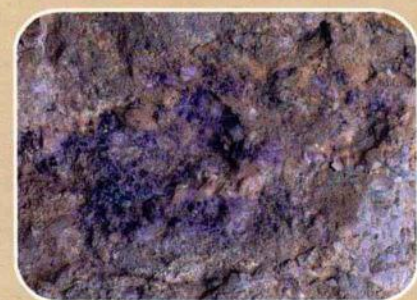


“973” 计划项目课题 (2006CB202401, 2011CB201001) 国家自然科学基金项目 (40272068) 资助

塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩 缝洞系统模式及成因研究

夏日元 邹胜章 梁彬 等 著



地质出版社

“973”计划项目课题(2006CB202401, 2011CB201001) 国家自然科学基金项目(40272068) 资助

塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩 缝洞系统模式及成因研究

夏日元 邹胜章 梁 彬 唐建生 陈宏峰 著
钟建华 顾汉明 曹建文 张庆玉 关碧珠

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

塔里木盆地是我国目前最具有油气勘探远景的大型沉积盆地,中、下奥陶统碳酸盐岩地层为古岩溶发育和海相缝洞型油气藏分布的主要层位。本书在深入分析古岩溶形成条件与控制因素基础上,初步揭示了塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩古岩溶形成机制与演变规律,系统阐明了油气储集体古岩溶缝洞系统发育机理以及区域上分区差异性、垂向上分带性和时代分期性,通过古今类比建立了缝洞系统发育模式。针对古岩溶发育受多因素控制的特点,建立了综合研究方法体系。

本书可供石油地质学、岩溶学、地球化学、水文地质学等专业的教学、科研及生产人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩缝洞系统模式及成因研究 /
夏日元等著. —北京:地质出版社, 2011.11
ISBN 978-7-116-07455-2

I. ①塔… II. ①夏… III. ①塔里木盆地—奥陶纪—
碳酸盐岩油气藏—研究 IV. ①P618.130.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第228878号

TALIMU PENDI AOTAOXI TANSUANYANYAN FENG Dong XITONG MOSHI JI CHENGYIN YANJIU

责任编辑:刘亚军 胡伟武

责任校对:黄苏晔

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路31号,100083

咨询电话:(010)82324508(邮购部);(010)82324578(编辑室)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱:zbs@gph.com.cn

传 真:(010)82310759

印 刷:北京天成印务有限责任公司

开 本:889mm×1194mm $\frac{1}{16}$

印 张:11

字 数:350千字

印 数:1—800册

版 次:2011年11月北京第1版

印 次:2011年11月北京第1次印刷

定 价:100.00元

书 号:ISBN 978-7-116-07455-2

(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

前言

据统计,全世界迄今已发现的碳酸盐岩油气藏有 279 个,分布在 39 个国家和地区,储量约占油气资源总量的 50%,产量占 60% 以上。近年来,我国的鄂尔多斯盆地、塔里木盆地、渤海湾盆地、四川盆地碳酸盐岩储层中相继发现了大中型油气田,打出了高产井。我国海相碳酸盐岩中油气资源量大于 300 亿 t 油当量,具有重要的能源意义。碳酸盐岩油气储层经历了漫长的岩溶作用过程,既有地质历史时期近地表环境下的岩溶作用,又经历了埋藏过程中岩溶作用与构造作用的叠加与改造,造成储层的油气储集规律十分复杂,给勘探和开发带来了一定难度。

塔里木盆地是我国目前最具有远景的大型沉积盆地,油气资源总量达 160 亿 t,已发现 50 多个油气田。中、下奥陶统碳酸盐岩地层为古岩溶发育和海相缝洞型油气藏分布的主要层位。古岩溶经历了一间房末期早表生裸露风化、海西早期裸露风化和石炭纪后期埋藏改造等多期演化过程。海西早期为裸露风化壳岩溶的强烈发育期,形成了较大规模的古岩溶缝洞系统。奥陶系碳酸盐岩油气藏在很大范围内连片含油气,但含油气丰度明显受缝洞发育程度控制。古岩溶缝洞发育不均一,非均质性强,与华北任丘油田以断层控制的碳酸盐岩油藏有较大区别。油藏的基质部分基本不含油,油气的有效储集空间为古岩溶缝洞,有效储集体分布及油藏流体性质非常复杂,成为目前油田开发领域中的一大难题。

近年来,中国地质科学院岩溶地质研究所与中国石油化工股份有限公司、中国石油天然气股份有限公司、中国石油大学及中国地质大学合作,以塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩为对象,开展了古岩溶型储层研究与对比工作,先后开展了 10 余项科技攻关项目,采用古水动力相关分析法、地球化学分析以及岩溶储层介质结构定量评价和预测等技术手段,研究古岩溶与深岩溶的形成条件、影响控制因素及其与油气富集关系,识别出多种多样的成因类型,建立了古岩溶发育演化模式,实现了对油气聚集有利发育区的预测,在岩溶型储层成因机理和空间分布规律研究方面取得了新进展。

本书主要集成了国家“973”计划项目课题“碳酸盐岩缝洞系统模式及成因研究”(编号 2006CB202401,2006~2010 年)、“碳酸盐岩缝洞型油藏缝洞单元形成机制及模式研究”(编号 2011CB201001,2010~2014 年)和国家自然科学基金项目“碳酸盐岩储层古岩溶模式及其对油气藏的控制机制研究”(编号 40272068,2003~2005 年)的部分成果。这 3 个项目,通过开展野外露头区岩溶缝洞系统调查与地质描述、典型碳酸盐岩露头区地球物理探测、塔河油田和轮南油田碳酸盐岩缝洞系统地质识别以及缝洞组构关系与缝洞系统地质模式研究等工作,重点解决了海相碳酸盐岩缝洞系统形成机制等关键科学问题。

项目实施过程中,开展了野外露头区岩溶缝洞系统调查与地质描述,在塔里木盆地北缘描述古溶洞 39 个,在湘西和贵州等典型露头区建立了对比地质模型 20 个,完成了 20 条地球物理响应岩溶剖面。在塔河油田和轮南油田进行了井下古岩溶缝洞系统地质识别工作,对 300 口控制井的钻孔岩心进行了观察与描述,编制单井古岩溶结构图 80 个,建立古岩溶对比剖面 20 条,对古岩溶充填物进行化学分析、同位素及微量元素测试、包裹体分析等测试样品 1000 件。通过上述工作,掌握了塔里木盆地油气田古岩溶缝洞系统平面分布和垂向分布特征,建立了典型缝洞系统发育模式、结构模式和地球物理响应模式,为解释碳酸盐岩储

层结构以及建立油藏模型提供了岩溶地质技术支撑。

全书共分七章。第一章(绪论),阐述了古岩溶型油气储层特点、油气田古岩溶方面国内外研究动态,介绍了依托上述项目所建立的油气田古岩溶研究方法体系;第二章(塔里木盆地古岩溶形成条件与控制因素),在介绍古岩溶作用地质背景的基础上,重点分析了古气候、岩石性质、层组结构类型、地质构造格局、地形地貌和地下水动力条件等古岩溶发育的控制因素;第三章(塔河油田前石炭纪古岩溶地貌特征),在介绍古岩溶地貌识别方法的基础上,对塔河油田主体区奥陶系古岩溶地貌进行了恢复,划分出岩溶台地、岩溶缓坡地(上)、岩溶缓坡地(下)和山间盆地4种二级地貌类型,以及峰丛洼地和丘峰洼地等10种三级地貌类型,重点论述了不同地貌单元区古岩溶发育特征及其与油气储集性能的关系;第四章(古岩溶发育演化与形态特征),论述了塔里木盆地奥陶系古岩溶形成演化机制,对地下河管道、岩溶洞穴、溶蚀孔洞和溶蚀缝等4类古岩溶形态进行了详细描述;第五章(古岩溶缝洞充填物地球化学特征),在总结古岩溶缝洞系统充填特征的基础上,重点阐述了充填物同位素对古岩溶环境的指示性和充填物包裹体对古岩溶作用的指示性;第六章(古岩溶垂向发育特征),在分析岩溶垂向分带性、确定划分标准的基础上,详细论述了塔河4区古岩溶垂向带发育特征;第七章(古岩溶缝洞系统发育模式),分别阐明了地下河管道、岩溶洞穴、溶蚀孔洞和溶蚀缝等4大类及单支管道型等8个亚类典型缝洞系统发育模式和地球物理响应模式。

本书由夏日元、邹胜章、梁彬、唐建生、陈宏峰、钟建华、顾汉明、曹建文、张庆玉、关碧珠共同编写完成,全书由夏日元、邹胜章统稿、定稿。参加项目研究工作的人员还有潘文庆、韩剑发、黄成毅、胡向阳、黄孝特、艾合买提江、刘莉、金意志、刘学利、李新华、黄咏梅、陈鑫、姚昕、邱士利、金新峰、于晓英、单洋天、朱志伟、朱远峰、刘江平、宋先海、王冠民、姚光庆、钟福平、田宗勇、王新侨、蔡成国等。本书图件由卢海平、杨月、刘月红、郭严正、余明等清绘。

李阳、牟书令、袁向春、窦之林、康玉柱、郭尚平、韩大匡、孙枢、彭苏萍、黄素逸、罗治斌、鲁新便、张宏方等专家直接指导了项目研究工作,提出了许多宝贵意见和建议。中国石化西北油田分公司、中国石油塔里木油田分公司等单位提供了大量基础资料。在此向有关单位和个人表示衷心感谢。

Abstract

Oil and gas in carbonate rocks, about 50% of the global resources, have important prospect of development. Compared with elastic rocks, reservoirs in carbonate rocks mainly have the following 3 characteristics: ① Multi-period tectonic movement and karstification reshaped the carbonate rocks, which results in complicated regulations of oil and gas storage. ② Such diverse storage spaces as pores, fractures, crevices, conduits and caves co-exist. ③ fracture-cavity systems have tremendous difference in size and remarkable spatial heterogeneity. Starting with the mechanism of paleokarst and its relations to the reservoir property, systematically studies performed on the forming conditions, controlling factors and distribution of paleokarst and deep buried karst, are an effective way to predict enrichment zone and a guide to exploration of oil and gas.

Research methods were put forward according to the traits of multivariate controlling paleokarst, that is, on the basis of integrated analysis on the paleogeology, paleotectonics, paleotopography, paleoclimate, and paleohydrogeological settings, comprehensive study on paleokarst including macroscopic and microscopic, exposed and buried, erosive and filled features should be conducted by application of analysis on genesis and combination of karst features, hydrodynamics, geochemistry, and geophysics, and then spacing difference, vertical zonation and multi-stages of paleokarst fracture-cavity be studied to set up genetic model and structure mode.

Tarim basin, a large sedimentary basin, presently is the most promising in China; Middle-Lower Ordovician carbonate rocks constitute the primary formations for paleokarst and fractured-cavernous reservoirs. Such factors mainly controlled paleokarst development, as paleoclimate, lithology, and combination of strata, tectonics frame, paleotopography, and groundwater hydrodynamics. Stable oxygen and carbon isotope testing of filling minerals shows paleokarst developed in 5 conditions, such as dry-hot karstification and thermo-fluid karst in deep buried period. The traits of fluid inclusions in filling minerals show that there existed 4 conditions during the paleokarst formation. Sporopollen from between late Ordovician and early Silurian were found in the fillings of paleokarst fractures or caves in the middle Ordovician carbonate rocks. Paleokarst had experienced multi-episodic evolution, from the very beginning, it was hypergenesis palaeokarst in the late Yijianfang Period of middle Ordovician, and followed by exposed residuum paleokarst in the early Hercynian, then deep buried erosion reshaping the original paleokarst after late Cambrian, paleokarst in early Hercynian most intensively developed, and as a consequence, formed large-scale paleokarst cave systems.

Identification methods were concluded for paleokarst landforms formation and combination, and used for restoration of paleokarst landforms in Ordovician carbonate rocks in Tahe oil field, Paleokarst landform was divided into 4 secondary ones, that is, karst platform, upper and lower gentle slope, and karst inter-mountainous basins, and further subdivided into 10 tertiary ones such as fengcong depression and karst hill depressions, etc. Characteristics of paleokarst development behaves much differently in various landform units, most and largest crevices or caves were nearly always encountered when drilling in karst fengcong depressions and karst hills depressions, paleokarst likely developed most intensively at the slope of each karst peak and hill in all landform units. Paleokarst landform features and units significantly controlled hydrocarbon enrichment. Karst fengcong depressions are best blocks for oil-gas production, accounting for about 69.8% of the total, karst hills depressions come second with 35.4% oil-gas production of the total, although fracture-cavity relatively developed in karst inter-mountainous basins, for its low paleotopographic position, which leads to worse

conditions for oil-gas enrichment. Side slope of karst hills and residual peaks, with well preserved paleokarst space of fractures and caves, becomes the target area for exploration in the coming stage.

Four main types of paleokarst forms such as conduits of subterranean streams, caves, dissolved pores and fractures developed in lower Ordovician carbonate rocks at the outcrops on the north rim or in oil wells in Tarim Basin. Great differences in dimensions of each paleokarst form exist, for example, the length of subterranean stream system can amount in total to 20km, and the diameter of hall-like caves may be 300m, while the diameter of dissolved pores is none but 1 to 2mm, so, according to the different scale of the forms, classified and grading evaluation should be performed. Fillings in paleokarst fracture-cavity system mainly includes mechanical deposits, collapse deposits, chemical deposits and weathering residual deposits, the types, traits and structures of such fillings can be fine indicators to identify the environment of paleokarst development and evolution.

There is significant difference vertically in karst form, development intensity and filling characteristics of paleokarst fracture-cavity systems, which behaves an apparent vertical zonality. From the top down, four karst zones can be divided, such as epikarst, vertical infiltration karst, ground water runoff karst and retained water karst. Corrosion, erosion and weathering co-exist in epikarst zone, from the surface to 30m below, a highly karstified layer developed basically consisting of solution grooves, crevices, conduits, caves and pores, etc. Groundwater permeates in vertical infiltration karst zone; leaching, erosion and collapse formed a series of high dip dissolution fractures or sinkholes. Ground water runoff karst zone is characterized by sub-horizontal dissolution fractures, karst caves and conduit systems, has not only relatively larger solution space but better horizontal connectivity. Groundwater in retained water karst zone flows much more slowly than the upper karst zones, which leads to less solution space, and chemical deposition predominates during the karstification process. Areal distribution of vertical paleokarst zones is controlled by such factors as paleogeomorphology and groundwater hydrodynamic conditions, in karst fengcong depressions and massif depressions, the thickness of epikarst zone and vertical infiltration karst zone is larger, while that of the infiltration karst zone is the least in karst valleys and karst inter-mountainous basins

According to the characteristics of paleokarst and the relation of which with the reservoir property, models of development and geophysical response 4 typical fracture-cavity systems were set up, such as conduits of subterranean streams, karst caves, dissolved pores and fractures, as well as 8 subclasses of which as single conduit, etc. Conduits system of subterranean streams includes 3 subclasses such as single conduit, multi conduits and porch-like conduit system, section structures of the system consisting of the conduit itself and the affected zone around which, respectively, mainly behave a strip of dual structure, network of multi-structure and fold line of three-dimension structure. Paleokarst system of caves includes 3 types as hall-like caves, karst caves and shaft-like caves, structures of which are comprised of main cave, dissolution fracture zone between caves, collapse fracture zone at the top, dissolution affecting zone at the top and the flank, dissolution affecting zone at the bottom. Dissolution pores or holes show irregular shapes, with the diameter ranging from 0.2 to 20cm, and always present stratified or zonal distributed fracture-cavity systems with combination of dissolution fractures around. Dissolution pores in reefs and dolomites, 2 particular types of pores, are scattered in study area, three degrees of dissolution fractures can be ascertained macroscopically, the width of first-degree is 10 ~ 50cm, extension length ranges from 50 to several hundred of meters, and spacing between fractures is 8 to 15m. As to the second-degree ones, which always exist in concentrated fissure or fractured zone, the width is 2 to 10cm, extension length is about a few meters to dozens of meters, and spacing is 1 to 5 m. and for the third-degree dissolution fractures, the width is 1 to 5cm, and extension length is 1 to 10cm, and spacing is about 10 to 30cm.

目 录

第一章 绪 论	1
第一节 古岩溶型油气储层特点	1
一、海相碳酸盐岩油气藏资源状况	1
二、海相碳酸盐岩油气藏储集体特点	1
第二节 油气田古岩溶研究动态	3
一、古岩溶与深岩溶概念	3
二、古岩溶识别与研究动态	3
三、油气田古岩溶研究进展	5
第三节 油气田古岩溶研究方法	6
一、研究思路	6
二、具体研究方法	7
三、主要工作进展与成果	8
第二章 塔里木盆地古岩溶形成条件与控制因素	9
第一节 碳酸盐岩油气勘探开发概况	9
第二节 古岩溶作用地质背景	10
一、古地理与古气候	10
二、区域构造	10
三、地层与岩性	14
第三节 古岩溶发育控制因素	14
一、岩石性质	14
二、层组结构类型	15
三、地质构造格局	15
四、地形地貌条件	17
五、地下水动力条件	17
第三章 塔河油田前石炭纪古岩溶地貌特征	20
第一节 古岩溶地貌识别方法	20
一、印模法	21
二、残厚法	22
三、古地貌成因组合识别法	22
第二节 塔河油田主体区前石炭纪古岩溶地貌类型划分	24
第三节 塔河油田主体区前石炭纪古岩溶地貌特征	29
一、岩溶台地 (I)	29
二、岩溶缓坡地 (上) (II)	33
三、岩溶缓坡地 (下) (III)	36
四、岩溶山间盆地 (IV)	37
第四节 不同古地貌单元储集性能	38

一、峰丛洼地区	39
二、丘峰洼地区	40
三、丘丛垄脊沟谷区	40
四、丘丛垄脊槽谷区	41
五、岩溶槽谷区	41
六、岩溶山间盆地	42
第四章 古岩溶发育演化与形态特征	44
第一节 古岩溶发育演化特征	44
一、一间房末期裸露风化岩溶发育与演化	44
二、泥盆纪—早石炭纪裸露风化岩溶发育模式	45
三、海西早期覆盖区岩溶发育与演化	46
四、埋藏期层状岩溶作用机理	47
第二节 古岩溶形态特征	47
一、古岩溶识别标志	47
二、塔北露头区古岩溶形态	51
三、油田井下古岩溶形态	70
第五章 古岩溶缝洞充填物地球化学特征	94
第一节 古岩溶缝洞系统充填特征	94
一、充填物类型	94
二、充填空间形式与充填方式	99
三、充填特征与充填程度	100
第二节 充填物同位素对古岩溶环境的指示性	102
一、碳、氧同位素变化原因及环境意义	102
二、塔里木盆地奥陶系古岩溶充填物碳、氧同位素特征	103
第三节 充填物包裹体对古岩溶作用的指示性	107
一、塔北露头区充填物包裹体特征	108
二、轮古地区充填物包裹体特征	110
三、塔河油田地区古岩溶缝洞系统充填物包裹体特征	113
第四节 充填物孢粉化石时代特征	116
一、轮古地区奥陶系古岩溶充填物中孢粉特征	116
二、塔北露头区充填物孢粉特征	117
三、塔河油田古岩溶充填物孢粉特征	117
第六章 古岩溶垂向发育特征	119
第一节 岩溶垂向分带性与划分标准	119
一、岩溶垂向分带理论	119
二、古岩溶垂向分带原则与依据	119
三、古岩溶垂向带划分标准	120
第二节 单井古岩溶垂向结构特征	121
一、BT403 井古岩溶垂向特性	121
二、BG117 井古岩溶垂向特性	122
第三节 塔河 4 区古岩溶垂向带发育特征	129
一、古岩溶垂向带展布特征	129
二、古岩溶垂向带发育剖面对比特征	131

三、不同地貌单元垂向带古岩溶发育特征	135
第七章 古岩溶缝洞系统发育模式	139
第一节 地下河管道系统发育模式	140
一、单支管道型	140
二、多支管道型	142
三、廊道型	146
第二节 洞穴型古岩溶系统发育模式	146
一、厅堂型	146
二、溶洞型	150
三、竖井型	151
第三节 溶蚀孔洞系统发育模式	151
一、溶蚀孔洞系统结构模式	151
二、白云岩孔洞型	152
三、礁滩溶孔型古岩溶系统地震响应模式	153
第四节 溶蚀缝发育模式	154
参 考 文 献	156

Contents

Preface	1
Chapter 1 Introduction	1
Section 1 Characteristics of Paleokarst Reservoir	1
1. Oil-gas Resources in Marine Carbonate Rocks	1
2. Characteristics of Marine Carbonate Reservoir	1
Section 2 Research Development on Paleokarst of Oil-gas field	3
1. Concepts of Paleokarst and Deep Buried Karst	3
2. Identification and Research Development of Paleokarst	3
3. Research Development on Paleokarst of Oil-gas Field	5
Section 3 Research Methods for Paleokarst of Oil-gas Field	6
1. Research Thoughts	6
2. Detailed Research Methods	7
3. Main Progresses and Achievements	8
Chapter 2 Forming Conditions and Controlling Factors of Paleokarst in Tarim Basin.....	9
Section 1 Survey of Oil-gas Exploration in Carbonate Rocks	9
Section 2 Geological Settings of Paleokarst	10
1. Paleogeography and Paleoclimate	10
2. Regional Tectonics	10
3. Strata and Lithology	14
Section 3 Controlling Factors for Paleokarst Development	14
1. Lithology	14
2. Fabric Types of Strata	15
3. Tectonics Framework	15
4. Paleotopography and Paleogeomorphology	17
5. Hydrodynamic Conditions of Groundwater	17
Chapter 3 Characteristics of Pre-Carboniferous Paleokarst Geomorphology in Tahe Oil Field	20
Section 1 Identification Methods for Paleokarst Geomorphology	20
1. Method of Impression	21
2. Method of Residual Thickness	22
3. Identification Method of Paleogeomorphology Formation and Combination	22
Section 2 Differentiation of Pre-Carboniferous Paleokarst Geomorphology in Primary Areas of Tahe Oil Field.....	24
Section 3 Characteristics of Pre-Carboniferous Paleokarst Geomorphology in Primary Areas of Tahe Oil Field.....	29
1. Paleokarst Platforms(I)	29
2. The Upper Gentle Slope of Paleokarst(II).....	33

3. The Lower Gentle Slope of Paleokarst (III)	36
4. Karst Intermountainous Basins(IV)	37
Section 4 Reservoir Properties in Different Paleokarst Geomorphologic Units	38
1. Karst Fengcong Depressions	39
2. Karst Hills Depressions	40
3. Hill Cluster and Ridge-valley Areas	40
4. Hill Cluster and Ridge-trough Areas	41
5. Karst Valleys	41
6. Karst Inter-mountainous Basins	42
Chapter 4 Paleokarst Evolution and Traits of its Features	44
Section 1 Evolution of Paleokarst Development	44
1. Development and Evolution of Exposed Residuum Type Paleokarst in Late Yijianfang Period of Middle Ordovician	44
2. Development Modes of Exposed Residuum Type Paleokarst from Devonian to Early Carboniferous	45
3. Development and Evolution of Covered Paleokarst in Early Hercynian	46
4. Mechanism of Layered Paleokarst in Deep Buried Period	47
Section 2 Characteristics of Paleokarst Features	47
1. Identification Signs of Paleokarst	47
2. Paleokarst Features of Outcrops in Northern Tarim Basin	51
3. Paleokarst Features in Wells of Tahe Oil Field	70
Chapter 5 Geochemical Characteristics of Fillings in Paleokarst Fractures and Caves	94
Section 1 Fillings Features of Paleokarst Fracture-cavity Systems	94
1. Types of Fillings	94
2. Filled Spaces and Filling Patterns	99
3. Fillings Features and Filled Extent	100
Section 2 Indicating Functions of Stable Isotope in Fillings to Paleokarst Conditions	102
1. Causes of Oxygen and Carbon Stable Isotope Changing and Its Environmental Implications	102
2. Characteristics of Carbon and Oxygen Stable Isotope in Ordovician Paleokarst Fillings in Tarim Basin	103
Section 3 Indicating Functions of Inclusion in Fillings to Paleokarst development	107
1. Inclusions in Fillings at Outcrops in Northern Tarim Basin	108
2. Inclusions in Fillings in Lungu Oil Field	110
3. Inclusions in Fillings of Paleokarst Fracture-cavity Systems in Tahe Oil Field	113
Section 4 Eras of Sporopollen in Fillings	116
1. Sporopollen in Paleokarst Fillings in Lungu Oil Field	116
2. Sporopollen in Fillings at the Outcrops in Northern Tarim Basin	117
3. Sporopollen in Paleokarst Fillings in Tahe Oil Field	117
Chapter 6 Vertical Zonation of Paleokarst	119
Section 1 Vertical Zonation and Dividing Standards of Paleokarst	119
1. Theories on Vertical Zonation of Karst	119
2. Principles and Basis for Vertical Zonation of Paleokarst	119
3. Dividing Standards of Vertical Zonation of Paleokarst	120

Section 2 Vertical Structure of Paleokarst in Single Oil Well	121
1. Vertical Features of Paleokarst in BT403 Oil Well	121
2. Vertical Features of Paleokarst in BG117 Oil Well	122
Section 3 Vertical Zonation Features of Paleokarst in the 4 th Area in Tahe Oil Field	129
1. Distribution of Vertical Paleokarst Zonation	129
2. Section Comparison of Vertical Paleokarst Zonation	131
3. Characteristics of Paleokarst in Vertical Zonation in Different Paleotopography Units.....	135
Chapter 7 Development Patterns of Paleokarst Fracture-cavity System	139
Section 1 Development Patterns of Conduits System in Subterranean Streams	140
1. Single Conduit Type Subterranean Stream	140
2. Multi Conduits Type Subterranean Stream	142
3. Porch-like Conduit System Type Subterranean Stream	146
Section 2 Development Patterns of Cave Type Paleokarst	146
1. Hall-like Cave Type Karst	146
2. Cave Type Karst	150
3. Shaft Type Karst	151
Section 3 Development Patterns of Dissolved Pores Systems	151
1. Structural Pattern of Dissolved Pores System	151
2. Dissolved Pores or holes in Dolomites	152
3. Seismic Response Model of Dissolved Pores in Reefs	153
Section 4 Development Patterns of Dissolved Fractures	154
References	156

第一章 绪 论

第一节 古岩溶型油气储层特点

一、海相碳酸盐岩油气藏资源状况

全世界油气资源已探明储量中,碳酸盐岩油气藏储量约占 50%、产量占 60% 以上;碳酸盐岩盆地中已发现数百个大型油气田。近年来,我国的鄂尔多斯盆地、塔里木盆地、渤海湾盆地、四川盆地碳酸盐岩储层中相继发现了大中型油气田,打出了高产井。我国海相碳酸盐岩层系油气资源量大于 300 亿 t 油当量,仅塔里木盆地的石油三级储量就达 30 多亿 t,塔河油田储量规模达 13.2 亿 t,已形成年生产能力 400 万 t。在渤海湾盆地和鄂尔多斯盆地也广泛分布。这些盆地碳酸盐岩中古岩溶发育,与油气藏关系密切。

据统计,全世界迄今已发现的碳酸盐岩油气藏有 279 个,分布在 39 个国家和地区,油气可采量 4860 亿桶。碳酸盐岩储层主要发育在前寒武纪晚期到中新世的岩层中,从碳酸盐岩油气田数量和储层看,最重要地质年代是白垩纪。在该时期地层中,有 55 个碳酸盐岩油气田,占总数的 19.7%。碳酸盐岩油气藏储层岩性主要为两大类:一类是石灰岩储层;另一类是白云岩储层。属于第一类储层的油气田有 147 个,占油气田总数的 52.7%,该类储层多见于白垩系和第三系^①岩层中;第二类储层的油气田有 132 个,占整个数据库油气田的 47.3%,该类储层主要分布在上古生界奥陶系和侏罗系岩层中(表 1-1)。

表 1-1 世界大型碳酸盐岩油气田基本情况表

国家和地区	油气田名称	地层时代	岩 性	可采储量
美国得克萨斯州	Puckett	早奥陶世	白云岩	5.5 亿桶
加拿大艾伯塔省	Rainbow	中泥盆世	灰岩和白云岩	7930 万桶
美国新墨西哥州	Morton	早二叠世	灰岩	182 万桶
沙特阿拉伯	Qatif	晚侏罗世	灰岩和白云岩	900 万桶
委内瑞拉	La Paz	早白垩世	灰岩	10 亿桶
阿拉伯联合酋长国	Fatch	中白垩世	灰岩	10.2 亿桶
墨西哥	Poza Rica	中白垩世	灰岩和白云岩	12.0 亿桶
巴西	Canpas	中白垩世	灰岩	6.3 亿桶
美国得克萨斯州	Fairway	早白垩世	灰岩	2.3 亿桶
挪威	Ekofisk	晚侏罗世	灰岩	12 亿桶
伊朗	GachSaran	渐新世—早新世	灰岩和白云岩	9 亿桶
日本九州	Fukubezawa	中新世	白云岩	330 万桶

(据罗海等, 1993)

二、海相碳酸盐岩油气藏储集体特点

碳酸盐岩储层经历了漫长的岩溶作用过程,既有地质历史时期近地表环境下的岩溶作用,又经历了埋藏过程中岩溶作用的叠加与改造,造成储层的油气储集规律十分复杂,给勘探和开发带来了一定难度。

①第三系(纪)现划分为古近系(纪)(老(早)第三系(纪))、新近系(纪)(新(晚)第三系(纪)),下同。

与碎屑岩储层相比，碳酸盐岩储集体具有 4 个方面主要特点：①经历了多期构造运动和多期岩溶作用叠加改造（图 1-1 ~ 图 1-3）；②储集空间类型多样化，孔、隙、缝、管、洞并存（图 1-4 ~ 图 1-7）；③缝洞系统大小悬殊，非均一性明显；④埋藏深，探测和识别难度大。



图 1-1 塔河油田 BT702 井古岩溶现象
图中白色方解石充填缝为早期古岩溶，
灰绿色砂泥质充填缝为海西早期古岩溶



图 1-2 轮南油田 BN140 井古岩溶现象
图中灰绿色砂泥质充填缝为海西早期古岩溶，
紫红色泥质充填缝为海西晚期干旱
环境下风化壳古岩溶



图 1-3 塔河油田 BT502 井古岩溶现象
图中白色方解石充填缝为早期古岩溶，
灰绿色砂泥质充填缝为海西早期古岩溶

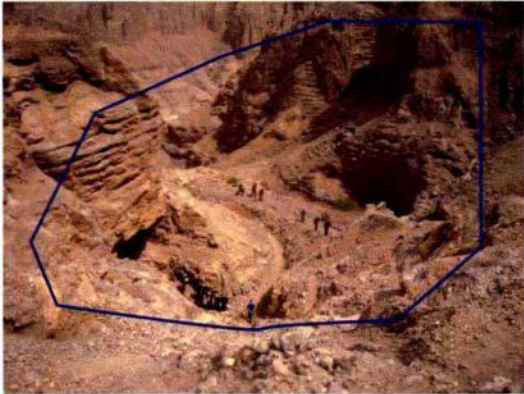


图 1-4 塔北露头区一间房南 7km 沟厅堂型古溶洞系统
推测溶洞主体长 65 ~ 70 m，宽 20 ~ 35 m；平面分布面积
大于 2000 m²



图 1-5 塔河油田 BS147 井溶蚀孔洞
沿溶蚀缝发育，零星分布，孔径 3 ~
10mm，方解石半充填



图 1-6 塔北露头区管道型古溶洞（直径 3 ~ 10 m）
图中黄色部分为古岩溶地下河管道，下部为主管道，右上角为支管道，
管道内充填的砂泥质地下河沉积物具清晰微层理。
洞顶垮塌破碎带明显（图中红圈内）



图 1-7 塔河油田 BS179 井溶蚀缝（缝宽 1 ~ 5 mm）

第二节 油气田古岩溶研究动态

一、古岩溶与深岩溶概念

(一) 古岩溶

按岩溶形成的时间,划分为古岩溶与现代岩溶。古岩溶(paleokarst)为非现代营力环境下形成的岩溶(袁道先,1988;James,1992)。Walkden(1974)和Wright(1982)则定义为被较新的沉积物或沉积岩所埋藏的古代的岩溶。可见,古岩溶目前还是一个笼统的概念,泛指地质历史阶段形成的岩溶,以区别于现代岩溶。但这个历史阶段如何划分,目前还没有一个统一的标准。参照地质学及其他学科的做法,可将更新世以前形成的岩溶称为古岩溶,全新世以后至今仍在发育的岩溶称为现代岩溶(全新世与更新世之间存在太行(云南)运动)。值得注意的是,岩溶发育一般经历了长期的演化过程,特别对暴露于地表的可溶岩层,岩溶作用往往经历了较长的时间跨度,也就是经历了后期直至现代的不断改造。所以,判断是否是古岩溶,应该以有否地质历史时期形成且被保存下来的岩溶迹象为标志。如果过去的岩溶迹象完全被后期改造而未留下任何迹象,尽管可能有过地质历史时期的岩溶作用,也应该归入现代岩溶的范畴。或者说,古岩溶是已经停止作用且被保存下来的地质历史时期的岩溶。

古岩溶成因与海平面的相对升降及构造运动密切相关。由于海平面的相对下降及区域构造运动的抬升,造成下伏碳酸盐岩地层隆升暴露,遭受风化剥蚀和淋滤岩溶作用,发育大量溶蚀孔洞缝,形成古风化壳岩溶储层,为油气藏形成提供了条件;后期埋藏生烃阶段的有机酸溶蚀、热溶解、复合溶蚀、地层压释水和热水溶蚀等岩溶作用进行叠加、改造,产生次生孔隙,并使前期缝洞系统重组。古风化壳岩溶作用和埋藏溶蚀作用的多期次叠加和改造,是古岩溶储层及油气藏形成的最佳组合模式(成都地质学院,1992),也是碳酸盐岩油气藏的主要影响因素之一。

(二) 深岩溶

按岩溶形成的深度,划分浅部岩溶与深部岩溶两种类型。据任美铎等(1982)定义,岩溶水的运动受邻近河谷侵蚀基准面控制的岩溶称为浅部岩溶,不受侵蚀基准面控制的岩溶称为深部岩溶。要理解好这一概念,关键要掌握直接在深部形成的岩溶才是深部岩溶(高进,1987),包括古代的和现代正在形成的。而岩溶作用发生于浅部,后经地表运动被埋藏到深部的岩溶,不能称为深部岩溶(夏日元,2001)。换言之,深部环境形成的古岩溶,经地壳抬升,现保存在地表浅部(如北方奥陶系碳酸盐岩中见到的深部热水岩溶现象)的岩溶应称为深部岩溶。深部水流一般受流体动力学的压力和流体静力学的压力影响,即深部地下水的运动不再取决于岩溶地貌,而取决于区域可溶性岩层与径流带之间的压力差和地质构造等条件。断陷盆地内的深大断裂、热液矿床和热液活动往往在深部形成压力差而产生地下水深部循环。深部地下水的溶蚀性来源有多种途径,岩浆活动会带入一定数量的 CO_2 ,生烃熟化(有机质热演化)过程中的有机质分解会产生羧酸(有机酸),碳酸盐岩本身在地壳深部受热而分解就会产生 CO_2 。现已发现,在几千米深处的地层中,存在有细菌和微生物,在一定条件下可促进深部岩溶的发育。在油气和地热勘探实践中,越来越多的深部岩溶现象不断发现,深部油气演化和运移过程中,其本身就具备了岩溶作用的条件。

二、古岩溶识别与研究动态

将岩溶作用与油气勘探直接联系起来的论述,首见于1954年桑布瑞发表的《石油勘探中地貌学的运用》一书,着重从潜伏岩溶地形等方面探讨不整合侵蚀面在油气聚集中的作用。

彭大钧等(1990)对20世纪90年代以前的古岩溶研究方法进行了系统性的总结:①古构造方法应用于研究古构造与古岩溶的关系;②沉积相分析方法应用于古岩溶相、亚相及微相的划分;③岩石学、

矿物学方法对古岩溶水文地质形迹、充填物特征的研究具有很大作用,可为探讨古岩溶形成的孔隙水起源、流体性质提供依据;岩石铸体薄片、岩心观察、扫描电镜分析、x 光衍射分析等,对古岩溶微孔隙系统的研究也很有帮助;④古水文地球化学分析、有机地球化学分析方法对古岩溶及油气形成的古水文地球化学环境研究很有意义;⑤古生物学方法与同位素方法结合运用对于发现和确定古岩溶的存在具有实际意义;⑥钻探方法和物探方法综合运用有助于发现和确定古岩溶的存在;⑦计算机运用对恢复古岩溶形成的古水动力场、古构造应力场的数学模拟提供了可能,同时,应用其他数学地质方法研究古岩溶也可得以实施;⑧物理方法可以对古岩溶系统的形成进行水动力场电模拟;⑨室内溶蚀实验方法可以获取古岩溶发育控制因素的重要参数和直观资料。

近 10 年来,岩溶研究方法进一步丰富(宋志敏,1993;黄思静,1995;林庆洲,1993;福特,1996;李定龙,1999),具体的研究方法还集中体现在以下几个方面。

在岩矿分析手段中,阴极发光技术获得了更加广泛的应用。黄思静(1995)、宋志敏(1993)等人将阴极发光技术更成熟地应用于矿物学研究中,对于研究胶结物的形成环境、期次、成因等做了大量的工作;岩溶作用的岩石学研究包括宏观和微观两方面内容。岩石的宏观研究,主要为研究围岩与洞穴中充填物的成分、孔隙特征以及充填物的充填方式等;其微观研究主要是通过铸体薄片、扫描电镜、阴极发光等现代岩矿分析手段,来辨认或推断古岩溶的存在。岩石学研究建立起岩溶分析的地质概念模型,是分析岩溶机制、建立岩溶模式的重要基石。

在地球化学分析中,微量元素和稀土元素的应用,使得岩溶分析方法取得了重要的进展(李定龙等,1999)。元素丰度在一定程度上可以揭示岩溶发生的环境和演变情况。一般来说,P, U 在岩溶系统中的含量低,而 Al 等在表生条件下稳定的元素丰度高;当粘性土充填孔洞缝中时,可以改变碳酸盐的化学成分,充填程度越高, Si, K, Ba, Zn, V 等易吸附的元素含量越高。

溶蚀过程中存在由弱到强的同位素分馏效应,即各区域样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 有随溶蚀强度加大同步朝低、负值方向迁移的规律。Mahboubi 等(2002)在研究伊朗 Kopet Dag 油田碳酸盐岩地层时,测得灰岩层的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的 PDB 值分别是 $+0.8\text{‰} \sim -1.5\text{‰}$ 和 $-2.82\text{‰} \sim +3.5\text{‰}$, 受到大气水和埋藏成岩作用的双重影响。根据同位素的质量平衡原理,成岩流体与基岩之间的同位素交换,就成了后来各种岩溶岩的同位素富集与贫乏的主要原因。郑荣才等(1997)依据蚀变碳酸盐矿物的锶同位素主要取决于流体中的 $w(^{87}\text{Sr})/w(^{86}\text{Sr})$ 比值的原理,首次利用 Sr 同位素对古岩溶作用进行了研究,对样品锶同位素比值及其与氧、碳同位素的相关关系作了详细的分析,得出川东黄龙组碳酸盐岩储层为古岩溶作用产物的结论;认为随着岩石蚀变程度的增加, $w(^{87}\text{Sr})/w(^{86}\text{Sr})$ 比值升高。

近几年出现的微量元素,尤其是稀土元素的研究,又将岩溶研究的定量化大大地推进了一步;稀土元素的迁移存在轻稀土迁出率高于重稀土的分馏效应,并具有随溶蚀强度加大, REE 与 $w(\text{La})/w(\text{Lu})$ 和 $\delta\text{Ce}/\delta\text{Eu}$ 比值趋于同步下降的特点,并且稀土配分模式也要相应地发生变化。李定龙等人(1999b)以皖北奥陶系稀土元素地球化学特征为标志确定其古岩溶发育环境、识别岩溶作用期次。稀土元素研究对于确定母岩来源,也是非常重要的。

油气田古岩溶研究过程中,充分应用钻井和录井资料是非常重要的。由于野外露头研究只能类比反映地下情况,而且多数地区很难找到较好的地下目的层的相应露头;同时,岩心资料非常有限,不可能只通过单孔来建立地下岩溶模式。这使得钻井、录井资料成为分析地下情况较为直接的重要证据。

相对于常规测井,成像测井资料在古岩溶的研究上独具特色。电阻率成像测井是 20 世纪 80 年代中期以来,在传统地层倾角测井技术基础上发展起来的一种高新技术。传统测井方法一般只能测量一条反映井壁地层特征垂向变化的测井曲线;而成像测井可以同时记录多达 192 条电阻率曲线,这些曲线有规律地覆盖在井壁不同部位,共同构成一个庞大的数字矩阵,经过数据恢复、图像生成和图像增强等一系列处理后,得到反映井壁地层细节特征的二维电阻率图像。利用这些二维图像,可以清楚地观察到井壁周围的岩溶现象。

根据不同规模岩溶储集空间对波速有不同程度影响的理论,利用现代精密的地震采集手段和处理方