

页岩储层地震尺度断裂系统分析 及其石油地质意义

——以四川盆地长宁地区宁201井区为例

石学文¹, 佟彦明², 刘文平¹, 赵春段², 刘佳¹, 方健³

¹ 中国石油西南油气田公司页岩气研究院;

² 斯伦贝谢中国公司; ³ 四川长宁天然气开发有限责任公司

摘要 以四川盆地长宁地区宁201井区页岩储层为例,借助三维地震体和其蚂蚁追踪体地震属性开展了构造精细解释,应用有限元层拉平、正交分解主成分分析、自动断层片提取和古应力场反演等技术,并结合已有区域构造地质认识和单井裂缝信息,对地震尺度断裂系统进行了分期与配套,不仅重新厘定了区域构造演化序列,而且实现了区域构造和油藏级别不同尺度裂缝系统之间的有机匹配。分析结果表明:①影响目的层地震尺度断裂系统发育的主要构造活动发生于燕山期—喜马拉雅期,主要包括燕山晚期构造幕的近S—N向挤压作用、喜马拉雅早期构造幕的NNE—SSW向挤压作用以及喜马拉雅中期构造幕的NNW—SEE向挤压作用;②燕山晚期构造幕主要形成近EW向长轴背斜和向斜、近EW向逆冲断层和断层相关裂缝,以及多个方向的褶皱相关裂缝;③喜马拉雅早期构造幕主要形成了成因上相关联的共轭断裂系统,包括走滑断层和剪切裂缝(NNW向和NE向2组)以及横向扩张裂缝;④喜马拉雅中期构造幕主要形成NNE—NE向逆冲断裂和伴生褶皱,以及横向扩张裂缝。研究成果对于页岩气勘探开发区离散型裂缝建模、钻井工程预警,以及完井、开发方案优化等都有着非常重要的石油地质意义。

关键词 页岩气; 天然裂缝; 断裂系统; 构造演化; 龙马溪组; 长宁地区; 四川盆地

中图分类号: TE121.2 **文献标识码**: A

0 前言

广义的岩石裂缝是指将岩体分割成2个或2个以上部分的力学破裂面或不连续面,其尺度范围相当宽泛,可从数百公里的板块边界到不足1毫米的晶内微裂隙^[1]。油藏级别的裂缝与勘探开发生产密切相关,可将其进一步分为大尺度裂缝、中尺度裂缝及小尺度裂缝^[2]。大尺度裂缝是指基于原始叠加偏移地震数据体就可以进行人工解释的断裂,中尺度裂缝是指利用常规地震数据体解释难以识别的、需利用地震相干体或蚂蚁追踪体等边界强化探测技术来识别和预测的断裂,而小尺度裂缝是指地震边界强化探测技术也不能识别,只能依靠岩心、成像测井和常规测井等资料才能识别的裂缝。由于前两者可为三

维地震资料所探测,所以可统称为地震尺度裂缝(或断裂、断层)。

目前针对大、中尺度裂缝的地震预测技术方法主要有2大类,即叠前预测和叠后预测^[3-5]。前者一般利用快、慢横波的差异或纵波的方位各向异性来预测裂缝的方位、发育程度甚至有效性,该方法要求有昂贵的三维地震采集和处理技术相配套,例如多波多分量地震采集与处理、高密度宽方位地震采集与处理等,因此,总体上叠前预测技术的应用并不十分广泛。后者主要利用叠后三维地震属性对裂缝进行识别和预测,其中很多振幅类、频率类和相位类的属性已被广泛应用,而较为精细的裂缝地震属性分析则主要是围绕地震反射波形的突变(不连续性)来开展,例如相干分析和蚂蚁追踪等边界强化探测技术。

收稿日期: 2018-05-03; 改回日期: 2019-01-16; 网络出版日期: 2019-10-28

本文受国家科技重大专项“长宁—威远页岩气开发示范工程——页岩气地质评价及开发优化技术研究与应用”(编号: 2016ZX05062-002)、四川省科技计划项目“四川盆地地下古生界页岩气资源潜力评价及选区”(编号: 2015SZ001)、中国石油重大现场试验项目“西南油气田页岩气钻采工程技术现场试验”(编号: 2014F-4701-01)联合资助

第一作者: 石学文, 硕士, 主要从事页岩气勘探部署与地质评价等研究工作。通信地址: 610051 四川省成都市成华区建设北路一段83号; E-mail: shixuewen@petrochina.com.cn

通信作者: 佟彦明, 博士, 高级地质师, 长期从事油田咨询研究项目综合地质分析工作。通信地址: 100015 北京市朝阳区酒仙桥路14号兆维华灯大厦斯伦贝谢公司; E-mail: ytong2@slb.com

由于叠后预测的数据基础可以是常规的三维地震体,因此,叠后预测技术因应用较为方便而成为目前较为流行的裂缝地震预测方法。

国内外越来越多的页岩气勘探开发实践表明,对页岩储层中的天然裂缝系统特征进行分析和描述,不仅可以为页岩气勘探区优选提供参考依据,而且还能为钻井部署优化、压裂改造优化、单井产能准确预测等方面提供重要认识基础,进而直接影响到开发井网和方案的有效部署^[6-12]。因而对于具体的页岩气勘探开发区,及早查明页岩储层地震尺度的断裂系统特征,对后续的勘探开发实践有着重要的指导意义。

四川盆地长宁地区上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组海相页岩层系发育多期次、多尺度、多类型和多方向的天然裂缝系统。前人对整个四川盆地或川南地区的区域构造^[13-15],以及长宁地区的小尺度裂缝有较多的描述^[12,16],但缺乏对具体页岩气勘探开发区地震尺度断裂系统的深入分析,因此,并未将区域构造和油藏级别不同尺度的裂缝系统从内在成因上进行统一认识和分析,这在一定程度上影响了前人的分析结论在工程和生产实际中的应用和指导价值。

本文以长宁地区宁201井区为例,首先基于原始叠加偏移三维地震体以及蚂蚁追踪体地震属性,开展了精细的地震构造解释工作;继而进一步应用有限元层拉平、正交分解主成分分析、自动断层片提取、古应力场反演等技术,并紧密结合已有

区域的构造地质认识和单井小尺度裂缝信息,对目的层地震尺度断裂系统进行了精细解释、识别、分期与配套,不仅重新厘定了区域构造演化序列,而且实现了区域构造和油藏级别不同尺度裂缝系统之间的有机匹配,这使得分析结论更为可靠;最后详细阐明了其实际应用价值。该成果对页岩气藏的有效勘探开发和生产实践具有广泛而重要的借鉴意义。

1 地质背景

长宁示范区位于四川盆地西南部(图1),横跨四川省宜宾市长宁县、珙县、兴文县和筠连县,在区域构造上属于川南低陡弯形带和娄山褶皱带,区内发育有主体构造轴部呈NWW向展布的“雏鸟状”长宁裙边式复式背斜构造(图1)。研究区宁201井区处于长宁背斜构造的西南翼,发育五峰组—龙马溪组海相页岩层系,其底部五峰组至龙马溪组一段1亚段(龙一1)的黑色富有机质页岩段是勘探开发的有利目的层段(优质页岩段),为深水陆棚欠补偿环境下的沉积产物^[17]。目的层段底界现今埋深一般为2 000~3 000 m;实测总有机碳含量(TOC)平均为4%;镜质组反射率(R_o)平均为2.5%^[16],指示其在地史上曾达到以生干气为主的过成熟阶段。研究区面积约为265 km²,截至2016年5月,区内共部署页岩气水平井开发平台15个,已完钻水平井48口,完成压裂的井有34口,为四川长宁—威远国家级页岩气示范区的重要组成部分。

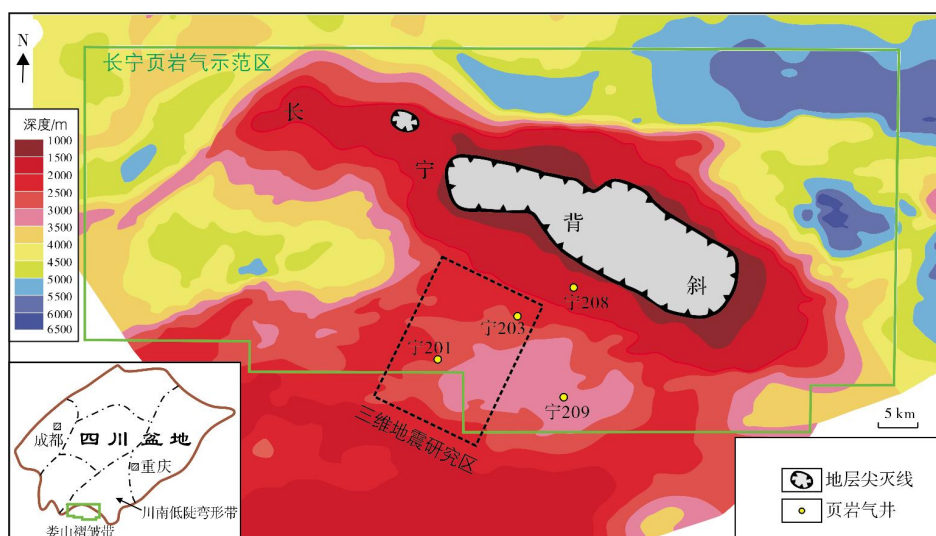


图1 四川盆地长宁地区目的层底界埋深及研究区位置

2 地震精细构造解释与识别

地震精细构造解释过程主要包括井震合成记录层位标定、连井骨干剖面手动解释、8线×8道格架剖面手动解释、手动加自动精细解释和任意地震剖面检查等步骤。尽管蚂蚁追踪技术是检测大、中尺度裂缝或裂缝发育带的有效手段,但实际应用时需要优化具体过程和相关参数。本文经大量尝试后所确定的优化工作流程如下:①从叠前道集出发,对道集进行去噪、拉平和振幅均衡等预处理,将信噪比较高、相对保幅的 $10^{\circ}\sim 28^{\circ}$ 道集部分叠加体作为蚂蚁追踪的输入;②对该部分叠加体做适当的平滑,减少随机噪音的影响;③产生方差体地震属性,进行初步的不连续性探测;④产生蚂蚁追踪体地震属性。

在上述工作过程中,特别强调将断层人工解释结果(指大尺度裂缝,下同)、成像测井解释数据、微地震监测高震级事件点分布以及钻录井信息等与蚂蚁追踪结果进行相互标定和质控,通过不断修正和调整蚂蚁体属性生成参数和构造解释方案,最终获得了相互协调统一、可信度较高的地震构造解释成果。全区共解释地震层位6层、断层41条,特别是由于优质页岩段底界(即中奥陶统临湘组—宝塔组石灰岩顶界)层位对应于目的层段振幅最强、连续性最好和信噪比最高的地震同相轴,因此对其进行了1线×1道的精细解释(图2a),并提取了该层位的蚂蚁体属性平面图(图2b),这为构造发育史分析和地震尺度断裂系统分析奠定了良好的数据基础。

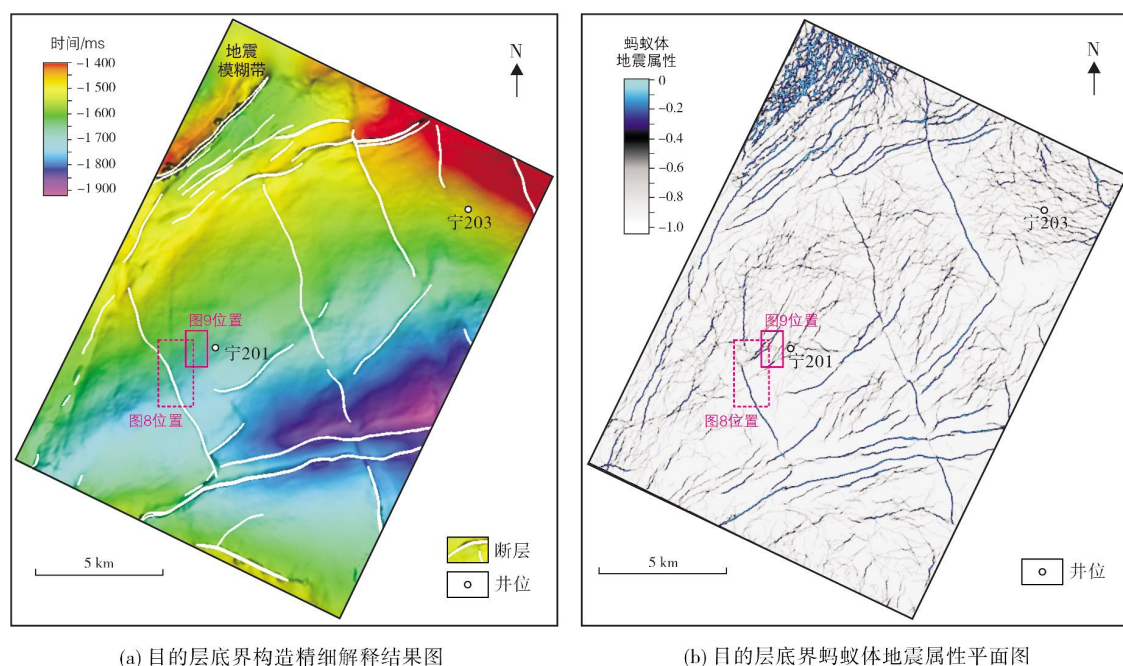


图2 四川盆地长宁地区宁201井区目的层底界地震精细构造解释与断裂识别结果

基于上述的目的层底界蚂蚁体属性平面图,进一步应用正交分解主成分分析(PCA)技术^[18]得到了9个主成分(图3a—3i),经筛选认为其中的第2主成分可以更好地表征大尺度裂缝的分布(图3b),而第4主成分可以更好地表征中尺度裂缝之间的交切关系(图3d)。需要指出,该PCA技术是通过计算原始地震属性平面图的二维自相关函数的特征值和特征向量,可将其最多分解为9个主成分(另外还有1个残差),从而用以分析其隐含的构造

要素特征;每个主成分仍然是1张平面图,其相加之和(连同残差图)等于原始地震属性平面图。主成分的排序主要依据其对原始地震属性平面图的贡献大小,一般第1主成分会承载原始地震属性平面图的绝大部分信息(例如本文的图3a),而其他主成分可能并无明确的地质意义,需要根据对研究区的地质认识和对其他学科资料的综合分析,对其进行筛选和标定,可赋予其相应的地质含义(例如本文筛选出的图3b和3d)。

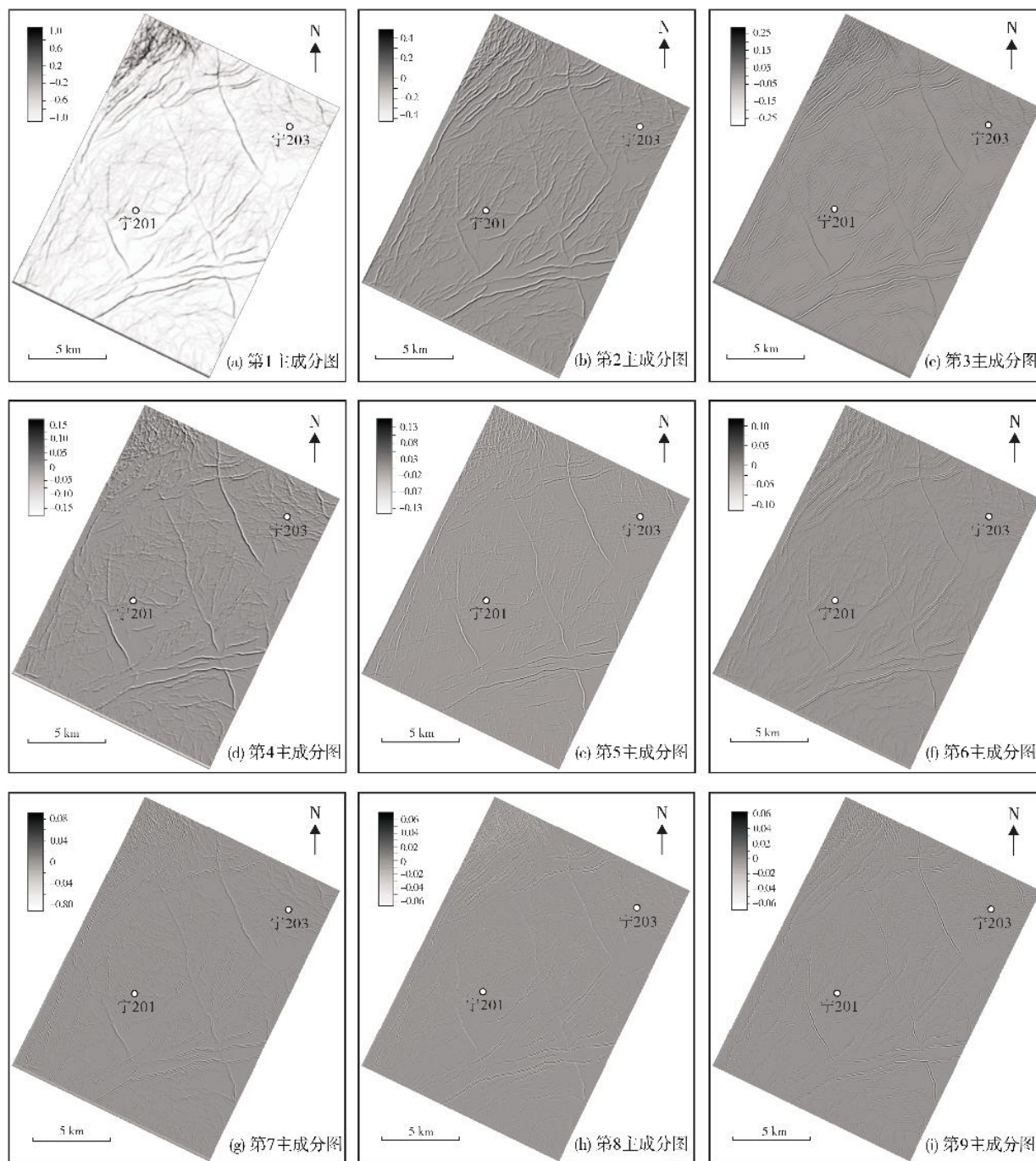


图3 四川盆地长宁地区宁201井区目的层底界蚂蚁体地震属性正交分解主成分图

地震精细构造解释成果表明：研究区从深到浅各层位的构造形态具有相对的一致性，总体上具有南北高、中间低的特征，其中工区中南部的向斜洼槽呈近EW向展布，向斜中心位于工区东侧；在总体平缓的构造背景上发育有一些由断裂活动所造成的次一级微幅构造单元；目的层的断层按

走向大致可分为3组，即近EW走向、(N)NE走向和NNW走向(图2a)。根据地震人工解释的41条深度域断层面，统计了其在目的层段的几何产状(图4a, 4b)；这些断层以高角度为主，绝大部分倾角大于 60° ；不考虑断层长度，仅就数目来看以NE走向者最多。

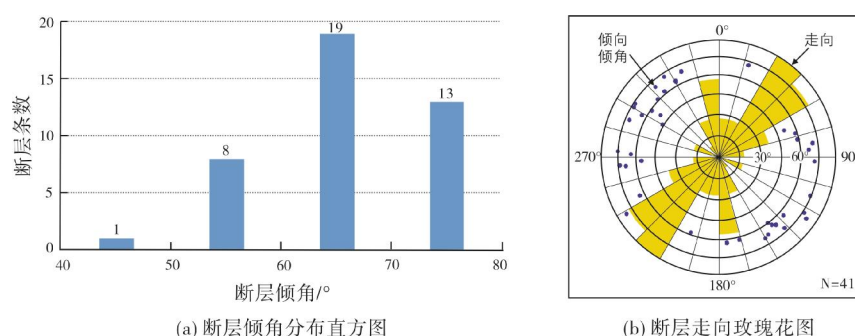


图4 四川盆地长宁地区宁201井区目的层断层产状统计

3 地震尺度断裂系统分期与配套

断裂系统分期是指将某一地区不同时期形成的断裂,按先后顺序组合成一定系列;而断裂系统配套是指在统一应力场中形成的各组断裂的组合关系,是划分断裂期次的重要依据^[19]。

层拉平技术是构造发育史、断裂系统分期与配套分析常用的重要手段,具有快速、直观的特点^[20-21]。但本文基于2条横切研究区主要构造的地震剖面 and 相应构造解释成果,利用有限元回剥地震层拉平技术进行的构造发育史分析结果,与由其他大量地质证据所指示的川南构造形迹主要成生于(晚)燕山期—喜马拉雅期^[14-15, 22-26]的结论并不相符,因此,该技术并不适用于研究区目的层。笔者推测其原因可能为研究区目的层在后期(燕山期—喜马拉雅期)构造变动中发生过一定程度的非能干(软)地层流动现象,这里不再赘述。

本文主要基于目的层底界的蚂蚁追踪体地震属性平面图(图2b),以及能更清晰地揭示不同方向地震尺度断裂的平面几何形态和交切关系的正交分解主成分图(图3b, 3d),并结合该层面的精细地震构造特征、单井小尺度裂缝信息,以及成因上相关联共轭裂缝的理论模式,辅助使用自动断层片提取和古应力场反演技术,同时在广泛调研、吸收和整合前人的区域构造地质认识的基础上,开展了深入的综合分析,对区域构造演化序列重新厘定,同时对目的层地震尺度的断裂系统进行了分期与配套,实现了区域构造和研究区油藏级别不同尺度裂缝系统之间的有机匹配。

综合分析得出,研究区目的层的主要构造活动发生于燕山期—喜马拉雅期,包括燕山晚期构造幕的近S—N向挤压作用、喜马拉雅早期构造幕的NNE—SSW向挤压作用,以及喜马拉雅中期构造幕的NWW—SEE

向挤压作用;喜马拉雅中期构造幕之后,研究区可能以强烈的整体隆升作用为主^[13, 15, 27-28]。在研究区整个构造演化过程中,晚期构造要素对早期构造要素的继承、发展、联合与叠加现象,也表现得相当明显。

3.1 燕山晚期构造幕

燕山晚期研究区受到近S—N向的挤压作用而主要形成近EW向构造。证据如下:①研究区及周边在早古生代就存在EW向构造的迹象(当时处于黔北斜坡的EW向拗陷),尽管在其后经历了数次构造运动和反转,但在燕山晚期之前,研究区只是发生了相对简单的垂直升降运动;由于燕山晚期(一幕)发生的大娄山由南向北的水平推挤受到四川盆地刚性基底的强烈阻挡,在研究区周边的赤水—长宁一带形成3排EW向低幅背斜构造^[15, 24]。②川南弧系构造形成于燕山期—喜马拉雅期,并在川南地区南部形成行列状构造格局——赤水—纳溪—长宁一带的行列状穹隆构造明显呈EW和SN向2个方位展布,均发育相应的直交横张大节理系统,而且EW向褶皱的翼部、顶部及轴面都同步卷入SN向褶皱之中,这些充分说明EW向褶皱发育相对较早^[14],综合构造解析结果表明其发育于(晚)燕山期^[24-26]。

具体到研究区,燕山晚期构造幕主要形成:①近EW向长轴背斜、向斜(图5a);②近EW向逆冲断层和断层相关裂缝;③多方向褶皱相关裂缝等(图5b与5c,在图5b中用红色线条和红字标注,其中较粗线条对应于人工地震构造解释的断层,下同)。推测该期也有横向扩张裂缝(近SN走向)的形成,但可能易被之后喜马拉雅早期运动的构造要素所改造、掩盖而难以单独识别出来。需要强调,这里所讨论的基于人工地震解释和地震属性所识别的断层和裂缝均属研究区目的层地震尺度的断裂系统(即大、中尺度的裂缝)。

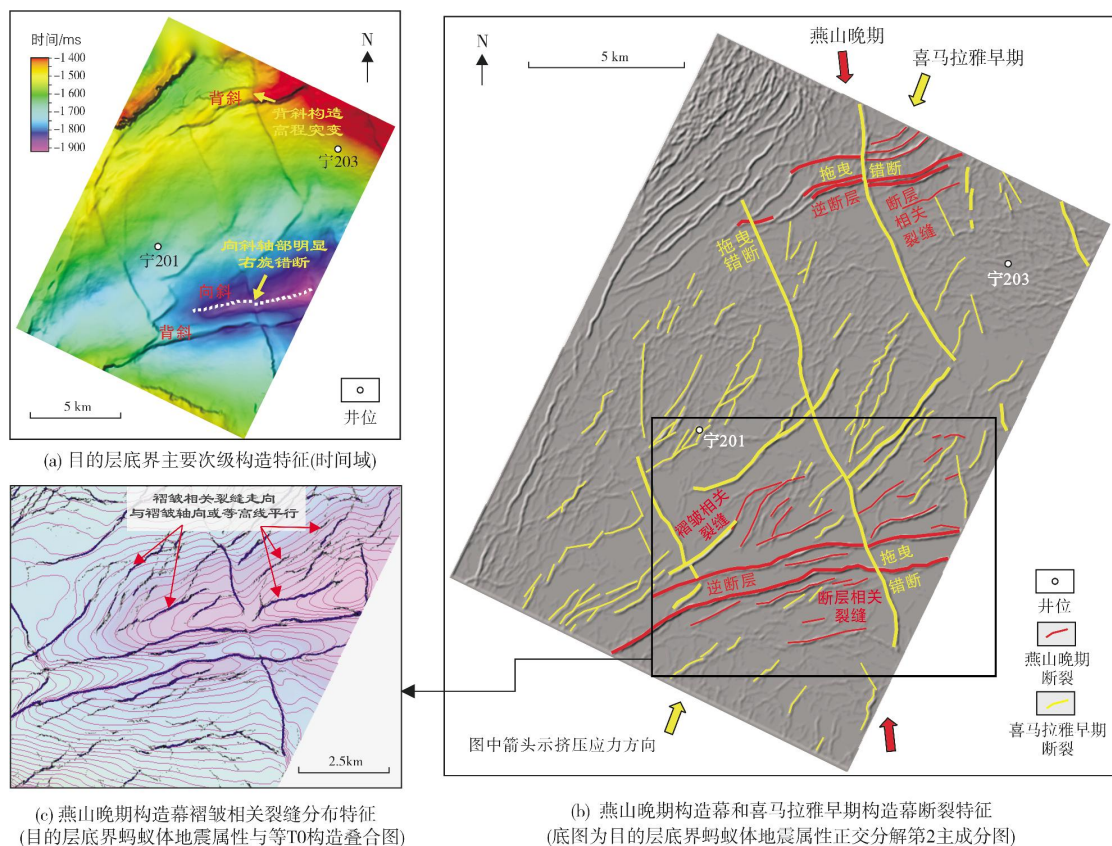


图5 四川盆地长宁地区区N201井区目的层燕山晚期和喜马拉雅早期构造幕地震尺度断裂系统分期与配套

3.2 喜马拉雅早期构造幕

始新世早中期,印度板块与欧亚板块逐渐碰撞闭合,对四川盆地产生NNE—SSW向挤压作用^[26,29-30]。与燕山晚期构造幕不同,喜马拉雅早期构造幕使研究区受到近NNE—SSW向的挤压作用而主要形成了成因上相关联的共轭断裂系统,包括走滑断层、剪切裂缝和横向扩张裂缝等(图5b中的亮黄色粗、细线条)。

具体地,共轭断裂系统中的剪切断裂相对比较平直,其中NNW向一组可能因为追踪燕山晚期的横向扩张裂缝而发育规模较大,而NE向一组则发育规模相对较小,两者局部呈互切关系而指示相对同期;另外,较小规模的横向扩张裂缝广泛发育,并且部分显示出平直的特征。剪切断裂具有走滑性质,特别是NNW向一组具有明显的右旋活动特征,包括切割、错动以及右旋拖曳燕山晚期的构造要素(长轴褶皱、逆冲断层)等(图5a与图5b中用黄色线条和黄色标注)。两组剪切断裂可能又都受到后期构造运动的改造,从而发生较小规模的逆冲作用,形成了沿剪切断裂分布的局部褶皱。

基于蚂蚁体异常的自动地震断层片提取及其统计结果(图6)表明,喜马拉雅早期构造幕NNE—SSW向的挤压作用对研究区目的层断裂系统的影响相当广泛,使得NNE—NE走向的断裂异常发育,如图6玫瑰花图所示。

3.3 喜马拉雅中期构造幕

渐新世到中新世,太平洋板块由之前的NNW向俯冲转为NWW向俯冲,以致构成了对中国东部包括扬子板块—华南板块在内的NWW—SEE向挤压,四川盆地也受到波及^[26,31-32]。受其影响,研究区主要形成了近垂直于挤压方向的逆冲断裂(伴随有褶皱),以及近平行于挤压方向且规模较小的裂缝系统(图7亮蓝色粗、细线条,均为地震尺度)。其中逆冲断裂及其伴生褶皱主要分布于研究区西部、西北部,呈NNE—NE向展布。而总体呈NWW向展布的较小规模裂缝具有全区弥散性分布的特征,局部密集发育(工区东北部),并且明显地被早期的断裂所限制(这在蚂蚁体地震属性正交分解之第4主成分图上表现得非常清晰,图3d和图7);根据走向和形态判断其成

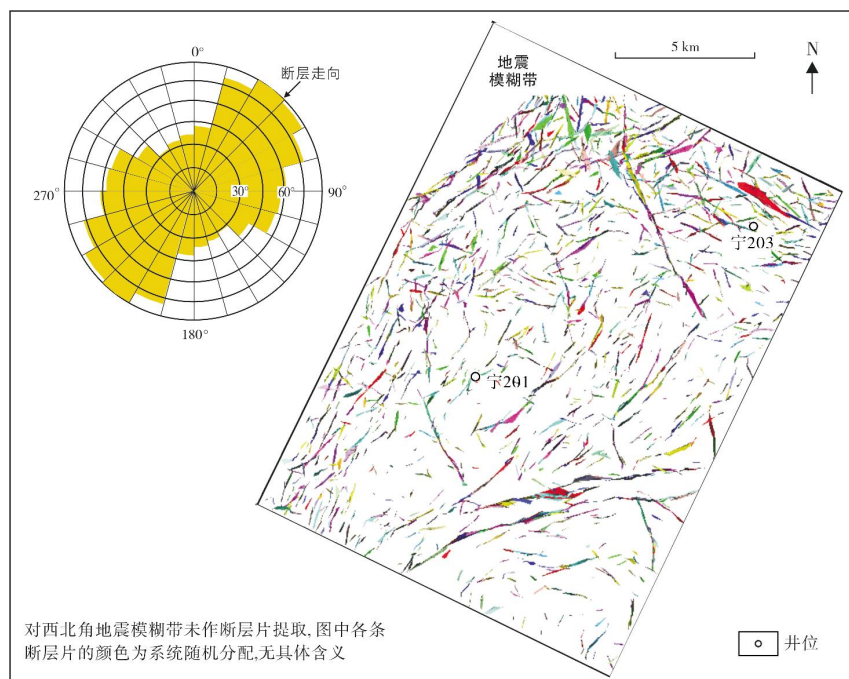


图6 四川盆地长宁地区宁201井区目的层蚂蚁体自动断层片提取及走向统计

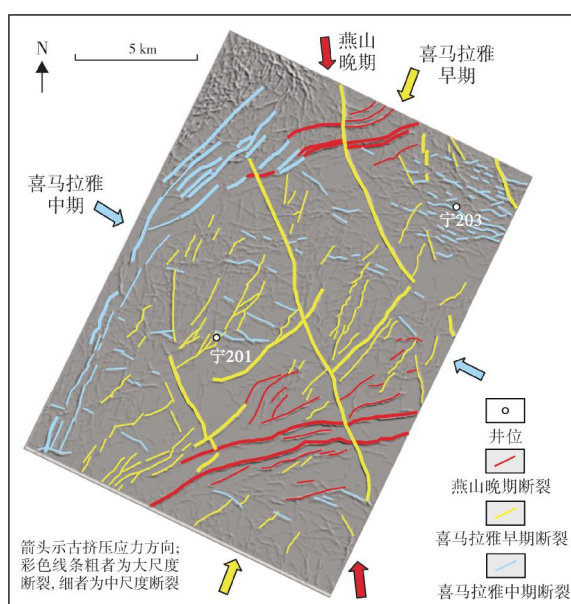


图7 四川盆地长宁地区宁201井区目的层地震尺度断裂系统分期与配套结果

因应以横向扩张裂缝为主, 含少量剪切裂缝。值得一提的是, 这种由挤压作用而形成的长轴褶皱、逆冲断层和伴生横向扩张裂缝(所谓横张大节理)的实例, 在现今川南及邻区地表广泛存在^[14, 33]。

此外, 以先存人工解释断层和2口井(宁201和宁203)小尺度裂缝产状为约束条件的古应力场反演结果表明, 喜马拉雅中期构造幕对研究区的挤压方向为 $117^{\circ}\sim 297^{\circ}$, 这不仅与上述该时期的区域应力场背景相一致, 而且与研究区现今最大水平主应力方向(基于横波测井、FMI成像测井解释)也基本一致, 这说明研究区现今应力场与喜马拉雅中期古应力场之间可能存在较强的继承关系。

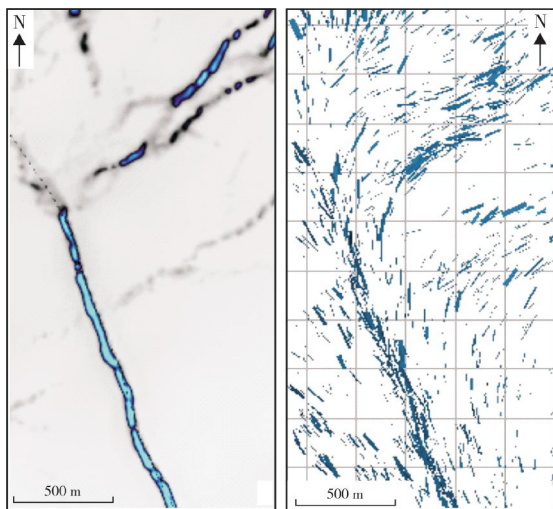
4 应用地质意义

提高页岩气目的层的地震资料品质并开展地震精细构造解释和地震尺度断裂系统分析, 对勘探开发和生产实践有着十分重要的应用意义。

4.1 为离散型裂缝建模提供数据基础

离散型裂缝模型具有诸多用途, 例如可以用于考虑天然裂缝系统的三维岩石力学建模、模拟更符合实际的水力压裂缝网形态、进行更为合理的单井产能预测和开发井网部署等, 因此对于发育天然裂缝的各种油气藏都非常重要。而本文的地震精细构造解释以及地震尺度断裂系统的分期与配套, 为建立更为准确、合理的离散型裂缝模型提供了重要数据基础, 例如: ①地震精细断层解释结果可以直接用

于建立大尺度的确定性离散裂缝模型;②基于蚂蚁体异常所提取出来的其他断层片可以直接用于建立中尺度的确定性离散裂缝模型;③与大、中尺度确定性裂缝的距离以及蚂蚁体异常值的大小(需先将其处理为三维网格属性模型)通常可以作为小尺度随机性离散裂缝模型的裂缝密度分布趋势,如由图8可见,距蚂蚁体线性异常的距离以及异常值的大小,可以用作小尺度随机性离散裂缝建模的密度趋势;④更进一步,还有助于单井上小尺度裂缝的合理配套分组(按走向或按充填特征,如成像测井所反映的高阻缝和高导缝),进而有助于探讨不同裂缝分组对勘探开发的不同影响,并可以分组确定相应的裂缝密度分布趋势的控制因素,从而最终有助于建立起更为合理的小尺度随机性离散裂缝模型。



(a) 蚂蚁体平面图(蓝色为大值) (b) 小尺度随机性离散裂缝模型

图8 蚂蚁体异常对小尺度随机性离散裂缝模型的控制作用

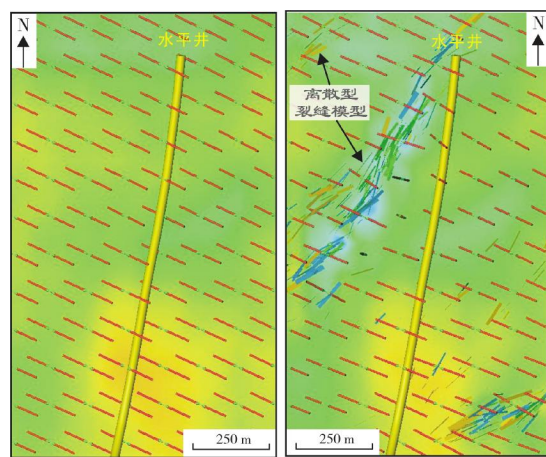
4.2 为钻井工程优化提供预警建议

地震精细构造解释是地质—工程一体化综合研究项目中一项重要的基础工作,其所获的成果和认识可为钻井工程优化提供多种预警和建议。

首先,准确的目层埋深、精细的总体或局部构造形态(如平缓单斜、褶皱、挠曲等)、详尽的地震尺度断裂或裂缝发育带分布等信息,不仅可以为页岩储层甜点区筛选、开发平台(井组)布置、井眼轨迹和井身结构设计等提供参考,而且还可以进一步为钻井工程和地质导向提供预警。例如当水平井段总体上沿地层上倾方向钻进时,如果钻头前方存在使地层倾角突然变低的构造挠曲时,应该提前将井轨迹

控制在优质页岩段的底部,以减小大段穿出靶层的钻探风险,反之亦然;井眼轨迹若跨越蚂蚁体异常所反映的可能的断层、挠曲、裂缝发育带,应提前设计相应预案以规避出靶、井漏等风险。

其次,如前所述,基于地震尺度断裂分期与配套认识可建立更为合理的离散型裂缝模型,进而可以用于建立考虑天然裂缝系统的、更为准确和接近地质实际的三维岩石力学模型(例如由图9可见,裂缝发育带可能会使主应力减小、方向发生偏转),最终更好地为钻井工程优选着陆层位、提供钻井地图、提示各种钻井风险,包括建议适合的钻井液密度,以及提示可能的井壁崩落、遇阻遇卡、钻井液漏失地层段等。



(a) 未考虑离散型裂缝网络的三维岩石力学模型 (b) 集成离散型裂缝网络的三维岩石力学模型
彩色背景代表最小水平主应力值(红色为大值,蓝色为小值),红色短棒代表最大水平主应力方向

图9 三维岩石力学模型效果对比

4.3 为完井、开发方案优化提供认识基础

研究区目的层大量的页岩储层完井实践表明,由蚂蚁体异常所反映的天然裂缝(带)对完井工程有不利影响,如:①容易造成压裂液严重滤失,进而导致支撑剂输送和铺设困难(即加砂困难);②与水力压裂缝延展方向以过大或过小角度相交的天然裂缝带可能会大大降低有效的压裂改造体积;③压裂施工时天然裂缝带被激活(在微地震监测数据上一般表现为矩震级较大的微地震事件)而导致套管变形或损坏等。

而针对页岩储层以通过完井方案和开发方案优化而最终实现高效开发为目标所开展的大量分析研究工作,例如分级射孔优化、水力缝网模拟、压裂施工参数优化、整合天然缝和压裂缝的油藏数值模拟(压后生产历史拟合、单井产能预测、生产制度优化)等,

均需要对不同期次、不同尺度、不同特征的天然裂缝系统进行深入认识、合理分期与配套、准确预测、三维表达(离散型裂缝模型),以及建立对应的更为准确的三维岩石力学模型(图9),因此,页岩储层断裂系统分析是完井、开发方案优化的重要数据和认识基础。

5 讨论

基于前述成果和认识,同时结合区内其他学科的相关资料及前人的区域构造地质认识,讨论如下:

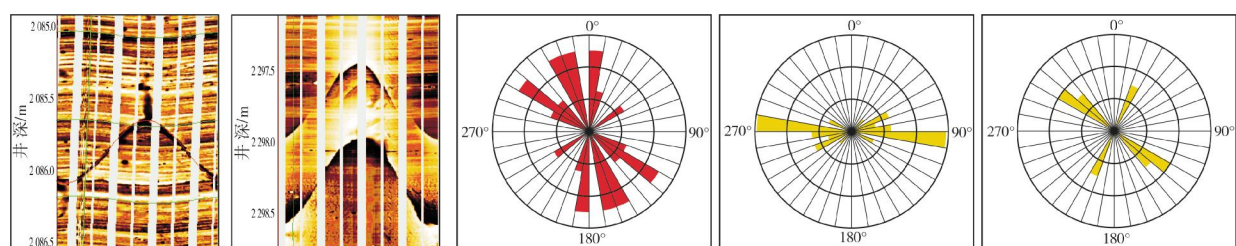


图 10 四川盆地长宁地区宁 201 井区 FMI 高分辨率电成像测井裂缝特征及其走向

(3)水力压裂微地震监测结果表明,研究区目的层绝大部分压裂作业都可以形成复杂裂缝网络,但缝网总体上为NWW走向,这可能体现了现今最大水平主应力、喜马拉雅中期构造幕横向扩张裂缝以及其他先存构造薄弱面的联合控制作用。

(4)由微地震监测所识别的构造微地震事件,据其延展方向推测,更多的是受喜马拉雅早期构造幕断裂系统所控制。由于与井筒直接相连或震级较大,可能会引起压裂施工困难或套管损坏,因此在井位设计和压裂施工过程中需要加以适当规避或密切监视。

(5)研究区内的近EW向构造在其西部普遍发生走向偏转(向SW方向偏转),以及NNE—NE向逆冲断裂主要发育于研究区西部边缘,这些现象可能都与整个川南三角形联合构造格局相一致^[14,31]。

6 结论

(1)研究区目的层的断层(指大尺度裂缝)以高角度为主,按走向大致可分为3组,即近EW、(N)NE和NNW走向,其中以NE走向者数目最多。

(2)基于多种技术的地震尺度断裂系统(指大、中尺度裂缝)分期与配套分析结果表明,影响研究区目的层断裂系统发育的主要构造活动包括:燕山晚期构造幕的近S—N向挤压作用,喜马拉雅早期构造幕的NNE—SSW向挤压作用,以及喜马拉雅中期构造幕的NWW—SEE向挤压作用。

(1)目的层页岩段总体上杨氏模量较低,属“偏软”地层,依据地质规律,其构造裂缝应较欠发育,但多种证据表明目的层段的构造裂缝总体上仍比较发育。

(2)由目前2口直井(宁201和宁203)有限的FMI高分辨率电成像测井资料所识别的小尺度裂缝的产状来判断(裂缝走向的变化基本在NWW—NNW向范围内,并且绝大多数为中高角度斜交缝),其可能主要形成于喜马拉雅早期和中期构造幕,参见图10。

(3)通过对比发现,喜马拉雅早期和中期构造幕的地震尺度断裂系统,与小尺度裂缝的发育,水力压裂缝网总体走向和形态,以及水力压裂构造微地震事件明显相关,因此在布井和压裂时要进行合理利用、尽量规避或密切监控。

(4)开展地震尺度断裂系统分析,对于离散型裂缝建模、钻井工程预警以及完井、开发方案优化都非常重要。建议今后应更为深入地、定性或半定量地分析不同期次、不同尺度、不同特征的天然裂缝系统对勘探开发及钻完井工程的具体影响,以进一步更有效地指导页岩气的生产实践。

参考文献

- [1] GUDMUNDSSON A. Rock fractures in geological processes [M]. New York: Cambridge University Press, 2011: 1.
- [2] 李阳,侯加根,李永强. 碳酸盐岩缝洞型储集体特征及分类分级地质建模[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(4): 600-606.
- [3] 刘振峰,曲寿利,孙建国,等. 地震裂缝预测技术研究进展[J]. 石油物探, 2012, 51(2): 191-198.
- [4] FAR M E, SAYERS C M, THOMSEN L, et al. Seismic characterization of naturally fractured reservoirs using amplitude versus offset and azimuth analysis[J]. Geophysical prospecting, 2013: 1-21.
- [5] 关宝文,郭建明,杨燕,等. 油气储层裂缝预测方法及发展趋势[J]. 特种油气藏, 2014, 21(1): 12-17.
- [6] BOWKER K A. Barnett Shale gas production, Fort Worth Basin: issues and discussion[J]. AAPG bulletin, 2007, 91(4): 523-533.
- [7] GALE J F W, REED R M, HOLDER J. Natural fractures in the Barnett Shale and their importance for hydraulic fracture treatments[J]. AAPG bulletin, 2007, 91(4): 603-622.

- [8] ENGELDER T, LASH G G, UZCATEGUI R S. Joint sets that enhance production from Middle and Upper Devonian gas shales of the Appalachian Basin[J]. AAPG bulletin, 2009, 93(7): 857-889.
- [9] ZENG Lianbo, LYU Wenya, LI Jian, et al. Natural fractures and their influence on shale gas enrichment in Sichuan Basin, China [J]. Journal of natural gas science and engineering, 2016, 30: 1-9.
- [10] 李新景, 胡素云, 程克明. 北美裂性页岩气勘探开发的启示[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(4): 392-400.
- [11] 潘仁芳, 龚琴, 鄢杰, 等. 页岩气藏“甜点”构成要素及富气特征分析: 以四川盆地长宁地区龙马溪组为例[J]. 天然气工业, 2016, 36(3): 7-13.
- [12] 朱利锋, 翁剑桥, 吕文雅. 四川长宁地区页岩储层天然裂缝发育特征及研究意义[J]. 地质调查与研究, 2016, 39(2): 104-110.
- [13] 沈传波, 梅廉夫, 徐振平, 等. 四川盆地复合盆地体系的结构构造和演化[J]. 大地构造与成矿学, 2007, 31(3): 288-299.
- [14] 杨武年. 川南区域构造变形及应力场遥感图像定量解析[J]. 遥感学报, 2001, 5(1): 62-68.
- [15] 周立夫, 陈孔全, 唐永, 等. 川南綦江—赤水地区晚燕山期以来差异构造变形[J]. 地质科技情报, 2016, 35(4): 66-73.
- [16] 王玉满, 黄金亮, 王淑芳, 等. 四川盆地长宁、焦石坝志留系龙马溪组页岩气刻度区精细解剖[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(3): 423-432.
- [17] 蒲泊伶, 董大忠, 耳闻, 等. 川南地区龙马溪组页岩有利储层发育特征及其影响因素[J]. 天然气工业, 2013, 33(12): 41-47.
- [18] PRIEZZHEV I I, SCOLLARD A. Fault and fracture detection based on seismic surface orthogonal decomposition [C]//74th EAGE conference and exhibition incorporating SPE EUROPEC 2012, June 4-7, 2012, Copenhagen, Denmark.
- [19] 曾佐勋, 樊光明. 构造地质学(第三版)[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2008: 137.
- [20] 蔡坤, 李小刚, 邵伟民, 等. 焉耆盆地博湖坳陷侏罗纪盆地原型与成因机制[J]. 新疆地质, 2012, 30(1): 26-30.
- [21] 久凯, 丁文龙, 李春燕, 等. 含油气盆地古构造恢复方法研究及进展[J]. 岩性油气藏, 2012, 24(1): 13-19.
- [22] 刘树根, 孙玮, 李智武, 等. 四川盆地晚白垩世以来的构造隆升作用与天然气成藏[J]. 天然气地球科学, 2008, 19(3): 293-300.
- [23] 张金川, 聂海宽, 徐波, 等. 四川盆地页岩气成藏地质条件[J]. 天然气工业, 2008, 28(2): 151-156.
- [24] 杨淑雯. 川南地区古生界构造特征及其对页岩气保存条件的影响[D]. 荆州: 长江大学, 2015.
- [25] 李乐. 川南地区三叠系嘉陵江组构造解析[D]. 成都: 西南石油大学, 2004.
- [26] 王适择. 川南长宁地区构造特征及志留系龙马溪组裂缝特征研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2014.
- [27] 来庆洲, 丁林, 王宏伟, 等. 青藏高原东部边界扩展过程的磷灰石裂变径迹热历史制约[J]. 中国科学: D辑 地球科学, 2006, 36(9): 785-796.
- [28] 黄方, 刘琼颖, 何丽娟. 晚喜山期以来四川盆地构造-热演化模拟[J]. 地球物理学报, 2012, 55(11): 3742-3753.
- [29] ROWLEY D B. Age of initiation of collision between India and Asia: a review of stratigraphic data[J]. Earth and planetary science letters, 1996, 145: 1-13.
- [30] 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 等. 印度—亚洲碰撞大地构造[J]. 地质学报, 2011, 85(1): 1-33.
- [31] 袁建新. 川南构造力学分区及其在油气勘探中的意义[J]. 重庆石油高等专科学校学报, 1996(1): 1-4.
- [32] 葛肖虹, 王敏沛, 刘俊来. 重新厘定“四川运动”与青藏高原初始隆升的时代、背景: 黄陵背斜构造形成的启示[J]. 地质前缘, 2010, 17(4): 206-217.
- [33] 周永刚. 中上扬子地块浅部褶皱逆冲格局: 遥感卫星图像处理与解释[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.

编辑: 黄革萍

Analysis of seismic-scale fracture system of shale reservoir and its petroleum significance: a case study of well Ning 201 area of Changning Block, Sichuan Basin

SHI Xuewen, TONG Yanming, LIU Wenping, ZHAO Chunduan, LIU Jia, FANG Jian

Abstract: Taking the shale reservoir of well Ning 201 area of Changning Block of Sichuan Basin as an example, seismic structural interpretation was carried out based on original seismic amplitude cube and derived ant-tracking cube, and then the technologies of finite-element horizon flattening, orthogonal decomposition principal component analysis (PCA), fracture/fault patch auto-extraction, paleo-stress field inversion were applied, combined with the existing regional structural geological knowledge and single well fracture information, to figure out the staging and grouping of seismic-scale fracture system, at the same time to clarify the regional tectonic evolution and its genetic relationship with fractures at different scales. The following results were obtained: (1) the main tectonic movements that affect the development of the seismic-scale fracture system of the target interval occurred in the Yanshanian-Himalayan periods, including the near S-N compression of the late Yanshanian tectonic episode, the NNE-SSW compression of the early Himalayan tectonic episode, and the NWW-SEE compression of the middle Himalayan tectonic episode; (2) the Late Yanshanian tectonic event mainly formed the near E-W long-axis anticlines and synclines, near E-W thrust faults and fault-related fractures, and fold-related fractures in different directions; (3) the Early Himalayan tectonic event mainly formed genetically related conjugate fracture sets including strike-slip faults and shear fractures both in NNW and NE directions, and transverse extensional fractures; (4) the Middle Himalayan event chiefly formed thrust faults, and related fractures and folds in NNE-NE direction, and transverse extensional fractures. It is concluded that such analysis of seismic-scale fracture system for specific shale gas reservoirs is of great significance in building discrete fracture model, providing precautionary advice for drilling engineering, and optimizing well completion program and field development plan, etc.

Key words: shale gas; natural fracture; fault system; tectonic evolution; Longmaxi Formation; Changning Block; Sichuan Basin
 SHI Xuewen, First author: MSc, Engineer, mainly engaged in shale gas exploration deployment and geological evaluation. Add: No. 83, 1st Section of North Jianshe Rd., Chenghua District, Chengdu, Sichuan 610051, China
 TONG Yanming, Corresponding author: PhD, Senior Geologist, engaged in integrated geological analysis for oilfield consulting research projects. Add: Zhaowei huadeng Building, No. 14 Jiuxianqiao Rd., Chaoyang District, Beijing 100015, China