

中上扬子地区地史模拟及其油气地质意义

邱登峰¹,李双建¹,袁玉松¹,毛小平^{2*},周雁¹,孙冬胜¹

(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.中国地质大学(北京) 能源学院,北京 100083)

摘要:利用三维盆地数值模拟技术恢复了中上扬子地区地史演化过程,在地史发育特征的基础上,分析了古构造对沉积的控制作用,并阐明了其发育的油气地质意义。结果表明,扬子板块泥盆纪沉积前表现为“隆凹相间”的格局,印支期在扬子地台上形成北东向的“一隆两坳”格局。对比加里东期与印支期的构造格局发现,印支期的川西坳陷基本上位于加里东期乐山—龙女寺隆起之上,印支期的泸州古隆起亦覆叠在加里东期的川南坳陷之上,南充—梁平一带位于构造转换的枢纽带,印支期的石首—宜昌隆起发育在加里东期的江汉盆地北部坳陷上,反映出印支期对加里东期的构造反转现象十分显著。从贯穿四川盆地东西向和南北向的2条构造演化剖面也可以看出,印支期对加里东期构造的叠加和反转,并反映出古构造的形成与迁移过程。泸州古隆起是一个典型的印支期古隆起叠加在加里东期古坳陷上的构造,形成了下生上储的油气资源配置关系,对以志留系为源的油气勘探应该具有良好的前景。乐山—龙女寺古隆起和黔中古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,与寒武系生烃坳陷相邻的古斜坡部位油气勘探比较有利。

关键词:地史模拟 回剥法 加里东期 印支期 构造反转 中上扬子地区

中图分类号:TE111.3

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2015)04-0006-08

Geohistory modeling and its petroleum geological significance of Middle–Upper Yangtze area

Qiu Dengfeng¹, Li Shuangjian¹, Yuan Yusong¹, Mao Xiaoping², Zhou Yan¹, Sun Dongsheng¹

(1. Laboratory of Structural and Sedimentological Reservoir Geology, Petroleum Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing City, 100083, China; 2. School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing City, 100083, China)

Abstract: The 3D basin modeling technique was used to restore the geohistory evolution process of Middle–Upper Yangtze area. Based on geological development characteristics, the control of paleo–tectonic on sedimentary was analyzed to point out its geological significance for hydrocarbon generation. The results show that depressions and uplifts developed alternately in the Yangtze area before Devonian sedimentary period, and an uplift and two depressions of north–east striking developed in Yangtze platform during Indo–Chinese epoch. Through comparing the structures developed in the Caledonian period and in Indo–Chinese epoch, Chuanxi depression developed in Indo–Chinese epoch locates on the Leshan–Longnusi uplift developed in the Caledonian period. Luzhou paleo–uplift developed in Indo–Chinese epoch superposes on the Chuan–nan depression developed in the Caledonian period. The zone of Nanchong–Liangping locates in structure transform regions and the Shishou–Yichang uplift develops in north depression of Jiangnan Basin, which suggests that the Caledonian strata reversed strongly in Indo–Chinese epoch. The Caledonian structures superposed and reversed strongly in Indo–Chinese epoch showing by the east–west and the north–south structural evolution profiles crossing the whole Sichuan Basin. The Luzhou paleo–uplift, superposed on the Caledonian paleo–depression developed in Indo–Chinese epoch, is a typical uplift

收稿日期:2015-05-14。

作者简介:邱登峰(1982—),男,湖北孝感人,工程师,硕士,从事构造地质及油气地质研究。联系电话:(010)82311175, E-mail:qiudf.syky@sinopec.com。

*通讯作者:毛小平(1965—),男,重庆忠县人,副教授,博士。联系电话:(010)82320319, E-mail:maoxp9@163.com。

基金项目:国家科技重大专项“海相碳酸盐岩油气资源潜力、富集规律与战略选区”(2008ZX05005-001-001),中国石化海相前瞻性项目“南方海相油气成藏动态分析及保存条件研究”(YPH-08082)。

which could accumulate hydrocarbons generated from the Silurian source rocks below. It could form favorable reservoirs and has good exploration prospect. The Leshan-Longnusi paleo-uplift and the Qianzhong paleo-uplift are the areas that receive the charge of hydrocarbons coming from the source rocks below until the Indo-Chinese epoch, but they only control the accumulation of the Cambrian hydrocarbons underlying the Ordovician. The paleo-slope adjacent to the hydrocarbon generation depression of the Cambrian source rocks is the benefit zone for hydrocarbon exploration.

Key words: geohistory modeling; backstripping method; Caledonian period; Indo-Chinese epoch; tectonic inversion; Middle-Upper Yangtze area

自从20世纪70年代Ojakangas首先用计算机实现一维沉积柱的升降模拟以来,盆地模拟方法发展神速^[1],作为一项高新仿真技术,它对降低油气勘探风险、深化地质认识并促进地学量化等方面有着重大意义^[2]。盆地数值模拟可以定量描述地质对象特征,综合考虑诸如沉积埋藏过程、成岩过程、温度场演化、压力场演化等沉积盆地演变的基本方面及其相互间的耦合关系^[3-4],为克服时空的限制、定量再现地质事件的发生、发展、演化过程提供一条可行之路^[5]。目前一个完整的盆地模拟系统是由地史模型、热史模型、成岩史模型、生烃史模型、排烃史模型(初次运移)、烃类运聚史模型(二次运移)6个模型有机组成^[6]。地史模型是盆地模拟的基础,应考虑沉积间断、沉积压实、欠压实(超压)、单层剥蚀、多层连续剥蚀、断层及古水深等地质现象^[6],其精度直接影响后面5个模型的精度,因此备受广大石油地质工作者的关注与重视^[6-7]。

中上扬子地区是在扬子克拉通台地基础上形成和发展起来的大型含油气叠合盆地,盆地沉积盖层发育齐全,自震旦纪至早中三叠世,整个扬子地块以升降运动占主导,发育一套巨厚的,以碳酸盐岩、泥岩、砂岩、蒸发岩等为主的台地相和大陆边缘相沉积,具有多旋回、多层系、多烃源层、多产层、油气多期成藏的特点^[8-11]。在漫长的地质演化历史中,中上扬子地区经历了多期次、不同性质的构造变动事件,不同构造事件不仅导致了原型盆地的形成和改造,同时它们之间的叠加、复合和联合,造就了现今复杂的构造形变图像^[8]。对于中上扬子地区的埋藏史,刘伊克等将地震剖面与钻井资料结合起来,对剖面上任意点进行回剥分析,给出了四川盆地的沉积史和构造史^[12];沃玉进等通过各二级构造区关键井埋藏史恢复,将印支运动以来中国南方海相层系的多期沉降与隆升划分为“早降晚抬”和“早抬晚降”2大类6种形式的埋藏演化史类型^[13];袁玉松等采用回剥法重建埋藏史,将中上扬子地区的埋藏史分为3种主要类型,即早抬持续型、早抬再降型和晚抬持续型^[14]。这些成果均是在单井埋藏史模

拟的基础上作出的分析和讨论。笔者采用朱夏院士提出的盆地研究TSM系统工作程式为指导思想的TSM盆地模拟技术^[15],重建了中上扬子地区地史演化过程,对深入认识该区演化历史及其与油气形成、聚集的关系具有重要意义。

1 区域地质背景

中上扬子地区大地构造位置隶属扬子地台中西部,北以商丹断裂带与秦岭褶皱系相邻,西以龙门山-小江断裂带与青藏-滇西褶皱区分界,西南以垭都-紫云-罗甸断裂带为界,东南则以江山-绍兴断裂与华南褶皱系相接^[16],东以连云港-黄梅大断裂与下扬子地块分隔^[17],面积近 $50 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。基底由前震旦系变质地层组成,最终于晋宁运动(距今1 000~830 Ma)固结^[8,18-21]。自中元古代以来,在秦岭造山带及其南北两侧大陆块伸展裂解—汇聚碰撞的大背景下,研究区经历了中新元古代、新元古代末—奥陶纪原特提斯、泥盆纪—中二叠世古特提斯、晚二叠世—侏罗纪新特提斯及白垩纪以来等5大收敛—聚合构造旋回,形成了丰富多彩的盆地原型及组合^[22-23]。根据前人的研究成果^[24],将中上扬子地区划分为四川盆地、黔西北宽缓褶皱带、黔南坳陷、武陵褶皱带、湘鄂西冲断褶皱带、江汉盆地及其北部褶皱带、监利通山冲断带等7个构造单元(图1)。

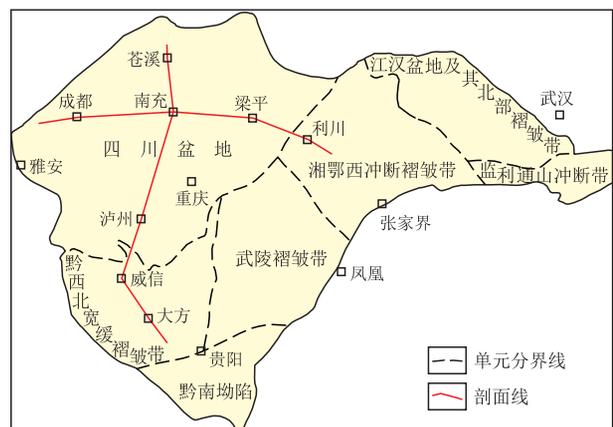


图1 中上扬子地区构造单元划分

Fig.1 Tectonic units division of Middle-Upper Yangtze area

2 方法原理

地史模拟的关键是恢复地层的古厚度,通过压实校正,消除地层厚度随时间和深度变化的影响,把某一地层单元的现今实测厚度恢复到沉积时或埋藏过程中某一时刻的厚度^[25]。采用回剥反演法来进行地层古厚度的恢复计算。

回剥反演法基于3条假设^[26-27]:①在压实过程中,地层骨架体积始终保持不变,地层体积变小是由地层孔隙体积变小引起的;②在压实过程中,地层横向宽度保持不变,仅纵向厚度随地层体积的变小而变小;③地层压实程度由埋深所决定,具不可逆性,即在埋深不超过最大古埋深时,地层压实程度保持不变。

地层骨架厚度的计算公式为

$$h_s = \int_{z_1}^{z_2} [1 - \phi(z)] dz \quad (1)$$

式中: h_s 为地层骨架厚度, m; z_1 和 z_2 分别为地层的顶、底界埋深, m; ϕ 为孔隙度; z 为埋深, m。

Athy 等基于正常压力提出的孔隙度—深度关系方程^[28-29], 认为孔隙度与埋深呈指数关系, 即

$$\phi(z) = \phi_0 \exp(-cz) \quad (2)$$

式中: ϕ_0 为地表孔隙度; c 为压实因子, 岩性不同其取值不同。

将式(2)代入式(1), 经过变换得到求取地层底界埋深的公式为

$$z_2 = h_s + z_1 + \frac{\phi_0}{c} [\exp(-cz_1) - \exp(-cz_2)] \quad (3)$$

TSM 地史模拟在现今残余地层格架的基础上, 结合钻井地层资料、孔隙度资料、剥蚀量资料, 按式(3)将上覆地层层层回剥、迭代得到各地层的原始沉积厚度, 进而按地层年代关系重建盆地的构造演化史, 在此过程中运用体元表达空间曲面, 运用体平衡技术保持变形过程中的体积守恒, 进而实现三维模拟^[30-31]。

3 地史模拟参数

3.1 地层时代参数

将中上扬子地区纵向上按照已有的地层厚度资料建立了11个地层层系, 并考虑了志留纪末、早中三叠世末、侏罗纪末等3期剥蚀因素。每个层系根据国际地层年代表给定底界地质年龄, 并以地层综合柱状体为依据统计了砂岩、泥岩和碳酸盐岩的

平均含量(表1)。

表1 中上扬子地区地层时代参数
Table1 Stratigraphic age parameters of Middle-Upper Yangtze area

地 层	底界地质 年龄/Ma	砂岩含 量, %	泥岩含 量, %	灰岩含 量, %	密度/ (g·cm ⁻³)
白垩系—新近系	145	50	50	0	2.5
侏罗系剥蚀	168	60	40	0	2.3
侏罗系	200	60	40	0	2.3
上三叠统	228	70	30	0	2.3
中下三叠统剥蚀	236	0	5	95	2.4
中下三叠统	251	0	5	95	2.4
上二叠统	275	0	30	70	2.4
下二叠统	299	0	15	85	2.4
石炭系	359	0	20	80	2.4
泥盆系	416	70	10	20	2.5
志留系剥蚀	428	40	60	0	2.4
志留系	444	40	60	0	2.4
奥陶系	488	0	10	90	2.4
寒武系	542	5	15	80	2.5

3.2 构造沉积体

现今的残余地层厚度来源于全国第3次油气资源评价的地层厚度数据^[32]。中上扬子地区寒武系分布不均匀, 厚度为500~3 600 m。奥陶系在北部厚度薄, 仅为100~200 m, 中南部除黔西北宽缓褶皱带外厚度约为500~800 m。志留系东西部差别较大, 在西部的四川盆地中西部、黔南坳陷基本无志留系, 其他地区厚度约为300~800 m; 东部地区厚度为1 000~2 000 m。泥盆系在黔南坳陷厚度为2 000~4 000 m, 其余地区剥蚀殆尽。石炭系在黔南坳陷、黔西北宽缓褶皱带厚度为300~1 000 m, 尽管厚度比泥盆系小, 但范围比泥盆系大。下二叠统遍布全区, 厚度为300~600 m; 上二叠统在四川盆地、黔南坳陷、黔西北宽缓褶皱带、武陵褶皱带厚度为300~500 m, 其余地区较薄, 厚度约为100 m。中下三叠统在全区均较厚, 在湘鄂西冲断褶皱带、黔南坳陷、四川盆地厚度可达2 000 m以上; 上三叠统在研究区中部几乎无地层残余, 在四川盆地西北角厚度约为800~2 000 m, 在四川盆地中东部、江汉盆地及其北部褶皱带残余200~400 m。侏罗系除湘鄂西冲断褶皱带南部地区外, 其余地区厚度均为800~2 000 m, 在江汉盆地及其北部褶皱带、四川盆地厚度最大。白垩系—新近系在江汉盆地厚度为900~2 000 m, 四川盆地西北角残余300~600 m, 中部大量地区缺失。忽略地表起伏及第四系残余厚度, 以白垩系—新近系残余厚度的负值为基准, 各层厚度取负

值后依次累加即得到各地层底界埋深。将各层的埋深图在三维模拟界面中按新老次序叠加,即得到了地史模拟的构造沉积体(图2)。平面上模拟区南北宽866 km,东西长1 250 km,综合考虑计算精度和模拟运算速度,取网格密度为160行×240列,每个网格代表的实际尺寸约为5 km×5 km。

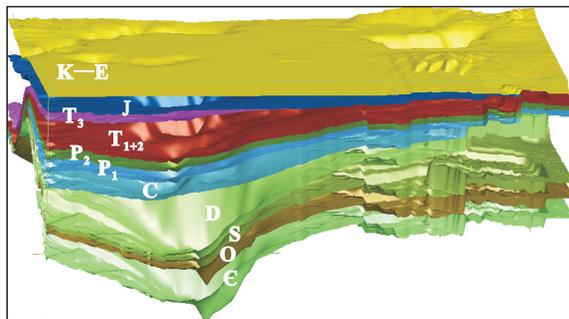


图2 中上扬子地区构造沉积体
Fig.2 Tectonic-sedimentary block of Middle-Upper Yangtze area

3.3 孔隙度—深度关系

利用回剥法进行地史恢复时,孔隙度随埋深的增加呈指数减小,而且岩性不同初始孔隙度和递减速率均不同。按照式(2)建立孔隙度—深度关系,根据前人盆地模拟时所选取的岩性参数^[33-34],并结合钻井孔隙度进行适度修正。砂岩、泥岩和碳酸盐岩的初始孔隙度分别为45%,60%和50%,压实系数分别为0.000 35,0.000 5和0.000 45。对于碳酸盐岩,在埋深达到一定程度后,除了机械压实还会发生压溶及其他影响作用,已有学者对压溶碳酸盐岩地层厚度的恢复问题进行初步探讨^[35],但尚不成熟,有待以后进一步研究。

3.4 剥蚀厚度

中上扬子地区在经历了加里东期、印支期、燕山早期、喜马拉雅晚期等强烈的构造运动后,分别在志留纪末、早中三叠世末、侏罗纪末、白垩纪—新近纪后形成了4期规模较大的区域性抬升剥蚀,在地震剖面上可识别出志留纪末、中三叠世末、侏罗纪末3个连续可追踪的区域不整合面。综合前人在四川盆地、江汉盆地、鄂西渝东、贵州等地区所做的剥蚀期次与剥蚀程度的工作^[36-42],对研究区的剥蚀量进行了整理。其中加里东期剥蚀厚度为200~600 m,印支期剥蚀厚度较大,为400~2 000 m,燕山早期剥蚀厚度为1 000~4 000 m,喜马拉雅晚期剥蚀厚度为500~2 000 m。

盆地模拟中将剥蚀事件视为沉积时间和剥蚀时间相等的地质过程^[7],而受剥蚀地层的古厚度恢复包括被剥蚀地层的古厚度恢复与目前残余地层

的古厚度恢复2部分^[25]。

4 模拟结果及其油气地质意义

运用回剥法反演了中上扬子地区的地史演化过程,在平面上编制不同层系、不同时期的古埋深图。中上扬子地区泥盆系沉积前寒武系底面埋深(图3)显示,研究区在加里东期具有“隆凹相间”的构造格局,形成了鄂西拗陷、川南拗陷、黔东南拗陷、江汉盆地北部拗陷、黔中隆起、乐山—龙女寺隆起。上三叠统沉积前二叠系底面埋深(图4)显示,研究区在印支期具有“三拗两隆”的构造格局,包含当阳—武汉拗陷、石首—宜昌隆起、湘鄂西—黔南拗陷、泸州隆起、川北—川西拗陷。二者对比显示,印支期的川北—川西拗陷发育在加里东期的乐山—龙女寺隆起上,泸州隆起发育在川南拗陷上,石首—宜昌隆起发育在江汉盆地北部拗陷上,表明印支期构造和沉降中心对加里东期的构造反转明显。

剖面上,纵贯四川盆地东西向和南北向的2条

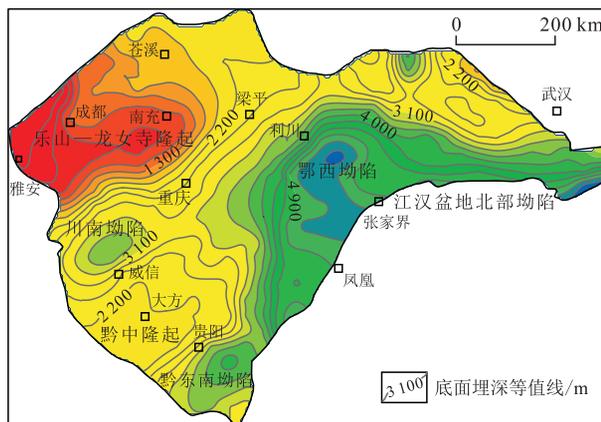


图3 中上扬子地区泥盆系沉积前寒武系底面埋深
Fig.3 Depth contour of the Cambrian bottom before the Devonian in Middle-Upper Yangtze area

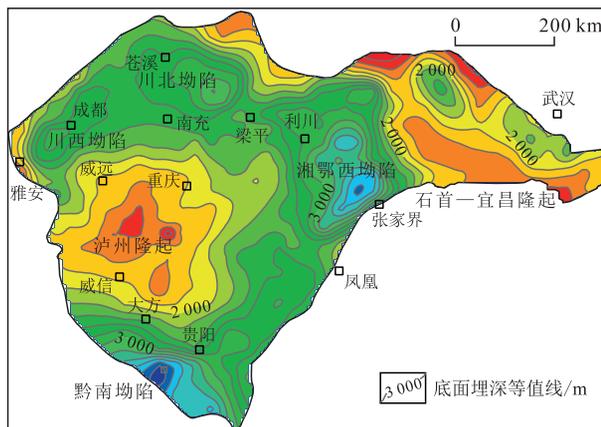


图4 中上扬子地区上三叠统沉积前二叠系底面埋深
Fig.4 Depth contour of the Permian bottom before the Upper Triassic in Middle-Upper Yangtze area

构造演化剖面反映了古构造的形成与迁移过程(剖面线位置见图1)。四川盆地南北向苍溪—大方剖面古构造演化史(图5)显示,在寒武系沉积末奥陶系沉积前,川中古隆起就已经形成,它控制了寒武系的沉积厚度,隆起的高点在南充一带,该古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。同期形成的黔中古隆起的隆起幅度没有川中古隆起大,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的沉积,该构造剖面经过的地区都缺失了泥盆系和石炭系的沉积。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,泸州古隆起初步形成,它控制了上二叠统的沉积厚度,在早中三叠世,泸州古隆起进一步发育,先前形成的川中古隆起和黔中古隆起都演变成了泸州古隆起的斜坡,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倾的斜坡,前期的加里东期和印支期古隆起不再对沉积起控制作用,但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,泸州古隆起是一个典型的印支期古隆起叠加在加里东期古拗陷上的构造,该区志留系烃源岩发育,又有适时的古隆起背景,形成了下生上储的油气资源配置关系,对以志留系为源的油气勘探应该具有良好的前景。川中古隆起和黔中古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,所以在这些地区与寒武系生烃拗陷相邻的古斜坡部位油气勘探比较有利。

四川盆地东西向成都—利川剖面的构造演化史(图6)显示,四川盆地东西向构造在加里东期和

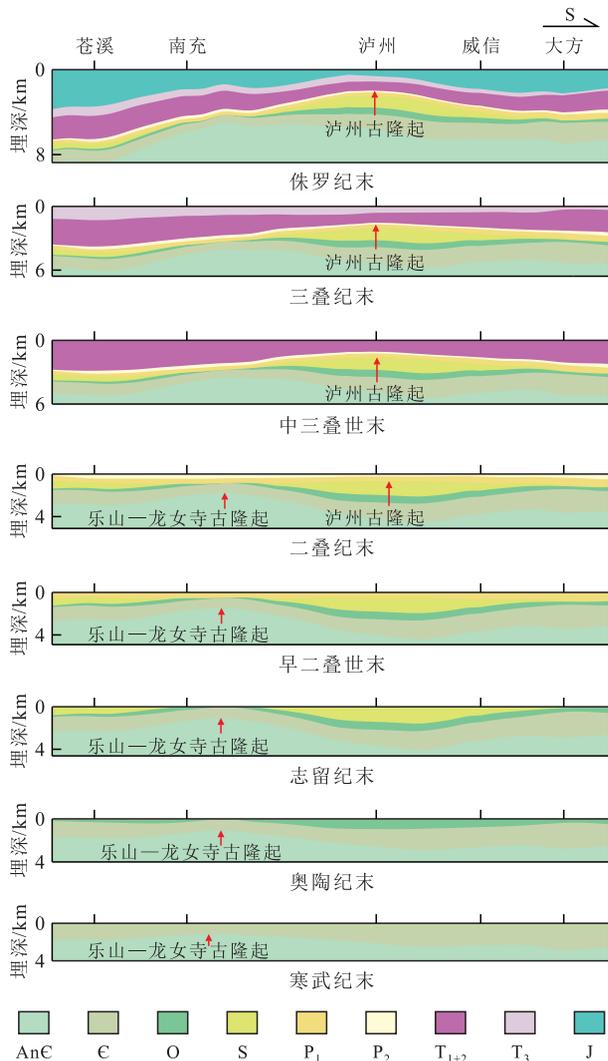


图5 四川盆地南北向苍溪—大方剖面古构造演化

Fig.5 Cangxi-Dafang paleo-tectonic evolution history profile in SN direction of Sichuan Basin

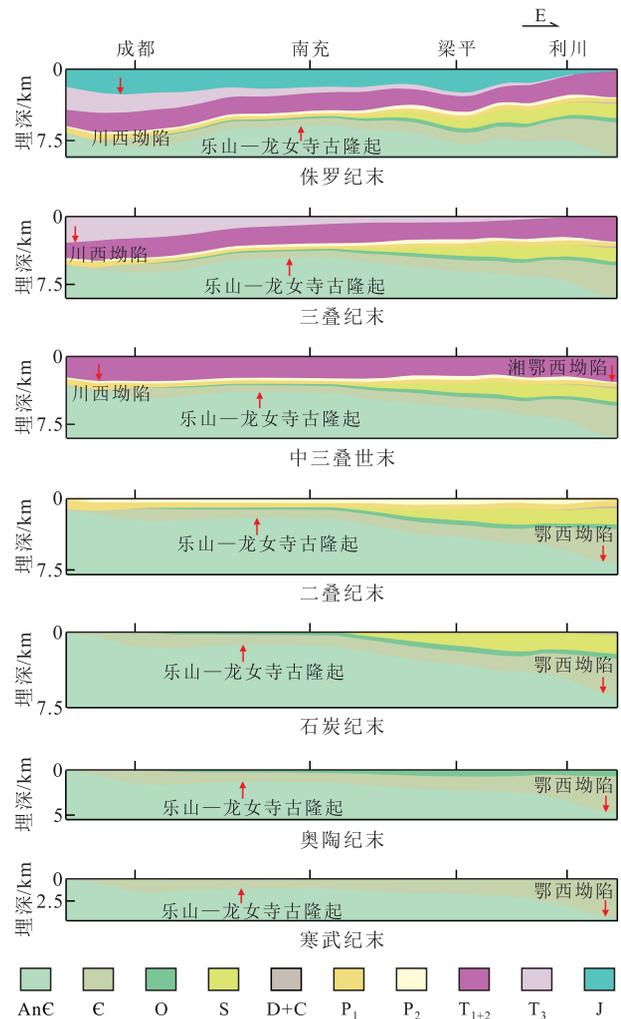


图6 四川盆地东西向成都—利川剖面古构造演化

Fig.6 Chengdu-Lichuan paleo-tectonic evolution history profile in EW direction of Sichuan Basin

印支期明显存在一次大规模的构造反转,在加里东期四川盆地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,南充—梁平一带是构造转换的枢纽带。枢纽带是一系列构造活动中的相对稳定部位,相对于凹陷处在高部位是油气运移的指向区,相对于隆起处在低部位有利于油气藏的保存,对于油气勘探具有重要意义^[43-44]。在加里东期川中古隆起控制了寒武系、奥陶系和志留系的沉积厚度,尤其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,川中古隆起对沉积的控制作用已经消失,但是它仍然控制着奥陶系以下地层的构造面貌,是以寒武系为源的油气运移的有利指向区。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,控制了早中三叠世的沉积,随后被晚三叠世末形成的西低东高的大斜坡所改造。

5 结论

地史模拟结果表明,中上扬子区在加里东期具有“隆凹相间”的构造格局,在印支期具有“三拗两隆”的构造格局,印支期构造和沉降中心对加里东期的构造反转作用明显。加里东期古隆起控制着奥陶系以下地层的油气运移方向,与寒武系生烃拗陷相邻的古斜坡部位油气勘探比较有利;泸州古隆起是一个典型的印支期古隆起叠加在加里东期古拗陷上的构造,形成了下生上储的油气资源配置关系;南充—梁平一带位于构造转换的枢纽带,有利于油气的运移和保存。

参考文献:

- [1] 张渝昌,徐旭辉,江兴歌,等.展望盆地模拟[J].石油与天然气地质,2005,26(1):29-36.
Zhang Yuchang, Xu Xuhui, Jiang Xingge, et al.Outlook for basin modelling[J].Oil & Gas Geology, 2005, 26(1): 29-36.
- [2] 吴冲龙,张洪年,周江羽.盆地模拟的系统观与方法论[J].地球科学——中国地质大学学报,1993,18(6):741-747.
Wu Chonglong, Zhang Hongnian, Zhou Jiangyu.On theoretical problems in basin modelling[J].Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 1993, 18(6): 741-747.
- [3] 罗晓容.沉积盆地数值模型的概念、设计及检验[J].石油与天然气地质,1998,19(3):196-204.
Luo Xiaorong.Numerical model of sedimentary basin: conception, composition and verification[J].Oil & Gas Geology, 1998, 19(3): 196-204.
- [4] 罗晓容.数值盆地模拟方法在地质研究中的应用[J].石油勘探与开发,2000,27(2):6-10.
Luo Xiaorong.The application of numerical basin modeling in geological studies [J].Petroleum Exploration and Development, 2000, 27(2): 6-10.
- [5] Luo Xiaorong, Vasseur G.Contributions of compaction and aquathermal pressuring to geopressure and the influence of environmental conditions [J].AAPG Bulletin, 1992, 76 (10) : 1 550-1 559.
- [6] 石广仁.盆地模拟技术30年回顾与展望[J].石油工业计算机应用,2009,61(1):3-6.
Shi Guangren.Review and outlook for the 30th anniversary of basin modeling technique [J].Computer Applications of Petroleum, 2009, 61(1): 3-6.
- [7] 叶加仁,陆明德.盆地地史模拟述评[J].地质科技情报,1995,14(2):45-51.
Ye Jiaren, Lu Mingde.Review of basin geohistory modeling [J].Geological Science and Technology Information, 1995, 14 (2) : 45-51.
- [8] 张岳桥,董树文,李建华,等.中生代多向挤压构造作用与四川盆地的形成和改造[J].中国地质,2011,38(2):233-250.
Zhang Yueqiao, Dong Shuwen, Li Jianhua, et al.Mesozoic multi-directional compressional tectonics and formation-reformation of Sichuan basin[J].Geology in China, 2011, 38(2): 233-250.
- [9] 陈洪德,庞林,倪新锋,等.中上扬子地区海相油气勘探前景[J].石油实验地质,2007,29(1):13-18.
Chen Hongde, Pang Lin, Ni Xinfeng, et al.New brief remarks on hydrocarbon prospecting of marine strata in the Middle and Upper Yangtze region [J].Petroleum Geology & Experiment, 2007, 29(1): 13-18.
- [10] 王根海.中国南方海相地层油气勘探现状及建议[J].石油学报,2000,21(5):1-6.
Wang Genhai.Petroleum exploration in the marine strata in southern China—exploration situation and proposal [J].Acta Petrolei Sinica, 2000, 21(5): 1-6.
- [11] 李建青,高玉巧,花彩霞,等.北美页岩气勘探经验对建立中国南方海相页岩气选区评价体系的启示[J].油气地质与采收率,2014,21(4):23-27,32.
Li Jianqing, Gao Yuqiao, Hua Caixia, et al.Marine shale gas evaluation system of regional selection in South China: enlightenment from North American exploration experience [J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(4): 23-27, 32.
- [12] 刘伊克,常旭.四川盆地埋藏沉降史模拟[J].地球物理学报,2003,46(2):203-208.
Liu Yike, Chang Xu.Modeling of burial and subsidence history in Sichuan basin [J].Chinese Journal of Geophysics, 2003, 46 (2) : 203-208.
- [13] 沃玉进,周雁,肖开华.中国南方海相层系埋藏史类型与生烃演化模式[J].沉积与特提斯地质,2007,27(3):94-100.
Wo Yujin, Zhou Yan, Xiao Kaihua.The burial history and models for hydrocarbon generation and evolution in the marine strata in southern China [J].Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2007, 27(3): 94-100.
- [14] 袁玉松,孙冬胜,沃玉进,等.中上扬子海相层系埋藏史与构造

- 运动的关系[J].地质科学,2010,45(3):707-717.
- Yuan Yusong, Sun Dongsheng, Wo Yujin, et al. The relationship between burial history of marine strata and tectonic movements in Mid-Upper Yangtze area [J]. Chinese Journal of Geology, 2010, 45(3):707-717.
- [15] 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 Xuhui, Jiang Xingge, Zhu Jianhui, et al. Basin system quantitative analysis and computer modeling application [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 1997, 36(3):56-69.
- [16] 马丽芳.中国地质图集[M].北京:地质出版社,2002:9.
- Ma Lifang. Geological atlas of China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002:9.
- [17] 徐伟民.下扬子地区海相中、古生界热演化和油气前景[J].石油勘探与开发,1991,18(2):25-32.
- Xu Weimin. Thermal evolution of meso-paleozoic marine formations and their prospects of oil and gas exploration in lower Yangzi region [J]. Petroleum Exploration and Development, 1991, 18(2):25-32.
- [18] Qiu Y M, Gao S, McNaughton N J, et al. First evidence of >3.2 Ga continental crust in the Yangtze craton of south China and its implications for Archean crustal evolution and Phanerozoic tectonics [J]. Geology, 2000, 28(1):11-14.
- [19] Zheng J P, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. Widespread Archean basement beneath the Yangtze craton [J]. Geology, 2006, 34(6):417-420.
- [20] Chen J F, Jahn B M. Crustal evolution of southeastern China: Nd and Sr isotopic evidence [J]. Tectonophysics, 1998, 284(1/2):101-133.
- [21] 陆松年,李怀坤,陈志宏,等.新元古时期中国古大陆与罗迪尼亚超大陆的关系[J].地学前缘,2004,11(2):515-523.
- Lu Songnian, Li Huaikun, Chen Zhihong, et al. Relationship between Neoproterozoic Cratons of China and the Rodinia [J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11(2):515-523.
- [22] 何治亮,程喆,徐旭辉,等.东秦岭—大别及两侧的大地构造旋回与油气勘探领域[J].石油实验地质,2009,31(2):109-118.
- He Zhiliang, Cheng Zhe, Xu Xuhui, et al. Tectonic cycles and petroleum exploration potential in the East Qinling and Dabie Orogenic Belt [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2009, 31(2):109-118.
- [23] 冯爱国,张建平,石元会,等.中扬子地区涪陵区块海相页岩气层特征[J].特种油气藏,2013,20(6):15-19.
- Feng Aiguo, Zhang Jianping, Shi Yuanhui, et al. Characteristics of marine shale gas play in Fuling Block in the Middle Yangtze Area [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2013, 20(6):15-19.
- [24] 周雁,李双建,等.南海相油气成藏动态分析及保存条件研究[R].北京:中国石化石油勘探开发研究院,2009.
- Zhou Yan, Li Shuangjian, et al. The dynamic analysis of hydrocarbon reservoir and preservation conditions research in south china marine strata [R]. Beijing: Petroleum Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, 2009.
- [25] 庞雄奇.地质过程定量模拟[M].北京:石油工业出版社,2003:89-91.
- Pang Xiongqi. Quantitative simulation of geological process [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003:89-91.
- [26] Watts A B, Ryan W B F. Flexure of the lithosphere and continental margin basins [J]. Tectonophysics, 1976, 36(1):25-44.
- [27] 郭颖,倪金龙.利用等效孔隙度法恢复沉积盆地残余地层古厚度——以济阳拗陷惠民凹陷为例[J].油气地质与采收率,2012,19(3):42-45.
- Guo Ying, Ni Jinlong. Paleo-thickness recovery of residual strata in sedimentary basin by equivalent porosity method—case of Huimin depression [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(3):42-45.
- [28] Athy L F. Density, porosity, and compaction of sedimentary rocks [J]. AAPG Bulletin, 1930, 14(1):1-24.
- [29] Hedberg H D. Gravitational compaction of clays and shales [J]. American Journal of Science, 1936, 31(5):241-287.
- [30] 毛小平,吴冲龙,袁艳斌.地质构造的物理平衡剖面法[J].地球科学——中国地质大学学报,1998,23(2):167-170.
- Mao Xiaoping, Wu Chonglong, Yuan Yanbin. Physical balanced cross sections for geological structure [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 1998, 23(2):167-170.
- [31] 毛小平,吴冲龙,袁艳斌.三维构造模拟方法——体平衡技术研究[J].地球科学——中国地质大学学报,1999,24(5):506-508.
- Mao Xiaoping, Wu Chonglong, Yuan Yanbin. Three dimensional structural modeling: Volume-balance technique [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 1999, 24(5):506-508.
- [32] 贾承造,赵文智,等.主要含油气盆地油气资源评价[R].北京:中国石油勘探开发研究院,2003.
- Jia Chengzao, Zhao Wenzhi, et al. The petroleum resources evaluation of main petroleum basin [R]. Beijing: PetroChina Exploration & Production Research Institute, 2003.
- [33] 漆家福,杨桥.关于碎屑岩层的去压实校正方法的讨论——兼讨论李绍虎等提出的压实校正方法[J].石油实验地质,2001,23(3):351-356.
- Qi Jiafu, Yang Qiao. A discussion about the method of decompaction correction [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2001, 23(3):351-356.
- [34] 朱建辉,江兴歌,徐旭辉.盆地模拟实践与进展[M].北京:石油工业出版社,2005:103,237.
- Zhu Jianhui, Jiang Xingge, Xu Xuhui. Basin modeling practice and progress [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2005:103,237.
- [35] 高岗,柳广弟,黄志龙,等.压溶碳酸盐岩地层厚度恢复初步探讨[J].地质论评,1998,44(6):590-595.
- Gao Gang, Liu Guangdi, Huang Zhilong, et al. Restoration of the thickness of pressure solution carbonate rocks [J]. Geological Review, 1998, 44(6):590-595.
- [36] 袁玉松,朱传庆,胡圣标.江汉盆地热流史、沉积构造演化与热事件[J].地球物理学进展,2007,22(3):934-939.
- Yuan Yusong, Zhu Chuanqing, Hu Shengbiao. Heat flow history, tectono-sedimentary evolution and thermal events of the Jiangnan basin [J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(3):934-939.

- [37] 刘景彦,林畅松,卢林,等.江汉盆地白垩-新近系主要不整合面剥蚀量分布及其构造意义[J].地质科技情报,2009,28(1):1-8.
Liu Jingyan, Lin Changsong, Lu Lin, et al. The erosion distribution of major unconformities and its tectonic significance of Cretaceous-Neogene Jianghan Basin [J]. Geological Science and Technology Information, 2009, 28(1): 1-8.
- [38] 朱传庆,徐明,单竟男,等.利用古温标恢复四川盆地主要构造运动时期的剥蚀量[J].中国地质,2009,26(6):1 268-1 277.
Zhu Chuanqing, Xu Ming, Shan Jingnan, et al. Quantifying the denudations of major tectonic events in Sichuan basin: Constrained by the paleothermal records [J]. Geology in China, 2009, 26(6): 1 268-1 277.
- [39] 李天义,何生,何治亮,等.中扬子地区当阳复向斜中生代以来的构造抬升和热史重建[J].石油学报,2012,33(2):213-224.
Li Tianyi, He Sheng, He Zhiliang, et al. Reconstruction of tectonic uplift and thermal history since Mesozoic in the Dangyang synclinorium of the central Yangtze area [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(2): 213-224.
- [40] 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 Shugen, Liu Shun, et al. Restoration of exhumation thickness and its significance in Sichuan Basin, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2009, 36(6): 675-686.
- [41] 罗开平,刘光祥,王津义.黔中隆起金沙地区中新生代隆升剥蚀的裂变径迹分析[J].海相油气地质,2009,14(1):61-64.
Luo Kaiping, Liu Guangxiang, Wang Jinyi. Fission track analysis of Meso-Cenozoic uplift and denudation in Jinsha area, the Qianzhong Uplift [J]. Marine Petroleum Geology, 2009, 14(1): 61-64.
- [42] 刘进.鄂西渝东地区中、古生界古地热场演化及有机质成熟史研究[D].武汉:中国地质大学(武汉),2008.
Liu Jin. Geothermal field evolution and organic maturity of Mesozoic and Paleozoic in western Hubei eastern Chongqing area [D]. Wuhan: China University of Geoscience (Wuhan), 2008.
- [43] 李建交,吕修祥,范秋海,等.叠合盆地构造活动枢纽部位形成及其控油气原理——以塔里木盆地为例[J].大地构造与成矿学,2009,33(1):160-167.
Li Jianjiao, Lü Xiuxiang, Fan Qiuhai, et al. The formation of structural pivot and its controlling on the accumulation and distribution of oil and gas in the superimposed basin: an example from the Tarim basin [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2009, 33(1): 160-167.
- [44] 周新源,吕修祥,金之钧,等.塔里木盆地构造活动枢纽部位碳酸盐岩油气聚集[J].西安石油大学学报:自然科学版,2004,19(4):19-23.
Zhou Xinyuan, Lü Xiuxiang, Jin Zhijun, et al. Accumulation of petroleum in the carbonate rocks in the pivot positions of structural activities in Talimu Basin [J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2004, 19(4): 19-23.

编辑 经雅丽

(上接第5页)

- Huang Chao. Faults in Jiyang depression accumulation zone division and fault block oil reservoir distribution laws [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2013, 20(6): 59-62.
- [6] 徐世光,郭远生.地热学基础[M].北京:科学出版社,2009.
Xu Shiguang, Guo Yuansheng. The basis of geothermal science [M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [7] 宾德智,刘延忠,郑克桢,等.GB/T 11615—2010地热资源地质勘查规范[S].北京:中国标准出版社,2011.
Bin Dezhi, Liu Yanzhong, Zheng Keyan, et al. GB/T 11615-2010 Geological exploration standard of geothermal resources [S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.
- [8] 郑希民,王多云,李凤杰,等.兰州-民和断陷盆地地热地质条件分析及热储概念模型[J].西北地震学报,2003,25(3):215-219.
Zheng Ximin, Wang Duoyun, Li Fengjie, et al. Analysis of geological conditions on geotherm and the conceptual model of geothermal reservoir in Lanzhou-Minhe basin [J]. Northwestern Seismological Journal, 2003, 25(3): 215-219.
- [9] 周少卿,徐恒力,陈绪钰,等.基于构造分析的辽宁汤岗子地热系统概念模型研究[J].地下水,2010,32(3):24-27.
Zhou Shaoqing, Xu Hengli, Chen Xuyu, et al. Study on conceptual model of Tanggangzi geothermal system based on structural analysis in Liaoning [J]. Ground Water, 2010, 32(3): 24-27.
- [10] 廖志杰,尹正武,贾希义,等.腾冲热海地热田的概念模型[J].高校地质学报,1997,3(2):212-221.
Liao Zhijie, Yin Zhengwu, Jia Xiyi, et al. Conceptual model of the Rehai (Hot Sea) geothermal field in Tengchong, Yunnan Province, China [J]. Geological Journal of China Universities, 1997, 3(2): 212-221.
- [11] 杨峰田,庞忠和,王彩会.苏北盆地老子山地热田成因模式[J].吉林大学学报:地球科学版,2012,42(2):468-475.
Yang Fengtian, Pang Zhonghe, Wang Caihui. Genesis model of Laozishan geothermal field, Subei Basin [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2012, 42(2): 468-475.
- [12] 吕金波,车用太,王继明.京北地区热水水文地球化学特征与地热系统的成因模式[J].地震地质,2006,28(3):419-429.
Lü Jinbo, Che Yongtai, Wang Jiming. Hydrogeochemical characteristics of thermal water and genetic model of geothermal system in north Beijing [J]. Seismology and Geology, 2006, 28(3): 419-429.

编辑 经雅丽