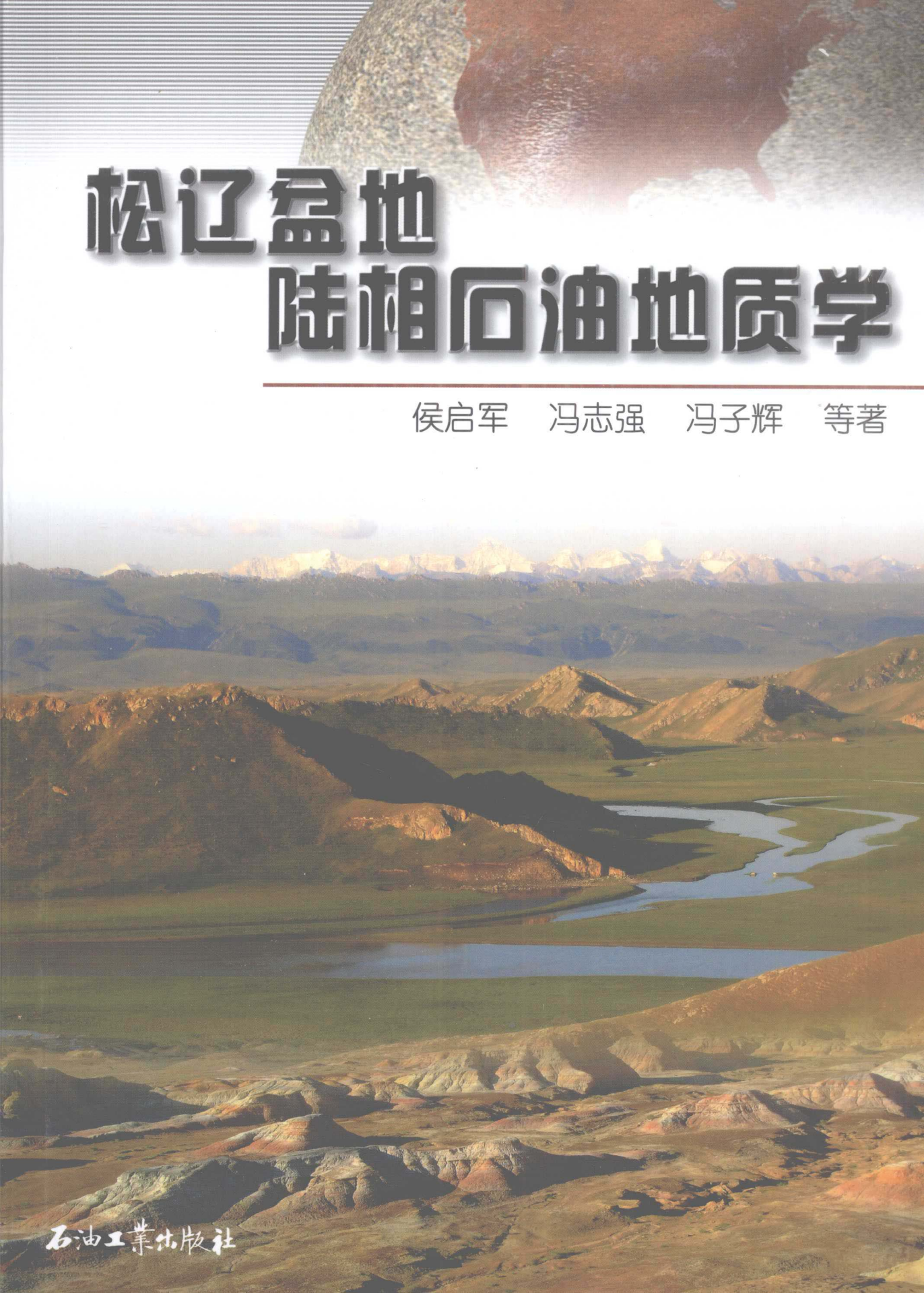




松辽盆地 陆相石油地质学

侯启军 冯志强 冯子辉 等著

石油工业出版社

松辽盆地陆相石油地质学

侯启军 冯志强 冯子辉 等著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书以松辽盆地 3000 多口探井的钻探结果为基础,以高分辨率三维地震资料和大量的地质、地球化学分析资料为依据,在对盆地的构造演化过程、沉积过程、油气生成及成藏过程等综合分析的基础上,应用高分辨率层序地层学方法、含油气系统方法、沉积坡折带控砂技术、储层包裹体测年技术、油气成藏运移示踪技术等,提出了反转构造油藏的“泵吸”成藏机理、大型三角洲沉积和大面积河道沉积砂体分布控制油藏类型的“三个成藏带”认识、向斜区低—特低渗透砂岩储层中“深盆油藏”的形成机理,这些认识不但丰富了我国陆相石油地质学理论,而且对我国其他陆相盆地石油勘探,尤其是岩性油藏勘探也具有重要的参考价值。

本书适合石油地质勘探专业的科研、技术人员及大专院校师生阅读。

图书在版编目 (CIP) 数据

松辽盆地陆相石油地质学/侯启军等著.

北京:石油工业出版社,2009.3

ISBN 978-7-5021-7030-1

I. 松…

II. 侯…

III. 陆相-含油气盆地-石油天然气地质-研究-东北地区

IV. P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 026357 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: www.petropub.com.cn

发行部: (010) 64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:保定彩虹印刷有限公司

2009 年 3 月第 1 版 2009 年 3 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 41.75

字数: 1060 千字

定价: 160.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

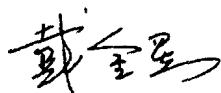
版权所有,翻印必究

序 言

在世界科技史上，中国四大发明为全球人民所赞誉，为人类进步做出了杰出的贡献；在近代，中国的陆相石油地质理论已成为被世人称誉的原创性理论，是油气理论上的一座丰碑。松辽大型陆相湖盆沉积、演化过程以及陆相大油田的生成、聚集过程是陆相石油地质理论一本天然的经典“教科书”和丰盛的博物馆。自 20 世纪 50 年代末大庆油田发现以来，几代石油勘探者发扬“三老四严”的求实精神，在不断发现油气储量的同时，也不断地深入探索、丰富、完善我国陆相石油地质理论，为陆相生油理论的发展和“源控论”的创立做出了突出贡献。20 世纪 80 年代初，大庆人系统地总结了松辽盆地油气生成、运移和聚集规律，指导了大庆油田以构造为主的油气勘探发现；随后在 20 世纪 90 年代末，应用层序地层学和含油气系统理论，进一步发展了松辽盆地油气成藏理论，为盆地构造—岩性油藏和岩性油藏的发现提供了重要的依据。

进入 21 世纪以来，以侯启军和冯志强为代表的松辽盆地石油勘探人充分吸收前人的研究精华，以 3000 多口探井的钻探结果为基础，以高分辨率三维地震资料和准确的地质、地球化学分析资料为依据，在对盆地的演化过程、沉积过程、油气生成过程等综合分析的基础上，应用高分辨率层序地层学方法、含油气系统方法、沉积坡折带控砂技术、储层包裹体测年技术、油气成藏运移示踪技术等，提出了反转构造油藏的“泵吸”成藏机理、大型三角洲和面积河道沉积砂体分布控制油藏类型的“三个成藏带”认识和向斜区低—特低渗透砂岩储层中“深盆油藏”的形成机理，这些认识不但丰富了松辽盆地这本陆相石油地质“教科书”，而且对我国陆相石油地质理论也具有重要的意义。近年来，在“三个成藏带”认识和“深盆油藏”理论指导下，松辽盆地岩性油藏勘探取得可喜的进展。其中 2004—2007 年岩性油藏勘探成效显著，大庆油田连续 4 年探明石油储量超亿吨，同时准备了多个亿吨级的储量目标区，为大庆油田的持续发展和百年油田的实现做出了应有的贡献。

2009 年是大庆油田发现 50 周年，在将庆贺这个具有历史意义时刻的前夜，侯启军、冯志强和冯子辉等所著的《松辽盆地陆相石油地质学》的出版，既是大庆几代石油人勤于耕耘克难聚果、善于探索凡事揭秘创新的科学研究成果的结晶，也是对几代石油勘探人扎实工作、无私奉献的最好的纪念。相信该书的出版，不但对未来松辽盆地石油勘探将会发挥重要的指导作用，同时对我国乃至世界陆相盆地的石油勘探也会起到有效的借鉴作用。该专著的问世是可喜可贺的，十分值得一读，读后定受益匪浅。



2008 年 10 月 28 日

前 言

松辽盆地是世界上以油气资源丰富而著名的陆相含油气盆地。根据国家第三轮资源评价结果,松辽盆地石油潜在资源量约 136 亿吨,天然气潜在资源量可达 3 万多亿立方米。截至 2007 年,石油探明储量约 60 多亿吨,探明率不足 50%;天然气探明储量约 3000 多亿立方米,探明率不足 10%。因此,松辽盆地石油和天然气勘探尤其是岩性油藏勘探在未来将有巨大的潜力。本书在前人研究的基础上,结合新的勘探成果,运用近年来国内外发展的新技术、新理论,对松辽盆地陆相石油地质特征进行分析研究,主要目的是为新的油气发现奠定理论和技术的基础。

松辽盆地是叠置于古生代基底上的大型中、新生代陆相沉积盆地,对松辽盆地类型虽然有不同的看法,但越来越多的证据显出松辽盆地是与中、新生代以来北部的鄂霍茨克海的关闭、东部太平洋板块对中国大陆的消减作用及洋壳俯冲方式的改变有关,在不同时期、不同地区,发生了上地幔对流调整,岩石圈拉薄,地壳断裂,形成的时空上有序分布的大陆边缘裂谷盆地。松辽盆地经历了断陷、沉陷、构造反转三个发展过程,主要发育断陷和坳陷两套沉积层序。晚侏罗世—早白垩世断陷期,常形成一系列单断的箕状断陷或双断的地堑断陷,构成凸起和凹陷分隔的构造格局。岩浆沿断层活动频繁,火山活动导致上地幔热流大量外溢,为地壳所吸收,使盆地表现为高热流值和高地温梯度。晚白垩世盆地整体下降,坳陷沉积统一了断陷期凹凸相隔的构造格局,褶皱与大断层不发育,多为平缓的披覆构造。沉积物多为河流相粗碎屑岩、湖相暗色泥岩、油页岩、粒屑灰岩和煤层,夹有碱性玄武岩和拉斑玄武岩,反映大陆边缘沉积特征。

盆地坳陷期发育多套沉积体系,不同的沉积体在空间上叠置,为油气的形成提供了生成条件、储集空间和遮挡条件。两次最大湖泛期,即青山口组一段和嫩江组一、二段沉积期受到松辽湖盆与海洋短期沟通的影响,沉积了两套分布广泛、富含有机质、巨厚的半深湖—深湖相黑色页岩和油页岩,形成了盆地最重要的生油层和区域性盖层。发育于湖盆周边的四条水系长时间持续发展,其中沿盆地长轴方向长期发育的两条河流,形成了南北对应的由青山口组二、三段进积和姚家组退积两段地层组成的两个大型三角洲复合体,呈楔状伸入半深湖—深湖相黑色页岩中,为油气运、聚成藏提供了巨大的储集空间。在湖泊基准面下降期,河流—三角洲向盆地内推进,在坳陷中心部位沉积了大面积分布的错叠连片的条带状、透镜状砂体,为岩性油藏形成创造了条件。

坳陷期储层岩石类型多为粉砂岩和细砂岩,局部地区还发育湖相碳酸盐岩和泥岩裂缝储层。以大型三角洲—湖泊相河道砂岩为主的储层通常具有非常好的物性,构成了松辽盆地 I 类储层的主体,孔隙类型以原生粒间孔为主;以小型三角洲分流河道砂和扇三角洲砂岩为主

的储层，构成松辽盆地中部含油气组合Ⅱ类储层的主体，孔隙类型为原生粒间孔、缩小粒间孔和较多的微孔；以滨浅湖相砂体为主的储层，构成松辽盆地中部含油气组合Ⅲ类储层的主体，孔隙类型以缩小粒间孔和微孔为主。

青一段和嫩一段烃源岩有机质丰度一般达最好烃源岩级别，生油母质主要为葡萄藻和沟鞭藻类等低等水生生物。青一段泥岩具有“裂隙式”和“孔隙式”两种排烃方式，裂隙式排烃效率高，排烃深度大；而孔隙式排烃效率低，排烃深度小。油气运移包括三种方式，一是垂向运移，如三肇凹陷和古龙凹陷中部地区；二是短距离侧向运移，如大庆长垣地区；三是长距离侧向运移，如西部斜坡地区。根据储层包裹体的研究，盆地各地区油气成藏时间和控制因素有明显差异，一般在嫩江组沉积末期至古近纪末期。

油藏主要分布于中央坳陷区，其次为西部斜坡区和东南隆起区。大型三角洲—湖泊沉积体系，沉积相带控制了油气藏类型。泛滥平原和分流平原相，储层砂地比一般大于40%，砂体形态呈块状或不规则板状，为构造油气藏带；分流平原和三角洲内前缘相，储层砂地比在20%~40%之间，砂体一般呈条带状，为复合油气藏带；三角洲外前缘、前三三角洲相，储层砂地比小于20%，砂体类型包括透镜状砂岩和席状砂岩，为岩性油气藏带。

中央坳陷区的生油凹陷内，扶余、杨大城子油层一般为低—特低渗透储层（孔隙度一般小于13%，渗透率一般小于2mD），油在水中的浮力无法克服界面张力而驱动原油运移，只有靠烃源岩不断生烃产生超压，储层中的原油在超压的驱动下，向下部和凹陷周边推排地层水而实现运移，油水间无重力分异作用。当油被排运到浅部孔喉半径超过临界上限值以后，浮力可以克服界面张力而驱动石油进行常规运移，并发生油水分异。因此，凹陷中部物性较差的储层油水分布与构造高低无明显关系。受上覆烃源层厚度、生烃强度、古超压、断层、微裂隙分布以及垂向岩性组合等的影响，生油凹陷内油层集中分布在一个包络面以上的扶余、杨大城子油层中，向周边物性变好地区反而为纯水层，形成“油水倒置”的分布特征，油气分布因类似于深盆气的特点而称之为深盆油藏。在凹陷周边高渗透储层发育的隆起、阶地等地区，形成油水分异作用明显的常规构造油藏和复合油藏。

大庆长垣地区油气的聚集机制可能与构造反转导致的差异泵吸作用有关。构造反转使生油凹陷内的烃源岩进一步熟化，沿盆地长轴方向发育的叶状三角洲复合体作为泵吸的良好通道、区域盖层为泵吸能量的保存提供了必要条件，差异抬升导致圈闭与烃源岩间势能在瞬间快速增大，促使油气大规模从烃源岩向砂体快速充注成藏。

松辽盆地复合含油气系统主要包括三种方式，一是共盖复合式，二是贯通复合式，三是叠置复合式，形成时间大体上在嫩江组沉积末期。对油气成藏的影响，一是导致油气来源不同，造成“同层多源”；二是油气运聚层位不同，导致“一层多层”。复合含油气系统的存在扩展了油气成藏的空间范围。

总之，本书以高分辨率三维地震资料和大量的地质、地球化学分析资料为依据，在对盆地的构造演化、沉积过程、油气生成及成藏过程等综合分析的基础上，应用高分辨率层序地

层学方法、含油气系统方法、沉积坡折带控砂技术、储层包裹体测年技术、油气成藏运移示踪技术等，提出了反转构造油藏的“泵吸”成藏机理、大型三角洲沉积和大面积河道沉积砂体分布控制油藏类型的“三个成藏带”认识、向斜区低一特低渗透砂岩储层中“深盆油藏”的形成机理，这些认识不但丰富了我国陆相石油地质学理论，而且对我国其他陆相盆地石油勘探，尤其是岩性油藏勘探也具有重要的参考价值。

本书由侯启军和冯志强确定编写提纲，由大庆油田勘探开发研究院勘探地质和实验技术人员集体分工完成。全书共分十章，各章的主要编写人：第一章由冯志强、冯子辉执笔；第二章由侯启军、冯子辉执笔；第三章由冯子辉、万传彪执笔；第四章由李景坤、刘伟、方伟执笔；第五章由王成、薛文涛执笔；第六章由曲斌、张作祥执笔；第七章由王雪、宋兰斌、方伟执笔；第八章由霍秋立、孙永红、王德权执笔；第九章由侯启军、冯志强、冯子辉执笔；第十章由李景坤、冯志强执笔。

全书由侯启军、冯志强统稿和定稿，中国科学院院士戴金星为本书写序。本书在写作过程中得到了大庆油田勘探开发研究院领导和科技人员的关心指导及大力帮助，在此深表感谢。

由于作者掌握资料有限，书中定有不足之处，敬请读者批评指正。

目 录

第一章 石油地质学发展历程与松辽盆地勘探史	(1)
第一节 石油地质学的形成与发展历程	(1)
第二节 中国的石油工业与石油地质学	(5)
第三节 松辽盆地油气勘探历程	(9)
第二章 松辽盆地类型与构造演化	(21)
第一节 区域地质背景及基底岩性特征	(21)
一、区域地壳结构	(21)
二、成盆先期的地质与构造特征	(25)
三、盆地基底岩性及基底结构分析	(34)
第二节 盆地发展历史与类型划分	(50)
一、盆地发展的地质背景	(50)
二、盆地类型及其构造演化	(63)
第三节 盆地断裂发育特征	(74)
一、盆地深断裂控制构造格局	(74)
二、盖层断裂与油气成藏相关	(80)
第四节 盆地坳陷层构造发育特征	(86)
一、坳陷层构造单元划分	(86)
二、坳陷层构造形成机制	(91)
三、坳陷层构造发育特征	(97)
四、构造与油气分布的关系	(101)
第三章 松辽盆地石油地层与沉积层序	(104)
第一节 生物地层及空间分布	(104)
一、盆地断陷期地层古生物化石组合及分布	(105)
二、盆地坳陷期地层古生物化石组合与分布	(109)
三、盆地萎缩期地层古生物化石组合及分布	(118)
第二节 地层时代及接触关系	(120)
一、地层时代	(120)
二、地层接触关系	(127)
第三节 坳陷地层层序与地层格架	(129)
一、基准面旋回与识别标志	(129)
二、基准面旋回的划分	(136)

三、层序地层对比·····	(153)
第四节 沉积体系与充填演化·····	(166)
一、浅水湖泊—三角洲沉积体系·····	(167)
二、大型湖泊—三角洲沉积体系·····	(170)
三、坳陷层充填演化特征·····	(177)
四、沉积体系与油气聚集·····	(189)
第四章 松辽盆地陆相烃源岩成烃条件 ·····	(195)
第一节 烃源岩含义及其评价方法·····	(195)
一、烃源岩类别·····	(195)
二、烃源岩评价标准·····	(195)
第二节 烃源岩有机岩石学特征·····	(204)
一、有机显微组分分类·····	(204)
二、烃源岩有机显微组分组成·····	(206)
第三节 烃源岩有机质丰度与成烃潜力·····	(212)
一、烃源岩有机质丰度垂向变化特征·····	(212)
二、烃源岩有机质丰度平面变化特征·····	(215)
第四节 烃源岩有机质类型与成烃方向·····	(222)
一、干酪根有机元素组成特征·····	(223)
二、岩石热解色谱特征·····	(227)
三、有机质的碳同位素分布特征·····	(231)
四、干酪根碳原子结构组成·····	(233)
五、烃源岩有机相及其展布特征·····	(238)
第五节 烃源岩有机质成烃演化与生烃模式·····	(245)
一、烃源岩成烃演化阶段·····	(245)
二、干酪根生烃演化特征·····	(247)
三、可溶有机质热演化特征·····	(256)
四、干酪根热解模拟生烃实验·····	(264)
五、有机质显微组分热解模拟生烃实验·····	(270)
六、烃源岩中有机质的成烃模式·····	(273)
第五章 松辽盆地油气储集条件 ·····	(277)
第一节 储层与含油气组合·····	(277)
一、储层及空间分布·····	(277)
二、含油气组合及主要特征·····	(283)
第二节 储层岩石矿物学及成岩演化·····	(286)
一、砂岩储层岩石矿物学一般特征·····	(286)
二、储层岩矿组成及胶结特征·····	(288)

三、砂岩储层成岩作用及控制因素·····	(296)
四、湖相碳酸盐岩储层特征·····	(297)
第三节 储层孔隙结构与物性特征 ·····	(301)
一、储层孔隙结构及组合特征·····	(301)
二、砂岩储层物性及控制因素·····	(303)
三、砂岩储层次生孔隙形成特征·····	(328)
第六章 松辽盆地盖层发育特征 ·····	(331)
第一节 盖层类型及评价依据 ·····	(331)
一、盖层类型及特征·····	(331)
二、盖层的封闭机制·····	(333)
三、盖层封闭的相对性·····	(335)
四、盖层的评价依据·····	(336)
第二节 盖层封闭性及其发育特征 ·····	(341)
一、盖层的宏观与微观特征·····	(341)
二、盖层性质与成岩作用的关系·····	(345)
三、盖层发育特征·····	(347)
第三节 盖层与油气藏形成关系 ·····	(352)
一、盖层在纵向上控制了油气的富集层位·····	(352)
二、盖层在平面上控制了油气藏的主要发育区·····	(353)
第七章 松辽盆地油气地球化学特征 ·····	(357)
第一节 中浅层油气分布特征 ·····	(357)
一、油气产层空间分布·····	(357)
二、油气储量分布特征·····	(363)
第二节 原油物理化学性质及类型特征 ·····	(365)
一、原油物理性质·····	(365)
二、原油化学性质·····	(388)
三、原油族群划分·····	(402)
四、原油来源分析·····	(409)
第三节 天然气类型及其地球化学特征 ·····	(419)
一、天然气物理性质·····	(419)
二、天然气化学性质·····	(422)
三、天然气成因类型的划分·····	(431)
四、天然气的气源关系·····	(437)
第八章 松辽盆地油气的运移与保存 ·····	(442)
第一节 油气运移及动力机制 ·····	(442)
一、油气运移的证据·····	(442)

二、油气运移的动力和相态·····	(443)
第二节 油气初次运移·····	(444)
一、初次运移的一般认识·····	(444)
二、烃源岩生烃、排烃模拟实验·····	(445)
三、地质体中烃源岩生烃、排烃特征·····	(450)
第三节 油气二次运移·····	(452)
一、油气二次运移的一般问题·····	(452)
二、油气通过断裂的二次运移·····	(459)
三、运移途径上的痕迹与地层色层效应·····	(462)
四、油气二次运移特征·····	(463)
第四节 油藏地球化学·····	(470)
一、西部斜坡区油气优势运移通道·····	(470)
二、新站油田油藏非均质性及油气运移方向·····	(475)
三、王府及周边地区油气运移方向·····	(482)
四、油气成藏期次·····	(486)
五、油气运移方式及成藏模式·····	(495)
第五节 油气保存条件·····	(499)
一、油气藏受破坏的机理·····	(499)
二、保存条件的定量评价·····	(501)
三、西部超覆带原油的生物降解·····	(501)
四、黑帝庙次生油气藏·····	(507)
第九章 松辽盆地油气藏类型及成藏控制因素·····	(510)
第一节 油气藏类型与分布特征·····	(510)
一、油气藏类型划分·····	(510)
二、油气藏分布特征·····	(521)
第二节 油气藏形成的宏观控制因素·····	(523)
一、有效烃源岩控制油气藏的空间展布范围·····	(524)
二、储层砂岩的发育规模影响油气藏类型·····	(528)
三、反转构造带是油气聚集的有利场所·····	(531)
四、断裂对油气运聚成藏的控制作用·····	(536)
五、向斜区大面积分布的低—特低渗透储层有利形成深盆油藏·····	(541)
第三节 大型湖泊—三角洲沉积体系油气藏形成特征·····	(545)
一、构造油气藏带特大型油田的形成与差异泵吸作用·····	(546)
二、复合油气藏带多层位含油与多种类型油气藏形成特征·····	(551)
三、大型湖泊—三角洲沉积体系岩性油气藏形成特征·····	(567)
第四节 浅水湖泊—三角洲沉积体系油气藏形成特征·····	(574)

一、大面积岩性油气藏形成的地质条件·····	(574)
二、岩性油气藏油气富集分布的控制因素·····	(582)
第十章 松辽盆地坳陷层含油气评价与资源潜力预测 ·····	(588)
第一节 含油气系统划分 ·····	(588)
一、含油气系统及评价方法·····	(588)
二、松辽盆地坳陷层含油气系统特征与评价·····	(593)
第二节 含油气区带评价 ·····	(607)
一、烃源灶间的正向构造含油气带是背斜型大油田形成的有利场所·····	(609)
二、烃源灶边部的正向构造含油气带是层状背斜型油田的有利勘探区·····	(610)
三、烃源灶周边的复合圈闭含油气带具有优越的油气成藏条件·····	(614)
四、烃源灶内的岩性圈闭含油气带是油气勘探的有利地区·····	(616)
第三节 岩性油藏发育区含油气圈闭评价技术 ·····	(617)
一、模式判别法、频谱分解等精细储层预测技术·····	(617)
二、相干体、层倾角等精细构造解释技术·····	(622)
三、薄互层储层反演岩性圈闭识别技术·····	(625)
第四节 油气资源预测 ·····	(629)
一、油气资源评价方法概要·····	(629)
二、坳陷层油气资源评价·····	(636)
参考文献 ·····	(644)

第一章 石油地质学发展历程与松辽盆地勘探史

石油地质学简明的解释是“应用于石油的地质学”(Vincent Illing, 1942),它是现代地质学中的一个分支学科。石油地质学主要任务是分析、阐述沉积盆地中油气资源的生、储、盖、圈、运、保等各项地质要素,归纳、总结油气藏形成过程、主控因素以及分布规律的科学。石油地质学是一门应用科学,是随着油气田的勘探、开发实践活动,而逐步总结上升为理论的(李德生,2000)。

第一节 石油地质学的形成与发展历程

石油地质学的产生、发展和不断完善,与地质学的发展直接相关,同油气勘探活动紧密相伴。作为一门实践性科学,从初级的、简陋的开始,到完整的、系列化的今天,大体上经历了以下几个阶段。

(1) 第一个阶段是1900年以前,石油地质学尚未形成学科,仅有“背斜学说”的认识。1859年,在美国宾夕法尼亚州首次钻探出石油(迪拉克井)作为石油工业的开始,在此之后的最初年代,石油钻探只是选择在天然油苗或先期成功井的附近,几乎没有什么石油地质学理论的指导。当时产出的石油主要在北美的阿帕拉契亚山区和大湖区的古生代地层、加利福尼亚南部的古近纪—新近纪砂岩,以及前苏联高加索地区的巴库和格罗兹涅区、罗马尼亚的普罗依什蒂、秘鲁的塔拉腊等,这些石油均产自古近纪—新近纪砂岩。这个时期的找油实践过程中,背斜说已为人们所观察到。

根据F. K. 诺斯(1994)的研究,背斜学说的证据首先是在加拿大发现并加以记录的。在1842年,当W. 洛根(William Logan)出任加拿大新的地质调查所的第一任所长时,他注意到位于圣·劳伦斯河(St. Lawrence)的河口以南的东加斯匹(Gaspe)古生代地层的背斜构造流出的油苗。T. S. 亨特(Thomas Sterry Hunt)于1861年正式提出了背斜说,他是在1847—1872年间被洛根的地质调查所雇用的美国人。E. B. 安德鲁斯(Andrews)在同年也提出了同样的主张,但依据的道理不同,他认为背斜的脊部应该是裂缝所在处,而裂缝可以使地下的油气通达地表。几乎在同期或稍后,俄国的阿比赫(1863)等也提出了背斜说,他们根据油气苗呈线状分布可能与断裂有关,提出了“石油线”的认识。此后在19世纪末,美国的I. C. 怀特(White, 1885)和奥地利的豪菲尔(1888)等重申了石油储集的背斜说。

事实上背斜说作为一种观察结果尽管提出较早,而地质学家真正用找寻背斜来进行石油和天然气勘探是在20世纪。主要标志是1901年得克萨斯湾岸地区斯平德托普(Spindletop)油田的发现,背斜说在石油勘探上产生了实际影响。

(2) 第二个阶段是1900—1960年,石油地质学的建立与应用阶段。在这个过程中包括3个时期,第一个是背斜说的发展时期(1901—1925年)。随着得克萨斯州斯平德托普油田的发现,1901年美国开始了旨在专门勘查石油构造的地面地质调查,当时许多人确信,所有的油田实际上均位于某种型式的背斜构造上,即使这样的构造不能在图上绘出来。这种简

单类型构造的探寻在美国特别成功，相继发现了 5 大油区，包括中大陆的俄克拉何马部分（1910—1925 年）、加利福尼亚州的圣·华金谷（1920 年前）、洛杉矶盆地（1910—1925 年）、特立尼达（1912—1920 年）以及墨西哥州的坦皮科区（1908—1920 年），在 1925 年美国年生产石油 $1.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，几乎是第二大产油国墨西哥产量的 7 倍。除美国之外，通过油苗与背斜构造的配合，其他国家也发现了许多油田，如委内瑞拉的马拉开波盆地、印度尼西亚、阿根廷南部、伊朗的马斯杰德—伊—苏莱曼油田等。在这个时期美国出版了世界上第一部石油地质学专著《实用石油地质》（D. Hager, 1916），同时美国石油地质学家协会（AAPG）成立（1917 年），该会总部设于俄克拉何马的图尔萨，是世界上最大、最成功的科学机构之一。

第二个是对圈闭和储层的认识深化时期（1926—1945 年）。在这个时期，油气聚集的背斜说仍然方兴未艾。但 1930 年，东得克萨斯油田的发现促使石油地质学家们将注意力转向单斜圈闭的潜力。对非背斜圈闭的认识促进了早期的石油圈闭的分类，这些分类几乎都是美国地质学家提出的，如 F. G. 克拉普（Clapp, 1929），W. B. 威尔逊等（Wilson, 1934），W. B. 赫罗伊（Heroy, 1941），O. 威廉（Wilhelm, 1945）。此外，对传统观念的另一改变是在储集岩的认识方面。在 1925 年以前，碳酸盐岩储层中仅有一些零星的油气发现，一般认为储集岩是砂岩。而 1925—1945 年间，碳酸盐岩储层中有新的发现，这类油田不但规模大而且地理分布范围广，如委内瑞拉的拉帕兹（1925 年）、得克萨斯州西部的耶茨（1926 年）、伊拉克的基尔库克（1927 年）、墨西哥的波萨里卡（1930 年），其中 1932—1948 年间，中东和美国的二叠盆地碳酸盐岩储层油田取得辉煌进展。

值得说明的是，这个时期是石油勘探技术革新最大的时期。例如能够将看不见的地下构造图绘出来的反射地震开始于 1927 年前后，并在 30 年代于美国南部取得了显著成功。电测井是在 30 年代早期引用的，并且很快就革新了井中流体评价和井间岩性对比的程序。20 年代晚期旋转钻机开始取代了老式的顿钻钻机，提高了钻进效率、扩大了钻探深度。在 1925 年前，大多数钻井未及 1000m，而新式钻机的使用，井深很快达到 3000m（1931 年）、4500m（1938 年）及 5000m（1945 年）。钻井深度增加，为地质家认识盆地的构造和历史、深埋地层的潜力、孔隙度和流体动态等地质特征带来了丰富的信息。

在 1926—1945 年，有两个新的学科被石油地质学家广泛使用，其一是石油地球化学的形成，其二是微体古生物学的繁荣。在此期间相继出版了 4 部对石油地质学家可称为经典性的参考书，即《典型美国油田的构造》（1929 年）、《石油地质学问题》（1934 年）、《石油科学》（1938 年）、《地层圈闭型油田》（1941 年）。

第三个是现代沉积学的发展和天然气的认识时期（1946—1960 年）。在此期间出现了钻井活动的高潮，当时仅美国每年即钻井 5 万多口，其中 1 万多口探井，年总进尺超过 $6000 \times 10^4 \text{ m}$ 。钻探工作扩展到所有容易达到的沉积区域，其中 40 年代末，勘探井推进到浅水海域，50 年代末，海上钻探已在若干有海岸的国家的浅水陆棚区展开。在这个时期，石油地质学的主要进展是引用了一门新的岩石学科——现代沉积学，沉积岩的研究首次受到高度重视。1950 年，库南（Kuenen）和米格里奥里尼（Migliorini）所做的实验解释了深水中粗砂沉积的机制，导致了对浊积岩相的认识。1952 年纳特兰德（Natland）首次将这一进展用于加利福尼亚州各盆地高产油气的上新世砂岩储层。另外，天然气被承认是一种有价值的和丰富的资源，也是石油地质学的重要进步，它不但导致钻探的进一步加深，而且也使有关烃类生成和运移的地质学及有机地球化学研究有重大进步。一些完整的沉积盆地可能只形成含气

区而不形成含油区，因此需要将这两种燃料作为不同过程的不同产物而进行地质的和地球化学的评价。

钻探高潮为掌握大量新的地下地质资料带来了机遇，一些有权威的、有重要影响的石油地质学论著相继问世，如1949年由美国科罗拉多矿业学院出版的《地下地质学方法》教材，1959年美国学者A. I. 莱复生编写的《石油地质学》。以后者为例，这是一部总结性的、集石油地质学各领域之大成的著作，标志着现代石油地质学理论走上系统化（石宝珩，1999）。

（3）第三个阶段是1961—1990年，石油地质学应用技术的迅速发展阶段。这个时期中东、利比亚、西西伯利亚、北海以及墨西哥等地区油气勘探都获得重大发现，非常大的个别油气藏的决定性作用，使人们不得不制造“巨型”（Giant）和“超巨型”（Supergiant）油气田这样的术语（诺斯，1994）。但在石油开发的成熟区域或接近于成熟条件的区域，油气勘探逐渐集中到M. T. 哈尔博蒂所谓的隐蔽的（Subtle）和不明显的（Obscure）圈闭上，相应地，石油地质学应用技术也有了快速发展。

在这个阶段中包括两个时期，第一个是地震地层学和有机地球化学迅速发展时期（1960—1980年）。第一项重要进展是由于地震资料的获取、处理、分辨及解释均有实质上的进步，70年代中期以P. R. Vail为首的埃克森（Exxon）石油公司的地质学家们创立了地震地层学，它把地质理论、地震勘探技术和当代计算机技术结合起来，实现了地震时间剖面与实际地质剖面之间的有效对比，并成功地应用于油气勘探。地球物理技术的进步产生了两个明显的效果，一是对隐蔽或复杂圈闭机制勘探的可靠性大为提高，二是在盆地勘探早期发现大型油气藏的可能性大为增加，这一点在海上尤为重要，因为只有早期发现大油田，才能使勘探持续到隐蔽和不明显的圈闭阶段。在60年代末和70年代初，另一项重要进展是有机地球化学用于了解烃类的生成机制、成熟作用和运移过程，首次被地质学家和地球物理学家完全理解。完成这一重要进展的先驱者主要来自前苏联和西欧国家，如B. 蒂索（Tissot，1969，1974，1975）、D. H. 威尔特（Welte，1972）。地质学家关于油源沉积物早期生成作用的半推测认识首次建立于真正的科学基础上，油源实验技术被广泛使用。

需要说明的是，1960年以后地球科学进入了被称作“地学革命”的空前活跃的历史时期，划时代的标志是板块构造的提出（Fischer，1975；Bott，1976）。其影响是一系列多边国际合作地学项目相继实施，地球科学视野和研究思路拓展，以强调“全球观”为特色，以研究“全球事件”、“全球变化”为内容的系统论的新思想给地学各个分支注入了新的活力，从而使地球科学从传统的、地域性的定性描述提高到系统的成因动力学分析，开创了全球地质学（Global Geology）的新纪元。

第二个是层序地层学和油藏地球化学的建立与发展时期（1980—1990年）。这个时期在全球范围内寻找大规模构造油藏的机会明显减少，而成熟区的隐蔽油气藏勘探已成为重要的勘探目标，相应的石油地质学进展主要表现在两个方面。

其一是80年代中后期，B. Haq，P. R. Vail，H. W. Posamentier（1987，1988）等在地震地层学的基础上创立了层序地层学。层序地层学从全球变化的研究思路出发，融现代沉积学理论、全球海平面升降旋回和年代地层学的时间框架于一体，以重建大陆边缘沉积记录中识别出来的海岸上超和海平面变化旋回为基本方法，界定和划分出成因地层单元——层序。层序地层学的理论和方法已被成功地应用于盆地分析、储集砂岩的预测和油藏描述，已成为当代地学领域中进展最快的分支之一。

其二是 80 年代末 90 年代初,以美国雪佛龙石油公司的研究者、英国纽卡索大学拉特教授(Larter, 1989, 1996)、加拿大联邦地质调查局黎茂文教授(1992)等为代表的地球化学家,在油气地球化学的基础上建立了油藏地球化学方法。通过精细的地球化学分析,计算油藏原油来源于不同生油岩的比例;阐述油藏原油的注入方向;分析油气的优势运移通道、运移距离等。以油气地球化学技术尤其是油藏地球化学技术的发展为依托,L. B. 马贡等(Magoon, 1987, 1991, 1992)发展了含油气系统的概念。含油气系统是指沉积盆地中由有效烃源岩、与其相关的油气和油气藏及其形成所需要的所有基本要素和成藏作用共同组成的油气地质单元。含油气系统研究的根本目的方面在于提供了油气资源评价的最佳单元,另一方面在于提出新的油气有利聚集区带的具体部位。美国、委内瑞拉、巴西、阿根廷等多个国家的勘探实践表明,含油气系统理论的广泛应用,解决了许多新区勘探和成熟区勘探遇到的难题,为提高钻探成功率和勘探效益提供了一种新途径。

(4) 第四个阶段是 1991 年至今,石油地质学向定性和定量化发展阶段。由于油气勘探对象以隐蔽油气藏或岩性油气藏为主,对勘探技术的要求越来越高,石油地质学研究实现了从宏观向微观方向的发展、从定性向半定量和定量方向的发展、从静态描述向动态模拟方向的发展。在这个阶段发展了多项对石油地质学研究有重要影响的技术领域,下面仅介绍其中的两项。

一是 90 年代以来,以美国南卡罗莱纳大学 I. 莱切(Lerche, 1990)教授等发表的《用定量方法进行盆地分析》专著为标志,盆地数值模拟成为石油地质学领域中迅速发展的前沿(石宝珩, 1999)。盆地模拟是新地学思维与当代计算机技术相结合的产物,其主要特点是能以某种逼真度定量地再现含油气盆地形成和演化的全部动力学过程以及与之伴随的成烃、排烃和运聚过程,并模拟这些过程的时间配置关系和瞬间变化,从而把石油地质学从静态的单因素的定性描述提升到动态的、整体化的定量模拟。

盆地数值模拟定量化的作用在于,借助地震剖面资料,可早期预测生烃时间、生烃门限、生烃潜力,模拟烃类运移方向和聚集部位,尤其对尚未钻探过的远景区,地表条件差或边远地区可以进行油藏类型和资源量的先期预测。90 年代后期随着盆地分析和模拟技术的逐渐成熟,盆地模拟技术在降低勘探风险、提高勘探成功率方面显示出越来越大的作用,因此国际石油界和跨国公司都竞相将其列入优先发展的战略性研究领域。

二是 1990 年以来,以科罗拉多矿业学院 T. A. 克劳司(Cross, 1990)教授发表的《定量动力地层学》专著为标志,形成了以地层过程——响应动力学原理为指导、以基准面旋回为参照格架的高分辨率层序地层学理论与分析技术。该理论与研究方法不仅可用于盆地地层格架的建立,同时由于它将层序地层学与沉积学理论和分析方法紧密结合起来,具有更明显的实用性和可操作性。主要表现在(邓宏文, 2002):基准面是控制地层形成的不同地质过程的综合反映,不需要以海平面为参照,因此可以同时应用于海相和陆相盆地;该技术将层序地层学与沉积学相结合,以相互标定的岩心、测井与高分辨率地震资料为基础,依据可容纳空间和沉积物供给的比值 A/S 值的变化趋势识别基准面旋回界面,因而各级次、不同性质的基准面旋回均具有可识别性,在缺乏不整合发育的地层中,根据沉积作用的转换即可识别高频时间界面,因此可以进行高分辨率层序地层划分;基准面旋回内部相域构成的二分特征在不同沉积环境、不同级次的层序中客观存在,基准面变化过程中相域的构成是由特定的沉积背景与环境所决定的,不一定符合被动大陆边缘受海平面控制的三分(低位、海进、高位)地层模式。

目前, 高分辨率层序地层学理论与分析技术的应用方兴未艾, 现已进入通过正、反演模型的建立, 对不同构造背景、不同沉积环境的地层进行定量预测的阶段。由于这些技术在海相和陆相盆地应用的广泛适用性, 已逐渐被国外大石油公司接受, 因此具有良好的发展前景。

第二节 中国的石油工业与石油地质学

中国近代石油工业从清政府在台灣设立油矿局、钻成第一口近代油井为起点, 距今已有 120 多年的历史。在这个过程中, 石油地质学的发展史可以划分为 4 个阶段。

第一个阶段是 1878—1949 年, 石油地质学的初创阶段。在这 70 年中, 中国的石油工业走过了漫长的、断续的发展时期。从 1904 年台湾苗栗县出磺坑出油、1907 年陕北延长油田投入开发、1939 年玉门老君庙油田投入开发, 到 1949 年全国只有 3 个小油田、2 个小气田, 石油地质储量为 $2900 \times 10^4 \text{t}$, 估算的远景石油储量仅 $2 \times 10^8 \text{t}$ 。从 1904 年至 1949 年, 全国共生产原油 $308 \times 10^4 \text{t}$, 1943 年年产量最高, 为 $32 \times 10^4 \text{t}$ 。

1932 年, 由谢家荣编著的《石油》一书的出版, 标志着石油地质学在中国诞生。当时由于中国的石油工业相对薄弱, 许多石油地质工作者先辈在困难的条件下, 为探索中国石油的发展道路, 相继在许多地区开展了石油地质调查工作。1933 年王竹泉和潘钟祥、谭锡畴和李春昱分别对陕北和四川进行石油地质调查; 1936 年, 潘钟祥对四川进行石油地质调查; 1938 年孙健初对酒泉、玉门一带进行石油地质调查并在 1939 年发现老君庙油田; 1939—1942 年、1942—1943 年, 黄汲清等先后对四川威远和新疆进行石油地质调查。当时虽然还缺乏对中国石油地质条件的深刻认识, 但提出了陆相沉积物中存在石油的可能性。1941 年潘钟祥在美国留学期间, 于《AAPG. Bulletin》杂志上发表了“中国陕北和四川白垩系石油陆相成因”的论文; 黄汲清在 1947 年出版的《新疆油田地质调查报告》中主张陆相侏罗纪地层是新疆的重要生油层之一。这些认识可以看作是后期发展起来的陆相生油理论的萌芽, 因此是中国石油地质学的初创阶段。

第二个阶段是 1950—1960 年, 中国石油地质学的成长时期。新中国成立后, 国家以玉门油矿为基地, 迅速扩大石油生产并积极在西北地区勘探, 先后发现了克拉玛依油田 (1955 年)、冷湖油田 (1956 年)、鸭儿峡油田 (1956—1958 年) 和四川天然气田 (1958 年) 等。1958 年石油勘探战略东移, 1959 年发现了大庆油田, 使我国石油工业的局面得到根本改变。

在这个时期, 中国的许多地质学家从不同领域或不同侧面, 为石油地质理论的发展和油气勘探工作作出了突出贡献。李四光 (1954) 从地质力学的观点出发, 分析中国构造体系, 指出石油的生、运、聚、散主要受构造体系的控制, 在新华夏体系内具有找油的可能性。这一观点为后来石油勘探方向的战略东移提供了科学依据。黄汲清 (1957) 从槽台说的角度出发, 指出“今后在工作中要上台, 注意在地台上找油”, 把华北平原和松辽盆地明确地划入“可能含油、经济价值一般很大的区域”。

在这个时期, 陆相生油的问题一直受到关注。1957 年谢家荣在《石油是怎样形成的》一文中指出, 大陆沉积中有机物可能主要是由陆生植物分异出来的, 陆相地层可能是主要的生油层。1959 年侯德封在《关于陆相沉积盆地石油地质的一些问题》一文中指出, 潮湿与干燥气候的时代转变, 有利于西北地区生油层的形成。这个时期, 中国陆相生油理论基本见到轮廓, 但陆相生油真正实现观念上的突破, 并作为石油地质学的重大课题加以研究, 则是