

川北山前带寒武系筇竹寺组富有机质页岩发育模式

张明何¹,魏祥峰²,高波³,戎佳³,刘珠江²,燕继红²,杨琪航¹,王佳乐¹,刘慧萍¹,游浪¹,刘自亮¹

(1. 成都理工大学 能源学院, 四川 成都 610059; 2. 中国石化勘探分公司, 四川 成都 610041;

3. 中国石化 石油勘探开发研究院, 北京 102206)

摘要:研究川北山前带寒武系筇竹寺组富有机质页岩分布、主控因素及沉积模式,对该地区页岩气勘探具有重要意义。利用野外地质调查、钻井和岩心资料,结合岩石薄片鉴定、全岩X射线衍射分析、总有机碳含量(TOC)测定等分析测试资料,研究川北山前带筇竹寺组富有机质页岩的沉积模式、分布及主控因素。研究表明:①筇竹寺组页岩主要为强脆性硅质页岩和中等脆性硅/黏土混合质页岩,根据总有机碳含量(TOC)—沉积构造—矿物组分将其划分为16种岩相类型川北山前带寒武系筇竹寺组页岩主要为富有机质纹层状强脆性硅质页岩相、富有机质层状强脆性硅质页岩相和含有机质层状强脆性硅质页岩相。其中前两类岩相为页岩气主要勘探开发岩相;②富有机质页岩TOC普遍高于2%,富有机质页岩具南厚北薄、西厚东薄分布的特征,有机质丰度具南高北低、西高东低的特点;③拉张槽及区域内隆—凹相间的古地理格局是筇竹寺组富有机质页岩差异分布的主要原因,区内不平衡构造演化加剧了页岩的非均质性展布;繁盛发育的低等浮游生物及细菌等提供了丰富的有机质来源,早期快速海侵下缺氧的深水环境利于有机质的保存,晚期摩天岭古陆和汉南古陆的持续隆升对有机质富集起抑制作用;④海平面升降和古气候演变控制了富有机质页岩在纵向上呈旋回性分布。

关键词:发育模式;控制因素;富有机质页岩;筇竹寺组;寒武系;川北山前带

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Developmental models of organic-rich shales in the Cambrian Qiongzhusi Formation in the piedmont zone of northern Sichuan Basin

ZHANG Minghe¹, WEI Xiangfeng², GAO Bo³, RONG Jia³, LIU Zhujiang², YAN Jihong², YANG Qihang¹,WANG Jiale¹, LIU Huiping¹, YOU Lang¹, LIU Ziliang¹

(1. College of Energy, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. Exploration Company, SINOPEC, Chengdu, Sichuan 610041, China; 3. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 102206, China)

Abstract: Investigating the distributions, dominant controlling factors, and sedimentary patterns of organic-rich shales in the Cambrian Qiongzhusi Formation in the Micang-Daba piedmont zone of the northern Sichuan Basin holds great significance for shale gas exploration within. Based on data from field geological surveys, drilling, and core observation, as well as analytical and test data derived from rock thin section observations, whole-rock X-ray diffraction (XRD) pattern, and total organic carbon (TOC) content determination, we explore the sedimentary patterns, distributions, and dominant controlling factors of organic-rich shales in the Qiongzhusi Formation, piedmont zone of the northern Sichuan Basin. The results indicate that shales in the Qiongzhusi Formation consist primarily of highly brittle siliceous shales and moderately brittle silica-clay mixed shales. In terms of their TOC content, sedimentary structures, and mineral components, these shales can be categorized into 16 lithofacies types, with the organic-rich laminated siliceous shale facies of high brittleness, organic-rich bedded siliceous shale facies of high brittleness, and the organic matter-bearing bedded siliceous shale facies of high brittleness dominating. The former two dominant shale facies are identified as the primary targets for the exploration and production of shale gas. The organic-rich shales, with TOC content typically exceeding 2%, are thicker in the south and west but thinner in the north and east, corresponding to a

收稿日期:2024-04-12;修回日期:2024-07-15。

第一作者简介:张明何(1999—),男,博士研究生,沉积学。E-mail: 1102553662@qq.com。

通信作者简介:刘自亮(1978—),男,博士、教授,沉积学与储层地质学。E-mail: bugliu2001@163.com。

基金项目:国家自然科学基金面上项目(42272183);中国石化科技开发部项目(P19017-4)。

higher organic matter abundance in the south and west and lower abundance in the north and east; The intracratonic sag and the paleogeographic patterns exhibiting alternating uplifts and sags within are identified as the primary causes of the differential distribution of organic-rich shales in the Qiongzhusi Formation. The imbalanced structural evolution in the zone enhances the heterogeneous distribution of shales. The flourishing lower plankton and bacteria serve as substantial sources of organic matter. The anoxic deep-water environment under rapid transgression in the early stage creates favorable conditions for the preservation of organic matter, whereas the continuous uplift of the Motianling and Hannan oldlands in the late stage inhibits the organic matter enrichment. The eustatic movements and paleoclimate evolution govern the vertical cyclic distribution of organic-rich shales.

Key words: developmental model, controlling factor, organic-rich shale, Qiongzhusi Formation, Cambrian, piedmont zone of the northern Sichuan Basin

引用格式:张明何,魏祥峰,高波,等. 川北山前带寒武系筇竹寺组富有机质页岩发育模式[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(4): 992–1006. DOI: 10. 11743/ogg20240407.

ZHANG Minghe, WEI Xiangfeng, GAO Bo, et al. Developmental models of organic-rich shales in the Cambrian Qiongzhusi Formation in the piedmont zone of northern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(4): 992–1006. DOI: 10. 11743/ogg20240407.

四川盆地页岩气资源量居中国之首^[1-4],然而复杂的成藏地质背景限制了盆内页岩气藏勘探突破,亟需寻找勘探开发接替层系。中、上扬子地区下寒武统筇竹寺组页岩具有脆性矿物含量高^[5-7]、生烃条件好^[8-12]、分布范围广^[10, 12]和资源潜力大^[9, 11, 13]等特点,目前已经在宜昌地区的鄂宜页1HF井(产量为 $6.02 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)、鄂阳页1HF井(产量为 $7.83 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)^[14]、川西南地区的金页1井(产量为 $8.60 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)^[15]和金石103HF井(产量为 $25.86 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)^[16]获得了较高的工业气流显示,揭示了良好的页岩气勘探前景,但整体勘探程度较低,是继上奥陶统五峰组–下志留统龙马溪组之后的页岩气勘探开发热点层系^[17-19]。前人针对该层系富有机质页岩形成的层序地层与沉积环境^[19-24]、储层特征与富集机制^[18, 25-30]等基础地质研究已经取得了一些优秀的成果,奠定了良好研究基础。但是,这些成果多集中于川西南地区,而川北山前带页岩沉积体系与构造条件复杂^[31-35],页岩非均质性较强^[23, 36],对该区富有机质页岩分布规律、沉积模式及主控因素尚未进行系统研究。

本文以川北地区(米仓山–大巴山)山前带下寒武统筇竹寺组页岩为主要研究对象,在前人研究成果的基础上,利用川北山前带14条野外地质剖面的分析测试资料,结合中国石化勘探开发研究院及中国石化勘探分公司联合提供研究区及其周缘7口钻井的地层、总有机碳含量(TOC)及矿物组分等实验资料,揭示研究区富有机质页岩发育及空间展布规律,建立川北山前带筇竹寺组富有机质页岩沉积模式,详细讨论富有机质页岩发育机制及主控因素,可为研究区筇竹寺组页岩气勘探提供基础地质资料支撑。

1 地质概况

研究区主体位于四川盆地北缘米仓山构造带,在大地构造位置上属于扬子板块西北端,北邻汉南隆起,南接四川盆地川北缓变形区,东、西两侧分别与NE向延伸的龙门山陆内复合造山带和NW向延伸的大巴山前陆冲断带交接过渡(图1a),是一个经印支期、燕山期和喜马拉雅期等多期构造活动叠加改造的前陆挤压变形区,构造走向总体呈近EW向,并叠加NE向和NW向构造^[37-38]。

寒武系在川北山前带及其周缘地区分布广泛、发育完整,下寒武统自下而上为麦地坪组、筇竹寺组、沧浪铺组以及龙王庙组^[23]。筇竹寺组命名源于云南昆明西郊的筇竹寺,主要发育一套早寒武世早期的海侵沉积,岩性以深灰色–灰黑色泥页岩、粉砂质泥岩和泥质粉砂岩为主(图1b),不同区域上又被称为九老洞组、郭家坝组、水井沱组、牛蹄塘组、天柱山组和鲁家坪村组等^[29, 39-40]。受震旦纪末期桐湾运动的抬升剥蚀作用,灯影组顶部发生大规模剥蚀,麦地坪组在盆地内展布十分有限,筇竹寺组与下伏麦地坪组含磷地层或灯影组白云岩呈平行不整合接触,与上覆沧浪铺组鲕粒灰岩呈整合接触^[41-42]。另外,川北山前带由于构造改造强烈、变形复杂^[34],区内筇竹寺组整体厚度变化较大,沉积中心位于研究区中部广元地区的TX1井、Z1井和花街村等地(厚度500~700 m),向西北方向减薄,而在研究区东部的SZY1井和小洋等地厚度最小(200~300 m),整体呈现南厚北薄、西厚东薄的分布特征(图2)。

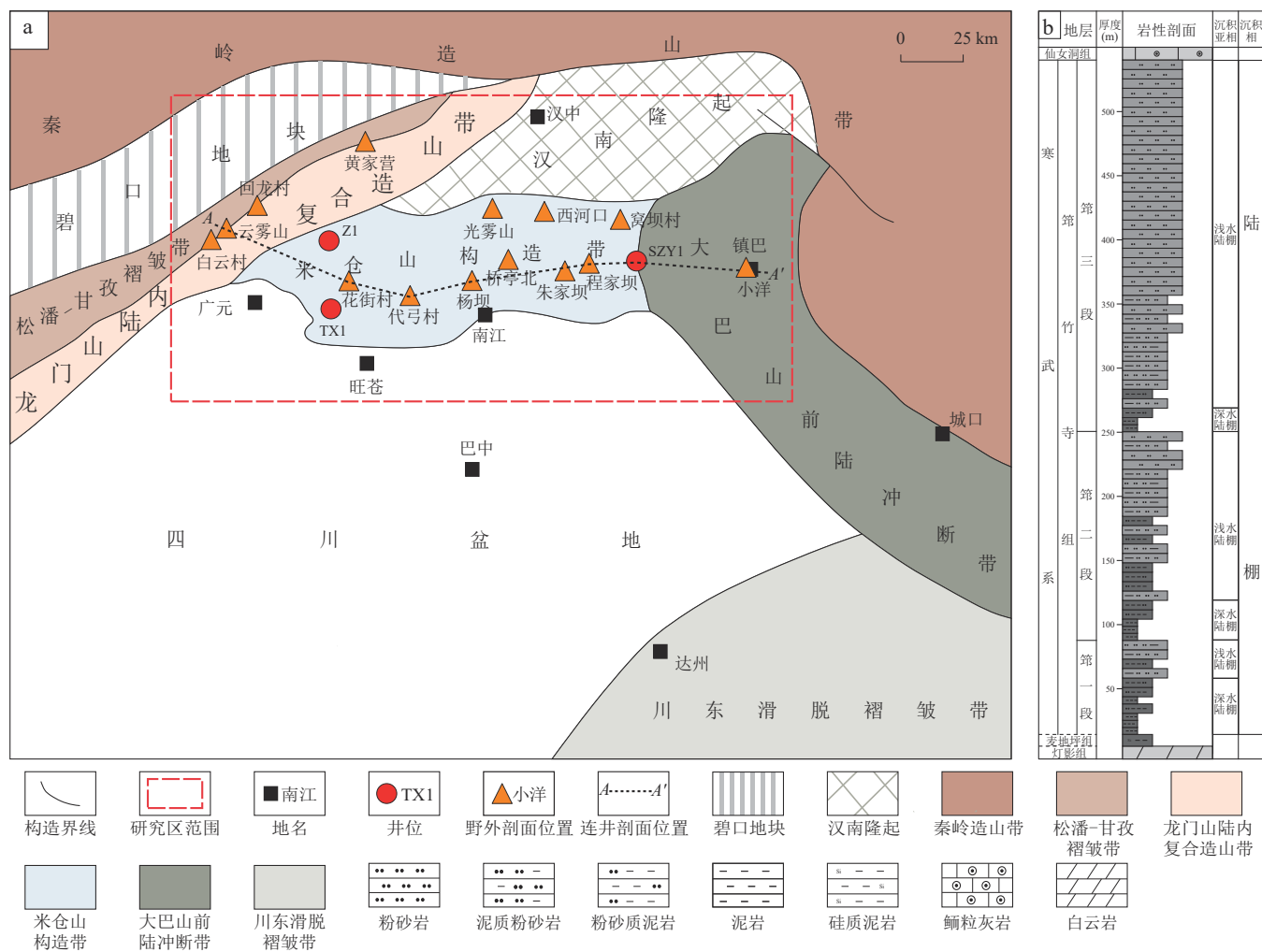


图1 川北山前带野外剖面位置、研究区周缘构造划分(a)及筇竹寺组地层综合柱状图(b)

Fig. 1 Positions of out crop section and division of structure in the piedmont zone of northern Sichuan Basin (a) and stratigraphic column of Qiongzhusi Formation (b)

早寒武世,研究区筇竹寺组继承了新元古代以来差异性隆升和隆-凹相间的沉积格局^[23],米仓山地区处于陆内拉张槽和被动大陆边缘叠合区^[8]。筇竹寺组沉积早期,受绵阳-长宁拉张槽的多期活动控制,发生强迫式快速海侵,区内广泛发育深水陆棚沉积^[25, 43];筇竹寺组沉积晚期受大规模海退以及北部摩天岭古陆和汉南古陆的持续性隆升影响,区内主要发育浅水陆棚沉积。

2 富有机质页岩岩相类型及特征

2.1 岩相划分及类型

为满足页岩气资源评价和勘探开发的需要,突出页岩作为烃源岩的有效性、储层的储集性及可压裂性特征,采用了前人提出的 TOC -沉积构造-页岩矿物

组分含量(脆性特征)的三级页岩岩相分类方案^[44]。

2.1.1 TOC 分级

页岩 TOC 是评价页岩气勘探潜力的重要依据,将其纳入岩相划分命名中,能够更准确、快速地体现不同类型页岩中有机质富集程度的差异。根据川北地区野外样品 TOC 测试结果,参考前人对龙马溪组页岩岩相划分方案^[45],将研究区筇竹寺组页岩按照 TOC 高低划分: $TOC \geq 2\%$ 为富有机质页岩相,约占45.76%; $1\% \leq TOC < 2\%$ 为含有机质页岩相,约占33.33%; $TOC < 1\%$ 为贫有机质页岩相,约占20.91%(图3a)。并将 TOC 分级作为岩相综合命名前缀。

2.1.2 沉积构造

依据微观岩石薄片尺度至岩石样品观察尺度,在命名过程中加入沉积构造因素,可以从更为宏观的角

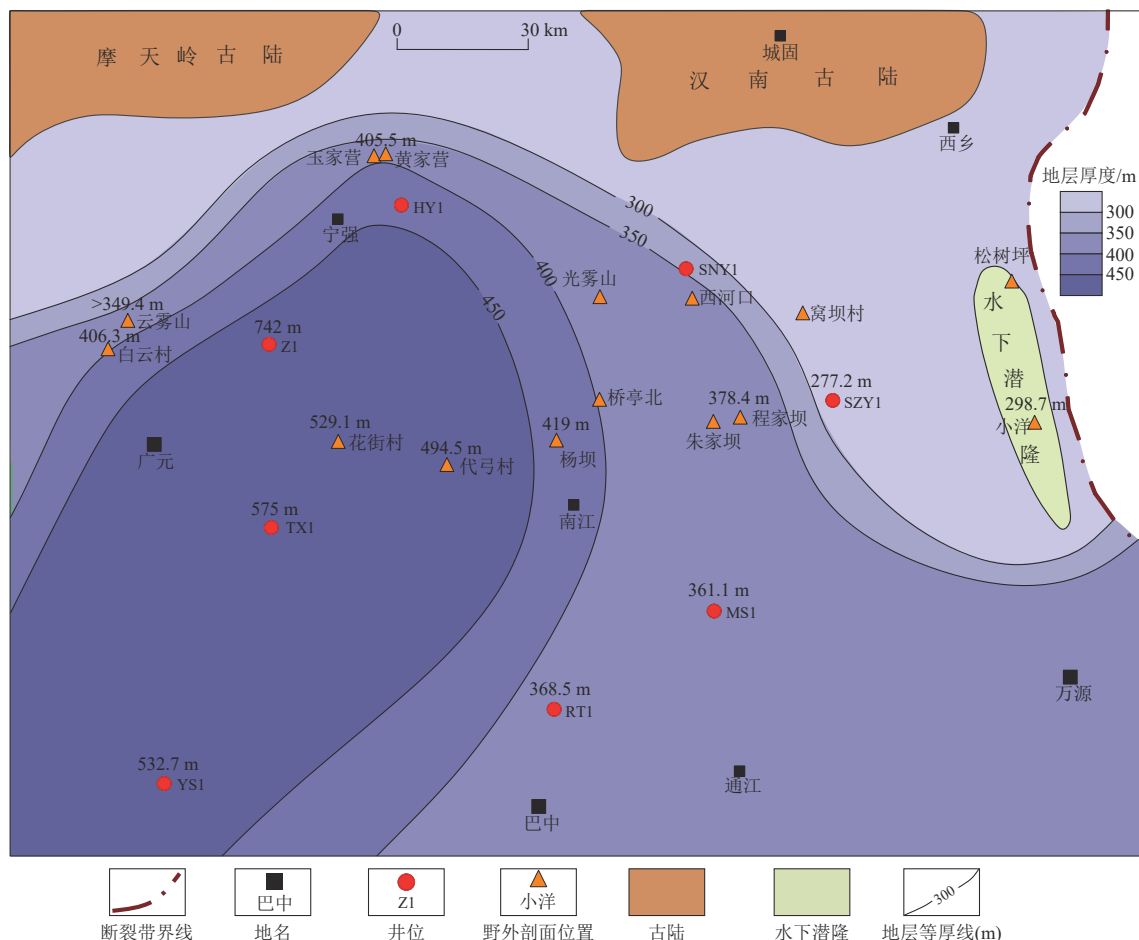


图2 川北山前带筇竹寺组沉积厚度

Fig. 2 Isopach of Qiongzhusi Formation in the piedmont zone of northern Sichuan Basin
(井位和野外剖面上方数字为地层厚度, m。)

度完善岩相划分。通过对研究区野外露头样品及其薄片的观察识别,按照单层厚度将筇竹寺组页岩岩相划分为纹层状页岩相、层状页岩相和块状页岩相(以1 mm和10 mm为界)3种类型,并将沉积构造划分作为岩相综合命名中缀。经过统计,纹层状页岩相最为发育,占比55.93%, TOC 平均值为2.19%;其次是层状页岩相,占比31.08%, TOC 平均值为2.01%;块状页岩相占比较少,仅占12.99%, TOC 平均值为1.84%(图3b)。可见纹层状和层状页岩相为研究区筇竹寺组的优势页岩相。

2.1.3 矿物组分(脆性特征)

全岩X射线衍射分析测试表明,研究区筇竹寺组泥页岩的主要矿物成分为石英(平均含量42.7%)、黏土矿物(平均含量29.3%)和长石(平均含量19.4%),此外还含有少量的碳酸盐矿物、黄铁矿及其它矿物(图4a)。考虑到矿物组成特征对页岩可压裂性的影响,将脆性矿物含量加入到岩相划分中。页岩中常见

的脆性矿物为石英、长石、方解石和白云石,其中石英和长石的脆性最强,一般认为页岩气藏中脆性矿物的含量大于40%才具备商业开发价值,因此将脆性矿物含量以40%和60%为界划分为差脆性、中等脆性和高脆性,而石英+长石含量 $\geq 60\%$ 则划分为强脆性^[44]。同时,将黏土矿物含量、长英质矿物含量(石英+长石含量)和碳酸盐矿物含量(方解石+白云石含量)以40%和60%为界进行三端元投点(图4b),发现筇竹寺组主要发育强脆性硅质页岩相(Ⅱ类),其次为中等脆性硅/黏土混合质页岩相(Ⅵ类),少量发育高脆性中硅质页岩相(Ⅸ类),将此方案作为岩相综合命名后缀。

综合 TOC 、沉积构造和矿物组分(脆性特征),建立了针对研究区筇竹寺组页岩的三端元四组分岩相划分方案(图5a),将研究区筇竹寺组页岩岩相划分为16类,其中主要岩相类型包括3类:富有机质纹层状强脆性硅质页岩相、富有机质层状强脆性硅质页岩相和含有机质层状强脆性硅质页岩相。其中,富有机质纹

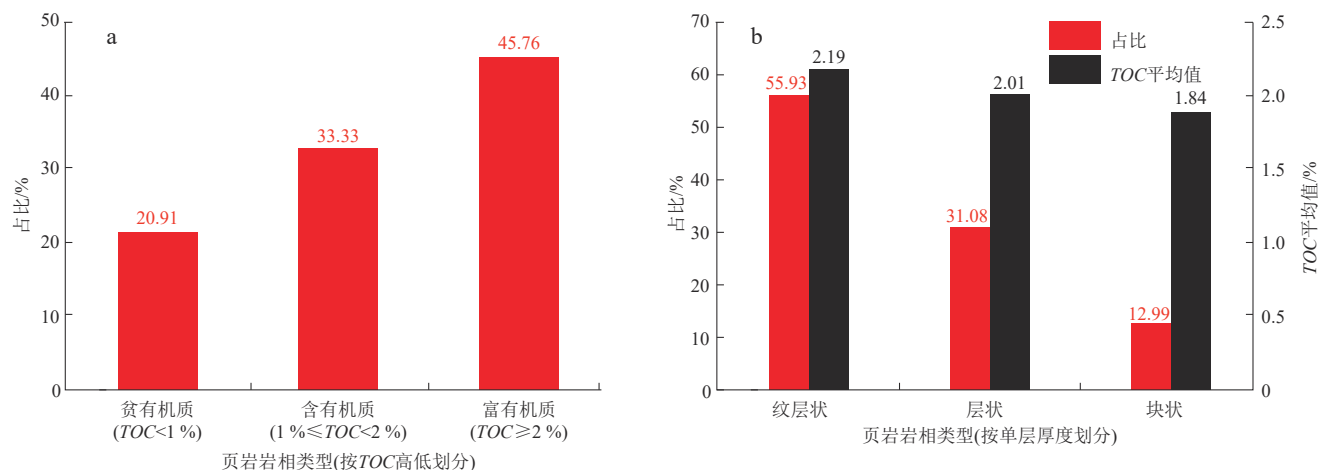


图3 川北山前带筇竹寺组页岩 TOC 分级占比(a)、沉积构造类型占比及相应 TOC 平均值(b)

Fig. 3 The proportions of shale samples with TOC values in different ranges (a), the proportions of shale samples of different sedimentary structures and the corresponding TOC average values (b) of Qiongzhusi Formation shale in the piedmont zone of northern Sichuan Basin

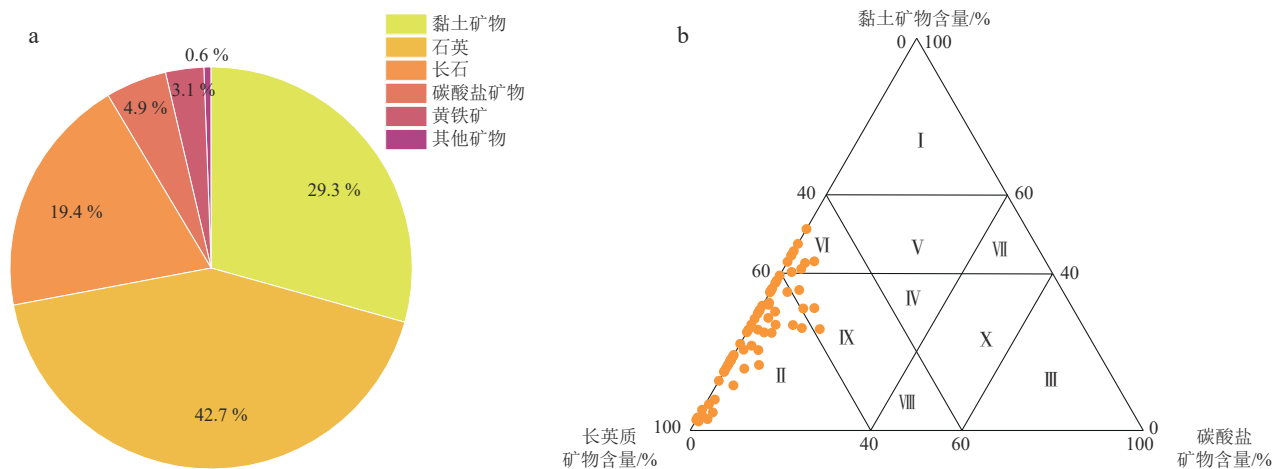


图4 川北山前带筇竹寺组页岩矿物组分饼状图(a)和三端元投点图(b)

Fig. 4 Pie chart (a) and ternary diagram (b) showing shale mineral composition of the Qiongzhusi Formation in the piedmont zone of northern Sichuan Basin

I. 差脆性黏土质页岩相; II. 强脆性硅质页岩相; III. 高脆性碳酸盐岩质页岩相; IV. 高脆性混合质页岩相; V. 中等脆性中黏土质页岩相; VI. 中等脆性硅/黏土混合质页岩相; VII. 中等脆性碳酸盐岩/黏土混合质页岩相; VIII. 高脆性硅/碳酸盐岩混合质页岩相; IX. 高脆性中硅质页岩相; X. 高脆性中碳酸盐岩质页岩相

层状强脆性硅质页岩相是最为发育的岩相,占比 32.4%(图5b)。

2.2 主要岩相特征

2.2.1 富有机质纹层状强脆性硅质页岩相

主要形成于具有厌氧和高还原性的深水陆棚沉积环境中,TOC较高,平均为3.16%,主要岩性为灰黑色炭质页岩和粉砂质泥页岩(图6a)。硅质矿物平均含量为75.07%,具有强脆性,黏土矿物含量较低,平均21.80%,碳酸盐矿物基本不发育,平均含量仅0.42%。镜下可见粉砂质水平纹层或变形纹层,由

富有机质泥质与细粉砂组成(图6b)。该岩相是研究区筇竹寺组中最为发育的岩相类型,占比32.40%,主要发育在云雾山、朱家坝剖面、程家坝等剖面的底部。

2.2.2 富有机质层状强脆性硅质页岩相

主要沉积在相对低能、缺氧的还原环境中,TOC最高,平均为3.37%,岩性以灰黑色-黑色炭质页岩为主(图6c)。硅质矿物含量极高,平均为74.72%,黏土矿物平均含量为24.76%。镜下见少量细粉砂级石英颗粒均匀分布(图6d),露头样品中成层性较好(图6e)。该岩相占比8.50%,主要发育在云雾山剖面。

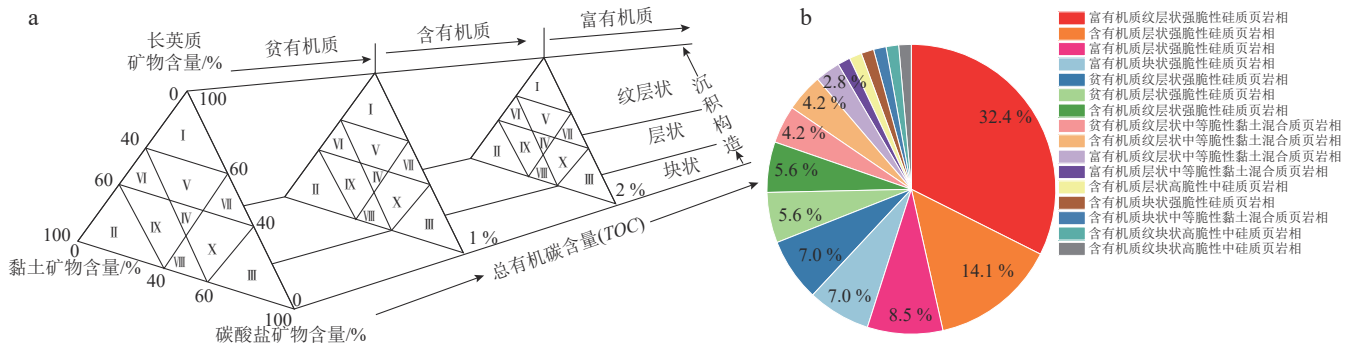


图5 川北山前带筇竹寺组页岩三端元四组分岩相划分方案(a)和岩相类型占比(b)

Fig. 5 The three-terminal four-component lithofacies division scheme (a) and lithofacies type proportion (b) of the Qiongzhusi Formation in the piedmont zone of northern Sichuan Basin

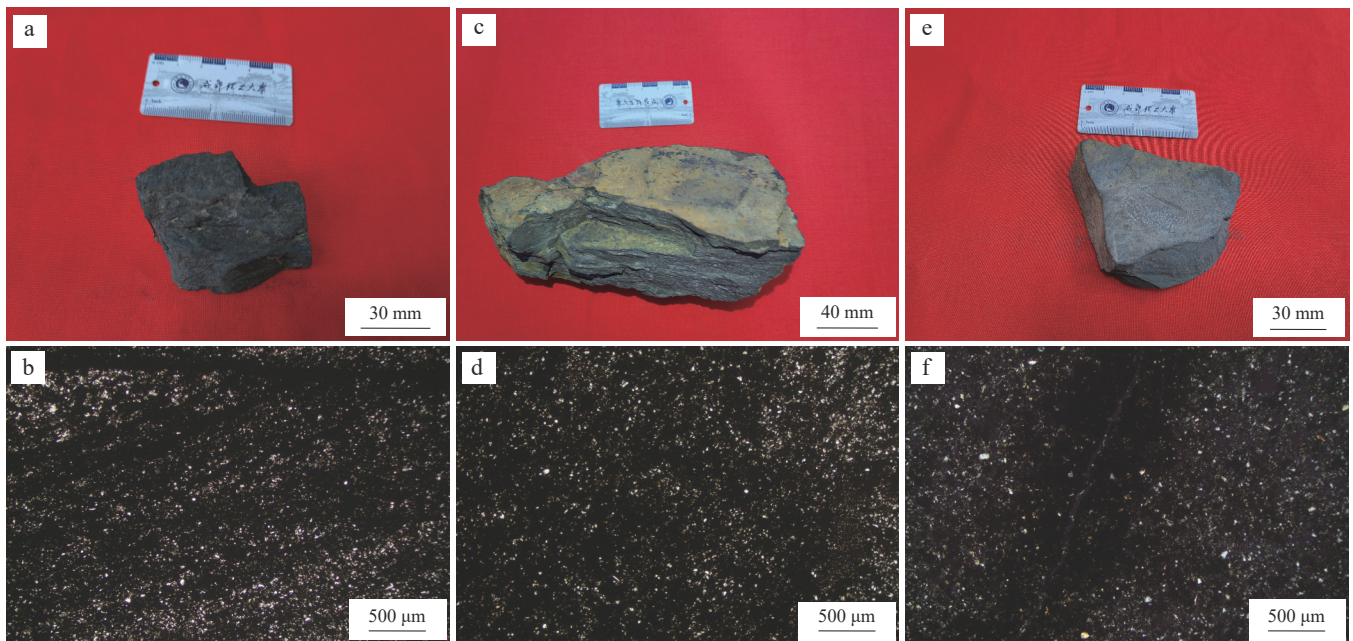


图6 川北山前带筇竹寺组典型岩相特征

Fig. 6 Typical lithofacies characteristics of the Qiongzhusi Formation in the piedmont zone of northern Sichuan Basin

a. 富有机质纹层状强脆性硅质页岩相, 黑色炭质页岩, 白云村剖面, 距底 115.5 m, 第三段, $TOC=3.13\%$, 岩心照片; b. 富有机质层状强脆性硅质页岩相, 粉砂质泥岩, 程家坝剖面, 距底 57.6 m, 第二段, $TOC=2.56\%$, 单偏光显微照片; c. 富有机质层状强脆性硅质页岩相, 灰黑色炭质页岩, 云雾山剖面, 距底 74.7 m, 第二段, $TOC=7.68\%$, 岩心照片; d. 富有机质层状强脆性硅质页岩相, 粉砂质泥岩, 程家坝剖面, 距底 56.2 m, 第二段, $TOC=2.34\%$, 单偏光显微照片; e. 含有机质层状强脆性硅质页岩相, 灰黑色粉砂质泥岩, 光雾山剖面, 距底 28.0 m, 第一段, $TOC=1.94\%$, 岩心照片; f. 含有机质层状强脆性硅质页岩相, 泥质粉砂岩, 花街村剖面, 距底 40.0 m, 第一段, $TOC=1.19\%$, 单偏光显微照片

2.2.3 含有机质层状强脆性硅质页岩相

主要形成于深水陆棚和浅水陆棚的过渡环境中, TOC 平均为 1.48% , 主要岩性为灰黑色-深灰色页岩、含粉砂页岩和粉砂质泥岩(图 6e)。硅质矿物平均含量为 71.61% , 黏土矿物平均含量为 21.86% , 碳酸盐矿物平均含量仅 2.92% 。镜下颜色主要为灰黑色, 内部充填石英颗粒(图 6f), 单层厚度普遍在 $2\sim 5\text{ mm}$ 。薄片下该岩相占比 14.10% , 主要发育在云雾山、光雾山和花街村剖面。

综合分析表明, 富有机质纹层状强脆性硅质页岩

相具有有机碳含量高、可压裂性强、分布范围广等特点, 是页岩气勘探开发首选的目标岩相。

3 富有机质页岩分布特征

3.1 富有机质页岩纵/横向分布规律

根据川北山前带筇竹寺组露头岩性变化、野外仪器打点数据和 TOC 含量等特征, 综合对比区内钻井资料及前人对筇竹寺组的划分方案^[36, 46], 认为研究区下

寒武统筇竹寺组自下而上可分为第一段、第二段和第三段(图7)。

受海平面周期性变化的影响,不同区域内筇竹寺组富有机质页岩在纵向上具有相似的规律,即自第一段到第三段页岩有机质丰度呈旋回性递减、富有机质页岩厚度逐渐减薄的特点(图7)。①第一段沉积期,川北山前带沉积区主要受到来自南—东南向的大规模海侵作用^[36, 46],筇竹寺组底部沉积了大套富有机质页岩,其主要岩性为灰黑色—黑色炭质页岩和含粉砂页岩等,主要岩相为富有机质纹层状/层状强脆性硅质页岩相。②第二段沉积期,海侵作用减弱,页岩有机质丰度降低、厚度减薄,主要发育灰黑色页岩和粉砂质泥岩等,岩相以富有机质纹层状强脆性硅质页岩相和含有机质纹层状强脆性硅质页岩相为主。③第三段沉积期,川北山前带沉积区开始发生海退^[47],同时随着北部摩天岭古陆和汉南古陆的持续隆升^[47-48],研究区整体水体变浅,富有机质页岩极少发育,有机质丰度变低,沉积岩性以粉砂质泥岩和泥质粉砂岩为主,主要岩相为贫有机质纹层状强脆性硅质页岩相。

横向上,筇竹寺组富有机质页岩的分布主要受区内隆—凹相间的古地理格局控制而呈现较大差异。研

究区西部云雾山和白云村剖面位于绵阳—长宁拉张槽内,拉张裂隙作用强烈^[43],在强迫式快速海侵下自下而上沉积了多套富有机质页岩,有机质丰度高,且该区可能受硅质热液的影响^[43],石英含量极高(平均为71.68%),富有机质页岩主要发育纹层状/层状强脆性硅质页岩相;位于南江西的花街村、代弓村和杨坝等剖面则受西部拉张槽和东部坳陷的双重控制,富有机质页岩主要沉积在第一段和第二段的底部,其岩相主要为纹层状强脆性硅质页岩相;南江东的程家坝和朱家坝剖面主要受区内坳陷的控制,富有机质页岩在第一段到第三段之间连续沉积,其岩相主要为纹层状强脆性硅质页岩相和纹层状中等脆性黏土混合质页岩相。研究区东部的小洋剖面由于离古隆起较近,沉积水体较浅,有机质丰度低,基本不发育富有机质页岩(图7)。

3.2 富有机质页岩平面展布特征

通过统计分析研究区野外剖面 and 单井及其周缘单井的筇竹寺组富有机质页岩 TOC 测试数据,编制了川北山前带筇竹寺组富有机质页岩 TOC 平均值($\geq 2\%$)分布图(图8)和富有机质页岩厚度分布图(图9),并结

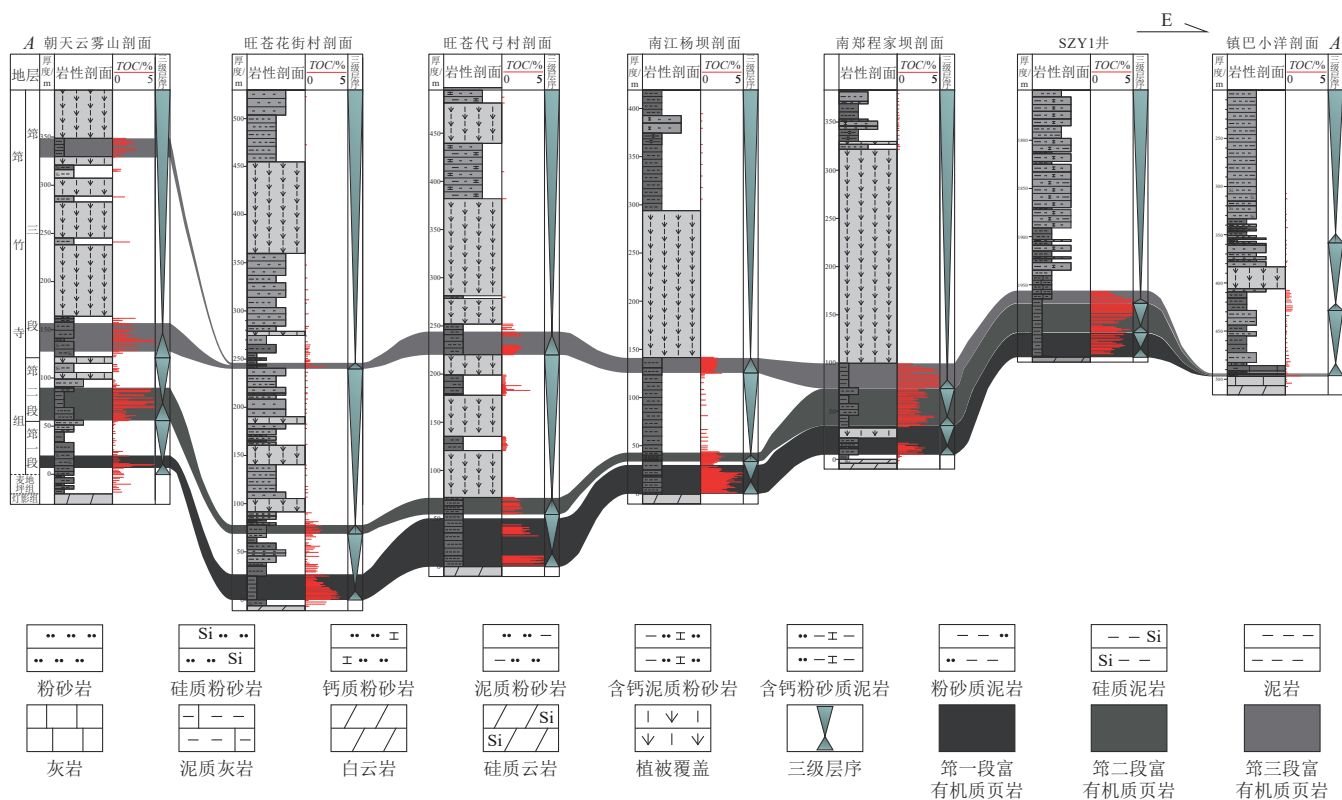


图7 川北山前带筇竹寺组富有机质页岩分布(剖面位置见图1a)

Fig. 7 Profile showing distribution of organic-rich shale of the Qiongzhusi Formation in the piedmont zone of northern Sichuan Basin (see Fig. 1a for the profile location)

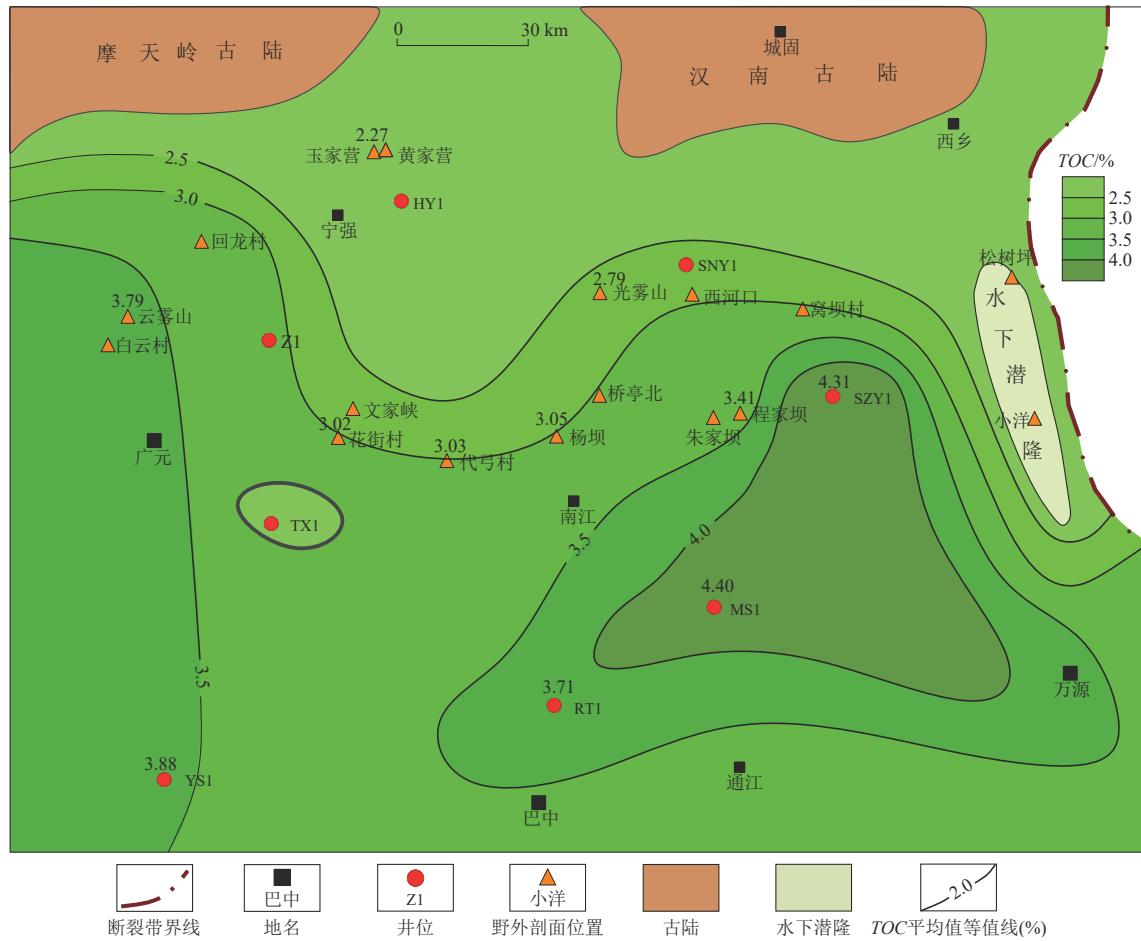


图8 川北山前带筇竹寺组富有机质页岩 TOC 平均值分布

Fig. 8 Contour map showing average TOC of organic-rich shale of the Qiongzhusi Formation in the piedmont zone of northern Sichuan Basin (井位和野外剖面上方数字为页岩 TOC, %.)

合岩相发育特征对研究区富有机质页岩的优势沉积区进行了分类(表1)。

从平面分布来看,川北山前带筇竹寺组富有机质页岩有机质丰度具南高北低、西高东低的特点,页岩厚度具南厚北薄、西厚东薄的特点(图8,图9)。广元朝天地区的白云村、云雾山等地和南郑—镇巴一带的朱家坝剖面、程家坝剖面及SZY1井等地为研究区的两个优势沉积区,其中位于镇巴西的SZY1井富有机质页岩品质最好,其TOC平均值为4.31%,富有机质页岩厚度为75.3 m,主要岩相为纹层状强脆性硅质页岩相;

广元朝天地区的云雾山剖面富有机质页岩也呈现出较好的品质,其TOC平均值为3.79%,富有机质页岩厚度为59.0 m,主要岩相为纹层状/层状强脆性硅质页岩相。旺苍—南江一带的TX1井、花街村剖面、代弓村剖面和杨坝剖面等富有机质页岩沉积的中等相区,其富有机质页岩TOC平均值普遍介于2.50%~3.50%,富有机质页岩厚度介于20.0~60.0 m,主要岩相为纹层状/层状强脆性硅质页岩相。汉中宁强和镇巴小洋地区则由于靠近古陆,富有机质页岩发育较差,主要岩相为层状中等脆性黏土混合质页岩相。

表1 川北山前带富有机质页岩沉积区分类

Table 1 Classification of sedimentary areas with organic-rich shales in the piedmont zone of northern Sichuan Basin

类别	富有机质页岩 TOC 平均值/%	富有机质页岩 岩厚度/m	主要岩相类型	地区	代表剖面/井位	评价
I 类	>3.5	>60	纹层状/层状强脆性硅质页岩相	广元朝天、南郑—镇巴西一带	云雾山、SZY1 井	优势沉积区
II 类	2.5~3.5	20~60	纹层状/层状强脆性硅质页岩相	旺苍—南江一带	花街村、代弓村	中等沉积区
III 类	2.0~2.5	<20	层状中等脆性黏土混合质页岩	汉中宁强、镇巴	黄家营、小洋	差沉积区

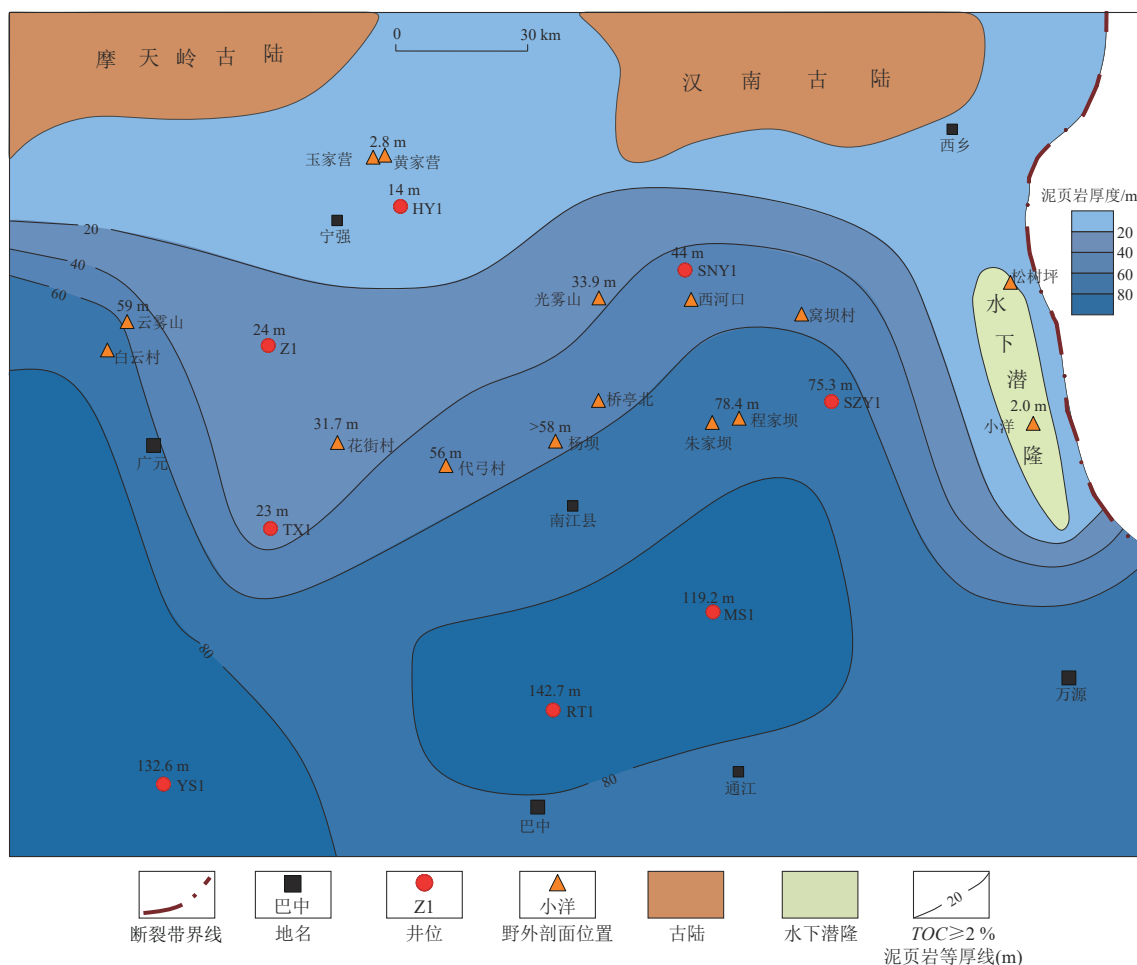


图9 川北山前带筇竹寺组富有机质页岩厚度分布

Fig. 9 Isopach of organic-rich shale of the Qiongzhusi Formation in the piedmont zone of northern Sichuan Basin
(井位和野外剖面上方数字为页岩厚度, m。)

4 富有机质页岩发育模式及控制因素

4.1 区域构造背景对页岩差异性分布的控制

晚震旦世—早寒武世,川北山前带沉积区经历了2次大规模的构造活动事件:①灯影组沉积期间发生以升降运动为主的桐湾运动,区内地层发生大规模抬升剥蚀,差异性隆升形成隆—凹相间的裂谷盆地格局,导致早寒武世沉积基底凹凸不平,沉积厚度变化较大^[49]。②早寒武世麦地坪组—筇竹寺组沉积期发生以地壳拉张作用为主的兴凯地裂运动,区内形成了大量断层和裂缝^[50],同时促进了绵阳—长宁拉张槽的发育^[8]。区域性隆—凹相间的古地理格局奠定了筇竹寺组页岩差异性分布的基础:拉张槽(白云村和云雾山剖面)及区内坳陷(SZY1井和程家坝等剖面)由于具有足够的可容纳空间,且长期处于安静的深水滞留沉积环

境,沉积了大套以纹层状/层状强脆性硅质页岩相为主的高品质富有机质页岩;而位于隆起区附近的小洋和黄家营等剖面则由于构造抬升地层剥蚀严重,且沉积水体较浅,富有机质页岩极少发育,有机质丰度较低,主要发育贫有机质层状中等脆性黏土混合质页岩相(图7—图9)。

除古地理格局外,筇竹寺组沉积期以来的构造演化也促进了页岩的差异性分布:筇竹寺组沉积期间,构造运动使西北沉积区开始缓慢抬升至地表,形成摩天岭古陆并持续隆升^[47],但影响较弱;同时研究区北缘也受到汉南古陆持续隆升的影响^[48],对页岩富集起到了较大的破坏性作用,页岩品质(厚度及有机质丰度)由北到南逐渐变好(图8,图9)。另外,除桐湾运动和兴凯地裂运动外,筇竹寺组还先后经历了加里东运动、海西运动、印支运动、燕山运动和喜马拉雅运动等多期构造运动的叠加改造^[8],差异性的构造演化加剧了筇竹寺组页岩的非均质性展布。

4.2 沉积古地理环境对富有机质页岩的控制

黑色富有机质页岩的形成往往伴随沉积地质环境的重大演变,由晚震旦世灯影期的碳酸盐台地沉积转变为早寒武世筇竹寺期富有机质页岩沉积^[25, 51]。晚震旦世—早寒武世期间,受大陆裂解及海底扩张作用影响,中、上扬子地区火山热液活动频繁^[8, 52-53],繁盛发育的低等浮游生物及细菌等共同为筇竹寺组页岩提供了有机质母源^[54],同时川北山前带周缘的摩天岭古陆及汉南古陆为筇竹寺组碎屑岩沉积提供了充足的物质基础^[39, 55-56]。

海相细粒沉积中,U/Th元素含量比值和化学蚀变指数(CIA)被视作评估氧化还原条件及古气候的可靠指标^[57-60]:当U/Th比值小于0.75时为氧化环境,U/Th比值介于0.75~1.25为贫氧环境,U/Th比值大于1.25为缺氧环境,而氧化还原条件常常与水深存在着极强的相关性,因此U/Th比值也可用于表征相对古水深;CIA值介于50~65对应弱风化的寒冷干燥气候环境,CIA值介于65~85对应中等风化的温暖湿润气候环境。文中U和Th元素数据源于露头剖面伽马仪打点,CIA值则是通过露头样品的主量元素数据计算校正所得。

第一段沉积早期,中、上扬子地区经历了大规模海侵^[41],U/Th平均值1.42,CIA平均值71.9,指示区内整体处于缺氧的深水环境中,气候温暖湿润,沉积了大套厚层以纹层状/层状强脆性硅质页岩相为主的富有机质页岩,第一段晚期时U/Th比值和CIA值呈逐步下降趋势,沉积环境逐渐过渡到贫氧、氧化的浅水环境中,气候转变为寒冷干燥(图10)。第二段—第三段沉积期间,U/Th比值和CIA值皆呈现早期快速升高,晚期持续降低的趋势(图10),体现了研究区内筇竹寺组3次周期性海平面变化及古气候呈现温湿—干旱的交替变化过程,这一变化特征也很好印证了前人观点^[23, 56, 61]。第三段沉积期为缓慢海退阶段^[23],加之研究区北缘摩天岭古陆和汉南古陆的持续隆升,区内地层抬升,整体处于富氧的浅水沉积环境,气候寒冷干燥,主要发育贫有机质层状中等脆性黏土混合质页岩相,有机质富集条件较差。

综上所述,尽管筇竹寺组氧化还原条件、古水深和古气候等古地理环境呈周期性变化,但筇竹寺组整体上是从小早期缺氧(硫化)深水、温暖湿润的沉积环境向晚期富氧浅水、寒冷干燥的沉积环境持续性转变,且U/Th比值和CIA值皆与TOC具有较好的正相关性(图11a,b),这也导致富有机质页岩在纵向上呈现旋回性分布的特点(图7)。

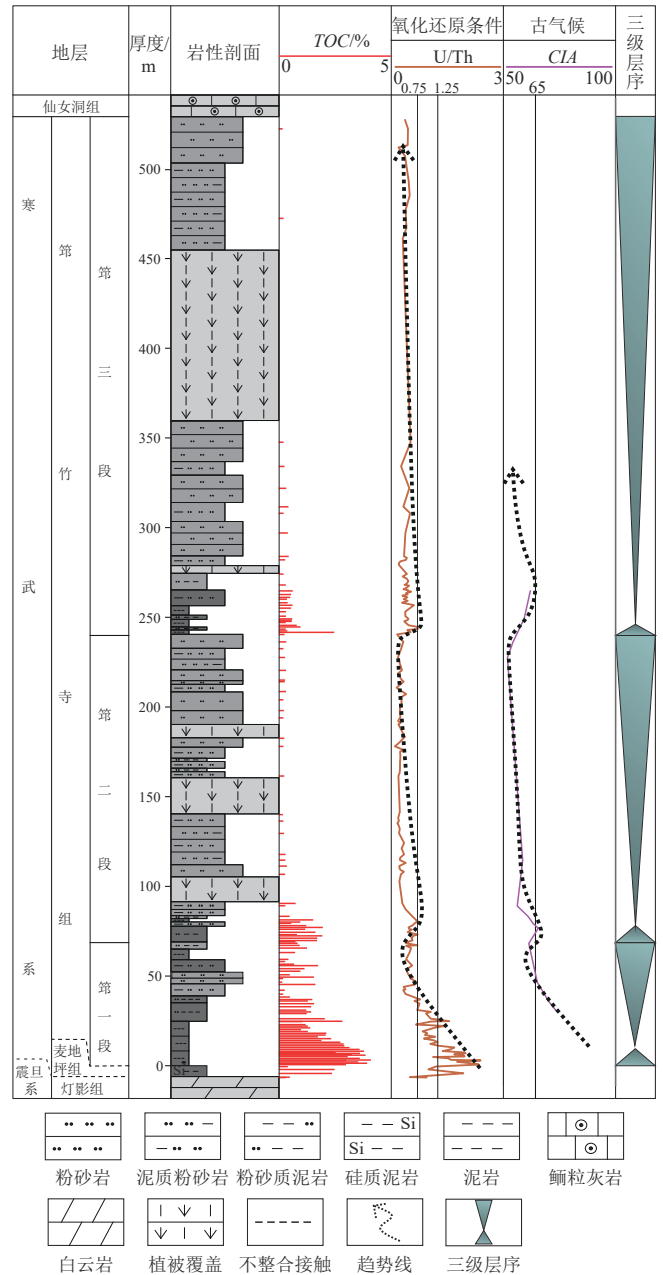


图10 广元市旺苍县花街村剖面筇竹寺组氧化还原条件与古气候演化柱状图

Fig. 10 Column showing the redox conditions and paleoclimate evolution of the Qiongzhusi Formation in Huajiecu section, Wangcang county, Guangyuan city

4.3 富有机质页岩沉积模式

基于前文对川北山前带富有机质页岩展布规律的厘定及控制因素的探讨,综合研究区及其周缘数十条野外露头剖面及大量钻井资料的对比分析,建立了川北山前带富有机质页岩沉积发育模式(图12)。第一段沉积期,伸展裂陷作用强烈,海平面一直偏高,低程度的陆源稀释和缺氧条件有利于有机质的保存及优势岩相

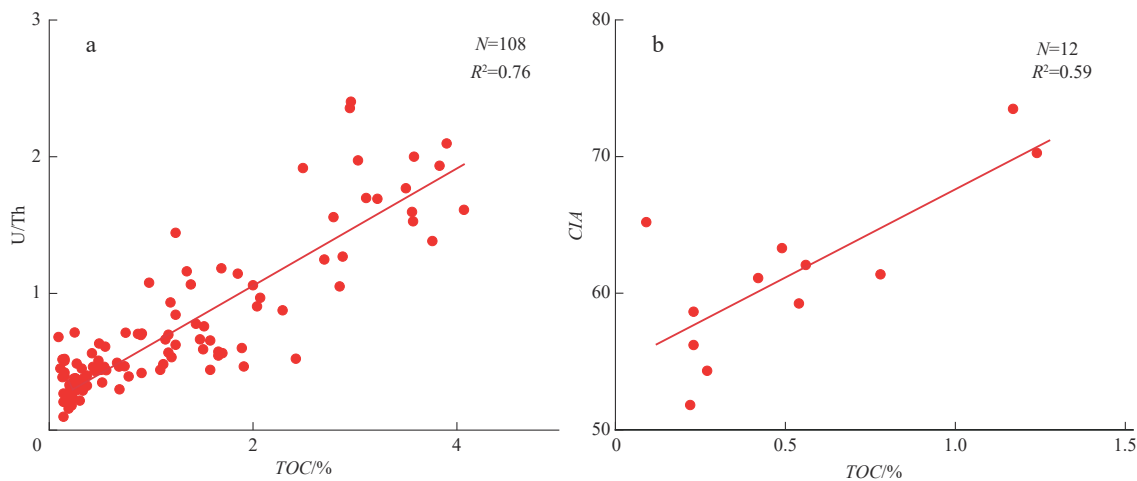


图 11 广元市旺苍县花街村剖面总有机碳含量与氧化还原条件(a)及古气候(b)关系

Fig. 11 Relationships of TOC content with redox conditions (a) and paleoclimate (b) in Huajiecun outcrop section, Wangcang county, Guangyuan city

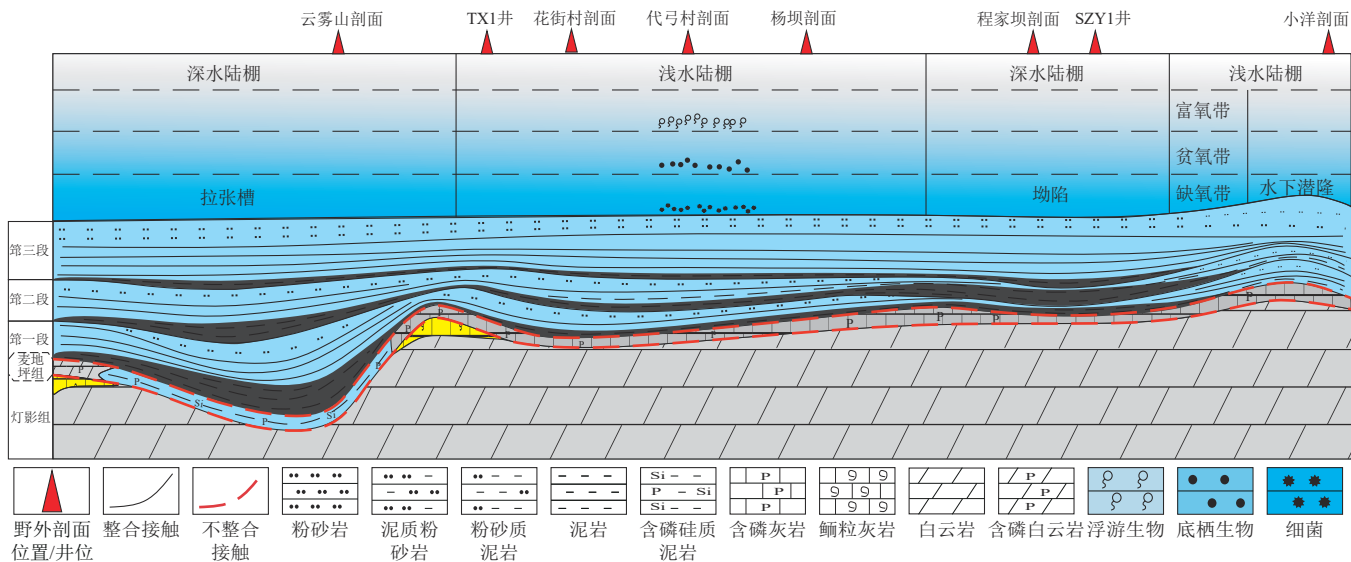


图 12 川北山前带筇竹寺组富有机质页岩沉积模式

Fig. 12 Sedimentary model of organic-rich shales in the Qiongzhusi Formation in the piedmont zone of northern Sichuan Basin

发育,该时期页岩品质最好,沉积厚度最大。第二段沉积期伸展裂陷作用减弱,海平面开始下降,有机质富集条件变差,页岩有机质丰度逐渐降低。第三段沉积过程中,扬子地台经历了填平补齐过程,海平面持续降低,区域内以富氧环境为主,富有机质页岩形成条件较差。

5 结论与建议

5.1 结论

1) 按照 TOC—沉积构造—矿物组分(脆性特征)三级划分方案,川北山前带筇竹寺组泥页岩共发育 16

种岩相类型,主要岩相为富有机质纹层状强脆性硅质页岩相(占比 32.4%)、富有机质层状强脆性硅质页岩相(占比 8.5%)和含有机质层状强脆性硅质页岩相(占比 14.1%),其中前两类岩相为页岩气勘探开发首选的目标岩相。

2) 川北山前带寒武系筇竹寺组富有机质页岩在纵向上呈旋回性递减的趋势,横向上存在拉张槽(白云村和云雾山剖面)及区内坳陷(SZY1 井和程家坝剖面等)两个优势沉积区,平面上富有机质页岩厚度具南厚北薄、西厚东薄的特点,有机质丰度具南高北低、西高东低的特点。

3) 拉张槽及区域内隆—凹相间的古地理格局是筇

竹寺组富有机质页岩差异分布的主要原因,区内不均衡构造演化加剧了页岩的非均质性展布;繁盛发育的低等浮游生物及细菌等提供了丰富的有机质来源,充足的物源为筇竹寺组碎屑沉积的物质基础,早期快速海侵下缺氧的深水环境利于有机质的保存,晚期摩天岭古陆和汉南古陆的持续隆升对有机质富集起抑制作用,但摩天岭古陆影响较弱。

5.2 建议

目前关于四川盆地寒武系筇竹寺组页岩发育的地质背景、岩相类型和分布规律等主要沉积特征的研究均取得重要进展,但不同沉积背景条件下富有机质页岩的沉积序列、岩相类型及分布、储层特征和寒武系早期特殊的古海洋环境与有机质发育富集之间的关系等,都需要开展深入分析。可考虑开展经典露头沉积序列精细解剖和典型岩相储层分析,结合地球物理和地球化学资料,充分利用纳米CT和氩离子抛光等精细测试手段,开展比较沉积学和细粒岩储层地质学研究,进一步解决上述科学问题。

参 考 文 献

- [1] 王光付,李凤霞,王海波,等. 四川盆地不同类型页岩气压裂难点和对策[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(6): 1378-1392.
WANG Guangfu, LI Fengxia, WANG Haibo, et al. Difficulties and countermeasures for fracturing of various shale gas reservoirs in the Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(6): 1378-1392.
- [2] 王建,郭秋麟,赵晨蕾,等. 中国主要盆地页岩油气资源潜力及发展前景[J]. 石油学报, 2023, 44(12): 2033-2044.
WANG Jian, GUO Qiulin, ZHAO Chenlei, et al. Potentials and prospects of shale oil-gas resources in major basins of China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(12): 2033-2044.
- [3] 邹才能,潘松圻,荆振华,等. 页岩油气革命及影响[J]. 石油学报, 2020, 41(1): 1-12.
ZOU Caineng, PAN Songqi, JING Zhenhua, et al. Shale oil and gas revolution and its impact [J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(1): 1-12.
- [4] 邱振,邹才能. 非常规油气沉积学: 内涵与展望[J]. 沉积学报, 2020, 38(1): 1-29.
QIU Zhen, ZOU Caineng. Unconventional petroleum sedimentology: Connotation and prospect [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2020, 38(1): 1-29.
- [5] 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.
- [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] 王同,熊亮,徐猛,等. 川南地区下寒武统筇竹寺组页岩储层特征[J]. 石油实验地质, 2016, 38(2): 197-203, 210.
WANG Tong, XIONG Liang, XU Meng, et al. Shale reservoir characteristics of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in the southern Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2016, 38(2): 197-203, 210.
- [8] 燕继红,李启桂,朱祥. 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[J]. 石油实验地质, 2016, 38(4): 445-452.
YAN Jihong, LI Qigui, ZHU Xiang. Main factors controlling shale gas accumulation and exploration targets in the Lower Cambrian, Sichuan Basin and its periphery [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2016, 38(4): 445-452.
- [9] 聂海宽,张金川,李玉喜. 四川盆地及其周缘下寒武统页岩气聚集条件[J]. 石油学报, 2011, 32(6): 959-967.
NIE Haikuan, ZHANG Jinchuan, LI Yuxi. Accumulation conditions of the Lower Cambrian shale gas in the Sichuan Basin and its periphery [J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(6): 959-967.
- [10] 程克明,王世谦,董大忠,等. 上扬子区下寒武统筇竹寺组页岩气成藏条件[J]. 天然气工业, 2009, 29(5): 40-44.
CHENG Keming, WANG Shiqian, DONG Dazhong, et al. Accumulation conditions of shale gas reservoirs in the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation, the Upper Yangtze region [J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(5): 40-44.
- [11] 胡琳,朱炎铭,陈尚斌,等. 中上扬子地区下寒武统筇竹寺组页岩气资源潜力分析[J]. 煤炭学报, 2012, 37(11): 1871-1877.
HU Lin, ZHU Yanming, CHEN Shangbin, et al. Resource potential analysis of shale gas in Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in Middle & Upper Yangtze region [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(11): 1871-1877.
- [12] 张静平,唐书恒,郭东鑫. 四川盆地古生界筇竹寺组与龙马溪组页岩气勘探优选区预测[J]. 地质通报, 2011, 30(2/3): 357-363.
ZHANG Jingping, TANG Shuheng, GUO Dongxin. Shale gas favorable area prediction of the Qiongzhusi Formation and Longmaxi Formation of Lower Palaeozoic in Sichuan Basin, China [J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(2/3): 357-363.
- [13] 黄金亮,邹才能,李建忠,等. 川南下寒武统筇竹寺组页岩气形成条件及资源潜力[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(1): 69-75.

- HUANG Jinliang, ZOU Caineng, LI Jianzhong, et al. Shale gas generation and potential of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in Southern Sichuan Basin, China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(1): 69–75.
- [14] 刘早学, 许露露, 温雅茹, 等. 湖北寒武系牛蹄塘组页岩气成藏条件与综合评价[J]. *地球科学*, 2022, 47(5): 1586–1603.
- LIU Zaoxue, XU Lulu, WEN Yaru, et al. Accumulation characteristics and comprehensive evaluation of shale gas in Cambrian Niutitang Formation, Hubei[J]. *Earth Science*, 2022, 47(5): 1586–1603.
- [15] 饶松, 杨铁南, 胡圣标, 等. 川西南地区下寒武统筇竹寺组页岩热演化史及页岩气成藏意义[J]. *地球科学*, 2022, 47(11): 4319–4335.
- RAO Song, YANG Yinan, HU Shengbiao, et al. Thermal evolution history and shale gas accumulation significance of Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in southwest Sichuan Basin[J]. *Earth Science*, 2022, 47(11): 4319–4335.
- [16] 戴金星, 倪云燕, 董大忠, 等. 近10年中国天然气工业快速发展[J]. *天然气地球科学*, 2022, 33(12): 1907–1910.
- DAI Jinxing, NI Yunyan, DONG Dazhong, et al. Rapid development of China's natural gas industry in the past decade[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2022, 33(12): 1907–1910.
- [17] 何陈诚, 陈红汉, 肖雪薇, 等. 中-上扬子地区下寒武统筇竹寺阶泥页岩差异成气过程分析[J]. *地学前缘*, 2023, 30(3): 44–65.
- HE Chencheng, CHEN Honghan, XIAO Xuewei, et al. Differential shale gas generation in the Lower Cambrian Qiongzhusi stage in the Middle-Upper Yangtze region[J]. *Earth Science Frontiers*, 2023, 30(3): 44–65.
- [18] 罗锦宇, 祝海华, 梁兴, 等. 滇黔北拗陷寒武系筇竹寺组岩相古地理特征与优质页岩展布[J]. *沉积学报*, 2023, 41(4): 1257–1270.
- LUO Jinyu, ZHU Haihua, LIANG Xing, et al. Lithofacies paleogeography and distribution of high-quality shale of the Cambrian Qiongzhusi Formation in the Dianqianbei Depression[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2023, 41(4): 1257–1270.
- [19] 周杨, 金思丁, 刘岩, 等. 川西南下寒武统筇竹寺组页岩旋回地层学研究[J]. *沉积学报*, 2024, 42(1): 142–157.
- ZHOU Yang, JIN Siding, LIU Yan, et al. Cyclostratigraphy research on well-logging of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in southwestern Sichuan Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2024, 42(1): 142–157.
- [20] 刘瑞奎, 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.
- [21] LIU Sibing, JIN Siding, LIU Yan, et al. Astronomical forced sequence infill of Early Cambrian Qiongzhusi organic-rich shale of Sichuan Basin, South China[J]. *Sedimentary Geology*, 2022, 440: 106261.
- [22] LAN Zhengkai, SHEN Junjun. Depositional paleo-environments of Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in the Western Middle Yangtze Block and its controlling effect on the organic matter enrichment[J]. *Energies*, 2022, 15(10): 3761.
- [23] 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 Meiyun, 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.
- [24] 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.
- [25] WANG Xiwei, ZHANG Jinchuan, ZHAO Rongrong, et al. Siliceous origin of the Cambrian Qiongzhusi Formation shale in the middle part of the Upper Yangtze platform: Significance of organic matter enrichment[J]. *ACS Omega*, 2023, 8(28): 25358–25369.
- [26] 古恒, 王剑, 韦恒叶, 等. 四川盆地城口地区下寒武统水井沱组有机质富集控制因素[J]. *沉积学报*, 2024, 42(3): 1073–1091.
- GU Heng, WANG Jian, WEI Hengye, et al. Controlling factors of organic enrichment in the Shuijingtuo Formation in the Lower Cambrian of the Chengkou area, Sichuan Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2024, 42(3): 1073–1091.
- [27] 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 Meiyun, 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.
- [28] YANG Wei, QIN Yuanyuan, ZHANG Tingshan. The characteristics and developmental control factors of microscopic pore structure in shale gas reservoirs in the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, 565(1): 012076.
- [29] ZENG Ping, GUO Tonglou. Enrichment of shale gas in different strata in Sichuan Basin and its periphery—The examples of the Cambrian Qiongzhusi Formation and the Silurian Longmaxi Formation[J]. *Energy Exploration & Exploitation*, 2015, 33(3): 277–298.
- [30] 何晓, 郑马嘉, 刘勇, 等. 四川盆地“槽—隆”控制下的寒武系筇

- 竹寺组页岩储层特征及其差异性成因[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(2): 420-439.
- HE Xiao, ZHENG Majia, LIU Yong, et al. Characteristics and differential origin of Qiongzhusi Formation shale reservoirs under the “aulacogen-uplift” tectonic setting, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(2): 420-439.
- [31] 张烨, 余川, 张志平, 等. 大巴山北缘下寒武统页岩沉积特征及有利相带分析——以紫阳毛坝剖面为例[J]. 油气藏评价与开发, 2022, 12(1): 107-118.
- ZHANG Ye, YU Chuan, ZHANG Zhiping, et al. Sedimentary characteristics and favorable facies of Lower Cambrian Shale in the northern margin of Mount Daba: A case study of Maoba Outcrop in Ziyang [J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(1): 107-118.
- [32] 闪晨晨. 米仓山地区下寒武统牛蹄塘组页岩气成藏条件研究[D]. 西安: 长安大学, 2020.
- SHAN Chenchen. Study on shale gas accumulation conditions of the Lower Cambrian Niutitang Formation in the Micangshan area [D]. Xi'an: Chang'an University, 2020.
- [33] 魏全超, 李小佳, 李峰, 等. 四川盆地米仓山前缘旺苍地区下寒武统筇竹寺组裂缝脉体发育特征及意义[J]. 岩性油气藏, 2023, 35(5): 62-70.
- WEI Quanchao, LI Xiaojia, LI Feng, et al. Development characteristics and significance of fracture veins of Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in Wangcang area at Micang Mountain front, Sichuan Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2023, 35(5): 62-70.
- [34] 师文文, 杨兆林, 尹洪荣, 等. 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[J]. 世界地质, 2022, 41(1): 173-185.
- SHI Wenwen, YANG Zhaolin, YIN Hongrong, et al. Characteristics and formation mechanism of sandstone spherical weathering in Lower Cambrian Qiongzhusi Formation, Micangshan structural zone[J]. Global Geology, 2022, 41(1): 173-185.
- [35] 杨帅杰, 王伟锋, 张道亮, 等. 川东北地区筇竹寺组优质烃源岩分布特征及形成环境[J]. 天然气地球科学, 2020, 31(4): 507-517.
- YANG Shuaijie, WANG Weifeng, ZHANG Daoliang, et al. Distribution characteristics and formation environment of high quality source rocks of Qiongzhusi Formation in northeastern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2020, 31(4): 507-517.
- [36] 江凯禧, 彭丽, 何文祥, 等. 页岩气储层非均质性研究——以四川盆地寒武统筇竹寺组为例[J]. 海洋地质前沿, 2014, 30(8): 47-54.
- JIANG Kaixi, PENG Li, HE Wenxiang, et al. Research of shale gas reservoir heterogeneity: A case of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation of the Sichuan Basin[J]. Marine Geology Frontiers, 2014, 30(8): 47-54.
- [37] 汤聪, 刘树根, 李智武, 等. 米仓山构造带逆冲-走滑变形序列的节理研究[J]. 岩性油气藏, 2011, 23(4): 81-87.
- TANG Cong, LIU Shugen, LI Zhiwu, et al. Thrust and strike-slip deformation sequence of Micangshan structural belt[J]. Lithologic Reservoirs, 2011, 23(4): 81-87.
- [38] 孙东. 米仓山构造带构造特征及中-新生代构造演化[D]. 成都: 成都理工大学, 2011.
- SUN Dong. The structural character and Meso-Cenozoic evolution of Micang Mountain Structural Zone, Northern Sichuan Basin, China[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011.
- [39] 王瀚. 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[D]. 成都: 成都理工大学, 2020.
- WANG Han. Sedimentary structural pattern and its significance of petroleum geology from Sinian to Early Cambrian in northern margin of Upper Yangtze [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020.
- [40] 贾智彬. 贵州地区牛蹄塘组热水沉积的地球化学特征研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
- JIA Zhibin. Geochemistry characteristics of hydrothermal sedimentation in the Lower Cambrian Niutitang Formation in Guizhou [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018.
- [41] 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.
- [42] 王东, 王国芝. 四川南江地区灯影组白云岩优质储层的形成与演化[J]. 现代地质, 2011, 25(4): 660-667.
- WANG Dong, WANG Guozhi. Formation and evolution of high-quality dolomite reservoir in Dengying Formation of Sinian, Nanjiang area, Sichuan[J]. Geoscience, 2011, 25(4): 660-667.
- [43] 高波, 刘忠宝, 舒志国, 等. 中上扬子地区下寒武统页岩气储层特征及勘探方向[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(2): 284-294.
- GAO Bo, LIU Zhongbao, SHU Zhiguo, et al. Reservoir characteristics and exploration of the Lower Cambrian shale gas in the Middle-Upper Yangtze area[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(2): 284-294.
- [44] 李丹龙, 伏美燕, 邓虎成, 等. 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[J]. 天然气地球科学, 2023, 34(3): 445-459.
- LI Danlong, FU Meiyun, DENG Hucheng, et al. Analysis of lithofacies and sedimentary environment of shale deposited in shelf facies: A case study of the Wenshuicun section in Guizhou Province, South China [J]. Natural Gas Geoscience, 2023, 34(3): 445-459.
- [45] 李卓, 姜振学, 唐相路, 等. 渝东南志留统龙马溪组页岩岩相特征及其对孔隙结构的控制[J]. 地球科学, 2017, 42(7): 1116-1123.
- LI Zhuo, JIANG Zhenxue, TANG Xianglu, et al. Lithofacies characteristics and its effect on pore structure of the marine shale in the Low Silurian Longmaxi Formation, Southeastern Chongqing [J]. Earth Science, 2017, 42(7): 1116-1123.
- [46] 刘仿韩, 苏春乾, 杨友运, 等. 米仓山南坡寒武系沉积相分析[J]. 地球科学与环境学报, 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 Earth Sciences and Environment*, 1987, 9(4): 1-12.
- [47] 莫雄. 川北广元地区寒武纪地层及沉积体系差异性研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2012.
- MO Xiong. Study of stratigraphic classification and the variance of sedimentary system of Cambrian stratum in Guangyuan area, Sichuan [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012.
- [48] 谷志东, 殷积峰, 姜华, 等. 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[J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(1): 1-11.
- GU Zhidong, YIN Jifeng, JIANG Hua, et al. Tectonic evolution from Late Sinian to Early Paleozoic and natural gas exploration in northwestern Sichuan Basin, SW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(1): 1-11.
- [49] 刘建清, 何利, 何平, 等. 康滇古陆东缘筇竹寺组地球化学特征及意义——以云南省昭通市昭阳区锌厂沟剖面为例[J]. *沉积学报*, 2021, 39(5): 1305-1319.
- LIU Jianqing, HE Li, HE Ping, et al. Geochemical characteristics and significance of the Qiongzhusi Formation on the eastern margin of the ancient Kangding-Yunnan land: Taking the Xinchangou section of Zhaoyang district, Zhaotong city, Yunnan Province as an example [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021, 39(5): 1305-1319.
- [50] 李伟, 刘静江, 邓胜徽, 等. 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[J]. *石油学报*, 2015, 36(5): 546-556, 563.
- LI Wei, LIU Jingjiang, DENG Shenghui, et al. The nature and role of Late Sinian-Early Cambrian tectonic movement in Sichuan Basin and its adjacent areas [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(5): 546-556, 563.
- [51] MAYER L M. Surface area control of organic carbon accumulation in continental shelf sediments [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58(4): 1271-1284.
- [52] 祝庆敏, 卢龙飞, 潘安阳, 等. 湘西地区下寒武统牛蹄塘组页岩沉积环境与有机质富集[J]. *石油实验地质*, 2021, 43(5): 797-809, 854.
- ZHU Qingmin, LU Longfei, PAN Anyang, et al. Sedimentary environment and organic matter enrichment of the Lower Cambrian Niutitang Formation shale, western Hunan Province, China [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2021, 43(5): 797-809, 854.
- [53] 罗胜元, 陈孝红, 李海, 等. 鄂西宜昌下寒武统水井沱组页岩气聚集条件与含气特征[J]. *地球科学*, 2019, 44(11): 3598-3615.
- LUO Shengyuan, CHEN Xiaohong, LI Hai, et al. Shale gas accumulation conditions and target optimization of Lower Cambrian Shuijingtu Formation in Yichang area, west Hubei [J]. *Earth Science*, 2019, 44(11): 3598-3615.
- [54] 韩雨樾, 冉波, 李智武, 等. 四川盆地北缘下寒武统页岩生物标志化合物特征及其地质意义[J]. *石油实验地质*, 2019, 41(3): 435-442.
- HAN Yuyue, RAN Bo, LI Zhiwu, et al. Characteristics of biomarker compounds and their implications for Lower Cambrian black shale on the northern margin of Sichuan Basin [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2019, 41(3): 435-442.
- [55] 侯乾乾. 大巴山西段镇巴—西乡地区下古生界黑色岩系页岩气成藏地质条件研究[D]. 西安: 长安大学, 2023.
- HOU Qianqian. Geological conditions of shale gas accumulation in black rock series of Lower Paleozoic in Zhenba-Xixiang area of western Daba Mountain [D]. Xi'an: Chang'an University, 2023.
- [56] 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.
- 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.
- [57] 徐海, 周向辉, 林俊峰, 等. 鄂西宜昌地区稀地1井陡山沱组古沉积环境演化特征[J]. *特种油气藏*, 2023, 30(6): 72-81.
- XU Hai, ZHOU Xianghui, LIN Junfeng, et al. Characteristics of paleo-sedimentary environment evolution of Doushantuo Formation in Well Zidi 1 of Yichang area in west Hubei of China [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2023, 30(6): 72-81.
- [58] 姚天星, 李忠诚, 郭世超, 等. 川南自贡地区海相页岩沉积环境及有机质富集主控因素研究[J]. *特种油气藏*, 2023, 30(4): 79-86.
- YAO Tianxing, LI Zhongcheng, GUO Shichao, et al. Study on the sedimentary environment and main controlling factors of organic matter enrichment of marine shale in Zigong area of the southern Sichuan Basin [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2023, 30(4): 79-86.
- [59] 万蒙蒙, 冯明石, 孟万斌, 等. 宜昌地区下寒武统水井沱组黑色页岩地球化学特征及其地质意义[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2021, 40(4): 946-957.
- WAN Mengmeng, FENG Mingshi, MENG Wanbin, et al. Geochemical characteristics and significance of black shale of the Lower Cambrian Shuijingtu Formation in the Yichang area [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2021, 40(4): 946-957.
- [60] 张春明, 张维生, 郭英海. 川东南—黔北地区龙马溪组沉积环境及对烃源岩的影响[J]. *地质前缘*, 2012, 19(1): 136-145.
- ZHANG Chunming, ZHANG Weisheng, GUO Yinghai. Sedimentary environment and its effect on hydrocarbon source rocks of Longmaxi Formation in southeast Sichuan and northern Guizhou [J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(1): 136-145.
- [61] 张天怡, 黄士鹏, 李贤庆, 等. 四川盆地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.