

中上扬子地区海相隆坳格局与油气聚集保存

周 雁¹, 李双建¹, 张荣强¹, 叶丽琴¹, 柴 童²

(1. 中国石化石油勘探开发研究院 构造与沉积储层实验室, 北京 100083;

2. 西安石油大学 地球科学与工程学院, 陕西 西安 710065)

摘 要:隆坳格局是海相油气聚集区及其保存条件的早期控制因素。综合地质、钻井、地震、测试等多种资料,编制关键界面埋深图、剥蚀程度图、古地质图、构造叠合图及构造演化剖面等,研究中上扬子地区海相隆坳格局特征,分析油气运移聚集和保存条件。结果表明:加里东期隆坳格局以 EW 向和 NE 向为主,出现鄂西坳陷、川南坳陷、黔东南坳陷、江汉盆地北部坳陷等四大坳陷以及江南—雪峰隆起、黔中隆起及乐山—龙女寺隆起等三大隆起;古隆起及扬子板块南、北缘长期稳定的大规模斜坡带控制了以下寒武统为烃源岩的油气运移和聚集;印支期对加里东期的构造反转作用明显,印支期的坳陷基本上位于加里东期古隆起之上;扬子地区的隆坳格局主要呈 SN 向和 NE 向,形成泸州隆起、川西坳陷、湘鄂西—黔西南坳陷;此时形成的古隆起控制了以下志留统和下二叠统为烃源岩的油气运移和聚集。

关键词:古构造;海相地层;扬子板块;保存条件;古生界;油气聚集;勘探方向;有利区

中图分类号:P618.13

文献标志码:A

Characteristics of Paleo-structure and Hydrocarbon Accumulation of Marine Sequence in the Middle and Upper Yangtze Region

ZHOU Yan¹, LI Shuang-jian¹, ZHANG Rong-qiang¹, YE Li-qin¹, CHAI Tong²

(1. Laboratory of Structural and Sedimentological Reservoir Geology, Petroleum Exploration and Production

Research Institute of SINOPEC, Beijing 100083, China; 2. School of Earth Sciences and

Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, Shaanxi, China)

Abstract: The uplift and depression patterns are early control factors of hydrocarbon accumulation and preservation conditions in marine sequence. Based on the geology, drilling, seismic and test data, the depth maps of critical interface, erosion degree maps, paleo geological map, superimposed tectonic map and evolution profiles of paleo-structure were compiled, and the uplift and depression patterns of marine sequence were studied, and the petroleum migration and accumulation, and preservation conditions were analyzed. The results show that the uplift and depression patterns in Caledonian are dominated by EW and NE directions, and appear four depressions including West Hubei depression, South Sichuan depression, Southeast Guizhou depression and North Jiangnan Basin depression, and three uplifts including Jiangnan-Xuefeng uplift, Middle Guizhou uplift and Leshan-Longnusi uplift; paleo-uplifts and large-scale slope belts with long-term stability in the southern and northern edges of Yangtze Plate, controls the hydrocarbon migration and accumulation of Lower Cambrian source rocks; the tectonic inversion

收稿日期:2016-01-27

基金项目:国家科技重大专项项目(2011ZX05005-002);国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)项目(2012CB214806)

作者简介:周 雁(1967-),男,安徽砀山人,教授级高级工程师,理学博士,E-mail:zhouyan_syky@sinopec.com.

of Indosinian to Caledonian is obvious, and the Indosinian depression locates on the Caledonian paleo-uplift; the uplift and depression patterns in Yangtze region are dominated by SN and NE directions, forming Luzhou uplift, West Sichuan depression, and West Hunan and Hubei-Southeast Guizhou depression; the paleo-uplift formed controls the hydrocarbon migration and accumulation of Lower Silurian and Lower Permian source rocks.

Key words: paleo-structure; marine stratum; Yangtze Plate; preservation condition; Paleozoic; petroleum accumulation; exploration direction; favourable area

0 引言

中国大陆长期处于全球动力学复合-联合体系,经历了多块体拼合,形成了一系列具有多旋回叠加结构的特色海相沉积盆地^[1-5]。随着油气勘探的发展,该领域显示出“更深、更广、更复杂”的特点,油气聚集区及其保存条件成为勘探过程中最重要的因素和关键环节^[6-7]。对于油气聚集和保存条件的研究,近年来呈升温趋势。根据《AAPG Bulletin》发表文章统计,1990~2013年全球相关文献共88篇,平均每年不到4篇,2014年达到11篇(如文献[8]),2015年超过20篇(如文献[9])。

在中国,20世纪六七十年代,相关研究是在“源控论”、“复式油气聚集区”的主导下开展的,认识到南方海相地层的特点有:构造大、领域大、资源潜力大;目的层多、圈闭多、油气显示多、地层老,关键在于保存条件^[10]。20世纪八九十年代,随着微观测试技术的进步,以突破压力为核心的盖层微观评价体系得以建立^[11]。同时,“叠合复合盆地”、“含油气系统”、“油气成藏组合”等指导的油气勘探深化了有关保存的相关研究^[6]。21世纪以来,众多学者开展了“岩性油气藏”、“流体压力封存箱”、“断层封堵性”、“源盖控烃”等研究,油气保存条件重要性认识进一步增强^[6-7,12-17]。

在中国南方,近半个世纪的勘探和研究成果表明,隆坳格局是海相油气聚集区及其保存条件的早期控制因素^[10,18]。随着加里东期—印支期隆坳格局的发展演化与构造迁移,南方海相中生界—古生界油气的生成、运移、聚集成藏、保存和破坏经历了多期次、阶段式发展和演化等复杂过程。研究不同时期盆地隆坳格局对于整体分析油气动态成藏和保存条件分布规律具有重要意义。

本文以系统编图为基础,综合研究了中上扬子地区加里东期和印支期隆坳格局特点,揭示了构造格局及其演变对成藏要素的控制作用,分析了油气聚集保存条件,讨论了不同烃源岩控制的勘探方向

和有利勘探区。

1 主要研究方法

为了揭示中上扬子地区海相隆坳格局与油气聚集保存区,本文综合研究区历年来地质、钻井、地震、测试等多种资料,编制了系列古构造图、剥蚀程度图及构造演化图等图件,力图刻画不同时期盆地隆坳格局的展布与演化,分析油气动态成藏和保存条件。

古构造图是用某一地质历史时期沉积盖层的等厚线表示该时期地壳的隆起和坳陷状况。这类图件可以用于分析关键构造时期油气运移和聚集的有利区。

采用以朱夏院士盆地研究TSM系统工作程式为指导思想编制的TSM盆地模拟技术来恢复中上扬子地区的古构造演化史^[19]。古构造恢复过程中用到的地层残余厚度主要根据盆地内区域地震剖面解释成果、600余口钻井地层厚度和露头区1:200 000地质调查报告中实测地层厚度汇编而成。

不整合剥蚀量恢复是多旋回盆地古构造恢复过程中的难题。前人针对研究区做过大量的探索。曾道富利用沉积速率比值法对不同时期的地层剥蚀量进行了初步恢复^[20];卢庆治等利用古温标反演法恢复了川东北地区部分钻井的地层剥蚀量^[21];邓宾等利用磷灰石裂变径迹和镜质体反射率反演校正方法恢复了四川盆地晚白垩世以来和新近纪的剥蚀量^[22];袁玉松等利用古温标反演法恢复了鄂西渝东地区燕山期以来的地层剥蚀量^[23]。

本文充分借鉴前人研究成果,利用古温标反演法恢复了中扬子地区近100口重点探井不同时期的地层剥蚀量;然后在不同时期古地质图的约束下,进行了主要不整合面剥蚀量平面分布的成图,成图方法参见文献[23];在地层残余厚度和不整合面剥蚀厚度恢复的基础上,采用回剥法进行地层古厚度的恢复,回剥过程中用到的地层岩性分层、孔隙度、密度和孔隙度与深度的经验关系式参见文献[24]。

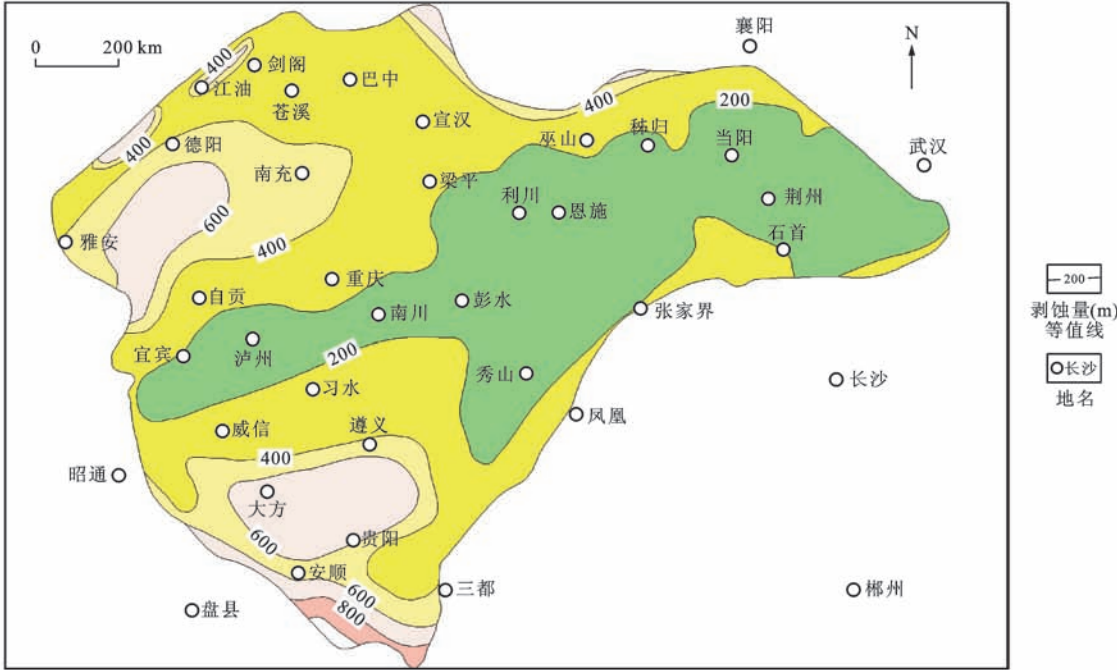


图 2 加里东期剥蚀程度
Fig. 2 Erosion Degree Map in Caledonian

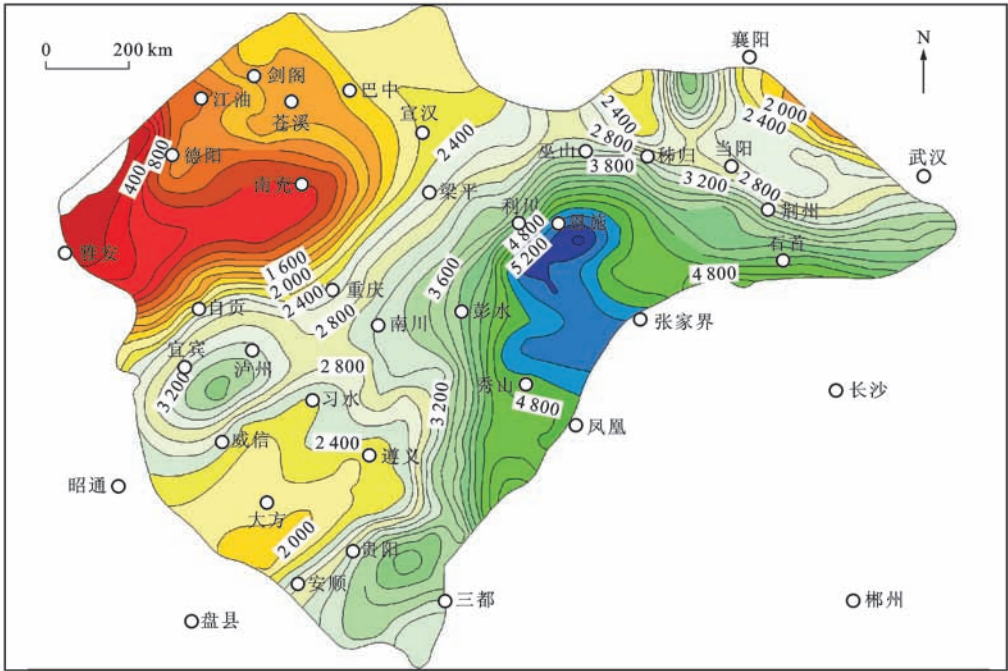


图 3 泥盆系沉积前寒武系底面埋深

Fig. 3 Depth Map of Precambrian Underside Surface Before Devonian Deposition

1 000 m,而川中和黔中两个古隆起上缺失了志留系地层(图 4)。若以古地温梯度 $30\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$ 推算,主要发育在扬子北部被动大陆边缘及扬子台内坳陷带内沉积中心的下寒武统底部烃源岩的最高古地温在 $120\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内,如中上扬子地区慈利—秀山一带的古地温约为 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$,上扬子南部泸州一带的古地温约为 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$,黔南坳陷古地温达 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$,可

能已演化为成熟早期—成熟阶段,而其他绝大部分地区尚处于未成熟阶段。加里东运动并没有改变志留系沉积中心的展布规律,从而使扬子板块泥盆纪沉积前表现为“隆坳相间”的格局,即鄂西坳陷、川南坳陷、黔东南坳陷与江汉盆地北部坳陷等,而加里东期形成的古隆起(如乐山—龙女寺隆起、江南—雪峰隆起、黔中隆起等)是该期志留系成熟烃源岩油气运

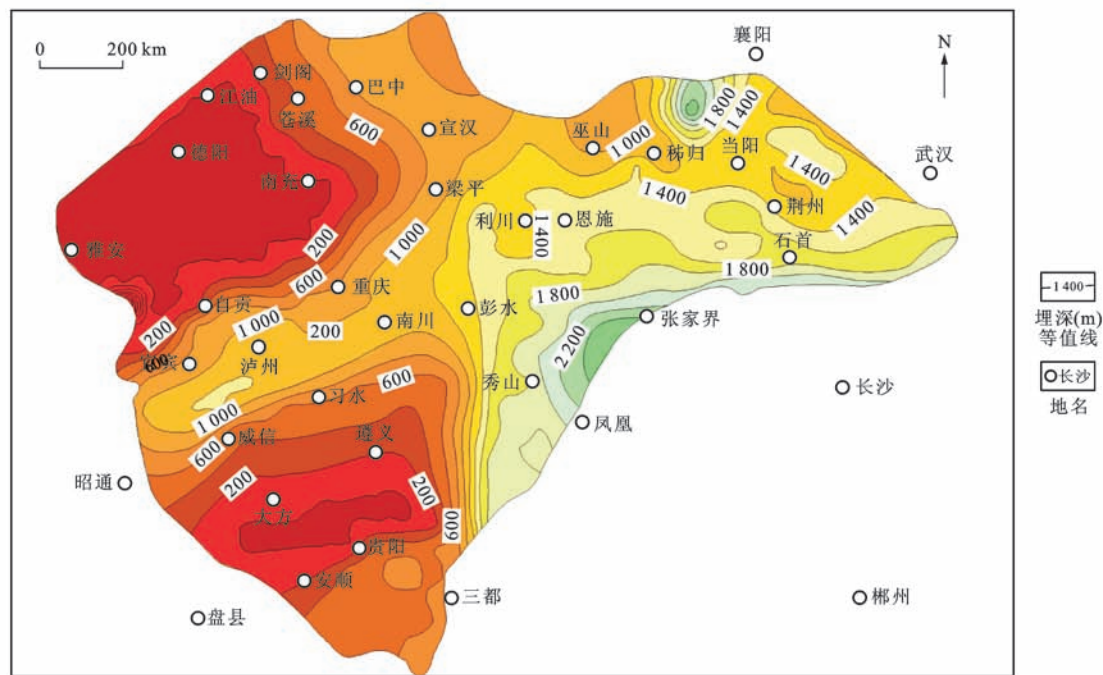


图4 泥盆系沉积前志留系底面埋深

Fig. 4 Depth Map of Silurian Underside Surface Before Devonian Deposition

移的指向区。

对寒武系烃源岩来讲,加里东期大部分地区正处于其生油高峰期,沿扬子准台地南缘的江南大断裂为控制早古生代各期的相变带,亦为台地相区与盆地相区的转折带^[25]。南侧的盆地与台地间存在的长期稳定的北高南低斜坡极有利于油气由南向北的区域运移。沿此带集中了扬子地区绝大多数古油藏及沥青显示带,如麻江古油藏、瓮安古油藏以及下古生界的若干沥青显示带全部分布于这个转折带附近,富集的沥青储量(下古生界)约为 13.5×10^8 t,折算原油储量约为 21.6×10^8 t。因此,可以认为这个转折带是加里东期扬子地区最重要的油气聚集带。

在扬子准台地北缘具有与南缘类似的石油地质条件,沥青显示带、古油藏的分布特征显示该区也是一个加里东期有利油气聚集带。四川盆地乐山—龙女寺隆起此时业已形成,并成为重要的油气运移指向区。

3 印支期隆坳格局及油气聚集特征

华力西期构造运动在扬子地区的表现并不十分强烈,对古生界油气藏的形成与破坏影响相对较小。然而印支运动(及其后的燕山、喜山运动)对古生界石油地质条件却有重要影响。

3.1 构造面貌与隆坳展布

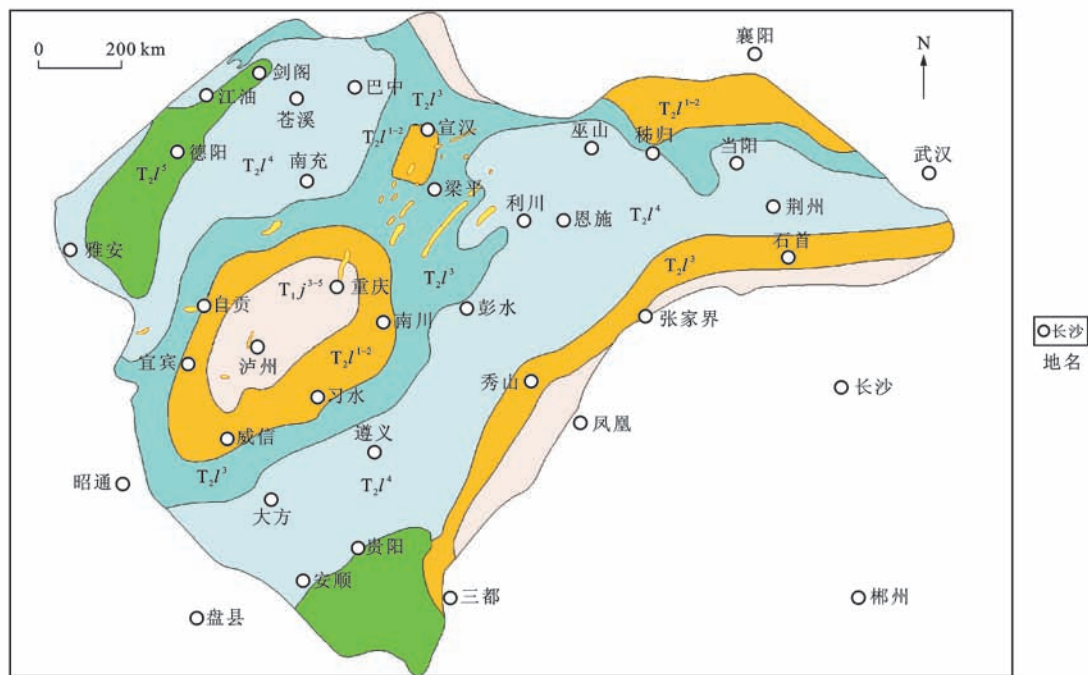
印支运动是发生在中三叠世与晚三叠世之间的

一场使中国南方发生重大变格的构造运动,使中国南方结束了海相沉积的发展历史。它不仅使中国南方大部分地区的中古生界发生褶皱,形成以梳状、箱状为特征的过渡型褶皱带,同时导致华南地区这一时期显著的岩浆活动和变质交代作用。在中国南方的不同地区,其发生的时段略有差异,东部地区发生于中三叠世末期,滇黔桂地区、川西地区则发生于晚三叠世早期末。

在华南褶皱区内,中三叠统几乎已被剥蚀殆尽,上三叠统普遍以角度不整合覆于早、中三叠世或古生代及元古代地层之上。

扬子地区印支运动主要表现为隆升运动,以中三叠统雷口坡组或巴东组为主体,形成大的NE向隆起和坳陷,上三叠统须家河组假整合于中三叠统不同层位之上,而褶皱运动在本区内表现不明显(图5)。在中上扬子地区可以看到由雷口坡组或巴东组组成的“一隆两坳”,一隆即为泸州隆起,隆起顶部由嘉陵江组三段至五段地层组成,两坳则为川西坳陷和湘鄂西—黔西南坳陷,川西坳陷轴部由雷口坡组第五段组成,湘鄂西—黔西南坳陷由巴东组第四段组成。在黔西南的郎岱、贞丰地区,上三叠统与下伏中三叠统为连续沉积,其他地区表现为假整合接触。

以中三叠世末石炭系底面埋深(图6)为例,中国南方印支期坳陷最深的地区为南盘江地区,最深可达6000 m,其次为湘鄂西和湘中地区,最深为



T_{1j} 代表下三叠统嘉陵江组; T_{2l} 代表三叠系中统雷口坡组; 地层代号上标代表该组的分段号

图 5 中三叠世末古地质图

Fig. 5 Ancient Geological Map at the End of Middle Triassic

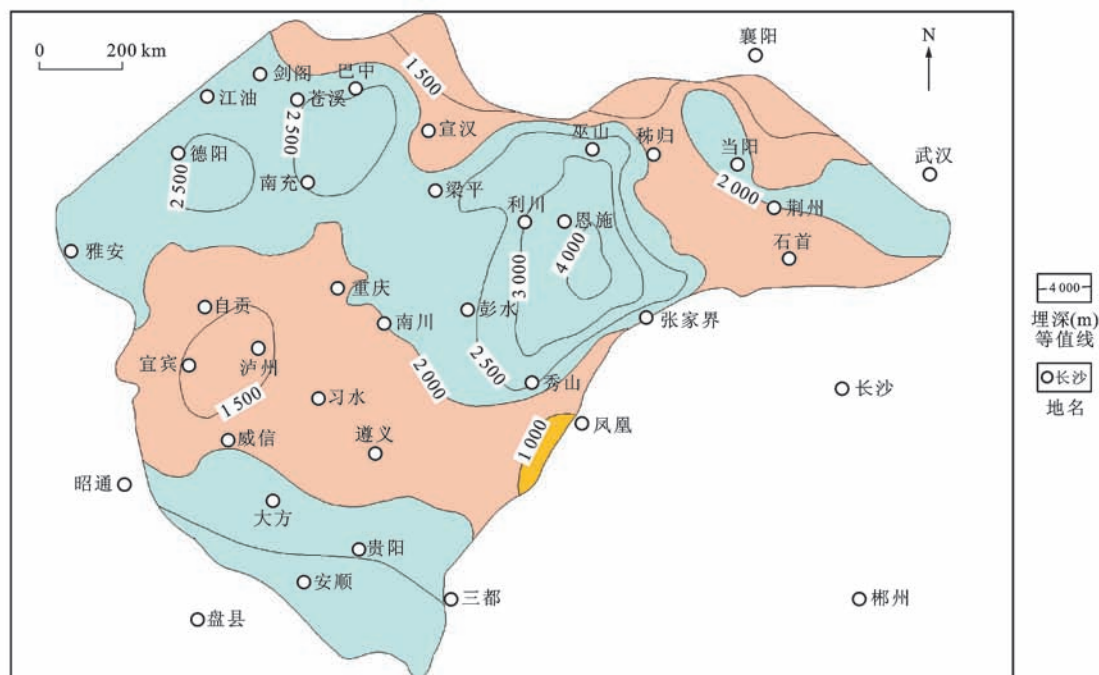


图 6 中三叠世末石炭系底面埋深

Fig. 6 Depth Map of Carboniferous Underside Surface in Late Middle Triassic

4 000 m, 该期隆起在中扬子地区主要是泸州—开江隆起, 石炭系底面埋深为 1 500~2 500 m, 与周边拗陷的相对高差为 500~1 000 m, 是该期油气聚集的最有利区带。另外, 黔中隆起、江南—雪峰隆起在印支末期也开始持续的区域抬升。下扬子大部分地区印支早期已经抬升剥蚀。

综合前人在四川盆地、江汉盆地所做的剥蚀期次与剥蚀程度工作的基础上, 本文编制了扬子板块印支期的区域剥蚀程度图(图 7)。从图 7 可以看出: 印支期剥蚀程度最大的地区为扬子克拉通周缘的造山带, 即龙门山、江南—雪峰隆起、勉略缝合带南侧一带, 剥蚀量均在 2 000 m 以上, 在隆起核部可

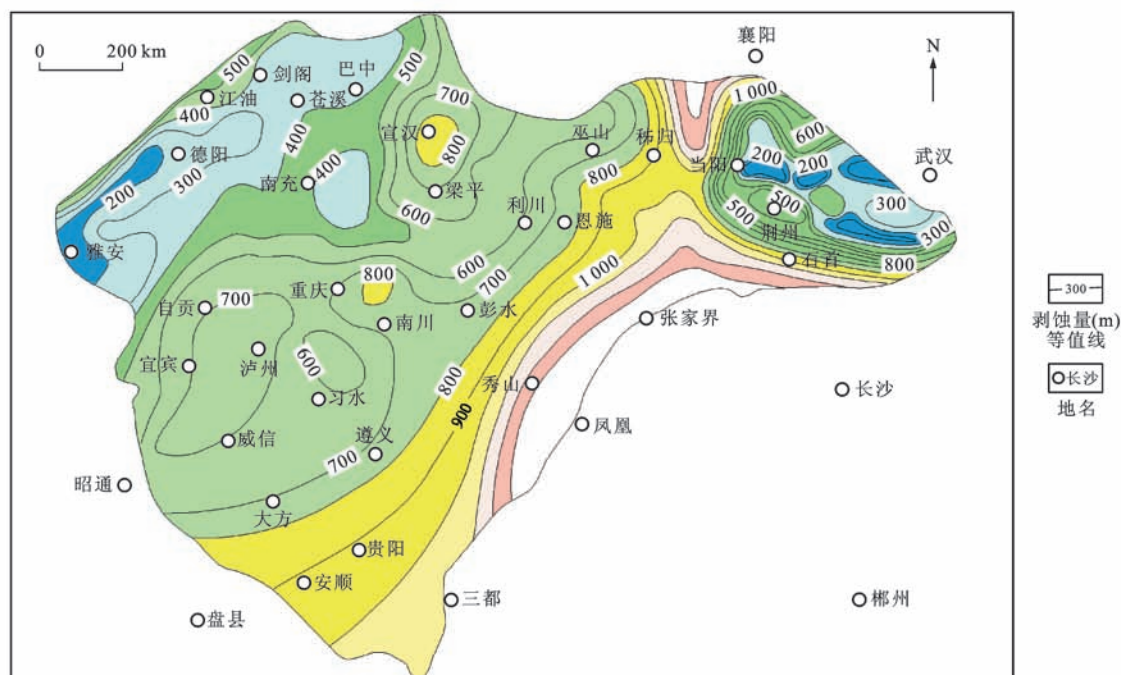


图7 印支期剥蚀程度

Fig. 7 Erosion Degree Map in Indosinian

能更高;在四川盆地内部因岩石圈挠曲形成了泸州—开江隆起,剥蚀量为800~1000 m;川东地区稍低,剥蚀量为600~700 m;川西地区较低,剥蚀量为300~400 m;江汉盆地与下扬子地区在盆地内的剥蚀量亦在300~400 m。

3.2 油气聚集特征

中三叠世末,厚逾千米的中、下三叠统含膏区域性盖层覆盖了扬子地区海相古生代地层。此时,上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组(高家边组)黑色泥岩已进入生油高峰,上古生界源岩在部分地区也已成熟,加里东期后保存下来的先期原油及氧化沥青随各地不同的沉降埋藏进一步演化并提供部分烃源。这些烃源在适当条件下于古生界(包括中、下三叠统)地层中聚集构成了印支期油气藏。如泸州—开江隆起周边的卧龙河、沙罐坪、建南、孔滩、榕山镇等处腹地发现了 C_2 、 P_1 、上二叠统长兴组(P_2ch)、 T_1 等多层位印支期油源的储层沥青,南丹大厂 D_2 礁型古油藏,平塘卡洛 C_1 砂岩古油藏等。

从上三叠统沉积前寒武系底面埋深图(图8)可以看出:黔南坳陷寒武系底面埋藏最深,在10000 m以上,湘鄂西桑植—永顺一带次之,在8000 m以上;同时,寒武系底面的古构造图存在几个台内隆起区,即川西雅安—川南威远—川中南充一带为传统的川中隆起,埋深为2000~3000 m;黔中隆起带的埋深为4000~4500 m;泸州一带的埋深小于4500 m;

四川盆地其他地区的埋深一般为5000~6000 m。上三叠统沉积前志留系底面埋深图(图9)与寒武系底面埋深图(图8)所展示的隆坳格局类似,只不过是埋深更浅,志留系底部最大埋深在黔南地区,可达10000 m,湘鄂西坳陷次之,在张家界附近可达6000 m,在四川盆地仍然可见川中隆起对志留系底面埋深的控制,在威远一带埋深最浅,为2000 m,黔中隆起埋深更浅,最浅小于1500 m。二叠系底面的埋深明显不受加里东期古隆起的控制,二叠系底面的古构造呈现出NE向3个坳陷带和2个隆起带的特征(图10),自东北向西南分别为当阳—武汉坳陷带、石首—宜昌隆起带、湘鄂西—黔南坳陷带、黔中—泸州—石柱隆起带、川北—川西坳陷带。若以平均古地温梯度 $30\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$ 推算,埋藏最深的湘鄂西桑植—永顺一带寒武系在此时的古地温为 $240\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 270\text{ }^{\circ}\text{C}$,志留系的古地温为 $180\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$,烃源岩已演化至过成熟阶段,以混生湿气与干气为主;在川东—川东南构造斜坡部位寒武系古地温为 $120\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$,志留系的古地温为 $100\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 120\text{ }^{\circ}\text{C}$,均为生烃高峰期,此时加里东期古隆起仍然是油气运移的指向区。二叠系烃源岩整体埋深不深,最高不超过3000 m,古地温约为 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$,处于生烃开始到生烃高峰的转换阶段,此时的印支期古隆起、泸州和开江—梁平隆起是其油气运移的指向区。

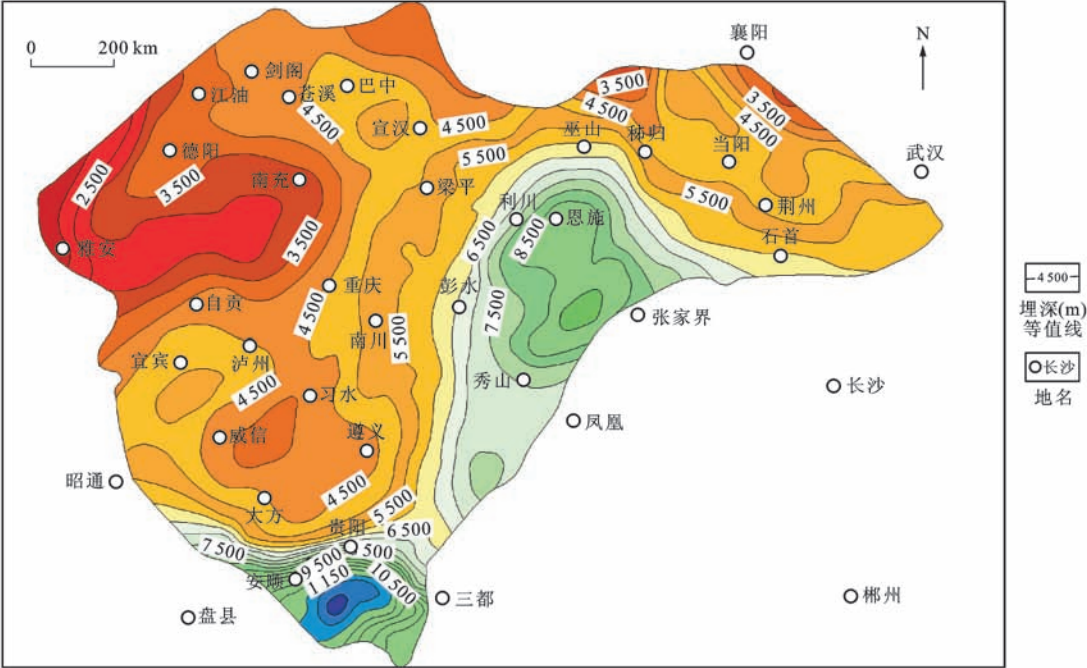


图 8 上三叠统沉积前寒武系底面埋深

Fig. 8 Depth Map of Precambrian Underside Surface Before Upper Triassic Deposition

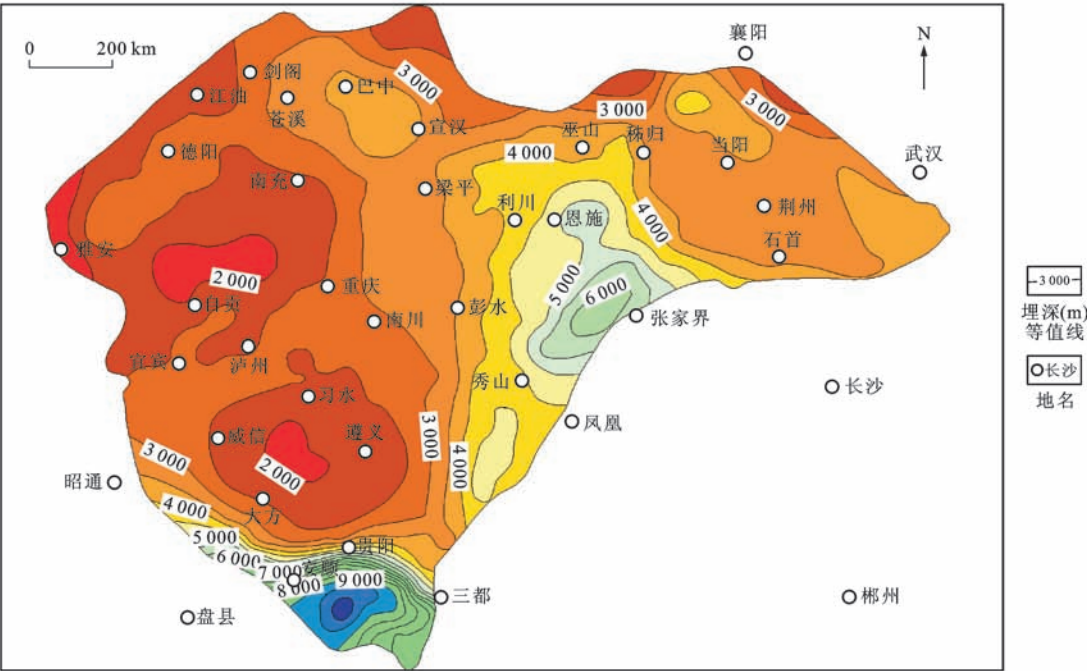


图 9 上三叠统沉积前志留系底面埋深

Fig. 9 Depth Map of Silurian Underside Surface Before Upper Triassic Deposition

经过印支期构造运动所引起的隆升、剥蚀后,寒武系烃源岩基本都已经达到或超过最高生烃温度,而志留系和下二叠统烃源岩的热演化程度适中。扬子板块内古构造基本表现为“大隆大坳”的格局。坳陷中心在上扬子地区主要有鄂西坳陷与川西北坳陷,中扬子地区因黄陵背斜的强烈隆升而分隔为当阳坳陷与嘉鱼坳陷;扬子板块内的隆起区主要有乐

山—龙女寺隆起、黔中隆起、江南—雪峰隆起与泸州—开江隆起等,乐山—龙女寺隆起、黔中隆起等属加里东期以来的继承性古隆起,与四周坳陷的高差在 500 m 左右,是成熟烃源岩生烃、排烃时油气运移的高势区,而泸州—开江隆起是印支期形成的古隆起,与四周坳陷的高差在 200 m 左右,是此时油气运移的低势区^[26-27]。

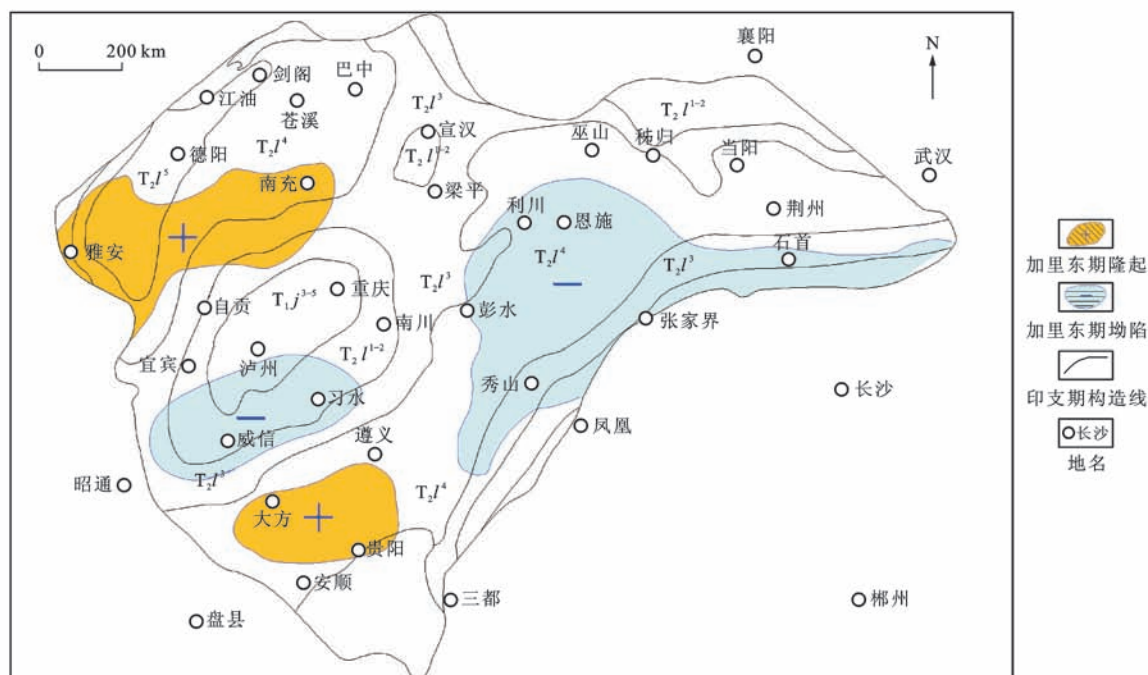


图 11 加里东期构造与印支期构造叠合

Fig. 11 Superimposed Tectonic Map in Caledonian and Indosinian

造的叠加和反转作用。该构造演化剖面是在地层厚度恢复的基础上,利用层拉平原理,通过回剥恢复不同时期地层沉积前下伏地层的埋深,以此反映古构造的形成与迁移过程。

由贯穿四川盆地 SN 向的苍溪—大方剖面演化史来看,在寒武系沉积末奥陶系沉积前,川中隆起就已经形成,它控制了寒武系地层的沉积厚度,隆起的高点在南充一带^[24]。该隆起在二叠纪沉积前持续发育,对奥陶系和志留系的沉积具有控制作用。黔中隆起的隆起幅度没有川中隆起大,在寒武纪末期隆起的规模不大。奥陶纪—二叠纪前,该隆起也是持续发育,控制了奥陶系和志留系沉积,该构造剖面经过的地区都缺失了泥盆系和石炭系沉积。剖面演化显示二叠系完全覆盖了加里东期的古隆起,隆起在海西期已经不对沉积产生控制,二叠系在区域上的厚度是稳定的。晚二叠世末三叠纪沉积前,泸州隆起就已经初步形成,它控制了上二叠统的沉积厚度,在早—中三叠世,泸州隆起进一步发育,先前形成的川中隆起和黔中隆起都演变成了泸州隆起的斜坡,但是以奥陶系底面为界,加里东期古隆起仍然控制着奥陶系以下地层的油气运移方向,奥陶系以上地层的油气运移受控于印支期的古隆起。晚三叠世,四川盆地总体表现为南升北降,由北向南表现为一个巨大的向北斜坡,前期的加里东期和印支期古隆起都不再对沉积起到控制作用,但它们仍然对油

气运移有控制作用,仍然是油气运移的低势区。从整个剖面的演化来看,泸州隆起是一个典型的印支期古隆起叠加在加里东期古拗陷的构造,该区志留系烃源岩发育,又有适时的古隆起发育,对以志留系为烃源岩的油气勘探应该具有良好的前景。川中隆起和黔中隆起是印支期以前奥陶系以下地层油气运移的持续指向区,但它们仅能控制寒武系烃源岩的油气,因此,在这些地区与寒武系生烃拗陷相邻的古斜坡部分油气勘探比较有利。

由贯穿四川盆地 EW 向的成都—利川剖面构造演化史来看,四川盆地 EW 向构造在加里东期和印支期明显存在一次大规模的构造反转,在加里东期表现为西高东低的构造格局,印支期特别是晚三叠世以来主要表现为西低东高的构造格局。

川中隆起控制了寒武系、奥陶系和志留系的沉积厚度,尤其是对志留系的控制作用比较明显,同样该构造线所经过的地区缺失了泥盆系与石炭系沉积。二叠纪开始,川中隆起对沉积的控制作用已经消失,但是仍然控制着奥陶系以下地层的构造面貌,是以寒武系为烃源岩的油气运移有利指向区。中—晚三叠世末的印支运动在该构造线上仅表现为梁平地区的低幅度隆起,控制了早—中三叠世沉积,随后被晚三叠世末西低东高的大斜坡所改造。

5 结 语

(1)加里东期,华夏板块与扬子板块 NW 向挤

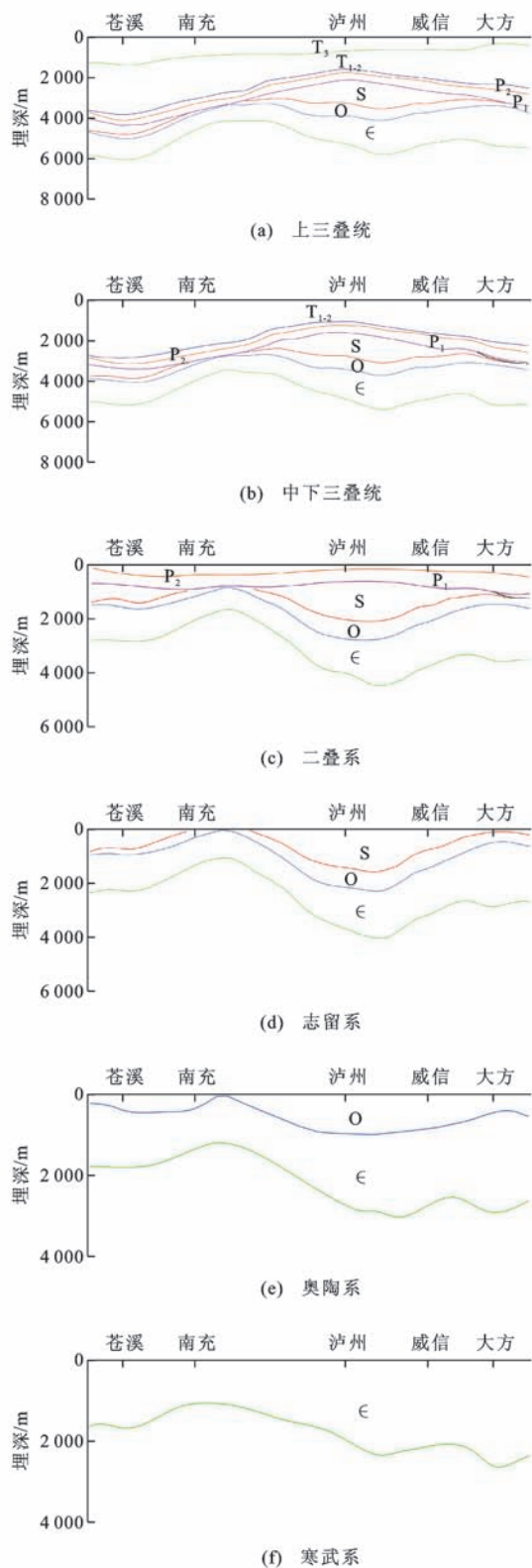


图 12 四川盆地 SN 向古构造演化剖面

Fig. 12 Evolution Profiles of SN-trending Paleo-structure in Sichuan Basin

压拼合,秦岭地块与华南板块 SN 向碰撞。受双重应力作用,隆坳格局以 EW 向和 NE 向为主,出现鄂西坳陷、川南坳陷、黔东南坳陷、江汉盆地北部坳陷

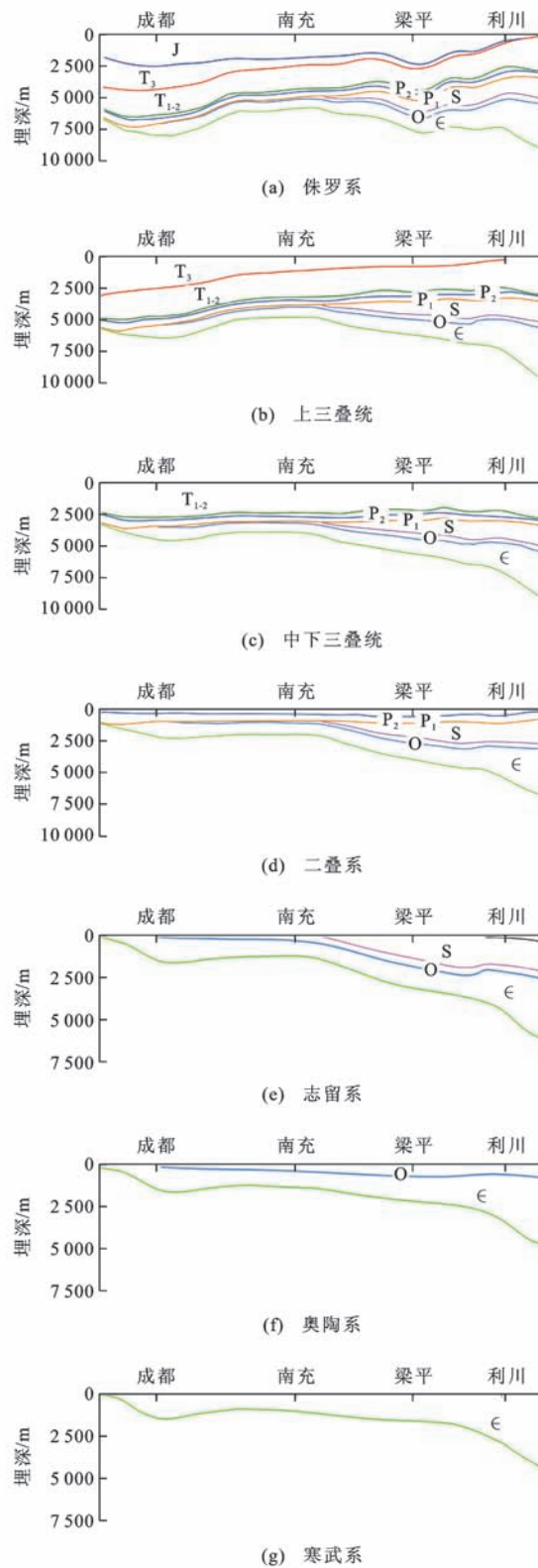


图 13 四川盆地 EW 向古构造演化剖面

Fig. 13 Evolution Profiles of SW-trending Paleo-structure in Sichuan Basin

等四大坳陷以及江南—雪峰隆起、黔中隆起及乐山—龙女寺隆起等三大隆起。古隆起及扬子板块南缘和北缘长期稳定的大规模斜坡带控制了以下寒武

统为烃源岩的油气运移和聚集。

(2)受周缘板块碰撞和陆内造山作用的影响,印支期隆坳格局主要呈SN向和NE向,形成泸州隆起、川西坳陷、湘鄂西—黔西南坳陷。此时形成的古隆起控制了以下志留统和下二叠统为烃源岩的油气运移和聚集。

(3)印支期对加里东期的构造反转作用明显,印支期的坳陷基本上位于加里东期的古隆起之上。如印支期的泸州隆起叠覆在加里东期的川南坳陷之上,印支期的湘鄂西—黔西南坳陷则横跨于加里东期的湘鄂西坳陷与黔中隆起之上。

(4)关于中国南方NW向构造带的研究,该地区存在系列NW向构造,中三叠世末石炭系底面、上三叠统沉积前志留系底面及上三叠统沉积前二叠系底面埋深都有反映。初步工作表明,这些NW向构造构成了大型的转换带,如垭紫罗断裂具有明显的重磁条带状异常,对二叠纪以来的沉积作用控制明显,影响成藏流体富集聚集。建议对中国南方NW向构造带及其控油气作用进行深入系统研究。

参考文献:

References:

- [1] 刘光鼎. 试论残留盆地[J]. 勘探家, 1997, 2(3): 1-4.
LIU Guang-ding. A Discussion on Residual Basin[J]. Petroleum Explorationist, 1997, 2(3): 1-4.
- [2] 贾承造, 何登发, 石 昕, 等. 中国油气晚期成藏特征[J]. 中国科学: D辑, 地球科学, 2006, 36(5): 412-420.
JIA Cheng-zao, HE Deng-fa, SHI Xin, et al. Late Hydrocarbon Accumulation Characteristics of Chinese Oil and Gas[J]. Science in China: Series D, Earth Sciences, 2006, 36(5): 412-420.
- [3] 刘池洋. 叠合盆地特征及油气赋存条件[J]. 石油学报, 2007, 28(1): 1-7.
LIU Chi-yang. Geologic Characteristics and Petroleum Accumulation Conditions of Superimposed Basins[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(1): 1-7.
- [4] 庞雄奇, 周新源, 姜振学, 等. 叠合盆地油气藏形成、演化与预测评价[J]. 地质学报, 2012, 86(1): 1-103.
PANG Xiong-qi, ZHOU Xin-yuan, JIANG Zhen-xue, et al. Hydrocarbon Reservoirs Formation, Evolution, Prediction and Evaluation in the Superimposed Basins[J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(1): 1-103.
- [5] 赵文智, 张光亚, 王红军, 等. 中国叠合含油气盆地石油地质基本特征与研究方法[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(2): 1-8.
ZHAO Wen-zhi, ZHANG Guang-ya, WANG Hong-jun, et al. Basic Features of Petroleum Geology in the Superimposed Petroliferous Basins of China and Their Research Methodologies[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(2): 1-8.
- [6] 金之钧. 我国海相碳酸盐岩层系石油地质基本特征及含油气远景[J]. 前沿科学, 2010, 4(13): 11-23.
JIN Zhi-jun. Petroliferous Features of Marine Carbonate Strata and Hydrocarbon Resource Prospects in China[J]. Frontier Science, 2010, 4(13): 11-23.
- [7] 邱中建, 邓松涛. 中国油气勘探的新思维[J]. 石油学报, 2012, 33(增1): 1-5.
QIU Zhong-jian, DENG Song-tao. New Thinking of Oil-gas Exploration in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(S1): 1-5.
- [8] HELLER R, VERMYLEN J, ZOBACK M. Experimental Investigation of Matrix Permeability of Gas Shales[J]. AAPG Bulletin, 2014, 98(5): 975-995.
- [9] HAO F, ZHU W L, ZOU H Y, et al. Factors Controlling Petroleum Accumulation and Leakage in Overpressured Reservoirs[J]. AAPG Bulletin, 2015, 99(5): 831-858.
- [10] 马永生, 楼章华, 郭彤楼, 等. 中国南方海相地层油气保存条件综合评价技术体系探讨[J]. 地质学报, 2006, 80(3): 406-417.
MA Yong-sheng, LOU Zhang-hua, GUO Tong-lou, et al. An Exploration on a Technological System of Petroleum Preservation Evaluation for Marine Strata in South China[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(3): 406-417.
- [11] 张义纲. 天然气的生成聚集和保存[M]. 南京: 河海大学出版社, 1991.
ZHANG Yi-gang. Natural Gas Accumulation and Reservoir[M]. Nanjing: Hohai University Press, 1991.
- [12] 戴金星, 卫延召, 赵靖舟. 晚期成藏对大气田形成的重大作用[J]. 中国地质, 2003, 30(1): 10-19.
DAI Jin-xing, WEI Yan-zhao, ZHAO Jing-zhou. Important Role of the Formation of Gas Accumulations in the Late Stage in the Formation of Large Gas Fields[J]. Geology in China, 2003, 30(1): 10-19.
- [13] 吕延防, 付 广, 张发强, 等. 超压盖层封烃能力的定量研究[J]. 沉积学报, 2000, 18(3): 465-468, 479.
LU Yan-fang, FU Guang, ZHANG Fa-qiang, et al. Quantitative Study on Sealing Ability of Ultra-pressure Caprock[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2000, 18(3): 465-468, 479.
- [14] 郝 芳, 董伟良. 沉积盆地超压系统演化、液体流动与成藏机理[J]. 地球科学进展, 2001, 16(1): 79-85.
HAO Fang, DONG Wei-liang. Evolution of Fluid

- Flow and Petroleum Accumulation in Overpressured Systems in Sedimentary Basins[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2001, 16(1): 79-85.
- [15] 罗晓容. 油气运聚动力学研究进展及存在问题[J]. *天然气地球科学*, 2003, 14(5): 337-346.
- LUO Xiao-rong. Review of Hydrocarbon Migration and Accumulation Dynamics[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2003, 14(5): 337-346.
- [16] 付 广, 王有功, 苏玉平. 超压泥岩盖层封闭性演化规律及其研究意义[J]. *矿物学报*, 2006, 26(4): 453-459.
- FU Guang, WANG You-gong, SU Yu-ping. Evaluation Law for Sealing of Overpressured Mudstone Caprock and Its Research Significance[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2006, 26(4): 453-459.
- [17] 郭彤楼, 张汉荣. 四川盆地焦石坝页岩气田形成与富集高产模式[J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(1): 28-36.
- GUO Tong-lou, ZHANG Han-rong. Formation and Enrichment Mode of Jiaoshiba Shale Gas Field, Sichuan Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(1): 28-36.
- [18] 刘树根, 李智武, 孙 玮, 等. 四川含油气叠合盆地基本特征[J]. *地质科学*, 2011, 46(1): 233-257.
- LIU Shu-gen, LI Zhi-wu, SUN Wei, et al. Basic Geological Features of Superimposed Basin and Hydrocarbon Accumulation in Sichuan Basin, China[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2011, 46(1): 233-257.
- [19] 徐旭辉, 江兴歌, 朱建辉, 等. 盆地系统定量分析和计算机模拟应用[J]. *石油物探*, 1997, 36(3): 56-69.
- XU Xu-hui, JIANG Xing-ge, ZHU Jian-hui, et al. Basin System Quantitative Analysis and Computer Modeling Application[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 1997, 36(3): 56-69.
- [20] 曾道富. 关于恢复四川盆地各地质时期地层剥蚀量的初探[J]. *石油实验地质*, 1988, 10(2): 134-141.
- ZENG Dao-fu. A Preliminary Study on the Restoration for the Various Denuded Sequences of Sichuan Basin[J]. *Experimental Petroleum Geology*, 1988, 10(2): 134-141.
- [21] 卢庆治, 胡圣标, 郭彤楼, 等. 川东北地区异常高压形成的地温场背景[J]. *地球物理学报*, 2005, 48(5): 1110-1116.
- LU Qing-zhi, HU Sheng-biao, GUO Tong-lou, et al. The Background of the Geothermal Field for Formation of Abnormal High Pressure in the Northeastern Sichuan Basin[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2005, 48(5): 1110-1116.
- [22] 邓 宾, 刘树根, 刘 顺, 等. 四川盆地地表剥蚀量恢复及其意义[J]. *成都理工大学学报: 自然科学版*, 2009, 36(6): 675-686.
- DENG Bin, LIU Shu-gen, LIU Shun, et al. Restoration of Exhumation Thickness and Its Significance in Sichuan Basin, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology: Science and Technology Edition*, 2009, 36(6): 675-686.
- [23] 袁玉松, 林娟华, 程心阳, 等. 鄂西渝东地区晚燕山—喜马拉雅期剥蚀量[J]. *地球物理学报*, 2014, 57(9): 2878-2884.
- YUAN Yu-song, LIN Juan-hua, CHENG Xin-yang, et al. Yanshan-Himalayan Denudation in Western Hubei-eastern Chongqing Area[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(9): 2878-2884.
- [24] 邱登峰, 李双建, 袁玉松, 等. 中上扬子地区地史模拟及其油气地质意义[J]. *油气地质与采收率*, 2015, 22(4): 6-13.
- QIU Deng-feng, LI Shuang-jian, YUAN Yu-song, et al. Geohistory Modeling and Its Petroleum Geological Significance of Middle-upper Yangtze Area[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2015, 22(4): 6-13.
- [25] 张永刚, 马宗晋, 王国力, 等. 中国南方海相油气成藏模式分析[J]. *地质学报*, 2007, 81(2): 236-243.
- ZHANG Yong-gang, MA Zong-jin, WANG Guo-li, et al. Hydrocarbon Reservoir Mode of Marine Sedimentary Rock in South China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(2): 236-243.
- [26] 赵宗举, 俞 广, 朱 琰, 等. 中国南方大地构造演化及其对油气的控制[J]. *成都理工大学学报: 自然科学版*, 2003, 30(2): 155-168.
- ZHAO Zong-ju, YU Guang, ZHU Yan, et al. Tectonic Evolution and Its Control over Hydrocarbon in Southern China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology: Science and Technology Edition*, 2003, 30(2): 155-168.
- [27] 肖开华, 李双建, 汪新伟, 等. 中、上扬子区志留系油气成藏特点与勘探前景[J]. *石油与天然气地质*, 2008, 29(5): 589-596.
- XIAO Kai-hua, LI Shuang-jian, WANG Xin-wei, et al. Hydrocarbon Accumulation Features and Exploration Direction in the Silurian of the Middle-upper Yangtze Platform[J]. *Oil and Gas Geology*, 2008, 29(5): 589-596.