



“十三五”国家重点出版物出版规划项目

中国油气重大基础研究丛书

中国天然气地质与开发 基础理论研究

Basic Research on Natural Gas Geology
and Development in China

赵文智 等 著



科学出版社

“十三五”国家重点出版物出版规划项目
中国油气重大基础研究丛书

中国天然气地质与开发 基础理论研究

Basic Research on Natural Gas Geology and
Development in China

赵文智 等 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书为国家重点基础发展计划(973)“高效天然气藏形成分布与凝析、低效气藏经济开发的基础研究(2001CB2091)”与“中低丰度天然气藏大面积成藏机理与有效开发的基础研究(2007CB2095)”十年研究成果的凝练,分为天然气地质、地球物理和气藏开发三部分共十二章:第一章至第四章重点介绍中国两类天然气资源成藏地质理论与分布;第五章到第八章重点介绍两类天然气藏地震识别理论、技术及应用;第九章至第十二章重点介绍致密砂岩天然气藏有效开发基础理论与关键方法和技术。

本书可供从事天然气勘探开发的科研人员、院校师生及油田生产部门的技术和管理人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

中国天然气地质与开发基础理论研究=Basic Research on Natural Gas Geology and Development in China/赵文智等著. —北京:科学出版社, 2019.3

(中国油气重大基础研究丛书)

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

ISBN 978-7-03-058547-9

I. ①中… II. ①赵… III. ①石油天然气地质-研究-中国②天然气-气田开发-研究-中国 IV. ①P618.130.2②TE37

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第187793号

责任编辑:吴凡洁 冯晓利 / 责任校对:彭 涛

责任印制:师艳茹 / 封面设计:黄华斌

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

三河市春园印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年3月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2019年3月第一次印刷 印张:23 1/4

字数:522 000

定价:298.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

“中国油气重大基础研究丛书”编委会

顾问：邱中建 翟光明

主编：贾承造

成员（按姓氏汉语拼音排序）：

陈树民	戴金星	冯志强	高德利	郭尚平	韩大匡
胡见义	金之钧	康玉柱	李根生	黎茂稳	李 阳
刘池阳	刘嘉祺	刘可禹	刘文汇	罗治斌	庞雄奇
彭平安	彭苏萍	沈平平	苏义脑	宋 岩	汪集旻
王清晨	王尚旭	王玉华	杨胜雄	袁士义	曾恒一
张国伟	赵文智	周守为	朱伟林	邹才能	

丛 书 序

石油与天然气是人类最重要的能源，半个世纪以来油气在一次能源消费结构中占比始终保持在 56%~60%。2015 年，全球一次能源消费总量 130 亿 t 油当量，其中石油占 31%、天然气占 27%。据多家权威机构预测，2035 年一次能源消费总量 162 亿 t，油气占比仍将在 60%左右；随着全球性碳减排趋势加快，天然气消费总量和结构性占比将逐年增加，2040 年天然气有望超过原油成为主要一次消费能源。

根据以美国地质调查局 (USGS) 为代表的多家机构预测，全球油气资源丰富，足以支持以油气为核心的全球能源经济在 21 世纪保持持续繁荣。USGS 研究表明：全球常规石油可采储量 4878 亿 t，已采出 1623 亿 t，剩余探明可采储量 2358 亿 t，剩余待发现资源 897 亿 t；全球常规天然气可采资源量 471 万亿 m³，已采出 95.8 万亿 m³，剩余探明可采储量 187.3 万亿 m³，剩余待发现资源 187.9 万亿 m³。近年来美国成功开发了新的油气资源——非常规油气，据多家机构评估全球非常规油可采资源量 5100 亿 t，非常规气可采资源量 2000 万亿 m³，油气资源将大幅增加，全球油气资源枯竭的威胁彻底消除。与此同时，全球油气资源变化的另一个趋势是资源劣质化，油气经济开发将要求更新、更复杂的技术，以及更低的生产成本。油气资源的大幅增加和劣质化已成为影响石油工业发展的重大因素，并将长期起作用。

石油工业的繁荣依赖于油气资源、技术、市场和政治、经济、社会环境。在一定的资源条件下，理论技术是最活跃、最具潜力的变量，石油工业的历史就是一部石油地质学与勘探开发技术发展史。非常规油气依靠水平井和体积压裂技术进步得以成功开发，揭示了全球石油工业未来油气资源大幅度增加和大幅度劣质化的资源前景，也揭示了理论技术创新的巨大威力和理论技术未来发展的无限可能性。所以回顾历史、展望未来，石油工业前景一定是持续发展和前景辉煌的，也一定是更高度依赖石油地质理论和勘探开发技术进步的。

石油天然气地质学 (geology of petroleum)，是研究地壳中油气成因、成藏的原理和油气分布规律的应用基础学科，是油气勘探开发的理论基础。人类认识和利用油气的历史由来已久，但现代油气勘探开发一般以 1859 年美国成功钻探的世界上第一口工业油井作为标志。1917 年，美国石油地质学家协会 (AAPG) 成立，并出版了《美国石油地质学家协会通报》(AAPG Bulletin)。1921 年，Emmons 出版 *Geology of Petroleum*，标志着石油天然气地质学成为一门独立的学科。20 世纪 30 年代，McCollough 与 Leverson 正式提出“圈闭学说”，成为常规油气地质理论的核心内容。1956 年，Levorsen 的 *Geology of Petroleum* 问世，实现了石油天然气地质学理论的系统化和科学化，建立了完善的圈闭分类体系，将圈闭划分为构造、地层和复合圈闭，指出储集层、盖层和遮挡条件是油气藏形成的必要条件，圈闭油气成藏是常规油气聚集机理的理论核心。经典的石油天然气地质学的理论核心包括盆地沉降增温增压、有机质干酪根生烃与

油气系统理论；由岩石骨架、有效孔隙及充注的可动流体构成的油气储集层理论；含油气盆地、区带、圈闭与油气藏的油气分布理论；能量与物质守恒，由人工干预形成油气储集层不同部位流体压差，从而形成产生和控制流动的油气开发理论。

石油天然气地质学历经百年历史，其发展史深受石油工业勘探开发实践、地质学相关基础学科进展和探测与计算机技术发展的推动。石油工业油气勘探从背斜圈闭油气藏发展到岩性地层油气藏；从陆地推进到海洋，进而到深水；从常规发展到非常规，这些都推动了石油天然气地质学理论的重大突破和新理论、新概念的出现。而地质学基础学科不断出现的重大进展，包括板块构造理论、层序地层学理论、有机质生烃理论都被及时融入石油天然气地质学核心理论之中。地震与测井等地球物理学勘探技术、地球化学分析技术与计算机技术的飞速发展推动了油气勘探开发技术进步，也推动了石油天然气地质学理论的进步与完善。纵观百年石油天然气地质学发展历史，可以看到五个重要节点：①背斜与圈闭理论（19世纪80年代~20世纪30年代）；②有机质生烃与油气系统理论（20世纪60~70年代）；③陆相油气地质理论（20世纪40年代~21世纪初）；④海洋深水油气地质理论（20世纪80年代~21世纪初）；⑤连续型油气聚集与非常规油气地质理论（2000年至今）。

近年来，随着全球油气产量增长和勘探开发规模不断扩大，勘探领域主要转向陆地深层、海洋深水和非常规油气。新的勘探活动不断揭示了新的地质现象和新的油气分布规律，许多是我们前所未知的，如陆地深层8000m的油气砂岩和碳酸盐岩储层、海洋深水陆棚的规模砂体分布、非常规油气的“连续性分布”成藏规律，都突破了传统的石油地质学、沉积学认识，揭示了基础理论的突破点和新理论的生长点，石油地质理论正面临着巨大变革的前景和机遇。

深层、深水、非常规勘探地质领域的发展同时也对地球物理和钻井等工程技术提出了更高、更难的技术需求和挑战，刺激石油工业工程技术加速技术创新和发展。与此同时，全球材料、电子、信息和工程制造等学科快速发展，极大地推动了工程技术和装备的更新。地球物理勘探的陆地和海洋反射地震三维技术，钻井工程的深井、水平井钻井和体积压裂技术，3000m水深的海洋深水开发作业能力，以人工智能为特征的信息化技术等都是近年工程技术创新发展的重点和亮点。预期工程技术发展方兴未艾，随着科技创新受到极大重视和科技研发投入持续增加，工程理论技术必将进入快速发展期，基础理论与基础技术已受到关注，也将进入发展黄金期。

我国石油工业历经六十余年快速发展，形成了独立自主的石油工业体系和强大的科技创新能力，油气勘探技术水平已进入全球行业前列。2015年我国原油产量2.15亿t，世界排名第四位，天然气产量1333亿 m^3 ，世界排名第六位。目前，我国油气勘探开发理论技术水平已经总体达到国际先进水平，其中陆相油气地质理论一直居国际领先地位，在陆上复杂地区的油气勘探技术领域，我国处于领先水平；我国发展了古老海相碳酸盐岩成藏地质理论与勘探配套技术，在四川盆地发现安岳气田，是我国地层最古老、规模最大的海相特大型气田，累计探明地质储量8500亿 m^3 ；发展了前陆冲断带深层天然气成藏理论，复杂山地盐下深层宽线大组合地震采集和叠前深度偏移、超深层复杂地层钻完井提速等勘探配套技术，油气勘探深度从4000m拓展到8000m，在塔里木盆地库车

深层发现 5 个千亿立方米大气田，形成万亿立方米规模大气区；在油气田开发提高采收率技术领域，大庆油田发展的二次、三次采油提高采收率技术，在全球原油开发技术界一直处于国际领先地位。在海洋油气勘探开发和工程技术领域，我国在近海油气勘探开发方面处于同等先进水平；在深水油气方面，我们已获得重大突破，但在深水工程技术和装备方面，与全球海洋工程强国相比仍有重大差距；在新兴的非常规油气开采技术领域，我国石油工业界起步迅速，已经基本掌握了页岩气、煤层气开采技术，成功开发了四川盆地志留系龙马溪组页岩气田。在油气勘探开发专业服务技术及装备领域，我国近年快速发展，在常规专业技术和装备方面已经全面实现了国产化，高端技术服务和装备已初步具有独立研发先进、新型、高端装备的能力。在技术进步助推下，中国石油集团东方地球物理勘探有限责任公司已成为全球最大物探技术服务公司。但我国石油科技界油气勘探开发面临重大挑战：深层油气成藏富集规律与科学问题；低渗透-致密油气提高采收率技术与理论问题；非常规油气（页岩气、致密油气、煤层气）勘探生产先进技术与科学问题；海洋及深水油气勘探生产重大科学问题；勘探地球物理、测井、钻井压裂新技术与科学问题等。我们也清醒地看到我国要成为真正的石油工业技术强国依然任重道远，我们要正视差距、继续努力，特别是要大力加强基础理论和基础技术。

1997 年 3 月，我国政府高度重视科学技术，确定了建立“创新型国家”的战略方向，采纳科学家的建议，决定开展国家重点基础研究发展计划（973 计划）。973 计划是具有明确国家目标、对国家的发展和科学技术的进步具有全局性和带动性的基础研究发展计划，旨在解决国家战略需求中的重大科学问题，以及对人类认识世界将会起到重要作用的科学前沿问题，提升我国基础研究自主创新能力，为国民经济和社会可持续发展提供科学基础，为未来高新技术的形成提供源头创新。这是我国加强基础研究、提升自主创新能力的重大战略举措。自 1998 年实施以来，973 计划围绕农业、能源、信息、资源环境、人口与健康、材料、综合交叉与重要科学前沿等领域进行战略部署，2006 年又启动了蛋白质研究、量子调控研究、纳米研究、发育与生殖研究四个重大科学研究计划。十几年来，973 计划的实施显著提升了中国基础研究创新能力和研究水平，带动了我国基础科学的发展，培养和锻炼了一支优秀的基础研究队伍，形成了一批高水平的研究基地，为经济建设、社会可持续发展提供了科学支撑。自 973 计划设立以来，能源领域油气行业共设置 27 项（表 1），对推动油气地质理论的研究与应用起到了至关重要的作用，带动了我国油气行业的快速发展。

表 1 国家 973 计划油气行业立项清单

序号	项目编号	项目名称	首席	第一承担单位	立项时间
1	G1999022500	大幅度提高石油采收率的基础研究	沈平平 俞稼镛	中国石油勘探开发研究院	1999
2	G1999043300	中国叠合盆地油气形成富集与分布预测	金之钧 王清晨	中国石油大学（北京）	1999
3	2001CB209100	高效天然气藏形成分布与凝析、低效气藏经济开发的基础研究	赵文智 刘文汇	中国石油勘探开发研究院	2001

续表

序号	项目编号	项目名称	首席	第一承担单位	立项时间
4	2002CB211700	中国煤层气成藏机制及经济开采基础研究	宋 岩 张新民	中国石油集团科学技术研究院	2002
5	2003CB214600	多种能源矿产共存成藏(矿)机理与富集分布规律	刘池阳	西北大学	2003
6	2005CB422100	中国海相碳酸盐岩层系油气富集机理与分布预测	金之钧	中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院	2005
7	2006CB202300	中国西部典型叠合盆地油气成藏机制与分布规律	庞雄奇	中国石油大学(北京)	2006
8	2006CB202400	碳酸盐岩缝洞型油藏开发基础研究	李 阳	中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院	2006
9	2006CB705800	温室气体提高石油采收率的资源化利用及地下埋存	沈平平 郑楚光	中国石油集团科学技术研究院	2006
10	2007CB209500	中低丰度天然气藏大面积成藏机理与有效开发的基础研究	赵文智	中国石油天然气股份有限公司勘探开发研究院	2007
11	2007CB209600	非均质油气藏地球物理探测的基础研究	王尚旭	中国石油大学(北京)	2007
12	2009CB219300	火山岩油气藏的形成机制与分布规律	陈树民	大庆油田有限责任公司	2009
13	2009CB219400	南海深水盆地油气资源形成与分布基础性研究	朱伟林	中国科学院地质与地球物理研究所	2009
14	2009CB219500	南海天然气水合物富集规律与开采基础研究	杨胜雄	中国地质调查局	2009
15	2009CB219600	高丰度煤层气富集机制及提高开采效率基础研究	宋 岩	中国石油集团科学技术研究院	2009
16	2010CB226700	深井复杂地层安全高效钻井基础研究	李根生	中国石油大学(北京)	2010
17	2011CB201000	碳酸盐岩缝洞型油藏开采机理及提高采收效率基础研究	李 阳	中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院	2011
18	2011CB201100	中国西部叠合盆地深部油气复合成藏机制与富集规律	庞雄奇	中国石油大学(北京)	2011
19	2012CB214700	中国南方古生界页岩气赋存富集机理和资源潜力评价	肖贤明	中国科学院广州地球化学研究所	2012
20	2012CB214800	中国早古生代海相碳酸盐岩层系大型油气田形成机理与分布规律	刘文汇	中国石油天然气股份有限公司勘探开发研究院	2012
21	2013CB228000	中国南海相页岩气高效开发的基础研究	刘玉章	中国石油集团科学技术研究院	2013
22	2013CB228600	深层油气藏地球物理探测的基础研究	王尚旭	中国石油大学(北京)	2013
23	2014CB239000	中国陆相致密油(页岩油)形成机理与富集规律	邹才能	中国石油集团科学技术研究院	2014

续表

序号	项目编号	项目名称	首席	第一承担单位	立项时间
24	2014CB239100	中国东部古近系陆相页岩油富集机理与分布规律	黎茂稳	中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院	2014
25	2014CB239200	超临界二氧化碳强化页岩气高效开发基础	李晓红	武汉大学	2014
26	2015CB250900	陆相致密油高效开发基础研究	姜汉桥	中国石油大学(北京)	2015
27	2015CB251200	海洋深水油气安全高效钻完井基础研究	孙宝江	中国石油大学(华东)	2015

这 27 个项目选题涵盖了我国石油工业上游和石油地质基础理论、基础技术方面的重大科学问题,既是石油工业当前发展面临的重大挑战,也是石油地质基础理论和基础技术未来的发展方向。这批重大科学问题的研究解决,必将大大推动我国石油天然气勘探开发储量产量的增长,保障国家油气供应安全和社会经济增长的能源需求;同时支持我国石油地质科学技术的进步与深入发展,推动基础研究进入新的阶段。

这 27 个项目现在已基本完成计划合同规定的研究内容,取得丰硕的成果,相当部分研究成果已经被中国石油天然气集团有限公司、中国石油化工集团有限公司和中国海洋石油集团有限公司应用于勘探生产,取得了巨大的经济效益;在科学理论方面的成果也在逐渐显现,我国石油地质学家在非常规油气地质理论方面已逐渐赶上国际前沿,先进理论技术进步渗透石油界与科学界,未来将进一步发挥其效能,显现其深远影响。

这 27 个 973 项目及其成果主要集中在以下几个方面。

(1) 大幅度提高采收率技术(2 个项目),在大型砂岩油田化学驱提高石油采收率基础理论技术研究方面取得了国际领先的成果,并成功应用于大庆油田。

(2) 我国天然气地质理论(3 个项目),针对我国复杂地质条件背景,在形成高丰度构造型气藏和低丰度大面积岩性地层型气藏的成藏机理、富集规律及开发理论技术方面取得重大进展,支撑我国天然气快速增长。

(3) 海相碳酸盐岩油气地质理论(4 个项目),针对我国古老层系海相碳酸盐岩多期演化与高热演化成熟度特点,在古老碳酸盐岩沉积层序恢复、古老油气系统演化、储层分布规律及成藏特征等重大地质基础理论,以及深层复杂气藏勘探开发技术方面取得重大进展。

(4) 我国西部叠合盆地构造与油气成藏理论(3 个项目),在我国西部塔里木等盆地“叠合”特征分析、盆地构造演化解析及多源油气系统长期演化的规律研究中,在盆地构造学和石油地质学基础理论方面取得重大进展。

(5) 非常规油气地质(8 个项目,包括煤层气、致密油气、页岩油气、天然气水合物),非常规油气是近年出现的新油气资源,其成功开发既表现出巨大的经济意义,也揭示了非常规油气地质是一个全新的理论技术领域,是石油地质基础理论和技术新突破和取得重大进展的良好机遇,因此 973 计划给予了重点部署。这批成果包括建立了独具特色的高煤阶煤层气地质理论与开发技术;在古老海相页岩气地质理论和技术上取得重大进展,支持四川盆地志留系龙马溪组页岩气成功大规模开发;在陆相致密油和页岩油

地质理论取得重大进展,发展了我国陆相非常规油气地质理论;在天然气水合物地质上取得进展。这批成果追踪和接近国际前沿,显示了我国科学家的学术水平和创造力,未来有进一步扩大的潜力。

(6) 深井、深水钻井与地球物理勘探理论技术(5个项目),针对油气勘探转向深层、深水与非常规,在深井、深水钻井和地球物理反射地震勘探基础理论技术方面取得重大进展,从工程技术上支撑了我国近年油气勘探开发。

(7) 南海深水石油天然气地质理论(1个项目),在南海构造沉积演化与深水油气富集规律理论领域取得重大成果。

(8) 沉积盆地多种能源矿产共存机理(1个项目),在沉积盆地中油气、煤与铀等矿产共存富集机理方面取得重大成果。

石油作为人类社会最重要的能源战略资源,将在一段相当长的时期内发挥无可替代的作用,石油工业仍然是最强大和最具生产力的工业部门。科学技术是石油工业生存发展的永恒动力,基础理论和基础技术创新是动力的不竭源泉,相信石油科技未来必将有更伟大的创新发现,推动石油工业走向更辉煌的未来。

我本人有幸在2007~2015年期间成为973计划第四、五届专家顾问组成员,并担任能源组召集人,亲身经历了这一段石油地质科学蓬勃发展的珍贵时光。回顾历史,十分感慨。感谢科学技术部关注石油工业科技发展,设立27个973计划项目,系统开展石油地质基础理论研究,有效推动了我国油气勘探开发理论技术创新,促进了油气行业的快速发展;感谢这批973计划项目首席科学家及相关研究人员立足岗位、积极奉献,为我国石油科技进步做出了突出贡献;感谢各承担单位在项目研究过程中给予的支持,保障项目顺利实施。“科学技术是第一生产力”,希望我们广大石油地质工作者能够立足行业重大科学问题,持之以恒、开拓进取,不断推进石油地质基础理论研究,为我国油气勘探开发提供不竭的动力。

本套丛书是对973计划油气领域27个项目在基础理论和基础技术方面攻关成果的总结,将陆续出版。相信本套丛书的出版,将会促进研究成果交流,推动我国石油地质理论领域发展。



中国科学院院士

2018年12月

前 言

2000 年以来,随着国民经济的快速发展,我国石油需求急剧增加,石油对外依存度逐年增大,从 2001 年的 25% 增加到 2010 年的 54%,已严重威胁国家能源安全。以煤为主的一次能源消费结构造成的大气污染损失已占 GDP 的 5%~7%,环境问题已严重影响我国经济和人民生活的健康发展。有效解决的重要途径是加快天然气勘探开发,提高天然气在一次能源消费结构中的比例,保障国民经济可持续发展,促进建设宜居环境,构建和谐社会。

我国天然气资源丰富,剩余可采资源量近 $27 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。天然气工业正步入快速发展阶段,未来 50 年是天然气的大发展时期。资源品质方面,高效天然气资源只占天然气总资源量的 1/3 左右,其余 2/3 主要是中低丰度天然气资源。在当前已探明的 $5.3 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 储量中,中低丰度天然气储量占 73%。由于中低丰度天然气资源在地质条件上有特殊性,如储层低孔低渗、气水边界与储层物性边界不明显,常规天然气藏地震识别与开发理论具有不适用性,相关技术研发缺少理论基础等,亟待创新和突破。

我国高度重视天然气资源的开发和利用,不断加大科技投入,2001~2011 年,先后启动两期国家 973 天然气基础研究项目,聘请中国石油勘探开发研究院赵文智教授为首席科学家,由中国石油勘探开发研究院、中国石油大学(北京)、清华大学、中国科学院广州地球化学所等 14 家单位近百位专家学者参与研究,形成一支高水平、长期稳定和具有创新能力的科学家团队,历经十年,潜心研究,通过基础理论和方法技术创新,推动我国天然气地质学发展,实现对我国天然气资源大规模勘探、发现与开发利用,推动天然气储量与产量快速发展。

总体上,我国天然气资源受两类大气田控制:一类是以构造型气藏为主的高丰度大气田,另一类是以地层岩性气藏为主的中低丰度大气田。

高丰度大气田方面,重点围绕制约我国天然气工业快速发展的关键问题开展研究,从高效气源灶、有效的成藏过程及优质成藏要素组合三个方面提出高效天然气藏形成与分布的评价指标,初步建立中国高效天然气藏形成的地质理论。针对我国高效气藏地质特点,建立气藏地球物理响应的理论基础,发展并完善实用技术,实现天然气藏的有效发现。阐明我国典型低效气藏的成因机理,建立相应的地质模式,提供低效气藏高效改造与保护的理论与实用技术。发展并完善凝析气藏气、液、固复杂相态与渗流理论,为实现凝析、低效气藏的经济开发提供理论依据和技术支持。

低丰度大气田方面,重点研究我国中低丰度天然气资源形成分布与规模有效开发的基础理论问题,提出一整套有关中低丰度天然气资源大型化成藏的地质新认识,创新开发多项面对复杂气水分异的气藏地震有效识别特色技术和低孔、渗气藏规模有效开发的理论与配套技术等。中低丰度大气田的成藏过程更为复杂,既有埋藏期的体积流充注,又有抬升期的扩散流充注,天然气在大面积分布的低孔渗储集体中高效聚集成藏。在气

藏地球物理识别方面,由于这类气藏的气水分异复杂、含气饱和度空间变化大,有效预测这类气藏和定量评价其中含气饱和度的空间变化是世界难题。这项研究成果攻克了一系列岩石物理和复杂气藏有效识别方面的基础理论问题,研发出多项特色识别评价新技术。在低孔、渗天然气藏有效开发方面,这项成果在渗流机理研究基础上,通过井网优化,优先开发“甜点”储层中的天然气储量,并带动周围致密储层中天然气储量的有效动用,成功解决了边际性很强的低丰度天然气储量规模动用问题,不仅增加了可动用储量,还为今后大规模有效动用我国低品位天然气储量作了有益的探索 and 开发技术的准备。

本专著是两期国家 973 项目研究的成果凝练,分为天然气地质、地球物理和气藏开发三部分共十二章:第一章至第四章重点介绍中国两类天然气资源成藏地质理论与分布,主要编写人员有赵文智、王红军、柳广弟、汪泽成、王兆云、卞从胜、徐安娜、徐兆辉、孙明亮、赵长毅、李永新、王铜山等;第五章至第八章重点介绍两类天然气藏地震识别理论、技术及应用,主要编写人员有曹宏、李红兵、巴晶、杨志芳、卢明辉、石玉梅、晏信飞、孙卫涛、徐右平、刘炯等;第九章至第十二章重点介绍致密砂岩天然气藏有效开发基础理论与关键方法和技术,主要编写人员有何东博、冉启全、杨贤友、熊春明、童敏、丁云宏、阎林、位云生、冀光、杨振周、唐海发、郑伟等。

全书由赵文智统一审稿,王红军、卞从胜、李永新和徐兆辉参与统稿。

本书相关研究得到科学技术部与中国石油天然气集团公司科技管理部的大力扶持,承担单位中国石油勘探开发研究院、中国石油大学(北京)、清华大学、中国科学院广州地球化学研究所等的全方位支持,参加研究的近百位科技人员付出了艰苦的劳动,项目跟踪专家组给予了严格的把关和指导,在此一并表示衷心的感谢!

作 者

2018 年 2 月

目 录

丛书序

前言

第一章 中国天然气资源类型与地质特征	1
第一节 中国天然气资源类型	1
一、已发现大气田的地质特征	3
二、中国天然气资源分类	6
第二节 两类天然气资源的地质特征	7
一、中低丰度天然气资源特征	9
二、高效天然气资源特征	10
第三节 中低丰度天然气资源的形成与分布特征	11
第四节 高效天然气藏形成条件与分布特征	13
参考文献	17
第二章 有机质接力成气机理	18
第一节 高-过成熟干酪根生气潜力	18
一、我国高-过成熟烃源岩分布及天然气勘探现状	18
二、核磁共振技术研究高-过成熟干酪根生气潜力	18
第二节 有机质接力成气机理	22
一、干酪根降解气和油裂解气成气时机和数量对比	22
二、分散液态烃裂解成气的热动力学条件	23
第三节 不同类型烃源岩排油率	28
一、影响烃源岩排烃效率的主要因素	28
二、烃源岩中滞留液态烃的数量统计	29
三、烃源岩排油率模拟实验研究	31
第四节 分散可溶有机质为气源岩的丰度标准	32
一、分散可溶有机质成气热模拟实验	32
二、实际地层中分散可溶有机质的丰度	33
第五节 分散可溶有机质裂解气的鉴别指标	34
一、分散可溶有机质裂解成气过程的催化模拟实验	34
二、天然气成因类型判识的轻烃新指标	35
第六节 双峰式生气模式及分散液态烃裂解气定量评价	37
一、塔里木盆地海相烃源岩双峰式生气历史	37
二、烃源岩双峰式生气模式及勘探意义	38

三、分散液态烃裂解气的定量评价	39
参考文献	43
第三章 高效气源灶及对形成高效气藏的作用	45
第一节 高效气源灶内涵	45
一、高效气源灶的概念	45
二、高效气源灶与有效气源岩、气源灶的异同	46
第二节 典型高效气源灶形成与评价	49
一、库车拗陷煤系高效气源灶	49
二、川东北原油裂解型高效气源灶	54
三、塔里木盆地古生界分散可溶有机质裂解型高效气源灶	60
第三节 高效气源灶对形成高效气藏的作用	63
一、单位时间内供气量大	63
二、单位时间内大量生气导致气源岩产生微裂缝并幕式排气	64
三、单位时间内气灶大量排气易产生有效与优势运移通道	65
四、单位时间内大量供气缩短聚气时间, 减少了天然气散失	66
参考文献	66
第四章 高效与中低丰度天然气藏形成机理研究	68
第一节 高效天然气藏的基本地质特征	68
一、高效气藏定义	68
二、已发现高效气藏的分布	68
三、高效气藏的基本特征	70
第二节 天然气高效成藏过程研究	72
一、天然气高效成藏过程的基本类型	72
二、灶-藏分离型成藏过程	74
三、古油藏裂解型成藏过程	82
第三节 中低丰度天然气藏成藏机理	88
一、天然气运移充注的基本方式	88
二、“薄饼式”成藏降低了对盖层条件的要求	92
三、“集群式”成藏降低了气藏群的整体逸散能量	93
四、抬升期成藏扩大了中低丰度天然气藏的成藏范围	97
参考文献	104
第五章 天然气地震有效识别现状及难点	105
第一节 我国天然气藏基本特点及地震需求	105
一、我国天然气藏基本特点	105
二、我国天然气工业发展对地球物理技术的需求	106
第二节 理论模型及技术发展现状	107
一、理论模型研究现状	107

二、烃类检测技术发展现状	107
第三节 难点与挑战	109
一、难点	109
二、挑战	112
参考文献	112
第六章 天然气藏地震有效识别理论基础	115
第一节 地震衰减理论	115
一、叠前衰减	115
二、反射系数频散	118
三、小波尺度域地震波衰减分析	122
第二节 双孔理论	134
一、地震波理论基础	134
二、双重孔隙介质地震波传播方程	139
三、非均匀介质 Biot-Rayleigh 理论	150
四、双连通孔隙部分饱和模型	157
参考文献	164
第七章 天然气藏地震有效检测技术	169
第一节 地震衰减气层检测技术	169
一、基于小波衰减理论的小波尺度能量、中心尺度技术	169
二、反射系数频散气层检测技术	175
三、振幅谱随入射角变化技术 (SVA)	178
第二节 声波方程弹性参数反演技术	183
一、基于波动方程和非线性扰动理论的叠前弹性参数反演技术	183
二、气藏波场响应信息结构识别技术	191
第三节 流体因子技术	198
一、基于 AVO 理论的岩性阻抗技术	198
二、声波阻抗梯度气藏识别技术	203
三、指数泊松比流体因子气层识别技术	207
第四节 含气饱和度地震预测技术	209
一、PGT 含气饱和度地震预测技术	209
二、基于地震数据的 AIS 模板含气饱和度地震预测技术	216
参考文献	221
第八章 天然气藏地震识别实例	222
第一节 四川盆地大川中须家河组致密砂岩气藏识别	222
一、储层及气藏特征	222
二、气层识别技术	223
三、工业化应用效果	227

第二节 龙岗超深层碳酸盐岩礁滩气藏地震识别	229
一、储层及气藏特征	229
二、气层识别方法	229
三、工业化应用效果	231
第三节 三湖疏松砂岩储层预测技术	233
一、研究区概况	233
二、气层识别技术	233
三、工业化应用效果	236
第四节 塔里木盆地乌什凹陷研究实例	239
一、工区概况	239
二、气层识别技术	239
三、工业化应用效果	243
参考文献	251
第九章 致密砂岩天然气藏开发地质特征	252
第一节 致密砂岩天然气藏概念界定	252
一、致密砂岩气概念	252
二、致密砂岩气成藏地质学内涵	252
三、致密砂岩气开发工程学内涵	253
四、致密储层渗透率参数评价	253
第二节 致密砂岩天然气藏开发特征	254
一、致密砂岩气藏主要开发地质特征	254
二、中国致密砂岩气藏主要类型	255
三、苏里格致密砂岩气田主要特征	255
四、致密砂岩气开发技术难点	256
五、国外开发技术现状	257
第三节 中国致密砂岩天然气资源与开发现状	258
参考文献	259
第十章 致密砂岩天然气藏“甜点储集体”成因机理与描述方法	260
第一节 “甜点储集体”主控因素与成因模式	260
一、“甜点储集体”主控因素	260
二、“甜点储集体”成因模式	276
第二节 “甜点储集体”识别与评价方法	277
一、不同孔隙结构的岩石物理测井响应机理和解释模型	278
二、多维岩石物理属性空间的岩石相解释	281
三、有效储层识别与分类评价	282
第三节 “甜点储集体”定量表征	283
一、有效单砂体规模尺度	283

二、复合有效砂体叠置类型及规模	288
三、有效砂体在各小层的分布特征	288
参考文献	289
第十一章 致密砂岩天然气藏非线性渗流特征与开发机理	291
第一节 致密砂岩储层渗流主要影响因素	291
一、气体滑脱效应	291
二、启动压力梯度	292
三、储层应力敏感性	293
第二节 致密气藏非线性渗流产能与有效动用评价	294
一、含水致密气藏类型划分与产能公式	294
二、不同流动状态气藏产能对比分析	299
三、致密砂岩天然气藏有效动用评价	301
第三节 致密砂岩储层基质-裂缝渗流及开采特征	310
一、基质-裂缝渗流数学模型	310
二、基质-裂缝耦合渗流开采特征	313
第四节 致密砂岩气藏非均质供气特征与开发模式	314
一、致密气藏非均质渗流模型	314
二、低渗区向高渗区供气特征	314
三、“甜点”外围低渗区供气能力分析	321
参考文献	330
第十二章 致密砂岩天然气藏规模有效开发技术	331
第一节 复合砂体分级构型描述与开发井布井技术	331
一、复合砂体分级构型划分	331
二、分级构型分布预测与井位优选	333
第二节 开发井井距优化技术	334
一、井距优化技术	334
二、井网几何形态	338
第三节 水平井优化设计	339
一、水平井地质目标优选	339
二、水平井主要参数优化设计	340
三、水平井提高单井控制储量和采收率机理分析	348
第四节 致密砂岩天然气藏开发技术的应用	349
一、在苏里格气田开发中的应用	349
二、在须家河组气藏和登娄库组气藏开发中的应用	350
参考文献	351