

DOI:10.12017/dzjx.2021.005

川南地区渐变型盆—山边界条件下 龙马溪组页岩气(藏)富集主控因素： 构造—沉积分异与差异性演化*

梁霄^{1,2} 徐剑良¹ 王滢¹ 方新焰³赵磊¹ 伍翊嘉¹ 邓宾²

(1. 中国石油集团川庆钻探工程有限公司, 地质勘探开发研究院 成都 610051; 2. 油气藏地质及开发工程
国家重点实验室, 成都理工大学 成都 610059; 3. 有机地球化学国家重点实验室,
中国科学院广州地球化学研究所 广州 510640)

摘要 川南地区龙马溪组全面进入3 500 m以浅的页岩气开发、上产关键阶段。油气地质学界长期以来针对页岩岩相、岩石学与孔隙特征等储层静态参数的重视以及对龙一₁小层的单—层系开发的局限,对川南地区龙马溪组页岩气整体产能的提高产生了一定制约。回归基础地质本质,采用地质—地球化学综合研究思路,以构造控制下的沉积分异格局为框架,补充完善川南地区笔石生物地层划分体系;依靠多期节理构造与古应力反演等构造解析方法,建立川南渐变型盆—山边界条件下龙马溪组多期构造演化与流体温压模型,明确川南地区复杂构造背景下页岩气差异富集机理。奥陶纪—志留纪之交的“三隆—坳”古构造—沉积分异,控制了川南地区五峰组—龙马溪组优质页岩渐进式发育与分布。在川南—大娄山渐变型盆山结构边界条件下,晚白垩世以来所经历的4期不同应力场构造变形事件,使威远、泸州—大足与长宁—宁西地区五峰组—龙马溪组具有差异性构造变形—抬升剥蚀与演化特征。差异性的埋深—隆升过程,对受埋深与构造热事件控制的页岩有机地球化学特征及流体充注体系产生重要影响。构造—沉积分异、盆山建造与热演化过程,最终控制川南地区五峰组—龙马溪组早期有限聚集—中期相对富集—晚期调整改造的页岩气成藏演化过程。

关键词 四川盆地 页岩气 富集主控因素 构造—沉积分异 盆—山建造 热演化

中图分类号: P618.2, TE121 **文献标识码**: A **文章编号**: 0563-5020(2021)01-060-22

本世纪初页岩气概念被引入中国后,页岩气勘探开发相关理论及技术逐渐被我国学者关注、了解及吸收(张金川等,2004,2008;刘树根等,2009,2013;聂海宽等,2009;邹才能等,2010)。经过2005~2009年的选区优化评价和2010~2012年的全面钻探评价两个阶段,中国石化率先在四川盆地东南缘涪陵焦石坝地区发现中国第一个大型海相页岩气田(郭彤楼等,2014;郭旭升等,2014),随后中国石油也很快实现川

* 国家自然科学基金项目“四川盆地东南缘下古生界页岩气差异强改造保存机理研究”(编号:41572119)资助。

梁霄,男,1991年生,博士,矿产普查与勘探专业。E-mail: liangx_dyy@cnpc.com.cn

邓宾,男,1980年生,教授,矿产普查与勘探专业。本文通讯作者。E-mail: dengbin13@mail.edut.edu.cn

2020-06-08收稿,2020-10-10改回。

南地区威远—长宁区块页岩气勘探的突破。页岩气作为非常规油气的重要组成部分，其研究成果完善和建立了“连续性油气聚集理论”，对经典石油地质学理论产生了重大革新与突破(贾承造，2017)。从烃源岩到储集层的评价思路(刘树根，2014)，以岩心、野外露头为基础，采用矿物学分析、等温吸附等实验方法，对四川盆地及周缘上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组页岩在沉积、储层、含气性等特征上取得了较丰硕成果(刘树根等，2014；金之钧等，2016；赵建华等，2016；腾格尔等，2017)。为了建立上扬子地区五峰组—龙马溪组的区域性地层分析与等时对比，地层沉积学研究以长宁、焦石坝、威远等页岩气区块关键钻井为依托，建立了四川盆地五峰组—龙马溪组黑色页岩中笔石带划分框架(聂海宽等，2016，2017；梁峰等，2017；罗超等，2017)。其中WF2-WF3、LM2-LM5/LM6笔石页岩段是页岩气产出的主要烃源岩层、储层及最有利含气层段(陈旭等，2015，2017)。

2018年以来，四川盆地川南地区已全面进入以3 500 m以浅的龙一₁小层为主力层系的页岩气开发、上产关键阶段(马新华等，2018)。随着川南威远、长宁地区五峰组—龙马溪组核心甜点建产区井网部署的日趋饱和，龙一₁小层单一开发的局限与埋深大于3 500 m后相关地质理论认识的缺乏对页岩气产能提高形成了较大制约。与龙马溪组页岩岩相及岩石学孔隙特征等储层静态参数方面相比，早期构造对页岩沉积的控制及其在有机地化特征上的反映，晚期深埋藏—强隆升背景下页岩改造强度对保存条件的控制等关键地质问题更应值得关注。本文致力于从构造—沉积分异角度，以盆—山原构造体系为切入，形成川南地区复杂地质构造背景下龙马溪组页岩气的富集主控因素新认识。

1 区域地质背景

四川盆地地貌三分性和构造形迹三分性主要受盆山结构的控制(图1)。受青藏高原向东扩展体系影响，刚性地块、地壳尺度的断层几何学、分层解耦冲断作用和深部壳幔活动作用对青藏高原东缘(四川盆地西缘与西南缘)差异隆升剥露和构造演化具有控制作用(邓宾等，2015，2016；刘树根等，2018；Liu et al., 2018)。四川盆地刚性基底的强烈阻挡，迫使深部壳幔物质可能由青藏高原向东挤出，并沿若尔盖地块和扬子地块间的通道被动上涌，最终导致浅部脆性地壳发生分层解耦冲断，证据之一即依靠最新地震资料层拉平恢复，显示盆内的龙泉山断裂和华蓥山断裂并未切割四川盆地基底，表明其与盆地基底构造并无直接联系。四川盆地基底与盖层构造解耦，有利于盆内前寒武纪基底结构构造的保存以及盖层内大型槽—块结构和隆—坳结构的形成；盖层内早期和晚期构造的解耦，有利于早期构造免遭后期破坏(Liu et al., 2018)，对四川盆地五峰组—龙马溪组页岩气藏的富集与保存意义重大。

川南地区一般指威远构造(含)以南的四川盆地南部。四川盆地南缘与大娄山构造带盆山边界并不明晰，总体表现为高山与深切沟谷，但并不存在前陆盆地盆—山系统中的典型山前陡变带。大娄山构造带长约250 km，宽约80 km，呈NEE-NE走向，平均海拔高度在1 000~1 800 m。位于山前的长宁地区(构造)与宁西地区高程为600~1 400 m。至盆内泸州一带海拔高程逐渐降低至400 m左右。威远构造作为四川盆地最大的地面构

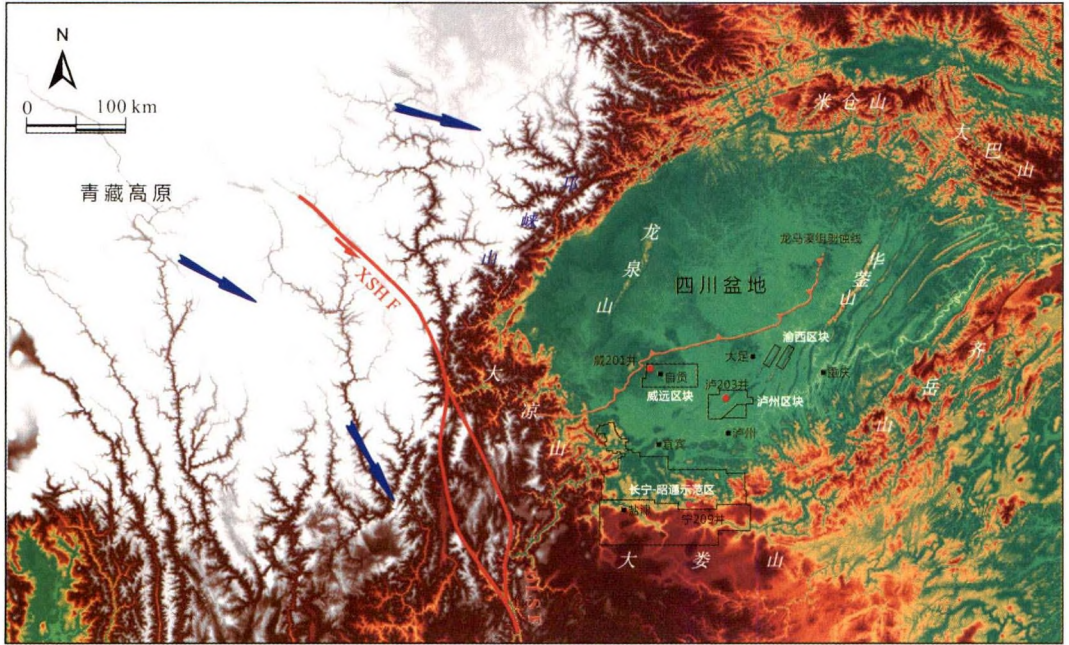


图1 四川盆地及周缘盆—山边界数字高程特征及盆地南部主要页岩气区块分布
 Fig.1 Digital elevation characteristics of basin-mountain boundary in the Sichuan Basin and its periphery and distribution of major shale gas blocks in the southern basin

造，新生代以来较为快速强烈的隆升剥蚀使中-下三叠统膏盐岩地层已经出露地表。根据川南地区不同区域所处的现今构造位置及其与盆—山边界距离，川南地区大致可以划分为威远地区、泸州—大足地区、长宁地区与宁西地区。

四川盆地自震旦纪灯影期开始经历了弱拉张—弱挤压—弱拉张—弱挤压两个完整的地质演化旋回(刘树根等, 2017), 形成两期可作为地质和地球物理标志层的不整合面(上震旦统灯影组顶不整合面、中二叠统茅口组顶不整合面), 同时还发生了两期地裂拉张运动(兴凯地裂运动和峨眉地裂运动及其对应的绵阳—长宁拉张槽和广旺—开江—梁平、盐亭—蓬溪拉张槽等拉张槽)以及两期挤压运动(加里东运动和印支运动及其所对应的乐山—龙女寺古隆起和泸州—开江古隆起)。两期拉张槽与古隆起演化过程中, 绵阳—长宁拉张槽与乐山—龙女寺古隆起的演化层次及深度, 对川南地区龙马溪组优质页岩形成及分布规模的影响更为重要。加里东期—燕山期, 乐山—龙女寺古隆起的演化表现为受绵阳—长宁拉张槽的分割, 具有共圈闭特征的两个古隆起, 其主要控制了古隆起南翼五峰组—龙马溪组沉积期的古地理格局; 喜马拉雅期, 拉张槽两侧再次表现出了较大差异的演化特征, 拉张槽的西侧威远地区大幅隆升, 东侧高石梯地区隆升幅度则较小(邓宾等, 2008; 刘树根等, 2015; 梁霄等, 2016; Liang et al., 2019)。根据四川盆地东缘焦石坝地区针对保存条件的研究经验(姜磊等, 2019), 龙马溪组早、中、晚期的埋深藏—强隆升热演化强变形过程, 对现今川南地区五峰组—龙马溪组页岩含气资源潜力评价及高效开发具有重大挑战。

2 构造—沉积分异作用对川南地区优质页岩形成与分布的控制

2.1 四川盆地中南部晚奥陶世—早志留世隆—坳格局与龙马溪组沉积古构造背景

构造—沉积分异作用对五峰组—龙马溪组优质页岩分布的影响很早即成为奥陶系—志留系之间的关键地质问题。中国地质学界普遍认为华南奥陶—志留系之间存在着一个沉积间断(陈旭等, 2001)。宜昌上升(Yichang Uplift)最早定义为反映鄂西地区大宝塔地层(五峰组—龙马溪组未划分且均归位志留系)与上覆地层间以升降运动为主的构造事件, 现今一般特指五峰组和龙马溪组之间的地层缺失(王怿等, 2013)。宜昌上升的范围经过了多次圈定, 根据宝塔组与五峰组、五峰组观音桥段与龙马溪组的地层接触关系, 宜昌运动大致可以分为两幕。针对晚奥陶世的升降运动, 贵州地质学者相继命名了都匀运动(余开富等, 1995)、加里东运动(沈建伟等, 1987)及太康运动(沈志达等, 1990)。

晚奥陶世—早志留世构造—沉积分异格局下“隆—坳格局”的演变与形成机制共同控制了凯丹晚期—鲁丹晚期川南地区龙马溪组富有机质页岩的形成展布。广西(都匀)运动是龙马溪组沉积前的一次重要构造事件。奥陶纪—志留纪华南板块西缘与北缘分别与冈瓦纳古大陆与南秦岭地块相邻。四川盆地东缘挤压为主的构造作用使川南地区龙马溪组下段黑色页岩沉积于几个古隆起约束的挤压凹陷中(图2)。四川盆地东南部(焦石坝、丁山—林滩场)受华南东部、南部深部构造活动控制更为明显, 反映为黔中古隆起的形成与宜昌上升运动的紧密相连。川南地区与渝东南地区在五峰组—龙马溪组的地层发育和古地理格局上具有明显的差异。黔中古陆位于川南地区南缘, 是晚奥陶世到志留纪早期华南上扬子区南部一个重要的古地理单元(梅冥相, 1994), 其形成时间和机制成因仍存在较大争议。宏观上看黔中古陆是滇黔桂古陆向东延伸到贵州中部的一个半岛。黔中古陆最早也同样为水下隆起, 后露出海面, 并历了多期抬升降起。紧邻川南地区的黔中古陆北缘在奥陶—志留纪交界期间保持缓慢、均匀的隆升态势。不断隆升的过程之中海岸带一直处于变动起伏状态。五峰组沉积末期, 全球海面大幅下降, 受海底起伏及个别孤岛露出海面影响, 沉积了广泛分布的观音桥段地层。赫南特晚期—鲁丹早期, 全球海平面再次大幅上升, 但黔中古陆上升速度超过海面上升速度, 使更多、更大的岛屿浮出海面; 鲁丹晚期, 这些岛屿再次被海水淹没, 进入龙马溪组稳定沉积发育阶段(戎嘉余等, 2011), 最终形成隆—坳相间的沉积古地理格局。

2.2 奥陶纪—志留纪之交的地质事件与有机质富集

奥陶纪末期的生物绝灭和冰期事件是显生宙内的一次重大转折事件, 受到地质学家们的普遍关注(Marshall et al., 1997; Chen et al., 2000)。O—S界限微量与稀土地球化学研究表明五峰组—龙马溪组整体呈缺氧环境, 而五峰组上部观音桥段出现的氧化环境的短暂波动则受冰期控制的全球海平面波动(严德天等, 2009)。古海洋环境变化与生物灭绝事件的协同演化逐渐成为奥陶系—志留系界限事件的主因。上扬子川南地区奥陶系—志留系之间也存在多个黏土岩层, 有研究认为其确属钾质斑脱岩

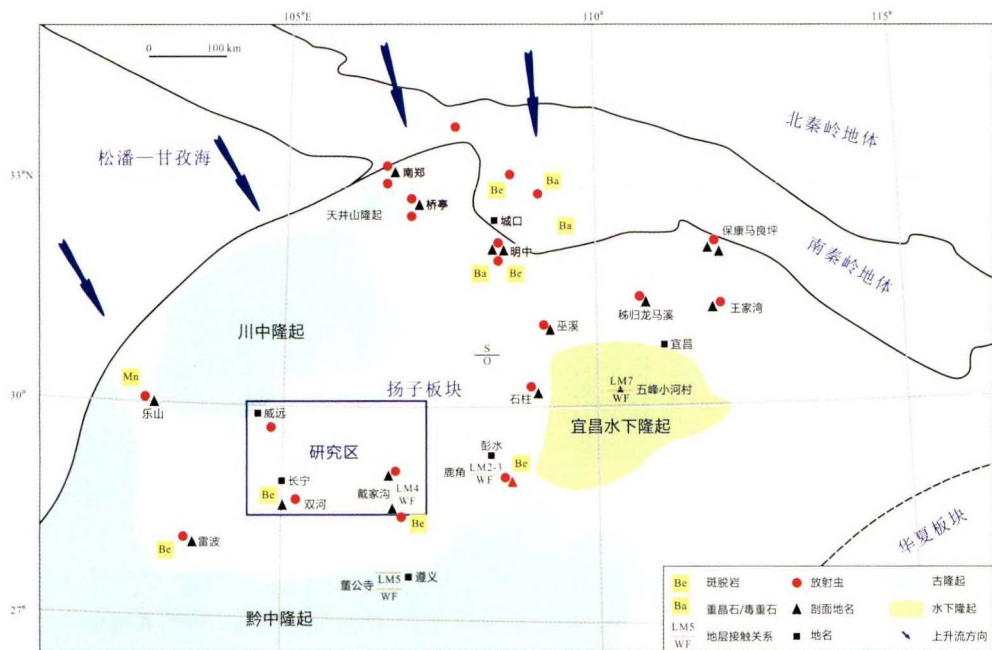


图2 晚奥陶世—早志留世上扬子地区古地理构造—沉积分异特征(部分地化资料及剖面据戎嘉余等, 2011, 2012; Ran et al., 2015; 陈旭等, 2017, 2018)

Fig. 2 Paleogeographic of tectono-depositional differentiation in the Upper Ordovician-Early Silurian in the Yangtze area (Rong et al., 2011, 2012; Ran et al., 2015; Chen et al., 2017, 2018)

(K-bentonite) (胡艳华等, 2009)。四川盆地五峰组—龙马溪组黑色页岩夹层中斑脱岩内火山物质具有由北向南的逐渐减少特征(图2)。川南地区威远及长宁区块五峰组—龙马溪组层内有数目不等的多层斑脱岩发育。以笔石层格架体系为依托, 川南地区的斑脱岩主要分布在赫南特阶—鲁丹阶 WF2-WF3 以及 LM2-LM4 带中, 但层数及分布范围相较于渝东南及川北地区略少。依据现代火山喷发活动统计, 火山灰喷发后沉落物数量与距火山口的距离呈反比(Olgun et al., 2013; Chikamoto et al., 2016)。扬子板块北缘下志留统地层中重晶石结核相对发育(咎博文等, 2017), 且沿南秦岭构造带—扬子地台北缘米仓山—大巴山构造(紫阳地区)—四川盆地具有典型的以火山碎屑岩—浊积岩—黑色页岩为代表的的一坡一盆沉积体系(孟庆任, 2017)。以上证据广泛揭示了川南地区五峰组—龙马溪组地层中的火山物质来源于扬子板块北缘的南北秦岭地体。五峰组沉积时水体滞留产生的海底缺氧, O—S 事件沉积后火山活动影响下冰期活动的加剧导致的龙马溪组沉积期海平面频繁升降导致的海水缺氧, 对川南地区龙马溪组页岩有机质的富集与保存具有重要影响。

2.3 构造—沉积分异格局下川南地区五峰组—龙马溪组黑色页岩生物地层划分

根据扬子区五峰组和龙马溪组黑色页岩中笔石动物群的研究成果, 针对最新页岩气钻井岩心含笔石地层的精确研究, 南京地质古生物研究所团队已提出并完善了五峰组—龙马溪组黑色页岩序列4阶、13笔石带的划分和对比方案(陈旭等, 2001, 2015;

樊隽轩等, 2012)。依据晚奥陶世—早志留世的构造—沉积分异作用, 川南地区龙马溪组黑色页岩应当具有与渝东南(黔渝地区)地区相似的(陈旭等, 2017)阶段渐进展布模式。根据川南地区与邻区奥陶纪—志留纪生物地层对比, 川南地区五峰组—龙马溪组笔石生物地层发育齐全, 观音桥段—志留系为整合接触。

川南地区黑色页岩生物地层划分与岩心、测井统计表明, 川南地区稳定存在测井伽玛峰值、总有机碳峰值与斑脱岩层位的“三位一体”出现规律(图3)。现代火山喷发研究证实在太平洋贫营养物和叶绿素的海域内, 火山灰的沉落和溶解会促进异养的菌类浮游植物富集, 随后带来浮游植物、微真核生物和大真核生物的爆发(Zhang et al., 2017)。高伽玛测井的数值一般代表高黏土含量、高放射性及富含有机质, 这与火山活

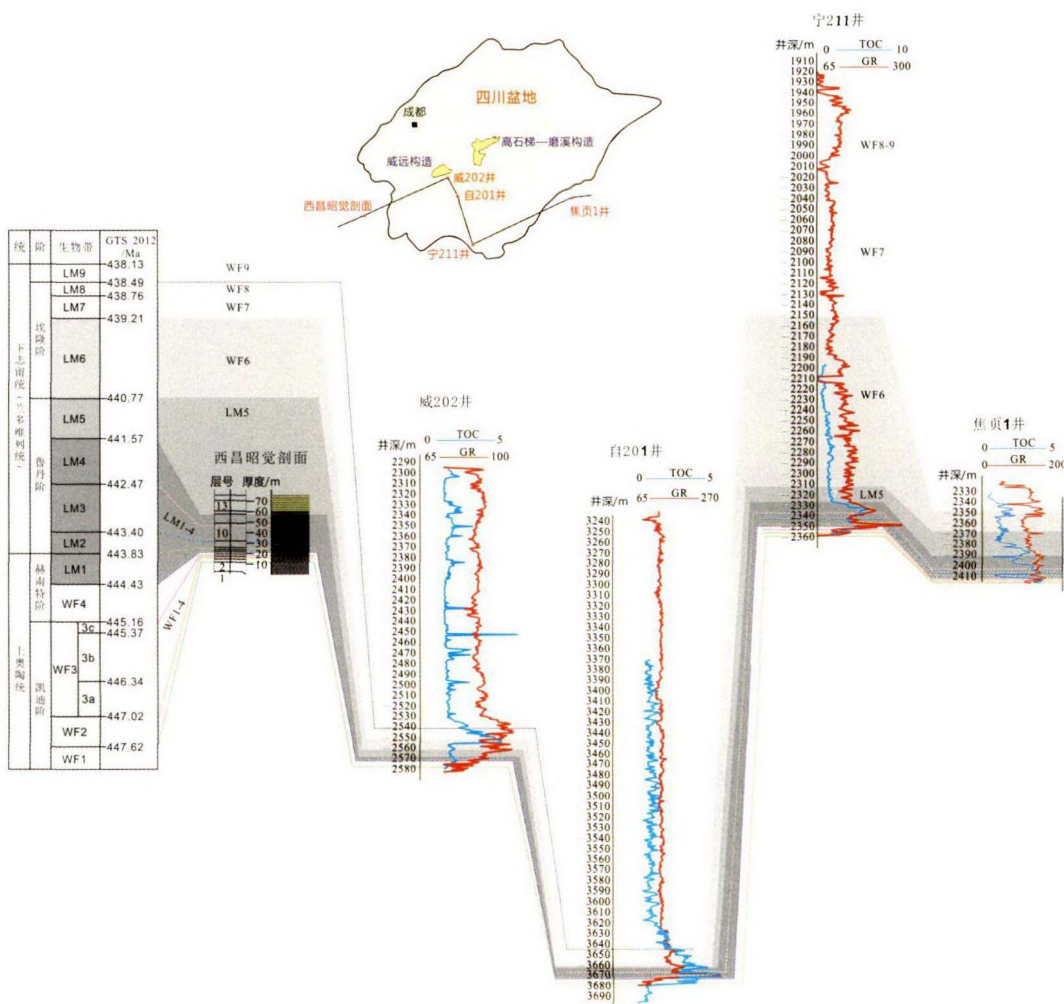


图3 川南地区笔石相连井地层对比图(部分钻井笔石带划分据陈旭等, 2015, 2018; 王红岩等, 2015, 2018; 罗超等, 2017)

Fig. 3 Stratigraphic correlation of graptolite facies in the southern Sichuan Basin (after Chen et al., 2015, 2018; Wang et al., 2015, 2018; Luo et al., 2017)

动喷发的火山灰联系十分紧密。O—S界限事件的火山喷发物质同样富含大量的营养元素,当火山活动发生后火山灰飘落的面积广大,火山灰沉降溶解后可为水体中的生物提供丰富的营养物质。川南地区五峰组—龙马溪组的地表露头中及部分岩心中均具有5~8套3~5 cm厚发育完好的斑脱岩层,与川南威远、长宁地区龙马溪组下段黑色岩系高GR峰值与测井峰值具有较好的对应。

峰值特征显示总有机碳(TOC)峰值和伽玛测井峰值大致出现在龙马溪组下部(LM2-LM5/LM6)的稳定层段之内,其中渝东南涪陵焦石坝构造焦页1井龙马溪组黑色页岩中总有机碳(TOC)和伽玛测井曲线呈现持续稳定的高值纵向分布,而川南地区长宁区块宁211井TOC和伽玛测井曲线的峰值则明显呈集中于LM2-LM5的局限范围内分布。川南地区龙马溪组页岩气井和主要地表剖面中威远区块的自201井、威202井以及昭觉剖面均与长宁区块宁211井均具有同一类型,可以进行有效比对。LM6时期之后广西运动影响范围加大,区域性抬升使乐山—龙女寺南缘与黔中古隆起北缘缘的陆源碎屑向四川盆地的中心位置汇集,川南地区黑色页岩消失,岩性中夹含粉砂岩和砂岩比例增加,总有机碳含量开始降低。

综上所述,川南地区具有高度一致的原始沉积背景,并对其所赋存的页岩气勘探开发布局具有重要的指导作用。四川盆地奥陶纪—志留纪的构造—沉积分异作用表现为由五峰组—龙马溪组下部沉积时期的双侧挤压型向龙马溪组上部沉积时期的单侧伸展型转变。广西运动对四川盆地的挤压作用应当局限在湄潭组—龙马溪组下段。龙马溪组上段(埃隆阶)开始,四川盆地再次进入拉张作用期,并应归属于峨眉地裂运动阶段。

3 川南地区晚三叠世后复杂构造地质背景与页岩气保存条件

3.1 四川盆地南缘渐变型盆—山结构特征

盆—山耦合是当今大陆动力学研究的前沿热点领域(刘树根等,2003;张国伟等,2006;李德威等,2009)。四川盆地盆—山结构边界具有渐变型(又称“弥散型”)与突变型(又称“线型”)两类(刘树根等,2011)。对比四川盆地西边界(龙门山)与北边界(米仓山和大巴山)所属突变型盆山边界,扬子板块的刚性结构特征使盆山边界的几何形状对盆内构造的走向具有明显的控制作用。而目前页岩气主要产区的长宁—昭通区块、威远及泸州—渝西区块位于四川盆地南部(缘)或靠近东南部(缘),属典型的板内渐变型盆山结构。川南地区东侧受齐岳山断裂及川东高陡构造控制,其南缘向为大凉山—大娄山低陡褶皱区过渡。与突变型盆山结构相比,板内渐变型盆山结构无明确的盆—山边界,地貌反差小、地形坡度缓。渐变型盆山结构的形成受控于盆外构造变形和盆内沉积盖层中滑脱层的分布特性控制,而其浅部构造具有大范围的盖层滑脱构造盆地向造山带过渡性转变特性。不同盆山结构区主要通过对陆相地层的沉积和地表隆升剥蚀作用的控制进而影响现今四川叠合盆地的页岩气保存条件并控制现今的页岩油气的分布。

四川盆地浅部重要的区域性盖层中生界红层(残留陆相地层厚度)可以有效反映不

同区域受周缘盆山结构影响所具有明显不同的构造变形强度与隆升剥蚀幅度。以构建冲断带—前陆盆地二元结构为主的突变型盆山结构在形成过程中其前缘发生明显沉降沉积充填，晚期隆升剥蚀幅度相对较小，现今盆地西缘及东北缘晚白垩世以来隆升剥蚀量普遍 $<3\ 000\text{ m}$ 。渐变型盆山结构所在的川南长宁地区以及受到多个造山带构造活动复合联合作用(盆山结构过渡带)的威远地区与泸州—大足地区晚白垩世以来隆升剥蚀幅度明显大于突变型盆山结构控制变形区。受浅层多层次滑脱构造和扩展变形影响，川南地区整体在晚白垩世后以隆升剥蚀为主，尤其是在大凉山渐变型盆山结构和龙门山突变型盆山结构过渡区，即威远构造核部及翼部产生了强烈的隆升剥蚀作用。川东、川东南地区晚白垩世以来剥蚀量普遍大于 $3\ 500\text{ m}$ ，但长宁—昭通及泸州地区局部等靠近的大娄山渐变型盆山结构区隆升剥蚀量相对较低($1\ 000\sim 2\ 500\text{ m}$) (刘树根等, 2016)。

3.2 川南差异性构造变形—抬升剥蚀特征

川南地区根据五峰组—龙马溪组页岩气勘探开发区块的划分，大致将其分为长宁地区、宁西地区、威远地区与泸州—大足地区。4个区域受差异性构造变形及抬升剥蚀的影响，具有同中存异的构造演化过程。长宁地区侏罗系—白垩系磷灰石裂变径迹测量和热史模式揭示出晚白垩世以来埋深增温过程逐渐停止、新生代早期 $50\sim 45\text{ Ma}$ 发生缓慢抬升以及 $30\sim 25\text{ Ma}$ 以来逐渐中等速率抬升剥蚀过程，总体导致地表抬升剥蚀量可达 $3\ 500\sim 4\ 000\text{ m}$ (图4b)。长宁地区主断层形成于加里东构造变形期，印支期—燕山期构造变形再活化，由于其断距较小推测终止于盆地区域盖层——中-下三叠统膏盐层系，新生代抬升剥蚀作用导致其剥露至地表，可能局部导致保存条件较差。

宁西地区侏罗系—白垩系磷灰石裂变径迹测量和热史模式揭示出晚白垩世以来埋深增温过程即逐渐停止，新生代早期 $50\sim 45\text{ Ma}$ 开始缓慢抬升，直至 $30\sim 25\text{ Ma}$ 以来逐渐发生中等速率抬升剥蚀过程，尤其是 10 Ma 以来发生快速抬升剥蚀过程明显强于长宁地区，总体导致地表抬升剥蚀量达到 $3\ 500\sim 4\ 000\text{ m}$ 。宁西地区主断层形成于印支期构造变形期，早期地表抬升剥蚀量相对较弱，但印支末期—燕山期构造变形再度活化，中-下三叠统膏盐层系滑脱变形与集中应变强烈，膏盐层系变形揉皱作用明显，同时对浅部侏罗系红层新生代构造强变形作用影响明显。因而宁西地区相对于长宁地区构造变形强度、叠加变形特征等明显增强，宁西地区晚新生代强烈缩短变形与叠加作用相对于长宁地区更强(图4a、图4c)。

泸州—大足地区主断层和构造格架同样形成于印支构造变形期，至燕山期构造变形再度活化，中-下三叠统膏盐层系滑脱变形与集中应变强烈，燕山期晚期—新生代构造变形与抬升剥蚀作用导致中-下三叠统膏盐岩地层在高陡构造局部剥露至地表。泸州地区侏罗系磷灰石裂变径迹测量和热史模式揭示出晚白垩世以来埋深增温过程逐渐停止、晚白垩世末期—新生代早期 $80\sim 40\text{ Ma}$ 中等速率抬升剥蚀过程(抬升剥蚀量相对较高)，晚新生代 20 Ma 以来抬升剥蚀速率中等，地表抬升剥蚀量达到 $2\ 000\sim 3\ 000\text{ m}$ (图4d)。相较于泸州地区，大足地区侏罗系磷灰石裂变径迹测量和热史模式揭示出新生代早期 $60\sim 25\text{ Ma}$ ，尤其是 20 Ma 以来抬升剥蚀速率加快的过程，总体导致地表抬升

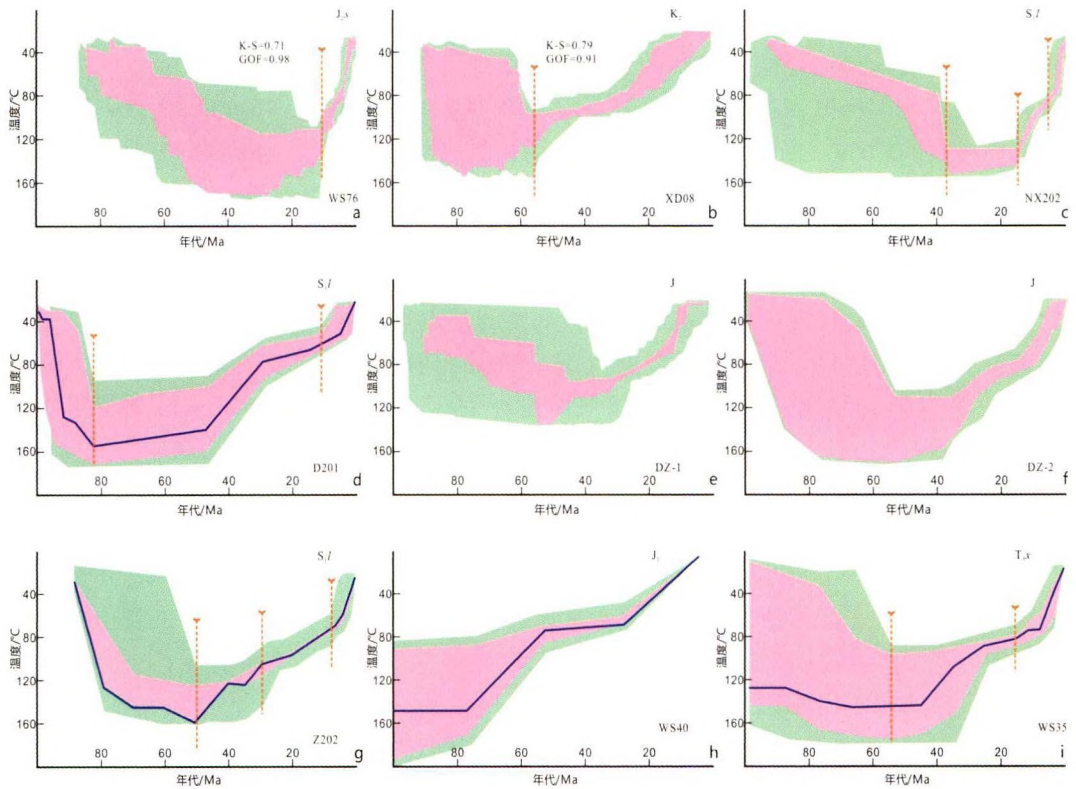


图 4 川南地区不同区域热演化史过程(样品点见图 9)

Fig. 4 History of thermal evolution in different regions of South Sichuan Basin

剥蚀量达到了 3 000 m (图 4e、图 4f)。

威远地区印支期后期逐渐发生格架调整, 威远构造核部须家河组侏罗系磷灰石裂变径迹测量和热史模式揭示出整个川南地区较为相似的晚白垩世以来逐渐停止埋深增温过程。相较于长宁—宁西地区, 威远地区晚新生代 20 Ma 以来抬升剥蚀过程更为剧烈, 地表总体抬升剥蚀量达到 2 000 ~ 3 000 m。晚白垩世末期—新生代强烈的构造变形与抬升剥蚀作用导致中-下三叠统膏盐岩已剥露至地表, 在地表形成天然气逸散的“天窗”(梁霄等, 2016), 使华蓥山以东的不同层系的天然气藏向威远构造发生差异运移作用, 五峰组—龙马溪组压力系数也具有向威远构造核部逐步降低的特征。

3.3 多期构造演化叠加与五峰组—龙马溪组断裂—裂缝体系建立

川南地区页岩气诸多钻井中普遍存在的裂缝期次及方向不明确等实际勘探开发问题。威远—宁西—长宁—泸州—大足一线靠近的大娄山构造带呈近东西展布横亘于四川盆地南缘, 因而依靠川南—大娄山渐变型盆山结构带多期节理构造和古应力反演为川南地区非常规页岩气研究提供基础地质条件, 定性建立较精准的五峰组—龙马溪组断裂—裂缝体系模型。

大娄山渐变型盆山结构带晚中生代—新生代受中国南方大陆板缘主要板块事件、

板内构造与隆升事件影响,存在多期构造变形作用。多期构造演化叠加表现为沉积建造、构造和岩浆热事件、低温热年代学等之间所具有一致性和同步性(邓宾等, 2016)。基于野外露头结构构造分析,大致可以揭示川南—大娄山地区4期具明显不同应力场特征的构造变形事件(图5)。晚侏罗世—早白垩世(~135 Ma),受雪峰陆内造山系统南东—北西向挤压应力场控制,大娄山东段发生近东西向主应力场挤压变形,逐步发生构造反转形成逆冲走滑变形,在川南泸州—大足地区东侧的南川地区形成近南北向构造(近东—西向主应力场第一期挤压变形);晚白垩世(~80 Ma),雪峰陆内造山系统仍处于北西向扩展变形构造活动之中,黔中古隆起地区以北西向沿紫云—罗甸断裂带强烈楔入大娄山一带(Yang, 2013)。受四川盆地刚性基底的阻挡,泸州—大足地区南部及长宁—宁西地区发生近南北向挤压褶皱变形事件(第二期近南北向主应力场挤压变形);古近纪晚期(40~20 Ma),四川盆地西南缘和南缘(威远—长宁—宁西地区)受印—亚板块碰撞远程效应影响,盆地西南缘大凉山前缘地区共同卷入北西—北北西走向的宽缓向斜。大娄山构造带形成北西至近南北走向的构造线理。泸州—大足等川南地区西部早期近东西走向褶皱后期也被近南北走向褶皱变形叠加(大娄山渐变型盆山结构的形成及第三期北东—南西向主应力场挤压变形事件)。新生代(10~5 Ma)以来,青藏高原持续向东扩展并沿鲜水河—安宁河—小江断裂发生大规模左旋走滑,川南地区西部发生最后一期北东—南西向挤压变形形成北西走向构造,并对第三期北东走向构造进行叠加改造。威远地区西南部及宁西地区受第三期—第四期构造叠加效应影响最为典型(第四期北西—南东向主应力场抬升剥蚀事件)。

3.4 川南渐变型盆—山体系下龙马溪组页岩保存条件差异性特征

(1) 有机热演化特征

针对现阶段川南地区长宁、威远区块龙马溪组含气量低或不含气井所存在的低电阻率现象。现有研究提出了两类不同的主控因素。一种主流观点认为低电阻页岩主要受已达到高演化的有机质中的高导矿物石墨引起(赵文韬等, 2018),表明有机质已经严重碳化(王玉满等, 2014, 2018; 蒋珊等, 2018);另一种观点认为页岩存在“荷电缝”现象(高和群等, 2016)。海相页岩在进入高一过成熟阶段后,受后期构造抬升剥露的影响导致页岩气保存条件破坏,页岩层间(内)天然气和水分等流体发生不同程度的运移逸散。压实作用的持续增强使页岩微孔隙缺少气体支撑而明显减小,颗粒间呈镶嵌式接触,超微裂缝随之减少以致使含气饱和度明显降低,含水饱和度增大,残余水矿化度增高从而最终使导电性增强而呈现低电阻特性。

选取威远地区两口评价井龙马溪组不同埋深、不同小层样品进行有机地球化学对比实验。龙一₁小层样品为W207-1与W206-1样品,分别对应1 852 m与3 788 m两套埋深,其中W207-1样品具有70 $\Omega \cdot m$ 的中高正常电阻率,而W206-1样品电阻率表现为近10 $\Omega \cdot m$ 的低电阻率。龙一₁样品为W206-2样品,对应埋深3 766 m,其测井曲线对应近10 $\Omega \cdot m$ 电阻率,具有典型的低电阻特征。详细实验方法参考(Wu et al., 2012)。索式抽提法抽提结果显示,川南威远地区龙马溪组页岩样品可溶抽提物整体较少,在宏观上已显示出现今不同埋深的样品均已处于一定的成熟度阶段。饱和烃全离子流图显

示，近龙马溪底部的两个龙一₁小层仍具备较完整的正构烷烃分布(W207-1与W206-1)。而具有明显差异的是，本次实验选取龙马溪组中上部页岩样品(W206-2)低碳数正构烷烃则明显缺失。一种解释认为样品可能遭受了较强的生物降解或是龙马溪组中上部页岩相对高孔隙度带来的更强的水洗作用以及流体活动使低分子量生物物大量缺失，这与页岩低电阻段成因具有相似性；第二种认识基于低碳数正构烷烃一般反映低等水生生物和菌类大量发育的沉积水体背景与生物类型，而高碳数正构烷烃与高等植物母源密切相关，W206-2样品生物物含量丰度可能代表了龙马溪组沉积地层内部存在较明显的沉积古环境差异(图6)。

参考反映生源的生物标志物参数特征。萘、藿烷参数中(*m/z* 191)，TT23(C23-三环萘烷)与TT24(C24-三环萘烷)具有较强的抗热降解的能力，威远地区龙马溪组两口钻

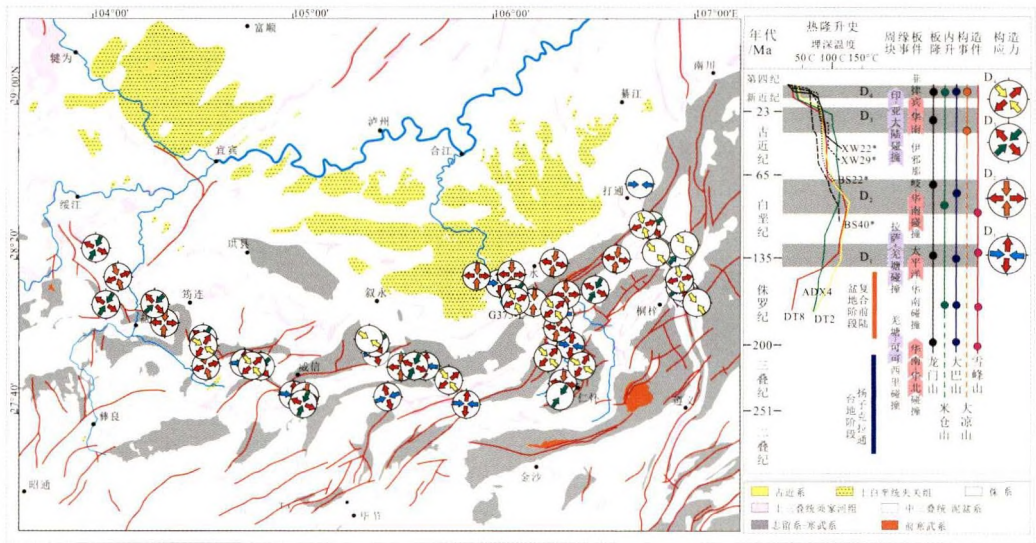


图5 川南大娄山渐变型盆山结构带4期变形构造综合解析图

Fig. 5 Comprehensive analysis of fourth-phase deformation structure in the Daloushan gradual basin-mountain structure belt, South Sichuan Basin

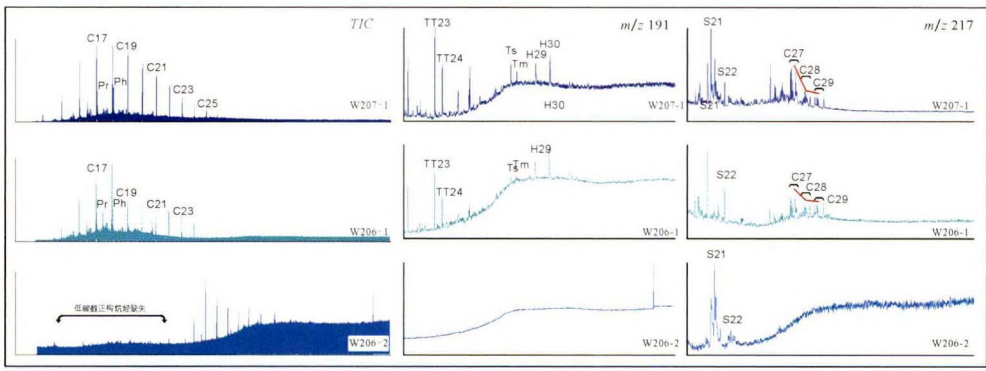


图6 川南威远地区龙马溪组饱和烃气相色谱—质谱特征

Fig. 6 GC-MS characteristic of saturated hydrocarbons in Longmaxi Formation, Weiyuan structure, South Sichuan

井页岩抽提物 TT23/(TT23+TT24) 比值在 0.63 ~ 0.66, 分布稳定(表 1)。在生油窗内, TT23/H30(TT23 与 C30-藿烷的比值)常被用作生源参数, 强烈的热成熟作用会使抽提物中的 TT23/H30 比值升高。龙马溪组常规索式抽提物中的 TT23/H30 值在 1.10 ~ 1.84, 表明相对较高的热成熟作用。甾烷源自真核生物体内的甾醇。S21(孕甾烷)及 S22(升孕甾烷)的先体被认为是荷尔蒙、孕烷醇及孕烷酮这一类化合物(Leeuw and Bass, 1986), 而两者一部分源自束缚在干酪根中的前体的释放, 另一部分则可能是规则甾烷在热演化过程中因侧链断裂而形成的。S21 在低熟阶段($R_o < 0.42\%$)时相对含量并不高, 在进入成熟阶段($R_o > 0.42\%$)才开始大量生成(黄第藩等, 1989)。C27 ~ C29 规则甾烷甾烷在整个生油窗内很稳定可以有效地区分相同源岩不同有机相的原油(Seifert et al., 1984), 并被广泛用于研究原油及沥青的亲缘关系。川南威远地区龙马溪组页岩甾烷特征中(m/z 217), S21 与 S22 相对与规则甾烷的较高的丰度代表了龙马溪组作为烃源岩其干酪根已经经历了大量生烃, 现今龙马溪组页岩均经历了较强的热演化作用。龙马溪组黑色页岩抽提物中 C27 ~ C29 规则甾烷的分布具有典型的“L”字型分布, 与下寒武统筇竹寺组的“V”型分布具有明显差异(图 6)。有研究表明热成熟作用会影响 C27 ~ C29 规则甾烷的分布, 由于 C29 及 C28 规则甾烷的热稳定性比 C27 规则甾烷差, 因而川南地区 1 800 ~ 3 700 m 埋深的龙马溪组黑色页岩已明显进入高演化阶段($1.74\% \leq \text{easy } R_o \leq 2.86\%$)。而 W206-2 样品规则甾烷的缺失也表明龙— $_{14}$ 小层也可能经历更强的热演化作用, 对龙马溪组下一步双层勘探开发模式也应具有一定的参考借鉴作用。

反映成熟度的参数中, C29-规则甾烷所具有的 $C29-20S/(20S+20R)$ 与 $C29-\beta\beta/(\beta\beta+\alpha\alpha)$ 是两类异构化指数是判别成熟度的最重要参数。C29 规则甾烷在 C-14、C-17 位上的异构化作用构成第一类异构化指数 $C29-\beta\beta/(\beta\beta+\alpha\alpha)$ 逐步从 0 增至 0.7, 在 0.67 ~ 0.71 间达到平衡。C29-规则甾烷在 C-20 位上的异构化作用则使得第二类异构化指数 $C29-20S/(20S+20R)$ 比值从 0 增至 0.5, 在 0.52 ~ 0.55 间达到平衡值(Peters et al., 2005)。W207-1 样品 $C29-20S/(20S+20R)$ 与 $C29-\beta\beta/(\beta\beta+\alpha\alpha)$ 分别为 0.41 与 0.42, W206-1 样品 $C29-20S/(20S+20R)$ 与 $C29-\beta\beta/(\beta\beta+\alpha\alpha)$ 值分别为 0.40 与 0.42, 表明川南地区 4 000 m 以浅的龙马

表 1 威远地区龙马溪组不同埋深页岩关键生物标志物特征参数

Table 1 Biomarker parameter of Longmaxi Formation, Weiyuan structure

生物标志物参数	井/样品号	W 207-1	W 206-1
	深度/m	1852	3788
TT23/(TT23+TT24)		0.62	0.66
Ts/(Ts+Tm)		0.62	0.67
TT23/H30		1.84	1.10
H29/H30		0.77	0.71
$C29-20S/(20S+20R)$		0.41	0.40
$C29-\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$		0.42	0.42
S21/S22		3.65	2.50
$S21+S22/C27+C28+C29$		0.47	0.70

溪组已具备一定热成熟度,但没有完全达到异构化作用的平衡值。可以预测,川南地区埋深大于4 000 m的页岩气勘探仍具有广阔前景。

龙马溪组页岩生物标志化合物研究证实,川南地区现今4 000 m以浅埋深的龙马溪组页岩均已进入了热成熟阶段,存在作为烃源岩而具备干酪根生排烃的有力证据。此外,与同样呈低电阻特征的威206井龙一₁小层W206-1样品相比,龙一₁小层(W206-2样品)抽提物总量的稀少、低碳数正构烷烃的低丰度以及饱和烃中萜烷、藿烷与甾烷的大量缺失表明川南地区局部存在的低电阻原因可能并非传统认识的因高演化的有机质中所高导矿物石墨引起,而与经历了强烈水洗导致流体自封闭体系失效的保存条件破坏有极大关联。

(2) 川南地区差异性多期流体活动特征

以川南地区泸州区块与长宁区块多口页岩气关键钻井薄片为基础开展微观流体活动特征分析,利用包裹体均一温度和盐度协和进行页岩气藏多期流体活动特征研究,从精确定量角度刻画多期构造演化叠加背景下川南地区页岩气保存条件特征。研究表明,靠近盆内的泸州一大足地区是202井龙马溪组镜下观察及包裹体均一温度测试显示该区流体演化大致具有两期,方解石包裹体均一温度明显分布集中于120℃~140℃、160℃~180℃峰值带,从温度阴极发光观察可见一期方解石呈暗橘黄色阴极光,一期方解石呈亮橘黄色阴极光(图7a)。而洞201井方解石包裹体均一温度明显分布集中于90℃~110℃、130℃~150℃、170℃~190℃峰值带,与阴极发光对比,揭示出可能的多期活动,不同性质的脉体所测的均一温度有明显的不同,剪性脉体所测均一温度主要为90℃~110℃,而张性脉体包裹体均一温度更高(图7b)。低盐度特征的早期流体揭示出泸州一大足地区可能受到地表流体系统影响,此后具有相同盐度特征中后期流体则代表区域相对较封闭的流体体系。

长宁区块方解石包裹体均一温度具有典型的双峰特征,其中宁209井包裹体均一温度与捕获压力分别对应130℃~150℃(捕获压力36~39 MPa)与160℃~170℃(捕获压力45~47 MPa)两期,整体显示长宁地区具有较明显的多期性流体活动特征。而依据包裹体均一温度、冰点温度和盐度协和可以划分判明长宁地区具有3类流体来源与活动属性,其中低均一温度流体又具有高盐度和低盐度特征,反映受淡水流体混合作用影响,这与较高均一温度—高盐度流体可以有效区别。宁西地区宁西202井包裹体均一温度、冰点温度和盐度所揭示的流体活动多期性特征则更为明显,具有100℃~110℃、120℃~140℃、160℃~170℃以及200℃等4套均一温度峰值。其中前两期流体以具有相同盐度特征的中-高均一温度流体特征为主(图8a),而中晚期两期高均一温度流体则具有低盐度、高盐度特征分异,也表明宁西地区受淡水流体混合作用影响可能更为强烈(图8a)。综合表明长宁—宁西地区流体体系的开放性以及宁西地区晚期保存条件变差的不确定性。

川南威远、长宁及泸州一大足地区具有的同中有异的早期埋深与中期叠加调整改造以及晚期隆升剥蚀过程。对比分析显示,威远地区20 Ma以来隆升剥蚀作用最为强烈,而长宁—宁西地区多期剪切脉体与顺层张—剪性脉体的丰富发育则体现出区块受多期构造作用叠加的影响层次更深。而泸州一大足地区晚期具有更封闭的流体体系,

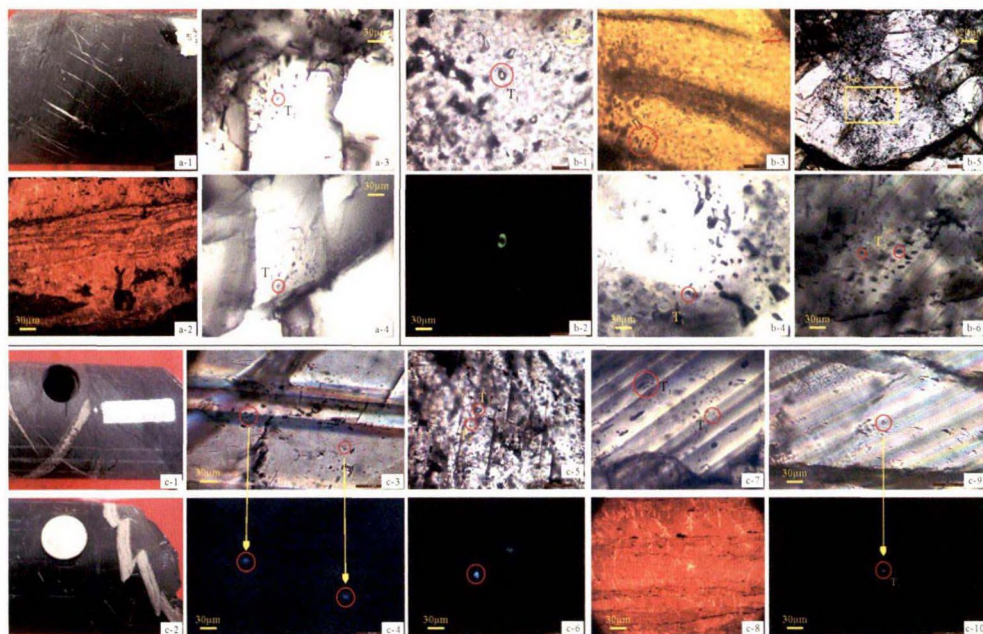


图7 川南泸州地区与长宁地区关键钻井流体包裹体特征

a-1/2. 足202井, 龙马溪组, 3 884.76 m, 以张性微裂缝为主, 方解石脉体充填, 呈雁列式排, 阴极发光观察可见一期方解石呈暗橘黄色阴极光, 一期方解石呈亮橘黄色阴极光(50TR); a-3/4. 足202井, 龙马溪组, 3 884.76 m, $T_1 : T_h = 131.5\text{ }^\circ\text{C}$, $T_m = -3.5\text{ }^\circ\text{C}$, $T_2 : T_h = 175.6\text{ }^\circ\text{C}$, $T_m = -7.4\text{ }^\circ\text{C}$ (100TR); b-1/2. 洞201井, 龙马溪组, 沥青同期的盐水包裹体, $T_1 : T_h = 100.5\text{ }^\circ\text{C}$, $T_m = -2.5\text{ }^\circ\text{C}$; b-3/4. 洞201井, 龙马溪组, 与气同期的气液两相盐水包裹体, $T_3 : T_h = 188.6\text{ }^\circ\text{C} \sim 191.8\text{ }^\circ\text{C}$, $T_m = -5.3\text{ }^\circ\text{C} \sim -5.4\text{ }^\circ\text{C}$; b-5/6. 洞201井, 龙马溪组, 暗色的包裹体, $T_2 : T_h = 135.2\text{ }^\circ\text{C} \sim 139.5\text{ }^\circ\text{C}$; c-1. 宁西202井, 龙马溪组, 3 852.51 m, 剪节理方解石脉体; c-2. 宁西202井, 龙马溪组, 3 946.53 m, 多期剪性裂缝方解石脉体; c-3/4. 宁西202井, 龙马溪组, 3 834.03 m, 方解石中发蓝色荧光的烃类包裹体(50TR); c-5/6. 宁西202井, 龙马溪组, 3 859.92 m, $T_2 : T_h = 163.2\text{ }^\circ\text{C}$, $T_m = -9.2\text{ }^\circ\text{C}$, $T_3 : T_h = 181.6\text{ }^\circ\text{C}$, $T_m = -4.2\text{ }^\circ\text{C}$ (100TR); c-7/8. 宁西202井, 龙马溪组, 3 889.83 m, 与沥青同期、暗色阴极光的盐水包裹体, $T_1 : T_h = 131.2\text{ }^\circ\text{C} \sim 137.4\text{ }^\circ\text{C}$, $T_m = -7.9\text{ }^\circ\text{C} \sim 8.1\text{ }^\circ\text{C}$ (100TR); c-9/10. 宁西202井, 龙马溪组, 3 926.00 m, $T_1 : T_h = 139.4\text{ }^\circ\text{C}$, $T_m = -8.2\text{ }^\circ\text{C}$ (100TR)

Fig. 7 Characteristics of fluid inclusions in Luzhou and Changning areas, South Sichuan Basin

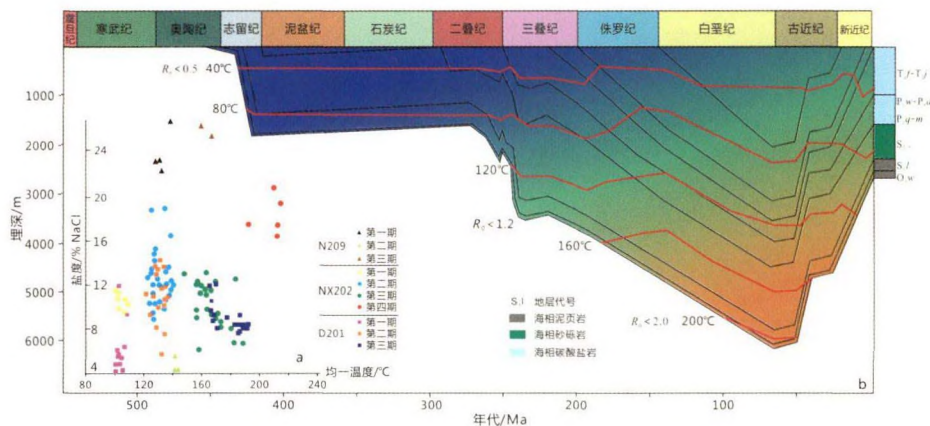


图8 川南地区流体包裹体均一温度—盐度交汇及埋藏史拟合

Fig. 8 Fitting between burial history and temperature-salinity intersection of fluid inclusion

五峰组—龙马溪组保存条件优于长宁—宁西地区，凸显出区域受川南大娄山渐变型盆山结构的影响更弱因而所具备更好的页岩气保存条件。

4 讨论与结论

依据裂变径迹数据，加入 R_o 与地温梯度拟合曲线参数进行 Basinmod 和 Petromod 双法数值模拟，最终建立了川南地区渐变型盆山结构边界条件下多期构造、流体演化对页岩气富集的影响机理。长宁地区早期沉积沉降速率稳定，存在 240 Ma 与 155 Ma 两期生气高峰，宁 201 井流体包裹体温度与捕获压力与计算得到白垩纪前五峰—龙马溪组压力系数为 1.1 的半埋深过程，具有典型的页岩气早期有限聚集特征。至晚白垩世长宁地区五峰组—龙马溪组达到最大埋约 6 000 m 过程中，流体封存体系完好，保存条件较为优越，中晚期的富集使压力系数逐渐向 2.0 的超压型过渡。新生代开始进入构造叠加定型期(图 9)，晚期抬升剥蚀显著，页岩气藏开始弱调整，形成现今具有 1.9 压力系数的保存型超压页岩气藏。而对应构造—流体演化期次明显增强的宁西地区。宁西 202 井稳压模型计算显示，宁西地区侏罗纪前即已进入快速埋深增压阶段，形成压力系数最高近 2.4 的早期富集型超压页岩气藏。然印支期—燕山期的构造叠加以及新生代的强烈隆升剥蚀使宁西地区保存条件骤然降低，调整改造强烈，最终定型为压力系数近 1.0 的常压页岩气藏。

对比长宁地区与宁西地区的成藏构造差异。川南泸州—大足地区以及威远地区与上述两地区的页岩气成藏演化过程上分别具有相似性及差异性。泸州—大足区块早期埋深稳定快速，晚白垩世达到近 6 500 m 的最大埋深，形成早期有限聚集，中期相对富集的压力系数近 1.8 的超压型页岩气藏。但无论是印支—燕山期的构造叠加定型以及新生代以来的隆升剥蚀作用，泸州—大足地区相较于长宁、威远地区调整改造幅度较弱，最终定型为保存型超压页岩气藏。威远构造早期埋深速率及强度相对较弱于上述 3 个地区，五峰组—龙马溪组早白垩世(155 Ma)进入生气高峰，晚白垩世达到近 5 500 m 的最

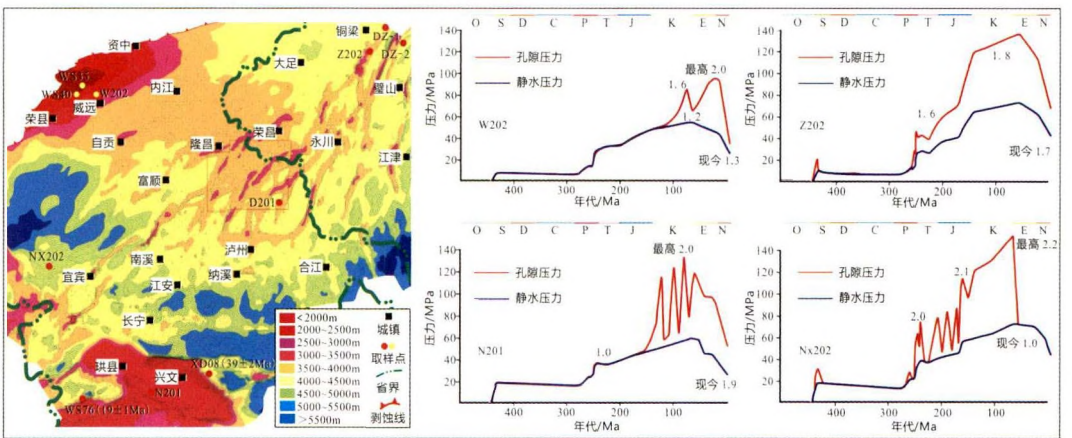


图 9 川南地区不同区域流体压力演化过程

Fig. 9 Evolution of fluid pressure in different areas of South Sichuan Basin

大理深, 同样也具有早期有限聚集—中晚期相对富集特征。但新生代以来威远构造抬升剥蚀幅度最为显著, 喜山期构造运动导致生气速率迅速降低, 但相对远离川南渐变型盆山结构变形区、较好的流体封存体系以及“天窗”的烟囱效应, 使威远地区在发生调整改造后最终定型为弱超压页岩气藏。

川南地区地质—地球化学综合研究表明, 早期构造控制下的沉积分异格局控制了龙马溪组富有机质优质页岩的形成与展布。奥陶纪—志留纪之交“三隆一坳”古构造格局使川南地区五峰组—龙马溪组黑色页岩层系发育齐全, 厚度稳定。根据多期节理构造与古应力反演, 川南威远、长宁—宁西以及泸州—大足地区具有差异性的多期构造演化与流体温压特征, 体现出燕山—喜山期四川盆地—大娄山渐变型盆山结构边界对页岩气晚期保存的控制作用。川南—大娄山渐变型盆山结构边界条件下晚白垩世以来所经历的4期不同应力场构造变形事件使威远、泸州—大足与长宁—宁西地区五峰组—龙马溪组具有差异性构造变形—抬升剥蚀与演化特征。差异性的埋深—隆升建造过程对受埋深与构造热事件控制的页岩有机地球化学特征及流体充注体系产生重要影响。构造—沉积分异, 盆山建造与热演化过程最终控制川南地区五峰组—龙马溪组早期有限聚集—中期相对富集—晚期调整改造的页岩气成藏演化过程。

参 考 文 献

- 陈 旭, 戎嘉余, 周志毅等. 2001. 上扬子区奥陶—志留纪之交的黔中隆起和宜昌上升. 科学通报, 46(12): 1052-1056.
- Chen Xu, Rong Jiayu, Zhou Zhiyi et al. 2001. The central Guizhou and Yi-chang uplifts, Upper Yangtze region, between Ordovician and Silurian. *Chinese Science Bulletin*, 46(18): 1580-1584.
- 陈 旭, 樊隽轩, 张元动等. 2015. 五峰组及龙马溪组黑色页岩在扬子覆盖区内的划分与圈定. 地层学杂志, 39(4): 351-358.
- Chen Xu, Fan Junxuan, Zhang Yuandong et al. 2015. Subdivision and delineation of the Wufeng and Lungmachi black shales in the subsurface areas of the Yangtze platform. *Journal of Stratigraphy*, 39(4): 351-358.
- 陈 旭, 樊隽轩, 王文卉等. 2017. 黔渝地区志留系龙马溪组黑色笔石页岩的阶段性渐进展布模式. 中国科学: 地球科学, 47(6): 720-732.
- Chen Xu, Fan Junxuan, Wang Wenhui et al. 2017. Stage-progressive distribution pattern of the Lungmachi black graptolitic shales from Guizhou to Chongqing, central China. *Science China Earth Sciences*, 60(6): 1133-1146.
- 陈 旭, 陈 清, 甄勇毅等. 2018. 志留纪初宜昌上升及其周缘龙马溪组黑色笔石页岩的圈层展布模式. 中国科学: 地球科学, 48(9): 1198-1206.
- Chen Xu, Chen Qing, Zhen Yongyi et al. 2018. Circumjacent distribution pattern of the Lungmachi black shale (Early Silurian) on the Yichang uplift and its peripheral region. *Science China Earth Sciences*, 61(9): 1195-1203.
- 邓 宾, 刘树根, 刘 顺等. 2009. 四川盆地地表剥蚀量恢复及其意义. 成都理工大学学报(自然科学版), 36(6): 675-686.
- Deng Bin, Liu Shugen, Liu Shun et al. 2009. Restoration of exhumation thickness and its significance in Sichuan Basin, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 36(6): 675-686.
- 邓 宾, 刘树根, 覃作鹏等. 2015. 扬子板内大娄山渐变型盆—山结构带多期构造特征及其对板内—板缘构造的响应. 大地构造与成矿学, 39(6): 973-991.
- Deng Bin, Liu Shugen, Qin Zuopeng et al. 2015. Multi-stage structural evolution of intracontinental Daloushan

- basin-mountain system, Upper Yangtze block: Implications for a coupling of deformation events across South China Plate and its periphery. *Geotectonica et Metallogenia*, 39(6): 973-991.
- 邓 宾, 雍自权, 刘树根等. 2016. 青藏高原东南缘大凉山新生代隆升建造过程——多封闭系统低温热年代学与热模型限制. *地球物理学报*, 59(6): 2162-2175.
- Deng Bin, Yong Ziquan, Liu Shugen et al. 2016. Cenozoic mountain-building processes in the Daliangshan, southeastern margin of the Tibetan Plateau: Evidence from low-temperature thermochronology and thermal modeling. *Chinese Journal of Geophysics*, 59(6): 2162-2175.
- 樊隽轩, Michael J, 陈 旭等. 2012. 华南奥陶—志留系龙马溪组黑色笔石页岩的生物地层学. *中国科学: 地球科学*, 42(1): 130-139.
- Fan Junxuan, Michael J, Chen Xu et al. 2011. Biostratigraphy and geography of the Ordovician-Silurian Lungmachi black shales in South China. *Science China Earth Sciences*, 54(12): 1854-1863.
- 高和群, 丁安徐, 蔡 潇等. 2016. 中上扬子海相页岩电阻率异常成因分析. *断块油气田*, 23(5): 578-582.
- Gao Hequn, Ding Anxu, Cai Xiao et al. 2016. Genetic analysis of abnormal resistivity of Middle-Upper Yangtze marine shales. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 23(5): 578-582.
- 郭彤楼, 张汉荣. 2014. 四川盆地焦石坝页岩气田形成与富集高产模式. *石油勘探与开发*, 41(1): 28-36.
- Guo Tonglou and Zhang Hanrong. 2014. Formation and enrichment mode of Jiaoshiba shale gas field, Sichuan Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 41(1): 28-36.
- 郭旭升, 胡东风, 文治东等. 2014. 四川盆地及周缘下古生界海相页岩气富集高产主控因素——以焦石坝地区五峰组—龙马溪组为例. *中国地质*, 41(3): 893-901.
- Guo Xusheng, Hu Dongfeng, Wen Zhidong et al. 2014. Major factors controlling the accumulation and high productivity in marine shale gas in the Lower Paleozoic of Sichuan Basin and its periphery: A case study of the Wufeng-Longmaxi Formation of Jiaoshiba area. *Geology in China*, 41(3): 893-901.
- 胡艳华, 孙卫东, 丁 兴等. 2009. 奥陶纪—志留纪边界附近火山活动记录: 来华南周缘钾质斑脱岩的信息. *岩石学报*, 25(12): 3298-3308.
- Hu Yanhua, Sun Weidong, Ding Xing et al. 2009. Volcanic event at the Ordovician-Silurian boundary: The message front K-bentonite of Yangtze block. *Acta Petrologica Sinica*, 25(12): 3298-3308.
- 贾承造. 2017. 论非常规油气对经典石油天然气地质学理论的突破及意义. *石油勘探与开发*, 44(1): 1-11.
- Jia Chengzao. 2017. Breakthrough and significance of unconventional oil and gas to classical petroleum geological theory. *Petroleum Exploration and Development*, 44(1): 1-11.
- 姜 磊, 邓 宾, 刘树根等. 2019. 焦石坝—武隆构造带古流体活动差异及对页岩气保存条件的影响. *地球科学*, 44(2): 174-188.
- Jiang Lei, Deng Bin, Liu Shugen et al. 2019. Paleo-fluid migration and conservation conditions of shale gas in Jiaoshiba-Wulong area. *Earth Science*, 44(2): 174-188.
- 蒋 珊, 王玉满, 王书彦等. 2018. 四川盆地川中古隆起及周缘下寒武统筇竹寺组页岩有机质石墨化区预测. *天然气工业*, 38(10): 19-27.
- Jiang Shan, Wang Yuman, Wang Shuyan et al. 2018. Distribution prediction of graphitized organic matter areas in the Lower Cambrian Qiongzhusi shale in the central Sichuan paleo-uplift and its surrounding areas in the Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 38(10): 19-27.
- 金之钧, 胡宗全, 高 波等. 2016. 川东南地区五峰组—龙马溪组页岩气富集与高产控制因素. *地质前缘*, 23(1): 1-10.
- Jin Zhijun, Hu Zongquan, Gao Bo et al. 2016. Controlling factors on the enrichment and high productivity of shale gas in the Wufeng-Longmaxi Formations, southeastern Sichuan Basin. *Earth Science Frontiers*, 23(1): 1-10.
- 李德威, 夏义平, 徐礼贵. 2009. 大陆板内盆山耦合及盆山成因——以青藏高原及周边盆地为例. *地质前缘*, 16(3): 110-119.
- Li Dewei, Xia Yiping and Xu Ligui. 2009. Coupling and formation mechanism of continental intraplate basin and orogeny: Examples from the Qinghai-Tibet Plateau and adjacent basins. *Earth Science Frontiers*, 16(3): 110-119.
- 梁 峰, 王红岩, 拜文华等. 2017. 川南地区五峰组—龙马溪组页岩笔石带对比及沉积特征. *天然气工业*, 37(7): 20-26.

- Liang Feng, Wang Hongyan, Bai Wenhua et al. 2017. Graptolite correlation and sedimentary characteristics of Wufeng-Longmaxi shale in southern Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 37(7): 20-26.
- 梁 霄, 刘树根, 夏 铭等. 2016. 四川盆地威远构造震旦系灯影组气烟囱特征及其地质意义. *石油与天然气地质*, 37(5): 702-712.
- Liang Xiao, Liu Shugen, Xia Ming et al. 2016. Characteristics and geological significance of gas chimney of the Sinian Dengying Formation in the Weiyuan structure, Sichuan Basin. *Oil & Gas Geology*, 37(5): 702-712.
- 刘树根, 罗志立, 赵锡奎等. 2003. 中国西部盆山系统的耦合关系及其动力学模式——以龙门山造山带—川西前陆盆地系统为例. *地质学报*, 77(2): 177-186.
- Liu Shugen, Luo Zhili, Zhao Xikui et al. 2003. Coupling relationships of sedimentary basin-orogenic belt systems and their dynamic models in West China: A case study of the Longmenshan orogenic belt-West Sichuan foreland basin system. *Acta Geologica Sinica*, 77(2): 177-186.
- 刘树根, 曾祥亮, 黄文明等. 2009. 四川盆地页岩气藏和连续型—非连续型气藏基本特征. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 36(6): 578-592.
- Liu Shugen, Zeng Xiangliang, Huang Wenming et al. 2009. Basic characteristics of shale and continuous-discontinuous transition gas reservoirs in Sichuan Basin, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 36(6): 578-592.
- 刘树根, 邓 宾, 李智武等. 2011. 盆山结构与油气分布——以四川盆地为例. *岩石学报*, 27(3): 621-635.
- Liu Shugen, Deng Bin, Li Zhiwu et al. 2011. The texture of sedimentary basin-orogenic belt system and its influence on oil/gas distribution: A case study from Sichuan Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 27(3): 621-635.
- 刘树根, 王世玉, 孙 玮等. 2013. 四川盆地及其周缘五峰组—龙马溪组黑色页岩特征. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 40(6): 621-639.
- Liu Shugen, Wang Shiyu, Sun Wei et al. 2013. Characteristics of black shale in Wufeng Formation and Longmaxi Formation in Sichuan Basin and its peripheral areas. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology edition)*, 40(6): 621-639.
- 刘树根. 2014. 四川盆地及周缘下古生界富有机质黑色页岩：从优质烃源岩到页岩气产层. 北京：科学出版社. 1-335.
- Liu Shugen. 2014. Lower Paleozoic Organic-Matter-Rich Black Shale in the Sichuan Basin and Its Periphery: from Oil-Prone Source Rock to Gas-Producing Shale Reservoir. Beijing: Science Press. 1-335.
- 刘树根, 孙 玮, 赵异华等. 2015. 四川盆地震旦系灯影组天然气的差异聚集分布及其主控因素. *天然气工业*, 35(1): 10-23.
- Liu Shugen, Sun Wei, Zhao Yihua et al. 2015. Differential accumulation and distribution of natural gas and their main controlling factors in the Upper Sinian Dengying Fm, Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 35(1): 10-23.
- 刘树根, 邓 宾, 钟 勇等. 2016. 四川盆地及周缘下古生界页岩气深埋藏—强改造独特地质作用. *地学前缘*, 23(1): 11-28.
- Liu Shugen, Deng Bin, Zhong Yong et al. 2016. Unique geological features of burial and superimposition of the Lower Paleozoic shale gas across the Sichuan Basin and its periphery. *Earth Science Frontiers*, 23(1): 11-28.
- 刘树根, 孙 玮, 钟 勇等. 2017. 四川海相克拉通盆地显生宙演化阶段及其特征. *岩石学报*, 33(4): 1058-1072.
- Liu Shugen, Sun Wei, Zhong Yong et al. 2017. Evolutionary episodes and their characteristics within the Sichuan marine craton basin during Phanerozoic Eon, China. *Acta Petrologica Sinica*, 33(4): 1058-1072.
- 刘树根, 邓 宾, 孙 玮等. 2018. 四川盆地：周缘活动主控下形成的叠合盆地. *地质科学*, 53(1): 308-326.
- Liu Shugen, Deng Bin, Sun Wei et al. 2018. Sichuan Basin: A superimposed sedimentary basin mainly controlled by its peripheric tectonics. *Chinese Journal of Geology*, 53(1): 308-326.
- 罗 超, 王兰生, 石学文等. 2017. 长宁页岩气田宁 211 井五峰组—龙马溪组生物地层. *地层学杂志*, 41(2): 142-152.
- Luo Chao, Wang Lansheng, Shi Xuewen et al. 2017. Biostratigraphy of the Wufeng to Longmaxi Formation at well Ning 211 of Changning shale gas field. *Journal of Stratigraphy*, 41(2): 142-152.
- 马新华, 谢 军. 2018. 川南地区页岩气勘探开发进展及发展前景. *石油勘探与开发*, 45(1): 161-169.
- Ma Xinhua and Xie Jun. 2018. The progress and prospects of shale gas exploration and exploitation in southern Sichuan

- Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 45(1): 161-169.
- 梅冥相. 1994. 论“黔中古陆”. *贵州地质*, 11(3): 199-205.
- Mei Mingxiang. 1994. On the central Guizhou “Oil Land”. *Guizhou Geology*, 11(3): 199-205.
- 孟庆任. 2017. 秦岭的由来. *中国科学: 地球科学*, 47(4): 412-420.
- Meng Qingren. 2017. Origin of the Qinling Mountains. *Scientia Sinica Terrae*, 47(4): 412-420.
- 聂海宽, 唐 玄, 边瑞康. 2009. 页岩气成藏控制因素及中国南方页岩气发育有利区预测. *石油学报*, 30(4): 484-491.
- Nie Haikuan, Tang Xuan and Bian Ruikang. 2009. Controlling factors for shale gas accumulation and prediction of potential development area in shale gas reservoir of South China. *Acta Petrolei Sinica*, 30(4): 484-491.
- 聂海宽, 金之钧, 边瑞康等. 2016. 四川盆地及其周缘上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组页岩气“源—盖控藏”富集. *石油学报*, 37(5): 557-571
- Nie Haikuan, Jin Zhijun, Bian Ruikang et al. 2016. The “source-cap hydrocarbon-controlling” enrichment of shale gas in Upper Ordovician Wufeng Formation-Lower Silurian Longmaxi Formation of Sichuan Basin and its periphery. *Acta Petrolei Sinica*, 37(5): 557-571
- 聂海宽, 金之钧, 马 鑫等. 2017. 四川盆地及邻区上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组底部笔石带及沉积特征. *石油学报*, 38(2): 160-174.
- Nie Haikuan, Jin Zhijun, Ma Xin et al. 2017. Graptolites zone and sedimentary characteristics of Upper Ordovician Wufeng Formation-Lower Silurian Longmaxi Formation in Sichuan Basin and its adjacent areas. *Acta Petrolei Sinica*, 38(2): 160-174.
- 戎嘉余, 陈 旭, 王 悻等. 2011. 奥陶—志留纪之交黔中古陆的变迁: 证据与启示. *中国科学: 地球科学*, 41(10): 1407-1415.
- Rong Jiayu, Chen Xu, Wang Yi et al. 2011. Northward expansion of central Guizhou old land through the Ordovician and Silurian transition: Evidence and implications. *Scientia Sinica Terrae*, 41(10): 1407-1415.
- 戎嘉余, 王 悻, 詹仁斌等. 2012. 论桐梓上升——志留纪埃隆晚期黔中古陆北扩的证据. *地层学杂志*, 36(4): 679-691.
- Rong Jiayu, Wang Yi, Zhan Renbin et al. 2012. On the Tongzi uplift: Evidence of northward expansion of Qianzhong old land during Aeronian, Llandovery, Silurian. *Journal of Stratigraphy*, 36(4): 679-691.
- 沈建伟, 梅冥相, 曾 羽. 1987. 贵州加里东运动的地层学效应. *贵州地质*, (4): 461-467.
- Shen Jianwei, Mei Mingxiang and Zeng Yu. 1987. The stratigraphy effect of the Caledonian Movement in Guizhou. *Guizhou Geology*, (4): 461-467
- 沈志达, 梅冥相, 曾 羽. 1990. 贵州太康运动的地层学效应——兼论“黔中古陆”的形成. *贵州地质*, (7): 91-98.
- Shen Zhida, Mei Mingxiang and Zeng Yu. 1990. The stratigraphy effect of the Taikang Movement in Guizhou: A discussion on the formation of paleoland of central Guizhou. *Guizhou Geology*, (7): 91-98.
- 腾格尔, 申宝剑, 俞俊杰等. 2017. 四川盆地五峰组—龙马溪组页岩气形成与聚集机理. *石油勘探与开发*, 44(1): 69-78.
- Tenger, Shen Baojian, Yu Lingjie et al. 2017. Mechanisms of shale gas generation and accumulation in the Ordovician Wufeng-Longmaxi Formation, Sichuan Basin, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 44(1): 69-78.
- 王红岩, 郭 伟, 梁 峰等. 2015. 四川盆地威远页岩气田五峰组和龙马溪组黑色页岩生物地层特征与意义. *地层学杂志*, 39(3): 289-293.
- Wang Hongyan, Guo Wei, Liang Feng et al. 2015. Biostratigraphy characteristics and scientific meaning of the Wufeng and Longmaxi Formation black shales at well Wei 202 of the Weiyuan shale gas field, Sichuan Basin. *Journal of Stratigraphy*, 39(3): 289-293.
- 王红岩, 郭 伟, 梁 峰等. 2018. 川南自201井区奥陶系—志留系间黑色页岩生物地层. *地层学杂志*, 42(4): 455-460.
- Wang Hongyan, Guo Wei, Liang Feng et al. 2018. Biostratigraphy of Ordovician-Silurian black shale at well Zi 201, South Sichuan. *Journal of Stratigraphy*, 42(4): 455-460.
- 王 悻, 戎嘉余, 詹仁斌等. 2013. 鄂西南奥陶系—志留系交界地层研究兼论宜昌上升. *地层学杂志*, 37(3):

264-274.

- Wang Yi, Rong Jiayu, Zhan Renbin et al. 2013. On the Ordovician-Silurian boundary strata in southwestern Hubei, and the Yichang uplift. *Journal of Stratigraphy*, 37(3): 264-274.
- 王玉满, 董大忠, 程相志等. 2014. 海相页岩有机质碳化的电性证据及其地质意义——以四川盆地南部地区下寒武统筇竹寺组页岩为例. *天然气工业*, 34(8): 1-7.
- Wang Yuman, Dong Dazhong, Cheng Xiangzhi et al. 2014. Electric property evidences of the carbonification of organic matters in marine shales and its geologic significance: A case of the Lower Cambrian Qiongzhusi shale in southern Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 34(8): 1-7.
- 王玉满, 李新景, 陈 波等. 2018. 海相页岩有机质碳化的热成熟度下限及勘探风险. *石油勘探与开发*, 45(3): 385-395.
- Wang Yuman, Li Xinjing, Chen Bo et al. 2018. Lower limit of thermal maturity for the carbonization of organic matter in marine shale and its exploration risk. *Petroleum Exploration and Development*, 45(3): 385-395.
- 严德天, 陈代钊, 王清晨等. 2009. 扬子地区奥陶系—志留系界线附近地球化学研究. *中国科学: 地球科学*, 39(3): 285-299.
- Yan Detian, Chen Daizhao, Wang Qingchen et al. 2009. Geochemical changes across the Ordovician-Silurian transition on the Yangtze platform, South China. *Science China Earth Sciences*, 52(1): 38-54.
- 余开富, 王守德. 1995. 贵州南部的都匀运动及其古构造特征和石油地质意义. *贵州地质*, 12(3): 225-232.
- Yu Kaifu and Wang Shoude. 1995. Duyun Movement in South Guizhou Province and its paleostructure, and their significance in petroleum geology. *Guizhou Geology*, 12(3): 225-232.
- 曾博文, 刘树根, 冉 波等. 2017. 扬子板块北缘下志留统龙马溪组重晶石结核特征及其成因机制分析. *岩石矿物学杂志*, 36(2): 213-226.
- Zan Bowen, Liu Shugen, Ran Bo et al. 2017. An analysis of barite concretions from Lower Silurian Longmaxi Formation on the northern margin of the Yangtze block and their genetic mechanism. *Acta Petrologica Mineralogica*, 36(2): 213-226.
- 张国伟, 郭安林, 姚安平. 2006. 关于中国大陆地质与大陆构造基础研究的思考. *自然科学进展*, 16(10): 1210-1215.
- Zhang Guowei, Guo Anlin and Yao Anping. 2006. Reflections on the basic research of Chinese continental geology and continental tectonics. *Progress in Natural Science*, 16(10): 1210-1215.
- 张金川, 金之钧, 袁明生. 2004. 页岩气成藏机理和分布. *天然气工业*, 24(7): 32-35+4-5.
- Zhang Jinchuan, Jin Zhijun and Yuan Mingsheng. 2004. Reservoiring mechanism of shale gas and its distribution. *Natural Gas Industry*, 24(7): 15-18.
- 张金川, 汪宗余, 聂海宽等. 2008. 页岩气及其勘探研究意义. *现代地质*, 22(4): 640-646.
- Zhang Jinchuan, Wang Zongyu, Nie Haikuan et al. 2008. Shale gas and its significance for exploration. *Geoscience*, 22(4): 640-646.
- 赵建华, 金之钧, 金振奎等. 2016. 四川盆地五峰组—龙马溪组页岩岩相类型与沉积环境. *石油学报*, 37(5): 572-586.
- Zhao Jianhua, Jin Zhijun, Jin Zhenkui et al. 2016. Lithofacies types and sedimentary environment of shale in Wufeng-Longmaxi Formation, Sichuan Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 37(5): 572-586.
- 赵文韬, 荆铁亚, 熊 鑫等. 2018. 海相页岩有机质石墨化特征研究：以渝东南地区牛蹄塘组为例. *地质科技情报*, 37(2): 183-191.
- Zhao Wentao, Jing Tieya, Xiong Xin et al. 2018. Graphitization characteristics of organic matters in marine-facies shales. *Geological Science and Technology Information*, 37(2): 183-191.
- 邹才能, 董大忠, 王社教等. 2010. 中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力. *石油勘探与开发*, 37(6): 6-18.
- Zou Caineng, Dong Dazhong, Wang Shejiao et al. 2010. Geological characteristics, formation mechanism and resource potential of shale gas in China. *Petroleum Exploration and Development*, 37(6): 6-18.
- Chen X, Rong J Y, Charles E M et al. 2000. Late Ordovician to earliest Silurian graptolite and brachiopod biozonation from the Yangtze region, South China, with a global correlation. *Geological Magazine*, 137(6): 623-650.

- Chikamoto Y, Mochizuki T, Timmermann A et al. 2016. Potential tropical Atlantic impacts on Pacific decadal climate trends. *Geophysical Research Letters*, 43(13): 7143-7151.
- Liang X, Liu S G, Wang S B et al. 2019. Analysis of the oldest Carbonate gas reservoir in China: New geological significance of the Dengying gas reservoir in the Weiyuan structure, Sichuan Basin. *Journal of Earth Science*, 30(2): 348-366.
- Liu S G, Deng B, Jansa L et al. 2018. Multi-stage basin development and hydrocarbon accumulations: A review of the Sichuan Basin at eastern margin of the Tibetan Plateau. *Journal of Earth Science*, 29(2): 75-93.
- Marshall J D, Brenchley P J, Mason P et al. 1997. Global carbon isotopic events associated with mass extinction and glaciation in the Late Ordovician. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 132(1-4): 195-210.
- Olgun N, Duggen S, Andronico D et al. 2013. Possible impacts of volcanic ash emissions of Mount Etna on the primary productivity in the oligotrophic Mediterranean Sea: Results from nutrient-release experiments in seawater. *Marine Chemistry*, 152: 32-42.
- Peters K E, Walters C C and Moldowan J M. 2005. *The Biomarker Guide, Biomarkers and Isotopes in Petroleum Exploration and Earth History*. New York: Cambridge University Press. 1-699.
- Ran B, Liu S G, Jansa L et al. 2015. Origin of the Upper Ordovician-Lower Silurian cherts of the Yangtze block, South China, and their palaeogeographic significance. *Journal of Asian Earth Sciences*, 108: 1-17.
- Wu L, Liao Y, Fang Y et al. 2012. The study on the source of the oil seeps and bitumens in the Tianjingshan structure of the northern Longmen Mountain structure of Sichuan Basin, China. *Marine and Petroleum Geology*, 37(1): 147-161.
- Yang Z. 2013. An unrecognized major collision of the Okhotomorsk Block with East Asia during the Late Cretaceous, constraints on the plate reorganization of the Northwest Pacific. *Earth-Science Reviews*, 126: 96-115.
- Zhang R, Jiang T, Tian Y et al. 2017. Volcanic ash stimulates growth of marine autotrophic and heterotrophic microorganisms. *Geology*, 45(8): 679-682.

The shale gas enrichment factors of Longmaxi Formation under gradient basin-mountain boundary in South Sichuan Basin: Tectono-depositional differentiation and discrepant evolution

Liang Xiao^{1,2} Xu Jianliang¹ Wang Ying¹ Fang Xinyan³ Zhao Lei¹ Wu Yijia¹ Deng Bin²

(1. Institute of Geological Exploration and Development of CNPC Chuanqing Drilling Engineering, Chengdu 610051;

2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology,

Chengdu 610059; 3. State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangzhou Institute of

Geochemistry, Chinese Academy of Science, Guangzhou 510640)

Abstract

The Longmaxi Formation in the southern Sichuan Basin has entered a critical stage of shale gas development and production with depth of less than 3 500 m. The petroleum geologist has long attached importance to the static parameters of reservoirs such as shale lithofacies, petrology and pore characteristics, and the limitation of the development of a single layer of the S_1^1 . The increase in production capacity has created greater constraints. Returning to the basic geological essence, using comprehensive geological-geochemical research ideas, taking the sedimentary differentiation pattern under structural control as the framework, supplementing and perfecting the biolithic

stratigraphic division system in southern Sichuan, relying on multi-phase joint structure and palaeostress inversion and other structural analysis method, finally establishing a multi-phase structural evolution and fluid temperature and pressure characteristic model of Longmaxi Formation under the boundary conditions of basin-mountain structure in the south of Sichuan, which can effectively form the shale gas difference enrichment mechanism in the same area in South Sichuan. Tectono-depositional differentiation of 'Palaeouplift-Depression' during Ordovician-Silurian has controlled the progressive development and distribution of high-quality Longmaxi shale in the southern Sichuan Basin. The four phases of tectonic deformation events experienced in different fields have given the Longmaxi Formation in Weiyuan, Luzhou-Dazu, and Changning-Ningxi areas with differential structural deformation-lifting erosion and evolution characteristics. Differential construction process of burial depth-uplifting has an important impact on shale organic geochemical characteristics and fluid filling system controlled by burial depth and tectonic thermal events. Tectono-depositional differentiation, basin-mountain construction, and thermal evolution ultimately control the Longmaxi Formation shale gas accumulation evolution process in the early limited accumulation-mid relative enrichment-late adjustment and transformation in the southern Sichuan area.

Keywords Sichuan Basin, Shale gas, Enrichment mechanism, Basin-mountain construction, Tectono-depositional differentiation, Thermal evolution