

本书由“西安石油大学优秀学术著作出版基金”资助出版

致密砂岩储层成岩作用 及其与天然气成藏耦合关系 ——以鄂尔多斯盆地为例

曹青 李军◎著



中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

致密砂岩储层成岩作用及其与 天然气成藏耦合关系

——以鄂尔多斯盆地为例

曹 青 李 军 著

中国石化出版社

内 容 提 要

本书系统地总结了致密砂岩储层成岩作用及其与天然气成藏耦合关系研究现状及存在问题,以鄂尔多斯致密砂岩储层为例,研究了盆地东部上古生界盒8段、山西组和太原组区域地质特征、气源特征和地层特征,针对盆地东部上古生界主要含气层段输导体系、成岩作用、储层致密性界限进行对比分析,探讨鄂尔多斯盆地上古生界储层致密成岩-天然气成藏的耦合关系以及致密砂岩天然气成藏的主控因素。

本书坚持理论与实践结合,技术与方法并重,对致密砂岩储层成岩-成藏耦合研究具有重要指导意义,可作为从事油气成藏的科研工作者、技术管理人员、在校大学生及研究生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

致密砂岩储层成岩作用及其与天然气成藏耦合关系:
以鄂尔多斯盆地为例 / 曹青, 李军著. —北京: 中国
石化出版社, 2015.

ISBN 978-7-5114-3572-9

I. ①致… II. ①曹… ②李… III. ①鄂尔多斯盆地
- 致密砂岩 - 砂岩储集层 - 成岩作用 ②鄂尔多斯盆地 -
致密砂岩 - 砂岩油气藏 IV. ①P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 190029 号

未经本社书面授权, 本书任何部分不得被复制、抄袭, 或者以任何
形式或任何方式传播。版权所有, 侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址: 北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编: 100011 电话: (010) 84271850

读者服务部电话: (010) 84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail: press@sinopec.com

北京柏力行彩印有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787 × 1092 毫米 16 开本 10.5 印张 222 千字

2015 年 8 月第 1 版 2015 年 8 月第 1 次印刷

定价: 43.00 元

前言

在能源问题关系到经济发展及社会稳定的背景下,非常规天然气由于其巨大的资源潜力和经济效益而被各国政府所重视。随着非常规天然气勘探开发技术水平的发展,截至2011年年底国内已发现15个致密砂岩大气田,其探明天然气地质储量为 $3.3 \times 10^{12} \text{ m}^3$,年产量达 $256 \times 10^8 \text{ m}^3$,致密砂岩大气田总储量和年总产量分别约占全国天然气储量和产量的39%和25%(李建忠等,2012)。非常规油气是未来全球油气工业持续发展必然的接替领域,其勘探理论和关键技术的总结推广,势必成为油气地质学的下一次大飞跃。因此,汲取国外针对致密砂岩气的经验、理论和技术,深入剖析具有中国特色致密砂岩气区的地质特征和形成机制,以完善致密砂岩气聚集的勘探实践和地质理论。

勘探实践及大量实验分析表明,鄂尔多斯盆地上古生界砂岩气藏主要为致密砂岩气藏。盆地东部上古生界致密砂岩气藏整体显示出低孔、低渗、低丰度以及大面积分布的特征,同时具有含气层系多、分布复杂、储层非均质性强和部分层段气层产量低的状态特点;上古生界不同层段在沉积相、沉积组分、成岩作用、埋藏史、热演化史及成藏期次等因素上的差异,导致其物性显示出较大的差异,对天然气勘探部署决策以及后期开发效果造成一定的影响。

本书以鄂尔多斯盆地东部上古生界致密砂岩为研究对象,对致密砂岩的储层特征、成岩作用特征、储层致密上下限、致密砂岩储层成岩—致密—成藏耦合关系及天然气聚集成藏的控制因素等进行了深入研究,取得了以下几方面的主要结论和认识:

(1)对研究区上古生界致密砂岩成岩作用类型及特征、成岩阶段和成岩演化序列进行深入地研究。研究表明,上古生界致密砂岩储层发生了多类成岩作用,经历了漫长而复杂的成岩演化,已经演变到了中成岩B期阶段。研究区上古生界致密砂岩储层的成岩作用在粒径、分选程度、矿物组分和孔喉大小等方面显示出独特性,与常规砂岩气藏对比显示以下特性:中—细粒砂岩和高塑性岩屑更易压实导致储层致密,储层致密后溶解物质交换不畅,快速饱和而就近胶结。

(2)首先以国内外普遍采取的经验统计法,对东部上古生界致密砂岩气储层下限进行统计分析。在此基础上从致密砂岩微观孔喉内天然气运移受力状态入手,建立孔喉半径与物性参数之间的线性回归关系,以不同受力状态下孔喉半径界限参数推算相应物性上下限参数。最终致密界限的推算结果显示(致密储层物性下限、早白垩世末期致密储层物性上限和现今致密储层物性上限),盒8段分别为4%、13%、14%和 $0.10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、 $1.8 \times$

$10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、 $2.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ；山₂段分别为2%、8%、9%和 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、 $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、 $1.4 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ；太原组分别为3.5%、11%、12%和 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、 $1.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、 $2.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

(3)通过伊利石 K-Ar 测年和流体包裹体综合分析的方法，分析盆地东部上古生界砂岩储层的天然气充注期次，结果显示其内天然气充注聚集成藏是一个相对漫长且连续的过程；从气态烃包裹体组合特征、地球化学组分和与其伴生的盐水包裹体均一温度等参数综合分析，并以第2期(140~110Ma)为主要充注期。

(4)在确定初始孔隙度的基础上，首先恢复压实作用造成的孔隙损失量；然后根据胶结物形成序列及其含量差异，确定不同类型胶结作用造成的孔隙损失量；同理再确定不同类型溶蚀作用造成的孔隙增加量。最终按成岩演化序列将二者结合，从而还原储层砂岩的致密化过程。依据推算的上古生界致密砂岩储层致密上下限确定研究区储层致密时间，将其与储层内天然气大规模聚集富集的时间耦合分析，最终确定研究区上古生界致密砂岩储层特有的成岩—成藏耦合关系。耦合结果显示盒8段和太原组岩屑石英砂岩储层显示“先致密、后成藏”的成岩—成藏关系，山2段石英砂岩储层显示“边致密、边成藏”的成岩—成藏耦合关系。

(5)针对气源岩的生气强度、盖层封闭状态和储层致密差异等因素，对盆地东部上古生界天然气聚集条件进行详细分析；在良好的气源基础上，不同成岩演化状态的砂岩储层与泥岩隔夹层的三维配套组合控制了其内天然气的聚集程度，从而使气藏显示出三维空间内相邻或叠置的“准连续型聚集”特征。

本书共分七章。第一章为绪论，第二章为鄂尔多斯盆地东部上古生界地质条件，第三章为鄂尔多斯盆地东部上古生界输导体系特征，前三章整体由曹青、李军完成；第四章为盆地东部上古生界致密砂岩储层成岩作用特征，第五章为盆地东部上古生界致密砂岩储层物性界限的确定，第六章为盆地东部上古生界致密砂岩成岩—成藏耦合关系，此三章由曹青完成；第七章为盆地东部上古生界致密砂岩气成藏控制因素，由曹青、李军完成。

在本书编写过程中，一直得到西安石油大学地球科学学院赵靖舟教授的悉心指导和大力支持，在此表示由衷的感谢！同时也得到油田企业领导和专家的大力支持、帮助和指导，在此表示由衷的感谢！

本书能够顺利出版还得益“十二五”国家科技重大专项中“鄂尔多斯盆地上古生界天然气富集规律研究”专题和“西安石油大学优秀学术著作出版基金”的联合资助，在此向一直关心和帮助本书出版工作的西安石油大学科技处和地球科学与工程学院的领导及同事表示衷心的感谢。

本书所反映的只是研究工作过程的阶段性成果，不足之处在所难免，敬请各位专家、读者批评指正。本书对所用资料数据尽量做了标注，受作者水平所限难免有不详之处，请给与谅解和指正。

目 录

CONTENT

第一章 绪 论	(1)
第一节 致密砂岩储层成岩—成藏耦合研究目的及意义	(1)
第二节 致密砂岩储层成岩—成藏耦合研究现状与存在问题	(2)
一、致密砂岩成岩演化研究现状与存在问题	(2)
二、致密砂岩储层界限研究现状	(3)
三、致密砂岩储层成岩—成藏耦合研究现状	(4)
第三节 致密砂岩储层成岩—成藏耦合主要研究内容	(5)
第四节 致密砂岩储层成岩—成藏耦合研究思路及技术方法	(6)
第二章 鄂尔多斯盆地东部上古生界地质条件	(7)
第一节 区域地质概况	(7)
第二节 上古生界气源特征	(10)
一、上古生界气源岩分布特征	(10)
二、上古生界煤系烃源岩评价	(10)
三、上古生界气源岩生气强度特征	(12)
第三节 上古生界地层发育特征	(13)
第三章 鄂尔多斯盆地东部上古生界输导体系特征	(16)
第一节 输导体系原理	(16)
一、输导体系的定义	(16)
二、输导体系的分类	(17)
三、输导体系与烃源岩的配置关系	(21)

第二节 研究区输导体系特征	(21)
一、输导体系类型及其演化	(22)
二、砂体型输导体系岩性特征	(24)
三、砂体型输导体系展布特征	(27)
四、砂体型输导体系物性特征	(29)
五、砂体型输导体系孔隙结构特征	(33)
第四章 盆地东部上古生界致密砂岩储层成岩作用特征	(40)
第一节 成岩作用类型	(40)
一、压实作用	(40)
二、胶结作用	(42)
三、溶解作用	(44)
第二节 成岩阶段划分依据	(46)
第三节 成岩阶段和成岩序列	(48)
第四节 成岩相特征	(50)
一、典型单井砂岩段成岩相划分	(51)
二、主要含气层段成岩相平面展布	(57)
第五节 致密砂岩储层成岩特征差异	(72)
第五章 盆地东部上古生界致密砂岩储层物性界限的确定	(80)
第一节 经验统计法确定致密砂岩气物性界限	(80)
一、经验统计法确定致密砂岩气储层下限	(80)
二、经验统计法确定致密砂岩气储层上限	(82)
第二节 孔喉半径确定致密砂岩气物性界限	(84)
一、微观孔喉内天然气受力因素	(84)
二、上古生界致密砂岩储层下限孔喉半径的确定	(86)
三、上古生界致密砂岩储层上限孔喉半径的确定	(87)
四、上古生界致密砂岩储层物性界限的确定	(93)
第三节 上古生界砂岩储层的致密状态	(98)
一、储层孔喉中值半径角度分析致密状态特征	(98)
二、储层物性角度分析致密状态特征	(103)
第六章 盆地东部上古生界致密砂岩成岩—成藏耦合关系	(106)
第一节 上古生界储层致密化恢复	(106)
一、恢复砂岩初始孔隙度	(106)

二、计算压实、胶结作用造成的孔隙度损失量·····	(107)
三、计算溶蚀作用造成的孔隙度增加量·····	(109)
第二节 上古生界致密砂岩天然气成藏期次·····	(112)
一、自生伊利石确定上古生界天然气成藏期次·····	(112)
二、流体包裹体确定上古生界天然气成藏期次·····	(115)
第三节 上古生界致密储层成岩—成藏耦合·····	(125)
第七章 盆地东部上古生界致密砂岩气成藏控制因素·····	(129)
第一节 生气强度及其控气作用·····	(129)
第二节 盖层条件及其控气作用·····	(135)
一、泥岩排替压力特征·····	(136)
二、泥岩累计厚度特征·····	(137)
第三节 储层条件及其控气作用·····	(144)
第四节 盆地东部致密砂岩气聚集模式·····	(148)
参考文献·····	(150)

第一章

绪 论



第一节 致密砂岩储层成岩—成藏耦合研究目的及意义

在能源问题关系到经济发展及社会稳定的背景下,非常规天然气由于其巨大的资源潜力和经济效益而被各国政府所重视。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(Law, 2002)。随着非常规天然气勘探开发技术水平的发展,全球范围内非常规天然气资源量的评价认识在不断改变提高,其中针对致密气资源量的评价结果由早期的 $210 \times 10^{12} \text{m}^3$ 增长到最新的 $2037 \times 10^{12} \text{m}^3$, 15 年内资源量增长近 10 倍(Rogner, 1996; Kawata 等, 2001; Dong 等, 2011)。截至 2011 年年底国内已发现 15 个致密砂岩大气田,其探明天然气地质储量为 $3.3 \times 10^{12} \text{m}^3$,年产量达 $256 \times 10^8 \text{m}^3$,致密砂岩大气田总储量和年总产量分别约占全国天然气储量和产量的 39% 和 25%(李建忠等, 2012)。非常规油气是未来全球油气工业持续发展必然的接替领域,其勘探理论和关键技术的总结推广,势必成为油气地质学的下一次大飞跃。因此,汲取国外针对致密砂岩气的经验、理论和技术,深入剖析具有中国特色致密砂岩气区的地质特征和形成机制,以完善致密砂岩气聚集的勘探实践和地质理论。

鄂尔多斯盆地最新的资源评价结果表明其天然气总资源量为 $15.16 \times 10^{12} \text{m}^3$,致密气资源量为 $10.37 \times 10^{12} \text{m}^3$ 且其累计地质储量约为 $3.53 \times 10^{12} \text{m}^3$,其中以苏里格、榆林和神木气田为大型致密气田的代表(杨华等, 2012)。勘探实践以及大量实验分析表明,鄂尔多斯盆地上古生界砂岩气藏主要为致密砂岩气藏。盆地东部上古生界致密砂岩气藏整体显示出低孔、低渗、低丰度、大面积分布的特征,同时具有含气层系多、分布复杂、储层非均质性强和部分层段气层产量低的状态特点;上古生界不同层段在沉积相、沉积组分、成岩作用、埋藏史、热演化史及成藏期次等因素上的差异,导致其物性显示出较大的差异,对

天然气勘探部署决策以及后期开发效果造成一定的影响。对致密砂岩气气藏形成机理的研究,首要解决的就是砂岩储层的成岩致密过程与天然气成藏之间的耦合关系。从不同含气层段的不同岩性条件下切入致密砂岩储层内部,在成岩作用特征、致密过程恢复及其致密成藏耦合关系等方面进行详细解剖。

第二节 致密砂岩储层成岩—成藏耦合研究现状与存在问题

一、致密砂岩成岩演化研究现状与存在问题

自从 Walther 在 1983 年提出现代成岩作用的概念之后,越来越多的地质工作者意识到成岩作用对沉积岩演化的重要影响,同时成岩、成矿和油气成藏之间的关联性更为突出。从 20 世纪 70 年代开始,鉴于当时世界性能源紧缺以及对次生溶蚀孔隙的研究认识,对于成岩作用的研究更多地考虑到其与有机物质演化之间的相关性,即储层成岩反应过程中无机矿物和有机烃类之间的相互作用,重点评价有机烃类演化过程和无机储集空间的形成演化之间的关系(Hower et al., 1976; Schmidt et al., 1977; Curtis, 1977, 1978)。随着盆地成烃—成岩过程的研究不断深入,更具有针对性的检测方法和技術被应用在成岩作用的分析研究领域(Boles and Franks, 1979; McDonald and Surdam, 1984; Gautier, 1986; Surdam et al., 1984、1989; Chen et al., 1990; Wolf and Chilingarian, 1992、1994; Bjorlykke, 1993; Pedersen P et al., 1994; Nunn, 1994; Horbury et al., 1993)。同时期国内的研究学者对诸多含油气盆地储层成岩作用开展分析研究,针对中国陆相地质条件下含油气盆地储层成岩作用进行了系统地研究,并以此归纳不同含油气盆地成岩作用规律(朱国华, 1980, 1985; 朱家祥等, 1988, 1989; 郑浚茂等, 1989; 刘宝珺等, 1992; 应凤祥等, 1993, 2003; 裴泽楠等, 1994, 1996; 柳益群, 1995, 1996, 2009; 肖丽华等, 1995)。

通过自“八五”至“十一五”近二十年的系统研究,国内不同含油气盆地的成岩作用研究均取得较大进展。碎屑岩储层在埋藏过程中经历了复杂的物理化学变化,成岩过程中矿物的溶解和沉淀与其成岩环境的酸碱状态密切相关(孟元林等, 1996; 李忠等, 1998; 赵伦, 1998; 王琪等, 1998, 2001; 吕明, 1999; 陆永潮, 1999; 邱隆伟等, 2001、2006; 史基安等, 2003; 寿建峰等, 2005; 宁宁等, 2007; 郑荣才等, 2007)。通过分析盆地内流体介质性质、成岩物质以及其成岩环境的差异性,建立淡水—半咸水盆地、盐湖盆地和含煤盆地的砂岩成岩模式(郑浚茂等, 1997);提出淡水—半咸水介质盆地砂岩成岩作用的主要特征是早期的压实和胶结作用相对较弱,黏土矿物演化序列正常且发育次生孔隙带,物性整体较好;而酸性水介质盆地(含煤盆地)砂岩成岩作用的主要特征是早期强压实使原生孔隙快速降低,后期有机酸溶解部分矿物形成次生孔隙带,由于强压实和自生矿物胶结使砂岩喉道连通性变差,显示出“孔大喉细”的特征。

成岩作用可作为影响有利储层形成和分布的主控因素,无论在勘探阶段还是开发过程中均是研究的难点。因为沉积相只能决定储集层的空间分布和原始物性,而储集层的最终物性则由成岩作用控制(曾大乾等,1994;裘怿楠等,1997;郑浚茂等,1997;Alaa M et al.,2000)。油气聚集富集并最终成藏的过程中,岩性—地层油气藏的主要控制因素是沉积相和成岩相(贾承造等,2004;邹才能等,2005)。成岩作用研究范围也逐步由局部单井扩展到整个盆地,在盆地三场(地温场、流体场和应力场)的大背景下分析成岩作用对储集性能的影响,建立微观砂体小尺度成岩特征与宏观盆地大尺度成岩演化的空间—时间的响应。不仅从定性角度分析成岩作用,还要更多的从定量角度分析成岩作用特征,以成岩相、成岩数值模拟和动力成岩作用等思路来量化分析(张枝焕等,2000;李忠,2006;焦养泉等,2004;罗静兰等,2001,2006;黄思静等,2001,2003;刘林玉等,2002;钟大康等,2003;孟元林等,2000,2003;张金亮等,2004;寿建峰等,2005,2006;刘成林等,2005;邱隆伟等,2006、2007;刘建清等,2006;朱筱敏等,2007;侯明才等,2009;杨智等,2010)。成岩相体现不同温压条件下储层内不同类型流体对原始沉积物的一系列综合改造结果;虽然不同研究者对成岩相的表述存在差异,但其中对于成岩作用及其产物等内容的认识上分歧不是很大(杨小萍等,2001;刘锐娥等,2002;邹才能等,2005、2008;季汉成等,2008)。

不同的非常规含油气盆地因其地质背景、成藏类型和成藏状态的不同,从而使得其内成岩作用研究结果显示出更多的差异性,即使同一盆地同时期储层的成岩作用也显示出区域性差异。成岩作用的研究范围从整个盆地精细到局部单井,注重大尺度成岩共性与小尺度成岩差异的配套分析(李忠等,2006;吕正祥等,2009;柳益群等,2009)。随着非常规油气地质研究的深入,尤其是低渗透超低渗透致密砂岩储层的形成机理,使许多成岩作用认识出现分歧。是否会大规模出现砂岩次生孔隙带?成岩过程中自生矿物的物质来源于内部颗粒溶解还是外部泥岩提供?储层致密状态下溶解物质交换是否能充分进行?这些问题都有待进一步研究确认。

二、致密砂岩储层界限研究现状

致密砂岩气(tight gas sandstone)最突出的特点就是储层致密,即其孔、渗参数低于常规储层,因而被划分到非常规天然气大类中。通过近40年来针对致密砂岩气界限的研究进展可知,致密只是一个相对的概念,划分标准和界限因不同国家、不同时期的资源状况和技术条件差异而有所不同,故致密砂岩气目前尚未提出严格的界限标准。致密砂岩气储层与常规砂岩气储层之间没有非常明确的界限,尤其考虑到致密砂岩储层较强的非均质性,两者之间通常情况下为过渡界限。两者之间的界限或差异,更多的应该体现在经济因素或开发因素方面。

美国联邦能源管理委员会(FERC)根据1978年美国天然气政策法规的规定,确定致密气藏的标准为原地储集层渗透率小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (Law, 1986);Spencer(1985)将致密

储层的渗透率上限定为 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ；Holditch(2006)通过勘探实践认为，只有采取压裂或水平井等工业措施后，致密砂岩气储层才能获得经济产量。加拿大非常规天然气协会(Dixon et al., 2007)将碎屑岩和碳酸盐岩储层中区域性连续分布的游离气称为致密气。Nehring(2008)不仅将渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的定义为致密气，还将渗透率介于 $(1 \sim 10) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间的也等同视之。

关德师等(1995)在国内最早提出致密砂岩气(tight sandstone gas)的概念，即指孔隙度低($<12\%$)、渗透率比较低($1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)、含气饱和度低($<60\%$)、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。早期部分学者(袁政文等, 1990; 许化政, 1991; 杨晓宁等, 2005)将地面渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、孔隙度小于12%的储层界定为致密气储层；随后部分学者(刘吉余等, 2008; 张哨楠, 2008)将致密砂岩描述为绝对渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、孔隙度小于10%的储层。

邹才能等(2009、2010)在国外非常规致密砂岩气研究的基础上，结合国内研究成果提出致密砂岩气储层首先显示出不采取工业措施无自然工业产量的特征，该类砂岩储层的孔隙度多数小于10%，空气渗透率一般小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，孔喉半径整体小于 $1 \mu\text{m}$ 。赵靖舟(2012)对非常规油气概念进行了系统地分析，明确指出常规砂岩气和致密砂岩气均属于源外型非常规气藏。与常规砂岩气相比，致密砂岩气储层致密必须经过压裂措施才能获得经济产量的程度，其物性表现为绝对渗透率低于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。结合国内外对低渗透—致密气藏的研究成果，将气藏按照其渗透率分为三大类：常规气藏，气层渗透率大于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ；低渗透气藏，气层渗透率介于 $(1 \sim 10) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间；致密气藏，气层绝对渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

随着非常规油气地质理论认识的深入，对于鄂尔多斯盆地内伊陕斜坡区大气田性质的认识也发生转变，从早期的常规岩性气藏(付金华等, 2005, 2008)逐渐转变为非常规致密砂岩气藏(邹才能等, 2009, 2011; 赵靖舟等, 2010; 杨华等, 2012)。最新的研究成果显示(赵靖舟等, 2012)，鄂尔多斯盆地上古生界气藏类型为“准连续型气藏”，即介于常规气藏与非常规气藏或不连续型与连续型天然气聚集之间的一种过渡类型。

三、致密砂岩储层成岩—成藏耦合研究现状

前人对鄂尔多斯盆地上古生界砂层的成岩作用展开了大量地分析研究，结果显示上古生界砂岩储层在早白垩世末期的埋深多超过4000m，平面上约85%的储层达到高成熟演化阶段，孔隙组合以次生溶孔和微孔为主。盆地上古生界煤系地层显示较为明显的酸性水介质环境，一定程度上阻止了早期碳酸盐胶结物形成，并且导致长石及凝灰质等组分大量溶解，改善了砂岩储层的储集性能(付金华等, 2001; 惠宽洋等, 2002; 赵国泉, 2005; 刘小洪, 2006; 宁宁等, 2007; 丁晓琪等, 2007)。

上古生界烃源岩在晚侏罗世到早白垩世已普遍进入成熟—高成熟阶段，同时期盆地上古生界生气强度大于 $16 \times 10^8 \text{km}^2$ 的区域约占整体的75%，显示出“广覆式生排烃”和“持

续充注、累积聚气”的特征(任战利等, 1995, 2007; 刘新社等, 2000, 2007; 窦伟坦等, 2010)。

前人对鄂尔多斯盆地上古生界砂岩储层成岩与成藏关系也进行过分析, 目前以“先致密、后成藏”为主流认识。刘新社等(2007)通过分析盆地上古生界气藏的形成过程, 提出三个演化阶段: 石炭—三叠系砂岩首先经历成岩早期的快速压实作用, 形成一定量的硅质胶结物, 与此同时液态烃开始充注进入砂岩储层; 随后侏罗纪机械压实作用使得原生孔隙大量消失, 储层内自生矿物的胶结作用与早期气态烃类充注同时进行, 形成较为致密的储层; 早白垩世期间虽然只有少量的硅质胶结物形成, 但储层整体较为致密, 随后大量生成天然气充注进入致密储层内。李仲东等(2008)结合盆地埋藏史和热演化史分析认为, 上古生界储层内大规模油气运移时期明显晚于砂岩储层的致密化过程。窦伟坦等(2010)认为苏里格气田天然气成藏具有先致密、后成藏的特点, 天然气以近距离运聚成藏为主, 侧向运移规模小。杨华等(2012)分析认为晚侏罗世—早白垩世末是盆地上古生界天然气的主成藏期, 但该时期上古生界砂岩储集层已完成致密化过程, 多数砂岩储层的孔隙度小于 10%, 显示出“先致密、后成藏”的特征。

第三节 致密砂岩储层成岩—成藏耦合主要研究内容

通过岩心观察、常规薄片、铸体薄片、扫描电镜、常规压汞测试、恒速压汞测试、岩心核磁共振测试、伊利石 K—Ar 测年和流体包裹体测温以及组分测定等现代分析化验测试手段, 结合盆地埋藏—热演化史等资料, 对鄂尔多斯盆地东部上古生界致密砂岩储层的成岩作用及成岩相特征进行了深入地研究, 根据盆地天然气聚集的实际地质状态推算致密储层物性上下限, 将其与储层孔隙致密化过程恢复结合来确定储层的致密时间; 并与储层内大量天然气富集成藏的时间对比耦合, 从而确定上古生界不同岩性致密砂岩储层的成岩—成藏耦合关系。具体包括以下研究内容:

1. 上古生界致密砂岩储层成岩作用特征

在大量岩石薄片观察的基础上, 研究致密砂岩储层的成岩作用类型及特点, 确定成岩演化期次以及成岩演化序列。在对比主要含气层段成岩相特征的基础上, 分析其内天然气富集聚集状态, 研究成岩环境对储层后期成岩作用的影响。

2. 上古生界致密砂岩储层界限的确定

储层致密界限状态主要从成藏动力角度方面研究, 着重分析天然气运移动力平衡状态下微观孔喉的状态。从微观孔喉体系角度入手, 考虑单位质量天然气在浮力、水动力、毛管阻力和异常超压 4 种受力向量下状态的平衡状态, 根据盆地不同时期地层条件下的相应参数, 推算其致密界限的孔喉大小; 最终依据孔喉中值半径与孔隙度、渗透率交汇趋势, 推算其相应的孔渗上下界限。

3. 上古生界致密砂岩储层成岩—成藏耦合

在确定初始孔隙度的基础上，首先恢复压实作用造成的孔隙损失量，然后根据胶结物形成序列及其含量差异，确定不同类型胶结作用造成的孔隙损失量。同理，再确定不同类型溶蚀作用造成的孔隙增加量。最终按成岩演化序列将二者结合，从而还原储层砂岩的致密化过程。依据推算的上古生界致密砂岩储层致密上下限确定研究区储层致密时间，将其与储层内天然气大规模聚集富集的时间耦合分析，最终确定研究区上古生界致密砂岩储层特有的成岩—成藏耦合关系。

第四节 致密砂岩储层成岩—成藏耦合研究思路及技术方法

以钻井、测井、分析化验等静态资料与试气、试采等动态资料为基础，以现代油气成藏理论为指导，采用地质综合分析与先进实验分析技术相结合、静态研究与动态研究相结合、现今特征与历史分析相结合的基本研究思路，从区域地质分析入手，在盆地构造—沉积演化分析的基础上，以盆地东北部上古生界的天然气藏为剖析点，分析主要含气层段成岩作用特征及其成岩演化特点。

综合利用岩石常规薄片、孔隙铸体薄片技术、阴极发光、电镜扫描、X 衍射、包裹体测温、同位素测年和伊利石测年等技术，研究油气充注对鄂尔多斯盆地上古生界山西组和石盒子组低孔低渗储层的成岩演化序列的影响，结合埋藏史研究，探讨成岩演化过程中天然气的生成—运移—聚集的耦合关系(图 1-1)。

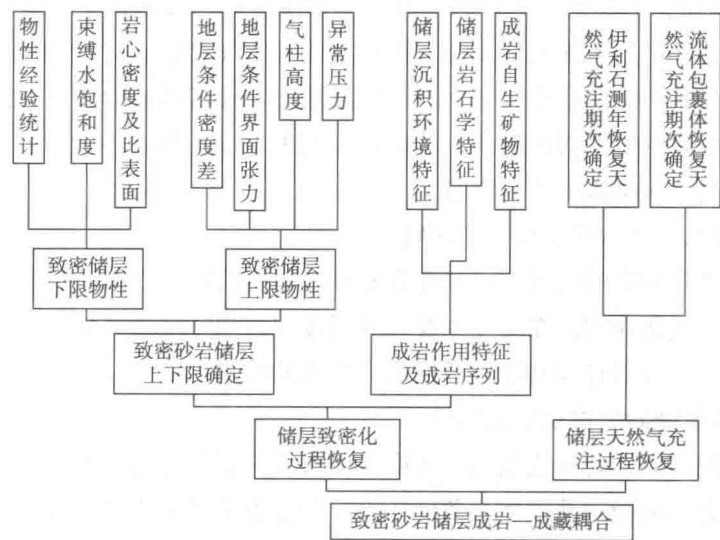


图 1-1 鄂尔多斯盆地上古生界致密砂岩成岩—成藏耦合研究技术路线图

第二章

鄂尔多斯盆地东部上古生界地质条件



第一节 区域地质概况

鄂尔多斯盆地，包括桌子山和六盘山以东、太行山以西、阴山和大青山以南至秦岭的广大地区，行政区域横跨陕、甘、宁、蒙、晋五省（区）。盆地主体面积约 $25 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，其内天然气、煤层气、煤炭三种资源探明储量均居全国首位，整体显示出“半盆油、满盆气”和“南油北气、上油下气”的油气聚集特征。

鄂尔多斯盆地是一个整体升降、拗陷迁移和构造简单的大型多旋回克拉通盆地，盆地基底为不同变质程度的变质岩系组合（形成于太古代及早元古代），志留纪—泥盆纪时期由于处于抬升剥蚀状态缺失地层，自寒武系开始至第三系结束盆地不同区域均有沉积显示。根据基底变质程度、构造特征和演化发展的差异性，将其划分为六个构造单元（图 2-1）。

（1）伊盟隆起：在太古代中元古代结晶基底之上发展，随后的演化过程中一直处于凸起状态。伊盟隆起的南坡在晚古生代由南向北超覆沉积了上古生界和中新生界地层，下二叠统太原组直接沉积在基底之上，而下二叠统山西组受基底影响呈现自北东向南西倾伏的形态。

（2）渭北隆起：处于活动构造带（秦岭造山带）与稳定地块（鄂尔多斯地块）的过渡地带，北接陕北斜坡，西临西缘逆冲带，东止汾河地堑。在中生代之前仅为一向南倾斜的斜坡，随后抬升而形成隆起；新生代渭河地区断陷下沉之后，渭北隆起的抬升更为明显。

（3）晋西挠褶带：虽然在上、下古生代均显示凸起状态，但其西侧在中晚石炭世及早二叠世出现薄层沉积。黄河以东中生代沉积地层抬升较快，形成南北走向的晋西挠褶带。

（4）陕北斜坡：结晶基底起伏较小，呈向西南倾斜的平缓单斜；沉积盖层倾角不到 1° ，坡降介于 $4 \sim 10 \text{ m/km}$ 之间。在中寒武世至早奥陶世期间沉积了海相碳酸盐岩地层，随后整体抬升风化剥蚀，在晚石炭世之后开始沉积陆相碎屑岩。陕北斜坡在侏罗纪已显示

出锥形，而在早白垩世之后快速成型。

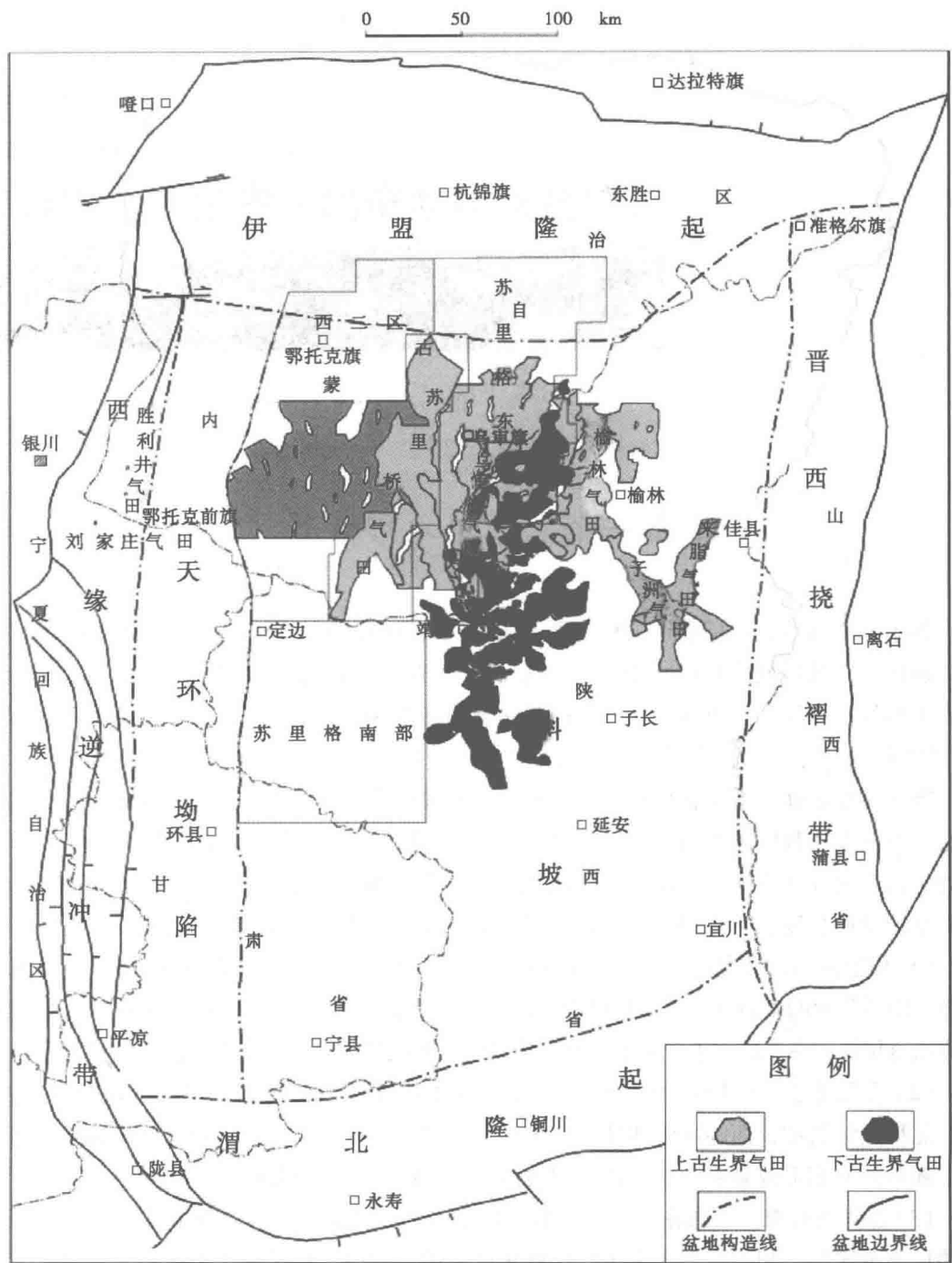


图 2-1 鄂尔多斯盆地现今构造单元及气藏展布图

(5)天环坳陷：整体近南北向展布，晚三叠世延长组在平凉地区的沉积厚度可达 3000m 左右，表明其为当时的沉降中心。在晚侏罗世到晚白垩世期间受燕山运动的影响，

是西缘冲断构造带向东推覆和隆升的结果。

(6) 西缘冲断构造带：整体近南北向展布，具有东西分带、南北分段的特征。构造作用复杂且变形强烈，表现为一系列西倾的大型逆冲断层，并伴随着同生和由断层牵引而形成的褶皱，其内部发育多种类型的断层。

鄂尔多斯盆地构造演化分为以下几个阶段：中晚元古代盆地整体处于坳拉谷发育阶段，太古代及早元古代的变质岩受晋宁运动影响形成盆地基底；受加里东运动影响盆地整体抬升，所以早古生代开始盆地处于陆缘浅海台地发展阶段；晚古生代盆地在早古生代台地基础上发展为滨浅海平原，受海西运动影响盆地主体为隆起区且沉降速度稳定；中生代盆地处于内陆盆地发展阶段，受燕山运动影响使盆地显示出西部冲断东部抬升，南北部同时隆升而内部相对平缓的构造特征；晚白垩世至新生代，盆地受喜山运动影响整体隆起，而周边形成新生的河套、银川、六盘山和汾渭等一系列小型断陷。

受不同时期构造运动的影响，盆地部分地层之间显示假整合或平行不整合的接触关系，存在四期较为清晰的不整合界面，分别为三叠系和侏罗系之间、侏罗系内延安组 and 直罗组之间、侏罗系和白垩系之间、白垩系和第四系之间。如图 2-2 所示，侏罗系—白垩系、白垩系—第四系之间地层剥蚀较为强烈(赵孟为等, 1996; 陈瑞银等, 2006)。

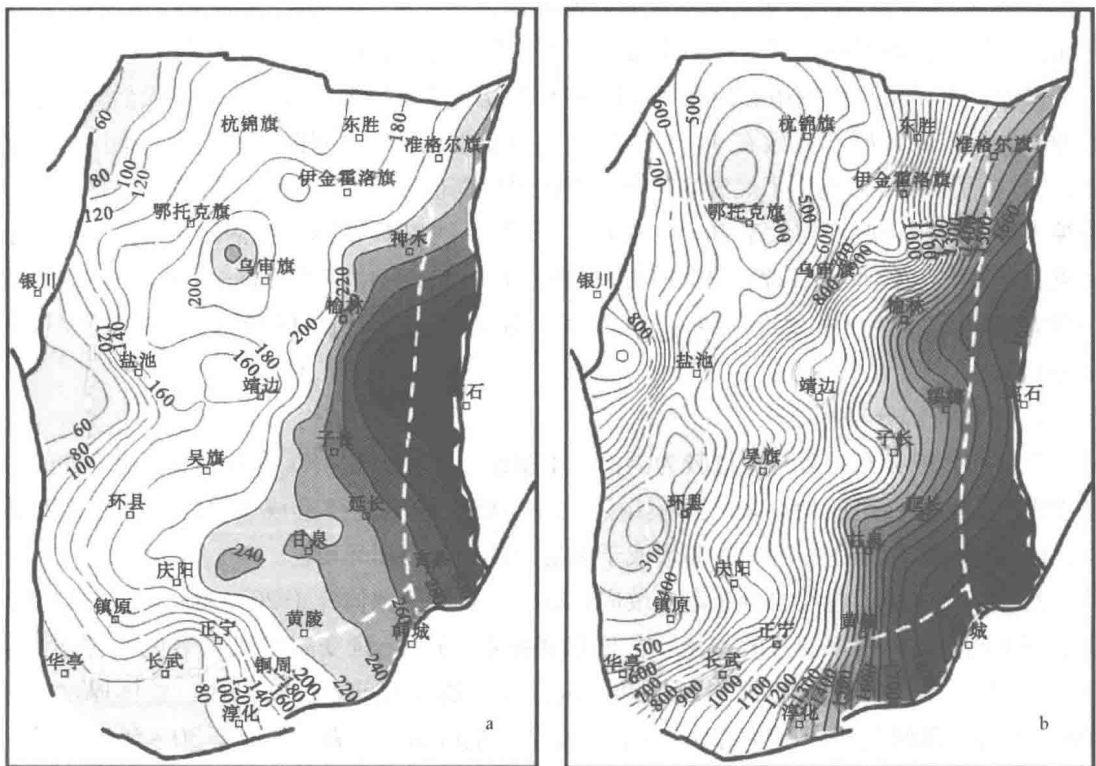


图 2-2 鄂尔多斯盆地主剥蚀期地层剥蚀厚度等值线

(陈瑞银等, 2006; a—侏罗纪末期; b—早白垩世末期; 单位: m)