

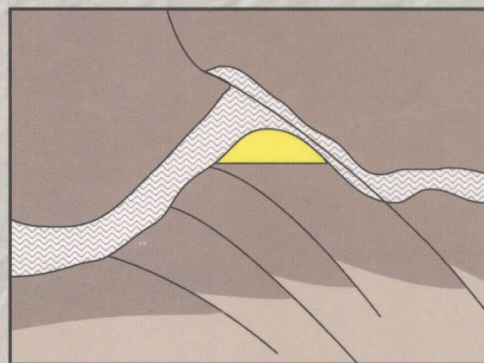


国家重点基础研究发展计划

天然气勘探开发基础研究丛书

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 等著



科学出版社
www.sciencep.com

天然气勘探开发基础研究丛书

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 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书为国家重点基础研究发展计划(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”项目(编号2001CB209100)研究成果,由三篇组成:第一篇,天然气高效成藏的地质理论与资源预测,重点论述在天然气成因、成藏与分布规律研究方面取得的新进展,是高效天然气藏形成地质理论的核心内容;第二篇,天然气藏有效识别的地震理论、技术与应用,系统论述了在天然气藏地震散射和子波衰减特征研究方面取得的主要成果,以小波衰减和叠前衰减新理论研发出的系列新技术及应用效果;第三篇,凝析、低效气藏经济开发的理论基础、技术与应用,重点论述了在低效气藏成因模式及“甜点”预测、气藏高效改造与保护以及凝析气藏的气-液-固三相相态理论方面取得的新进展。

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及管理人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

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,刘文汇等著. —北京:科学出版社,2008

(天然气勘探开发基础研究丛书)

ISBN 978-7-03-020822-4

I. 高… II. ①赵…②刘… III. ①油气藏-形成-研究②油气藏-分布-研究③油气藏-油田开发-研究 IV. P618.130.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第007197号

责任编辑:谢洪源 王日臣/责任校对:陈玉凤

责任印制:钱玉芬/封面设计:耕者设计工作室

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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008年1月第一版 开本:889×1194 1/16

2008年1月第一次印刷 印张:34

印数:1—1500 字数:900 000

定价:270.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

《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》主要编写单位和编写人员

主要编写单位： 中国石油勘探开发研究院
中国科学院兰州地质研究所
中国石油大学
中国科学院广州地球化学研究所
中国石油勘探开发研究院廊坊分院
大庆石油学院
中国地质大学
中国石油西南油气田分公司
中国石油塔里木油田分公司
中国石油长庆油田公司

主 编： 赵文智 刘文汇

主要编写人员： (按姓氏笔画排序)

丁云宏	于柄松	王一刚	王云鹏
王兆云	王红军	王尚旭	石玉梅
卢拥军	田昌柄	朱怡祥	朱维耀
刘文汇	刘合年	杨贤友	李生杰
李宏兵	李治平	李 剑	汪泽成
张水昌	陈孟晋	欧阳永林	罗 凯
郑希谭	郑建京	单文文	赵长毅
赵文智	胡永乐	胡国艺	柳广弟
钱 凯	郭燕华	曹 宏	熊春明

序 一

当前我国油气消费已经进入快速增长期，油气资源短缺已成为制约国民经济和社会发展的的重要因素，加强石油天然气勘探开发，保持原油产量持续稳定，加快天然气工业发展，对国家能源安全具有十分重要的战略意义。自 20 世纪 90 年代以来，随着我国天然气地质理论的建立和完善，以及克拉 2、苏里格、川东北等一批大气田的发现，实现了天然气探明储量和产量的快速增长，我国天然气工业也由此步入快速发展时期。

我国天然气资源主要分布于塔里木盆地、鄂尔多斯盆地、四川盆地、柴达木盆地、莺歌海—琼东南盆地和东海盆地等十大盆地，总资源量超过 $5.5 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。然而，目前整体探明程度只有不到 7%，远远低于世界平均探明程度 59.5%，地下仍然有大量天然气资源有待我们去发现。

地球物理技术在我国油气工业发展史上发挥了不可替代的关键作用，现有油气田的绝大多数都是用物探方法发现的。尤其是近年来高分辨率地震、山地地震、特殊资料处理和地震解释技术的进步，有效地推动了天然气资源的快速有效发现。以一批具有里程碑意义的复杂地质条件、特殊储层和低渗透大气田的发现为标志，我国的天然气地震勘探整体水平已经处于世界先进行列。天然气地震勘探对象也从 20 世纪 90 年代及以前的构造勘探为主，到近年来的构造、岩性勘探并举；地震技术也从构造成像为主，发展到现在的岩性识别和烃类检测居主导地位。

烃类检测历来都是地震勘探难度最大的研究领域之一。国外从 20 世纪 70 年代开始，陆续出现了亮点技术、AVO 技术、模式识别技术和弹性参数反演技术，经历了定性、半定量到定量的发展过程。90 年代以来，岩石物理成功推动了以 AVO 和弹性参数反演为代表的烃类检测技术及其向量化方向发展。客观地说，这一领域的研究目前仍然不够成熟，有很多基础理论问题和勘探技术难题有待我们去探索、去解决。今后较长一段时期内，烃类检测仍将是油气地震勘探的热点和难点。

由赵文智教授和刘文汇研究员为首席科学家的国家重点基础研究发展计划项目“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”组织了一批中青年专家，自 2001 年起历时五年，在天然气地震勘探理论和有效识别技术方面开展了大量卓有成效的研究，并取得了一批很有特色的理论和技术成果。

地震衰减在烃类检测领域一直被人们寄予厚望，大量实验成果也已证实含油气储层会产生较大的衰减，但地震衰减的机理和衰减量的估计一直没有取得突破，很大程度上限制了它在油气勘探中的应用。项目组从天然气藏地震波速度频散这一基本现象入手，指出由速度频散导致的反射系数随频率变化（反射系数频散）和子波能量衰减是除经典的吸收衰减外，引起气藏地震衰减的重要原因，并推导了不同入射角情形下的反射系数频散公式，将地震衰减理论成功拓展到叠前地震资料分析。通过将小波变换理论与地震衰减理论相结合，推导了小波尺度域的地震波能量衰减方程，将地震衰减研究从传统的时间-频率域拓展到时间-尺度域，成功实现了任意时窗的地震衰减量的有效估计，克服了传统时频分析方法的时窗限制和衰减量估计不准的缺陷。上述创新成果不但丰富和发展了地震衰减理论，而且也对天然气地震勘探具有重要应用价值。基于天然气藏地震衰减理论所研发的小波衰减和叠前衰减气藏识别新技术于 2005 年获得 World Oil 全球“最佳勘探技术奖”提名，标志着上述成果也得到国际学术界的认可，这也是

我国油气地球物理勘探界的最高荣誉之一。

在弹性波天然气地震勘探技术方面的成果也同样令人欣慰。基于各向异性介质地震波传播方程和非线性扰动理论,通过定义新的弹性张量和拉梅常数,推导了直接用波场表示的弹性参数反演公式,实现了炮集数据的弹性参数全波场反演。另外通过分离流体模量和岩石骨架模量,借助地震叠前加权反演方法,成功实现了流体模量反演。上述技术比目前常用的叠前弹性参数反演在流体成像效果和降低多解性上均有明显进步,也代表了今后叠前反演的发展趋势。

该研究成果的另一重要特色是理论基础研究、新技术研发与生产应用的紧密结合,这一方式加快了理论基础研究成果向工业化应用的转化进程,在发现天然气新储量、提高钻井成功率等方面取得了显著的应用效果。

项目组同志将他们的主要成果总结出版,一方面可以有更多机会与国内外同行分享这些成果,另一方面也可以吸引更多有兴趣的学者共同参与和延续主要科学问题的研究。

我很高兴向大家推荐这本专著,虽然书中所展示的理论和技术成果尚不能涵盖天然气地震勘探的所有方向,甚至还可能存在不完备的地方,但这并不影响其学术和应用价值。其中所展示的一些很有意义的研究方向、理论研究与生产应用研究相结合的思路和方法,相信会对今后的天然气地震勘探起到积极的推动作用。同时该成果的出版,也可以及时弥补我国在天然气地震检测领域至今没有专著的局面,书中的主要理论与方法对于油藏检测、裂缝预测等也有积极的借鉴意义。希望更多有志于油气地震勘探的科研人员能从中受益。

中国科学院院士



2007年8月1日

序 二

我国在天然气地质理论研究上取得多方面的重大进展,从而推动和促进了我国天然气工业的迅速发展,使中国天然气工业进入了黄金岁月。天然气产量从 1949 年的 $0.11 \times 10^8 \text{ m}^3$ 增至 2006 年的 $585.5 \times 10^8 \text{ m}^3$, 增长了 5323 倍,成为世界重要的产气国。其中几项突出成果对指导大气田的发现、增加天然气探明储量作用尤为突出。如煤成气理论的建立使天然气勘探理论从一元论发展为多元论,大大拓展了勘探领域,煤成气在探明储量中的比例从 1978 年的 9% 增至 2005 年的 70%。大气田发育在生气中心及其周缘、天然气晚期成藏等大天然气田形成与分布主控因素研究成果,有利地指导了我国大气田的发现。由于我国天然气地质条件复杂,成因与成藏类型多样,控制成藏的因素千差万别,为保证天然气工业在未来 20 年的快速大发展,仍需要在天然气成因、成藏、分布规律等地质基础研究方面持续不断的加强研究,以新的认识指导复杂地质条件下的天然气勘探,争取发现更多的大气田、建成更多的大气区。

以赵文智教授和刘文汇研究员为首席科学家的国家 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”项目自 2001 年正式启动,汇集了一支国内从事天然气地质基础研究的核心力量,经过五年的攻关,不仅在天然气成因、成藏方面提出了新的认识和一系列定量评价指标,而且紧密结合勘探实践,总结提出了我国高效天然气藏形成的基本条件,预测了高效天然气资源总量与分布,指出未来勘探高效大气田的方向和主要领域,是一项基础理论有创新,指导勘探见实效的优秀研究成果。

在气源灶评价方面,将生烃动力学引入气源灶评价,提出高效气源灶的新概念和熟化速率、主生气作用时间、主生气期生气速率等五项定量评价新指标,指出高效气源灶是一定规模的优质气源岩在热力或生物化学营力作用下,于较短时期内生成并排出大量天然气,从而在大、中型气藏形成中高效发挥作用的一类优质气源灶,是形成高效天然气资源的基础,推动了气源灶定量评价的发展。

在天然气的成因方面,提出有机质“接力”成气模式,指出在烃源岩演化的高一过成熟阶段,滞留于烃源岩内部的分散可溶有机质是重要的成气母质;探索了高阶成气的新来源;细化了 Tissot 模式在高一过成熟阶段成气物质来源,丰富和发展了天然气成因理论,回答了海相成因天然气藏晚期成藏的机理问题,已有效指导了塔里木盆地、四川盆地海相天然气勘探。

在天然气成藏机理研究方面,提出天然气高效成藏过程受成藏阶段较大的源储剩余压力差、较高的输导效率及良好的封闭三个关键因素控制,并建立了定量评价的标准;提出地质要素、作用过程以及能量场环境三要素耦合是控制天然气高效成藏的重要机制,从而推动了油气成藏地质理论的发展,为勘探领域的优选提供了依据。

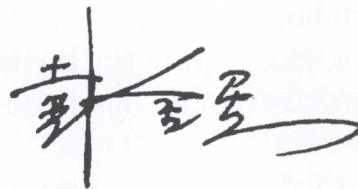
在高效天然气藏形成条件研究方面,提出中国叠合盆地深层在早成藏、晚埋藏、构造托举、溶蚀改造与火山作用等条件下可以形成优质储层;改变了传统石油地质中有效储层埋深下限在 3500m 左右的认识,成为指导塔里木盆地、四川盆地、松辽盆地深层油气勘探的重要地质依据之一。

以这些新的地质研究成果为基础,在常规天然气资源评价中,增加高效气源灶、过程有效性等定量评价参数及关键时刻三要素耦合程度的评价,实现了对全国高效天然气资源的评价和分布预测;指出我国高效天然气资源总量及主要分布的盆地、区带,在重点探区应用已获得良

好应用效果，对于加快天然气勘探有重要的现实意义。

赵文智教授等撰写的这部专著从我国天然气勘探面临的科学问题出发，以大量实验和地质解剖为基础，系统阐述了我国高效天然气藏形成与分布的地质理论，是一部创新性佳、学术价值高、实用性强的专著。该专著不仅有我国天然气地质基础理论研究方面的最新进展，而且对其继续发展有所启示，在我国天然气工业处于高潮时期，该书的问世是可喜可贺的。向广大读者推荐此专著，读后必将受益匪浅。

中国科学院院士

A stylized handwritten signature in black ink, likely belonging to Zhao Wenzhi, the Chinese Academy of Sciences Academician mentioned in the text.

2007年7月5日

序 三

近十多年来,面对我国快速增长的能源需求和日益迫切的环保形势,作为清洁能源的天然气工业在我国发展迅猛,2005年产量约500亿 m^3 ,年均增长超过10%,进入了世界产气大国行列。目前,以“西气东输”和“陕京输气”管线为主的全国天然气骨干管网已初步形成,国内2010年天然气产量预计将达900~1000亿 m^3 ,短短5年就将实现前50多年才达到的目标。

我国天然气工业经历50多年的生产实践,不断发展壮大。成功开发了四川盆地的碳酸盐岩气藏、鄂尔多斯盆地的低渗气田、塔里木盆地的异常高压气田和凝析气田等,积累了较为丰富的开发经验,形成了一系列有特色的气田开发技术,如气田早期评价技术、有水气藏开发技术、低渗透气藏提高单井产能技术、少井高产技术、循环注气提高凝析油采收率技术,以及气井管柱及设备防腐工艺技术、天然气净化处理技术、地面高压集输或混输技术和储气库技术等配套工艺技术。

国内天然气工业虽然取得了辉煌的成就,但也面临许多新的挑战。已探明天然气储量中低效储量约占70%,凝析气储量超过25%,目前这些低效和难开发储量比例还在不断增长。如何提高低效和凝析气藏的开发效益是国内天然气开发急需破解的重大难题,有许多基础理论与技术问题亟待解决。因此,2001年国家重点基础研究发展计划项目首席科学家赵文智教授和刘文汇研究员凝聚了一批国内中青年专家,将“高效天然气藏形成分布”与“凝析、低效气藏经济开发”同时列为研究重点,历经5年艰苦攻关,在低效气藏中相对高渗砂体形成的主控因素、分布模式及“甜点”预测技术,低效气藏高效保护与改造机理和技术,凝析气藏三相相态及渗流理论等方面取得了一批突出的理论和技术成果,并成功地应用于国内气田开发生产实践,取得明显效果。

低效气藏地质特征研究方面成果突出。中国低效气藏储层具有典型的煤系地层成岩作用特征,沉积类型主要为河流相分流河道相。发现煤系地层中次生溶蚀孔洞的发育程度是形成相对高产的主要因素,建立了测井次生溶蚀孔洞指数解释模型和岩石相测井解释模型。通过研究陆相低效气藏中相对高渗储层形成的主控因素,提出了可容纳空间的分布率是控制河道砂体物性和分布特征的主要因素的新理念,并建立了一套基于地质成因分析的地质、测井、地震等多种技术一体化的相对高渗砂体识别、预测和逆演技术流程。相对高渗砂体识别和预测技术、方法及流程已得到成功应用,对低效气藏的开发具有普遍意义。

针对低效气藏保护中储层敏感性损害评价方法存在的问题,建立了气藏敏感性损害实验评价新方法和定量预测模型,可以更加准确和快速地评价气层敏感性损害。针对低效气藏单井产量低、常规压裂改造伤害严重、需要高效改造的要求,在分析研究压裂改造伤害机理和高效改造基本原理的基础上,研发了清洁压裂液等系列低损害压裂液和高效酸压液体系,系统评价研究了其性能与高效改造机理,建立了清洁压裂液的流变动力学模型和本构方程,研究与优化了使用工艺,现场试验与应用效果显著,为气藏高效改造提供了技术手段。

针对深层高压凝析气藏相态和渗流机理复杂等理论问题,首次系统地研究了国内深层高温高压凝析气藏在原始状态、衰竭式开采和注气保压开采过程中气-液-固三相复杂相变规律,建立了凝析气藏(更加完善的)气-液-固三相相态理论。利用组分随压力变化的原理,定量分析了多孔介质对流体组成及露点压力的影响。采用高温高压微观可视模型系统地研究了凝析气藏

开采过程中的渗流机理，认识了气-液-固三相的变相态渗流形态和规律。这些研究成果已成功应用到牙哈凝析气田开发动态分析及生产管理。

在 5 年多的时间里，我见证了这支年轻的优秀科研团队的形成和成长，及其锲而不舍、锐意创新、踏实求是和重视基础研究与生产应用密切结合的精神，欣喜地见到他们取得了优秀的成果。当然，短短五年时间，不可能解决国内天然气开发面临的所有难题，有些理论和技术可能还不够完善，但这不会影响其较好的学术理论水平和生产应用价值。项目组的同志毫无保留地将最新成果总结出版，一方面是为了将这些新的思想、方法和技术与广大读者共享，另一方面也有利于激励更多的学者从事这方面的科学研究和技术开发，以进一步促进国内气田开发理论和技术的发展。为此，我非常乐意向同行们推荐此专著。

应当看到，伴随天然气工业的飞速发展，天然气开发将面临更多的难题、更大的挑战，科学研究和技术开发的任务还很艰巨，这是时代赋予我们的责任，也是一个难得的锤炼人生、回报社会、服务人民、献身祖国的机会。近年来新发现和投入开发的气藏类型越来越复杂，地层温度和压力越来越高，流体性质越来越特殊，储层渗透率越来越低，开发难度越来越大，例如四川盆地和鄂尔多斯的大面积低渗气田，塔里木盆地的超高压气田，松辽盆地、准噶尔盆地和吐哈盆地的火山岩气田，都面临许多新的难题，迫切需要新的理论、方法和技术。因此，我殷切希望有更多的中青年学者加入这个科学研究和技术开发的行列，共同解决天然气开发面临的重大难题，迎接我国天然气工业的大发展。

中国科学院院士



2007 年 8 月 3 日

前 言

加快天然气的勘探开发与有效利用,对缓解石油需求过快增长给国家能源安全造成的巨大压力,改善我们赖以生存的环境,实现国民经济在 21 世纪可持续发展有着重要意义。

我国天然气资源丰富,资源品位存在“贫”“富”差异。根据 2000 年底的统计,已探明天然气储量及待探明资源量中,近 30%属于高效,即天然气藏储量规模大 ($>100 \times 10^8 \text{ m}^3$)、丰度高 ($>3 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$)、千米井深日产量高 ($>5 \times 10^8 \text{ m}^3$),其余 70%属于低效天然气藏。满足国家对天然气的重大需求有两个有效途径:一是多找高效天然气藏,快速增加储量;二是对已经探明的低效天然气藏实现经济开发,变低效为高效,快速增加产量。2001 年 11 月,国家科技部下发“关于‘国家重点基础研究发展计划’2001 年度项目立项的通知”(国科发基字[2001]第 468 号),启动“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”项目。聘任中国石油勘探开发研究院赵文智教授与中国科学院兰州地质研究所刘文汇研究员为项目首席科学家,依托中国石油天然气集团公司与中国科学院两个部门,组织中国石油勘探开发研究院,中国科学院兰州地质研究所、广州地球化学研究所、地质与地球物理研究所及中国石油大学、中国地质大学、大庆石油学院、西南石油大学、北京大学、中国科学技术大学、中国石油塔里木油田分公司、西南油气田分公司、长庆油田公司、青海油气田分公司等 14 家单位共 130 余位研究人员开展为期五年的天然气基础应用研究。

在连续实施了二十年天然气科技攻关的基础上,国家首次将天然气勘探开发基础研究列入“国家重点基础研究发展计划”,充分体现出国民经济发展对天然气资源的重大需求,以及通过加强天然气基础理论研究以满足国家重大需求的迫切性。项目紧密围绕制约我国天然气工业快速发展的两大关键问题,即高效天然气资源总量的评价预测以及凝析、低效气藏的经济开采,重点研究四方面基础科学问题:①不同类型母质成气机理与有效性;②天然气成藏动力学机制与高效天然气藏形成机理;③天然气藏地球物理响应特征及有效识别技术的理论基础;④低效与凝析气藏最佳采气机理。通过基础理论的创新和实用新技术的研发,有效推动我国天然气的勘探开发的发展,并向国家提出加快天然气资源勘探与开发的建议,为制定天然气工业中长期发展规划提供决策依据。

五年当中,项目首席科学家带领项目组全体研究人员,以国家目标为己任,注重基础工作的扎实性、研究方法的先进性和成果的创新性,特别强调研究成果能够对解决国家重大需求做出实质性贡献和发挥重要作用。在高效天然气藏形成的地质理论、天然气藏地震衰减理论、凝析气藏气-液-固三相相态理论研究方面取得重要理论创新,研发出系列相关配套新技术,获得显著应用效果。圆满完成了计划任务,推动了我国天然气基础理论研究的进步,促进了天然气工业的发展。

1. 基础理论研究取得三项重要创新

(1) 初步建立了高效天然气藏形成与分布的地质理论

1) 将生烃动力学引入气源灶评价,提出高效气源灶的概念与定量评价新指标,更好地表征了气源灶生气行为对气藏的贡献;

2) 重点研究了滞留于烃源岩中分散可溶有机质在高—过成熟阶段的成气时机与潜力,提

出有机质“接力成气”模式,丰富和发展了天然气成因理论,拓展了高一过成熟烃源区天然气的勘探领域;

3) 提出了深层(埋深大于 3500m)优质储层保持的五种机理,为深层天然气勘探提供了理论依据;

4) 提出高效天然气藏成藏过程的主控因素,建立了天然气成藏过程有效性的评价方法,推动了成藏过程研究的发展;

5) 提出三要素耦合控藏机理,将能量场、地质要素、作用过程三者有机统一起来,为预测不同能量场环境下高效天然气资源形成潜力与分布奠定了基础;

6) 建立了高效天然气资源评价方法,评价并预测了我国高效天然气资源潜力与分布,为我国天然气勘探中长期部署和战略选区提供了重要决策依据。

(2) 初步建立了天然气藏地震衰减理论体系

1) 揭示了反射系数频散、吸收衰减和子波频散是天然气藏反射地震信号内在能量衰减的主要机理,构建了天然气藏地震衰减的理论基础;

2) 首次把小波理论引入到地震波衰减研究领域,推导了小波尺度域地震波能量衰减方程和地震波尺度图公式,提出了利用小波衰减属性识别气藏的方法,为天然气地震有效识别开辟了新的研究方向;

3) 建立了叠前衰减随入射角变化的分析方法,以平面波界面能量分配原理和速度频散理论为基础,推导了反射系数随频率和入射角变化公式,为叠前(即不同入射角)地震衰减分析提供了更可靠的理论基础。

(3) 初步建立了凝析气藏的气-液-固三相相态理论

1) 实验揭示深层凝析气藏流体相变过程中会有固相析出,存在气、气-液、气-固和气-液-固四个相变区域。固相析出时,即随温度升高,凝析气的气-固相变压力随之降低,而气-液-固三相相变压力却升高。将凝析气相态理论从目前的两相相变发展到三相相变。

2) 凝析气藏在注气开采过程中,随注气量增加,会在地层中析出固相,阻碍气体渗流,从而降低气井产能。在充分考虑地下流体性质,相渗速度,气-液-固三相相变以及非达西效应的基础上,建立了凝析气藏的气-液-固三相相态渗流数学模型,为凝析气高效开发提供了更加完善的理论基础。

2. 在四个方面研发出具有自主创新意义的 13 项新技术

1) 天然气藏地震有效识别技术系列,包括具有自主创新意义的 9 项天然气藏地震有效识别技术;

2) 低效气藏“甜点”预测技术;

3) 天然气藏高效改造与保护技术,包括高效改造液所需的 VES(黏弹性表面活性剂)等 4 种新型添加剂、具自主知识产权的低矿化度 VES 清洁压裂液等系列新产品以及 TCA 温控变黏酸液体系及配套技术;

4) 凝析气藏高效经济开采技术,包括提供控制液-固相析出的最佳参数、凝析气气井产能评价技术和凝析气藏动态预测技术。

3. 新理论与新技术在五方面为解决国家重大需求做出实质性贡献

1) 高效天然气资源分布预测,为国家制定天然气工业中长期发展计划提供了决策依据。评价指出我国陆上与近海盆地高效天然气地质资源量为 $13 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 剩余高效天然气资源量

主要分布在三大领域（中西部前陆盆地冲断带、近海-东部裂谷盆地、克拉通盆地古隆起及边缘）。

2) 在促进天然气储量增长方面，五年提供高效天然气藏钻探目标 7 个，6 个被采纳实施，2 口井获重大突破。为增加 $1760 \times 10^8 \text{m}^3$ 的天然气储量做出重要贡献，占中国石油天然气集团公司五年探明天然气储量 ($12\,249 \times 10^8 \text{m}^3$) 的 14%。

3) 推动苏里格大气田低效储量动用。针对苏里格大气田储量动用难的问题，应用“甜点”分布预测技术及地震叠前信息直接检测气层技术指导高产井部署，成功率达 86.7%，为苏里格气田产能建设发挥了指导和推动作用。

4) 天然气藏高效改造与保护方法及系列新产品，应用到柴达木、塔里木等油气田，提高气井产能 1~2 倍。

5) 实现牙哈凝析气田高效经济开发。应用凝析气藏气-液-固三相相变理论及产能动态评价及预测技术，成功地解决了牙哈凝析气藏在高压 (50MPa) 注气过程中面临流体的相态变化、大量蜡在井筒中析出将降低气体流动截面积和空间、甚至堵塞井筒影响气井正常生产等难题，为牙哈凝析气田开发调整措施的实施提供了科学的依据。可增加凝析油产量 325 万 t，提高凝析油采收率 25%。自 2004 年 1 月至 2005 年 12 月，累计新增产值 1.63 亿元。

五年共发表论文 378 篇，其中 SCI 收录 46 篇。参加国际会议做学术报告 36 篇，国内会议做特邀学术报告 40 篇。出版专著 13 部，申请专利 4 项。

本书全面介绍了该 973 项目的研究成果，分三篇组织编写：

第一篇，天然气高效成藏的地质理论与资源预测。重点论述在天然气成因、成藏与分布规律研究方面取得的新进展，是高效天然气藏形成与分布理论的核心内容。主要编写人：赵文智、刘文汇、王红军、赵长毅、柳广弟、汪泽成、王兆云、张水昌、王云鹏、李剑、郑建京、陈孟晋、胡国艺、钱凯、王一刚、于柄松。

第二篇，天然气藏有效识别的地震理论、技术与应用。系统论述了在天然气藏地震散射和子波衰减特征研究方面取得的主要成果，以小波衰减和叠前衰减新理论研发出的系列新技术及应用效果。主要编写人：曹宏、李宏兵、王尚旭、石玉梅、李生杰、欧阳永林。

第三篇，凝析、低效气藏经济开发的理论基础、技术与应用。重点论述了在低效气藏成因模式及“甜点”预测、气藏高效改造与保护以及凝析气藏的气-液-固三相相态理论方面取得的新进展。主要编写人：胡永乐、熊春明、田昌柄、罗凯、杨贤友、朱怡祥、刘合年、郭燕华、卢拥军、丁云宏、单文文、朱维耀、李治平、郑希谭。

感谢国家科技部对项目的重视、指导和支持；感谢中国石油天然气集团公司、中国石油天然气股份有限公司各级领导及管理部门在配套研究经费、组织协调、对外宣传等方面给予的大力支持和帮助；感谢各承担单位为项目顺利实施所提供的基础设施及保障条件；感谢项目专家组各位专家的辛勤指导与帮助；感谢中国石油塔里木油田、长庆油田、西南油气田、青海油田为项目研究提供的各项支撑条件；感谢全体研究人员的共同努力，圆满完成了研究任务。

目 录

序一
序二
序三
前言

第一篇 天然气高效成藏的地质理论与资源预测

第一章 天然气地质理论研究现状及发展趋势	3
第一节 20 年天然气科技攻关取得的主要成果	3
一、天然气成因理论	3
二、天然气成藏理论	4
三、天然气分布规律	6
第二节 天然气工业的快速发展对地质理论研究的需求	8
一、国家需求	8
二、高效天然气藏形成与分布研究的主要内容	8
第二章 天然气生成的物质基础与成气机理	10
第一节 中国主要成气母质类型与分布特征	10
一、不同类型成气母质的组成特征	10
二、不同类型成气母质的分布特征与资源潜力	17
第二节 不同母质成气机理	18
一、生物气形成机理	18
二、煤系有机质成气机理	21
三、海相源岩、原油与分散可溶有机质的生气机理	23
四、有机酸岩生气机理	27
第三章 高一过成熟阶段有机质成气模式与潜力评价	32
第一节 高一过成熟烃源岩成气潜力评价现状	32
一、高一过成熟区烃源岩分布及天然气勘探现状	32
二、影响高一过成熟烃源岩生烃潜力评价的主要问题	32
第二节 高一过成熟阶段有机质成气模式	35
一、高一过成熟干酪根的生气潜力分析	35
二、干酪根降解气和油裂解气的成气时机和数量对比	38
第三节 地层中液态烃赋存状态及滞留数量	44
一、影响烃源岩排烃效率的主要地质因素	44
二、烃源岩的排烃实验	45
三、源岩中分散可溶有机质的数量	45
第四节 分散可溶有机质作为有效气源岩的丰度标准	46
一、分散可溶有机质成气热模拟实验	46

二、实际地层中分散可溶有机质的丰度	48
第五节 分散可溶有机质裂解气的地球化学鉴别指标	48
一、分散可溶有机质裂解成气过程的催化模拟实验	48
二、天然气成因类型判识的轻烃新指标	49
第六节 高一过成熟阶段有机质成气模式的理论意义及在勘探中应用	50
一、理论的现实意义	50
二、有机质接力成气在勘探中的作用	52
第四章 高效气源灶的内涵与定量评价	53
第一节 高效气源灶的概念与作用	53
一、气源灶对天然气成藏与富集效率的影响	53
二、源岩不同热力学条件下的生气行为	54
三、高效气源灶的概念及内涵	55
第二节 高效气源灶定量评价新指标	58
一、气源灶的表征参数	58
二、高效气源灶的类型与分布	60
第三节 气源灶有效性评价方法	63
一、高效气源灶评价方法	63
二、气源灶对气藏贡献的定量评价	63
第四节 典型高效气源灶形成与评价	69
一、库车拗陷煤系高效气源灶	69
二、川东北原油裂解型高效气源灶	74
三、塔里木盆地古生界分散可溶有机质裂解型高效气源灶	78
四、柴达木盆地第四系生物型高效气源灶	83
第五章 天然气成烃、成藏三元地球化学示踪体系	89
第一节 三元示踪指标体系的建立及基本理论	89
一、天然气形成、成藏三元地球化学示踪体系的建立,为天然气成藏过程示踪和高效气藏的分 布预测提供方法基础	89
二、成藏过程的地球化学示踪的基本理论	93
三、叠合盆地高演化阶段新的气源——分散可溶有机质	96
四、生烃与碳同位素分馏动力学实验方法和数理模型	97
五、混源成藏作用的定量评价——天然气动态混合模型	101
六、天然气轻烃的分馏基本理论的完善和实验地质学证实	104
七、生物气直接气源岩的地球化学示踪	106
第二节 新技术、新方法与新指标支撑三元地球化学示踪体系的完善和建立	108
一、天然气轻烃形成分布实验地质学研究极大地丰富了示踪体系的可靠程度	108
二、稀有气体 ³⁸ Ar 同位素组成的测定和理论分析,提供了天然气运聚方式的新指标	110
三、氢同位素组成实验方法和成烃过程氢同位素分馏模拟	111
第三节 三元示踪指标体系在典型气藏中应用研究	113
一、库车拗陷	113
二、和田河气田示踪解剖	114
三、中部气田	117

四、川东气田示踪解剖·····	120
第六章 天然气成藏过程及其有效性评价 ·····	125
第一节 天然气高效成藏的动力学 ·····	125
一、天然气高效成藏的动力学机制·····	126
二、天然气高效输导体系的内部结构及输导机理·····	129
三、源储盖能量配置对天然气成藏过程的影响·····	134
第二节 高效成藏过程的类型和主控因素 ·····	136
一、天然气高效成藏过程的基本类型·····	136
二、藏灶分离型成藏过程·····	137
三、古油藏裂解型成藏过程·····	145
四、生物气高效成藏过程·····	150
第三节 库车拗陷天然气成藏过程定量评价 ·····	152
一、天然气成藏过程有效性评价的指标体系·····	153
二、库车拗陷不同时期源储剩余压力差评价·····	154
三、断裂输导通道的输导效率评价·····	156
四、盖层封闭能力的评价·····	158
五、成藏过程有效性综合评价与高效成藏区预测·····	158
六、高效成藏过程发育区·····	159
七、中效成藏过程发育区·····	160
第七章 高效天然气藏形成条件与分布 ·····	161
第一节 高效天然气藏的基本地质特征 ·····	161
一、高效天然气藏定义·····	161
二、已发现高效天然气藏的分布·····	163
三、高效天然气藏的基本特征·····	164
第二节 深层优质储层形成机理·····	166
一、早成藏作用·····	166
二、晚埋藏作用·····	168
三、构造托举与膏盐悬浮·····	169
四、构造裂缝与淋滤溶蚀作用·····	170
五、火山岩孔隙的抗压实作用·····	171
第三节 成藏三要素耦合控藏与典型天然气藏解剖 ·····	172
一、三要素内涵及其耦合作用·····	172
二、库车拗陷克拉 2 高效天然气藏形成机理·····	173
三、四川盆地川东北地区飞仙关组鲕滩高效天然气藏形成机理·····	175
四、塔里木盆地地下古生界高效天然气藏形成机理·····	178
五、柴达木盆地第四系高效天然气藏形成机理·····	180
六、鄂尔多斯盆地苏里格低效天然气藏形成机理·····	180
第八章 高效天然气资源分布预测 ·····	182
第一节 高效天然气资源评价方法 ·····	182
一、常规天然气资源评价方法简介·····	182
二、高效天然气资源评价方法与流程·····	183

三、高效天然气资源评价的关键参数·····	186
第二节 高效天然气资源分布·····	187
一、高效天然气资源分布特点·····	187
二、高效天然气资源潜力分析·····	188
 第二篇 天然气藏有效识别的地震理论、技术与应用	
第九章 天然气藏地球物理勘探研究现状与难点·····	191
第一节 国内外研究现状·····	191
一、当前天然气地球物理勘探的主要理论·····	191
二、目前应用的关键技术、发展现状及效果评述·····	192
第二节 我国天然气藏地震勘探的主要特点与研究难点·····	195
一、我国天然气工业发展对地球物理技术的需求·····	195
二、我国天然气地震勘探的特点和难点·····	196
第三节 研究方向与技术路线·····	197
一、物理模拟技术·····	198
二、叠前地震反演预测技术·····	198
三、地震属性表征技术·····	198
第十章 天然气藏的地球物理理论基础研究·····	200
第一节 含气地层岩石物理特征·····	200
一、天然气与地层水弹性性质·····	200
二、含气地层弹性性质与岩石骨架、孔隙及其流体性质关系·····	203
三、含气地层黏弹特征·····	207
第二节 含气地层模型正演研究·····	212
一、物理模型模拟研究·····	212
二、数学模型模拟研究·····	222
第十一章 天然气藏地震衰减理论进展·····	227
第一节 地震衰减机理·····	227
一、反射系数频散机理·····	227
二、子波频散机理·····	237
三、吸收衰减机理·····	240
第二节 衰减理论·····	243
一、小波尺度域地震波衰减分析·····	243
二、天然气藏叠前地震衰减理论·····	253
第十二章 天然气藏地震有效识别新技术·····	258
第一节 基于天然气地震衰减理论的气层有效识别新技术·····	258
一、基于小波衰减理论的小波尺度能量、中心尺度技术·····	258
二、反射系数频散气层检测技术·····	263
三、振幅谱随入射角变化技术(SVA)·····	266
四、中心尺度随入射角变化技术·····	271
五、中心频率随入射角变化技术·····	275
第二节 基于弹性介质理论的气层有效识别新技术·····	279