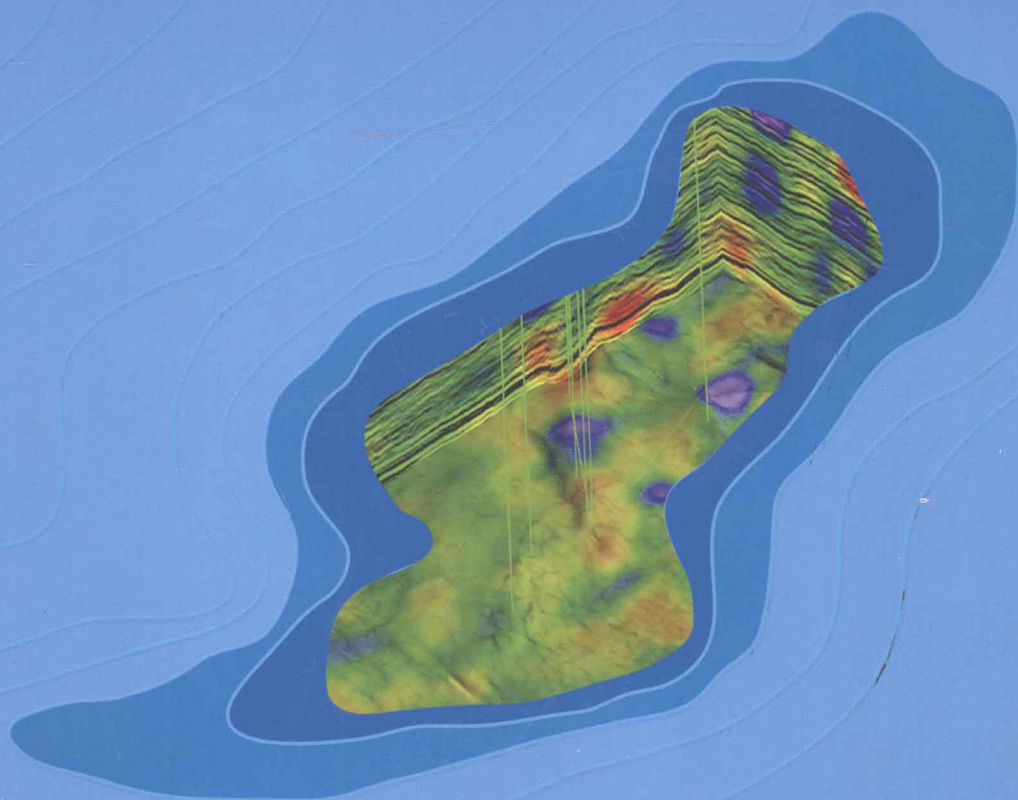


杨克明 庞雄奇 等著

# 致密砂岩气藏形成机制与预测方法

## ——以川西拗陷为例



科学出版社

# 致密砂岩气藏形成机制 与预测方法

——以川西拗陷为例

杨克明 庞雄奇 等 著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书旨在介绍在当前国内外致密气藏勘探和研究掀起热潮的时期,针对四川盆地川西拗陷典型致密气藏系统开展的气藏形成机制与分布预测研究的成果,展示了致密气藏成藏理论指导下四川盆地天然气勘探的良好前景。

本书共分六章。第一章介绍了致密砂岩气藏的概念,系统分析了国内外致密砂岩气藏勘探进展与资源潜力、典型致密砂岩气藏地质特征和致密砂岩气藏成藏机理研究进展与问题。第二章系统介绍了川西拗陷致密砂岩气藏形成的地质条件,包括构造特征与构造演化、层序特征与沉积体系、烃源岩特征与油气资源潜力及储盖组合特征等。第三章重点剖析了孝泉一新场气田、大邑气田、中坝气田、平落坝气田和新都—洛带气田等典型致密砂岩气藏的地质特征和成藏过程。第四章介绍了川西拗陷致密砂岩气藏成藏主控因素,包括烃源灶、古今隆起、沉积相、断裂、流体势场等的控藏作用。第五章重点阐述了在沉积盆地流体动力场划分的基础上,从天然气来源与烃源岩演化、储层致密化原因及演化、天然气运移路径和运移模式、天然气成藏动力学机制和成藏模式等方面研究了致密砂岩气藏形成机理与模式。第六章讲述了应用功能要素匹配的方法和原理,建立了针对不同流体动力场条件下先成型和后成型致密气藏分布有利区的预测方法。

本书理论与实践相结合,既可以供油田等生产单位使用,也可以作为石油大专院校的教学参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

致密砂岩气藏形成机制与预测方法:以川西拗陷为例/杨克明等著. —北京:科学出版社,2012. 9

ISBN 978-7-03-035492-1

I. ①致… II. ①杨… III. ①致密砂岩-砂岩油气藏-研究-川西地区  
IV. ①P618. 130. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 208843 号

责任编辑:吴凡洁 李 静 / 责任校对:钟 洋  
责任印制:张 倩 / 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>

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

\*

2012 年 10 月第 一 版 开本:16(787×1092)

2012 年 10 月第一次印刷 印张:20

字数:474 000

定价:118.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 前言

自 1927 年美国的圣胡安盆地发现致密砂岩气藏以来的 80 多年间,致密气藏的勘探和开发得到了国内外较为广泛的关注。世界致密气资源丰富,是未来重要的勘探增储领域,据 Holditch (2007) 估算,世界上非常规天然气中致密砂岩气的资源量大约为  $7\,406 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ,是非常规油气资源中重要的类型,近年来,其产量几乎占了全球非常规资源量的 70%。据统计,全球已发现或推测发育致密砂岩气的盆地有 70 个,主要分布在北美、欧洲和亚太地区。致密气开发活动主要集中于美国、加拿大和中国。迄今为止,美国是目前致密砂岩气资源勘探开发程度相对较高的国家,仅圣胡安盆地、丹佛盆地、尤因塔-皮申斯盆地、大绿河盆地的致密砂岩气保守资源量就达  $10 \sim 50 \text{ tcf}$  ( $1 \text{ tcf} = 2.831\,7 \times 10^{10} \text{ m}^3$ )。

中国自 1971 年发现川西中坝气田之后,也逐步系统地开始了对致密砂岩气藏的勘探和研究。中国拥有巨大的致密砂岩气储量和广阔的致密砂岩气勘探空间,天然气资源量为  $18.8 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ,占我国天然气资源量的 40% 左右;已有规模致密气藏产出的盆地包括:四川、鄂尔多斯、柴达木、松辽、渤海湾、塔里木及准噶尔等。致密砂岩气已成为近些年来我国天然气探明储量的主要增长点。

尽管前人对这类非常规气藏提出很多种叫法,如深盆气藏 (Masters, 1979)、盆地中心气藏 (Law, 2002)、连续气藏 (Schmoker, 1996) 和根缘气藏 (张金川, 2006) 等,但致密砂岩气藏这个概念更能反映低孔隙度和低渗透率砂岩中的天然气藏的特征。目前国内外关于致密砂岩气藏的成因机制有多种提法,包括水动力封闭、相对渗透率屏障封闭、缺乏浮力导致气在低渗透砂岩上浮、侧向断层-垂向页岩封闭、地层-成岩作用复合封闭、动态气藏 (物质平衡与力平衡) 等,但在实际应用或理论分析中却发现这些提法均存在一定的不足。由于致密砂岩气藏在成藏动态过程中,储层致密化过程与烃源岩生排烃演化、构造演化、气藏形成时间和期次的时间和空间匹配关系非常复杂,导致致密砂岩气藏的成因类型和成藏机制非常复杂,增加了气藏勘探难度,制约着该类气藏的勘探进程。

川西拗陷油气勘探始于 20 世纪 40 年代的龙门山山前油气地质调查,自 70 年代初发现中坝气田至今已发现众多大中型气田和含气构造。虽然个别砂岩储层层段最大孔隙度达到 15.67%,最大渗透率达到  $269.65 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,但是各层段孔隙度平均值均小于 5%,渗透率平均值均小于  $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,属于典型的致密砂岩气藏。川西拗陷为晚三叠世以来陆相盆地的深拗陷部分,走向北东,总面积约  $3.1 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。川西拗陷侏罗系与上三叠统天然气资源量为  $(1.8 \sim 2.5) \times 10^{12} \text{ m}^3$ ,而目前的探明储量约为  $2200 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,探明储量仅占资源量的 10% 左右,主力气层是侏罗系蓬莱镇组、遂宁组、沙溪庙组和上三叠统须家河组。该区已发现中坝、孝泉—新场—合兴场、马井、新都—洛带、大邑、白马庙、九龙山、平落坝、邛西、大兴西等众多大中型天然气田和射箭河、白龙

场、金马—鸭子河等众多的含气构造。

关于川西拗陷致密砂岩气藏的成因类型和形成机制,前人有不同的认识。20世纪80年代,我国专家就意识到四川盆地具有类似于加拿大阿尔伯达盆地的地质条件,可能存在深盆地气藏。随后罗启厚和王世谦(1997)、宋岩和洪峰(2001)、王金琪(2001)、以及张金亮等(2002a)对川西拗陷深盆地气成藏作了深入研究,认为川西拗陷具备深盆地气成藏条件。有学者又提出“早常规—晚改造”复式成藏模式(叶军等,2003a;陈昭国,2005),认为实际勘探实践显示出,川西拗陷并不具备典型深盆地气藏的特点,气水倒置关系不明显,深凹区地层水活跃,天然气富集高产区一定程度上受构造高和裂缝的控制。由于川西拗陷具有多期构造演化、多期生排烃、多期成藏及储层致密化过程复杂的特点,导致致密砂岩气藏的成因类型和形成机制的研究困难。成因类型和形成机制等理论上认识不清,严重影响勘探实践进一步深入。是强调部署中需同时兼顾古、今构造特征,还是部署中要找古圈闭或是“甜点”区?深凹区是否具备勘探的价值?这些问题的解决,均需要深入剖析致密砂岩气藏的形成机制并形成有利区的预测方法。

本书在对典型致密砂岩气藏地质特征和成藏过程精细解剖的基础上,结合区域地质条件的分布和演化的分析,研究致密砂岩成藏的地质条件;以含油气盆地流体动力场控油作用及其基本模式为理论指导,通过对川西拗陷流体动力场特征及演化分析,阐明不同历史时期流体动力场控制下的气藏成因类型和控制因素;系统分析天然气藏成因类型和气源对比、储层致密化原因及演化史、天然气成藏时间和期次、运移路径和运移模式、天然气成藏动力学机制等,通过匹配构造演化史、源岩排烃史、储层致密化史、天然气成藏史等,综合判定天然气藏成因类型,建立成藏模式;在区分天然气成藏主要控制因素,包括烃源灶、古今隆起、沉积相、盖层、断裂、流体势等的控制作用,以及划分流体动力场的基础上,分不同流体动力场,应用功能要素叠加的模式预测有利成藏区。

在川西拗陷致密砂岩气藏理论研究和勘探取得重大突破之后,为了系统总结致密砂岩气藏在勘探中规律性的认识和成功勘探经验,有效指导未来的勘探工作,特著此书,以供国内同行参考,同时也为进一步推动世界非常规气藏的理论研究和勘探进展做出贡献。

本书共分六章。第一章为致密砂岩气藏概论,由陈冬霞、郭迎春完成。第二章为川西拗陷致密砂岩气藏形成的地质条件,由杨克明、杨宇、朱宏权、张克银等完成。第三章为川西拗陷典型致密气藏地质特征,由李书兵、叶军、陈冬霞、朱宏权等完成。第四章为川西拗陷致密砂岩气藏成藏主控因素,由庞雄奇、杨克明、陈冬霞等完成。第五章为川西拗陷致密砂岩气藏形成机理与模式,由庞雄奇、陈冬霞、朱宏权、张克银等完成。第六章为川西拗陷致密砂岩气藏分布预测,由杨克明、庞雄奇完成。全书由杨克明统稿、审定。

# 目 录

## 前言

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 第一章 致密砂岩气藏概论             | 1  |
| 第一节 致密砂岩气藏概念             | 1  |
| 一、致密砂岩气藏概念的提出            | 1  |
| 二、国内外常见的致密砂岩的概念          | 2  |
| 三、国内外常见的致密砂岩气藏的成因类型      | 2  |
| 第二节 国内外致密砂岩气藏勘探进展与资源潜力   | 7  |
| 一、世界致密砂岩气藏资源潜力与勘探进展      | 7  |
| 二、中国致密砂岩气藏资源潜力与勘探进展      | 10 |
| 第三节 国内外典型致密砂岩气藏地质特征      | 11 |
| 一、美国落基山地区致密砂岩气藏地质特征      | 11 |
| 二、加拿大阿尔伯达盆地致密砂岩气藏地质特征    | 15 |
| 三、中国鄂尔多斯盆地低渗透致密砂岩气藏地质特征  | 21 |
| 第四节 国内外致密砂岩气藏成藏机理研究进展与问题 | 28 |
| 一、致密砂岩气藏成藏机理研究进展         | 28 |
| 二、致密砂岩气藏成藏机理研究中存在的问题     | 32 |
| 第二章 川西拗陷致密砂岩气藏形成的地质条件    | 34 |
| 第一节 川西拗陷构造特征与构造演化        | 34 |
| 一、川西前陆盆地形成与演化            | 34 |
| 二、川西拗陷构造单元划分             | 39 |
| 三、川西拗陷断裂分布与几何特征          | 41 |
| 四、川西拗陷古隆起形成与演化特征         | 43 |
| 第二节 川西拗陷陆相碎屑岩领域层序特征与沉积体系 | 45 |
| 一、川西拗陷碎屑岩领域层序特征          | 45 |
| 二、川西拗陷碎屑岩领域沉积体系          | 48 |
| 三、川西拗陷碎屑岩领域沉积体系演化        | 53 |
| 第三节 川西拗陷陆相烃源岩特征与油气资源潜力   | 56 |
| 一、烃源岩地质特征                | 56 |
| 二、烃源岩地球化学特征              | 58 |
| 三、烃源岩演化成生烃特征             | 62 |
| 四、油气资源潜力                 | 64 |
| 第四节 川西拗陷陆相碎屑岩领域储盖组合特征    | 65 |
| 一、碎屑岩领域储层基本特征            | 65 |

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| 二、碎屑岩领域盖层特征·····                   | 69  |
| 三、碎屑岩领域储盖组合特征·····                 | 70  |
| <b>第三章 川西拗陷典型致密气藏地质特征</b> ·····    | 72  |
| 第一节 孝泉—新场气田·····                   | 72  |
| 一、气田地质特征·····                      | 72  |
| 二、气藏形成与成因类型·····                   | 78  |
| 第二节 大邑气田·····                      | 83  |
| 一、气田地质特征·····                      | 83  |
| 二、气藏形成条件与成因类型·····                 | 89  |
| 第三节 中坝气田·····                      | 92  |
| 一、气田地质特征·····                      | 92  |
| 二、气藏形成条件与成因类型·····                 | 97  |
| 第四节 平落坝气田·····                     | 99  |
| 一、气田地质特征·····                      | 99  |
| 二、气藏形成条件与成因类型·····                 | 103 |
| 第五节 新都—洛带气田·····                   | 108 |
| 一、气田地质特征类型·····                    | 108 |
| 二、气藏形成条件与成因类型·····                 | 116 |
| <b>第四章 川西拗陷致密砂岩气藏成藏主控因素</b> ·····  | 121 |
| 第一节 烃源灶对天然气成藏的控制作用·····            | 121 |
| 一、有效烃源灶的范围对气藏的控制作用·····            | 121 |
| 二、有效烃源灶的演化对气藏的控制作用·····            | 125 |
| 第二节 构造隆起对天然气成藏的控制作用·····           | 128 |
| 一、古构造对气藏的控制作用·····                 | 128 |
| 二、今构造对气藏的控制作用·····                 | 135 |
| 第三节 断裂对天然气成藏的控制作用·····             | 137 |
| 一、断层对天然气成藏的控制作用·····               | 137 |
| 二、裂缝对天然气成藏的控制作用·····               | 144 |
| 第四节 地质相对天然气成藏的控制作用·····            | 151 |
| 一、构造相对天然气成藏的控制作用·····              | 152 |
| 二、沉积相对天然气成藏的控制作用·····              | 152 |
| 三、岩相对天然气成藏的控制作用·····               | 155 |
| 四、岩石物理相对天然气成藏的控制作用·····            | 157 |
| <b>第五章 川西拗陷致密砂岩气藏形成机理与模式</b> ····· | 164 |
| 第一节 流体动力场概念、划分及控油气作用模式·····        | 164 |
| 一、流体动力场的概念、研究进展与问题·····            | 164 |
| 二、含油气盆地流体动力边界条件及动力场划分·····         | 165 |
| 三、流体动力场控油气作用及其基本模式·····            | 169 |

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 第二节 致密砂岩气藏天然气来源与烃源岩演化 | 171 |
| 一、天然气成因类型             | 171 |
| 二、天然气来源               | 183 |
| 三、烃源岩排烃特征与演化史         | 188 |
| 第三节 致密砂岩气藏储层致密化原因及演化史 | 196 |
| 一、影响储层物性的主要因素         | 196 |
| 二、储层成岩作用序列与演化         | 199 |
| 三、储层孔隙演化史             | 207 |
| 第四节 致密砂岩气藏天然气成藏时间和期次  | 212 |
| 一、有机包裹体特征             | 213 |
| 二、同位素测年               | 221 |
| 三、油气充注期次及主成藏期         | 224 |
| 第五节 天然气运移路径和运移模式      | 225 |
| 一、天然气运移的路径            | 225 |
| 二、天然气运移路径示踪           | 232 |
| 三、天然气运移模式             | 238 |
| 第六节 天然气藏成因类型与成藏动力学机制  | 240 |
| 一、川西陆相领域流体动力场划分       | 240 |
| 二、天然气藏成因类型            | 252 |
| 三、天然气成藏动力学机制          | 255 |
| 第七节 天然气成藏模式           | 265 |
| 一、深层须家河组天然气成藏机理和模式    | 265 |
| 二、中、浅层侏罗系天然气运聚成藏机理和模式 | 269 |
| 第六章 川西拗陷致密砂岩气藏分布预测    | 275 |
| 第一节 致密砂岩气藏有利区预测原理与方法  | 275 |
| 一、功能要素匹配预测有利区的原理      | 275 |
| 二、功能要素匹配预测有利区的方法和流程   | 277 |
| 三、川西拗陷功能要素控油气作用定量表征   | 279 |
| 第二节 川西拗陷深层致密砂岩气藏分布预测  | 284 |
| 一、预测实例                | 284 |
| 二、川西拗陷深层须二段有利勘探区带     | 289 |
| 三、川西拗陷深层须四段有利勘探区带     | 291 |
| 第三节 川西拗陷中浅层致密砂岩气藏分布预测 | 293 |
| 一、预测实例                | 293 |
| 二、沙溪庙有利勘探区预测          | 298 |
| 三、遂宁组有利勘探区预测          | 301 |
| 四、蓬莱镇组有利勘探区预测         | 302 |
| 参考文献                  | 305 |

# 第一章 致密砂岩气藏概论

## 第一节 致密砂岩气藏概念

### 一、致密砂岩气藏概念的提出

致密砂岩气藏几乎存在于所有的含油气区，最早于 1927 年发现于美国的圣胡安盆地，1976 年在加拿大阿尔伯达盆地西部深拗陷区北部发现了大型的埃尔姆沃斯致密砂岩气田。我国自 1971 年发现川西中坝气田之后，也逐步系统地开始了对致密砂岩含气领域的研究。由于北美地区发现的致密砂岩气藏大多分布在盆地中心或盆地构造的深部，1979 年 Masters 提出了深盆地气藏的概念。

在对低渗透油气藏的研究中，致密砂岩气藏更受到国外学者的关注，诸多低渗低孔条件下的致密砂岩气藏的新概念被相继提出，如深盆地气藏（deep basin gas）（Masters, 1979）、盆地中心气藏（basin-centered gas accumulation）和连续气藏（continuous gas accumulation）（Schmoker, 1996）等。深盆地气藏的概念最早由 Masters（1979）在对美国新墨西哥州和科罗拉多州的圣胡安盆地和加拿大阿尔伯达盆地深部天然气藏的研究基础上提出，他认为深盆地气藏系指在特殊地质条件下形成的、具有特殊圈闭机理和分布规律的非常规天然气藏。深盆地气藏主要集中分布在盆地中心或盆地构造的深部位，故称之为深盆地气藏。其后，Masters（1984）讨论了加拿大阿尔伯达盆地艾尔姆华士（Elmworth）油田深盆地气藏的地质特征，指出深盆地气藏的主要地质特征为储层致密，气藏内气水倒置，负压异常以及源-藏伴生等。深盆地气定义在应用上出现了一些问题，因为并不是所有储存在致密储层中的气藏都埋藏在很大的深度，如圣胡安盆地中致密储层中的气藏埋藏在深度为 914m 的浅层。此外，致密储层中的气藏都饱含气，不存在倒置的气水界面。Rose 等（1986）在研究 Raton 盆地 Trinidad 砂岩天然气聚集时提到盆地中心气藏（basin-centered gas accumulations, BCGAS）这个概念。Law（2002）将盆地中心气藏定义为区域上广泛分布的充满天然气的气藏。该气藏为饱含气，具异常压力（高压或低压），通常没有下倾的水界面，并且为低渗透的储层。连续气藏（continuous gas accumulation）的概念由 Schmoker（1996）提出，它反映了气藏的大面积连续分布。连续气藏虽然可以准确地描述致密储层中大面积充满天然气的特征，但是太广泛，包括了煤层甲烷和泥岩天然气藏。

相对来说，致密砂岩气藏这个概念更能反映低孔隙度和低渗透率砂岩中的天然气藏的特征，因此，本书主张采用致密砂岩气藏这个概念，并且认为深盆地气是致密砂岩气的一种特殊类型，且目前国外所勘探的致密砂岩气藏主要以深盆地气藏为主。总体来说，低

渗透致密砂岩油气藏是指赋存于低孔隙度和低渗透率砂岩中的低渗透天然气藏和（或）油藏，为非常规油气藏。

## 二、国内外常见的致密砂岩的概念

致密含气砂岩的概念最早出现于美国。1978年美国天然气政策法案中规定只有砂岩储层对天然气的渗透率等于或小于  $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  的气藏才可以被定义为致密砂岩气藏。美国联邦能源监管委员会（FERC）也把致密砂岩气藏储层定义为地层渗透率为  $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  的砂岩储层。Berg（1985）认为低渗透油藏储层的上限为  $(1 \sim 10) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。Holditch 认为致密含气砂岩是一种不经过大型改造措施（水力压裂）或者不采用水平井、多分支井，就不能产出工业性气流的砂岩储层。因此就不存在典型的致密含气砂岩。致密含气砂岩可以埋藏很深，也可以埋藏很浅；可以是高压，也可以是低压；可以是低温，也可以是高温；可以是单层，也可以是多层；可以是均质的，也可以是非均质的。

苏联将储层渗透率小于  $(50 \sim 100) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  的油藏作为低渗透油气藏。我国唐曾熊（1994）在《油气藏的开发分类及描述》中建议将低渗透油气藏储层的渗透率定为  $(10 \sim 100) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ；罗蛰潭和王允诚（1986）将油层分为 4 类，把渗透率小于  $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  的称为特低渗透油藏，把渗透率小于  $100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  的称为低渗透油藏。

关德师等（1995）在《中国非常规油气地质》中，把致密砂岩气藏定义为孔隙度低（小于 12%）、渗透率比较低（ $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ）、含气饱和度低（小于 60%）、含水饱和度高（大于 40%）、天然气在其中流动速度较为缓慢的砂岩层中的非常规天然气藏。

杨晓宁等（2005）认为致密砂岩一般具有 7%~12% 的孔隙度和小于  $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  的空气渗透率，砂岩孔喉半径一般小于  $0.5 \mu\text{m}$ 。在特定条件下，致密砂岩既可以作为天然气的储层也可以作为油气藏的盖层，与常规的砂岩储层相比较，具有明显的岩石物理性质和流体力学性质方面的差异。

按照我国国家矿产储量委员会的标准，有效渗透率不大于  $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ （绝对渗透率不大于  $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ）、孔隙度不大于 10% 的气藏为致密气藏。由此可见，世界上对致密含气砂岩并无统一的标准和界限，不同的国家是根据不同时期的石油资源状况和技术经济条件来制定其标准和界限的，而在同一国家、同一地区，随着认识程度的提高，致密含气砂岩的概念也是在不断地发展和完善的。

## 三、国内外常见的致密砂岩气藏的成因类型

因为不同盆地、不同深度致密气藏的开采现状、分布规律、地质产状和形成机制等不同，导致致密气藏的分类、评价标准也不一样。

### （一）按油气藏储层产状类型划分

按致密砂岩油气藏储层产状可将其油气藏划分为：致密岩性砂岩油气藏、致密构造

砂岩油气藏和深部致密向斜砂岩油气藏（即深盆油气藏）。

### 1. 致密岩性砂岩油气藏（透镜状砂岩储层油气藏）

储层空间几何形态为透镜状，单个砂体之间连通性差，各自具有独立的压力体系和气水界面，为独立的成藏单元。透镜状砂岩储层多数为河流河道或砂坝沉积体。储层致密主要是由于储层埋深及其他一些因素导致的过度成岩作用造成的。以中国川西白马庙气藏为代表，该组蓬莱镇组储层致密，砂体厚度小（一般为5~10m），个数多，呈透镜状错落、叠置；砂体平面展布范围小，连片性差。

### 2. 致密构造砂岩油气藏（席状砂岩储层油气藏）

此类气藏成藏受构造控制作用明显。储层致密，空间呈席状展布，具有相对较好的横向连续性，一般具有统一的压力体系和油气水界面，为统一的成藏单元。席状储层主要发育在滨海（湖）和海相环境中，如三角洲前缘、滨海（湖）、近海（湖）及陆架。储层致密也是由压实和成岩作用造成的。中国以东濮凹陷户部寨气藏为代表，气藏沙四上亚段为深湖一半深湖相湖底扇和滑塌浊积岩相粉砂一细砂岩，厚度约为300m，区域稳定分布，砂岩含量为30%~50%，横向连续性较好（图1-1-1）。美国绿河盆地Farson向斜的Jonah气藏就是典型的受边界断层封闭成藏的致密构造砂岩油气藏（图1-1-2）。

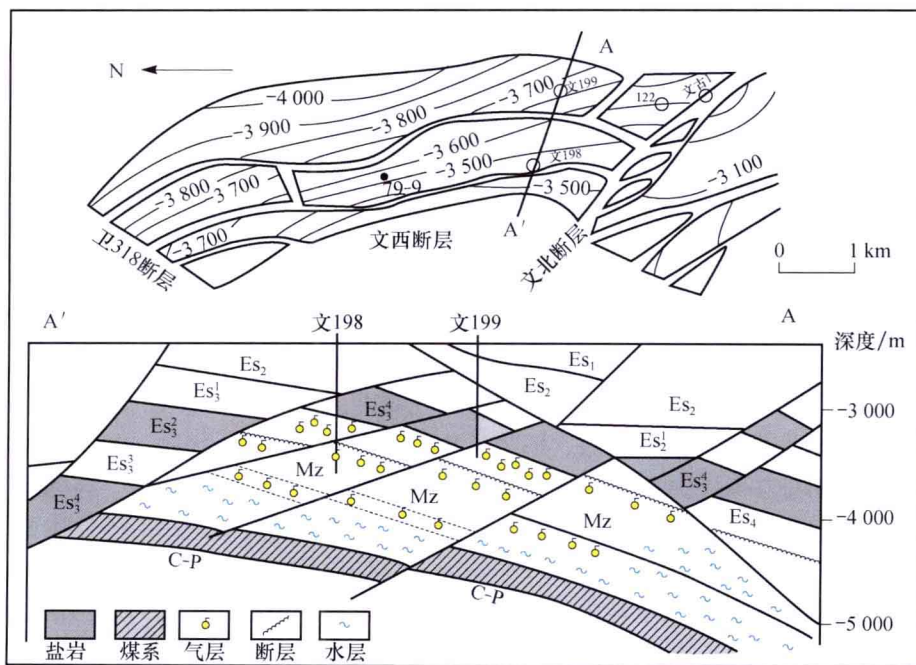


图 1-1-1 中国渤海湾盆地东濮凹陷户部寨致密构造砂岩气藏（许化政等，1994，修改）

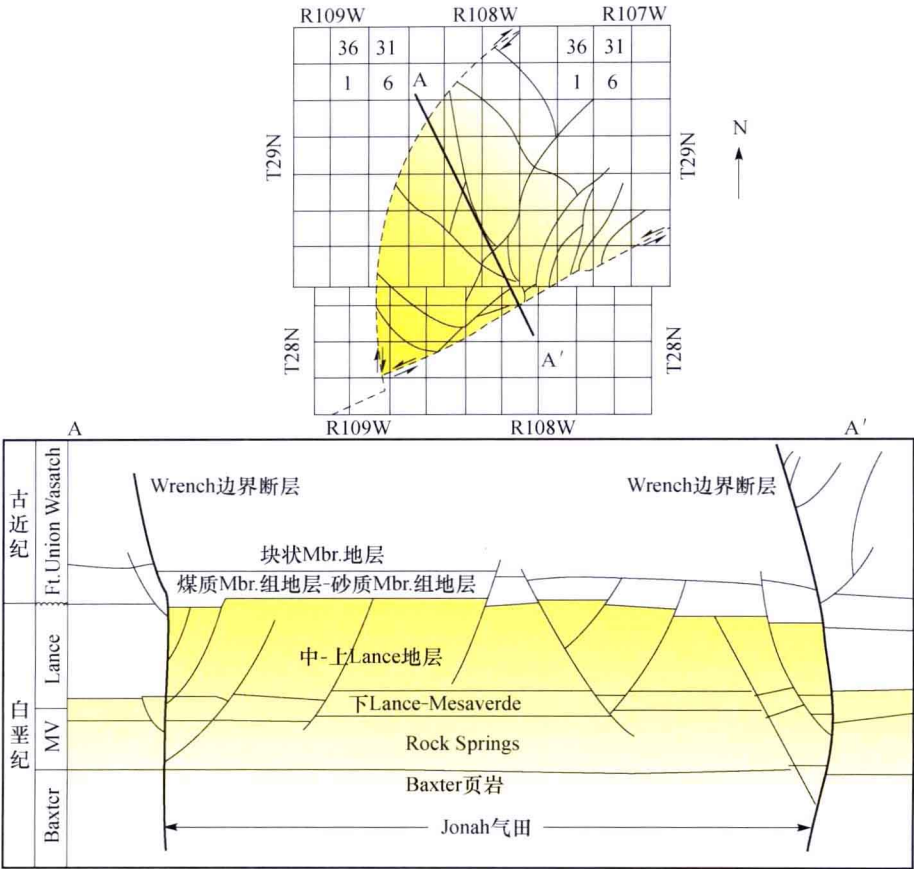


图 1-1-2 美国绿河盆地 Jonah 致密构造砂岩气藏 (Law, 2002, 修改)

3. 深部致密向斜砂岩油气藏（即深盆油气藏）

1979 年，在北美西加 Alberta 盆地向斜中心部位发现白垩纪致密砂岩气藏（图 1-1-3），该气藏具有区域大面积含气、具异常地层压力和倒置的气水界面的特点，气藏储层有席状砂岩储层和透镜状砂岩储层两种类型，Master 将此类气藏命名为“深盆气藏”。此后多位地质学家针对这一不同于常规油气藏的新气藏类型进行卓有成效的研究工作，相继在美国多个盆地发现此类型油气藏（图 1-1-4）。自国外提出“深盆气”概念之后，中国学者总结多年鄂尔多斯盆地勘探研究成果，认为该盆地上古生界气藏为一典型的深盆气藏，含气主体部位为盆地下降深凹方向，具有区域气水倒置特征，储层砂体主要为河流相沉积分流河道砂体，厚度一般为 100~210m，单层砂体厚度为 5~15m，为席状砂和透镜砂的混合体。此外松辽盆地中央拗陷区齐家古龙凹陷中部葡萄花油层和扶杨油层也是典型深盆油藏。

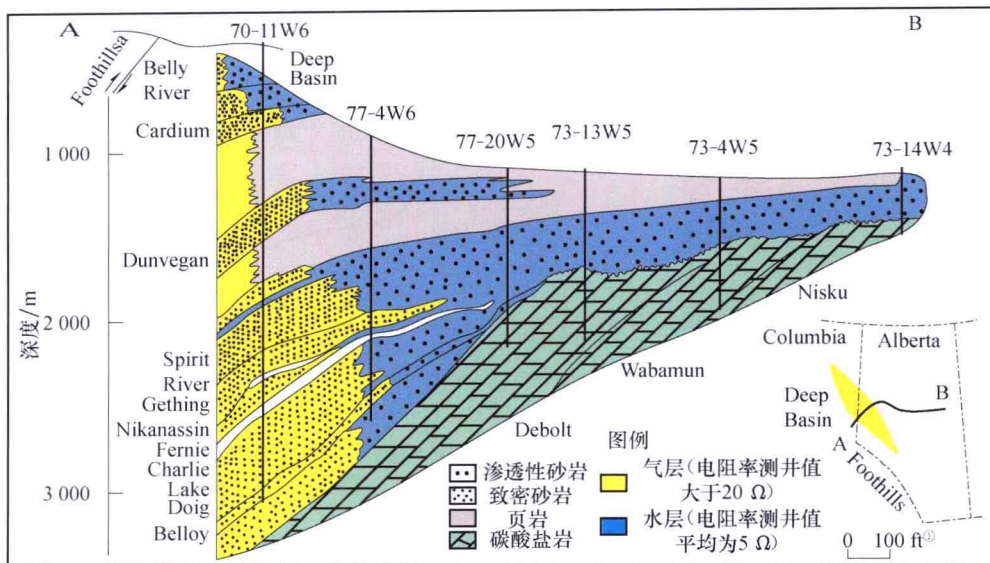


图 1-1-3 加拿大西加 (Alberta) 盆地致密向斜砂岩气藏剖面图 (据 Masters, 1979, 修改)

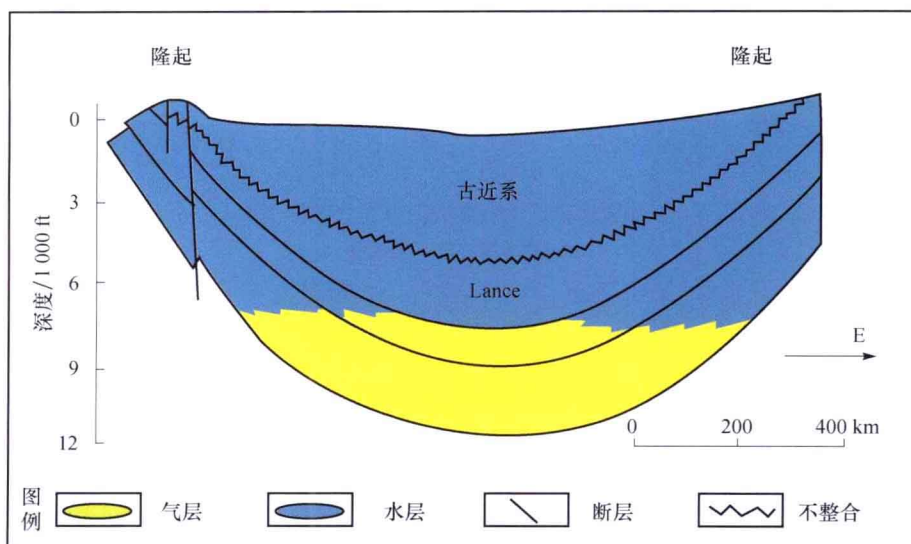


图 1-1-4 美国怀俄明州红色沙漠盆地致密向斜砂岩气藏剖面图 (据 Law, 2002, 修改)

## (二) 按油气藏成因机制划分

依据致密砂岩油气藏成藏时间与砂岩储层致密时间的先后关系, 可将致密砂岩油气藏划分为两类 (姜振学等, 2006), 即先成型致密砂岩油气藏 (油气成藏在前, 储层致密在后) 和后成型致密砂岩油气藏 (储层致密在前, 油气成藏在后)。油气成藏时间与

①  $1\text{ft}=3.048\times 10^{-1}\text{m}$ 。

砂岩储层致密时间的先后关系不同，油气成藏机理与成藏模式也不同（图 1-1-5）。

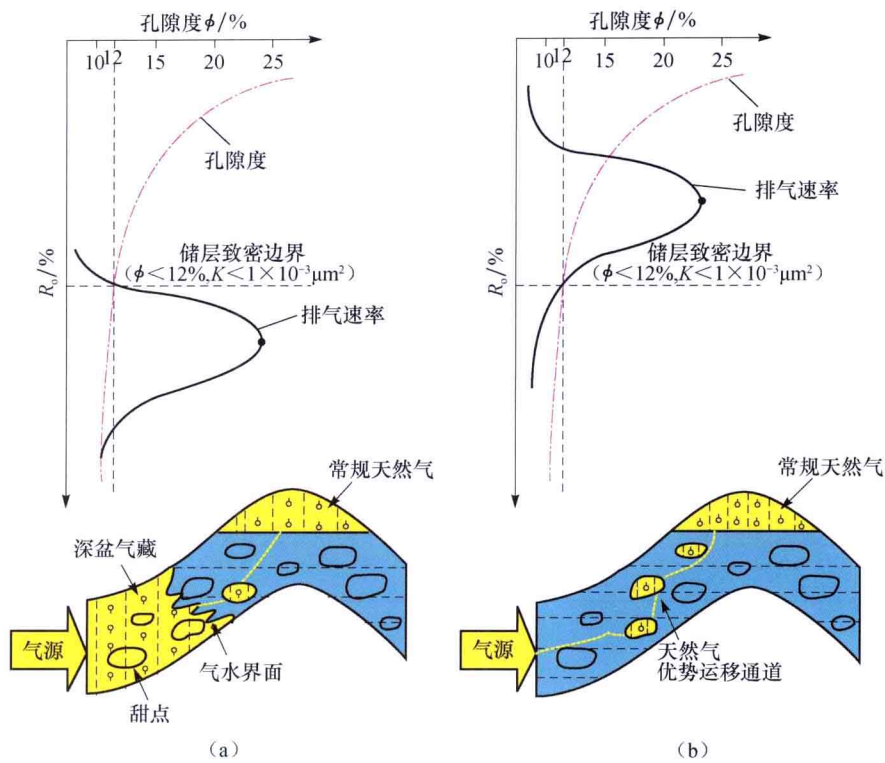


图 1-1-5 深部致密砂岩油气藏成因分类（姜振学等，2006）  
(a) 后成型；(b) 先成型

1. 先成型深部致密砂岩油气藏

此类致密砂岩油气藏最大特点是油气充注时间早于储层致密时间。油气藏形成时储层尚未致密，形成的为常规油气藏，浮力为油气藏成藏动力，油气一般分布在圈闭的高部位，具有正常的压力场，但随着后期油气藏埋深的加大或储层胶结作用的加强，导致储层可容空间的减小，与此同时，储层流体并没有发生相应的减小，因此导致油气藏一般具有异常高压特征，中国发现的先成型致密砂岩油气藏（渤海湾盆地东濮凹陷）压力系数为 1.1~2.0，表现为弱超压—超压的特征，但油气藏分布在构造高点的特征并没有发生改变。

2. 后成型深部致密砂岩油气藏

油气充注发生在储层致密之后，由于储层过于致密，油气水不能进行有效的重力分异作用，因此形成气（油）下-水上“气水（油水）倒置”的特殊的油气水接触关系。后成型致密砂岩油气藏早期形成时，烃源岩生烃形成的超压是油气藏运移聚集的主要动力，因此此类油气藏形成阶段一般为超压，随后随着烃源岩生烃能力的降低或减弱，油

气运移动力减弱, 伴随烃类的散失, 早先形成的油气藏内的油气不断散失, 当油气藏内散失的油气量大于同期源岩补给的量时, 那么油气藏内的压力开始降低, 如果时间足够长, 此类气藏甚至会出现负压的现象, 典型的后成型油气藏具有典型的帚状压力场类型。后成型油气藏一般分布在盆地或拗陷的深部位或宽缓的斜坡部位。

## 第二节 国内外致密砂岩气藏勘探进展与资源潜力

### 一、世界致密砂岩气藏资源潜力与勘探进展

#### (一) 世界致密砂岩气藏资源潜力

世界致密气资源丰富, 是未来重要的勘探增储领域。致密砂岩气藏存在于世界许多盆地中, 主要集中在北美洲、拉丁美洲、亚洲和苏联, 致密气开发活动主要集中于加拿大和美国。除此外, 其他国家也正在如火如荼的研究着致密气。例如, 澳大利亚、阿尔及利亚、阿曼、委内瑞拉、阿根廷、巴西、埃及和一些欧洲国家。近年来, 致密气产量几乎占了全球非常规资源量的 70%, 图 1-2-1 显示了全球致密气可采资源量分布情况。

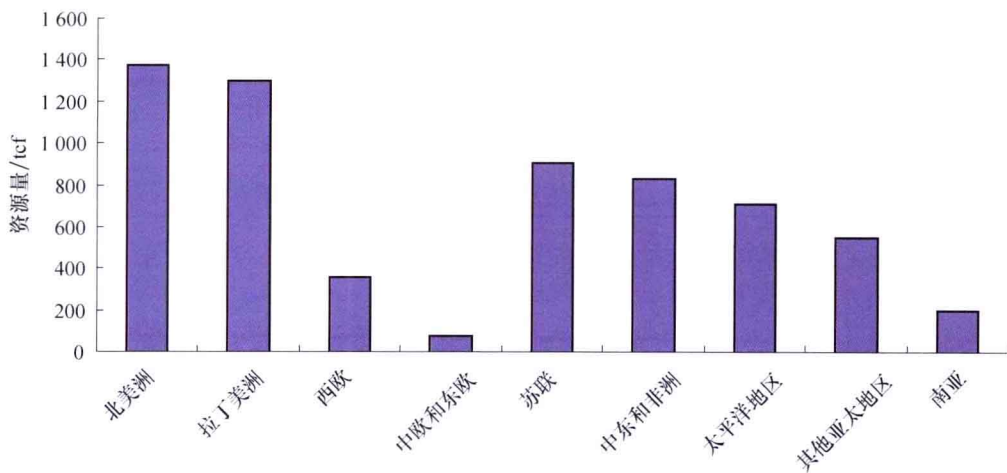


图 1-2-1 致密砂岩气在全球的分布

据 Holditch 等 (2007) 估算, 世界上非常规天然气中致密砂岩气的资源量大约为  $7\,406 \times 10^{12} \text{ m}^3$ , 其中北美洲为 1371tcf, 拉丁美洲为 1293tcf, 西欧为 353tcf, 中欧和东欧为 78tcf, 苏联为 901tcf, 中东和非洲北部为 823tcf, 太平洋地区为 705tcf, 其他亚太地区为 549tcf, 南亚为 196tcf。

#### (二) 世界致密砂岩气藏勘探进展

据统计, 全球已发现或推测发育致密砂岩气的盆地有 70 个, 主要分布在北美、欧

洲和亚太地区。迄今为止,美国是目前致密砂岩气资源勘探开发程度相对较高的国家,自1950年美国的Silver在研究过程中间接地认识到新墨西哥州和科罗拉多州的圣胡安(San Juan)盆地白垩系大范围低渗透储层中普遍含气以来,经过地质学家多年不懈的努力研究,最终认识到这是一种具有特殊成藏特征的新型致密砂岩油气藏。目前学术界比较公认的美国已发现的此种致密砂岩油气藏主要分布在以下几个盆地:圣胡安盆地、丹佛盆地、尤因塔-皮申斯盆地、大绿河盆地,仅这几个盆地的致密砂岩气保守资源量就达到了10~50tcf(图1-2-2)。

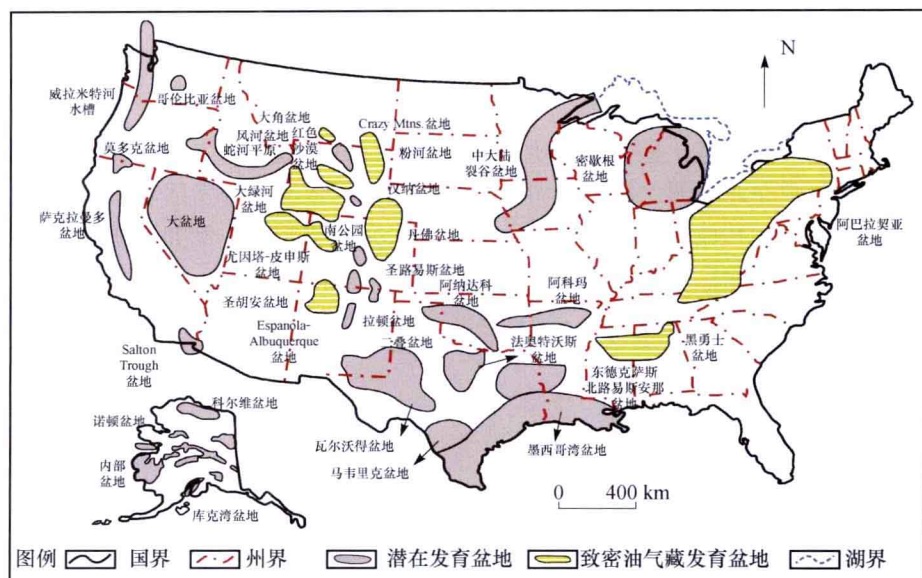


图 1-2-2 美国深部致密砂岩油气藏发育盆地分布图 (Law, 2000, 修改)

1976年北美加拿大西加(Alberta)盆地中发现艾尔姆华士大型致密砂岩气藏(Master称之为深盆气藏),经过多年不断地勘探,目前该气藏探明天然气地质储量达17tcf,并且其周边地区大约仍有1亿桶液态天然气储量,是加拿大目前发现的最大的天然气藏,位列北美第一位(图1-2-3)。西加(Alberta)盆地发现的艾尔姆华士致密砂岩气藏以其独特的压力系统、倒置的气水关系引起了石油地质学界的广泛关注,针对此种新型油气藏的成藏特征与机理进行了多年不懈的研究,并在全球掀起了寻找致密砂岩气藏(深盆气藏)的热潮。目前西加(Alberta)盆地致密砂岩气含气范围仍不断扩大,其天然气地质储量不断增加,展示了此种致密砂岩气藏巨大的勘探潜力。加拿大已发现的深部致密油气藏主要分布在西加盆地地区。

中国拥有巨大的致密砂岩气储量和广阔的致密砂岩气勘探空间,我国陆上天然气资源为 $47 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ,其中致密砂岩气资源量占我国天然气资源量的40%左右(约 $18.8 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ),资源量居非常规天然气之首(图1-2-4)。我国已有规模致密气藏产出的盆地包括:四川、鄂尔多斯、柴达木、松辽、渤海湾、塔里木及准噶尔等,这些盆地都具有

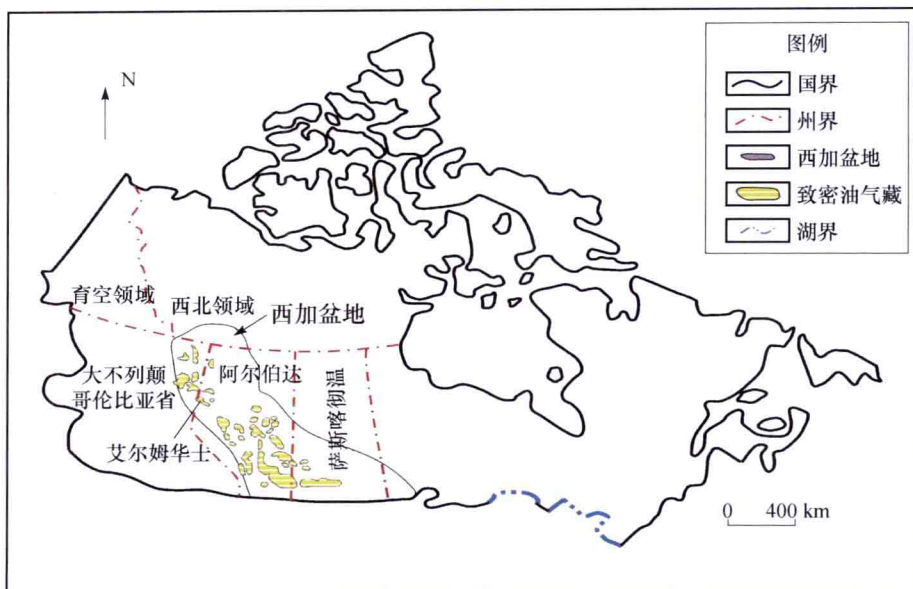


图 1-2-3 加拿大深部致密砂岩油气藏分布图 (Law, 2000, 修改)

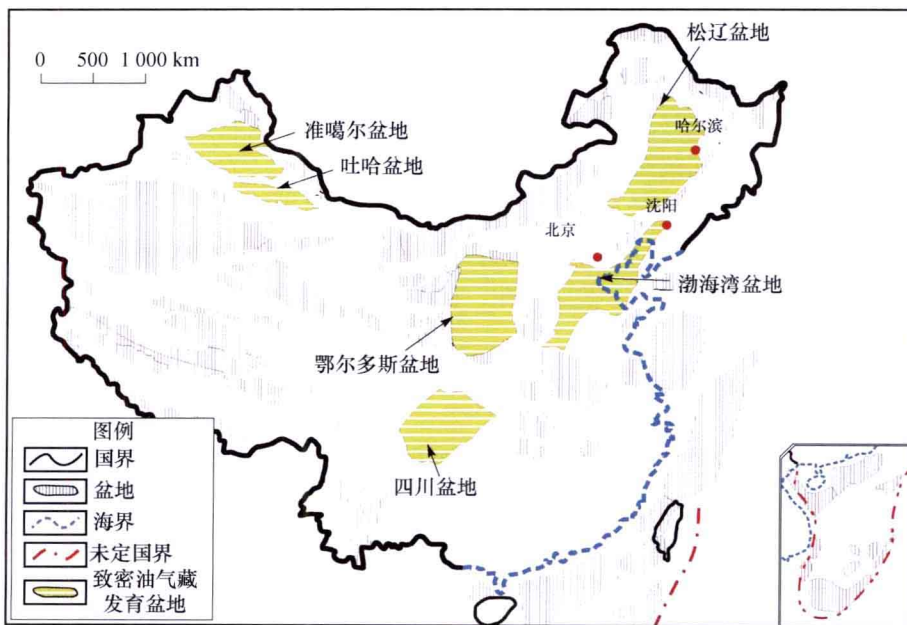


图 1-2-4 中国致密砂岩油气藏分布图 (王涛等, 2002, 修改)

优良的致密砂岩气藏勘探前景。致密砂岩气已成为近些年来我国的天然气探明储量的主要增长点。

除了美国、加拿大和中国, 在世界上其他地区也发现了很多的致密砂岩气藏。其