

文章编号: 0253-9985(2006)03-0392-07

雪峰推覆体掩覆的下组合(Z-S)油气资源预测

李仲东, 罗志立, 刘树根, 雍自全

(成都理工大学 能源学院 “油气藏地质及开发工程”国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要: 雪峰推覆体震旦纪—志留纪地层位于扬子古板块东南缘大陆斜坡上。经加里东运动, 伴随“江南隆起”的上升、剥蚀, 而逐步演化为雪峰古陆。加里东期, 雪峰推覆体古褶皱样式为向西北推覆的近平卧褶皱构造。再经印支—燕山期多层次的由东南向西北叠加推覆作用, 在推覆体的前峰带掩覆了大片古生代地层。据岩相带和地球物理等资料, 推测雪峰推覆体推覆距离不超过几十公里, 前锋带掩覆下古生界深度约 4 000 m, 掩覆面积至少为 3 000 km²。雪峰推覆体下组合(震旦系—志留系)为半深海滞流缺氧环境下沉积的黑色碳质泥岩、硅质岩、磷块岩和生物灰岩, 有机碳含量为 0.01%~4.00%, 生油条件良好, 加里东期具有油气藏形成过程, 沿江南隆起西缘已发现有 9 个古油藏和残留油气藏。通过虎庄残留油气藏成藏条件分析, 油气源来自于下组合(震旦系—志留系)和上组合(上二叠统—下三叠统)海相高成熟—过成熟二次生烃的混合烃源, 具有长距离运移和一定的油气保存条件, 油气藏形成于燕山晚期—喜马拉雅期, 与雪峰推覆体最终定型期相同。由此认为雪峰推覆体掩覆的下组合, 有较大的油气资源前景, 其中, 镇远—凯里—三都一带的弧形地区为有利的勘探地区。

关键词: 平卧褶皱; 虎庄残留油气藏; 油气资源; 雪峰推覆体

中图分类号: TE122.1 文献标识码: A

Assessment of petroleum resources in Lower assemblage under Xuefeng thrust nappe

Li Zhongdong, Luo Zhili, Liu Shugen, Yong Ziquan

(State Key Laboratory of Oil & Gas Reservoir Geology and Exploitation Engineering,
Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059)

Abstract Xuefeng thrust nappe was located on the continental slope on the southeastern margin of Yangtze fossil plate during Sinian–Silurian, and evolved progressively into Xuefeng ancient land along with the ascending and erosion of “Jiangnan uplift” during Caledonian movement. The pattern of paleofold in Xuefeng thrust nappe was near recumbent fold thrusting toward northwest during Caledonian. The frontal zone of the thrust nappe overrode large area of Paleozoic strata due to the multiple superimposition and thrusting from southeast to northwest during Indosinian–Yanshanian. Based on lithofacies zones and geophysical data, it is predicted that the thrusting distance of Xuefeng thrust nappe would not exceed dozens of kilometers, the depth of Lower Paleozoic overridden by the frontal zone is about 4 000 m, and the overridden area is at least 3 000 km². The lower assemblage (Sinian–Silurian) of Xuefeng thrust nappe consists of black carbonaceous mudstone, siliceous rock, phosphate rock and biogenic limestone deposited in a bathyal, stagnant and anaerobic environment with TOC value in the range of 0.01%–4.00% and good oil-generating conditions. Oil and gas pools had been formed in Caledonian, and 9 fossil oil pools and residual oil and gas pools have been discovered along the western margin of Jiangnan uplift. Reservoiring condition analysis of Huzhuang residual oil and gas pools shows that the oil and gas have come from the secondary hydrocarbon generation of the marine lower assemblage (Sinian–Silurian) and upper assemblage (Upper Permian–Lower Triassic). Hydrocarbons have experienced long-distance migration and

收稿日期: 2006-05-09

第一作者简介: 李仲东 (1958—), 男, 副教授, 石油地质专业

基金项目: 国家“七五”重点科技攻关项目 (75-54-02-01-01-04)

have been accumulated in places having a certain preservation condition. Oil and gas pools have been formed during Late Yanshanian-Himalayan, the same as the finalization of Xuefeng thrust nappe. Therefore, it is believed that the lower assemblage of Xuefeng thrust nappe has relatively large potential of petroleum resources, and the arcuate zone along Zhenyuan-Kaili-Sandu is favorable for exploration.

Key words recumbent fold; Huzhuang residual oil and gas reservoir; petroleum resources; Xuefeng thrust nappe

雪峰推覆体位于“江南古陆”的南段。“江南古陆”一词来自黄汲清^[1], 用以指长江以南从桂北-黔东-湘鄂赣-皖浙边境, 横亘七省的长条状中-晚元古代板溪群浅变质岩组成的加里东褶皱山系, 它在中国南方处于区域构造重要位置。20世纪 70 年代后期经过岩相古地理研究和区域地质调查, 证实自震旦纪至志留纪“江南古陆”并不存在, 而是扬子古板块东南缘统一的被动大陆边缘, 现许多文献^[2-3]多改称为加里东期的江南隆起 (本文也用此术语)。雪峰推覆体是在江南隆起南段雪峰古陆上形成的印支-燕山期推覆构造, 因而得名。

扬子古板块东南缘的下组合 (震旦系-志留系) 有良好的生油条件, 沿江南隆起西北缘发育许多古油藏, 特别是在雪峰推覆体前缘下组合中, 见

到虎庄等残留油气藏。据地球物理和岩相古地理资料, 在雪峰推覆体下掩覆有大面积的下组合。多项资料表明雪峰推覆体可能存在良好油气资源潜力。立足于“七五”科技攻关项目研究基础^①, 从沉积相、构造变形史、油气显示现状等方面预测其含油气远景, 提出进一步勘探的建议。

1 雪峰推覆体的沉积-构造背景

震旦纪雪峰推覆体处于扬子古板块东南缘大陆斜坡位置^②。四川盆地据钻入基底两口深井资料 (威 28 井和女基井), 结合区域地质和航磁资料, 认为扬子古板块前震旦纪的基底格局为两弧夹一盆^[4] (图 1)。震旦系为第一套盖层, 晚

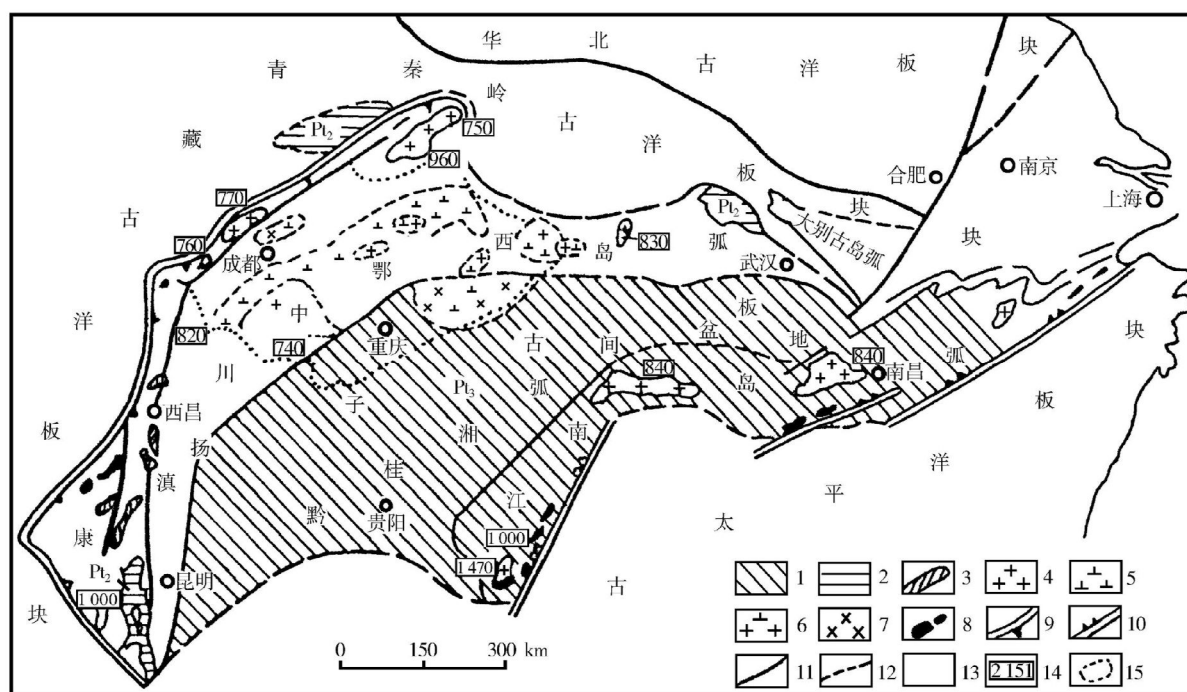


图 1 扬子古板块晋宁-澄江期板块构造示意

Fig. 1 Sketch map showing plate tectonics of Yangtze fossil plate during Jinning-Chengjiang period

1. 板溪群 (P_1); 2. 中元古界 (P_2); 3. 代表康滇地轴的太古宙-元古界; 4. 酸性岩体; 5. 中性岩体;
6. 中酸性岩体; 7. 中基性岩体; 8. 蛇绿岩套; 9. 晋宁期俯冲带; 10. 澄江期俯冲带; 11. 推测深断裂;
12. 推测构造单元边界; 13. 四川盆地内弱磁性区; 14. 同位素年龄 (Ma); 15. 四川盆地范围

① 丘元禧, 庄培仁, 罗志立, 等. “江南古陆”及邻侧构造演化与古生代含油气盆地的关系. 1990

② 唐勇. 雪峰隆起西缘的逆冲推覆体. 地矿部石油海洋地质局 05 工程处, 1988

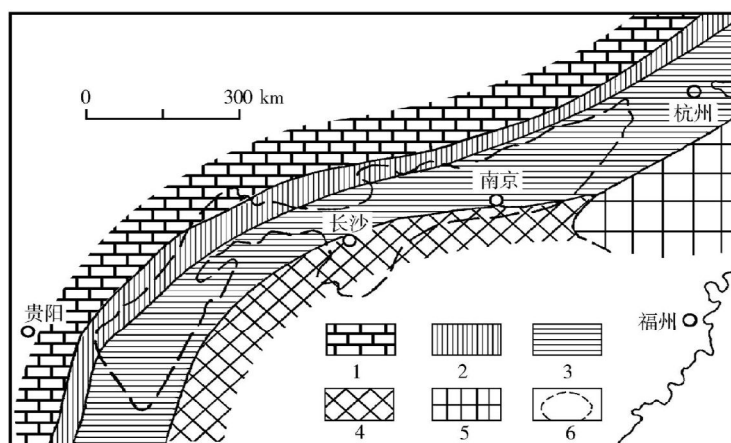


图 2 早寒武世“江南古陆”周边岩相古地理示意^[5]

Fig. 2 Sketch map showing lithofacies paleogeography on the periphery of Jiangnan ancient land in the Early Cambrian^[5]

1. 陆架碳酸盐岩; 2. 陆架外缘斜坡黑色钙硅质岩组合; 3. 陆坡黑色硅泥质岩组合;
4. 盆地相碎屑复理石; 5. 推测的蚀源区; 6. “江南古陆”现在的出露范围

震旦世扬子古板块为浅水碳酸盐台坪, 向东至“江南岛弧”相变为陆架含碳硅质岩, 代表陆架前缘斜坡相, 当时的雪峰推覆体即位于相变带上。

早古生代寒武纪—志留纪雪峰古陆仍处于大陆斜坡沉积构造背景。早寒武世从扬子古板块的陆架碳酸盐岩相, 向东相变为陆坡黑色硅泥质岩相 (图 2), 志留纪虽出露局限, 仍保持东倾的斜坡格局。因此, 从岩相古地理分析, 整个“江南隆起”在早古生代是不存在的, 它处于古扬子地台东缘古岛弧基底位置上, 为向南华小洋盆过渡的大陆斜坡。

经过加里东运动, 晚古生代“江南隆起”上升、剥蚀、夷平逐步变为古陆, 即一般所称的“江南隆起”。在其南段的雪峰古陆北段, 从常德往北到石门, 可见泥盆系由东向西超覆、厚度减薄; 在其南段的靖县、黎平和天柱县等地, 可见石炭系—二叠系直接覆盖在板溪群上, 表明雪峰古陆已准平原化。直到二叠纪至早、中三叠世又重新沦为浅海, 接受新的碳酸盐岩沉积。

中生代的印支—燕山运动, 使雪峰古陆形变成雪峰推覆体。中三叠世末, 华南板块上发生的印支早幕金子运动, 可见上三叠统黄马青组陆相地层角度不整合在中三叠统青龙灰岩上。三叠纪与侏罗纪之间的印支运动主幕, 通称南象运动, 进一步推动雪峰推覆体的形成和发展。

晚侏罗世—早白垩世发生的燕山运动异常强烈, 在东南沿海出现大量的火山岩喷发和花岗岩侵入, 整个华南褶皱区多转为内陆隆起和火山岩

盆地。向西北的雪峰推覆体区及其以北的湘鄂西地区, 褶皱构造强度虽有减弱, 但仍可见上白垩统与其下地层的不整合。这次运动促使雪峰推覆体最后定型。

晚白垩世—早第三纪, 华南板块显示拉张运动。如黔东榕江县城北雪峰推覆体发育的箕状断陷盆地, 充填有晚白垩世—早第三纪的紫红色砾岩和砂泥岩沉积, 与其下伏板溪群呈不整合接触。

2 雪峰推覆体的形成和演化

2.1 加里东期

加里东期雪峰推覆体古褶皱样式为近平卧褶皱和褶皱推覆构造。现在的雪峰推覆体为多次次的复合构造, 我们通过构造解析和构造筛分方法, 识别出各构造期面貌, 得出雪峰推覆体古褶皱样式为近平卧褶皱^[6] (图 3)。

此外, 在镇远施洞口至新城凉土凹一带, 自东向西分布着 5~6 条逆冲—逆掩叠瓦构造扇, 断面倾向东南, 进一步证实加里东期雪峰推覆体的古褶皱样式。由东南向西北推覆的滑脱面, 可能发生在板溪群 (P_6) 与其下四堡群 (P_4) 不整合面间。

再从震旦纪—早古生代沉积相带突然变窄, 也可说明加里东期逆冲推覆构造的存在。如早寒武世梅树村—沧浪铺期的陆棚相带, 在江南隆起中段湘西北地区宽 120 km, 而在江南隆起南段雪峰地区的三都一带, 相带变窄, 仅有 50 km。若南、北

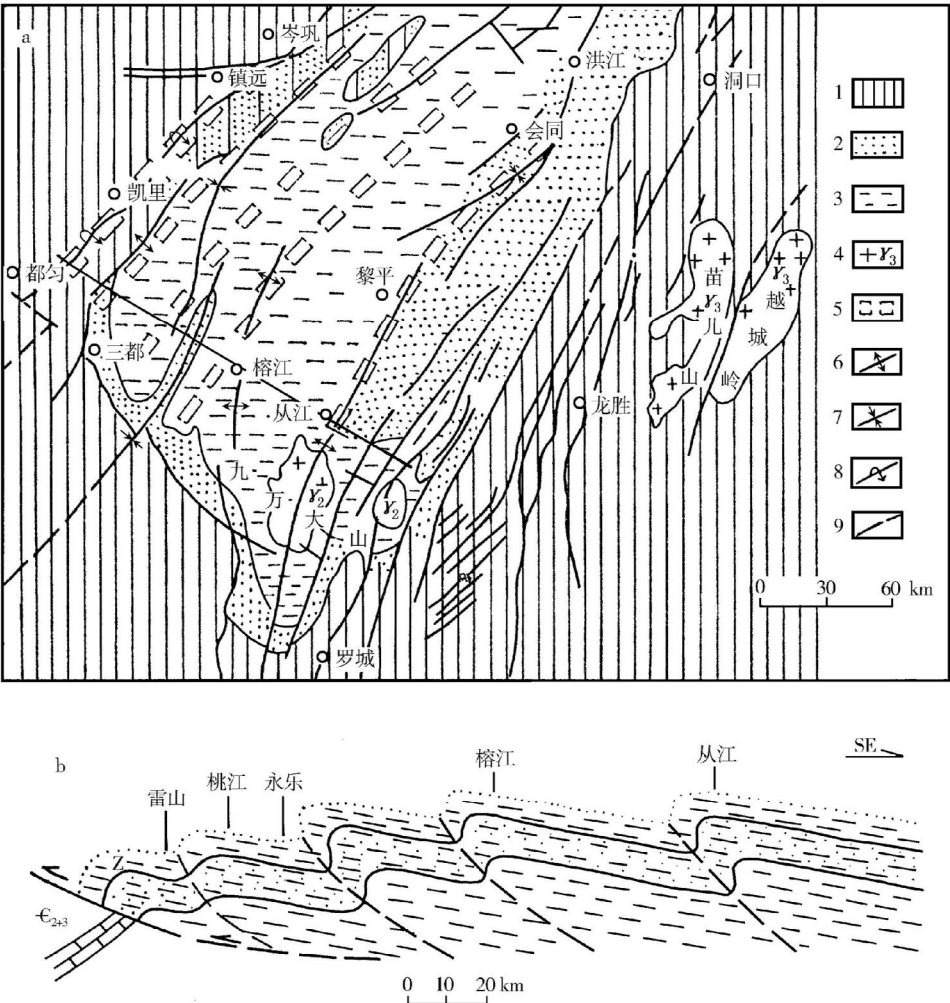


图 3 加里东期雪峰推覆体复原平面示意 a)和横剖面复原示意 b)^[5]

Fig. 3 Diagrammatic maps of the reconstructed composite recumbent folds in the Xuefeng thrust nappe during Caledonian epoch a) plane view; b) cross section^[5]

1. 古生界至中生界; 2. 震旦系; 3. 中上元古界; 4. 花岗岩; 5. 复式近平卧褶皱转折端;
6. 背斜; 7. 向斜; 8. 倒转背斜; 9. 实测、推测断层

相带宽度变化不大, 则可推断雪峰地区由东南向西北逆掩推覆 70 km。

2.2 印支—燕山期

印支—燕山期褶皱构造运动叠加在加里东期平卧褶皱上, 最终使雪峰推覆体形成。在江南隆起两侧内部的坳陷(麻阳盆地)存在印支—燕山期构造变形形迹和前述中生代地层不整合接触关系。因而可推断江南隆起出露板溪群的变质岩区, 也同样地经历过印支—燕山期的构造变形。丘元禧^[2]通过构造解析和构造筛分, 认为雪峰推覆体南段的挂丁断裂—雷山一带, 加里东期褶皱走向为北东东向, 存在逆冲叠瓦岩片和断层扩展褶皱模式; 印支—燕山期构造走向为北东—北北东

向。动力由东南向西北多次叠加推挤, 改造加里东期构造向西成弧形, 成为陆内造山带, 雪峰推覆体最终定型。

2.3 地球物理资料

地球物理资料初步证实雪峰推覆体向西推覆构造格局的存在。20世纪 80 年代, 贵州 05 工程处曾在凯里—雷山沿公路一线作过 50 km 的地震剖面, 在 2.0 s 处存在滑脱面, 最深处 4 000 m, 地表与雪峰推覆体前锋的挂丁断裂相接。据唐勇^①地震地质解释在 F1 断层滑脱面之下, 掩覆大面积的古生界海相地层(图 4)。这个构造格局不仅印证前述雪峰推覆体变形特征, 也为在推覆构造下寻找下组合油气藏提供了依据。

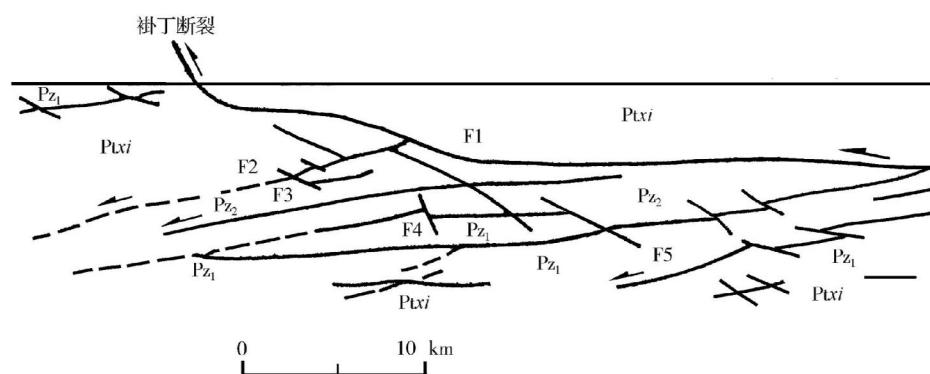


图 4 雪峰推覆体西缘凯里-雷山间地震剖面地质解释^①

Fig. 4 Sketch map showing geological interpretation of the seismic section from Kaili to Leishan on the western margin of Xuefeng thrust nappe^①

F1 断层编号; Ptxi 下江群; Pz1, 下古生界; Pz2, 上古生界

2.4 雪峰推覆体推覆距离讨论

根据雪峰推覆体不同时代沉积相带分布与邻区对比, 推覆体前缘施洞口等主干断裂逆冲量的估算, 雪峰推覆体是一个准原地岩体, 其位移距离不超过几十公里, 若掩覆宽度 15 km 计, 其西北缘推覆掩盖古生界的面积约 3 000 km², 为油气资源有利的勘探地区^[4]。

3 油气成藏条件分析及潜力预测

3.1 古生界发育良好的烃源层

古生代雪峰推覆体位于扬子古板块东南缘大陆斜坡上, 生油条件良好。下组合(震旦系-志留系)多为黑色碳质泥岩、硅质岩、磷块岩和生物灰岩, 有机碳含量为 0.01% ~ 4.00%。其中, 下寒武统生烃条件最好, 为全球缺氧事件的产物, 沉积物中富含有机质、磷质、硅质和微粒黄铁矿; 缺少底栖生物、含丰富的菌藻类和少量放射虫及海绵骨针, 代表半深海滞流缺氧沉积环境。类似生烃良好的黑色页岩, 尚有奥陶系的五峰组页岩(O₄, 注: 国际地层对比表中奥陶纪 4 分, 相当于临湘期-五峰期)、志留系龙马溪组页岩(S₁), 以及泥盆系一二叠系中-深水台槽间黑色碳质和硅质页岩。

3.2 古油藏和残留油气藏

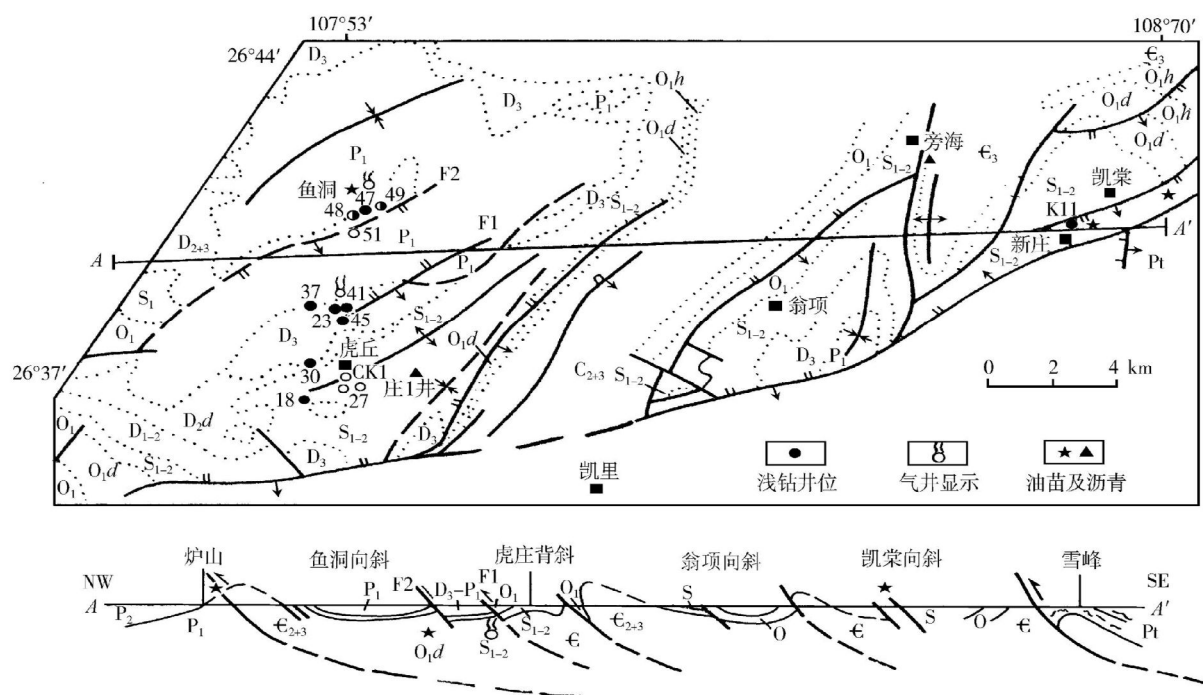
沿江南隆起西缘有众多的古油藏和残留油气

藏。在扬子古板块东南缘从黔东到湘西的三都-丹寨-凯里-松桃-保靖-慈利大断裂, 是扬子古板块寒武-奥陶纪盆地相到大陆斜坡边缘相的分界断裂, 下组合良好的生烃黑色泥岩与暗色泥质灰岩, 生成的油气沿斜坡向台缘带运移聚集, 在适当的圈闭中形成众多的油气藏。其后, 经印支-燕山期构造运动强烈的改造, 使下组合的油气藏受到破坏, 目前仅能看到众多的古油藏和残留油气藏。沿江南隆起西缘带, 从南向北分布有贵州的瓮安(下寒武统)、麻江(下奥陶统一志留统估算沥青储量可达 10 × 10⁸ t)、虎庄(中、下志留统残留油气藏)、丹寨(寒武系)、万仁(中寒武统)和湘西的凤凰阿拉营(上寒武统)、慈利南山坪(中震旦统), 以及浙江余杭泰山(中震旦统)和苏南的昆山(中寒武统、下奥陶统)等古油藏。这 9 个古油藏的存在和分布, 提示我们在雪峰推覆体掩覆区适当的成藏条件下, 还有可能找到下组合的油气藏。

3.3 油气显示

雪峰推覆体前缘虎庄残留油气藏位于凯里以西 10 km, 东距雪峰推覆体前缘逆冲断裂 2~4 km(图 5)。1956—1962 年在虎庄背斜轴部钻探的 CK1 浅井首次在中、下志留统砂岩中(S₂₋₃)见微气(2.7 m³/d); 后在西翼钻的虎 41 井获气 41 860 m³/d 井口流压 4.0 MPa 虎 23 井获气 3 699 m³/d 并在虎 41 井中下奥陶统石灰岩捞获 2.3 t 原油。

①唐勇. 雪峰隆起西缘的逆冲推覆体. 地矿部石油海洋地质局 05 工程处, 1988

图 5 贵州凯里地区构造图及油气显示图^[6]Fig. 5 Structural map with oil & gas shows in Kaili area, Guizhou^[6]

这些油气显示,经过采样分析,展示下列一些地质和地球化学信息^[6]:

1) 天然气组成,甲烷占 94.60% ~ 97.69%,乙烷以上重烃 (C_2^+) 含量仅占 0.53% ~ 3.53%、干燥系数 C_1/C_2 高达 20.7~305.1,属典型的过熟裂解干气成因类型;又据虎庄南部大背斜黔山 1 井下寒武统天然气碳同位素成因类型判别属海相高熟-过熟混源气类型^[5]。

2) 虎 48 井为气水同产井,自 1956 年见气后,至今仍持续不断冒气,点之即燃,表明深部沿断层有长期供给的气源。

3) 虎庄 47 井下奥陶统原油成因类型,属封闭性的海相高熟轻质混源类型;从芳烃组成以富含二环萘系列和芴系列特征判断,展现成藏环境为封闭性强和长距离运移特征。

4) 虎庄下奥陶统的原油与其井下众多的下奥陶统和下志留统中的油浸、油迹显示,共有 nC_{14} , nC_{16} , nC_{18} 呈现局部碳位的偶碳优势,与四川盆地燕山晚期-喜马拉雅早期形成的嘉陵江组 (付 1 井 $T_{C_{2-1}}$) 气伴生油流特征相似。因而推测虎庄下组合油气形成于喜马拉雅期,油源可能来自下组合二次生烃。另从凯里地区下组合和邻区上二叠统与下三叠统的油、沥青及源岩芳烃稳定分子化合物特征分析,有上古生界烃源混油特征,

显示“二次生烃”新烃源渗混的信息。

上述特征启示我们虎庄背斜是一个未被完全破坏的残留油气藏。气源来自于海相高熟-过熟混源气,油源来自于下组合和上组合 (上二叠统一下三叠统) 二次生烃源的混入,具有一定的保存条件和长距离运移特征。由此推测从雪峰推覆体掩覆区供油的可能性。若油气形成于燕山晚期-喜马拉雅期的“二次成烃”^[7,8],这与雪峰推覆体最终定型期相同,这些信息无疑增加了我们在雪峰推覆体掩覆区勘探油、气的信心。

3.4 油气勘探前景预测及建议

3.4.1 勘探前景预测及其意义

雪峰推覆体古生代处于扬子古板块东南缘大陆斜坡位置。生油条件良好,加里东期有过大油气藏形成过程,沿江南隆起西缘分布的 9 个古油气藏和残留油气藏可资证明。雪峰推覆体在加里东期的褶皱样式为近平卧式褶皱,向西北方向推覆,在其前缘的三都-丹寨-凯里-松桃-保靖-慈利大断裂带以东可能掩覆部分下组合;再经印支-燕山期多层次的由东南向西北叠加推覆作用,在推覆体的前峰带掩覆系统下面掩盖了大片古生代地层;从岩相带宽窄的变化和 20 世纪 80 年代 05

工程获得的地震资料,也证实这一推断的可信性;近年来中国石化南方勘探分公司,采用地震-MT联合反演法,在雪峰推覆体覆盖区也见到良好的反射层,推测为下组合^①。雪峰推覆体前峰掩覆面积至少有 3 000 km²,以镇远-凯里-三都一带的弧形地区最为有利,值得进一步研究和勘探。

雪峰推覆体前缘虎庄残留油气藏,从地质和油气地球化学信息方面,得出许多有益的启示;在被板溪群掩覆的古生界,油藏保存条件比虎庄残留油气藏好,很有可能找到大型油气藏。据上所述,雪峰推覆体前峰掩覆的古生界发育地区,应是南方下组合勘探有利地区,应积极开展地质、地球物理工作,选择适当的有利部位准备钻探。若本区钻探油气成功,还可在江南隆起两侧寻找其他有利地区,如江西的萍乡-乐平盆地,双桥山群(Pt)可自北向南滑移掩覆古生界地层距离约 32 km^[5]。这将打开中国南方下组合找油的新领域,具有战略勘探的重大意义。

3.4.2 建议

对雪峰推覆体油气勘探有利远景仅仅进行了展望,要达到钻探程度,尚须做许多具体、扎实的工作。首先要对雪峰推覆体前峰作进一步的野外调查甚至填图工作,查明推覆体地表发育特征;其次,要继续使用地震-MT联合攻关和解释,查清板溪群下掩覆的古生界的分布、深度和产状;第三,结合地面地质调查资料和区域构造与油气显示资料,选择推覆体有利圈闭和目的层,选定井位准备钻探。当前国内外在中新生代前陆盆地的推覆体下勘探油气已十分困难,成功率较低,本区为在元古代变质岩层(Pt)形成的推覆体下寻找古生代碳酸盐岩裂缝性油气藏,就更具挑战性。为此,建议“十一·五”期间把雪峰推覆体区选作油气勘探综合研究和准备钻探的靶区,力争突破,为中国南方下组合找油和在古生代推覆体找油作出巨大的贡献。

参 考 文 献

- 1 黄汲清. 中国主要地质构造单位(再版)[M]. 北京:地质出版社, 1994 20~ 21

- Huang Jiqing On major tectonic forms of China[M]. Beijing Geological Publishing House 1994 20~ 21
- 2 丘元禧, 张渝昌, 马文瑛, 等. 雪峰山的构造性质与演化——一个陆内造山带的形成与演化模式[M]. 北京:地质出版社, 1999 64~ 121
Qiu Yuanxi, Zhang Yuchang, Ma Wenying et al The tectonic nature and evolution of Xuefeng mountains one mode of formation and evolution of intracontinental orogenic belt[M]. Beijing Geological Publishing House 1999 64~ 121
- 3 马文瑛, 李学军, 刘和甫, 等. 雪峰隆起的构造性质及其对上扬子东南古生代盆地的改造[A]. 见:张渝昌, 秦德余, 汤福生, 编. 江南-雪峰科研专题组——江南-雪峰地区层滑作用及多期复合构造[C]. 北京:地质出版社, 1993 120~ 147
Ma Wenpu, Li Xuejun, Liu Hefu et al Tectonic nature and the alteration to the Paleozoic basin of the southeast of Upper Yangtze Xuefeng hump[A]. In Zhang Yuchang Qiu Deyu Tang Fusheng eds Jiangnan-Xuefeng research team—layer sliding and multi-complex tectonic in the Jiangnan-Xuefeng area[C]. Beijing Geological Publishing House 1993 120~ 147
- 4 罗志立. 川中是一个古陆核吗?[J]. 成都地质学院学报, 1986 13(8): 65~ 73
Luo Zhili Is there a paleocontinental nuclear in central Sichuan? [J]. Journal of Chengdu College of Geology 1986 13(8): 65~ 73
- 5 丘元禧, 庄培仁, 罗志立, 等. “江南隆起”及邻侧构造演化与古生代含油气盆地的关系[M]. 北京:地质出版社, 1990 64~ 121
Qiu Yuanxi, Zhuang Peiren, Luo Zhili et al Relationship of the evolution of Jiangnan Uplift and adjacent structures to the Paleozoic petroliferous basins[M]. Beijing Geological Publishing House 1990 64~ 121
- 6 马力, 陈焕疆, 甘克文, 等. 中国南方大地构造和海相油气地质[M]. 北京:地质出版社, 2004 502~ 533
Ma Li, Chen Huanjiang, Gan Kewen et al Geotectonics and petroleum geology of marine sedimentary rocks in southern China[M]. Beijing Geological Publishing House 2004 502~ 533
- 7 戴少武, 贺自爱, 王津义. 中国南方中、古生界油气勘探的思路[J]. 石油与天然气地质, 2001, 22(3): 195~ 202
Dai Shaowu, He Ziai, Wang Jinyi Thinking of Mesozoic-Paleozoic hydrocarbon exploration in South China[J]. Oil & Gas Geology 2001, 22(3): 195~ 202
- 8 赵宗举, 朱琰, 李大成, 等. 中国南方构造变形对油气藏的控制作用[J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(1): 19~ 25
Zhao Zongju, Zhu Yan, Li Dacheng et al Control affect of tectonic deformation to oil-gas pools in southern China[J]. Oil & Gas Geology 2002, 23(1): 19~ 25

(编辑 李树森)

①朱铨. 南方下组合地球物理勘探技术. 中国南方下组合油气勘探研讨会文稿汇编, 2005 132~ 140