

“十二五” 国家重点图书出版规划项目

SHIERWU GUOJIA ZHONGDIAN TUSHU CHUBAN GUIHUA XIANGMU

超深高酸性气田钻井工程 技术与实践

CHAOSHEN GAOSUANXINGQITIAN
ZUANJINGGONGCHENG JISHU YU SHIJIAN

曹耀峰 编著

中国石化出版社

[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

超深高酸性气田钻井工程 技术与实践

曹耀峰 编著

中国石化出版社

内 容 提 要

本书简述了川东北地区复杂的地理与地质特点,分析了钻井技术难点,较为详细地总结了川东北超深高酸性气田钻井工程配套技术及应用情况,包括钻前工程、井身结构设计、井控技术、岩石力学特性与钻头优选、气体钻井、防斜打快、复合钻井、定向井、水平井钻井、钻井液及固井等工程技术,并介绍了配套技术在普光气田的综合应用情况。对超深高酸性气田勘探开发钻井具有较强的指导意义。

本书可供从事天然气勘探开发的工程技术人员、管理人员及石油院校相关专业的师生及研究人员使用,也可供为气田提供装备、工具及工程服务的人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

超深高酸性气田钻井工程技术与实践/曹耀峰编著
—北京:中国石化出版社,2011
ISBN: 978-7-5114-0817-4

I. ①超… II. ①曹… III. ①油气钻井—技术 IV. ①TE 242

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第027163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

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.cn

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 32印张 540千字

2011年2月第1版 2011年2月第1次印刷

定价:180.00元

序

川东北地区地域辽阔,蕴藏着丰富的天然气资源,是天然气重点勘探区域。随着海相油气勘探理论获得突破性进展,在川渝地区相继发现了普光、罗家寨等大型海相碳酸盐岩气田。这类海相气藏多含酸性气体,尤其是普光气田,地质环境异常复杂,储层埋深超过5000m, H_2S 平均含量15%, CO_2 平均含量8%,原始气层压力平均55.8 MPa,平均配产 $80 \times 10^4 \text{ m}^3$,是典型的高含硫、高压、高产的“三高”气田。普光气田勘探开发之前,超深高酸性气田钻井技术相对不成熟,工程技术标准不完善,规模化钻探开发更是前所未有,钻井工程面临许多世界级技术难题,曾多次发生重大钻井事故,因而钻井难度大且风险高。

国内规模最大、丰度最高的特大型整装海相气田——普光气田的建成投产,开创了国内建设大型超深高酸性气田的先例;在我国工业化、城镇化进程加速,能源消费需求旺盛,能源安全问题日益突出的情况下,对于满足国民经济发展对能源的需求,改变经济发展模式,拉动西部地方经济发展具有重大意义;而且也为国家节能减排、环境保护作出了重大贡献,是一个造福子孙后代的好项目。

本书全面总结了川东北钻井技术攻关成果及现场应用经验,是一本系统介绍超深高酸性气田钻井工程技术与应用实践方面的著作,涵盖了钻前工程、井身结构设计、井控、优快钻井、定向井水平井、钻井液、固井等方面的内容,反映了具有国际先进水平的钻井理论、技术和标准,体现出川东北地区超深高酸性气田钻井技术特色,论述了先进技术和成果的应用实践效果。本书在写作方式上做到了理论、技术和实践相结合,可为我国其他地区酸性气田的规模开发提供借鉴及指导,也可作为从事高酸性气田钻探施工的工程技术人员、油田企业和科研院所相关技术人员培训教材及参考资料。本书的出版必将对我国超深高酸性气田钻井理论和技术水平发展及加快勘探开发超深高酸性气田起到推动作用。



前言

在川东北地区进行油气勘探已长达几十年，但受限于勘探理论、钻井装备和技术水平，一直未取得突破性进展。“十五”期间，在老一辈石油人探索积累的基础上，中国石化通过海相油气勘探理论和技术创新，在川东北地区发现了迄今为止储量最大、丰度最高的普光气田，之后又先后发现了元坝、河坝场、马路背三个气田。党中央、国务院对此高度重视，将普光气田的勘探开发及管道输送项目定名为“川气东送”工程，列为等同于三峡工程、南水北调、西气东输、青藏铁路的国家“十一五”重大工程。开发川东北地区气田，是国家保障能源安全、调整能源结构、化解资源供应紧张矛盾、促进区域经济协调发展的战略举措。

川东北地区地质构造复杂、地层可钻性差、压力系统多变、储层超深、高含硫、高压、高产，使得众多的世界级钻井难题在该地区集中呈现，造成勘探认识困难，钻井风险高，开发难度大，技术要求高，而且在国内规模开发超深高酸性气田前所未有。国外同类气田远不及川东北地区构造复杂，基础理论、工程技术、配套装备、施工经验整体不成熟。在国内尚无可供借鉴的先例和经验，国外经验也十分匮乏，工程设计、施工工艺、安全质量面临很大挑战的情况下，为了把川气东送工程建设为“安全工程、效益工程、优质工程、生态工程、阳光工程”，中国石化充分发挥集团优势，精心组织，精心设计，面对超深高酸性气田规模开发的世界级难题，坚持科学态度，发扬创新精神，面向世界引进和吸收借鉴有利工程建设的先进技术和成果，立足集团公司整体科技资源，树立一切资源皆可为我所用的开放思维，集成优势，合力攻关，针对性开展了23项先导项目试验，推进了关键技术研究，以高科技战胜高难度，安全、优质、高效地完成了工程建设任务。同时，在工程建设中，通过应用实践、科技攻关、总结完善，又促进了钻井技术的发展，集成形成了超深高酸性气田钻井配套技术，建立了超深高酸性气田工程技术系列标准体系，可为我国超深高酸性气田规模开发提供借鉴。

为了把川气东送工程建设中形成的钻井技术成果和经验总结提炼出来，加快科技成果转化成为生产力，促进川东北地区后续气田的开发成效，作者组织编写了《超深高酸性气田钻井工程技术与实践》一书。本书较为详细地总结了在川气东送工程建设中形成的超深高酸性气田钻井配套技术及应用实践。全书共分十二章，第一章主要介绍了川东北地区构造特征、储层特征、钻井技术难点和普光气田开发部署

情况；第二章基于川东北地区地貌特征、气候特征及钻井装备、井控和防硫化氢要求，从井场、生活营地选址、井场布置设计、道路建设维护及预防自然灾害等方面介绍了钻前工程技术；第三章介绍了超深高酸性气田高抗挤、高耐蚀、高产气井井身结构及管材优选技术；第四章针对川东北地区储层超深、高压、高含硫、高产特征及地貌特征，着重介绍了井控装备配套、压井方法和井控管理；第五章分析了川东北地区岩石工程力学特性与钻头钻进特性，推荐了钻头选型和应用方案；第六章阐述了气体钻井理论、气体钻井装备、气体钻井配套工艺技术，介绍了气体钻井在川东北地区应用效果；第七章结合陆相地层高陡构造特征，介绍了川东北地区应用的防斜打快钻井技术和应用效果；第八章根据动力钻具工作原理及输出特性，介绍了螺杆钻具、涡轮钻具和高效钻头优选方法和应用技术；第九章从轨道设计、井眼减阻、轨迹控制、随钻测量、钻井液技术等方面介绍了超深定向井、水平井钻井工艺技术；第十章介绍了川东北地区钻井液体体系优选及应用、气液转换、井漏预防与处理和储层保护等技术；第十一章介绍了复杂压力体系及高酸性环境高产气井的固井配套技术；第十二章介绍了钻井配套技术在普光气田开发中应用效果。

本作者是川气东送工程建设的主要组织者，参加了技术攻关和工程建设全过程的工作。为了更好地把川气东送工程建设中的技术成果和经验总结出来，主要从应用方法和应用实践角度出发，系统地把超深高酸性气田钻井配套技术按照技术难点、理论依据、工艺措施、应用方法和应用成效的程序写出来。在编写过程中，收集、参考了众多的工程方案、成果、论文和经验总结资料，融合多学科、多专业、多层次技术，结合自己的认识和体会，用了8个月的时间进行构思与编撰，组织参与工程建设的相关专业技术专家和学者进行了4次审稿修改，最后定稿出版。由于时间仓促及作者水平所限，书中难免存在一些不足和有待探讨的问题，还需在今后的科研及生产实践中继续总结和完善。

在此要特别说明的是，本书的基本素材是在中国石化川气东送建设工程指挥部组织的钻井先导项目攻关及现场实施成果的基础上系统提炼而形成的。杨玉坤、王宝新、翟建明、李祖奎、何存良、苗锡庆、李长宏、陈明、房舟、陈永明、李群生、牛洪波、刘四海、陈雷等部分专家和科技工作者参与了素材收集整理及部分编校工作，沈琛、刘汝山、李作会、蒋祖军、廖成锐、陈济峰、刘学章等专家参与了审稿工作，在此，对他们为本书做出的贡献表示衷心的感谢！

作者

目 录

第一章 概 述.....	1
第一节 川东北地区勘探情况简介.....	1
一、宣汉-达县区块勘探概况.....	2
二、元坝构造带.....	5
三、通南巴构造背斜构造带.....	6
第二节 普光气田简介.....	7
一、地理位置及气候特点.....	7
二、构造特点.....	8
三、地层特征.....	10
四、气藏特征.....	13
五、开发部署.....	14
第三节 国内外高酸性气田简介及川东北钻井工程面临的技术难点 ...	15
一、“三高”含硫气田划分.....	15
二、国内外高含硫气田简介.....	16
三、川东北钻井工程面临的技术难点	17
四、钻井总体技术方案	18
第二章 钻前工程.....	20
第一节 钻前工程的特点.....	20
一、区域气候及地形特点.....	20
二、钻前工程的难点.....	21
三、钻前工程的技术要求.....	21
第二节 井 场.....	24
一、井场选址原则.....	24
二、井场地质灾害评估和治理设计.....	24
三、井场设计基本要求与原则	30
四、井场布置及井场设计.....	32
第三节 井场道路.....	38
一、基本要求.....	38
二、道路平曲线半径.....	39

三、最大纵坡和坡长.....	40
四、路面结构.....	40
五、道路横断面形式.....	40
六、道路边沟.....	41
七、道路土石方工程.....	42
八、软土地基处理.....	43
九、道路维护.....	43
十、桥涵.....	43
第四节 生活营地	44
一、基本要求.....	44
二、布置.....	44
第五节 钻前工程塌方治理范例	45
一、P202井场.....	45
二、P302井场.....	45
第三章 井身结构设计技术	47
第一节 井身结构设计难点	47
第二节 井身结构设计现状	48
一、国外井身结构设计现状.....	48
二、国内井身结构设计现状.....	51
第三节 酸性环境下的套管选材	53
一、酸性环境条件下的套管腐蚀.....	53
二、套管选材.....	58
第四节 井身结构设计	68
一、设计原则及依据.....	68
二、设计方法.....	69
三、设计优化.....	75
第五节 井身结构方案应用范例	83
第四章 井控技术	87
第一节 井控技术现状	87
一、钻井井控的特点、难点.....	87

二、井控技术现状	90
第二节 节流及压井技术	94
一、气体、液体的侵入与处理	94
二、溢流的处理与压井作业	97
三、特殊压井方法	102
第三节 井控装置及配套	104
一、不同区块的井控对井身结构的要求	104
二、井控装置及辅助设备配套	107
三、硫化氢监测	123
第四节 井控管理	125
一、主要井控技术措施	125
二、井控管理制度	128
三、应急救援体系	129
第五章 岩石工程力学分析与钻头合理选用技术	130
第一节 区域构造地层特点与钻井技术难点	130
一、区域构造地层特点	130
二、钻井工程与钻头选择面临的技术难点	131
第二节 地层与岩性产状和影响钻头选型因素	132
一、地层与岩性产状	132
二、影响钻头选用的因素	136
第三节 岩石工程力学特性参数与PDC钻进特性	138
一、地层岩样的岩石工程力学特性	138
二、川东北地区露头岩样岩石工程力学特性	143
三、普光地区岩石工程力学特性参数预测剖面	153
四、PDC钻进特性	154
第四节 钻头选型与推荐方案	158
一、国内外钻头选型方法综述	158
二、川东北地区的钻头选型方法与钻头选型推荐方案	160
三、适应于相关地质层段的个性化钻头型号推荐	172
四、钻头合理选择与使用要点	182

第六章 气体钻井技术	184
第一节 概 述	184
一、气体钻井技术简介	184
二、川东北地区应用概述	186
第二节 气体钻井理论	187
一、提高机械钻速机理	187
二、流体力学分析计算	188
三、井壁稳定性分析	200
四、地层出水量预测	204
五、气体钻井防斜研究	206
六、钻具失效问题研究	208
第三节 气体钻井设备	211
一、专用设备的组成及作用	211
二、设备配置要求	214
三、设备配套	215
第四节 气体钻井工艺技术	216
一、空气锤钻井技术	216
二、井下燃爆监测技术	220
三、泡沫钻井技术	222
四、施工工艺	224
五、气、液转换技术	231
第五节 应用效果与实例	234
一、应用效果与认识	234
二、应用实例	236
第七章 防斜打快钻井技术	240
第一节 陆相地层井斜控制难点	240
一、钻井易斜因素分析	240
二、常规井身质量控制技术应用评价	244
三、气体钻井在陆相地层的应用评价	245
第二节 国内外防斜打快技术现状	245
一、井斜控制理论	245
二、井斜控制方式及其防斜打快性能分析	246

三、发展趋势.....	255
第三节 国外垂直钻井系统介绍	256
一、VDS垂直钻井系统.....	256
二、Power V 垂直钻井系统.....	257
三、VertiTrak 垂直钻井系统.....	264
第四节 国产MVDT自动垂直钻井系统	272
一、研制过程.....	272
二、工具结构及工作原理	274
三、工具设计参数	275
四、工具使用要求	276
五、机械式自动垂直钻井系统在雷北1井试验应用情况	277
第五节 川东北垂直钻井系统应用技术方案	278
一、系统选定.....	278
二、施工井段的确定、钻头的选择与钻具组合推荐	282
第八章 复合钻井技术.....	283
第一节 国内外技术现状	283
一、螺杆复合钻井技术	283
二、涡轮钻井技术	285
第二节 动力钻具的工作原理及输出特性分析	285
一、螺杆钻具的构成和输出特性	286
二、涡轮钻具的工作原理和工作特性	300
第三节 配套技术	304
一、螺杆钻具配套技术	304
二、涡轮钻具应用技术	313
第四节 应用效果与范例	316
一、应用效果.....	316
二、范例	319
第九章 定向井、水平井钻井技术	324
第一节 国内外技术现状及发展趋势	324
一、国外技术现状	324
二、国内技术现状	327

三、技术水平与发展趋势	328
第二节 水平井井眼轨道优化设计技术	329
一、考虑方位漂移的水平井井眼轨道优化设计	330
二、摩阻扭矩较小井眼轨道优选技术	335
第三节 定向井、水平井钻井工艺关键技术	339
一、井眼轨迹控制技术	339
二、随钻测量技术	345
三、钻井液技术基本要求	348
第四节 施工范例	349
一、普光地区定向井、水平井技术	349
二、超深小井眼定向钻井技术	356
第十章 钻井液技术	362
第一节 地层特点和钻井液施工难点	362
一、地层特点分析	362
二、钻井液施工难点	363
第二节 钻井液体系优选与应用	366
一、本地区黏土矿物分析	366
二、钻井液体系评价与优化研究	368
三、钻井液的污染与处理技术	372
四、现场应用实例——普光202-2H井	373
第三节 气体钻井钻井液转换技术	376
一、疏水型气液转换剂稳定井壁机理分析	376
二、疏水型化学剂的优选与合理配伍研究	378
三、润湿反转剂RSF-1抑制能力和相容性实验评价	379
四、疏水型复合化学剂提高地层稳定性效果分析	381
五、疏水型化学剂现场转换工艺	383
六、实施气液转换后的钻井液维护与处理	384
第四节 井漏预防与处理技术	384
一、本地区井漏情况分析	385
二、井漏的预防	386
三、井漏的处理	387

四、提高地层承压堵漏技术.....	398
五、现场应用实例——新黑池1井	406
第五节 气层保护技术	408
一、储层特征分析	408
二、保护储层屏蔽暂堵技术.....	414
三、钻井/完井液配制及维护处理	418
四、保护气层技术措施	418
第十一章 固井技术	420
第一节 地质特征及固井难点分析	420
一、区域地质特征分析	420
二、井身结构及固井方式	421
三、气田整体固井难点	422
四、不同层次套管固井难题.....	424
第二节 固井水泥浆体系	426
一、高酸性环境下水泥石腐蚀机理及防腐蚀技术研究	426
二、不同层次套管固井水泥浆性能要求	430
三、抗高温防气窜水泥浆体系	431
四、高密度防气窜水泥浆体系	436
五、低密度水泥浆体系	439
六、固井水泥浆方案.....	444
第三节 固井工具	444
一、高酸性气田固井工具面临的问题	444
二、酸性条件下固井工具选型要求.....	445
三、新型防腐型双级注水泥器	445
四、非常规系列液压尾管悬挂器	447
第四节 固井工艺技术	450
一、高压防气窜固井工艺技术	450
二、防漏固井技术.....	453
三、提高固井顶替效率技术.....	456
四、旋转尾管技术.....	457
五、小间隙固井技术.....	458
六、水平井固井技术.....	458

七、其他特殊固井技术	462
第五节 应用范例	462
一、高密度非渗透防气窜水泥浆体系现场应用	463
二、胶乳防腐防气窜水泥浆体系的应用	467
三、防漏固井技术的应用	470
四、川东北复杂地层综合固井技术现场应用	474
五、普光气田固井技术应用效果	478
第十二章 钻井配套技术在普光气田的应用	479
第一节 单项技术应用效果	479
一、井身结构优化技术	479
二、井控技术	481
三、钻头选用技术	481
四、气体钻井技术	481
五、防斜打快钻井技术	484
六、复合钻井技术	485
七、定向井水平井技术	485
八、钻井液技术	486
九、复杂压力体系固井技术	486
第二节 整体应用效果	488
参考文献	490

第一章 概述

随着我国经济持续快速发展,能源需求量越来越大,未来几十年将是我国能源需求增长最快的一段时期。由于我国的石油资源相对缺乏,天然气的开发利用已成为我国能源发展战略的重要方向。我国的天然气资源比较丰富,但勘探开发程度较低,其中天然气资源蕴藏量丰富的川渝地区,已成为国家重要的油气勘探开发区域。近年来中国石油天然气集团公司(简称中国石油)相继在四川盆地北部的罗家寨、滚子坪、铁山坡和渡口河等构造飞仙关组地层发现了高含硫天然气田;中国石油化工集团公司(简称中国石化)也在四川盆地东北部取得重大突破,发现了迄今全国最大的整装高含硫气田。由于川东北地区地质条件复杂、储层埋藏深、富集天然气的储层中多伴生有高浓度的 H_2S ,从而为该区的深井、超深井钻井工作带来了极大的安全风险和严峻挑战。

第一节 川东北地区勘探情况简介

川东北地区是中国石化油气勘探开发的重点探区之一,目前主要工作集中在宣汉-达县、通南巴及巴中构造。21世纪初,中国石化投入大量资金进行勘探,继发现普光大气田之后,又在清溪场、大湾、毛坝、河坝场、元坝及老君、双庙等构造取得了一系列突破,先后发现了元坝、河坝场、马路背三个气田,其天然气勘探开发程度正不断的向广度和深度拓展。在已发现的四个气田的海相与陆相9个地质层段、15个储层中获得工业气流(构造分布见图1-1)。截至2009年底,累计探明储量 $4981 \times 10^8 \text{m}^3$ 、控制储量 $4032 \times 10^8 \text{m}^3$ 、预测储量 $5598 \times 10^8 \text{m}^3$ 、三级储量合计 $14611 \times 10^8 \text{m}^3$ 。

本地区钻井井深大都在6000m左右,元坝构造设计井深平均在7000m以上,这些深井、超深井普遍要钻穿和钻遇具有高温、高压、高陡、高密度岩性地层条件以及富含 H_2S 、 CO_2 气体和多套地层压力系统等特点的白垩系-二叠系地层。

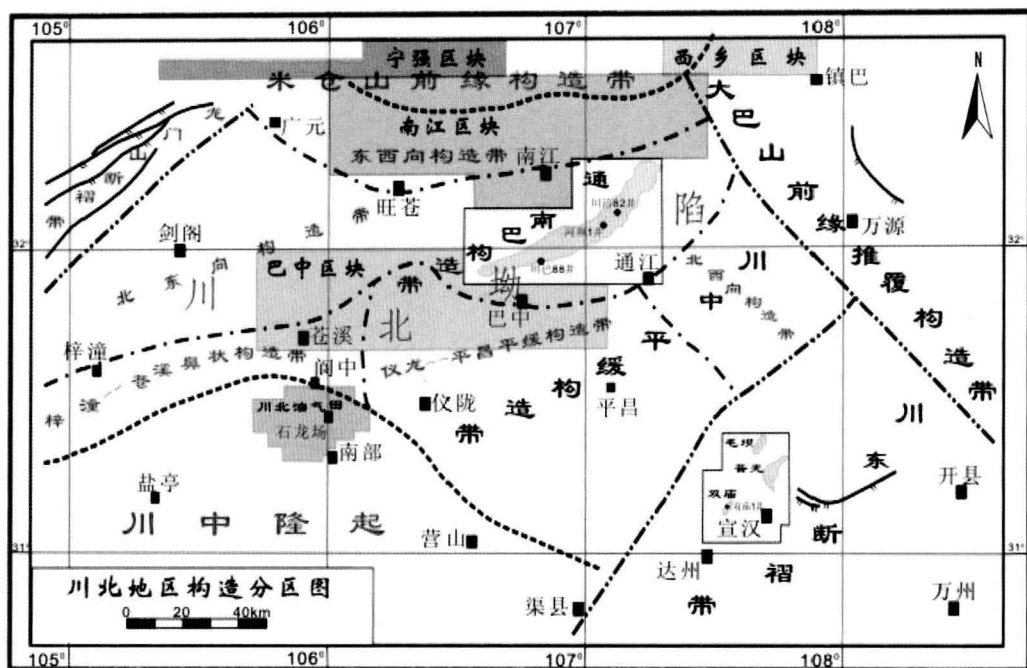


图1-1 川东北地区构造分布图

一、宣汉-达县区块勘探概况

宣汉-达县地区于20世纪50年代开始进行石油地质调查工作，于2000~2001年进行了高分辨率二维地震详查，2003~2004年完成了高分辨率三维地震详查，先后在该区的飞仙关组及长兴组进行了数轮精细的构造解释工作，2005年又以三维地震资料为基础，以多井地层对比为依据开展了精细的构造解释，进一步落实了飞仙关组~长兴组构造形态及断层的分布情况，先后发现了普光主体、毛坝、大湾、清溪等气田。截至2006年8月，普光主体气田共完钻评价井10口、试气7井24层。其中普光1井、普光2井、普光4井、普光5井、普光6井、普光7井6口井获得工业气流，普光3井、普光9井为产水井，酸化压裂后普光2井、普光6井、普光7-侧1井均获高产，奠定了建设大型气田的资源基础。

地表露头及勘探钻井揭示，该地区下古生界地层较完整，从下至上发育有志留系、石炭系、二叠系、三叠系和侏罗系。其中志留系上统缺失、上古生界缺失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，三叠系与侏罗系保留较全，早白垩系地层保留较好，上白垩统缺失，新生界基本没有沉积保留。

受构造运动的影响，该地区地层间发育较多不整合面，在海相地层中志留系与石炭系、石炭系与二叠系上下统之间皆为平行不整合接触关系；经晚三叠系末期的印支运动，四川盆地整体抬升成陆，古特提斯海水彻底退出扬子地台，接受了以陆相碎屑岩为主的湖泊-三角洲-河流沉积。

该地区已探明含气层系为二叠系上统长兴组及三叠系下统飞仙关组，其以 P_2ch-T_1f 生储盖组合为主。该组合以长兴组生物礁滩相、飞仙关组暴露浅滩-浅滩相溶孔白云岩、长兴组-飞仙关组陆棚相裂缝灰岩为储层，以飞四段膏岩、泥岩为盖层，以下伏下的志留统-上二叠统龙潭组为烃源岩层，目前探明储量均分布在该套组合；其次是 $T_{3x} \sim J_{2x}$ 生储盖组合，该组合以须家河组-下沙溪庙组砂岩为主要储层，以泥岩、碳质泥岩、煤层为烃源岩及盖层，泥质岩处于成熟阶段，为区域性自生自储型组合，该组合见到了良好的天然气显示，但储集层主要为薄层细-粉细砂岩，裂缝、微裂隙为主要储集空间，储集性能较差，主要为岩性气藏。普光2井、普光3井、普光4井在须家河组中途测试分别产气 $162\text{ m}^3/\text{d}$ 、 $448\text{ m}^3/\text{d}$ 、 $267\text{ m}^3/\text{d}$ ，以干层、干层含气、低产气层为主，与川西须家河组气层的对比研究证明，该类储层具有酸化压裂改造的空间。宣汉-达县地区构造分布图见图1-2，生储盖（成藏）组合简表见表1-1。

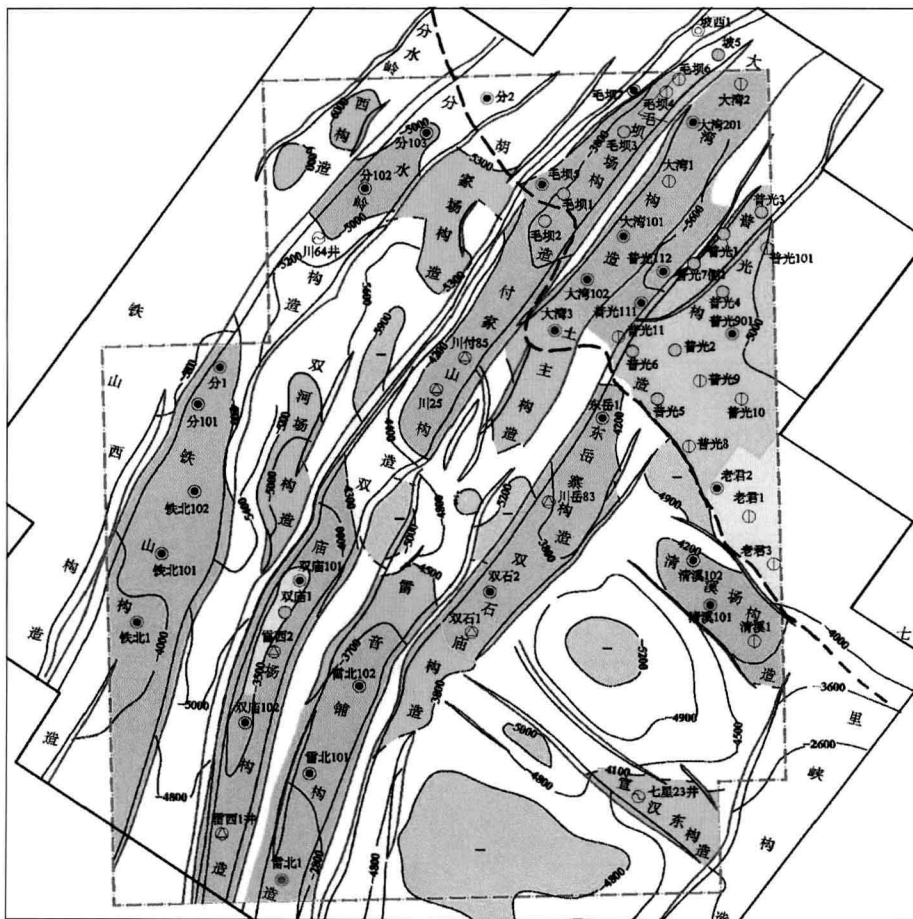


图1-2 宣汉-达县构造分布图