

四川盆地北部前陆构造叠加区正断层成因机制

苏楠^{1,2}, 陈竹新^{1,2}, 翟咏荷³, 潘颖^{1,4}, 王丽宁^{1,2}, 任荣^{1,2}, 张宇轩⁵, 谢武仁¹, 武赛军¹

[1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石油盆地构造与油气成藏重点实验室, 北京 100083; 3. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 102260; 4. 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083; 5. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580]

摘要:四川盆地北部侏罗系广泛发育正断层,但其在持续前陆盆地挤压背景下的成因机制尚不明确。通过不同构造位置三维地震断裂详细刻画和对比分析,研究了挤压背景下侏罗系正断层形成的主控因素、形成机制和多期叠加地质过程。研究表明:①四川盆地北部侏罗系正断层是地层隆起过程中岩层弯曲拉伸时张应变的结果,在平面上具有均匀分散的分布特征。形成了大量两条或多条对倾的小断距、短延伸正断层组成的地堑结构。②其发育的方向和数量受到周缘冲断带挤压方向和构造期次的控制,在各期次均发育与挤压方向垂直的正断层。③盆地内正断层是龙门山-米仓山-大巴山陆内造山运动的响应。前缘隆起过程中地层褶皱控制了断层发育,构造叠加区多期次、多方向构造活动导致形成复杂正断层组合。④正断层不是挤压应力场的直接结果,而是挤压背景下隆起变形的伴生构造。

关键词:张应变;成因机制;正断层;叠加构造;前陆盆地;四川盆地

中图分类号:TE121.2

文献标识码:A

Genetic mechanisms of normal faults in the superimposed structural zone in the foreland area of the northern Sichuan Basin

SU Nan^{1,2}, CHEN Zhuxin^{1,2}, ZHAI Yonghe³, PAN Ying^{1,4}, WANG Lining^{1,2}, REN Rong^{1,2}, ZHANG Yuxuan⁵, XIE Wuren¹, WU Saijun¹

[1. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Basin Structure & Hydrocarbon Accumulation, PetroChina, Beijing 100083, China; 3. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 102260, China; 4. School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 5. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China]

Abstract: Normal faults are widely distributed throughout the Jurassic strata in the northern Sichuan Basin. However, their genetic mechanisms are yet to be clarified under the continuous compression from foreland basins. A detailed characterization and comparative analysis of faults at various structural locations is conducted using 3D seismic data, and the major controlling factors, genetic mechanisms, and multi-phase structural superimposition process of the Jurassic normal faults are investigated under a compressional tectonic setting. The results indicate that the Jurassic normal faults in the northern Sichuan Basin are a product of tensile strain caused by the folding and bending of strata during uplift. These faults exhibit a uniform and scattered planar distribution, forming numerous graben structures consisting of two or more normal faults with small throws and short displacements that dip in opposite directions. The strikes and numbers of these faults are controlled by the compressional directions and structural phases of surrounding thrust belts, with normal faults perpendicular to the compressional directions formed in each structural phase. The Jurassic normal faults within the northern Sichuan Basin are formed in response to the intracontinental orogeny of the Longmenshan, Micangshan, and Dabashan mountains. Stratum folding and bending formed during the formation of front uplift lead to the development of these faults, with multi-phase, multi-directional tectonic activities in the superimposed

收稿日期:2024-11-24;修回日期:2025-01-15。

作者简介:苏楠(1985—),男,博士、高级工程师,构造地质与综合勘探。E-mail:sunan11a23@petrochina.com.cn。

基金项目:中国石油基础性前瞻性重大科技专项(2023ZZ0202);中国石油勘探开发研究院开放课题(2024-KFKT-05);中国石油油气和新能源公司C1类科技专项(2023YQX10101)。

structural zone resulting in the formation of complex normal fault assemblages. The Jurassic normal faults in the northern Sichuan Basin are associated structures formed during uplift and deformation in a compressional tectonic setting rather than resulting directly from compressional stress fields.

Key words: tensile strain, genetic mechanism, normal fault, superimposed structure, foreland basin, Sichuan Basin

引用格式: 苏楠, 陈竹新, 翟咏荷, 等. 四川盆地北部前陆构造叠加区正断层成因机制[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(2): 478–490. DOI: 10. 11743/ogg20250210.

SU Nan, CHEN Zhuxin, ZHAI Yonghe, et al. Genetic mechanisms of normal faults in the superimposed structural zone in the foreland area of the northern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(2): 478–490. DOI: 10. 11743/ogg20250210.

四川盆地侏罗系是近期非常规油气勘探的重要领域, 包括了中侏罗统沙溪庙组致密砂岩气, 以及中下侏罗统自流井组—凉高山组页岩油^[1–2]。断层是沙溪庙组致密气成藏的重要控制因素之一, 在断砂配置、天然气运移方面具有重要控制作用^[3–6]。已有研究对四川盆地侏罗系断裂体系认识仍不全面, 现阶段围绕川西坳陷金秋、八角场和中江等核心建产区开展研究, 认识到川西地区侏罗系主要规模断裂为受龙门山构造带控制的逆断层^[7–8], 多发育于三叠系滑脱层, 靠近盆缘地区则部分为基底卷入构造。此外, 这些研究也发现在侏罗系内部发育一套断裂体系, 但初步认为其为次级断裂而并未详细剖析。苏楠等以龙岗地区为例^[9], 提出侏罗系内部断裂以北东东走向正断层为主要特征, 在川中北部地区广泛发育, 并提出正断层体系对沙溪庙组成藏模式具有控制作用, 但对正断层体系的成因机制并未充分说明。

侏罗系正断层成因机制问题亟需进一步深化研究。一方面在构造体系认识上, 四川盆地侏罗纪之后长期处于燕山期—喜马拉雅期持续挤压的构造背景下, 广泛发育正断层的力学机制需要明确。另一方面在油气勘探上, 由于断裂成因机制和主控要素不明确, 限制了对盆地范围内侏罗系多层系成藏模式和保存条件的认识, 制约了勘探领域的拓展。本文利用川西北地区不同构造位置三维地震资料, 对侏罗系内部正断层特征进行刻画和对比分析, 发现其受到地层褶皱弯曲、构造位置的控制, 据此提出了多期挤压构造背景下的正断层发育机制。

1 地质概况

研究区位于四川盆地西北部, 现今构造整体为北西倾的斜坡区(图1a)。在东西方向上(图1c), 研究区西端为龙门山冲断带及其东倾斜坡; 向东间隔前缘凹陷, 为北东东走向、受米仓山—大巴山叠加构造形成的通南巴背斜带; 东部至川东构造带以西, 整体为西北倾

斜坡, 是西部、北部前缘凹陷区沉降造成的相对隆起。南北方向上(图1d), 剖面北端为米仓山冲断构造及其南倾斜坡; 向南至川中地区为北西倾斜坡。剖面中震旦系—侏罗系具有较为一致的变形, 反映现今构造形态是白垩纪以来燕山期—喜马拉雅期构造作用的结果。

研究区处于龙门山、米仓山和大巴山3大盆缘前陆冲断带控制的构造叠加部位。西侧的龙门山由于晚三叠世华北板块、华南板块和羌塘板块的聚合碰撞, 古特提斯松潘洋和秦岭洋关闭, 自北西向南东逆冲推覆。新生代以来龙门山冲断带再次复活和发生剧烈的隆升, 造成盆地西缘逆冲推覆构造以及川西坳陷的形成^[10–12]。米仓山冲断带构造走向为北东向和近东西向, 经历了4个主要演化阶段: ①早印支期, 米仓山—汉南刚性地块与秦岭板块结合; ②晚三叠世以来, 多地体不同方向形成了通南巴和九龙山向斜的早期雏形; ③早喜马拉雅期, 米仓山—汉南地体向前陆盆地方向形成米仓山推覆体; ④喜马拉雅晚期, 秦岭板块的碰撞作用使米仓山隆起的基岩迅速抬升。时间上米仓山在白垩纪以来经历2期快速隆升剥蚀^[13–15]: 第一期反映了秦岭—大别造山带白垩纪的区域性剥蚀事件; 第二期反映了青藏高原隆升的影响。大巴山构造演化分为2个阶段: 晚三叠世华南板块和华北板块碰撞带来前陆褶皱和逆冲作用, 形成北大巴山构造带; 在早侏罗世经历了构造稳定期, 中—晚侏罗世构造活动再次活跃, 大巴山冲断带经历了板内变形和变质作用, 形成南大巴山前陆褶皱逆冲带^[16–18]。白垩纪以来南大巴山及其前陆盆地发生多期抬升剥露, 经历了快速隆升—缓慢隆升—快速隆升3个阶段^[19–23]。

四川盆地中、北部侏罗系主要为陆相河流和湖泊沉积, 岩性组成包括砂岩、粉砂岩、页岩和泥岩(图1b), 陆源冲积扇及砾岩岩性则分布于盆地北缘。其中中侏罗统沙溪庙组为一套巨厚泥岩夹河道砂体地层, 发育河流—三角洲—湖泊沉积体系, 河道砂体分布

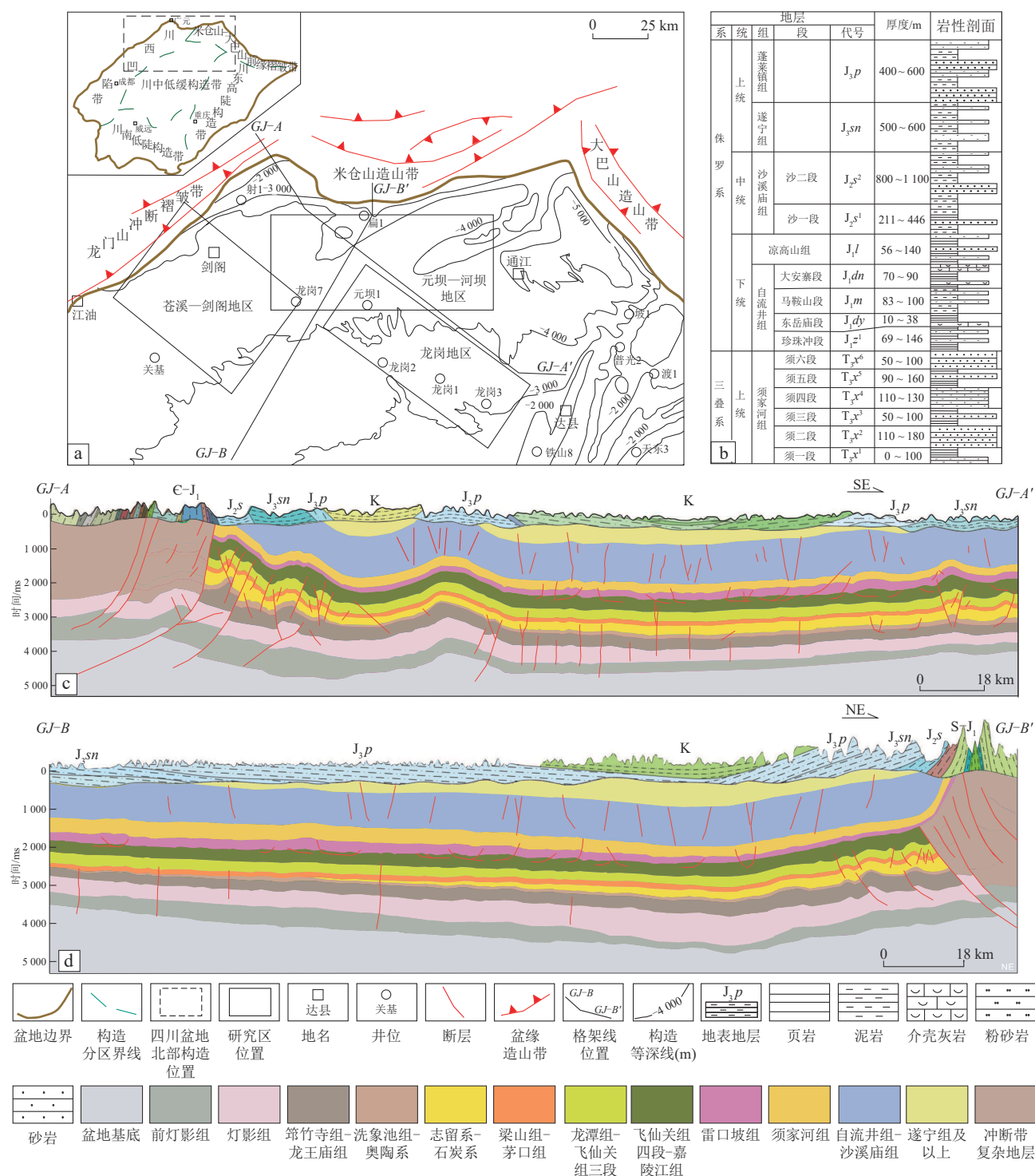


图1 四川盆地北部三维工区位置及造山带示意图(底图为上三叠统须家河组底界现今构造图)

Fig. 1 Schematic diagrams showing the locations of 3D acreages and orogenic belts in the northern Sichuan Basin (base map: present-day structural map of the bottom boundary of the Upper Triassic Xujiahe Formation)

a. 三维工区、格架线及造山带位置; b. 川中北部上三叠统-侏罗系地层综合柱状图; c. 四川盆地北部西北-南东向格架线地层结构及断裂分布; d. 四川盆地北部南北-北东向格架线地层结构及断裂分布

广泛,多期砂体叠置发育,储层物质基础好。中、下侏罗统是烃源岩发育的层段,包括凉高山组、自流井组(包括大安寨段、东岳庙段),其本身也是页岩油气的重要勘探领域,其中凉高山组为三角洲-湖泊相沉积,发

育富有机质页岩与三角洲前缘或浊流相中、薄层砂岩组合;东岳庙段与大安寨段为介壳滩-湖泊相沉积,发育半深湖相富有机质页岩与浅湖相薄层介壳灰岩组合。

2 侏罗系正断层特征

2.1 龙岗地区

龙岗地区地处现今川中构造稳定区与川北大巴山

前陆拗陷之间(图1a),东临川东高陡褶皱带,现今位于倾向西北的斜坡部位。根据龙岗三维地震资料构建的沙(沙溪庙组)二²亚段底界顺层相干体切片(图2a),龙岗地区沙溪庙组发育4个方向主要断裂(图2b);其中研究区西部两条北西走向延伸较长的断层为逆断层,自三叠系嘉陵江组滑脱层发育并上穿至侏罗系;另外3个方

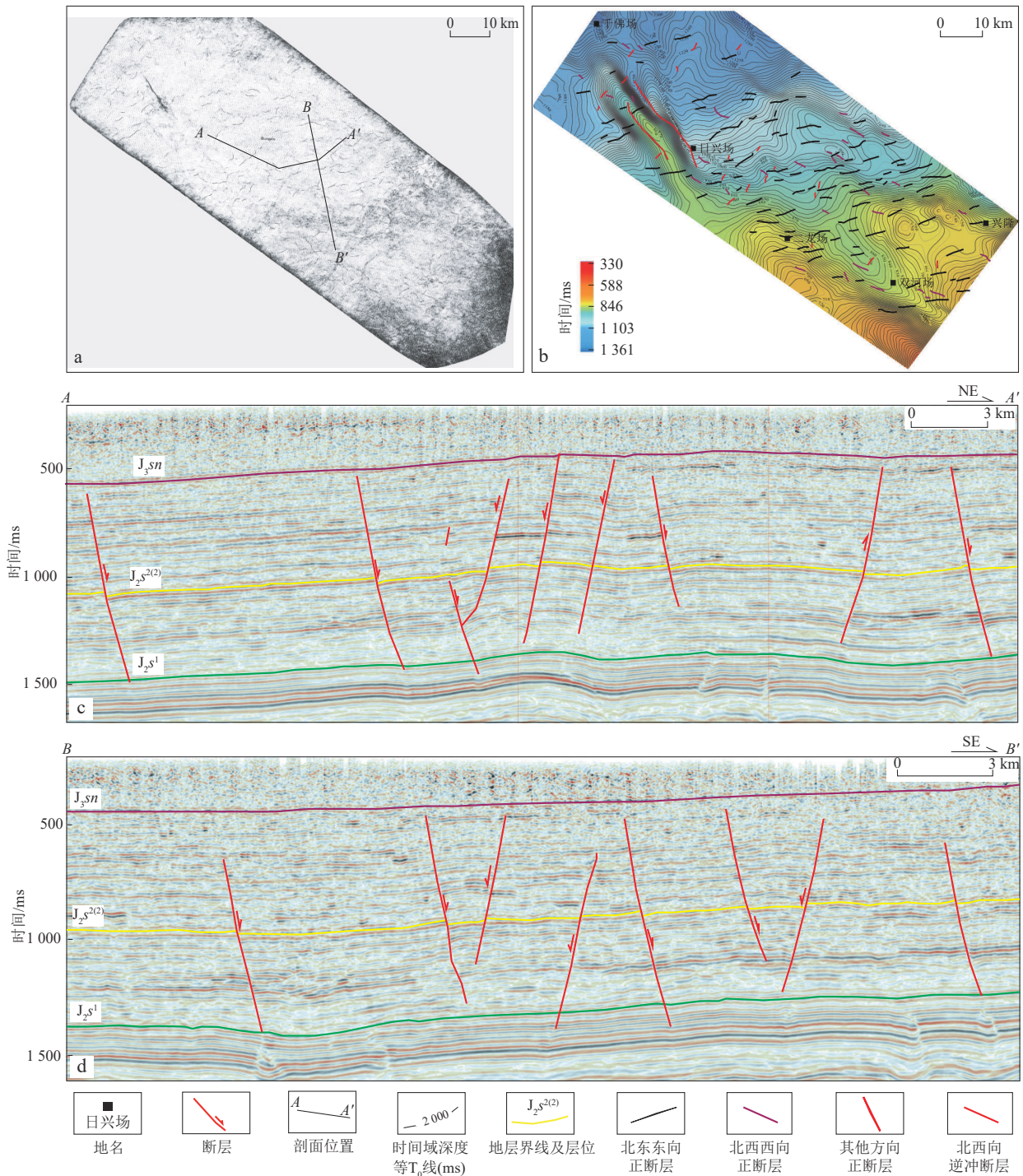


图2 四川盆地北部龙岗地区侏罗系正断层特征

Fig. 2 Characteristics of the Jurassic normal faults in the Longgang area, northern Sichuan Basin

a. 龙岗三维工区沙二²亚段底界顺层相干体切片; b. 龙岗三维工区沙二²亚段断层分布与构造形态叠合图; c, d. 龙岗地区典型地震剖面断层解释成果

向分别为北东东向、北西西向以及北东—近南北向,在平面上特征较为接近,由多条不连续的小断层定向排列组成。单条断层延伸长度较短,约1.7~4.4 km。

地震剖面切过不同方向正断层(图2c,d),其中A—A'剖面左侧主要发育北东向正断层,右侧主要发育北西西向正断层,B—B'剖面中断层主要为北东东向,各方向正断层多以单条或者两(多)条对倾的断层为主要特征,组成地堑结构,但普遍断距较小。可见北东东向、北西西向和北东—近南北向3组断裂尽管延伸方向不同、发育密度不同,但其在剖面上的几何特征基本一致。断层贯穿地层主要为侏罗系下统自流井组至上统遂宁组底界以下,少量断层贯穿遂宁组底界,断层上盘的向下运动普遍造成了遂宁组的相应下降,可以判断其形成晚于侏罗纪晚期。断层少量切入下侏罗统及三叠系须家河组,但整体上主要局限在沙溪庙组内部,下伏地层中三叠统嘉陵江组一下侏罗统主要为滑脱层控制的逆断层及其相关褶皱构造。正断层上段未观察到明显的正、负花状构造,因此其本身走滑性质较弱。另外在正断层根部的下部地层中没有观察到高陡走滑断裂存在的证据,因此这些正断层也并不是下伏走滑断裂负花状构造的一部分。平面上正断层在区块内分布均匀,和走滑断裂派生的雁列正断层也具有明显差异,雁列正断层一般为一系列平行的紧密间隔的小断层,组合形成向一个方向延伸的断裂带。

三组正断层的方向与研究区现今地层的构造形态表现出了一定的相关性。研究区沙二₂段底界整体呈北北西倾向的斜坡构造,即地层走向为北东东走向,与北东东向正断层延伸方向一致,北东东向断层也是发育数量最多的,并且在地层曲率较大处发育密集。侏罗系除北东东走向构造外,还发育北西西走向构造,局部叠加改造了原本北西倾向的构造形态,也发育同方向的北西西向正断层。北东向正断层发育较少,但也与局部构造等高线平行。区域上北西倾的斜坡构造是米仓山活动的结果,北西西走向构造来自于大巴山方向的挤压,而北东向构造是川西龙门山冲断带造成,因此认为3个方向正断层的发育可能与周缘冲断带的活动相关。

2.2 苍溪—剑阁地区

苍溪—剑阁地区位于川西前陆拗陷北段(图1a),西侧为龙门山冲断褶皱带,东侧临近川中构造稳定区。研究区东部为北西倾向斜坡,处于川西前陆斜坡区东坡,西部为北东倾向斜坡,位于川西前陆斜坡区西坡,中部发育拗陷区将两侧斜坡间隔开来(图3b)。根据苍溪—剑阁三维地震资料构建的沙溪庙组沙二₂亚段底

界顺层相干体切片(图3a)揭示,该地区侏罗系沙溪庙组断层,除断层延伸方向外,平面特征上与龙岗地区基本相同,均以大量延伸较短、多方向的正断层为主(图3b)。在剖面特征上,同样与龙岗地区类似,不同方向的断裂均为断距较小的正断层(图3c,d),两条或多条对倾形成地堑结构,发育层位同样局限于下侏罗统与上侏罗统遂宁组底界之间,因此可以认为两个地区断层在断裂性质和成因机制上应该是相同的。

苍溪—剑阁地区在平面上发育4个方向正断层,分别为北东向、近南北向、北东东向以及北西西向。这4个方向正断层在东侧的龙岗地区也有发育,但分布数量有所差异。龙岗地区以北东东走向正断层为主,北西西向和北东向断层数量相近。苍溪—剑阁地区则北东向正断层最为发育,近南北向和北东东方向次之,北西西方向断层发育较少。各组正断层的方向同样表现出了与地层构造形态以及多期次地层褶皱变形的相关性。其中最为发育的北东走向正断层,方向与区块内现今主要的地层构造形态一致,而区块内北东走向的构造形态是龙门山北西—南东向冲断挤压形成的;马家寺—太平场、王家河以东、白龙场以东均为北西西向构造,反映在北东向构造形成后,受到了北西西向构造改造,相应的区域内也发育了北西西走向正断层;与此类似的,区块东南部隆起在北东走向地层形态基础上发育了北东东走向构造,反映了相对晚期的北东东向构造的叠加改造,对应的在其附近北东东走向正断层发育;除此之外也发育了少量局部南北向构造,分布于酒店垭—观音寺、白龙场以南,区块内也少量发育了近南北向正断层。从断层方向与地层构造形态相关性的分析来看,沙溪庙组正断层的发育方向与区块内发生过的多期褶皱变形是相对应的。

值得注意的是,正断层主要发育在区块东部,即川西前陆拗陷的东坡,在区块中部的低部位和西部的斜坡区则很少发育。对于正断层等张性构造的成因机制,必然需要考虑区域性的拉张背景的可能性。四川盆地侏罗纪中期处于构造稳定期,之后燕山期—喜马拉雅期多期构造挤压活动的间歇期也可能存在应力松弛等拉张背景。但对于区域性的拉张应力场,其形成的断层应具有普遍的分布,不应受构造单元的控制。而川西北侏罗系正断层在隆起、拗陷等不同构造位置的分布具有明显差异,表明其更多受控于区块的构造变形,而并非区域性的拉张应力场。

2.3 元坝—河坝地区

元坝—河坝地区位置更接近于北部的米仓山构造

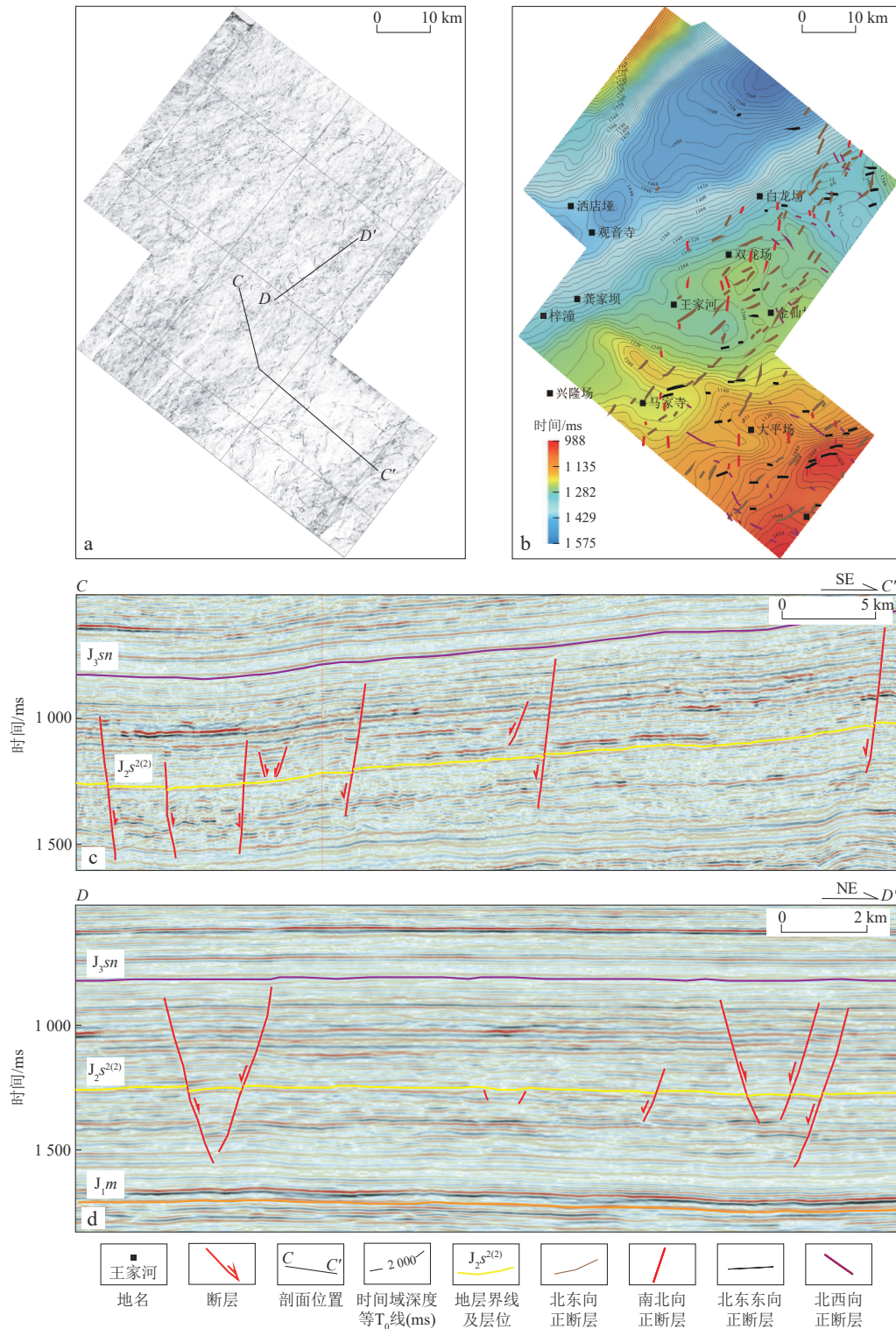


图3 四川盆地北部苍溪—剑阁地区侏罗系正断层特征

Fig. 3 Characteristics of the Jurassic normal faults in the Cangxi-Jian'ge area, northern Sichuan Basin

a. 苍溪—剑阁三维工区沙二²亚段底界顺层相干体切片; b. 苍溪—剑阁三维工区沙二²亚段断层分布与构造形态叠合图; c, d. 苍溪—剑阁地区典型地震剖面断层解释成果

带(图1a),处于龙门山-米仓山-大巴山构造叠加部位,现今侏罗系构造以北东东走向构造为主,同时于也发育北西(南店垭附近)、近南北向构造(龙三场—千佛

场)(图4b)。研究区内发育多个方向断层,区块东部发育6条北西走向、平面上延伸较长的逆断层,发育自中三叠统嘉陵江组滑脱层,从方向上判断受控于大巴

山冲断带的挤压变形。其他数量众多、分布杂乱、方向复杂的断裂,与龙岗、苍溪—剑阁地区相似,平面上均为延伸较短、多方向的正断层(图4b)。

在多方向的正断层中,除了在龙岗、苍溪—剑阁地区均有发育的北东向、近南北向、北东东向以及北西西向断层外,元坝—河坝地区还发育近东西向和北西

向两个方向断层。在剖面上这两个方向断层与其他方向正断层基本一致,主要局限于沙溪庙组内,形成由两条或多条小断距正断层对倾的地堑结构(图4c,d)。这两组正断层的发育与地层构造形态同样具有相关性。其中研究区内自东向西发育多排北西走向构造,与东侧的大巴山冲断带挤压传播方向一致。而近东

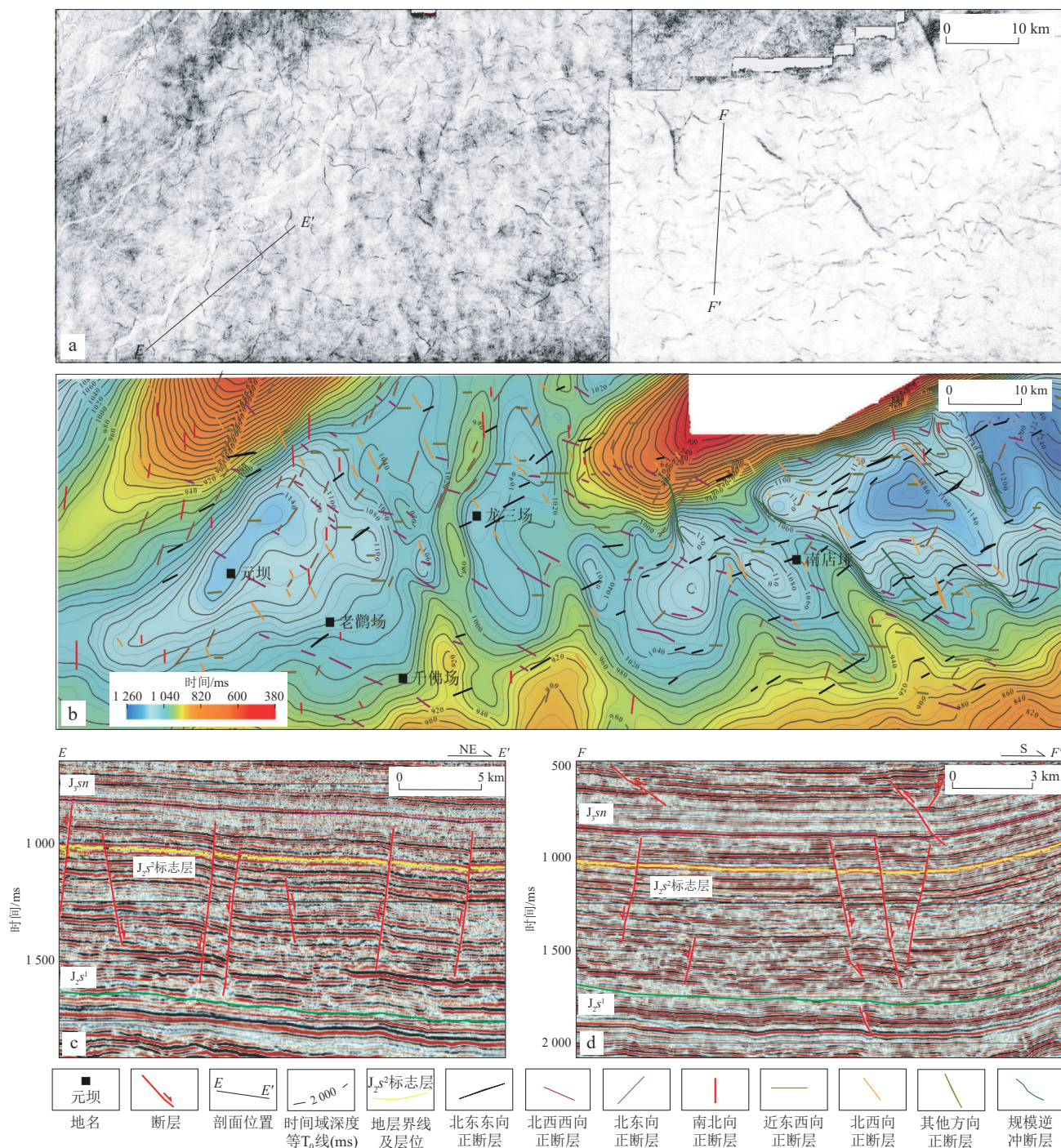


图4 四川盆地北部元坝—河坝地区侏罗系正断层特征

Fig. 4 Characteristics of the Jurassic normal faults in the Yuanba-Heba area, northern Sichuan Basin

a. 元坝—河坝三维工区沙二段标志层顺层相干体切片; b. 元坝—河坝三维工区沙二段标志层断层分布与构造形态叠合图; c, d. 元坝—河坝地区典型地震剖面断层解释成果

向断裂则是米仓山构造相对早期活动的记录。米仓山构造带平面上表现为近东西走向的大型复背斜^[24],并发育有新生代北东-南西走向的褶皱和断裂构造^[25-26]。其中东西向褶皱形成最早,然后形成北东向褶皱^[27]。上侏罗统-下白垩统残余厚度等值线在米仓山前西段呈近东西向^[28],也表明在研究区早期存在近东西向构造,晚期被北东向以及来自东侧的北西向构造叠加改造。

3 正断层发育主控因素

3.1 地层隆起弯曲

根据以上分析,可以发现在3个研究区中,正断层的展布与区块地层变形相吻合。一方面体现在正断层的主要走向与地层的走向基本一致,如龙岗地区和苍溪—剑阁地区现今侏罗系走向分别为北东东和北东方向,正断层走向同样分别为北东东和北东向;另一方面体现在各个区块内,尽管正断层走向各异,但均有相应走向的褶皱构造与之对应。

正断层方向和地层变形之间的匹配关系,反映它们在成因机制上的相关性。在同一应力场控制下,由于主应力方向不变,其造成的地层弯曲与断层的方向必然具有一致性,例如在前陆挤压区褶皱的轴向与逆冲断层的走向一致,均垂直于最大主应力的方向;部分挤压区发育共轭节理(或断层),共轭节理的锐夹角方向应与最大主应力方向一致,垂直于区域褶皱走向^[29-30]。一种比较复杂的方向关系是简单剪切变形中的里德尔模式,其会形成与主滑动面具有固定夹角的 R, R', T 和 P 等多方向断裂,但本次刻画的断层在平面上并不符合该模式,也并未识别出主滑动面。

然而正断层的发育与导致研究区内地层发生隆起和褶皱变形的应力背景似乎存在矛盾。根据区域构造背景已有认识,四川盆地北部侏罗纪晚期以来,受到周缘龙门山-米仓山-大巴山构造活动的控制,燕山期—喜马拉雅期长期处于挤压应力背景之下,盆地内地层的褶皱弯曲是盆缘挤压应力向盆地内部传播的结果,仅从应力场的角度无法解释正断层的发育机制。但从变形的角度出发,隆起过程中地层的弯曲变形会使岩层发生不均匀应变^[31],中和面以下的岩层缩短发生挤压,而中和面以上的岩层由于伸长发生拉张,这种张应变为正断层的发育提供了应力背景。因此认为研究区正断层可能并不是挤压应力的直接结果,而是区域挤压下发生隆起变形的伴生构造。

3.2 构造位置

对比3个区块断层走向统计结果(图5),正断层发育的主要方向和组数在不同构造位置具有明显差异。其中苍溪—剑阁地区以北东方向正断层为主,其次为北西西向和近南北向断层。龙岗地区绝大多数断层为北东东向,其次为北西西方向以及少量北东向断层。元坝—河坝地区断层发育情况复杂,多个方向断裂均有发育,但总体上近东西—北西西方向为优势。在该区域自西向东断裂发育情况也有所差异,最西端以近南北、北东和北西向断层为主;中部北西西向和近东西向断层占优势,南北、北东和北西向断层次之;而到了东部,则以北西西向和北东东向断层最为发育,北向断层次之。

不同构造位置正断层发育的差异实际上反映了周缘冲断带的控制作用。苍溪地区在位置上更接近于西侧北东走向的龙门山冲断带,受其影响北东向构造最为发育。相对而言,龙岗地区因远离龙门山冲断带,所以北东向、近南北向断层发育较少。相比其他两个冲断带,龙岗地区在位置上更接近于米仓山变形控制区域(也与冲断带变形在盆内的影响范围有关),在其影响下川北地区呈北北西倾向斜坡,因此北东东走向最为发育,另外受东北侧大巴山挤压变形向盆内传递的影响,发育北西西向正断层。元坝—河坝地区更接近于北侧的米仓山构造带,并位于龙门山及大巴山之间,多方向构造叠加导致多方向正断层的发育。由于更接近于米仓山构造带,导致近东西向断层最为发育。因此构造位置或周缘冲断带的控制作用表现为,冲断带挤压引起的地层褶皱弯曲导致正断层发育,方向与冲断带方向平行;多期多方向的冲断带挤压造成的正断层,在构造叠加区均有保留;随着远离冲断带,传递的挤压变形变弱,正断层逐步不发育。

4 正断层发育机制

4.1 应变机制及叠加模式

根据正断层展布的主控因素分析,川北地区侏罗系正断层是挤压背景下褶皱变形的伴生构造,在周缘冲断带挤压变形向盆地内传播过程中,前陆拗陷远端形成隆起和褶皱构造,岩层弯曲过程中的张应变导致正断层的发育。

前人对地层弯曲过程中岩层张应变及其伴生断裂

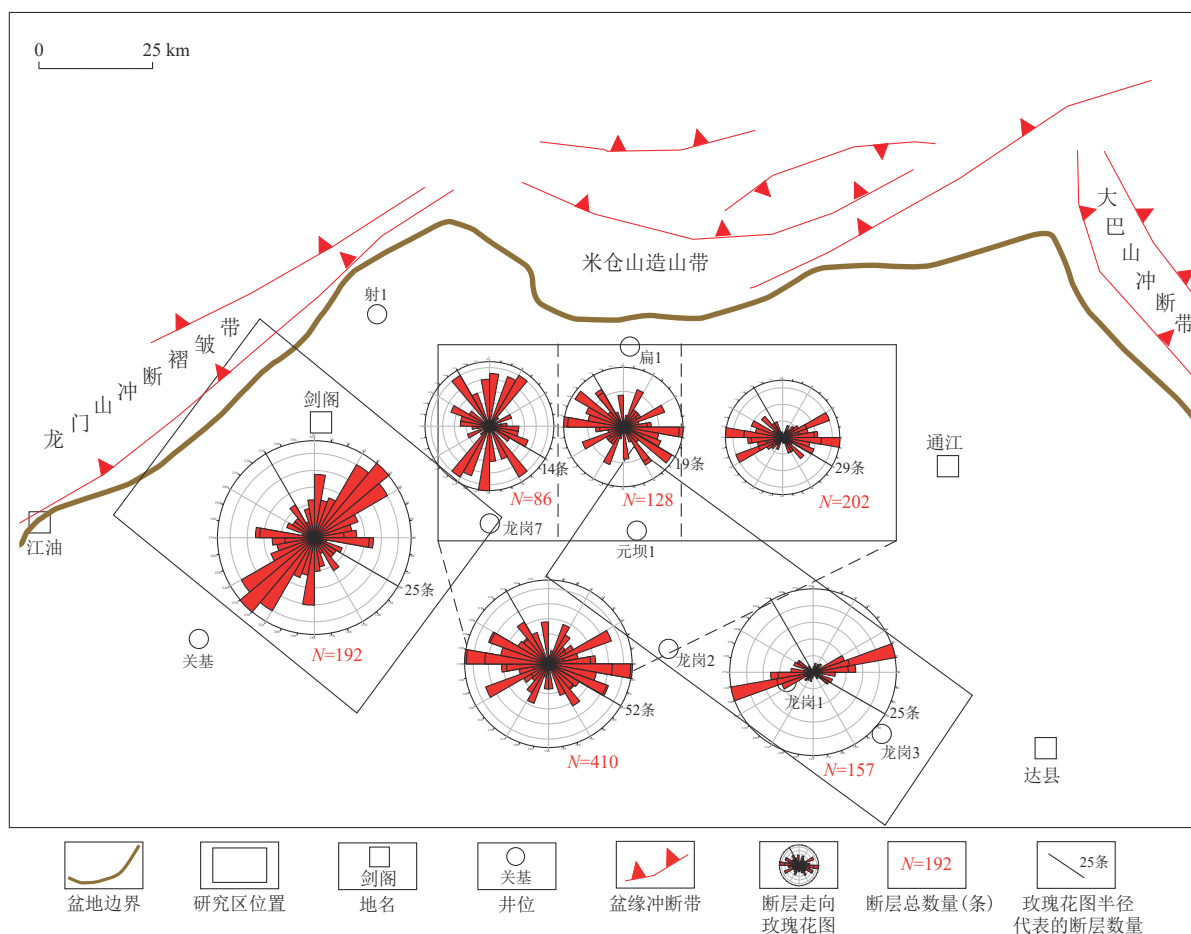


图5 川西北不同地区侏罗系沙溪庙组正断层走向玫瑰花图

Fig. 5 Statistical map of normal fault strikes of the Jurassic normal faults in the Shaximiao Formation in different areas of the northwestern Sichuan Basin

构造已有研究,在该背景下外弧岩层相对伸展变长,内弧岩层相对缩短挤压,外侧被拉张而内侧受到挤压(图6a)。当地层外弧张力超过地层抗张强度时,将发生张性破裂。在裂缝尺度,褶皱核部及翼部通常发育走向与褶皱枢纽方向平行的纵张节理,节理面常粗糙,延伸不平直,张开度相对剪节理更大,表明为张性破裂^[32-34]。尽管张裂缝与正断层存在尺度差异,但表明了地层弯曲相关的张应变的存在。

而在断裂尺度,也有研究发现类似断层并称为弯矩正断层^[35]。在西昆仑前陆冲断带固满地区,褶皱两端和中部野外观察到与背斜轴向对应的正断层,可见垂向擦痕。弯矩断层主要是调节层面的拉长或缩短^[36],由于外弧张应变大,向下接近中和面的应变接近于零,因此正断层多上段断距相对较大,而向下接近沙溪庙组底部断距基本消失。Livio等^[37]利用沙箱物理模拟方法模拟了地层弯曲过程中弯矩正断层的形态(图6b),模拟结果中断裂体系以两条或多条高陡、对倾的正断层组成的地堑为特征,与地震资料所刻画的

侏罗系正断层基本一致。同时反映弯矩正断层的发育并不需要地层具有较大的曲率。

对于研究区侏罗系而言,在周缘冲断带挤压背景下,盆内地层发育两个不同尺度的褶皱弯曲。首先是前缘隆起所反映的地层大范围的褶皱变形,这类变形范围大,地层曲率相对较小。从地震解译结果来看,正断层广泛而均匀分布,与区域整体地层形态一致,因此地层大范围隆起或者挠曲造成的拉张是造成正断层发育的主要因素。另一个尺度是局部褶皱变形(断层滑脱褶皱等),图2b和图4b中的侏罗系背斜多为受中、下三叠统嘉陵江组滑脱层控制的断层滑脱褶皱,构造幅度大、形态紧闭,但正断层的分布不受背斜范围局限,表明这类变形尽管曲率更大但不是正断层发育的主控因素,其原因在于大量逆断层的发育以及沿断层的滑动是地层变形的主要方式。但由于这两种尺度的褶皱变形的来源都是盆缘冲断变形,因此其共同发育并方向一致。

侏罗系正断层实例进一步完善了弯矩断层模型中

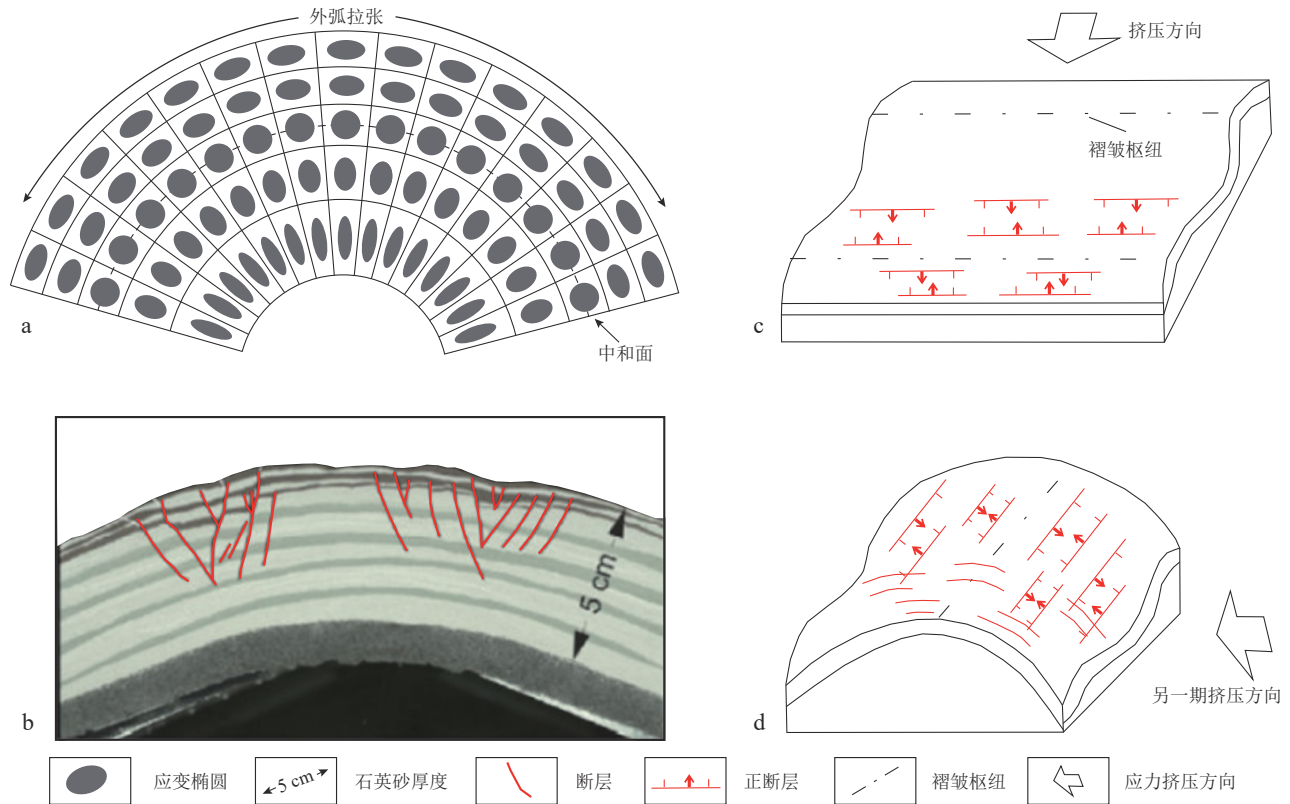


图6 川西北侏罗系正断层形成机制示意图

Fig. 6 Schematic diagram showing the genetic mechanisms of the Jurassic normal faults in the northwestern Sichuan Basin

a. 褶皱过程中岩层应变分布模式(据文献[31]修改); b. 物理模拟中弯矩正断层发育特征(据文献[37]); c, d. 多期挤压背景下正断层发育模式示意图

断裂-应变模式认识。川北不同区块侏罗系正断层均显示出均匀或者弥散性的分布,表明地层弯曲过程中岩层外弧的张应变是均匀分布的,通过在大量分散的位置分别发育地堑结构来协调地层的长度变化,这与区域拉张应力场下集中发育的大规模正断层或者延伸较长的裂谷结构具有明显不同。另外就多次挤压过程中的断裂叠加改造而言,由于弯矩正断层本身延伸较短、张应变局限于下侏罗统和遂宁组底界之间、以及张应变方向不一致,后一期的弯矩变形并不造成已经存在的正断层活化,而是发育新方向上的弯矩正断层。但由于地层发生了另一个方向上的弯曲(图6c, d),原本平直的延伸方向受到改造,这也是部分正断层在地震相干体切片上呈弧形延伸的原因。

4.2 地质演化过程

基于以上研究,建立了川北地区侏罗系正断层发育的地质过程,但由于不同期次断层之间没有明显交切关系,而且在贯穿地层上也基本一致,断裂发育期次的判识难度较大。演化过程推断主要依据两方面证据:①正断层方向与当期冲断带挤压方向垂直,研

究区周缘龙门山-米仓山-大巴山冲断带的活动过程已有大量研究,可以据此对相应正断层的活动时间进行判识;②正断层与当期地层弯曲变形方向相关,可以通过不同方向构造之间的叠加改造来判识断层的先后期次。

北东走向正断层的形成受龙门山冲断带演化控制,主要形成于晚侏罗世—早白垩世。该时期川西北地区龙门山构造急剧活化,山前形成强烈拗陷^[38]。北西-南东走向拗陷发育导致盆地方向地层发生弯曲,形成北东走向正断层,该过程影响范围较大,苍溪至龙岗地区均有发育,远离龙门山方向上断层逐渐减少。新生代龙门山北段存在再次活化,以往认为此阶段以整体抬升为主,褶皱变形相对较弱,但苍溪—元坝地区近南北向正断层以及南北向构造轴迹指示此阶段可能存在局部褶皱变形。

早白垩世晚期,是米仓山前地区近东西向正断层的发育时期。该时期米仓山冲断带造成的南北向挤压向盆地方向扩展,但传播仅至米仓山冲断带前缘。该过程导致米仓山前发育少量近东西向正断层,在距离较远的龙岗地区则不发育近东西向正断层,现今该

地区侏罗系鲜见近东西向构造,也表明其形成期次较早。

白垩纪晚期,南大巴山构造带正在经历强烈的陆内造山作用,受北东-南西向挤压控制,发育一系列北西-南东走向的褶皱-冲断构造。该过程造成侏罗系发育北西走向正断层,在元坝-河坝地区东部较多发育了北西走向正断层,并保留了北西走向的构造轴迹(后期被北东东走向构造改造),但向西至苍溪地区、向南至龙岗地区则发育不明显。

始新世-中新世,北东东向正断层广泛发育。青藏高原快速隆升并向东推进,米仓山受其影响产生北北西的挤压。该过程影响范围较大,东至龙岗地区形成了侏罗系现今北东东走向的斜坡区。以北东东为轴向的整体隆起弯曲导致了从米仓山前至龙岗地区发育了北东东向正断层。

渐新世-中新世,大巴山构造带再次活动,在盆内形成一系列北西走向褶皱。前人研究利用磷灰石裂变径迹对盆地内变形传播过程进行限定^[39],认为约33~12 Ma才影响到宣汉-达县地区。该过程向南传播,在龙岗地区形成北西走向褶皱,改造侏罗系原有北东东走向构造形态,并发育北西西走向正断层。

总体来说,侏罗系正断层是燕山期以来盆地内对龙门山-米仓山-大巴山陆内造山运动的响应结果,在多期、多向构造挤压作用下,构造叠加区形成了看似杂乱无序、实际分组明确的复杂正断层组合。以往考虑盆缘挤压应力对盆内断裂系统的控制,多从应力场角度出发,认为应发育纯剪剪切模式下的共轭断裂或者简单剪切模式下的走滑体系。侏罗系正断层的现象则反映在存在褶皱变形的条件下,挤压应力并不直接形成这两类断裂,而是以褶皱伴生的断裂系统为主。

5 结论

1) 川西北地区侏罗系正断层,以两条或多条对倾正断层组成的地堑结构为特征,在不同构造位置的区块中,其剖面特征基本一致。不同区块中正断层走向和分组具有明显差异,表现出与地层构造形态和所处构造位置具有明显的相关性。

2) 正断层的形成机制为挤压背景下岩层弯曲形成的张应变,张应变在平面上具有均匀分散的展布特征,形成了大量小断距的地堑结构。正断层的发育不是挤压应力场的直接结果,而是挤压背景下褶皱变形的伴生构造。

3) 川西北地区长期处于龙门山、米仓山和大巴山冲断带控制下的前缘隆起部位,经历了燕山期-喜马拉雅期多期次、多方向的构造叠加,形成了构造叠加区复杂的正断层组合。

参 考 文 献

- [1] WU Xiaoqi, YANG Jun, WANG Ping, et al. Gas source of the Middle Jurassic Shaximiao Formation in the Zhongjiang large gas field of Western Sichuan Depression: Constraints from geochemical characteristics of light hydrocarbons [J]. *Energy Geoscience*, 2024, 5(2): 100263.
- [2] 方锐, 蒋裕强, 杨长城, 等. 四川盆地侏罗系凉高山组不同岩性组合页岩油赋存状态及可动性[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(3): 752-769.
FANG Rui, JIANG Yuqiang, YANG Changcheng, et al. Occurrence states and mobility of shale oil in different lithologic assemblages in the Jurassic Lianggaoshan Formation, Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(3): 752-769.
- [3] 刘景东, 任成刚, 王小娟, 等. 川中地区中侏罗统沙溪庙组断层输导有效性定量评价[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(6): 1705-1719.
LIU Jingdong, REN Chenggang, WANG Xiaojuan, et al. Quantitative assessment of hydrocarbon transport effectiveness along faults in the Middle Jurassic Shaximiao Formation, central Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(6): 1705-1719.
- [4] 陈冬霞, 王雷, 庞雄奇, 等. 断裂对川西坳陷致密砂岩气藏天然气运聚的控制作用[J]. *现代地质*, 2013, 27(5): 1137-1146.
CHEN Dongxia, WANG Lei, PANG Xiongqi, et al. The controlling of fault on the tight sandstone gas migration and accumulation in west Sichuan Depression[J]. *Geoscience*, 2013, 27(5): 1137-1146.
- [5] 李忠平, 冉令波, 黎华继, 等. 窄河道远源致密砂岩气藏断层特征及天然气富集规律——以四川盆地中江气田侏罗系沙溪庙组气藏为例[J]. *天然气工业*, 2016, 36(7): 1-7.
LI Zhongping, RAN Lingbo, LI Huaji, et al. Fault features and enrichment laws of narrow-channel distal tight sandstone gas reservoirs: A case study of the Jurassic Shaximiao Fm gas reservoir in the Zhongjiang Gas Field, Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2016, 36(7): 1-7.
- [6] 曾焱, 黎华继, 周文雅, 等. 川西坳陷东坡中江气田沙溪庙组复杂“窄”河道致密砂岩气藏高产富集规律[J]. *天然气勘探与开发*, 2017, 40(4): 1-8.
ZENG Yan, LI Huaji, ZHOU Wenya, et al. High-yield enrichment laws of Shaximiao Formation tight sandstone gas reservoir of complex “narrow” channel in Zhongjiang Gas Field, in the eastern slope of west Sichuan Depression[J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2017, 40(4): 1-8.

- [7] 张本健, 潘珂, 吴长江, 等. 四川盆地金秋气田侏罗系沙溪庙组多期砂组天然气复合成藏机理及模式[J]. 天然气工业, 2022, 42(1): 51–61.
- ZHANG Benjian, PAN Ke, WU Changjiang, et al. Compound gas accumulation mechanism and model of Jurassic Shaximiao Formation multi-stage sandstone formations in Jinqiu Gas Field of the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(1): 51–61.
- [8] 张道伟, 杨雨. 四川盆地陆相致密砂岩气勘探潜力与发展方向[J]. 天然气工业, 2022, 42(1): 1–11.
- ZHANG Daowei, YANG Yu. Exploration potential and development direction of continental tight sandstone gas in the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(1): 1–11.
- [9] 苏楠, 陈竹新, 杨威, 等. 川中北部侏罗系正断层特征及有利勘探方向[J]. 天然气地球科学, 2023, 34(9): 1581–1594.
- SU Nan, CHEN Zhuxin, YANG Wei, et al. Features of normal faults in Jurassic strata in northern central Sichuan Basin and favorable exploration direction [J]. Natural Gas Geoscience, 2023, 34(9): 1581–1594.
- [10] 贾东, 陈竹新, 贾承造, 等. 龙门山前陆褶皱冲断带构造解析与川西前陆盆地的发育[J]. 高校地质学报, 2003, 9(3): 402–410.
- JIA Dong, CHEN Zhuxin, JIA Chengzao, et al. Structural features of the Longmenshan fold and thrust belt and development of the western Sichuan foreland basin, Central China [J]. Geological Journal of China Universities, 2003, 9(3): 402–410.
- [11] 陈竹新, 李本亮, 贾东, 等. 龙门山冲断带北段前缘带新生代构造变形[J]. 地质学报, 2008, 82(9): 1178–1185.
- CHEN Zhuxin, LI Benliang, JIA Dong, et al. The Cenozoic structural deformation in the northern Longmenshan front belt [J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(9): 1178–1185.
- [12] 魏国齐, 贾东, 杨威, 等. 四川盆地构造特征与油气[M]. 北京: 科学出版社, 2019: 175–190.
- WEI Guoqi, JIA Dong, YANG Wei, et al. Structural characteristics and oil and gas in the Sichuan Basin [M]. Beijing: Science Press, 2019: 175–190.
- [13] 常远, 许长海, REINERS P W, 等. 米仓山—汉南隆起白垩纪以来的剥露作用: 磷灰石(U-Th)/He年龄记录[J]. 地球物理学报, 2010, 53(4): 912–919.
- CHANG Yuan, XU Changhai, REINERS P W, et al. The exhumation evolution of the Micang Shan–Hannan uplift since Cretaceous: Evidence from apatite (U-Th)/He dating [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(4): 912–919.
- [14] 田涛涛, 朱传庆, 徐明, 等. 白垩纪以来米仓山—汉南穹窿剥蚀过程及其构造意义: 磷灰石裂变径迹的证据[J]. 地球物理学报, 2010, 53(4): 920–930.
- TIAN Yuntao, ZHU Chuanqing, XU Ming, et al. Exhumation history of the Micangshan–Hannan dome since Cretaceous and its tectonic significance: Evidences from apatite fission track analysis [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(4): 920–930.
- [15] YANG Zhao, RATSCHBACHER L, JONCKHEERE R, et al. Late-stage foreland growth of China's largest orogens (Qinling, Tibet): Evidence from the Hannan–Micang crystalline massifs and the northern Sichuan Basin, central China [J]. Lithosphere, 2013, 5(4): 420–437.
- [16] 李智武. 中-新生代大巴山前陆盆地-冲断带的形成演化[D]. 成都: 成都理工大学, 2006.
- LI Zhiwu. Meso-Cenozoic evolution of Dabashan foreland basin-thrust belt, central China [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2006.
- [17] 张岳桥, 施炜, 李建华, 等. 大巴山前陆弧形构造带形成机理分析[J]. 地质学报, 2010, 84(9): 1300–1315.
- ZHANG Yueqiao, SHI Wei, LI Jianhua, et al. Formation mechanism of the Dabashan foreland arc-shaped structural belt [J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(9): 1300–1315.
- [18] WANG Ruirui, XU Zhiqin, SANTOSH M, et al. Formation of Dabashan arcuate structures: Constraints from Mesozoic basement deformation in South Qinling Orogen, China [J]. Journal of Structural Geology, 2019, 118: 135–149.
- [19] 胡迪, 沈传波, 刘泽阳. 川东北地区埋藏-剥露历史分析——来自盆地模拟和热年代的制约[J]. 大地构造与成矿学, 2016, 40(6): 1145–1153.
- HU Di, SHEN Chuanbo, LIU Zeyang. Basin modeling and thermochronological constraints on the burial and denudational history of the northeast Sichuan Basin [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2016, 40(6): 1145–1153.
- [20] 陈龙博, 何登发, 王贝, 等. 川东北地区通南巴背斜中三叠世以来构造变形时间厘定及其地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 2017, 41(3): 433–445.
- CHEN Longbo, HE Dengfa, WANG Bei, et al. Dating the tectonic deformation since the Middle Triassic for the Tongnanba anticline in the northeastern Sichuan Basin and its geological implications [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2017, 41(3): 433–445.
- [21] SHEN Chuanbo, MEI Lianfu, XU Sihuang. Fission track dating of Mesozoic sandstones and its tectonic significance in the eastern Sichuan Basin, China [J]. Radiation Measurements, 2009, 44(9/10): 945–949.
- [22] YANG Zhao, SHEN Chuanbo, RATSCHBACHER L, et al. Sichuan Basin and beyond: Eastward foreland growth of the Tibetan Plateau from an integration of Late Cretaceous–Cenozoic fission track and (U-Th)/He ages of the eastern Tibetan Plateau, Qinling, and Daba Shan [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2017, 122(6): 4712–4740.
- [23] ISSOUFOU ABOUBACAR M S, CAI Zhongxian, HAROUNA M, et al. Thermo-tectonic history of the northeast Sichuan Basin, Southwest China, using apatite fission-track analysis, vitrinite reflectance, and basin modelling: Implications for hydrocarbon

- prospectivity[J]. *Geological Journal*, 2020, 55(9): 6049–6065.
- [24] 杜思清, 魏显贵, 刘援朝, 等. 汉南-米仓山区叠加东西向隆坳的北东向推覆构造[J]. *成都理工大学学报*, 1998, 25(3): 369–374.
- DU Siqing, WEI Xiangui, LIU Yuanchao, et al. The NE-SW nappe tectonic of superposed e w structure in Hannan-Micangshan area[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 1998, 25(3): 369–374.
- [25] 魏显贵, 杜思清, 何政伟, 等. 米仓山地区构造演化[J]. *矿物岩石*, 1997, 17(增刊1): 110–116.
- WEI Xiangui, DU Siqing, HE Zhengwei, et al. The tectonic evolution of Micangshan area [J]. *Mineralogy and Petrology*, 1997, 17(S1): 110–116.
- [26] 吴德超, 魏显贵, 杜思清, 等. 米仓山叠加型推覆构造几何结构及演化[J]. *矿物岩石*, 1998, 18(增刊1): 22–26.
- WU Dechao, WEI Xiangui, DU Siqing, et al. The geometrical texture and structural evolution of Micangshan superposed nappe structure[J]. *Mineralogy and Petrology*, 1998, 18(S1): 22–26.
- [27] 孙东. 米仓山构造带构造特征及中—新生代构造演化[D]. 成都: 成都理工大学, 2011.
- SUN Dong. The structural character and Meso-Cenozoic evolution of Micang Mountain Structural Zone, northern Sichuan Basin, China [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011.
- [28] 朱晨曦. 米仓山-大巴山冲断带构造变形与演化研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2021.
- ZHU Chenxi. Research on structural deformation and evolution of the Micang Shan-Daba Shan thrust belt [D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2021.
- [29] SU Nan, ZOU Lejun, SHEN Xiaohua, et al. Fracture patterns in successive folding in the western Sichuan Basin, China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 81: 65–76.
- [30] SU Nan, ZOU Lejun, SHEN Xiaohua, et al. Identification of fracture development period and stress field analysis based on fracture fabrics in tectonic superposition areas [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2014, 7(10): 3983–3994.
- [31] RAMSAY J G, HUBER M I. Folds and fractures[C]//RAMSAY J G, HUBER M I. *The Techniques of Modern Structural Geology*. London: Academic Press, 1987: 381.
- [32] 苏楠. 基于节理组构的应变分析及其在碎屑岩褶皱中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- SU Nan. Strain analysis based on fracture fabrics and its application in folds in clastic rock zone [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [33] ENGELDER T, PEACOCK D C P. Joint development normal to regional compression during flexural-flow folding: The Lillstock buttress anticline, Somerset, England [J]. *Journal of Structural Geology*, 2001, 23(2/3): 259–277.
- [34] SMART K J, FERRILL D A, MORRIS A P. Impact of interlayer slip on fracture prediction from geomechanical models of fault-related folds[J]. *AAPG Bulletin*, 2009, 93(11): 1447–1458.
- [35] 许建红. 西昆仑前陆冲断带固满褶皱的断弯褶皱变形、弯矩正断层作用与强震[D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2022.
- XU Jianhong. Guman fault-bending folding and bending-moment normal faulting and related strong earthquake in the western Kunlun foreland basin [D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administrator, 2022.
- [36] BURBANK D W, ANDERSON R S. *Tectonic geomorphology* [M]. 2nd ed. Chichester: Wiley-Blackwell, 2012.
- [37] LIVIO F, KETTERMANN M, REICHERTER K, et al. Growth of bending-moment faults due to progressive folding: Insights from sandbox models and paleoseismological implications [J]. *Geomorphology*, 2019, 326: 152–166.
- [38] 冉崎, 雷程, 陈康, 等. 四川盆地西北地区构造变形特征、演化及油气地质意义[J]. *地质科学*, 2023, 58(1): 18–35.
- RAN Qi, LEI Cheng, CHEN Kang, et al. Structural styles, evolution and their oil-gas geological significance in the northwestern Sichuan Basin [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2023, 58(1): 18–35.
- [39] 沈传波, 梅廉夫, 汤济广, 等. 大巴山逆冲推覆带构造扩展变形的年代学制约[J]. *原子能科学技术*, 2008, 42(6): 574–576.
- SHEN Chuanbo, MEI Lianfu, TANG Jiguang, et al. Geochronology evidences for tectonic deformation of Dabashan fold-thrust belt in central China [J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2008, 42(6): 574–576.

(编辑 孙川翔)