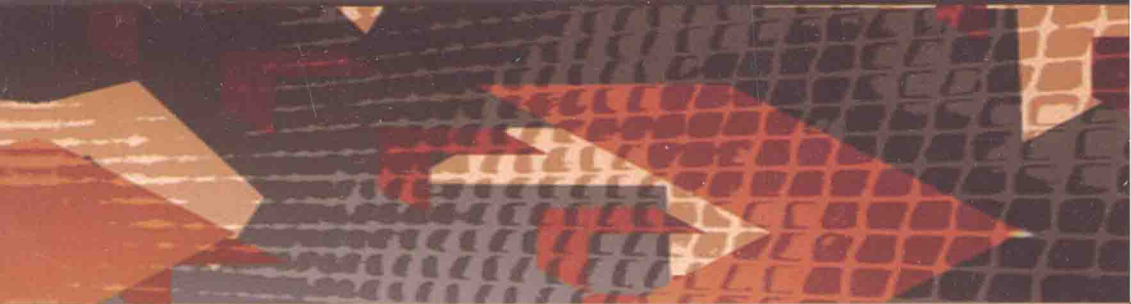


“十二五”国家重点图书出版规划项目

SHIERWU GUOJIA ZHONGDIAN TUSHU CHUBAN GUIHUA XIANGMU



# 普光高酸性气田 采气工程技术与实践

沈 琛 编著

中國石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

# 普光高酸性气田采气工程 技术与实践

沈 琛 编著

中国石化出版社

## 内 容 提 要

本书以采气工程方案设计、方案实施顺序为主线,以高酸性气田的腐蚀防护和作业施工过程中的安全环保为核心,突出技术集成与创新、新技术的应用与效果评价,介绍了普光气田的完井作业、射孔工艺、储层改造、腐蚀防护、投产试气、配套装备、应急救援、安全环保、施工管理内容和涉及的基础理论。在内容上,吸收了国内外高酸性气田采气工艺方面的最新研究成果,重点介绍中国石化在高酸性气田开发中开展的机理研究和基础实验,总结了普光高酸性气田投产作业的施工经验和管理办法。力求把基础理论、新技术应用、工程实践和生产管理相结合,系统地展现普光高酸性气田的采气工程技术。可供从事油气田开发的科研人员、管理人员及相关院校相关师生参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

普光高酸性气田采气工程技术与实践/沈琛编著  
—北京:中国石化出版社,2013.6  
ISBN: 978-7-5114-2158-6

I. ①普… II. ①沈… III. ①采气 IV. ①TE37

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第098988号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制,抄袭,或者以任何形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

### 中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街58号  
邮编:100011 电话:(010)84271850  
读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com

北京柏力行彩印有限公司印刷

全国各地新华书店经销

\*

787×1092毫米 16开本 20.75印张 455千字

2013年7月第1版 2013年7月第1次印刷

定价:160.00元

# 序

能源是国家经济发展的重要基础，我国经济社会的持续发展对清洁能源的需求十分紧迫。近年来，随着我国油气勘探力度加大，在勘探领域不断取得新的突破，尤其是含硫天然气的勘探开发取得了长足的进步，已探明高含硫天然气地质储量超过 $10000 \times 10^8 \text{m}^3$ ，主要分布在川东北地区普光、元坝、罗家寨、龙岗、渡口河、铁山坡等碳酸盐岩气田。其中普光气田是目前国内发现的规模最大的海相整装气田，是国家“十一五”重大工程——“川气东送”建设工程的主供气源。普光气田的发现得益于我国复杂山地深层碳酸盐岩储层预测这一世界级难题取得的突破性进展，扩大了天然气的勘探领域，使我国碳酸盐岩油气勘探理论与实践进入了世界先进行列，它的发现使几代石油人找到海相大气田的梦想成为现实。

普光气田是国内首次大规模开发的高酸性气田， $\text{H}_2\text{S}$ 和 $\text{CO}_2$ 含量高、分压高，开发条件恶劣，开发过程中遇到了许多前所未有的挑战。为了攻克普光气田开发面临的“世界级难题”，中国石化集团公司充分发挥集团化优势，整合技术资源，建立强大的多级技术支撑体系，形成集科研、技术攻关、技术服务为一体的技术团队，采用先进的设计理念，将最新理论、研究成果和国内外先进的工艺技术应用用于普光气田的开发建设；同时建立全方位、全过程的管理体系，科学决策，精心组织，稳步推进，实现了普光气田安全、科学和高效的开发。在采气工程方面，通过引进吸收、自主攻关、集成创新，改进完善，较好地解决了高酸性气田腐蚀与防护、投产作业、储层改造、安全环保和应急处理等技术难题，制定完善了酸性气田开发的管理规定、技术标准和操作规程，形成了适合普光高酸性气田的采气工程系列技术，使我国在该领域的整体技术达到世界领先水平。

普光气田的成功开发，填补了我国高酸性气田开发技术领域的多项空白，完善了我国高酸性气田开发技术标准，形成了独具普光气田特色的开发工程技术和管理制度。随着该气田的全面投产，进一步提高了川渝地区和中东部经济发达地区天然气供应保障能力，缓解了国内天然气供需矛盾，为高酸性气田勘探与开发的大发展打下了坚实基础。

作为“川气东送”工程建设项目的组织者，本人参与了普光气田开发的全过程，在与工程技术人员共同探讨、研究、决策气田开发方案，特别是亲历了涉及气田安全开发的钻采工程技术研究应用之后，倍感其成功开发对我国高酸性气田开发具有里程碑意义，相关

技术的系列化极大地促进了我国石油工业工程技术的发展。

目前国内介绍高酸性气田开发方面的文献、专业书籍等资料相对较少，系统总结普光高酸性气田采气工程技术，编写的《普光高酸性气田采气工程技术与实践》一书是广大工程技术人员多年心血的结晶，值得推荐给开发战线的工程技术和管理人员学习借鉴。



# 前 言

酸性天然气在全世界拥有巨大的资源量，截至2004年，全球已发现400多个具有工业开发价值的酸性气田，仅北美以外地区 $\text{H}_2\text{S}$ 含量超过10%的天然气储量就超过 $9.8 \times 10^{12} \text{m}^3$ 。比较著名的高酸性气田包括法国的拉克（Lacq）气田、俄罗斯的奥伦堡（Orenburg）气田和阿斯特拉罕（Astrakhan）气田、加拿大卡罗林（Caroline）气田等。我国现已探明的天然气田中近一半为酸性气田，主要有分布在渤海湾盆地陆相地层的赵兰庄气田和四川盆地海相地层的渡口河、罗家寨、中坝、威远、卧龙河、普光等气田。

国外高酸性气田开发从20世纪中叶开始至今已有半个多世纪，加拿大、美国、法国、俄罗斯等国家成功开发了一批高含硫气田，建立了一套较为完整的开发配套技术及管理体系统，已取得了许多成功经验。

酸性天然气不同于普通天然气的特点主要在于其毒性和对设备的腐蚀性。酸性天然气中的 $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{CO}_2$ 对钢材的腐蚀包括硫化物应力腐蚀开裂、点蚀、氢诱发裂纹和氢鼓泡等，对钻杆、套管、生产管柱、井下工具、集输管线具有极强的腐蚀性。所以，酸性气田的开发对设备和材料的耐腐蚀性能以及对人的防护要求极高。

高酸性气田开发安全风险大、生产管理标准要求高。为了降低开发成本，提高气田开发效益，主要采取“少井高产、快速开发”的原则。开采技术的关键是腐蚀防护，主要通过选用防腐材料、采用添加有缓蚀剂的溶剂及辅以腐蚀监测等方法控制腐蚀。同时，酸性气田开发主要采用射孔、永久封隔器生产完井管柱，普遍采用储层酸压改造措施提高气井产能，并高度重视硫沉积、水合物的防治及HSE的管理等。这些做法对指导高酸性气田安全、经济和高效开发有着重要的指导意义。

本书以采气工程方案设计、方案实施顺序为主线，以高酸性气田的腐蚀防护和作业施工过程中的安全环保为核心，突出技术集成与创新、新技术的应用与效果评价，介绍了普光气田的完井作业、射孔工艺、储层改造、腐蚀防护、投产试气、配套装备、应急救援、安全环保、施工管理等内容和涉及的基础理论。在内容上，吸收了国内外高酸性气田采气工艺方面的最新研究成果，重点介绍中国石化在高酸性气田开发中开展的机理研究和基础实验，总结了普光高酸性气田投产作业的施工经验和管理办法。力求把基础理论、新技术应用、工程实践和生产管理相结合，系统地展现普光高酸性气田的采气工程技术。

鉴于普光高酸性气田的复杂性和不确定性，书中有些技术观点、技术路线方法和做法还有待进一步研究，共同商榷。加上时间仓促，水平有限，书中的错误在所难免，恳请各位读者不吝指正。

在本书的编写过程中，中国石化天然气工程项目管理部和中原油田普光分公司、采油工程技术研究院、勘探开发研究院、井下特种作业处等单位提供了大量的基础资料，并给予大力的支持。张庆生、古小红、彭鑫岭、曹言光、张文昌、王栋、张诚、魏鲲鹏、石俊生、魏风玲、陈勇光、邓方斌等同志参与了素材收集整理及部分编校工作，何生厚、杨玉坤、黎洪、廖成锐、唐宇祥、刘殷韬、雷有为、杨廷玉等专家和同志参与了本书的统稿与审校工作，在此一并表示衷心的感谢！

# 目 录

<b>第一章 开发地质概述</b> .....	1
<b>第一节 主要地质特征</b> .....	1
一、地层特征 .....	1
二、构造特征 .....	2
三、储层特征 .....	5
四、气藏特征 .....	9
<b>第二节 开发技术政策及实施要求</b> .....	11
一、开发技术政策 .....	11
二、实施要求 .....	13
<b>第二章 防腐与材料选择</b> .....	16
<b>第一节 高酸性气田金属材料腐蚀特征</b> .....	16
一、腐蚀形式 .....	16
二、腐蚀介质 .....	18
<b>第二节 腐蚀评价与材料优选</b> .....	25
一、耐蚀材料的选择方法 .....	25
二、普光气田井筒材料选择 .....	34
<b>第三节 缓蚀剂的筛选与应用</b> .....	42
一、缓蚀剂的分类与应用 .....	42
二、缓蚀剂的筛选与性能评价 .....	44
三、缓蚀剂的加注工艺 .....	51
<b>第四节 腐蚀监测</b> .....	53
一、腐蚀监测方法和监测位置选取 .....	53
二、普光腐蚀监测现场应用 .....	54
<b>第三章 完井工程</b> .....	59
<b>第一节 完井工艺</b> .....	59
一、钻井完井 .....	59
二、生产完井工艺 .....	61



第二节 射孔工艺 .....	62
一、射孔工艺及要求 .....	62
二、射孔管柱 .....	63
三、射孔器 .....	65
四、射孔参数优化 .....	69
第三节 生产完井管柱 .....	73
一、管柱结构设计 .....	73
二、生产油管尺寸的选择 .....	76
三、管柱连接螺纹选择 .....	81
四、生产管柱力学分析 .....	84
第四节 井下工具 .....	87
一、井下安全阀 .....	87
二、滑套 .....	88
三、封隔器 .....	89
四、球座 .....	91
第五节 采气井口装置 .....	91
一、采气井口参数 .....	92
二、采气井口结构及特点 .....	92
三、井口安全控制系统 .....	94
<b>第四章 作业入井液 .....</b>	<b>98</b>
<b>第一节 作业入井液体系 .....</b>	<b>98</b>
一、作业入井液要求 .....	98
二、作业入井液体系优选 .....	100
三、有机酸盐体系性能评价 .....	102
<b>第二节 作业入井液优选 .....</b>	<b>105</b>
一、井筒保护液 .....	105
二、压井液 .....	107
三、射孔液 .....	113
四、屏蔽暂堵液 .....	116
五、环空保护液 .....	119

<b>第五章 酸压改造技术</b> .....	125
<b>第一节 酸压液体体系</b> .....	125
一、高含硫气藏酸压液体性能要求 .....	125
二、酸压液体配方及体系 .....	126
<b>第二节 酸压工艺</b> .....	134
一、酸-岩反应动力学实验 .....	134
二、酸蚀裂缝导流能力模拟实验 .....	135
三、酸压工艺技术选择 .....	137
四、工艺设计优化 .....	138
<b>第三节 酸压施工工艺</b> .....	140
一、长井段暂堵分流酸压工艺 .....	140
二、水平井酸压工艺 .....	145
三、酸压施工配套技术 .....	146
<b>第六章 投产试气与生产测试</b> .....	150
<b>第一节 产能试井方法选择</b> .....	150
一、常用产能试井方法的适应性评价 .....	150
二、普光气田产能试井方法 .....	152
<b>第二节 试气工艺</b> .....	157
一、地面流程节流计算 .....	157
二、地面流程设计 .....	160
<b>第三节 试气资料解释</b> .....	163
一、井底压力折算方法 .....	163
二、产能试井解释方法 .....	173
三、试气资料分析和处理 .....	176
<b>第四节 生产测试</b> .....	180
一、永置式测试工艺 .....	180
二、钢丝存储式测试工艺 .....	182
三、电缆直读式测试工艺 .....	184

<b>第七章 水合物及硫沉积防治技术</b> .....	191
<b>第一节 水合物预测与防治</b> .....	191
一、水合物形成的影响因素.....	191
二、水合物生成预测与防治.....	195
<b>第二节 硫沉积原理与溶硫剂</b> .....	204
一、硫沉积的原理及其影响因素.....	204
二、井筒硫沉积.....	208
三、硫沉积防治.....	215
<b>第八章 投产作业工艺与装备</b> .....	221
<b>第一节 作业工艺</b> .....	221
一、井筒准备.....	221
二、射孔作业工艺.....	224
三、镍基合金管柱下井工艺.....	226
<b>第二节 井下作业装备</b> .....	227
一、XJ200模块式修井机.....	227
二、泥浆泵注与循环净化系统.....	229
三、井控防喷装备.....	230
四、连续油管作业装备.....	231
五、镍基合金管柱下井设备.....	232
六、油管气密封检测设备.....	233
<b>第三节 山地酸压施工配套设备</b> .....	234
一、压裂机组.....	234
二、酸、液储备罐.....	236
三、酸泵、供液流程.....	237
四、卸酸、配酸流程.....	238
五、液氮泵注装备.....	239
<b>第四节 放喷试气配套装备</b> .....	239
一、放喷试气流程.....	240
二、高温焚烧炉.....	242
三、钢丝作业装备.....	245

第五节 应急救援装备 .....	246
一、山地消防坦克 .....	246
二、山地越野型消防车 .....	248
三、掩体式消防水炮 .....	248
四、强风抢险车 .....	248
五、涡喷消防车 .....	249
六、快速移动充气车 .....	250
<b>第九章 作业安全与环保技术</b> .....	<b>251</b>
<b>第一节 主要风险分析</b> .....	<b>251</b>
一、主要危害物质 .....	251
二、作业施工中的安全风险 .....	253
<b>第二节 气井作业井控</b> .....	<b>255</b>
一、作业过程井控措施 .....	255
二、井控处置程序 .....	258
<b>第三节 安全作业防护措施</b> .....	<b>263</b>
一、井场设施布置要求 .....	263
二、主要作业安全措施 .....	263
三、H <sub>2</sub> S中毒防护 .....	265
<b>第四节 作业环保技术</b> .....	<b>267</b>
一、废水、废液、废渣处理 .....	267
二、气井长时间试气环境保护 .....	268
三、试气环境监测 .....	272
<b>第十章 工程组织与管理</b> .....	<b>274</b>
<b>第一节 川气东送工程管理</b> .....	<b>274</b>
一、管理模式与机制 .....	275
二、工程安全管理 .....	277
三、工程技术管理 .....	279
四、工程投资管理 .....	281
五、公共管理 .....	283

第二节 采气工程管理 .....	284
一、组织形式 .....	284
二、技术决策 .....	285
三、标准建设 .....	286
四、管理制度 .....	287
第三节 采气工程技术管理 .....	288
一、多层次技术攻关 .....	288
二、引进吸收与集成配套 .....	289
三、关键装备国产化 .....	290
第四节 采气工程队伍管理 .....	290
一、采气工程队伍配备与准入 .....	290
二、队伍软实力建设 .....	291
三、队伍硬实力建设 .....	293
<b>第十一章 技术应用与效果 .....</b>	<b>296</b>
<b>第一节 典型施工井例 .....</b>	<b>296</b>
一、PD-2井试气投产作业 .....	296
二、Mb3-2H井试气投产作业 .....	306
<b>第二节 主要工程技术应用效果 .....</b>	<b>313</b>
一、开发效果 .....	313
二、主要工程技术应用效果 .....	314
<b>参考文献 .....</b>	<b>318</b>

# 第一章 开发地质概述

2001年中国石化在川东北东岳寨—普光构造上部署了探井Pg1井，主要目的层为下三叠统飞仙关组。2001年11月3日开钻，2003年4月27日钻至井深5700m完钻，钻遇气层厚度达279m。2003年7月测试，获工业气流 $42.37 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ ，从而发现了普光气田。

普光气田位于四川省达州市宣汉县，地表属中~低山区，地面海拔300~1200m，沟壑纵横、水系发育，气候潮湿、降雨频繁，人口密集，交通不便。

普光气田是我国目前发现的规模最大、丰度最高的特大型海相高含 $\text{H}_2\text{S}$ 整装气田。普光气田开发方案设计动用天然气地质储量 $2579.06 \times 10^8 \text{m}^3$ ，部署开发井54口，其中新井48口，利用探井6口，设计井深5500~7000m。2005年12月第一口开发井PD-1井开钻，标志着普光气田正式进入开发建设阶段。2009年10月投入试生产，2010年3月正式投产，2012年5月实现全面投产。普光气田已建成“十一五”期间国家重点工程“川气东送工程”的主要天然气生产基地。

本章主要介绍普光气田主要地质特征、开发技术政策及实施要求。

## 第一节 主要地质特征

### 一、地层特征

根据钻井揭示及地表露头，四川宣汉—达县地区下古生界地层较完整，仅缺失志留系上统。上古生界缺失了泥盆系全部和石炭系大部，仅残留中石炭统黄龙组；二叠系齐全。中生界三叠系、侏罗系保留较全，早白垩世地层保留较好，上白垩统缺失。新生界基本没有沉积保留。

侏罗系和三叠系上统的须家河为陆相地层，三叠系中下统、二叠系、石炭系和志留系均为海相地层。普光气田主要目的层段为三叠系的飞仙关组和二叠系的长兴组。

#### (一) 飞仙关组 (T<sub>1</sub>f)

与下伏长兴组、上覆嘉陵江组为整合接触，厚度445~720m。该套地层沉积特征在区域上具有明显的两分性，川东北—川北地区存在一个整体呈北西(NW)向延伸的相变线。该相变线在铁山坡—普光—渡口河一线呈NWW—NNW向穿过，相变线以西主要为陆棚相灰岩沉积，以东主要为台地边缘—台地相鲕粒灰岩沉积。普光气田飞仙关组为台地边缘—台地相鲕粒滩相沉积。

飞四段,岩性为紫色、灰色白云岩、灰岩、石膏质白云岩与灰白色石膏不等厚互层,以石膏层发育为特征。地层厚度一般在30m左右,整体由东向西增厚,并且石膏层趋于发育。

飞三段,以灰岩较飞一、二段发育、针孔状白云岩不发育为主要特征。整体表现为东薄西厚。

飞一~二段,岩性为灰色、深灰色结晶白云岩、溶孔状白云岩、鲕状白云岩,总体以溶孔状白云岩较发育为特征,形成于台地边缘暴露浅滩相,与北部的铁山坡、东部的渡口河地区形成了一个白云岩发育区。飞一~二段地层分段性不明显,与下伏长兴组灰岩或生物灰岩呈假整合接触。

## (二) 长兴组 ( $P_2ch$ )

长兴组厚92~240m,整体表现为西薄东厚,部分地区与上覆飞仙关组难以区分,地层划分方案有差异。区域上,长兴组顶部为青灰色含白云质、硅质、泥质灰岩,含生物层、局部富集发育礁滩,以Pg6井、Pg5井和老君一带生物礁相最为发育,主要为浅灰色海绵骨架礁灰岩、深灰色海绵障积礁白云岩、灰白色砾屑细一中晶白云岩、深灰色砾屑灰岩、灰色含生屑砾屑灰质白云岩、深灰色灰岩等,见海绵、腕足类、瓣鳃类化石。中、上部为中厚层状灰色白云质灰岩、灰岩,以富含燧石结核为特征,底部以灰岩和下伏龙潭组灰岩夹页岩层呈整合接触。

Pg2井、Pg4井一带主要为台地相沉积,主要为灰色、深灰色结晶白云岩、溶孔状白云岩夹鲕状白云岩,顶底部灰岩较发育,暴露浅滩沉积,向北、向东到坡1井—渡口河一带主要为台地相灰岩沉积。

## 二、构造特征

普光气田构造上处于川东断褶带的东北段与大巴山前缘推覆构造带的双重叠加构造区,该区主要经历了燕山期及早、晚喜山期三期构造变形,主要形成有北东(NNE)、北西(NW)向构造。发育三套脆性变形层、三套塑性变形层,以嘉陵江组上部至雷口坡组下部膏盐岩为最主要的滑脱层,志留系页岩为次要滑脱层,形成了上、中、下三个变形层,具有不协调变形特点。嘉陵江组上部至雷口坡组下部膏盐岩滑脱层和志留系页岩滑脱层形成封闭性很好的区域盖层。

中构造变形层是普光气田的主要勘探目的层。普光构造所处的双石庙—普光构造带即为中构造变形层中东侧的一个北东(NE)向褶皱带。区内主要发育普光构造、大湾构造、毛坝构造、老君庙构造、双庙构造、普光西构造及清溪场构造等,这里重点介绍普光构造、大湾构造和毛坝构造。

### (一) 普光构造

普光构造整体表现为与逆冲断层有关的、西南高北东低、NNE走向的大型长轴断背斜型构造,构造位置处于双石庙—普光背斜带的北段,主要发育于嘉四段以下的海相地层

中。各层系构造继承性发育，构造高点基本重合，主要在Pg2—Pg6井一带。断裂系统分为北东向和北西向两组，包括东岳寨—普光、普光7、老君庙南及普光3等4条断层，其中东岳寨—普光断层是普光构造的主控断层。普光3断层将普光构造分为两个次级圈闭，即普光2块圈闭、普光3块圈闭，飞仙关组一二段构造高点海拔分别为-4450m、-4550m。

普光2块西北与普光3断层和普光7断层相邻，断层封闭；西南至相变带和普光南断层，东南与老君庙构造相邻，受储层边界控制。普光3块西侧与普光7断层相邻，东侧为普光3断层，向东北逐渐倾伏。东北受储层边界线控制，其他各方向则受断层遮挡。普光2块和普光3块属于构造—岩性圈闭（见图1-1-1、图1-1-2）。

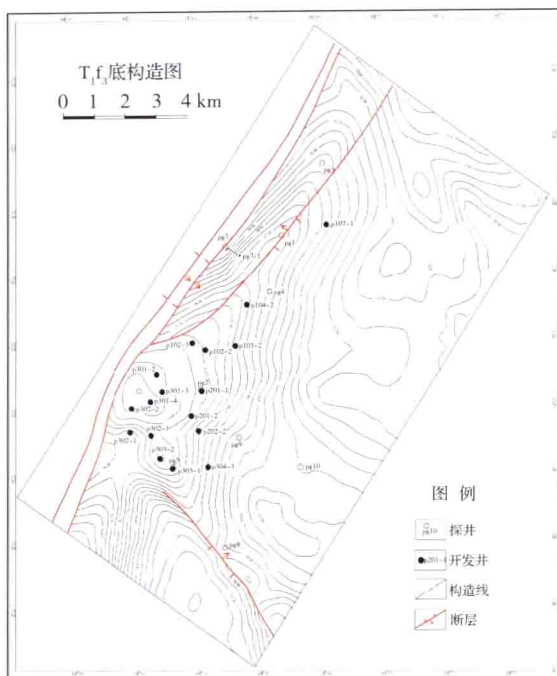


图1-1-1 普光主体 $T_{1f_3}$ 底面构造图

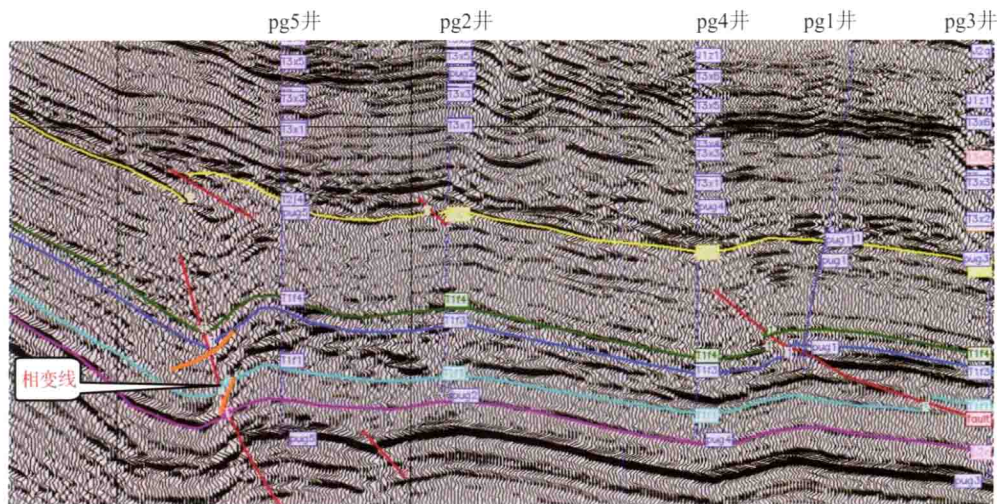


图1-1-2 过Pg5—Pg2—Pg4—Pg1—Pg3井构造剖面图

## （二）大湾构造

大湾构造为受多条次级断层控制的大型长轴断背斜构造，但两翼不完全对称，西缓东陡，西南低东北高。大湾构造以毛坝东断层和大湾西断层作为西边界，以大湾东断层作为东边界，南部以相变线为界，和北部的大湾2井北断层共同形成构造—岩性圈闭。圈闭在飞仙关组一、二段发育两个次级构造高点，分别位于Dw1井和Dw102井附近，高点海拔



为-3800m、-4300m（见图1-1-3、图1-1-4）。

Dw3井及Dw101井处于背斜的翼部。Dw3井实钻表明飞仙关组一、二段岩性为灰、深灰色泥晶灰岩，局部夹角砾灰岩，仅见少量鲕粒灰岩，南部飞仙关组局限台地与陆棚相沉积相变带位于Dw3井与Dw102井之间。

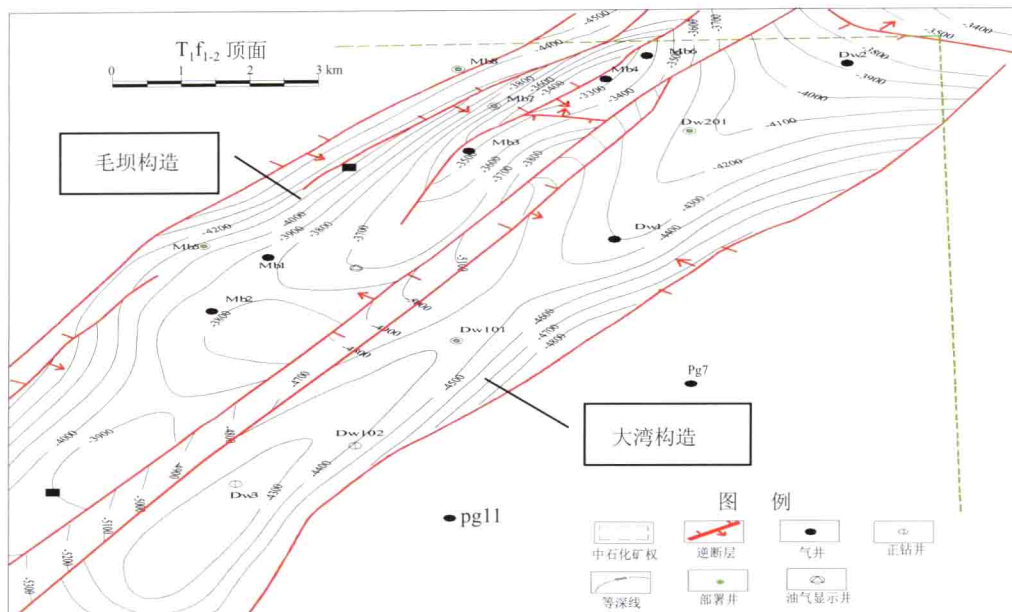


图1-1-3 大湾区块 $T_{1f_{1-2}}$ 顶面构造图

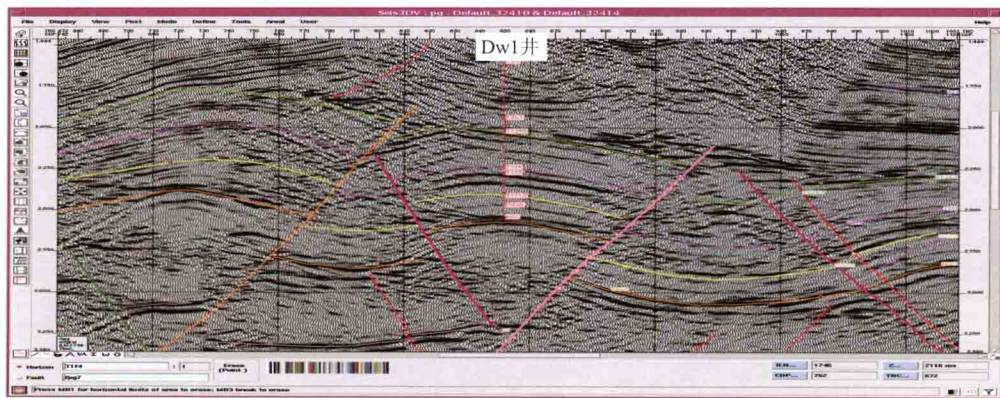


图1-1-4 过Dw1井地震解释构造剖面图

### （三）毛坝构造

毛坝构造位于毛坝场—双庙场构造带北端，是受毛坝东断层、毛坝西断层控制的NE向长轴背斜构造。构造西翼陡，东翼相对较缓，南翼与北翼倾没端通过一鞍部分别与付家山构造和铁山坡构造相连接。构造主体的高部位位于Mb3—Mb4—Mb6井区一线，由于Mb3井北断层的分隔作用，毛坝构造可以分为毛坝3和毛坝4两个次级圈闭。圈闭飞仙关组一、二段构造高点埋深-3500m、-3300m（图1-1-3、图1-1-5）。