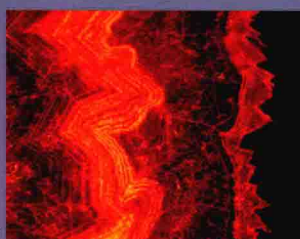


中国海相碳酸盐岩 储层成因与分布



何治亮 钱一雄 樊太亮 胡文瑄 等 著
鲍征宇 李国蓉 焦存礼 陈代钊



中国海相

碳酸盐岩储层成因与分布

何治亮 钱一雄 樊太亮 胡文瑄 等 著
鲍征宇 李国蓉 焦存礼 陈代钊



科学出版社
北 京

内 容 简 介

本书在对碳酸盐岩岩石与储层分类综述的基础上,重点介绍了白云岩尤其是微生物白云岩研究的最新成果、碳酸盐岩溶蚀实验方法以及碳酸盐岩储层的溶蚀机理。论述了中国海相碳酸盐岩层系主要储层类型与形成的区域地质背景。分别对岩溶型、礁滩型、白云岩型储层的岩石类型、储层空间特征、成岩作用、储层发育与分布的地质模式进行了系统研究。完善了白云岩成岩流体研究的方法体系,并基于碳酸盐岩储层孔隙微观结构的数字图像分析,采用分形理论,建立了碳酸盐岩储层孔隙组构的二维、三维定量表征新方法。总结了塔里木盆地、四川盆地和鄂尔多斯盆地碳酸盐岩储层的分布规律,建立了地质与地球物理相结合的碳酸盐岩储层评价预测方法,并对三大盆地重点层系和地区的储层进行了分布预测和评价。

本书适合于从事海相碳酸盐岩油气地质研究与勘探管理决策的专业人员阅读,也可供高等院校地质与地球物理等相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

中国海相碳酸盐岩储层成因与分布 / 何治亮等著. —北京: 科学出版社, 2016

ISBN 978-7-03-046530-6

I. ①中… II. ①何… III. ①海相-碳酸盐岩-储集层-矿床成因-中国 ②海相-碳酸盐岩-储集层-地理分布-中国 IV. ①P588.24

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 285573 号

责任编辑: 韦 沁 韩 鹏 李 静 / 责任校对: 张小霞
责任印制: 肖 兴 / 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>

北京利丰雅高长城印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 6 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2016 年 6 月第一次印刷 印张: 26 1/4

字数: 622 000

定价: 358.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

本书主要作者名单

何治亮	钱一雄	樊太亮	胡文瑄
鲍征宇	李国蓉	焦存礼	陈代钊
谢淑云	高志前	朱井泉	张军涛
朱东亚	沃玉进	彭守涛	尤东华
李宏涛	张宏	由雪莲	吴仕强

序

储层是油气地质研究的重点内容之一。

全球范围内，碳酸盐岩储层中的油气产量约占总产量的 2/3。特别是中东、北美、前苏联的许多大型-特大型油气田均与碳酸盐岩储层密切相关。

经过几代油气地质学家的共同努力，我国先后在四川、鄂尔多斯、渤海湾、塔里木等盆地的碳酸盐岩地层中发现了可观的油气资源。特别是近 20 年来，先后在塔里木盆地发现了塔河-轮南和塔中油气田，在四川盆地发现了普光、龙岗、元坝和安岳等气田，在鄂尔多斯盆地发现了靖边气田，展示出我国前新生代海相碳酸盐岩巨大的资源潜力和美好的勘探前景。

碳酸盐岩储层大致可分为四大类：生物礁滩型、白云岩型、风化壳岩溶型和构造裂缝型。受生物礁、滩控制的碳酸盐岩储层是世界上最早引起关注的重要的储层类型。由于礁、滩体大多呈层状或者块状分布，孔隙度较高，因此，生物礁、滩体往往能形成储量大、单井产量高的自生自储型油气藏。一个典型的例子是沙特阿拉伯的加瓦尔（Ghawar）油田，主要产层为侏罗系碳酸盐岩台内颗粒滩相储层，可采储量约 133 亿 t。在深层碳酸盐岩油气藏勘探中，白云岩储层占有极其重要的地位。根据 C&C 公司对世界上 342 个碳酸盐岩油气藏进行的统计结果表明，随着埋深的增加和地质时代的变老，白云岩油气藏所占的比例大幅度增加。在埋深 4500m 以下和早古生代及其以前地层中所发现的碳酸盐岩油气藏，其储层大多是白云岩。卡塔尔诺斯（North）气田二叠系和三叠系的白云岩储层中，可采储量达 22 万亿 m³，为世界上最大的气田。因此，自 20 世纪 70 年代以来，白云岩储层越来越被广泛关注。碳酸盐岩岩溶储层也是国内外石油地质学家普遍关注的重点领域之一，尤其是与大型不整合面风化壳有关的岩溶储层。20 世纪末，在塔里木盆地奥陶系不整合风化壳岩溶型储层中，发现了塔河大油田并成功投入了规模开发，对这类储层的研究工作得到了普遍的重视。碳酸盐岩裂缝型储层曾经是四川盆地海相领域的重要储集体，由于气藏规模有限，后期重视程度有所减弱。近年来，随着中国油公司积极走向海外，在以扎格罗斯山前带为代表的油藏勘探评价和开发研究过程中，裂缝型储层又成为了新的研究重点。

我国海相盆地具有资源潜力大，勘探领域多，同时又具有多旋回、强改造的特点，油气成藏条件非常复杂。国家相关部委高度重视海相碳酸盐岩领域的油气勘探开发研究工作，从“十五”开始，先后设立了多项国家重点基础研究发展计划（973 计划）项目，旨在解决我国海相油气勘探领域所面临的应用基础理论与技术问题。“十一五”、“十二五”期间，国家又设立了相应的油气重大专项，对中国海相盆地的勘探理论与技术进行了系统研究，支撑了各大探区的油气勘探开发工作。我本人有幸牵头组织完成了相关项目的工作，参与了何治亮、樊太亮、胡文瑄、鲍征宇、钱一雄、陈代钊、李国蓉、朱井泉、于炳松等学者组成的碳酸盐岩储层研究团队对中国海相碳酸盐岩储层面临的科学问题、攻关目

标和研究思路的讨论,跟踪了研究进程,近距离了解和感受了团队所作的探索性很强、也是卓有成效的工作。

与国际上典型的碳酸盐岩油气田(藏)相比,我国碳酸盐岩储层具有地质时代老、演化历史长、埋藏深度大、非均质性强等突出特点。十年来,这个团队完成了大量针对性的实物工作量,在塔里木盆地、四川盆地、鄂尔多斯盆地及周缘开展了艰苦的野外地质调查和钻井岩芯观察,并与国内外典型露头、岩芯进行了对比研究,利用先进的测试装备进行了数万项次的实验,解释了大量的地震、测井资料,编制了数千幅各类图件,积累了丰富的第一手资料。团队开展了大量创新性工作,取得了一批有分量的理论和技术成果。根据碳酸盐岩易于溶蚀也易于充填的基本特点,既重视沉积建造研究,又重视后期成岩改造研究。强调地质-地球物理-地球化学的紧密结合,形成了清晰系统的研究思路与工作流程。针对不同盆地和层系的碳酸盐岩储层,开展了储层形成的地球动力学背景、碳酸盐岩溶蚀动力学实验、热力学模拟计算等机理研究,深化了优质岩溶型、礁滩型、白云岩储层发育机理与分布模式的认识,建立了碳酸盐岩非均质性油气储层地球物理综合预测方法。这些成果多次在国内外学术交流平台上进行了展示,得到了广泛关注和好评。相关理论技术成果也在塔里木、四川、鄂尔多斯海相领域的勘探开发实践中进行了应用,有效地支撑了勘探发现与规模开发。

何治亮教授组织碳酸盐岩储层研究团队将近十年的研究成果进行了系统的梳理,完成了这部《中国海相碳酸盐岩储层成因与分布》专著。相信这部专著的出版,将为我国海相碳酸盐岩油气地质理论和勘探评价技术增砖添瓦,为深化具有中国特色的海相碳酸盐岩储层的研究,实现油气勘探的不断突破,发挥重要的推动作用。

“雄关漫道真如铁,而今迈步从头越。”经过几代石油工作者的艰苦努力,中国海相领域的勘探开发已经取得了举世瞩目的成就。未来的勘探开发尽管面临更大更多的挑战,随着油气地质理论和勘探技术的进步,相信还会取得越来越多的发现与突破。我也相信在未来的科研工作与勘探实践过程中,这个产、学、研有机结合的碳酸盐岩储层研究团队也将会取得更加丰富多彩的学术与应用成果,为我国能源事业做出更大的贡献。

特此作序。

中国科学院院士



2016年6月

前 言

自 20 世纪 50 年代以来,随着地质认识和勘探技术的突破,在全球多个大型盆地的海相碳酸盐岩层系中,油气勘探不断获得了一批重大发现,为世界油气行业的繁荣和发展作出了突出贡献。从世界范围看,碳酸盐岩储层的油气产量约占总产量的 2/3,特别是中东、北美、苏联的许多大型-特大型油气田的油气产层均为碳酸盐岩储层。

碳酸盐岩储层研究历史由来已久,资料积累也非常丰富,目前仍然是国际地学界的热点研究领域。随着研究手段和技术的不断进步,碳酸盐岩沉积学、储层地质学、地球物理等理论认识也在不断完善,为油气勘探不断取得重大发现和规模性商业开发提供了关键的理论与技术支持。

中国海相碳酸盐岩分布广、厚度大、领域多,但由于地质条件复杂,海相优质碳酸盐岩储层发育、分布、描述与预测技术一直是制约勘探开发的重大瓶颈问题。

面对国家油气供需缺口不断增大的严峻形势,为了推进我国海相碳酸盐岩层系油气勘探的理论技术进步,提高勘探效率,国家科技部先后设立了两轮国家重大专项(“海相碳酸盐岩层系优质储层分布与保存条件评价(2008ZX05005-2、2011ZX05005-002)”和两轮 973 项目(“中国海相碳酸盐岩层系多种储层形成机理与分布模式(2005CB422103)”及“下古生界碳酸盐岩优质储层形成与分布预测(2012CB214802)”),以及国家自然科学基金委员会设立了石油化工联合基金项目“深层-超深层规模性白云岩储层形成机理与地质模式(U1663209)”,这五个项目就三大盆地海相碳酸盐岩层系优质储层形成与分布这一重大科学问题进行研究。中国石化也先后设立了一系列重点科技攻关、勘探先导和相关油田的生产支撑项目,先后对塔里木、四川、鄂尔多斯盆地一些重点层系和重点地区的碳酸盐岩储层的理论与技术问题进行了深入的研究和攻关。中国石化石油勘探开发研究院联合中国地质大学(北京)、南京大学、中国地质大学(武汉)、成都理工大学、中国科学院地质与地球物理研究所和中国石化西北油气分公司、西南油气分公司,前后组成了一个近百人的研究团队,开展了联合攻关研究。总体目标是通过系统分析以下古生界为主的海相碳酸盐岩层系的多类型储层形成的区域动力学条件,明确在常温、常压和高温、高压条件下碳酸盐岩溶蚀作用与储层成因机理;建立不同盆地、不同层系碳酸盐岩的沉积模式,总结不同类型有利储集体的发育分布规律;研究不同类型储层成岩作用与成岩环境,建立优质储层发育的地质模式;分析不同类型优质储层地震响应特征,建立不同类型优质储层地质地球物理预测方法,开展储层描述和评价。

近十年来,这个“产、学、研三结合”科学研究团队完成了大量针对性的实物工作量。在塔里木、四川、鄂尔多斯盆地及周缘开展了艰苦的野外地质调查和钻井岩心观察,测制地表露头剖面近百条,观察岩心几百口,并与国内外典型露头、岩心进行了对比研究。采集地表井下样品数千块,利用先进的测试装备进行了数万项次的实验,获得了大量的分析数据。拍摄各类图片、编制图版数万幅。解释了二维地震剖面 1 万多千米、三维地震近万平方千米,处理解释测井资料数百口井。编制了储层柱状图、沉积相图、古地质

图、储层地震预测图、储层评价图等各类图件数千幅,积累了丰富的第一手资料。通过数十个专题的研究,取得了丰富多彩的阶段成果。先后在国内外学术刊物上发表学术论文一百多篇,还形成了部分发明专利、申报了多项软件著作权,编写了多项企业技术标准。先后多次组织了以碳酸盐岩储层为主题的学术研讨会和专题工作讨论。积极参与了塔里木、四川、鄂尔多斯盆地的地质研究与勘探评价部署工作,研究成果得到了及时转化,推动了部分重点地区的油气重大发现与突破。

为了使从事碳酸盐岩研究的同行们了解中国三大盆地海相碳酸盐岩储层的基本地质特征、类型、成因和分布特征,本专著以前述项目攻关成果为基础,重点通过对岩溶型、礁滩型和白云岩三大类储层形成的地质背景、发育特征、成因机制、主控因素与分布规律等方面的归纳、总结,力求使研究成果更具代表性和典型性。在研究过程中还创建了基于分形理论的碳酸盐岩储层孔隙组构图像的二维和三维数值定量表征新方法,并形成了相应的软件系统,为储层表征与描述增添了新手段。

本专著由何治亮主持编写。各章的主要执笔人如下:前言、绪论由何治亮编写;第一章由胡文瑄、鲍征宇、朱井泉、谢淑云、范明、于炳松、由雪莲编写;第二章由樊太亮、李国蓉、张军涛、焦存礼、何治亮、高志前编写;第三章由钱一雄、何治亮、沃玉进、李文厚、李淑筠、张军涛、朱东亚、尤东华、彭守涛、吴仕强编写;第四章由李国蓉、樊太亮、高志前、李宏涛编写;第五章由陈代钊、胡文瑄、钱一雄、焦存礼、张军涛、何治亮编写;第六章由鲍征宇、谢淑云编写;第七章由何治亮、焦存礼、李国蓉、张宏、张军涛、沃玉进、罗开平、朱东亚编写;最后由何治亮、钱一雄、沃玉进、彭守涛、张军涛统稿定稿;李慧莉、陈强路、杨子川、张涛、邬兴威、吴世祥、魏水建、游瑜春、刘伟新、廖太平、蒋小琼、陈冬、陈天胜等参与了相关科研工作,发挥了重要作用。还有一批年轻的学者王小林、杨瑞琰、刘玲、邢秀娟、胡晓兰、董少峰、张文涛、冯菊芳、丁茜、王康宁、王晓敏、王鑫、乔博、孟祥杰、阮壮、王利超、黄康俊、雷蕾、彭博等,参与了大量的研究工作并为本项研究作出了重要贡献,在解决一个个学术与勘探生产问题的过程中,他们也经历了专业能力和综合素质的快速提升。

本团队在研究和专著编写过程中,得到了诸多学者和单位无私的帮助。金之钧院士作为上级项目的负责人,对研究工作给予了全面的指导和帮助,特别是在科学问题的凝练和研究重点的把控上,起到了关键作用。研究过程中还得到了牟书令、刘宝珺、孙枢、马宗晋、翟光明、付家谟、戴金星、汪集旻、张国伟、朱日祥、李廷栋、贾承造、王铁冠、马永生、彭苏萍、王成善、陈骏、彭平安、徐永昌、贝丰、赵振华、马福臣、罗治斌、刘池阳、蔡希源、关德范、张永刚、钱基、焦大庆等专家学者的关心和指导,研究过程中分别与魏修成、蔡立国、刘文汇、王清晨、汤良杰、郝芳、刘树根、武恒志、漆立新、张洪安、王恕一、云露、蔡勋育、王国力、李宗杰、吕海涛、王起琮、黄思静、罗平、王国芝、蔡忠贤、刘波、史晓颖等学者专家进行过相关学术问题的讨论和交流,从中得到过很多有益的启示。中国石化西北油田分公司、勘探分公司、西南油气分公司、华北油气分公司、江汉油田分公司和中国石油部分单位为本项研究提供了大量宝贵基础资料,研究过程中也与这些单位专家就有关理论技术问题进行了富有成效的探讨。研究工作还得到了国家科技部、国家自然科学基金委员会、国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”项目办公室、国内外有关院校的大力支持和帮助,在此一并表示衷心的感谢。

目 录

序

前言

绪论	1
参考文献	5
第一章 碳酸盐岩储层类型与溶蚀机理	6
第一节 岩石类型	6
一、碳酸盐岩分类	6
二、白云岩成因分类及鉴别标志	14
三、微生物白云岩研究	18
第二节 碳酸盐岩储层分类	25
一、储层分类方案	25
二、中国海相碳酸盐岩储层类型特征	35
第三节 碳酸盐岩溶蚀机理与实验	40
一、碳酸盐岩溶解动力学研究方法	40
二、碳酸盐岩溶解动力学实验方法	43
三、溶解动力学特征及其控制因素	48
参考文献	62
第二章 碳酸盐岩储层形成的区域地质背景	68
第一节 塔里木盆地碳酸盐岩储层形成的区域地质背景	68
一、盆地概况	68
二、层序格架	70
三、岩相古地理	76
第二节 四川盆地碳酸盐岩储层形成的地质背景	85
一、沉积盆地性质及演化	85
二、重要海相碳酸盐岩层系的层序地层格架	86
三、重要海相碳酸盐岩层系沉积相展布与礁滩体发育分布	107
第三节 鄂尔多斯盆地碳酸盐岩储层形成的区域地质背景	131
一、区域构造特征	131
二、区域地层层序特征	131

三、岩相古地理	135
参考文献	140
第三章 岩溶型储集体的溶蚀与充填过程	142
第一节 综述与方法原理	142
一、概念及分类	142
二、进展与趋势	144
第二节 塔里木盆地奥陶系典型岩溶型储集体特征	145
一、塔中西北部奥陶系碳酸盐岩岩溶储层发育特征	145
二、麦盖提东北部北东向构造潜山带奥陶系岩溶储层特征	154
第三节 鄂尔多斯奥陶系含膏白云岩岩溶型储集体特征	160
一、储层岩石类型	161
二、储层空间类型	163
三、成岩作用分析	164
四、形成演化模式	167
第四节 四川盆地灯影组岩溶型储集体特征	169
一、地表暴露及岩溶发育标志	169
二、区域长期不整合面岩溶	170
三、短期暴露形成的局部层内岩溶储层	172
四、多级次岩溶作用下的白云岩储层发育模式	177
第五节 岩溶型储层形成的主要控制因素与发育模式	179
一、岩溶型储层形成的主要控制因素	179
二、岩溶储层阶段发育模式	184
参考文献	185
第四章 礁滩型储层形成条件与发育模式	188
第一节 综述	188
第二节 四川盆地二叠系、三叠系礁滩相储层形成条件与发育模式	189
一、长兴组—飞仙关组礁滩相储层成岩作用类型与成岩作用序列	190
二、长兴组—飞仙关组礁滩相的白云石化作用	193
三、长兴组—飞仙关组礁滩相的溶蚀作用	203
四、长兴组—飞仙关组礁滩相储层形成条件及发育模式	207
第三节 塔里木盆地寒武—奥陶系礁滩相及礁滩储层特征	224
一、塔里木盆地寒武—奥陶系台缘结构及礁滩相特征	224
二、奥陶系礁滩相储层特征及分布	240
第四节 礁滩储层发育的控制因素与模式	251
一、古气候条件对礁滩储层发育的影响	251

二、海平面变化和古水深对礁滩储层分布的影响	252
三、古构造活动及古地貌对礁滩储层发育的控制	255
四、台地结构及沉积相带与礁滩储层的关系	256
五、成岩改造对礁滩相储层发育的控制	258
参考文献	258
第五章 白云岩储集体形成条件与发育模式	261
第一节 综述与方法原理	261
一、白云岩储层形成机理研究现状	261
二、白云岩储层研究方法	262
三、最新研究进展	263
第二节 热液白云岩及储层	278
一、引言	278
二、热液白云石(岩):基本概念	279
三、热液成因白云岩主要特征与表征	279
第三节 埋藏白云岩及储层	289
一、鄂尔多斯地区奥陶系马家沟群的斑块状白云岩	289
二、塔里木盆地寒武-奥陶系的两类深埋藏白云岩	294
第四节 白云岩储层控制因素与发育模式	300
一、白云岩储层类型	300
二、优质白云岩储层主控因素分析	304
三、优质白云岩储层发育模式	307
参考文献	310
第六章 碳酸盐岩储层孔隙组构数值表征新方法	315
第一节 碳酸盐岩二维孔隙空间的定量表征	316
一、碳酸盐岩储层孔隙微观结构	317
二、碳酸盐岩储层孔隙微观结构数字图像分析	318
三、四川盆地典型碳酸盐岩二维孔隙的空间分布研究	329
第二节 碳酸盐岩孔隙空间的三维定量表征	333
一、孔隙体的获取	333
二、孔隙微观结构三维数值分析	335
三、实例分析	340
参考文献	345
第七章 重点地区储层形成分布与评价	349
第一节 塔里木盆地海相碳酸盐岩储层形成与分布	349
一、奥陶系风化壳岩溶储层有利区带评价与预测	349

二、寒武系白云岩储层有利区带评价与预测	369
第二节 四川盆地海相碳酸盐岩储层形成与分布	374
一、震旦系灯影组储层发育分布规律	375
二、寒武系碳酸盐岩储层发育分布与评价	378
三、川西-川北地区中二叠统白云岩储层的发育分布与评价	384
四、上二叠统长兴组储层发育分布与评价	385
五、下三叠统飞仙关组储层发育分布与评价	388
六、下三叠统嘉陵江组储层发育分布与评价	391
七、中三叠统雷口坡组储层发育分布与评价	393
第三节 鄂尔多斯盆地海相碳酸盐岩储层形成与分布	396
一、不同类型碳酸盐岩储层的分布	398
二、不同类型碳酸盐岩储层的形成	398
三、重点地区储层分布预测	402
参考文献	408

绪 论

从 20 世纪 50 年代至今,我国先后在四川、鄂尔多斯、渤海湾、塔里木等盆地的海、陆相层系中陆续发现了众多的以碳酸盐岩为储层的油气田(藏)。近 20 年来,针对海相碳酸盐岩领域的油气勘探,捷报频传。先后在塔里木盆地发现了塔河-轮南油田、塔中、和田河等大中型油气田,在四川盆地发现了普光、龙岗、元坝、安岳等大气田,在鄂尔多斯盆地发现了靖边大气田,展示出我国海相碳酸盐岩层系巨大的油气资源潜力和勘探开发前景。

四川盆地面积约 $23 \times 10^4 \text{ km}^2$,经过半个多世纪的勘探,对天然气成藏地质背景、成藏条件和富集规律已有了较为系统的认识。在现今盆地内部,由于具有优越的烃源条件和整体保存条件,储层的发育特征与规模往往是决定勘探成效的关键因素。震旦系—中三叠统碳酸盐岩储层分别受多期构造运动形成的不整合面、各期高能礁、滩相分布与各种白云石化作用特别是热液白云石化作用等因素单独或联合控制,对各类储层的成因、地质模式与预测方法等方面的研究已成为油气勘探的热点问题。

塔里木盆地面积 $56 \times 10^4 \text{ km}^2$,是具有“五世同堂”特点的多旋回叠加复合盆地,油气资源丰富,但总的勘探程度较低。由于目的层埋深大、地表条件复杂,勘探成本高,能否找到优质储层,实现高产稳产,是制约该盆地勘探开发成效的主要因素。目前,取得重要突破主要集中在以塔河-轮南特大油田为代表的奥陶系灰岩缝洞型储层中,塔中地区 I 号带的上奥陶统礁滩相储层中也有较好的勘探成果。下古生界白云岩储层中的晶间孔、溶蚀孔、洞、缝发育,也是近期重要的勘探对象。但不同类型碳酸盐岩储层地质成因模式的建立与优质碳酸盐岩储层有效预测方法的形成,一直是勘探中的瓶颈问题。

鄂尔多斯盆地面积 $32 \times 10^4 \text{ km}^2$,也是一个大型的多旋回叠合盆地。现今盆地形态为一不对称的矩形向斜,海相层系天然气勘探前景广阔。近期研究表明,沉积相和古岩溶地貌联合控制了三大呈弧形展布的有利储集相带。受马五段含膏云坪相和风化壳控制的有利储集体分布在靖边地区弧形带;受马四白云岩控制的储层主要分布在定边-黄龙地区弧形带,分布在“三隆二鞍”的内侧;风化壳与白云岩体复合控制的天池-镇原弧形带沿“三隆二鞍”外侧分布。作为中国三大克拉通中加里东—海西早期暴露时间最长的风化壳,与奥陶系特殊的地层结构和相带展布、特殊的埋藏-抬升历史与地层流体活动联合,究竟如何控制了优质储层的发育,如何有效预测,制约了油气勘探的进一步展开。

我国碳酸盐岩储层类型多样、后期改造强烈、深埋藏后优质储层形成机制复杂,不易预测。基于对前人工作大量调研以及具体地区的系统分析,按照多旋回叠合盆地碳酸盐岩储层成因的多因素联合作用和多期复合控制的总体思路,针对碳酸盐岩储层成因与演化过程中易溶蚀、也易充填的特点,抓住碳酸盐岩储层形成过程中多期次、多成因溶蚀-充填作用复合叠加机理与分布预测这一核心问题,以碳酸盐岩储层建造与改造、溶蚀与充填的动态演化过程为主线,强调地质-地球物理-地球化学相结合的基本研究工作方法。其中,

地质分析形成成因模式，地球化学阐释溶蚀机理，地球物理建立预测方法。形成了从储层环境描述-形成机理-发育模式-分布预测的总体技术路线，在分析控制碳酸盐岩储层发育的构造和沉积背景的基础上，开展孔隙流体运动学和水-岩相互作用分析，揭示碳酸盐岩储层发育多样性和非均质性的形成机理，建立碳酸盐岩储层发育模式和预测模型，形成有效储层的地球物理判识方法，预测重点探区重点层位优质储层分布区带（图 0.1）。

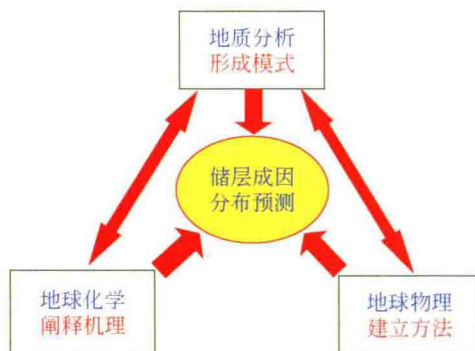


图 0.1 碳酸盐岩储层研究的基本思路

溶蚀机理实验与研究是解释碳酸盐岩储层成因的重要手段。早在 20 世纪 70 年代，国外就进行了流体-岩石相互作用的实验研究（Plummer *et al.*, 1979），模拟了不同流体介质、不同温压条件下、不同成分和粒级的碳酸盐岩溶解过程，并总结了一些热力学规律。随后国内外多家机构的学者开展了广泛的有关碳酸盐岩溶解实验的研究，但是不同学者对实验边界条件设计不同，对结果的解释和规律的总结也不尽相同。本团队研究中特别强调了模拟不同地层条件下碳酸盐岩流体-岩石相互作用，通过对比实验流程设计，采用旋转盘、环境扫描电镜、固液-垂扫等先进的实验手段，选用塔里木盆地、川东北地区不同层系的碳酸盐岩样品，模拟了在表生及埋藏环境、不同流体、温压及添加物条件下的碳酸盐岩溶蚀-沉淀作用过程，建立了碳酸盐岩溶蚀模拟试验的流程，揭示了在升、降温条件下碳酸盐岩溶解-沉淀的“溶蚀窗”规律。即开放或半开放的流体条件下不同岩石分别在某个温度段会出现溶蚀率先增加后降低的现象。分析这一规律的内涵可能为：①在复杂的地质演化历程中，盆地经历了多种方式的沉降埋藏与隆升过程，地层中的温度压力不断发生变化，在相同或者不同的流体作用下，碳酸盐岩的溶解-沉淀作用贯穿于整个埋藏与抬升过程，是可逆的作用过程；②不同岩性其溶蚀窗的形状与幅度不同。灰岩出现溶解高峰的温度低、白云岩出现溶解高峰温度高，灰岩溶蚀窗的幅度大于白云岩；③地层中不同酸性流体和温度、压力环境及开放状态的差异决定了溶蚀窗的深度和形状。同样的流体，封闭状态下的溶蚀窗深度明显大于开放状态；④只有处于溶蚀窗中的储层才能形成并保持储集空间。

影响碳酸盐岩储层发育与展布的因素很多。早期的学者多从沉积和成岩后生变化两方面进行总结和分析。在对国内外一些具有代表性的碳酸盐岩储层解剖分析的基础上，我们认为，碳酸盐岩储层的形成总体上受控于环境与时间两大条件，环境的差异与变化又分别由于构造、地层、岩相、流体的不同而不同。不同的盆地、不同的区带、不同的层系其环境各不相同，加之地质演化历史的迥异，使碳酸盐岩储层的成因类型和品质呈现出复杂的

变化规律。按照“构造、地层、岩相、流体、时间”五个因素分别对研究对象进行剖析，可以全面系统地总结其成因特点和分布规律，实现对不同地区和层系储层发育展布的有效评价与预测（图 0.2）。

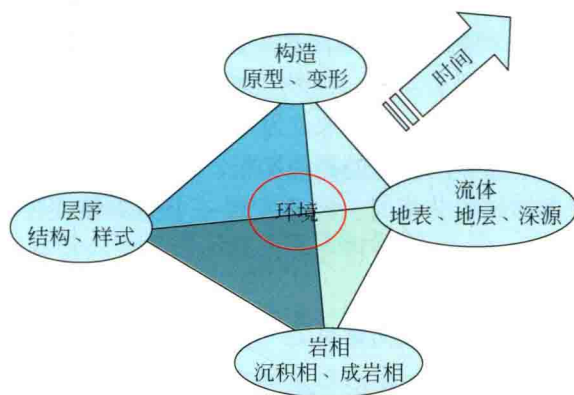


图 0.2 五因素控制碳酸盐岩储层的概念模型

构造因素包括控制沉积、沉降的盆地构造原型和控制变形及抬升、剥蚀的后期改造。不同的板块构造环境下的盆地原型控制了碳酸盐岩地层宏观发育的差异性。大地构造阶段、海平面升降、气候变化和生物种群的演化联合控制了沉积环境的变化和组合方式，进而影响了盆地大的沉积建造组合和沉积相带的展布规律。不同构造体制下盆地原型控制了碳酸盐岩储层发育沉积、成岩环境。对四川盆地寒武系、二叠系和塔里木盆地奥陶系研究表明，同沉积构造所控制的古地形对碳酸盐岩沉积体系的发育与分布具有明显的影响。后期的变形改造决定了盆地内的变形组合、应力场和流体类型，对碳酸盐岩储层的形成与保持也产生了重要的影响。

层序因素包括层序结构与层序样式。确定不同级别、类型的不整合面发育与分布是描述层序结构的关键。这些不整合面所代表的地质事件深刻地影响了各类碳酸盐岩储层特别是岩溶储层的形成。受盆地类型、古地形、气候和海（湖）平面变化所控制的层序样式，包括体系域的组成和加积、退积、进积等组合方式，对碳酸盐岩的发育、储集空间的形成和储集体的分布都具有决定性的影响。

岩相因素包括沉积相和成岩相。岩石成分与结构类型、高能相带分布和合适的成岩环境控制优质储层的发育分布已为前人大量的研究所证实。作为机械、化学和生物共同作用的产物，碳酸盐岩岩石类型非常丰富，其岩石成因机理及其对储层的影响是目前学术界讨论最多的话题，在本专著中也有多处涉及。

流体因素包括地表、地层和深源流体。流体对碳酸盐岩储层的作用是一把双刃剑。在碳酸盐岩建造与改造过程中，流体作用贯穿始终。地层中酸性流体的形成和温、压环境的改变决定了吉普生自由能的差异，进而控制了碳酸盐岩矿物的溶蚀或者沉淀以及相互转化的过程。流体在同一地层和不同地层间的运动和流体所含物质的交换过程同时也是碳酸盐岩储集空间形成或致密化的过程。

时间因素是碳酸盐岩储层形成与保持的最重要因素。碳酸盐岩储集空间的演化过程贯穿于整个盆地的地质演化过程中，严格受构造演化、应力场演化、流体物理化学场演化所

控制。与埋藏史、热史、生烃史、成岩史相伴生的孔隙演化史,是各种有利于储集空间形成的建设性作用与破坏性作用此消彼长的具体表现。建设性的作用包括溶蚀、白云岩化、构造破裂、压溶、重结晶等,破坏性的作用包括各种胶结作用、膏化、硅化、压实、沉积充填等。

碳酸盐岩储层分类是一个争议颇多的话题。通常情况下,学术界和产业界倾向于把碳酸盐岩储层分为四大类:风化壳岩溶型、生物礁滩型、白云岩型、构造裂缝型。应该说,尽管这是一个很不完美的分类方案,但大家又基本上达成了共识。四类储层主控因素分别为与不整合面有关的暴露溶蚀、沉积时的高能相带、埋藏条件下的大规模的白云岩化和构造破裂作用。尽管在对具体储层分析时,经常发现一个储集体往往受多种机制联合控制,难以准确归类。通常的做法是,通过分析在找出其中最主要的控制因素后,再把它归入其中的一类。

风化壳岩溶型碳酸盐岩储层是较为常见的一种优质但是非均质性很强的储层。国外学者对岩溶系统的演化途径、溶蚀几何学进行了深入系统研究,分别探讨了气候、地下水的溶解潜力、矿物组成、暴露时间的长短、先存的孔洞系统、沉积相和地层特征、水文系统、出露区的规模和地形特征、基准面的改变、构造沉降特征等因素对孔隙的影响。包括我们团队在内的国内众多学者,从20世纪90年代就开始对塔河油田为代表的岩溶型储层形成机理和分布规律进行了研究(叶德胜等,2000;何治亮,2001;闫相宾等,2002;俞仁连等,2005;张涛等,2007),分别认识到,控制优质储层形成的地质因素是多样的,优质储层的形成也是多期的。几年前,我们提出塔河油田北部多期不整合叠加区厚层纯灰岩中优质岩溶储层发育受控于多期表生岩溶的“复合效应”;南部地区暴露时间短,有利储层形成受控于有利相带、古地貌、断裂-裂缝等多因素有效匹配的“联合效应”。在分析了岩溶孔洞后期充填与保持的规律后,建立了更系统的岩溶型储层复合-联合的成因模式(何治亮等,2011)。

在深层碳酸盐岩中,白云岩储层占有极其重要的地位。近期国内外关于白云岩储层的研究主要包括白云岩成因机理、孔隙类型及演化、地球化学模拟、成岩环境、主控因素研究等,国内学者在与古岩溶、礁滩有关的白云岩储层研究上取得了突出成果。但对于中国下古生界深埋条件下白云岩储层研究仍然是一个薄弱环节。对中国白云岩储层分析表明,优质白云岩储层控制因素除了各类白云岩化外,还包括有利的沉积相带、不整合、断层、优质盖层和相关的热液溶蚀机制。多期构造运动叠加的古隆起上往往存在多种因素的叠加复合,存在特殊建造与剥蚀改造的组合,常常发育优质白云岩储层。因而,好的白云岩储层往往也是多种机制联合作用的产物。

储层有效预测是勘探能否展开并形成大场面的基础。地质分布规律的总结与针对性的地球物理预测方法的建立,特别是两者有机的结合,是预测的关键。普光气田发现后,大家普遍关心的一个问题是:能否再找到类似的气田。按照沉积斜坡控油气和台地边缘发育优质礁滩相储层的经验认识,国内两大公司的勘探家们沿着二叠纪长兴组沉积期梁平-开江陆棚两侧分别找到了新的目标,先后发现了元坝、龙岗、兴隆等气田。应该说,这是地质家们总结的储层发育展布规律指导勘探实践的生动案例。

储层地震预测方法一直是油气勘探中的重点攻关内容。经过长达50多年特别是近20年的不断探索和实践,储层预测技术已发展成为一套相对完备的技术方法。地震正、反演

技术日趋成熟,地震多属性分析技术逐渐完善,特别是多波、多分量技术以及四维地震、叠前叠后反演、谱分解等新技术的出现为储层成功预测和精细描述提供了“利器”。尽管成绩骄人,但地震储层预测精度,地震、测井、地质和工程等多信息融合、多方法综合,以及运用多种数学、软件工具进行可视化描述等方面还有待深入;同时,加强针对复杂储集体的数学模型的模拟和物理模型的试验也是值得努力的方向。

参 考 文 献

- 何治亮,彭守涛,张涛. 2011. 塔里木盆地塔河地区奥陶系储层形成的控制因素与复合-联合成因机制. 石油与天然气地质, 31 (6): 743 ~ 752
- 何治亮,罗传容,龚铭等. 2001. 塔里木多旋回盆地与复式油气系统. 北京: 中国地质大学出版社. 159 ~ 161
- 闫相宾,韩振华,李永宏. 2002. 塔河油田奥陶系油藏的储层特征和成因机理探讨. 地质论评, 48 (6): 620 ~ 626
- 叶德胜,王根长,林忠民等. 2000. 塔里木盆地北部寒武-奥陶系碳酸盐岩储层特征及油气前景. 成都: 四川大学出版社. 88 ~ 102
- 俞仁连. 2005. 塔里木盆地塔河油田加里东期古岩溶特征及其意义. 石油实验地质, 27 (5): 468 ~ 472
- 张涛,蔡希源. 2007. 塔河地区加里东中期古岩溶作用及分布模式. 地质学报, 81 (8): 1125 ~ 1134
- Plummer L N, Wigley T M L, Parkhurst D L. 1979. Critical review of the kinetics of calcite dissolution and precipitation. Jenne E A, ACS Symposium Series, 493 ~ 537