

山地高陡复杂构造

地震信息精细解释技术

Seismic Data Fine Interpretation Techniques and Practices
in Tall and Steep Structure
of Complex Mountain Areas

罗仁泽 / 著



科学出版社

山地高陡复杂构造地震信息 精细解释技术

罗仁泽 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书内容包括：针对主要目的层进行（国家标准、行业标准、企业标准）剖面地质评价；精确标定地震反射地质界面：主要反射层波形特征描述；通过对区域构造应力场分析，确定研究区的构造样式；通过地震反射剖面结合研究区的构造发展史及构造运动期次，编制构造演化剖面；根据地震反射剖面上同相轴的振幅、频率、相位、波形、时变规律等特征，进行地质层位的精细追踪对比；依据地震反射剖面上的断面波、同相轴分叉合并、相邻、相交剖面的构造部位，结合相干数据体、属性分析及沿层相干切片分析断裂的展布特征，进行断层面的空间闭合；参考切片指导断层空间闭合和断层平面组合。利用钻井和测井资料，结合地质露头、区域厚度和速度资料及地震反射剖面结构，建立适合研究区特点的时深转换速度场，编制地震反射构造图及埋深图，并对成果图件的可靠性进行评价。

本书适用于地震勘探的本科高年级学生、地球物理勘探硕士及博士研究生，尤其对从事地震资料解释工程实践和技术研究人员具有指导作用。

图书在版编目(CIP)数据

山地高陡复杂构造地震信息精细解释技术/罗仁泽著. —北京：科学出版社，2018.01

ISBN 978-7-03-055217-4

I. ①山… II. ①罗… III. ①山地—地震反射波法 IV. ①P631.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2017）第 273905 号

责任编辑：罗 莉 / 责任校对：王 翔
责任印制：罗 科 / 封面设计：墨创文化

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>

四川煤田地质制图印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 1 月第 一 版 开本：787×1092 1/16

2018 年 1 月第一次印刷 印张：17

字数：406 068

定价：248.00 元

（如有印装质量问题，我社负责调换）

前 言

油气勘探是一项高风险的生产活动,为了最大限度地降低勘探风险,山地高陡复杂构造精细解释技术面临巨大的挑战,即如何真实地反映地腹构造形态,查明断裂的空间展布规律,精细描述储层的厚度分布情况,提供钻探井位,为勘探开发提供可靠的基础资料,提高钻探成功率,获得良好的经济效益。

要进行山地高陡复杂构造精细解释就必须充分理解地质任务及要求,全面收集基础资料:了解研究区的行政区划、地理位置、地形地貌、交通、水系、厂矿分布、主要农作物、主要经济作物、温差、降水量等情况;区域构造位置、地层发育特征,不整合面的类型及分布,各地层单元的厚度特征、岩性特征、构造特征、沉积相特征;研究区勘探历程、地震勘探程度、钻探程度、油气藏分布及三级储量情况、油气井点分布、圈闭分布情况等;项目研究需要使用的各种基础资料的收集、分析、整理情况,包括测井曲线的校正、钻井分层的调整、地震资料的叠后处理等。

山地高陡复杂构造精细解释必须严格对所获得的地震反射剖面,按照国家标准、行业标准、企业标准进行剖面地质评价;确定区内构造样式类型及地震反射标准层;采用多种手段精细标定地质界面,包括 VSP 走廊叠加、合成地震记录、“穿鞋戴帽系领带”、邻区剖面引入、钻厚资料、区域地层厚度资料、格架剖面等引入地质层位;利用地震波的动力学原理及运动学特点采用强相位、波组关系、相邻剖面对比、跳线对比等方法,确保解释方案的合理性,同时考虑相邻剖面的构造形态及断层的展布规律等作出合理的地质解释。纵观全区剖面对比中各主要反射层波形特征及波组关系,在测线边缘部位和构造复杂带对比相对较困难时,通过借助上、下波组关系及地层厚度进行对比追踪。

根据地震反射同相轴错动、扰动、能量变化等特征,结合相干、曲率等属性变化特征与地质戴帽相结合,利用断层两侧反射波不连续,正确识别地震反射剖面上的较大的断层,精细解释断层的断点位置、产状、断距。通过相邻测线剖面特征对比,综合分析区内断层性质,进行断层组合,描述区内断层的展布规律。相邻测线相同构造部位、向上断开层位向下消失的地层基本相似;按照构造运动期次及研究区内的滑脱层对断层进行分级,利用相干体数据及沿层相干切片分析断层延伸情况,进行断层的平面组合及空间闭合。

利用典型剖面结合研究区在地史发展中所经历的构造运动期次,制作构造演化剖面。在进行时-深转换速度模型的制作前,首先对研究区内及邻区钻井的速度进行分析,了解各控制层的速度在平面上的分布规律;然后,根据钻井数据和井旁地震道反射时间反算出基准面至第一层地质界面、第一层至第二层、第二层至第三层……至最深层及最深层以下的层速度;对计算机绘制的速度平面分布图不合理的地方进行人工编辑修改,使速度的变化趋势更加符合地质规律,并与实钻井资料进行对比,检查采用速度的合理性。

山地高陡复杂构造精细解释成果的可靠性与野外采集的地震资料品质密切相关。经过精细处理获得的叠前时间偏移剖面应当波形活跃、特征明显、波组关系清楚，回转波、绕射波归位合理、断点清晰可靠。纵向上主要目的层反射层次分明、同相轴光滑连续易于追踪对比解释；没有钻井控制的地质界面，其速度采用区域速度结构及邻区建立的速度场，其准确性有待落实，因此其埋藏深度的可靠性有待于后期钻井资料进一步验证。

本书得到西南石油大学地球科学与技术学院、国家重点研发计划《超深层重磁地震勘探技术研究》项目（子课题编号：2016YFC060110603）以及天然气地质四川省重点实验室开放课题基金（项目编号为 2015trqdz06）资助，在此表示感谢。

在本书的撰写、出版过程中，得到了川庆钻探工程有限公司地球物理勘探公司地震资料解释老专家、在地震资料解释第一线辛勤工作近五十年的周茂林高级工程师的鼎力相助，他在本书的整体构思、书稿编辑及修改方面协助作者做了大量工作，在此向周茂林老师表示深深的谢意和敬意。另外，也感谢川庆钻探工程有限公司地球物理勘探公司的鼎力相助以及西南石油大学给予的众多关心和支持。在本书编辑过程中，解读和参考了大量相关文献，引用了其中部分代表性文献，感谢这些同行的艰辛付出以及为地球物理技术发展所做出的贡献。

目 录

1	山地高陡复杂构造概述	1
1.1	山地高陡复杂构造地貌特征	1
1.1.1	简单低缓构造	2
1.1.2	中等复杂构造	2
1.1.3	高陡复杂构造	2
1.1.4	山地高陡复杂构造	4
1.1.5	山地逆掩推覆构造特征	5
1.2	山地高陡复杂构造分类	6
1.2.1	根据构造运动期次分类	6
1.2.2	根据地震反射特征分类	11
1.2.3	根据受力方式、方向和组系分类	13
2	山地高陡复杂构造剖面地质评价	17
2.1	地震反射剖面品质分析	17
2.2	地震反射剖面地质评价	18
2.2.1	地震反射剖面地质评价标准	18
2.2.2	地震反射剖面品质评价方式	18
2.2.3	碳酸盐岩出露区资料评价	21
2.2.4	火山岩出露区资料评价	21
2.3	山地复杂构造剖面品质分析	23
2.3.1	客观地评价山地高陡复杂构造剖面品质	23
2.3.2	影响地震反射品质因素	23
2.3.3	反射特征与相变的关系	23
2.3.4	特殊岩性反射特征	24
2.4	地腹构造形态与剖面品质的关系	25
2.4.1	山地陡倾界面的反射特征	25
2.4.2	构造的纵向变异	25
2.4.3	近地表结构对资料品质的影响	28
3	山地高陡复杂构造剖面分辨率讨论	31
3.1	地震反射剖面分辨率	31
3.1.1	地震分辨率的基本概念	31
3.1.2	地震横向分辨率(空间分辨率)	37
3.1.3	通过提高分辨率来解决地质问题	38

3.1.4	剖面提高分辨率处理的目的	38
3.2	高分辨处理资料的应用	39
3.2.1	振幅属性预测储层	40
3.2.2	改变剖面显示方式突出储层	40
3.2.3	精细解释高分辨剖面	42
3.3	山地高陡复杂构造分辨率讨论	43
4	剖面极性鉴别及处理质量监控	44
4.1	极性确定的重要性	44
4.2	地震反射剖面必须极性统一	44
4.3	地震反射剖面极性的确定	44
4.3.1	国际标准 (SEG) 极性	44
4.3.2	国际标准极性与合成地震记录极性的关系	45
4.3.3	地震反射剖面极性鉴别的方法	45
4.4	地震反射剖面极性判别的认识	45
4.5	地震资料处理质控体系的建立	46
4.5.1	质控技术思路	46
4.5.2	保真、保幅监控	52
4.5.3	剖面分辨率监控	54
4.5.4	剖面成像精度监控	56
4.5.5	资料处理效果分析评价	58
4.5.6	资料处理质控流程	61
5	山地高陡复杂构造精细解释技术	62
5.1	山地高陡复杂构造精细解释流程	62
5.1.1	资料收集	62
5.1.2	完成地质任务条件分析	62
5.1.3	研究区概况	62
5.2	确定主要反射层和标准层	63
5.2.1	地震反射标准层代表性较强	63
5.2.2	具有明显的地震反射特征	64
5.2.3	反映地层厚度变化规律	65
5.2.4	地震反射标准层对应明显的岩性界面	65
5.3	地质界面的综合标定技术	66
5.3.1	地震反射层位地质界面的标定过程	67
5.3.2	地震合成记录的制作方法	68
5.3.3	地震反射层的地质层位标定方法	70
5.3.4	地震测井资料标定地质层位	70
5.3.5	从相邻研究区引入地质层位	72
5.3.6	根据区域地质资料确定地质层位	73

5.3.7 薄互层地质界面标定技术·····	73
5.3.8 深度域地质界面标定技术·····	74
5.3.9 地质层位标定精度分析·····	74
5.3.10 主要地震反射层波形特征描述·····	75
5.4 确定研究区的构造样式·····	76
5.4.1 构造样式的定义·····	76
5.4.2 构造样式的简单分类·····	76
5.4.3 构造样式确定的意义·····	78
5.5 走滑构造的特征·····	79
5.5.1 走滑构造分类·····	79
5.5.2 如何识别走滑构造·····	80
5.5.3 反转构造·····	82
5.5.4 叠瓦状构造组合·····	83
5.6 盐上、盐下构造特征分析·····	83
5.6.1 盐上及盐下构造·····	84
5.6.2 底辟构造·····	86
5.6.3 底辟构造分类·····	86
5.6.4 盐上地层的变形特征·····	87
5.6.5 盐下的构造形态特征·····	88
5.7 山地高陡复杂构造·····	88
5.7.1 高陡复杂构造的地质特点·····	89
5.7.2 构造主体推覆倒转·····	89
5.7.3 正扫帚状构造样式·····	90
5.7.4 倒扫帚状构造样式·····	90
5.7.5 断鼻构造特征·····	90
5.8 地震反射同相轴的对比追踪·····	92
5.8.1 水平剖面与偏移剖面对应关系·····	92
5.8.2 山地高陡复杂构造地震反射波的识别·····	94
5.8.3 山地复杂构造时间剖面闭合·····	98
5.8.4 山地复杂构造平面与空间解释·····	99
5.8.5 山地复杂构造综合地质解释·····	100
5.9 山地复杂构造剖面平衡技术·····	100
5.9.1 山地复杂构造平衡剖面制作·····	100
5.9.2 山地复杂构造模型正演技术·····	101
5.9.3 山地复杂构造模型正演技术思路·····	103
5.9.4 地腹地质体波场响应特征·····	104
5.9.5 山地高陡复杂构造 AVO 正演分析·····	104

6 山地高陡复杂构造建模	106
6.1 时-深转换速度场的构建	106
6.2 山地地震勘探技术攻关	106
6.3 山地复杂构造断层解释	108
6.3.1 山地复杂构造精细解释流程	111
6.3.2 构造层的划分及主要反射层波组特征	111
6.3.3 山地复杂构造的形成机制	112
6.3.4 山地高陡复杂构造解释的陷阱	116
6.3.5 山地高陡复杂构造圈闭识别	119
6.4 山地复杂构造断层分类	121
6.4.1 断层简单分类	121
6.4.2 沉积盖层断层和基底断层	123
6.4.3 断裂对构造的控制作用	123
6.4.4 断裂的形态及组合特征	124
6.4.5 断层控制褶皱	132
6.4.6 褶皱伴生断层	133
6.4.7 正断层模式	134
6.4.8 山地高陡复杂构造断层解释	138
6.5 成果平面图的绘制	139
6.5.1 山地复杂构造时深转换	140
6.5.2 山地复杂构造成果平面图精度分析	141
6.5.3 古构造图的绘制	143
6.5.4 地质成果的质量保证	143
6.6 地质研究报告编写	144
6.6.1 总结报告编写的规范要求	144
6.6.2 山地复杂地质成果汇报多媒体制作技巧	144
6.6.3 山地地震勘探成果归档	145
7 山地复杂构造地震属性分析技术	146
7.1 地震属性分析的理论基础	146
7.1.1 地震属性代表的地质意义	146
7.1.2 地震属性分类及应用	146
7.2 如何提取地震属性	147
7.2.1 沿层属性提取技术	147
7.2.2 体属性提取技术	147
7.2.3 地震属性表征的储层响应特征	149
7.2.4 利用地震属性反映储层特征的方法	149
8 储层综合预测技术	151
8.1 储层预测技术的发展历程	151

8.2 储层综合预测技术思路及方法	151
8.2.1 储层基本地质特征分析	152
8.2.2 储层的测井响应特征	155
8.2.3 储层的地震响应特征特点	156
8.2.4 储层井震模式建立	156
8.2.5 嘉陵江组储层地震反演	159
8.2.6 储层有利区划分	163
8.2.7 储层预测可靠性评价	164
9 山地复杂构造裂缝预测	165
9.1 裂缝成因	165
9.1.1 构造作用产生的裂缝	165
9.1.2 非构造因素产生的裂缝	165
9.2 裂缝的特征	166
9.3 裂缝的测井响应特征分析	167
9.4 山地叠后裂缝检测	170
9.4.1 山地叠后裂缝检测方法原理	170
9.4.2 山地叠后裂缝检测试验效果分析	170
9.4.3 裂缝预测平面分布特征	172
9.5 山地叠前裂缝检测	173
9.5.1 山地叠前裂缝检测方法原理	173
9.5.2 山地裂缝发育带预测的 AVA 技术	173
9.5.3 山地裂缝发育带预测的 FVA 技术	174
9.5.4 方位角数据的处理	175
9.6 裂缝方位体地质解释	176
9.6.1 裂缝方位体切片解释	176
9.6.2 裂缝密度体切片解释	177
9.6.3 叠前裂缝预测应用效果	177
9.6.4 方位地震属性的提取	179
9.7 叠前裂缝检测应用效果分析	179
9.7.1 “茅口组”裂缝分布特征	179
9.7.2 “栖霞组”裂缝分布特征	179
9.7.3 “长兴组”裂缝分布特征	181
9.7.4 “飞仙关组”裂缝分布特征	181
10 油气盆地评价技术	185
10.1 区带优选评价	185
10.2 山地构造圈闭评价规范	185
10.3 地震构造圈闭综合评价	185
10.3.1 山地圈闭分类	185

10.3.2	山地构造圈闭含油气性评价·····	186
10.3.3	山地构造圈闭含油气性评价参数·····	186
10.4	成果评价及井位建议·····	186
10.4.1	野外采集及资料品质评价·····	187
10.4.2	资料处理流程及处理效果评价·····	187
10.4.3	地震资料解释成果评价·····	187
10.5	建议钻探井位目标·····	188
10.5.1	构造成果·····	188
10.5.2	储层预测成果·····	188
10.5.3	裂缝预测成果·····	188
10.5.4	综合油气评价成果·····	189
11	山地地震解释新技术·····	192
11.1	三维相干解释技术·····	192
11.1.1	三维相干技术基本原理·····	192
11.1.2	相干体参数选取·····	192
11.2	山地宽方位三维精细解释技术·····	194
11.2.1	面切片解释技术·····	194
11.2.2	体切片解释技术·····	194
11.2.3	水平切片解释技术·····	195
11.2.4	沿层切片解释技术·····	195
11.2.5	立体可视化技术·····	195
11.3	山地三维可视化技术·····	195
12	多分量地震资料精细处理解释技术·····	198
12.1	多波多分量勘探历程·····	198
12.2	多波地震精细处理技术·····	199
12.2.1	多波资料处理的重难点及对策·····	199
12.2.2	多波资料精细处理技术措施·····	199
12.3	多波资料精细解释·····	200
12.3.1	多波地质层位标定技术·····	203
12.3.2	多波地震层位解释技术·····	210
12.3.3	多波断层解释技术·····	215
12.3.4	多波地震资料匹配技术·····	220
12.4	多波沉积相分析技术·····	225
12.4.1	多波沉积相解释技术·····	225
12.4.2	多波层序地层分析·····	226
12.4.3	多波层序划分·····	226
12.5	多分量地震反演·····	243
12.5.1	多分量地震反演概述·····	243

12.5.2	岩石物理参数分析及参数优选	243
12.5.3	山地多波数据联合反演技术	246
12.5.4	多波联合反演流程参数	246
13	时频分析技术概述	253
13.1	时频分析基础	253
13.2	时频分布的特性	253
13.3	时频分析技术应用	253
13.3.1	时频分析的优势和缺陷	253
13.3.2	时频分析在地震勘探中的应用	254
14	突变论解释技术	256
14.1	突变论在山地资料解释中的应用	256
14.2	突变论预测储层的含油气性	256
14.3	突变论预测裂缝性储层	257
14.4	利用突变论识别地质体异常边界	257
14.5	结论及认识	259
	参考文献	260

1 山地高陡复杂构造概述

1.1 山地高陡复杂构造地貌特征

纵观四川盆地的地貌特征，川东高陡复杂构造区的地貌表现为起伏剧烈，沟壑纵横、切割厉害、相对高差达 1500m 以上。山地的特点是包含了众多的山脉或高山的区域，如四川盆地华蓥山以东的地区是由多条近北东向平行相间的山脉和洼地组成山地高陡复杂构造带，其山脉高陡、险峻，海拔为 1500~3000m；洼地较为开阔，海拔在 200~800m。

从地震勘探的角度来说，山地的地理条件比较恶劣，野外施工组织的难度较大。更重要的是，山地的构成往往为地层强烈褶皱再经风化剥蚀的产物，地表岩层坚硬、破碎，甚至倒转，地腹断裂发育，特别是山地高陡复杂构造顶部的灰岩出露区地震资料品质相对较差。

根据海拔将山地划分为高山、中山及低山。海拔 3500m 以上为高山，海拔 1500~3500m 为中山，海拔 800~1500m 为低山，见图 1-1。

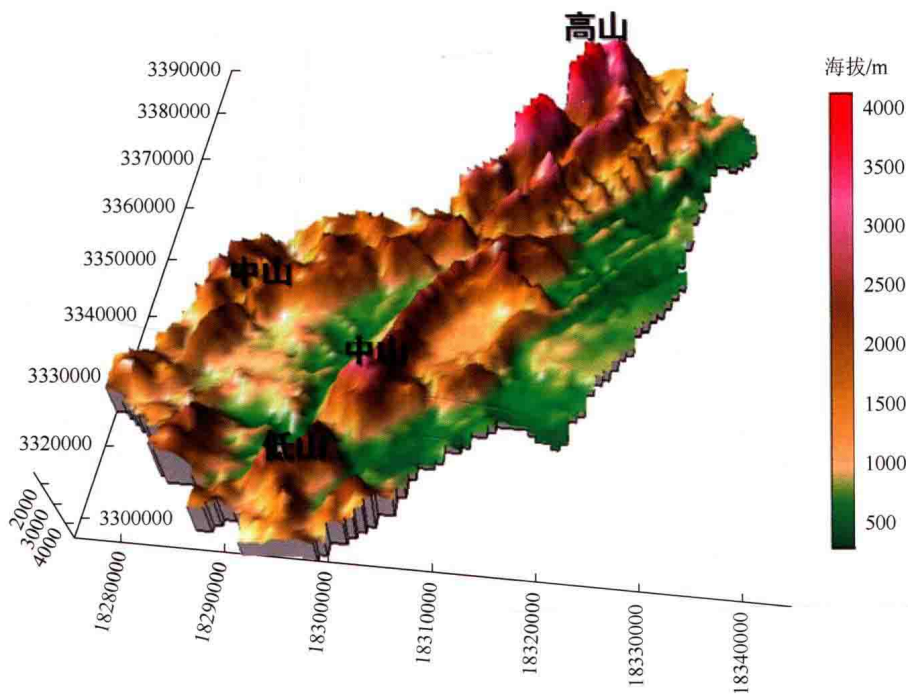


图 1-1 山地地貌示意图

四川盆地四面环山的菱形盆地，盆地周边山脉多为海拔 1500~3500m 的沿北东向和近北西向展布的高山，山势雄伟，峰陡谷深。盆地西部分布有邛崃山、二郎山、峨眉山、

大凉山；东部分别为巫山、金佛山；北部分布有大巴山、米仓山、龙门山、茶坪山，南部分布有大娄山、五莲峰；总体地貌趋势为西高东低的特征，见图 1-2。

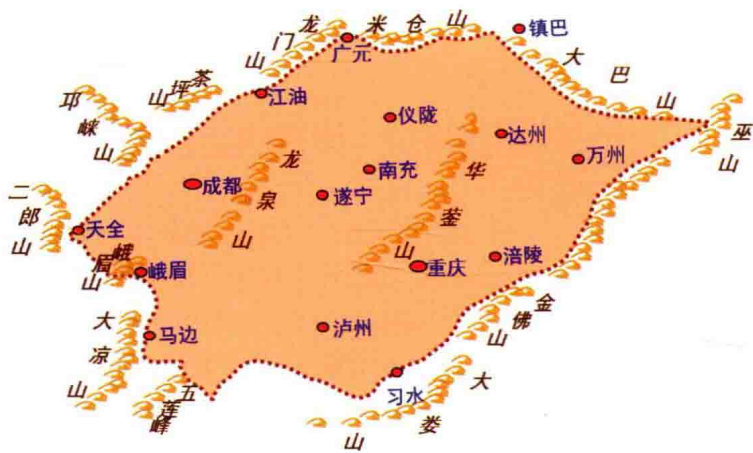


图 1-2 四川盆地周边山脉分布图

1.1.1 简单低缓构造

低缓构造为地层受力微弱、形态简单，构造两翼产状倾角较小、构造幅度相对平缓，断层发育较少，几乎没有岩浆喷发或侵入的地质构造。因地层层序简单、断层少且落差较小，地质特征明显；地震反射资料信噪比较高，剖面上同相轴波形特征明显、波组关系清楚，易于追踪对比来自地腹同一地质界面的反射同相轴，构造解释方案确定性较强。例如，四川盆地川中地区的低缓构造（图 1-3）、四川盆地蜀南地区的丘状构造、四川盆地北部的单斜小型逆冲构造等。

1.1.2 中等复杂构造

介于低缓构造与高陡复杂构造之间的构造，简称为“中等复杂构造”，其地层结构相对简单，构造应力适中，受力方向较为单一，即使受两组构造应力复合作用，但未带有旋转性质，断层相对发育，断层落差较小，地震资料信噪比较高，解释方案较为简单，如四川盆地蜀南地区的中等复杂构造，见图 1-4。

1.1.3 高陡复杂构造

受多期构造运动的复合作用，在多组系地质应力的作用下，可形成挤压型、直扭型和旋扭型三类构造形态，表现出极其复杂的构造形态。从构造地质研究的角度来看，可以通过地震勘探方法来恢复地腹地质构造的形态及圈闭规模、断层展布情况。山地高陡复杂构造精细解释的目的在于通过地震反射剖面研究山地高陡复杂构造的形成机制及其演化过程，见图 1-5。

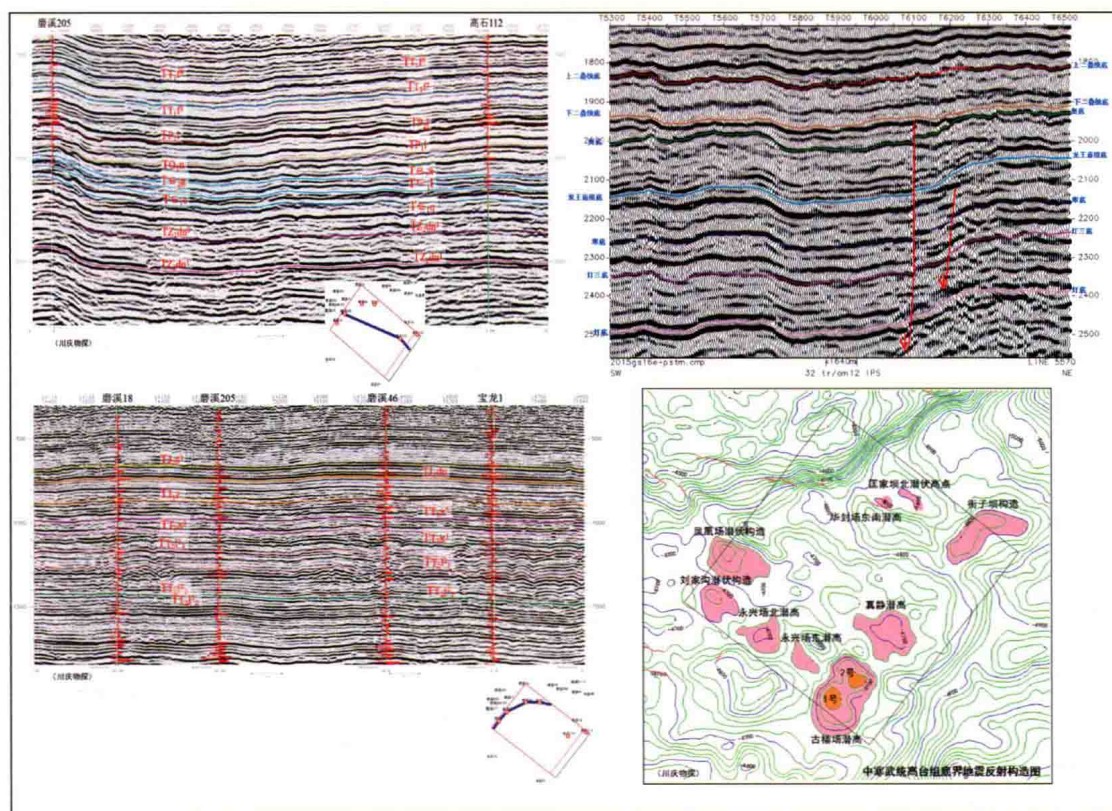


图 1-3 四川盆地川中地区低缓构造特征

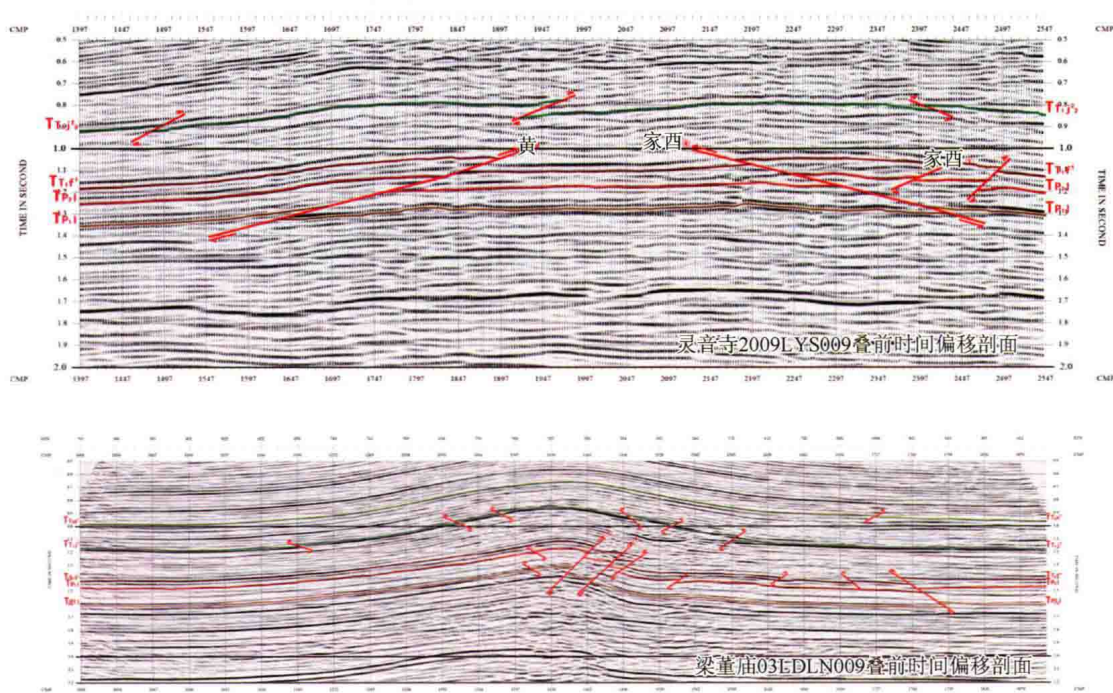


图 1-4 四川盆地蜀南地区中等复杂构造特征

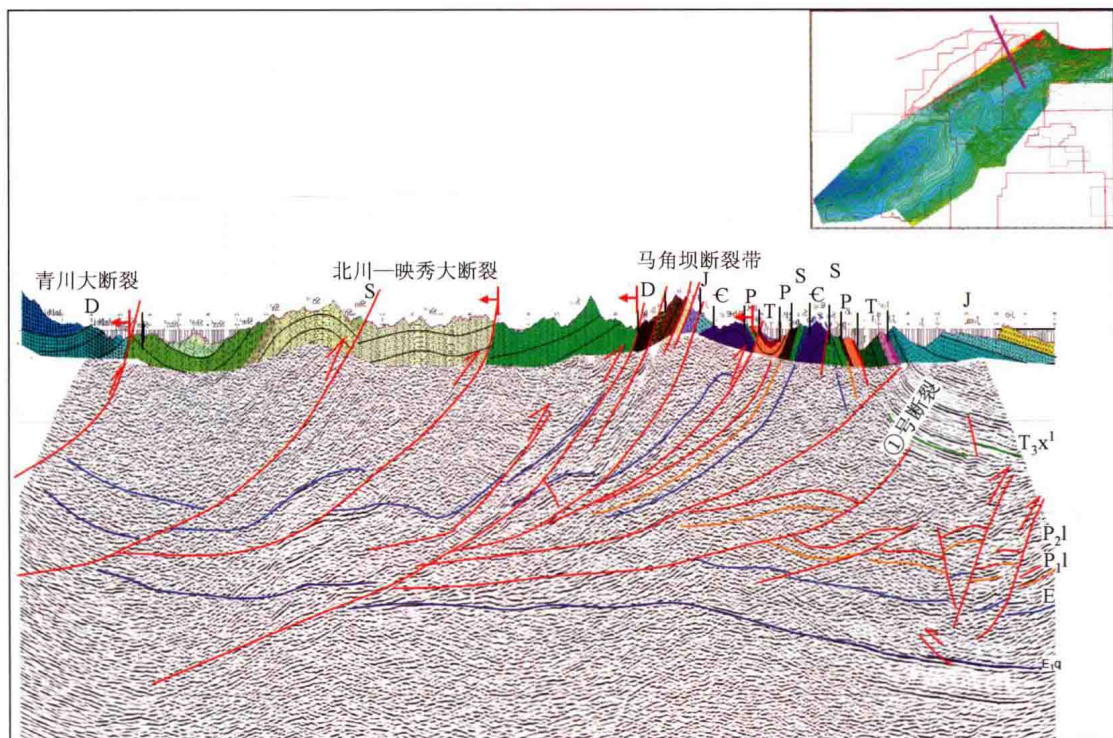


图 1-5 四川盆地川西北地区地震反射剖面特征 (2014FSC001 测线)

1.1.4 山地高陡复杂构造

山地高陡复杂构造一般指地貌为山地、地形起伏剧烈、相对高差 1500m 以上、地腹构造十分复杂的褶皱及断层组合。山地高陡复杂构造地震地质条件相对较差，地震资料采集、处理及解释难度非常大。特别是前陆盆地的地层层序复杂，反射界面特征不清楚，对于不易识别、追踪、对比地腹同一地质界面的地震反射同相轴较为困难，必须结合各种地质资料通过模型正演分析，分解各种波场，反复修改地质模型，才能更加逼近地腹地质构造形态、断裂的发育程度及地层的厚度变化情况。四川盆地典型的山地高陡复杂构造主要分布在盆地东部和东北部、龙门山逆冲断褶皱带，峨眉山—瓦山断褶皱带。

高陡复杂的含义为构造圈闭隆起幅度高，构造两翼地层倾角大于 45° 以上、地层直立甚至倒转，受力方式以多组挤压为主，伴随断裂、推覆，地腹构造十分复杂的褶皱及断层组合。如四川东部的华蓥山构造带为典型的山地高陡复杂构造，其两翼极不对称，见图 1-6 (a)。构造的纵向变异较大，中三叠统侵蚀面（须家河组底界）以上地层构造保存相对完整，隆起幅度较高，与地表构造形态大致相似；下三叠统嘉陵江组—石炭系构造层，受多组地质应力的复合作用，断裂十分发育，断裂复杂带普遍存在地层倒转的现象；奥陶系—震旦系构造，经志留系泥页岩滑脱后，构造变缓，隆起幅度降低，断层减少，控制构造的主控断层消失于寒武系高台组的膏盐层之中，见图 1-6 (b)。

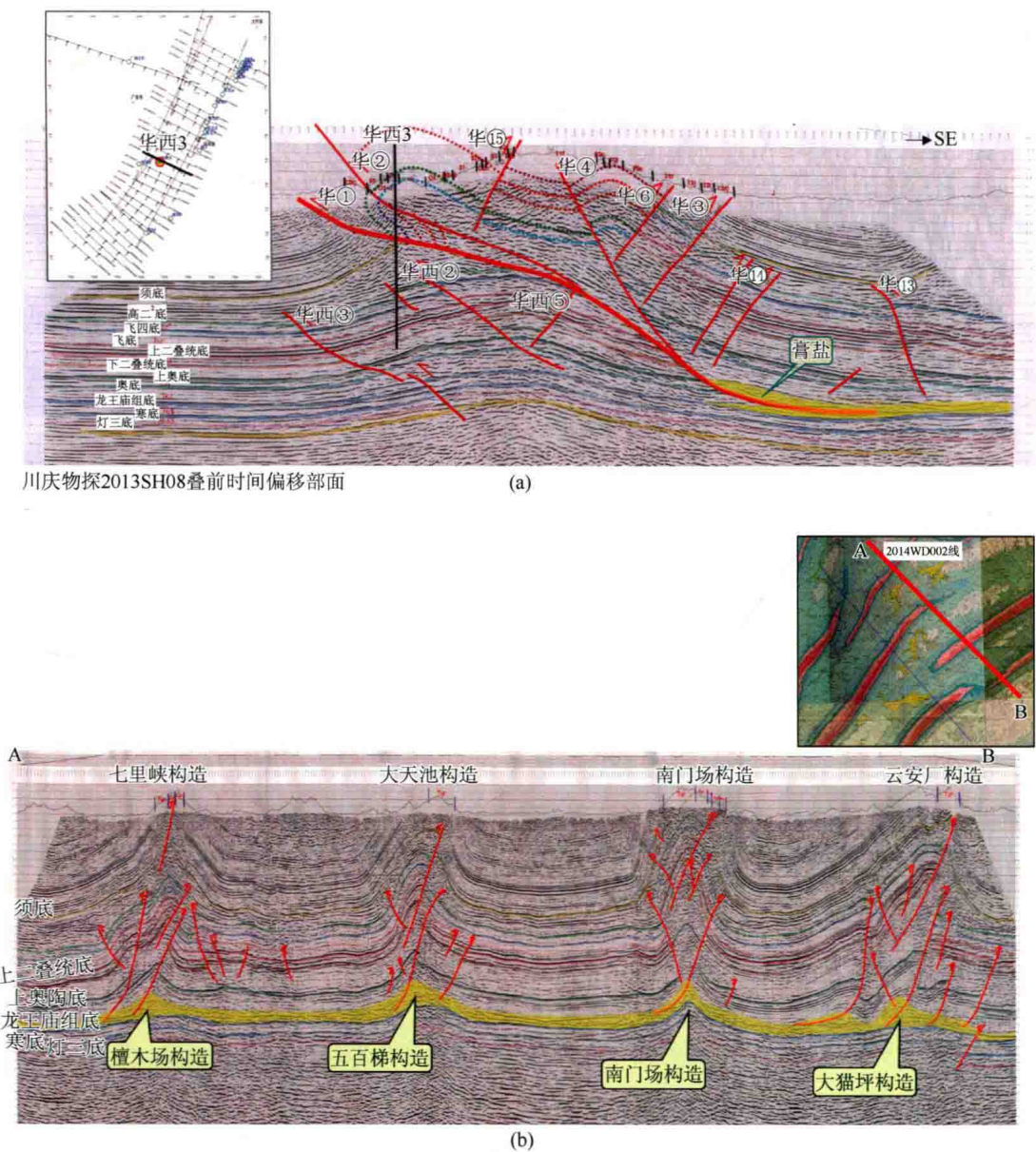


图 1-6 川东山地高陡复杂构造特征

1.1.5 山地逆掩推覆构造特征

如图 1-7 所示。受平落①、三合①、高④号主控断层（大型逆掩推覆断层）的制约，构造形态以逆掩冲断块和断片为主，在不同的滑脱层内部滑脱。不同的构造层其构造变形强度及期次均有所差异，不同构造变形层的构造平面图差异较大，构造形态、高点位置等存在不同程度的偏移。