



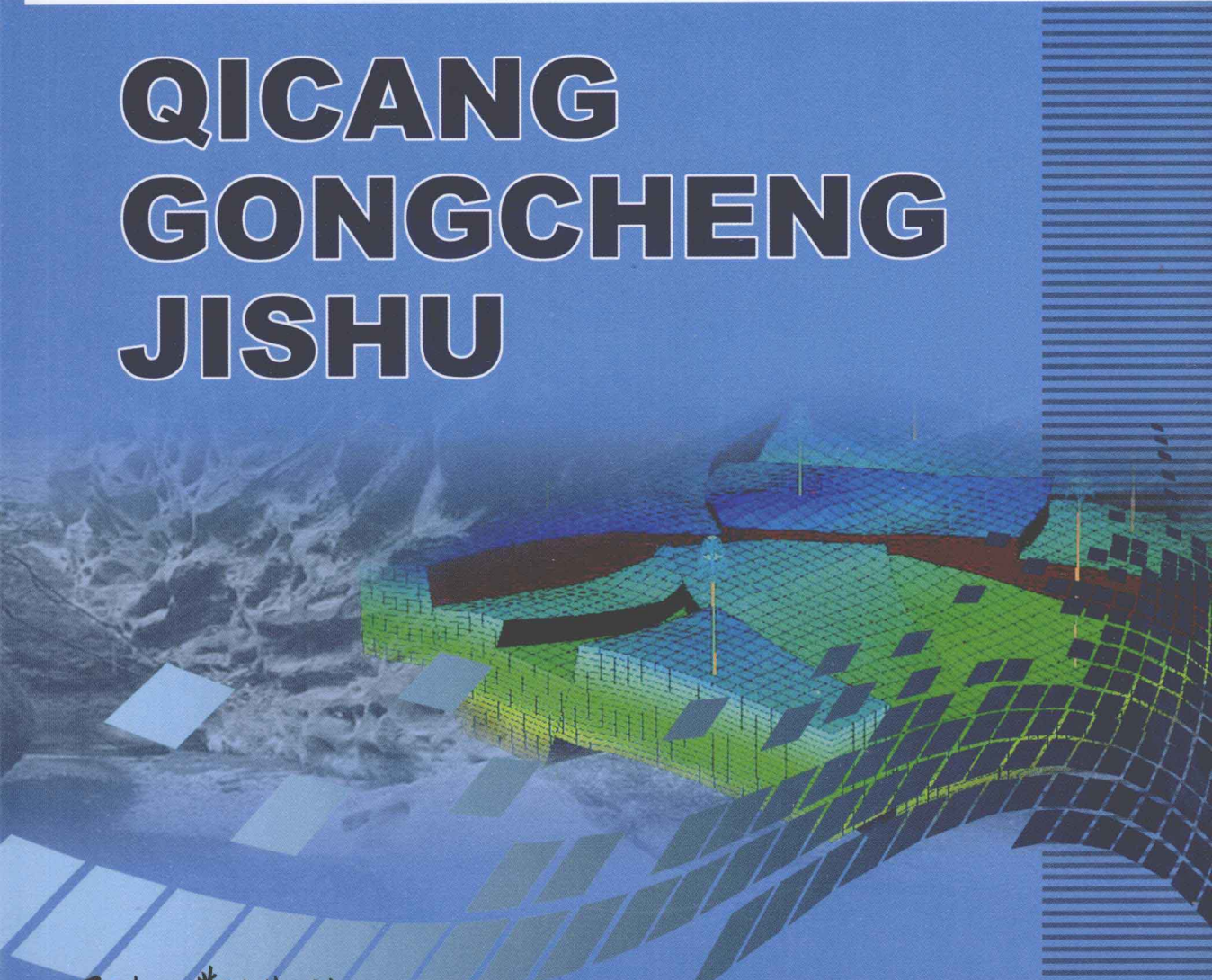
C

川南碳酸盐岩有水气藏开采丛书
HUANNAN TANSUANYANYAN YOUSHUI QICANG KAICAI CONGSHU

气藏工程技术

唐建荣 熊 钰 乐 宏 王园森 等编著

QICANG
GONGCHENG
JISHU



石油工业出版社

川南碳酸盐岩有水气藏开采丛书

气藏工程技术

唐建荣 熊 钰 乐 宏 王园森 等编著

石油工业出版社

内 容 提 要

全书主要包括气田地质、天然气物理化学性质、有水气藏水侵机理研究、水侵动态分析、储量计算与评价、有水气藏开发技术。本书采用理论结合实际的方法,介绍了有水气藏开发技术和现场实用的技术经验,具有较强的理论指导和实际应用价值。

本书可作为从事气田开发的中高级科技人员、经营管理者及石油大专院校相关专业师生的培训教材和使用参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

气藏工程技术/唐建荣等编著.
北京:石油工业出版社,2011.10
(川南碳酸盐岩有水气藏开采丛书)
ISBN 978-7-5021-8705-7

I. 气…
II. 唐…
III. 气藏工程—工程技术
IV. TE37

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 194009 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.cn
编辑部:(010) 64523580 发行部:(010) 64523620
经 销:全国新华书店
印 刷:石油工业出版社印刷厂

2011 年 10 月第 1 版 2011 年 10 月第 1 次印刷
787×1092 毫米 开本:1/16 印张:19.25
字数:488 千字

定价:66.00 元
(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)
版权所有,翻印必究

《川南碳酸盐岩有水气藏开采丛书》

编 委 会

主 任：乐 宏

副 主 任：杨水清 葛有琰 唐建荣

成 员：吕宗刚 陈华勇 戴晓峰 赵 成 喻平仁 王国森

李其荣 刘旭光 李雪萍 何激扬

技术顾问：许可方 杨川东 李颖川 何术坤 胡述清 王守康

颜光宗

《川南碳酸盐岩有水气藏开采丛书·气藏工程技术》

编辑组成员

组 长：唐建荣

组 员：王国森 李其荣 黎隆兴 熊 钰 何激扬 肖 红

董荣祥 夏绍文 严 鸿 张爱华 杨茂康 隆 辉

廖 易 郭富凤 余 翔 朱豫川

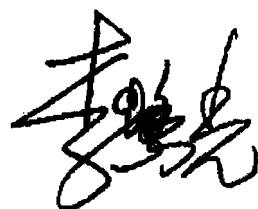
序

有水气藏的开发是天然气复杂气藏开发的世界级难题之一。据统计,我国目前已发现的气藏中80%为有水气藏,其天然气储量占气藏总储量的3/4以上。由于这类气藏大多数具有低孔低渗、非均质性强、气水关系复杂、流体普遍含酸性腐蚀成分的特点,且埋藏较深,给开发工作带来很大困难,采收率一般不到60%。

川南气区不仅是世界上勘探、开发和利用天然气历史最悠久的地区之一,而且是我国最早勘探、开发和利用有水气藏并取得显著成效的地区之一。

新中国成立以来,川南气区经过半个多世纪的勘探、开发生产实践,在不断学习、借鉴国内外有水气藏开发新工艺、新技术的同时,勘探开发工作者脚踏实地刻苦攻关,坚持不懈探索创新,在有水气藏开发的气藏工程技术、排水采气工艺技术和地面集输工程技术等领域的应用研究方面取得了丰硕成果,积累了宝贵的经验,初步形成了一套有水气藏开发特点的技术理论和工艺方法,使相当一批有水气藏的采收率达到或超过70%,部分气藏甚至超过90%,标志着我国有水气藏的开发进入了一个新的发展阶段。这些成就饱含着从事天然气勘探开发工作的广大工程技术人员、生产经营管理者和全体员工的智慧和艰辛。

《川南碳酸盐岩有水气藏开采丛书》约100万字,包括三个分册,分别为《气藏工程技术》、《排水采气工艺技术》和《地面集输工程技术》。研究应用这些技术对充分利用地层能量,科学开发有水气藏,最大限度地提高我国有水气藏采收率有着十分重要的作用。这套丛书是由长期从事气田开发工程技术工作的专家、技术骨干与西南石油大学从事油气田开发教学和科研的学者相结合集体创作完成的,具有较强的理论指导和实际应用价值。希望《川南碳酸盐岩有水气藏开采丛书》的出版能对提高有水气藏开发技术水平和促进有水气藏开发技术进步有所裨益。



2011年6月

前 言

川南气区有水气藏的勘探和开发,有其自身的特点。气田的地质条件复杂,绝大多数气田的储层具有边、底水,非均质性严重;气田规模多为中小型且地域分散,这就使气藏工程、排水采气及配套工程等,面临一系列技术难题,开采的技术难度较大。正是在这种复杂和困难的条件下,川南气区科技人员经历了30多年的不懈探索和实践,研究和应用有水气藏排水采气工艺新技术、新方法和新装置,加深了对川南气区有水气藏基本规律的认识,完善、发展和形成了有水气藏排水采气成套集成工艺技术,使川南气区老气藏排水采气换新貌,天然气生产得到了可持续发展,老气藏的平均采收率达到70%,其中一批有水气藏的采收率已达到70%以上。

《气藏工程技术》正是按系统工程要求编写的、总结了川南气区有水气藏开发的经验和技术,展示了川南气区有水气藏高效开采的成就和进步,对指导和促进有水气藏开发技术水平的提高有很好的借鉴参考价值。

本书是川南碳酸盐岩有水气藏开采丛书之一,全书共分为七章,内容包括:绪论、气田地质、天然气物理化学性质、有水气藏水侵机理研究、水侵动态分析、储量计算与评价、川南气区有水气藏开发技术。

本书由何术坤、胡述清为技术顾问,全书由序言、前言和相对独立的七章组成,主要编撰人员如下:

第一章 乐 宏、唐建荣、董荣祥。

第二章 乐 宏、李其荣、隆 辉、杨茂康。

第三章 唐建荣、熊 钰。

第四章 熊 钰、唐建荣。

第五章 熊 钰、唐建荣、王国森、郭富凤。

第六章 唐建荣、廖 易、熊 钰、余 翔、郭富凤。

第七章 王国森、黎隆兴、何激扬、肖 红、夏绍文、张爱华、曾玉明。

本书的编写工作得到了中国石油西南油气田分公司、西南石油大学、西南油气田分公司采气工程研究院等单位领导和专家学者的指导、支持和帮助。在此,对所有提供指导、关心、支持与帮助的单位 and 有关领导与员工以及为本书所引用参考资料的有关作者表示衷心的感谢。

鉴于编者水平有限,书中难免存在错、漏及不当之处,敬请使用本书的读者批评赐教,特此表示衷心感谢。

编 者

2011年6月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 有水气藏开发简史	3
第二节 有水气藏开发技术发展	9
第三节 有水气藏的主要特点及主体开发思路	16
第二章 气田地质	19
第一节 构造	19
第二节 地层及沉积相	26
第三节 储层	43
第四节 储集层的裂缝	65
第五节 缝洞系统的地震预测技术	72
第六节 气藏	89
第七节 气水分布	120
第三章 天然气的物理化学性质	130
第一节 天然气的组成和分类	130
第二节 天然气的相对分子质量、密度和比容	132
第三节 天然气偏差系数的确定	135
第四节 天然气的等温压缩系数	138
第五节 天然气的体积系数和膨胀系数	140
第六节 天然气的粘度	142
第七节 天然气含水量	144
第四章 有水气藏水侵机理研究	147
第一节 地层水的基本物理特性	147
第二节 气水两相渗流物理模拟	150
第三节 气水三维渗流物理模拟	162
第四节 水侵速度与采气速度的实验评价	164
第五章 水侵动态分析	169
第一节 水侵动态分析	169
第二节 气藏水侵机理宏观描述	207

第六章 储量计算与评价..... 231

 第一节 静态储量计算..... 231

 第二节 动态储量计算..... 231

第七章 川南气区有水气藏开发技术..... 263

 第一节 压水采气..... 263

 第二节 井筒排水采气..... 264

 第三节 低排低采、低排高采气藏排水开发方式..... 266

 第四节 “低排低采、低排高采” 开发方案设计..... 274

参考文献..... 298

第一章 绪 论

川南气区位于四川盆地南部，地理位置东到重庆市綦江县，西至四川省乐山市犍为县，南达贵州省赤水市，北抵四川省资阳市安岳县，中心在泸州、自贡地区；构造位置属川东南拗褶带和川中隆起带，西北为华蓥山大断裂，东为中梁山断裂，南为娄山褶皱带，西为西昌大断裂；工区面积 $5.3 \times 10^4 \text{ km}^2$ （图 1-1）。自 1945 年 4 月圣灯山气田隆 2 井投入开发，到 2009 年底，发现构造 129 个；其中，地面构造 93 个，单独命名的潜伏构造 26 个，向斜 6 个，地区 4 个（铜梁永安桥地区、资阳地区、威东地区、安岳—通贤地区）；已钻探构造 105 个，未钻探构造 24 个，完钻井数 1630 口，获气井 935 口，裂缝圈闭 632 个，获天然气探明储量 $1800.98 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，累计产气 $1070.40 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，产油 $13.8951 \times 10^4 \text{ t}$ ，产水 $5215.4942 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

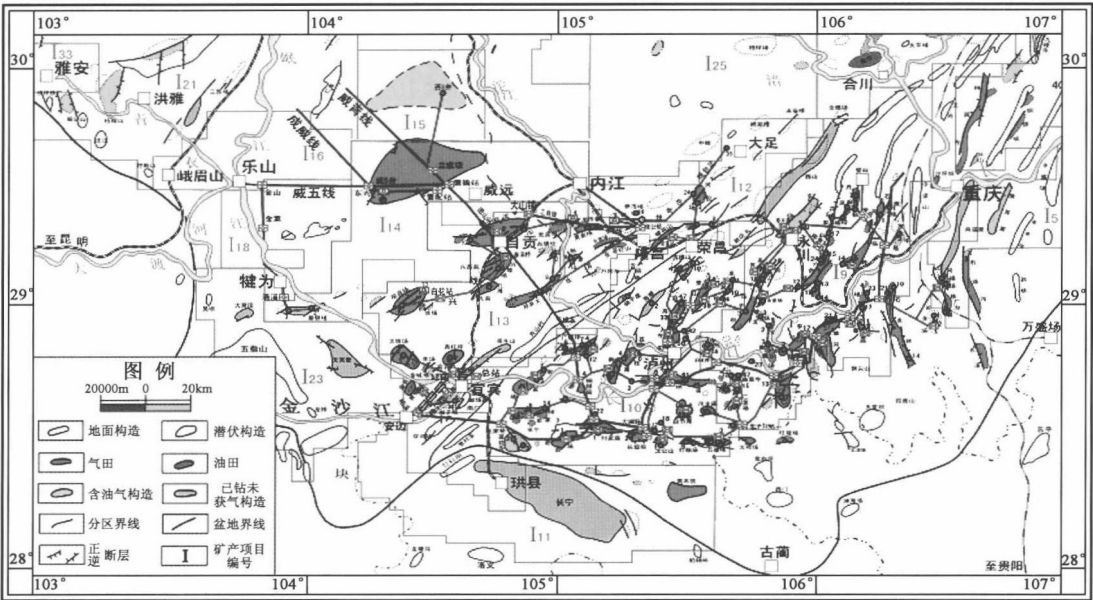


图 1-1 川南地区气田分布图

川南气区获工业气流的开发层系有 19 个，即侏罗系 1 个：自流井组东岳庙；三叠系 12 个：须家河组须六、须四、须三、须二、须一；嘉陵江组嘉四³、嘉四¹、嘉三、嘉二³、嘉二²、嘉二¹~嘉一；飞仙关组飞三、飞一；二叠系 3 个：长兴组，茅口组茅四~茅二，栖霞组栖霞二~栖霞一；奥陶系 1 个：宝塔组；寒武系 1 个：洗象池组；震旦系 1 个：灯影组。获工业气流的层位多，主要产层有 3 个，即三叠系嘉陵江组、二叠系茅口组和震旦系灯影组。

三叠系嘉陵江组嘉三气藏主要分布在自贡地区，储集单元由嘉四¹ 和嘉三组成，简称嘉三气藏，岩性主要为白云岩、鲕粒石灰岩、砂屑石灰岩，厚度 110~150m，埋深一般在 800~1500m，储集空间主要为粒间孔、次生粒间溶孔、晶间溶孔、白云石晶间孔、缝隙等。27 口井岩心物性分析，孔隙度一般在 1%~22.18%之间，大于或等于 3%的有效储层段平均孔

隙度为 4.36%~7.28%；其中嘉四¹~嘉三³ 为 4.59%~7.91%；渗透率一般小于 $9.87 \times 10^{-4} \mu\text{m}^2$ ，个别高达 $254 \times 10^{-4} \mu\text{m}^2$ ；有效储层厚度为 1.5~5m，平均约 4m。储集类型主要为裂缝—孔隙型或孔隙—裂缝型。由于基质岩块是低孔、低渗，所以孔隙度一般低于 1%，因此，裂缝是流体的渗流通道，储层分布稳定。

三叠系嘉陵江组嘉一（泸州地区）储层由嘉二¹ 和嘉一组成，岩性为白云岩、白云化生屑灰岩、生屑灰岩，厚度 180~200m，埋深一般在 1000~2500m，储集空间主要为粒间孔、粒间溶孔、粒内溶孔、白云化晶间孔、溶蚀缝等，溶孔发育程度受岩性、岩相控制，在滩相地区溶孔发育，但产量大小受裂缝控制，所以只有在溶孔和裂缝均发育的地区，才能获得高产油气流，储集类型主要为裂缝—孔隙型气藏。根据泸州地区嘉一 2697 个样品岩心物性统计，平均孔隙度 1%左右。但有效储层段孔隙度较高，如沈 17 井嘉二¹—嘉一上部有厚 8.65m 溶孔层，最高孔隙度 19%，平均 7.5%，张开缝发育，获得了高产油气流，储量 $5 \times 10^8 \text{m}^3$ 左右。

二叠系茅口组储层由茅四~茅二组成，为浅海碳酸盐岩沉积，岩性为生物碎屑灰岩，厚度 200~250m，埋深一般在 2000~4000m，储集空间主要为溶蚀孔、洞、缝等。茅口组碳酸盐岩储层具有极其明显的非均质性，基质岩块具低孔低渗特征。茅口组石灰岩基质孔隙度一般都小于 1%。据自贡地区 44 口井 4256.23m 岩心物性统计，6408 个样品分析，平均孔隙度值 0.76%，区间值 0.01%~15.10%， $\phi \geq 3\%$ 的有效值 4.98%（样品 211 个），占总样品数的 3.29%，2690 个样品分析，渗透率一般小于 $0.1 \times 10^{-4} \mu\text{m}^2$ 。据泸州地区 4053 个样品分析，平均孔隙度值 0.80%，渗透率一般小于 $0.1 \times 10^{-4} \mu\text{m}^2$ 。但在茅口组钻井过程中放空、井漏、井喷十分普遍。据泸州地区 72 井次放空情况统计，放空量最大的长 8 井位于长垣坝构造的高部位，在距茅顶 24m 放空 4.78m，喷大气大水。天然气储量大小与储层溶蚀孔、洞发育好坏，缝、洞的连通范围密切相关；天然气产量大小与裂缝发育密切相关。储集类型为典型的裂缝—孔洞型气藏。

震旦系灯影组储层为潮坪环境沉积的白云岩，厚度 110m 左右，埋藏深度 3000m 左右，主要储集空间有孔、洞和缝，孔隙又包括有晶间孔、粒间孔、溶孔、窗格孔。基质岩块的孔隙度低，平均孔隙度 2%左右；渗透率极低，平均为 $(0.01 \sim 0.4) \times 10^{-4} \mu\text{m}^2$ ，储层非均质性很强。主要储集空间是孔隙和溶洞，主要的渗流通道是裂缝，储集类型主要为裂缝—孔洞型。

不管是三叠系嘉陵江组气藏、二叠系茅口组气藏，还是震旦系灯影组气藏，气井普遍产水。在有水气藏开采过程中，早期是怕水，见水就压，见水就堵，结果是气井把水压小了，天然气产量也压小了。后来逐渐认识到，气藏表现为有气就有水，或者说有水就有气的气水共存特征。开采方式才由压水、控水采气转变为排水采气。为提高有水气藏采收率，科技工作者们通过引进、消化、创新，采取了化学泡沫排水采气、小油管排水采气、机抽排水采气、气举排水采气、电潜泵排水采气、水力喷射泵排水采气、螺杆泵排水采气工艺等单一和复合排水采气工艺措施。同时，根据川南地区二叠系茅口组气藏地质特征，地质工作者总结出气水共存的 5 种基本地质模式，提出了排水找气。

川南气区有水气藏在开采过程中，通过不断总结，由初期的单井排水采气，到气藏整体排水采气。而气藏整体排水采气又细分为低排低采和低排高采。在气藏开发的早期，由于气藏能量充足，一般利用气藏自身能量进行排水采气，而在气藏开发的中后期，气井水淹停产以后，一般采用工艺措施，进行人工助排生产。

第一节 有水气藏开发简史

一、古代天然气的开发和利用

四川盆地天然气的开发利用源远流长，远在两千多年以前的秦汉时期，就已出现了人工钻凿的盐井，伴随而出的天然气早在西晋时期就有文字记载，张华所著《博物志》中说：“临邛（今四川邛崃县）火井一所，从（纵）广五尺，深二三丈”，这远早于巴库巴拉汗地区有据可查的 1594 年由工长阿拉赫等所建的井。在我国，最早开发的气田就是川南气区的自流井气田，如图 1-2 至图 1-5 所示。

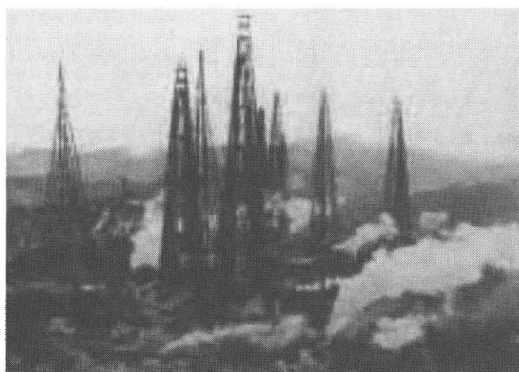


图 1-2 自流盐场井群

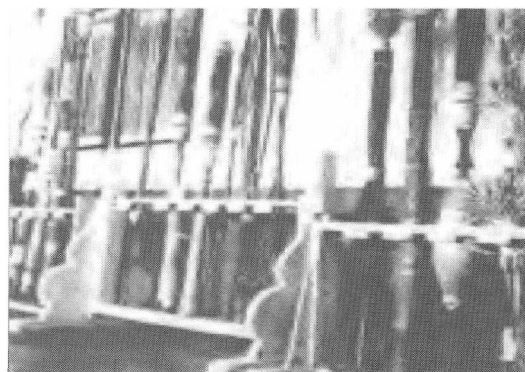


图 1-3 各种凿井，治井工具



图 1-4 牛车取卤



图 1-5 川北蓬溪县井口与采卤风貌

对自流井构造盐卤和“火井”天然气的开发，比较集中地代表了我国古代对天然气的勘探和利用情况。据东汉章帝时崔骃《博徒论》，该构造产盐始于汉朝，当时即以“江阳之盐”著称。据《华阳国志》蜀志及唐李吉甫《元和郡县图志》卷三，晋朝有深达 250 尺的富世盐井和大公井。至隋朝自流井构造采卤制盐业已很发达。唐朝时自流井构造可能已开始利用天然气煎制食盐。宋朝时将天然气用于制盐已有相当规模，盐井深度已达 230m。到明朝，凿井工艺技术有了更大发展，明末宋应星（公元 1637 年）所著的《天工开物》中留下了自流井一带用天然气煮卤熬盐的图画。随着钻井深度增加，开采层位也由新到老。清乾隆三十年（公元 1765 年）钻成 530m 深的老双盛井。嘉庆二十年（公元 1815 年）钻成的桂粘井深达 797.8m，钻穿层位已达三叠系顶部。道光二十年（公元 1840 年）钻成 1001.4m 深的兴海井，

开始钻达嘉五层（三叠系下统嘉陵江组顶部），从石灰岩中采黑卤。公元 1840 年以前，自流井构造主要采取三叠系上统须家河组的黄卤，并利用这些浅井中小量天然气产煎制食盐。

公元 1850 年左右，由于太平天国革命，海盐不能上运，故促使自流井构造的盐井增多，深度增大，于构造顶部的磨子井首先发现该构造的主力气藏——嘉三（ T_{1j}^3 ）气藏。磨子井深为 1200m，井喷后着火，火舌数十丈高，有“火王井”之称，估计天然气日产量数十万立方米。

在钻井和开采工艺技术方面，利用竹、木、铁、麻为材料制造出了结构简易、操作方便的钻采工具（图 1-6）和具有减压、配风、混合、气水分离等 4 项功能的“康盆”（井口装置，图 1-7）及山枳（外输管线）。有时“一井口接数十竹，并每竹中间复横嵌竹以接之”，“高者登山，低者入地，钩连支柱，虽长虹之饮涧，秋色之赴壑，不能名状也”。说明当时钻探和开采工艺均具有很高的水平，居于世界领先地位。著名英国科学家李约瑟，在其名著《中国科学技术史》一书中也承认：“今天在勘探油田时所用的这种钻探或凿洞技术，肯定是中国人的发明……”，并说，这种技术大约在 12 世纪以前传到西方各国。



图 1-6 旋转钻井



图 1-7 自流井构造早期采气井口装置——“康盆”

1840 年以后，三叠系嘉陵江组的气藏开始开发，仅从前人所留下的零碎的、间接反映出天然气数量的资料即可看出：自 1850 年以来的产盐量和气井煎盐的锅口数资料，大致在公元 1851—1950 年期间，自贡盐场用天然气共制盐 44207.2980 万担（ $2210 \times 10^4 \text{ t}$ ），共有制盐总的锅口数 771492 口，每一口锅盐用气 $105 \text{ m}^3/\text{d}$ ，一年按 365 天计算，历年累计产气量为： $771492 \times 365 \times 105 \approx 295 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

考虑到 1850 年磨子井喷气量，这样从 1850—1950 年自流井构造共产出天然气约 $300 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，上述统计数字仅仅是自流井构造三叠系下统嘉二段（ T_{1j}^2 ）以上的气层于 1850—1950 年间所采出的气量，而且 1850 年以前的产气量因无法考证，也未计算在内，但可见有相当的工业规模。

二、近代早期石油和天然气的钻探和调查

1936 年，先后在石油沟、圣灯山、海棠铺、威远等地进行钻探，仅获得了巴 1 井和隆 2 井两口小产量气井，探明天然气储量 $3.85 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。位于石油沟构造的巴 1 井于 1939 年底投产，日产天然气 $1 \times 10^4 \text{ m}^3$ 左右，是四川气田应用近代勘探开发技术投入开采的第一口气井。

隆 2 井是川南地区钻探的第一口井。该井 1943 年 5 月 1 日开钻，1944 年 7 月 5 日钻至层位 T_{1j}^3 （井深 844.97m）完钻，测试获气 $3.0 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

1937 年抗日战争爆发，四川成为后方重地，地质调查工作和以石油勘探为对象的调查工作仍然继续进行。

1939 年，前四川省地质调查所潘钟祥、彭国庆复查了石油沟构造北段。赵家骧、杨登华、肖安源对沙坪坝、相国寺、寿保场等构造进行了调查。

1939—1942 年，以中央地质调查所为主体，在黄汲清的领导下，对威远构造进行正规、系统的地质测量制图。1940 年陈秉范在永川至隆昌一带进行了调查，认为黄瓜山、圣灯山构造均有钻探价值，并把圣灯山构造列为第一位，编制了构造图，拟定了钻探井位。

抗日战争胜利后，石油地质调查则由前矿产测勘处及前四川省地质调查所担任。由谢家荣领导的前矿产测勘处复查了石油沟、海棠铺构造，重点对龙泉山背斜进行多次调查，又研究了沙坪坝穹窿构造，并对江油梓潼地区、遂宁蓬莱镇至南充一带地区做了区域了解。

在这一阶段后期，参加调查的外籍人士较著名者有前英伊石油公司总地质师 M. W. 斯特朗。他受前资源委员会的聘请来华考察，1947 年 9 月至 12 月在重庆、圣灯山、威远、五通桥、龙泉山、灌县、江油、广元等地工作，事后编制了“四川石油地质报告”及附图册，该材料是论述四川石油地质的第一份较完整的文献。

在外籍人中还有美国“战时生产局”的地质顾问茵奇，他于 1945 年赴川调查，写有“四川盆地油气之可能性”一文，曾认为“在四川盆地找到足够数量的石油希望很少……”。

对于在四川寻找油气持悲观观点的认识已被现在大量的勘探成果所否定，事实上早在 1946 年谢家荣就曾予以反对，他撰文道：“……四川盆地中油源遍布，适宜构造又到处可见，故含油区域甚宽广……采油之井寥寥可数，此与宽广油区之面积相较，诚履微渺之比例，且每区仅凿一井，此井无油，即顾而之他，一若采油事业，可以幸运得之，而绝无从容考量之余地者，依此而遽下结论，谓四川无油，诚不免有武断肤浅之讥矣”。

四川的石油和天然气钻探工作由前四川油矿探勘处担任，1937—1949 年这 12 年内共钻有石油沟 1 号井、2 号井，威远 1 号井，圣灯山 2 号井、4 号井（因故停钻），海棠铺 1 号井等 6 口井（表 1-1）。尽管钻井工作量不多，但 1939 年于石油沟构造钻获天然气流，是盆地内油气勘探的大事，证实了除盆地西南部（自流井构造）有气外，东部也有气。相继于 1945 年在圣灯山构造又获气流（并利用天然气炼制天然汽油、熬盐等），大大坚定了在四川盆地找油、气的决心。

表 1-1 1937—1949 年钻探情况一览表

井 号	开钻时间 年.月.日	完钻时间 年.月.日	完钻井深 (m)	完钻层位	日产气量 (10 ⁴ m ³)	日产水量 (m ³)
巴 1 井	1937. 11. 6	1939. 11. 25	1402. 20	不详	1. 3027	
威 1 井	1940. 7. 24	1941. 2. 20	1202. 66	P ₁ m ¹	微气	(产水)
巴 2 井	1941. 12. 21	1943. 2. 11	1002. 01	T ₃ x		
隆 2 井	1943. 5. 1	1944. 7. 5	844. 97	T _{1j} ¹ ~T _{1j} ³	3. 0	29. 382 (T ₃ x~T _{1j} ¹), 6. 38 (T _{1j} ¹ ~T _{1j} ³) 48. 3 (T _{1j} ³)
江 1 井	1945. 7. 2	1947. 4. 18	1157. 83	T ₂ l~T _{1j}		
隆 4 井	1949. 3. 28		418. 40 (至新中国 成立时)			新中国成立后继续加深, 1950 年完钻, 井深 973. 63m

三、现代石油和天然气的勘探开发阶段

1. 1949—1965 年石油和天然气勘探初期，产能建设阶段

四川解放前，川南气区共钻井 3 口（威 1 井、隆 2 井和隆 4 井），仅获气井 1 口（隆 2 井）。解放后，川南地区钻的第一口井是 1953 年 6 月 15 日开钻的圣灯山构造隆 1 井。到 1965 年底，川南地区共完钻井 140 口，获气井 65 口，投产气井 24 口，获裂缝圈闭 109 个，获探明地质储量 $615.89 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。当年产气达到 $10.81 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，历年累计产气 $72.69 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，当年产水 $5.9640 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，历年累计产水 $65.7525 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

1) 油气勘探工作的恢复和二叠系气藏的发现

新中国成立以后，中共西南局和西南军政委员会着手恢复和发展四川天然气工业。1950 年，除将在 1948 年已停产的巴 1 井恢复生产以外，又开始在隆昌圣灯山建立炭黑厂，组织试制炭黑，并于 1951 年 6 月利用隆 2 井产出天然气制造出第一批国产天然气槽法炭黑，开始了我国利用天然气生产炭黑的历史。

1949 年底四川解放以后，以四川盆地为重点进行了大量油气普查勘探工作，四川的石油天然气有了很大发展，建成了我国第一个天然气工业基地。从 1950—1952 年为解放后 3 年恢复阶段，当时的重庆西南地质调查所（西南地质局的前身）曾先后成立了 4 个石油勘探队。除复查了隆昌圣灯山构造，测制了 1/10000 的地质图和构造图外，还对五通桥地区、邓井关构造及黄瓜山构造进行地质制图。

新中国成立以后，在四川盆地开钻的第一口油气勘探井是隆昌圣灯山构造的隆 1 井（1953 年 6 月 15 日开钻），至 1956 年底，圣灯山构造已开钻 22 口井，完钻井 21 口。由于当时按均质油气藏用十字剖面的布井方案，不符合嘉陵江组碳酸盐岩裂缝性气藏特点，在两翼打了不少的井，除靠构造轴部获气井 3 口外，其余皆为干井或产量微小。

1956 年，东溪构造东 1 井（原巴 15 井）、黄瓜山黄 1 井及 1957 年高木顶构造高 1 井，先后在钻至嘉陵江组嘉一段和嘉二段时获工业气流。这些气田的发现和已有的石油沟气田、圣灯山气田，证实了三叠系嘉陵江组在川南地区是一个区域性产气层。

1957 年 3 月 28 日至 6 月 14 日，对圣灯山气田隆 10 井二叠系下统茅口组第二段（ $P_1 m^2$ ）上盘 2040~2060m 井段射孔测试，在回压 10.485MPa 的条件下，日产天然气 $16.3 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，该井是解放后在盆地内钻探的第一口二叠系探井，也是最先在下二叠统获得工业气流的探井。隆 10 井的突破是地质勘探上的一个大事件，为川南气区全面开展钻探二叠系气藏提供了重要的依据。

2) 对裂缝性气藏认识的深化和威远震旦系气藏的发现

随着科学技术的发展和改进，人们对裂缝性气藏的认识不断深化。在此阶段，经过川中会战、圣灯山气田综合勘探、中梁山坑道调查，以及“十快”、“十细”钻井工作方法等一整套对付裂缝性气藏技术措施的形成，打开了油气勘探的新局面。

1958 年，川南气区采用“撒大网、占山头、插红旗”甩开钻探，相继于同年 7 月在阳高寺构造阳 1 井、纳溪构造纳 1 井，8 月在邓井关构造邓 1 井，9 月在长垣坝构造长 1 井钻获高产气流（其中，长 1 井井口压力为 3.001MPa 时，日产气 $600 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，绝对无阻流量每日高达 $1000 \times 10^4 \text{ m}^3$ ），获得了好的勘探成效。

威远构造，1940 年曾钻探威 1 井，目的层为二叠系，1941 年完钻，未获油气，产水。

1956年5月22日钻探威基井，因钻机负荷能力有限，于1958年5月3日井深2438.65m，钻达下寒武统后停钻。1964年5月加深威基井，当钻至震旦系灯影组顶部（井深2858.11m）发生井漏，立即停钻进行中途测试。当降低井内液柱回压时，发生井喷，在回压23.327MPa下，日产气 $13.2180 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。用 $\phi 8\text{mm}$ 孔板测试（井段2438~2859.39m）日产气 $7.8 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，日产水 121.2 m^3 。后继续钻进至井深3041m完钻。该井在四川盆地最古老的地层震旦系顶部获得工业性气流，发现了当时国内含气面积最大，天然气储量 $400 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的底水气田。

3) 1965年石油工业部决定对四川进行“开气找油”会战

1965年6月，四川石油会战领导小组成立，为贯彻“开气找油”方针，决定集中力量在威远构造和泸州地区进行勘探和气田开发，力争尽早实现天然气年生产能力达 $70 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。为此突出了综合勘探，加强地震勘探和缝缝洞洞储集层的研究。如对钻井岩心、中梁山煤洞1755m巷道、范店乡震旦系1056m隧道、小南海60m采石场等进行了观察、描述和(1:1)~(1:10)的素描、照相。

1965年11月召开了大型技术座谈会，除总结对付裂缝性油气井防止井喷的“十快”措施外，还总结了取全取准井下地质资料的“十细”要求。特别是总结了裂缝分布规律：狭长的石油沟构造类型—裂缝主要沿长轴分布；较短的构造邓井关类型—裂缝发育带沿高点、轴线及偏缓翼发育；圆型的构造长垣坝类型—裂缝发育在高点成片分布；川中一带很平缓的构造裂缝沿断裂、陡带、鼻褶比较发育。进而提出：“打第一批初探井的井位，必须占高点、沿长轴、沿扭曲、沿断层”的布井原则。这“一占三沿”的井位部署原则，不仅提高了勘探成效，而且为今后的勘探部署奠定了重要的基础。

同时还发现川南泸州地区三叠系下统嘉陵江组嘉一段(T_{1j}^1)主要渗透层段分布在顶部40m范围内，产层分布稳定，与泸州古隆起的分布范围基本吻合。

2. 1966—1979年建成天然气生产基地，产能上升阶段

从1966—1979年，川南气区年完钻井数从62口到71口，年获气井数从22口到34口，获裂缝圈闭从10个到20个，投产气井从7口到35口，探明地质储量从 $70.21 \times 10^8 \text{ m}^3$ 到 $49.53 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，年产气量从 $8.80 \times 10^8 \text{ m}^3$ 上升到 $49.80 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，产水量从 $4.2579 \times 10^4 \text{ m}^3$ 到 $72.4775 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

到1979年底，川南气区累计完钻井数737口，获气井363口，获裂缝圈闭318个，投产气井318口，获探明地质储量 $1091.11 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，历年产气 $438.08 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，历年产水 $368.02 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

1966至1979年，川南气区阶段钻井597口，获气井298口，获裂缝圈闭209个，投产气井294口，获探明地质储量 $475.22 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，产气 $365.39 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，产水 $302.26 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

由于1965年“开气找油”勘探会战后相继结出硕果，四川盆地的油气勘探成效显著，川东南二、三叠系勘探进一步取得成果，威远气田投入开发和川中油田不断发展。在威远气田，会战初步探明了震旦系气藏，到1966年底，已获气井7口，年产天然气能力达到 $3.9 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。并于1967年建成威远至成都的输气管线，全长147km，管径630mm，是我国第一条大型输气管线。

1) 1966年3月大上泸州古隆起，综合勘探三叠系嘉陵江组

印支期形成的泸州古隆起是一个区域性隆起，以往在古隆起核部泸州一带钻探二叠系、三叠系过程中已经发现，但直至1960年始予确认。川南气区在泸州附近除获得嘉陵江组嘉

一气藏、下二叠统茅口气藏外，于嘉陵江组顶部侵蚀面附近也有油气显示。为了扩大找油领域，1966年四川石油会战领导小组决定大上泸州古隆起，并以印支期风化壳找油为重点，综合勘探嘉陵江组三套目的层（风化壳、嘉二段、嘉一段）的工作从1966年3月开始。

在此以前，西起梯子崖，东至坛子坝，北起黄瓜山，南至纳溪约3000km²的古隆起顶部已钻探构造8个，钻井59口（包括二叠系探井15口）。其中，在嘉一段获气田6个（黄瓜山、阳高寺、纳溪、龙洞坪、九奎山、广福坪），气井17口；嘉三段风化壳15口井见油气显示。1966—1967年大上古隆起期间，又开始在坛子坝、梯子崖、海潮、荔枝滩、桐梓园5个构造和得胜、福集2个向斜进行钻探，新开井34口（包括二叠系探井3口）。在嘉一段新获气田3个（坛子坝、荔枝滩、桐梓园），气井17口（累计获气井34口）。另外，在得胜向斜有少量原油产出、嘉三段风化壳及嘉二3层油气显示也较广泛，但油气产量很低，未形成工业规模。

勘探还表明，碳酸盐岩储集层除具有裂缝性特点外，还有孔隙层段，如1963年在阳高寺气田发现嘉二¹~嘉一（T_{1j}²—T_{2j}¹）白云岩、灰质白云岩中生物碎屑以及鲕粒等粗结构在一些层段集中出现，有的还具有较好的孔隙性。

1971年3月，位于阳高寺与纳溪构造鞍部的纳9井（1960年完钻）修井试油，于下二叠统获工业气流。纳9井下二叠统顶部海拔—2310.5m，比阳高寺构造高点的阳7井同层海拔—1587m低723.5m，比纳溪构造高点的纳8井同层海拔—1638m低672.5m，产气层位高差如此悬殊却均能产气，突破了油气仅受局部构造控制的概念。

2) 1971年8月泸州古隆起会战，以二叠系勘探为重点

为配合川东南地区的天然气勘探，加强了地震工作，使工作范围也从初期只在一个局部构造上进行，扩展为区域连片详查。依据地震布井，提高了勘探成效，如1966年在泸州地区约8500km²范围内，进行了地震连片详查工作，1971—1972年，完成了泸州古隆起顶部附近约3000km²的二叠系、三叠系地震构造图的编制。探井的部署原则也从“一占三沿”发展成“三占三沿”，即占高点、占鞍部、占鼻凸，沿长轴、沿扭曲、沿断裂，对油气勘探具有一定的指导意义。

此阶段，相继在付家庙、塘河、五通场等17个气田获嘉陵江组气藏；中心场等获上二叠统长兴组气藏；宋家场、庙高寺、白节滩等气田获下二叠统茅口组气藏。

通过钻探，对二叠系、三叠系的气水分布面貌有了进一步认识。嘉陵江组嘉一气藏在古隆起顶部约3000km²范围内未见水，无论是在背斜和向斜均有油气产出，在背斜构造主要产气，大向斜内以低产原油为主。下二叠统的主要产气层是茅口组，在古隆起顶部，不仅局部构造高点、长轴产气丰富，而且背斜构造鞍部也获工业气流，甚至在大向斜内也有天然气产出而水量有限。但与嘉一段比较，现今构造受断层切割影响，气水关系比较复杂，常存在海拔高部位产水、而低部位又产气的情况，在同一气田、同一气藏没有统一的气水界面。二叠系、三叠系气藏的钻探情况反映了泸州古隆起的存在和发展对早期油气运移起到了一定的作用，但形成工业气藏主要还是属于现今构造圈闭。因此，选择有利的构造圈闭和构造部位是获得工业气井、提高储量和产能的关键。

3. 1980—2002年，产量递减，排水采气阶段

随着勘探时间的延续，新获储量相对减少，年采出气量大于新获储量，一批高产井、高产气藏相继出地层水，气藏、气井进入排水采气，产能递减阶段。

从1980—2002年，川南气区年完钻井数从44口减少到20口，年获气井数从23口减少

到 8 口, 获裂缝圈闭从 11 个减少到 4 个, 投产气井从 31 口减少到 13 口, 探明地质储量从 $58.55 \times 10^8 \text{ m}^3$ 减少到 $4.02 \times 10^8 \text{ m}^3$, 当年产气量从 $42.32 \times 10^8 \text{ m}^3$ 减少到 $11.42 \times 10^8 \text{ m}^3$, 产水量从 $91.8778 \times 10^4 \text{ m}^3$ 减少到 $201.3830 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

1980—2002 年, 川南气区阶段钻井 733 口, 获气井 452 口, 获裂缝圈闭 276 个, 获探明地质储量 $389.92 \times 10^8 \text{ m}^3$, 产气 $497.86 \times 10^8 \text{ m}^3$, 产水 $3747.7971 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

到 2002 年底, 川南气区累计完钻井数 1470 口, 获气井 815 口, 获裂缝圈闭 594 个, 投产气井 793 口, 获探明地质储量 $1481.03 \times 10^8 \text{ m}^3$, 历年累计产气 $935.94 \times 10^8 \text{ m}^3$, 历年累计产水 $4115.81 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

4. 2003 年至现在, 产量逐渐回升阶段

2001 年, 发现了麻柳场嘉陵江组气藏, 2002 年, 麻柳场嘉陵江组气藏投入开发生产, 川南气区天然气年产量走出 2002 年的最低产量 $11.42 \times 10^8 \text{ m}^3$, 逐渐步入回升阶段。

从 2003 年到 2009 年底, 川南气区年完钻井数从 33 口到 31 口, 年获气井数从 25 口增加到 34 口 (包括旧井回采获气), 获裂缝圈闭从 14 个减少到 3 个, 投产气井从 12 口增加到 20 口, 探明地质储量从 $97.40 \times 10^8 \text{ m}^3$ 上升到 $1800.98 \times 10^8 \text{ m}^3$, 年产气量从 $11.60 \times 10^8 \text{ m}^3$ 上升到 $17.84 \times 10^8 \text{ m}^3$, 产水量从 $166.0960 \times 10^4 \text{ m}^3$ 上升到 $248.6865 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

2003—2009 年, 川南气区阶段钻井 160 口, 获气井 120 口, 获裂缝圈闭 38 个, 投产气井 92 口, 获探明地质储量 $319.95 \times 10^8 \text{ m}^3$, 产气 $106.67 \times 10^8 \text{ m}^3$, 产水 $1140.32 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

到 2009 年底, 川南气区累计完钻井数 1630 口, 获气井 935 口, 获裂缝圈闭 632 个, 投产气井 885 口, 获探明地质储量 $1800.98 \times 10^8 \text{ m}^3$, 历年累计产气 $1042.61 \times 10^8 \text{ m}^3$, 历年累计产水 $5256.13 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

第二节 有水气藏开发技术发展

一、有水气藏开发认识历程

川南气区自三叠系嘉陵江组隆 2 井 1945 年投产出水到现在, 对三叠系嘉陵江组、二叠系茅口组、威远气田震旦系灯影组碳酸盐岩裂缝性有水气藏的开采, 经历了压水采气、井筒排水采气、气藏排水采气三个阶段。

1. 压水采气阶段 (1969 年以前)

1969 年以前川南气区产水量较大的气水同产井仅 4 口, 由于对有水气藏开采没有经验, 均采取控水、压水或关井的办法, 认为把地层水控制在气藏内, 不让地层水产出, 才能产出天然气, 没有采取排水采气的生产方式, 造成气井水淹。开发生产过程中, 受条件限制或根据需要任意开关井, 有的见水就控制水产量, 有的关井不让产水, 没有排水采气的观念和意识。

圣灯山气田嘉三气藏隆 2 井, 1945 年 4 月投产, 1948 年 1 月至 1950 年 8 月期间大排量排水采气, 产水量 $250 \sim 360 \text{ m}^3/\text{d}$; 1950 年 9 月至 1954 年 2 月期间停止排水, 采取控水采气方式生产, 产气量减少; 1954 年 3 月至 1958 年 5 月期间, 采取关井间断排水采气方式生产, 于 1969 年 2 月水淹。

圣灯山气田嘉三气藏隆 23 井, 1956 年 4 月投产, 出水后到 1958 年 5 月期间, 采取关