究建立储层的非均质性模型，对预测油水运动规律，指导方案调整，提高油田开发效果是非常有意义的。

尽管当所有的沉积物沉积时都具有相当高的孔隙度，但随沉积物埋藏深度增大，压实作用使得大部分沉积岩很快失去原有的作为有效储集岩所需的孔隙空间。在一定的深度范围内，有一部分沉积岩仍然保持一定的孔隙度和渗透率。使这部分沉积岩保持储层特征的主要因素是这类岩石的结构，如颗粒大小、颗粒形态、颗粒的分选及磨圆度等。因此研究高孔渗沉积岩在空间的分布规律，研究孔隙特征及渗透率与岩石结构的关系是储层地质学的一项重要内容。

沉积物自沉积后，除因压实而失去部分孔隙度外，由于环境变化，孔隙中的流体与介质之间会产生一系列物理、化学反应，其结果既可以使好的储层变差，甚至变为非储层；也可以使差的储层改善其储集性能。沉积物自沉积到变质作用前所经历的一切物理、化学和生物的作用称为成岩作用。研究成岩作用对储层物性的影响是储层地质学的另一重要内容。

裂缝的存在是形成裂缝性储层的一个必要条件，此外随着对裂缝性储层认识的加深，人们发觉裂缝对一般正常储层的影响亦很大。裂缝的存在不仅造成储层的非均质性。给开发方案的制定带来影响，而且影响油气最终采收率。对控制储层裂缝形成因素的研究，预测裂缝的空间分布，描述裂缝对储层非均质性带来的影响是储层研究中的一个重要任务。

二、储层地质学发展的地质背景

油气储层地质学是近年来在石油勘探和开发实践中发展起来的一门应用学科。随着储层研究工作的不断深入，尤其是 80 年代中期石油地质基础理论不断完善和边缘学科的发展，为储层地质学成为一门相对独立的应用学科提供了坚实的理论依据，新的勘探方法和分析手段为储层地质学家们提供丰富的地质、地球物理、地球化学、岩石物理及油藏物性资料，从而为储层地质学的研究创造了条件。在储层地质学形成过程中，有两大因素促进了这门学科的迅速发展。一是勘探难度增大，随着勘探的深入，采用常规手段比较容易落实的构造圈闭越来越少，在石油勘探程度高的地区更是如此。勘探的重点正在逐渐地转移到寻找隐蔽圈闭、深部油气藏和与裂缝有关的裂缝性油气藏。与构造圈闭相比，这些勘探新领域对储层分布及几何形态的依赖性显得更加突出。另一个因素是，油藏开发实践中越来越多的事实表明：储层的空间展布、几何形态、内部细致结构（流动单元和遮挡单元的相互关系）及空间非均质性是提高油气采收率、降低开采成本的关键所在。

储层非均质性是普遍的、绝对的，而均质性只是相对的、有条件的。一个精细准确的储层地质模型对于油藏模拟至关重要。往日基于平均化的储层参数，把一切都平均化了，横向的连续性被夸大，对相变的认识不足，物性的变化没有如实地反应出来，以此为基础所做的模型上不可能是一个精细的储层地质模型。地质模型没有足够的空间分辨率就不可能精确模拟驱替动力。在不准确的油藏模拟基础上做出的开发方案，哪怕是用了最好的优化设计、预测和预算也还是不准确。其结果常常是开发成本大大超过预算，作业及维护费用高出计划许多。

为提供一个精细的储层地质模型要求我们对储层有更深层次的认识，从理论上、成因机制上探讨储层空间结构和非均质性成为必然。近二十年发展起来的油藏描述（Reservoir Description）和储层表征（Reservoir Characterization）就是在这个背景下发展起来的一门综合评价油气藏的技术。

60年代初期，我国在松辽盆地的勘探和开发以及后来在东部地区各盆地油气田的开发过程中，深入研究储层，发展了一套陆相碎屑岩储层研究方法，包括岩性、储油物性、含油性、含油砂体的空间分布和储层沉积相等的研究，为我国碎屑储集层地质学的发展奠定了基础。80年代我国石油地质工作者在总结我国储层特征的基础上正式提出了储层地质学的概念（裘怿楠，1987）。我国对碳酸盐岩储层的研究也比较早，几百年前四川自流井气田就有碳酸盐储层中有裂缝通脉的记载，并注意到有“横脉出水，竖脉出气”的规律。在四川碳酸盐储层及华北任丘碳酸盐古潜山储层的研究方面，包括储层单元的划分、对比，储层中裂缝带研究，储层物性参数的测定、储量计算及综合评价等对指导开发方案、提高开采效果起了重要的作用（李德生，1989）。

三、储层地质学研究在油气勘探开发各阶段的特点

储层是油藏的三大要素之一，油气勘探开发各阶段都涉及到储层。从勘探早期的盆地分析到油藏开发的三次采油，对储层的研究贯穿始终。但勘探和开发阶段对储层研究的侧重点不同，内容有别，方法也各异。总的来说随勘探的深入到开发，对储层的研究内容逐渐扩大并深化，从宏观向微观，从定性向定量发展。另一方面从勘探到开发，对储层研究的重要性越来越突出，储层研究所占的比例也越来越大（裘怿楠，1993）。

在勘探阶段，储层研究的重点是岩相地理、沉积体系和有利储层段空间展布的研究，弄清有利的储层相带，预测油气储层的空间分布和质量，确保勘探目标的确定和其后油气田的发现。进入油气田开发和生产阶段，最根本的问题是用最少的投资，获得尽可能高的采油速度和采收率。储层的非均质性是油气田开发遇到的一个最重要也是最棘手的问题。储层非均质性从成因上来说主要是由于沉积格局的复杂性和成岩作用的多样性造成的。储层非均质性的变化规律、建立储层非均质性的模式及定量表达方式对优化开发方案、提高最终采收率无疑是非常重要的。围绕这一主题，储层研究的重点转为储层的精细描述。作为油藏描述的

核心部分，储层描述是一项以储层地质学为理论依据，综合应用沉积学和构造地质学的方法及地震、测井、测试信息，最大限度地利用计算机技术对储层进行定性、定量的综合研究的方法和技术。其主要任务是对沉积相和微相的类型及展布、储集体几何形态和大小，储层的微观特征及非均质性，以及微观孔隙结构、物性特征及对孔隙流体的影响进行定量详细的描述，并为油气藏的数学模拟提供一个可靠和准确的储层地质模型。

建立储层模型的一个重要作用是预测。地质模型是建立在对地质现象的普通规律的认识和对学科知识的总结之上的，但又是一般化了（抽象化）的地质规律。因此，一个好的储层地质模型应具备以下三方面的条件：一是能够为油气（勘探）开发决策提供有关储层特征方面的定量描述；二是能具有充分的有关成因理论的依据；三是具有现有技术条件下可供预测的有效指标（裘怿楠，1993）。一个完整的储层地质模型还应包括多个子模型以描述不同地质作用对储层的影响，通常有以下四种子模型：沉积模型，描述储层的结构特征；成岩作用模型，记述储层质量的演化和发展；构造模型，描述断层、裂缝的位置及对储层的作用；储层地球化学模型，描述地层中流体的成因以及与介质间的反应。储层研究的一个最大特点就是来自多学科，强调工作紧密协作。

第一章 储层沉积作用

沉积相控制了储集体的形态、规模以及相互间的联系，也控制了储集空间的类型，因而，储层的沉积作用是储层地质学的基础。

尽管已发现在火成岩和变质岩中同样有油气分布，但绝大多数油气储层是沉积成因的。本章首先介绍碎屑岩储层沉积体系的基本特征，在此基础上简单介绍我国不同类型沉积盆地的沉积体系与砂体类型。在第三节，对碳酸盐岩储层的沉积作用作了全面的概括。

第一节 碎屑岩储层沉积体系

碎屑岩储层是分布最广的一种储层类型，我国中新生代陆相盆地中尤为如此，据裘怿楠等的抽样统计，我国中、新生代含油气盆地已发现的石油储量中，碎屑岩储层类型占 90% 以上，其它类型储层不足 10%。

形成碎屑岩储层的沉积体系可以分为以下几个方面：

1) 大陆环境下的沉积体系。

残积带、坡积带；②沙漠；冰川；冲积扇；河流；

⑥湖泊体系。

2) 过渡环境下的沉积体系。

三角洲体系；河口湾体系。

3) 海洋环境下的沉积体系。

海岸体系；陆架体系；陆坡及盆地体系。

我国目前已发现的油气储层，大多数属于大陆环境下陆相湖盆沉积的产物。但近几年，在海上和西部塔里木盆地等地区已发现了过环境和海洋环境下形成的碎屑岩储层。例如我国东海平湖

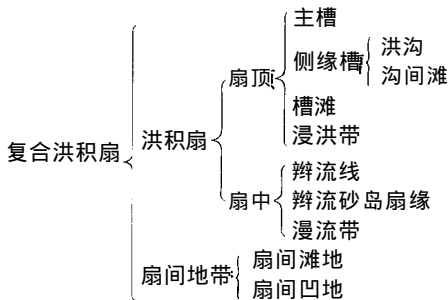
油气田第三系的平湖组潮坪相储层和塔里木盆地东河塘组的滨岸海滩砂岩储层。

一、冲积扇体系

山地河流或间歇性洪流出山口进入冲积平原，由于坡度突然变缓，河流流速降低，水流分散，河流搬运能力减弱，将大量碎屑物质在山口处堆积，形成向平原倾斜延伸较长的扇体或较短的锥体，被称为洪积或冲积扇体（或锥体）。英文中多用冲积扇（alluvial fan），中国人习惯于将气候干旱或半干旱地区季节性山洪暴发时，或是高山积雪融化时在山口堆积的粗碎屑扇体叫洪积扇，将气候潮湿地区、山地河流出山口处堆积的粗碎屑扇体叫冲积扇（吴崇筠等，1992），Galloway（1983）认为“冲积扇是由山前或断崖边向邻近低地延伸的一种主要由粗碎屑物质组成的圆锥形、舌形或弓形的堆积体”。作用于冲积扇上的过程包括河道水流、泥石流、筛积作用、席状漫流以及风的作用；地下水和盆内作用（专指扇三角洲而言）对冲积扇沉积物具有一定的改造。

从沉积和地貌学的角度，冲积扇可划分为近端相、中部相和远端相，也有人称为扇根、扇中和扇缘亚相（图 1—1）或上扇、中扇和下扇亚相，由上扇至下扇，扇面坡度降低，粒级减小（图 1—2）。

张纪易在现代洪积扇和克拉玛依油田中三叠统冲积扇研究基础上，提出了一个粗碎屑冲（洪）积扇的划分系统（图 1—3），可以做为一个相模式，该系统将冲积扇亚相划分如下：



冲积扇具有干扇和湿扇（或称湿地扇和旱地扇）之分，目前所研究的冲积扇大多数都是旱地扇（干扇），湿地扇以具有常年性流水为特征，但常年河对扇的大小影响很小，所以这种扇主要受特大洪水的控制，它们的面积是旱地扇的数百倍，扇面坡度很低，如印度的柯西（Kosi）扇、黄河下游冲积扇体系等。

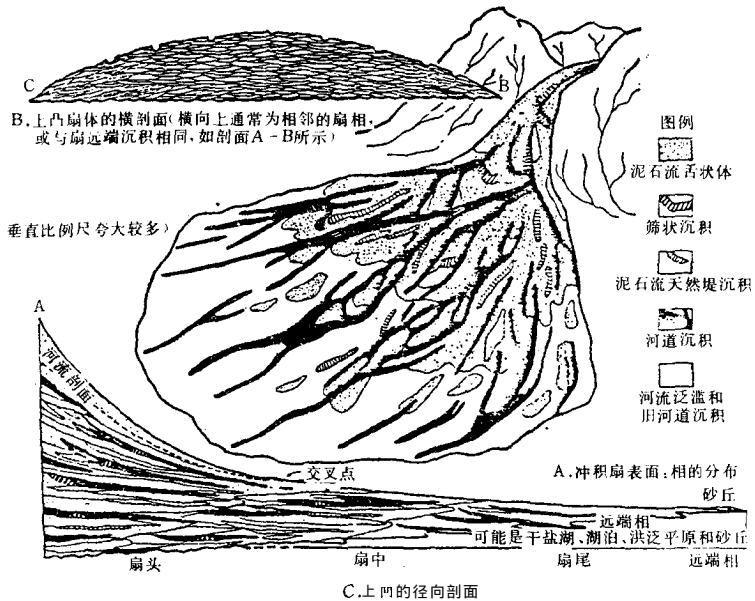


图 1-1 一理相冲积扇的沉积相分布和地貌剖面

(据 Spearing, 1975 转引自 G devriesdq 克莱因, 1985)

二、河流体系

河流体系是我国陆相盆地中最发育的一种沉积类型，按河道的弯曲度和分叉指数可以分为四种类型的河流，它们是：顺直河、曲流河、辫状河和网状河。尽管目前对河道类型的分类仍然存在一些有争议的问题，但上述四种河型已经被大多数人所接受。

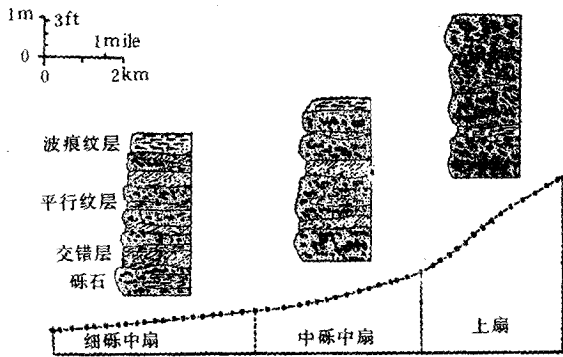


图 1—2 湿地扇中，从上扇至下扇，扇面坡度降低，粒级减小（据 Boothroyd, 1972）

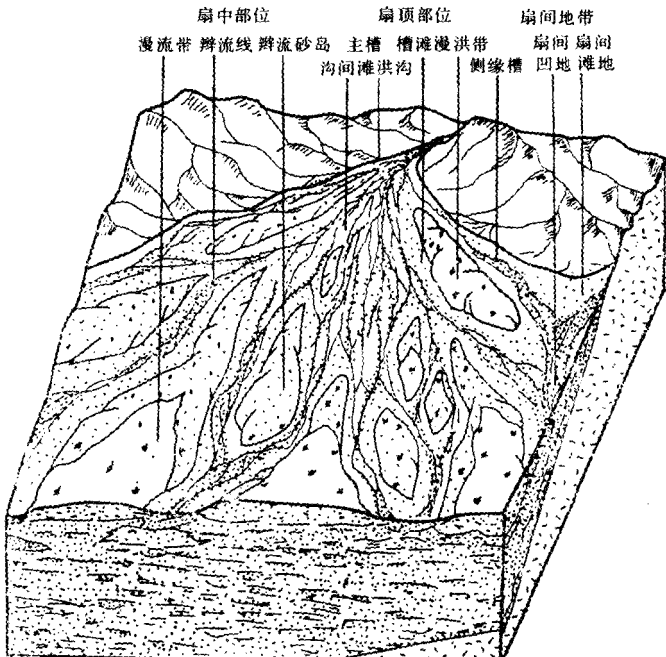


图 1—3 冲（洪）积扇相带划分示意图
（据张纪易，1985）

流动河道：
粉砂：漫滩
砂：点砂坝
砾：河底

废弃河道：
粉砂：河道充填
砾：河底

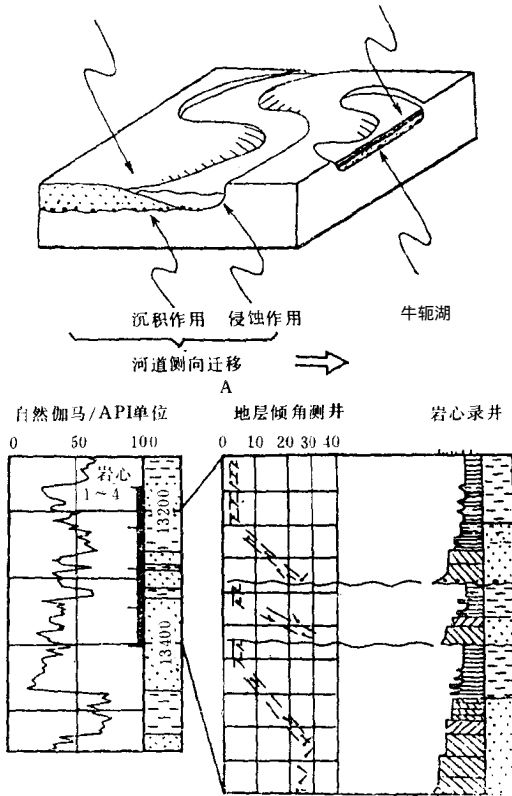


图 1—4 曲流河的沉积模式、垂向层序与电性特征
(据 Selley, 1982, 转引自裘怿楠等 1994)
A—立体模式图；B—岩心录井及测井剖面

1. 顺直河

顺直河是指弯曲率 $S < 1.5$ ，分叉指数（或称辫状指数） BP