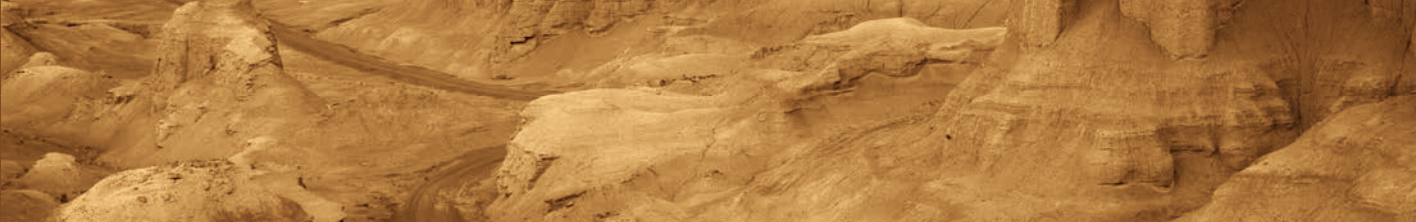


■ 准噶尔盆地勘探理论与实践系列丛书 ■

咸化湖相页岩油地质 特征与勘探实践

——以准噶尔盆地吉木萨尔凹陷为例

匡立春 雷德文 王志章 贾希玉 等/著



Geological Characteristics and Exploration
Practice in Shale Oil of Saline Lacustrine Facies:
Taking the Jimsar Sag in the Junggar Basin as an Example



科学出版社

准噶尔盆地勘探理论与实践系列丛书

咸化湖相页岩油地质特征与勘探实践

——以准噶尔盆地吉木萨尔凹陷为例

**Geological Characteristics and Exploration Practice in
Shale Oil of Saline Lacustrine Facies: Taking the
Jimsar Sag in the Junggar Basin as an Example**

匡立春 雷德文 王志章 贾希玉 等 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书在充分调研国内外页岩油研究现状基础上,从烃源岩特征与评价、页岩油形成机理及成藏模式、页岩油沉积特征与储层特征、源储配置与资源评价、页岩油储层测井地震响应特征、核磁测井评价与地震反演及预测、三维模型建立与水平井轨迹优化、页岩油水平井优化钻井工艺及储层压裂改造等方面进行了详细阐述。

本书适合于从事页岩油气勘探、开发的专业技术人员使用,也可供大专院校师生、科研院所相关专业人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

咸化湖相页岩油地质特征与勘探实践:以准噶尔盆地吉木萨尔凹陷为例—
Geological Characteristics and Exploration Practice in Shale Oil of Saline Lacustrine Facies: Taking the Jimsar Sag in the Junggar Basin as an Example/匡立春等著. —北京:科学出版社,2020. 1

(准噶尔盆地勘探理论与实践系列丛书)

ISBN 978-7-03-059297-2

I. ①咸… II. ①匡… III. ①准噶尔盆地-致密砂岩-页岩油气藏-地质特征
②准噶尔盆地-致密砂岩-页岩油气藏-油气勘探 IV. ①P618. 13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 247568 号

责任编辑:万群霞 / 责任校对:王萌萌

责任印制:师艳茹 / 封面设计:无极书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京画中画印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2020年1月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2020年1月第一次印刷 印张:23 1/4

字数:544 000

定价:298.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

本书作者名单

匡立春 雷德文 王志章 贾希玉
凌立苏 郭旭光 周柯全 宋 永
王振林 钱永新 吴俊军 王霞田

序

准噶尔盆地位于我国西部,行政区划属新疆维吾尔自治区(简称新疆)。盆地西北为准噶尔界山,东北为阿尔泰山,南部为北天山,是一个略呈三角形的封闭式内陆盆地,东西长为 700km,南北宽为 370km,面积为 $13 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。盆地腹部为古尔班通古特沙漠,面积占盆地总面积的 36.9%。

1955 年 10 月 29 日,克拉玛依黑油山 1 号井喷出高产油气流,宣告了克拉玛依油田的诞生,从此揭开了新疆石油工业发展的序幕。1958 年 7 月 25 日,世界上唯一一座以油田命名的城市——克拉玛依市诞生了。1960 年,克拉玛依油田原油产量达到 166 万 t,占当年全国原油产量的 40%,成为新中国成立后发现的第一个大油田。2002 年原油年产量突破 1000 万 t,成为我国西部第一个千万吨级大油田。

准噶尔盆地蕴藏丰富的油气资源。油气总资源量为 $107 \times 10^8 \text{ t}$,是我国陆上油气资源超过 $100 \times 10^8 \text{ t}$ 的四大含油气盆地之一。虽然经过半个多世纪的勘探开发,但截至 2012 年年底,石油探明程度仅为 26.26%,天然气探明程度仅为 8.51%,均处于含油气盆地油气勘探阶段的早中期,预示着准噶尔盆地具有巨大的油气资源和勘探开发潜力。

准噶尔盆地是一个具有复合叠加特征的大型含油气盆地。盆地自晚古生代至第四纪经历了海西、印支、燕山、喜马拉雅等构造运动。其中,晚海西期是盆地拗隆构造格局形成、演化的时期,印支-燕山运动进一步叠加和改造,喜马拉雅运动重点作用于盆地南缘。多旋回的构造发展在盆地中造成多期活动、类型多样的构造组合。

准噶尔盆地沉积总厚度可达 15000m。石炭系—二叠系被认为是由海相到陆相的过渡地层,中、新生界则属于纯陆相沉积。盆地发育了石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系和古近系六套烃源岩,分布于盆地不同的凹陷,它们为准噶尔盆地奠定了丰富的油气源物质基础。

纵观准噶尔盆地整个勘探历程,储量增长的高峰大致可分为准噶尔西北缘深化勘探阶段(20 世纪 70~80 年代)、准噶尔东部快速发现阶段(20 世纪 80~90 年代)、准噶尔腹部高效勘探阶段(20 世纪 90 年代至 21 世纪初期)、准噶尔西北缘滚动勘探阶段(21 世纪初期至今)。不难看出,勘探方向和目标的转移反映了地质认识的不断深化和勘探技术的日臻成熟。

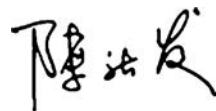
正是由于几代石油地质工作者的不懈努力和执着追求,使准噶尔盆地在经历了半个多世纪的勘探开发后,仍显示出勃勃生机,油气储量和产量连续 29 年稳中有升,为我国石油工业发展做出了积极贡献。

在充分肯定和乐观评价准噶尔盆地油气资源和勘探开发前景的同时,必须清醒地看到,由于准噶尔盆地石油地质条件的复杂性和特殊性,随着勘探程度的不断提高,勘探目标多呈“低、深、隐、难”特点,勘探难度不断加大,勘探效益逐年下降。巨大的剩余油气资源分布和赋存于何处,是目前盆地油气勘探研究的热点和焦点。

由中国石油新疆油田分公司(以下简称新疆油田分公司)组织编写的“准噶尔盆地勘探理论与实践系列丛书”历经近两年的时间终于面世。这是由油田自己的科技人员编写出版的一套专著类丛书,这充分表明我们不但在半个多世纪的勘探开发实践中取得了一系列重大的成果,积累了丰富的经验,而且在准噶尔盆地油气勘探开发理论和技术总结方面有了长足的进步,理论和实践的结合必将更好地推动准噶尔盆地勘探开发事业的进步。

该系列专著汇集了几代石油勘探开发科技工作者的成果和智慧,也彰显了当代年轻地质工作者的厚积薄发和聪明才智。希望今后能有更多高水平的、反映准噶尔盆地特色的地质理论专著出版。

“路漫漫其修远兮,吾将上下而求索”。希望从事准噶尔盆地油气勘探开发的科技工作者勤于耕耘、勇于创新、精于钻研、甘于奉献,为“十二五”新疆油田的加快发展和“新疆大庆”的战略实施做出新的更大的贡献。



新疆油田分公司总经理

2012年11月

前 言

吉木萨尔凹陷芦草沟组的勘探历程也是芦草沟组页岩油和“甜点”认识的形成过程, 芦草沟组有无页岩油, 页岩油有无“甜点”是勘探大发现的前提和关键, 芦草沟组页岩油的勘探发现是勘探家不断解放思想、开拓创新的结果。

通过井震结合识别和预测出芦草沟组发育上、下两个“甜点段”, 在明确“甜点段”展布及岩石力学特征的前提下, 钻井方案中首次引入“储层改造最优化”思路, 创新水平井理念, 根据水平井压裂裂缝延展及铺砂最佳方式, 优化水平井井眼轨迹设计, 实现“甜点”钻遇率 100%、油层钻遇率 93% 的骄人业绩。

吉木萨尔凹陷芦草沟组处于单斜背景, 烃源岩和云质岩页岩“甜点”储层厚度均较大, 横向连续性好, 分布稳定, 无明显圈闭界限, 纵向上源储一体, 平面上分布面积大, 具有广覆式分布页岩油的地质特征。页岩油勘探中摆脱常规油气勘探思路, 创新思维, 开拓思路, 以页岩油理念为指导, 获得了页岩油勘探的重大发现和突破。

全书共 14 章, 第 1 章为总论, 主要概述准噶尔盆地吉木萨尔凹陷区域地质条件、芦草沟组页岩油地质特征及勘探实践。第 2 章则围绕页岩油基本概念、分类、特征、识别标志与评价标准、开采工艺技术及成功的勘探开发实例进行广泛调研, 旨在弄清国内外页岩油研究现状。第 3、4 章详细阐述页岩油烃源岩特征与评价、页岩源油类型与油源对比、运移机制、页岩油形成机理与成藏模式。第 5、6 章阐释吉木萨尔凹陷页岩油储层岩石学与沉积相特征、页岩储层成因及储集特征。第 7 章主要通过分析含油性、岩性、物性、孔隙结构、岩石脆性及黏土矿物间关系, 弄清源储配置关系及其组合特征。第 8 章主要阐述页岩油资源评价方法。第 9~11 章探讨页岩油储层测井地震响应特征及其数值模拟, 研究页岩储层裂缝发育特征及地震测井预测方法; 详细分析页岩油储层常规测井评价难点及核磁测井评价的技术及应用效果; 阐述页岩油甜点段划分对比、成因分析, 地震反演及分布预测, 并详细描述页岩油甜点段岩性、物性、孔隙结构特征。第 12 章建立“甜点段”三维地质模型, 提出基于三维模型的水平井优化设计。第 13、14 章详细阐述页岩油水平井优化钻采工艺技术及储层压裂改造技术。

本书由匡立春、雷德文、王志章、贾希玉、凌立苏、郭旭光、周柯全、宋永、王振林、钱永新、吴俊军、王霞田撰写, 由匡立春、雷德文、王志章、贾希玉统稿, 由中国石油大学(华东)李汉林教授和操应长教授、中国石油天然气集团科学技术研究院吴晓智高级工程师、中国石油新疆油田分公司勘探开发研究院翁宁高级工程师等审阅。

在本书编写过程中,得到中国石油新疆油田分公司领导的指导和帮助,同时还凝聚了多年来支持新疆油田分公司科研、生产一线的各大专院校、科研院所专家、同行的心血,在此一并致谢。

由于作者水平所限,书中不妥之处,恳请读者批评指正。

作者
2018年4月

目 录



序

前言

第 1 章 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷页岩油概述	1
1.1 区域地质条件	1
1.1.1 构造演化	1
1.1.2 芦草沟组展布及分层	4
1.2 芦草沟组页岩油地质特征	6
1.2.1 岩性特征	6
1.2.2 “甜点段”储层特征	7
1.2.3 “甜点”储层沉积特征	7
1.2.4 优质厚层烃源岩特征	8
1.2.5 “甜点段”储层微观特征	9
1.3 页岩油勘探实践	9
1.3.1 芦草沟组页岩油与“甜点”认识的形成	9
1.3.2 “甜点”优选	11
1.3.3 关键井确定	11
1.3.4 钻井提速和体积压裂	12
第 2 章 国内外页岩油研究现状	13
2.1 概述	14
2.1.1 页岩油概念	14
2.1.2 页岩油一般特征	14
2.1.3 几点重要认识	16
2.2 国外页岩油研究现状	18
2.2.1 世界页岩油资源分布	18
2.2.2 主要页岩油地区和国家勘探开发现状	18
2.2.3 页岩油开发的工程技术	23
2.3 中国陆相页岩油特征及勘探现状	25
2.3.1 我国页岩油分布情况	25
2.3.2 中国陆相页岩油特征	25
2.3.3 页岩油评价进展	28
2.3.4 中国页岩油勘探开发现状	29

2.3.5	我国开发页岩油技术与装备现状	31
2.3.6	中国页岩油开发面临的挑战	32
2.3.7	中国页岩油开发前景	33
第3章	页岩油烃源岩条件分析与油源对比	34
3.1	页岩油烃源岩特征与评价	34
3.1.1	烃源岩特征	34
3.1.2	烃源岩评价	34
3.2	页岩原油类型与油源对比	48
3.2.1	页岩原油类型	48
3.2.2	油源对比与稠油成因分析	57
第4章	页岩油形成机理	68
4.1	页岩油运移机制	68
4.1.1	页岩油运移特征	68
4.1.2	页岩油运移动力	75
4.1.3	页岩油运移通道	82
4.2	页岩油成藏模式	84
4.2.1	自生自储成藏模式	84
4.2.2	近源成藏模式	84
第5章	吉木萨尔凹陷页岩油储层岩石学与沉积相特征	86
5.1	页岩油储层岩石学特征	86
5.1.1	页岩油储层岩石类型	86
5.1.2	页岩油储层岩性特征	88
5.2	沉积相特征	95
5.2.1	沉积相标志	95
5.2.2	沉积相类型及其特征	99
5.2.3	“甜点段”储层沉积相分析	102
第6章	页岩油储层白云岩成因与储集特征	109
6.1	储层成岩作用类型及芦苇沟组白云岩成因	109
6.1.1	储层成岩作用类型	109
6.1.2	芦苇沟组白云岩成因	113
6.2	储层孔渗特征、储集空间类型及其特征	118
6.2.1	储层孔渗特征	118
6.2.2	储集空间类型及特征	119
6.3	储层发育的主控因素及储层特征	126
6.3.1	储层发育的主控因素	126
6.3.2	目的层储层特征	128
第7章	页岩储层含油性与源储配置关系	130
7.1	含油性与岩性的关系	130

7.2	关键井含油性与岩性	132
7.2.1	吉 174 井含油性与岩性	132
7.2.2	吉 251 井含油性与岩性	134
7.3	含油性与孔渗性关系	134
7.3.1	含油性与物性的关系	134
7.3.2	含油性与孔喉结构的关系	135
7.3.3	含油性与岩石刚性矿物成分的关系	138
7.3.4	含油性与黏土矿物的关系	138
7.4	含油性与润湿性特征分析	141
7.4.1	润湿性的测定	142
7.4.2	实验结果分析	143
7.4.3	润湿性与含油性的关系	145
7.4.4	润湿性与岩石矿物成分的关系	146
7.5	源储配置关系分析	146
7.5.1	芦草沟组二段源储组合特征分析	146
7.5.2	芦草沟组一段源储组合特征分析	147
7.5.3	源储组合类型	147
第 8 章	页岩油资源评价方法	150
8.1	芦草沟组地质要素分布	150
8.1.1	芦草沟组顶面构造	150
8.1.2	地层厚度分布	151
8.1.3	“甜点段”及“甜点”厚度分布	153
8.1.4	烃源岩厚度分布	155
8.1.5	有机质丰度及 R_o 的平面分布	158
8.1.6	生烃强度平面分布	159
8.2	单井控制的资源丰度	160
8.2.1	体积法估算页岩油资源丰度	160
8.2.2	评价参数的选取和确定	161
8.2.3	蒙特卡罗法估算单井资源丰度	163
8.3	资源评价方法	165
8.3.1	体积概率法	165
8.3.2	排聚系数法	166
8.3.3	资源丰度模型法	166
第 9 章	页岩储层的地球物理识别方法	170
9.1	页岩储层测井特征分析	170
9.2	储层地震响应特征的数值模拟	173
9.2.1	数值模拟方法原理	173
9.2.2	储层模型的设计与制作	174

9.2.3	数值模拟方法	176
9.2.4	地震资料数值模拟实例	178
9.3	储层及裂缝发育带的岩石物理特征	179
9.3.1	岩石物理测量结果	179
9.3.2	岩石物理测量结果分析	181
9.4	裂缝发育带的地震检测方法	185
9.4.1	基于方向加权的相干检测	185
9.4.2	曲率分析的方法原理	189
9.4.3	复数域各向异性扩散滤波	194
9.4.4	小波奇异性指数	198
第10章	页岩油储层核磁共振测井评价技术	202
10.1	页岩油储层测井评价的困难	202
10.1.1	岩石学特征复杂、岩性识别困难	202
10.1.2	岩石骨架矿物多变、物性表征困难	203
10.1.3	饱和度计算困难	205
10.2	核磁共振测井仪的选择	207
10.2.1	井径对核磁共振测井仪的影响分析	207
10.2.2	回波间隔 T_E 对核磁共振测井的影响分析	207
10.2.3	吉木萨尔凹陷核磁共振测井仪的选择	213
10.3	核磁共振测井资料在岩性识别中的应用	214
10.3.1	吉木萨尔凹陷页岩油储层岩性特征	214
10.3.2	页岩油储层岩性识别方法研究	214
10.4	核磁共振测井物性表征方法研究	217
10.4.1	孔隙度表征方法研究	217
10.4.2	渗透率表征方法研究	219
10.4.3	孔隙结构表征方法研究	221
10.5	核磁共振测井含油性评价方法研究	223
10.5.1	饱和度计算方法研究	223
10.5.2	饱和度计算方法对比分析	225
10.6	核磁共振测井技术应用效果	226
10.6.1	首次在芦苇沟组发现页岩油储层	226
10.6.2	有效地指导了勘探部署	227
10.6.3	有效地指导了压裂选层和工艺技术的选择	227
10.6.4	较好地解决了资源评价技术	229
10.6.5	形成页岩油“七性”关系研究技术	231
第11章	页岩油“甜点段”预测	232
11.1	芦苇沟组“甜点段”对比划分与成因分析	232
11.1.1	“甜点段”对比及划分	232

11.1.2	“甜点段”成因分析与分布预测	233
11.2	“甜点段”地震响应与分布预测	235
11.2.1	“甜点段”正演模型	236
11.2.2	“甜点段”阻抗特征	236
11.2.3	单井阻抗差异分析	237
11.2.4	合成记录特征	238
11.2.5	储层地震反射强弱与子波频率关系	238
11.2.6	“甜点段”振幅井间对比特征	240
11.2.7	敏感属性与“甜点”分布	240
11.3	地震波阻抗反演与裂缝预测	243
11.3.1	波阻抗反演与“甜点”分布	243
11.3.2	裂缝特征	243
11.4	裂缝发育带及储层“甜点”综合预测	247
11.4.1	综合预测的必要性、任务与基本思路	247
11.4.2	芦草沟组缝洞发育带的地震检测	249
11.4.3	芦草沟组储层“甜点”综合预测	259
11.5	芦草沟组页岩油“甜点”特征分析	268
11.5.1	芦草沟组页岩油“甜点”分布特征	268
11.5.2	芦草沟组页岩油“甜点”岩性特征	268
11.5.3	芦草沟组页岩油“甜点段”物性特征	269
11.5.4	芦草沟组页岩油“甜点”微观孔隙结构特征	272
11.5.5	芦草沟组页岩油“甜点”的成岩演化特征	272
第 12 章	三维地质模型与井位部署	274
12.1	三维地质建模	274
12.1.1	三维地质建模流程	274
12.1.2	三维地质模型	275
12.2	水平井设计	281
12.3	勘探部署研究	283
12.3.1	老井恢复试油	283
12.3.2	探井部署	283
12.3.3	三维地震部署	287
12.3.4	勘探效果	288
第 13 章	页岩油水平井优快钻井技术研究	290
13.1	概述	290
13.2	页岩油水平井优快钻井工艺研究	291
13.2.1	水平井方案中引入“最优化储层改造”	291
13.2.2	优化井身剖面设计	293
13.2.3	钻具与井眼相容性研究,优化钻具结构	295
13.2.4	优化水平井轨迹控制,确保油层钻遇率	300

13.2.5 定向工具常规化,实现水平井技术国产化	304
13.3 页岩油水平井快钻工艺技术	304
13.3.1 芦苇沟组优选 PDC 钻头,机械钻速获突破	304
13.3.2 水平井安全快速的钻井液工艺技术	306
13.4 效果评价及技术成果	307
13.4.1 效果评价	307
13.4.2 技术成果	308
第 14 章 页岩油储层压裂改造技术研究	310
14.1 吉木萨尔凹陷前期储层改造技术简介	310
14.2 压裂工艺及配套技术研究与应用	314
14.2.1 页岩油储层改造的技术对策	314
14.2.2 优选压裂液,造复杂裂缝	315
14.2.3 优化直井分层压裂工艺	320
14.2.4 页岩油储层改造工具及配套技术优选	321
14.2.5 水平井压裂工艺研究——以吉 172-H 井为例	327
14.2.6 页岩油储层改造技术的应用	333
14.3 压裂监测技术研究与应用	334
14.3.1 压裂实时监控技术研究	334
14.3.2 微地震监测压裂裂缝技术	343
14.3.3 电法监测压裂裂缝技术	345
14.3.4 多种监测方法的综合应用	345
14.4 研究成果	349
14.4.1 压裂增产效果评价	349
14.4.2 研究成果	349
主要参考文献	350

准噶尔盆地吉木萨尔凹陷 页岩油概述

第 1 章

本章主要从准噶尔盆地吉木萨尔凹陷构造演化、目的层芦苇沟组展布及分布特点,阐述其区域地质条件。从地质岩性、储层沉积、宏微观特征,烃源岩特征等方面概述芦苇沟组页岩油地质特征。高度概括芦苇沟组页岩油“甜点”认识的形成、“甜点”优选、关键井确定、钻井提速和体积压裂等勘探实践过程。

1.1 区域地质条件

1.1.1 构造演化

吉木萨尔凹陷为准噶尔盆地东部隆起的二级构造带,位于东部隆起的西南部,面积约1300km²(图 1.1)。

吉木萨尔凹陷是在中石炭统褶皱基底上发育的一个西断东超的箕状凹陷,其周边边界明显,西面以西地断裂等与北三台凸起相接,北面以吉木萨尔断裂与沙奇凸起毗邻(图 1.2),西面则以三台断裂和后堡子断裂与阜康断裂带相接,向东为一个逐渐抬升的斜坡,逐渐过渡到古西凸起上。该区经历了海西、印支、燕山、喜马拉雅等多期构造运动。现今构造在平面上相对简单,为半环带状单斜(图 1.3)。

海西运动是准噶尔盆地的成盆运动,早二叠世晚期,盆地南缘残存的博格达海槽开始闭合造山,形成了博格达山前中二叠世早期的前陆型箕状拗陷,吉木萨尔凹陷与博格达山前凹陷、西部阜康凹陷水体相连,沉积了中二叠统井井子沟组南厚北薄的火山—磨拉石建造。中二叠世晚期,吉木萨尔凹陷封闭,并作为一个相对独立的沉积单元接受了芦苇沟组的深湖—半深湖相沉积,成为该区的主力烃源岩。

三叠纪末期的印支构造运动使凹陷东部古西凸起强烈上升,使凹陷东斜坡三叠系、二叠系遭受不同程度的剥蚀,侏罗系与下伏地层不整合接触。

燕山期准噶尔盆地构造活动频繁,具有强烈的振荡性,燕山运动在该区有三幕,且三幕运动都很强烈,是吉木萨尔凹陷及周边构造单元的主要改造期。侏罗纪末期的燕山运动Ⅱ幕使沙奇凸起快速强烈隆升,使侏罗系遭受严重剥蚀。白垩纪时独立的凹陷格局消失,受燕山Ⅲ幕构造运动的影响,吉木萨尔凹陷东南部逐渐抬升。

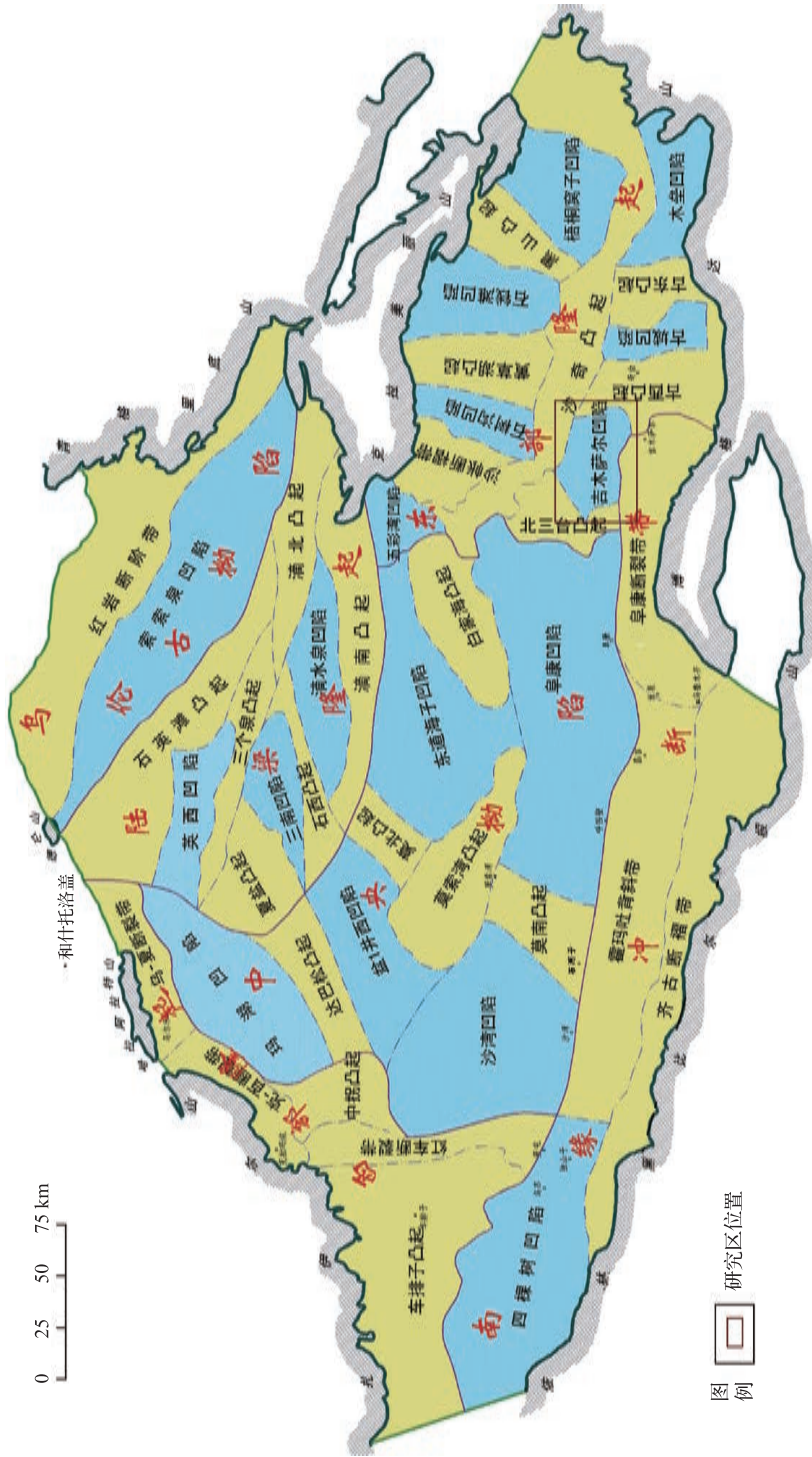


图 1.1 准噶尔盆地构造单元分区图

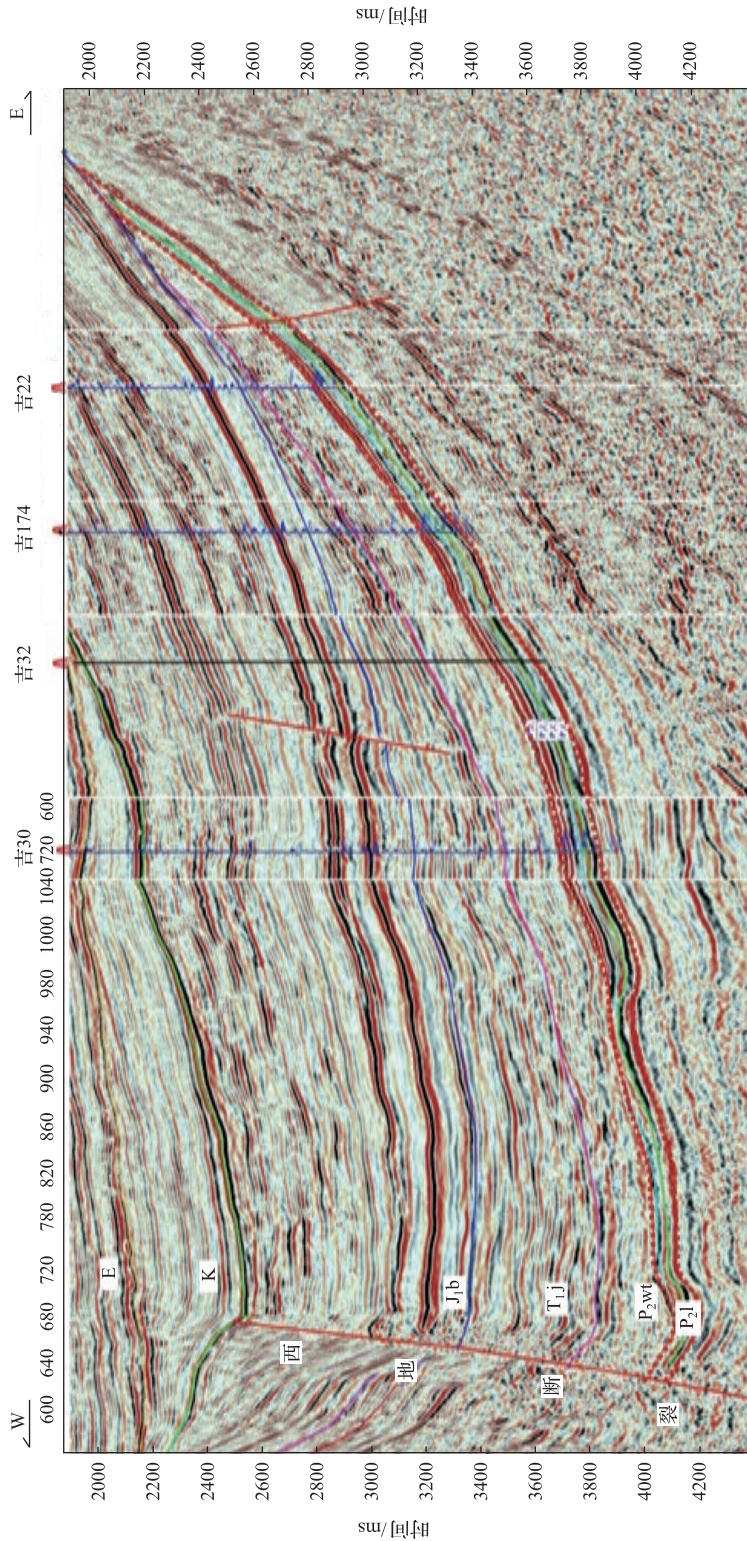


图 1.2 吉木萨尔凹陷东西向地震地质解释剖面