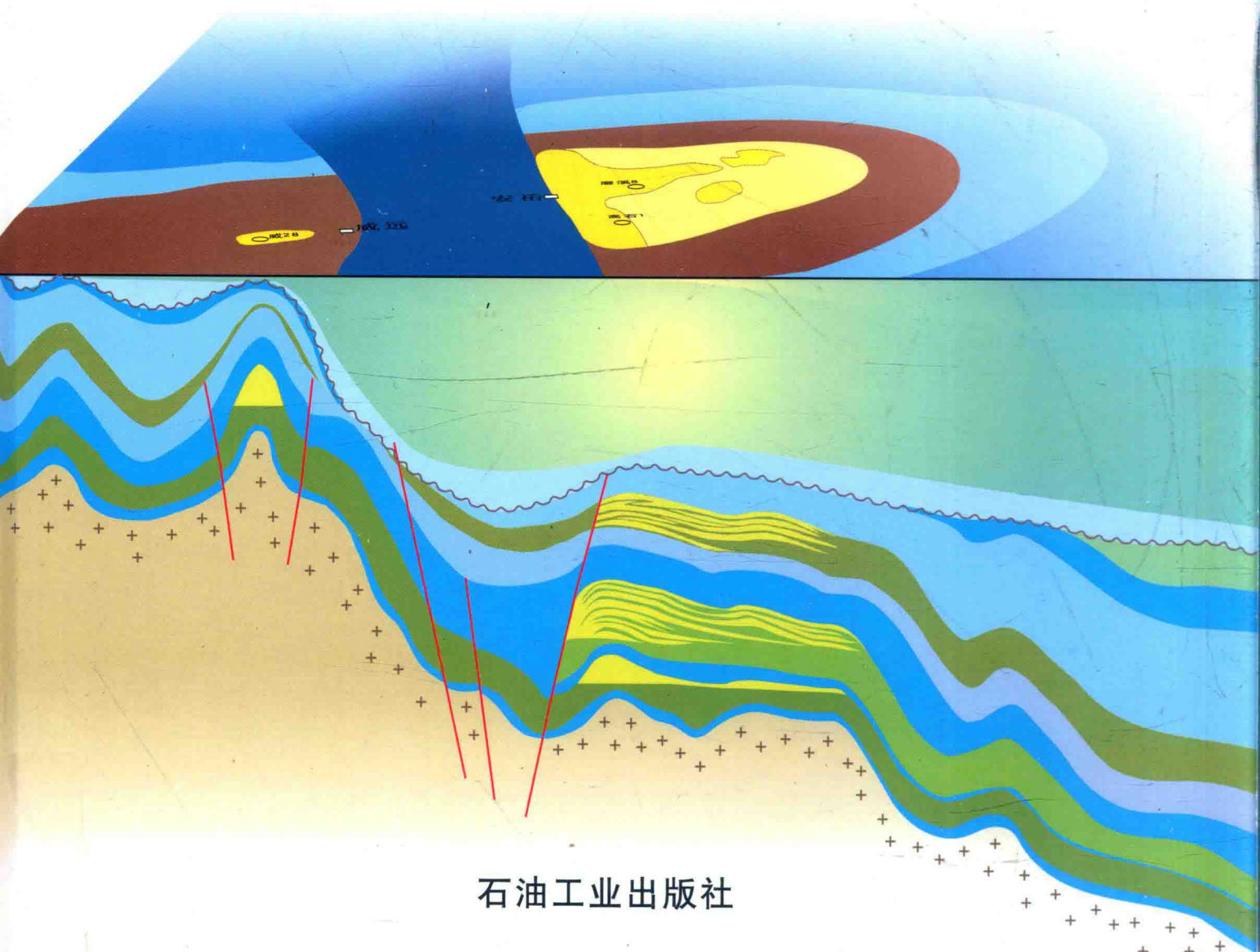


GULAO TANSUANYANYAN DAQITIAN DIZHI LILUN YU KANTAN SHIJIAN

古老碳酸盐岩大气田 地质理论与勘探实践

杜金虎 等著



石油工业出版社

古老碳酸盐岩大气田 地质理论与勘探实践

杜金虎 汪泽成 邹才能 徐春春 魏国齐
张宝民 杨 威 周进高 王铜山 邓胜徽 著

石油工业出版社

Geologic Theory and Exploration Practice of Ancient Large Carbonates Gas Field

Du Jinhua, et al.

Petroleum Industry Press

内 容 提 要

本书在重点介绍震旦系—寒武系地层划分对比新方案,克拉通内构造格局新认识,岩相古地理新模式的基础上,系统分析了古老碳酸盐岩大气田成藏的地质条件,创新提出了“四古”控制安岳特大型气田形成与富集的新理论,指出了四川盆地、塔里木盆地及鄂尔多斯盆地古老碳酸盐岩天然气勘探的主攻方向和有利目标,并扼要介绍了古老碳酸盐岩高效勘探的工程配套技术。

本书可供从事海相碳酸盐岩油气地质勘探与研究的专业人员参考,也可作为高等院校相关专业师生的阅读书目。

图书在版编目 (CIP) 数据

古老碳酸盐岩大气田地质理论与勘探实践/杜金虎等著.
北京:石油工业出版社,2015.12
ISBN 978-7-5183-1016-6

- I. 古…
- II. 杜…
- III. 碳酸盐岩油气藏-油气勘探
- IV. TE344

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 289067 号

出版发行:石油工业出版社
(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)
网 址: www.petropub.com
编辑部: (010) 64523562
图书营销中心: (010) 64523633

经 销:全国新华书店
印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2015 年 12 月第 1 版 2015 年 12 月第 1 次印刷
210×285 毫米 开本: 1/16 印张: 15
字数: 384 千字

定价: 120.00 元
(如出现印装质量问题,我社图书营销中心负责调换)
版权所有,翻印必究

前言

新元古界—寒武系作为全球古老碳酸盐岩含油气系统,20世纪以来,随着俄罗斯、北非、中国四川等特大型油气田的发现,其勘探的现实性和巨大勘探潜力,早已被世人所关注。然而,由于其地层时代之古老,烃源岩演化程度之高,储层成岩作用之强,构造演化期次之多,油气成藏条件之复杂,勘探工程技术难度之大,进而总体勘探进展缓慢,发现不多,成效不佳。

四川盆地是发育在扬子克拉通之上的大型叠合含油气盆地,经历了克拉通盆地和前陆盆地两大演化阶段。震旦系—寒武系古老碳酸盐岩在盆地内广泛分布,厚度达2000余米。盆地腹部发育一个巨型鼻状古隆起(本书简称川中古隆起),面积超过6万平方千米,具有良好的油气地质条件和巨大的勘探潜力,在古隆起上寻找特大型油气田是几代中国石油人的梦想。

川中古隆起震旦系一下古生界油气勘探可追溯到20世纪40年代,经历“三上威远”,于1964年在古隆起高部位发现威远震旦系气田,探明天然气地质储量400亿立方米。然而,其后40余年的持续探索,却始终未取得重大突破。2006年,中国石油天然气股份有限公司(简称中国石油)再次锁定川中古隆起,以其倾没端的高石梯、磨溪低幅度构造作为重点勘探目标,实施风险勘探,先后部署探井6口。2011年,高石梯构造部署钻探的高石1井于震旦系灯影组获日产百万立方米高产气流,2012年磨溪构造部署钻探的磨溪8井于寒武系龙王庙组再获日产百万立方米高产气流,勘探工作取得了历史性的重大突破。

胜利喜悦之余,勘探却面临着一系列重大科学和技术难题。气藏的主控因素是什么?气藏的储量规模有多大?古老烃源岩能否形成规模资源?古老碳酸盐岩能否发育规模有效储层?古隆起今构造低部位能否规模聚集?岩性—地层圈闭能否规模有效成藏?目的层埋藏深、地震储层预测难度大、测井评价精度不高、钻井周期过长、储层改造难度大,如何实现有效勘探开发?为此,2011年中国石油设立了重大勘探研究专项“四川盆地川中古隆起震旦系—寒武系含油气评价及勘探配套技术研究”。组织中国石油西南油气田公司、中国石油勘探开发研究院、川庆钻探工程公司等多家单位,开展联合攻关研究。项目实施突出“四个统一”,即统一立项、统一设计、统一组织、统一运行;强化“四个结合”,即科研与生产相结合、地质与工程相结合、基础与应用相结合、研究与部署相结合。通过三年的攻关研究,在反复认识—实践—再认识—再实践的过程中,地质认识不断深化,工程技术不断创新,为安岳特大型气田的科学、整体、快速、高效勘探开发提供了有力的理论与技术支撑。

综合地质研究创新提出古老碳酸盐岩特大型气田地质理论。发现了四川盆地震旦系一下寒武统克拉通内裂陷——德阳—安岳裂陷,提出了裂陷区控制生烃中心,评价震旦系—寒武系天然气资源量为4.1万亿~5.0万亿立方米;建立了震旦系灯影组镶边碳酸盐岩台地沉积模式和寒武系龙王庙组双颗粒滩沉积模式,阐明了岩相与岩溶双重因素联合控储的机理,预测了优质储层分布;建立了川中古隆起演化模式,提出川中古隆起为桐湾期沉积型古隆起与加里东期构造型古隆起叠合形成,早期发育,继承性演化,有利于油气运聚;建立了灯影组和龙王庙组岩性—地层型古圈闭与油气成藏演化模式;提出“四古”(古裂陷、古丘滩体、古隆起、古圈闭)是安岳特大型气田形成的关键因素。其中,古裂陷是核心要素,没有古裂陷就没有安岳大气田。德阳—安岳裂陷的发现以及“四古”控制安岳特大型气田形成的新认识,是理论研究的重大突破与创新,有效指导了川中古隆起整体勘探部署,并对其他克拉通盆地古老碳酸盐岩油气勘探具有重要的借鉴意义。

工程技术攻关形成了古老碳酸盐岩先进、实用、配套的工程技术。针对四川盆地震旦系—寒武系储层埋深大、岩性复杂、高温高压等复杂地质条件,立足自主研发和集成创新,形成了地震、测井、钻井及储层改造四项配套技术系列。这些技术的推广应用,大幅缩短了钻井周期,大幅提高灯影组及龙王庙组的储层预测精度;储层改造及增产效果显著,为高效勘探提供了技术保障。

理论和技术创新成果有效指导了安岳特大型气田整体勘探开发实践，在短短三年内发现了安岳特大型气田，整体控制储量规模达万亿立方米。2013 年磨溪龙王庙组气藏上交探明储量 4403 亿立方米，2015 年将整体建成 110 亿立方米产能规模，创造了一个整体、快速、高效的勘探典范。古老碳酸盐岩这一战略发现是中国乃至世界天然气勘探史上又一激动人心的重大成果和里程碑，对推进全球天然气工业的快速发展具有十分重要的意义。

《古老碳酸盐岩大气田地质理论与勘探实践》这部著作，正是以此项目的研究成果为基础，取其精华、凝练创新成果而作，是一部科研与生产紧密结合的成果，更是一部古老海相碳酸盐岩油气勘探新成果、新理论、新技术、新方法相集成的专著。地质认识对于古老海相碳酸盐岩沉积、储层及成藏研究具有一定的理论价值，勘探思路、勘探技术、勘探方法对古老海相碳酸盐岩油气勘探具有一定的借鉴作用。

本书共分九章。第一章绪论，简述四川盆地震旦系—寒武系油气勘探历程、勘探成果、地质新认识及技术新进展；第二章地层特征，阐述四川盆地震旦系灯影组、寒武系麦地坪组和龙王庙组的地层划分与对比新方案；第三章构造特征，阐述克拉通内裂陷及川中古隆起的构造演化的新认识；第四章岩相古地理，阐述震旦系灯影组及寒武系龙王庙组沉积新模式及岩相古地理特征；第五章储层特征，阐述震旦系灯影组及寒武系龙王庙组储层特征，揭示了储层形成机理及分布规律；第六章烃源岩及资源潜力，重点阐述了震旦系、寒武系烃源岩特征、成烃演化，评价了资源潜力；第七章安岳特大型气田的形成，重点阐述“四古”对大气田形成的控制作用；第八章古老碳酸盐岩勘探配套技术，阐述地震、测井、钻井、储层改造的技术进步与应用；第九章古老海相碳酸盐岩油气勘探前景，基于“四古”认识，分析了四川、鄂尔多斯和塔里木盆地古老碳酸盐岩油气勘探方向。

专著是在杜金虎教授组织下，结晶集体智慧，分工协作完成编写。前言、第一章由杜金虎完成；第二章由邓胜徽、邹才能、张宝民完成；第三章由杜金虎、汪泽成、沈平、杨跃明完成；第四章由邹才能、张宝民、杨雨、刘静江、周慧完成；第五章由周进高、张建勇、郝毅完成；第六章由魏国齐、杨威、谢增业、王志宏完成；第七章由杜金虎、何海清、汪泽成、王铜山、文龙、姜华、张玺华完成；第八章由徐春春、李亚林、赵路子、谢冰、刘定锦、张帆、王业众等完成；第九章由张健、杨跃明、汪泽成、潘文庆、徐安娜等完成。杜金虎、汪泽成负责统稿；杜金虎最终定稿。

中国石油天然气集团公司副总经理赵政璋教授、总经理助理李鹭光教授，中国石油勘探开发研究院院长赵文智院士、张义杰教授，勘探与生产分公司总工程师赵邦六教授、王喜双教授，川庆钻探工程公司副总经理伍贤柱教授等领导、专家在项目立项及攻关研究过程中给予大力支持与亲切指导。孙枢院士、刘宝珺院士、邱中建院士、胡见义院士、戴金星院士、贾承造院士、王铁冠院士、康玉柱院士、孙龙德院士、马永生院士、王成善院士、高瑞祺教授、傅诚德教授、何起祥教授、林畅松教授、冉隆辉教授、顾家裕教授、方朝亮教授、李宁教授等专家，对项目成果总结提炼及书稿编写提出了具体修改建议，在此一并表示衷心的感谢。

由于古老碳酸盐岩油气成藏与勘探的复杂性，加之作者水平有限，书中难免有不妥之处，敬请广大读者批评指正。

Foreword

The Neo-proterozoic-Cambrian, which is an old petroleum system of carbonates in the world, has long received considerable attention for its exploration feasibility and great potential as giant oil and gas fields have been discovered in Russia, North Africa, Sichuan of China since the last century. However, the process of its exploration, generally speaking, is slow and the results are not satisfactory because of its ancient strata, highly evolved source rocks, intensively diagenetic reservoirs, multiple stages of structural evolution, complicated conditions of hydrocarbon accumulation, and highly demanded techniques for exploration engineering.

The Sichuan Basin is a large superimposed petroleum basin developed on the Yangtze craton, and it has experienced two stages of evolution, craton basin and foreland basin. The old Sinian-Cambrian carbonates are distributed extensively in the basin, more than 2000 meters in thickness. A giant nose-like palaeo-uplift, Central Sichuan palaeo-uplift, is developed in the center of the basin with an area of over 60, 000 km² and has favorable geological conditions and great potential of petroleum exploration. It has been the dream for several generations of Chinese petroleum men to find giant oil and gas fields in this palaeo-uplift.

The exploration for oil and gas in the Sinian-Lower Paleozoic dates back to the 1940s in the Central Sichuan palaeo-uplift. In 1964, the Sinian Weiyuan gas field was discovered in the high part of the palaeo-uplift after “three times of exploration in Weiyuan” and the proved gas in place was 40 billion cubic meters. In the following exploration of over four decades, however, no great breakthroughs were achieved. In 2006, PetroChina Company Limited (PetroChina) focused on the Central Sichuan palaeo-uplift once again. Risk exploration was carried out with the low-amplitude structures of Gaoshiti and Moxi as the main targets, which are located in the plunge of the paleo-uplift, and six exploration wells were deployed. In 2011, the Gaoshi 1 well drilled in the Gaoshiti structure produced one million cubic meters of gas flow from the Sinian Dengying Formation, and in 2012, the Moxi 8 well drilled in the Moxi structure produced one million cubic meters of gas flow from the Cambrian Longwangmiao Formation. The exploration has achieved a historical breakthrough.

Along with the joy of victory is a series of significant scientific and technical challenges facing exploration. What are the major controls of the gas reservoir? How many are the reserves of the gas reservoir? Can the ancient source rocks form resources of scale? Can the ancient carbonates develop extensive, effective reservoirs? Can a certain scale of accumulation be formed in the lower part of the present structure of the palaeo-uplift? Can lithologic-stratigraphic traps form large, effective accumulations? How to explore and produce effectively under the following conditions: deeply buried layers of interest, difficult seismic reservoir prediction, poor logging evaluation, long drilling period, and difficult reservoir stimulation. To answer these questions, in 2011, PetroChina set a major project of exploration research “The Sinian-Cambrian Oil and Gas Evaluation of the Central Sichuan Palaeo-uplift in the Sichuan Basin and the Study of the Matching Exploration Techniques”. The PetroChina Southwest Oil and Gas Field, the PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, the CNPC Sichuan-Changqing United Drilling & Exploration Engineering Company etc were organized to research jointly. The implementation of the project stresses four unifications, i. e., unification of arrangement, unification of program setting, unification of planning, unification of deployment; and intensifies four combinations, i. e., combination of scientific research and production, combination of geology and engineering, combination of foundation and application. In the process of repeated cognition-practice-recognition-practice during three years of research, the un-

derstanding of geology have become deep and engineering techniques have advanced continuously, providing powerful theoretical and technical support for the scientific, overall, rapid and efficient exploration and production of the giant Anyue gas field.

The geologic theory of giant gas field of ancient carbonates has been innovated. The study has discovered the Sinian-Lower Cambrian intra-cratonic rift (Deyang-Anyue rift) in the Sichuan Basin, presented that the rift area controls the hydrocarbon-generating center, and estimated the Sinian-Cambrian gas resources to be 4.1~5.0 trillion cubic meters; established the sedimentary patterns of Sinian Dengying Formation intra-cratonic rimmed platform and Cambrian Longwangmiao Formation dual granular shoals in the Sinian Denying Formation, explained the mechanisms of the joint control of reserves by lithological facies and karst, predicted the distribution of excellent reservoirs; established the evolutionary model of the Central Sichuan palaeo-uplift: the Central Sichuan palaeo-uplift is formed by the superimposition of the depositional palaeo-uplift of Tongwan Age and the structural palaeo-uplift of Caledonian Age, it was developed early and evolved successively, favorable for the migration and accumulation of oil and gas; established the evolutionary model of the lithologic-stratigraphic palaeo-trap and hydrocarbon accumulation; proposed that “four palaeoes” (palaeorift, palaeo-uplift, palaeo bioherm-shoal body and palaeo-trap) are the key factors controlling the formation of the giant Anyue gas field. The discovery of the Deyang-Anyue rift and the new cognition of “four palaeoes” controlling the giant Anyue gas field are the significant breakthrough and innovation in theoretical study, have effectively guided the overall exploration deployment in the Central Sichuan palaeo-uplift, and provided important reference for the exploration of oil and gas of ancient carbonates in other cratonic basins.

The advanced, practical matching engineering techniques have been developed for ancient carbonates. Depending on independent research and development (R&D) and integrated innovation, four series of matching technologies of seism, logging, drilling and reservoir stimulation have been formed aimed at such complex geological conditions as deeply buried reservoirs, complicated lithology, high temperature and pressure of the Sinian-Cambrian in the Sichuan Basin. The promoted application of these techniques greatly improves the prediction accuracy of reservoirs in the Dengying and Longwangmiao formations, the logging identification accuracy of reservoir validity and fluids is all above 90%, the drilling cycles are shortened greatly, and the effects of reservoir simulation and production increase are significant, providing technical support for highly efficient exploration.

The innovative achievements of theory and techniques have successfully directed the overall exploration and development of the giant Anyue gas field, which has been discovered in a short time of three years. The overall controlled reserves are up to one trillion cubic meters in the field, the proved reserves of the Longwangmiao gas reservoir in Moxi was 440.3 billion cubic meters in 2013, and the production capacity of 11 billion cubic meters will be established in 2015, creating a model of overall, rapid and efficient exploration.

The present book, *Geologic Theory and Exploration Practice of Large Ancient Carbonates Gas Field*, is written based on the very research results of this project. Not pursuing comprehensive and systematic, it is accomplished by selecting the essence and condensing the innovative achievements, is a work of combining scientific study with production closely, also, is an integration of up-to-date achievements, theory, techniques and methods concerning the oil and gas exploration of ancient marine carbonates. The geologic cognition has theoretical values for the study of the deposition, reservoir and accumulation of ancient marine carbonates. The ideas, techniques and methods of exploration provide good reference for the exploration for oil and gas in ancient marine carbonates. The book is intended for geologic exploration staff, researchers engaging in comprehensive study of petroleum geology, and college students studying geology and petroleum science.

The book is composed of nine chapters. Chapter One, Introduction, briefly describes the petroleum exploration history, exploration achievements, new geologic cognition, and new technological advances of the Sinian-

Cambrian strata in the Sichuan Basin. Chapter Two, Geologic Features, elaborates the new scheme of strata division and correlation for the Sinian Dengying Formation and Cambrian Maidiping and Longwangmiao formations in the Sichuan Basin. Chapter Three, Structural Features, elaborates the new cognition of structural evolution of the intra-cratonic rift and Central Sichuan palaeo-uplift. Chapter Four, Lithofacies Palaeogeography, elaborates the sedimentary model and lithofacies palaeogeographic features of the Sinian Dengying Formation and Cambrian Longwangmiao Formation. Chapter Five, Reservoir Features, elaborates the features of the reservoirs of the Sinian Dengying Formation and Cambrian Longwangmiao Formation, reveals the formation mechanisms and distribution of the reservoirs. Chapter Six, Source Rocks and Resource Potential, mainly focuses on the characteristics and hydrocarbon-generating evolution of the Sinian and Cambrian source rocks, evaluates the potential of resources. Chapter Seven, Formation Conditions of Giant Anyue Gas Field, elaborates the control of "four palaeoes" on the formation of the large gas field. Chapter Eight, Deep Carbonates Exploration Techniques, describes the technical advances and application of seism, logging, drilling, and reservoir simulation. Chapter Nine, Exploration Prospects of Ancient Carbonates Oil and Gas, analyzes, based on the cognition of "four palaeoes", the exploration directions of ancient carbonates oil and gas in the Sichuan, Ordos, Tarim and other basins.

The book is a work of collective intelligence and cooperation organized by Professor Du Jinhu. Foreword and Chapter One are written by Du Jinhu; Chapter Two is written by Deng Shenghui, Zou Caineng and Zhang Baomin; Chapter Three is finished by Du Jinhu, Wang Zecheng, Shen Ping and Yang Yueming; Chapter Four is composed by Zou Caineng, Zhang Baomin, Yang Yu, Liu Jingjiang and Zhou Hui; Chapter Five is written by Zhou Jingao, Zhang Jianyong and Haoyi; Chapter Six is written by Wei Guoqi, Yang Wei, Xie Zengye and Wang Zhihong; Chapter Seven is completed by Du Jinhu, He Haiqing, Wang Zecheng, Wang Tongshan, Wen Long, Jiang Hua and Zhang Xihua; Chapter Eight is written by Xu Chunchun, Li Yalin, Zhao Luzi, Xie Bing, Liu Dingjin, Zhang Fan, Wang Yezhong, et al; and Chapter Nine is completed by Zhang Jian, Yang Yueming, Wang Zecheng, Pan Wenqing, Xu Anna, et al. Du Jinhu, Wang Zecheng are responsible for the compilation; and Du Jinhu finalizes the manuscript.

We extend our heartfelt thanks to Zhao Zhengzhang, CNPC Deputy General Manager; Academician Sun Longde, Zhao Wenzhi, Sun Shu, Liu Baojun, Qiu Zhongjian, Hu Jianyi, Dai Jinxing, Jia Chengzao, Wang Tieguan, Kang Yuzhu, Ma Yongsheng, Wang Chengshan; Professor Li Luguang, Zhang Yijie, Zhao Bangliu, Wang Xishuang, Wu Xianzhu, Gao Ruiqi, Fu Chengde, He Qixiang, Lin Changsong, Ran Longhui, Gu Jiayu, Fang Chaoliang, Li Ning; and other experts for their help in the summarization and extraction of the project achievements and also for their revision advice during the writing and review of the manuscript.

It is inevitable that there is something amiss in the book due to the complexity of the petroleum accumulation and exploration in the ancient carbonates, and due to the limited knowledge of the authors. Criticism and comments are always welcome.

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 勘探历程	(1)
第二节 勘探成果	(5)
第三节 理论认识	(10)
第四节 勘探技术	(12)
第二章 地层特征	(14)
第一节 震旦系	(14)
第二节 寒武系	(18)
第三章 构造特征	(31)
第一节 克拉通内裂陷形成与演化	(31)
第二节 桐湾运动与岩溶古地貌	(44)
第三节 川中古隆起形成与演化	(47)
第四章 岩相古地理	(57)
第一节 灯影组岩相古地理	(57)
第二节 龙王庙组岩相古地理	(71)
第五章 储层特征	(86)
第一节 震旦系灯影组丘滩体岩溶储层	(86)
第二节 寒武系龙王庙组颗粒滩岩溶储层	(105)
第六章 烃源岩及资源潜力	(120)
第一节 震旦系—寒武系烃源岩特征	(120)
第二节 气—源对比	(130)
第三节 震旦系—寒武系天然气资源潜力	(135)
第七章 安岳特大型气田的形成	(148)
第一节 古裂陷	(149)
第二节 古丘滩体	(151)
第三节 古隆起	(151)
第四节 古圈闭	(157)
第八章 古老碳酸盐岩勘探配套技术	(162)
第一节 地震储层预测与烃类检测技术	(162)
第二节 深层碳酸盐岩优快钻井技术	(181)
第三节 震旦系—寒武系测井评价技术	(189)
第四节 震旦系—寒武系储层有效改造技术	(206)
第九章 古老海相碳酸盐岩油气勘探前景	(215)
第一节 四川盆地	(215)
第二节 塔里木盆地	(218)
第三节 鄂尔多斯盆地	(222)
结束语	(224)
参考文献	(225)

Contents

Chapter One Introduction	(1)
1. Exploration History	(1)
2. Exploration Achievement	(5)
3. Geologic Cognition	(10)
4. Exploration Technique	(12)
Chapter Two Geologic Features	(14)
1. The Sinian	(14)
2. The Cambrian	(18)
Chapter Three Structural Features	(31)
1. Formation and Evolution of Intra-cratonic Rift	(31)
2. Tongwan Orogeny and Karstic Palaeogeomorphology	(44)
3. Formation and Evolution of Central Sichuan Palaeo-uplift	(47)
Chapter Four Lithofacies Palaeogeography	(57)
1. Lithofacies Palaeogeography of Dengying Formation	(57)
2. Lithofacies Palaeogeography of Longwangmiao Formation	(71)
Chapter Five Reservoir Features	(86)
1. Sinian Dengying Formation Bioherm-Shoal Karstic Reservoirs	(86)
2. Cambrian Longwangmiao Formation Granular Shoal Karstic Reservoirs	(105)
Chapter Six Source Rocks and Resource Potential	(120)
1. Features of the Sinian-Cambrian Source Rocks	(120)
2. Gas-Oil Correlation	(130)
3. Resource Potential of the Sinian-Cambrian gas	(135)
Chapter Seven Formation Conditions of Giant Anyue Gas Field	(148)
1. Palaeorift	(149)
2. Palaeo Bioherm-Shoal Body	(151)
3. Palaeo-uplift	(151)
4. Palaeo-trap	(157)
Chapter Eight Ancient Carbonates Exploration Techniques	(162)
1. Seismic Reservoir Prediction and Hydrocarbon Detection Techniques	(162)
2. Optimized Fast Drilling Techniques of Deep Carbonates	(181)
3. Sinian-Cambrian Well Logging Analysis	(189)
4. Sinian-Cambrian Reservoir Stimulation Techniques	(206)
Chapter Nine Exploration Prospects of Ancient Carbonates Oil and Gas	(215)
1. Sichuan Basin	(215)
2. Tarim Basin	(218)
3. Ordos Basin	(222)
Conclusions	(224)
Reference	(225)

第一章 绪 论

四川盆地是一个四周环山的构造盆地（图 1-1），大地构造属于扬子板块西部，为大型叠合含油气盆地，经历了震旦纪—中三叠世的克拉通拗陷盆地和晚三叠世—新生代前陆盆地两大阶段。地层发育齐全，震旦系—中下三叠统为海相地层，以碳酸盐岩为主，厚度为 6000~7000m；上三叠统一新近系以陆相沉积的碎屑岩为主，厚度为 2000~5000m。以出露侏罗系底界构成菱形盆地边框计算，盆地面积约 $18\times 10^4\text{km}^2$ 。含油气层系多，油气资源丰富，以天然气资源为主，是一个典型的富气盆地。

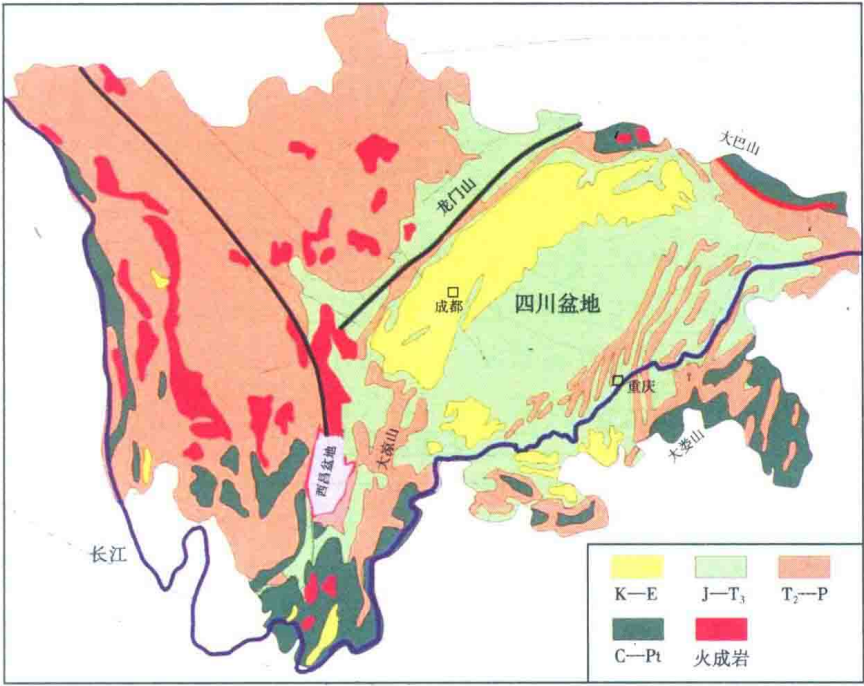


图 1-1 四川盆地及邻区地质略图

震旦系—寒武系是四川盆地时代最古老、分布又广泛的碳酸盐岩层系，厚度达 2000~3000m，面积超过 $20\times 10^4\text{km}^2$ ，具良好的油气地质条件。油气勘探始于 20 世纪 40 年代，迄今已有 70 余年勘探历史，勘探历程曲折漫长。2011 年在川中古隆起高石梯—磨溪地区发现安岳特大型气田，发育震旦系灯影组和寒武系龙王庙组两套含气层系，天然气储量规模已超过万亿立方米，是近年来我国乃至世界古老海相碳酸盐岩层系油气勘探的重大成果，具有里程碑意义。

第一节 勘探历程

四川盆地震旦系—寒武系油气勘探可分为四个阶段：威远气田发现阶段（1940—1964 年）、持续探索阶段（1965—2005 年）、风险勘探阶段（2006—2011 年）和整体勘探阶段（2012 年—现今）。

一、威远气田发现阶段（1940—1964 年）

四川盆地震旦系的勘探始于 20 世纪 40 年代。通过地面构造调查与评价，确定威远背斜构造作为勘探目标。期间“三上威远”，历经 24 年发现新中国成立以来的第一个大气田。1940 年“一上威远”，钻

探威 1 井，该井在阳新统完钻，获微气。1956 年“二上威远”钻探威基井，在下寒武统完钻，未获工业气流。1963 年“三上威远”，威基井加深钻探，1964 年 9 月钻至井深 2848.5m，在上震旦统灯影组顶部见气侵、井漏，中途测试获日产气 $(7.98 \sim 14.5) \times 10^4 \text{m}^3$ ，震旦系首次突破，随后 12 口井获气，探明含气面积 216km^2 ，地质储量 $400 \times 10^8 \text{m}^3$ ，发现了我国第一个整装海相大气田（图 1-2）。威远气田以震旦系灯影组为主要储层，气藏类型为构造气藏，气藏具统一底水，气藏充满度低，仅为圈闭幅度的 25%。

这一阶段的地质认识是“构造控藏”。

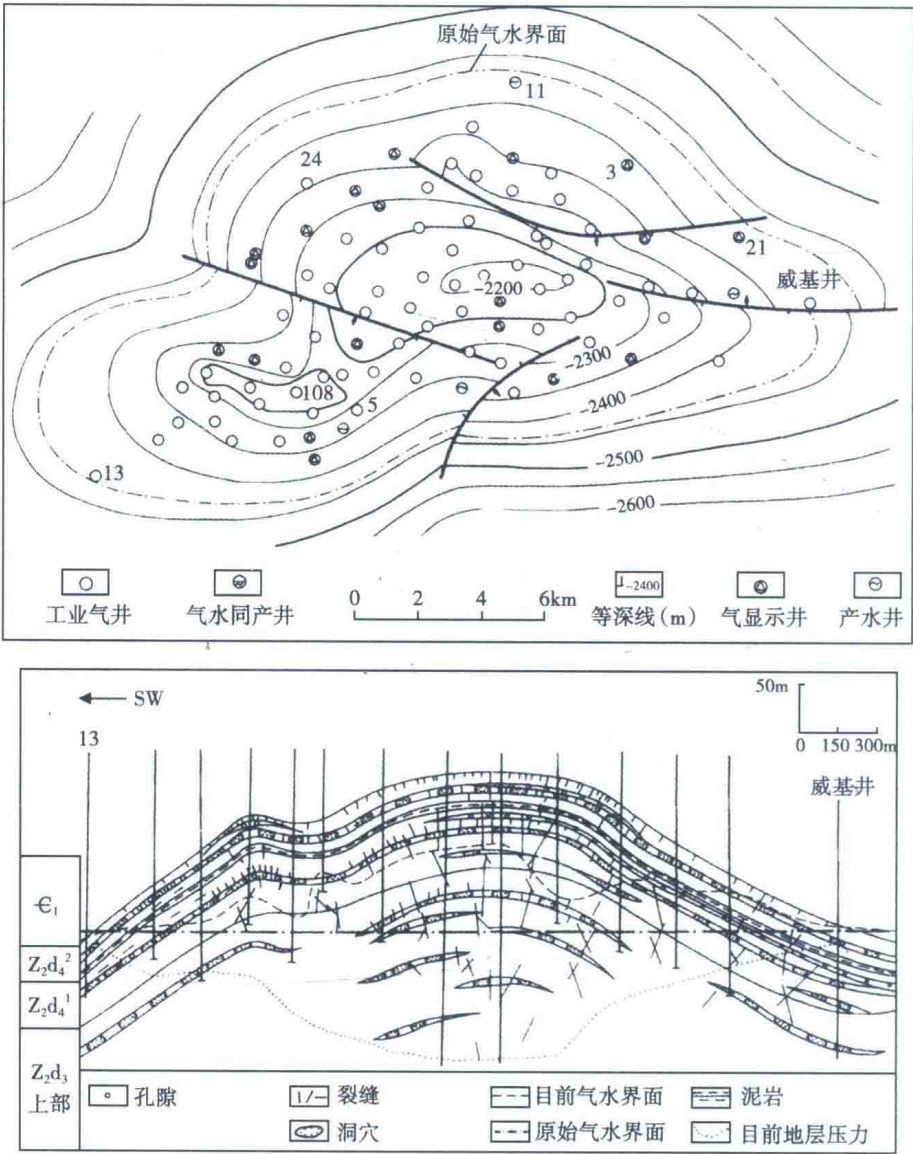


图 1-2 威远气田平面及气藏剖面图（据翟光明，1989）

二、持续探索阶段（1965—2005 年）

威远震旦系气藏发现后到 2005 年底的 40 多年时间里，川中古隆起震旦系—寒武系勘探潜力一直被地质学家所看好，并进行了持续的探索。20 世纪 70 年代初，重力、磁力及地震普查发现了川中古隆起（称为乐山—龙女寺古隆起），为大型鼻状古隆起（图 1-3），震旦系埋深 2500~5500m，长 320km，宽 160km，面积 $6.25 \times 10^4 \text{km}^2$ 。该古隆起长期继承性发育，具备形成特大型气田的基本地质条件。其后共钻探井 21 口，获气井 4 口，发现了资阳、高石梯、安平店、龙女寺等小型含气构造，资阳地区获控制储量 $102 \times 10^8 \text{m}^3$ 、预测储量 $338 \times 10^8 \text{m}^3$ 外，其余构造的高科 1 井、安平 1 井、女基井仅获低产或见显示，

勘探一直未获得大的突破。

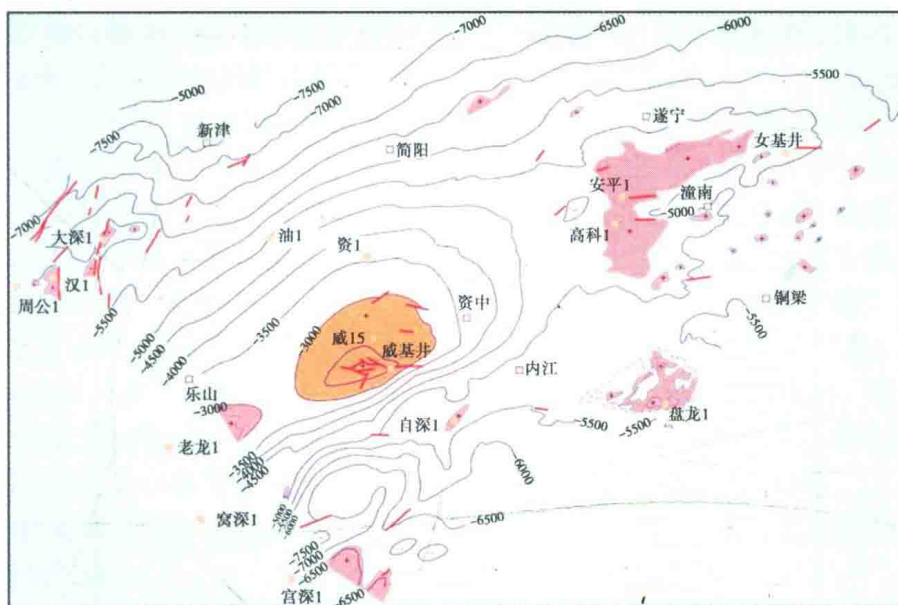


图 1-3 乐山—龙女寺古隆起震旦系顶界地震反射构造简图

这一时期，加强了四川盆地震旦系一下古生界油气地质研究。取得的基本认识是：(1) 下寒武统筇竹寺组为主力烃源岩，具大面积分布特点。(2) 震旦系灯影组白云岩孔洞型储层大面积发育，但非均质性较强。(3) 盆缘构造保存条件差，灯影组普遍含水；古隆起高部位构造控藏（如威远构造），但充满度低；古隆起斜坡及倾没端具成藏条件，但储层条件差。总体而言，勘探上，对大型古隆起勘探潜力既充满信心，但也意识到成藏条件复杂、勘探部署难度大。

三、风险勘探阶段（2006—2011 年）

2006 年，川中古隆起震旦系一下古生界被列为中国石油天然气股份有限公司重点风险勘探领域，勘探与生产公司组织多家单位进行系统研究并开展地震老资料处理解释攻关。

通过老井复查、露头剖面研究、地震储层预测，取得三条重要认识。一是，川中古隆起倾没端高石梯—磨溪地区（以下简称高磨地区）发育两大低幅度构造，保存条件好，具有良好的勘探潜力。二是，灯影组风化壳岩溶储层区域性分布，但非均质强，差中有好，仍是主要目的层之一。三是，寒武系龙王庙组在部分井和露头剖面可见颗粒滩白云岩储层，物性条件好，厚度可达 20~30m，是该区域潜在的高效目的层。

基于上述认识，转变勘探思路，又一次锁定川中古隆起倾没端高石梯和磨溪构造作为风险勘探目标，兼顾灯影组和龙王庙组两套目的层，经过多轮风险勘探目标评价优选，先后确定风险探井 6 口。

2007—2008 年，按照区域甩开思路，先后部署实施了风险探井磨溪 1 井、宝龙 1 井和汉深 1 井。磨溪 1 井由于浅层长兴组获气提前完钻；宝龙 1 井寒武系龙王庙组储层欠发育，洗象池组获低产气流；汉深 1 井灯影组储层发育，由于保存条件差，测试产水。三口探井钻探失利，再次证实震旦系灯影组、寒武系具有含气性，但储层非均质性强，寻找有利储层发育区和保存条件较好的继承性构造是该领域获得突破的关键。

2009 年，开展了新一轮的震旦系—寒武系统层对比、构造演化、沉积储层、老井复查等基础工作。特别针对高石梯—磨溪构造主要目的储层非均质性强、预测难度大的技术瓶颈，组织多家单位进行了磨溪构造三维地震（面积为 215km²）及高石梯构造二维地震资料（测线长度 1100km）的平行处理解释储层预测技术攻关。综合研究，坚持认为高石梯—磨溪地区成藏条件有利，尽管处于川中古隆起今构造的低部位，但具有如下特征。(1) 始终位于古隆起轴部，继承性发育；(2) 构造圈闭发育，形态完整、面

积大；(3) 烃源条件好，具备形成大型气田的烃源条件；(4) 震旦系储层“差中有好”，寒武系龙王庙组发育孔隙性储层，烃类检测具含气性。在进一步落实构造圈闭基础上，锁定了高石梯、磨溪、螺观山3个勘探目标（图 1-4），确定了3口风险探井，并决定先实施高石1井、螺观1井，磨溪8井要视高石1井钻探情况择机钻探。

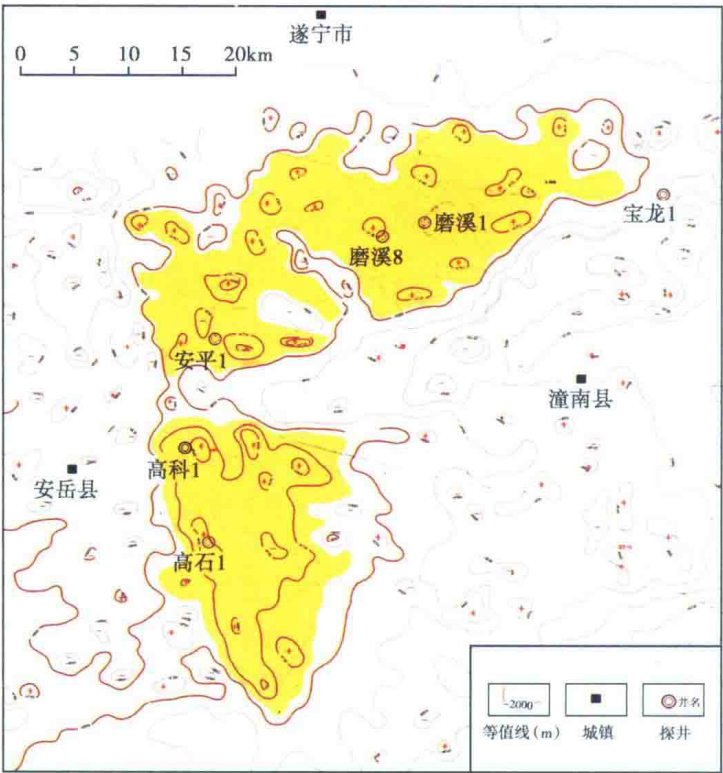


图 1-4 高石梯—磨溪地区寒武系底界地震反射构造图（2009 年）

高石1井位于高石梯构造，于2010年8月20日开钻，2011年6月17日钻至5841m完钻，完钻层位为震旦系陡山沱组。完井综合解释灯影组4956~5390m井段，气层13层150.4m，差气层12层41.9m；寒武系龙王庙组4501.5~4544m井段，气层与差气层2层，厚度为15.8m，孔隙度为4.6%。2011年7月，对震旦系灯影组灯二段射孔酸化联作测试，获日产天然气 $102.14\times10^4\text{m}^3$ 。高石1井震旦系灯影组获高产气流，川中古隆起震旦系天然气勘探取得重大突破。

磨溪8井位于古隆起磨溪—安平店潜伏构造震旦系顶构造高部位。于2011年9月8日开钻，2012年4月14日完钻，完钻井深5920m，完钻层位为震旦系灯影组灯一段。在钻井过程中寒武系龙王庙组见两次气测异常显示。在4646.4~4714.8m井段共解释气层2层，累计厚度为34.6m，孔隙度为4.8%~7.2%；差气层1层，厚度为15.0m，孔隙度为4.0%。2012年9月9日，第一层试油为龙王庙组下段（4697.5~4713m），测试产气为 $107.18\times10^4\text{m}^3/\text{d}$ 。2012年9月28日，第二层试油为龙王庙组上段（4686.5~4675.5m），测试产气为 $83.50\times10^4\text{m}^3/\text{d}$ 。磨溪8井于龙王庙组获得高产工业气流，实现了寒武系龙王庙组历史性突破。

四、整体勘探阶段（2012 年—现今）

高石1井获得重大发现后，中国石油确定了川中大型古隆起“整体研究、整体部署、整体勘探、分批实施、择优探明”的工作部署原则。设立了一体化攻关项目“四川盆地川中古隆起震旦系—寒武系含油气评价及勘探配套技术研究”，对古隆起进行整体研究，并以阶段地质认识为依据，整体部署，分步实施。

2011年7月—2012年9月，主攻高石梯—磨溪灯影组，兼探寒武系，分两批部署探井23口。2011

年8月，基于“大型低幅度构造控藏”的地质认识，立足高石梯、磨溪构造，第一轮整体部署探井7口。钻探结果，灯影组灯二段、灯四段分布稳定，厚度为50~123m。龙王庙组发现气层。2012年5月，基于川中古隆起倾没端具备多层系、多类型的地质条件的宏观判断，第二轮部署探井共16口。钻探结果表明，勘探成果进一步扩大，地质认识取得重要突破，发现了“台内裂陷”。

2012年10月—2013年12月，探明磨溪龙王庙组，整体评价灯影组。2012年9月，磨溪8井在寒武系龙王庙组获高产气流。基于对“龙王庙组储层厚度大、分布稳定、储层物性好、油气产量高”的地质认识，针对龙王庙组确定了第三轮勘探部署，部署探井12口，加快了磨溪龙王庙组的探明步伐。2013年4月，基于寒武系龙王庙组气藏为构造—岩性气藏，以及震旦系灯影组为大型古隆起背景上的岩性地层气藏的基本认识，确立了“整体控制区域含气规模，加快探明磨溪龙王庙组气藏”的总体目标，部署探井27口。钻探结果表明，基本控制灯影组的含气规模，探明龙王庙组的主力气藏。

2014年1月—至今，主攻高石梯—磨溪灯影组台缘带，控制龙女寺龙王庙组。基于震旦系台缘带控制富集高产，龙女寺龙王庙组以岩性气藏为主的地质认识，部署探井15口，三维地震868km²，钻探结果表明，基本探明了震旦系台缘带含气规模，控制了龙女寺龙王庙组的含气规模。

通过四轮的整体部署，整体控制了古隆起震旦系—寒武系万亿立方米大气区的勘探场面，探明了磨溪区块龙王庙组高效气藏。

第二节 勘探成果

三年的整体勘探，取得了丰硕的成果。在川中古隆起倾没端高石梯—磨溪地区发现了我国单体规模最大的海相特大型气田——安岳气田，储量规模超1.0×10¹² m³。震旦系灯影组整体控制含气范围为7500km²（图1-5），其中台缘富集带控制含气面积为1500km²，天然气储量规模达5000×10⁸ m³以上。寒武系龙王庙组发现磨溪、高石梯、龙女寺、高16井区块等气藏。其中，磨溪区块龙王庙组气藏单体含气面积800km²，探明天然气地质储量4404×10⁸ m³（图1-6），属大型整装气藏；高石梯、龙女寺、高16井区块控制储量规模（500~600）×10⁸ m³以上。龙王庙组储量总体规模超过5000×10⁸ m³。

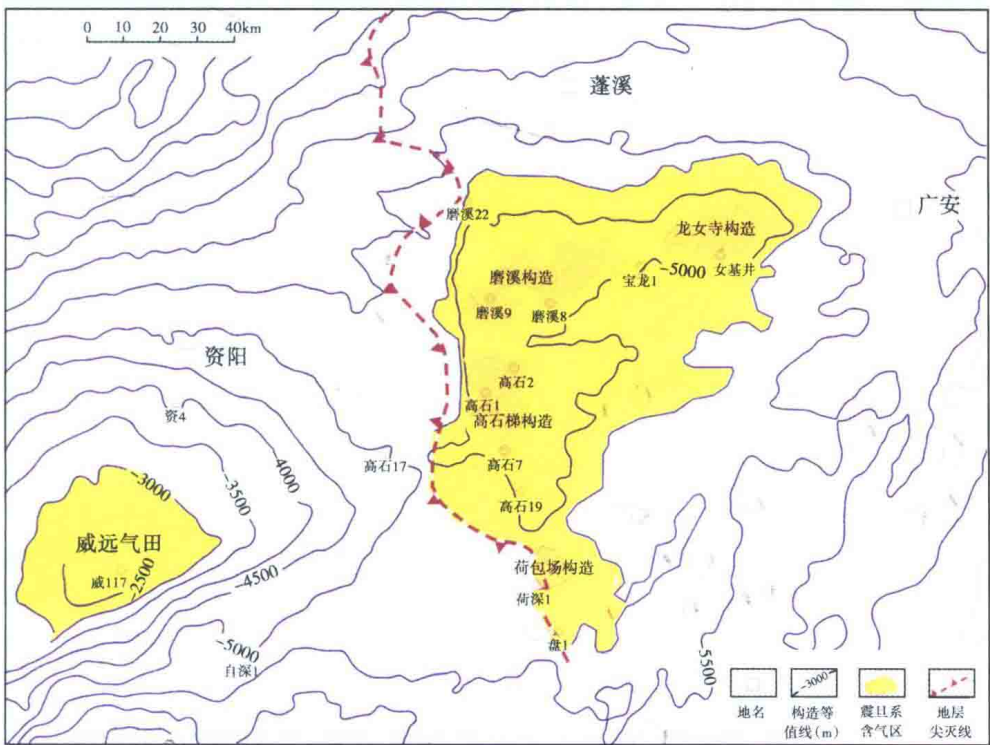


图 1-5 川中古隆起震旦系灯影组含气区分布图

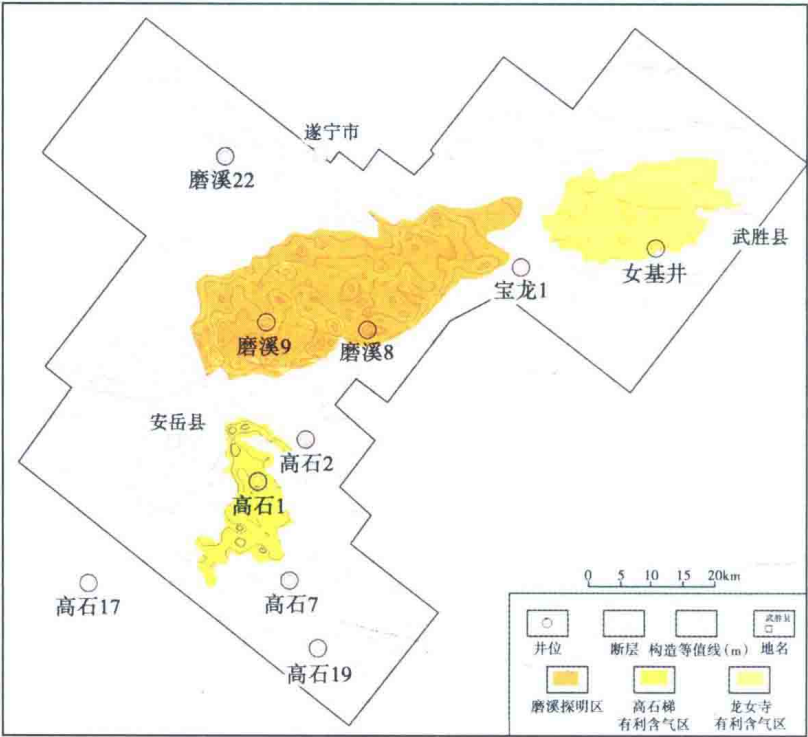


图 1-6 川中古隆起寒武系龙王庙组含气区分布图

一、龙王庙组气藏

1. 储层特征

龙王庙组储集岩类型主要为砂屑白云岩、残余砂屑白云岩和细—中晶白云岩等。储集空间包括孔隙、溶洞和缝，主要以粒间溶孔、晶间溶孔为主，其次为晶间孔，部分井段溶洞和缝较发育。储层孔隙度为 2.00%~18.48%，平均 4.28%。渗透率为 0.0001~248mD，平均 0.966mD。储层孔隙度—渗透率具有较明显的正相关关系。储层厚度为 10~60m，磨溪区块储层厚度最大，龙女寺及高石梯次之。

2. 气藏类型

安岳气田龙王庙组气藏总体表现为构造背景上的岩性气藏群。高石梯、磨溪、龙女寺、高 16 井区的气水界面、气体性质、压力系统具有明显的差别。磨溪构造主体的龙王庙组气藏，气藏高部位的西、南方向岩性圈闭的特征明显，目前开发证实的气水界面为-4385m。而龙女寺区块龙王庙组气藏在-4600m 仍未钻遇水层，从磨溪—龙女寺龙王庙组气藏剖面可以看出，安岳气田龙王庙组气藏总体表现为构造背景上的岩性气藏群（图 1-7）。

安岳龙王庙组气藏总体上属于深层、高温、高压气藏。气藏埋深大于 4600~4700m。气藏中部地层压力在磨溪区块为 75.7MPa，压力系数为 1.65；在高石梯区块平均为 68.3MPa，压力系数为 1.5；在龙女寺区块为 78.0MPa，压力系数为 1.67。气藏中部平均温度为 140.3~150.4℃。

3. 磨溪龙王庙组气藏具有“两大、两高、两好”的特点

1) 磨溪区块龙王庙组气藏含气面积大、储量规模大

磨溪区块龙王庙组气藏含气面积达 800km²，气层平均厚度为 36m，横向分布稳定。探明储量为 4404×10⁸m³，储量丰度为 5.5×10⁸m³/km²，是目前我国单体储量规模最大的碳酸盐岩特大型气藏。

2) 磨溪区块龙王庙组气藏产量高、温压高

龙王庙组探井试气 43 口/49 层，获工业气井 22 口/24 层；累计测试产量为 1817.1×10⁴m³/d，单井平均产量为 82.59×10⁴m³/d。开发井试气 11 口/12 层，获工业气井 11 井/12 层；累计测试产量为 1898.22×10⁴m³/d，单井平均产量为 172.57×10⁴m³/d。