

王一新 王家林 万明浩 钟慧智 编著

石油综合地球物理 方法与应用

石油工业出版社



登录号	127498
分类号	P618.130.8
种次号	028

石油综合地球物理方法与应用

王一新 王家林 万明浩 钟慧智 编著



5206/04



石油0121293

石油工业出版社

内 容 提 要

本书以石油物探资料综合解释为中心,以重力、磁力、电法等非地震方法与地震方法相互配合的原理和资料综合解释方法为重点,全面论述综合地球物理勘探原理、地球物理资料综合处理与解释方法、综合物探方法在油气盆地与油气圈闭勘探中的应用。书中大量应用实例属首次公开发表。

本书可供石油物探、石油地质等专业的科技工作者及有关院校师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

石油综合地球物理方法与应用 / 王一新编著

北京: 石油工业出版社, 1995.8

ISBN 7-5021-1469-6

I. 石…

II. 王…

III. 石油—地球物理勘探, 综合物探—地质数据—注释

IV. P618.130.8

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里1号楼)

石油工业出版社印刷厂排版刷

新华书店北京发行所发

*

787×1092 毫米 16 开 11.75 印张 2 插页 千字 印 1—1200

1995 年 8 月北京第 1 版 1995 年 8 月第 1 次印刷

定价: 12.00 元

前 言

石油物探综合解释是石油地球物理勘探领域中重要的一个环节。在国内外有关学术刊物上已经发表了不少文章,在国外也有一些专著。然而,迄今为止,国内还没有一本石油综合物探方面的专著。同济大学海洋地质与地球物理系在中国科学院院士刘光鼎教授的倡导下建立了综合地球物理学科研究方向,从70年代末起,在综合地球物理勘探领域内,重点是在石油综合物探方面做了许多工作。研究的地区从松辽到海南,从准噶尔到苏浙皖,从辽东湾到珠江口,几乎遍及全国。本书的编写除了参考国内外有关文献外,主要是十几年来综合物探学科组教学和科研成果的总结与归纳。本书大量应用实例是第一次公开发表。

我国虽然经过几十年油气勘探发现了一大批油气田,由于我国幅员辽阔,地质地球物理条件复杂,勘探程度很不平衡。其表现是东部勘探程度高,西部勘探程度低;陆地工作多,海域工作少;新生界工作多,古生界工作少;陆相比海相的发现和勘探多;构造圈闭比非构造圈闭的发现和勘探多。当前我国油气勘探已转入到向广度和深度进军的阶段,前者要求逐步全面查清我国现有盆地的远景和发现新的勘探领域,后者要求寻找那些深度和难度更大的油气藏。从这一任务出发,过去相当长时期内基本上只依靠地震勘探的作法已面临困难,尤其在地震勘探难以达到的地区。因而,石油勘探中综合物探方法的应用就成为必行之举。所谓综合,目前的概念已发生根本变化,从过去几种方法的同时应用和并列的单独解释,发展成方法之间的相互沟通和物性参数之间的互相转换;从过去的以定性解释为主发展到今天的以定量解释为主的阶段。因而,综合物探所能解决问题的能力已大为提高。

当前,石油综合物探学科发展的广阔前景与本学科专门著作较少构成了尖锐的矛盾。为此,我们提供了这本专著。本书将主要论述各种物探方法,主要是非地震方法与地震方法相互配合的原理和资料综合解释的方法。其中第一章论述综合地球物理勘探原理,第二章论述地球物理资料综合处理与解释方法,第三章与第四章分别叙述综合物探方法在油气盆地与油气圈闭勘探中的应用。

本书在编写过程中得到了中国石油天然气总公司、海洋石油天然气总公司、地质矿产部及其下属各单位和有关院校领导与专家的极大支持与关怀。同济大学海洋地质与地球物理系和各位老师,尤其是综合物探学科组的其他老师与历届研究生、本科生对本书的编写也给予了大力支持,在此向他们表示衷心感谢。这里特别要感谢石油工业出版社编辑部在本书编写过程中给予的支持和帮助。

本书第一章由王一新编写,第二章由王家林编写,第三章由钟慧智、王家林编写,第四章由万明浩、王一新、钟慧智编写,全书由王一新统编。

最后热忱欢迎广大读者对本书中的问题予以批评指正。

作 者

1994年12月

序

地球物理学是应用物理学的理论、方法和技术来认识地球，并在资源勘查、环境保护和灾害防治等社会发展和经济需求的多种领域中获得广泛应用。尤其是多半个世纪来，应用地球物理方法在油气、金属矿床的勘查中所取得的成效，不仅推动了自身的进步，被称为地球物理勘探（简称为物探），还反过来加深了对地球的认识。

姑且不论物理学起源于对地球的认识，并为其提供了广阔的应用领域，仅从地球物理学与物理学的关系来看，其间继承与发展的脉络是十分清楚的，只是地球物理学及其应用（地球物理勘探）有明确的研究目标与对象（地球及资源、环境与灾害）。从而还必须根据认识地球的程度来指导自己的工作。

由于矿产资源，尤其是油气资源的需求，地球物理勘探的仪器、方法、技术，从 50 年代以来，一直处在突飞猛进之中，而计算机技术更促使物探在数据采集，资料处理、地质解释与成果表示等方面都更上一层楼。例如，重力仪器已由毫伽级提高到微伽级；磁力仪已由成十个 nT 提高到十分之几的 nT；反射地震勘探在油气田勘查中得到充分的应用，也促使它本身的巨大发展，50 年代电子管的光电地震仪，动态范围仅 25dB，经历了 60 年代，模拟磁带地震仪，70 年代二进制数字地震仪和 80 年代的瞬时浮点数字地震仪，其动态范围已由 45dB 提高到 120dB，使地震信号几乎可以无畸变地记录下来，再加上计算机对各种物探方法的应用发展，从处理机，到工作站，到并行机的进步，使物探解决地质任务的能力和应用领域都得到极大扩展。因此，面对中国雄伟的国民经济建设，其应用前景是十分美好的。当然，这里有许多新领域（例如浅层的工程与环境问题，深部的结构与过程问题）需要去开拓，同时地球物理也必须进一步完善自己的方法、技术，提高解决各种层次中复杂地质问题的能力，努力满足社会经济发展的需求。

但是，必须清醒地认识地球物理勘探的两个基本问题，即方法本身的片面性与反演问题的不适宜性或多解性，而这两个基本问题的解决，只有在地质理论的指导下，走综合物探的道路。

磁力勘探和重力勘探一样，在位场理论的基础上，通过重力异常来认识地球内部结构，依据是岩石的磁化率差异与密度差异，它们具有良好的水平分辨能力，异常图上的梯阶带可以确定断裂的位置，延拓不同高度可以大体估算断裂的延伸深度，而不同方位的方向导数能够帮助判断平面上断裂系统的展布，然而，它们的垂向分辨能力很差，需要利用钻探或反射地震资料进行检验与控制。人工场的反射地震与电测深资料分别以岩石的波阻抗（速度与密度的乘积）差与视电阻抗差为参数，具有良好的垂向分辨能力，而横向分辨能力很差，只有三维观测才能较可靠地给出断裂位置，尽管如此，不同物探方法是以不同岩石物性参数为依据，从一个侧面来认识地质体的，从而具有相当程度的片面性。因此，只有综合各种物探资料，才有可能获得对地质体比较全面的认识。

在地球物理勘探中，不论是重磁场，还是电场与时间场，其反演问题的解答都是不适定的，即不具备唯一性解答。而且，迄今为止并没有找出地球物理反演问题的直接解法。采用任何间接方法求解地球物理反演问题，都需要精确的先验知识，或者是已知的初始条件，或

者是从其它途径获得的约束条件。当然不同物探资料（例如重、磁、震）的联合反演，也是一条增加约束条件的途径，但首先必须证实它们具有同一的场源。利用人机交互系统对地球物理剖面进行正反演计算，一般以反射地震资料作为初始模型，使反演结果与正演结果相拟合，再作同源重磁联合反演，而深部界面则需要用反射地震资料作调整，或用大地电磁测深资料检验。

从 1978 年开始，同济大学海洋地质系率先开展石油综合物探研究，随后在系统整理中国海域地球物理资料过程中，对综合地球物理勘探工作进行了总结，得出“一、二、三、多”的方法学：

一种指导，以活动论岩石层板块大地构造作为工作假说，具体分析地质地球物理资料，引申出规律性认识，反对生搬硬套。

二个环节，岩石物性是联系地质与地球物理的纽带，而物理模型是正反演计算的基础，必须切实处理好。

三项结合，在各种地球物理方法相结合的原则下，必须使地质与地球物理、正演与反演，定性与定量三方面的计算与解释结合起来。

多次反馈，在综合解释过程中，通过反复的比较，利用反馈信息进行调整，直到理论曲线与计算值相拟合，取得比较全面的认识。

应用综合物探方法勘查油气资源，应该分层次进行。首先是对沉积盆地进行整体性研究，取得宏观认识，为油气勘查的部署提供科学依据。其次，应对油气圈闭，包括构造圈闭与地层岩性圈闭，进行研究与评价，为钻探提供井位。第三个层次则是对油气储层进行详细描述，为开采提供定量数据。在不同层次的研究工作中，需要针对地质地球物理条件，结合各种地球物理方法的勘探能力，进行认真的选择，求得合理的配置，才可能取得综合物探的良好效益。

从 70 年代末开始，同济大学海洋地质系一直坚持综合地球物理勘探的实践与研究，他们的足迹几乎遍及中国海陆各个油气盆地，积累了丰富的实例，并参考了国内外有关文献资料，编写出《石油综合地球物理方法与应用》，实际上是对过去十几年工作的系统总结与归纳，不仅是建设综合地球物理勘探学科的一本重要教材，对油气综合物探工作有指导意义，而且对金属物探、工程物探也都具有参考价值。为此，特郑重向读者推荐这本书，希望综合地球物理勘探能在中国国民经济建设中发挥作用。

刘光鼎

1995 年 4 月 25 日

目 录

第一章 综合地球物理勘探原理	(1)
第一节 综合地球物理研究的物理—地质基础	(1)
第二节 物探方法的合理配置与综合应用	(17)
第二章 综合地球物理资料的处理与解释方法	(28)
第一节 地球物理异常可靠性评价	(29)
第二节 地球物理异常的分离和信息提取	(32)
第三节 综合地球物理定性解释	(44)
第四节 地球物理资料的综合定量解释方法	(62)
第三章 综合物探方法在含油气盆地勘探中的应用	(78)
第一节 松辽盆地北部深层综合物探解释研究	(79)
第二节 辽东湾西部基底结构综合地球物理研究	(111)
第三节 盆地的区域地质和构造区划研究实例	(126)
第四章 油气圈闭的综合地球物理研究	(139)
第一节 背斜类圈闭的综合地球物理研究	(139)
第二节 与侵蚀面有关圈闭的综合地球物理研究	(148)
第三节 火成岩圈闭的综合地球物理研究	(167)
第四节 圈闭含油气性的综合地球物理研究	(171)

第一章 综合地球物理勘探原理

第一节 综合地球物理研究的物理—地质基础

一、岩石物性

岩石物理性质的差异是进行地球物理勘探的前提。岩石物性研究是地球物理勘探的基础，其作用可以归纳为以下四个方面：（1）勘探的布署和方法的选择要依据勘探对象的物性差异；（2）正演物理—地质模型构组也要用到物性参数的数值；（3）了解物性参数的变化规律和变化范围，对于克服地球物理反问题的多解性和不稳定性也是十分有益的；（4）确定某一类岩石各种物性参数间的实验相关关系，对于物探资料的综合解释是十分有用的。

近年来，石油地球物理勘探有了飞速发展，已经从单一解决构造问题，向全面解决构造、沉积、油气问题推进。这些进展既为岩石物性研究提供了新的手段，又向岩石物性研究提出了更高的要求。

（一）岩石物性的影响因素

1. 沉积岩

沉积岩一般由大小和形状不同的岩石颗粒胶结而成。岩石颗粒之间有孔隙，孔隙中充填有液体（水、石油）、气体或它们的混合物。因此沉积岩的物性主要决定于这些岩石颗粒与孔隙中充填流体的物性及孔隙度的大小。下面我们分别就密度、弹性波传播速度、电阻率、磁性等方面分析影响沉积岩岩石物性的各个因素。

1) 密度

岩石成分的影响。它的影响体现在岩石固相的矿物密度 δ 的差异上， δ 等于固相的质量与体积之比。大多数沉积岩石的矿物密度从 $2.5\text{g}/\text{cm}^3$ 变化到 $3.0\text{g}/\text{cm}^3$ 。矿物密度最大的是白云岩（ $2.76\sim 2.88\text{g}/\text{cm}^3$ ）和硬石膏（ $2.92\sim 3.0\text{g}/\text{cm}^3$ ）；最小的是岩盐（ $2.12\sim 2.22\text{g}/\text{cm}^3$ ）和石膏（ $2.37\sim 2.48\text{g}/\text{cm}^3$ ）；取中间值的是泥岩和粉砂岩（ $2.58\sim 2.78\text{g}/\text{cm}^3$ ）。

孔隙及孔隙中流体的影响。含孔隙岩石的密度 σ 可由下式计算

$$\sigma = (1 - k_{\text{孔}}) \delta + k_{\text{孔}} \sigma_{\text{流}}$$

式中 $k_{\text{孔}}$ ——孔隙度系数，它等于孔隙度体积 $v_{\text{孔}}$ 与岩石总体积 V 之比；

$\sigma_{\text{流}}$ ——孔隙中充填的流体的密度。

由上式可看出，含孔隙岩石的密度 σ 不但与矿物密度 δ 有关，还与孔隙度 $k_{\text{孔}}$ 及孔隙中流体密度 $\sigma_{\text{流}}$ 有关。当孔隙中全部充水时，则 $\sigma_{\text{流}}$ 为水的密度，若孔隙中除了水以外，还有一定数量的石油和天然气时，则 $\sigma_{\text{流}}$ 可按这三种成分所占的比例计算得出。

埋深和压力的变化对密度的影响，实际也是通过它们对岩石孔隙度的影响而体现出来的。

2) 速度

岩石成分的影响。它是影响速度的最重要因素。如果岩石是致密的，则波在其中的传播

速度只取决于岩石的矿物成分。通过将孔隙度外推到零，得到以下致密岩石的速度值（单位为 km/s）：泥岩——1.8~4.9；泥质砂岩——5.7；不胶结砂——5.3；胶结砂岩——5.9；石膏——5.8；岩盐——4.3~4.6；硬石膏——5.8~6.1；石灰岩和白云岩——6.4~7.9。

孔隙度的影响。众所周知，岩石中孔隙度和速度间最简单的联系由平均时间方程描述

$$\frac{1}{v_{\text{岩层}}} = \frac{k_{\text{孔}}}{v_{\text{流}}} + \frac{1-k_{\text{孔}}}{v_{\text{固}}}$$

式中 $v_{\text{岩层}}$ ——在岩层中的速度；

$v_{\text{流}}$ ——在流体中的速度；

$v_{\text{固}}$ ——在岩石骨架中的速度。

埋深和压力的影响。这一因素对速度的影响要比对密度的影响复杂，埋深和压力除了引起孔隙度变化而影响速度变化外，还有以下复杂情况。在自然埋深状态下在岩石中的速度取决于所谓差异压力，它是所有上覆岩层引起的静地压力（围压）与包含在岩石骨架孔隙和裂缝中的液体和气体的压力（孔隙压）——内压力之间的差。当围压大于孔隙压时，差异压力为正，其数值越大，速度增加得越多。当围压小于孔隙压力时，差异压力为负，其数值越大，速度减少得越多。后一种情况，也就是所谓的地下异常压力区。利用低速异常预测地下异常压力区，曾经是地震勘探的热点课题之一。

3) 电阻率

岩石成份的影响。由于岩石造岩矿物的电阻率十分高（ $10^6 \sim 10^{12} \Omega \cdot \text{m}$ ），它比液相电阻率高 6~8 个级次，因此，大多数岩石的电阻率将不决定于它们的矿物成分，而决定于充填在孔隙空间中流体的电导率以及孔隙的结构和连通性。但是当岩石中含有粘土时，由于粘土吸附大量的水和盐，而拥有很大的表面电导，使得岩石电阻率大大减小。

孔隙度的影响。假定岩石由球形颗粒组成，并且孔隙中充满了水，则含水层的电阻率 $\rho_{\text{含水层}}$ 可由下式表示

$$\rho_{\text{含水层}} = (3-k_{\text{孔}}) \rho_{\text{水}} / 2k_{\text{孔}}$$

式中 $\rho_{\text{水}}$ ——孔隙中水的电阻率。

由于地下岩层中的水均有一定的矿化度，所以其电阻率比纯水低得多，它的电阻率随溶液矿化度的增长而按线性规律减小。

岩石的压力对电阻率影响不大，而温度则对电阻率有较大影响。

4) 磁性

相对于岩浆岩和变质岩而言，沉积岩的磁性是十分微弱的，绝大部分沉积岩均可看成是无磁性或弱磁性，当含有一定数量铁磁性矿物（磁铁矿、磁赤铁矿、赤铁矿等）时，沉积岩可以显示一定磁性，磁性的强弱主要决定于铁磁矿物的含量，这些铁磁矿物的载体可以是砂质——粉砂质，也可以是粘土质的。

2. 岩浆岩与变质岩

1) 密度

由于岩浆岩与变质岩的孔隙度都很小，一般不超过 2%~3%。因此，它们的物性主要

取决于岩石的成分。

对所有的岩浆岩，都存在以下明显关系：当基性程度增加时，密度增加，这主要是由于铁镁组分增加，二氧化硅减少。在侵入岩中平均密度最低的是花岗岩 ($2.57\text{g}/\text{cm}^3$)，花岗斑岩的平均密度为 $2.69\text{g}/\text{cm}^3$ ，斑岩为 $2.81\text{g}/\text{cm}^3$ ，辉长岩为 $2.95\text{g}/\text{cm}^3$ ，各种辉石和橄榄岩为 $3.19\sim 3.27\text{g}/\text{cm}^3$ ，当化学成分相同时，从侵入岩到喷发岩，从古生界喷发岩到新生界喷发岩，密度降低。

碱性岩石通常比它的正常类别岩石的密度要大，但是当在碱性岩石的长石晶体中存在微斜长石时，这种关系遭到破坏。

侵入岩的孔隙度、结构构造特点对它的密度没有多大影响。喷发岩的原有结构构造及成岩作用程度对它的密度有一定影响。由于副矿物的富集，可以使岩浆岩密度增加 $n \times 10^{-1}\text{g}/\text{cm}^3$ 。

变质岩的密度取决于它的矿物成分和原始岩石变质程度。页岩和千枚岩密度相对较低 ($2.45\sim 2.60\text{g}/\text{cm}^3$)，含硅、云母和石英——绿泥石的绢云母页岩、大理石和大理石化灰岩的密度为中等 ($2.60\sim 2.75\text{g}/\text{cm}^3$)。绿泥石页岩、角闪石页岩和阳起石——绿泥石页岩的密度较高 ($2.75\sim 2.85\text{g}/\text{cm}^3$)。对正变质岩而言，云母片麻岩密度较低 ($2.60\sim 2.65\text{g}/\text{cm}^3$)，角闪石、辉石片麻岩密度较高 ($2.75\sim 2.85\text{g}/\text{cm}^3$)，角闪石最高 ($2.85\sim 3.10\text{g}/\text{cm}^3$)。接触变质和超变质形成的岩石的密度在很大范围内变化，但与原始岩石密度差别不大，变化范围为 ($2.65\sim 2.80\text{g}/\text{cm}^3$)。

2) 速度

与密度一样，纵波速度随岩石基性度增加而增长。在岩浆岩中，花岗岩的速度为 $5.15\sim 6\text{km}/\text{s}$ ，角闪石为 $5.3\sim 6.5\text{km}/\text{s}$ ，辉长石为 $6.1\sim 7.4\text{km}/\text{s}$ ，未蚀变的超基性岩则为 $7.8\sim 8.7\text{km}/\text{s}$ 。

在变质岩中，从浅变质相到深变质相，波速增大。黑云母片麻岩为 $5.2\sim 5.8\text{km}/\text{s}$ ，角闪岩为 $7.0\sim 7.5\text{km}/\text{s}$ ，榴辉岩为 $8.0\sim 8.4\text{km}/\text{s}$ 。

横波在所有类型的岩石中的速度比纵波要低， $v_p/v_s=1.7\sim 2.2$ 。

除了岩石成分外，岩石中的一些微结构也会对速度有一定影响，例如肉眼看不到的微裂隙会引起速度降低。

3) 电阻率

火成岩和变质岩的电阻率一般都很高，可达 $10^3\sim 10^6\Omega\cdot\text{m}$ 。但是当存在石墨化、硫化及蛇纹岩化作用时，电阻率可大为降低，断裂破碎带由于充填有矿化水，也会使电阻率大大减小。

4) 磁性

火成岩的磁化率主要取决于它的磁性矿物含量，并且随着岩石基性程度增加而磁性增强。

喷发岩除了有感应磁化强度外，还有很强的剩余磁化强度，尤其是年代较新的中生界喷发岩，它的剩磁可以比感磁强得多，而且其方向可以与现代地磁场方向有很大差别，甚至相反。

变质岩的磁性与原来的基质有关。沉积岩变质而成的副变质岩一般为弱磁或无磁；由侵入岩变质而成的正变质岩与其原来的磁性矿物含量有关，一般随基性程度增加而增加。

变质岩的磁性还与其变质程度有关，通常变质程度越高，磁性越强。

(二) 岩石物性变化规律

1. 物性界面与地质界面

岩石物性研究的一个重要方面就是研究它的变化规律。石油地球物理勘探的最主要任务是解决石油地质构造问题，它的前提就是不同构造层之间的物性差异，也就是构造层面上的物性跃变。这是物性变化的主要规律之一。

由于每个构造层有不同的构造及沉积特征，在岩性、岩相上有较大差异，所以往往成为明显的物性界面。例如在 80 年代南方碳酸盐岩攻关期间，作了大量岩石物性研究，经过综合分析，得出下扬子地区综合地球物理特征，如表 1-1^[5]。

表 1-1 下扬子综合地球物理特性表

地 层 系 统			下 扬 子 区						
界	系		密度 g/ cm ³	纵波速度 m/ s	横波速度 m/ s	磁化率 4πk×10 ⁻⁶ SI	电阻率 Ω·m	对应波组	
新 生 界	第四系 Q		1.98~2.00	2500		10~190	20~50	—T ₂ ⁰ —T ₄ ⁰	
	第三系	N	2.15			0~100			
		E	2.35	0~300					
				0~170					
中 生 界	白垩系 K		2.38	4700~5000	2200~2800	3~780			
	侏罗系 J		2.55~2.60			6~230			
	三叠系 T								
古 生 界	上 古 生 界	二叠系 P	2.65~2.69	5000~6000	2900	6~29	100~200	—T _g ⁰ —T _g ¹ —T _g ² —T _g ³	
			2.23~2.63						
		石炭系 C	2.55~2.72	5700~6700	2500~3000				
		泥盆系 D	2.55~2.64	3700~5000	2300~3000				
	下 古 生 界	志留系 S	2.45~2.62	4000~4200	2400~2800	14~44			
		奥陶系 O	2.60~2.71	5600~6900	2500~3100				5~20
		寒武系 C	2.74~2.78	6300~6800	2800~3100				
		震旦系 Z	2.80~2.82	6500~6800	3100~3300				
中 晚 元古界		浅变质岩系 Pt ₂₋₃	2.65~2.70	5700~5800		<150	10~50	—T _j ⁰ —T _j ¹	
下元古界 ~ 太古界(?)	深变质岩系 Pt ₁ ~Ar(?)	2.60~2.81	6300~6500 (?) (?)	500~2000		300~500	—T _c —T _{cm}		
下 地 壳		2.90	6500~7500	40~n×10 ³		—T _m			
上地幔岩石圈		3.3	7800~8000						

在各个大构造层内还会有一些次级界面，例如作者在江西弋阳盆地作电法工作时，发现在白垩系内部存在一个明显的电性界面（图 1-1）。值得注意的是盆地的基底常常是一个重要的物性界面。

2. 岩石物性的垂向变化规律

除了分界面上的跃变以外，岩石物性还存在垂向（沿深度）逐渐变化的规律，尤其在中新世砂泥岩地层中比较明显地存在这一规律。

由于静地压力逐渐增大的结果，沉积盖层碎屑岩逐渐压实。压实最明显的是泥质岩石，其次是粉砂质岩石，具有刚性联系的砂岩压实程度最差。按压实特征分，可分为三个深度段。第一段从 0 到 8~10m，粘土孔隙度从 66% 减小到 40%，砂岩和粉砂岩的孔隙度从 56% 减小到 40%。第二段从 8~10m 到 1200~1400m，粘土（泥岩）、砂岩和粉砂岩的孔隙度减小到 20%~21%。第三段从 1400m 到 6000m，以缓慢压实为特征，按指数规律沿深度渐渐衰减。在 6000m 深度时，砂岩、粉砂岩的孔隙度降到 10% 以内，泥岩降到 7%~8% 以内。由于孔隙度的变化，使密度和速度也发生不同程度的变化。

除了压实这种物理变化外，沿深度还会发生形成新矿物取代旧矿物这样的化学变化。据有关文献⁽²⁾，沉积物内发生的变化，由浅至深可划分为同生作用、成岩作用、后生作用、变质作用四个阶段。在该文献中，主要对前苏联一些地区的砂泥质煤系地层的岩石物性进行了统计分析和研究，发现了在这些地层中存在着岩石物性的逆变现象。

第一个逆变范围处于深度 25~75m（图 1-2），在这深度之上，粘土的孔隙度大于粉砂的孔隙度，粉砂的孔隙度大于砂的孔隙度；在这深度之下则有相反的关系。除了孔隙度以外，干燥岩石密度 δ_F 和饱水岩石密度 $\delta_{\text{湿}}$ 也有类似的逆变规律。在 25~75m 这一逆变深度范围内，粘土、粉砂和砂的孔隙度和密度实际上不存在多少差异。这一逆变深度范围正好处于同生作用与成岩作用分界处。

随着深度的继续加深，粘土、粉砂和砂的孔隙度、密度和速度的差异增加，在深度 1000~1200m 处达到最大差异，以后又逐渐缩小。

在 2250~2500m 深度间隔内出现沉积物孔隙度、密度和速度第二个逆变范围（图 1-3）。在这逆变范围后，泥岩的孔隙度最大，密度和弹性波传播速度最小；而砂岩的孔隙

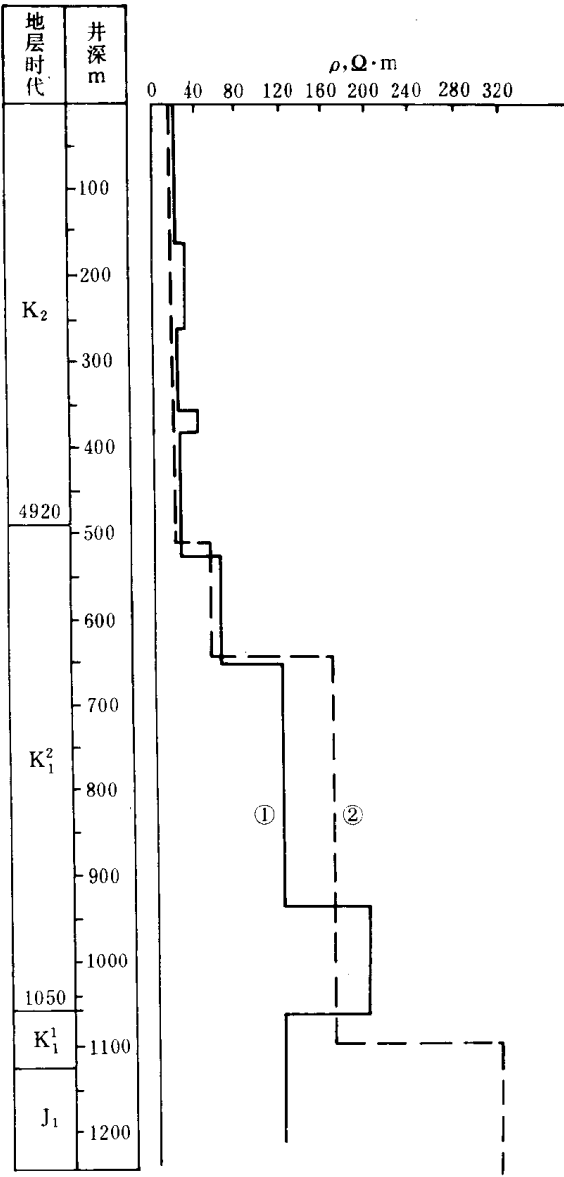


图 1-1 电测井剖面与 CSAMT 井旁测深曲线对应关系图

① 电测井曲线；② CSAMT 解释结果

度最小，密度和弹性波传播速度最大；粉砂岩介于两者之间。这一逆变范围也是成岩作用与后生作用的分界线。

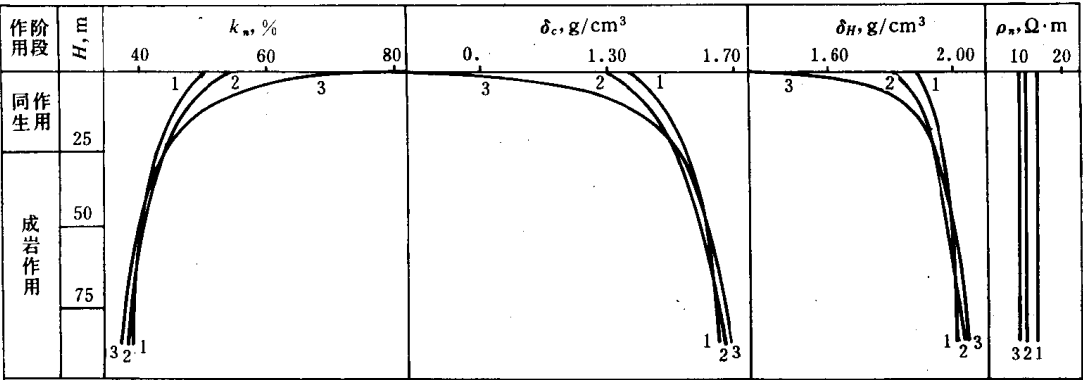


图 1-2 同生作用和成岩作用分界处砂泥岩层物理性质的变化
1—砂；2—粉砂；3—粘土

在深度 5800~6000m 处还存在着第三个逆变范围，这也是后生作用与变质作用的分界线。这一逆变范围有三个特点，第一，它不仅存在机械压实，还开始产生变质；第二，它发生在孔隙度值非常低的情况下，所以岩石物性参数变化很小；第三，这一逆变范围上下的电阻率也发生逆变（图 1-4）。

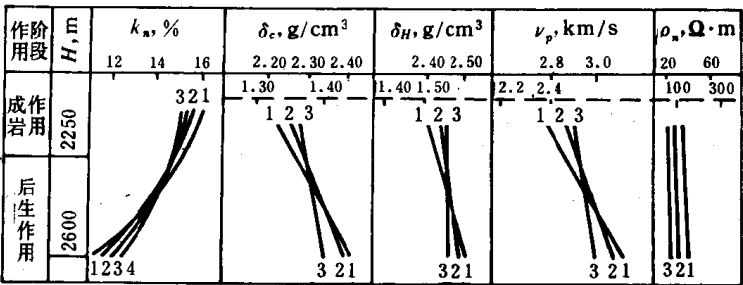


图 1-3 成岩作用和后生作用分界处砂泥岩层物理性质的变化
1—砂岩；2—粉砂岩；3—泥岩

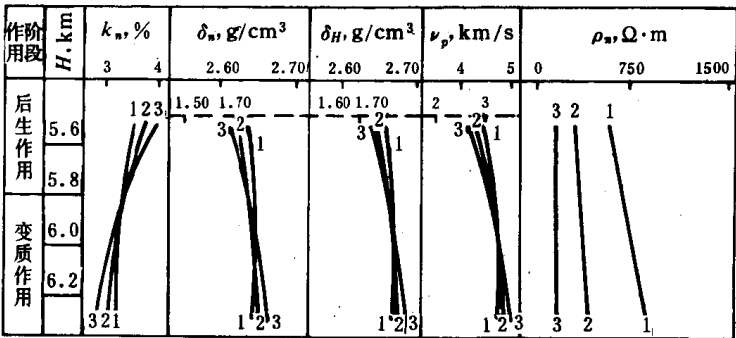


图 1-4 后生作用和变质作用分界处砂泥岩层物理性质的变化
1—砂岩；2—粉砂岩；3—泥岩

本文作者曾在松辽盆地北部对上百口井的上万块标本进行了密度测定, 并对测定结果进行了分区、分层、分岩性(砂岩、粉砂岩、泥岩等)统计整理。发现密度随深度有着上述相类似的变化规律。总结起来有以下特点:

- (1) 密度随深度的变化近于线性关系或指数关系(图 1-5)。
- (2) 各层 $\sigma-H$ 回归直线的斜率随地层时代的衰老而减小, 这说明随着岩石埋藏时间增长、埋深加大, 密度随深度的变化率逐渐降低, 最终趋于常数。
- (3) 各区同一层的 $\sigma-H$ 回归直线具有相近的斜率, 说明它们在同一区内的同一地层经历了基本相同的成岩后生现象。
- (4) 泥岩、粉砂岩和砂岩的密度随深度变化也存在着逆变点(图 1-6)。第一逆变点在深度 200m 附近, 第二逆变点深度在 300m 左右。在两个逆变点之间深度范围内, 泥岩密度大于砂岩密度。在逆变点之外深度上, 泥岩密度小于砂岩密度。

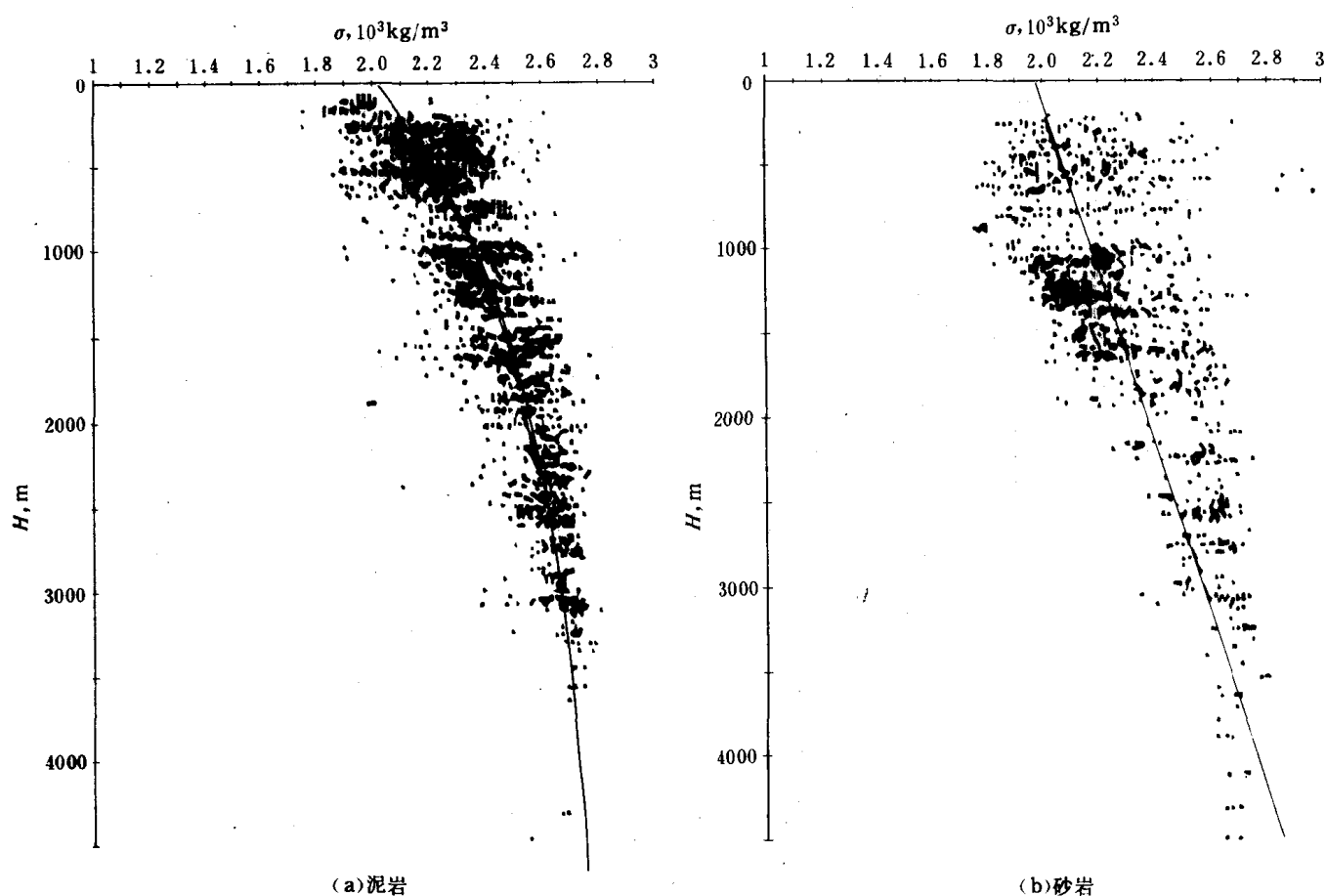


图 1-5 松辽盆地北部密度-深度关系图

除了上述一般情况下, 岩石物性随深度的变化还存在一些特殊情况。

对快速沉降而又泥岩占优势的剖面中, 由于在压缩压实时不存在挤出通道, 沉积水排不出去, 一部分压缩负荷被位于异常高岩层压力条件下的孔隙体所承受。在这种异常高岩层压力区, 甚至当下沉到 5~6km 时, 碎屑岩的密度也不超过 $2.3 \sim 2.5 \text{ g/cm}^3$, 孔隙度也可达到 10%~20%。

碳酸盐岩岩石物性的研究表明, 它的物性随深度的变化非常缓慢, 对时代较老的碳酸盐

岩而言，它的岩石物性可以看作与深度无关，而主要决定于岩石成分的变化。盐岩、石膏等水化学岩则更是如此。

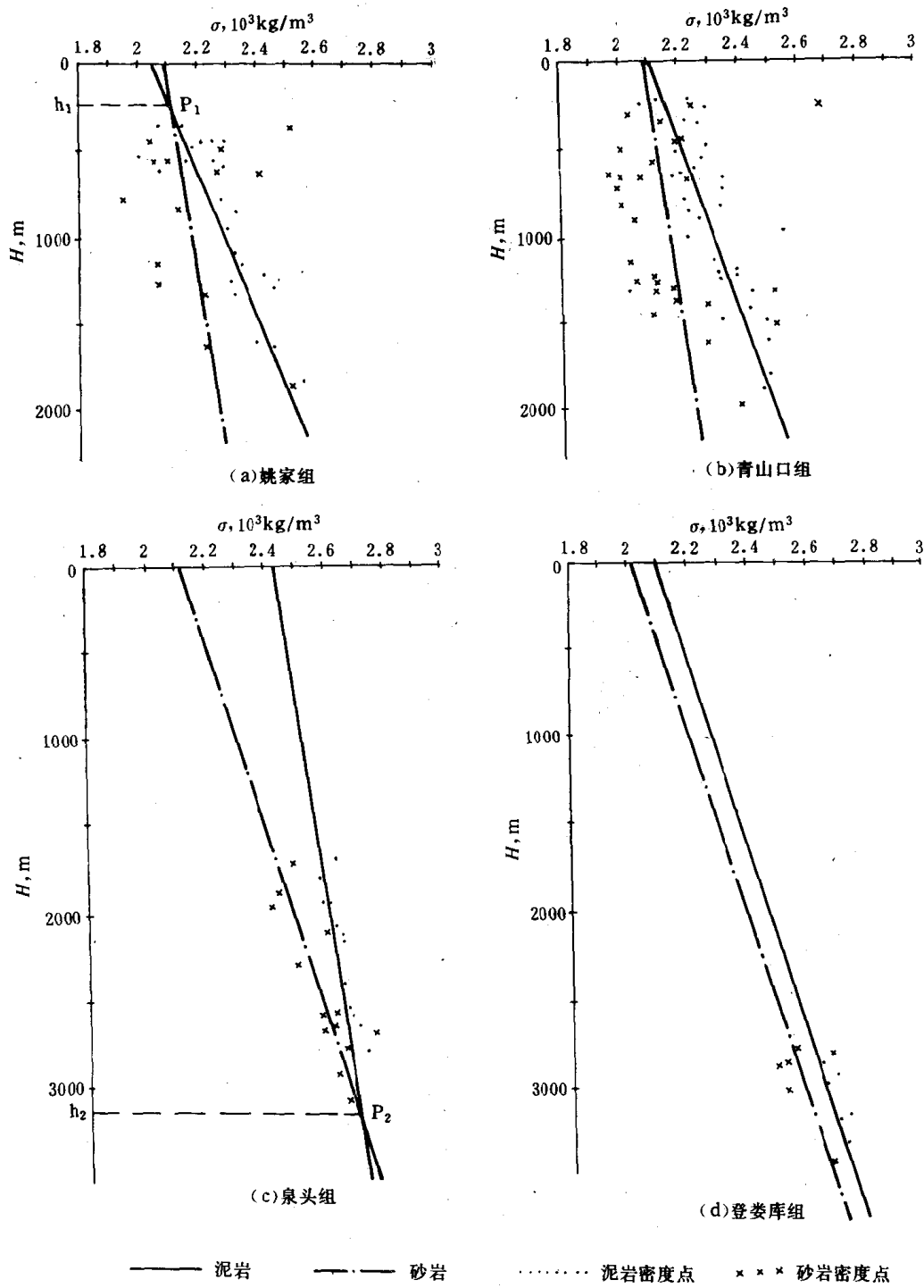


图 1-6 松辽盆地北部砂岩与泥岩密度的逆变关系图

3. 岩石物性的横向变化规律

除了垂向变化外，岩石物性沿水平方向（横向）的变化也是明显的。这种变化可以由以下几种原因引起的。第一，岩性岩相的变化。由于沉积物形成期间的物源分布和搬运路程

的不同，造成了岩性的逐渐变化及岩相的不同分布。第二，埋深的变化。同一地层，由于埋深不同，也会造成物性的差异。第三，在不同部位经受构造变动不同，也会造成物性差异。

在图 1-7 上表示了松辽盆地北部嫩江组密度变化的平面图。图上表示的高密度区应与当时的沉降中心相一致。因为沉降中心埋深较深，且泥岩成分较多，造成密度较大。

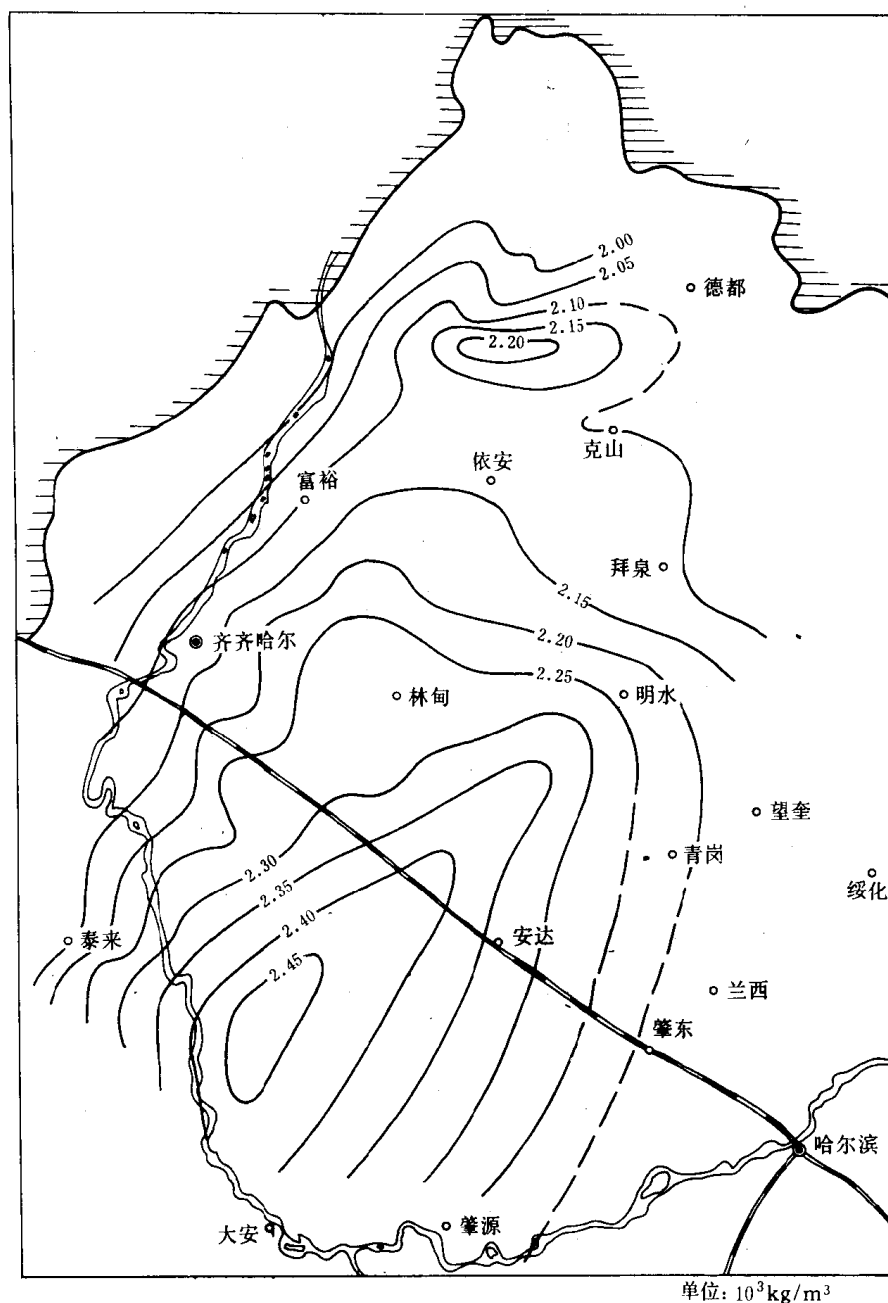


图 1-7 松辽盆地北部嫩江组密度平面分布图

上述这种变化可以称之为岩石物性的区域性变化。在每一个局部构造范围内，也会存在岩石物性的局部变化。以岩石密度横向变化为例，有些情况下，向背斜隆起顶部密度减小，而在另一些情况下，密度却增大。对于不同类型的构造，岩性岩相的变化是不同的，在估计局部构造上密度变化时，通常考虑的是顶部和翼部的密度差异。这样的估计是对幅度比较小

的地台型平缓构造进行的。在幅度比较大的构造上，同一年代碎屑岩密度在翼部的增加，主要是由于它在翼部埋深加大引起的。

与构造顶部相比，翼部岩石密度的变化主要是由以下原因引起的：

(1)当各个层的厚度保持不变时，也就是沉积后的构造：①岩性成分的逐渐变化（颗粒、胶结成分、含泥量的增大）；②下沉对翼部的影响；③在受力岩石压力分布变化影响下裂隙发育程度的差别；④储集层所含流体成分（油、气、水）的变化；⑤在局部构造作用下变质作用的差别；⑥后生变化的差异特征。

(2)当各个层的厚度发生变化时，也就是同沉积构造：①十分高和十分低密度岩层厚度的减小（直到尖灭）；②可塑岩石（泥岩、岩盐等）厚度的明显增大；③孔隙流体成分的变化。

在实际情况下，密度的变化是由上述各种因素叠加在一起影响的结果。

根据不同作者的资料，在平缓地台构造上发现以下典型的横向密度变化，碎屑岩（除了泥岩以外）密度在构造顶部有系统性减小。泥岩密度在构造顶部既可减小，也可增大。还确定了在埋深2~2.5km以内构造顶部岩石性质变松的现象。对大多数碳酸盐岩而言，只是在遭到很强的后生变化（硬石膏化和方解石化）时，才在构造顶部发现明显的岩石变松，而一般来说，碳酸盐岩在构造顶部都要变密，在油水接触带也发现密度增大现象。

在图1-8上展示了前苏联乌斯特-巴雷科构造上的密度剖面图⁽¹⁾。

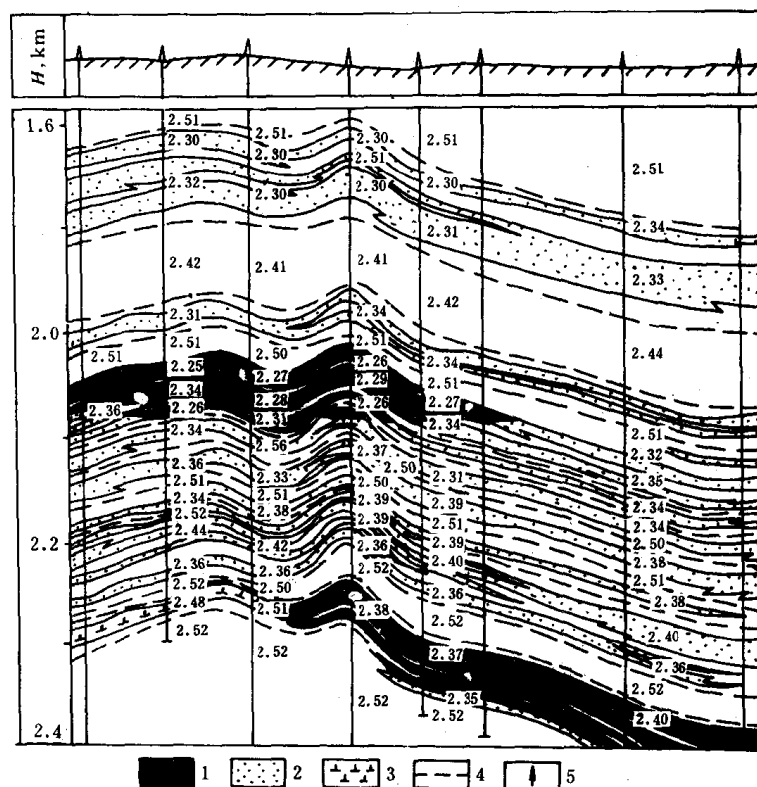


图1-8 乌斯特-巴雷科地区密度剖面图

1—石油；2—砂岩；3—石灰岩，砂藻类粘土；4—粘土；5—钻井；数字是密度值(g/cm^3)

4. 岩石物性的分区特点

当对一个比较大的区域进行岩石物性研究时，由于其内部各分区的构造和沉积特征有较