

文章编号:0253-9985(2008)06-0740-08

麻江地区节理发育特征及对应力场转换的指示

董立¹, 汤良杰², 卢雪梅¹, 李 仓³

(1. 中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石油大学 资源与信息学院, 北京 102249;
3. 中海油能源发展股份有限公司 监督监理技术分公司, 天津 300452)

摘要: 贵州麻江地区发育的麻江古油藏是我国南方海相残留单元中特大型古油藏之一。该地区受多期构造运动的影响, 具有复杂的构造演化过程, 岩层中发育大量节理。节理是地表岩石经历多期构造演化和多期构造应力场作用下的最终表现, 而它作为应力场特征的敏感示踪标志, 可用来恢复应力场的状态及其演化(转换)过程。通过对麻江地区不同地层中节理的实地测量, 统计分析了节理性质、产状以及几何样式等; 依据节理交切关系及其与断层的切割关系, 并结合区域地质背景, 认为麻江地区主要发育五期节理, 由老到新依次为 NEE-SE 向早期平面 X 型共轭剪节理、SEE-NNE 向 X 型共轭剪节理、NE 向节理、SSE 向节理和近 EW 向节理。这五期节理分别是都匀运动、广西运动早期、广西运动晚期、印支运动和燕山运动的产物。最后依据节理产状要素反演了每期构造应力场, 计算结果表明麻江地区主压应力场依次发生了 SEE-SE-SSE-EW 的顺时针方向的转换。

关键词: 节理; 古应力场; 麻江古油藏; 麻江地区

中图分类号: TE121.1

文献标识码: A

Joint development features and their functions as indicators for stress field transformation in the Majiang area

Dong Li¹, Tang Liangjie², Lu Xuemei¹, Li Cang³

(1. SINOPEC Petroleum Exploration and Production Research Institute, Beijing 100083, China;
2. Faculty of Natural Resource & Information Technology, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;
3. Technology Supervision Division, CNOOC Energy Development Company Ltd., Tianjin 300452, China)

Abstract: The Majiang paleo-reservoir of hydrocarbon formed in the Majiang area, Guizhou Province, is one of the large-scale paleo-reservoirs in the residual units of marine strata in southern China. Affected by multi-stages of tectonic movements and experiencing complicated tectonic evolution processes, a large amount of joints were developed in the strata in the area. Joints are the final representation of surface rocks being reshaped and reformed by multi-stages of tectonic evolution and stress fields, and can be used to reconstruct stress field status

and finally EW.

Key words: joint; palaeo-stress-field; Majiang reservoir; Majiang area

节理是地壳上部岩层中广泛发育的一种脆性构造,是地表岩石在经历多期构造演化和相应构造应力场作用下的最终表现。利用节理,尤其是共轭节理判断主应力方向,分析构造应力场是最可靠、实用的方法,利用节理组在区域上广泛分布并具备一致方位的重要特征,可以进行区域应力场特征的研究^[1-4]。分析区域构造应力场特征和它的变化规律,对深入认识区域构造运动演化过程中的应力状态、构造变形特征及其成因是极其重要的。从工作区不同地层中所测得的节理数据,将直接反映工作区不同构造运动时期构造应力场的信息^[5]。

贵州省麻江地区发育的麻江古油藏长期以来被认为是我国南方海相残留单元中特大的古油藏之一,初算奥陶系红花园组(O_1h)古岩溶储层及志留系翁项群三段($S_{1-2}wn^3$)砂岩储层原始石油储量达 15.08×10^8 t。对麻江古油藏进行详细解剖,阐明多期构造运动对它的保存和破坏的影响,将会为我国南方古老的海相碳酸盐岩的油气勘探提供可靠的类比依据。前人围绕麻江古油藏的成藏期次与破坏时间做了众多研究工作,但尚无统一认识,众说纷纭^[6-8]。本文将麻江地区发育的麻江古油藏及其周缘为重点研究区域,从发育在元古代、古生代、中生代地层中的节理的实地观测入手,在详细分析其性质、方位、几何样式和序列关系的基础上,探讨节理对区域应力场的指示意义和应力场可能的转换过程,期冀为古油藏的构造演化提供基础资料。

1 地质背景

中国南方海相含油气盆地发展演化受控于特提斯域构造演化,与原特提斯域、古特提斯域和新特提斯域的发展演化密切相关,在原特提斯和古特提斯阶段相应形成“下组合含油气盆地”和“中组合含油气盆地”,在新特提斯阶段则主要接受后期改造作用^[9-13]。贵州麻江地区的麻江古油藏是我国南方海相残留单元中最大的“下组合”油气藏,若按照特提斯域南北分带、东西分段模式进行划分,

它位于特提斯构造带的北带、东段;从中国南方区域构造背景来看,研究区位于上扬子准地台南缘,雪峰隆起的西南缘,属于上扬子准地台与华南褶皱系的过渡地带(图1)。

麻江古油藏主体为麻江背斜,东、西分别包括舟溪向斜和都匀向斜,轴向近南北,轴部宽缓,向南变窄倾没,向北变宽翘起呈鼻状,北端被陕班(贵定-凯里)断层横切。麻江古油藏经历了多期的构造发展史,加里东晚期发生了都匀运动,麻江地区形成宽缓的古凸起;加里东末期的广西运动使麻江古凸起在都匀运动雏型的基础上,进一步发展、改造;在海西期—印支期主要为连续沉积;燕山运动是自加里运动之后,在贵州表现最为强烈的地壳运动,深刻地改造了晚元古代晚期以来各构造期所形成的古构造型式,奠定了现今地表构造的格局;喜马拉雅期构造运动以强烈的抬升剥蚀为特征,在燕山期构造格局基础之上继续叠加改造,使麻江古油藏呈现今日的地貌景观。本

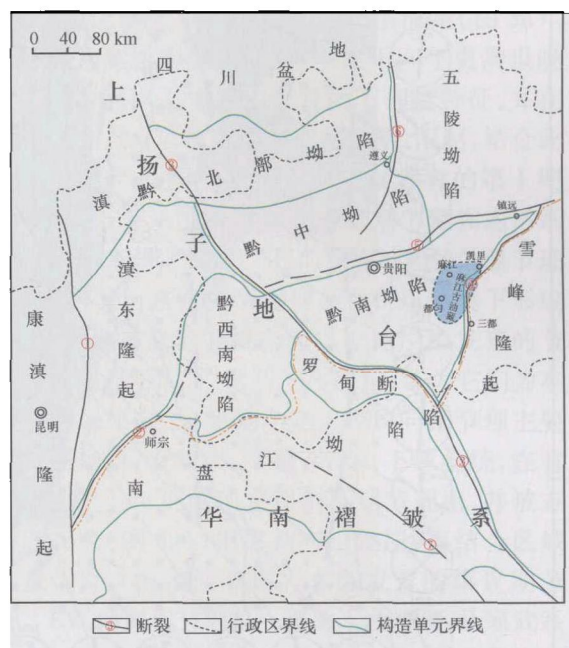


图1 研究区构造位置示意图

Fig. 1 Sketch map showing the tectonic location of the study area

- ① 小江断裂; ② 师宗-弥勒断裂; ③ 姚安-都安断裂; ④ 三都断裂;
⑤ 贵阳-镇江断裂; ⑥ 遵义断裂; ⑦ 右江断裂

区出露的时代最老地层为上板溪群清水江组(Pt_2q),此外,震旦系,寒武系,中、下奥陶统,中、下志留统,中、上泥盆统、石炭系、二叠系、下三叠统均有出露。其中,震旦系主要为一套白云岩,在其底部有一层分布广泛的冰渍砾岩;寒武系碳质泥页岩、灰岩、白云岩均发育,其中渣拉沟组(ϵ_{1z})、牛蹄塘组(ϵ_{1n})、九门冲组(ϵ_{1jm})、变马冲-杷榔组($\epsilon_{1bm} + \epsilon_{1pl}$)是较好的烃源岩;中、下奥陶统主要为溶洞型生物灰岩,是比较重要的储集层;中、下志留统发育泥页岩、粉砂质泥岩、砂岩,它是一套质量较好的直接盖层和区域盖层,同

时其砂岩层是麻江古油藏的主力储层;中、上泥盆统,石炭系,二叠系,中、下三叠统的岩性主要为石英砂岩、灰岩、白云岩、粘土岩等。

2 节理发育特征

通过野外实地测量与观测,共获得了来自45个观测点上千条节理的数据(图2)。这些节理测量点在麻江背斜的核部、东西两翼以及背斜两侧的向斜构造中均有分布;节理在下古生界地层中非常发育,而且节理组较多,在其他新的地层中也

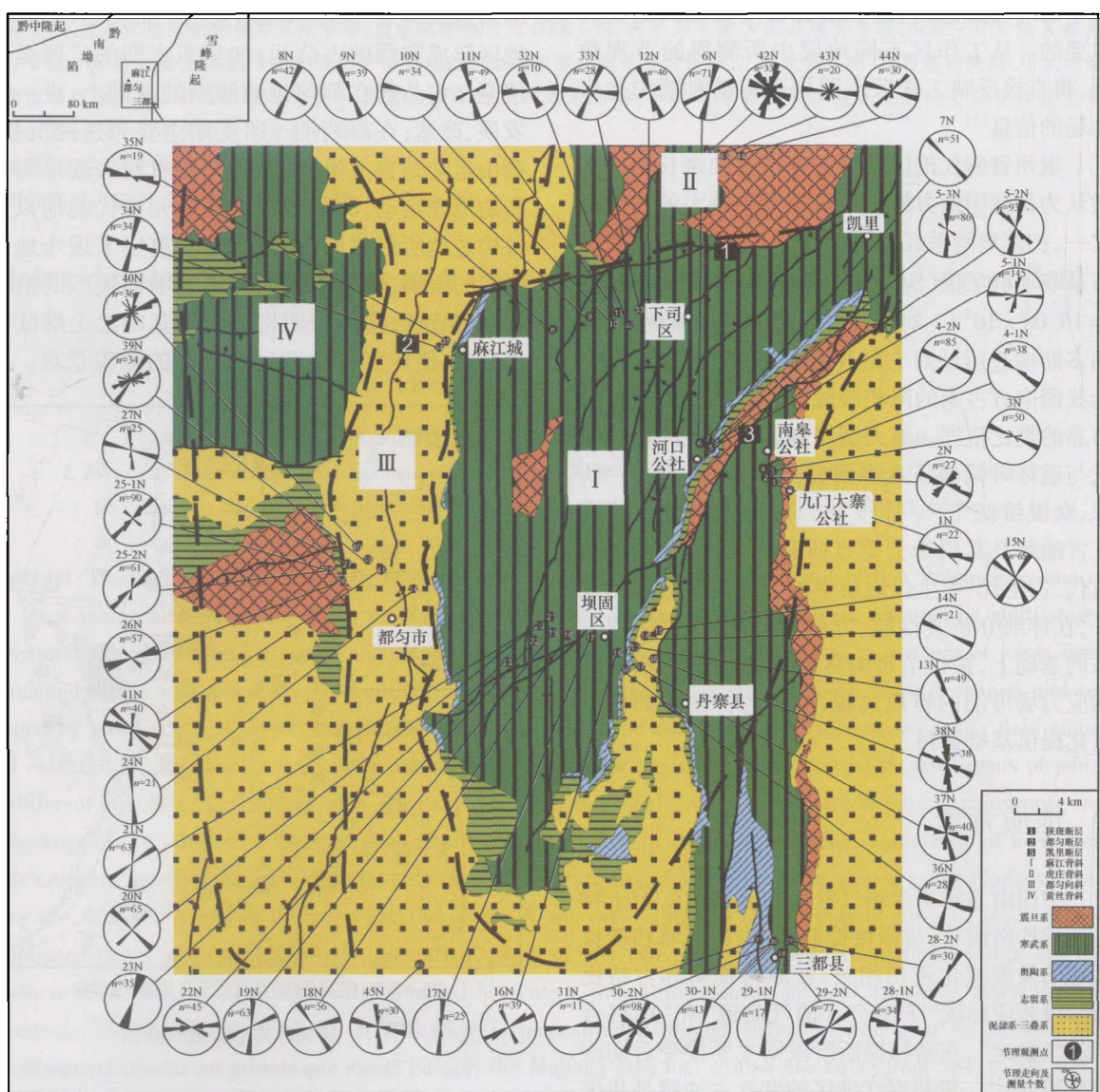


图2 研究区各个观测点节理走向玫瑰图

Fig. 2 Rose diagram showing the joint orientation in all the observation points of the study area

有发育。发育节理的地层,其岩性主要为白云岩、灰岩、泥岩与砂岩。

在岩层近水平的地区进行节理分析,可以直接进行,而不必把岩层校正到水平;在岩层倾斜的地区进行测量,首先要进行倾斜校正^[3,14]。本次分析的数据点多来自倾斜和高陡的岩层,因此需要进行水平校正。具体做法是,面向岩层走向($0^{\circ} \sim 180^{\circ}$),把岩层以走向线为轴朝着和倾向相反的方向旋转与倾角相同的角度(倒转地层除外)。

在本次研究工作中,节理的统计以及制图工作依靠 StereoNett (Version 2.02) 软件来完成,类型识别及相对期次判别主要在野外现场完成。

2.1 节理组的延伸方位

将每个观测点地节理走向玫瑰花图投到区域地质图上(图2),按照节理所发育地层时代由老至新的顺序,麻江地区发育的节理可分为如下5组。

1) NEE-SE 向早期平面 X 共轭剪节理($75^{\circ} \pm 10^{\circ}$ 与 $135^{\circ} \pm 10^{\circ}$)。野外多处见于震旦系至下奥陶统大湾组中(观察点 1, 2, 3, 4, 30, 32, 33, 40 等),每组节理垂直于岩层面,交角近 90° ,节理切割关系清楚(图 3a)。

2) SEE-NNE 向 X 型共轭剪节理($110^{\circ} \pm 10^{\circ}$ 与 $10^{\circ} \pm 10^{\circ}$)。它们的共轭关系在奥陶系大湾组中部比较清晰(观察点 40, 42),地层被切割成众多规则的菱形块体(图 3b),并且在志留系出现的频率非常高。在奥陶系红花园组中(坝固,绿茵桥等地),这两组节理中均含有沥青,在野外观察,沥青是沿着这两组节理向上运移的。

3) NE 向具逆冲趋势的纵节理($50^{\circ} \pm 10^{\circ}$)。此组节理与麻江古背斜轴线有很小的交角,与一些北东向的断层平行,在野外露头上,被后期节理限制、改造,连续性不好。在寒武系至奥陶系中出现的频率很高(图 3c)。

4) SSE 向张节理($170^{\circ} \pm 15^{\circ}$)。主要在泥盆系、石炭系、二叠系、中、下三叠统中测得,如观测点 24, 38, 41, 45 等。此组节理为一组张节理,多被方解石充填(图 3d)。

5) EW 向剪切节理($90^{\circ} \pm 10^{\circ}$)。此组节理是一组透入性节理,从寒武系地层到中、下三叠统均有发育,在泥盆系地层中观察到此组节理面上发

育擦痕,表明节理具有明显的左旋走滑特征,如观测点 41(图 3e)。

2.2 节理组间的序列关系

在一个区域应力场发生更迭转换的地区,节理一般是长期多次构造活动的产物,为了探讨该地区的构造变形史和古构造应力场,常常进行节理分期与配套^[15]。节理组的分期主要依据两个方面,即节理组的交切关系,切割和限制其它节理组的节理形成期次较晚;两组节理相互切错,表明它们是同期形成的;其次是利用与各期次节理有关的地质体,如岩墙、岩脉和其他侵入体均可以用来间断判定节理的形成顺序。此外,分析对比不整合上下岩系中节理的发育情况也有助于判别节理的形成顺序。对于无法用相互切割关系判断节理发育顺序的节理组,结合节理组和断层、褶皱的关系来分析节理组的发育次序。

在麻江地区进行野外实地测量时,发现同一观测点处可见多组不同期次节理共存的现象。NEE-SE 向早期平面 X 共轭剪节理多处见于震旦系至下奥陶统大湾组地层中,节理垂直于岩层面发育,交角近 90° ,节理切割关系清楚(图 3a)。通过野外实地观测,发现它明显不同于奥陶世晚期不整合面以上地层中发育的节理组特征,并在多个观测点可见被后期节理组切割、限制,结合此组节理的产出地层,认为它是本区发育的第 I 期节理组。SEE-NNE 向 X 型共轭剪节理在志留系出现的频率非常高,被 NE 向具逆冲趋势的纵节理切割(图 3f),这两组节理均是在挤压环境下形成的,并与早泥盆世不整合面以上地层中发育的节理特征明显不同,根据其产出层位,认为它们为本区发育的第 II、第 III 期节理。SSE 向张节理主要发育泥盆系、石炭系、二叠系、中、下三叠统,在有些观测点上可观测到它切割早期节理组,并被方解石充填(图 3g),根据其产出地层,再结合区域背景认为这组张性节理为本区发育的第 IV 期节理。EW 向剪切节理是一组透入性节理,从寒武系地层到中、下三叠统均有发育,在泥盆系地层中观察到此组节理面上发育擦痕,表明节理具有明显的左旋走滑特征,在多个观测点可见其切割早期节理组(图 3h),因此它的形成时间最晚,结合区域地质背景认为它为本区发育的第 V 期节理。

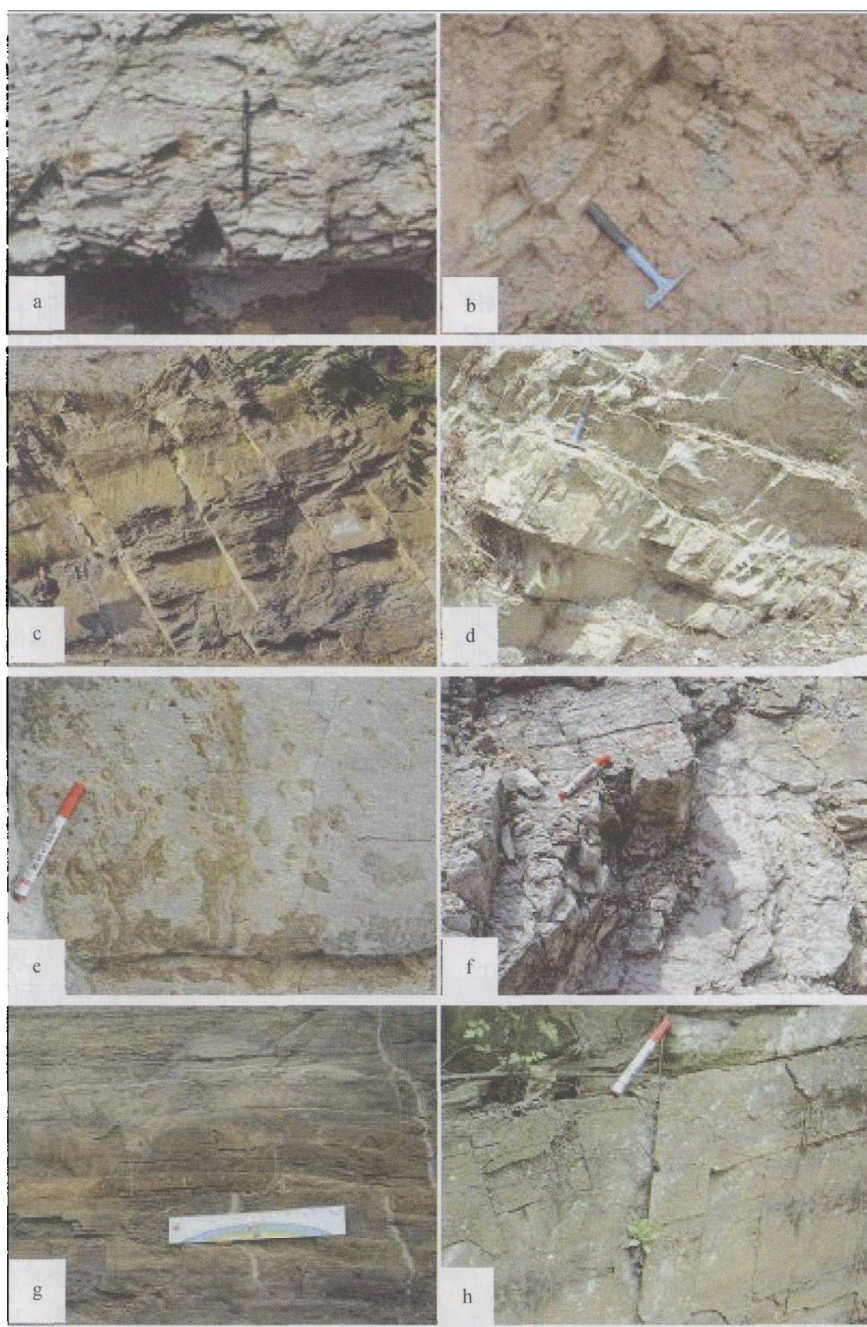


图3 麻江地区节理组及其交切关系照片

Fig. 3 Photos showing joint groups and their intersecting relationships

a. NEE-SE 向早期平面 X 型共轭剪节理, 俯视; b. SEE-NNE 向 X 型共轭剪节理, 俯视; c. NE 向具逆冲趋势的纵节理, 镜头朝 60°; d. SSE 向张节理, 镜头朝 110°; e. EW 向剪节理, 镜头朝 220°; f. SEE-NNE 向 X 型共轭剪节理被 NE 向具逆冲趋势的纵节理切割, 镜头朝 290°; g. SSE 向张节理切割早期节理, 镜头朝 160°; h. EW 向剪节理切割早期节理

2.3 节理组与断层的关系

野外观察测量显示, 在断层附近节理密度显著增大。断层对裂缝的影响主要与断层的力学性

质有关, 其影响大小次序为压扭断层、逆冲断层、走滑断层、正断层^[16]。麻江地区褶皱及逆冲断裂发育, 根据断裂的展布方向, 可将本区发育的断裂分为 5 组, 即北东向断裂、北北东向断裂、北西向

断裂、南北向断裂和东西向断裂。结合区域地质资料、野外地质调查以及前人的研究成果^[8,11],认为这五组断裂分别形成于雪峰期、加里东期、海西期和燕山晚期-喜马拉雅早期。NEE-SE向早期平面X共轭剪节理常与北东向逆冲断裂伴生,如本区著名的三都逆冲断裂,在一些观测点可见被该方向断裂切割的现象。三都断裂作为雪峰古隆起于黔南坳陷的分界线,具有深大断裂的特征,自雪峰期产生后,于加里东晚期及燕山期多次复活。结合产出地层,本期节理可能形成于三都断裂加里东晚期复活之时。SSE向张节理经常与北西向、南北向断层伴生,或者与之平行,或者小角度相交,可见本期节理是海西期拉张作用下的产物。EW向剪切节理平行于东西向逆冲断裂,并切割其他走向的断层,推测其形成与燕山晚期-喜马拉雅早期。

3 节理组动力学成因讨论

根据区域地质背景以及上述节理组形成的先后关系,讨论节理组的动力学成因。

1) NEE-SE向早期平面X共轭节理出现于本区震旦系至下奥陶统中,它们具有相同的方位及应力场,故应该是同期构造运动的产物。据区域地质资料,本区在加里东早期以较稳定的连续沉积为主,而在加里东晚期发生了都匀运动,致使麻江地区形成宽缓的古凸起。从此组共轭节理反映的是平面应变这个角度来看,这组节理应当是由都匀运动形成的,而挤压应力则可能直接来自于雪峰古隆起自东向西的逆冲推覆运动。

2) SEE-NNE向X型共轭剪节理在志留系地层中出现的频率非常高,在奥陶系大湾组中部它们的切割关系最清晰(观察点40,42)。区域资料表明本区在志留纪晚期发生了波及贵州全省的广西运动,华南洋完成其俯冲、关闭、褶皱的最后阶段,扬子板块和华夏板块发生陆陆碰撞后拼贴成南华陆块。鉴于上述证据,判断此组节理应该是广西运动的产物,并形成于地层褶皱作用的早期,即广西运动的早期,其动力则来源于华夏板块与扬子板块的碰撞。

3) NE向具逆冲趋势的纵节理,其形成应该与地层褶皱作用主期同时或稍后一段时间。根据其发育的地层来看,可判断其应该形成于广西运

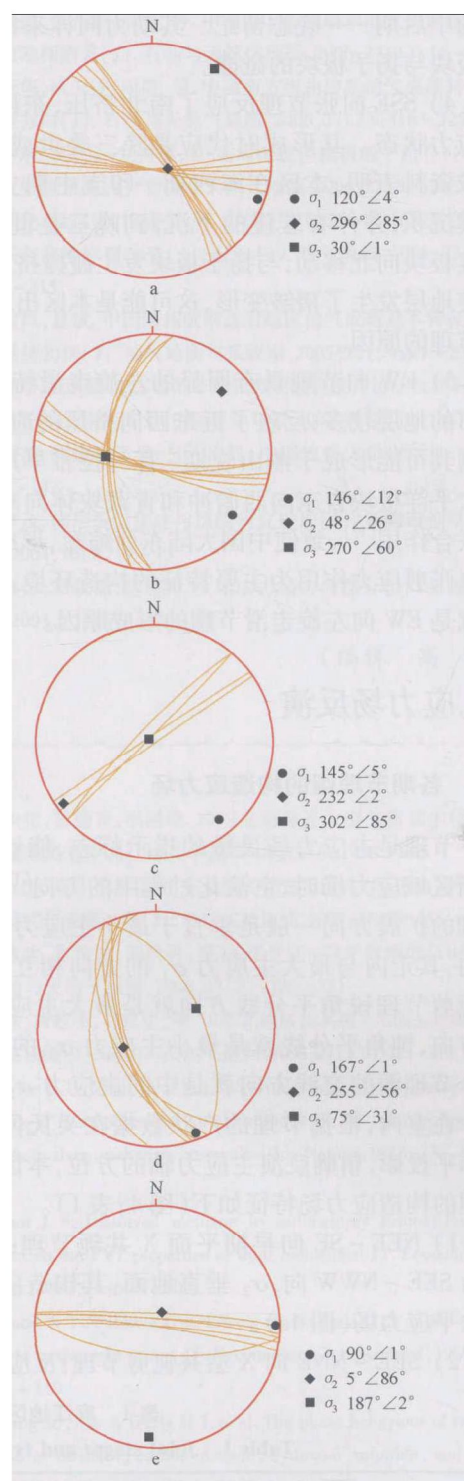


图4 麻江地区5组节理反演的构造应力场

Fig. 4 Tectonic stress field constructed through inversion of five joint groups in the Majiang area

a. NEE-SEE向早期平面X型共轭剪节理应力场;b. SEE-NNE向X型共轭剪节理应力场;c. NE向具逆冲趋势的纵节理应力场;d. SSE向张节理应力场;e. EW向剪切节理应力场

动的中后期——晚志留纪。其动力同样来源于华夏板块与扬子板块的碰撞。

4) SSE 向张节理反应了南北挤压,东西拉张的应力状态。其形成时代应是晚三叠世或以后。区域资料表明,本区在海西期—印支中期主要为连续沉积,并伴有缓慢的下沉,到晚三叠世,由于印度板块向北移动,与扬子板块发生碰撞挤压^[17],致使地层发生了褶皱变形,这可能是本区出现 SSE 向节理的原因。

5) EW 向节理具有明显的左旋走滑特征,其分布的地层较多,反映了近东西向挤压的应力场,推测其可能形成于燕山晚期—喜马拉雅早期。由于太平洋板块自东向西俯冲和青藏块体向东推挤的联合作用^[17],致使中国大陆东西缩短,形成了一种以张剪应力作用为主要特征的构造环境。这可能就是 EW 向左旋走滑节理的形成原因。

4 应力场反演

4.1 各期节理组的构造应力场

节理是古应力场灵敏的指示标志,能够用于推断区域应力场时、空演化过程中的方向^[17]。张节理的扩展方向一般是垂直于最小主应力 σ_3 的方向,其走向与最大主应力 σ_1 的方向相互平行;共轭剪节理锐角平分线方向就是最大主应力 σ_1 的方向,钝角平分线就是最小主应力 σ_3 的方向,两个节理面的交线方向就是中间主应力 σ_2 的方向。在室内,根据节理的产状数据在吴氏网上进行赤平投影,精确反演主应力轴的方位,本区 5 组节理的构造应力场特征如下(图 4;表 1)。

1) NEE—SE 向早期平面 X 共轭节理: σ_1 方向为 SEE—NWW 向, σ_2 垂直地面,其构造应力场为水平应力场(图 4a)。

2) SEE—NNE 向 X 型共轭剪节理:反应的 σ_1

为 SE—NW 向, σ_2 为 NE—SW 向, σ_3 与水平面倾角很大,但未垂直(图 4b)。

3) NE 向具逆冲趋势的纵节理: σ_1 为 SE—NW 向, σ_2 为 NE—SW 向, σ_3 为铅直方向(图 4c)。

4) SSE 向节理:反应的 σ_1 的方向为 SSE—NNW 向, σ_3 的方向为 NEE—SWW 向,即南北挤压,东西拉张的应力状态(图 4d)。

5) EW 向剪切节理: σ_1 与 σ_3 水平, σ_2 直立,反应的主应力 σ_1 的方向是东西向,并具有明显的左旋走滑特征(图 4e)。

4.2 应力场的转换

区域上广泛分布且方位一致的系统节理是区域构造活动的产物。多组方位不一致的系统节理在一个区域上的出现必然指示该区多期构造活动的叠加,同时也是区域上古应力场变化过程的反映。由上述的分析可知本区发育 5 期节理,每期节理的构造应力场如表 1 所示。通过对比表中的数据,可以发现麻江地区从加里东晚期至燕山晚期—喜马拉雅早期,主压应力场方向(σ_1)发生了顺时针方向的转变,即 SEE—SE—SSE—EW 方向的转变。

5 结论

1) 根据节理优势发育层位、切割关系以及区域构造背景分析,按照从老至新的顺序,将麻江地区发育的节理分为 5 期:NEE—SE 向早期平面 X 型共轭剪节理,SEE—NNE 向 X 型共轭剪节理、NE 向节理、SSE 向节理和近 EW 向节理。

2) 利用节理产状数据,在吴氏网上进行赤平投影,精确反演每期节理的构造应力场,从计算结果可知,麻江地区从加里东晚期至燕山晚期—喜马拉雅早期,主压应力场方向(σ_1)发生了顺时针方向的转变,即 SEE—SE—SSE—EW 方向的转变。

表 1 麻江地区节理期次、节理类型及构造应力场

Table 1 Joint stages and types, and tectonic stress field in the Majiang area

节理期次	节理类型	形成时代	区域应力场		
			σ_1	σ_2	σ_3
I	早期平面 X 节理	O ₂ 末—O ₃	120°∠4°	296°∠85°	30°∠1°
II	SEE 与 NNE 向 X 型剪节理	S ₃ 早期	146°∠12°	48°∠26°	270°∠60°
III	逆冲纵节理	S ₃ 末期	145°∠5°	232°∠2°	302°∠85°
IV	张节理	T ₃ 末期	167°∠1°	255°∠56°	75°∠31°
V	剪切节理	J—K	90°∠1°	5°∠86°	187°∠2°

参考文献

- 1 万天丰. 古构造应力场[M]. 北京:地质出版社,1988. 15~23
- 2 万天丰. 构造应力场研究的新进展[J]. 地学前缘,1995,2(1~2):22~6234
- 3 Whitaker A E, Engelder T. Characterizing stress fields in the upper crust using joint orientation distributions[J]. Journal of Structural Geology, 2005, 27: 1 778 - 1 787
- 4 Eyal Y, Gross M R. Joint development during fluctuation of the regional stress in southern Israel[J]. Journal of Structural Geology, 2001, 23: 279 - 296
- 5 Silliphant L J, Engelder T, Gross M R. The state of stress in the limb of the Split Mountain anticline, Utah: constraints placed by transected joints[J]. Journal of Geology, 2002, 24: 155 - 172
- 6 刘树晖, 胡维元, 邱运鑫. 麻江古油藏翁项群成岩序列时代划分及油源讨论[J]. 石油与天然气地质, 1985, 6(2): 127~139
- 7 武蔚文. 贵州东部若干古油藏的形成和破坏[J]. 贵州地质, 1989, 6(1): 9~23
- 8 田海岸, 胡东风, 郭彤楼, 等. 黔中隆起及其周缘地区海相下组合油气勘探前景[J]. 古地理学报, 2006, 8(4): 509~518
- 9 沃玉进, 肖开华, 周雁, 等. 中国南方海相系油气成藏组合类型与勘探前景[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(1): 11~16
- 10 肖开华, 沃玉进, 周雁, 等. 中国南方海相系油气成藏特点与勘探方向[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(3): 316~325
- 11 李仲东, 罗志立, 刘树根, 等. 雪峰推覆体掩覆的下组合(Z-S)油气资源预测[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(3): 392~398
- 12 吴冲龙, 杜远生, 梅廉夫, 等. 中国南方印支—燕山期复合盆地体系与盆地原型改造[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(3): 305~315
- 13 吕宝凤, 夏斌. 中国海相碳酸盐岩地区油气成藏基本特征及勘探系统初探[J]. 油气地质与采收率, 2005, 12(5): 21~23
- 14 张仲培, 王清晨. 库车坳陷节理和剪切破裂发育特征及其对区域应力场转换的指示[J]. 中国科学 D 辑, 2004, 34(增刊 I): 63~73
- 15 朱志澄. 构造地质学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1999. 128~142
- 16 童亨茂. 储层裂缝描述与预测研究进展[J]. 新疆石油学院学报, 2004, 16(2): 9~13
- 17 谢富仁, 崔效锋, 赵建涛. 全球应力场与构造分析[J]. 地学前缘, 2003, 10(特刊): 22~30
- (编辑 高岩)
- (上接第 739 页)
- 20 Darryl G, Eric W M. Fault and conduit controlled burial dolomitization of the Devonian west-central Alberta Deep Basin[J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 2005, 53: 101~129
- 21 Moore C H. Carbonate diagenesis and porosity[J]. Developments in Sedimentology 46, Elsevier, Amsterdam, 1989, 338
- 22 Adams A E, Mackenzie W S. A colour atlas of carbonate sediments and rocks under the microscope[M]. London: Manson Publishing, 1998. 180
- 23 Bathurst R G C. Carbonate sediments and diagenesis. Developments in Sedimentology 12 (Second Edition) [J]. Amsterdam: Elsevier, 1975. 658
- 24 马永生, 蔡勋育. 四川盆地川东北区二叠系—三叠系天然气勘探成果与前景展望[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(6): 742~750
- 25 马永生, 郭彤楼, 朱光有, 等. 硫化氢对碳酸盐储层溶蚀改造作用的模拟实验证据——以川东飞仙关组为例[J]. 科学通报, 2007, 52(增刊 1): 136~141
- 26 Yang C, Hutcheon I, Krouse H R. Fluid inclusion and stable isotopic studies of thermochemical sulphate reduction from Burnt Timber and Crossfield East gas fields in Alberta, Canada[J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 2001, 49: 149~164
- 27 朱光有, 张水昌, 梁英波, 等. 川东北地区飞仙关组富含 H₂S 天然气 TSR 成因的同位素证据[J]. 中国科学 D 辑, 2005, 35(11): 1 037~1 046
- 28 刘德汉, 肖贤明, 熊永强, 等. 四川东部飞仙关组鲕滩气藏储层含自然硫不混溶包裹体及硫化氢成因研究[J]. 中国科学 D 辑(地球科学), 2006, 36(6): 520~532
- 29 马永生, 蔡勋育, 李国雄. 四川盆地普光大型气藏基本特征及成藏富集规律[J]. 地质学报, 2005, 79(6): 858~865
- 30 马永生, 傅强, 郭彤楼. 川东北地区普光气田长兴—飞仙关气藏成藏模式与成藏过程[J]. 石油实验地质, 2005, 27(5): 455~461
- 31 马永生, 牟传龙, 谭钦银, 等. 关于开江—梁海海槽的认识[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(3): 326~331
- 32 刘殊, 唐建明, 马永生, 等. 川东北地区长兴组—飞仙关组礁滩相储层预测[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(3): 332~339, 347
- 33 Krouse H R, Vial CA, Eliuk L S, et al. Chemical and isotopic evidence of thermochemical sulphate reduction by light hydrocarbon gases in deep carbonate reservoirs[J]. Nature, 1988, 333: 415~419
- 34 Hanor J S. Dissolved methane in sedimentary brines: Potential effect on the PVT properties of fluid inclusions[J]. Economic Geology, 1980, 75: 603~609
- 35 Namot A Y, Gubkina G F. Effects of dissolved H₂S on the solubility of methane in water[J]. Geochemistry International, 1989, 26: 117~119
- 36 Huang SS, Leu A D, Ng H J, et al. The phase behaviour of twomixtures of methane, carbon dioxide, hydrogen sulphide, and water[J]. Fluid Phase Equilibria, 1985, 19: 21~32
- 37 Ehrenberg S N, Nadeau P H. Sandstone vs. carbonate petroleum reservoirs: A global perspective on porosity-depth and porosity-permeability relationships[J]. AAPG Bulletin, 2005, 89(4): 435~445
- (编辑 陈喜禄)