

“十二五”国家重点图书出版规划项目



中国石油大学(北京)
学术专著系列

中国叠合盆地油气成藏研究丛书

A Series of
Study on Hydrocarbon Accumulation
in Chinese Superimposed Basins



国家重点基础研究发展计划

丛书主编 / 庞雄奇

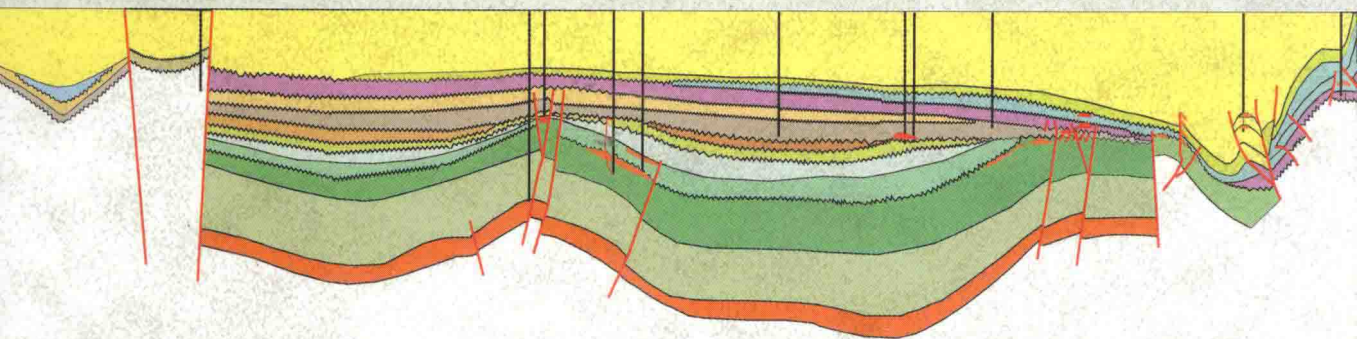
中国叠合盆地油气来源与形成演化


——以塔里木盆地为例

Origin and Evolution of Hydrocarbons in Typical Superimposed Basins of China

——A Case Study of Tarim Basin

李素梅 庞雄奇 杨海军 张宝收 著



 科学出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目
中国石油大学（北京）学术专著系列



中国叠合盆地油气成藏研究丛书

A Series of
Study on Hydrocarbon Accumulation
in Chinese Superimposed Basins

丛书主编 / 庞雄奇

中国叠合盆地油气来源与形成演化

——以塔里木盆地为例

Origin and Evolution of Hydrocarbons in Typical Superimposed Basins of China
—A Case Study of Tarim Basin

李素梅 庞雄奇 杨海军 张宝收 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书以中国西部典型叠合盆地——塔里木盆地为主要研究区，分析该盆地油气的地质地球化学特征，解剖油气的来源及其相对贡献，探讨油气的运移与富集模式，研究油气的改造及成藏效应，涵盖塔里木盆地海相油气的生成、运移、聚集、后期改造与演化，深部油气成藏效应等多方面内容，集最新的国内外分析测试技术、最新的油气成因与成藏研究理念，以及最近的油气勘探实践成果于一体。这是一部奉献给从事塔里木等叠合盆地油气形成与演化研究的地质地球化学工作者的专著，也可作为油气勘探、开发专业及大专院校相关专业师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

中国叠合盆地油气来源与形成演化：以塔里木盆地为例 = Origin and Evolution of Hydrocarbons in Typical Superimposed Basins of China: A Case Study of Tarim Basin/李素梅等著. —北京：科学出版社，2014

(中国叠合盆地油气成藏研究丛书)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-03-039361-6

I. ①中… II. ①李… III. ①塔里木盆地-含油气盆地-油气藏-形成
IV. ①P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 307222 号

责任编辑：吴凡洁 杨若昕/责任校对：刘小梅

责任印制：阎磊/封面设计：王浩

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>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年6月第 一 版 开本：787×1092 1/16

2014年6月第一次印刷 印张：18 1/2

字数：409 000

定价：130.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换)

《中国叠合盆地油气成藏研究丛书》 学术指导委员会

名誉主任：邱中建 刘光鼎 王 涛

主任：贾承造 王铁冠 张一伟

委员：(以下按姓氏拼音排序)

贝 丰	柴育成	陈新发	常 旭	陈 伟	戴金星	方朝亮	冯志强
傅承德	高瑞祺	龚再升	关德范	郝 芳	胡见义	金之钧	康玉柱
李 阳	刘池阳	刘可禹	黎茂稳	李思田	罗治斌	马永生	马宗晋
毛宗强	彭平安	彭苏萍	宋 岩	孙龙德	汪集旻	王清晨	袁士义
张大伟	张国伟	赵文智	朱日祥	朱伟林			

《中国叠合盆地油气成藏研究丛书》 编委会

主 编：庞雄奇

编 委：(以下按姓氏拼音排序)

鲍志东	蔡春芳	陈践发	陈建平	陈建强	董月霞	符力耘	何登发
黄捍东	黄志龙	纪友亮	贾希玉	姜振学	金振奎	康永尚	况 军
匡立春	雷德文	李丕龙	李启明	李素梅	李 勇	李 忠	林畅松
卢双舫	罗 平	罗晓容	漆家福	邱楠生	寿建峰	史基安	孙永革
孙赞东	王绪龙	王招明	夏庆龙	肖立志	肖中尧	谢会文	谢文彦
杨长春	杨海军	杨文静	于炳松	曾澹辉	张宝民	张年富	张善文
张水昌	张枝焕	赵俊猛	钟大康	钟宁宁	周世新	周新源	朱筱敏

丛书序一

油气藏是油气地质研究的对象，也是油气勘探寻找的最终目标。开展油气成藏研究对于认识油气分布规律和提高油气探明率，揭示油气富集机制和提高油气采收率，都具有十分重要的理论意义和现实价值。《中国叠合盆地油气成藏研究丛书》是“九五”以来在国家 973 项目、中国三大石油公司研究项目及其相关油田研究项目等的联合资助下，经过近 20 年的努力取得的重大科技成果。


《中国叠合盆地油气成藏研究丛书》阐述了我国叠合盆地油气成藏研究领域的重要进展，其中包括：叠合盆地构造特征及其形成演化、地层分布发育与储层形成演化、古隆起变迁与隐蔽圈闭分布研究、油气生成及其演化、油气藏形成演化与分布预测、油气藏调整改造与剩余资源潜力、油气藏地球物理检测与含油气性评价、油气藏分布规律与勘探实践等。这些成果既涉及叠合盆地中浅部油气成藏，也涉及深部油气成藏，既涉及常规油气藏形成演化，也涉及非常规油气藏分布预测，它是由教育系统、科研院所、油田公司等相关单位近百位中青年学者和研究生联合完成的。研究过程得到了相关领导的大力支持和老一代专家学者的悉心指导，体现了产、学、研结合和老、中、青三代人的联合奋斗。

《中国叠合盆地油气成藏研究丛书》中一个具有代表性的成果是建立了油气门限控藏理论模型，突出了勘探关键问题，抓住了成藏主要矛盾，实现了油气分布定量预测。油气门限控藏研究，提出用运聚门限判别有效资源领域和测算资源量，避免了人为主观因素对资源量评价结果的影响，使半个多世纪以来国内外学者（如苏联学者维索茨基等）追求的用物质平衡原理评价资源量的科学思想得以实现；提出用分布门限定量评价有利成藏区带，用多要素控藏组合模拟油气成藏替代单要素分析油气成藏，用定量方法确定成藏“边界+范围+概率”替代用传统定性方法“分析成藏条件、研究成藏可能性、讨论成藏范围”；提出依富集门限定量评价有利目标含油气性，实现有利目标钻前地质评价，定量回答圈闭中是否有油气以及油气多少等方面的问题，降低了决策风险，提高了成果质量，填补了国内外空白。

“十五”以来，中国三大石油公司应用油气门限控藏理论模型在国内外 20 多个盆地和地区应用，为这一期间我国油气储量快速增长提供了理论和技术支撑。仅在渤海海域盆地、辽河西部凹陷、济阳拗陷、柴达木盆地、南堡凹陷五个重点测试区系统应用，即预测出 26 个潜在资源领域、300 多个成藏区带、500 多个有利目标，指导油田公司共计部署探井 776 口，发现三级储量 46.8 亿 t 油当量，取得了巨大的经济效益。教育部相关机构在 2010 年 8 月 28 日，组织了相关领域的院士和知名专家对相关理论成果进行了评审鉴定。大家一致认为，油气门限控藏研究创造性地从油气成藏临界地质条件控油气

作用出发，揭示和阐明了油气藏形成和富集规律，为复杂地质条件下的油气勘探提供了新的理论、方法和技术。

作为“中国叠合盆地油气成藏研究”的倡导者、见证者和某种意义上的参与者，我十分高兴地看到以庞雄奇教授为首席科学家的团队在近 20 多年来的快速成长和取得的一项又一项的创新成果。我们有充分的理由相信，随着 973 项目的研究深入和该套丛书的相继出版，“中国叠合盆地油气成藏研究”系列成果将为我国，乃至世界油气勘探事业的发展做出更大贡献。



中国科学院院士

2013 年 8 月 18 日

丛书序二

《中国叠合盆地油气成藏研究丛书》集中展示了中国学者近 20 年来在国家三轮 973 项目连续资助下取得的创新成果，这些成果完善和发展了中国叠合盆地油气地质与勘探理论，为复杂地质条件下的油气勘探提供了新的理论指导和方法技术支撑。相信出版这些成果将有力地推动我国叠合盆地的油气勘探。

“油气门限控藏”是“中国叠合盆地油气成藏研究”系列创新成果中的核心内容，它从油气运聚、分布和富集的临界地质条件出发，揭示和阐明了油气藏分布规律。在这一学术思想引导下，获得了一系列相关的创新成果，突出表现在以下四个方面。

一是提出了油气运聚门限联合控藏模式，建立了油气生排聚散平衡模型，研发了资源评价与预测新方法和新技术。基于大量的样品测试和物理模拟、数值模拟实验研究，发现油气在成藏过程中存在排运、聚集和工业规模三个临界地质条件，研究揭示了每一个油气门限及其联合控油气作用机制与损耗烃量变化特征；提出了三个油气门限的判别标准和四类损耗烃量计算模型，创建了新的油气生排聚散平衡模型和油气运聚地质门限控藏模式，已在全国新一轮油气资源评价中发挥了重要作用。

二是提出了油气分布门限组合控藏模式，研发了有利成藏区预测与评价新方法和新技术。基于两千多个油气藏剖析和上万个油气藏资料统计，研究发现油气分布的边界、范围和概率受六个既能客观描述又能定量表征的功能要素控制；揭示了每一功能要素的控藏临界条件与变化特征；阐明了源、储、盖、势四大类控藏临界条件的时空组合决定着油气藏分布的边界、范围和概率；建立了不同类型油气藏要素组合控藏模式并研发了应用技术，实现了成藏过程研究与评价的模式化和定量化，提高了成藏目标预测的科学性和可靠性。

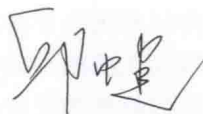
三是提出了油气富集临界条件复合控藏模式，研发了有利目标含油气性评价技术。基于上万个油气藏含油气性资料的统计分析和近千次物理模拟和数值模拟实验研究，发现近源-优相-低势复合区控制着圈闭内储层的含油气性。圈闭内外界面能势差越大，圈闭内储层的含油气性越好。研究成果揭示了储层内外界面势差控油气富集的临界条件与变化特征；阐明了圈闭内部储层含油气性随内外界面势差增大而增加的基本规律；建立了相-势-源复合指数（FPSI）与储层含油气性定量关系模式并研发了应用技术，实现了钻前目标含油气性地质预测与定量评价，降低了勘探风险。

四是提出了构造过程叠加与油气藏调整改造模式，研发了多期构造变动下油气藏破坏烃量评价方法和技术。研究成果阐明了构造变动对油气藏形成和分布的破坏作用；揭示了构造变动破坏和改造油气藏的机制，其中包括位置迁移、规模改造、组分分异、相态转换、生物降解和高温裂解；建立了构造变动破坏烃量与构造变动强度、次数、顺序

及盖层封油气性等四大主控因素之间的定量关系模型，应用相关技术能够评价叠合盆地每一次构造变动的相对破坏烃量和绝对破坏烃量，为有利成藏区域内当今最有利勘探区带的预测与资源潜力评价提供了科学的地质依据。

油气门限控藏理论成果已通过产、学、研相结合等多种形式与油田公司合作在辽河西部凹陷、渤海海域盆地、济阳拗陷、南堡凹陷、柴达木盆地五个测试区进行了全面系统的应用。“十五”以来，中国三大石油公司将新成果推广应用于 20 个盆地和地区，为大量工业性油气发现提供了理论和技术支撑。

作为中国油气工业战线的一位老兵和油气地质与勘探领域的科技工作者，我有幸担任了“中国叠合盆地油气成藏研究”的 973 项目专家组组长的工作，见证了年轻一代科技工作者好学求进、不畏艰难、勇攀高峰的科学精神，看到一代又一代的年轻学者在我们共同的事业中快速成长起来，心中感受到的不仅是欣慰，更有自豪和光荣。鉴于“中国叠合盆地油气成藏研究”取得的重要进展和在油气勘探过程中取得的重大效益，我十分高兴向同行学者推荐这方面成果并期盼该套丛书中的成果能在我国乃至世界叠合盆地的油气勘探中发挥出越来越大的作用。



中国工程院院士

2013 年 2 月 28 日

丛书序三

中国含油气盆地的最大特征是在不同地区叠加和复合了不同时期形成的不同类型的含油气盆地，它们被称为叠合盆地。叠合盆地内部出现多个不整合面、存在多套生储盖组合、发生多旋回成藏作用、经历多期调整改造。四多的地质特征决定了中国叠合盆地油气成藏与分布的复杂性。目前，在中国叠合盆地，尤其是西部复杂叠合盆地发现的油气藏普遍表现出位置迁移、组分变异、规模改造、相态转换、生物降解和高温裂解等现象，油气勘探十分困难。应用国内外已有的成藏理论指导油气勘探遇到了前所未有的挑战，其中包括：烃源灶内有时找不到大量的油气聚集，构造高部位有时出现更多的失利井，预测的最有利目标有时发现有大量干沥青，斜坡带传导层内有时能够富集大量油气……所有这些说明，开展“中国叠合盆地油气成藏研究”对于解决油气勘探问题并提高勘探成效具有十分重要的理论意义和现实价值。

经过近二十年的努力探索，尤其是在国家几轮 973 项目的连续资助下，中国学者在叠合盆地油气成藏研究领域取得了重要进展。为了解决中国叠合盆地油气勘探困难，科技部自一开始就在资源和能源两个领域设立了 973 项目，《中国叠合盆地油气成藏研究丛书》就是这方面多个 973 项目创新成果的集中展示。在这一系列成果中，不仅有对叠合盆地形成机制和演化历史的剖析，也有对叠合盆地油气成藏条件的分析和评价，还有对叠合盆地油气成藏特征、成藏机制和成藏规律的揭示和总结，更有对叠合盆地油气分布预测方法和技术的研发以及应用成效的介绍。《油气运聚门限与资源潜力评价》《油气分布门限与成藏区带预测》《油气富集门限与勘探目标优选》和《油气藏调整改造与构造破坏烃量模拟》都是丛书中的代表性专著。出版这些创新成果对于推动我国，乃至世界叠合盆地的油气勘探都具有十分重要的理论意义和现实意义。

“中国叠合盆地油气成藏研究”系列成果的出版标志着我国因“文化大革命”造成的人才断层的完全弥合。这项成果主要是我国招生制度改革后培养出来的年轻一代学者负责承担项目并努力奋斗取得的，它们的出版标志着“文化大革命”后新一代科学家已全面成长起来并在我国科技战线中发挥着关键作用，也从另一侧面反映了我国招生制度改革的成功和油气地质与勘探事业后继有人，是较之科研成果自身更让我们感到欣慰和振奋的成果。

“中国叠合盆地油气成藏研究”系列成果的出版标志着叠合盆地油气成藏理论研究取得重要进展。这项成果是针对国内外已有理论在指导我国叠合盆地油气勘探过程中遇到挑战后展开探索研究取得的，它们既有对经典理论的完善和发展，也有对复杂地质条件下油气成藏理论的新探索和油气勘探技术的新研发。“油气门限控藏”理论模式的提出以及“油气藏调整改造与构造变动破坏烃量评价技术”的研发都是这方面的代表性成果，它们

有力地推动了叠合盆地油气勘探事业的向前发展。

“中国叠合盆地油气成藏研究”系列成果的出版标志着我国叠合盆地油气勘探事业取得重大成效。它是针对我国叠合盆地油气勘探遇到的生产实际问题展开研究所取得的创新成果，对于指导我国叠合盆地，尤其是西部复杂叠合盆地的油气深化勘探具有重大的现实意义。近十年来中国西部叠合盆地油气勘探的不断突破和储产量快速增长，真实地反映了相关理论和技术在油气勘探实践中的指导作用。

“中国叠合盆地油气成藏研究”系列成果的出版标志着能源领域国家重点基础研究(973)项目的成功实践。这项成果是在获得国家连续三届973项目资助下取得的，其中包括“中国典型叠合盆地油气形成富集与分布预测(G1999043300)”“中国西部典型叠合盆地油气成藏机制与分布规律(2006CB202300)”“中国西部叠合盆地深部油气复合成藏机制与富集规律(2011CB201100)”。这些项目与成果集中体现了科学研究的国家目标和技术目标的统一，反映了973项目的成功实践和取得的丰硕成果。

“中国叠合盆地油气成藏研究”系列成果的出版将进一步凝聚力量并持续推动中国叠合盆地油气勘探事业向前发展。这一系列成果是在我国油气地质与勘探领域老一代科学家的关怀和指导下，中国年轻一代的科学家带领硕士生、博士生、博士后和年轻科技工作者努力奋斗取得的，它凝聚了老、中、青三代人的心血和智慧。《中国叠合盆地油气成藏研究丛书》的出版既集中展示了中国叠合盆地油气成藏研究的最新成果，也反映了老、中、青三代科研人的团结奋斗和共同期待，必将引导和鼓励越来越多年轻学者加入到叠合盆地油气成藏深化研究和油气勘探持续发展的事业中来。

中国叠合盆地剩余资源潜力十分巨大，近十年来中国西部叠合盆地油气储量和产量的快速增长证明了这一点。随着油气勘探的深入和大规模非常规油气资源的发现，叠合盆地深部油气成藏研究和非常规油气藏研究正在吸引着越来越多学者的关注。我们期盼，《中国叠合盆地油气成藏研究丛书》的出版不仅能够引导中国叠合盆地常规油气资源的勘探和开发，也能为推动中国，乃至世界叠合盆地深部油气资源和非常规油气资源的勘探和开发做出积极贡献。

中国科学院院士

2013年2月28日

丛书前言

中国油气地质的显著特点是广泛发育叠合盆地。叠合盆地发生过多期构造变动，发育了多套生储盖组合，出现过多旋回的油气成藏和多期次的调整改造，目前显现出“位置迁移、组分变异、多源混合、规模改造、相态转换”等复杂地质特征，已有勘探理论和技术在实用中遇到了前所未有的挑战。中国含油气盆地具有从东到西，由单型盆地向简单叠合盆地再向复杂叠合盆地过渡的特点，相比之下西部复杂叠合盆地的油气勘探难度更大。揭示中国叠合盆地油气成藏机制和分布规律，是 20 世纪末中国油气勘探实施稳定东部、发展西部战略过程中面临的最为迫切的科研任务。

《中国叠合盆地油气成藏研究丛书》汇集了我国油气地质与勘探工作者在油气成藏研究的相关领域取得的创新成果，它们主要涉及“中国西部典型叠合盆地油气成藏机制与分布规律（2006CB202300）”和“中国西部叠合盆地深部油气复合成藏机制与富集规律（2011CB201100）”两个国家重点基础研究发展计划（973）项目。在这之前，金之钧教授和王清晨研究员已带领我们及相关的研究团队完成了中国叠合盆地第一个 973 项目“中国典型叠合盆地油气形成富集与分布预测（G1999043300）”。这一期间积累的资料、获得的成果和发现的问题，为后期两个 973 项目的展开奠定了基础、确立了方向、开辟了道路，后两个 973 项目可以说是前期 973 项目研究工作的持续和深化。

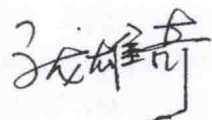
“中国叠合盆地油气成藏研究”能够持续展开，得益于科学技术部重点基础研究计划项目的资助，更得力于老一代科学家的悉心指导和大力帮助。许多前辈导师作为科学技术部跟踪专家和项目组聘请专家长期参与和指导了项目工作，为中国叠合盆地油气成藏研究奉献了智慧、热情和心血。中国石油大学张一伟教授，就是众多导师中持续关心我们、指导我们、帮助我们和鼓励我们的一位突出代表。他既将 973 项目看作年轻专家学者攀登科学高峰的战场，也将它当作培养高层次研究人才的平台，还将它视为发展新型交叉学科的沃土。他不仅指导我们凝炼科学问题，还亲自带领我们研发物理模拟实验装置，甚至亲自开展科学实验。在他最后即将离开人世的时候还在念念不忘我们承担的项目和正在培养的研究生。老一代科学家的关心指导、各领域专家的大力帮助以及社会的殷切期盼是我们团队努力做好项目的强大动力。

“中国叠合盆地油气成藏研究”能够顺利进行，得力于相关部门，尤其是依托单位的强力组织和研究基地的大力帮助。中国石油天然气集团公司，既组织我们申报立项、答辩验收，还协助我们组织课题和给予配套经费支持；中石油塔里木油田公司和中石油新疆油田公司组织专门的队伍参与项目研究，协助各课题研究人员到现场收集资料，每年派专家向全体研究人员报告生产进展和问题，轮流主持学术成果交流会，积极组织力量将创新成果用于油气勘探实践。依托单位的帮助和研究基地人员的参与，一方面保障

了项目研究的顺利进行、加快了项目研究进程，另一方面缩短了创新成果用于勘探生产实践的测试时间，促进了科技成果向生产力转化。在相关部门的支持和帮助下，本项目成果已通过多种方法和途径被推广应用国内外二十多个盆地和地区，并取得重大勘探成效。

“中国叠合盆地油气成藏研究”能够获得创新成果，得益于产、学、研结合和老、中、青三代人的联合奋斗。近二十年来，我们以 973 项目为纽带，汇聚了中国石油大学、中国地质大学、中国科学院地质与地球物理研究所、中国科学院广州地球化学研究所、中石油勘探开发研究院、中石油塔里木油田公司、中石油新疆油田公司等单位的相关力量，做到了产学研强强联合和优势互补，加速了科学问题的解决；每一期 973 项目研究，除了有科技部指派的跟踪专家、项目组聘请的指导专家和承担各课题的科学家外，还有一批研究助手、研究生以及油田公司配套的研究人员和年轻科技人员参加。这种产、学、研结合和老、中、青联合的科研形式，既保障了科研工作的质量、科学问题的快速解决以及创新成果的及时应用，又为油气勘探事业的不断发展创造了条件，增加了新的动力。

《中国叠合盆地油气成藏研究丛书》的创新成果，已通过油田公司的配套项目、项目组或课题组与油田公司联合承担项目等形式，广泛应用于油气勘探生产，该丛书的出版必将更有力地推动相关创新成果的广泛应用并为更加复杂问题的解决提供技术思路和工作参考。《中国叠合盆地油气成藏研究丛书》凝聚了以各种形式参与这一研究工作的全体同仁的心血、汗水和智慧，它的出版获得了 973 项目承担单位和主管部门的大力支持，也得到了依托部门的资助和科学出版社的帮助，在此我们深表谢意。



2014 年 3 月 18 日

前 言

《中国叠合盆地油气来源与形成演化——以塔里木盆地为例》一书是国家重点基础研究发展计划(973)项目“中国西部典型叠合盆地深部多元油气生成机制与相态转化(2011CB201102)”,国家自然科学基金项目“海相油气藏 TSR-有机硫分布特征、成因机制与定量评价(No. 41173061)”,“海相原油超高芳香硫-二苯并噻吩成因机制与石油地质意义(No. 40973031)”,“断陷盆地混源油气定量预测理论与方法探索(No. 40772077/D0206)”,教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(No. 20120007110002),中国石油大学(北京)资源与探测国家重点实验室基金项目(PRP/indep-1-1101)以及中国石油塔里木油田公司研究项目“塔里木台盆区碳酸盐岩油气成藏理论与勘探实践”的研究成果。此外,它还得到了中国石油大学(北京)学术专著出版基金资助。

塔里木盆地是中国西部最重要的含油气叠合盆地,台盆区海相油气是塔里木盆地重要的油气资源。塔里木盆地油气成因类型多样、油气形成与演化过程复杂,复杂油气源厘定、混源相对贡献预测、油气演化与成藏效应鉴别长期困扰地球化学家。基于成烃成藏的前沿理论和国际上先进的分析测试技术,笔者近年针对塔里木盆地台盆区海相油气的上述问题开展了深入细致的探索工作。该项研究建立了一套海相油气成因地球化学综合判识标准、混源油气识别与定量方法体系、油气运移方向和充注途径示踪的地球化学参数和方法体系、深部碳酸盐岩油气成藏效应的方法技术等,相关成果为我国叠合盆地油气成因与成藏理论研究、海相高过成熟油气地球化学分析与测试提供了先进的方法途径,有助于指导叠合盆地碳酸盐岩油气藏勘探实践。

本书包含五方面的内容,分别介绍了中国叠合盆地油气来源与形成演化特征的独特性、研究意义与方法(绪论)、叠合盆地油气地质地球化学特征(第一章)、叠合盆地烃源岩地质地球化学特征(第二章)、叠合盆地油气的成因机制与运聚过程(第三章)和叠合盆地油气的后期改造与成藏效应(第四章)。

在国家自然科学基金委员会、科学技术部和石油企业的资助下,通过多年的努力,在叠合盆地油气特征、成因与成藏以及改造与演化过程领域取得了多项研究成果,培养了硕士、博士研究生 20 余名,成果发表于 *Organic Geochemistry*、*AAPG*、*Marine and Petroleum Geology*、*Energy Exploration and Exploitation*、*Acta Geologica Sinica*、*Petroleum Science* 以及国内核心期刊。然而,由于地质条件的复杂性、方法技术的局限性,一些问题的研究还有待深入,获得的认识还需要检验。

在叠合盆地油气形成与演化研究过程中,得到国家自然科学基金委员会、科学技术部、教育部高等学校博士学科点专项科研基金委员会和中国石油天然气股份有限公司的大力支持与帮助。中国石油塔里木油田分公司、科技处、勘探开发研究院有关领导和专家给

予了热情指导和大力支持。参与研究工作的还有中国石油塔里木油田分公司的肖中尧、卢玉红、李梅、张海祖及中国石油大学（北京）的吴公益、苏展、李楠、赵明、庞秋菊、石磊、孙浩。中国石油大学（北京）油气资源与探测国家重点实验室王铁冠院士、钟宁宁教授、朱雷实验员及重质油国家重点实验室史权博士、潘娜博士等给予了热情的指导与实验支持，中国石油大学（北京）盆地与油藏研究中心汤良杰、吕修祥、姜振学教授等领导 and 同事给予了大力支持与协助；陈君、庞秋菊、张传运、万中华、孙浩、陈湘飞、张鹏、霍志鹏等帮助清绘了部分插图，中心办公室刘红英、石海霞、张文贤等给予了诸多帮助，笔者在此一并致以诚挚的谢意。

由于时间仓促，书中观点和资料不妥之处，敬请读者批评指正。

目 录

丛书序一	
丛书序二	
丛书序三	
丛书前言	
前言	
绪论	1
第一节 中国叠合盆地油气来源与形成演化特征的独特性	1
第二节 叠合盆地油气来源与形成演化特征的研究意义	2
第三节 叠合盆地油气来源与形成演化特征的研究方法	3
第四节 叠合盆地油气来源与形成演化特征的主要研究成果	4
第一章 叠合盆地油气地质地球化学特征	7
第一节 叠合盆地原油地球化学特征	7
第二节 叠合盆地天然气地球化学特征	74
第三节 叠合盆地油气分布特征	77
第二章 叠合盆地烃源岩地质地球化学特征	86
第一节 海相烃源岩地质地球化学特征	86
第二节 陆相烃源岩地质地球化学特征	98
第三章 叠合盆地油气的成因机制与运聚过程解析	106
第一节 油气来源与混源识别	106
第二节 混源相对贡献评价	120
第三节 混源模拟实验研究	128
第四节 油气成藏期次判别与关键时间确定	137
第五节 油气运移路径示踪与富集模式建立	142
第四章 叠合盆地油气的后期改造与成藏效应	180
第一节 海相油气改造与成藏效应——生物降解、水洗与氧化	180
第二节 海相油气改造与成藏效应——热成熟作用	203
第三节 海相油气改造与成藏效应——气侵与蒸发分馏作用	219
第四节 海相油气改造与成藏效应——TSR作用	232
参考文献	257
索引	273

绪论

第一节 中国叠合盆地油气来源与形成演化特征的独特性

与国外含油气盆地相比,中国叠合盆地有其独特的石油地质特征,包括“多期成盆、多套烃源岩、多次生排烃、多套储盖组合、多期构造演化、多次运聚散、多期改造”等(贾承造,1997,1999;贾承造和魏国齐,2002;金之钧和王清晨,2004;庞雄奇等,2008),致使中国叠合盆地油气成因与成藏过程复杂、油气的形成与演化过程独特。

一、叠合盆地油气分布广泛且组分特征变异

中国叠合盆地含油层系多、分布范围广、油气性质变化大。其中,深层油气藏往往埋藏深度大,处于特殊的高温高压成烃成藏环境,油气热演化程度较高、物理性质与化学成分与中浅层油气有很大差异;中浅层油气藏也常常因多期油气充注、调整改造过程中的诸多物理与化学作用而失去了最初的面貌。概括而言,叠合盆地油气类型多样——高蜡油、挥发性油、凝析油、稠油等时常共生发育(Li et al., 2011a, 2011b; 张水昌等, 2011a);颜色多变——无色—墨绿色—黄色等,差异显著(塔里木盆地与渤海湾盆地均发育多种颜色的油气);化学组成异常——可能富集某些特定种类的化合物,如塔里木盆地深层(O_1)及局部中浅层(C)钻遇“高芳香硫油气”(朱扬明等, 1998a, 1988b; Li et al., 2012),某些层位天然气成分异常——富含高丰度硫化氢伴生气;同位素出现“反转”迹象——甲烷同位素有时逆演化,如塔中深部甲烷同位素较其他气体大幅度变轻(Li et al., 2012)。造成叠合盆地上述油气组分异常的因素很多,包括有机-无机相互作用、热化学作用、热蒸发分馏作用、运移分馏作用与微生物作用等。

二、叠合盆地油气来源众多且相对贡献不清

叠合盆地一般发育多套烃源岩,由于热演化过程中油气性质趋同以及多期构造演化过程中不同来源、不同成熟度油气的混合作用,使得油气源识别与相对贡献、油气资源评价困难。塔里木盆地海相油气源已争议二十多年,可见油气成因研究的复杂性。叠合盆地油气源研究的复杂性首先在于发育多套热演化程度不等的烃源岩,某些烃源岩原始形成环境可以相近,如塔里木盆地地下古生界的寒武系与奥陶系烃源岩同为海相、渤海湾盆地古近系东营组(Ed_3)及沙河街组($Es_1—Es_3$ 、 Es_4)、孔店组(Ek_2)则发育多套湖相烃源岩,母源性质的相同或相近、较高热演化阶段油气性质的趋同,致使油气源不

易识别。特别地,叠合盆地油气藏形成时间跨度大,早期古油藏可能成为晚期油气藏的烃类来源(以热裂解方式改变烃类的相态);存在于储层(沥青砂等)、运移通道以及广泛存在的低丰度烃源岩中的沥青或有机质,也可能是油气的重要来源。例如,叠合盆地天然气可来自干酪根热降解、原油裂解、分散可溶有机质生烃、古油藏再生烃。由于烃源岩热演化与油气演化的渐变性、多源多期混合的复杂性、油气运移及深部多种油气成藏效应等的干扰,混源油气的相对贡献评价一直是国际性的地学难题。当前塔里木叠合盆地油气源研究的关键问题是:寒武系、奥陶系烃源岩的成烃相对贡献及其分布规律;原油裂解气、干酪根裂解气的识别与相对贡献;广泛存在的低丰度烃源岩的成烃贡献量大小、碳酸盐岩(泥灰岩等)、泥页岩的成烃相对贡献等。

三、叠合盆地油气演化复杂且过程机制不明

叠合盆地深部高温高压、超临界相态环境决定油气演化过程中热蚀变、有机-无机等作用显著。热蚀变表现为烃类向裂解和稠合两个终级方向转化,原油裂解成气是主要表现形式,但不同地区原油裂解时的深度有很大差异,如四川盆地普光、元坝气田深度大于5000m后烃类为气态,但塔里木盆地在6500m仍高产工业凝析油,反映烃类热演化规律复杂。深部碳酸盐岩有机-无机作用,如硫酸盐热化学还原作用(TSR)较常见,它可改变油气的化学成分(Li et al., 2012)并消耗烃类产生无机产物(Ho et al., 1974; Heydari, 1997)。例如,美国墨西哥湾沿岸侏罗统Smackover地层富硫酸盐层段的深部油藏已裂解演变为含78% H_2S 、20% CO_2 、2% CH_4 (Black Creek油田)的气藏(Heydari, 1997)。塔里木盆地台盆区海相原油的TSR作用显示出随埋深增强的趋势(Li et al., 2011a, 2012),深部油气藏演化与成藏效应及其机制有待揭示与评价。

第二节 叠合盆地油气来源与形成演化特征的研究意义

一、有利于揭示油气的来源并预测有利资源领域

油气源是叠合盆地油气生成的物质基础,决定油气的分布、特性与资源潜能;油气演化决定油气的相态与不同相态油气的分布规律。塔里木盆地中深1井是最近在塔中寒武系膏盐岩下发现了工业油气流的探井,该井凝析油气来源的确认,对于揭示塔中地区深层油气勘探意义重大。倘若中深1井油气确定为寒武系烃源岩所生,则预示着塔里木盆地寒武系膏盐岩下仍有巨大的油气勘探潜能,这是由于寒武系是迄今公认的塔里木盆地地史演化过程中最重要的海相烃源岩,优质烃源岩极其发育,并且中寒武统厚层膏盐岩具有很好的油气保存作用。相反,若中深1井油气被确认为奥陶系成因,也不排除寒武系膏盐岩下具有良好的油气勘探前景。深层寒武系液态油的存在,是塔里木盆地烃源岩液态烃生成下限、古油藏液态烃保存下限研究的一大挑战。以往的研究一直认为,塔里木盆地寒武系烃源岩已处于高-过熟热演化阶段,不太具备液态烃生成能力。相关研究是塔里木盆地寒武系深层油气勘探与资源评价的重要依据。