



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

排水采气工艺技术

乐宏 唐建荣 葛有琰 喻平仁 等编著

PAISHUI
CAIQI
GONGYI JISHU

石油工业出版社

川南碳酸盐岩有水气藏开采丛书

排水采气工艺技术

乐 宏 唐建荣 葛有琰 喻平仁 等编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书主要内容包括气水两相垂直管流与排水采气工艺的选择、优选管柱排水采气、泡沫排水采气工艺、气举排水采气工艺、电潜泵排水采气工艺、机抽排水采气工艺、射流泵排水采气工艺、组合排水采气工艺以及排水采气新工艺试验。本书采用理论结合实际的方法,介绍了排水采气工艺原理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学习参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

排水采气工艺技术/乐宏等编著.
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 978-7-5021-8696-8

- I. 排…
- II. 乐…
- III. 气田开发-排水采气-生产技术
- IV. TE375

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 190847 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:14.75

字数:371 千字

定价:58.00 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 王园森

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·排水采气工艺技术》

编辑组成员

组 长：唐建荣

组 员：喻平仁 王园森 黎隆兴 何激扬 廖 毅 廖德君

肖 红 朱豫川 朱 庆

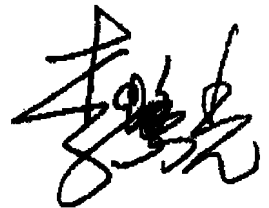
序

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超过70%。

《排水采气工艺技术》是按系统工程要求编写的。全书总结了川南气区有水气藏排水采气工艺的经验和技术,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排水采气工艺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》之二,全书共分为十章,内容包括绪论、气水两相垂直管流与排水采气工艺的选择、优选管柱排水采气、泡沫排水采气、气举排水采气、电潜泵排水采气、机抽排水采气、射流泵排水采气、组合排水采气工艺以及排水采气新工艺。

本书由杨川东、李颖川为技术顾问,全书由序言、前言和相对独立的十章组成,主要编撰人员如下:

第一章 乐 宏、唐建荣、喻平仁。

第二章 杨 涛、喻平仁、朱 庆。

第三章 喻平仁、喻 宁、杨川东。

第四章 葛有琰、段方华、叶 婷、谢远新。

第五章 乐 宏、唐贵林、朱 庆、谢 波、冉明伟、郑清平。

第六章 葛有琰、廖 毅、朱豫川。

第七章 唐建荣、唐贵林。

第八章 乐 宏、谢 飞。

第九章 唐建荣、张俊杰。

第十章 乐 宏、阮开贵。

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、支持与帮助的单位及有关领导与员工以及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,书中难免存在错误,敬请读者批评赐教,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 川南气区概况.....	1
第二节 川南气区有水气藏开发历程及气藏工程研究新成果.....	4
第三节 川南气区有水气藏基本特征.....	9
第四节 川南气区排水采气工艺技术应用现状及发展趋势	10
参考文献	16
第二章 气水两相垂直管流与排水采气工艺的选择	17
第一节 气水两相垂直管流	17
第二节 气井动态曲线	36
第三节 排水采气工艺的选择	56
参考文献	63
第三章 优选管柱排水采气	64
第一节 技术发展	64
第二节 工艺程序及井下作业	70
第三节 应用工艺需注意的问题	73
第四节 取得的主要成果和经验	74
参考文献	83
第四章 泡沫排水采气工艺	84
第一节 机理及技术发展	84
第二节 工艺流程及主要设备	89
第三节 主要成果与经验	93
参考文献.....	103
第五章 气举排水采气工艺	104
第一节 机理及技术发展.....	104
第二节 气举方式及管柱结构.....	108
第三节 工艺流程及主要设备.....	110
第四节 工艺优化设计及程序.....	116
第五节 取得的主要成果与经验.....	125

参考文献	132
第六章 电潜泵排水采气工艺	133
第一节 工艺流程及主要设备	133
第二节 工艺的优化设计及程序	140
第三节 取得的主要技术成果与经验	145
参考文献	154
第七章 机抽排水采气工艺	155
第一节 机理及技术发展	155
第二节 工艺流程及主要设备	157
第三节 工艺优化设计及程序	160
第四节 取得的主要成果与经验	164
参考文献	170
第八章 射流泵排水采气工艺	171
第一节 机理及技术发展	171
第二节 工艺流程及主要设备	172
第三节 工艺的优化设计及程序	173
第四节 取得的主要成果及经验	176
参考文献	183
第九章 组合排水采气工艺技术	184
第一节 泡排+优选管柱组合排水采气工艺	184
第二节 泡排+气举组合排水采气工艺	187
第三节 泡排+气举+增压组合排水采气工艺	193
参考文献	197
第十章 排水采气新工艺试验	198
第一节 气体加速泵排水采气工艺	198
第二节 球塞气举排水采气工艺	207
第三节 螺杆泵排水采气工艺	215
参考文献	225

第一章 绪 论

第一节 川南气区概况

川南气区位于川渝地区南部，地跨四川省乐山、宜宾、自贡、内江、资阳、泸州地区及重庆市西南部分地区，东起重庆市江津、綦江，西至乐山市沐川、犍为，南起泸州市叙永、古蔺，北至资阳、遂宁，勘探开发面积约 $4.99 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图 1-1)。

截至 2009 年底，川南气区已钻探背斜构造 107 个，获工业气流 78 个；钻探向斜构造 6 个，获工业气流 3 个；获工业产层 20 个，其中侏罗系 1 个、三叠系 13 个、二叠系 3 个、奥陶系 1 个、寒武系 1 个、震旦系 1 个；获气田 53 个，含气构造 21 个 (图 1-2)；获裂缝圈闭 629 个，其中核实储量的裂缝圈闭 408 个，原始探明天然气地质储量 $1801 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，历年累积采气 $1029 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，剩余地质储量 $772 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，采出程度 57.1%。在核实储量的裂缝圈闭中有水裂缝圈闭 326 个 (占 80%)，其探明天然气地质储量 $1687 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，占川南气区已探明储量的 93.7%，历年累积采气 $933 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，采出程度 55.3%，部分有水气藏裂缝圈闭的采出程度已经超过了 70% (表 1-1)。

表 1-1 川南气区采出程度超过 70% 的部分有水气藏裂缝圈闭统计表

气 田	气 藏	裂 缝 圈 闭	探明储量, 10^8 m^3	累产气量, 10^8 m^3	累产水量, 10^4 m^3	采出程度, %
自流井	茅口	自 2 井、自 3 井	55.70	53.92	76.99	96.80
黄家场	茅口	家 5 井、家 13 井	46.00	35.76	5.22	77.74
河包场	茅口	包 39 井	2.32	1.72	21.94	74.14
		包 33 井	11.25	8.40	26.43	74.67
圣灯山	嘉三	隆 27 井	4.40	3.95	44.47	89.77
大塔场	茅口	塔 4 井	5.40	4.04	34.49	74.81
阳高寺	茅口	阳 72 井	1.72	1.66	51.64	96.51
		阳 43 井	5.01	3.72	51.60	74.25
宋家场	茅口	宋 1 井	38.00	28.86	73.57	75.95
桐梓园	茅口	桐 4 井	15.00	11.08	52.97	73.87
付家庙	茅口	付 5 井	38.26	34.28	34.57	89.60
长垣坝	嘉一	长 4 井	10.70	7.92	58.58	74.02
长宁	茅口	宁 5 井	1.72	1.58	1.30	91.86
白节滩	茅口	白 19 井	2.63	2.41	9.73	91.63
纳溪	嘉一	纳 1 井	6.68	6.47	9.45	96.86
庙高寺	茅口	寺 25 井	10.85	9.62	24.08	88.66
分水	茅口	分 12 井	5.87	5.30	3.72	90.29
合江	嘉三	合 10 井	5.56	5.21	7.23	93.71
鹿角场	茅口	鹿 3 井	6.89	6.31	11.42	91.58
临峰场	茅口	临 18 井	2.76	2.34	3.00	84.78
花果山	茅口	花 11 井	1.21	1.00	2.42	82.64

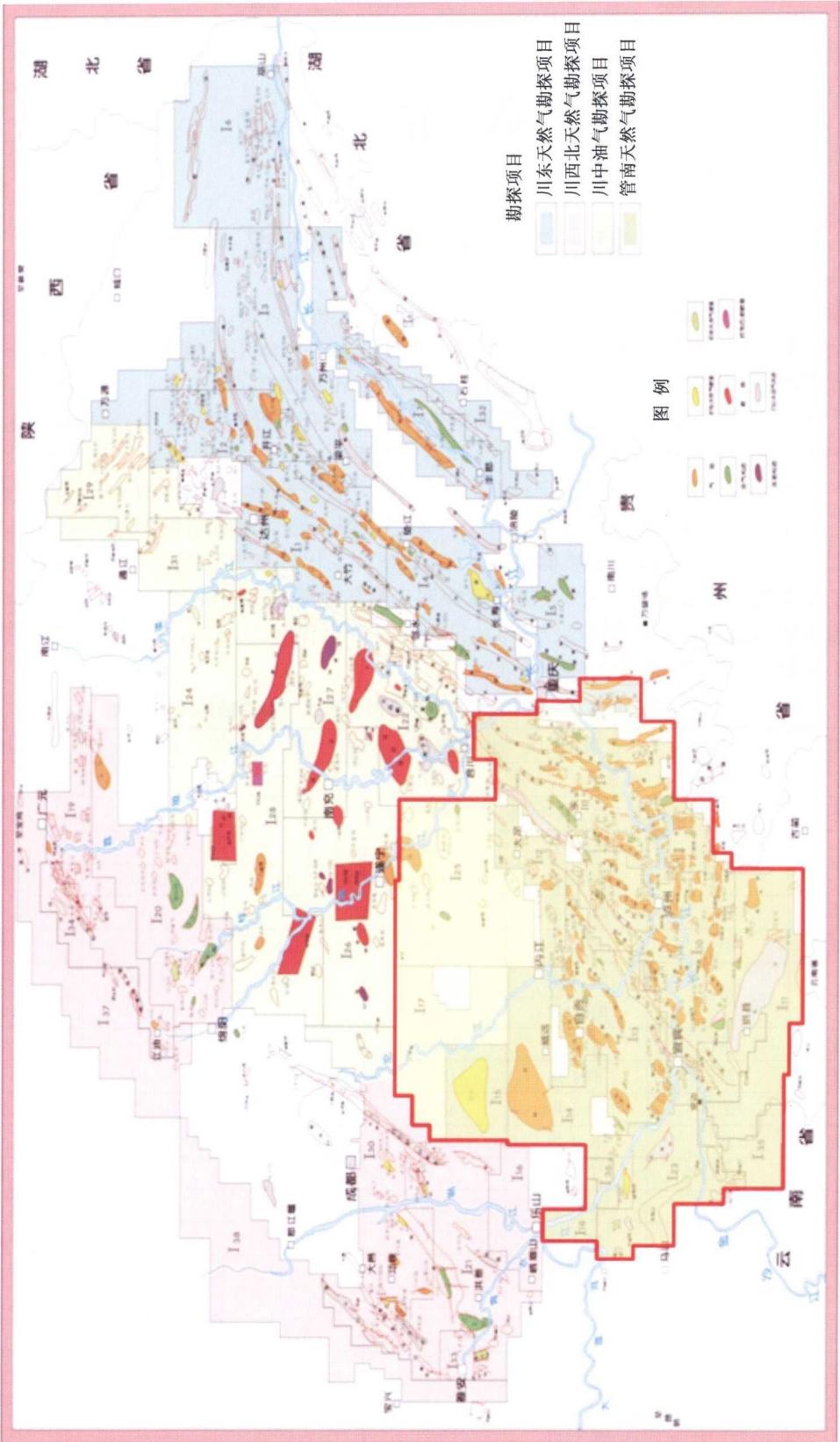


图1-1 川南气区位置图

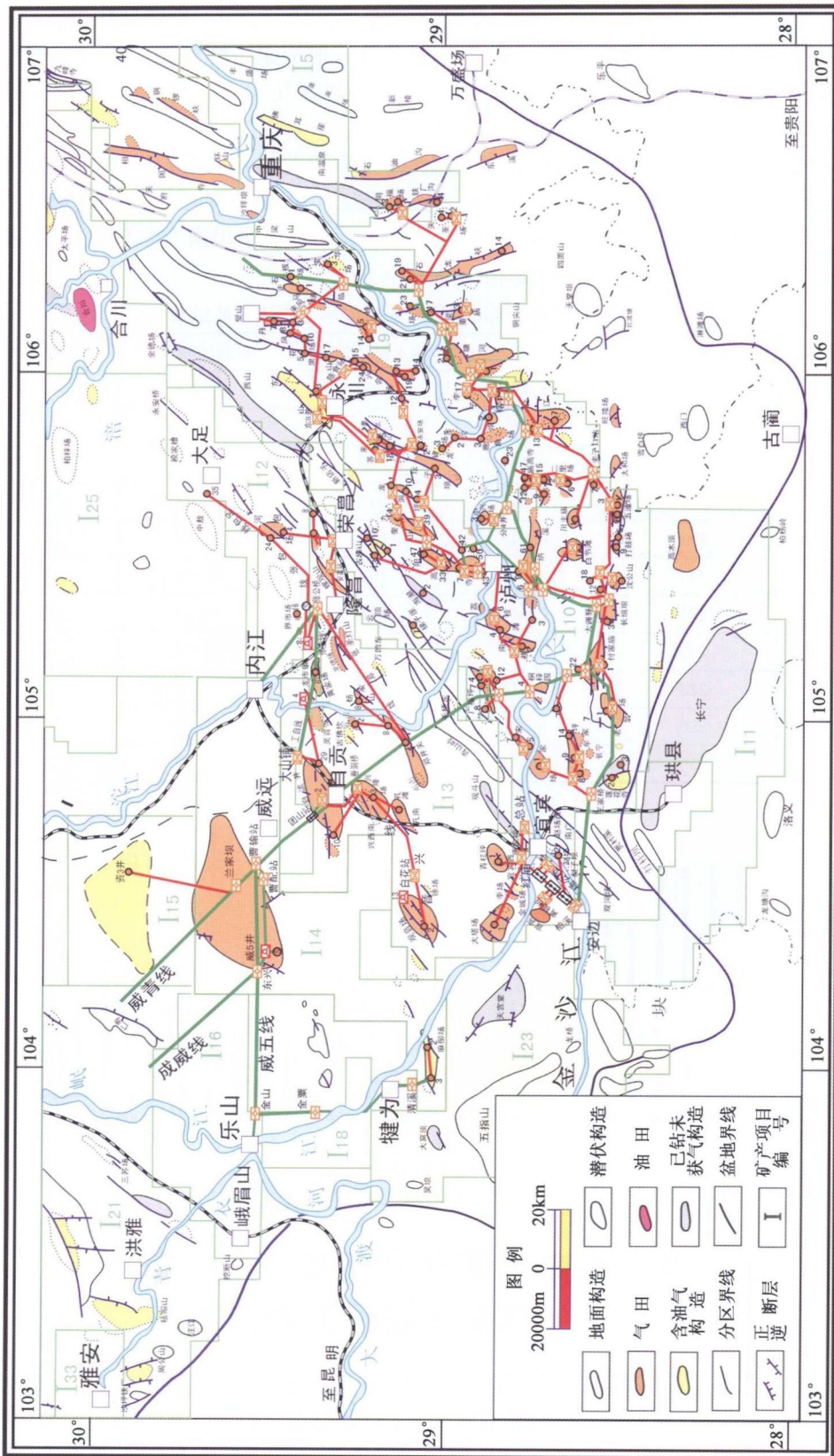


图1-2 四川盆地川南气田分布图

排水采气工艺技术是开采有水气藏最有效的工艺技术手段之一，它包括优选管柱、泡沫剂助排（简称泡排，下同）以及气举、机抽、电潜泵、射流泵、螺杆泵等多种排水工艺技术，能快速有效地排出地层水，恢复或保持气井较长时间稳定生产，从而大幅度提高有水气藏天然气采收率。

川南气区自 1978 年在气水井上试验、应用排水采气工艺技术以来，经过 30 多年的研究和推广，取得了良好的增产效果（图 1-3）。特别是近 10 年来在单项工艺的基础上发展了组合工艺，使得排水采气工艺技术的增产效果更为显著，对加速川南有水气藏的后期开发，稳定天然气产量，延缓递减起到了重要作用（表 1-2）。

表 1-2 1999—2009 年川南气区应用排水采气工艺成效表

年 度	工艺措施井数, 口	增产气量, 10^8m^3	排水量, 10^4m^3	自然递减, %	综合递减, %
1999	178	4.70	275.9	10.07	7.44
2000	182	4.74	216.5	14.76	12.07
2001	249	5.83	223.4	13.59	10.94
2002	258	5.54	201.4	29.02	11.64
2003	257	6.54	166.0	27.06	3.82
2004	236	5.94	109.6	31.05	5.37
2005	256	6.60	141.6	12.34	5.86
2006	245	7.37	156.2	14.98	2.20
2007	223	7.41	150.1	19.70	1.38
2008	250	8.30	165.9	21.23	2.36
2009	230	8.34	177.3	20.69	4.89

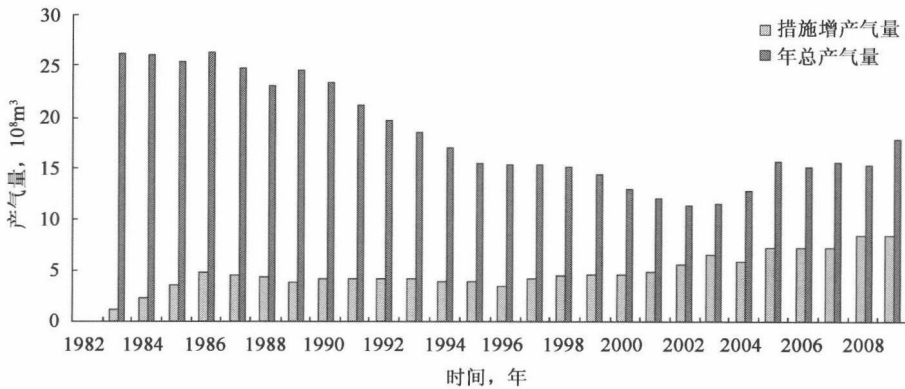


图 1-3 川南气区排水采气增产气量柱状图

第二节 川南气区有水气藏开发历程及气藏工程研究新成果

川南气区有水气藏的开发自 1945 年 4 月圣灯山气田嘉三气藏隆 2 井投产（1948 年产水，日产水量 $250\sim 360\text{m}^3$ ）以来，已走过了 60 多年的历程，由于气藏类型多、地质条件复杂，开采道路历尽艰辛。在 60 多年的开发历程中，曾经采用过控水采气、压水采气、单井

排水采气、气藏排水采气以及排水找气等多种工艺方法，取得了许多成功的经验和失败的教训。

一、开发历程

川南气区有水气藏的开发历程大致可以分为开发早期、中期、中后期三个阶段。

1. 开发早期阶段（20 世纪 50~60 年代）

在有水气藏投入开发的早期，人们对气藏的构造、储层、岩性、气水关系、驱动方式等的认识比较肤浅，普遍采取比较简单的控水采气和压水采气的方式生产。

1) 控水采气——延长气井无水采气期^[1]

所谓控水采气是指有水气藏在开采过程中控制气藏的采气速度和控制气井合理的采气压差，从而有效地控制水窜，延长气井无水采气期。这种方式对于整装非均质有水气藏是有效的，在气井出水前和出水后都存在控制出水的问题，对水的控制主要通过生产试验或通过分析产出水的氯离子变化，了解和掌握气井出水的临界流量（临界压差），使气井在临界值以下生产来实现控水采气。

威远气田震旦系气藏是一个具有统一气水界面的整装气藏，在开发早期就采取过控水采气。如威 2 井于 1965 年 10 月投产，生产初期日产气 $(15\sim 18)\times 10^4\text{m}^3$ ，1966 年上升至 $(20\sim 30)\times 10^4\text{m}^3$ ，同年 10 月，产水量由 $1\text{m}^3/\text{d}$ 上升至 $6\text{m}^3/\text{d}$ ，且产出水的氯离子含量上升。经过动态分析和试验，将该井的产气量控制在“临界产量” $(15\times 10^4\text{m}^3)$ 以下生产，无水采气期长达 20 年之久，累积采气 $11.1\times 10^4\text{m}^3$ ，采出该井控制储量 $(23\times 10^8\text{m}^3)$ 的 48.4%，获得了较好的开发效果。

2) 压水采气——气井频繁水淹

所谓压水采气是指压小气井产气量使井不产水或关井复压，待压力升高，地层水退出井筒后再开井生产，出水后又关井，实行间歇生产。如此频繁开关井，不仅采气时率低，采出气量少，而且严重影响天然气用户的使用，纳溪气田纳 6 井就是一典型井例^[2]：

纳 6 井产层为二叠系茅三~茅二 b 段，产层中部井深 2320m，1961 年 9 月完井测试气水同产，日产气 $14.2\times 10^4\text{m}^3$ ，日产水 43m^3 。1962 年 12 月 28 日投产至 1968 年 12 月，由于产水，多次开井关井，间歇生产，井筒严重积液，曾 3 次水淹，水淹后开井生产困难，产气量逐年降低。采取这种压水采气的生产方式在长达 7 年的时间里累积采气仅 $2865\times 10^4\text{m}^3$ ，产水 2800m^3 ，采气速度 0.7%，采出程度仅 5.1%，气藏开发效果很差。

川南气区为解决开发初期气井频繁水淹而采用的“井口放喷排液”法，是一种操作简单但却非常有效的方法。这是因为该方法能最大限度地降低井口回压，增大采气压差，充分利用地层的能量排出井底积液，使“假性水淹井”复产。

应用井口放喷排液法的关键是要严格按照操作规程操作，确保安全放喷和环境保护，其要点如下：

(1) 放喷装置的设计与安装应符合相应的规范。放喷管线应平直，尽量避免转弯，且用地脚螺栓固定牢，放喷用的闸门、管件质量优良且试压合格，仪表固定良好。

(2) 放喷口必须安装缓冲设施，如排酸筒。

(3) 通常采用节流阀作为放喷控制阀门。

(4) 放喷口应选在地势空旷且建有废水池的地方。

(5) 放喷装置应试压合格。

(6) 经过放喷分离器分离出的天然气应点火烧掉。

(7) 放喷操作应平稳缓慢，注意调节放喷压力，观察放喷口气水喷势，防止气水外溢造成环境污染。

(8) 做好放喷作业方案和安全应急预案。

(9) 精心组织、精心实施。

(10) 对于深井、积液严重的井，可采用泡排、气举等方法辅助放喷，以提高放喷效果。

3) 井口放喷开井应用实例

南井气田井 9 井于 1977 年 10 月 11 日完井，产层中深 2625m（茅二 b 段），原始地层压力 25.5MPa，测试时气水同产，日产气量 $38.0 \times 10^4 \text{m}^3$ ，日产水 56.6 m^3 。1978 年 2 月 3 日开井时，由于输压高达 3MPa，只产了 $0.2 \times 10^4 \text{m}^3$ 气、1.4 m^3 水后就平输压，气水停喷。2 月 15 日采取“井口放喷排液”开井，由于井口回压降至大气压，增大了采气压差，排出了井底积液，气井自喷带水正常生产至 1982 年 8 月，期间累计采气 $3.73 \times 10^8 \text{m}^3$ ，排水 $7.98 \times 10^4 \text{m}^3$ ，效果显著。由于充分利用了地层能力，延长了自喷采气的周期，该井在 1983 年以后才开始采用人工举升排水采气工艺。

2. 开发中期阶段（20 世纪 70~80 年代）

20 世纪 70 年代，随着天然气市场需求的快速增长，许多气藏由于加速开采，采出程度很快超过 40%，进入开发中期。在此开发阶段，主要依靠单井排水采气，有经验也有教训。

1) 单井排水采气的经验

对有水气藏的单井生产建立“三稳定”自喷排水采气的工作制度：即

(1) 井口生产压力波动前后两天相比不超过 0.3MPa，月平均井口压力下降（前后两月相比）不超过 0.25MPa；

(2) 日产气量大于 $10 \times 10^4 \text{m}^3$ 的气井，日产量波动不超过 $1 \times 10^4 \text{m}^3$ ，日产气量小于 $10 \times 10^4 \text{m}^3$ 的气井，日产量波动不超过 $0.5 \times 10^4 \text{m}^3$ ，月平均日产量下降不超过 $0.3 \times 10^4 \text{m}^3$ ；

(3) 月平均水气比波动不超过 20%。

依靠上述工作制度获得了较好的开发效果^[3]，是川南气区开发中期阶段取得的基本经验之一。

在总结认识纳 6 井压水采气失败的教训后，经过对川南二叠系茅口组碳酸盐岩裂缝性气藏的进一步研究提出了排水采气的课题，主要从以下三个方面进行了分析：

(1) 认识气藏非均质的地质特征和气水在产层中的活动规律。

(2) 认识气水两相流体性质的差异，通过排水减少地层水的渗吸作用、续流作用和对气的封隔作用。

(3) 认识产层渗流与自喷管柱之间协调工作的关系，制订排水采气的工作制度，且固定操作均衡生产。

基于上述认识，1968 年 12 月在纳 6 井开展了排水采气试验，先后以 $2.5 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ 、 $4 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ 、 $5.8 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ 的工作制度生产，对比其井口压降速度、单位压降采气量、平均水气比等技术指标，最终选择技术指标较好的 $4 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ 的工作制度，边排水边采气，实现了气井的压力、产量、水气比“三稳定”生产。从 1969 年 12 月至 1983 年 12 月，历时 14 年，累积排水 $21.16 \times 10^4 \text{m}^3$ ，年平均采气 $1161 \times 10^4 \text{m}^3$ ，与压水采气阶段年平均采气 $409 \times 10^4 \text{m}^3$ 相比生产量增加了 1.54 倍，开发效果良好。

2) 单井排水采气的教训

对于部分有水气藏的单井生产，气井出水就排，造成气井过早水淹，难于复产，致使一

些气藏采出程度低，是川南气区开发中期阶段总结的基本教训之一。

随着国家对天然气的需求日益增加，川南气区的上产速度加快，出水气井越来越多，1979年川南气区年产气达到 $49.8 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，年产水 $72.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。在纳6井排水采气获得成功的基础上，川南气区从20世纪70年代末至80年代初召开了一系列气田（气井）动态分析技术交流会，开始大规模推广纳6井排水采气经验，但并非所有井开发效果都好。

由于川南气区的气藏大多属于小型碳酸盐岩裂缝性气藏，采取的是“占高点，沿长轴”的滚动勘探开发方案，获气一口，投产一口。高点、长轴的气井一旦出水就采取排水采气，很容易造成地层水迅速进入产气层，气藏中大量天然气被水封隔，气井水淹，复产困难，导致气藏采出程度低（表1-3）。如庙高寺气田茅口气藏寺5井裂缝圈闭1974年8月投产，至2009年底累积采气 $1.21 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，历经34年采出程度仅17.4%。

表1-3 川南部分采出程度低的气藏开采情况表

气田	裂缝圈闭	产层	复核天然气储量, 10^8 m^3	2009年底累积采 气量, 10^8 m^3	采出程度 %
庙高寺	寺5	茅二a~茅二b	6.95	1.21	17.4
白节滩	白11	茅二c	3.48	0.36	10.3
杨家山	山8	茅口	16.11	1.63	10.1
青杠坪	青1	茅口	18.63	4.31	23.1
古佛山	古12	茅二c	5.06	1.50	29.6
孔滩	孔6	茅口	20.15	10.24	50.8

在总结多年的排水采气实践经验之后，人们才认识到，单井排水采气有无成效，主要取决于气井位于气藏构造的哪个部位：低部位水区或气水界面附近的井进行排水采气效果好；高部位气顶位置的井效果差。

3) 人工举升排水采气

从20世纪80年代开始，川南气区开展了泡排、气举、优选管柱、机抽、电潜泵、射流泵等排水采气工艺试验，并迅速在40多个气田上推广，排水采气措施工艺井数由80年代初的每年9~10口增加到80年代末的每年130~140口，天然气年增产量由 $(0.05 \sim 0.06) \times 10^8 \text{ m}^3$ 迅速上升到 $(3.8 \sim 4.2) \times 10^8 \text{ m}^3$ ，从而延缓了天然气产量递减。

3. 开发中后期（20世纪90年代至21世纪最初10年）

20世纪90年代以来，川南气区大部分有水气藏采出程度都超过了50%，进入中后期开发。在继续深入发展排水采气的基础上，随即开展了排水找气，为有水气藏的开发开辟了一条新的途径，并在气藏工程研究取得全新进展的基础上，开展了气藏整体治水，使过去一批在滚动勘探开发时被封堵的有水气藏可以重新投入开发。

20世纪90年代之前，川南气区勘探钻井过程中，遇水就封堵，完井时若为水井就大都废弃，井眼利用率不高。成都理工大学陈立官和川南气区长高盛等勘探开发科技工作者密切配合，深入研究川南二叠系茅口组和三叠系嘉陵江组的地质特征，创建了有水气藏气水共存的基本地质模型，即底水式、边水式、隔气式、隔水式等4种模型，研究成果指出：产大水的井在水体上方存在着隐蔽的天然气聚集，利用天然气自身能量坚持排水，水落气出，报废的水井可能获得隐蔽的储量，转变成为工业气井。自1984年起，先后在坝12井、合16井、阳72井等产水气井开展排水找气试验，均把水井转变成了气井。如阳高寺气田阳72井完井

时是一口水井，测试最大产水量 $2970\text{m}^3/\text{d}$ ，持续排水 8 个月零 13 天，最高日排水量 1200m^3 ，日均排水量 500m^3 ，累积排水 $13.24 \times 10^4\text{m}^3$ 后见气，随即关井进行井站地面配套建设，正式投产后又坚持排水 3 个月，之后正常生产，最高日产气 $10.9 \times 10^4\text{m}^3$ ，日产水 205m^3 。

20 世纪 90 年代中期在原中国石油天然气集团公司和四川石油管理局的关怀支持下，川南气区在 25 个构造 53 口井上大规模开展排水找气取得重要进展：获气井 22 口，新增天然气储量 $28.77 \times 10^8\text{m}^3$ ，投产 19 口井，至 2009 年底累积产气 $11.9 \times 10^8\text{m}^3$ ，目前还有年产 $3000 \times 10^4\text{m}^3$ 的生产能力。经过大量井的排水找气生产实践，丰富和发展了排水找气理论，1995—1998 年原川南矿区与成都理工大学，四川石油管理局勘察开发研究院、钻采工艺技术研究院的科技人员继续协作完成了“川南有水气藏排水找气地质模式研究及目标选择”和“排水找气早期动态预报及后续工艺方法研究”等一批中国石油天然气集团公司下达的油气田提高采收率导向技术项目，全面研究和总结了排水采气与排水找气井的地质特征、开采特征、出水规律、排水工艺、储量计算、动态预测和修井工艺等配套系列技术，为搞好川南气区的排水找气与排水采气工作发挥了重要的指导作用。

二、气藏工程研究新成果

20 世纪 90 年代至 21 世纪初 10 年，随着排水采气与排水找气的大规模深入开展，尤其是通过总结分析有水气藏开发 30 多年来的成功经验和失败教训，对气藏动态、水体能量、水侵规律及气水关系有了全新认识，气藏工程的理论研究取得了重大突破，为有水气藏整体治水、科学开发、提高采收率找到了最有效的方法。

气藏工程理论研究的新成果主要有以下几项：

(1) 提出了“低排低采、低排高采”开采有水气藏的技术新思路。低排低采是指气藏的排水点部署在构造的低部位，利用低部位的井排水同时采气；低排高采是指低部位的井排水，高部位的井采气。技术新思路改变了过去长期以来不考虑构造部位见水就排的错误做法。

(2) 构造低部位排水点的产水层段的最佳位置应选在气水界面附近。让产出的地层水直接流入井筒，而不让其沿裂缝发育的高渗透带上窜至储层顶部再进入井筒，从而避免了高部位的渗流通道被水封堵，造成气顶被水分割成死气区难于解封的被动局面。

(3) 低排高采的关键是合理控制生产压差。要使低排点的生产压差大于高采点的生产压差，即控制高采点的井底压力高于低排点的井底压力，以便阻止地层水沿裂缝发育带向高采点窜流，避免产层高部位渗流通道被水伤害。

(4) 利用气藏自身能量充沛时在低部位实施早期排水，可以改善气水关系，控制和防止底水水锥或边水上窜。

(5) 在低排点进行人工举升排水时，选择的工艺应满足强排的要求，即产水井的排水速度应不低于气藏中流入井底水的水侵速度。这样才能快速有效地减少井底积液，恢复水淹停产井的生产。

(6) 川南气区茅口组有水气藏内普遍存在的“隔气式”隐蔽气藏经过科学排水后，这些气藏的气水界面下降，隐蔽气可突破隔气式气藏底部地层水的封锁向外流动，大幅度补给开采井，从而增加开采井的天然气地质储量和可采储量。

以荔枝滩气田茅口组气藏的荔 6 井裂缝圈闭为例：该圈闭闭合面积 17.85km^2 ，闭合高

度 290m, 上报天然气探明地质储量 $3.53 \times 10^8 \text{m}^3$, 2006 年之前有 3 口气井, 即荔 6 井、荔 2 井、荔 9 井, 分别于 1976 年 4 月、1980 年 4 月和 1997 年 11 月投产。荔 2 井和荔 9 井投产后, 由于地层水的严重干扰, 分别仅生产 3 个月和 6 个月就水淹停产, 一直无法复产。荔 6 井从 1984 年开始应用泡排、气举等排水采气工艺维持间歇生产, 同样由于水的严重干扰, 自 1990 年以后生产非常困难, 常常水淹或关井, 平均每年采气不到 $100 \times 10^4 \text{m}^3$ 。气藏从投入开发到 2005 年的 30 年间该裂缝圈闭累积产气 $1.04 \times 10^8 \text{m}^3$, 采出程度只有 29.16%。2006 年在该构造距荔 6 井 500m 处重新部署了一口补充开发井——荔 002-X1 井, 该井钻在气藏气水界面附近, 其产层中部比荔 6 井低 90.35m, 比荔 2 井低 38.73m, 于 2006 年 12 月完井投产, 能自喷带水采气, 日排水 480m^3 , 日产气 $3.5 \times 10^4 \text{m}^3$ 。随着该裂缝圈闭的地层水源不断从荔 002-X1 井排出, 在该井连续排水 10 个月之后, 荔 2 井、荔 6 井、荔 9 井的井口压力开始回升, 地层水慢慢退出井底, 3 口井自 2008 年 4 月开始, 先后奇迹般地复活。2009 年 4 口井产气达 $3593 \times 10^4 \text{m}^3$, 为之前平均年产气的 36 倍, 目前该裂缝圈闭日排水 $400 \sim 500 \text{m}^3$, 日产气 $(5 \sim 6) \times 10^4 \text{m}^3$ 。由于强排水, 气藏中的隐蔽气得以释放, 向生产井补给, 经复核该圈闭的天然气储量达到 $5.59 \times 10^8 \text{m}^3$ 。与原上报储量相比增加了 $2.06 \times 10^8 \text{m}^3$ 。

在充分认识研究川南气区有水气藏地质特征的基础上, 基于“低排低采、低排高采”的技术新思路, 一批储量较大而停产多年的有水气藏得以重新启动投入开发, 并获得了显著成效。如庙高寺气田寺 25 井区、寺 5 井区、荔枝滩气田荔 6 井区、白节滩气田白 11 井区等裂缝圈闭都相继恢复了生产, 34 个裂缝圈闭增加了天然气储量超过 $100 \times 10^8 \text{m}^3$ 。近 3 年增加的天然气产量超过 $65 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ 。

第三节 川南气区有水气藏基本特征

川南气区有水气藏除上三叠统须家河组为砂岩孔隙性气藏外, 其余均为碳酸盐岩裂缝(溶洞)性气藏。

一、气藏面积小, 裂缝圈闭多

川南气区有 53 个气田, 21 个含气构造, 除威远气田震旦系灯影组气藏圈闭面积较大以外 (2030km^2), 其余气田面积均较小, 一般在数十平方公里以内。如位于泸州市北郊泸县境内的阳高寺气田二叠系茅口组气藏构造长轴 25km, 短轴 4.35km, 闭合面积 67m^2 。川南气区已获储量的裂缝圈闭 408 个, 其中无水气藏裂缝圈闭 82 个, 有水裂缝圈闭 326 个。每个气田在构造顶部一般都有一个主裂缝圈闭, 其裂缝分布范围广, 储量相对较大, 气井产量高。如阳高寺气田茅口组气藏有 11 个裂缝圈闭, 共有天然气探明地质储量 $48.8 \times 10^8 \text{m}^3$ 。位于构造顶部的阳 7 井主裂缝圈闭共探明地质储量有 $28.1 \times 10^8 \text{m}^3$, 占整个茅口组气藏储量的 57.6%。阳 7 井是一口高产气井, 完井测试日产气量达 $108 \times 10^4 \text{m}^3$, 自 1961 年 4 月 25 日投产至 2009 年底累积采气 $20.5 \times 10^8 \text{m}^3$, 目前日平均产气仍有 $2.5 \times 10^4 \text{m}^3$ 。

二、储层非均质性强, 气水关系复杂

川南气区有水气藏多为碳酸盐岩储层, 地质条件复杂, 非均质性强, 基岩孔隙度低, 渗透性差。二叠系茅口组和栖霞组储层平均孔隙度 0.8%, 平均渗透率不足 $1.02 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,