

上扬子地区下寒武统筇竹寺组地层特征及页岩气富集段分布

王红岩 施振生 赵群 周天琪 汪鹏飞

引用本文:

王红岩, 施振生, 赵群, 等. 上扬子地区下寒武统筇竹寺组地层特征及页岩气富集段分布[J]. 煤田地质与勘探, 2025, 53(3): 72–89.

WANG Hongyan, SHI Zhensheng, ZHAO Qun, et al. Stratigraphic characteristics and shale gas enrichment interval distribution of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation, Upper Yangtze region, China[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2025, 53(3): 72–89.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.12363/issn.1001-1986.24.12.0765>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

大面积高丰度海相页岩气富集理论及地质评价技术进展与应用

Enrichment theory of large area and high abundance marine shale gas and its geological evaluation technology progress and application

煤田地质与勘探. 2022, 50(3): 69–81 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.21.12.0824>

川东南东溪地区龙马溪组裂缝分布预测及页岩气保存条件评价

Prediction of fracture distribution and evaluation of shale gas preservation conditions in Longmaxi Formation in Dongxi area

煤田地质与勘探. 2021, 49(6): 35–45 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.06.004>

鄂尔多斯盆地东缘临兴地区海陆过渡相页岩气地质特征及成藏潜力

Geological characteristics and reservoir-forming potential of shale gas of transitional facies in Linxing area, eastern margin of Ordos Basin

煤田地质与勘探. 2021, 49(6): 24–34 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.06.003>

荆门探区五峰组龙马溪组页岩储层特征及甜点层段评价

Characteristics of the shale gas reservoirs and evaluation of sweet spots in Wufeng Formation and Longmaxi Formation in Jingmen exploration area

煤田地质与勘探. 2021, 49(6): 1–11 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.06.001>

临兴地区海陆过渡相页岩及页岩气地球化学特征

Geochemical characteristics of marine–continental transitional facies shale and shale gas in Linxing area

煤田地质与勘探. 2021, 49(6): 12–23 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.06.002>

沁水盆地阳泉区块上古生界煤系页岩气储层特征

Characteristics of shale gas reservoir in Upper Paleozoic coal measures in Yangquan Block, Qinshui Basin

煤田地质与勘探. 2021, 49(2): 142–151 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.02.018>



移动阅读

王红岩, 施振生, 赵群, 等. 上扬子地区下寒武统筇竹寺组地层特征及页岩气富集段分布[J]. 煤田地质与勘探, 2025, 53(3): 72–89. doi: 10.12363/issn.1001-1986.24.12.0765
WANG Hongyan, SHI Zhensheng, ZHAO Qun, et al. Stratigraphic characteristics and shale gas enrichment interval distribution of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation, Upper Yangtze region, China[J]. Coal Geology & Exploration, 2025, 53(3): 72–89. doi: 10.12363/issn.1001-1986.24.12.0765

上扬子地区下寒武统筇竹寺组地层特征及页岩气富集段分布

王红岩^{1,2}, 施振生^{2,3,*}, 赵群^{2,3}, 周天琪^{2,3}, 汪鹏飞^{2,3}

(1. 中国石油国家卓越工程师学院, 北京 100096; 2. 国家能源页岩气研发(实验)中心,
北京 100083; 3. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要: 【目的】上扬子地区下寒武统筇竹寺组页岩不仅保留重要的原始沉积海洋信息, 更是重要的烃源岩和储集层, 已展示出巨大的页岩气勘探潜力。【方法】基于地震、钻井和露头资料, 通过系统地层划分和对比, 开展页岩地层和分布, 明确页岩气甜点段。【结果和结论】结果表明: 上扬子地区下寒武统筇竹寺组划分为, 筇一段(筇一 1 至筇一 4 亚段)和筇二段(筇二 1 至筇二 4 亚段)。(2)麦地坪组和筇一段主要发育于德阳—安岳克拉通内裂陷内, 而筇二段在裂陷外亦有广泛分布。裂陷内部地层结构表现为麦地坪组至筇一段东西两侧终止于灯影组灰岩, 西侧厚度变化较缓, 东侧地层快速尖灭; 南北方向上, 筇一段由北向南减薄, 筇二段中部薄而南北厚。裂陷外部则以筇二段全区发育为特征, 其中筇二 1 亚段直接超覆于筇一段或灯影组灰岩之上。(3)筇二 1 亚段页岩具有优越的生烃、储集以及垂向和侧向封堵条件, 为页岩气的富集段。内裂陷北段天星 1 井筇二 1 亚段页岩微孔隙和微裂缝发育, 测井孔隙率为 4.93%~6.57%, 平均 5.08%; 德阳—安岳克拉通内裂陷槽中部的威页 1 井筇竹寺组筇二 1 亚段页岩有机质孔发育, 测井孔隙率为 4.20%~4.70%, 平均 4.51%; 内裂陷南部的云南曲靖地区钻井井位有曲页 1 井、曲地 1 井等, 筇竹寺组黑色页岩孔隙发育, 高压压汞孔隙率为 1.59%~11.33%, 平均 5.0%。(4)相比之下, 尽管筇一段页岩在生烃和储集条件上表现良好, 但其生成的页岩气易侧向沿岩溶带或断层逸散, 不利于原地聚集成藏。如, 内裂陷北段的川深 1 井, 筇一 3 亚段厚约 40 m, 测井 TOC 含量平均 3.5%, 测井孔隙率平均 6.4%, 均为优质烃源岩和储集层, 不利于原位聚集成藏。综上, 筇二 1 亚段页岩因其高孔隙率和良好的封堵条件, 为页岩气勘探的“甜点段”, 为下一步油气勘探提供依据和指导。

关 键 词: 页岩气; 富集段; 地层划分; 筇竹寺组; 下寒武统; 上扬子地区

中图分类号: TE121.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1986(2025)03-0072-18

Stratigraphic characteristics and shale gas enrichment interval distribution of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation, Upper Yangtze region, China

WANG Hongyan^{1,2}, SHI Zhensheng^{2,3,*}, ZHAO Qun^{2,3}, ZHOU Tianqi^{2,3}, WANG Pengfei^{2,3}

(1. PetroChina National Institute of Excellence Engineers, Beijing 100096, China; 2. National Energy Shale Gas Research and Development (Experimental) Center, Beijing 100083, China; 3. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] Shales in the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation within the Upper Yangtze region preserve critical information about primitive oceans. Furthermore, these shales serve as vital source rocks and reservoirs, having

收稿日期: 2024-12-10; 接收日期: 2025-03-04

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司前瞻性基础性战略性技术攻关项目(2024DJ87)

第一作者: 王红岩, 1971 年生, 男, 江苏徐州人, 博士, 教授级高级工程师。E-mail: wanghongyan69@petrochina.com.cn

*通信作者: 施振生, 1976 年生, 男, 安徽枞阳人, 博士, 高级工程师。E-mail: shizs69@petrochina.com.cn

© Editorial Office of *Coal Geology & Exploration*. OA under CC BY-NC-ND

demonstrated considerable potential for shale gas exploration. [Methods] Using seismic, borehole, and outcrop data, this study investigated the shale strata and their distribution in the Qiongzhusi Formation through comparative analysis. Accordingly, the sweet-spot interval was determined. [Results and conclusions] The results indicate that the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in the Upper Yangtze region can be divided into the first and second members (also referred to as the Qiong 1 and 2 members, respectively), with the former consisting of Q1-1 to Q1-4 sub-members and the latter comprising Q2-1 to Q2-4 sub-members. The Maidiping Formation and the Qiong 1 Member predominantly occur within the Deyang-Anyue intracratonic rift, while the Qiong 2 Member is extensively distributed both inside and outside the rift. Within the rift, the west and east sides of the Maidiping Formation - Qiong 1 Member terminates at the limestone of the Dengying Formation, with the west side gradually thinning while the east side pinching out rapidly. In the north-south direction, the Qiong 1 Member thins southward, while the Qiong 2 Member is thin in the central part but thick in the northern and southern parts. Outside the rift, the Qiong 2 Member is distributed throughout the region, with the Q2-1 sub-member directly overlapping either the Qiong 1 Member or the limestone of the Dengying Formation. Shales in the Q2-1 sub-member enjoy superior hydrocarbon generation and reservoir conditions, as well as vertical/lateral sealing performance, emerging as a shale gas enrichment interval. For instance, in the northern part of the intracratonic rift, shales in the Q2-1 sub-member in well Tianxing-1 contain well-developed micropores and microfractures, with logging-derived porosity ranging from 4.93% to 6.57% (average: 5.08%). In the central part of the Deyang-Anyue intracratonic rift trough, shales in the Q2-1 sub-member in well Weiye-1 well exhibit organic matter-hosted pores, with logging-derived porosity ranging from 4.20% to 4.70% (average: 4.51%). In the Qujing area, Yunnan Province, within the southern part of the rift, black shales in the Qiongzhusi Formation in wells Qudi-1 and Quye-1 reveal well-developed black shales with high-pressure mercury injection-derived porosity spanning 1.59% to 11.33% (average: 5.0%). Although shales in the Qiong 1 Member exhibit favorable source-reservoir properties, the shale gas generated is prone to escape along karst zones or faults, un conducive to in-situ accumulation. For instance, in the northern part of the intracratonic rift, the Q1-3 submember in well Chuanshen-1 exhibits a thickness of about 40 m, logging-derived average TOC of 3.5%, and logging-derived porosity of 6.4%, suggesting high-quality source rocks and reservoirs but unfavorable conditions for in-situ accumulation. Overall, shales in the Q2-1 sub-member are identified as a sweet-spot interval for shale gas exploration due to their high porosity and great sealing performance. This study can serve as a critical basis and guide for future shale gas exploration in the Upper Yangtze region.

Keywords: shale gas; enrichment interval; stratigraphic subdivision; Qiongzhusi Formation; Lower Cambrian; Upper Yangtze region

寒武纪是地球演化历史的重要转折期,经历了从新元古代的冰期事件过渡到古生代的暖球事件^[1],气候、古海洋环境和生物演化都发生了剧烈变化^[2-4]。寒武系黑色页岩全球分布广泛,包括上扬子地区的筇竹寺组(牛蹄塘组)页岩^[5-6]、塔里木盆地的玉尔吐斯组页岩^[7-8]、鄂尔多斯盆地的寒武系页岩^[9]、阿曼盆地寒武系黑色页岩^[10]、东西伯利亚盆地寒武系黑色页岩等^[11]。针对这些页岩的古生物学特征^[12-13]、地层年代学^[14]、元素地球化学^[15]、沉积环境恢复^[16]、黑色页岩形成演化^[17-18]、黑色页岩孔隙结构特征等^[19],前人开展了大量研究,有效指导了页岩气的勘探开发。

上扬子地区下寒武统筇竹寺组页岩在四川、滇东、渝东、鄂西、贵州和湘西等地区广泛分布,岩性以黑色页岩、含磷黑色页岩、硅质页岩为主。上扬子地区下寒武统筇竹寺组页岩厚约130~550 m^[20],其不仅保留有重要的原始海洋信息,而且是重要的烃源层^[21-23]和页岩气储集层。作为烃源岩,筇竹寺组黑色页岩为德阳—安岳克拉通裂陷内灯二段规模性垒控丘滩体、灯四段规模岩溶储集层及裂陷边缘沧浪铺组规模颗粒滩储集

层提供了大量气源,并形成了安岳特大型气田^[24]。截至2020年底,安岳大气田探明天然气地质储量超过1万亿m³,天然气年生产能力约170亿m³,资源潜力巨大^[21,25]。作为储集层,筇竹寺组页岩气资源量可达8.86万亿m³^[26-27],已钻评价井有威201井、威207井、威201-H3井、威页1H井、资201井、金石1井、金页1HF井和金石103HF井,其中,资201井获得测试产量73.88万m³/d,金石103HF井获得测试产量25.86万m³/d,展示出巨大的页岩气勘探潜力。

上扬子地区筇竹寺组发育台地相、斜坡相和盆地相页岩^[5],德阳—安岳克拉通内裂陷控制着台地相黑色页岩的厚度及TOC含量分布^[28-30]。上扬子地区筇竹寺组发育时期,水体整体处于静止、分层的状态,底层水体还原性较强^[31-32],由早到晚水体还原性存在着由强变弱再变强、水体由深变浅再变深的过程^[33],高初级生产力和强还原条件造成有机质富集^[32-33]。筇竹寺组黑色页岩发育有机孔、无机孔和微裂缝3种孔隙类型^[34-37],三者构成的孔隙系统发育段是下一步页岩气勘探的重点关注时段^[36]。

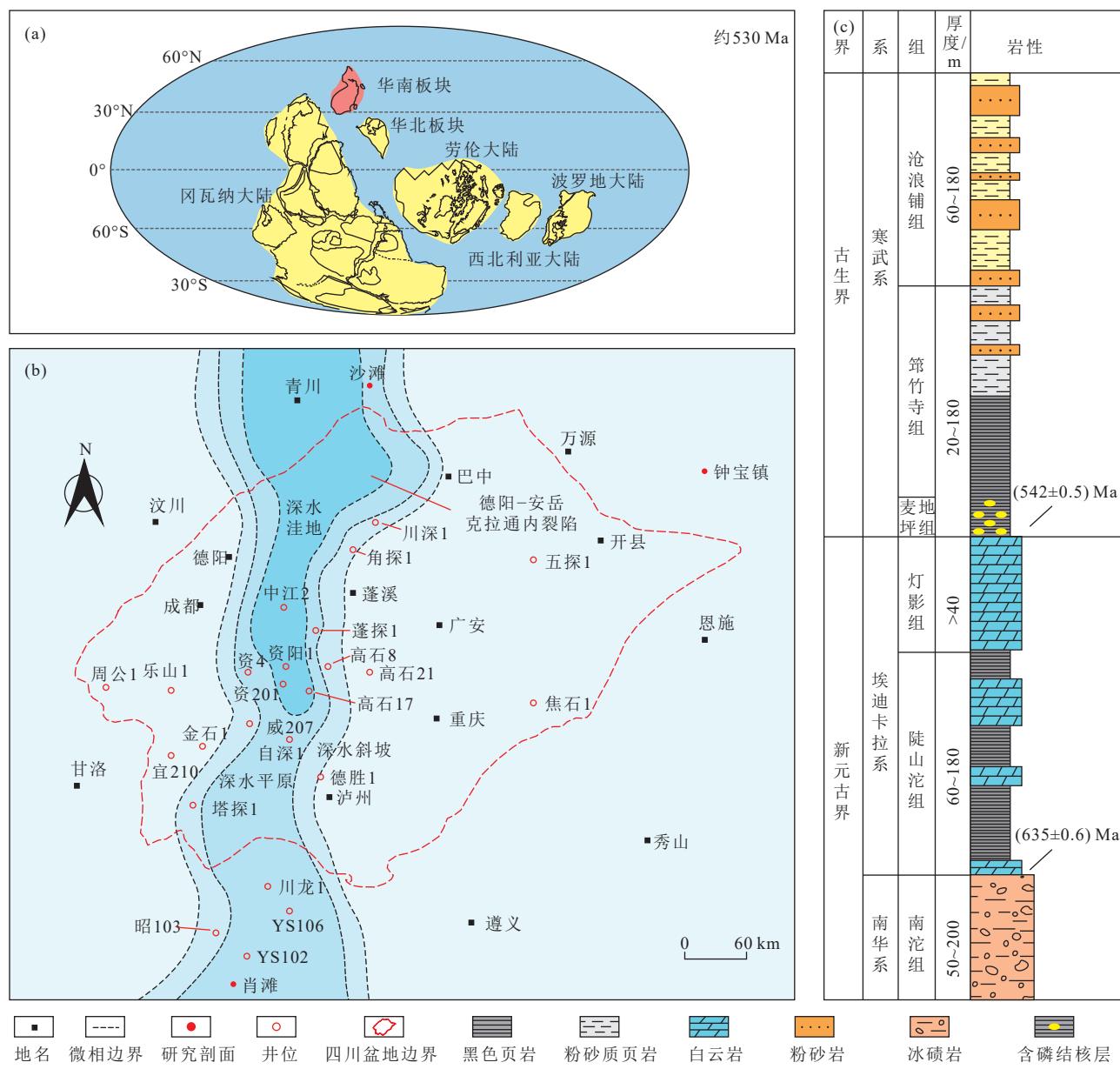
然而,上扬子地区筇竹寺组黑色页岩研究仍存在着地层结构不清楚、不同地层单元平面分布规律不明确、页岩气富集层段不确定等问题,严重限制了该区页岩气勘探开发。笔者综合利用已有的钻井和露头资料,通过页岩地层精细划分、平面成图及成藏要素匹配关系分析,明确了上扬子地区筇竹寺组的地层结构、分布规律及页岩气富集段位置,以期能更有效地指导该区页岩气勘探开发。

1 地质背景

上扬子地区发育太古宙和早元古界基底^[38],基底之上覆盖震旦纪至中三叠世的海相碳酸盐岩和晚三叠

世至始新世的陆相碎屑岩。新元古代(约 800 Ma)罗迪尼亞超大陆的裂解与聚合,引起扬子板块和华夏板块碰撞,并在埃迪卡拉纪(震旦纪)末期形成华南克拉通盆地^[39]。古地磁数据证实,埃迪卡拉纪晚期—早寒武世,华南克拉通盆地处于北半球的中—低纬度位置,被北半球的泛大洋包围(图 1a)^[40]。寒武纪初期,扬子板块东南缘整体处于被动大陆边缘构造背景,从 NW 向的扬子台地到东南缘的裂谷盆地,依次发育台地、斜坡、盆地 3 种沉积相^[5]。

震旦系灯影组—寒武系龙王庙组沉积时期,上扬子地区发育德阳—安岳克拉通内裂陷(图 1b)^[21],裂陷两侧发育边界断层。裂陷西侧地形相对较缓,发育多个地形



(a) 早寒武世华南板块位置^[40]; (b) 上扬子地区早寒武世古地貌及研究点分布; (c) 上扬子地区前寒武纪—寒武纪地层综合柱状图

图 1 上扬子地区地质及沉积概况
Fig.1 Geological and sedimentary overview of the Upper Yangtze region

坡折带,东侧地形较陡。由北向南,德阳-安岳克拉通内裂陷可分为北段和南段,北段具有“窄、陡、深”、南段具有“宽、缓、浅”的特点^[41-42]。德阳-安岳克拉通内裂陷形成演化分为形成期(灯影组一段至二段沉积期)、发展期(灯影组三段至四段沉积期)、充填期(寒武系麦地坪组至筇竹寺组沉积期)和消亡期(寒武系沧浪铺组至龙王庙组沉积期)4个阶段^[21]。裂陷控制着内部及周边地层的沉积、天然气储集层的形成和成藏^[43-44]。

上扬子地区下寒武统发育麦地坪组和筇竹寺组(图1c)。其中,麦地坪组主要发育白云岩、含磷结核白云岩及页岩,筇竹寺组主要发育富有机质页岩和粉砂岩^[24]。麦地坪组和筇竹寺组分布广泛,厚度差异大,地层命名也不同(表1)。其中,川中地区称为麦地坪组和筇竹寺组、川东北地区称为宽川铺组和郭家坝组、川东南称为桃子冲组和牛蹄塘组、川南地区称为九老洞组,盆地之外主要有滇东地区的朱家箐组和石岩头组、渝东和鄂西地区的水井沱组、黔南地区的九门冲组、黔中和黔北地区的牛蹄塘组、黔东南地区的渣拉沟组以及湘西北地区的水井沱组等。受沉积相和构造变化的影响,不同地区岩性明显差异^[5]。

2 研究资料和方法

本文研究重点是上扬子地区下寒武统筇竹寺组的

地层划分、地层结构及展布、页岩气富集段分布。研究资料包括沙滩剖面、肖滩剖面和钟宝镇剖面、68口评价井及6条全区二维地震测线。共分析XRD全岩数据55样次、孔隙率和渗透率测试数据共28样次、TOC含量测试数据共145样次、大薄片成像数据8样次及氯离子抛光扫描电镜分析8样次。

通过单剖面地层划分、多剖面连井地层对比、过井地震剖面关键层位确定和追踪和地层等厚图编制,确定研究区筇竹寺组地层划分方案。步骤如下:(1)选取5口标准井(标准井的选取标准是筇竹寺组发育完整,测井资料、录井资料和岩心资料相对齐全,有系统的古生物学研究资料等),系统开展不整合面确定、岩相/岩相突变识别,测井相划分、矿物组成分析和古生物组合研究,识别关键地层界面,初步确立单井地层划分方案。(2)结合研究区地质背景,开展过标准井的连井地层划分和对比,分析各地层单元的地层厚度变化、关键地层界面横向演化特征及全区闭合情况,校正单井地层划分方案,并初步确定地层结构。(3)选取多条过标准井的二维或三维地震剖面,开展地震合成记录标定、关键地层界面地震识别及追踪、地震终止关系(上超、下超、削截、顶超等)解释等,最终确定地层结构。(4)以研究区露头和评价井资料为依据,分别统计各地层单元的厚度,并编制各单元地层等厚图。

表1 上扬子地区下寒武统相关的地层划分方案^[5]
Table 1 Stratigraphic subdivision scheme for the Lower Cambrian in the Upper Yangtze region^[5]

地层	四川			贵州			重庆		云南	湖北	湖南				
	川中	川东北	川东南	黔中/黔西	黔东北	黔东南	渝东北	其他	滇东	鄂西	湘西北	其他			
下寒武统	龙王庙阶	龙王庙组	孔明洞组	清虚洞组		清虚洞组	都柳江组	石龙洞组	清虚洞组	龙王庙级	石龙洞组				
											清虚洞组				
	沧浪铺阶	沧浪铺组	阎王碥组	金顶山组		耙榔组		天河板组	金顶山组	天河板组	天河板组				
			仙女洞组	明心寺组		变马冲组		石牌组	明心寺组		耙榔组				
											石牌组				
筇竹寺阶	筇竹寺组	郭家坝组	牛蹄塘组		九门冲组	渣拉沟组	玉案山组	水井沱组	牛蹄塘组	水井沱组	木昌组	水井沱组			
梅树村阶	麦地坪组	宽川铺组	缺失	桃子冲组	留茶坡组					朱家箐组	岩家河组				
埃迪卡拉系															

3 页岩地层特征及展布

3.1 页岩地层划分

地震、露头和钻井资料综合分析表明,上扬子地区麦地坪组—筇竹寺组页岩可划分为2个二级层序和5

个三级层序(图2)。S-1对应于麦地坪组,S-2对应于筇竹寺组。2个二级层序均可划分出海进体系域(TST)和高位体系域(HST)。其中,二级层序S-2的海进体系域对应于筇一段,高位体系域对应于筇二段。筇一段进一步划分出2个三级层序Sqq1和Sqq2,筇二段细分为三

级层序 Sqq3 和 Sqq4。

上扬子地区麦地坪组和筇竹寺组岩性、电性和古生物组合等存在明显差异(图 2)。麦地坪组建剖面峨眉高桥张沟至高坡剖面厚度 38.42 m, 盆内覆盖区厚度为数米至 196.5 m 不等^[24], 局部剥蚀殆尽。其底界面为整合面或平行不整合面(表 2), 地震剖面上为强振幅、高连续波峰反射(图 3)。岩性主要为白云岩、硅质条带白云岩夹胶磷矿砂砾屑生物碎屑白云岩或胶磷矿砂砾屑白云岩等^[24]。自下而上产小壳动物化石 *Anabarites trisulcatus-Protohertzina anabarica* 带、*Siphogonuchites pusilliformis-Paragloborilus subglobosus* 带和 *Heraultipegma yunnanensis* 带, 指示时代为早寒武世梅树村期。

锆石 U-Pb 同位素年龄显示, 麦地坪组及相当地层年龄为 (539.3 ± 2.9) Ma 至 (525.1 ± 1.9) Ma^[45]。此外, 麦地坪组底部存在一个负漂移事件, 此事件应与全球寒武系底部的 BACE 相当。

筇竹寺组厚 18.2 m(周公 1 井)至 684.3 m(中江 2 井), 岩性主要由黑色页岩、粉砂质泥岩、粉砂岩及少量灰岩组成。底界面为平行不整合面, 地震剖面为强振幅、高连续波峰反射(图 3), 界面之下为震旦系灯影组白云岩或麦地坪组白云岩; 顶界面为整合面, 地震反射特征不明显(图 3), 但界面上下岩性、岩相发生突变。筇竹寺组对应 *Lapworthella-Tannuolina-Sinoscachites* 组合、*Parabadiella-Mianxiandiscus* 组合和 *Eoredlichia-*

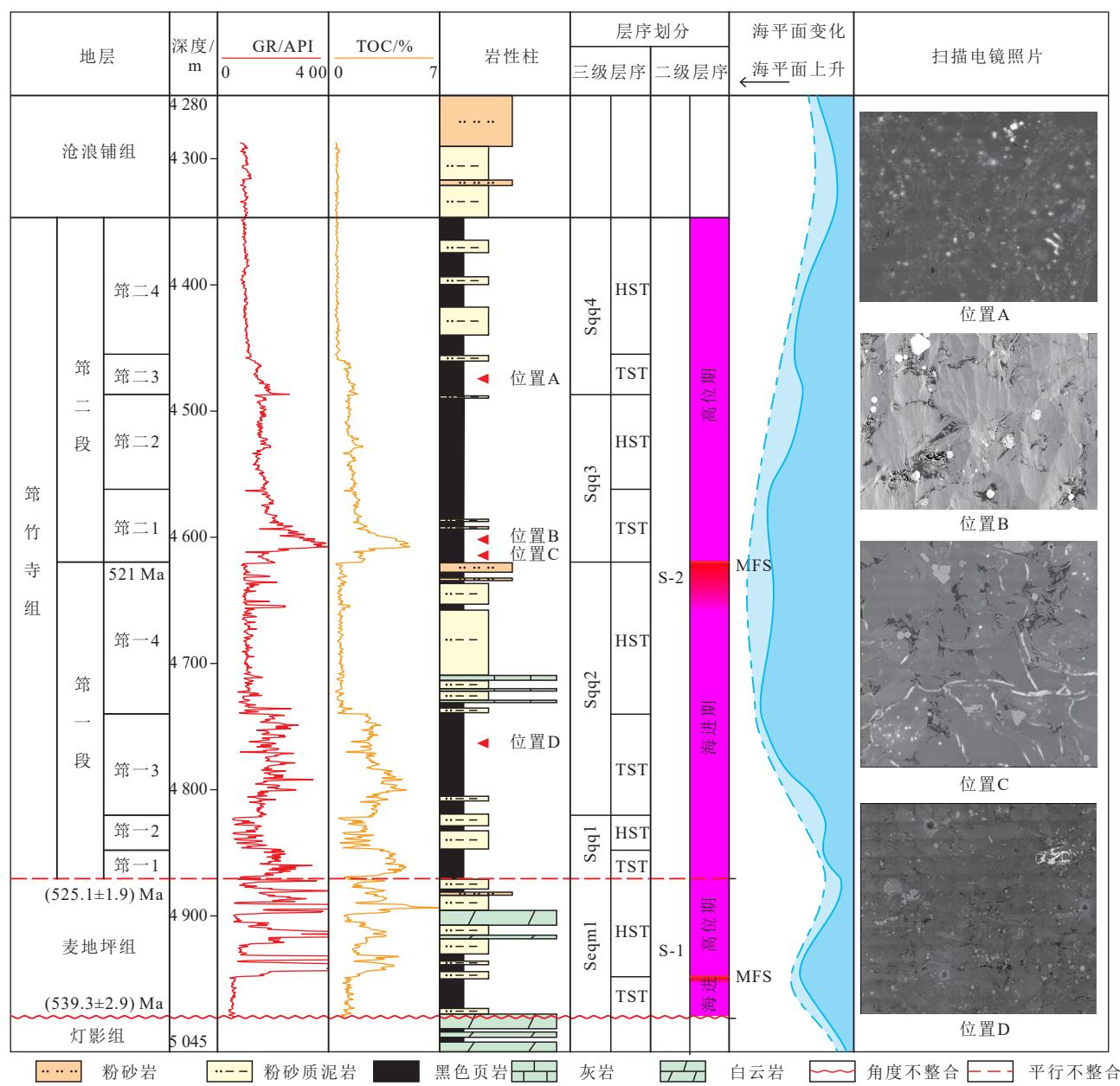


图 2 上扬子地区下寒武统麦地坪组—筇竹寺组地层综合柱状图

Fig.2 Composite stratigraphic column of the Lower Cambrian Maidiping and Qiongzhusi formations, Upper Yangtze region

表2 上扬子地区下寒武统麦地坪组—筇竹寺组地层划分及特征

Table 2 Stratigraphic subdivision and characteristics of the Lower Cambrian Maidiping and Qiongzhusi formations, Upper Yangtze region

地层	岩性特征	电性特征	沉积相	生物组合
沧浪铺组	深灰色薄层页岩及粉砂质泥岩、泥质粉砂岩互层	自然伽马和声波均呈低值锯齿状, 电阻率振荡增大	潮坪相	
筇竹寺组	筇二4 浅灰色粉砂质泥岩、泥质粉砂岩互层	箱状低自然伽马和声波, 电阻率较大、平直状	浅水陆棚	<i>Parabadiella</i> - <i>Mianxiandiscus</i> - <i>Eoredlichia</i> - <i>Wutingaspis</i>
	筇二3 灰色泥岩、粉砂质泥岩	漏斗状低自然伽马和声波, 电阻率较大、平直状	浅水陆棚	
	筇二2 浅灰色页岩, 夹有少量粉砂岩	漏斗状中自然伽马, 中声波, 平直状中高电阻率	深水陆棚	
	筇二1 黑色、深灰色页岩、炭质页岩, 夹有少量粉砂岩	指状中高自然伽马, 高声波, 平直状中高电阻率	深水陆棚	
麦地坪组	筇一4 深灰色泥质砂岩、粉砂岩, 夹少量灰岩及泥岩	箱形低自然伽马和声波, 电阻率较大、平直状	浅水陆棚	<i>Lapworthella</i> - <i>Tannuolina</i> - <i>Sinosachites</i>
	筇一3 黑色炭质页岩	中高自然伽马、高声波, 中低电阻率	深水陆棚	
	筇一2 灰黑色粉砂质页岩与泥岩互层	箱形低自然伽马和声波, 齿状低电阻	浅水陆棚	
	筇一1 黑色炭质页岩、粉砂质页岩	中高自然伽马和声波, 中高指状电阻率	深水陆棚	
麦地坪组	硅质页岩、白云岩、磷块岩等	自然伽马值高低相间、中高电阻	深水坳拉槽	<i>Anabarites trisulcatus</i> - <i>Protohertzina anabarica</i> 带、 <i>Siphogonuchites pusilliformis</i> - <i>Paragloborilus subglobosus</i> 带、 <i>Heraultipegma yunnanensis</i> 带
灯影组	白云岩	低伽马、高电阻	碳酸盐岩台地相	

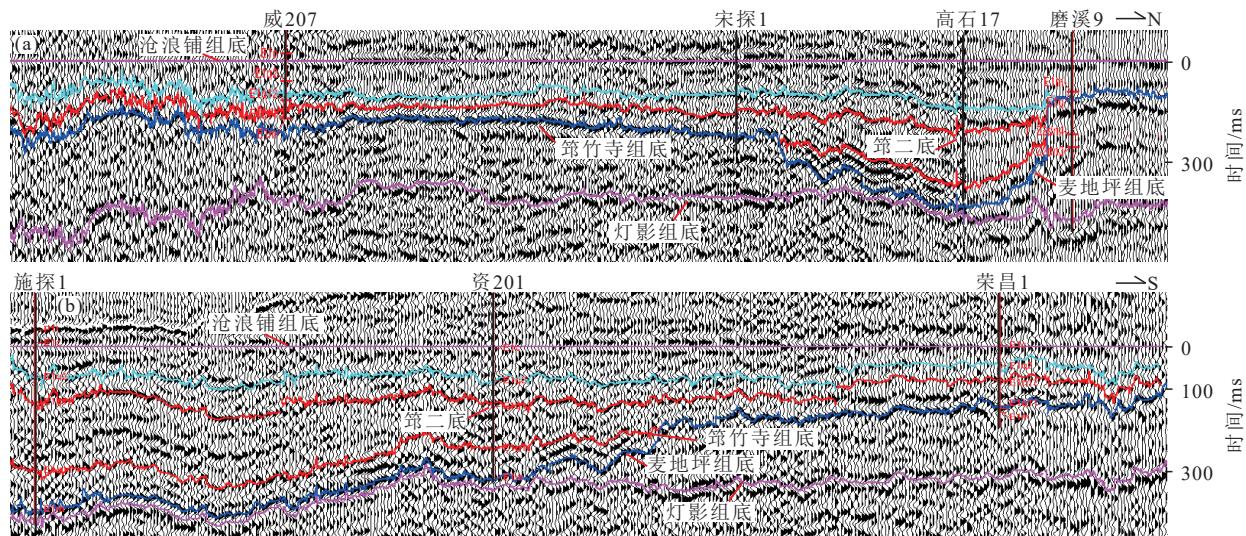


图3 上扬子地区下寒武统麦地坪组—筇竹寺组二维地震剖面

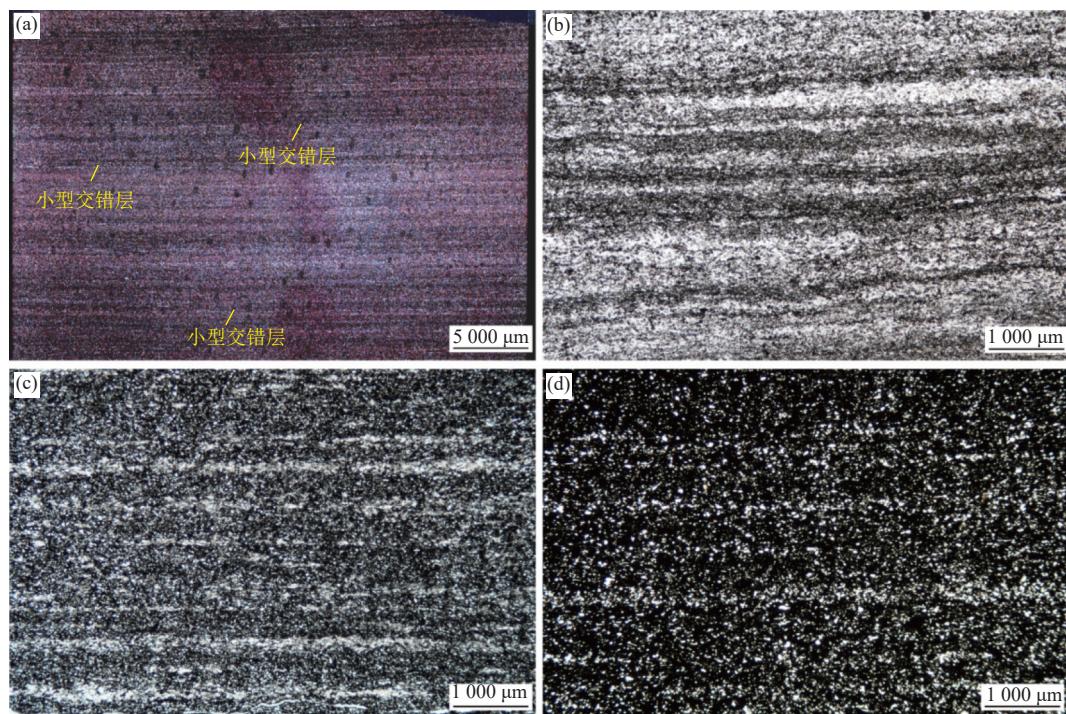
Fig.3 2D seismic profiles of the Lower Cambrian Maidiping and Qiongzhusi formations, Upper Yangtze region

Wutingaspis 组合, 底部年龄有 (528.3 ± 2.0) Ma^[45]、 (522.7 ± 4.9) Ma^[46] 和 (532.3 ± 0.7) Ma^[15] 等。

根据地震、岩性、矿物组成及电性特征, 筇竹寺组可划分为第一段和第二段, 筇二段底界面为中振幅、中连续波峰反射(图3)。第一段进一步细分为第一1、第一2、第一3和第一4四个亚段, 筇二段进一步细分为筇二1、筇二2、筇二3和筇二4四个亚段(图2)。筇一段的第一1亚段和第一3亚段主要为深灰、灰黑色

页岩^[47], 第一2亚段和第一4亚段主要为深灰色砂质页岩和灰色粉砂岩, 内部可见椭圆形钙质结核。筇二段整体上以泥质粉砂岩和粉砂岩沉积为主, 岩心上可见大量生物碎屑。上扬子地区筇竹寺组筇二2亚段和筇二4亚段发育板状交错层理(图4a)和波状交错层理(图4b), 反映了流动的水流环境^[48-49]; 而筇一段以书页状水平层理为主(图4c—图4d), 表明以静水沉降为主^[50-52]。

上扬子地区麦地坪组—筇竹寺组矿物组分均以石



(a) 小型交错层理, 3 018.84 m, 第二 2 亚段; (b) 波状交错层理, 3 056.54 m, 第二 1 亚段; (c) 书页状水平层理, 3 146.60 m, 第一 4 亚段; (d) 书页状水平层理, 3 236.23 m, 第一 1 亚段

图 4 大薄片照片展示上扬子地区威 207 井下寒武统麦地坪组—筇竹寺组不同层段页岩沉积构造特征

Fig.4 Photomicrographs of large thin sections showing the sedimentary texture characteristics of shales in the Lower Cambrian Maidiping and Qiongzhusi formations in well Wei 207 in the Upper Yangtze region

英质量分数(平均 40.6%)、黏土矿物(平均 22.3%)和长石(平均 20.5%)为主, 碳酸盐岩矿物(11.1%)和黄铁矿(5.2%)含量相对较低。麦地坪组和第一 1 亚段以高硅质含量(>55%)和低黏土矿物含量(<10%)为特征, 并富含黄铁矿和菱铁矿(>5%)(表 3)。第一 2 亚段和第一 3

亚段黏土矿物含量和硅质含量接近(约 32%), 黄铁矿含量相对较高。第一 4 和第二 1 亚段以高长石含量为特征(>26%), 黏土矿物含量相对较低(<25%)。第二 2 亚段和沧浪铺组表现出黏土矿物含量(>30%)明显增大、长石含量(<15%)明显降低的特征。

表 3 上扬子地区下寒武统麦地坪组—筇竹寺组不同层段页岩矿物组成

Table 3 Mineral compositions of shales in different intervals of the Lower Cambrian Maidiping and Qiongzhusi formations, Upper Yangtze region

层位	黏土总量	石英	正长石	斜长石	方解石	白云石	黄铁矿	菱铁矿	%
沧浪铺组	37.2	39.3	0	7.8	15.8	1.5	1.5	0	
第二 4	35.4	38.1	0.9	9.1	14.0	2.4	2.5	0	
第二 3	35.8	31.8	1.4	11.4	8.7	7.2	3.7	0	
第二 2	21.3	45.6	2.4	21.1	3.5	4.3	1.8	0	
第二 1	23.6	38.4	3.7	23.3	3.1	3.8	4.2	0	
第一 4	15.6	39.6	4.5	25.5	9.8	3.4	1.8	0	
第一 3	25.9	34.3	4.7	12.3	3.7	9.7	9.4	0	
第一 2	33.0	33.5	3.5	18.0	9.5	0.0	2.5	0	
第一 1	5.5	68.1	0.9	3.2	6.4	2.3	6.6	7	
麦地坪组	11.4	56.2	0	5.7	1.2	5.4	11.1	9.15	

3.2 页岩地层结构

上扬子地区麦地坪组和筇竹寺组页岩地层结构受德阳—安岳克拉通内裂陷控制。麦地坪组至第一段仅发育于德阳—安岳克拉通内裂陷之内, 两侧围岩是灯

影组灰岩; 第二段超覆于第一段和灯影组之上, 全区均有分布。内裂陷西侧, 麦地坪组至第一段厚度变化相对较缓, 存在 2 大厚度突变带; 内裂陷东侧, 厚度快速尖灭, 存在 1 大厚度突变带。以过周公 1—高石 21 井连井地

层对比剖面为例,麦地坪组至第一段仅发育于内裂陷之内,两侧围岩是灯影组灰岩,第二段全剖面均有分布。第一段发育区,第二段整合上覆于第一段;第一段缺失区,第二段平行不整合上覆于灯影组灰岩之上(图5)。内裂陷西侧,只有高石17井和资4井发育麦地坪组、第一1亚段和第一2亚段,向西截止于灯影组灰岩。乐山1井也有发育有第一3亚段和第一4亚段,向西截止

于灯影组灰岩,地形坡折带分别位于乐山1井与资4井之间及周公1井与乐山1井之间。地震剖面上,内裂陷西侧表现为缓慢上超的特点(图3a)。内裂陷东侧,麦地坪组至第一段由高石17井向东快速变薄并截止于灯影组灰岩。地震剖面上,内裂陷东侧也表现为快速上超的特点,并截止于灯影组灰岩(图3a)。

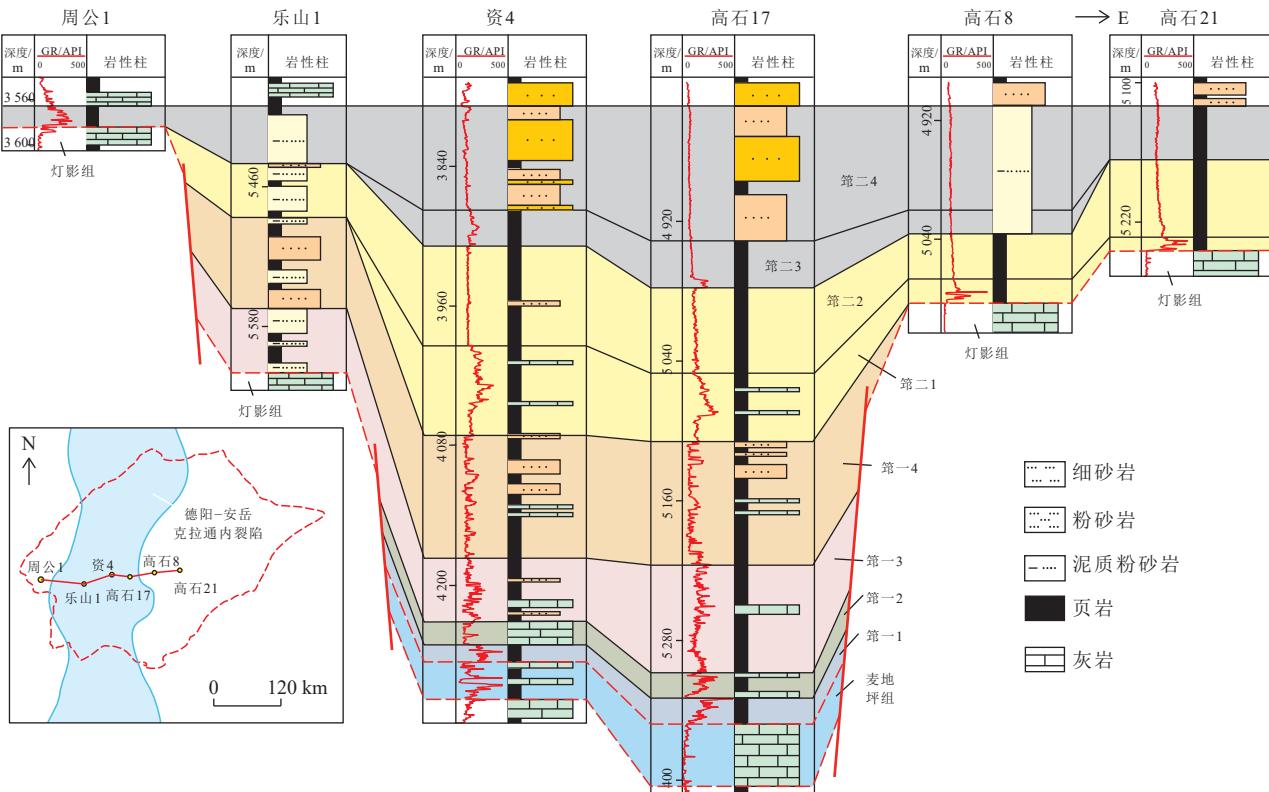


图5 上扬子地区垂直裂陷方向下寒武统麦地坪组—筇竹寺组连井地层对比剖面

Fig.5 Well-correlation section of the Lower Cambrian Maidiping and Qiongzhusi formations perpendicular to the rift direction in the Upper Yangtze region

上扬子地区德阳—安岳克拉通内裂陷内部,麦地坪组和筇竹寺组发育完整,第一段由北向南减薄,突然减薄带位于自深1至塔探1井之间,第二段是中部薄南北厚。以过YS102井—中江2井连井地层剖面为例(图6),南部的YS102井和YS106井麦地坪组厚60~70 m,北部的中江2井和资阳1井厚45~60 m,而中部的自深1井厚度不足45 m。第一段所有井均有发育,北部的中江1井厚372 m、资阳1井厚313 m、自深1井厚203.5 m,而塔探1井仅厚115 m、YS106井厚132 m、YS102井仅102 m,地层由北向南减薄。第二段,北部的中江1井厚311.5 m、资阳1井厚292 m,南部的YS102井厚322 m、YS106井厚251.5 m,而中部的自深1井厚237.5 m、塔探1井厚243.6 m,地层厚度是南北厚、中间薄。地震剖面上,麦地坪组和筇竹寺组由北向南表现出明显的逐渐上超现象(图3b)。

3.3 页岩平面分布

上扬子地区麦地坪组和筇竹寺组地层的平面分布也受德阳—安岳克拉通内裂陷控制,沉积中心位于裂陷分布区。平面上,麦地坪组呈南北向顺裂陷分布(图7a),西部边界位于成都—乐山1井—宜210井一线以东,东部边界位于巴中—川深1井一线以西,地层厚度0~67 m。麦地坪组存在4个沉积中心,北部沉积中心位于剑阁附近,厚度大于60 m,南部沉积中心位于YS102井区附近,厚度大于65 m,中部2个沉积中心位于资201井和塔探1井附近,厚度均大于42 m。筇竹寺组在研究区大部分地区均有分布,厚度为100~600 m,沉积中心呈南北向顺内裂陷分布(图7b)。筇竹寺组沉积中心厚度均大于400 m,厚度最大值位于北部的剑阁地区,由南向北逐渐增厚。

上扬子地区筇竹寺组由下至上分布范围逐渐扩大。

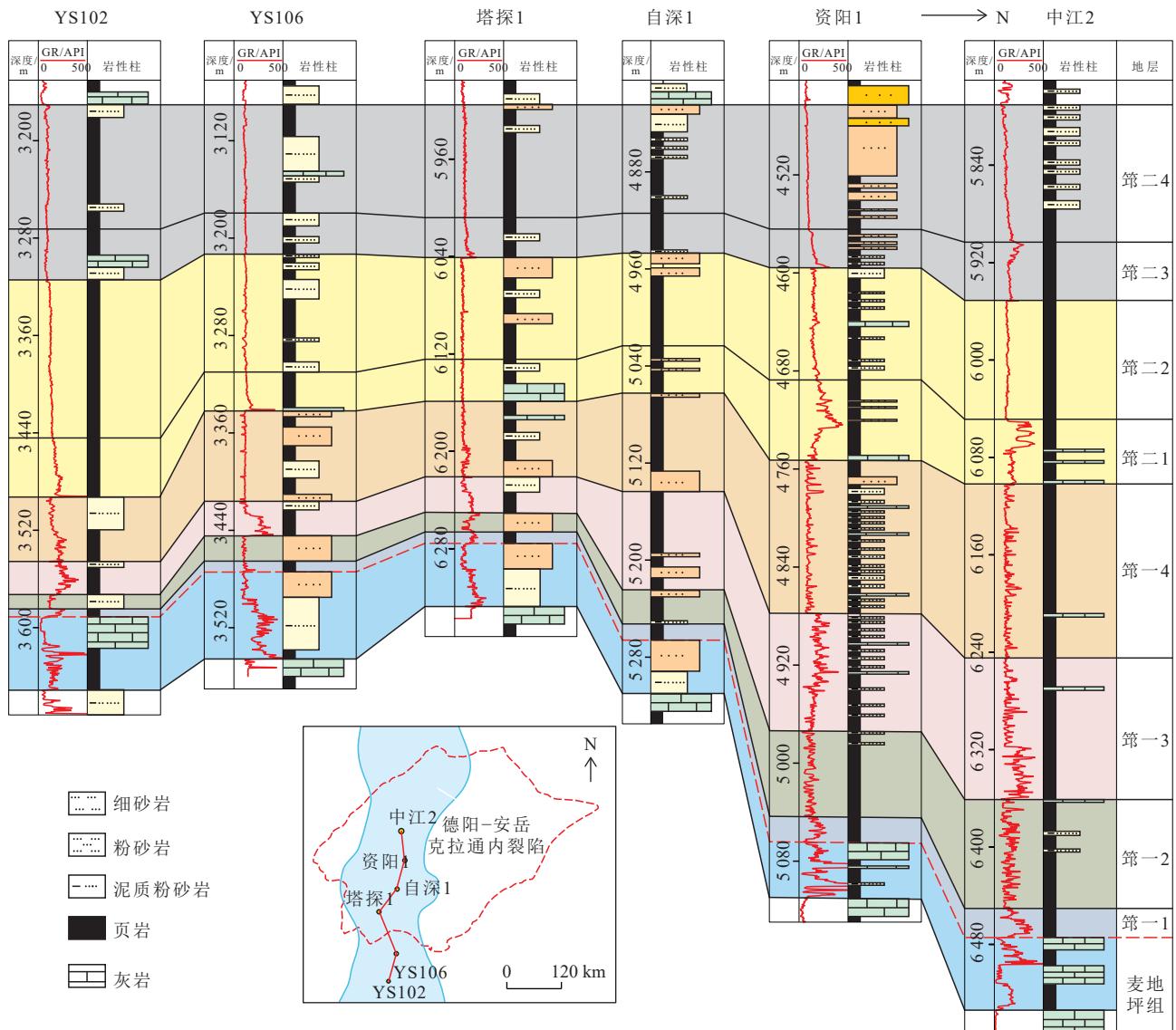


图 6 上扬子地区平行裂陷方向下寒武统麦地坪组—筇竹寺组地层展布

Fig.6 Stratigraphic distribution of the Lower Cambrian Maidiping and Qiongzhusi formations parallel to the rift direction in the Upper Yangtze region

筇竹寺组第一亚段，西部边界在绵阳—威 207 井—宜 210 井一线以东，东部边界在强 1 井—磨溪 116 井—阳 1 井一线以西，地层厚度小于 25 m(图 8a)。第二 2 亚段、第一 3 亚段和第一 4 亚段的西部和东部边界逐渐扩大，地层厚度分别为 0~47 m、0~116 m 及 0~245 m，但分布范围仍局限于内裂陷分布区(图 8b—图 8d)。第二 1 亚段+第二 2 亚段和第二 3 亚段+第二 4 亚段不仅内裂陷分布区发育，盆地其他地区地层也普遍发育，厚度分别为 0~143 m 和 0~127 m(图 8e—图 8f)。第一段沉积中心位于裂陷北部，厚度由北向南减薄，厚度突变带位于资 201 井附近，第二段北部和南部各发育 1 个沉积中心。

4 页岩气富集段分布

上扬子地区筇竹寺组页岩的地层结构和储层特征

控制着页岩气富集段分布。第二 1 亚段页岩具有良好生烃和储集条件及垂向和侧向封盖条件，是页岩气的富集段。第一段生成的页岩气易侧向逸散，不利于原地聚集成藏。

4.1 第二 1 亚段，良好的生烃条件和储集条件

有机碳含量(TOC)是评价烃源岩的重要指标。上扬子地区德阳—安岳克拉通内裂陷分布区的第二 1 亚段页岩有机碳含量整体较高，由内裂陷西北缘沙滩剖面^[53]，第二 1 的黑色页岩 TOC 值为 2.75%~4.90%，平均为 3.86%(样品数为 15)，厚度约为 51 m(图 9)，为优质烃源岩。而上部灰岩和粉砂质页岩的 TOC 值逐渐降低(平均值为 1.02%，样品数为 16)，厚度超过 106 m，烃源岩质量一般。威 201 井、威 207 井和德胜 1 井第二 1 亚段黑色页岩的厚度分别为 61、44 和 56 m。威 201 井钻

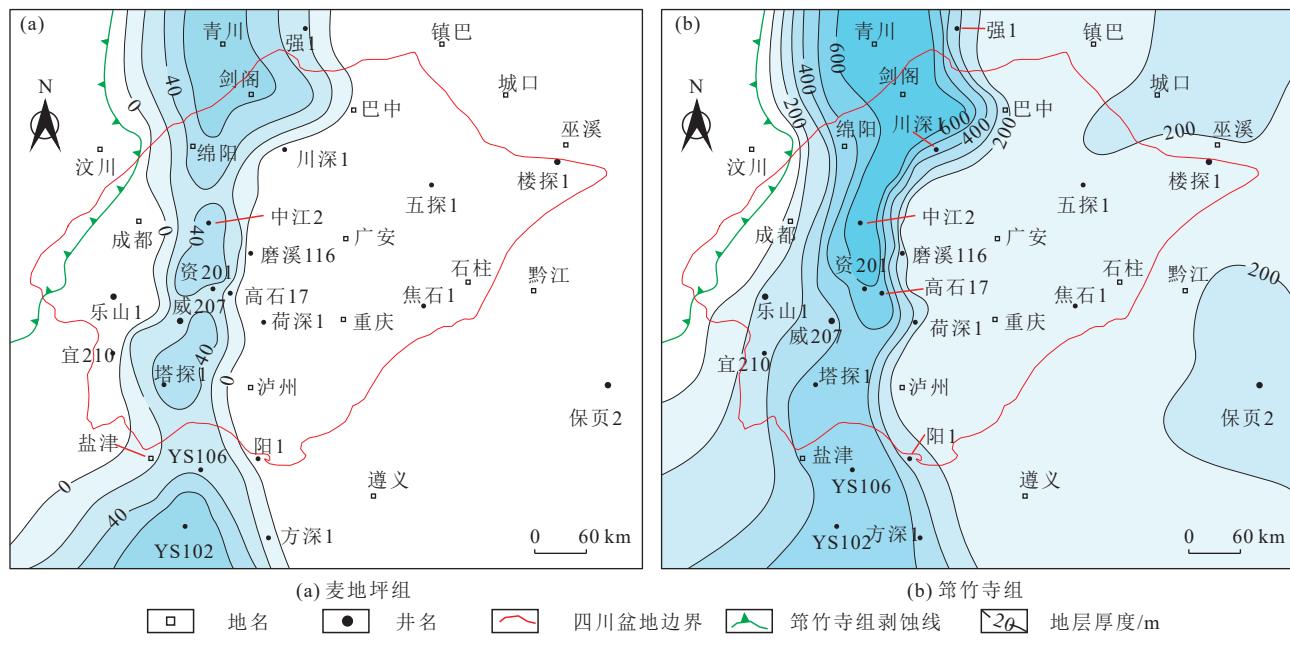
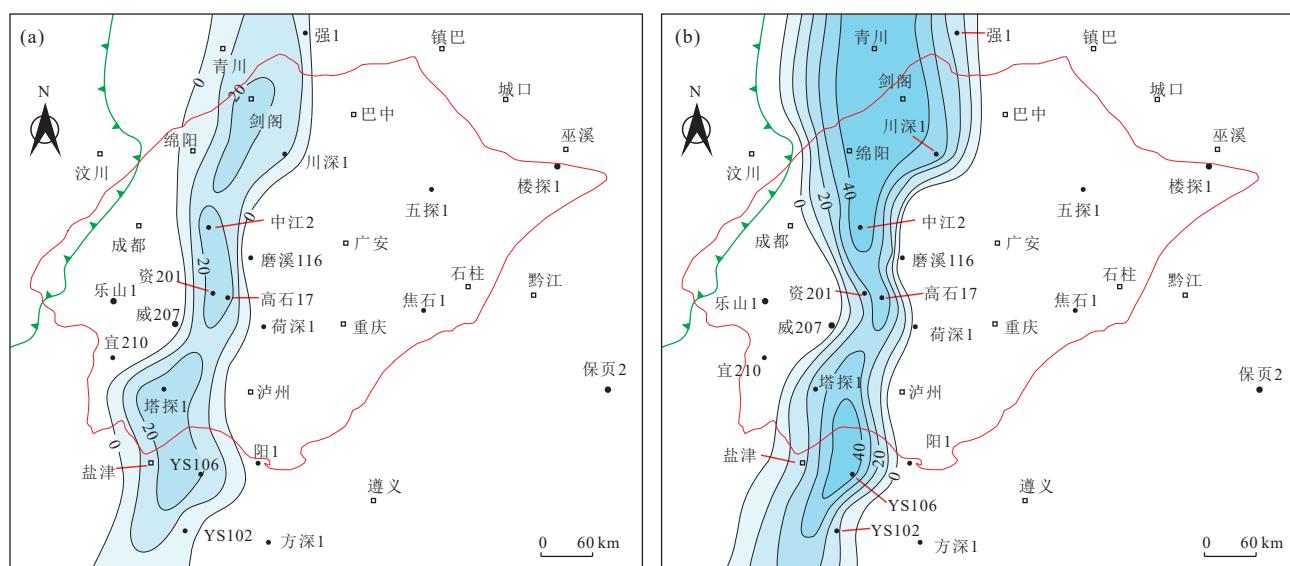


Fig.7 Isopach maps of the Lower Cambrian (a) Maidiping and (b) Qiongzhusi formations parallel to the rift direction in the Upper Yangtze region

孔富有机质黑色页岩 TOC 为 2.74%~4.03%(样品数为 46), 平均为 3.25%; 威 207 井页岩 TOC 值为 2.21%~4.71%(样品数为 21), 平均为 3.89%; 德胜 1 井页岩 TOC 值为 2.17%~3.19%(样品数为 18), 平均为 2.86%, 裂陷中部烃源岩品质较好。昭 103 井和肖滩剖面第二 1 亚段黑色页岩厚度分别约为 56 m 和 23 m。昭 103 井页岩 TOC 为 1.74%~2.23%(样品数为 13), 平均为 2.21%。肖滩剖面页岩 TOC 为 1.74%~6.03%(样品数为 17), 平均为 3.85%。金石 103 井第二 1 亚段页岩的 TOC 为 0.17%~0.35%(样品数为 20), 平均为 0.21%, 烃源岩品质差。下寒武统筇竹寺组烃源岩的显微组分以腐泥组为主(占 95% 以上), 有机质为无定形, 扫描电镜

下表现为絮状体, 干酪根碳同位素值普遍较轻。微体古生物是寒武纪重要的生物组成部分, 生烃母质优, 主要为藻体(底栖藻类)和多细胞藻类^[5]。

第二 1 亚段页岩孔隙发育, 孔隙率高, 为优质储集层。内裂陷北段天星 1 井第二 1 亚段页岩微孔隙和微裂缝发育, 测井孔隙率为 4.93%~6.57%, 平均为 5.08%, 孔隙率高。德阳—安岳克拉通内裂陷槽中部的威页 1 井筇竹寺组第二 1 亚段页岩有机质孔发育(图 10), 有机孔、无机孔和微裂缝相互连通构成三级孔隙网络^[36]。威页 1 井测井孔隙率为 4.20%~4.70%, 平均 4.51%。内裂陷南部的云南曲靖地区钻井井位有曲页 1 井、曲地 1 井、曲地 6 井、曲地 7 井和 ZK2 井, 露头剖面有小安



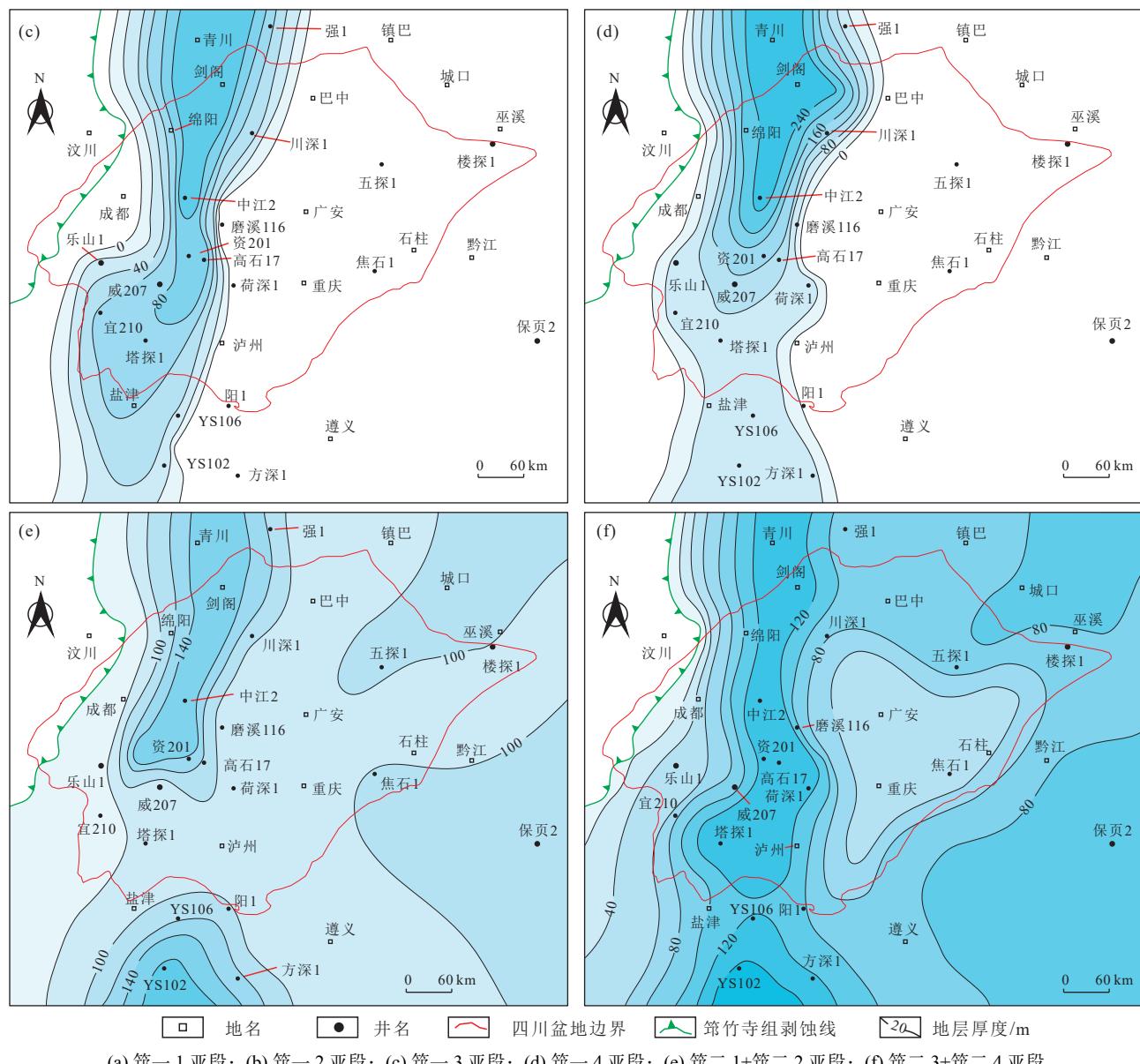


图 8 上扬子地区平行裂陷方向下寒武统筇竹寺组不同亚段地层厚度分布

Fig.8 Isopach maps of various sub-members of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation parallel to the rift direction in the Upper Yangtze region

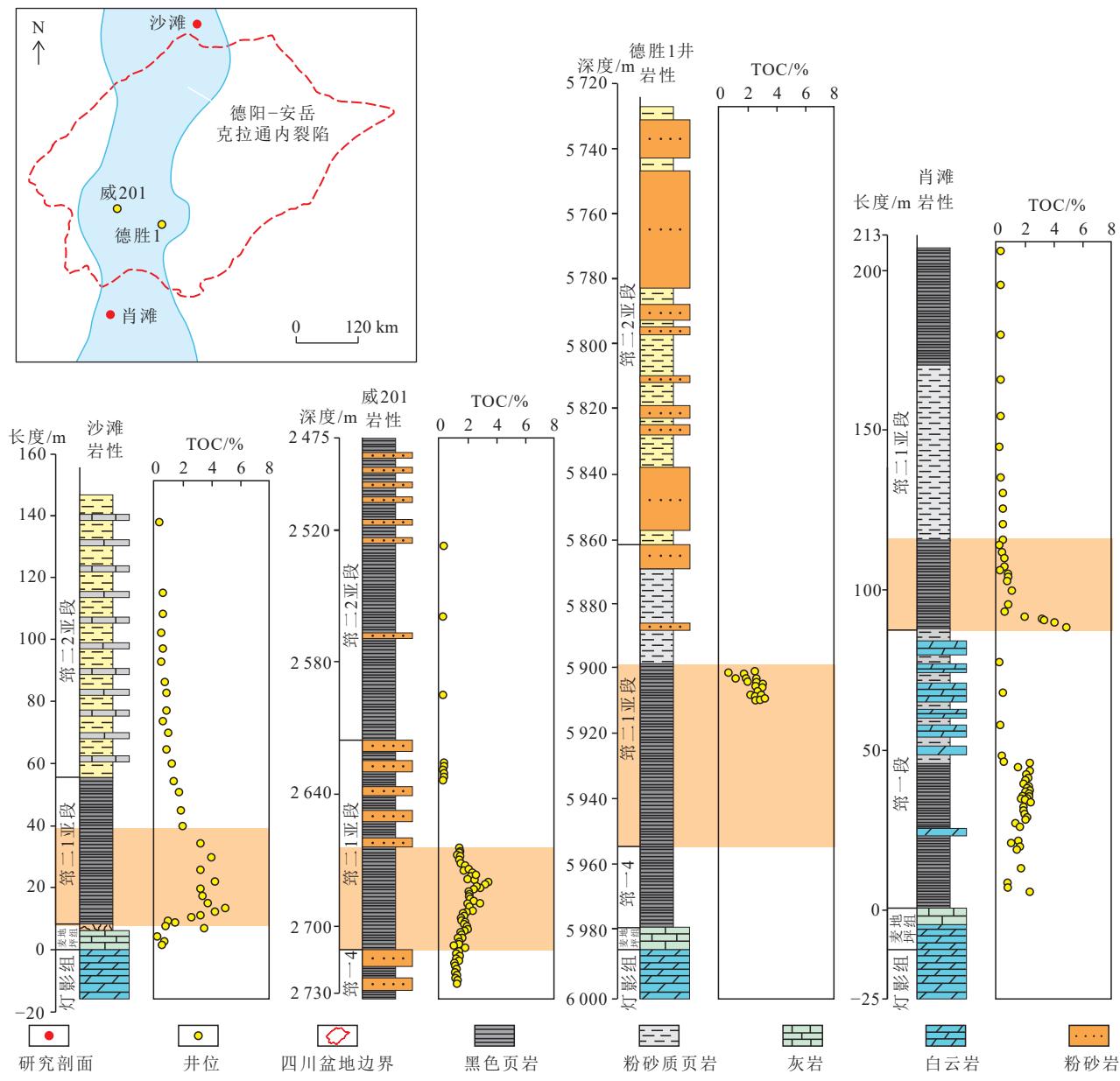
南剖面、老林村剖面、箐门村剖面、聂家村剖面和九乡剖面等,筇竹寺组总厚一般为 230~360 m,局部可达 425 m。筇竹寺组黑色页岩孔隙发育,孔隙率高。页岩中粒间孔、粒内孔和有机质孔发育,高压压汞孔隙率为 1.59%~11.33%(样品数为 6),平均为 5.0%^[55]。箐门村剖面黑色页岩孔隙发育,以粒间孔、粒内孔和有机质孔为主,高压压汞孔隙率为 0.88%~4.18%(样品数为 4),平均为 2.23%。

内裂陷分布区筇一段发育优质烃源岩,通过侧向逸散,可以持续向筇二 1 亚段页岩供烃。内裂陷西北缘杨木镇剖面筇一段黑色页岩 TOC 值为 0.60%~5.36%,平均为 2.73%(样品数为 19),厚度约为 85 m。中部的资

201 井筇一段厚 250.8 m,富有机质黑色页岩 TOC 为 1.74%~5.16%(样品数为 8),平均为 2.92%;高石 17 井筇一段厚 259.5 m,钻孔富有机质黑色页岩 TOC 为 3.50%~6.00%(样品数为 6),平均为 4.71%,烃源岩品质较好。内裂陷的南部的 YS102 井筇一段厚 98.5 m,页岩 TOC 为 1.14%~5.13%(样品数为 53),平均为 3.02%,有机质丰度较高。筇竹寺组烃源岩成熟度高,处于过成熟阶段^[56-57],生烃潜力大。

4.2 筇二 1 亚段, 良好的垂向和侧向封盖条件

上扬子地区筇二 2、筇二 3 和筇二 4 亚段和沧浪铺组直接覆盖于筇二 1 亚段之上,具有分布面积广、厚度大、低孔、低渗等特征,构成筇二 1 亚段的直接区域性



注: 沙滩和肖滩剖面数据引自文献 [53-54]。

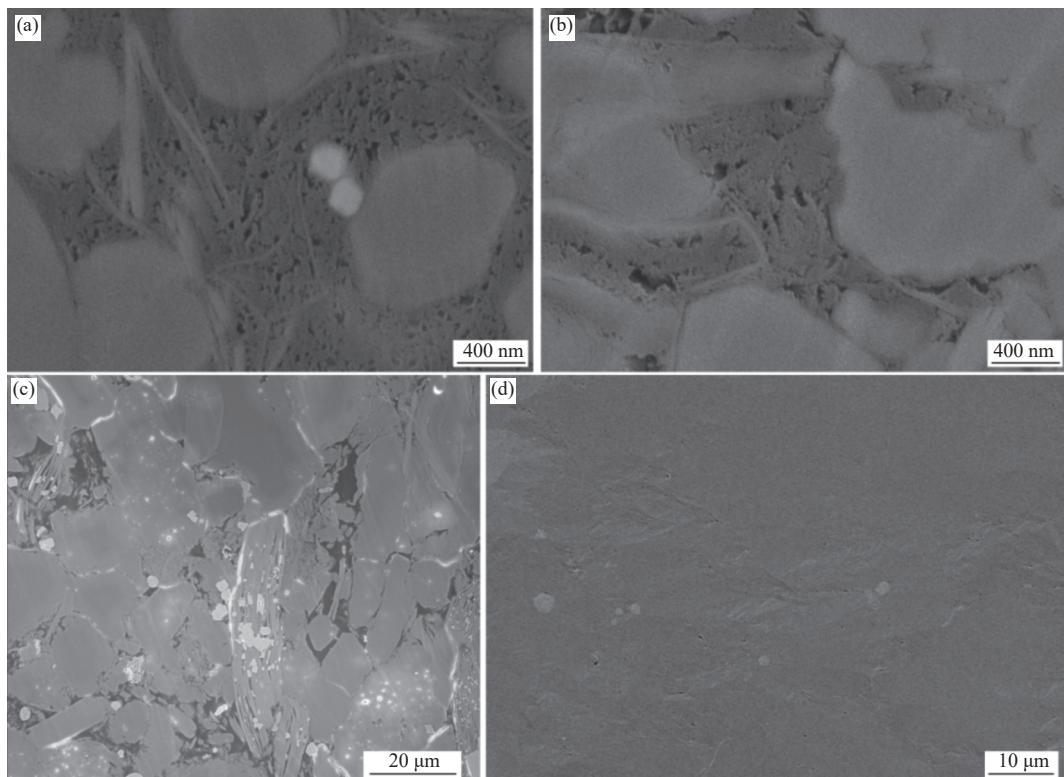
图 9 上扬子地区下寒武统筇竹寺组有机碳含量变化关系

Fig.9 Total organic carbon (TOC) variations in the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation, Upper Yangtze region

盖层,除在局部地区缺失外,其他地区均广泛分布(图 8)。其中,第二 2 亚段厚度为 55~92 m,第二 3+ 第二 4 亚段厚度为 61~123 m,沧浪铺组厚度为 82~240 m^[21],页岩分布面积广、厚度大。内裂陷中部德胜 1 井,第二 2 亚段厚约 48.5 m,页岩黏土矿物平均大于 30%,孔隙率为 0.23%~1.09%(样品数 18),平均 0.73%,孔隙率低;第二 3+ 第二 4 亚段厚约 112 m,页岩黏土矿物大于 40%,测井孔隙率低(小于 0.5%);沧浪铺组厚 267 m,页岩黏土矿物大于 45%,测井孔隙率低(小于 0.7%)。内裂陷南部的宁 206 井,第二 1 亚段不发育,第二 3+ 第二 4 亚段页岩厚为 78.5 m,黏土矿物平均质量分数为 30.7%,孔隙率低,为 0.11%~1.75%(平均 0.45%);沧浪铺组页岩厚

度为 236 m,黑色页岩孔隙率低,为 0.23%~0.75%(样品数 10),平均 0.46%。

上扬子地区第二 1 亚段页岩整体分布连续,不仅裂陷分布区发育,远离裂陷分布区页岩厚度也在 40 m 以上(图 8e),侧向分布连续。资 201 井第二 1 页岩的孔隙率为 1.39%~6.21%(样品数为 77),平均 4.54%,页岩物性较好(图 11)。威 207 井第二 1 页岩孔隙率为 1.99%~5.03%(样品数为 55),平均 3.61%,页岩物性相对较好。金石 103 井第二 1 页岩孔隙率为 0.55%~4.51%(样品数为 67),平均 2.21%,页岩物性明显变差。宜 210 井第二 1 页岩孔隙率为 0.53%~3.94%(样品数为 42),平均为 2.08%,页岩物性进一步变差。随着远离裂陷区,页



(a) 资 201 井, 4 754.23 m; (b) 资 201 井, 4 781.23 m; (c) 威 207 井, 3 022.07 m; (d) 资 201 井, 4 556.99 m

图 10 扫描电镜照片展示上扬子地区下寒武统筇竹寺组黑色页岩孔隙特征

Fig.10 Scanning electron microscope (SEM) images showing the pore characteristics of black shales in the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation, Upper Yangtze region

岩物性变差,页岩的侧向封堵能力增强。

4.3 第一段页岩气易侧向逸散,不利于原地成藏

内裂陷分布区内第一段筇竹寺亚段和第三段筇竹寺亚段页岩具有高 TOC 和高孔隙率特征,是优质的烃源岩和储集层。内裂陷北段的川深 1 井,筇竹寺第三段厚约 40 m,测井 TOC 含量平均为 3.5%,测井孔隙率平均为 6.4%,为优质的烃源岩和储集层。内裂陷中段的资 201 井和资 4 井,其筇竹寺第一段分别厚 22.5 m 和 14.5 m;筇竹寺第三段分别厚 80 m 和 54.5 m。资 201 井筇竹寺第一段测井 TOC 含量平均为 4.11%,测井孔隙率平均为 4.35%;筇竹寺第三段测井 TOC 含量平均为 2.97%,测井孔隙率平均为 4.2%,均为优质的烃源岩和储集层。资 4 井筇竹寺第一段测井 TOC 含量平均为 3.53%,测井孔隙率平均为 4.17%;筇竹寺第三段测井 TOC 含量平均为 2.27%,测井孔隙率平均为 4.35%,均为优质的烃源岩和储集层。内裂陷中段的川龙 1 井,其筇竹寺第一段厚约 26.8 m,测井 TOC 含量平均为 1.73%,测井孔隙率平均为 3.6%;筇竹寺第三段厚约 78.5 m,测井 TOC 平均为 2.36%,测井孔隙率平均为 4.4%,烃源岩和储集层品质相对较好。

上扬子地区德阳—安岳克拉通内裂陷分布区内麦地坪组和第一段侧向与灯影组灰岩直接接触,生成的页岩气易沿着岩溶带或断层逸散,不利于原位聚集成藏。

前人研究表明,裂陷内灯二段发育规模性垄控丘滩体储集层,灯四段发育规模岩溶储集层,裂陷边缘发育规模颗粒滩储集层^[21]。这三套储集层孔隙率高、渗透性好,麦地坪组和第一段生成的页岩气可直接或顺着岩溶带、断层向下或侧向运移聚集至这些储集体内,从而造成页岩气的逸散(图 12)。如内裂陷北段的角探 1 井、蓬探 1 井和中江 2 井发育垄控型丘滩储集体。角探 1 井灯四段丘滩体厚约 280 m,岩性组合主要为砂屑云岩、藻凝块云岩、藻叠层云岩和藻黏结云岩,孔隙率平均值为 3.5%。蓬探 1 井灯二段岩性为砂屑云岩、葡萄花边状白云岩、泥粉晶白云岩,孔隙率大于 2%,测试获超过 100 万 m³/d 的高产气流。与蓬探 1 井相似,中江 2 井的灯二段储层品质佳,测试获气 3.6 万 m³/d。这些丘滩体从上面、周边均被麦地坪组和第一段页岩包裹,麦地坪组和第一段生成的页岩气向下或侧向直接运移聚集于这些储集体中^[58-59]。内裂陷南段灯四段岩溶风化壳发育,上覆的麦地坪组和第一段页岩生成的页岩气顺着岩溶带或直接向下运移聚集形成岩性气藏。内裂陷东侧边缘发育大量丘滩体,这些台缘丘滩体与裂陷内筇竹寺组泥质烃源岩可形成良好的侧向对接关系。麦地坪组和第一段页岩生成的页岩气可顺着断裂运移,从而形成良好的岩性圈闭^[22,59]。

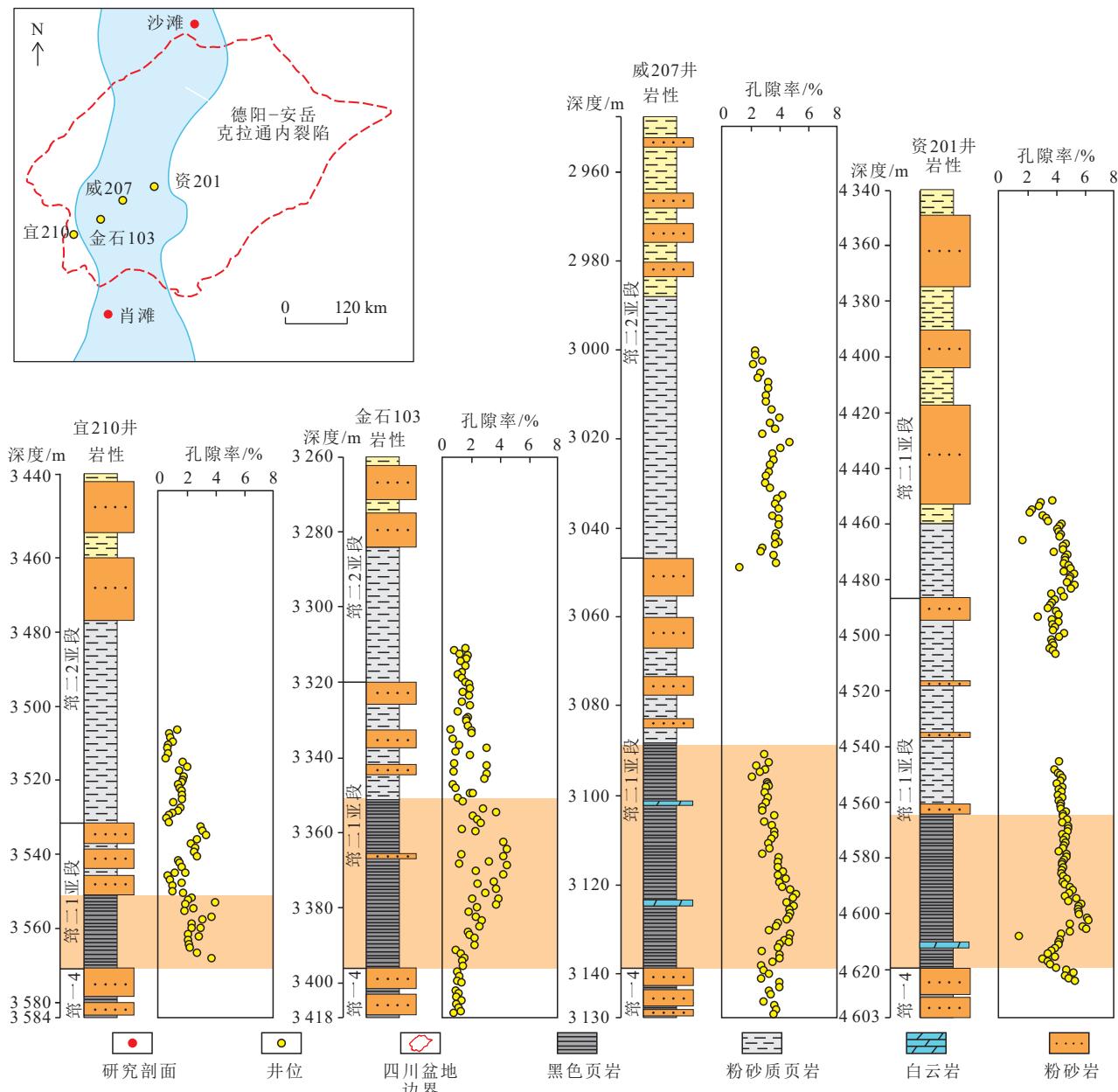


图 11 上扬子地区下寒武统筇竹寺组第二1孔隙率变化关系

Fig.11 Porosity variations in the Q2-1 sub-member of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation, Upper Yangtze region

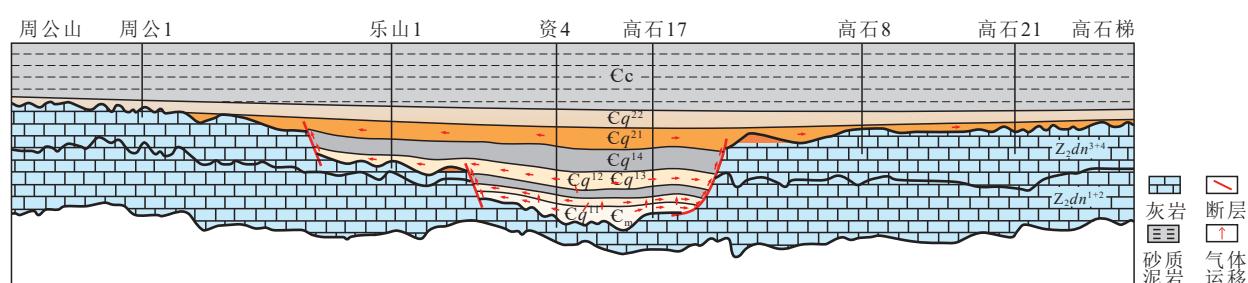


图 12 上扬子地区下寒武统麦地坪和筇竹寺组地层分布模式及页岩气成藏特征

Fig.12 Stratigraphic distribution pattern and shale gas accumulation characteristics of the Lower Cambrian Maidiping and Qiongzhusi formations, Upper Yangtze region

上扬子地区目前共实施评价井 8 口, 测试高产段均位于第二 1 亚段, 表明其为“甜点段”。以金石 103HF 井为例, 其测试井段位于第二 1 亚段, 测试产量为

25.86 万 m^3/d ; 截至 2023 年 6 月初, 日产气 4.531 万 m^3/d , 累计产气 0.13 亿 m^3 。资 201 井测试井位位于第二 1 亚段, 测试产气量为 73.88×万 m^3/d , 目前日产气

7.34 万 m³, 累产气量 472 万 m³。

5 结论

(1) 上扬子地区筇竹寺组可划分为第一段和第二段, 第一段细分为第一 1、第一 2、第一 3 和第一 4 四个亚段, 第二段细分为第二 1、第二 2、第二 3 和第二 4 四个亚段。麦地坪组和第一段主要发育于德阳—安岳克拉通内裂陷内, 而第二段在裂陷外亦有广泛分布。裂陷内部, 麦地坪组至第一段东西两侧终止于灯影组灰岩, 西侧厚度变化较缓, 东侧地层快速尖灭; 南北方向上, 第一段由北向南减薄, 第二段中部薄南北厚。裂陷外部, 第二段全区发育, 第二 1 亚段直接超覆于第一段或灯影组灰岩之上。

(2) 第一段页岩虽然生烃和储集条件较好, 但生成的页岩气易侧向逸散, 不利于原地聚集成藏。相比之下, 第二 1 亚段页岩的高孔隙率和良好的封堵条件, 使其成为页岩气勘探的“甜点段”, 具有较高的开发潜力。目前实施的评价井测试高产段均位于第二 1 亚段, 如, 金石 103HF 井测试产气量为 25.86 万 m³/d, 资 201 井测试产气量为 73.88 万 m³/d。

(3) 下一步开发建议应重点关注第二 1 亚段页岩的勘探和开发, 进一步优化钻井和压裂技术, 提高页岩气的采收率。同时, 应加强对典型井的动态监测和分析, 为后续开发提供科学依据。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References)

- [1] HOFFMAN P F, KAUFMAN A J, HALVERSON G P, et al. A Neoproterozoic snowball Earth[J]. *Science*, 1998, 281(5381): 1342–1346.
- [2] DONNADIEU Y, GODDÉRIS Y, RAMSTEIN G, et al. A “snowball Earth” climate triggered by continental break-up through changes in runoff[J]. *Nature*, 2004, 428: 303–306.
- [3] MARSHALL C R. Explaining the Cambrian “explosion” of animals[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2006, 34: 355–384.
- [4] PENG S C, BABCOCK L E, AHLBERG P. The Cambrian period[M]//GRADSTEIN F M, OGG J G, SCHMITZ M D, et al. Geologic time scale 2020. Amsterdam: Elsevier, 2020: 565–629.
- [5] 朱光有, 赵坤, 李婷婷, 等. 中国华南地区下寒武统烃源岩沉积环境、发育模式与分布预测[J]. 石油学报, 2020, 41(12): 1567–1586.
- ZHU Guangyou, ZHAO Kun, LI Tingting, et al. Sedimentary environment, development model and distribution prediction of Lower Cambrian source rocks in South China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(12): 1567–1586.
- [6] 梁霄, 李香华, 徐剑良, 等. 从优质烃源岩到储层: 构造–沉积分异格局下的四川盆地中西部下寒武统页岩气勘探前景[J]. *天然气工业*, 2021, 41(5): 30–41.
- LIANG Xiao, LI Xianghua, XU Jianliang, et al. Exploration prospects of Lower Cambrian shale gas in the central-western Sichuan Basin under the pattern of tectonic–depositional differentiation: From high-quality source rocks to reservoirs[J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(5): 30–41.
- [7] 张科, 苏劲, 陈永权, 等. 塔里木盆地寒武系–奥陶系烃源岩油源特征与超深层油气来源[J]. 地质学报, 2023, 97(6): 2026–2041.
- ZHANG Ke, SU Jin, CHEN Yongquan, et al. The biogeochemical features of the Cambrian–Ordovician source rocks and origin of ultra-deep hydrocarbons in the Tarim Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2023, 97(6): 2026–2041.
- [8] 汪建国, 陈代钊, 王清晨, 等. 中扬子地区晚震旦世–早寒武世转折期台–盆演化及烃源岩形成机理[J]. 地质学报, 2007, 81(8): 1102–1109.
- WANG Jianguo, CHEN Daizhao, WANG Qingchen, et al. Platform evolution and marine source rock deposition during the terminal Sinian to Early Cambrian in the middle Yangtze Region[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(8): 1102–1109.
- [9] 欧阳征健, 冯娟萍, 姚韦卓, 等. 鄂尔多斯盆地及周缘寒武系烃源岩地质特征及有利区带优选[J]. 地质科学, 2023, 58(4): 1291–1308.
- OUYANG Zhengjian, FENG Juanping, YAO Weizhuo, et al. Characteristics and favorable areas of Cambrian natural gas reservoirs in Ordos Basin and its periphery areas[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2023, 58(4): 1291–1308.
- [10] GORIN G E, RACZ L G, WALTER M R. Late Precambrian–Cambrian sediments of Huqf group, sultanate of Oman[J]. *AAPG Bulletin*, 1982, 66(12): 2609–2627.
- [11] ZHURAVLEV A Y, WOOD R A. The two phases of the Cambrian explosion[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 16656.
- [12] WILLE M, NÄGLER T F, LEHMANN B, et al. Hydrogen sulphide release to surface waters at the Precambrian/Cambrian boundary[J]. *Nature*, 2008, 453(7196): 767–769.
- [13] ZHU Maoyan, LI Xianhua. Introduction: From snowball Earth to the Cambrian explosion–evidence from China[J]. *Geological Magazine*, 2017, 154(6): 1187–1192.
- [14] OKADA Y, SAWAKI Y, KOMIYA T, et al. New chronological constraints for Cryogenian to Cambrian rocks in the Three Gorges, Weng'an and Chengjiang areas, South China[J]. *Gondwana Research*, 2014, 25(3): 1027–1044.
- [15] JIANG Shaoyong, PI Daohui, HEUBECK C, et al. Early Cambrian ocean anoxia in South China[J]. *Nature*, 2009, 459(7248): E5–E6.
- [16] XU Lingang, MAO Jingwen. Trace element and C–S–Fe geochemistry of Early Cambrian black shales and associated polymetallic Ni–Mo sulfide and vanadium mineralization, South China: Implications for paleoceanic redox variation[J]. *Ore Geology Reviews*, 2021, 135: 104210.
- [17] FANG Xinyan, WU Liangliang, GENG Ansong, et al. Formation and evolution of the Ediacaran to Lower Cambrian black shales in

- the Yangtze Platform, South China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2019, 527: 87–102.
- [18] XIANG Lei, SCHOEPFER S D, ZHANG Hua, et al. Evolution of primary producers and productivity across the Ediacaran–Cambrian transition[J]. *Precambrian Research*, 2018, 313: 68–77.
- [19] EL-GHALI M A K, SHELUKHINA O, ABBASI I A, et al. Depositional and sequence stratigraphic controls on diagenesis in the Upper Cambrian–Lower Ordovician Barik Formation, central Oman: Implications for prediction of reservoir porosity in a hybrid–energy delta system[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2024, 160: 106611.
- [20] 张天怡, 黄士鹏, 李贤庆, 等. 四川盆地下寒武统筇竹寺组沉积地球化学特征与有机质富集机制[J]. 天然气地球科学, 2024, 35(4): 688–703.
ZHANG Tianyi, HUANG Shipeng, LI Xianqing, et al. Sedimentary geochemical characteristics and organic matter enrichment of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in the Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2024, 35(4): 688–703.
- [21] 魏国齐, 杨威, 谢武仁, 等. 克拉通内裂陷及周缘大型岩性气藏形成机制、潜力与勘探实践: 以四川盆地震旦系–寒武系为例[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(3): 465–477.
WEI Guoqi, YANG Wei, XIE Wuren, et al. Formation mechanisms, potentials and exploration practices of large lithologic gas reservoirs in and around an intracratonic rift: Taking the Sinian–Cambrian of Sichuan Basin as an example[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49(3): 465–477.
- [22] 魏国齐, 王志宏, 李剑, 等. 四川盆地震旦系、寒武系烃源岩特征、资源潜力与勘探方向[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(1): 1–13.
WEI Guoqi, WANG Zhihong, LI Jian, et al. Characteristics of source rocks, resource potential and exploration direction of Sinian and Cambrian in Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2017, 28(1): 1–13.
- [23] 谢增业, 李剑, 杨春龙, 等. 川中古隆起震旦系–寒武系天然气地球化学特征与太和气区的勘探潜力[J]. 天然气工业, 2021, 41(7): 1–14.
XIE Zengye, LI Jian, YANG Chunlong, et al. Geochemical characteristics of Sinian–Cambrian natural gas in central Sichuan paleo-uplift and exploration potential of Taihe gas area[J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(7): 1–14.
- [24] 杜金虎, 汪泽成, 邹才能, 等. 古老碳酸盐岩大气田地质理论与勘探实践[M]. 北京: 石油工业出版社, 2015.
- [25] 杨威, 魏国齐, 谢武仁, 等. 古隆起在四川盆地台内碳酸盐岩丘滩体规模成储中的作用[J]. 天然气工业, 2021, 41(4): 1–12.
YANG Wei, WEI Guoqi, XIE Wuren, et al. Role of paleo uplift in the scale formation of intra-platform carbonate mound–bank body reservoirs in the Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(4): 1–12.
- [26] POTTER C J. Paleozoic shale gas resources in the Sichuan Basin, China[J]. *AAPG Bulletin*, 2018, 102(6): 987–1009.
- [27] WANG Wenyang, PANG Xiongqi, CHEN Zhangxin, et al. Quantitative prediction of oil and gas prospects of the Sinian–Lower Paleozoic in the Sichuan Basin in Central China[J]. *Energy*, 2019, 174: 861–872.
- [28] 魏国齐, 杨威, 杜金虎, 等. 四川盆地震旦纪–早寒武世克拉通内裂陷地质特征[J]. 天然气工业, 2015, 35(1): 24–35.
WEI Guoqi, YANG Wei, DU Jinhu, et al. Geological characteristics of the Sinian–Early Cambrian intracratonic rift, Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2015, 35(1): 24–35.
- [29] 钟勇, 李亚林, 张晓斌, 等. 川中古隆起构造演化特征及其与早寒武世绵阳–长宁张槽的关系[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2014, 41(6): 703–712.
ZHONG Yong, LI Yalin, ZHANG Xiaobin, et al. Evolution characteristics of central Sichuan palaeouplift and its relationship with Early Cambrian Mianyang–Changning intracratonic sag[J]. *Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition)*, 2014, 41(6): 703–712.
- [30] 李忠权, 刘记, 李应, 等. 四川盆地地震旦系威远–安岳拉张侵蚀槽特征及形成演化[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(1): 26–33.
LI Zhongquan, LIU Ji, LI Ying, et al. Formation and evolution of Weiyuan–Anyue extension–erosion groove in Sinian system, Sichuan Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(1): 26–33.
- [31] PI Daohui, LIU Congqiang, SHIELDS-ZHOU G A, et al. Trace and rare earth element geochemistry of black shale and kerogen in the Early Cambrian Niutitang Formation in Guizhou Province, South China: Constraints for redox environments and origin of metal enrichments[J]. *Precambrian Research*, 2013, 225: 218–229.
- [32] ZHOU Lei, KANG Zhihong, WANG Zongxiu, et al. Sedimentary geochemical investigation for paleoenvironment of the Lower Cambrian Niutitang Formation shales in the Yangtze Platform[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, 159: 376–386.
- [33] MA Yiquan, LU Yongchao, LIU Xiaofeng, et al. Depositional environment and organic matter enrichment of the Lower Cambrian Niutitang shale in western Hubei Province, South China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 109: 381–393.
- [34] 马子杰, 唐玄, 张金川, 等. 上扬子地区寒武系牛蹄塘组页岩有机质孔隙发育特征及主控因素[J]. 地学前缘, 2023, 30(3): 124–137.
MA Zijie, TANG Xuan, ZHANG Jinchuan, et al. Organic matter–hosted pores in the Cambrian Niutitang shales of the Upper Yangtze region: Pore development characteristics and main controlling factors[J]. *Earth Science Frontiers*, 2023, 30(3): 124–137.
- [35] 王濡岳, 丁文龙, 龚大建, 等. 渝东南–黔北地区下寒武统牛蹄塘组页岩裂缝发育特征与主控因素[J]. 石油学报, 2016, 37(7): 832–845.
WANG Ruyue, DING Wenlong, GONG Dajian, et al. Development characteristics and major controlling factors of shale fractures in the Lower Cambrian Niutitang Formation, southeastern Chongqing–northern Guizhou area[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(7): 832–845.
- [36] 梁峰, 吴伟, 张琴, 等. 四川盆地南部下寒武统筇竹寺组页岩孔隙结构特征与页岩气赋存模式[J]. 天然气工业, 2024, 44(3): 131–142.
LIANG Feng, WU Wei, ZHANG Qin, et al. Shale pore structure characteristics and shale gas occurrence pattern of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in the southern Sichuan Basin[J]. *Nat-*

- ural Gas Industry, 2024, 44(3): 131–142.
- [37] WANG Ruyue, DING Wenlong, ZHANG Yeqian, et al. Analysis of developmental characteristics and dominant factors of fractures in Lower Cambrian marine shale reservoirs: A case study of Niutitang Formation in Cen'gong Block, Southern China[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2016, 138: 31–49.
- [38] 周慧, 李伟, 张宝民, 等. 四川盆地震旦纪末期—寒武纪早期台盆的形成与演化[J]. 石油学报, 2015, 36(3): 310–323.
- ZHOU Hui, LI Wei, ZHANG Baomin, et al. Formation and evolution of Upper Sinian to Lower Cambrian intraplatformal basin in Sichuan Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(3): 310–323.
- [39] WANG Jian, LI Zhengxiang. History of Neoproterozoic rift basins in South China: Implications for Rodinia break-up[J]. *Precambrian Research*, 2003, 122(1/2/3/4): 141–158.
- [40] LI Z X, BOGDANOVA S V, COLLINS A S, et al. Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: A synthesis[J]. *Precambrian Research*, 2008, 160(1/2): 179–210.
- [41] 黎荣, 王永晓, 汪泽成, 等. 四川盆地晚震旦世—早寒武世德阳—安岳裂陷槽南段地质特征[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(2): 285–296.
- LI Rong, WANG Yongxiao, WANG Zecheng, et al. Geological characteristics of the southern segment of the Late Sinian–Early Cambrian Deyang–Anyue rift trough in Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2023, 50(2): 285–296.
- [42] 谢武仁, 姜华, 马石玉, 等. 四川盆地德阳—安岳裂陷晚震旦世—早寒武世沉积演化特征与有利勘探方向[J]. 天然气地球科学, 2022, 33(8): 1240–1250.
- XIE Wuren, JIANG Hua, MA Shiyu, et al. Sedimentary evolution characteristics and favorable exploration directions of Deyang–Anyue rift within the Sichuan Basin in Late Sinian–Early Cambrian[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2022, 33(8): 1240–1250.
- [43] 杜金虎, 汪泽成, 邹才能, 等. 上扬子克拉通内裂陷的发现及对安岳特大型气田形成的控制作用[J]. 石油学报, 2016, 37(1): 1–16.
- DU Jinhu, WANG Zecheng, ZOU Caineng, et al. Discovery of intra-cratonic rift in the Upper Yangtze and its control effect on the formation of Anyue giant gas field[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(1): 1–16.
- [44] 杨威, 魏国齐, 谢武仁, 等. 克拉通内裂陷边缘台缘丘滩体规模储层发育主控因素与成因模式: 以四川盆地德阳—安岳克拉通内裂陷东侧灯影组四段为例[J]. 天然气地球科学, 2022, 33(10): 1541–1553.
- YANG Wei, WEI Guoqi, XIE Wuren, et al. Main controlling factors and genetic mechanism for the development of high-quality reservoirs in the mound–shoal complexes on the platform margin mound–beach body at platform margin of the inner cratonic rift: Case study of the fourth member of Dengying Formation in the east side of the Deyang–Anyue cratonic rifts, Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2022, 33(10): 1541–1553.
- [45] COMPSTON W, ZHANG Zichao, COOPER J A, et al. Further SHRIMP geochronology on the Early Cambrian of South China[J]. *American Journal of Science*, 2008, 308(4): 399–420.
- [46] WANG Xinjiang, SHI Xiaoying, JIANG Ganqing, et al. New U–Pb age from the basal Niutitang Formation in South China: Implications for diachronous development and condensation of stratigraphic units across the Yangtze Platform at the Ediacaran–Cambrian transition[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 48: 1–8.
- [47] 刘瑞崟, 周文, 徐浩, 等. 层序格架下构造–沉积分异对页岩气储层特征的控制: 以四川盆地西南部筇竹寺组为例[J]. 沉积学报, 2023, 41(5): 1478–1494.
- LIU Ruiyin, ZHOU Wen, XU Hao, et al. Control of the pattern of tectonic–depositional differentiation on shale gas reservoir characteristics within a sequence stratigraphic framework: A case study from the Qiongzhusi Formation in the southwestern Sichuan Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2023, 41(5): 1478–1494.
- [48] YAWAR Z, SCHIEBER J. On the origin of silt laminae in laminated shales[J]. *Sedimentary Geology*, 2017, 360: 22–34.
- [49] SCHIEBER J, SOUTHARD J, THAISEN K. Accretion of mudstone beds from migrating floccule ripples[J]. *Science*, 2007, 318(5857): 1760–1763.
- [50] 施振生, 赵圣贤, 周天琪, 等. 海相含气页岩水平层理类型、成因及其页岩气意义: 以川南地区古生界五峰组–龙马溪组为例[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(6): 1499–1514.
- SHI Zhensheng, ZHAO Shengxian, ZHOU Tianqi, et al. Types and genesis of horizontal bedding of marine gas-bearing shale and its significance for shale gas: A case study of the Wufeng–Longmaxi shale in southern Sichuan Basin, China[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(6): 1499–1514.
- [51] 施振生, 邱振. 海相细粒沉积层理类型及其油气勘探开发意义[J]. 沉积学报, 2021, 39(1): 181–196.
- SHI Zhensheng, QIU Zhen. Main bedding types of marine fine-grained sediments and their significance for oil and gas exploration and development[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021, 39(1): 181–196.
- [52] SHI Zhensheng, ZHOU Tianqi, WANG Hongyan, et al. Depositional structures and their reservoir characteristics in the Wufeng–Longmaxi shale in southern Sichuan Basin, China[J]. *Energies*, 2022, 15(5): 1618.
- [53] GOLDBERG T, STRAUSS H, GUO Qingjun, et al. Reconstructing marine redox conditions for the Early Cambrian Yangtze Platform: Evidence from biogenic sulphur and organic carbon isotopes[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2007, 254(1/2): 175–193.
- [54] OCH L M, SHIELDS-ZHOU G A, POULTON S W, et al. Redox changes in Early Cambrian black shales at Xiaotan section, Yunnan Province, South China[J]. *Precambrian Research*, 2013, 225: 166–189.
- [55] 胡琳, 薛晓辉, 杜伟, 等. 云南曲靖地区筇竹寺组泥页岩储层发育特征与影响因素[J]. 高校地质学报, 2022, 28(4): 617–622.
- HU Lin, XUE Xiaohui, DU Wei, et al. Reservoir characteristics of the Qiongzhusi shales and their influencing factors in the Qujing area, Yunnan Province[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2022, 28(4): 617–622.
- [56] 王玉满, 董大忠, 程相志, 等. 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[J]. 天然气工业, 2014, 34(8): 1–7.
- WANG Yuman, DONG Dazhong, CHENG Xiangzhi, et al. Elec-

- tric 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[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(8): 1–7.
- [57] 王玉满, 李新景, 陈波, 等. 海相页岩有机质炭化的热成熟度下限及勘探风险[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(3): 385–395.
WANG Yuman, LI Xinjing, CHEN Bo, et al. Lower limit of thermal maturity for the carbonization of organic matter in marine shale and its exploration risk[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(3): 385–395.
- [58] 杨威, 魏国齐, 谢武仁, 等. 四川盆地绵竹-长宁克拉通内裂陷东侧震旦系灯影组四段台缘丘滩体成藏特征与勘探前景[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(6): 1174–1184.
YANG Wei, WEI Guoqi, XIE Wuren, et al. Hydrocarbon accumula-
- tion and exploration prospect of mound-shoal complexes on the platform margin of the fourth member of Sinian Dengying Formation in the east of Mianzhu-Changning intracratonic rift, Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(6): 1174–1184.
- [59] 魏国齐, 杜金虎, 徐春春, 等. 四川盆地高石梯-磨溪地区震旦系-寒武系大型气藏特征与聚集模式[J]. 石油学报, 2015, 36(1): 1–12.
WEI Guoqi, DU Jinhui, XU Chunchun, et al. Characteristics and accumulation modes of large gas reservoirs in Sinian-Cambrian of Gaoshiti-Moxi region, Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(1): 1–12.

(责任编辑 范章群)