

[英] D.Emery & A.Robinson 等著

无机地球化学

在石油地质学中的应用



石油工业出版社

无机地球化学 在石油地质学中的应用

[英] D.Emery & A.Robinson 等著

王铁冠 金振奎 译
王大锐 张卫彪

石油工业出版社

内 容 提 要

本书以无机地球化学基础理论以及最新的研究成果为依据,对油藏地质中的矿物学、流体包裹体、稳定同位素和放射性同位素等项研究的理论依据、分析方法、研究实例等加以深入剖析,从而得出油气运移和成藏过程中的时间、温度和化学组成信息,并将其正确地应用于孔隙度与渗透率预测、流体运移、油层对比和强化采油诸方面

本书可供石油地质与地球化学科研人员、有关大专院校师生参考

图书在版编目(CIP)数据

无机地球化学在石油地质学中的应用/(英)埃默里(Emery, D.),
(英)鲁滨逊(Robinson, A.)著;王铁冠等译. —北京:石油工
业出版社, 1999.6

ISBN 7-5021-2453-5

I. 无…

II. ①埃…②鲁…③王…

III. 无机化学: 地球化学-应用-石油天然气地质-研究

IV. P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 33090 号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

石油工业出版社印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 15¼印张 388 千字 印 1—1200

1999 年 6 月北京第 1 版 1999 年 6 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-2453-5/TE·2020

定价: 32.00 元

《中文版》序

地球化学教科书的作者们绝对不会发现在各个民航机场上出售他们撰写的著作。像本书这样一部论及一个专业性科学主题的著作，必然只影响一个小范围的读者群。在欧洲和美国，这个潜在的读者群看来是在逐渐缩小。为了寻求成本效益，一些较大的石油公司内部正在继续忙于紧缩它们的研究经费预算，并且裁减越来越多的雇员。在 1999 年，由于许多大公司的兼并，这个进程似乎也在加大步伐。每当想到（本书）潜在的读者群在西方已经缩小，而在东方正在显著地增加的时候，我要感谢王铁冠教授等的工作，它甚至给我带来更多的欢欣。翻译一本书不是一项容易的任务，因而对他（们）出色的工作，我表示祝贺。我希望中国的科研人员将会从本书中找到感兴趣的某些内容，并且希望它能够帮助他们在理解我最感兴趣的问题以及理解沉积岩在埋藏后确实发生的过程上有所进展。

Andrew Robinson

1999 年 2 月 25 日

译者的话

本书是由英国石油公司的资深地质—地球化学家 D. Emery 和 A. Robinson 主笔, 为从事石油勘探与开发的地质学家、地球物理学家和采油工程师以及相关专业的大学和研究生撰写的专著。英国纽卡斯尔大学 A. Aplin 博士和英国石油公司 C. Smalley 博士参与撰写部分有关章节。从全书的内容来看, 作者们并未系统论及具体的无机地球化学的分析原理与技术, 而是针对解决油气勘探与开发中的油藏地质问题, 论述无机地球化学的基本原理及其在地质—地球化学资料解释与综合研究中的应用。书中着重介绍了储层孔隙结构与成岩矿物、流体包裹体、稳定同位素以及放射性同位素研究的基本原理与方法。作者们以自己在北海油田的科研实践为基础, 吸收北美的一些例证, 将上述无机地球化学原理与地质—地球化学分析测试数据相结合, 解决了孔隙度与渗透率预测、流体运移研究、地层与油层对比以及强化采油(火烧油层和蒸汽驱油)等问题。因此, 确切地说, 本书实际上论述的是无机地球化学在油藏地质学中的应用。

80 年代中期以来, 由于全球性石油勘探市场的相对萎缩趋势, 一些欧美国家的石油公司把重点从区域性勘探转向油田勘探与开发。作为石油地质学的分支学科, 油藏地质学则方兴未艾, 这一点在欧洲北海油田的近期勘探与科研实践中尤为明显。在本书中, 通过作者们列举的诸多研究例证, 从一斑可窥其全貌, 在北海油田的油藏地质学研究中, 几乎动用了石油公司地质试验室所有的现代化分析测试手段, 包括透射光显微镜、紫外荧光显微镜、阴极发光显微镜、扫描电镜、透射电镜、X-射线衍射、孔隙图像分析、热重法释放水分析、显微测温术、激光拉曼光谱、傅里叶变换红外光谱、紫外荧光光谱、气相色谱、色谱—质谱、同位素质谱、放射性同位素年龄测定、岩心残盐分析以及油层物性测定(孔隙度、渗透率、饱和度)等, 全部聚焦于解决油藏地质学问题的综合性探索研究上, 从而构成本书论述现代油藏地质—地球化学的一个鲜明的特色。

本书的第二个鲜明特色是, 作者们列举的实例历史研究, 充分体现了基础性研究与应用性研究的完美结合。无论从成岩矿物世代划分与共生序列的精细剖析, 到砂岩油层孔隙度与渗透率的有效预测; 还是从成岩矿物流体包裹体伸长与渗漏判识以及 pVT 相态分析, 到显微测温数据的实际应用; 以至从砂岩碎屑矿物绝对年龄测定和陆源区研究, 到油田内部的油层精细对比; 更不待言从流体的同位素测定到油藏边水突进的动态分析, 无一不是基础研究成果向应用研究转化的典型例证。正是基于扎实的基础研究成果, 书中众多的实例历史研究开拓了油藏地质—地球化学的预测性研究的应用领域。

目前油藏地质学的研究内容, 既包含了对油藏的静态与动态的描述(或称表征), 又涉及油藏形成机理的研究。油藏描述(表征)的内涵已从早期单纯的储层描述外延到流体(油、气和水)的表征。作为一门新兴的边缘学科, 油藏地球化学无论对于油藏连通性、分隔性与非均质性的描述表征, 还是对于油藏充注历史、混合模式、成藏时期等成藏机理性问题的研究, 均起着积极的作用。油藏地球化学中包含有机地球化学与无机地球化学两大部分, 前者以烃类(油和气)流体为研究对象, 后者则涉及储层及无机流体(非烃气体和水)的研究。顾名思义, 本书的第三个特点即为油藏无机地球化学范畴的一本代表著。对于油藏

有机和无机地球化学的全面介绍，读者可参阅 J.M.Cubitt 和 W.A.England 主编的《油藏地球化学》一书（王铁冠、张枝唤译，石油工业出版社，1997）。

本书各章的翻译分工如下：前言、致谢、第一、第六至第九章由王铁冠翻译，第二章由金振奎翻译、第三章由张卫彪翻译、第四、第五章由王大锐翻译，全书由王铁冠统校。译者感谢在版权交涉问题上，本书两位作者 D.Emery 和 A.Robinson 两位博士以及英国 Blackwell 科学出版公司科学出版主任 S.Rallison 先生和出版部 Sophie Savage 先生的理解、支持与合作；并对 Robinson 博士为本书中文版作序深表谢忱。

王铁冠
石油大学（北京）
1997 年 4 月

前 言

1990年春季,一位地质家同仁和我们探讨过一个问题。他读了发表在一家主要刊物最新一期上的一篇文章,文中介绍在他曾勘探过的地区的流体包裹体数据。这篇文章作出结论,认为第三纪“热事件”引起石油生成。果真如此的话,我们的这位朋友就向我们保证,这一结论会对该盆地的勘探前景具有更深远的意义。他问我们能否阅读该文,并对其结论的有效性提出意见吗?我们读过这篇文章后的看法是,文章介绍的数据可能没有问题,但是文章作者对其作了蹩脚的和过分乐观的解释,以致于热事件的证据实际上是非常不可靠的。我们的朋友对此深表感谢。

这件事使我们萌发了写书的兴趣,在这一点上我们断定,通过写一本书,向石油地质家们解说流体包裹体及其它地球化学方法,我们可能会得到很多回报。事实上,我们对这本著作已经酝酿几个月时间了。然而上述事件确实起到了进一步确认我们这样一种认识的作用,即客观上还有写这本书的余地,书中以现在每月发表的大量论文中涉及到的无机地球化学的某些方面作为主要内容,使得非专家们(读后)也能作出自己的抉择。本书就是这样一份成果,它的宗旨是将最重要的无机地球化学方法汇集成一卷,以非专家们可以理解的一种方式,解释其(应用)潜力和局限性,并且论证它在从勘探、评价、开发,直到采油生产的石油地质学的广泛领域中的应用。所以,本书是打算为石油公司中希望拓宽其现有地球化学知识,解决他们日常面临问题的地质师、地球物理师和采油工程师们而撰写的。我们希望,爱好沉积岩和水的无机地球化学以及选修石油地质学和有关硕士学位课程的高年级大学生与研究生们,也会对本书感兴趣。

致谢

(英国)纽卡斯尔大学的 Andrew Aplin 对第4章的主要部分作了贡献,还有英国石油研究公司的 Craig Smalley 撰写了第5章有关 Rb—Sr、Sm—Nd 和 U—Th—Pb 的各节。由于这些贡献,使本书得以锦上添花。很多朋友通过提供第一流的珍贵照片,通过在本书写作的各个不同阶段评审书稿,均对这本书作出了奉献。为此谨向下列朋友们深表谢意,他们是 Chris Rundle (英国地质调查所)、Jim Marshall (利物浦大学)、Ian Hutcheon (卡尔加里大学)、Christine Knox、Jon Gluyas、Jonathan Henton、Ed Warren、Tim Primmer、Norman Oxtoby、Andy Brayshaw、Shona Grant、Andy Leonard、Mike Bowman、Joyce Neilson, Steve Rainey、Max Coleman 和 Keith Mills (姓氏排序无特殊意义)。

如果没有英国石油勘探公司和英国石油研究公司的支持,本书的撰写将会是特别困难的,我们感谢后者准许本书的出版。然而,组织机构是个人的组合,我们还要特别向 Ian Vann 和 Jon Bellamy 的慷慨资助衷心致谢。对于遍布在英国石油公司内的许多其他朋友允许引用他们所工作的油田和地区的实例研究材料,我们也十分感激。我们还要向与英国石油公司共同作业的各家合伙人同意发表书中涉及油田和租约地区的许多资料诚至谢意。

Dominic Emery 和 Andrew Robinson
英国石油勘探公司, 伦敦

目 录

第一章 导论	(1)
第一节 背景情况	(1)
第二节 无机地球化学如何应用于石油地质学领域?	(1)
第三节 本书所包含的内容	(2)
第四节 综述	(4)
第五节 本书不涉及的范畴	(5)
第二章 矿物结构与成分分析	(6)
第一节 绪言	(6)
第二节 透射光显微镜分析	(7)
第三节 阴极发光显微镜分析 (CL)	(18)
第四节 紫外荧光显微镜分析 (UVF)	(23)
第五节 扫描电子显微镜分析 (SEM)	(24)
第六节 透射电子显微镜分析 (TEM)	(29)
第七节 X-射线衍射分析 (XRD)	(31)
第八节 热重法释放水的分析 (TG-EWA)	(34)
第九节 孔隙图像分析 (PIA)	(36)
第三章 流体包裹体	(38)
第一节 绪言	(38)
第二节 与宿主矿物的关系	(40)
第三节 显微测温术 I——原理	(43)
第四节 显微测温术 II——解释	(49)
第五节 单个包裹体的非破坏性分析	(59)
第六节 石油包裹体的全分析	(63)
第四章 稳定同位素	(67)
第一节 绪言	(67)
第二节 原理	(68)
第三节 氧和氢	(73)
第四节 碳	(86)
第五节 硫	(90)
第五章 放射性成因同位素	(94)
第一节 绪言	(94)
第二节 放射性成因同位素体系	(94)
第三节 钾 (K) —氩 (Ar) 法年代测定法	(96)
第四节 ^{40}Ar — ^{39}Ar 年代测定法	(108)
第五节 铷 (Rb) —锶 (Sr) 体系	(112)

第六节	钐 (Sm) — 钕 (Nd) 体系	(119)
第七节	碳酸盐类的铀 (U) — 钍 (Th) — 铅 (Pb) 年代测定法	(121)
第六章	孔隙度和渗透率预测	(123)
第一节	绪言	(123)
第二节	新区勘探中的储层质量预测	(125)
第三节	有效厚度/总厚度值的预测: 墨西哥湾诺夫利特组	(133)
第四节	高岭石对砂岩孔隙度的影响: 北海北部布伦特省	(141)
第五节	根据一口发现井作评价: 北海北部马格努斯油田	(146)
第六节	一个白垩油藏的裂隙史: 北海中部马查尔油田	(151)
第七节	渗透率的制约因素以及高渗透率层的成因: 北海中部福蒂斯油田	(158)
第七章	流体运移	(163)
第一节	绪言	(163)
第二节	根据露头样品研究石油运移历史: 法国阿基坦盆地	(163)
第三节	对成岩作用成因的天青石产状预测: 北海中部	(168)
第四节	运移途径的区域性制图: 英国陆上威尔德盆地	(171)
第五节	一个油藏的充注史: 荷兰陆上瓦尔韦克	(173)
第八章	地层与油层对比	(179)
第一节	绪言	(179)
第二节	地层对比	(179)
第三节	岩性和油藏性质对比	(182)
第四节	勘探中的地层对比: 挪威近海的第三系	(184)
第五节	勘探中的地层对比: 墨西哥湾上新—更新统	(190)
第六节	油藏连通性: 挪威近海埃科菲斯克油田的白垩系	(193)
第七节	油层对比: 挪威近海居尔法克斯油田的三叠—侏罗系	(197)
第九章	石油开采	(202)
第一节	绪言	(202)
第二节	二次采油	(203)
第三节	强化采油	(204)
第四节	腐蚀性流体的生产	(205)
第五节	二次采油: 英国近海福蒂斯油田	(206)
第六节	二次采油和气体酸化: 英国多塞特维奇农场油田	(209)
第七节	强化采油——蒸气驱油: 加拿大艾伯塔冷湖地区的油砂	(214)
第八节	强化采油——火烧油层: 加拿大萨斯喀彻温劳埃德明斯特油砂	(217)
参考文献		(220)

第一章 导 论

第一节 背景情况

石油已经不再象过去那么容易寻找了。世界上，人们可以进入的沉积盆地大都业已进行过勘探，并且大部分较为明显的石油靶区也都已经钻过探井。勘探变得风险愈大、花费愈高，尽可能有效地开发新油田以及从现有油田的地下汲取更大比率的石油，就显得愈加重要。在地球科学领域中，过去 15 年已显现出这种提出某些重要新论题的紧迫性，正如给大学生们讲授的那样，其中大多数论题都跨越了地质学传统学科的界线。例如，层序地层学（现在勘探地质家的一项主要手段）已经从经典的地层学和地震解释中派生出来；油藏描述则产生于油藏工程、高级地球物理学、地层学和沉积学之间的一种长期以来期待已久的联系。

无机地球化学是石油地质家武器库中的一项相对较新的武器。从最广阔的意义上讲，这门学科包含对于岩石和地下流体的全部化学组成的研究，仅仅将以碳为基础的有机组分排除在外。本书并不打算全盘覆盖这个潜在的浩瀚领域。初看起来，它可能象一个主题素材的混合物，但是书中所包含内容的选择却绝非任意性的。这本书的主题是对沉积盆地中各种流体的表征，认识其彼此之间的以及其与岩石之间的相互作用，还有这种信息在发现、开发和生产油气中的应用。这可能涉及在试图预测孔隙度分布，或者在预测采油生产过程中海水突进油藏的程度时，测定砂岩中石英胶结物生长的年龄。虽然与沉积物成岩作用的研究领域有相当大程度的重叠，但是本书中包容了具有地球化学内涵的重要题材，这些内容从未在一本有关成岩作用的书籍中出现过，例如铀的同位素地层学、地层与油层对比和采油化学。

无机地球化学题材本身当然不算是新闻，但是它在沉积盆地中的应用，却已经落后于岩浆岩和变质岩的地球化学。对此有若干原因，一个原因可能是在着手研究时，砂岩与橄榄岩相比，相对说来缺乏引人入胜的性质。或许更重要的原因在于这样的事实，即沉积岩（特别是碎屑岩）生来就难以任何有意义的方式作分析，因为它们含有许多不同来源的成分，在多数情况下必须对其分别进行分析。然而，由于石油勘探公司从深部埋藏的沉积物中取岩心增多，而且他们乐于为孔隙度和渗透率控制因素的研究筹措资金（我们自己就从这种慷慨大度中获益匪浅），最近多年来沉积物地球化学的研究具有模拟的特征。近二、三年来，也看到新方法的发展（如激光技术的应用）有助于克服采样的困难。

第二节 无机地球化学如何应用于石油地质学领域？

潜游到一个正在生长的生物礁上方，从礁体上观察其微细的波纹，并且研究沉积物的沉积作用，已经是易于实现的事。但是，在一个盆地中，欲研究沉积物在埋藏期间是如何变化的，确实要困难得多；人们基本上是不可能直接观察到这些变化过程的，因为它们发生于相当深的部位，而且在许多情况下，可能在很早以前业已结束了。只有流体—岩石相互作用的产物、成岩作用形成的矿物以及现今的地层水遗留下来成为（地质）记录。无机地球化学则

提供了解释这些记录的一种手段。它所提供的信息有下列主要类型。

①时间。矿物生长和溶解与流体（无论水还是石油）存在和运移的相对和绝对年龄。

②温度。矿物生长或溶解时的温度以及特定流体在岩石孔隙中存在时的温度。在一个正在沉降的盆地中，一种沉积物的温度和时间是相关的，而且通过模拟埋藏史和热史，可以将二者联系起来。

③化学组成。矿物和水的总体组成与同位素组成，包含着有关流体历史的信息，尤其是流体与岩石相互作用的信息。

从矿物和流体获取这种信息是一回事，但是对其所涉及的（地质）过程作出解释则完全是另一回事。已知一个石英胶结的砂岩样品，地球化学将完全有能力找出它的生长温度，并且说出一些有关所涉及的水的成因看法，但是将不能说明该岩石为什么胶结，或者什么因素引起石英沉淀。这就是当前对大多数成岩作用现象的认识水平问题：我们可能表征它们，但是不能解释它们。在石油地质学领域中，运用无机地球化学解决问题的谋略是承认这些限制因素，依据可能得到的信息，尽最大努力做可能的工作。在很多情况下，还有相当多的事可做。至少地球化学方法提供一种手段，将成岩作用现象综合成为一个时间框架，构成盆地分析的基础。例如，确定矿物胶结作用与溶解作用以及随后孔隙度与渗透率变化的时间，可以与一个盆地的发展阶段以及石油运移建立联系。为预测孔隙度和渗透率所建立的各种方法，在很大程度上一般均含有以经验为依据的成分，但是与单纯经验主义的方法相比较，它们代表了一种改进措施。

第三节 本书所包含的内容

本书有两部分。第2至第5章论述我们已发现的在石油地质学领域中最有用的各类技术；而第6至第9章根据无机地球化学帮助解决的（或者在某些情况下未能解决的）问题的性质，分类论述实例研究历史，其中主要是我们自己的成果，或者我们同事的成果。

有关地球化学技术的诸章节，重点强调在沉积盆地中，对沉积岩和流体的应用。尤其是将注意力特别放在精确度和准确度上，并且特别注意得到的什么信息可能是似乎有理的以及在何种情况下获得这种信息的问题，即要判断得到的数据确实意谓什么和确实不意谓什么？通过完整配套的真实数据组成例证的运用，阐明特殊的难题以及易于引人得出错误结论的陷阱。组成本书后半部分的实例历史覆盖了广泛的应用领域，但是也不可避免地反映了我们的兴趣和倾向性。它们包括取自世界很多地区的碎屑岩和碳酸盐岩，但若干实例是取自北海的（图1—1）。许多实例研究是引自裂谷盆地的，然而通常没有理由认为在其它地质背景中，类似的问题就不应该以相似的方式来解决。粗粒沉积物的论述多于泥岩，因为它们作为储层具有重要意义，而且也因为它们大体上易于研究，从中可以获取较多的信息。

全部历史实例取材于真正的实际资料，而且我们对数据未作过拙劣的修补或修改结论。一些实例研究成功地解决了他们试图解决的问题；相当多的实例只解决了部分问题。有些解决了一种完全不同的问题，即只是证明了科学的魅力，然而实际上什么问题都没有解决。我们感到，既介绍相对成功的例证，又介绍相对失败的例证，要更加有启迪性和有意思得多。否定性的成果很少有机会发表，但是经常象肯定性的成果一样，也具有启迪意义。在大多数例证中，精细而又严谨的科学方法迄今只能攻克一个难题。当达到这一点时（而且在问题已经解决之时，我们还试图对它理解得更清楚），我们对于推测并不感到窘迫。石油地质学，

特别是勘探，就必须包含对不完善认识的充分利用，而且也是一种必不可少的乐观主义的风险事业。

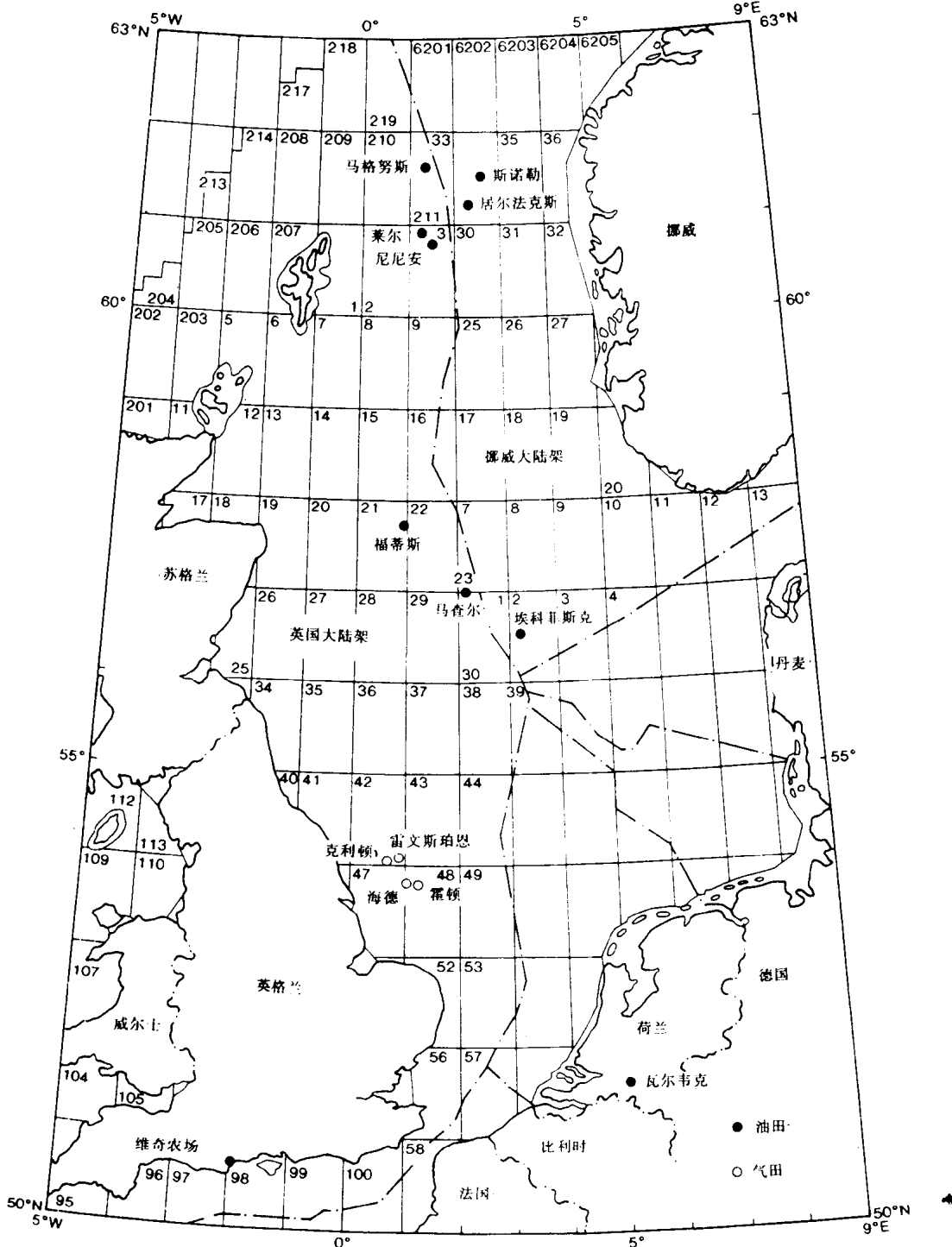


图 1—1 本书论及的北海油气田位置图

第四节 综 述

第二章矿物结构与成分分析中,论述对于矿物鉴定和定量的5种基本方法和3项较先进的技术。在一本地球化学书中,这个主题的内涵引伸了该术语的定义,但是欲弄懂从中获取的地球化学信息的任何道理的话,一个样品的矿物学分析仍是极其重要的。基本的方法包括岩石学薄片鉴定、阴极发光显微镜、荧光显微镜、扫描电子显微镜和X-射线衍射。贯穿全章提供了这些技术应用于矿物鉴定,从成岩胶结物中区分碎屑颗粒、矿物定量分析以及储层岩石共生历史的建立等方面的实例。文中涉及的3项较先进的技术是透射电子显微镜、热重法释放水的分析以及孔隙图像分析,这些技术分别在化学分析、粘土矿物定量分析和孔隙图像分析中起着日益重要的作用。这一章在舍弃对仪器和样品制备详细描述(对此可参阅Tucker, 1988)的前提下,着重强调方法的应用。重点也放在这些技术与标准的岩石物理学和工程学方法相结合,用于描述岩样的储层质量评价上。

第三章流体包裹体解释在矿物生长或裂隙愈合期间捕集的这些微妙的流体样品,怎么能够提供有关成岩作用的反应温度,和关于穿过沉积岩的流体组成以及在什么温度条件下流体这样活动的信息。在岩浆岩以及特别是金属矿物沉积物中,流体包裹体的研究可追溯到一个世纪以前,但是只在过去的10年中,人们才对沉积物包裹体的研究作出很大的努力。早期的大部分工作和某些当前的研究蒙受到过分解的影响,而本章打算通过强调这项技术的某些局限性,调整其应用范畴。特别将注意力放在渗漏问题上,因为假若在成岩作用成因的矿物中,流体包裹体例行地渗漏,而且可以证明其确实渗漏的话,那么它们对于沉积岩的研究,将会只具有有限的价值。

第四章的主题,为稳定同位素在石油地质学领域中的应用,包括从地层分析,到更好地认识和预测储层质量以及油藏流体类型。稳定同位素主要用来作为天然的示踪物,以及在氧同位素的例证中,还可能提供有关反应温度的信息。本章首先论述稳定同位素体系的原理和术语、基本的分析技术以及与同位素测量有关的误差。继而论述在实测的流体和矿物中最重要的稳定同位素体系:水、硅酸盐、硫酸盐和碳酸盐矿物中的氧;水和粘土中的氢;碳酸盐矿物、 CO_2 和 CH_4 中的碳;以及硫酸盐和硫化物矿物与 H_2S 中的硫。

第五章解释放射性成因同位素在阐明地质历史中的运用。它从复习构成放射性年龄测定基础的简单的物理学入手,其适用于强调所有的年龄测定方法的共性。总共论述四种同位素体系:钾—氩(K—Ar)、铷—锶(Rb—Sr)、钐—钕(Sm—Nd)和铀—钍—铅(U—Th—Pb)。 K—Ar 年代测定法几乎常规地用于测定含钾矿物胶结物(主要是伊利石)的年龄测定。本章说明即使在样品物质特别适用的情况下,为何采用此法还必须异常地谨慎。还介绍一种精巧的 Ar—Ar 年代测定技术,这种技术也依赖于 K—Ar 衰变系列。可以适用于沉积物质年代测定的其它同位素体系,仅在相当严格限制的情况下才能采用。然而,放射性成因的同位素还具有天然示踪物的价值。特别是锶同位素比值,可用来追踪天然水的化学演化。这种属性的一项成果,是将其用来作为一种海相碳酸盐和磷酸盐的年代测定手段(锶同位素地层学)。

第六章孔隙度和渗透率预测是阐明无机地球化学特定应用的四个实例历史研究组合中的第一个例证。如果按照已发表的研究成果数目判断,这是迄今最为重要的应用成果,所以这一章的篇幅也是最庞大的。引言一节解释了无机地球化学如何对减少孔隙度和渗透率预测的

风险作出贡献（单独运用无机地球化学，对二者均不可能作出预测）。继而有六个实例历史，从现有资料非常有限的新区勘探（弗莱米斯帕斯、大浅滩），经逐渐较为成熟的地区（路易斯安那近海和布伦特省），直到处于评价、开发和采油生产阶段的三个北海油田（马格努斯、马查尔和福蒂斯）。

第七章流体运移侧重于水和石油运移相态的地球化学证据。对于认识石油运移的价值简直无需再强调，但是水的运移也同样是值得注意的，因为通过与岩石的相互作用，这些过程均影响储层的质量，而且经过生物降解作用和水洗过程，也能使原油蚀变。四个实例历史包括在了解较差和认识较清楚的地区（阿基坦和威尔德盆地），用流体包裹体对运移历史作分类研究，在北海中部对一个相当奇特的成岩阶段的储层分布作预测以及对一个新发现的凝析气田作充注历史研究（荷兰瓦尔韦克）。

第八章地层与油层对比主要在一个广阔的勘探规模上，论述稳定的和放射性成因的同位素体系，如何能够用于地层单位的对比，而且也适用于孤立的油田内部较小规模的单个油层单位的对比。总共描述了四个研究实例。第一个位于挪威的北海，表明铍同位素地层学和放射性年代测定法，怎样可以用于第三系碎屑沉积物的精细地层对比，并且有助于一项层序地层学研究。第二个实例也运用同位素地层学，但是在这个实例中，氧同位素应用于墨西哥湾上新—更新统砂岩油藏靶区，从而提供一个几万年的非常高分辨率地层学研究成果。第三和第四个实例研究均取材于北海挪威海域的油田，即埃科菲斯克白垩油田和居尔法克斯碎屑岩油田。在埃科菲斯克，采用从岩石基质和地层水得到的数据，以铍同位素作油层对比。在居尔法克斯，利用钐和钕同位素方法，通过鉴别砂粒的陆源区变化，预测油藏砂体分布。

第九章石油开采概述二次采油和强化采油的基本原理以及具腐蚀性流体（ H_2S 和 CO_2 ）生产的问题。前两个实例研究取材于北海英国海域的福蒂斯油田以及英国陆上维奇农场油田，论证了在采油生产过程中，氧和氢同位素作为海水突进示踪物的应用价值。也概述了在维奇农场利用硫同位素认识酸气生产的问题。后两个研究实例来自加拿大西部艾伯塔和萨斯喀彻温的白垩系重油砂。这些材料论证了定量岩石学与岩石物理学相结合，对于描述浅层油藏砂岩热采工艺过程（注入蒸汽和火攻油层）效果的重要性。蒸汽驱油的实例研究也表明，怎样能够利用碳同位素鉴别热采期间采出的 CO_2 的来源。

第五节 本书不涉及的范畴

这是一本有关流体—流体和流体—岩石相互作用，在石油地质领域中应用的书，并且只涉及到我们发现在这个领域中有应用价值的这些方法。我们避免描述全岩的分析方法，其部分原因是我们已经发现总体化学成分（分析），在这方面具有相当有限的价值，而且也因为正是这个题材包含于本书的内涵中，更优于我们在其它书中所可能作的编排。我们也回避了水—岩相互作用的化学模拟以及对沉积盆地中流体流动的模拟。有些人（但不是我们）将这些方法一起用于预测孔隙度；我们相信它们具有说服力，并且对于理解成岩作用过程是有用的，但是我们也感到其预测能力是有限的（参阅第六章第一节）。虽然本文中再三涉及到地史分析，尤其是埋藏史和热史模拟，但是它也构成一个独立的主题，而且我们最终也未涉及裂变径迹分析，这是标定埋藏历史的一种主要方法。

第二章 矿物结构与成分分析

第一节 绪 言

样品的矿物成分和结构分析是所有无机地球化学分析程序中极其重要的第一步。这种分析在储层质量（主要指孔隙度和渗透率）和更先进的地球化学分析技术（如流体包裹体分析）之间架起了关键性的桥梁（图 2—1）。矿物成分和结构分析能够提供如下几种信息：

- ① 矿物鉴定；
- ② 碎屑组分与成岩组分之间的区分；
- ③ 矿物丰度的定量分析；
- ④ 矿物共生组合（矿物生长和溶解的序列）；
- ⑤ 矿物化学成分；
- ⑥ 孔隙的描述和量化；
- ⑦ 分析影响孔隙度和渗透率的主要因素。

表 2—1 列出了提供上述每一类信息最合适的技术。值得注意的是，某些技术需要与其它技术配合应用才是最有效的。当与热重法释放水的分析配合应用时，粘土矿物 X—射线衍射分析是定量分析岩样中粘土矿物含量最有效的手段。同样，灰岩样品的阴极发光显微镜当与透射光观察相结合时才是最有效的。

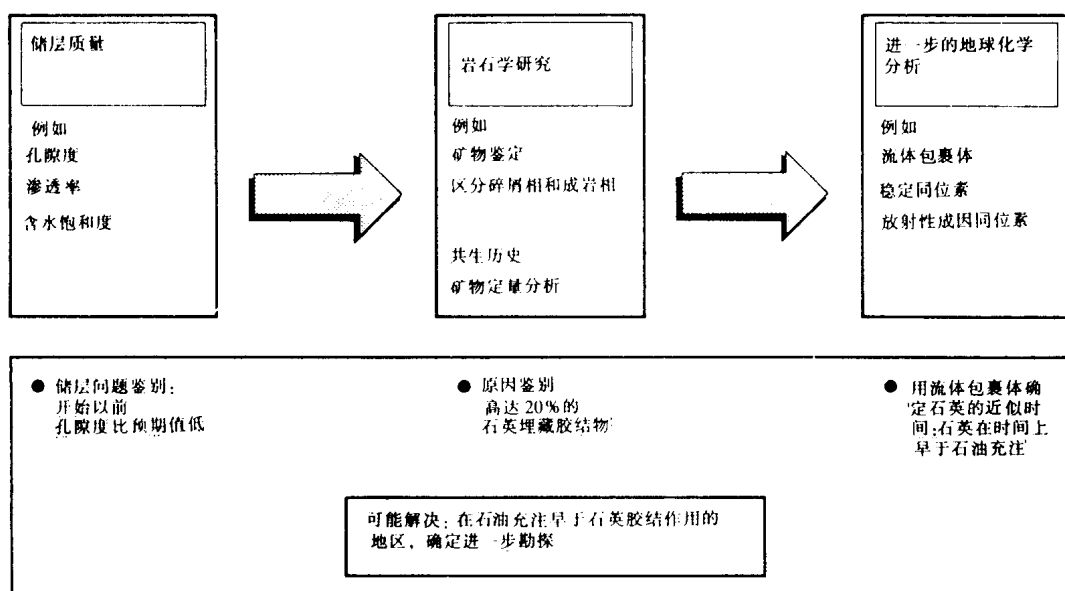


图 2—1 储层质量、岩石学分析与进一步的地球化学分析之间的关系

表 2—1 各项技术及其应用一览表

技 术	应 用 范 围						
	矿物 鉴定	区分成岩相 ^① 和碎屑相	矿物定 量分析	矿物 ^② 共 生组合	矿物化 学成分	高分辨率 矿物成分 及结构分析	孔隙性 描述
透射光显微镜	●	●	● ^③	●	● ^④		● ^⑤
阴极发光 (冷)	C	●		● ^⑥	● ^⑥		
阴极发光 (热)	S	●		●			
阴极发光	S	●		●			
紫外荧光				● ^⑦			
扫描电镜 (发射模式)	●	●		●	● ^⑧	●	●
扫描电镜 (背散模式)	●		● ^⑨		● ^⑨		● ^⑩
透射电镜		●		●	●	●	
X-射线衍射 (全岩)	● ^⑪						
X-射线衍射 (细粒级)	● ^⑫		●				
热重释水分析			●				
孔隙图像分析							● ^⑬

①包括样品筛选；②包括胶结物地层学和胶结物组构分析；③配置计数器；④对于染色的碳酸盐岩仅是定性的；⑤特别是在碳酸盐岩中的胶结物地层学和胶结物组构分析；⑥对碳酸盐岩中的 Mn 和 Fe 主要是定性的；⑦结合能散 X-射线分析定性；⑧对于非常简单的矿物混合物的背散模式扫描电镜定量分析各有软件；⑨结合能散 X-射线作半定量分析；⑩背散扫描电镜—孔隙图像分析仅提供定量的孔隙度信息；⑪非常快速的全岩样品分析；⑫特别适用于作粘土矿物鉴定。

本章的目的是介绍矿物成分和结构分析方法及其在认识油区碎屑岩和碳酸盐岩沉积之后的演化过程中的应用。我们的重点将主要是这里描述的各类技术的应用；而不是仪器和样品制备的细节，本文提供了这些方面有更详细论述的参考文献。

第二节 透射光显微镜分析

一、引言

透射光显微镜是沉积岩描述方面最基本的专业手段，并且已有许多涉及沉积岩石学各个方面的教科书。Folk (1974)、Pettijohn (1975) 和 Tucker (1981) 是普通岩石学的好教科书，而 Moore (1989) 和 Pettijohn 等 (1973) 则分别专长于碳酸盐岩和硅质碎屑岩。Adams 等 (1984) 的沉积岩图集和美国石油地质家协会出版的砂岩 (Scholle, 1979) 和碳酸盐岩 (Scholle, 1978) 彩色手册中具有极好的彩色薄片显微照片，很值得参考。

本节的目的是解释怎样将透射光岩石学分析应用于描述沉积岩的成岩作用（而不是沉积组构）。岩石学描述能提供下列五类主要的信息：

- ①矿物鉴定；
- ②区分碎屑相和成岩相；
- ③矿物丰度的定量分析；
- ④矿物共生组合关系；

⑤孔隙性的描述。

硅质碎屑岩岩石学方面的问题完全不同于与碳酸盐岩有关的那些问题。碎屑岩主要是多矿物成分的，具有几种不同的成岩相（如粘土矿物、石英和碳酸盐），并且通常易于将其与沉积物的碎屑组分区分开来。相反，碳酸盐岩由少数矿物组成，这些矿物趋向于在成岩过程中相对不稳定，以致于许多原始沉积组构可能消失了。因此，对于从成岩相中区分原生组分以及使不同的成岩碳酸盐得以识别，碳酸盐岩组构和化学成分微小变化的识别是至关重要的。

二、样品制备

薄片是显微镜岩石分析最基本的样品条件。它是由固定在玻璃载片上的一个 $30\mu\text{m}$ 厚的岩石薄切片所组成。岩石薄片的厚度是标准的，以便保证双折射颜色的一致性（这种颜色部分是由薄片厚度决定的）。同样，为了保证样品之间的可比性，岩石薄片通常用具均一折射率的介质固定在一块玻璃载片上。Miller (1988) 更详细地描述了基本的薄片制备方法。

在切片之前，样品通常用染了颜色的树胶浸泡。这种树胶充填样品中的孔隙空间，并使之着色；从而能更容易地鉴别样品中的孔隙类型，并且也避免固结不好的岩石散落。薄片通常要染色，一般使用两种染色剂：碳酸盐岩用一种混合染色剂使含铁与不含铁的方解石与白云石得以区分 (Dickson, 1966)；而长石类用另一种染色剂以便区分钾长石、斜长石和石英 (Houghton, 1980)。表 2—2 总结了染色法对于碳酸盐和硅酸盐矿物成分的颜色效果。注意一定要在使用碳酸盐染色剂之前，先使用长石染色剂，否则前者会被消除掉！

表 2—2 碳酸盐和长石的典型染色颜色

矿物成分	染色颜色
不含铁的方解石 ^①	很淡的粉红色至红色
铁方解石 ^①	随 Fe 含量增加，从紫红色至紫色至蓝色
白云石 ^①	无色
铁白云石 ^①	随 Fe 含量增加，从苍白色到深绿蓝色
斜长石 ^②	粉红色，色调随 Ca 含量增加而加深
纯的钠长石 ^②	用玫棕酸盐染色剂呈无色
碱性长石 ^②	黄色

①用铁氰化物与硒素红-S 混合染色剂时，碳酸盐的染色颜色 (Dickson, 1966)。

②先用亚硝酸根合高钴酸钠，再用玫棕酸钾染色时，长石的染色颜色 (Houghton, 1980)。

三、矿物成分鉴定以及碎屑颗粒与成岩胶结物的区分

本节的主要内容是区分成岩相和沉积颗粒，这可能是薄片描述中相当多的多解性的一个原因。下面对于在碎屑岩和碳酸盐岩中识别最常见的成岩相提供一个指南，并且概述从成岩相中区分碎屑颗粒和基质的过程中易犯的错误和问题。至于沉积矿物鉴定的详细描述则超出了本书的范畴，关于这方面的内容读者可参考 Kerr (1959) 和 Deer 等 (1977) 所著的教科书。表 2—3 总结了沉积岩中常见矿物的光学性质及其产状。如果矿物的性质仅靠显微镜难以确定的话，则可应用微束技术（见本章后面几节）。