文章编号:1006-6616(2009)03-0289-07

雪峰隆起西南缘古应力特征 及其石油地质意义

崔 ${f w}^{1,2}$,汤良杰^{1,2},王鹏吴^{1,2},郭彤楼³,路兴斌⁴

(1. 中国石油大学盆地与油藏研究中心,北京 102249;2. 油气资源与探测国家重点实验室,北京 102249;
 3. 中国石化南方勘探分公司,成都 610041;4. 德州学院中专部,山东 德州 253023)

摘 要:在野外地质调查、平衡剖面分析的基础上,结合区域构造演化,采用岩石 声发射法对雪峰隆起西南缘的最大古应力进行了恢复,并探讨了古应力大小与油气 成藏破坏的关系。研究结果表明,研究区共经历了5期不同强度的重要构造变革运 动。在早古生代末期和印支期构造运动较弱,声发射法的测量表明古应力值分别为 13.3 MPa和24 MPa,对应于麻江古油藏的主要成藏期。构造运动次数较多或者古 应力值较大的时期,主要对应于麻江古油藏储集层的发育期和油藏大规模破坏期。 晚古生代末期构造活动次数较少,但恢复地古应力值较大,为92.6 MPa;燕山期和 喜马拉雅期经历了多期构造活动,恢复地古应力值为23.3~74.4 MPa。 关键词:声发射;古应力;麻江古油藏;石油地质;雪峰隆起 中图分类号:P542 文献标识码:A

0 引言

构造应力的大小控制了地质体的变形和演化过程,同时也是油气运移、聚集和破坏的主要外部因素和动力^[1]。近年来,许多学者通过各种方法探讨了不同地区的古应力特征及其对油气成藏的影响。丁原辰和邵兆刚^[2,3]提出利用声发射的广义抹不净效应,测定岩石所经历的各主要构造运动期次的最大主应力值,探索三维古构造应力场恢复的新方法。陈志德等^[4]利用声发射法、位错密度法和岩石力学参数等多种方法识别了松辽盆地古龙凹陷内四个应力释放区,预测了裂缝储集层勘探靶区。曾联波等^[5]通过声发射和构造变形分析,结合磁组构分析定量恢复了库车坳陷自中生代以来不同构造期次构造应力场的分布,并对构造应力场的油气运聚效应进行了探讨。张明利等^[6]利用声发射古应力恢复的结果对柴达木盆地成藏期的应力场进行了数值模拟,并对断裂对油气聚集地双重作用进行了探讨。ZENG和 Lf^{7]}通过古应力恢复等方法研究了鄂尔多斯盆地超低渗透率地层中砂岩储集层的裂缝特征。目前,古应力恢复的石油地质意义研究主要集中在成藏方面,而对于古应力对油气藏的破坏作用涉及较少。

收稿日期: 2009-03-29

雪峰隆起西缘分布着9个古生代的古油藏。地球物理、岩相古地理特征和虎庄等残留油 气藏的发现,表明雪峰推覆体前缘下组合中目前可能存在良好油气资源潜力^[8-10]。研究古油 藏的形成与破坏成为目前勘探油气藏的难点。古应力值的大小与古油藏的油气运聚、保存和 破坏存在密切联系。本文旨在通过雪峰隆起西南缘构造古应力的恢复,探讨构造运动期次和 古应力大小对古油藏的形成与破坏的影响。研究区内中、新生代的构造变形事件对早期构造 的强烈改造和叠加,使得构造应力场的恢复相当困难。我们在构造变形分析的基础上,采用 声发射法对古应力进行了恢复。

1 地质背景

研究区位于上扬子地台与华南造山带的结合部位,是黔南坳陷的一部分,东侧与出露元 古宇板溪群的雪峰隆起相邻,西侧为黔中隆起(见图 1)。作为扬子地台的一部分,研究区 在晋宁运动之后形成稳定基底,并开始接受沉积,其后经历了多期构造运动的改造^[11,12]。南 华纪—志留纪雪峰推覆体位于扬子古板块东南缘大陆斜坡上,之后逐步演化为"雪峰古陆"。 加里东期,研究区内的构造线主要为 NNE—SSW 向,表现为阿尔卑斯式褶皱变形和向西北 推覆的近平卧褶皱构造^[11,13]。印支—燕山期,多层次的由东南向西北叠加推覆作用将晚古生 界、中新生界卷入了侏罗山式褶皱构造变形之中,构造线方向主要为 SN,部分呈 NNE—NE 向;此外,在雪峰推覆体的前峰带还覆盖了大片的古生代地层^[10]。喜马拉雅期,研究区发 育典型的走滑断层系和伸展地垒—地堑构造^[11,13]。 现今构造特征主要表现为大量 SN 向的隔



槽式褶皱和逆冲断层组合。逆冲断层主要分布于凯里、玉屏一带,走向 NNE,断面多倾向 东,倾角为 20°~40°,在走向上常分叉或结合,形成了复杂的断裂带^[11]。平面上逆冲断层主 要在向斜的核部发育,在背斜的核部发育为数不多的东西向正断层。雪峰隆起西缘的寒武— 志留系是目前重要的有利区带勘探目的层(见图 1)。凯里—虎庄残余油气藏以及麻江古油 藏、丹寨古油藏和瓮安古油藏的研究表明,雪峰隆起西缘的前缘带可能存在保存较好的寒武 系—志留系油气藏^[9]。

2 古应力恢复原理与样品采集

为了恢复研究区的古应力值,我们在构造变形分析的基础上,采用声发射法对最大古应 力的有效值进行了恢复。声发射是岩石存在内部缺陷或潜在缺陷时,在外部条件作用下改变 状态而自动发声的现象。利用岩石声发射对应力的记忆特性可以进行地应力的恢复,并据此 推断研究区所经历过的构造运动期次及其强度^[2,14]。目前声发射法古应力恢复所测得的各应 力值是岩石记忆的各主要构造运动期的最大主应力值,是不包含当时孔隙压力的最大主应力 值。鉴于无法知道当时的孔隙压力,通常将该有效最大主应力值视为最大主应力值^[3]。岩样 选取了节理裂缝少、未风化的岩石,在实验室中将进行试验的岩芯加工成直径 25 mm、高 50 mm 的圆柱体。样品加工按规定的高度切割两端,装入卡具内在精密平面磨床上将两端磨 平,制成满足要求的试验用小岩柱,然后进行声发射实验。测得各试样初压(第一次加载) 复压(特定技术条件下第二次加载) AE 度(每秒声发射计数)记录曲线,并分别给出它们 的 AE 累计数与外加压力响应曲线,最后通过初压、特定条件下的复压和第三次加载的响应 曲线特征筛选,可以确定声发射曲线上的所有 Kaiser 点估算试样中记录的古今应力的次数和 大小,同一测点通过测量多个样品的共同记忆信息,即可比较准确地确定其应力大小^[2,3]。

不同时代岩石记忆的主要构造运动期次不同。时代晚的岩石不可能记忆时代早的岩石所 经历的主要构造运动期,而时代早的岩石却可记忆时代晚的岩石所经历的主要构造运动期 次。比较不同时代岩石记忆的主要构造运动期次,可确定某一地质时代经历的主要构造运动 期次。对于时代不明地层,通过比较岩石记忆的主要构造运动期次,可以推断其时代。本文 在雪峰隆起西南缘采取了寒武系、二叠系和三叠系样品,取芯和测试分别在北京科技大学和 在中国地质科学院地质力学所测试完成。

3 声发射古应力恢复结果分析

前人通过对野外露头节理的统计分析,认为研究区内主要发育早古生代 NEE 和 NW 向 共轭剪节理、晚古生代早期 NWW 和 NNE 向共轭剪节理、古生代晚期 NE 向节理、印支期 NNW 向节理和燕山期 EW 向节理,主压应力场依次发生了 SEE—SE—SE—EW 的顺时针方 向的转换^[15]。本文根据不同时代地层岩石声发射所记录的信息,结合区域构造演化过程和 前人详细的野外节理统计,认为雪峰隆起西南缘自寒武纪以来主要经历了9次构造运动,其 中包括 5 期重要构造变革运动^[8]。寒武纪岩石记录了 8 次和 9 次,二叠纪岩石记录了 6 次, 三叠纪岩石记录了 5 次(见表 1)。野外构造特征和平衡剖面的几何学和运动学分析结果表 明,雪峰隆起西南缘在加里东期形成整体的隆坳格局。晚奥陶世中期的都匀运动构造活动强 度较弱,志留纪末至早泥盆世的广西运动构造活动强烈。在印支期研究区开始海陆转换,没 有大规模构造运动发生,地层界线表现为平行不整合接触;而燕山运动和喜马拉雅运动时期 构造活动最强烈^[8,13]。

Table 1 Maximum principal stress and tectonic stages by AE restoring in southwest margin of Xuefeng Uplift

编号	岩性	时代	各期构造应力 σ_1 值/MPa	构造运动期次
XF1	砂岩	Т	23.3, 34.1, 54.3, 64.8, 73.7	5
XF2	灰岩	Т	24.6 , 36.0 , 52.3 , 63.2 , 74.4	5
XF3	灰岩	\in	13.3 , 25.8 , 35.5 , 55.1 , 63.5 , 72.5 , 81.9 , 102.6	8
XF4	灰岩	\in	16.2 , 27.9 , 35.9 , 45.6 , 56.6 , 64.8 , 73.2 , 83.9 , 92.6	9
XF5	砂岩	Р	24.0, 35.3, 52.5, 62.4, 73.5, 83.9	6

按照由新到老、由浅到深逐时代(或运动阶段),逐层系对样品进行了对比、分析。寒 武纪岩石与二叠纪岩石反映的构造运动相差2~3次,结合区域构造运动和平衡剖面恢复结 果,笔者认为这些差异反映了研究区在都匀运动到广西运动过程中所经历的构造变形。都匀 运动在雪峰隆起前缘的最大古应力为 16.2 MPa, 在麻江背斜核部减小为 13.3 MPa, 而广西运 动期间其大小分别为 102.6 MPa 和 92.6 MPa。二叠纪和三叠纪岩石所记录的构造运动相差一 次,反映了研究区构造变形在印支期较弱,对应于黔中隆起及其周缘由海相碳酸盐岩沉积缓 慢向陆相碎屑岩沉积过渡的特征^[13]。印支期在雪峰隆起西南缘的最大古应力为 24.0 MPa, 说明雪峰隆起在三叠系开始抬升。三叠纪岩石记录了5次构造运动,结合研究区内三叠系及 其之后地层卷入构造变形的强度,笔者认为燕山期和喜马拉雅期的构造运动期次多、强度 大。研究区内多条平衡地震剖面的缩短量和缩短率的分析结果,也证明了这一点。在燕山运 动之前,总的缩短率平均为 3 % 左右,而燕山期之后的缩短率达到 11 %,恢复的最大主应力 值为 23.3~74.4 MPa。三叠纪声发射样品主要位于都匀向斜核部,距离雪峰隆起相对较远 (见图1),随着逆冲位移量的减少,同一期构造运动的应力值也逐渐变小,但是由于地表应 力值往往与下伏层位更高应力值对应,所以三叠纪样品恢复的最大主应力值不能表明三叠纪 之后所经历的最大主应力较小。三叠纪样品表现的多期构造运动则反映了三叠纪之后研究区 内的构造活动强度较大,由于构造应力的叠加造成古生代的广西运动一次(102.6 MPa)完 成,而燕山运动和喜马拉雅运动分为5次(23.3~74.4 MPa)完成。

4 古应力恢复与油气运聚关系

构造应力作用是驱使油气运移、聚集的重要条件之一。一方面构造应力形成了油气运移 的通道与油气富集的圈闭构造;另一方面不连续状态的瞬间构造应力和连续状态的长期构造 应力为油气运移提供了驱动力,并通过影响流体势场控制了油气运移的方向与油气分布^[16]。 研究区内声发射古应力的恢复结果与古油藏的形成与破坏有着密切的联系。下面以麻江古油 藏为例,阐述古应力大小、期次与油气运聚和破坏的关系。

麻江古油藏位于雪峰隆起西南缘的黔南坳陷内部,具有多期沉降沉积和多期构造抬升剥 蚀的复杂演变历史。早寒武世海平面上升趋势,在研究区形成了缺氧盆地的黑色泥质沉积, 海域中有机质丰富,是麻江古油藏主力生油层的形成期(见图 2a)。在晚奥陶世中期发生了 都匀运动(σ₁ = 13.3 MPa),使研究区及其周缘形成大隆大坳的构造格局,在麻江地区形成

宽缓的古凸起:后期随着古凸起隆升幅度 的增大,导致其核部红花园组暴露地表 (见图 2b), 经浅埋、胶结重结晶或局部白 云化后即抬升至地表,因受大气降水—混 合水的淋滤溶蚀,出现部分溶蚀孔、洞、 裂缝:志留纪末至早泥盆世,受到广西运 动 ($\sigma_1 = 92.6$ MPa) 的影响,该地区油气部 分破坏(见图 2b),再次形成大量的溶蚀 孔、洞、裂缝。之后,黔南坳陷继续稳定 沉积,在泥盆系至二叠系形成大规模的碳 酸盐岩稳定沉积。印支期由于构造运动相 对较弱 ($\sigma_1 = 24$ MPa),志留系翁项群和二 叠系烃源岩逐渐达到生油高峰。加里东期 活动的逆冲断层和海西期的正断层为油气 提供运移通道,局部暴露地表的志留系翁 项群砂岩和晚古生代岩石的岩溶孔洞、裂 隙为主要空间(见图 2c)。三叠纪之后,研 究区共经历了5期构造运动,最大主应力值 由 23.3 MPa 到 74.4 MPa, 是贵州最为强烈 的地壳运动,除形成了强烈的褶皱断裂外, 并使贵州整体抬升。野外地质调查和流体 活动的结果都表明燕山晚期—喜马拉雅早 期是油气藏的主要破坏期(见图 2d)。麻江 地区翁项群三段和红花园组储集层大部分 被剥蚀或裸露地表。翁项群三段储集层的 展布面积从 2450 km² 减少到 876 km²,油气 破坏殆尽,仅残留部分沥青,最终形成现 今的古油藏概貌(见图 2e)。

5 结论

雪峰隆起西南缘的岩石声发射法定量 地记录了它所受到的构造期次和强度。根 据岩石的声发射测试结果和构造变形分析, 可以确定雪峰隆起前缘都匀运动时最大古 应力为 16.2 MPa,而在麻江背斜核部为 13.3 MPa,广西运动期间其大小分别为 102.6 MPa和 92.6 MPa。印支期研究区构造



变形较弱,仅有一次构造运动,最大古应力为 24.0 MPa,三叠纪之后经历了燕山期和喜马拉 雅期的五次构造运动,古应力值的恢复从 23.3 MPa 至 74.4 MPa。 雪峰隆起西南缘发育的麻江古油藏的形成和破环与岩石声发射法所反映的构造运动期次 和强度有着密切联系。声发射次数少且古应力值相对较弱的时期,是麻江古油藏的主要成藏 期(早加里东期末和印支期);声发射次数较多或者古应力值较大时(晚加里东期运动末、 燕山运动和喜马拉雅运动),主要对应于油藏的储集层发育期和大规模破坏期。

老 文 献 紶

- [1] 张明利,万天丰. 含油气盆地构造应力场研究新进展[J]. 地球科学进展,1998,13(1):38~43.
 ZHANG Ming-li, WANG Tian-feng. The new research development of tectonic stress field in oil and gas basin [J]. Advance in Earth Sciences, 1998, 13(1):38~43.
- [2] 丁原辰,邵兆刚.测定岩石经历的最高古应力状态实验研究[J].地球科学——中国地质大学学报,2001,26 (1):99~104.

DING Yuan-chen , SHAO Zhao-gang. An experimental research into determination of highest paleo-tectonic stress state experienced by rock through geological ages [J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences , 2001 , 26 (1): $99 \sim 104$.

[3] 丁原辰. 声发射法古应力测量问题讨论 [J]. 地质力学学报,2000,6(2):45~52.

DING Yuan-chen. Discussion on paleo-stress measurement by AE method [J]. Journal of Geomechanics , 2000 , 6 (2): 45 ~ 52.

[4] 陈志德,蒙启安,万天丰,等.松辽盆地古龙凹陷构造应力场弹 – 塑性增量法数值模拟 [J]. 地学前缘,2002,9 (2):483~492.

CHEN Zhi-de, MENG Qi-an, WANG Tian-feng, et al. Numerical simulation of tectonic stress field in Gulong Depression in Songliao Basin using elastic-plastic increment method [J]. Earth Science Frontiers, 2002, 9 (2): 483 ~ 492.

[5] 曾联波,谭成轩,张明利.塔里木盆地库车坳陷中新生代构造应力场及其油气运聚效应[J].中国科学(D辑), 2004,34(Supp.1):98~106.

ZENG Lian-bo, TANG Cheng-xuan, ZHANG Ming-li. Cenozoic and Mesozoic tectonic stress field and its effect of oil and gas migration in Kuqa Depression, Tarim Basin [J]. Science in China Ser. D Earth Sciences, 2004, 34 (S1): 98 ~ 106.

[6] 张明利,金之钧,万天丰,等.柴达木盆地应力场特征与油气运聚关系[J].石油与天然气地质,2005,26(5): 675~680.

ZHANG Ming-li, JIN Zhi-jun, WANG Tianfeng, et al. A discussion on relationship between tectonic stress field and migration and accumulation of hydrocarbons in Qaidam Basin [J]. Oil and Gas Geology, 2005, 26 (5): 675 ~ 680.

- [7] ZENG Lianbo, LI Xiangyang. Fractures in sandstone reservoirs with ultra-low permeability: A case study of the Upper Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin, China [J]. AAPG Bulletin. 2009, 93 (4): 461 ~ 477.
- [8] 汤良杰,郭彤楼,田海芹,等.黔中地区多期构造演化、差异变形与油气保存条件[J].地质学报,2008,82 (3):298~307.

TANG Liang-jie, GUO Tong-lou, TIAN Hai-qin, et al. Poly-cycle tectonic evolution, differential deformation and hydrocarbon reservation of central Guizhou and adjacent region [J]. ACTA Geologica SINICA, 2008, 82 (3): 298 ~ 307.

[9] 刘运黎,沈忠民,丁道桂,等.江南—雪峰山推覆体前缘沥青古油藏及油源对比[J].成都理工大学学报(自然 科学版),2008,35(1):34~40.

LIU Yun-li, SHEN Zhong-min, DING Dao-gui, et al. The characters of the old asphalt-oil pool in the Jiangnan-Xuefeng thrust nappe front and the correlation of oil sources [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Natural Science Edition), 2008, $35 (1): 34 \sim 40$.

[10] 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..

LI Zhong-dong , LUO Zhi-li , LIU Shu-gen , et al. Assessment of petroleum resources in Lower assemblage under Xuefeng thrust nappe [J]. Oil and Gas Geology , 2006 , 27 (3): 392 ~ 398.

[11] 戴传固,张慧,黄清华. 黔东地区典型构造样式特征及其地质意义 [J]. 地质力学学报,2008,14(4):339~ 345. DAI Chuan-gu, ZHANG Hui, HUANG Qing-hua. Typical tectonic styles and their geologic significance in eastern Guizhou province [J]. Journal of Geomechanics, 2008, 14 (4): 339 ~ 345.

[12] 周小进,杨帆.中国南方中、新生代盆地对海相中、古生界的迭加、改造分析 [J].地质力学学报,2008,14 (4):346~371.

ZHOU Xiao-jin, YANG Fan. Superposition and reconstruction of marine Meso-Paleozoic strata by Meso-Cenozoic basins in Southern China [J]. Journal of Geomechanics, 2008, 14 (4): 346 ~ 371.

[13] 贵州省地质矿产局.贵州省区域地质志 [M].北京:地质出版社, 1987.608~616.

Bureau of Geology and Mineral Resources of Guizhou Province. Regional geology of Guizhou Province [M]. Beijing : Geological Publishing House , 1987 : 608 ~ 616.

[14] 孙宝珊,丁原辰,任希飞,等. 辽北张强地区燕山期以来主要构造运动期最大主应力的测定[J]. 地质论评, 2000,46(1):91~98..

SUN Bao-shan, DING Yuan-chen, REN Xi-fei, et al. A measurement of maximum principal stresses of main tectonic phases in the Zhangqiang area, Northern Liaoning Province since the Yanshanian movement [J]. Geological Review, 2000, 46 (1): 91 \sim 98.

[15] 董立,汤良杰,卢雪梅,等.麻江地区节理发育特征及对应力场转换的指示[J].石油与天然气地质,2008,29 (6):740~747.

DONG Li, TANG Liang-jie, LU Xue-mei et al. The characteristics of joint and its instructions of stress field transformation in Majiang area [J]. Oil and Gas Geology, 2008, 29 (6): 740 ~ 747.

CHARACTERISTICS OF THE PALEO-STRESS IN THE SOUTHWESTERN MARGIN OF XUEFENG UPLIFT AND ITS SIGNIFICANCE FOR PETROLEUM GEOLOGY

CUI Min^{1,2}, TANG Liang-jie^{1,2}, WANG Peng-hao^{1,2}, GUO Tong-lou³, LU Xing-bin⁴

(1. Basin & Reservoir Research Center, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. State Key Laboratory f or Petroleum Resource and Prospecting , Beijing 102249 , China ;

3. Southern Exploration Division Company, SINOPEC, Chengdu 610041, China;

4. Dezhou College Technical Secondary School, Dezhou 253023, China)

Abstract: Based on the geological survey, balanced cross-section analysis and regional tectonic evolution, we take advantage of rock acoustic emission information to restore the maximum paleo-stress in the southwest margin of Xuefeng Uplift, and discuss the relationship between the maximum paleo-stress and hydrocarbon accumulation and damage. The results show that the study area has undergone five key structural reforms of different intensities. In the early Paleozoic and Indosinian cycle, the tectonic movement is weak, and the maximum paleo-stress are 13.3 MPa and 24 MPa respectively, equivalent to the main accumulation period of Majiang ancient reservoir. The high-frequency and high-intensity paleo-stress correspond to accumulation and damage of Majiang ancient reservoir. The Neopaleozoic structural deformation with the maximum paleo-stress of 92.6 MPa represents the formation of the reservoir. The Yanshan and Himalayan structural movements, with the restored paleo-stress from 23.3 MPa to 74.4 MPa, cover the period of extensive destruction of paleo-reservoir.

Key words : acoustic emission ; paleo-stress ; Majiang paleo-reservoir ; petroleum geology ; Xuefeng Uplift