

彭水地区五峰—龙马溪组页岩热演化史及生烃史研究 ——以 PY1 井为例

徐二社^{1,2}, 李志明^{1,2}, 杨振恒^{1,2}

(1. 中国石化 油气成藏重点实验室, 江苏 无锡 214126;

2. 中国石化 石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214126)

摘要: 利用盆地模拟软件 BasinMod 1-D, 选用古地温梯度法, 采用镜质体反射率正演法厘定彭水地区各时期构造剥蚀量及古地温梯度。结果表明, 该区自晚古生代以来古热流经历了低—高一低的变化过程, 其古地温梯度具有相同特征; 志留纪—中二叠世古地温梯度平均值约为 2.5~3.0 °C/hm; 晚二叠—早白垩世古地温梯度平均值约为 3.0~3.5 °C/hm; 早白垩世末期以来, 古地温梯度平均值介于 2.0~2.5 °C/hm; 加里东期、印支期构造抬升剥蚀量不足 500 m, 燕山、喜马拉雅运动构造抬升剥蚀量可达 4 300 m。成烃史研究表明, 彭水地区五峰—龙马溪组页岩早泥盆世进入生油门限, 在晚二叠—晚三叠世进入生油高峰, 在早侏罗世进入生气期, 中侏罗世进入过成熟生干气阶段。后期燕山、喜马拉雅运动, 致使地层抬升、剥蚀, 研究区页岩气保存条件将成为下一步勘探的研究重点。

关键词: 热演化史; 古地温梯度; 剥蚀量; 生烃史; 五峰—龙马溪组; 彭水地区; 川东南

中图分类号: TE122.1

文献标志码: A

Thermal and hydrocarbon generation history of Wufeng and Longmaxi shales in Pengshui area, eastern Sichuan Basin: A well PY1 case study

Xu Ershe^{1,2}, Li Zhiming^{1,2}, Yang Zhenheng^{1,2}

(1. Key Laboratory of Petroleum Accumulation Mechanisms, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China;

2. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China)

Abstract: The erosion thickness and paleogeothermal gradient of the Pengshui area in the eastern Sichuan Basin during various tectonic movements were established by means of vitrinite reflectance forward modeling and basin modeling software (BasinMod 1-D). Since the Late Paleozoic, the paleo heat flow and paleogeothermal gradient in the study area first increased and then decreased. The average paleogeothermal gradients from Silurian to the Middle Permian, from the Middle Permian to the Early Cretaceous, and from the end of the Early Cretaceous until now were 25 - 30 °C/km, 30 - 35 °C/km, and 20 - 25 °C/km, respectively. In the Caledonian and Indosinian periods, the erosion thickness of the study area was less than 500 m; while in the Yanshanian and Himalayan periods, it reached 4 300 m. The Wufeng and Longmaxi shales entered the threshold of oil generation in the Early Devonian, and reached peak generation from the Late Permian to the Late Triassic. Gas generation started in the Early Jurassic, and over-mature dry gas was generated in the Middle Jurassic. In the following Yanshan and Himalayan movements, the study area was uplifted and eroded, which raised challenges for the preservation of shale gas.

Key words: thermal evolution history; paleogeothermal gradient; erosion thickness; hydrocarbon generation history; Wufeng and Longmaxi formations; Pengshui area; southeastern Sichuan

中国南方地区在漫长的沉积及构造演化历史中, 经历多期和多向的边缘深断裂活动, 具有多旋回的特点。沉积地层经历多期构造运动, 在地质历史上经历了扬子、加里东、海西、印支、燕山、喜马拉雅

雅 6 个主要构造旋回。彭水地区及周缘整体上位于川东南, 该地区构造演化史整体受中国南方构造运动的控制, 形成了川东南—湘鄂西“槽—档”过渡区, 其构造形态以 NE 向复向斜和复背斜相间分

布为主。区内向斜构造相对宽缓,在一定程度上有利于页岩气成藏。前人通过对研究区沉积、构造演化及其页岩地球化学特征的研究表明,研究区内下志留统龙马溪组为中上扬子地区页岩气勘探的主要方向和有利目标区^[1-5]。

近年来,中国石化在川东南构造变形较弱的向斜内开展页岩气勘探工作,目的层为下志留统龙马溪组—上奥陶统五峰组。PY1井是研究区内武陵褶皱带桑柘坪向斜上部署的第一口页岩气勘探参数井(图1),共揭示五峰—龙马溪组厚度达103 m的优质页岩,现场气测全烃峰值达22.50%,现场解吸气含量最高值达2.30 m³/t,压裂测试最高日产气达25 000 m³。尽管如此,前人对本区五峰—龙马溪组页岩的埋藏史及生烃史并未曾深入研究。本文在前人研究基础上,梳理研究区各时期构造演化史,采用构造埋藏史结合镜质体反射率正演校验法,确定其各时期古地温梯度及剥蚀量取值,选取典型井——PY1井,恢复其埋藏史;通过数值模拟其热演化,明确其有机质生烃史,以期为本区下一步页岩气勘探部署起到一定启示作用。

1 区域地质概况

由区域构造演化来看,晋宁运动以后,研究区基底基本固结,并开始接受地层沉积,此后经历多次构造运动的叠加和改造^[2,6-11]。加里东运动期,研究区受云南和东吴构造运动的影响,主要以沉积间断和剥蚀为主,泥盆系和石炭系被剥蚀殆尽;印支运动结束了区内持续海相沉积的历史,取而代之的是陆相沉积盆地的发育时期,区域整体抬升,遭受风化剥蚀,形成了中、上三叠统之间的区域性不整合;燕山运动基本奠定了区内的主体构造格架,晚三叠世—早白垩世,以陆相碎屑岩沉积为主,沉

积厚度大,沉积稳定。晚白垩世以来的喜马拉雅运动,才出现较大幅度的抬升、剥蚀作用。快速隆升主要发生在晚白垩世和新近纪,古近纪以缓慢隆升剥蚀为主。区内地层层系发育较全,基底为前震旦系板溪群浅变质岩,上覆地层局部缺失泥盆系,全区缺失石炭系、白垩系、第三系外,从震旦系至侏罗系其他沉积地层总厚度近万米。区内页岩主要发育在下寒武统水井沱组和下志留统龙马溪组—上奥陶统五峰组中。PY1井自上而下依次钻遇第四系、下三叠统大冶组(T_1d),上二叠统长兴组(P_2c)、吴家坪组(P_2w),下二叠统茅口组(P_1m)、栖霞组(P_1q)、梁山组(P_1l),中上志留统韩家店组(S_2h)、下志留统小河坝组(S_1x)、龙马溪组(S_1l),上奥陶统五峰组(O_3w)、临湘组(O_3l),中奥陶统宝塔组(O_2b)。受加里东、印支及燕山、喜马拉雅运动影响,下二叠统梁山组与中上志留统韩家店组、第四系与三叠系大冶组呈不整合接触(表1)。

2 剥蚀量及古地温梯度的取值

彭水地区及周缘具有“燕山运动抬升暴露型”的构造—埋藏特征,在漫长的构造演化中,基本处在构造沉积深埋的背景之下,仅在燕山期之后才出现较大幅度的抬升剥蚀作用^[10]。前人对其加里东期、印支期、燕山期及喜马拉雅期构造剥蚀量的研究较多(表2)。其中徐国盛等^[9]、孙玮等^[12]采用磷灰石裂变径迹法恢复得到丁山1井晚白垩世以来燕山运动、喜马拉雅运动间剥蚀量在3 500 m以上。王东等^[13]通过对丁山构造北西翼上侏罗统蓬莱镇组砂岩中磷灰石裂变径迹 $T-t$ 热史模拟,得到川东南地区燕山期以来的累计剥蚀厚度可达2 580 m左右。卢庆治等^[14]根据研究区邻近的建28、茶园1等10口井的镜质体反射率值,应用古热流值法反演拟合,结合埋藏史恢复,得出中生界与上覆新生界之间的不整合的剥蚀厚度为1 700~4 000 m;其他各不整合面剥蚀厚度均在300 m左右。袁玉松等^[15]利用“沉积速率比值+古热流反演+地质图”法对四川盆地及其周缘加里东期的剥蚀量进行恢复,得到该区加里东期剥蚀量小于100 m。袁玉松等^[16]基于鄂西渝东地区古温标镜质体反射率 R_0 剖面特征,采用古地温梯度反演法对鄂西渝东地区钻井剥蚀量进行恢复,表明晚燕山—喜马拉雅期剥蚀量总体上由东往西逐渐变小,其中彭水地区的剥蚀量大于4 000 m。

前人对研究区及邻区热演化史研究表明,尽管各地古大地热流及其变化有明显的差异(大地热

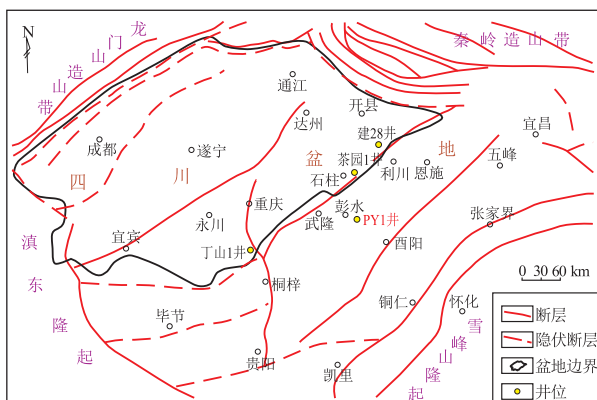


图1 川东南PY1井构造位置

Fig. 1 Regional location of well PY1 in southeastern Sichuan Basin

表 1 川东南 PY1 井钻遇地层

Table 1 Drilled formations in well PY1 in southeastern Sichuan Basin

地层			厚度/m	岩性
系	统	组		
第四系			5	表层土
三叠系	下	大冶组	215	上部为灰色泥晶灰岩、泥质灰岩夹浅紫红色灰质泥岩,中部为灰色—深灰色灰质泥岩与灰色泥晶灰岩互层,下部为深灰—灰黑色泥质灰岩
		长兴组	82	上部为灰色云质灰岩,下部为深灰色—灰黑色含硅质灰岩夹燧石团块
		吴家坪组	68	顶部为 1 层灰黑色灰质泥岩,上部为浅灰—深灰色泥晶灰岩、含泥灰岩互层,下部为灰黑色泥岩、灰质泥岩夹煤线
二叠系	下	茅口组	318	上部为浅灰色铝土质的灰岩、泥晶灰岩;中下部为深灰色泥晶灰岩、泥质灰岩夹灰质泥岩,具眼球构造;底部为一套浅灰色泥晶灰岩
		栖霞组	70	主要为 1 套深灰色泥质灰岩,具眼球构造,下部夹有深灰色沥青质灰岩
		梁山组	4	灰绿色粉砂岩、铝土质泥岩
泥盆系	上	水车坪组		缺失
	中上	韩家店组	543	灰色泥岩、粉砂质泥岩与绿灰色泥质粉砂岩、粉砂岩互层,底部为一层红色泥岩
志留系	下	小河坝组	433	上部为灰色、灰绿色泥岩、粉砂质泥岩夹灰色粉砂岩;下部灰色、灰绿色粉砂岩与泥质粉砂岩互层;底部为浅灰色细砂岩、灰绿色粉砂岩
		龙马溪组	405	上部为灰色泥岩、粉砂质泥岩夹粉砂岩;中下部为深灰色泥岩,含笔石化石丰富;下部为灰黑色页岩、粉砂质页岩夹灰色粉砂岩;底部为灰黑色含碳质页岩
奥陶系	上	五峰组	5.3	灰黑色碳质页岩

表 2 川东南彭水地区各时期构造剥蚀量已有研究成果

Table 2 Tectonic denudations in Pengshui area, southeastern Sichuan Basin

已有文献	剥蚀量/m			研究方法
	加里东期	印支期	燕山—喜马拉雅期	
徐国盛等 ^[9]			>3 500	磷灰石裂变径迹
孙玮等 ^[12]			>3 500	磷灰石裂变径迹
王东等 ^[13]			2 580	磷灰石裂变径迹
卢庆治等 ^[14]	300	300	1 700 ~ 4 000	古热流值法反演拟合
袁玉松等 ^[15-16]	<100		>4 000	沉积速率比值+古热流反演+古地质图+古地温梯度反演法

流峰值、大地热流值的升降速率和大地热流高值持续的时间不同),但基本上都有一个共同的变化趋势,自晚古生代以来,经历了低—高一低的变化过程。卢庆治等^[14]对鄂西—渝东地区的热史恢复结果表明,研究区及其周缘在晚二叠世初期达到最高古热流(可达到 68 ~ 78 mW/m²),从志留纪到晚二叠世初持续增大,而从晚二叠世初到现今古热流持续降低。姜本鸿等^[17]总结出研究区现今地温梯度为 1.93 ~ 2.82 °C/hm。刘进^[18]研究认为邻区(鄂西—渝东)的现今地温梯度在 1.8 ~ 2.2 °C/hm 之间,大地热流值介于 42 ~ 46 mW/m² 之间。王玮

等^[19]根据 27 口井的镜质体反射率剖面研究认为,四川盆地早白垩世末—古新世时的古地温梯度介于 2.0 ~ 2.5 °C/hm,并总体呈南部略大于北部、东部大于西部的分布特征。

由于前人对研究区及周缘各时期的构造剥蚀量及古地温梯度的研究,所涉及的地区范围远超于彭水地区,且其取值范围较大,而对于研究区较小的范围,尤其是典型井 PY1 井,构造剥蚀量及古地温梯度的取值,参考前人的研究成果,并结合埋藏史和镜质体反射率正演校验法来确定。

利用盆地模拟软件 BasinMod 1-D,选用古地

温梯度法,古地表温度取平均温度 24 °C;有机质热演化动力学模型采用 Sweeney 和 Burnham 提出的 EASY% R_o [20],在前人研究的取值范围内,以实测沥青反射率等效值(等效镜质体反射率值) [21]为基准,并辅以现今井底实测温度校验。耦合各时期的剥蚀量与古地温梯度,恢复其埋藏史,且使得热成熟度—镜质体反射率模拟值与实测值一致,井底温度模拟值与实测值相符(图 2,3)。

经过耦合—模拟可知,研究区志留纪—中二叠世古地温梯度平均值约为 2.5 ~ 3.0 °C/hm;晚二叠世—早白垩世古地温梯度平均值约为 3.0 ~ 3.5 °C/hm;早白垩世末期以来,古地温梯度平均值介于 2.0 ~ 2.5 °C/hm(图 4)。各时期的构造剥蚀量见表 3,取值结果均介于前人研究的取值范围,且古地温梯度演化趋势与前人的研究一致。同时由图 3 可以看出镜质体反射率模拟结果与实测结果具有很好的一致性。现今龙马溪组地层井底温度模拟

值在 75 °C 左右,与其水平压裂井 PYHF-1 井龙马溪组地层实测井底温度 78 °C 相符,说明其古地温梯度及构造剥蚀量取值合理。

3 页岩有机质热演化及其生烃史

基于以上古地温梯度及剥蚀量的厘定过程, PY1 井五峰—龙马溪组页岩的埋藏史及其有机质热演化史得以重建(图 3,5)。其生烃史为有机质热演化史在油气生成阶段上的反映,页岩不同的油

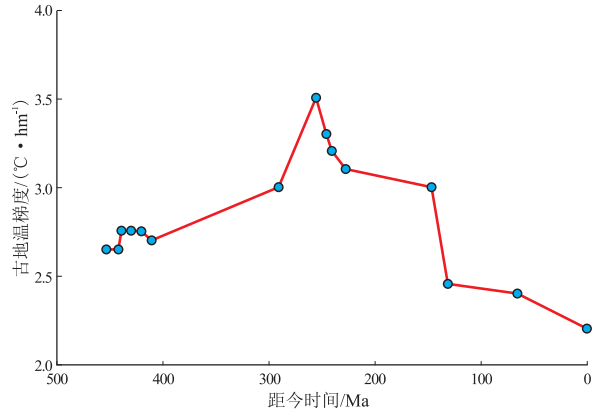


图 4 川东南 PY1 井晚奥陶世以来古地温梯度史
Fig. 4 Paleogeothermal gradient history of well PY1 in southeastern Sichuan Basin since Late Ordovician

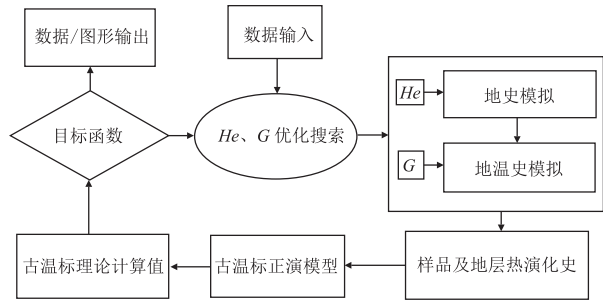


图 2 剥蚀量及古地温梯度厘定流程

据胡圣标等 [22] 修改。

H_e 为各时期地层剥蚀厚度; G 为各时期古地温梯度

Fig. 2 Flow chart of erosion thickness and paleogeothermal gradient reconstruction

表 3 川东南 PY1 井各构造运动时期剥蚀量

Table 3 Erosion thickness of well PY1 in southeastern Sichuan Basin during various tectonic movements

构造运动	大概时期	剥蚀量/m
加里东	S 末	200
印支	T ₂ 末	350
燕山—喜马拉雅	K ₁ 末至今	4 300

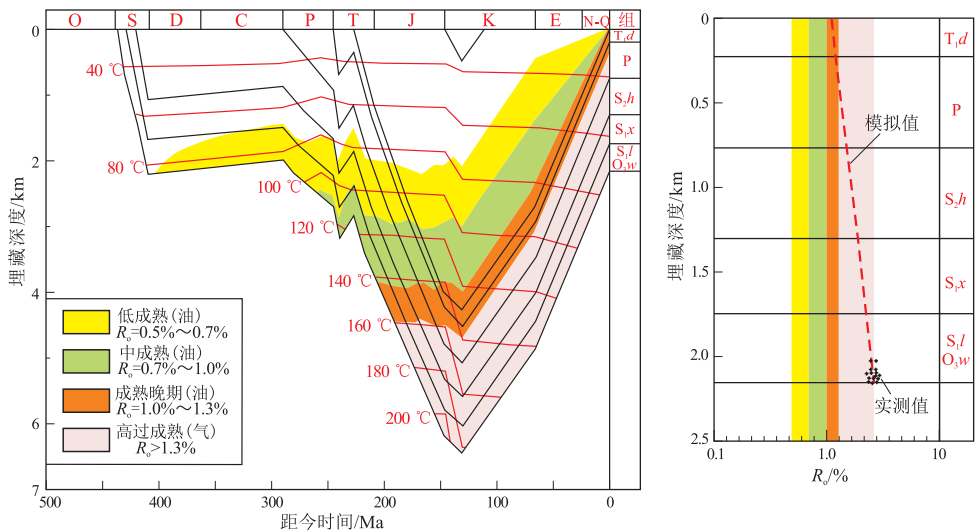


图 3 川东南 PY1 井埋藏史及有机质热演化史

Fig. 3 Burial history and thermal evolution of organic matter of well PY1 in southeastern Sichuan Basin

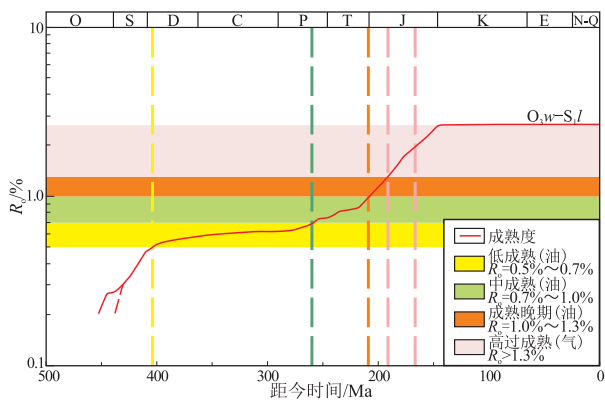


图5 川东南PY1井五峰—龙马溪组页岩热演化史及生烃史

Fig. 5 Thermal history and hydrocarbon generation history of Wufeng and Longmaxi shales in well PY1, southeastern Sichuan Basin

气生成阶段对应于所处不同的热演化阶段。地层连续增温时,页岩热演化程度不断增高,当遭受抬升剥蚀冷却,地层温度降低时,会导致烃源岩生烃过程的中止,因此,PY1井五峰—龙马溪组页岩的生烃史受控于其热演化史。

PY1井五峰—龙马溪组页岩底部在早泥盆世进入生油门限,后因加里东运动的抬升作用,埋深变浅,镜质体反射率保持在0.5%左右,直至二叠系地层开始沉积,页岩埋深再次增加,早二叠世末期 R_o 值达到0.7%左右,五峰—龙马溪组页岩处于未熟、低熟阶段。其后,晚二叠世持续沉积至早三叠世,沉积厚度有限, R_o 值变化不大;中三叠世遭受印支运动的抬升剥蚀较弱,影响不大;至晚三叠世时 R_o 值达到1.0%。晚二叠世—晚三叠世期间,五峰—龙马溪组页岩达到成熟阶段,有机质以大量生油为主。随着侏罗纪地层的快速沉降,至早侏罗世晚期时 R_o 值达到1.3%,早侏罗世期间,五峰—龙马溪组页岩以生成凝析油、气为主。至中侏罗世 R_o 值达到2.0%,五峰—龙马溪组页岩达到高成熟阶段,以生湿气为主;晚侏罗世之后,达到过成熟阶段,有机质以干酪根裂解生干气为主,同时页岩中残留沥青多裂解成气。至早白垩世晚期,页岩气的生成达到高峰(图3)。

4 结论与讨论

(1) 彭水地区自晚古生代以来古热流经历了低—高—低的变化过程,其古地温梯度具有相似特征,志留纪—中二叠世古地温梯度平均值约为2.5~3.0℃/hm;晚二叠世—早白垩世古地温梯度平均值约为3.0~3.5℃/hm;早白垩世末期以来,古地温梯度平均值介于2.0~2.5℃/hm。

(2) 彭水地区加里东期、印支期构造抬升剥蚀量不足500m,燕山、喜马拉雅运动构造抬升剥蚀量可达4300m。

(3) 彭水地区五峰—龙马溪组页岩早泥盆世进入生油门限,在晚二叠世—晚三叠世进入生油高峰,在早侏罗世进入生气期,中侏罗世进入过成熟生干气阶段。

(4) PY1井五峰—龙马溪组页岩气烃源供给充足且多元化,不仅有干酪根生气,更有沥青裂解成气,早白垩世晚期达到高峰,早于晚白垩世以来的燕山—喜马拉雅运动大幅抬升破坏。因此,彭水地区页岩气虽具有一定产能,但受致使“槽—档”形成的构造作用影响较大。对于该区页岩气的勘探而言,后期的构造破坏作用对其保存条件的影响就变得至关重要,也将成为下一步研究的重点。

致谢:本文在研究过程中得到了中国石化华东分公司领导、专家及非常规项目部的大力支持,在此致以诚挚的感谢。

参考文献:

- [1] 黄文明,刘树根,马文辛,等.川东南—鄂西渝东地区下古生界页岩气勘探前景[J].地质学报,2011,30(2/3):364-371.
Huang Wenming, Liu Shugen, Ma Wenxin, et al. Shale gas exploration prospect of Lower Paleozoic in southeastern Sichuan and western Hubei—eastern Chongqing areas, China [J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(2/3): 364-371.
- [2] 王庆之,杨飞,喻永生.川东南—湘鄂西地区构造演化与页岩气保存关系分析[J].长江大学学报:自然科学版,2012,9(4):44-46.
Wang Qingzhi, Yang Fei, Yu Yongsheng. The tectonic evolution and the shale gas preservation relationship analysis in southeastern Sichuan and western Hunan—Hubei areas [J]. Journal of Yangtze University: Natural Science Edition, 2012, 9(4): 44-46.
- [3] 郑和荣,高波,彭勇民,等.中上扬子地区下志留统沉积演化与页岩气勘探方向[J].古地理学报,2013,15(5):645-656.
Zheng Herong, Gao Bo, Peng Yongmin, et al. Sedimentary evolution and shale gas exploration direction of the Lower Silurian in Middle—Upper Yangtze area [J]. Journal of Palaeogeography, 2013, 15(5): 645-656.
- [4] 郭少斌,黄磊.页岩气储层含气性影响因素及储层评价:以上扬子古生界页岩气储层为例[J].石油实验地质,2013,35(6):601-606.
Guo Shaobin, Huang Lei. Gas-bearing influential factors and evaluation of shale gas reservoir: A case study of Paleozoic shale gas reservoir in Upper Yangtze region [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2013, 35(6): 601-606.
- [5] 王志刚.涪陵页岩气勘探开发重大突破与启示[J].石油与天然气地质,2015,36(1):1-6.
Wang Zhigang. Breakthrough of Fuling shale gas exploration and development and its inspiration [J]. Oil & Gas Geology, 2015,

- 36(1):1-6.
- [6] 郭正吾,邓康龄,韩永辉. 四川盆地形成与演化[M]. 北京:地质出版社,1996:48-88.
Guo Zhengwu, Deng Kangling, Han Yonghui. The formation and evolution of Sichuan Basin [M]. Beijing: Geological Publ. House, 1996:48-88.
- [7] 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,2004:401-418,459-467.
Ma Li, Chen Huanjiang, Gan Kewen, et al. Tectonics and marine origin petroleum geology in southern China [M]. Beijing: Geological Public House, 2004:401-418, 459-467.
- [8] 徐政语,李大成,卢文忠,等. 渝东构造样式分析与成因解析[J]. 大地构造与成矿学,2004,28(1):15-22.
Xu Zhengyu, Li Dacheng, Lu Wenzhong, et al. Pattern analyses and genetic interpretation about the geotectonics of Yudong (East Chongqing) [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2004, 28(1): 15-22.
- [9] 徐国盛,袁海锋,马永生,等. 川中—川东南地区震旦系—下古生界沥青来源及成烃演化[J]. 地质学报,2007,81(8):1143-1152.
Xu Guosheng, Yuan Haifeng, Ma Yongsheng, et al. The source of Sinian and Lower-Palaeozoic bitumen and hydrocarbon evolution in the middle and southeast of the Sichuan Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(8):1143-1152.
- [10] 赵喆,钟宁宁,梁狄刚,等. 中国南方含油气区构造—沉积类型及其勘探潜力[J]. 海相油气地质,2008,13(1):51-54.
Zhao Zhe, Zhong Ningning, Liang Digang, et al. Tectonic-sedimentation types and exploration potential of prospecting oil areas in southern China [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2008, 13(1):51-54.
- [11] 徐政语,姚根顺,黄羚,等. 中国南方海相残留盆地勘探风险分析与选区评价[J]. 石油实验地质,2013,35(1):9-16.
Xu Zhengyu, Yao Genshun, Huang Ling, et al. Risk analysis and play evaluation of marine residual basins in South China [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2013, 35(1):9-16.
- [12] 孙玮,刘树根,王国芝,等. 川东南丁山构造震旦系—下古生界油气成藏条件及成藏过程[J]. 地质科技情报,2010,29(1):49-55.
Sun We, Liu Shugen, Wang Guozhi, et al. Petroleum formed condition and process research for sinian to Low Paleozoic at Dingshan structure in southeast of Sichuan basin [J]. Geological Science and Technology Information, 2010, 29(1):49-55.
- [13] 王东,王国芝,刘树根. 川东南地区燕山期以来的隆升剥蚀历史研究[J]. 地质学报,2009,29(1):5-7,10.
Wang Dong, Wang Guozhi, Liu Shugen. Study of history of uplift and denudation in southeast Sichuan since Yanshan Epoch [J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 29(1):5-7, 10.
- [14] 卢庆治,马永生,郭彤楼,等. 鄂西—渝东地区热史恢复及烃源岩成烃史[J]. 地质科学,2007,42(1):189-198.
Lu Qingzhi, Ma Yongsheng, Guo Tonglou, et al. Thermal history and hydrocarbon generation history in western Hubei—eastern Chongqing area [J]. Chinese Journal of Geology, 2007, 42(1): 189-198.
- [15] 袁玉松,孙冬胜,李双建,等. 四川盆地加里东期剥蚀量恢复[J]. 地质科学,2013,48(3):581-591.
Yuan Yusong, Sun Dongsheng, Li Shuangjian, et al. Caledonian erosion thickness reconstruction in the Sichuan Basin [J]. Chinese Journal of Geology, 2013, 48(3):581-591.
- [16] 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 Yusong, Lin Juanhua, Cheng Xinyang, et al. Yanshan-Himalayan denudation in Western Hubei Eastern Chongqing area [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(9):2878-2884.
- [17] 姜本鸿,韩庆之. 川东南地区地温场形成的地质背景及温泉形成模式探讨:以四川彭水长溪坝址区温泉为例[J]. 现代地质,1993,7(4):485-494.
Jiang Benhong, Han Qingzhi. Analysis of geological background of geothermal field and hot spring model in the south east area of Sichuan province: Taking the Changxi hot spring in Pengshui county of Sichuan province as an example [J]. Geoscience, 1993, 7(4):485-494.
- [18] 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,2008.
Liu Jin. Geothermal field evolution and organic matter maturity history of Mesozoic and Paleozoic in western Hubei—eastern Chongqing area [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2008.
- [19] 王玮,周祖翼,郭彤楼,等. 四川盆地古地温梯度和中—新生代构造热历史[J]. 同济大学学报:自然科学版,2011,39(4):606-613.
Wang Wei, Zhou Zuyi, Guo Tonglou, et al. Early Cretaceous—Paleocene geothermal gradients and Cenozoic Tectono-Thermal history of Sichuan basin [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2011, 39(4):606-613.
- [20] Sweeney J J, Burnham A K. Evaluation of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics [J]. AAPG Bulletin, 1990, 74(10):1559-1570.
- [21] 丰国秀,陈盛吉. 岩石中沥青反射率与镜质体反射率之间的关系[J]. 天然气工业,1988,8(3):20-25.
Feng Guoxiu, Chen Shengji. Relation between the reflectance of bitumen and vitrinite in rock [J]. Natural Gas Industry, 1988, 8(2):20-25.
- [22] 胡圣标,张容燕,周礼成. 油气盆地地热史恢复方法[J]. 勘探家,1998,3(4):52-54.
Hu Shengbiao, Zhang Rongyan, Zhou Licheng. Reconstruction of geothermal history in hydrocarbon basins [J]. Petroleum Explorationist, 1998, 3(4):52-54.