

川北地区下寒武统筇竹寺组沉积特征 及对构造演化的启示*

张明何¹ 戎 佳² 刘自亮¹ 高 波² 罗怡鑫¹ 刘李铭¹

1 成都理工大学油气藏地质及开发工程全国重点实验室, 四川成都 610059

2 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 102206

摘 要 四川盆地下寒武统筇竹寺组是海相深层页岩气勘探的重点层系, 明确其沉积特征和充填演化过程对储集层评价和有利区预测具有指导作用。基于野外地质调查和钻测井资料, 通过野外自然伽马数据采集、岩石薄片观察、全岩 X 射线衍射及总有机碳含量 (TOC) 测定等分析测试手段, 系统讨论了川北地区下寒武统筇竹寺组发育特征、沉积相时空分布演化规律及其对区域构造演化的启示。结果表明: (1) 川北地区筇竹寺组在纵向上呈现“早期较薄、晚期较厚”的特征, 平面上呈现南西厚、北东薄的特征。(2) 研究区筇竹寺组主要发育陆棚沉积体系, 可进一步细分为 7 种沉积微相, 由北向南依次发育古陆—滨岸—砂质浅水陆棚 (或灰泥质浅水陆棚)—砂泥质浅水陆棚—泥质深水陆棚 (或硅泥质深水陆棚) 沉积体系。(3) “槽—隆—坳”控制下的古地理格局是筇竹寺组沉积相带差异性分布的主要控制因素, 海平面升降和古气候演变控制了筇竹寺组在纵向上具旋回式沉积的特点。

关键词 沉积特征 构造演化 筇竹寺组 寒武系 四川盆地

第一作者简介 张明何, 男, 1999 年生, 博士研究生, 研究方向为沉积学。E-mail: 1102553662@qq.com。

通讯作者简介 刘自亮, 男, 1978 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事沉积学与储层地质学方面的教学与科研工作。E-mail: bugliu2001@163.com。

中图分类号: P512.2 文献标志码: A

Sedimentary characteristics of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in northern Sichuan Basin and their implications for tectonic evolution

ZHANG Minghe¹ RONG Jia² LIU Ziliang¹ GAO Bo² LUO Yixin¹ LIU Liming¹

1 State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

2 Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 102206, China

Abstract The Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in Sichuan Basin is a key target for marine deep shale gas exploration. Clarifying its sedimentary characteristics and filling evolution is crucial for guiding reservoir evaluation and favorable zone prediction. Through integrated field geological surveys, borehole data, and analytical techniques—including in-situ gamma-ray logging, petrographic thin-section

* 新型油气勘探开发国家科技重大专项 (编号: 2025ZD1403906) 和国家自然科学基金项目 (编号: 42272183) 联合资助。[Co-funded by the National Key Science and Technological Program for New Oil and Gas Exploration and Development (No. 2025ZD1403906) and National Natural Science Foundation of China (No. 42272183)]

收稿日期: 2025-12-29 改回日期: 2026-01-30

analysis, whole-rock X-ray diffraction, and total organic carbon (TOC) measurement—this study systematically discusses the development characteristics, spatiotemporal distribution and evolution of sedimentary facies of the Qiongzhusi Formation in the northern Sichuan Basin, as well as its implications for regional tectonic evolution. Key findings include: (1) The formation thickens upward in vertical section and exhibits a southwestward-thickening, northeastward-thinning trend in plan view. (2) A shelf depositional system prevailed during the Qiongzhusi period, subdivided into seven microfacies that collectively form a north-to-south transect: paleo-uplift (source area) –shoreface-sandy shallow shelf (or calcareous-muddy shallow shelf) –sandymuddy shallow shelf-muddy deep shelf (or siliceousmuddy deep shelf). (3) The differential distribution of the Qiongzhusi Formation was primarily governed by an “intracratonic sag-uplift-depression” paleogeographic framework, whereas its vertical cyclicity reflects superimposed controls by eustatic fluctuations and paleoclimatic shifts.

Key words sedimentary characteristics, tectonic evolution, Qiongzhusi Formation, Cambrian, Sichuan Basin

About the first author Zhang Minghe, born in 1999, Ph.D. candidate, is engaged in research on sedimentology. E-mail: 1102553662@qq.com.

About the corresponding author Liu Ziliang, born in 1978, professor, doctoral supervisor, is mainly engaged in teaching and researches on sedimentology and reservoir geology. E-mail: bugliu2001@163.com.

0 引言

埃迪卡拉纪（震旦纪）—寒武纪（E-C 过渡）被认为是地质历史上记录后生动物爆炸辐射的一个非常重要的时期，同时也是从以微生物为主导的前寒武纪生态系统向以动物为特征的显生宙生态系统转变的重要转折期，被称为“寒武纪大爆炸”（Shu *et al.*, 2014；王华建等，2024）。该时期华南从埃迪卡拉纪末期碳酸盐台地向寒武纪初期深水陆棚的沉积环境转变（Wang *et al.*, 2023），不仅记录了原特提斯洋俯冲和泛非造山运动背景下扬子板块西北缘一系列隆—坳相间的古地理格局演化（汪正江等，2022；Gu *et al.*, 2023；Han *et al.*, 2025；Wang *et al.*, 2025；张帅等，2025），也提供了从物源—沉积动力耦合视角揭示早寒武世细粒沉积充填过程的良好素材。准确解析研究区早寒武世细粒沉积的构造—沉积响应过程，可为恢复扬子板块西北缘筇竹寺组差异沉积的动力学机制提供依据。

四川盆地下寒武统筇竹寺组广泛发育富有机质页岩，具有生烃条件好、有机质丰度高、分布面积广和资源潜力大等特点（胡琳等，2012；燕继红等，2016；张明何等，2024），近年来已经在川西南地区的金石 103HF 井（ $25.86 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ）（戴金星等，2022）、资 201 井（ $73.88 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ）（李敏等，

2023）、金页 3HF 井（ $82.62 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ）（Yong *et al.*, 2024）和资阳 2 井（ $125.76 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ）（樊大磊等，2025）取得了勘探突破，显示了巨大的页岩气资源潜力。同时，川北地区的陕镇页 1 井、城浅 1 井和镇地 1 井等多口浅井均有较好的页岩气显示（陈相霖等，2018；余川等，2020；邹才能等，2024），揭示了川北地区有可能成为筇竹寺组页岩气勘探开发的重要接替区域。前人针对川北地区筇竹寺组的岩相及储集层特征（焦堃等，2022；师文文等，2022；张明何等，2024）、有机地球化学及古环境演化（刘慧萍等，2025；王佳乐等，2026）等方面进行了深入研究，然而，川北地区处于米仓山—大巴山山前带，构造条件与沉积体系复杂，地层非均质性较强（江凯禧等，2014；范海经等，2021），但前人的研究多聚焦于单一维度，缺乏对复杂构造背景下的地层对比、沉积相时空演化及充填过程的系统性分析，制约了对川北地区筇竹寺组富有机质页岩发育、沉积和保存机制的整体认识。

在前人研究成果的基础上，本研究以川北地区多条筇竹寺组野外地质剖面资料为基础，结合研究区及其周缘多口钻井资料及分析测试数据，系统开展了地层划分、沉积相分布规律和沉积过程分析。本研究阐明了在“槽—隆—坳”复杂构造背景下

沉积相带的时空展布规律，明确了富有机质页岩的发育环境与分布模式，揭示出沉积有机质富集与构造演化的耦合关系，可为川北地区筇竹寺组页岩气有利区预测与风险勘探提供地质依据。

1 地质概况

四川盆地北部处于扬子地块西北缘，一般认为是前寒武纪罗迪尼亚超大陆的一部分 (Zhou *et al.*, 2008)。研究区位于川北米仓山构造带及其周缘地区，北邻碧口地块和汉南古陆，南接川北缓变形区，东靠大巴山前陆冲断带，西毗松潘—甘孜褶皱带和龙门山陆内复合造山带，是一个历经扬子板块与华北板块碰撞拼接、多期构造运动叠加改造的前陆挤压变形区 (孙东, 2011; 汤聪等, 2011)，总体呈现“南北分带、东西分块”的构造格局 (图 1-a)。

早寒武世，川北地区继承了震旦纪末期凹凸不平的沉积基底。随着绵阳—长宁拉张槽、前陆坳陷的发育 (燕继红等, 2016; 张明何等, 2024)，以及研究区北部汉南古陆和摩天岭古陆的持续性隆升 (谷志东等, 2016; 张英利等, 2018)，在川北地

区进一步形成了“槽—隆—坳”相间的裂谷盆地格局 (图 1-a)。研究区广泛发育震旦系—寒武系，其中下寒武统 (纽芬兰统和第二统) 自下而上又分为麦地坪组、筇竹寺组、沧浪铺组以及龙王庙组 (图 1-b)。受早寒武世大规模海侵影响，筇竹寺组主要发育陆棚沉积体系，深水陆棚沉积广泛，由北向南依次为滨岸—浅水陆棚—深水陆棚沉积 (图 1-a)。底部岩性以灰黑色泥页岩、含粉砂页岩为主，向上粉砂含量增多，并过渡为深灰色、灰色泥质粉砂岩和粉砂岩 (图 1-c)。

2 地层划分与对比

基于 15 条野外剖面 and 钻井资料 (图 1-a)，从岩性特征、U 元素序列及总有机碳含量等方面系统总结了川北地区筇竹寺组的地层叠置样式和沉积序列特征。筇竹寺组主要发育一套海相泥页岩和碎屑岩沉积，自下而上由 4 个由细变粗的次级旋回组成，分别对应第一上亚段、第一下亚段、第二段及第三段 (图 2; 图 3-a)。筇竹寺组底部与下伏麦地坪组或震旦系灯影组呈不整合接触，发育风化壳，岩性主要为灰黑色碳质泥页岩和含粉砂页岩，有机

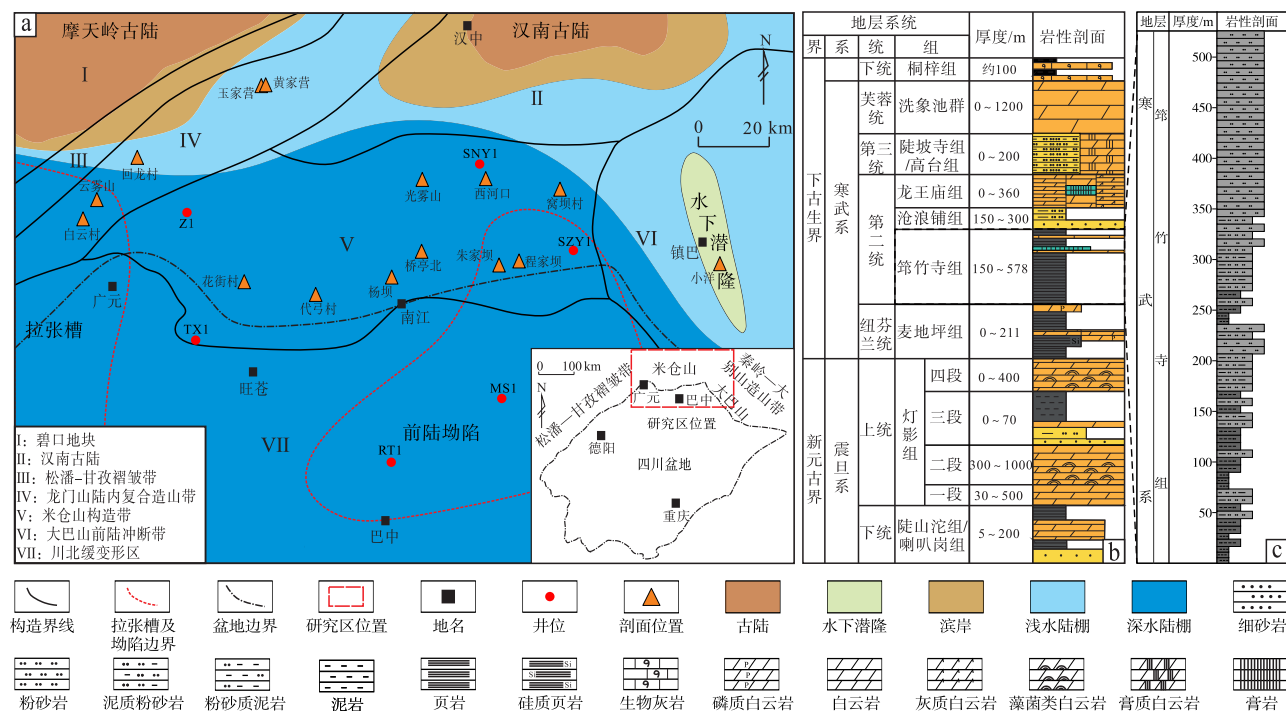
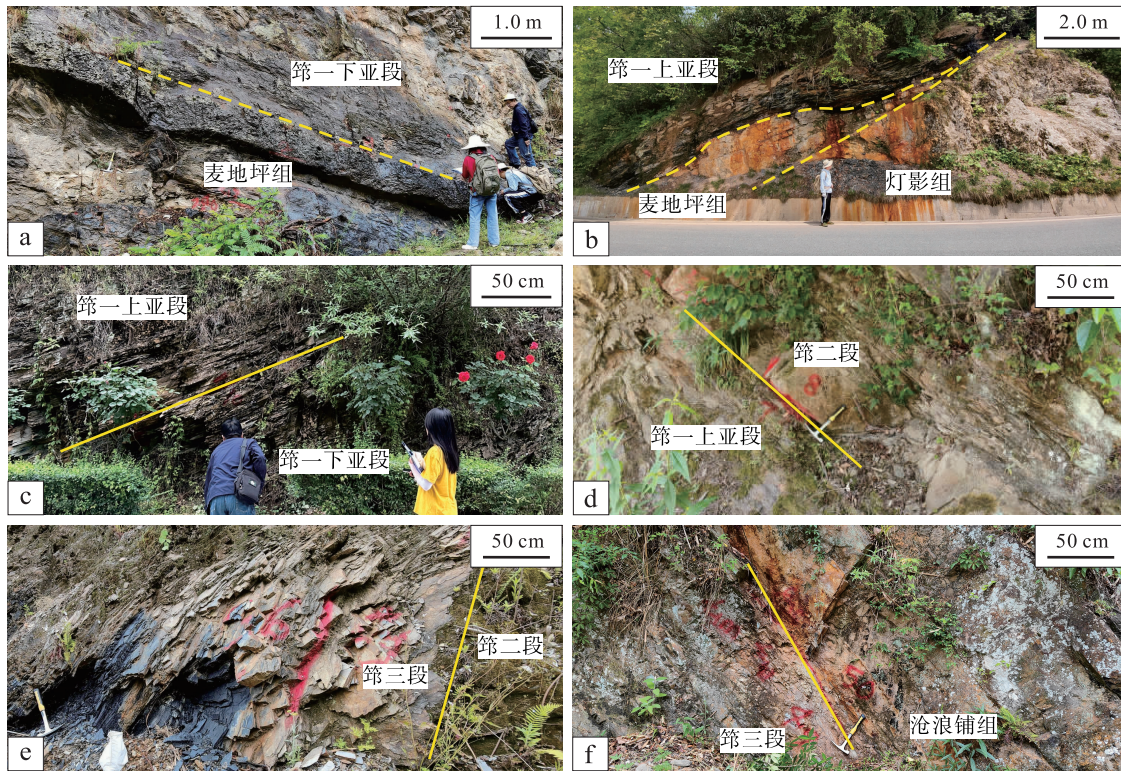


图 1 川北地区早寒武世岩相古地理及构造单元划分 (a)、震旦系—寒武系地层特征 (b) 及麦地坪组—筇竹寺组地层柱状图 (c)

Fig. 1 Division of tectonic units and lithofacies paleogeography during the Early Cambrian (a), stratigraphic characteristics of the Sinian-Cambrian (b), and stratigraphic column of the Maidiping Formation-Qiongzhusi Formation (c) in northern Sichuan Basin



a—云雾山剖面，麦地坪组顶部角砾岩与第一下亚段底部泥页岩呈不整合接触；b—光雾山剖面，灯影组顶部白云岩、麦地坪组硅质泥岩和第一上亚段底部碳质页岩之间呈不整合接触；c—云雾山剖面，第一下亚段顶部泥质粉砂岩与第一上亚段底部泥页岩呈整合接触；d—花街村剖面，第一上亚段顶部泥质粉砂岩与第二段底部泥页岩呈整合接触；e—云雾山剖面，第二段粉砂岩顶部与第三段底部碳质页岩呈整合接触；f—白云村剖面，筇竹寺组粉砂岩顶部和沧浪铺组底部灰岩呈整合接触

图 2 川北地区下寒武统筇竹寺组野外露头特征

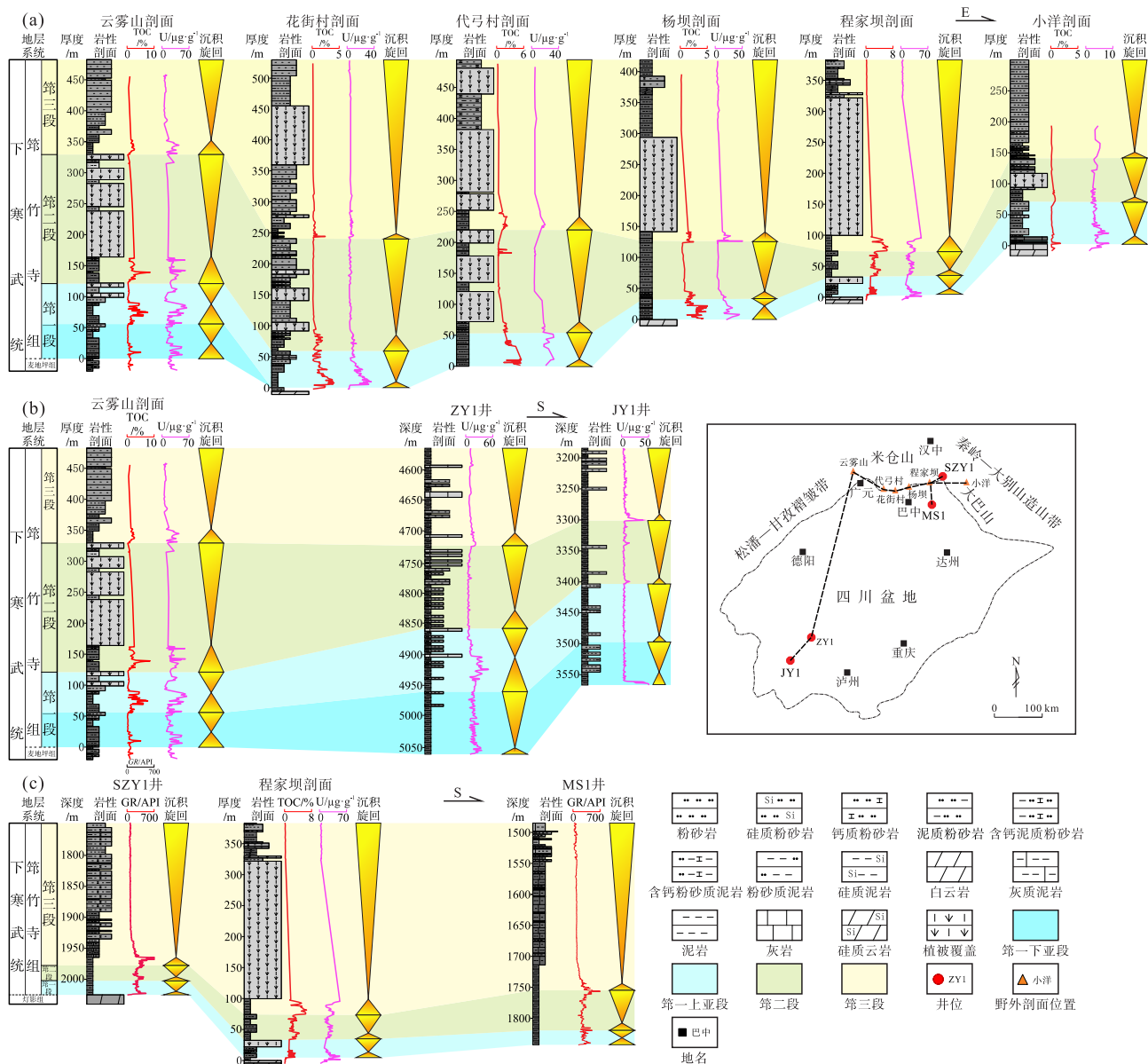
Fig. 2 Outcrop characteristics of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in northern Sichuan Basin

碳含量较高(图 2-a, 2-b; 图 3-a); 在筇竹寺组内部, 多以岩性、岩相转换面作为各次级旋回的分界面, 岩性上表现为由颗粒较粗的泥质粉砂岩、粉砂岩转变为颗粒较细的泥页岩, 并且具颜色加深、有机碳含量和 U 含量由低值向高值突变的特征, 界面之间常呈突变式接触(图 2-c, 2-d, 2-e; 图 3-a)。筇竹寺组顶部与上覆沧浪铺组呈整合接触, 发育一套灰白色粉砂岩夹泥质粉砂岩, 有机碳含量低(图 2-f; 图 3-a)。

结合早寒武世沉积古地理格局(图 1-a), 将研究区筇竹寺组分为拉张槽型、拗陷型及拉张槽—拗陷过渡型沉积(张明何等, 2024)。云雾山剖面、金页 1 井和资阳 1 井主要受早寒武世强烈的拉张裂隙作用控制(燕继红等, 2016; 高波等, 2020), 拉张槽内水体较深, 筇竹寺组发育齐全, 纵向上形成多套富有机质页岩(图 3-b)。程家坝剖面、SZY1 井和 RT1 井主要受前陆拗陷控制, 缺

失第一下亚段, 在深水滞留环境下第一上亚段至第三段下部之间连续沉积了大套优质页岩, 向上粉砂质和灰质含量增多(图 3-c)。花街村、杨坝和代弓村剖面位于拉张槽与前陆拗陷的过渡区域, 整体表现为深水—半深水过渡沉积, 同样缺失第一下亚段, 暗色泥页岩主要分布在第一上亚段和第二段底部(图 3-a)。

受区域内构造运动及古地貌影响, 川北地区筇竹寺组向山前超覆, 沉积厚度变化较大。纵向上, 第一段沉积厚度最小, 普遍在 30~100 m 之间, 第二段厚度普遍在 50~200 m 之间, 第三段厚度最大, 普遍在 200~300 m 之间, 具“早期较薄、晚期加厚”的特征(图 4-a)。平面上, 广元旺苍地区的花街村剖面、TX1 井等地的地层厚度最大, 超过 500 m, 向北部的古陆方向厚度逐渐减小, 总体具“南厚北薄、西厚东薄”的特征(图 4-b)。



a—川北地区连井地层对比剖面；b—拉张槽连井地层对比剖面（ZY1 井、JY1 井数据引自 Liu *et al.*, 2022；周杨等，2024）；c—前陆拗陷连井地层对比剖面

图 3 川北地区下寒武统筇竹寺组连井地层对比

Fig. 3 Cross-well stratigraphic correlation of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in northern Sichuan Basin

3 沉积相类型及特征

基于川北地区筇竹寺组野外剖面及其周围钻井资料，结合前人的研究成果（赵建华等，2019；李丹龙等，2023；张明何等，2024），认为研究区主要发育陆棚沉积体系。综合岩石颜色、岩性组合、沉积构造、TOC 含量、放射性元素序列及测井曲线等相标志，将陆棚相进一步划分为深水陆棚和浅水陆棚 2 类亚相。参考上扬子地区龙马溪组和

筇竹寺组沉积相划分中应用的 TOC 和 U/Th 指标（Liu *et al.*, 2017；伍翊嘉等，2021），结合研究区测试数据（表 1），按照垂向序列、岩性组合和沉积构造等特征，又可将深水陆棚亚相分为泥质深水陆棚、硅泥质深水陆棚和砂泥质深水陆棚 3 种沉积微相，将浅水陆棚亚相分为砂质浅水陆棚、砂泥质浅水陆棚、泥质浅水陆棚和灰泥质浅水陆棚 4 种沉积微相（表 2）。

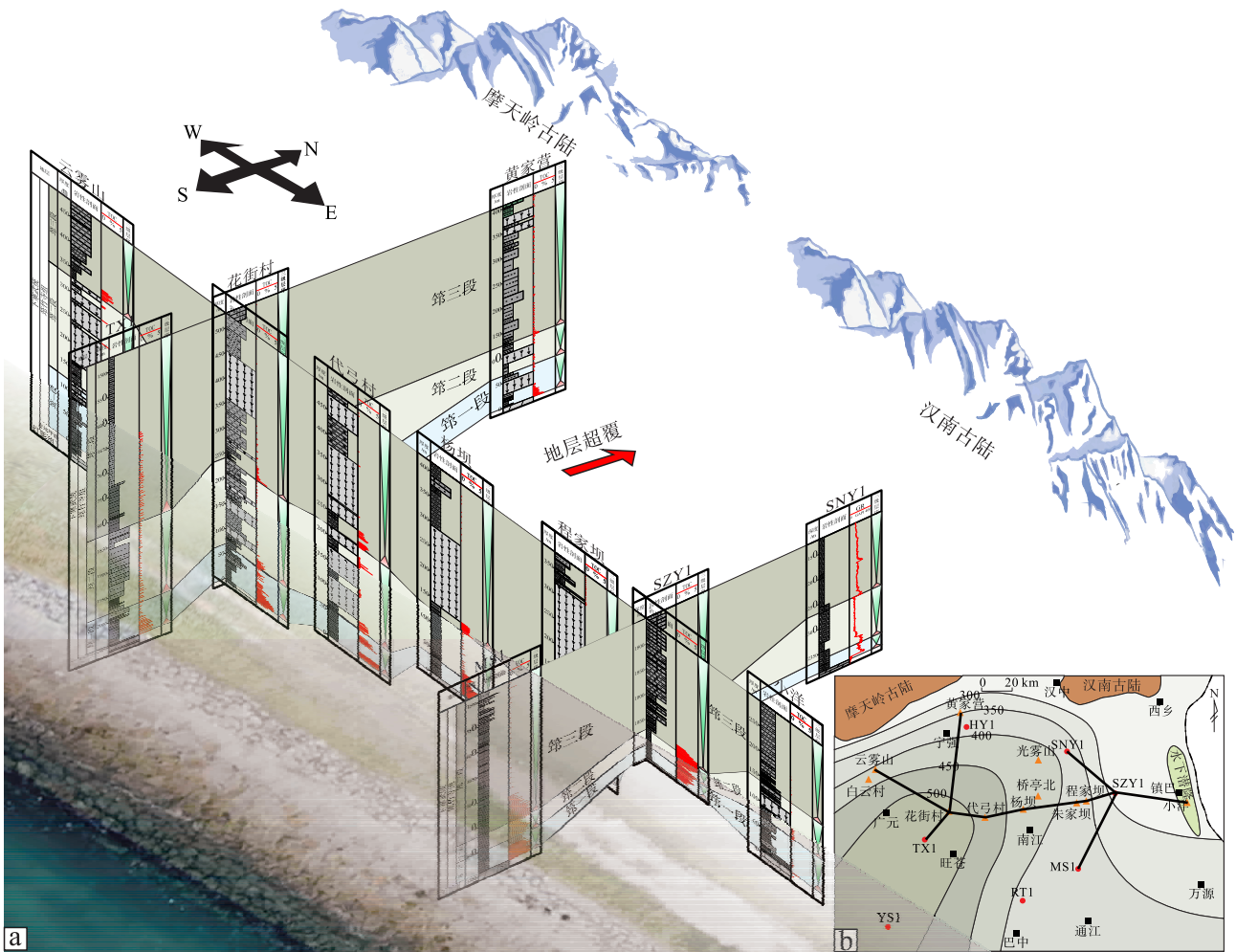


图 4 川北地区下寒武统筇竹寺组连井剖面栅栏图 (a) 及地层厚度平面图 (b)

Fig. 4 Fence diagram showing cross-well sections (a) and stratigraphic isopach map (b)

of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in northern Sichuan Basin

表 1 川北地区典型剖面下寒武统筇竹寺组样品 TOC 含量和 U/Th 值统计

Table 1 TOC content and U/Th values for samples from the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in typical sections of northern Sichuan Basin

剖面	样品数量 /个	TOC/%			样品数量 /个	U/Th		
		最小值	最大值	平均值		最小值	最大值	平均值
白云村	17	0.5	4.7	2.3	130	0.26	19.48	2.15
云雾山	123	0.1	8.6	1.8	118	0.61	18.48	4.05
花街村	121	0.1	4.1	1.1	178	0.10	2.40	0.57
代弓村	151	0.2	5.5	1.7	43	0.23	2.67	0.97
杨坝	140	0.1	5.2	2.1	80	0.24	3.64	0.83
程家坝	93	0.1	6.5	2.3	112	0.18	3.90	1.19
小洋	47	0.1	3.5	0.4	76	0.19	0.80	0.35
黄家营	90	0.1	2.4	0.5	90	0.16	1.05	0.44

表 2 川北地区下寒武统筇竹寺组沉积相划分方案

Table 2 Sedimentary facies classification scheme of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in northern Sichuan Basin						
沉积相	沉积亚相	沉积微相	岩性组合及沉积构造	定量指标		
				TOC/%	矿物含量/%	U/Th
深水陆棚	深水陆棚	泥质	以灰黑色、黑灰色泥页岩为主,发育块状层理和水平层理	≥ 2.0	泥级 ≥ 50	≥ 1.25
		深水陆棚				
		硅泥质				
	深水陆棚	深水陆棚	以黑灰色、深灰色硅质泥岩为主,发育水平层理和块状层理	≥ 2.0	泥级 ≥ 50, 石英 ≥ 50	≥ 1.25
		砂泥质				
	陆棚	深水陆棚	以灰黑色、深灰色泥页岩、粉砂质泥岩和泥质粉砂岩互层为主,发育水平层理	1.0~2.0	泥级 ≥ 25	0.75~1.25
		砂质				
		浅水陆棚				
浅水陆棚	浅水陆棚	砂质	以灰色、灰白色粉砂岩、泥质粉砂岩为主,发育平行层理、波状层理及小型交错层理	< 0.5	粉砂级 ≥ 50	< 0.75
		砂泥质				
		浅水陆棚				
	浅水陆棚	灰泥质	以灰色、灰白色含钙泥质粉砂岩、含钙粉砂质泥岩、含钙粉砂质为主,发育平行层理	< 0.5	粉砂级 ≥ 50, 灰质 ≥ 10	< 0.75
		浅水陆棚				
	浅水陆棚	泥质	以浅灰色、灰绿色泥岩和粉砂质泥岩为主,发育水平层理或块状构造	< 0.5	泥级 ≥ 50	< 0.75
		浅水陆棚				

3.1 深水陆棚亚相

1) 泥质深水陆棚微相 在研究区广泛分布,主要发育在筇竹寺组第一段和第二段底部。形成于低能、缺氧的深水环境中,主要岩性为灰黑色碳质页岩,有机碳含量高,是区内富有机质页岩段形成的有利沉积微相。沉积构造主要为块状层理或水平层理(图 5-a, 5-d)。

2) 硅泥质深水陆棚微相 仅在位于拉张槽内的云雾山和白云村剖面中发育。具有相对稳定的高可容空间,在深水、安静及缺氧的环境中沉积了多段富含生物硅的灰黑色—黑色硅质页岩和硅质岩,有机碳含量高,以块状层理为主(图 5-b, 5-e)。

3) 砂泥质深水陆棚微相 一般沉积在硅泥质深水陆棚或者泥质深水陆棚微相之上,指示水体的短暂波动。发育水平层理和微粒序层理。主要岩性为灰黑色—深灰色含粉砂页岩、粉砂质泥岩和泥质粉砂岩互层,砂质含量较泥质深水陆棚微相增多,有机碳含量有所降低(图 5-c, 5-f)。

3.2 浅水陆棚亚相

1) 砂泥质浅水陆棚微相 广泛发育于深水陆棚之上,水动力条件较强,有机碳含量较低。岩性以深灰色、灰色泥质粉砂岩、粉砂质泥岩互层为主,主要发育平行层理和粒序层理,向上往往过渡为砂质浅水陆棚微相或灰泥质浅水陆棚微相(图 6-a, 6-e)。

2) 砂质浅水陆棚微相 在花街村和小洋等剖

面分布。主要发育在三级旋回的上部和顶部,水体较泥质浅水陆棚微相更浅,水动力更强,有机碳含量极低。岩性以灰色、灰白色以及灰绿色粉砂岩和泥质粉砂岩为主,主要发育平行层理、波状层理和交错层理等沉积构造(图 6-b, 6-f)。

3) 灰泥质浅水陆棚微相 多在旺苍以西一带分布,主要位于筇竹寺组中上部。该微相形成于动荡浅水的氧化环境中,有机碳含量极低。主要岩性为含钙粉砂质泥岩、含钙泥质粉砂岩等,发育平行层理、斜层理等沉积构造(图 6-c, 6-g)。

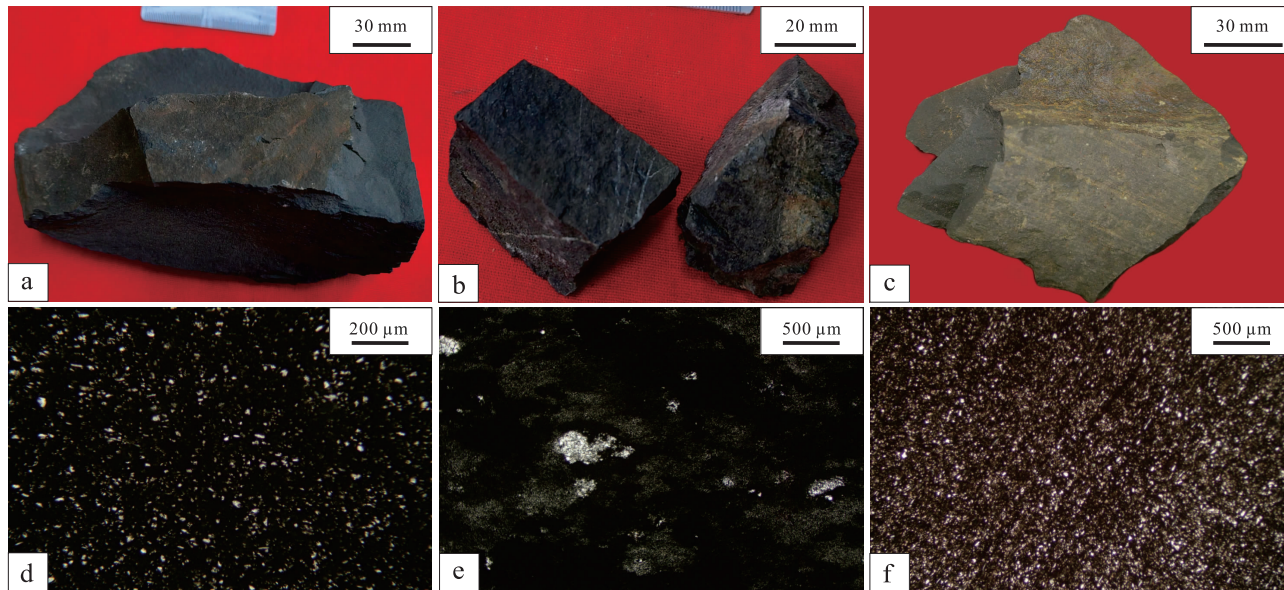
4) 泥质浅水陆棚微相 仅在黄家营和桥亭北等剖面少量发育,主要位于筇竹寺组中下段。该微相水体能量相对较低,有机质富集条件较差。岩性以浅灰色至灰绿色粉砂质泥岩、泥岩为主,偶见水平层理或块状构造(图 6-d, 6-h)。

4 讨论

4.1 沉积相时空分布规律

4.1.1 沉积相演化特征

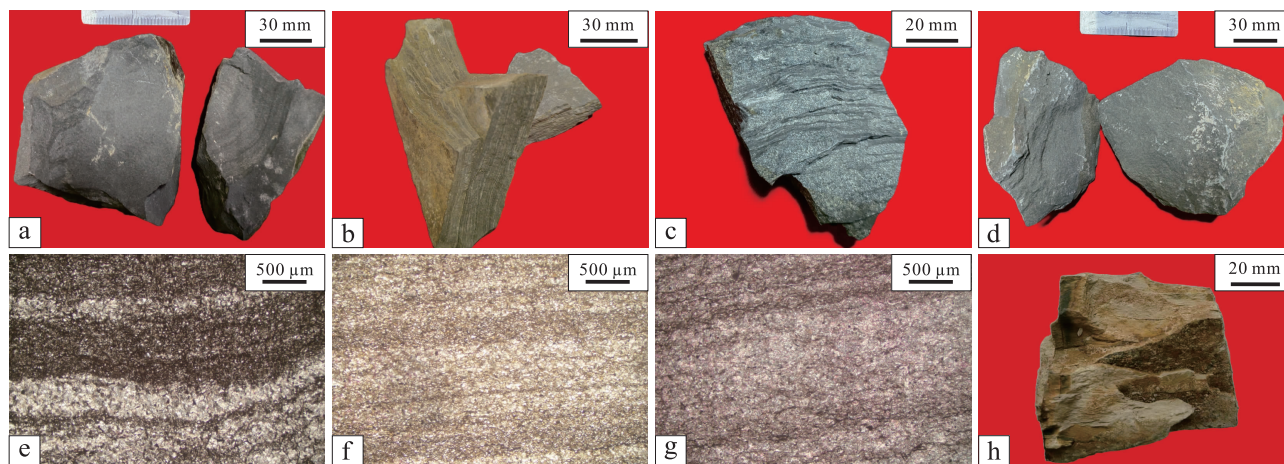
纵向上,寒武纪早期受海平面周期性变化影响,深水/浅水陆棚沉积通常呈旋回式交替演变。其中,深水陆棚亚相在筇竹寺组第一段和第二段中发育范围较广,岩性以灰黑色、深灰色泥页岩和粉砂质泥岩为主,有机碳含量高,且砂泥质深水陆棚微相通常沉积于泥质深水陆棚微相之上。浅水陆棚沉积则在筇竹寺组第三段大面积分布,主要岩性为灰色、灰白色及灰



a—程家坝剖面, 距底 43.1 m, 第二段, 灰黑色碳质页岩, 块状层理, $\text{TOC} = 3.6\%$, 泥质深水陆棚微相; b—白云村剖面, 距底 95.5 m, 第二段, 灰黑色硅质页岩, 块状层理, 质硬, 发育硅质条带, $\text{TOC} = 4.7\%$, 硅泥质深水陆棚微相; c—朱家坝剖面, 距底 37.5 m, 第一段, 深灰色粉砂质泥岩, 水平层理, $\text{TOC} = 2.2\%$, 砂泥质深水陆棚微相; d—程家坝剖面, 距底 43.1 m, 第二段, 含细粉砂页岩, $\text{TOC} = 3.6\%$, 泥质深水陆棚微相, 单偏光; e—云雾山剖面, 距底 9.9 m, 第一段, 硅质页岩, $\text{TOC} = 4.5\%$, 硅泥质深水陆棚微相, 单偏光; f—花街村剖面, 距底 76.5 m, 第二段, 细粉砂质泥岩, $\text{TOC} = 1.2\%$, 砂泥质深水陆棚微相, 单偏光

图 5 川北地区下寒武统筇竹寺组深水陆棚相沉积特征

Fig. 5 Sedimentary characteristics of deep-water shelf facies of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in northern Sichuan Basin



a—黄家营剖面, 距底 17.4 m, 第一段, 深灰色泥质粉砂岩, 波状层理, $\text{TOC} = 0.34\%$, 砂泥质浅水陆棚微相; b—花街村剖面, 距底 150.6 m, 第二段, 浅灰色泥质粉砂岩, 平行层理, $\text{TOC} = 0.12\%$, 砂质浅水陆棚微相; c—程家坝剖面, 距底 378.4 m, 第三段, 深灰色含钙泥质粉砂岩, 小型交错层理, $\text{TOC} = 0.14\%$, 灰泥质浅水陆棚微相; d—黄家营剖面, 距底 80.6 m, 第一段, 浅灰色含粉砂泥岩, $\text{TOC} = 0.21\%$, 泥质浅水陆棚微相; e—桥亭北剖面, 距底 160.6 m, 第二段, 变形纹层状泥质粉砂岩, $\text{TOC} = 0.34\%$, 砂泥质浅水陆棚微相, 单偏光; f—花街村剖面, 距底 125.5 m, 第二段, 纹层状粉砂岩, $\text{TOC} = 0.23\%$, 砂质浅水陆棚微相, 单偏光; g—花街村剖面, 距底 238.5 m, 第二段, 纹层状含钙泥质粉砂岩, $\text{TOC} = 0.22\%$, 灰泥质浅水陆棚微相, 单偏光; h—桥亭北剖面, 距底 171.8 m, 第二段, 灰白色泥岩, 泥质浅水陆棚微相

图 6 川北地区下寒武统筇竹寺组浅水陆棚相沉积特征

Fig. 6 Sedimentary characteristics of shallow-water shelf facies of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in northern Sichuan Basin

绿色泥质粉砂岩和粉砂岩，有机碳含量较低。一般而言，深水陆棚沉积过渡为浅水陆棚沉积时，先是发育砂泥质浅水陆棚微相，再过渡为砂质浅水陆棚微相或灰泥质浅水陆棚微相(图 7)。

横向上，受古地形差异、海侵方向、物源方向等多重因素影响，研究区不同部位的沉积微相特征差异较大。其中，拉张槽内的云雾山剖面受强烈的拉张裂隙作用控制(高波等，2020)，主要发育硅泥质深水陆棚微相；坳陷内的程家坝剖面 and SZY1 井，深水陆棚沉积在第一段到第三段连续发育，以泥质深水陆棚微相为主，浅水陆棚沉积仅在第三段中上部发育，主要为砂泥质浅水陆棚微相和灰泥质浅水陆棚微相；而拉张槽—坳陷过渡带之间的花街村、代弓村和杨坝等剖面，深水陆棚沉积主要发育于三级层序的上升半旋回中，以砂泥质/泥质深水陆棚沉积微相为主，而三级层序下降半旋回则主要发育砂泥质浅水陆棚和砂质浅水陆棚沉积微相，含少量灰泥质浅水陆棚微相；研究区东部的小洋剖面靠近古隆起，沉积水体较浅，主要发育浅水陆棚沉积，以砂泥质浅水陆棚和砂质浅水陆棚沉积微相为主(图 7)。

4.1.2 沉积相平面演化特征

基于研究区“槽—隆—坳”相间的古地理格局和富有机质($\text{TOC} \geq 2.0\%$)页岩厚度分布特征(以 20 m 作为深水/浅水陆棚的分界)(张明何等，2024)，综合垂向的优势沉积微相，系统编制了川北地区第一段—第三段的沉积微相平面分布图

(图 8)，进一步明确了筇竹寺期沉积微相平面展布及演化规律。

第一段沉积期，川北地区经历了来自东部、东南部的大规模海侵(江凯禧等，2014)，广泛发育深水陆棚沉积。其中，拉张槽内的云雾山和白云村剖面发育硅泥质深水陆棚微相，拉张槽外的花街村、代弓村、杨坝及程家坝等地广泛发育泥质深水陆棚沉积，而离古隆起较近的玉家营、黄家营和小洋剖面则发育浅水陆棚沉积。受物源方向及古陆位置的影响，研究区由北向南总体发育 2 种沉积体系：摩天岭古陆→滨岸→砂质浅水陆棚→砂泥质浅水陆棚→硅泥质深水陆棚，汉南古陆→滨岸→砂质浅水陆棚→砂泥质浅水陆棚→泥质深水陆棚(图 8-a)。

第二段沉积期，海侵作用减弱，沉积水体相对变浅，浅水陆棚沉积范围扩大，TX1 井、花街村、代弓村及西河口等地的沉积微相转变为砂泥质浅水陆棚微相，回龙村、黄家营及光雾山等地的沉积微相转变为砂质浅水陆棚微相。而拉张槽内的白云村和云雾山剖面以及坳陷内的 SZY1 井、RT1 井、MS1 井和程家坝等地仍发育深水陆棚沉积，南北向沉积体系的总体变化不大(图 8-b)。

第三段沉积期，上扬子地区发生大规模的海退，加之摩天岭古陆和汉南古陆的持续隆升，导致沉积物中砂质、灰质含量增加，研究区内普遍发育浅水陆棚沉积。其中，广元地区的白云村、云雾山、花街村剖面和研究区东部的小洋剖面转变为砂

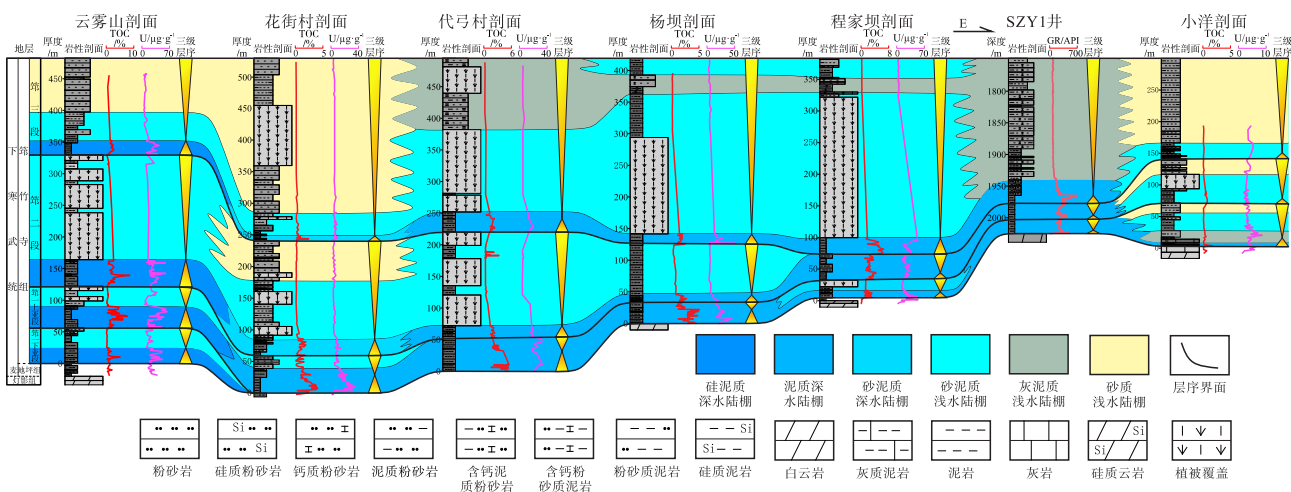


图 7 川北地区下寒武统筇竹寺组层序地层—沉积微相综合对比(剖面位置见图 3)

Fig. 7 Comprehensive correlation diagram showing sequence stratigraphy-sedimentary microfacies of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in northern Sichuan Basin (profile location shown in Fig. 3)

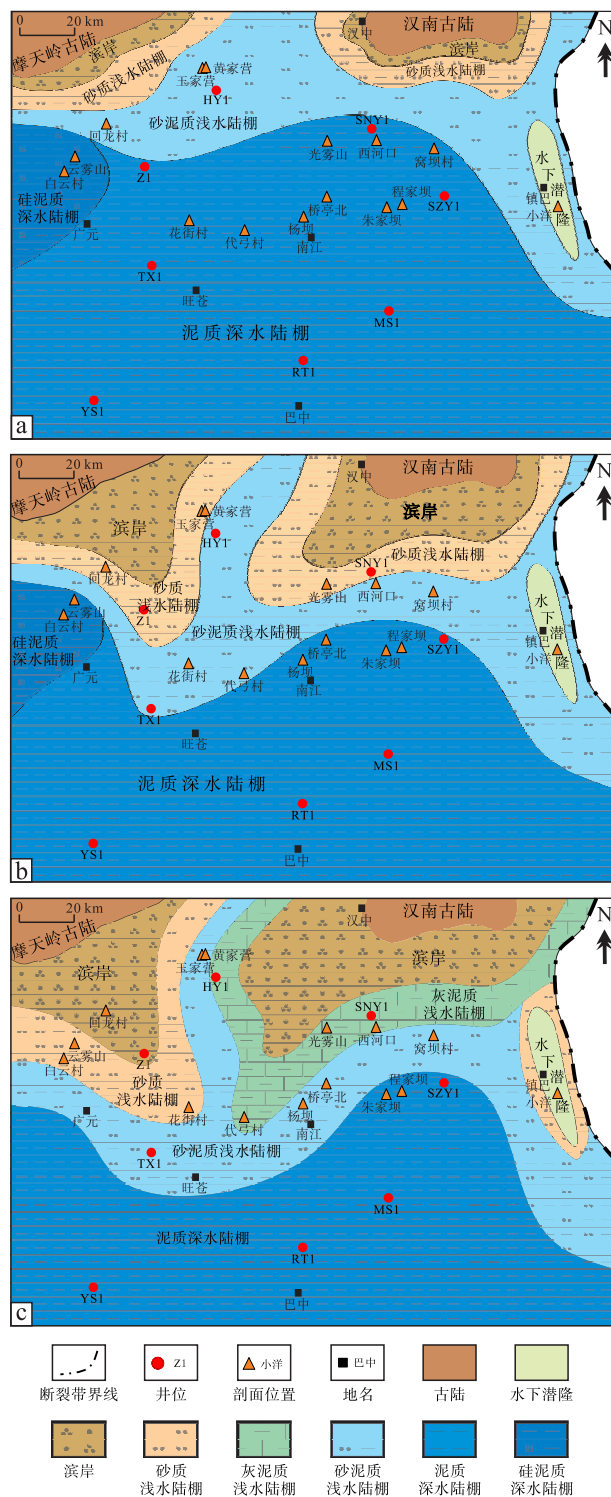


图 8 川北地区下寒武统筇竹寺组沉积微相平面分布

质浅水陆棚微相, 坳陷边缘的杨坝和桥亭北剖面转变为砂泥质浅水陆棚微相, 而 HY1 井、SNY1 井及

代弓村等离汉南古陆相对较近的地方则发育灰泥质浅水陆棚微相。平面上, 研究区沉积体系仍保持南北分异特征, 摩天岭古陆以南以“砂质—砂泥质—泥质”过渡序列为特征, 汉南古陆以南则发育“灰泥质—砂泥质—泥质”过渡序列(图 8-c)。

4.2 充填模式及演化

震旦纪末期,受桐湾运动地壳抬升作用影响,研究区内灯影组出露水面,遭受大规模剥蚀,与寒武系呈区域不整合接触(王东和王国芝,2011),而位于拉张槽北侧的大滩—羊木一带主要发育深水斜坡—盆地沉积,灯影组地层完整(文龙等,2021;马奎等,2022),整体呈现西低东高的沉积格局。晚震旦世至早寒武世期间,受大陆裂解、海底扩张及兴凯地裂运动等影响(李伟等,2015;燕继红等,2016;罗胜元等,2019),地壳伸展裂陷作用强烈(丁一等,2025),促进了绵阳—长宁拉张槽的快速发育。随着早寒武世的初次海侵,在拉张槽内沉积了厚层麦地坪组,主要岩性为含磷硅质页岩、磷块岩及碳质页岩等(赵立可等,2020)。拉张槽外地层受桐湾运动二幕及三幕的持续抬升剥蚀作用影响(邓宾等,2022),麦地坪组发生沉积间断或沉积后剥蚀,地层展布十分有限,在研究区内表现为麦地坪组不整合接触于筇竹寺组和灯影组之间,或是在缺失区内筇竹寺组不整合覆于灯影组之上。

在筇竹寺组沉积初期的首次海侵—海退过程中, 研究区拉张槽内沉积了第 1 下亚段, 形成第 1 个三级旋回层序, 主要为一套有机碳含量高的硅质细粒沉积, 而拉张槽外受麦地坪组沉积末期桐湾运动三幕的影响 (邓宾等, 2022), 仍处于构造高点, 产生沉积间断 (图 9-a)。第 1 下亚段至第 1 上亚段沉积期, 川北地区由伸展转变为挤压背景 (Gu *et al.*, 2023; 张帅等, 2025), 挤压应力作用下形成的挠曲沉降在通江—南江一带转为前陆拗陷, 沉积了快速海侵背景下的第 2 个三级旋回层序 (第 1 上亚段), 区内广泛发育深水陆棚沉积, 低程度的陆源稀释和缺氧条件有利于有机质的保存, 在拉张槽和拗陷内沉积了大套优质页岩 (图 9-b)。第二段沉积期的再一次海侵—海退作用形成了第 3 个三级旋回层序, 此时海侵作用减弱, 海平面相对降低, 拉张槽和拗陷内仍主要发育深水陆棚沉积,

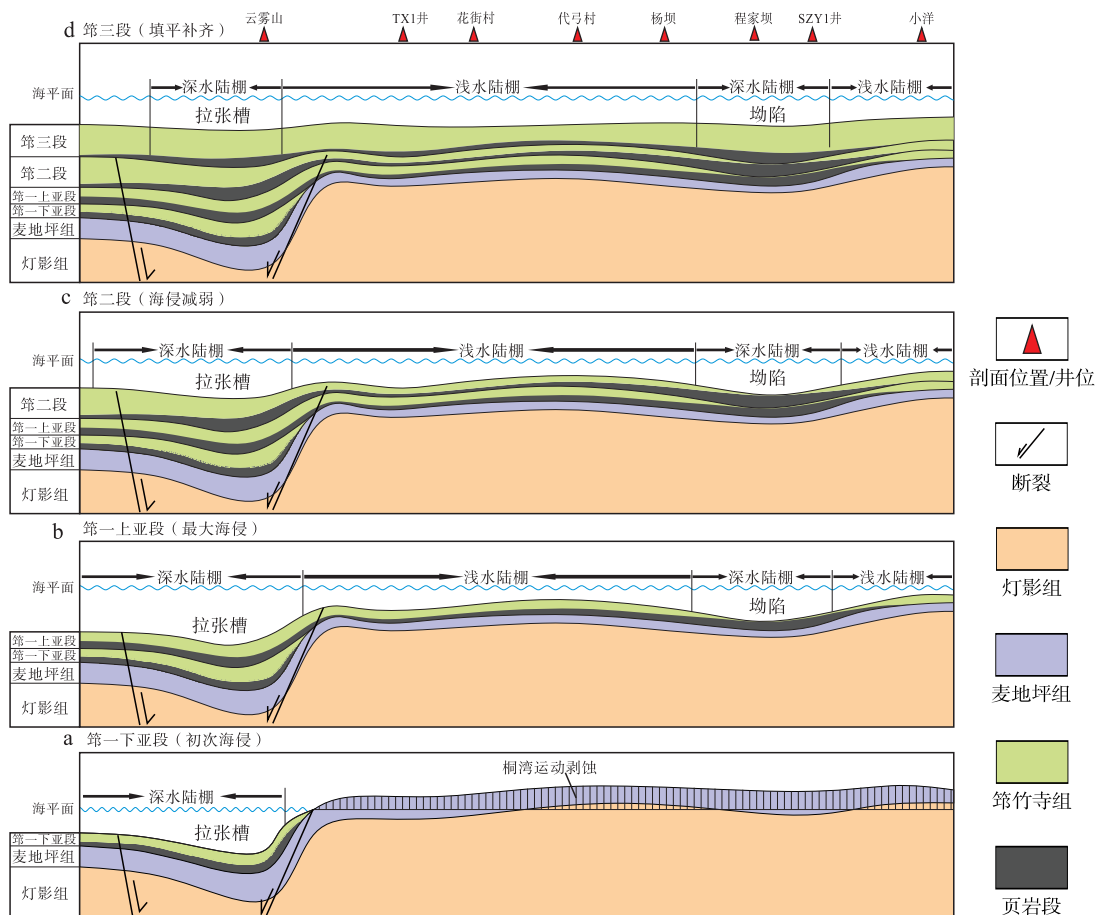


图 9 川北地区下寒武统筇竹寺组沉积演化模式

Fig. 9 Sedimentary evolution model of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in northern Sichuan Basin

而花街村、代弓村及 TX1 井等地则变成了浅水陆棚沉积(图 9-c)。第三段沉积期经历短暂海侵后,随着古陆隆升和持续性海退,发育第 4 个三级旋回层序。此时,扬子地台整体进入填平补齐过程,拉张槽和坳陷逐渐萎缩,区内以富氧的浅水陆棚沉积为主(图 9-d)。

4.3 构造地质意义

震旦纪—寒武纪之交,在全球泛非造山作用与冈瓦纳大陆汇聚的背景下,原特提斯洋向冈瓦纳大陆之下俯冲产生的拖拽作用(图 10),引起原特提斯洋洋壳板块后撤及地幔热液上隆底侵,导致华南陆块内部伸展作用增强,在扬子板块西缘形成了一系列隆、坳相间的古地理格局(李智武等, 2019; 王瀚, 2020; 汪正江等, 2022)。灯影组沉积末期至麦地坪组沉积时期,华南板块向冈瓦纳大陆汇聚,研究区伸展构造背景下的强烈拉张裂陷作用促进了绵阳—长宁拉张槽的迅速发育(韩雨樾,

2023; Han *et al.*, 2025)(图 9-a)。麦地坪组沉积末期至筇竹寺组沉积时期,随着华南板块完成与冈瓦纳大陆的聚合,扬子板块西缘的构造属性由伸展转变为挤压背景(Han *et al.*, 2025; 张帅等, 2025),在龙门山和四川盆地形成了岩石圈挠曲作用下的弧后前陆盆地(Gu *et al.*, 2023),其中川北通江—南江一带为该盆地的前陆挤压坳陷(图 9-b)。另外,研究区西北部受早寒武世拉张作用造成的板块掀斜影响,开始缓慢抬升并形成摩天岭古陆(张英利等, 2018; 汪正江等, 2022; Gu *et al.*, 2023),而北部的汉南古陆也持续隆升(谷志东等, 2016),进而在川北地区形成“槽—隆—坳”相间的沉积古地理格局,奠定了筇竹寺组差异性沉积的基础,控制了该区沉积有机质富集和富有机质页岩有利相带分布(张明何等, 2024; 戎佳等, 2026)。因此,宏观古地理格局是控制川北地区筇竹寺组沉积相带空间分异的关键因素。

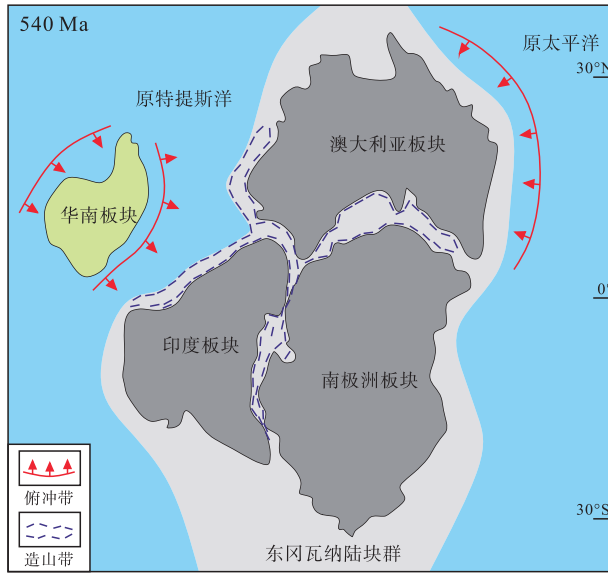


图 10 早寒武世华南板块及东冈瓦纳大陆古地理位置
(据 Cawood *et al.*, 2021; 刘磊鑫等, 2023; Han *et al.*, 2025; 有修改)

Fig. 10 Palaeogeographic location of South China Block and East Gondwana during the Early Cambrian (modified from Cawood *et al.*, 2021; Liu *et al.*, 2023; Han *et al.*, 2025)

基于上述对川北地区早寒武世的构造-沉积背景分析,认为筇竹寺组沉积充填过程与原特提斯洋俯冲引发的弧后伸展-挤压转换密切相关。震旦纪-寒武纪之交的原特提斯洋俯冲导致克拉通边缘发生弧后伸展,开启了扬子板块西北缘的拉张槽(Wang *et al.*, 2025; 张帅等, 2025),早寒武世期间的快速海侵在拉张槽内沉积了大套富有机质页岩(张明何等, 2024)。随后,筇竹寺组沉积时期,受控于海侵-海退过程的海平面升降变化和温湿-干旱交替的气候演变(范海经等, 2021; 吴冬等, 2023),氧化还原评估指标 U/Th 和古气候评估指标 CIA 值皆与 TOC 呈明显的正相关(张明何等, 2024),反映了海平面周期性升降与古气候交替演变对筇竹寺组纵向上旋回式沉积的控制作用。同时,洋壳持续俯冲诱发的弧(陆)-陆碰撞,导致川北地区由伸展转变为挤压背景(汪正江等, 2022; Han *et al.*, 2025; 张帅等, 2025),在通江-南江一带发育前陆挤压坳陷,而在碰撞挤压作用下的古陆隆升剥蚀带来的陆源碎屑和营养物质(韩雨樾, 2023),为筇竹寺组有机质发育和快速埋藏保存提供了物质基础。因此,筇竹寺组沉积序

列不仅记录了伸展-挤压的构造转换过程,也揭示了“槽-隆-坳”格局对优质页岩分布的控制机制,对认识扬子板块西北缘早寒武世构造-沉积响应过程具有重要意义。

5 结论

1) 寒武纪早期,川北地区拉张槽-前陆坳陷的古地貌空间差异造成了筇竹寺组地层在拉张槽内发育齐全,拉张槽外缺失筇一下亚段,并且地层厚度在纵向上呈现“早期较薄、晚期较厚”的特征,平面上呈“南厚北薄、西厚东薄”的特征。

2) 川北地区筇竹寺组主要发育深水陆棚和浅水陆棚 2 种亚相,进一步细分为泥质/硅泥质/砂泥质深水陆棚和砂质/砂泥质/泥质/灰泥质浅水陆棚 7 种沉积微相。纵向上,深水陆棚亚相在第一段和第二段中发育范围较广,浅水陆棚亚相则在第三段中大面积分布;平面上,沉积体系呈南北分异,由南向北总体发育古陆-滨岸-砂质浅水陆棚(或灰泥质浅水陆棚)-砂泥质浅水陆棚-泥质深水陆棚(或硅泥质深水陆棚)沉积体系。

3) 筇竹寺组沉积充填受三级海平面变化与区域构造-古地理格局的双重控制,可分为初次海侵、最大海侵、海侵减弱及填平补齐 4 个阶段。其中,泛非造山运动背景下原特提斯洋俯冲引发的“槽-隆-坳”相间的古地理格局是筇竹寺组沉积相带空间分异的关键原因,海平面周期性升降和古气候交替演变共同控制了筇竹寺组在纵向上旋回式沉积的特点。

参考文献 (References)

- 陈相霖,翟刚毅,包书景,庞飞,王劲铸,童川川. 2018. 陕南镇巴地区牛蹄塘组页岩气地质条件与含气性特征:以镇地 1 井为例. 中国矿业, 27(S1): 101-106. [Chen X L, Zhai G Y, Bao S J, Pang F, Wang J Z, Tong C C. 2018. Shale gas accumulation and gas-bearing properties of Niutitang Formation in well Zhendi 1, Zhenba region of southern Shaanxi Province. China Mining Magazine, 27(S1): 101-106]
- 戴金星,倪云燕,董大忠,洪峰,张延玲,康楚娟. 2022. 近 10 年中国天然气工业快速发展. 天然气地球科学, 33(12): 1907-1910. [Dai J X, Ni Y Y, Dong D Z, Hong F, Zhang Y L, Kang C J. 2022. Rapid development of China's natural gas industry in the past decade. Natural Gas Geoscience, 33(12): 1907-1910]
- 邓宾,李泽奇,张航,鲁鹏达,田腾振,孙玮,姜华,吴娟,张旋,张洁伟,刘树根. 2022. 四川盆地桐湾期不整合面的侵蚀成因地质新证

- 据. 天然气工业, 42(11): 13-24. [Deng B, Li Z Q, Zhang H, Lu P D, Tian T Z, Sun W, Jiang H, Wu J, Zhang X, Zhang J W, Liu S G. 2022. New geological evidence for erosive genesis of Tongwan unconformities in the Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 42(11): 13-24]
- 丁一, 刘树根, 文龙, 马奎, 陈代钊, 宋金民, 王瀚, 王林康, 陈明思, 杨钺, 唐攀, 李智武. 2025. 绵阳—长宁拉张槽东北缘埃迪卡拉系灯影组上部地层缺失及构造意义. *地质学报*, 99(2): 352-364. [Ding Y, Liu S G, Wen L, Ma K, Chen D Z, Song J M, Wang H, Wang L K, Chen M S, Yang B, Tang P, Li Z W. 2025. Strata missing of the Ediacaran upper Dengying Formation at the northeastern Mianyang-Changning intracratonic sag, and tectonic implications. *Acta Geologica Sinica*, 99(2): 352-364]
- 樊大磊, 王宗礼, 王彧嫣, 韩志强, 李文博, 白羽, 卜小平, 李剑. 2025. 2024年国内外油气资源形势分析及展望. *中国矿业*, 34(1): 46-54. [Fan D L, Wang Z L, Wang Y Y, Han Z Q, Li W B, Bai Y, Bo X P, Li J. 2025. Analysis of oil and gas resources situation at home and abroad in 2024 and outlook. *China Mining Magazine*, 34(1): 46-54]
- 范海经, 邓虎成, 伏美燕, 刘四兵, 余翰泽, 李依林. 2021. 四川盆地地下寒武统筇竹寺组沉积特征及其对构造的响应. *沉积学报*, 39(4): 1004-1019. [Fan H J, Deng H C, Fu M Y, Liu S B, Yu H Z, Li Y L. 2021. Sedimentary characteristics of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in the Sichuan Basin and its response to construction. *Acta Sedimentologica Sinica*, 39(4): 1004-1019]
- 高波, 刘忠宝, 舒志国, 刘皓天, 王濡岳, 金治光, 王冠平. 2020. 中上扬子地区下寒武统页岩气储层特征及勘探方向. *石油与天然气地质*, 41(2): 284-294. [Gao B, Liu Z B, Shu Z G, Liu H T, Wang R Y, Jin Z G, Wang G P. 2020. Reservoir characteristics and exploration of the Lower Cambrian shale gas in the Middle-Upper Yangtze area. *Oil & Gas Geology*, 41(2): 284-294]
- 谷志东, 殷积峰, 姜华, 张宝民, 李秋芬, 袁苗, 翟秀芬, 张黎, 杨帆. 2016. 四川盆地西北部晚震旦世—早古生代构造演化与天然气勘探. *石油勘探与开发*, 43(1): 1-11. [Gu Z D, Yin J F, Jiang H, Zhang B M, Li Q F, Yuan M, Zhai X F, Zhang L, Yang F. 2016. Tectonic evolution from Late Sinian to Early Paleozoic and natural gas exploration in northwestern Sichuan Basin, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 43(1): 1-11]
- 韩雨樾. 2023. 四川盆地及周缘早寒武世构造—沉积分异. 成都理工大学博士学位论文. [Han Y Y. 2023. Early Cambrian tectonic-sedimentary differentiation in the Sichuan Basin and its periphery. Doctoral dissertation of Chengdu University of Technology]
- 胡琳, 朱炎铭, 陈尚斌, 陈洁, 王阳. 2012. 中上扬子地区下寒武统筇竹寺组页岩气资源潜力分析. *煤炭学报*, 37(11): 1871-1877. [Hu L, Zhu Y M, Chen S B, Chen J, Wang Y. 2012. Resource potential analysis of shale gas in Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in Middle & Upper Yangtze Region. *Journal of China Coal Society*, 37(11): 1871-1877]
- 江凯禧, 彭丽, 何文祥, 郭清正, 姚长华, 张曼婷. 2014. 页岩气储层非均质性研究: 以四川盆地地下寒武统筇竹寺组为例. *海洋地质前沿*, 30(8): 47-54. [Jiang K X, Peng L, He W X, Guo Q Z, Yao C H, Zhang M T. 2014. Research of shale gas reservoir heterogeneity: a case of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation of the Sichuan Basin. *Marine Geology Frontiers*, 30(8): 47-54]
- 焦堃, 夏国栋, 张正林, 刘树根, 王佳玉, 邓宾, 叶玥豪, 吴娟, 李飞, 李小花. 2022. 米仓山前缘下寒武统筇竹寺组页岩孔隙特征及地质意义. *中南大学学报(自然科学版)*, 53(9): 3708-3723. [Jiao K, Xia G D, Zhang Z L, Liu S G, Wang J Y, Deng B, Ye Y H, Wu J, Li F, Li X J. 2022. Pore characteristics and geological significance of Lower Cambrian Qiongzhusi formation shale in Micangshan front. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 53(9): 3708-3723]
- 李丹龙, 伏美燕, 邓虎成, 胥旺, 刘四兵, 吴冬. 2023. 上扬子地区下寒武统牛蹄塘组富有机质页岩岩相及沉积环境分析: 以贵州温水村剖面为例. *天然气地球科学*, 34(3): 445-459. [Li D L, Fu M Y, Deng H C, Xu W, Liu S B, Wu D. 2023. Analysis of lithofacies and sedimentary environment of shale deposited in shelf facies: a case study of the Wenshuicun section in Guizhou Province, South China. *Natural Gas Geoscience*, 34(3): 445-459]
- 李敏, 刘雅利, 冯动军, 申宝剑, 杜伟, 王鹏威. 2023. 中国海相页岩气资源潜力及未来勘探方向. *石油实验地质*, 45(6): 1097-1108. [Li M, Liu Y L, Feng D J, Shen B J, Du W, Wang P W. 2023. Potential and future exploration direction of marine shale gas resources in China. *Petroleum Geology & Experiment*, 45(6): 1097-1108]
- 李伟, 刘静江, 邓胜徽, 张宝民, 周慧. 2015. 四川盆地及邻区震旦纪末—寒武纪早期构造运动性质与作用. *石油学报*, 36(5): 546-556, 563. [Li W, Liu J J, Deng S H, Zhang B M, Zhou H. 2015. The nature and role of Late Sinian-Early Cambrian tectonic movement in Sichuan Basin and its adjacent areas. *Acta Petrolei Sinica*, 36(5): 546-556, 563]
- 李智武, 冉波, 肖斌, 宋金民, 郑玲, 李金玺, 王瀚, 肖斌, 叶玥豪, 蔡其新. 2019. 四川盆地北缘震旦纪—早寒武世隆—拗格局及其油气勘探意义. *地学前缘*, 26(1): 59-85. [Li Z W, Ran B, Xiao B, Song J M, Zheng L, Li J X, Wang H, Xiao B, Ye Y H, Cai Q X. 2019. Sinian to Early Cambrian uplift-depression framework along the northern margin of the Sichuan Basin, central China and its implications for hydrocarbon exploration. *Earth Science Frontiers*, 26(1): 59-85]
- 刘慧萍, 戎佳, 刘自亮, 高波, 张明何, 杨琪航, 王佳乐, 游浪. 2025. 四川盆地广元北部寒武系筇竹寺组元素地球化学特征及地质意义. *天然气地球科学*, 36(5): 936-952. [Liu H P, Rong J, Liu Z L, Gao B, Zhang M H, Yang Q H, Wang J L, You L. 2025. Element geochemical characteristics and geological significance of the Cambrian Qiongzhusi Formation in northern Guangyuan, Sichuan Basin. *Natural Gas Geoscience*, 36(5): 936-952]
- 刘磊鑫, 李江海, 马昌明. 2023. 扬子板块、澳大利亚板块、印度板块在新元古代晚期(750~540 Ma)古板块再造: 来自古地磁制约. *地学前缘*, 30(2): 154-162. [Liu L X, Li J H, Ma C M. 2023. Reconstruction of the Yangtze, Australian and Indian plates in the Late Neoproterozoic(750~540 Ma) using paleomagnetic constraints.

- Earth Science Frontiers, 30(2): 154–162]
- 罗胜元, 陈孝红, 李海, 刘安, 王传尚. 2019. 鄂西宜昌下寒武统水井沱组页岩气聚集条件与含气特征. 地球科学, 44(11): 3598–3615. [Luo S Y, Chen X H, Li H, Liu A, Wang C S. 2019. Shale gas accumulation conditions and target optimization of Lower Cambrian Shuijingtuo Formation in Yichang area, west Hubei. Earth Science, 44(11): 3598–3615]
- 马奎, 文龙, 张本健, 李勇, 钟佳倚, 王云龙, 彭瀚霖, 张玺华, 严威, 丁一, 陈骁. 2022. 四川盆地德阳—安岳侵蚀裂陷槽分段性演化分析和油气勘探意义. 石油勘探与开发, 49(2): 274–284. [Ma K, Wen L, Zhang B J, Li Y, Zhong J Y, Wang Y L, Peng H L, Zhang X H, Yan W, Ding Y, Chen X. 2022. Segmented evolution of Dengyang-Anyue erosion rift trough in Sichuan Basin and its significance for oil and gas exploration, SW China. Petroleum Exploration and Development, 49(2): 274–284]
- 戎佳, 高波, 张明何, 刘自亮, 燕继红, 李敏, 刘慧萍, 王佳乐. 2026. 川北寒武系筇竹寺组页岩展布规律及源储特征. 石油实验地质, 48(1): 159–173. [Rong J, Gao B, Zhang M H, Liu Z L, Yan J H, Li M, Liu H P, Wang J L. 2026. Distribution patterns and source-reservoir characteristics of Cambrian Qiongzhusi Formation shale in northern Sichuan Basin. Petroleum Geology & Experiment, 48(1): 159–173]
- 师文文, 杨兆林, 尹洪荣, 牛基宏, 杜贵超, 陈娟, 陈奕阳, 崔耀科. 2022. 米仓山构造带下寒武统筇竹寺组砂岩球状风化特征及成因机制. 世界地质, 41(1): 173–185. [Shi W W, Yang Z L, Yin H R, Niu J H, Du G C, Chen J, Chen Y Y, Cui Y K. 2022. Characteristics and formation mechanism of sandstone spherical weathering in Lower Cambrian Qiongzhusi Formation, Micangshan structural zone. Global Geology, 41(1): 173–185]
- 孙东. 2011. 米仓山构造带构造特征及中—新生代构造演化. 成都理工大学博士学位论文. [Sun D. 2011. The structural character and meso-Cenozoic evolution of Micang Mountain structural zone, northern Sichuan Basin, China. Doctoral dissertation of Chengdu University of Technology]
- 汤聪, 刘树根, 李智武, 孙东, 孙玮, 李金玺. 2011. 米仓山构造带逆冲—走滑变形序列的节理研究. 岩性油气藏, 23(4): 81–87. [Tang C, Liu S G, Li Z W, Sun D, Sun W, Li J X. 2011. Thrust and strike-slip deformation sequence of Micangshan structural belt. Lithologic Reservoirs, 23(4): 81–87]
- 王东, 王国芝. 2011. 四川南江地区灯影组白云岩优质储层的形成与演化. 现代地质, 25(4): 660–667. [Wang D, Wang G Z. 2011. Formation and evolution of high-quality dolomite reservoir in Dengying Formation of Sinian, Nanjiang area, Sichuan. Geoscience, 25(4): 660–667]
- 王瀚. 2020. 上扬子北缘震旦纪—早寒武世沉积—构造格局及其油气地质意义. 成都理工大学博士学位论文. [Wang H. 2020. Sedimentary structural pattern and its significance of petroleum geology from Sinian to Early Cambrian in northern margin of Upper Yangtze. Doctoral dissertation of Chengdu University of Technology]
- 王华建, 张水昌, 王晓梅, 苏劲, 叶云涛, 柳宇柯. 2024. 寒武纪海洋碳循环新模型. 中国科学(地球科学), 54(6): 1786–1805. [Wang H J, Zhang S C, Wang X M, Su J, Ye Y T, Liu Y K. 2024. A novel model of the carbon cycle in the Cambrian ocean. Scientia Sinica (Terrae), 54(6): 1786–1805]
- 王佳乐, 戎佳, 刘自亮, 高波, 张明何, 刘慧萍, 杨琪航, 游浪. 2026. 川北寒武系筇竹寺组页岩沉积环境及有机质富集机理: 以南郑程家坝剖面为例. 沉积学报, 44(4): 1535–1551. [Wang J L, Rong J, Liu Z L, Gao B, Zhang M H, Liu H P, Yang Q H, You L. 2026. Paleoenvironmental reconstruction and organic matter accumulation mechanisms in the Cambrian Qiongzhusi shale: a high-resolution case study of the Chengjiaba section, northern margin of Sichuan Basin. Acta Sedimentologica Sinica, 44(4): 1535–1551]
- 汪正江, 王启宇, 杨菲, 熊国庆, 马龙, 杜秋定, 郑炳嵩. 2022. 扬子西缘泛非造山与绵阳—长宁克拉通裂陷的沉积充填过程研究. 沉积与特提斯地质, 42(3): 350–367. [Wang Z J, Wang Q Y, Yang F, Xiong G Q, Ma L, Du Q D, Zheng B S. 2022. Study on the deposition and filling process of the Mianyang-Changning cratonic rift: implications for the Pan-African orogeny on the western margin of Yangtze Block. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 42(3): 350–367]
- 文龙, 罗冰, 钟原, 马奎, 严威, 张玺华, 李勇, 彭瀚霖, 李堃宇, 周红飞. 2021. 四川盆地灯影期沉积特征及槽—台体系成因模式. 成都理工大学学报(自然科学版), 48(5): 513–524, 590. [Wen L, Luo B, Zhong Y, Ma K, Yan W, Zhang X H, Li Y, Peng H L, Li K Y, Zhou H F. 2021. Sedimentary characteristics and genetic model of trough-platform system during the Dengying period in Sichuan Basin, China. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 48(5): 513–524, 590]
- 吴冬, 邓虎成, 熊亮, 曹凯旋, 董晓霞, 赵勇, 魏力民, 王同, 马若龙. 2023. 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. 石油与天然气地质, 44(3): 764–777. [Wu D, Deng H C, Xiong L, Cao K X, Dong X X, Zhao Y, Wei L M, Wang T, Ma R L. 2023. Sequence filling and evolutionary model of the Lower Cambrian Maidiping–Qiongzhusi Formations in Sichuan Basin and on its periphery. Oil & Gas Geology, 44(3): 764–777]
- 伍翊嘉, 王滢, 黎菁. 2021. 四川盆地深层页岩沉积特征及储层主控因素: 以威东地区龙马溪组为例. 天然气工业, 41(5): 55–65. [Wu Y J, Wang Y, Li J. 2021. Sedimentary characteristics and main reservoir control factors of deep shale in the Sichuan Basin: a case study on the Longmaxi Formation in the eastern Weiyuan area. Natural Gas Industry, 41(5): 55–65]
- 燕继红, 李启桂, 朱祥. 2016. 四川盆地及周缘下寒武统页岩气成藏主控因素与勘探方向. 石油实验地质, 38(4): 445–452. [Yan J H, Li Q G, Zhu X. 2016. Main factors controlling shale gas accumulation and exploration targets in the Lower Cambrian, Sichuan Basin and its periphery. Petroleum Geology & Experiment, 38(4): 445–452]
- 余川, 汪生秀, 汪威, 曾春林, 王巧丽, 张华莲. 2020. 大巴山北缘鲁家坪组变质作用及其对页岩气储层的影响. 地质学报, 94(11): 3461–3470. [Yu C, Wang S X, Wang W, Zeng C L, Wang Q L,

- Zhang H L. 2020. The metamorphism of the Lujiaping Formation at the northern Daba Mountains and its influence on shale gas reservoirs. *Acta Geologica Sinica*, 94(11): 3461–3470]
- 张明何, 魏祥峰, 高波, 戎佳, 刘珠江, 燕继红, 杨琪航, 王佳乐, 刘慧萍, 游浪, 刘自亮. 2024. 川北山前带寒武系筇竹寺组富有机质页岩发育模式. *石油与天然气地质*, 45(4): 992–1006. [Zhang M H, Wei X F, Gao B, Rong J, Liu Z J, Yan J H, Yang Q H, Wang J L, Liu H P, You L, Liu Z L. 2024. Developmental models of organic-rich shales in the Cambrian Qiongzhusi Formation in the piedmont zone of northern Sichuan Basin. *Oil & Gas Geology*, 45(4): 992–1006]
- 张帅, 罗冰, 汪泽成, 谢武仁. 2025. 四川盆地德阳—安岳克拉通内裂陷成因及其与原特提斯洋的联系. *天然气工业*, 45(2): 37–50. [Zhang S, Luo B, Wang Z C, Xie W R. 2025. Genesis of the Dengyang-Anyue intracontinental rift in the Sichuan Basin and its connection with the Proto-Tethys Ocean. *Natural Gas Industry*, 45(2): 37–50]
- 张英利, 贾晓彤, 王宗起, 陈木银. 2018. 米仓山地区早寒武世仙女洞组沉积物源新认识: 沉积学、重矿物和碎屑锆石年代学的证据. *地质学报*, 92(9): 1918–1935. [Zhang Y L, Jia X T, Wang Z Q, Chen M Y. 2018. New insights into provenance of Early Cambrian Xiannüdong Formation in the Micangshan area: evidence from sedimentology, heavy mineral and detrital zircon chronology. *Acta Geologica Sinica*, 92(9): 1918–1935]
- 赵建华, 金之钧, 林畅松, 刘光祥, 刘可禹, 刘忠宝, 张钰莹. 2019. 上扬子地区下寒武统筇竹寺组页岩沉积环境. *石油与天然气地质*, 40(4): 701–715. [Zhao J H, Jin Z J, Lin C S, Liu G X, Liu K Y, Liu Z B, Zhang Y Y. 2019. Sedimentary environment of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation shale in the Upper Yangtze region. *Oil & Gas Geology*, 40(4): 701–715]
- 赵立可, 李文皓, 和源, 周红飞, 刘冉, 李亚, 王尉, 钟原, 王莹莹. 2020. 四川盆地麦地坪组—筇竹寺组沉积充填规律及勘探意义. *天然气勘探与开发*, 43(3): 30–38. [Zhao L K, Li W H, He Y, Zhou H F, Liu R, Li Y, Wang W, Zhong Y, Wang Y Y. 2020. Sedimentation and filling laws of Maidiping-Qiongzhusi formations in Sichuan Basin and their significance of oil and gas geological exploration. *Natural Gas Exploration and Development*, 43(3): 30–38]
- 周杨, 金思丁, 刘岩, 刘四兵, 张全林. 2024. 川西南下寒武统筇竹寺组页岩旋回地层学研究. *沉积学报*, 42(1): 142–157. [Zhou Y, Jin S D, Liu Y, Liu S B, Zhang Q L. 2024. Cyclostratigraphy research on well-logging of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in southwestern Sichuan Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 42(1): 142–157]
- 邹才能, 董大忠, 熊伟, 傅国友, 赵群, 刘雯, 孔维亮, 张琴, 蔡光银, 王玉满, 梁峰, 刘翰林, 邱振. 2024. 中国页岩气新区带、新层系和新类型勘探进展、挑战及对策. *石油与天然气地质*, 45(2): 309–326. [Zou C N, Dong D Z, Xiong W, Fu G Y, Zhao Q, Liu W, Kong W L, Zhang Q, Cai G Y, Wang Y M, Liang F, Liu H L, Qiu Z. 2024. Advances, challenges, and countermeasures in shale gas exploration of underexplored plays, sequences and new types in China. *Oil & Gas Geology*, 45(2): 309–326]
- Cawood P A, Martin E L, Murphy J B, Pisarevsky S A. 2021. Gondwana's interlinked peripheral orogens. *Earth and Planetary Science Letters*, 568: 117057.
- Gu Z D, Jian X, Watts A B, Zhai X F, Liu G X, Jiang H. 2023. Formation and evolution of an Early Cambrian foreland basin in the NW Yangtze Block, South China. *Journal of the Geological Society*, 180: jgs2022–jgs2127.
- Han Y Y, Ran B, Santosh M, Liu S G, Li Z W, Ye Y H, Lü F, Wang H, Li C. 2025. The Cambrian collision of the Yangtze Block with Gondwana: Evidence from provenance analyses. *Geological Society of America Bulletin*, 137(1–2): 594–612.
- Liu S B, Jin S D, Liu Y, Chen A Q. 2022. Astronomical forced sequence infill of Early Cambrian Qiongzhusi organic-rich shale of Sichuan Basin, South China. *Sedimentary Geology*, 440: 106261.
- Liu Z B, Gao B, Zhang Y Y, Du W, Feng D J, Nie H K. 2017. Types and distribution of the shale sedimentary facies of the Lower Cambrian in Upper Yangtze area, South China. *Petroleum Exploration and Development*, 44(1): 20–31.
- Shu D G, Isozaki Y, Zhang X L, Han J, Maruyama S. 2014. Birth and early evolution of Metazoans. *Gondwana Research*, 25(3): 884–895.
- Wang Q Y, Wang Z J, Liu J H, Deng Q, Liu H, Li Z W, Zhou G, Li S J, Xiong G Q, Xia Y, Ma L. 2025. Depositional sequence and detrital zircon age spectra from Ediacaran to Early Cambrian at the northwestern Yangtze Craton: implication for the basin dynamics. *Pre-Cambrian Research*, 417: 107667.
- Wang X W, Zhang J C, Zhao R R, Gao P, Liu Q, Pang Y, Zhao Y C, Zhang J Z, Yang C, Ding K, Mo Q W. 2023. Siliceous origin of the Cambrian Qiongzhusi Formation shale in the middle part of the Upper Yangtze Platform: significance of organic matter enrichment. *ACS Omega*, 8(28): 25358–25369.
- Yong R, Shi X W, Luo C, Zhong K S, Wu W, Zheng M J, Yang Y R, Li Y Y, Xu L, Zhu Y Q, He Y F, Chen L Q, Yu W M. 2024. Aulacogen-uplift enrichment pattern and exploration prospect of Cambrian Qiongzhusi Formation shale gas in Sichuan Basin, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 51(6): 1402–1420.
- Zhou M F, Yan D P, Vasconcelos P M, Li J W, Hu R Z. 2008. Structural and geochronological constraints on the tectono-thermal evolution of the Danba Domal Terrane, eastern margin of the Tibetan Plateau. *Journal of Asian Earth Sciences*, 33(5–6): 414–427.

(责任编辑 张西娟)