

石油地球物理勘探丛书

石油重磁解释



王家林 王一新 万明浩 编著



石油工业出版社

出版者的话

近二十年来，石油地球物理勘探技术日新月异，发展迅速。为了总结地球物理与地质相结合的经验，推广石油物探方法的新技术，我们组织有关专家、教授编写了这套《石油地球物理勘探丛书》，供石油地球物理工程师学习参考，以期做到物探工作中设计的合理性、采集的可靠性、处理的正确性、解释的科学性，提高解决各种复杂问题的能力。

这套丛书以应用为主，对基本概念和基础理论只做简要阐述，侧重于介绍各种新技术、新方法在实际工作中的应用。内容包括石油重、磁、电、地球化学、放射性、地震各种方法的资料采集、数字处理、成果解释、应用等，预计编写二十余册，每册都力图讲述清楚一个课题，它既是石油物探工作者施展才能的园地，又是您工作案旁的良师益友。让我们为发展石油物探技术，来共同编好和使用好这套丛书吧！

序

王家林、王一新、万明浩等同志编写的《石油重磁解释》，现在终于出版问世了。这是同济大学海洋地质系在过去十年（1980—1990）里，坚持综合地质—地球物理研究所取得的一系列成果之一。

长期以来，在油气勘探工作中，广泛应用反射波地震勘探方法和技术，从而，一方面促使反射地震仪器设备一再更新换代，飞速发展；一方面又为新油气田的发现提供了更为精确的资料，特别是地震地层学的出现，使地震勘探从寻找构造进入查明与岩性有关的隐蔽圈闭。但是，任何地球物理勘探方法，其中包括反射地震方法，在勘探能力上都是有限的，更何况油气田的发展必须分别对沉积盆地、构造圈闭与隐蔽圈闭，以及储集体取得尽可能丰富的资料，以求得比较深入和全面的认识，因此，开展综合地球物理研究，使重、磁、电、地震等多种地球物理方法相互结合是完全必要的。

过去，在油气勘探工作中，仅在区域调查或盆地研究中应用重力与磁力方法，在文献资料中也曾见到过使用重磁查明局部构造的个别实例。随着重磁仪器的进步，特别是近年将电子计算机应用于重磁资料的处理与解释，使得重磁的勘探能力有了极大的提高，它们不仅能在盆地研究中作出更多的贡献，而且有可能在圈闭研究中也发挥作用，至少也是反射地震的重要补充。

应该指出：我们在提出并开展综合地球物理研究的实践中，认识得到了不断的深化。

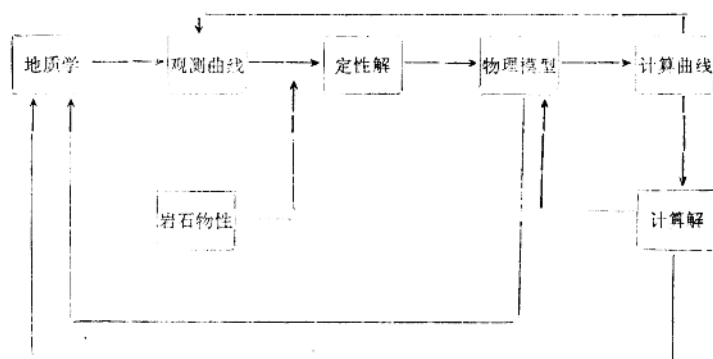
首先，我们注意到了当代地球科学的发展具有极其鲜明的特点：

（1）全球性 自从板块大地构造出现以来，它作为当代地球科学的最高总结，不仅对过去的地质认识进行了宏观的科学概括，而且在活动论的基础上建立起新全球构造的概念。此后，任何地球科学研究都应努力接受这种指导，并将自己的工作纳入新全球构造体系之中，以便使全球性的普遍规律与具体的实践结合起来，创造性地发展地球科学理论，并用来指导实践。

（2）综合性 地球是复杂的，从地球表面的沉积盆地中寻找出石油和天然气是高难度的。地质、地球物理、地球化学以及其它有关学科都曾为认识地球、大地构造和沉积盆地及其含油性分别作出了应有的贡献，深入发展这些学科无疑是十分重要的。但是，每个学科（以及地球物理勘探中的每一种方法），对上述问题的认识，不仅只是一个侧面，而且又都存在着其本身固有的局限性（例如，任何地球物理方法都有其反演问题的多解性）。因此，为了取得对问题的比较全面和比较深刻的认识，应以系统工程原理，综合各种学科、各种方法，进行有层次的研究。这种综合性，实际上是以各种学科、各种方法为基础，而又站在它们之上的高层次研究。它不仅是加深地质规律性认识所必要的，同时也是当代地球科学发展的趋势。

（3）现代化 科学技术的迅速发展，为我们研究地球科学、寻找油气资源不断地提供新的仪器设备和新的技术方法。例如，计算机技术的引用，使地球物理的资料采集、数据处理，以及正反演问题的计算，都取得了长足的进展，从而也将地球物理方法解决地质问题的能力提高到一个新的高度。为此，地球物理勘探应尽可能不断地使自己实现现代化。

其次，众所周知，地球物理系统的工作过程可以概略表示如下：



总结十年来综合地球物理研究的实践，我们认识到在此工作过程中必须切实地贯彻下列四条条件原则：

(1) 一种指导 从活动论观点出发，以全球板块大地构造为指导，对问题作具体分析，努力认识其演化历史，即求得其时空分布的规律性；

(2) 两个环节 地球物理场是地球内部物质物理性质的综合反映，具有丰富的地球内部的信息。但要充分认识这些信息，首先必须紧紧抓住岩石物性这一重要环节，因为它是联系地质与地球物理之间的纽带；其次一个重要环节是物理模型，因为它是地球物理资料由定性解释向定量解释过渡的关键；

(3) 三项结合 为了深化地质认识，在解决任何问题的全过程中，都必须努力使各种地球物理资料与地质资料相结合，使定性解释与定量解释相结合，使正演问题与反演问题相结合，因为这是一个特定系统工程的不同层次；

(4) 多次反馈 在地球物理系统工程中，同样也必须依靠各种反馈信息进行完善，特别是消除任何地球物理反演问题的多解性，获取精确的定量解答。

《石油重磁解释》就是在这种认识的背景上提出来的。它首先论述了重磁方法的物理—地质基础和重磁测量的基本要求，以及应用电子计算机对重磁资料的整理，然后讨论重磁方法的正、反演问题，其中包括异常的转换与分离，以及各种计算解释方法，并着重阐述了区域地质、局部构造的重磁解释和油气藏的重磁检测，最后给出应用实例。因此，这本书是在油气勘探发展到现阶段，综合地质—地球物理研究逐渐得到认识，重磁方法得以联合应用，特别是使用计算机技术的情况下，同济大学海洋地质系率先贡献出来的一本实用工具书。它集中地反映了同济大学海洋地质系十年艰苦奋斗所积累起来的经验与认识，同时也吸收了国内外同行的资料。希望重磁方法能够得到重新认识与评价，并进一步推动综合地质—地球物理工作，寻找出更多的石油和天然气。

刘光鼎

1990.6.25

前 言

在我国的石油普查勘探中，经典的重磁力勘探方法曾建立过历史性的功勋，但是，随着地震勘探技术的飞速发展，石油重磁●一度步入了低谷。自80年代以来，石油重磁作为综合地球物理勘探的一支方面军又异军突起，以新的姿态投身到石油勘探之中。

重视石油重磁勘探是形势和任务的要求。我国的石油勘探面临着十分严峻的形势：石油勘探工作者要向地质条件困难的地区、向海洋、向沙漠、向山区进军；要向油田的深层要油；要寻找非构造圈闭的复杂的油气藏类型。勘探工作的广度、深度和难度在大大地增加，不进行地震和重磁电法的综合物探，不搞综合勘探就难以担当此重任。

重磁方法在石油勘探中的重振雄风不仅需要，而且也是完全可能的。近一二十年来，由于测量仪器、方法技术的迅猛发展和计算机的普及，石油重磁也有了“今非昔比”的进展。仪器精度的提高，方法技术的改进以及解释方法的发展，都为重磁方法在石油勘探的作用发挥提供了良好的条件，拓宽了应用范围，开创了新的局面。勘探的实践和经验告诉了我们，要充分发挥重磁在石油勘探中的作用，必须抓住两个方面，一是走高精度、精细解释之路，向高精度要信息，向精细解释要效果。二是走综合之路，从综合物探解释中找出路，在综合解释中发挥重磁的潜力。

重磁资料解释是重磁勘探的中心环节，近二三十年来，它从单一的空间域处理和解释发展到空间域和波数域（频率域）两大处理和解释系统，从形状简单物性均匀物体的正反演发展到形状任意物性不均匀物体的正反演，从经典的手工计算为主发展到计算机解释为主，从单一方法的解释发展到综合物探方法的解释，变化之大的确惊人。本书的编写围绕着石油重磁解释这个中心，全面论述了石油重磁的物理—地质基础、工作方法的基本要求和资料整理，资料的处理与解释，并附有典型实例。目的就是为从事石油重磁工作同志提供一本比较新的实用的工具书，同时也作为从事地球物理勘探和石油勘探专业的师生、科技人员的参考书。

从上述目的出发，本书力图体现其先进性、实用性和综合性。对经典的基本理论、实用的公式和方法我们仍作保留，但仅作扼要的概括总结，而重点突出近一二十年来的新理论、新方法和新经验，注意选用国内外的新资料。从实用出发，不仅在编排上围绕着石油重磁解释这一中心，论述了各个环节，而且在解释上又分别按区域地质与局部构造的油气检测两部分来讨论其解释方法，综合性则主要体现在把重磁两种方法有机地结合了起来，这不仅减少了篇幅，同时也阐明了重磁异常之间的联系，便于读者融会贯通，举一反三。这也是和以前重磁教材差异之处。

本书的编写酝酿已久，石油天然气总公司、地质矿产部和有关院校的同行们一直热情鼓励支持着我们，并慷慨提供了大量材料，尤其是刘光鼎教授、许云教授和苏盛甫教授给了我们极大的支持和关怀，肖一鸣副教授以巨大的热情领导和组织了这次编写，并几次讨论了编写提纲，但由于健康原因未能投入具体编写，尽管如此，他还一直关注着我们的编写。此外，同济大学海洋地质系重磁组的其它同志对本书的编写给予了大力支持。在此我们向上述

● 石油重磁在这里系指石油重磁勘探。

同志和前辈们表示衷心的感谢！应该说，没有他们，就没有这本书。

本书由王家林（第三、四、五、六、七章）、王一新（第一章第一节～第五节、第八章）、万明浩（第一章第六节～第八节、第二章）编著，全书由王家林统编，图件由江苏有色金属勘探公司八一四队郭奕馥与同济大学海洋地质系王秀雅、吴美英同志清绘。在此我们深表谢意！

由于受到条件、水平和时间限制，书中的缺点、错误一定不少，随时欢迎读者批评指正。如果本书的出版能为振兴石油重磁作出微薄的贡献，这就算是实现了我们的心愿。

作者 1990年5月

目 录

第一章 石油重磁勘探的物理—地质基础	(1)
第一节 确定岩石标本的密度	(1)
第二节 利用地面重力测量资料确定中间层岩石密度	(15)
第三节 利用其它资料间接确定密度的方法	(18)
第四节 井中重力测量	(24)
第五节 密度资料的利用	(29)
第六节 岩石磁性的岩样测定法及其资料整理	(34)
第七节 利用磁测资料确定自然埋藏条件下岩石的磁性	(41)
第八节 岩石磁性变化的一般规律	(43)
第二章 石油重磁测量的基本要求和资料整理	(46)
第一节 石油重磁测量的基本要求	(46)
第二节 重力改正的讨论	(58)
第三节 磁测改正的讨论	(70)
第四节 重磁资料的计算机整理	(73)
第三章 石油重磁正演问题	(81)
第一节 重磁正演问题的基本途径	(81)
第二节 空间域重磁场的计算及其特征	(85)
第三节 重磁异常波谱及其计算方法	(109)
第四节 物性不均匀时重磁正演问题	(126)
第四章 石油重磁勘探中异常的转换与分离	(140)
第一节 空间域内重磁异常的转换	(140)
第二节 波数域(频率域)内重磁异常的转换	(154)
第三节 空间域内重磁异常的分离	(163)
第四节 频率域内重磁异常的分离	(180)
第五章 石油重磁解释的基本问题	(188)
第一节 重磁反问题的多解性和不稳定性	(188)
第二节 石油重磁解释的一般原则和基本方法	(201)
第六章 区域地质中的重磁资料解释方法	(204)
第一节 概述	(204)
第二节 界面迭代反演法	(206)
第三节 界面直接反演法	(215)
第四节 界面统计反演	(224)
第五节 多层密度界面的反演	(226)
第六节 物性不均匀时界面反演	(250)
第七节 界面物性的反演	(266)

第八节 断裂的解释	(282)
第九节 重磁等物探资料综合解释方法	(288)
第七章 局部构造和油气藏标志的重磁解释	(296)
第一节 典型形体重磁异常常规反演方法	(297)
第二节 重磁异常的计算机反演方法	(311)
第三节 最优化选择法	(317)
第四节 人机联作选择法反演	(329)
第五节 油气藏标志的重力检测	(334)
第六节 油气藏标志的磁力检测	(341)
第八章 石油重磁勘探应用实例	(348)
第一节 江苏南部重磁力等地球物理资料的综合研究	(348)
第二节 重磁力在寻找局部构造和地质体时的应用	(360)
附录 重磁勘探中常用单位制 (CGS和CGSM) 与国际单位制 (SI) 对照表	(368)
参考文献	(369)

第一章 石油重磁勘探的物理-地质基础

岩石的密度和磁性差异是重磁勘探的前提条件,确定不同岩层和地质体的密度和磁性是重磁勘探的基础工作和重要内容。当要确定地下密度和磁性界面的埋深和起伏时,如果掌握了密度和磁性的基本数值,了解了密度和磁性的变化模式和规律,准确地建立地下的物理-地质模型,将能大大减少反问题解的多解性,提高解释的可靠性和精度。

然而,岩石物性研究是我国目前地球物理工作的薄弱环节,随着石油重磁勘探从区域向局部、从低精度向高精度、从定性解释到定量解释、从构造解释到岩性解释、从单一方法到多方法综合勘探的发展,对岩石物性及物理-地质模型的研究提出了越来越高的要求。由于常常忽略了这一工作,重磁方法在石油勘探中的应用受到了很大限制。本书将在这一章中详细介绍确定岩石密度和磁性的各种方法,全面叙述岩石密度和磁性变化的一般规律和物理-地质模型的建立。

第一节 确定岩石标本的密度

一、与岩石密度有关的几个物理参数

在单位体积 V 内物体的质量 M 称为不均匀体的密度 σ

$$\sigma = M/V$$

它的常用单位为 g/cm^3 (克/厘米³) 或 t/m^3 (吨/米³)。

岩石中包含固相、液相和气相物质,因此其密度为

$$\sigma = \frac{M_{\text{固}} + M_{\text{液}} + M_{\text{气}}}{V_{\text{固}} + V_{\text{液}} + V_{\text{气}}}$$

式中 $M_{\text{固}}$ 、 $M_{\text{液}}$ 、 $M_{\text{气}}$ —固相、液相和气相的质量;

$V_{\text{固}}$ 、 $V_{\text{液}}$ 、 $V_{\text{气}}$ —固相、液相和气相的体积。

包含在岩石中的气体和液体充填在矿物骨架颗粒间的空隙中。空隙包括孔隙、微空穴和微裂隙。所谓总孔隙度 n 是指所有孔隙的体积 $V_{\text{孔}}$ 与岩石体积 V 之比

$$n = V_{\text{孔}}/V$$

为了评价总孔隙度还可以利用折算孔隙度

$$k_{\text{孔}} = V_{\text{孔}}/V_{\text{固}}$$

$k_{\text{孔}}$ 与 n 间有以下联系:

$$n = k_{\text{孔}} / (1 + k_{\text{孔}})$$

$$k_{\text{孔}} = n / (1 - n)$$

岩石孔隙中所含水的质量与绝对干燥岩石质量之比称为湿度。为了表征孔隙空间中所包含的水、石油或天然气,利用了含水饱和度系数 $k_{\text{水}}$ 、含油饱和度系数 $k_{\text{油}}$ 和含气饱和度系数 $k_{\text{气}}$

$$k_{\text{水}} = V_{\text{水}}/V$$

$$k_{\text{油}} = V_{\text{油}}/V$$

$$k_{\pi} = V_{\pi} / V$$

二、样本（标本）的选取

选取岩石样本应考虑系统地收集不同构造单元、不同岩性、不同时代、不同深度的样本，使其具有充分代表性，样本的代表性意味着：（1）在样本中应包括组成所研究地质体的所有各种不同的岩石，并应知道每种岩石在地质体中占的百分比；（2）样本的数量应该足够多，以便使样本的特征（平均值、方差等）能足够可靠地确定；（3）样本应处于与自然埋藏时相接近的状态，至少应该知道由实验室测定校正到自然状态岩石的校正值。

样本数量 n 决定于密度剖面的不均匀程度、研究任务和技术可能性。均匀样本的数量大致可由下式计算

$$n = 2.7 \lambda^2$$

式中 $\lambda = e / e_0$;

e ——密度分布的均方偏差值;

e_0 ——确定密度所要求的精度。

岩石标本主要是从钻孔和露头上采取的。当在钻孔中采取时，岩心标本应尽可能地均匀分布，根据研究程度和岩性变化的情况不同取样间隔为0.5到5m。对剖面的上部也要做详细研究，通常，这一区段是最不均匀的，并对重力场的局部特征有明显影响。在露头上取样本时，应注意取未受风化的岩石。样本重量为50—400g。

三、标本密度测定

测量岩石标本的密度最常用方法是静水称重法。标本质量 M 可用天平法称出。标本体积可根据阿基米德原理，用它在空气中的重量 P 和水中重量 P_1 之差求得，体积 V 为：

$$V = \frac{P - P_1}{\sigma_{*} \cdot g}$$

式中 σ_{*} ——水的密度。

g ——重力加速度。

此时有密度

$$\sigma = P \sigma_{*} / (P - P_1) \quad (1.1)$$

为了提高标本测量速度，在重力勘探中常常使用密度计代替天平求密度。密度计有可能产生系统误差。为消除系统误差，必须每天在标准计量上检查2—4次。

对透水岩石，为测定其在天然状态下的密度，要将标本用石蜡密封称重。若未封蜡标本在空气中重量为 P ，封蜡后标本重量为 P_2 ，蜡封标本在水中重量为 P_3 ，则有

$$\sigma = P \sigma_{*} / [P - P_3 - K (P_2 - P)] \quad (1.2)$$

式中 $K = \sigma_{*} / \sigma_{\text{蜡}} - 1$;

$\sigma_{\text{蜡}}$ ——石蜡密度。

为了求得饱水标本密度 $\sigma_{\text{水}}$ ，要把标本预先用水浸泡，而测定饱气岩石的密度 $\sigma_{\text{干}}$ ，则要把标本放入实验炉中烘干后才能进行。

松散岩石（砂、土壤等）的密度，可用比重计法，即称出一定体积的岩石后，按下式计算

$$\sigma = (M - M') / V \quad (1.3)$$

式中 M ——装了岩石后的比重瓶质量；

M' ——比重瓶本身的质量；

V ——岩石体积。

多孔和松散标本的称重，可在煤油中进行，以代替封蜡法。在空气中称出标本重量为 P ，然后用煤油浸泡，再测定饱煤油的标本重量，在空气中为 P_1 ，在煤油中为 P_2 ，则标本密度为

$$\sigma = P\sigma_{油} / (P_1 - P_2) \quad (1.4)$$

式中 $\sigma_{油}$ ——煤油密度。

为了测定岩石固相矿物骨架颗粒的密度 $\sigma_{\#}$ ，要把岩石粉碎成细粒，通过 0.25mm^2 筛孔筛选。矿物骨架的体积，用校准好了的装有液体和岩石粉末的密度计称出。为排除空气，要预先将液体和岩石粉末抽真空。可以采用煤油、水、酒精作为液体。 $\sigma_{\#}$ 按下式计算

$$\sigma_{\#} = \frac{(P_2 - P_1) \sigma_{液}}{(P_0 + P_2) - (P_1 + P_3)}$$

式中 P_0 ——充满液体的比重计的重量；

P_1 ——装有任意数量液体的比重计的重量；

P_2 ——装有任意数量液体和岩石的比重计的重量；

P_3 ——装满液体和岩石的比重计的重量；

$\sigma_{液}$ ——液体密度。

$\sigma_{\#}$ 、 $\sigma_{干}$ 、 $\sigma_{湿}$ 和 n 间有以下关系

$$\sigma_{\#} = \frac{\sigma_{干}}{1-n} = \frac{\sigma_{湿} - n\sigma_{液}}{1-n} = \frac{\sigma_{干}\sigma_{液}}{\sigma_{干} + \sigma_{液} - \sigma_{湿}}$$

$$\sigma_{干} = \sigma_{\#}(1-n) = \sigma_{湿} - n\sigma_{液} = \frac{\sigma_{\#}(\sigma_{湿} - \sigma_{液})}{\sigma_{\#} - \sigma_{液}}$$

$$\sigma_{湿} = \sigma_{\#}(1-n) + n\sigma_{液} = \sigma_{干} + n\sigma_{液} = \sigma_{干} + \sigma_{液} - \frac{\sigma_{干}\sigma_{液}}{\sigma_{\#}}$$

$$n = \left(1 - \frac{\sigma_{干}}{\sigma_{\#}}\right) = \frac{\sigma_{湿} - \sigma_{干}}{\sigma_{液}} = \frac{\sigma_{\#} - \sigma_{湿}}{\sigma_{\#} - \sigma_{液}}$$

式中 $\sigma_{\#}$ ——矿物骨架密度；

$\sigma_{干}$ ——饱气岩石密度；

$\sigma_{湿}$ ——饱液体岩石密度；

n ——孔隙度；

$\sigma_{液}$ ——充填孔隙的液体的密度。

四、对标本测定值进行改正

进行改正的目的是为了消除系统测量误差，把实验室测到的岩石密度值改正到自然埋藏条件下岩石的密度值。消除系统测量误差的最可靠方法是利用系统控制测量得到的各种已知标准密度值。

在地球内部高温高压作用下岩石会压实。这一过程是不可逆的，把岩心标本取出地表以后，标本本身的体积以及孔隙空间的体积变化都很小，对岩石密度测量值作的改正值不会超过 $0.002 \sim 0.004\text{g/cm}^3$ 。为了把岩石密度值改正到自然状态，更重要的还必须考虑充填在孔隙空间中的流体或气体的成分，其改正值为

$$\Delta\sigma = k_{\text{液气}} n (\sigma_{\text{液气}} - \sigma_{\text{水}}) \quad (1.5)$$

式中 $k_{\text{液气}}$ ——含液体或气体的饱和度系数；

n ——孔隙度；

$\sigma_{\text{液气}}$ ——液体（气体）的密度。

由于矿化程度不同，充填在孔隙中的水的密度可以从 1.0g/cm^3 变化到 1.2g/cm^3 。取决于成分不同的石油的密度可以从 0.6g/cm^3 变化到 1.0g/cm^3 ，石油的密度随温度升高而有某些减小，而压力对其影响不大。

风化作用对岩石密度有很大影响。在剖面最上部常常有一个风化破碎带，其厚度约1—10m。由于风化裂隙的发育及水化作用对矿物体积变化的影响，给岩石密度的确定带来很大误差。在破碎带下面还有一个氧化带，其厚度在山区可达300—400m以上。在这一带内由于化学和物理化学变化，使组成岩石的矿物发生一定改造，对岩石密度也有一定影响。

在测量空气-干燥标本时，必须估计岩石的湿度并引入相应的改正。

在文献^[100]中讨论了岩石埋藏热动力条件对物理参数值的影响及改正方法。在深度 D 上的任一物性参数值 $A(D)$ 可由以下方程确定：

$$A(D) = A_{(0)} K_1 K_2 K_3$$

式中 $A_{(0)}$ ——在大气压和常温下的物理参数值；

K_1 、 K_2 、 K_3 ——与静地压力、岩层压力和温度有关的改正系数值。

对孔隙度来说，如果只知道岩石的相对含泥量，可以根据表1.1的资料估算相应深度的 $K_1 K_2 K_3$ 乘积值。

岩石密度改正主要取决于孔隙度和所含流体密度的变化。当相当于在7km深度以内的温度与压力时，矿物密度可取为常数。在这种情况下，埋深 D 处的密度

$$\sigma_{\text{岩}/D} = \sigma_{\text{岩}} \left(1 - k_{\text{R}/D} \frac{\sigma_{\text{液}} - \sigma_{\text{岩}/D}}{\sigma_{\text{液}}} \right) / \left(1 - k_{\text{R}} \frac{\sigma_{\text{液}} - \sigma_{\text{岩}}}{\sigma_{\text{液}}} \right)$$

式中 $\sigma_{\text{岩}}$ ——在实验室条件下确定的含水岩石的密度；

$\sigma_{\text{液}}$ 和 $\sigma_{\text{岩}/D}$ ——在大气条件下和 D 深度处的所含液体的密度；

k_{R} 和 $k_{\text{R}/D}$ ——大气条件下和 D 深度处的折算孔隙度。

表 1.1 在岩层条件下*为了确定砂泥岩孔隙度的改正值的乘积 $K_1 K_2 K_3$

埋 深 km	相 对 含 泥 量 η							
	0		0.2		0.5		0.7	
	范 围	平 均	范 围	平 均	范 围	平 均	范 围	平 均
2	0.995~0.978	0.986	0.990~0.996	0.978	0.976~0.940	0.958	0.955~0.895	0.925
4	0.993~0.962	0.978	0.984~0.948	0.966	0.963~0.907	0.935	0.925~0.830	0.878
6	0.990~0.952	0.971	0.978~0.934	0.956	0.950~0.880	0.915	0.900~0.780	0.840
8	0.988~0.948	0.968	0.973~0.923	0.948	0.935~0.855	0.895	0.870~0.720	0.795

* 计算时取地温梯度为 $3^\circ\text{C}/100\text{m}$ 。

五、密度资料的整理

岩石密度资料的整理可以划分成以下几个阶段：（1）组成样本组；（2）构组密度实验分布系列；（3）计算统计特征；（4）岩石物理分析，构组岩石密度平面图和剖面图，查明密度变化规律；（5）划分密度分界面，计算剩余密度。

在整理确定密度成果时利用了数理统计方法，所研究的岩石整体是作为一个总体组合讨论的，它的特征（分布规律、平均值等）是根据样本资料确定的。由于样本数量 n 的有限，样本特征与相应的总体组合特征是有区别的，随着 n 的增大，样本特征接近于相应的总体组合的特征。

（一）组成样本组

样本组的划分可以根据不同标志进行：岩石学特征、地质年代和埋深，岩石在地质剖面中的位置，岩石在构造上的位置（顶部或翼部），样本组在成分上可以是单一的，也可以是不单一的。样本组在统计性质方面可以分为两类：一类是只有随机变化，另一类是既有随机变化，也有系统变化。例如，在图1.1上，除了存在由于泥岩不均匀性引起的密度值随机离散外，还可以明显地看到密度随深度加深而增大的规律，密度平均值 $\bar{\sigma}$ 与深度 D 有以下关系

$$\bar{\sigma}(D) = 1.695D - 0.842$$

式中 D 的单位为 km ， $\bar{\sigma}$ 的单位为 g/cm^3 。

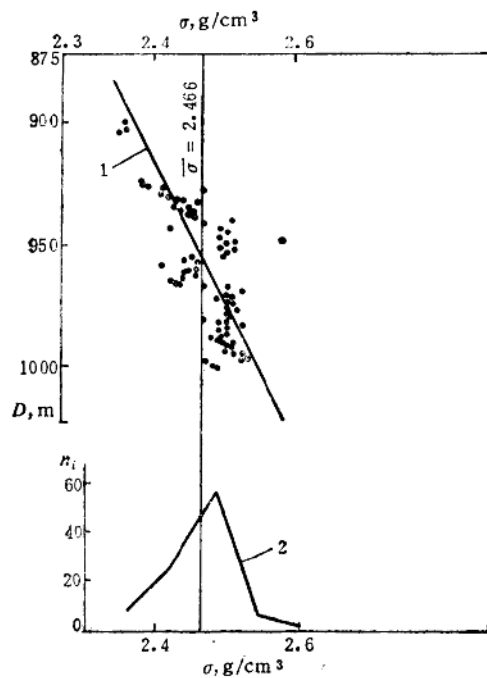


图 1.1 苏联Малокет-长垣8号钻孔下侏罗系泥岩的密度
1— $\bar{\sigma}$ 与 D 的直线回归；2—泥岩密度分布多边形； n_i —在间隔内的样本数

（二）构组实验分布系列

对每一个划分出的岩石样本组都要构组实验分布系列。如果样本数量不多，则确定密度的结果可以表示成点图的形式（图1.2），这种图可以作为构组大量样本的实验分布系列的中间成果。

实验分布系列表示成多边形分布图或直方图的形式（图1.3），在构组这些图形时，将观测到的 σ 值划分成等间隔，并计算每个间隔内的频数 $W_i = n_i/n \times 100\%$ ，或标本数 n_i ，式

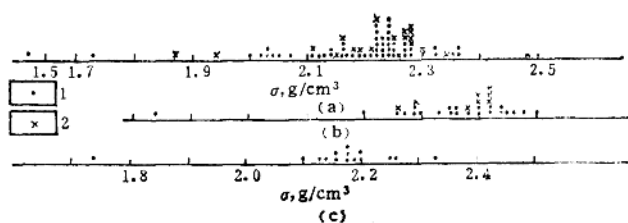


图 1.2 苏联某地上白垩系岩石密度点图

a—泥岩；b—砂岩；c—泥灰岩；

1—剖面I的标本；2—剖面II的标本。

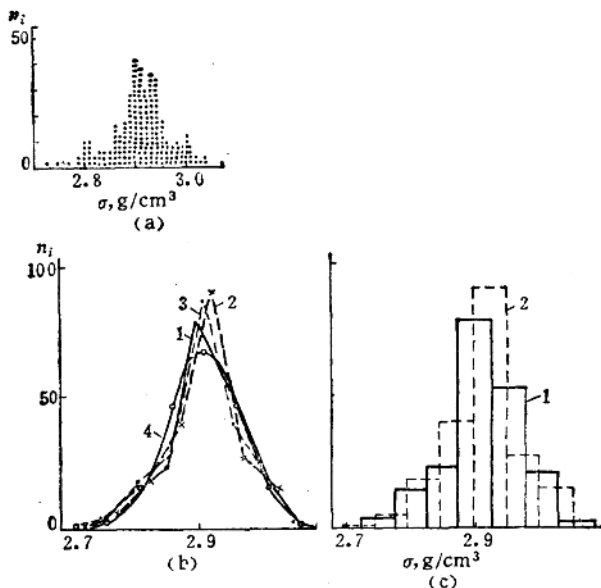


图 1.3 暗色岩密度分布的点图 (a)、多边形 (b) 和直方图 (c)

1~3—不同起点的分组；4—正态分布理论曲线

中 n 为总标本数。在构组多边形分布图或直方图时，有两个数是要选择的：一个是间隔长度，另一个是分隔的起始点。间隔长度决定于测量误差、样本数量、分布类型及所研究参数的变化范围。当样本数不十分大时 ($n < 200$)，间隔数可取为6~10。在大多数情况下，间隔长度可取为0.03~0.05 g/cm³。当样本数 n 很大时，分组间隔长度可由以下公式求得

$$\Delta\sigma = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) / (1 + 3.32 \lg n) \quad (1.6)$$

式中 $\sigma_{\max}$ 和 $\sigma_{\min}$ —— σ 的最大和最小测量值。

在图1.3上举例说明了选择不同分组间隔起始点对同一样本组在间隔长度相同时对分布多边形的影响。当样本不均匀时，实验分布系列复杂化，这就可能产生不确定的情况。此时必须分析点图，并且构组具有不同间隔和起始点的一组分布多边形（直方图）。根据分布多边形（直方图）的形状，可以判断所研究样本的均匀性。如果样本是均一的，则多边形只有一个极大（单顶点），如果分布多边形（直方图）是多顶点的或非对称的，这就意味着，在样本组中包含着不同的岩石或同一种岩石的不同变种。

(三) 计算统计特征

实验分布系列的最重要统计特征是密度的算术平均值、方差（或均方差）、非对称性及偏度。因为这些参数是根据样本结果计算的，所以称为标本参数。

密度的样本算术平均值为

$$\bar{\sigma} = \sum \sigma_i / n \quad (1.7)$$

式中 $\bar{\sigma}$ ——算术平均值；

σ_i ——第*i*块样本的密度测定值；

n ——同类样本总块数。

样本方差为

$$E^2 = \sum (\sigma_i - \bar{\sigma})^2 / (n - 1) \quad (1.8)$$

通常利用的不是方差 E^2 ，而是均方差 Σ （标准离差），这一参数表征测量值的分散程度和不均匀程度（由于偶然因素引起的）。对不同岩石和地质体来说， E 值大致在0.03到0.3g/cm³范围内变化。随岩石埋深增加和研究面积减小， E 值通常会减小。沉积岩的 Σ 通常比岩浆岩和变质岩的大。

分布形状用不对称系数 Sk 和偏度 E_x 。不对称系数用下式计算

$$S_k = \sum (\sigma_i - \bar{\sigma})^3 / (nE^3) \quad (1.9)$$

它表示实验分布函数相对于正态分布理论曲线的不对称程度。

偏度表征实验分布相对于理论正态分布的正偏程度（ $E_x > 0$ ）和负偏程度（ $E_x < 0$ ）：

$$E_x = \frac{\sum (\sigma_i - \bar{\sigma})^4}{nE^4} - 3 \quad (1.10)$$

(四) 研究岩石密度的空间变化

岩石密度随空间坐标位置的变化，主要的有两种形式。一种是同一个岩层岩石密度的平缓变化；另一种是从一个岩层转到另一个岩层时发生的跃变。通常讨论的是两个紧密相连的问题：研究某一岩层岩石密度变化的一般规律；划分密度分界面，查明密度不同的岩层。对于不同区域和沉积类型，对于沉积岩、变质岩和岩浆岩，岩石密度的变化情况都是不同的。

研究岩石密度随深度变化的一般规律，孔隙度很小的岩浆岩和变质岩的密度主要决定于它的矿物成分和形成条件。但是，组成沉积岩的矿物密度是大致相同的，所以沉积岩的密度差别主要是决定于孔隙度。随着岩石埋深的增大，静地压力和温度增长，这就引起孔隙度的减小，压实最大的是泥岩。现代粘土沉积物的孔隙度达到80%以上，随着压实程度的增加，孔隙度可减小到百分之几。砂岩和碳酸盐岩的压实程度较差。岩石的压实程度不是决定于它的现代埋深，而是决定于在该区地质发展过程中该岩石所达到过的最大深度。随着埋深的增大，各种岩性成分岩石密度间的差别逐渐变小。

可以在各个钻孔或钻孔组范围内研究岩石密度随深度变化的规律。下面以苏联 Hamck 基准井为例进行讨论。该井深约3000m，是全取心井。根据岩石标本密度确定结果（图1.4）发现，表面看来岩石密度与其埋深之间不存在明显的函数联系，深度间隔 ΔH 对应的是密度的随机值集合。

但是，利用统计分析的方法，例如：常用的回归分析有可能发现密度随深度变化的规律。最简单的是求取线性回归

$$\bar{y}_x = a + bx \quad (1.11)$$

式中 $\bar{y}_x$ ——可理解为平均密度，

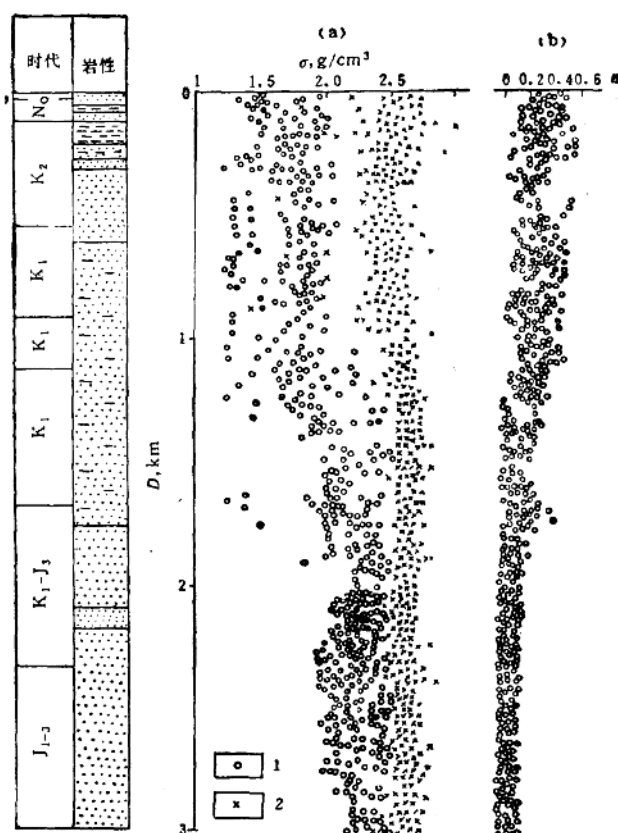


图 1.4 苏联Hamck基准井岩石密度 (a) 和孔隙度
(b) 随深度的变化密度
1—绝对干燥标本; 2—矿物密度

x ——相应于平均密度的深度。

计算 y_x 的过程可分为以下几个阶段:

(1) 计算 a 和 b :

$$a = \frac{\sum y \sum x^2 - \sum x \sum xy}{n \sum x^2 - (\sum x)^2}$$

$$b = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (1.12)$$

在计算Hamck基准井的线性回归近似方程时, 利用了300m间隔内的平均密度资料 (图 1.5, 表1.2)。

(2) 估算确定 y_x 的精度:

$$E = \sqrt{\sum (y_i - y_{xi})^2 / (n-2)} \quad (1.13)$$

由上式可看出, 样本数量 n 越大, y_x 越接近于观测点 x_i 上的 y_i , 则回归直线确定得越精确。在极限情况下, 当 $y_{xi} = y_i$ 时, 就有函数关系 $y_i = f(x_i)$ 。

(3) 计算确定参数 b 的均方误差:

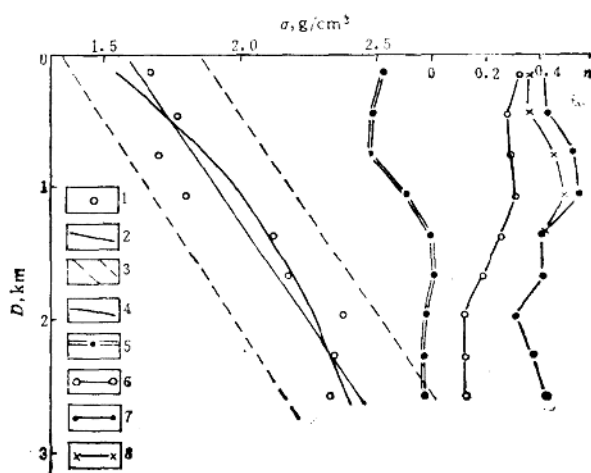


图 1.5 Намск井300m间隔内平均的岩石孔隙度和密度值
1—σ值；2—回归直线；3—可信间隔；4—回归曲线；5—矿物密度；孔隙度；6— σ ；
7—当 $\sigma_F=2.7\text{g/cm}^3$ 时的 n ；8—当 $\sigma_F=2.5\text{g/cm}^3$ 时的 n 。

表 1.2 线性回归的计算

x_i	x_{0i}	y_i	x_{0i}^2	$x_{0i}y_i$	y_i^2	$\bar{x}_i$	$\delta = y_i - \bar{y}_i$	$\delta^2 \cdot 10^4$	$\Delta = y_i - \bar{y}$	$\Delta^2 \cdot 10^4$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0.15	-4	1.67	16	-6.68	2.7889	1.63	0.04	16	-0.36	1296
0.45	-3	1.77	9	-5.31	3.1329	1.73	0.04	16	-0.26	676
0.75	-2	1.70	4	-3.40	2.8900	1.83	0.13	169	-0.33	1089
1.05	-1	1.80	1	-1.80	3.2400	1.93	0.13	169	-0.23	529
1.35	0	2.12	0	0	4.4944	2.03	0.09	81	0.09	81
1.65	1	2.17	1	2.17	4.7089	2.13	0.04	16	0.14	196
1.95	2	2.37	4	4.74	5.6169	2.23	0.14	196	0.34	1156
2.25	3	2.34	9	7.02	5.4756	2.23	0.01	1	0.31	961
2.55	4	2.33	16	9.32	5.4289	2.43	0.10	100	0.30	900
和	0	18.27	60	6.08	37.7765			764		6884
平均值	$\bar{x}=0$	$\bar{y}=2.03$								

$$E_b = E/E_s \sqrt{n-2} \quad (1.14)$$

式中 $E_s = \sqrt{\sum (X_i - \bar{X})^2 / n}$

在分析线性回归时，参数 b 有比较大的意义。它称为回归系数，表征 x 单位参数上的平均值 $\bar{y}_x$ 的变化。样本数 n 越大， x 值变化范围越大，回归系数的计算就越精确。 x_i 值离平均值 $\bar{x}$ 越远， $y_i = f(x_i)$ 值具有越大的权。

(4) 计算相关系数：

$$r = \frac{\sum xy - n \bar{x} \bar{y}}{\sqrt{(\sum x^2 - n \bar{x}^2)(\sum y^2 - n \bar{y}^2)}} \quad (1.15)$$

系数 r 表征样本中参数间线性联系的紧密程度。它的变化范围从0到1。 $|r|$ 越接近于0，联系越弱； $|r|$ 越接近于1，联系越强。当 $|r| = 1$ 时，变成函数关系。如果 $r > 0$ ，称为正相关；