

四川盆地及其周缘下寒武统麦地坪组-筇竹寺组 层序充填和演化模式

吴冬^{1,2}, 邓虎成^{1,2}, 熊亮³, 曹凯旋², 董晓霞³, 赵勇³, 魏力民³, 王同³, 马若龙^{1,2}

(1. 成都理工大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610059; 2. 成都理工大学 能源学院, 四川 成都 610059;
3. 中国石化 西南油气分公司 勘探开发研究院, 四川 成都 610041)

摘要:四川盆地及其周缘下寒武统筇竹寺组页岩气资源丰富,是重要的页岩气产气层段之一。由于该套地层埋藏深、资料少且地质条件复杂,对其开展的层序地层研究较为薄弱,这严重制约了后续研究和生产。首先对四川盆地及其周缘早寒武世构造-沉积背景开展研究,在此基础上结合岩性、颜色、测井曲线、微量元素、古生物和地震反射同相轴等特征,对麦地坪组-筇竹寺组层序地层开展研究,提出层序划分思路,将麦地坪组-筇竹寺组从下往上依次划分为4个Ⅲ级层序。进而厘清层序地层空间分布规律,建立受全球板块张性活动控制的四川盆地及其周缘麦地坪组-筇竹寺组“早期窄盆差异沉积,后期广盆稳定分布”的层序演化模式。该演化模式对深化认识四川盆地寒武纪构造-沉积格局、推动沉积成藏等地质研究及促进深部页岩气勘探开发具有一定意义。

关键词:演化模式;层序地层;麦地坪组;筇竹寺组;下寒武统;四川盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Sequence filling and evolutionary model of the Lower Cambrian Maidiping-Qiongzhusi formations in Sichuan Basin and on its periphery

WU Dong^{1,2}, DENG Hucheng^{1,2}, XIONG Liang³, CAO Kaixuan², DONG Xiaoxia³, ZHAO Yong³, WEI Limin³,
WANG Tong³, MA Ruolong^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. College of Energy, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 3. Exploration and Development Research Institute of Southwest China Oil and Gas Branch, SINOPEC, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: The Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in the Sichuan Basin and on its periphery is rich in shale gas resources and has been proven to be one of the important shale gas pay zones in the basin. Due to the deep burial depth, few data and complex geological conditions, the research on its sequence stratigraphy has been relatively weak, having seriously restricted the follow-up research and development. The study on the Early Cambrian tectono-sedimentary setting of the Sichuan Basin and on its periphery, coupled with lithology, rock color, logging curve, trace elements, paleontology, seismic reflection event and other characteristics, is carried out to further explore the sequence stratigraphy of the Maidiping-Qiongzhusi formations, with the idea for the sequence division proposed. As a result, the Maidiping-Qiongzhusi formations are divided into four third-order sequences from bottom to top. By revealing the spatial distribution pattern of the sequence stratigraphy, we establish a sequence evolutionary model of “differential sedimentation in early narrow basin, and stable sedimentation in later wide basin” for the Maidiping-Qiongzhusi formations in the Sichuan Basin and on its periphery under the control of global plate extensional activity. The sequence evolutionary model will be of help to deepening understanding of the Cambrian tectono-sedimentary setting in the Sichuan Basin, promoting geological research on sedimentary reservoirs, and serving the exploration and development of deep shale gas.

收稿日期:2022-12-31;修订日期:2023-04-07。

第一作者简介:吴冬(1987—),男,博士、副研究员,沉积学和储层地质学。E-mail: lisandpw@163.com。

通讯作者简介:邓虎成(1980—),男,博士、教授,油气开发。E-mail: denghucheng@cdut.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(42072182);四川省科技计划杰出青年科技人才项目(2020JDJQ0058)。

Key words: evolutionary model, sequence stratigraphy, Maidiping Formation, Qiongzhusi Formation, Lower Cambrian, Sichuan Basin

引用格式:吴冬,邓虎成,熊亮,等. 四川盆地及其周缘下寒武统麦地坪组-筇竹寺组层序充填和演化模式[J]. 石油与天然气地质,2023,44(3):764-777. DOI:10.11743/ogg20230318.

WU Dong, DENG Hucheng, XIONG Liang, et al. Sequence filling and evolutionary model of the Lower Cambrian Maidiping-Qiongzhusi formations in Sichuan Basin and on its periphery[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(3): 764-777. DOI: 10.11743/ogg20230318.

四川盆地及其周缘是中国最早发现页岩气的地区,页岩气勘探最具潜力^[1-5]。随着四川盆地页岩油气勘探的持续进行,上扬子地区下寒武统筇竹寺组页岩受到了广泛关注^[6-12]。近日,中国石化西南油气分公司成功部署了金石103HF探井,日产天然气25.86×10⁴ m³,产层段资源量达3 878×10⁸ m³,整个页岩层段资源量超过1×10¹² m³,显示出筇竹寺组页岩气广阔的勘探开发前景。另一方面,下寒武统筇竹寺组页岩的研究程度远不及志留系龙马溪组,较老的岩石年龄、较深的埋藏环境、复杂的构造-沉积格局、有限的研究资料是影响筇竹寺组研究程度的关键因素。层序地层研究是后续沉积、成藏研究与气藏勘探开发的重要基础,厘清深部筇竹寺组层序充填过程,构建筇竹寺组层序发育模式显得尤为关键。目前,对四川盆地及其周缘下寒武统筇竹寺组层序地层的研究较为薄弱,或者是作为寒武系研究的一小部分^[10],或者是作为沉积演化研究的背景^[13-17],尚未建立完整而立体的层序地层格架,无法有效支撑深部筇竹寺组天然气勘探开发稳步、持续推进。本文综合利用四川盆地及其周缘300余口钻井、测井、8条野外剖面和450余米的岩心资料,结合骨干地震剖面,以构造-沉积演化背景为基础展开分析,克服因仅依靠有限资料的表象去研究深部地层而造成的不确定性;通过识别层序类型、对比层序界面,建立层序地层格架和层序充填模式,以期对四川盆地深部下寒武统筇竹寺组基础地质认识及油气勘探开发提供帮助。

1 区域地质概况

受扬子板块构造活动影响,四川盆地及其周缘经历了3个大型旋回:早古生代的加里东期旋回,晚古生代和三叠纪的海西期和印支期旋回,以及中、新生代的燕山期和喜马拉雅期旋回。加里东期旋回内,四川盆地经历了震旦纪一早寒武世的伸展期、中寒武世一早奥陶世的稳定发育期及中奥陶世一早志留世的挤压期。在伸展期,西伯利亚板块、华北克拉通和波罗的海

板块与劳伦古陆分离,华南地块四面环海^[18-21],上扬子克拉通盆地被劈开,形成地垒和地堑盆地结构(图1a)^[22-28]。在张性构造活动背景下,四川盆地内部沿绵阳—乐至—隆昌—长宁一带形成凹槽构造;凹槽内震旦系与下寒武统之间发育侵蚀暴露面,且下寒武统厚度显著增大,反映了灯影组四段沉积末期盆地抬升剥蚀和下寒武统沉积期盆地转为拉张的构造演化过程^[24-26];绵阳—长宁凹槽至沧浪铺组沉积晚期被填满。

四川盆地及其周缘下寒武统中、下部为碎屑沉积,其余为碳酸盐沉积(图1b)。从震旦纪灯影期到寒武纪麦地坪期,上扬子地区发生桐湾运动^[29],导致灯影组二段和灯影组四段顶部分别形成不整合面,某些地区麦地坪组不发育。至筇竹寺组沉积期,受全球海平面快速上升影响,黑色页岩几乎覆盖了整个上扬子地区^[30-31]。在差异沉降的影响下,上扬子地区寒武纪早期受控于前寒武纪沉积古地貌(灯影组沉积和岩溶古地貌),沉积主要发生在克拉通内凹陷(凹槽),后期差异沉降减弱,沉积广泛。

2 早寒武世物源供给及不同构造分区沉积充填差异

2.1 碎屑供给存在差异

通过大量文献调研,结合实际研究资料,对四川盆地及其周缘早寒武世主要供源古陆进行分类,认为古陆供源强度存在3个层次。

2.1.1 显著且持续的碎屑供给——康滇古陆

该古陆前震旦纪为裂陷^[32-33],晋宁运动开始褶皱。古生代大部分时期其大部分地区为古隆起,遭受剥蚀^[27,34-35]。实际资料则证实了这一观点:上扬子地区筇竹寺组总体岩性为粉砂岩和泥页岩,细砂岩较为少见,在峨边葛村野外露头发现细砂岩层;另外,从钻井资料来看,在井研—犍为地区,越往西砂/地比越大,普遍大于17%,揭示了康滇古陆的影响。

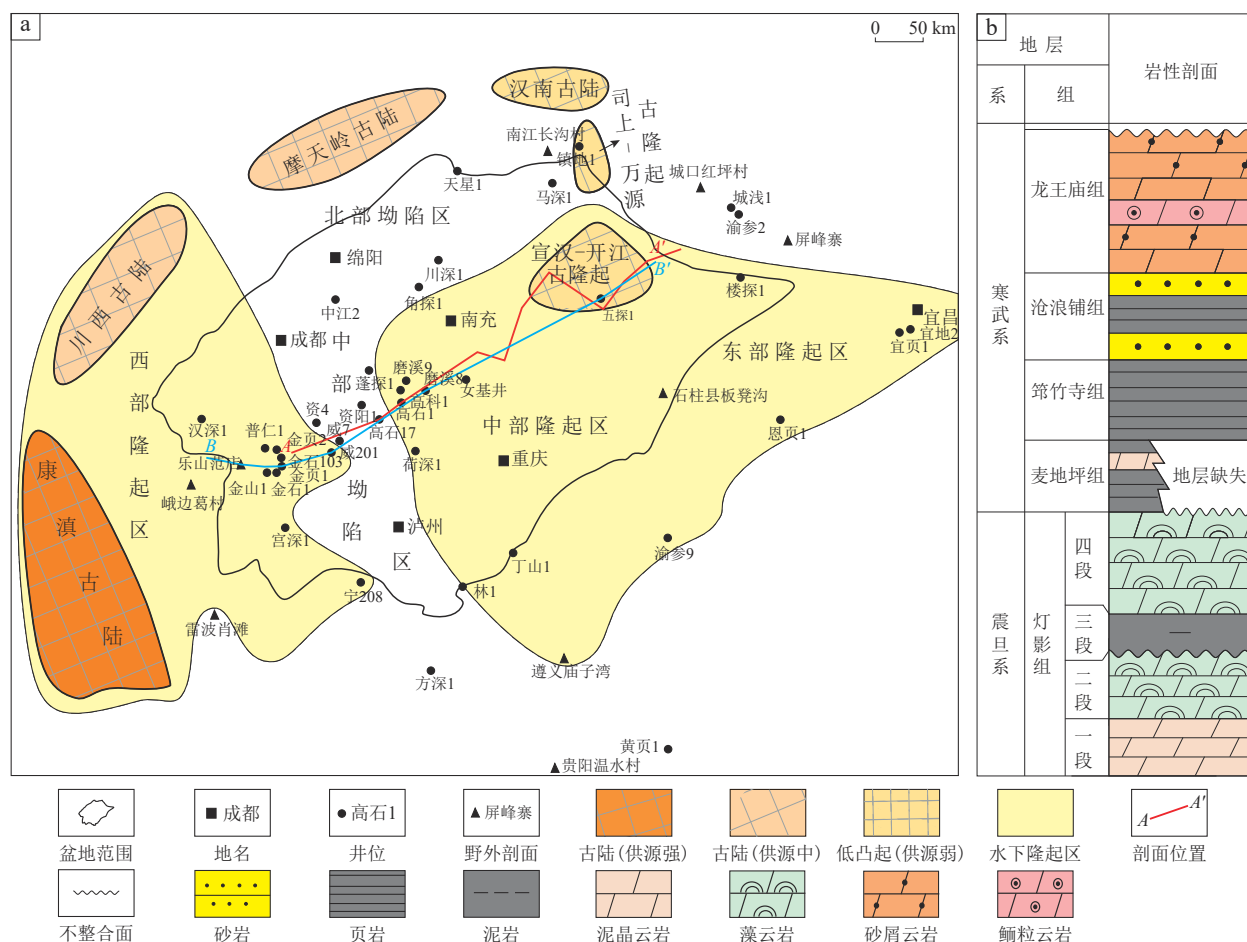


图1 四川盆地及其周缘早寒武世构造-沉积分区及地层综合柱状图

Fig. 1 Tectono-sedimentary compartmentalization and composite stratigraphic column of the Early Cambrian in the Sichuan Basin and on its periphery

a. 盆地及其周缘构造-沉积分区; b. 上震旦统一寒武统地层综合柱状图^[8]

(依据前人对下寒武统和筇竹寺组厚度的描述及本次研究的实际井-震资料划分^[25,27], 筇竹寺组厚度在中部拗陷区普遍大于400 m, 北部拗陷区大于300 m, 西部隆起区小于400 m, 中-东部隆起区小于200 m。上扬子地区范围大, 构造背景复杂, 图中展示的是大致格局。)

2.1.2 中等且局限的碎屑供给——摩天岭古陆

刘仿韩认为摩天岭古陆供源^[36]; 陈洪德和郭彤楼认为寒武纪摩天岭古陆供源作用不显著^[35]; 何登发等认为摩天岭古陆影响剑阁西北、松潘以东^[27]。从现有资料来看, 紧邻摩天岭古陆的天星1井目的层段砂/地比可达18%, 往南至川深1井, 砂/地比迅速减小至8%, 说明摩天岭古陆在筇竹寺组沉积期是提供物源的, 只是影响范围不大。

2.1.3 较弱且局限的碎屑供给——汉南古陆、宣汉-开江古隆起及司上-万源古隆起

郭正吾认为汉南古陆晚震旦世后接受碳酸盐岩台地沉积^[34], 余宽宏等认为汉南古陆的影响范围最南不超过苍溪县^[37], 何登发等认为汉南古陆的影响限于

汉中以南、南江以北^[27], 谷志东等认为汉南古陆供源时, 大巴山和米仓山地区还在水下^[38]。从现有资料来看, 长沟村野外剖面目的层厚度较小, 反映差异升降运动较弱, 可容空间和物源供给不足, 该剖面岩性较细, 以粉砂质泥岩和页岩为主。宣汉-开江古隆起是受基底隆升控制的前震旦纪古隆起, 晚震旦世早期发育明显, 晚震旦世晚期一早寒武世继承性发育^[38]。该区域目前尚无钻井, 地震剖面揭示早寒武世早期, 古隆起北西侧宽川铺组和郭家坝组可见超覆沉积, 且厚度有变化; 早寒武世中、晚期古隆起发育强度减弱, 从井资料来看, 高石梯地区筇竹寺组的砂/地比小于磨溪地区筇竹寺组的砂/地比, 反映东北方向物源的影响。司上-万源古隆起偶有提及^[34], 可能为宣汉-开江古隆起的延伸; 从长沟村野外露头和红坪村野外露头特征来看, 其对沉积物具有一定分隔作用。

2.2 不同沉积充填区存在差异

2.2.1 西部隆起区

该区内葛村剖面更靠近康滇古陆,粉砂岩含量更高,且发育薄层细砂岩,不发育麦地坪组;范店剖面发育12 m厚的麦地坪组。汉深1井以粉砂质泥岩和泥岩为主,显示砂质碎屑供给至汉深1井减弱。井研一犍为地区麦地坪组厚50~80 m,筇竹寺组厚270~380 m,筇竹寺组厚度是麦地坪组的4~6倍,往西麦地坪组尖灭。肖滩地区差异沉降显著,地层变厚,但砂/地比依然较高,且细砂岩发育,往东南砂/地比急速降低,反映西部康滇古陆的影响往东南减弱。总体来看,西部隆起区受西侧康滇古陆持续供源影响,粉砂质和砂质含量较高,在野外露头可以观察到细砂岩;西部隆起区从麦地坪期便接受沉积,只是受控于隆起区的可容空间和沉积古地貌,地层相对较薄,且往西逐渐尖灭。

2.2.2 中-东部隆起区

区域内板凳沟剖面筇竹寺组厚度50 m,未见麦地坪组;庙子湾剖面筇竹寺组厚147 m,同样未见麦地坪组。从不同井中筇竹寺组的砂/地比来看,宣汉地区古隆起存在一定的供源作用,靠近古隆起的磨溪和楼探井区砂/地比较高,远离古隆起的高石、焦石、丁山和庙子湾地区砂/地比较低,且最南部渝参、丁山等井发育灰岩,揭示较浅且缺乏物源供给的沉积环境。总体来看,中-东部隆起区受古陆或古隆起影响较少,主要发育泥岩夹粉砂岩或粉砂质泥岩,局部地区灰质含量增加,甚至沉积灰岩;中-东部隆起区不发育麦地坪组,筇竹寺组厚度大幅度减薄。

2.2.3 北部拗陷区

受司上-万源隆起影响,长沟村和红坪村可容空间存在差异,红坪村发育麦地坪组,筇竹寺组厚度大于500 m,长沟村不发育麦地坪组,筇竹寺组厚度小于300 m。远离物源区,砂/地比逐渐减小,天星1井和西部肖滩类似,反映近源深洼汇砂作用。总体来看,北部拗陷区受北侧古陆影响较少,粉砂质沉积物紧紧围绕古陆分布,未见细砂岩;拗陷区可容空间较大,自下而上沉积麦地坪组和筇竹寺组,且厚度较大。

2.2.4 中部拗陷区

该区对应“绵阳-长宁拉张槽”^[39],中江2井筇竹寺组与麦地坪组的厚度比值较大,反映中部拗陷区在筇

竹寺组沉积期大幅沉降。往南至威远和长宁地区,麦地坪组不发育,筇竹寺组厚度减小至300 m以内,揭示了局部正向构造单元的存在。总体来看,中部拗陷区受到古陆或古隆起的影响较少,以粉砂岩和泥岩为主;除局部区域外,麦地坪组-筇竹寺组均发育,厚度较大。

3 层序地层格架

四川盆地及其周缘目的层范围广且厚度大,在不同地区岩性变化(同期异相),加之缺乏足够的岩矿、地化和骨干地震剖面等资料,仅靠测井曲线形态难以准确划分并追踪层序,常导致“穿层”。本文认为中部拗陷区(威远和长宁地区除外)发育麦地坪组-筇竹寺组,且保存较为完整,可作为层序地层划分和对比标准;从地震反射同相轴特征(图2)来看,越往上地层分布越广,地震反射同相轴追踪范围越大、可比性越强^[8,38]。

3.1 层序界面级别和特征

I级层序界面由构造运动形成,常见大规模不整合面;四川盆地及其周缘发育的地层可划分出6个I级层序,其中寒武系、奥陶系和志留系3套海相沉积地层构成1个I级层序^[27,40],层序界面为大型不整合面,发育风化壳和岩溶古地貌。区域岩性突变面对应沉积环境的巨大改变,一般与局部构造运动有关,是II级和III级层序划分的标志;如寒武系顶、底界均为岩性突变面,且在区域上可追踪对比,据此可将寒武系划分为1个II级层序。

由于筇竹寺组上覆地层沧浪铺组和下伏地层麦地坪组均存在同期异相现象,不同地区岩石学特征存在差异,因此必须在梳理麦地坪组-筇竹寺组分布特征后,才能够开展筇竹寺组内部III级层序研究。

筇竹寺组和沧浪铺组为连续沉积,之间未发现大规模不整合面,但岩性依然存在变化。通过对上扬子地区不同构造-沉积分区内筇竹寺组和沧浪铺组界面特征进行梳理(表1),发现筇竹寺组以泥岩、粉砂岩和粉砂质泥岩为主,沧浪铺组以粉砂岩和碳酸盐岩为主,层序界面清晰。

麦地坪组的情况则复杂得多。受同期异相现象的干扰,不同地区麦地坪组特征差变化大,或与筇竹寺组存在差异,或与筇竹寺组或下伏灯影组差异不大。本文首先对上扬子地区不同构造-沉积分区的麦地坪组野外露头进行梳理(表2)^[41-42],通过对不同地区麦地坪组野外露头岩性和厚度特征分析,解释相邻地区的单

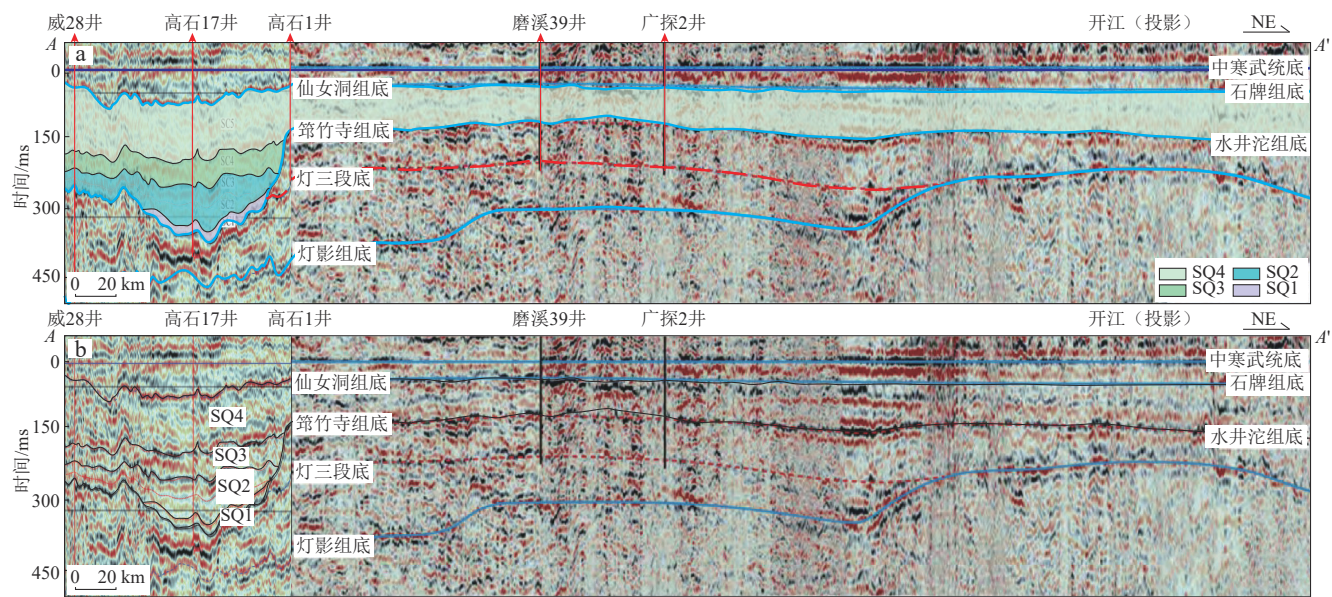


图2 四川盆地及其周缘麦地坪组-筇竹寺组地震剖面特征^[8,38](剖面位置见图1)

Fig. 2 Seismic section characteristics of the Maidiping-Qiongzhusi formations in the Sichuan Basin and on its periphery^[8,38]
(see Fig. 1 for the section location)
a. 层序分布;b. 层序解释
(SQ1—SQ4为Ⅲ级层序。)

表1 四川盆地及其周缘筇竹寺组-沧浪铺组界面特征

Table 1 Boundary signature of the Qiongzhusi-Canglangpu formations in the Sichuan Basin and on its periphery

构造-沉积分区	Ⅲ级层序界面之上	Ⅲ级层序界面之下
中部坳陷区	沧浪铺组粉砂岩	筇竹寺组泥岩
北部坳陷区	沧浪铺组鲕粒灰岩、白云岩	筇竹寺组泥岩
西部隆起区	沧浪铺组砂岩	筇竹寺组泥岩、粉砂质泥岩
中-东部隆起区	沧浪铺组灰岩、粉砂岩	筇竹寺组泥岩、粉砂质泥岩

井剖面,从而在单井上识别麦地坪组。总体来看,虽然麦地坪组存在同期异相现象,但其主要仍是一套含磷岩层,以白云岩和灰岩为主,亦含有硅质泥页岩。麦地坪组在不同地区厚度存在较大差异,鄂西北和黔西北

地区的麦地坪组厚度较薄,滇东、汉中、川西南和川北地区的麦地坪组厚度相对更大。从测井曲线特征来看,川北和川中地区麦地坪组顶部和底部对应GR高值;一般情况下灰岩和白云岩GR值较低,当受到岩溶作用影响时,渗滤黏土往往会充填岩溶孔洞,形成GR峰值,麦地坪组底部和顶部的GR高值可能与桐湾运动Ⅱ幕和Ⅲ幕表生岩溶作用有关。

四川盆地及其周缘筇竹寺组Ⅲ级层序界面识别标志主要包括岩性、颜色、测井曲线、微量元素和古生物等5大类。①岩性:研究区内筇竹寺组各Ⅲ级层序海侵体系域主要发育泥岩,高位体系域主要发育粉砂岩。②颜色:最大海泛面处岩石颜色往往最深。③测井曲

表2 四川盆地及其周缘麦地坪组野外地质特征^[41-42]

Table 2 Outcrop characteristics of the Maidiping Formation in the Sichuan Basin and on its periphery^[41-42]

地区	岩性	厚度/m
滇东大区	澄江	硅质磷块岩、白云岩
	晋宁	白云岩、磷块岩
	禄劝	白云质、硅质磷块岩
	沾益	泥质云岩、硅质岩、硅质磷块岩
川西南、川西和川北大区	凉山、乐山、雅安、德阳、南江、城口	硅质条带白云岩、白云质磷块岩、砂质白云岩
陕南大区	汉中	硅质岩、磷块岩、石灰岩
	安康	灰质白云岩、硅质白云岩、硅质岩
鄂西北大区	神农架、荆门、十堰	白云岩、白云质灰岩
黔西北、黔中大区	遵义、毕节、贵阳	白云岩、磷块岩、硅质岩

线:完整的筇竹寺组内部可见 3 个 GR 曲线尖峰,对应 3 期最大海泛面,指示 3 次海侵—海退过程;CNL 曲线在 SQ2 均值最小,在 SQ4 均值最大,呈现阶梯状;RD/RS 曲线同样呈现阶梯状(图 3)。④微量元素:总体变化不大,海平面上升区域元素含量比值 Sr/Ba 和 V/(V+Ni)略高。⑤古生物:根据彭善池^[43]建立的上扬子地区

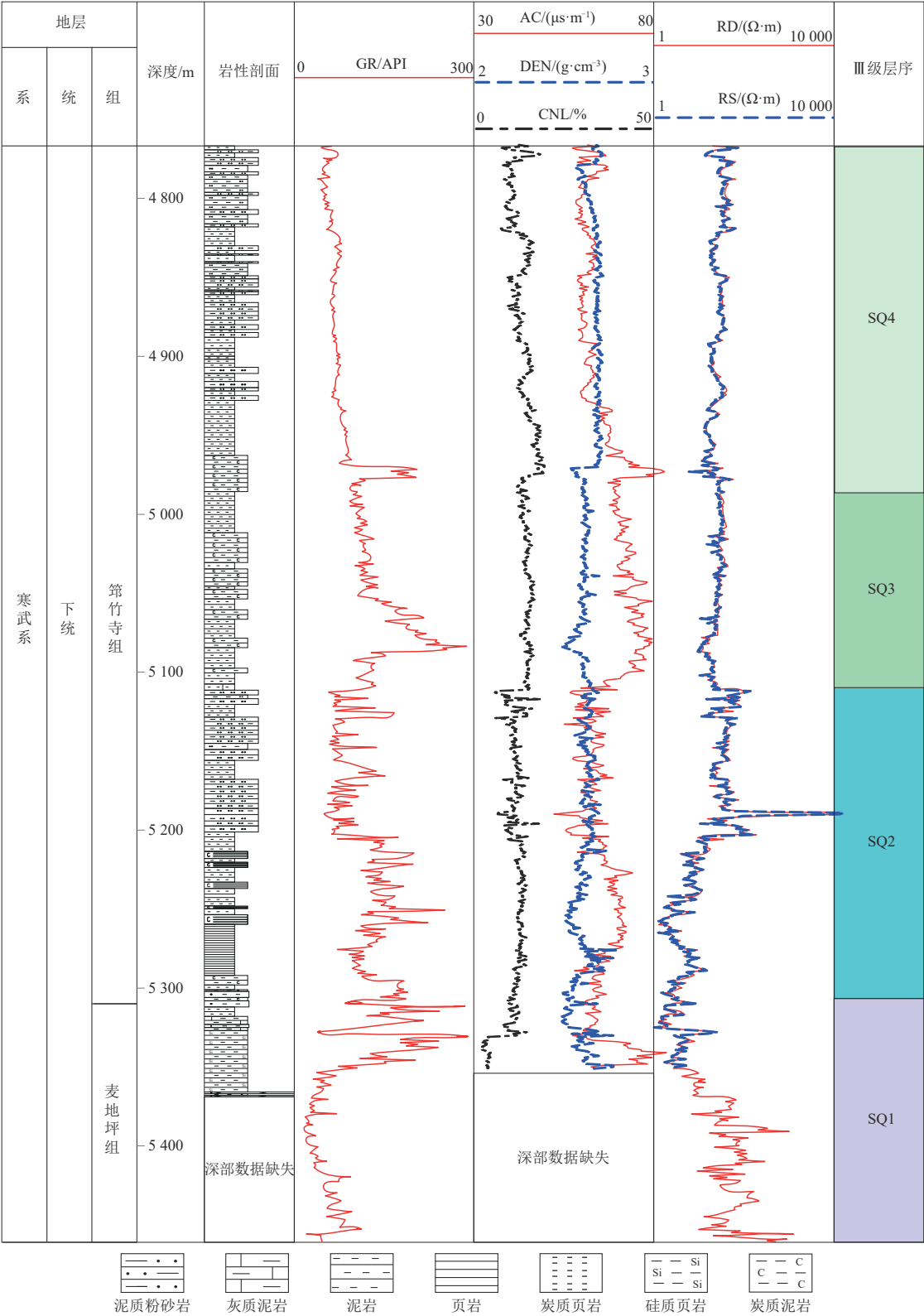


图 3 四川盆地高石 17 井麦地坪组-筇竹寺组Ⅲ级层序岩性和电性特征

Fig. 3 Composite stratigraphic column showing the lithology and well logging characteristics of the third-order sequences of the Maidiping-Qiongzhusi formations in well GS 17, Sichuan Basin

寒武系古生物序列以及相关学术论文,认为麦地坪组的典型特征为大规模出现小壳化石;筇竹寺组的典型特征为下段的化石类型以软舌螺为主,上段则广泛发育三叶虫,典型生物种属大量出现指示层序充填的相对时间。基于上述层序界面识别标志,本文将麦地坪组划分为1个Ⅲ级层序,即SQ1;将筇竹寺组划分为3个Ⅲ级层序,分别为SQ2—SQ4(图3)。

3.2 层序地层划分与分布

基于层序界面标志特征,从中部拗陷开始划分Ⅲ级层序,往四周逐层对比。基于层序地层划分结果明确四川盆地及其周缘不同构造-沉积区层序充填和分布特征。

3.2.1 中部拗陷区

中部拗陷区发育完整的筇竹寺组,其顶界为沧浪铺组粉砂岩,GR曲线齿化显著,地震反射表现为强振幅、高连续,可对比追踪至中-东部隆起区和北部拗陷区(图2)。筇竹寺组底界与麦地坪组含磷、含硅泥岩接触,GR曲线在麦地坪组顶底呈现尖峰,地震反射同相轴局限在拗陷区内,无法外延。

中部拗陷区筇竹寺组厚度平均约550 m,以高石17井和资阳1井为典型代表,岩性组合自下而上为富有机质页岩—泥、砂互层—页岩—泥、砂互层(图3)。必须指出,从测井曲线来看中部拗陷区的SQ2存在两分可能,以高石17井为例,SQ2底部沉积了中-薄层黑色泥页岩,GR曲线呈现中-高值,往上GR曲线数值下降;再往上出现大约50 m厚的高GR值段,随后GR值再次下降。考虑到上述50 m厚的高GR值段在其他地区并未出现,其地质特征亦缺乏其他资料来揭示,故本文暂不将SQ2细分。

3.2.2 北部拗陷区

北部拗陷区筇竹寺组同样发育完整。顶界为沧浪铺组鲕粒灰岩和白云岩,GR值对应降低,地震反射表现为强振幅、高连续,分隔上、下中弱振幅地层,可与中部拗陷区、中-东部隆起区对比。筇竹寺组底界为麦地坪组磷块岩和硅质白云岩,厚度较薄,往南向中部隆起区尖灭,变为灯影组白云岩,GR曲线在麦地坪组顶、底呈现尖峰。

筇竹寺组在北部拗陷区厚度平均约330 m,岩性组合自下而上为富有机质页岩—页岩—泥、砂互层(图4)。天星1井(筇竹寺组厚度592 m)位于北部拗陷区,所处沉积背景、筇竹寺组沉积厚度均与高石17井

(厚度544 m)相似;同样类似的还有川深1井和马深1井。总体来看,北部拗陷区和中部拗陷区层序地层充填和分布特征相似,但碎屑物质来源、可容空间、沉积水体开阔程度等存在一定差异。

3.2.3 西部隆起区

西部隆起区筇竹寺组发育4个Ⅲ级层序,其顶界为沧浪铺组石英砂岩,受岩性变化影响,GR曲线剧烈齿化,筇竹寺组底界为麦地坪组含磷白云岩、含硅泥岩,GR曲线在麦地坪组顶底呈现尖峰,同时在野外露头观察到麦地坪组与筇竹寺组呈不整合接触(图5)。

西部隆起区筇竹寺组厚度平均约300 m,岩性组合自下而上为富有机质页岩—粉砂岩—泥页岩。西部隆起区亦发育SQ1(麦地坪组)(表3),麦地坪组往西朝康滇古陆方向尖灭。对比发现,井研一缝为地区筇竹寺组层序发育特征与中部拗陷区井上显示相似,且厚度变化符合构造-沉积背景,推断井研一缝为地区筇竹寺组普遍发育完整。另一方面,中部拗陷区筇竹寺组与麦地坪组厚度比为2~3,而井研一缝为地区为4~6(图6),反映西部隆起区麦地坪组发育不全;麦地坪期西部隆起区部分区域未接受沉积以及桐湾运动Ⅲ幕对麦地坪组的剥蚀是麦地坪组发育不全的主要原因^[44]。

3.2.4 中-东部隆起区

中-东部隆起区主要发育SQ4,局部低洼处发育薄层SQ3。筇竹寺组顶界为沧浪铺组灰岩和粉砂岩,与筇竹寺组泥岩相比GR值降低且发生齿化,筇竹寺组底界为灯影组白云岩,GR值在界面之下迅速降低,呈现平直状(与麦地坪组截然不同)。筇竹寺组底界面之上可见上超地震反射,揭示地层超覆现象。

中-东部隆起区筇竹寺组整体较薄,厚度平均约150 m,岩性组合自下而上为页岩—泥、砂互层—粉砂岩(中部隆起区)或富有机质页岩—碳酸盐岩(东部隆起区)(图7)。研究认为,虽然从中部隆起区至东部隆起区,目的层岩性发生了显著变化,但该套地层仍属于筇竹寺组SQ4。根据骨干地震剖面的地震反射同相轴能够将高石1井、高石17井等井上层序划分结果延伸到中-东部隆起区(图2);SQ1和SQ2受限于中部拗陷,无法外延,因此中部隆起区主要发育SQ4,局部发育SQ3顶部薄层,继续往东对比,SQ4略有减薄。图2显示开江地区主要发育SQ4,而从开江地区往西北至平昌、往东南至万州和云阳,筇竹寺组厚度都相对稳定,地震反射同相轴连续可追踪且近乎平行^[38],说明中部

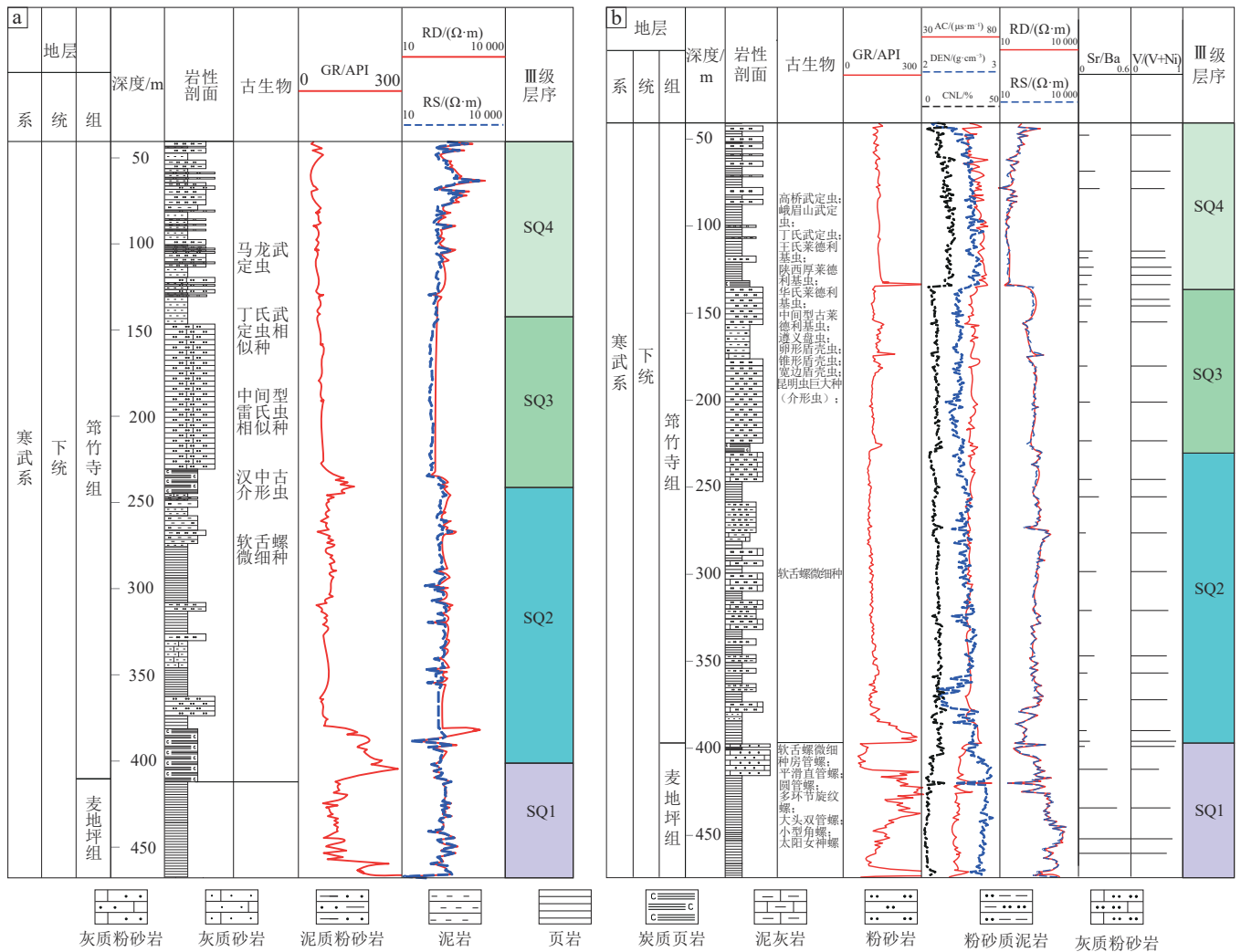


图4 四川盆地北部坳陷区和西部隆起区麦地坪组-筇竹寺组Ⅲ级层序特征

Fig. 4 Characteristics of the third-order sequences of the Maidiping-Qiongzhusi formations in the northern depression and western uplift of the Sichuan Basin

a. 北部坳陷区; b. 西部隆起区

隆起区和东部隆起区区域性发育SQ4,不同地区同期异相。黔江地区以及鄂西地区西蒿坪、大坑垭和走马岭剖面水井沱组(筇竹寺组)直接覆盖于灯影组之上,缺失麦地坪组,且水井沱组(筇竹寺组)化石以三叶虫为主^[48],进一步指示中-东部隆起区主要发育水井沱组(筇竹寺组)上部层序。

3.2.5 整个四川盆地及其周缘区域

麦地坪组对应SQ1,分布十分局限(图8),其纵向厚度不大,最厚处位于高石17—资阳1井区,厚度达到150 m左右,其次为井研—犍为地区,大约80 m。西部隆起区往西、中-东部隆起区不发育麦地坪组。

筇竹寺组对应SQ2—SQ4,自下往上分布范围逐步扩大(图8)。深部SQ2资料少,分布局限且不易落实,

厚度较大处位于中部坳陷区北部,中江2—天星1井区SQ2厚度可达300余米,井研—犍为地区及其南部、城口地区SQ2也十分发育,厚度主要在100~160 m;钻井揭示中部坳陷区南面的长宁和威远次级正向构造单元内SQ2不发育。SQ3在SQ2基础上继承性发育,中部坳陷区和北部坳陷区都是地层发育较厚的地方,厚度普遍达到130~200 m,威远地区SQ3依然较薄,厚度小于100 m,井研—犍为地区SQ3厚度大约100 m;中-东部隆起区可见SQ3分布,丁山1井区不发育SQ3,往东北方向SQ3逐渐增厚,宜昌西部SQ3厚度达到70 m,再往东到宜页1井区SQ3再次尖灭。SQ4在上扬子全区都有分布,厚度差异性较小,最厚处位于中部坳陷区高石17井区以及城口地区,可达200多米,西部隆起区的雷波和中部隆起区的丁山1井、北部坳陷区的马深1井

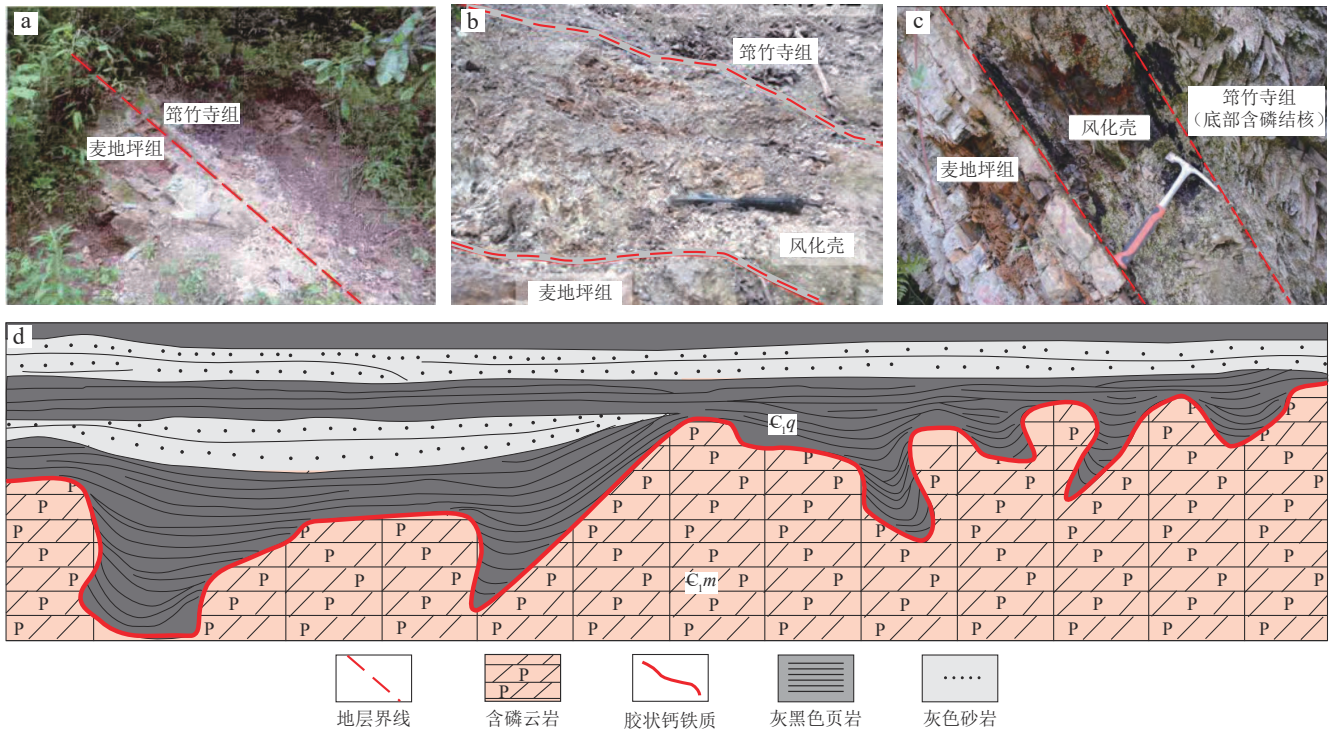


图5 四川盆地及其周缘麦地坪组-筇竹寺组不整合特征剖面示意图

Fig. 5 Sectional unconformity characteristics of the Maidiping-Qiongzhusi formations in the Sichuan Basin and on its periphery

a. 乐山范店剖面; b. 雷波卡哈洛瓦岗剖面^[45]; c. 黔中南麻江基东剖面^[46]; d. 峨嵋高桥剖面^[47]

(C_m , 下寒武统麦地坪组; C_q , 下寒武统筇竹寺组)

表3 四川盆地西部隆起区麦地坪组-筇竹寺组古生物种属

Table 3 Statistics of the paleontological species of the Maidiping-Qiongzhusi formations in the western uplift, Sichuan Basin

地区	筇竹寺组	麦地坪组
峨边	高桥武定虫; 峨眉山武定虫; 丁氏武定虫; 王氏莱德利基虫; 陕西厚莱德利基虫; 华氏莱德利基虫; 张山厚莱德利基虫; 中间型古莱德利基虫; 卵形盾壳虫; 锥形盾壳虫; 宽边盾壳虫; 遵义盘虫; 昆明虫巨大种(介形虫); 软舌螺, 微细种	软舌螺, 微细种; 房管螺; 平滑直管螺; 圆管螺; 多环节旋纹螺; 大头双管螺; 小型角螺; 太阳女神螺

SQ4厚度大多在150~200 m,井研—犍为地区以西地区其厚度较薄(图8),只有数十米,反映了沉积时可容空间有限。

4 层序演化模式

综合构造-沉积背景调研与实际资料分析,基于层序界面和层序地层格架研究认识,建立了起四川盆地及其周缘麦地坪组-筇竹寺组Ⅲ级层序“早期窄盆差异沉积,后期广盆稳定分布”演化模式(图9)。

灯影组碳酸盐岩地层在沉积末期受桐湾运动影响发生抬升,地层广泛遭受表生岩溶作用,发生风化剥蚀,即便是凹槽等负向构造单元,亦发生侵蚀作用^[26]。岩溶斜坡、岩溶洼地等岩溶地貌单元有利于岩溶水的流动和汇聚,进一步加强了碳酸盐岩地层的溶蚀减薄,

加剧了次级负向构造单元彼此分隔,连通性减弱,上扬子地区进入窄盆阶段(图9a)。麦地坪组就是沉积于这样的窄盆时期,发育于不同的次级负向构造单元,彼此连续性较差,平面分布难以准确揭示(图9b)。

桐湾运动Ⅲ幕抬升过程使麦地坪组发生不同程度的剥蚀(图9c),处于正向构造单元的地层剥蚀严重,西部隆起区西侧缺失麦地坪组,野外露头观察到风化壳(图5)。随后上扬子地区差异沉降,西部隆起区和中部拗陷区沉降速度较快,西部隆起区形成西高东低的斜坡,中部拗陷区东侧继承性发育陡坡,而中部隆起区依然是高台地形(图9d),SQ2和SQ3发育于该时期,覆盖了部分西部隆起区和大部分中部拗陷区,在中部隆起区则未沉积(图9e)。SQ4沉积于上扬子地区广盆阶段,该阶段构造作用持续减弱,沉积差异性也随之减弱,SQ4全区分布,厚度较为均匀(图9f)。

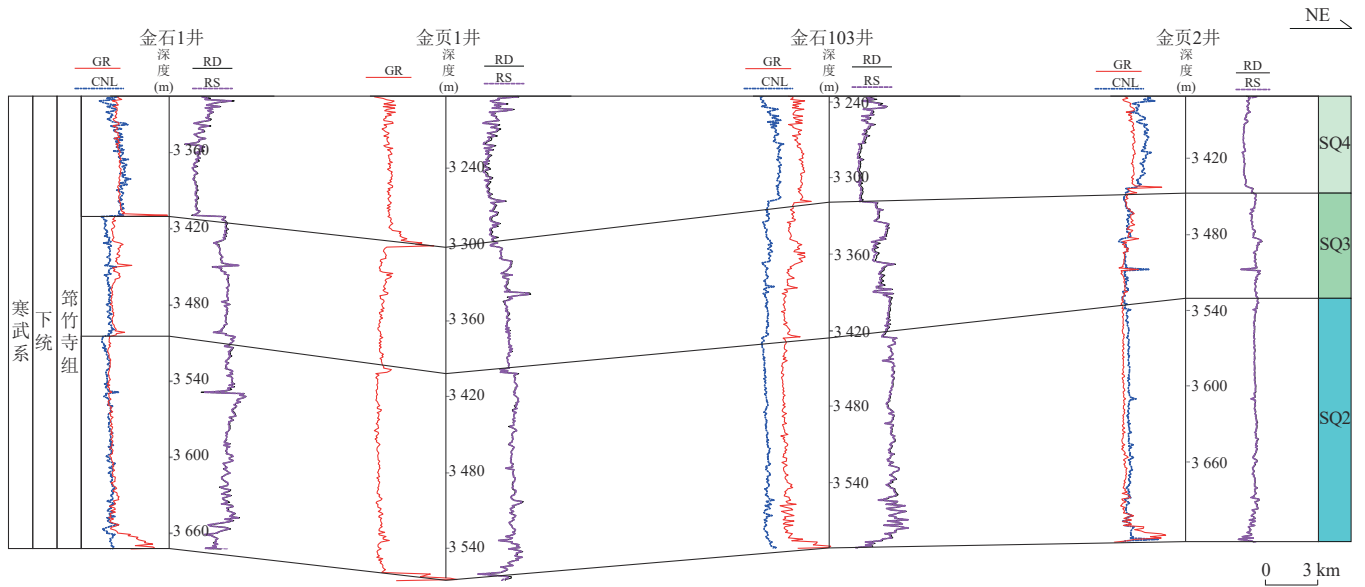


图6 四川盆地井研一犍为地区筇竹寺组Ⅲ级层序划分和对比

Fig. 6 Division and correlation of the third-order sequences of the Qiongzhusi Formation in Jingyan-Qianwei area, Sichuan Basin

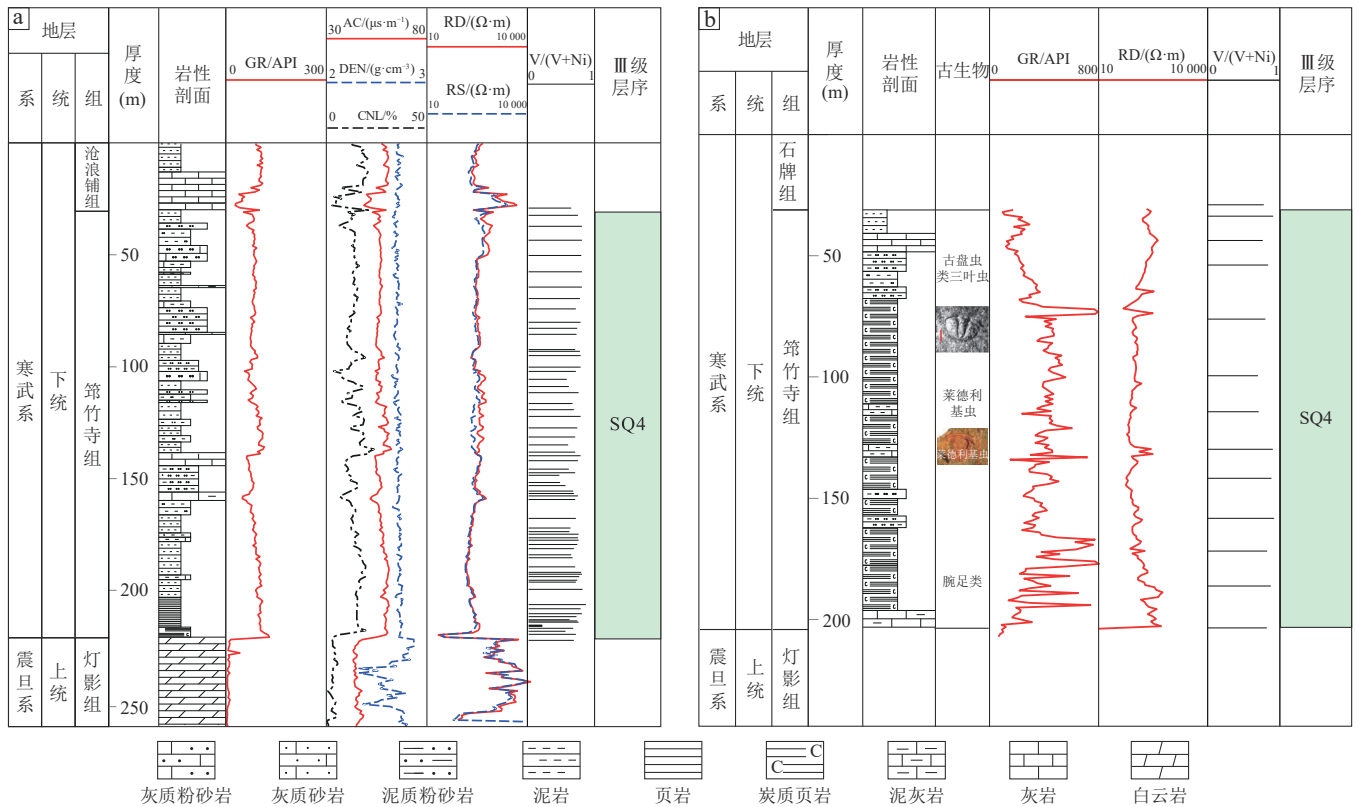


图7 四川盆地中部隆起区和东部隆起区筇竹寺组Ⅲ级层序特征(古生物资料据文献[48]修改)

Fig. 7 Characteristics of the third-order sequences of the Qiongzhusi Formation in the central and eastern uplifts, Sichuan Basin (paleontological data modified after reference [48])

a. 中部隆起区; b. 东部隆起区

5 结论

1) 在明确早寒武世物源供给和不同构造分区沉

积充填差异的基础上,从中部拗陷开始划分Ⅲ级层序,往四周逐层对比,避免早期沉降差异造成的底部层序难以追踪对比,也避免不同构造-沉积区内同期异相造成层序界面变化而形成“穿层”。根据岩性、颜色、测

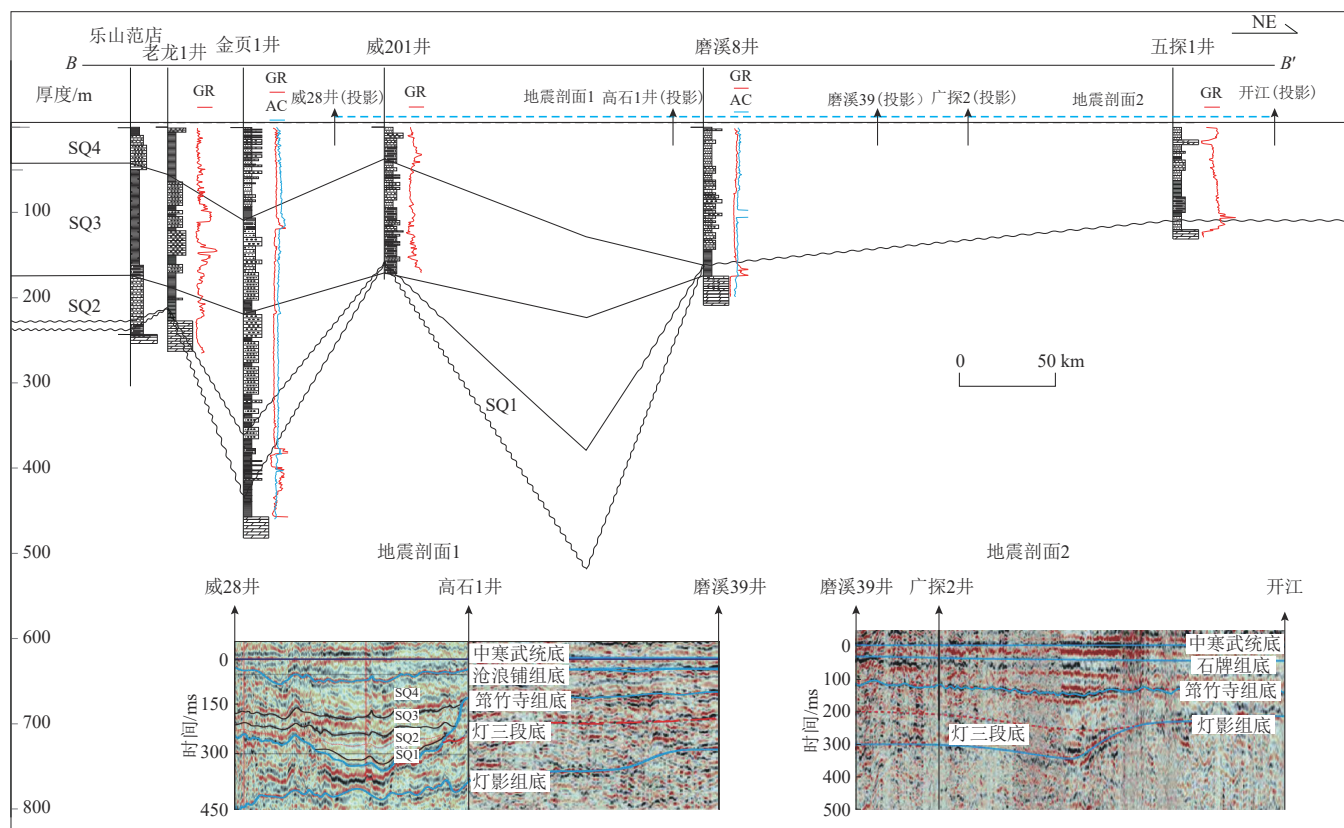


图8 四川盆地麦地坪组-筇竹寺组南西-北东向多井-地震-露头综合对比剖面(剖面位置见图1)

Fig. 8 Correlation section of wells, seismic reflection event and outcrop in southwest-northeast direction of the Maidiping-Qiongzhusi formations, Sichuan Basin (see Fig. 1 for the section location)

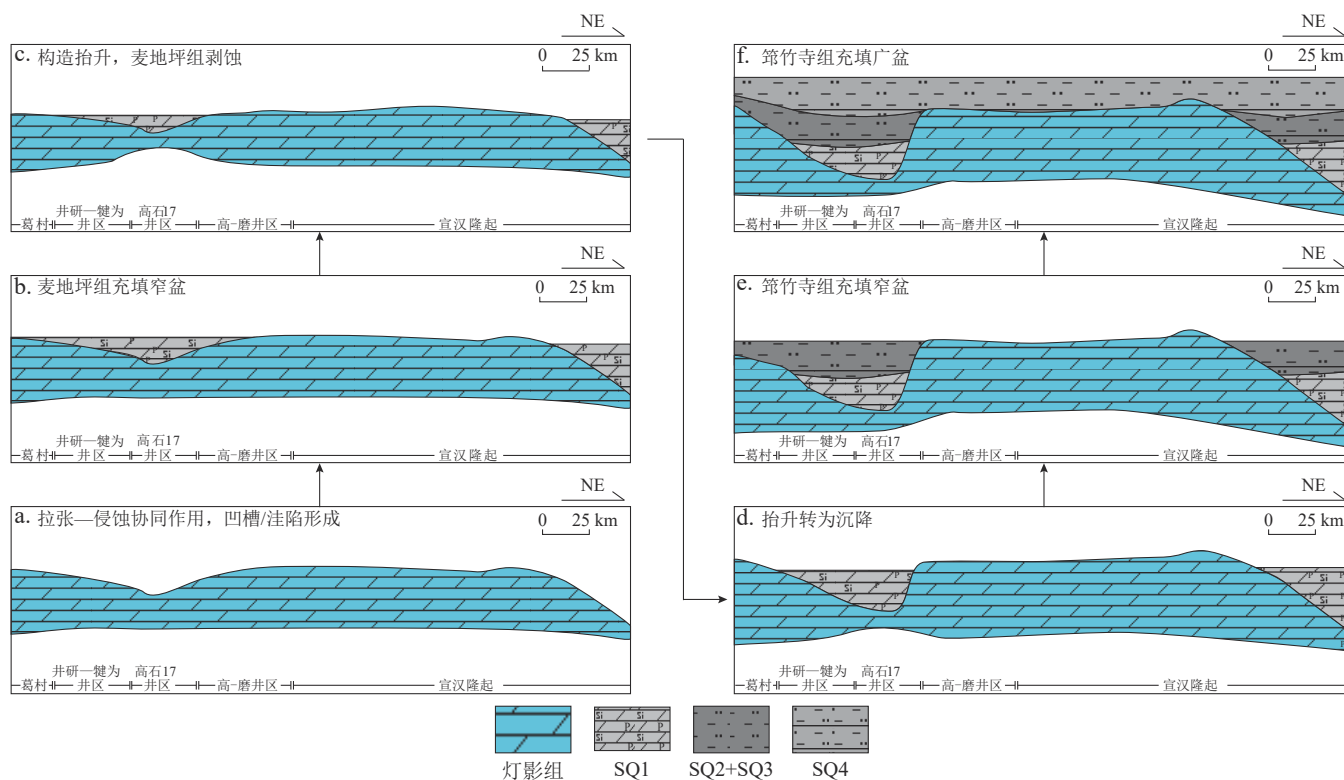


图9 四川盆地及其周缘麦地坪组-筇竹寺组层序演化模式

Fig. 9 Diagram showing the sequence evolutionary model of the Maidiping-Qiongzhusi formations in the Sichuan Basin and on its periphery

井曲线、微量元素、古生物和地震反射同相轴等特征,将麦地坪组-筇竹寺组自下往上依次划分为SQ1, SQ2, SQ3和SQ4共4个Ⅲ级层序。

2) SQ1分布有限,不同地区厚度差异较大,反映了麦地坪期不同构造-沉积区相对独立的特征;SQ2分布依然有限,但厚度迅速增大,且不同构造-沉积区厚度差异较大,反映了筇竹寺组沉积早期强烈的差异沉降;SQ3分布范围逐步扩大,在隆起区的低洼地带局部发育;SQ4则充填整个四川盆地及其周缘地区,厚度相对较薄且整体变化不大,反映了筇竹寺组沉积晚期区域性的、平稳的沉降过程。

3) 基于上述认识,本文最终建立了在全球板块张性活动控制下的四川盆地及其周缘麦地坪组-筇竹寺组Ⅲ级层序“早期窄盆差异沉积,后期广盆稳定分布”演化模式。

参 考 文 献

- [1] 王阳,陈洁,胡琳,等. 沉积环境对页岩气储层的控制作用——以中下扬子区下寒武统筇竹寺组为例[J]. 煤炭学报, 2013, 38(5): 845-850.
WANG Yang, CHEN Jie, HU Lin, et al. Sedimentary environment control on shale gas reservoir: A case study of Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in the Middle Lower Yangtze area [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(5): 845-850.
- [2] 熊亮,杨振恒,申宝剑,等. 川南威荣地区五峰组-龙马溪组深层页岩气微观储集空间发育特征及意义[J]. 天然气地球科学, 2022, 33(6): 860-872.
XIONG Liang, YANG Zhenheng, SHEN Baojian, et al. Micro reservoir space characteristics and significance of deep shale gas in Wufeng-Longmaxi formations in Weirong area, South Sichuan [J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(6): 860-872.
- [3] 何治亮,聂海宽,蒋廷学. 四川盆地深层页岩气规模有效开发面临的挑战与对策[J]. 油气藏评价与开发, 2021, 11(2): 135-145, 175.
HE Zhiliang, NIE Haikuan, JIANG Tingxue. Challenges and countermeasures of effective development with large scale of deep shale gas in Sichuan Basin [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(2): 135-145, 175.
- [4] 葛勋,郭彤楼,马永生,等. 四川盆地东南缘林滩场地区上奥陶统五峰组-龙马溪组页岩气储层甜点预测[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(3): 633-647.
GE Xun, GUO Tonglou, MA Yongsheng, et al. Prediction of shale reservoir sweet spots of the Upper Ordovician Wufeng-Longmaxi formations in Lintanchang area, southeastern margin of Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(3): 633-647.
- [5] 王濡岳,胡宗全,包汉勇,等. 四川盆地上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组页岩关键矿物成岩演化及其控储作用[J]. 石油实验地质, 2021, 43(6): 996-1005.
WANG Ruyue, HU Zongquan, BAO Hanyong, et al. Diagenetic evolution of key minerals and its controls on reservoir quality of Upper Ordovician Wufeng-Lower Silurian Longmaxi shale of Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2021, 43(6): 996-1005.
- [6] 刘忠宝,杜伟,高波,等. 层序格架中富有机质页岩发育模式及差异分布:以上扬子下寒武统为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2018, 48(1): 1-14.
LIU Zhongbao, DU Wei, GAO Bo, et al. Sedimentary model and distribution of organic-rich shale in the sequence stratigraphic framework: A case study of Lower Cambrian in Upper Yangtze region [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2018, 48(1): 1-14.
- [7] 范海经,邓虎成,伏美燕,等. 四川盆地寒武统筇竹寺组沉积特征及其对构造的响应[J]. 沉积学报, 2021, 39(4): 1004-1019.
FAN Haijing, DENG Hucheng, FU Meiyuan, et al. Sedimentary characteristics of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in the Sichuan Basin and its response to construction [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39(4): 1004-1019.
- [8] 赵立可,李文皓,和源,等. 四川盆地麦地坪组-筇竹寺组沉积充填规律及勘探意义[J]. 天然气勘探与开发, 2020, 43(3): 30-38.
ZHAO Like, LI Wenhao, HE Yuan, et al. Sedimentation and filling laws of Maidiping-Qiongzhusi formations in Sichuan Basin and their significance of oil and gas geological exploration [J]. Natural Gas Exploration and Development, 2020, 43(3): 30-38.
- [9] 李依林,伏美燕,邓虎成,等. 滨岸闭塞环境中有机质富集模式——以川西南峨边葛村剖面筇竹寺组为例[J]. 天然气地球科学, 2022, 33(4): 588-604.
LI Yilin, FU Meiyuan, DENG Hucheng, et al. The enrichment model of organic matter in the coastal detention environment: Case study of the Qiongzhusi Formation in the Gecun section of Ebian in southwestern Sichuan Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(4): 588-604.
- [10] 谢环羽,姜在兴,王培玺,等. 中-上扬子地区寒武系层序地层格架[J]. 石油学报, 2021, 42(7): 865-884.
XIE Huanyu, JIANG Zaixing, WANG Peixi, et al. Cambrian sequence stratigraphic framework in the Middle-Upper Yangtze area [J]. Acta Petroli Sinica, 2021, 42(7): 865-884.
- [11] 付小东,陈娅娜,罗冰,等. 中上扬子区下寒武统麦地坪组-筇竹寺组烃源岩与含油气系统评价[J]. 中国石油勘探, 2022, 27(4): 103-120.
FU Xiaodong, CHEN Yana, LUO Bing, et al. Evaluation of source rocks and petroleum system of the Lower Cambrian Maidiping Formation-Qiongzhusi Formation in the Middle-Upper Yangtze region [J]. China Petroleum Exploration, 2022, 27(4): 103-120.
- [12] 刘双莲. 页岩气“双甜点”参数测井评价方法[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(4): 1005-1012.
LIU Shuanglian. Logging evaluation of “double sweet spot” in shale gas reservoirs [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(4): 1005-1012.
- [13] 李智武,冉波,肖斌,等. 四川盆地北缘震旦纪一早寒武世隆一坳格局及其油气勘探意义[J]. 地学前缘, 2019, 26(1):

- 59-85.
- LI Zhiwu, RAN Bo, XIAO Bin, et al. Sinian to Early Cambrian uplift-depression framework along the northern margin of the Sichuan Basin, central China and its implications for hydrocarbon exploration[J]. *Earth Science Frontiers*, 2019, 26(1): 59-85.
- [14] 李晓霞, 谷渊涛, 万泉, 等. 泥页岩中有机质-黏土复合体的微观结构、变形作用及源-储意义[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(2): 452-467.
- LI Xiaoxia, GU Yuantao, WAN Quan, et al. Micro-architecture, deformation and source-reservoir significance of organic-clay composites in shale[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(2): 452-467.
- [15] 胡宗全, 杜伟, 朱彤, 等. 四川盆地及其周缘五峰组-龙马溪组细粒沉积的层序地层与岩相特征[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(5): 1024-1038.
- HU Zongquan, DU Wei, ZHU Tong, et al. Sequence stratigraphy and lithofacies characteristics of fine-grained deposits of Wufeng-Longmaxi formations in the Sichuan Basin and on its periphery[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(5): 1024-1038.
- [16] 杜伟, 胡宗全, 刘光祥, 等. 四川盆地及周缘上奥陶统五峰组岩相特征[J]. *石油实验地质*, 2020, 42(3): 398-404.
- DU Wei, HU Zongquan, LIU Guangxiang, et al. Lithofacies of Upper Ordovician Wufeng formation in Sichuan Basin and its periphery[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2020, 42(3): 398-404.
- [17] 黎茂稳, 马晓潇, 金之钧, 等. 中国海、陆相页岩层系岩相组合多样性与非常规油气勘探意义[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(1): 1-25.
- LI Maowen, MA Xiaoxiao, JIN Zhijun, et al. Diversity in the lithofacies assemblages of marine and lacustrine shale strata and significance for unconventional petroleum exploration in China[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(1): 1-25.
- [18] CAWOOD P A, PISAREVSKY S A. Was Baltica right-way-up or upside-down in the Neoproterozoic?[J]. *Journal of the Geological Society*, 2006, 163(5): 753-759.
- [19] 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.
- [20] 李江海, 姜洪福. 全球古板块再造、岩相古地理及古环境图集[M]. 北京: 地质出版社, 2013: 1-127.
- LI Jianghai, JIANG Hongfu. World atlas of plate tectonic reconstruction, lithofacies paleogeography and palaeoenvironment[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2013: 1-127.
- [21] ZHAO Hanqing, ZHANG Shihong, ZHU Maoyan, et al. Paleomagnetic insights into the Cambrian biogeographic conundrum: Did the North China craton link Laurentia and East Gondwana?[J]. *Geology*, 2021, 49(4): 372-376.
- [22] 钟勇, 李亚林, 张晓斌, 等. 四川盆地地下组合张性构造特征[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2013, 40(5): 498-510.
- ZHONG Yong, LI Yalin, ZHANG Xiaobin, et al. Features of extensional structures in pre-Sinian to Cambrian strata, Sichuan Basin, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2013, 40(5): 498-510.
- [23] 罗超. 上扬子地区下寒武统牛蹄塘组页岩特征研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2014.
- LUO Chao. Geological characteristics of gas shale in the Lower Cambrian Niutitang Formation of the Upper Yangtze platform[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014.
- [24] 刘树根, 孙玮, 罗志立, 等. 兴凯地裂运动与四川盆地地下组合油气勘探[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2013, 40(5): 511-520.
- LIU Shugen, SUN Wei, LUO Zhili, et al. Xingkai taphrogenesis and petroleum exploration from Upper Sinian to Cambrian Strata in Sichuan Basin, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2013, 40(5): 511-520.
- [25] 刘树根, 王—刚, 孙玮, 等. 拉张槽对四川盆地海相油气分布的控制作用[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2016, 43(1): 1-23.
- LIU Shugen, WANG Yigang, SUN Wei, et al. Control of intracratonic sags on the hydrocarbon accumulations in the marine strata across the Sichuan Basin, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2016, 43(1): 1-23.
- [26] 李双建, 高平, 黄博宇, 等. 四川盆地绵阳-长宁凹槽构造演化的沉积约束[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(5): 889-898.
- LI Shuangjian, GAO Ping, HUANG Boyu, et al. Sedimentary constraints on the tectonic evolution of Mianyang-Changning trough in the Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(5): 889-898.
- [27] 何登发, 李英强, 黄涵宇, 等. 四川多旋回叠合盆地的形成演化与油气聚集[M]. 北京: 科学出版社, 2020: 1-569.
- HE Dengfa, LI Yingqiang, HUANG Hanyu, et al. The formation, evolution and oil and gas accumulation of polycyclic superimposed basins in Sichuan[M]. Beijing: Science Press, 2020: 1-569.
- [28] 杨雨, 罗冰, 张本健, 等. 四川盆地地下寒武统筇竹寺组页岩有机质差异富集机制与天然气勘探领域[J]. *石油实验地质*, 2021, 43(4): 611-619.
- YANG Yu, LUO Bing, ZHANG Benjian, et al. Differential mechanisms of organic matter accumulation of source rocks in the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation and implications for gas exploration fields in Sichuan Basin[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2021, 43(4): 611-619.
- [29] 赵建华, 金之钧, 林畅松, 等. 上扬子地区下寒武统筇竹寺组页岩沉积环境[J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(4): 701-715.
- ZHAO Jianhua, JIN Zhijun, LIN Changsong, et al. Sedimentary environment of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation shale in the Upper Yangtze region[J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(4): 701-715.
- [30] 邹才能, 董大忠, 王玉满, 等. 中国页岩气特征、挑战及前景(二)[J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(2): 166-178.
- ZOU Caineng, DONG Dazhong, WANG Yuman, et al. Shale gas in China: Characteristics, challenges and prospects (II) [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(2): 166-178.
- [31] 王玉满, 沈均均, 邱振, 等. 中上扬子地区下寒武统筇竹寺组

- 结核体发育特征及沉积环境意义[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(9): 1308-1323.
- WANG Yuman, SHEN Junjun, QIU Zhen, et al. Characteristics and environmental significance of concretion in the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in the Middle-Upper Yangtze area [J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(9): 1308-1323.
- [32] 曾忻耕. 康滇构造带的成矿作用与地壳演化历史[J]. 大地构造与成矿学, 1986, 10(3): 295-302.
- CENG Xingeng. Metallogenesis and crustal evolution of the Kang-Dian tectonic zone [J]. Geotectonica et Metallogenia, 1986, 10(3): 295-302.
- [33] 付坤荣. 康滇裂谷充填序列关键层位定年、沉积地质特征及其大地构造意义[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
- FU Kunrong. Dating of the key formations, sedimentary geological characteristics and the tectonic significance of rift filling sequence in Kangdian rift [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.
- [34] 郭正吾, 邓康龄, 韩永辉, 等. 四川盆地形成与演化[M]. 北京: 地质出版社, 1996: 1-200.
- GUO Zhengwu, DENG Kangling, HAN Yonghui, et al. The formation and development of Sichuan Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996: 1-200.
- [35] 陈洪德, 郭彤楼. 中上扬子叠合盆地沉积充填过程与物质分布规律[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 1-461.
- CHEN Hongde, GUO Tonglou. Sedimentary filling process and material distribution patterns in the superimposed basins of the middle and upper Yangtze River [M]. Beijing: Science Press, 2012: 1-461.
- [36] 刘仿韩, 苏春乾, 杨友运, 等. 米仓山南坡寒武系沉积相分析[J]. 西安地质学院学报, 1987, 9(4): 1-12.
- LIU Fanghan, SU Chunqian, YANG Youyun, et al. Sedimentary facies analysis of Cambrian in the South of Micang Mountain [J]. Journal of Xi'an College of Geology, 1987, 9(4): 1-12.
- [37] 余宽宏, 金振奎, 苏奎, 等. 中、上扬子地台北缘寒武纪沉积特征及油气勘探意义[J]. 中国科学: 地球科学, 2013, 43(9): 1418-1435.
- YU Kuanhong, JIN Zhenkui, SU Kui, et al. The Cambrian sedimentary characteristics and their implications for oil and gas exploration in north margin of Middle-Upper Yangtze plate [J]. Scientia Sinica(Terrae), 2013, 43(9): 1418-1435.
- [38] 谷志东, 殷积峰, 姜华, 等. 四川盆地宣汉—开江古隆起的发现及意义[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(6): 893-904.
- GU Zhidong, YIN Jifeng, JIANG Hua, et al. Discovery of Xuanhan-Kaijiang paleouplift and its significance in the Sichuan Basin, SW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(6): 893-904.
- [39] 刘树根, 刘殊, 孙玮, 等. 绵阳—长宁拉张槽北段构造—沉积特征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2018, 45(1): 1-13.
- LIU Shugen, LIU Shu, SUN Wei, et al. Tectonic and sedimentary features of the northern Mianyang-Changning intracratonic sag, Sichuan, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2018, 45(1): 1-13.
- [40] 郑和荣, 胡宗全. 中国前中生代构造—岩相古地理图集[M]. 北京: 地质出版社, 2010.
- ZHENG Herong, HU Zongquan. Atlas of pre Mesozoic tectonic lithofacies and paleogeography in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010.
- [41] 陈吉艳, 杨瑞东, 张杰. 扬子区寒武系底部含磷岩系沉积及元素地球化学特征[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- CHEN Jiyan, YANG Ruidong, ZHANG Jie. Sedimentary and element geochemical characteristics of phosphorous rock series at the bottom of Cambrian in Yangtze region [M]. Beijing: Science Press, 2019.
- [42] 陈孝红, 王传尚, 刘安, 等. 宜昌地区寒武系页岩气富集成藏与勘探实践[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- CHEN Xiaohong, WANG Chuanshang, LIU An, et al. Enrichment, accumulation and exploration of Cambrian shale gas in Yichang area [M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [43] 彭善池. 华南新的寒武纪生物地层序列和年代地层系统[J]. 科学通报, 2009, 54(18): 2691-2698.
- PENG Shanchi. The newly-developed Cambrian biostratigraphic succession and chronostratigraphic scheme for South China [J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(18): 2691-2698.
- [44] 武赛军, 魏国齐, 杨威, 等. 四川盆地关键构造变革期不整合特征及其油气地质意义[J]. 科技导报, 2015, 33(10): 93-100.
- WU Saijun, WEI Guoqi, YANG Wei, et al. Unconformity characteristics and its petroleum geological implication in key tectonic change stages, Sichuan Basin [J]. Science & Technology Review, 2015, 33(10): 93-100.
- [45] 黄博宇. 四川盆地震旦纪—早寒武世岩相古地理与裂陷槽演化[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2018.
- HUANG Boyu. The evolution of paleogeographic and rift trough during Sinian-Early Cambrian in Sichuan Basin [D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2018.
- [46] 汪泽成, 姜华, 王铜山, 等. 四川盆地桐湾期古地貌特征及成藏意义[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(3): 305-312.
- WANG Zecheng, JIANG Hua, WANG Tongshan, et al. Paleogeomorphology formed during Tongwan tectonization in Sichuan Basin and its significance for hydrocarbon accumulation [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(3): 305-312.
- [47] 王同. 川南地区下寒武统麦地坪组—筇竹寺组储层特征及形成机理研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.
- WANG Tong. Reservoir characteristics and formation mechanism of the Lower Cambrian Maidiping-Qiongzhusi Formation in Southern Sichuan [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016.
- [48] 石欢. 鄂西地区寒武纪早期生物组合及环境演化特征[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016.
- SHI Huan. Biotic assemblages and paleoenvironment characteristics in the Early Cambrian of Western Hubei, China [D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2016.