

引用格式:张焯,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.

DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2022.01.009

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

张焯^{1,2},余川^{1,2},张志平^{1,2},韦国栋³,张华莲^{1,2}

(1.页岩气勘探开发国家地方联合工程研究中心(重庆地质矿产研究院),重庆401120;2.自然资源部页岩气资源勘查重点实验室(重庆地质矿产研究院),重庆401120;3.西南石油大学地球科学与技术学院,四川成都610500)

摘要:大巴山北缘下寒武统页岩气钻探显示良好,具有较好的勘探前景。该区下寒武统普遍发育了一套暗色页岩层系,但地层非均质性较强,区域上沉积相变较大。对该区下寒武统页岩沉积特征进行研究,分析其对有机质差异富集的影响,有助于进一步的勘探开发工作。以紫阳毛坝露头剖面及其实验测试资料为基础,从沉积相划分与对比、沉积模式分析、有利沉积相带分析等3个方面开展研究。将研究区下寒武统划分为次深海裂陷槽盆相、深水陆棚相、浅水陆棚相、台地边缘斜坡相4类沉积亚相;纵向上,水体由深变浅,碳质、硅质含量逐渐降低,黏土质、碳酸盐含量逐渐增高。研究区岚皋—镇坪地层小区下寒武统鲁家坪组下部深水陆棚相发育的暗色泥页岩,厚度大,总有机碳和脆性矿物含量均较高,是优质页岩发育的有利沉积相带。

关键词:大巴山北缘;下寒武统;沉积模式;页岩气;差异富集

中图分类号:TE122

文献标识码:A

Sedimentary characteristics and favorable facies of Lower Cambrian Shale in the northern margin of Mount Daba: A case study of Maoba Outcrop in Ziyang

ZHANG Ye^{1,2}, YU Chuan^{1,2}, ZHANG Zhiping^{1,2}, WEI Guodong³, ZHANG Hualian^{1,2}

(1. National Joint Engineering Research Center for Shale Gas Exploration and Development, Chongqing Institute of Geology and Mineral Resources, Chongqing 401120, China; 2. Key Laboratory of Shale Gas Exploration, Ministry of Natural Resources, Chongqing Institute of Geology and Mineral Resources, Chongqing 401120, China; 3. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China)

Abstract: The drilling of Lower Cambrian shale gas in the northern margin of Mount Daba shows good prospect. A set of dark shale strata are generally developed in the lower Cambrian in this area, but the stratigraphic heterogeneity is strong, and the sedimentary facies change obviously in the region. It is helpful for the further exploration and development to the study shale sedimentary characteristics of the Lower Cambrian in this area and analyze its influence on the differential enrichment of organic matter. On the basis of outcrop section in Maoba of Ziyang and experimental data, the researches are carried out from three aspects: the division and correlation of sedimentary facies, the analysis of sedimentary mode and the analysis of favorable sedimentary facies zones. The Lower Cambrian in the study area can be divided into four sedimentary subfacies: sub abyssal rifting trough basin facies, deep water shelf facies, shallow water shelf facies, and platform edge slope facies. Longitudinally, the water body changes from deep to shallow, and the contents of carbonaceous and siliceous gradually decrease, while the contents of clayey and carbonate gradually increase. The dark mud shale developed in the lower Cambrian Lujiaping Formation deep water shelf facies in Langao-Zhenping stratigraphic district has the larger thickness and higher content of total organic carbon and brittle minerals, which is a favorable sedimentary facies belt for the development of high-quality shale.

Keywords: northern margin of Mount Daba; Lower Cambrian; sedimentary mode; shale gas; differential enrichment

收稿日期:2021-03-22。

第一作者简介:张焯(1976—),男,博士,正高级工程师,主要研究方向为非常规油气勘探开发技术研究。地址:重庆市渝北区兰馨大道111号,邮政编码:401120。E-mail:zhangye_sg@vip.163.com

通信作者:余川(1985—),男,硕士,高级工程师,主要从事页岩气地质勘探研究工作。地址:重庆市渝北区兰馨大道111号,邮政编码:401120。E-mail:yuchuan03041512@aliyun.com

基金项目:重庆市规划和自然资源局科技项目“页岩气开发地质稳定性安全评价与控制技术研究”(KJ-20200041)。

四川盆地及周缘下寒武统是富有机质暗色页岩发育的重要层位,是该区域页岩气勘探的一个重要层系^[1]。大巴山处于盆缘复杂构造区,大巴山北缘下寒武统发育了一套优质的烃源岩,具有成熟度高(成熟度大于2.0%)、有机质丰度高(有机碳大于1.0%)、脆性矿物含量高(石英大于40%)等特征,具有较好的页岩气发育物质基础^[2-4]。但由于后期受到多期构造改造,该区地质构造条件极其复杂,地层压力系数低,油气保存条件较差,且下寒武统页岩地层非均质性较强,页岩含气性变化复杂,页岩气勘探开发难度大,迟迟未取得勘探突破^[5-8]。目前,对大巴山北缘构造、储层等方面的研究已有较多,但对下寒武统沉积特征方面研究程度较低,尤其是下寒武统页岩沉积岩相及其对页岩气富集成藏的控制作用方面,资料相对匮乏^[9-14]。紫阳毛坝剖面是该区域下寒武统暗色泥页岩出露较连续完整的一个典型剖面,本文以毛坝下寒武统露头剖面观测描述及样品分析化验资料为基础,对该区下寒武统富有机质页岩有利沉积相带及其页岩气富集关键地质条件进行分析研究,对于盆缘复杂构造区页岩气勘探研究工作具有重要的参考价值。

1 区域地质特征

1.1 构造沉积背景

大巴山冲断带处于秦岭造山带与扬子板块俯冲碰撞造山带构成的连续过渡带之中,经过多期次构造运动,秦岭地槽于印支运动最终褶皱回返,构成典型的地台边缘盆山耦合体系^[15]。大巴山冲断带构造变形特征具有显著的分带性,根据区域变形强度、褶皱样式、断裂发育程度等特征,从北东向南西方向可划分为大巴山北缘逆冲推覆构造带和大巴山南缘前陆冲断褶皱带两大构造带。大巴山北缘处于地槽区,南及城口断裂,北达月河断裂,缺失晚古生代以来的沉积建造,仅在局部地区见中生界及新生界陆相地层不整合于以下的下古生界地层之上^[16]。该区在强烈的构造动力及火山活动作用下,地层普遍发生了区域动力变质作用,下寒武统泥页岩后期大多浅变质为板岩,但岩石颗粒结构并未发生明显重结晶作用,也未产生变质矿物,浅变质作用对于页岩气储层未产生明显改变和影响。根据地层发育情况及变质特征,以红椿坝—曾家坝断裂为界,大巴山北缘

北部为紫阳—平利地层小区,南部则是紫阳毛坝剖面所在的岚皋—镇坪地层小区^[17](图1)。

该区早寒武世以来海水由南部海盆自西南和东南方向侵入,于紫阳、岚皋一带继梅树村期沉积之后,开始了鲁家坪期浅海相过渡类型沉积。受大地构造的影响,该区在早寒武世形成了次深海—浅海滞留缺氧的沉积环境,发育碳硅质沉积组合,沉积了一套厚数百米的暗色泥页岩^[18-19]。

1.2 毛坝剖面实测地层特征

1.2.1 剖面概况

大巴山北缘下寒武统主要出露于各大断裂带附近,毛坝剖面处于城口断裂上盘的紫阳县毛坝镇,该区为高陡构造带,构造变形强烈,地表基岩出露较完整,沿线连续出露了南华系木座组—震旦系蜈蚣口组和水晶组一下寒武统巴山组、鲁家坪组和箭竹坝组一中寒武统毛坝关组地层(图2)。

紫阳毛坝剖面实测剖面长度总计715 m,共26小层,实测地层总厚度598.79 m,其中,下震旦统蜈蚣口组厚21.50 m;上震旦统水晶组厚30.67 m;下寒武统巴山组真厚49.64 m;鲁家坪组厚378.34 m;箭竹坝组厚61.09 m;鲁家坪组下部的富有机质板岩段真厚为131.31 m(图2)。针对主要目的层段进行了连续取样,其他层段根据地层岩性变化进行了代表性采样,岩样采集19块,地层伽马能谱(放射性)测量数据点25个,野外照片74张。

1.2.2 实测地层划分及描述

通过对毛坝剖面的测量,对下寒武统地层进行了划分和详细分层描述,剖面纵向发育特征及分层岩性描述如下:

中寒武统毛坝关组(ϵ_2m):厚53.36 m(未见顶)。

26层灰色中—厚层状灰质白云岩夹白云质板岩,岩石颗粒结构致密坚硬,厚24.32 m。

25层灰色厚层状粉砂质板岩,岩石相对较为软弱,风化后呈黄灰色,与下伏地层箭竹坝组整合接触,厚29.04 m。

下寒武统箭竹坝组(ϵ_1j):厚61.09 m。

24层浅灰色至灰色薄—中层状灰岩,岩石致密坚硬,溶蚀作用明显,厚21.96 m。

23层深灰色中—厚层状白云质灰岩夹薄层状粉

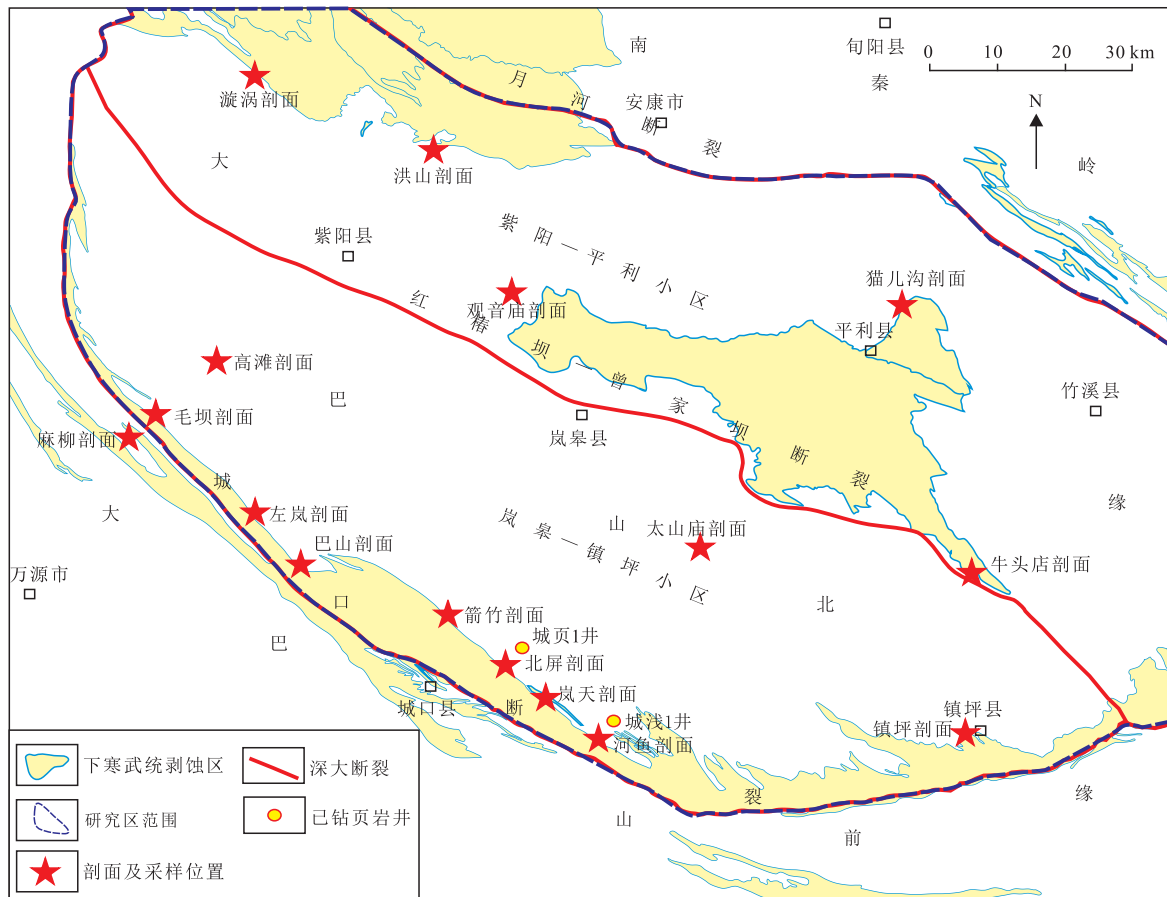


图1 大巴山北缘构造位置

Fig. 1 Structural location of the northern margin of Mount Daba

砂质板岩,层内构造节理极其发育,方解石充填,与下伏地层鲁家坪组整合接触,厚39.13 m。

下寒武统鲁家坪组($\epsilon_1 l$):厚378.34 m。

22层浅灰色薄层状白云质板岩夹极薄层粉砂质板岩,上部见岩体顺层侵入,岩性为灰黑色辉长岩,厚15.44 m。

21层灰黑色薄—中层状粉砂质板岩,岩层板理构造明显,层内节理发育,厚19.77 m。

20层灰黑色辉长岩,岩体顺层侵入,岩石颗粒结构致密坚硬,厚25.35 m。

19层浅灰色至灰色薄—中层状粉砂质板岩,板理构造明显,呈书页状,厚20.08 m。

18层深灰色中—厚层状粉砂质板岩,板理构造较发育,厚36.43 m。

17层浅灰色中—厚层状白云质粉砂质板岩,层理发育,夹一层厚约1 m灰质白云岩,厚42.75 m。

16层浅灰色薄层粉砂质板岩与浅灰色薄层灰质白云岩互层,板岩中发育水平粉砂质纹层理,厚15.66 m。

15层浅灰色中—厚层状粉砂质板岩,板理构造清晰,呈书页状,岩层砂质纹层较发育,发育两组“X”型剪节理,节理发育密度较大,厚40.54 m。

14层深灰色中—厚层状粉砂质板岩,岩层板理构造发育,呈书页状,厚30.99 m。

13层深灰色厚层状含粉砂质板岩,岩层板理构造发育,呈书页状,层内颗粒黄铁矿发育,呈星点状分布;层内见一宽15 cm充填石英脉顺层呈条带状分布,厚8.80 m。

12层黑色中—厚层状碳质板岩,层内板理构造明显,风化后呈极薄书页状,底部见黑色硅质透镜体,发育3组剪节理,裂缝间距较小,多在10 cm以内,无矿物充填,厚37.92 m。

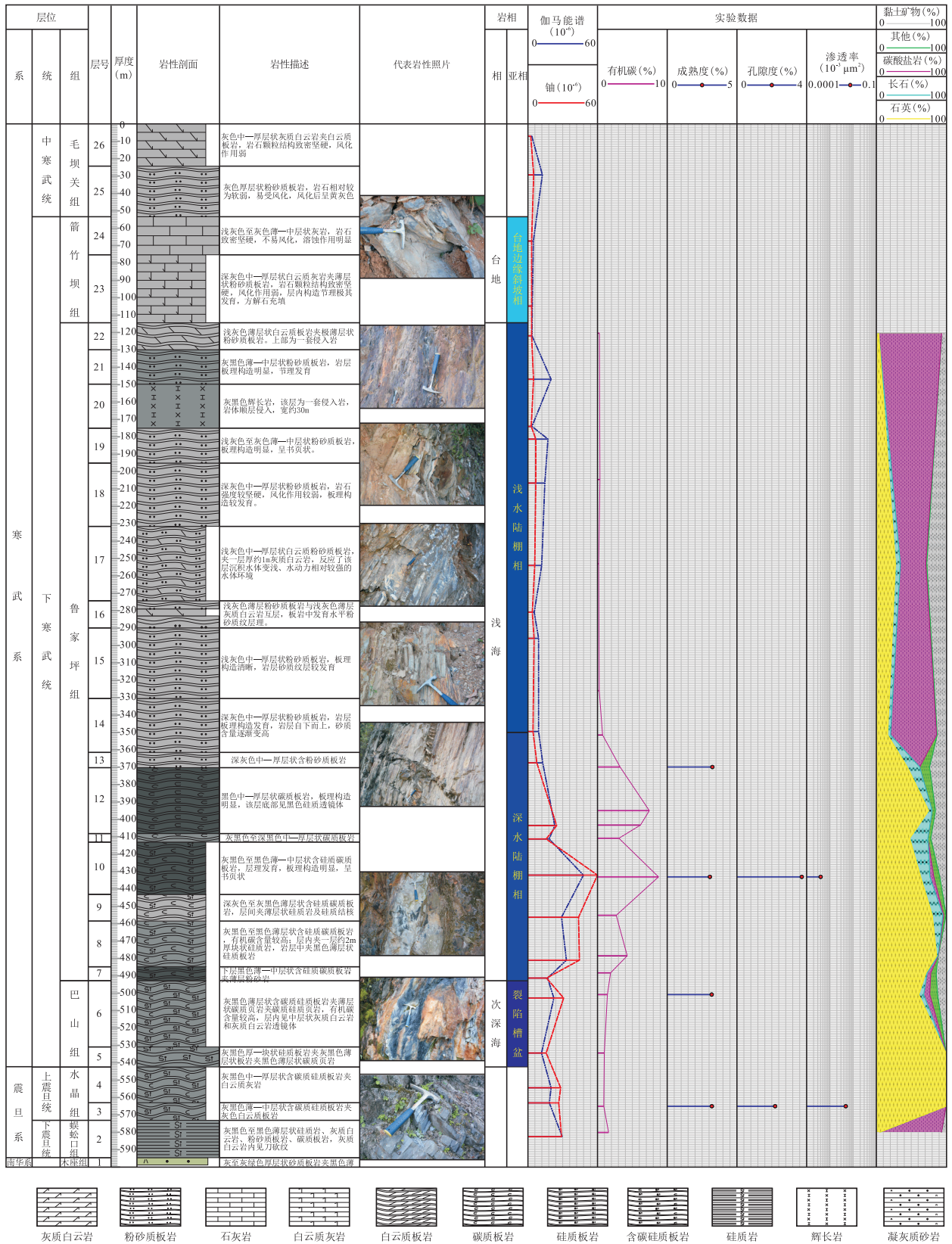


图2 紫阳毛坝下寒武统实测剖面地层综合柱状图

Fig. 2 Measured stratigraphic section column chart of Lower Cambrian strata in Maoba, Ziyang

11层灰黑色至深黑色中—厚层状碳质板岩,层内层理发育,板理构造明显,厚4.95 m。

10层灰黑色至黑色薄—中层状含硅碳质板岩,岩层层理发育,板理构造明显,厚30.07 m。

9层深灰色至灰黑色薄层状含硅碳质板岩,该层下部碳质含量较高,层间夹薄层状硅质岩及硅质结核,厚15.26 m。

8层灰黑色至黑色薄层状含硅碳质板岩,层内夹一层约1 m厚块状硅质岩,厚26.36 m。

7层黑色薄—中层状含硅碳质板岩,以薄层为主,夹薄层粉砂岩,岩层板理构造发育,有机碳含量较高,厚7.95 m。

下寒武统巴山组($\epsilon_1 b$):厚49.64 m。

6层灰黑色薄层状含碳硅质板岩夹薄层状碳质页岩,层内见灰质白云岩透镜体,厚38.16 m。

5层灰黑色厚层—块状硅质板岩夹灰黑色薄层状碳质页岩,岩石硬度差异较大,差异风化作用明显,岩层板理构造发育,厚11.48 m。

上震旦统水晶组($Z_2 s$):厚30.67 m。

4层灰黑色中—厚层状含碳硅质板岩夹白云质灰岩,岩层节理构造发育,节理缝方解石充填,厚20.61 m。

3层灰黑色薄—中层状含碳硅质板岩夹灰色白云质板岩,厚10.06 m。

下震旦统蜈蚣口组($Z_1 w$):厚21.50 m。

2层灰黑色至黑色薄层状硅质岩夹灰质白云岩,灰质白云岩内见刀砍纹,厚21.50 m。

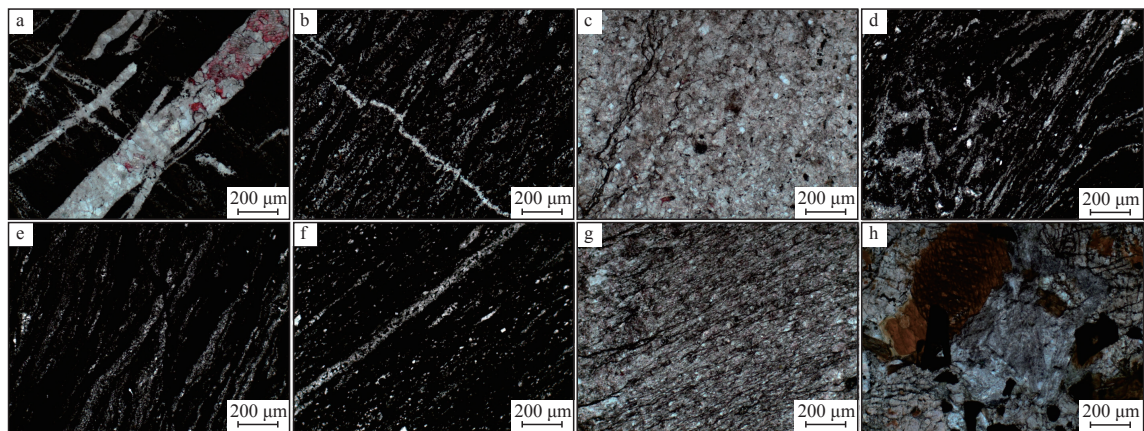
南华系木座组($Nh_2 m$):厚4.16 m(未见底)。

1层灰至灰绿色厚层状粉砂质板岩,层内裂缝极其发育,石英充填裂缝,厚4.16 m。

2 沉积相识别与划分

2.1 地层岩石学特征

通过对毛坝下寒武统地层剖面的观测和描述,结合薄片鉴定、全岩分析等实验测试,揭示了研究区下寒武统地层发育组合及其岩石学特征。上部的箭竹坝组岩性主要为薄—中层状灰岩、白云质灰岩,底部为一层含钙粉砂质板岩与下覆的鲁家坪组分界。地层岩石由上到下粒度减小,灰岩溶蚀作用明显,地层中充填有大量方解石脉。中部的鲁家坪组岩性主要为薄—中厚层状深灰色—黑色板岩,部分含碳质,越往下,硅质、碳质含量越高,岩石颜色逐渐加深,有机质含量明显增加,岩性变为灰黑色中—薄层状碳质板岩、硅质碳质板岩夹中层状粉砂质板岩,岩石致密且坚硬,层间发育大量黄铁矿及石英脉,地表板理构造明显。底部巴山组板岩中硅质含量明显增高,上部岩性为深灰色薄—中层状硅质板岩夹灰质白云岩透镜体,底部则沉积了一套深灰—黑色厚层—块状的碳硅质板岩,具有一定的有机质丰度(图3)。



注:a.巴山组,灰黑色硅质板岩,见浅暗交替平行纹层,暗色纹层碳质、铁质含量相对较高;b.巴山组,灰黑色含云硅质板岩,见浅暗交替平行纹层,后期硅质脉穿插岩石分布;c.箭竹坝组,深灰色含钙粉砂质板岩,方解石沿微裂缝发育,黄铁矿呈粒状不均匀分布;d.鲁家坪组,黑色硅质碳质板岩,微裂缝发育;e.鲁家坪组,黑色含碳硅质板岩,部分硅质呈条带状分布,微裂缝发育;f.鲁家坪组,黑色含粉砂硅质板岩,见浅色平行纹层,部分硅质呈条带状分布;g.箭竹坝组,灰色泥质钙质板岩,见浅暗交替平行纹层,斜长石绢云母化;h.鲁家坪组,灰绿色辉长岩,斜长石呈半自形板柱状,部分绢云母化,见后期石英脉。

图3 大巴山北缘毛坝剖面下寒武统岩石薄片特征

Fig. 3 Thin section characteristics of Lower Cambrian in Maoba Outcrop in northern margin of Mount Daba

2.2 沉积相类型及标志

根据地层岩石矿物特征、沉积构造、地球化学指标、地球物理等标志,对大巴山北缘地区下寒武统沉积相类型进行了识别与划分,其中,巴山组发育于次深海裂陷槽盆环境,鲁家坪组主要发育于浅海陆棚沉积环境,又可进一步划分为浅水陆棚相和深水陆棚相,箭竹坝组为浅海碳酸盐台地边缘相沉积(图2)。

2.2.1 次深海裂陷槽盆相

次深海位于浅海与深海环境的过渡区中,裂陷槽盆相是被动大陆边缘盆地沉积的典型特征,反映了盆地海槽经历了强烈的拉张作用。

研究区下寒武统巴山组表现为典型的海洋沉积环境,主要发育一套灰黑色致密坚硬的含碳硅质页岩,石英含量普遍达到70%以上,局部夹灰岩或灰质白云岩(图4a),在地表抗风化能力强,往往以陡峭的孤峰存在。而硅质岩具有一定的有机质丰度,能反映一种相对较深的缺氧还原水体环境,富 H_2S 的还原水体导致藻类生物的大量繁殖,同时也为厌氧细菌和嗜硫细菌的生长提供了有利条件。该区域巴山组局部形成了钡成矿带(图4b),而钡矿的形成与裂陷盆地广泛发育的洋流、火山及热水活动有关^[20],是裂陷槽盆沉积的标志性矿物。巴山组的硅质成分主要来源于沉积盆地内同生断裂的活动和盆地扩张所形成的热水系统与生物成因的混合沉积。种种证据表明早寒武世巴山期北大巴山经历了从强烈拉张到逐

渐闭合的裂陷海槽沉积构造演化过程,逐渐向鲁家坪期的浅海陆棚环境过渡。

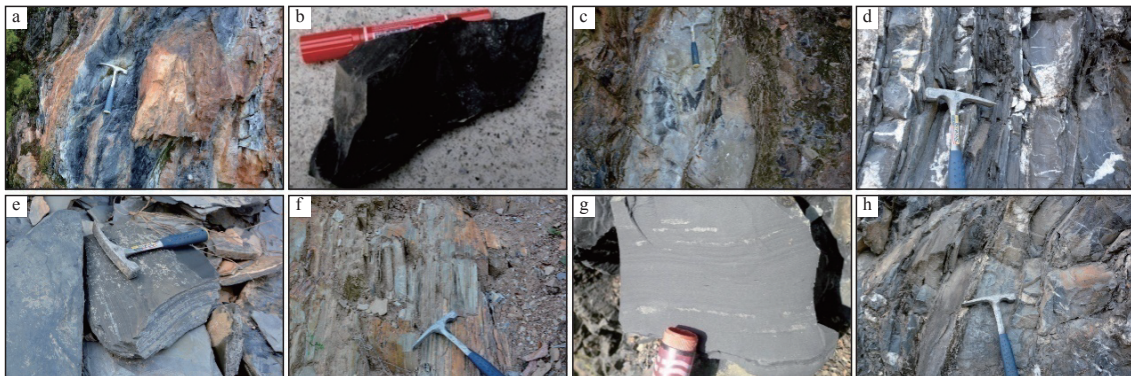
2.2.2 深水陆棚相

深水陆棚相是指靠近海盆一侧的陆棚边缘盆地沉积相带,处于风暴浪基面以下,为一种水动力较弱的滞流缺氧的浅海静水沉积环境。该区下寒武统鲁家坪组下部就为一套深水陆棚相沉积,主要发育富有机质的黑色碳质、硅质泥页岩,颜色较深,页岩内部黄铁矿结核或条带,硅质结核较发育(图4c),这些结核体初步认为是在沉积过程中搬运过来的弱固结的结核体,为滑塌沉积体,指示一种深水沉积环境。页岩石英、长石等脆性矿物含量较高,石英含量普遍达到了40%以上,岩石粒度一般在几至几十微米且分选磨圆度较好,碎屑沉积颗粒的搬运方式主要以悬浮模式为主,岩石结构成熟度和成分成熟度均较高,沉积构造主要以水平层理为主,页岩有机质富集程度较高,地层伽马能谱呈现为高值,总有机碳含量(TOC)普遍达到2.0%以上。

在该相带还发育一套石煤夹层^[21],石煤是由菌藻类等生物遗体在浅海条件下经腐泥化作用和煤化作用转变而成,这也在一定程度上反映了当时的深水沉积环境及后期的成岩演化。

2.2.3 浅水陆棚相

浅水陆棚相处于陆棚中带风暴浪基面之上的浅水区,受到环流控制,水体相对较浅,但水动力相对



注:a.毛坝剖面巴山组硅质岩特征;b.黄安坝剖面巴山组的钡矿;c.毛坝剖面鲁家坪组碳质板岩内发育硅质透镜体;d.毛坝剖面鲁家坪组上部发育灰岩条带;e.毛坝剖面鲁家坪组中部发育砂纹层理;f.毛坝剖面鲁家坪组发育水平层理;g.巴山剖面鲁家坪组发育波状层理;h.毛坝剖面箭竹坝组薄层灰岩夹板岩。

图4 大巴山北缘地区下寒武统各沉积相标志

Fig. 4 Sedimentary facies marks of Lower Cambrian in northern margin of Mount Daba

较强,为弱氧化环境。下寒武统鲁家坪组上部则是一套浅水陆棚相沉积,岩性主要以深灰—灰色粉砂质、灰质泥页岩、泥质粉砂岩为主,局部夹灰岩条带或透镜体(图4d)。岩石中石英、长石、碳酸盐等脆性矿物含量较高,岩石颗粒相对深水陆棚相页岩较粗,但仍以微米级为主。碎屑颗粒的搬运方式以跳跃和悬浮模式为主,岩石的结构成熟度和成分成熟度均较高。沉积构造主要以水平层理、砂纹层理和波状层理为主(图4e—图4g),反映了水动力较强的浅水陆棚环境。

浅水陆棚沉积的页岩有机质富集程度相对较低,有机质类型仍以腐泥型干酪根(I型)为主,干酪根 $\delta^{13}\text{C}$ 值普遍小于 -28‰ ^[22]。浅水陆棚相页岩相对深水陆棚相页岩,具有较低的伽马能谱、电阻率和相对较高的岩石密度的响应特征。

2.2.4 台地边缘斜坡相

碳酸盐台地边缘斜坡相,位于浪基面以上至低潮线之间的高能带,波浪及潮汐作用活跃,阳光充足、氧气充分,各种底栖生物、造礁生物和藻类生物等大量发育,生物成因的碳酸盐生产率高,波浪及水流作用频繁,使岩石表面形成波状层理和交错层理。该区下寒武统箭竹坝组则为一套台地边缘斜坡相沉积,岩性以薄层灰、青灰色灰岩,微晶灰岩及泥质条带灰岩为主,夹少量白云质灰岩和页岩(图4h)。该套灰岩层上部为中厚层状,下部厚薄较均一,单层厚10~25 cm,普遍具波状层理,沉积物具有明显的分异性,局部发育因滑塌作用而形成的同沉积变形构造,为台地边缘斜坡带碳酸盐岩沉积的典型特征。台地边缘相沉积的碳酸盐岩具有较低的地层伽马、相对较高的电阻率和岩石密度的响应特征。

2.3 剖面沉积相划分对比

通过对沉积相标志的分析与识别,对研究区下寒武统剖面沉积相进行了划分。在剖面上,底部巴山组为次深海裂陷槽盆相沉积,主要发育一套灰黑色含碳硅质岩,局部夹灰岩或灰质白云岩。鲁家坪组下部为深水陆棚相沉积,发育了富有机质的深色碳质、硅质页岩,内部夹有黄铁矿结核与硅质结核。向上水体逐渐变浅,过渡为浅水陆棚,主要发育颜色较浅的粉砂质、灰质泥页岩、泥质粉砂岩,偶夹灰岩条带。到了上部箭竹坝组,则为碳酸盐台地边缘相

沉积,主要发育一套薄—中层状灰岩,白云质灰岩,夹有薄层状粉砂质页岩。

通过对区域内多个露头剖面进行对比分析,纵向上,每条剖面沉积相发育都经历了由次深海裂陷槽盆到碳酸盐台地边缘过渡的沉积环境,总体上,由下到上表现为沉积水体逐渐变浅的沉积演化过程,其中以鲁家坪组的浅海陆棚相沉积厚度最大(图5)。从区域上对比来看,各相带发育厚度差别较大,由南向北各相带沉积厚度逐渐减小,以南部的镇坪剖面鲁家坪组深水陆棚相沉积厚度最大,发育的暗色泥页岩具有典型的高伽马、高有机质丰度的特征。该区下寒武统深水陆棚相的发育控制了富有机质泥页岩的发育程度,是富有机质页岩沉积的主要相带。

3 沉积模式分析

在对大巴山北缘下寒武统剖面沉积相划分对比的基础上,并结合前人研究认识,对研究区及周缘早寒武世时期沉积模式特征进行了分析(图6)。早寒武世早期,随着秦岭海槽强烈拉张作用,扬子北缘海水扩张,区域上形成北低南高的古地形,此时的南秦岭水体较深,反映出一种较深水的半封闭式海盆环境。研究区下寒武统巴山组发育了一套灰黑色含碳硅质岩系,层内钡矿的形成与裂陷盆地扩张导致的热水活动和生物作用有关,反映了一种裂陷槽盆沉积环境。研究区南部,则发育了一套有机质丰度较高的碳硅质页岩沉积建造,反映了一种滞留缺氧还原的浅海水体环境。再往东南方向,受水下隆起的影响,水体开始变浅,沉积物粉砂质、灰质含量增加,碳质含量逐渐减少,由深水陆棚向浅水陆棚过渡。水下隆起区域则由于水体变浅,水动力活动性增强,主要以粒度较粗的泥质粉砂岩或粉砂岩沉积为主。向周缘前陆盆地边缘方向,随着地形的整体抬升,沉积物中碳酸盐含量逐渐增多,向台地边缘相过渡。

4 有利沉积相带分析

在对研究区下寒武统页岩沉积特征分析的基础上,再结合实测剖面页岩样品的分析化验数据,对下寒武统富有机质页岩发育的有利沉积相带进行了分析。紫阳毛坝剖面显示,纵向上下寒武统页岩有机碳含量从巴山组到鲁家坪组中下部逐渐增加,最高

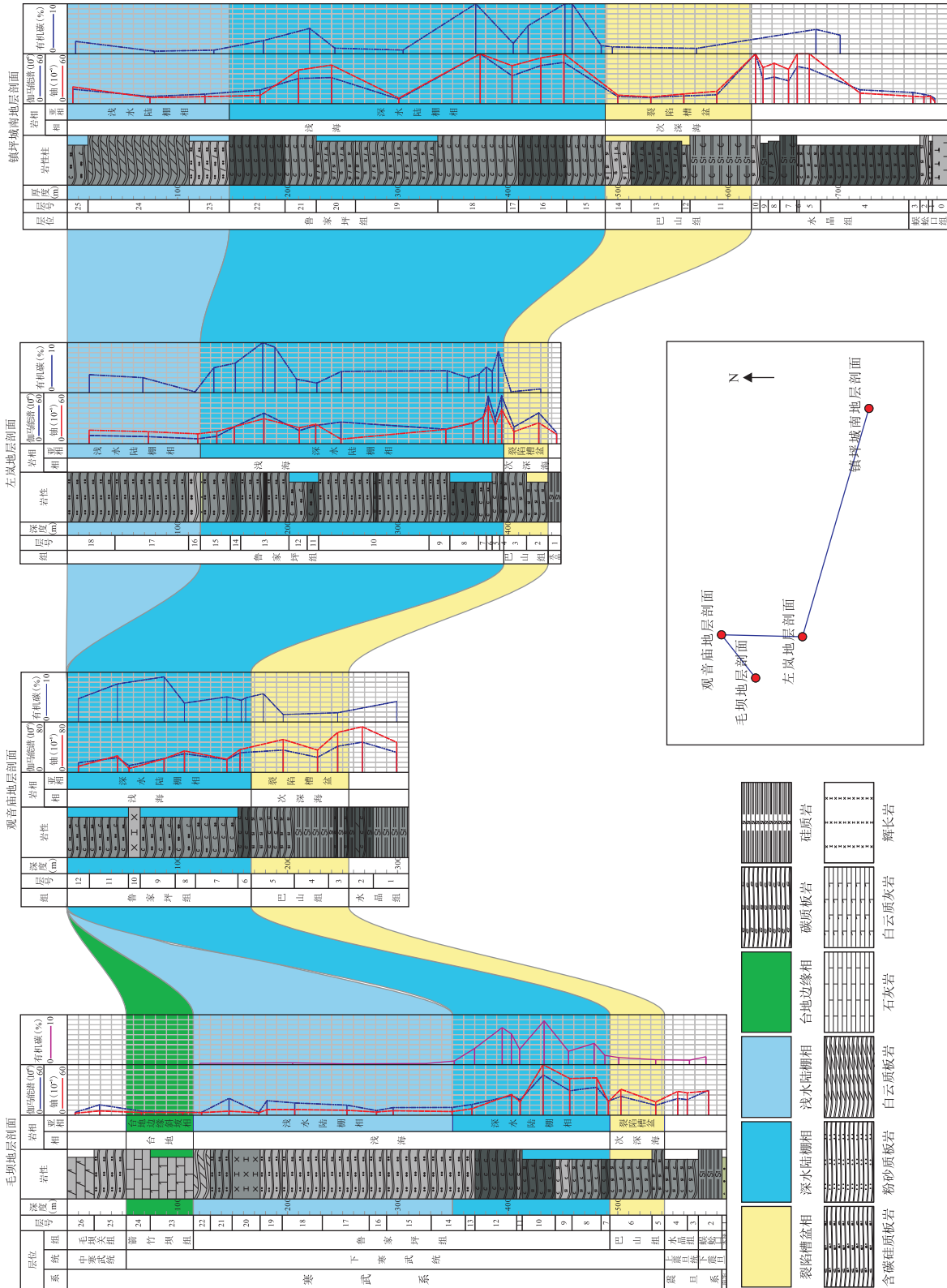


图 5 大巴山北缘下寒武统页岩剖面沉积相划分对比

Fig. 5 Sedimentary facies division and correlation of Lower Cambrian section in the northern margin of Mount Daba

值达到了9.0%，再从中部到上部逐渐降低，到了上部基本都小于2.0%；页岩热演化程度均处于高一过成熟阶段，纵向上变化不明显，物性整体表现为低孔低渗的特征。在地表剖面实测的地层伽马能谱数据与实测有机碳含量也具有很好的正相关性，基本在有机碳含量高的页岩层段，其伽马能谱值也较高。下寒武统全岩测试分析数据显示，中下部层段石英、长石等脆性矿物含量普遍达到50%以上，黏土矿物含量普遍在30%以下，底部巴山组硅质板岩石英含量达到70%以上，由下向上，硅质含量逐渐降低，碳酸盐和黏土矿物含量逐渐增高(图2)。

通过对比分析下寒武统不同沉积相带发育页岩的基本地质特征可以发现，鲁家坪组下部深水陆棚相发育的碳质页岩有机质丰度最高、且岩石脆性较

强，总有机碳含量普遍大于2.0%，是富有机质泥页岩发育的有利相带(表1)。根据研究区内已有钻井显示情况，该区下寒武统页岩含气层段主要位于鲁家坪组中下部的富有机质页岩层段，其中有机质丰度越高的位置其含气性也越好^[23-24]。这表明，在深水陆棚下的滞留缺氧还原环境下，更有利于藻类等有机物质的富集和保存；同时由于水体环境相对较深和安静，碎屑颗粒的成分和结构成熟度均较高，矿物成分主要以石英等脆性矿物为主，矿物颗粒较细小且磨圆度较高。平面上，研究区岚皋—镇坪地层小区东部沉积水体环境整体相对较深，深水沉积中心位于东南部的镇坪县地区，鲁家坪组富有机质页岩层段发育厚度较大，达到200 m以上，是富有机质页岩发育的有利相区(图7)。

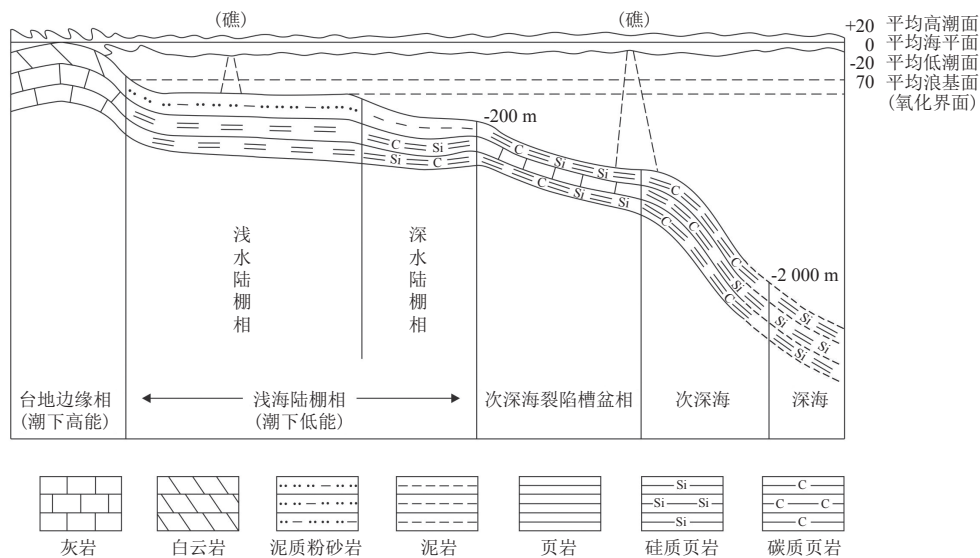


图6 大巴山北缘早寒武世沉积模式

Fig. 6 Sedimentary mode of Early Cambrian in the northern margin of Mountain Daba

表1 下寒武统不同沉积相带页岩相关地质参数对比

Table 1 Comparison of shale related geological parameters in different sedimentary facies belts of Lower Cambrian

沉积相类型	主要沉积岩性	发育厚度 (m)	有机碳 (%)	成熟度 (%)	孔隙度 (%)	渗透率 ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	脆性矿物 (%)	黏土矿物 (%)
次深海裂陷槽盆	深灰—灰黑色含碳硅质页岩夹灰质白云岩	28~110	0.8~1.5	2.5~4.1	0.5~1.2	0.002~0.008	70~85	7~15
深水陆棚	黑色碳质页岩夹硅质岩	130~290	2.2~9.6	2.4~3.9	0.7~1.9	0.002~0.015	50~63	10~26
浅水陆棚	深灰—灰黑色含碳粉砂质页岩	158~360	0.5~1.8	2.1~4.0	0.8~1.6	0.003~0.010	32~53	15~33
台地边缘	灰色灰质页岩、泥灰岩	112~195	0.2~0.7	2.2~3.8	0.6~2.1	0.003~0.016	25~41	14~35

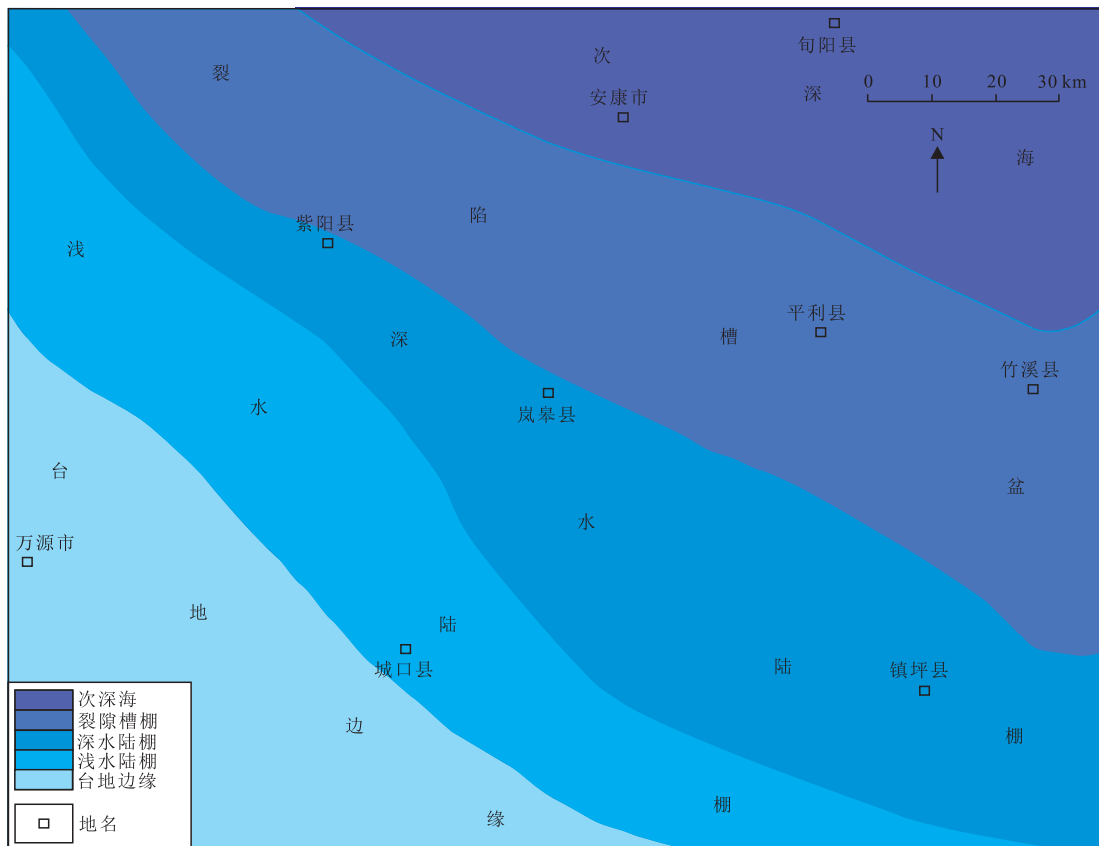


图7 研究区及周缘早寒武世中晚期沉积相平面展布

Fig. 7 Plane distribution of sedimentary facies of middle and late period of Early Cambrian in the study area and its surrounding areas

综合以上分析可以得知,研究区下寒武统鲁家坪组中下部的深水陆棚相是优质页岩发育的有利沉积相带,是页岩气富集的物质基础,具有沉积厚度大、有机质丰度高、成熟度高、脆性矿物含量高等特点。

5 结论

1) 将研究区下寒武统划分为4类沉积亚相,由下到上依次发育了次深海裂陷槽盆相、深水陆棚相、浅水陆棚相与碳酸盐台地边缘相,反映了沉积水体逐渐变浅,纵向上,页岩碳质、硅质含量逐渐降低,黏土、碳酸盐含量逐渐增高。

2) 在早寒武世早期秦岭海槽的拉张作用下,研究区东北部形成了次深海盆地沉积环境,中部由于裂陷盆地扩张形成了裂陷槽盆沉积环境,南部则表

现为一种滞留缺氧还原的浅海陆棚水体环境,向西南部方向,由深水陆棚向浅水陆棚沉积环境过渡。

3) 研究区岚皋—镇坪地层小区东部下寒武统鲁家坪组深水陆棚相发育的暗色泥页岩有机质丰度较高,总有机碳含量普遍大于2.0%,且石英、长石等脆性矿物含量普遍达到50%以上,岩石脆性较强,是优质页岩发育的有利沉积相带。

参考文献

- [1] 方志雄.中国南方常压页岩气勘探开发面临的挑战及对策[J].油气藏评价与开发,2019,9(5):1-13.
FANG Zhixiong. Challenges and countermeasures for exploration and development of normal pressure shale gas in southern China[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2019, 9(5): 1-13.
- [2] 熊国庆,王剑,李园园,等.大巴山地区早古生代黑色岩系岩相古地理及页岩气地质意义[J].古地理学报,2017,19(6):965-986.
XIONG Guoqing, WANG Jian, LI Yuanyuan, et al. Lithofacies

- paleogeography of the Early Paleozoic black rock series in Dabashan region and their shale-gas geological significance[J]. *Journal of Paleogeography*, 2017, 19(6): 965-986.
- [3] 刘劲松,邹先武,段其发,等.大巴山镇坪地区早寒武世硅质岩的地球化学特征及成因[J]. *地质与勘探*, 2014, 50(4): 725-734.
LIU Jinsong, ZOU Xianwu, DUAN Qifa, et al. Geo-chemical characteristics and origin of the lower Cambrian siliceous rocks from Zhenping area in north Daba Mountain[J]. *Geology and Exploration*, 2014, 50(4): 725-734.
- [4] 龙鹏宇,张金川,李玉喜,等.重庆及周缘地区下古生界页岩气资源潜力[J]. *天然气工业*, 2009, 28(12): 125-129.
LONG Pengyu, ZHANG Jinchuan, LI Yuxi, et al. Potentials of the Lower Palaeozoic shale gas resources in Chongqing and its adjacent areas[J]. *Natural Gas Industry*, 2009, 28(12): 125-129.
- [5] 刘树根,徐国盛,徐国强,等.四川盆地天然气成藏动力学初探[J]. *天然气地球科学*, 2004, 15(4): 323-330.
LIU Shugen, XU Guosheng, XU Guoqiang, et al. Primary study on the dynamics of natural gas pools in Sichuan basin, China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2004, 15(4): 323-330.
- [6] 邹才能,董大忠,王社教,等.中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力[J]. *石油勘探与开发*, 2010, 37(6): 641-653.
ZOU Caineng, DONG Dazhong, WANG Shejiao, et al. Geological characteristics, formation mechanism and resource potential of shale gas in China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2010, 37(6): 641-653.
- [7] 聂海宽,张金川,包书景,等.页岩气成藏体系研究——以四川盆地及其周缘下寒武统为例[J]. *西安石油大学学报:自然科学版*, 2012, 27(3): 8-14.
NIE Haikuan, ZHANG Jinchuan, BAO Shujing, et al. Study on the accumulation systems of shale gas: Taking the lower Cambrian in Sichuan Basin and its periphery as an example[J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 2012, 27(3): 8-14.
- [8] 胡东风,张汉荣,倪楷,等.四川盆地东南缘海相页岩气保存条件及其主控因素[J]. *天然气工业*, 2014, 34(6): 17-23.
HU Dongfeng, ZHANG Hanrong, NI Kai, et al. Main controlling factors for gas preservation conditions of marine shales in southeastern margins of the Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2014, 34(6): 17-23.
- [9] 余川,曾春林,周洵,等.大巴山冲断带下寒武统页岩气构造保存单元划分及分区评价[J]. *天然气地球科学*, 2018, 29(6): 853-865.
YU Chuan, ZENG Chunlin, ZHOU Xun, et al. Tectonic preservation unit division and zoning evaluation of shale gas in the Lower Cambrian of Daba mountain thrust belt[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2018, 29(6): 853-865.
- [10] 魏国齐,杨威,刘满仓,等.四川盆地大气田分布、主控因素与勘探方向[J]. *天然气工业*, 2019, 39(6): 1-12.
WEI Guoqi, YANG Wei, LIU Mancang, et al. Distribution rules, main controlling factors and exploration directions of giant gas fields in the Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2019, 39(6): 1-12.
- [11] 余川,汪生秀,汪威,等.大巴山北缘鲁家坪组变质作用及其对页岩气储层的影响[J]. *地质学报*, 2020, 94(11): 3461-3470.
YU Chuan, WANG Shengxiu, WANG Wei, et al. The metamorphism of the Lujiaping Formation at the northern Daba mountain and its influence on shale gas reservoirs[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(11): 3461-3470.
- [12] 张志平,方光建,曾春林,等.渝东北下寒武统页岩气储层特征研究[J]. *西北地质*, 2017, 50(4): 209-214.
ZHANG Zhiping, FANG Guangjian, ZENG Chunlin, et al. The research on reservoir characteristics of Lower Cambrian Shale Gas in Northeast Chongqing[J]. *Northwestern Geology*, 2017, 50(4): 209-214.
- [13] 杨佳佳,孙玮琳,徐学敏,等.高演化烃源岩岩石热解和总有机碳标准物质研制[J]. *地质学报*, 2020, 94(11): 3515-3522.
YANG Jiajia, SUN Weiling, XU Xuemin, et al. Preparation of certified reference materials for rock-eval and total organic carbon of postmature source rock[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(11): 3515-3522.
- [14] 张光荣,聂海宽,唐玄,等.基于有机孔和生物成因硅优选页岩气富集高产层段的方法及应用——以四川盆地及其周缘五峰组—龙马溪组页岩为例[J]. *天然气地球科学*, 2021, 32(6): 888-898.
ZHANG Guangrong, NIE Haikuan, TANG Xuan, et al. Optimization method and application of shale gas enrichment layer based on biogenic silica and organic matter pore: Case study of Wufeng-Longmaxi formations shale in the Sichuan Basin and its periphery[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2021, 32(6): 888-898.
- [15] 汪泽成,赵文智,徐安娜,等.四川盆地北部大巴山山前带构造样式与变形机制[J]. *现代地质*, 2006, 20(3): 429-435.
WANG Zecheng, ZHAO Wenzhi, XU Anna, et al. Structure styles and their deformation mechanisms of Dabashan foreland thrust belt in the North of Sichuan Basin[J]. *Geoscience*, 2006, 20(3): 429-435.
- [16] 潘商,徐啸,郭良辉,等.四川盆地—大巴山结合带地壳构造特征:深反射地震约束的重磁解释[J]. *地球物理学进展*, 2020, 35(4): 1292-1298.
PAN Shang, XU Xiao, GUO Lianghui, et al. Crustal structure of Daba Shan and adjacent terranes revealed from high-resolution deep seismic-reflection profiling and potential field modelling[J]. *Progress in Geophysics*, 2020, 35(4): 1292-1298.
- [17] 李智武,刘树根,罗玉宏,等.南大巴山前陆冲断带构造样式及变形机制分析[J]. *大地构造与成矿学*, 2006, 30(3): 294-304.
LI Zhiwu, LIU Shugen, LUO Yuhong, et al. Structural style and deformational mechanism of southern Dabashan foreland fold-thrust belt in central China[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2006, 30(3): 294-304.
- [18] 汪泽成,邹才能,陶士振,等.大巴山前陆盆地形成及演化与

- 油气勘探潜力分析[J]. 石油学报, 2004, (6): 23-28.
- WANG Zecheng, ZOU Caineng, TAO Shizhen, et al. Analysis on tectonic evolution and exploration potential in Dabashan foreland basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2004, (6): 23-28.
- [19] 王忠诚, 范德廉, 陈锦石. 大巴山下寒武统黑色岩系中毒重石矿床的成因探讨[J]. 地质科学, 1992, (3): 237-248.
- WANG Zhongcheng, FAN Delian, CHEN Jinshi. Origin of witherite ore deposits in early Cambrian Daba mountain black shale series[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1992, (3): 237-248.
- [20] 吕志成, 刘丛强, 刘家军, 等. 北大巴山下寒武统毒重石矿床赋矿硅质岩地球化学研究[J]. 地质学报, 2004, 78(3): 390-406.
- LYU Zhicheng, LIU Congqiang, LIU Jiajun, et al. Geochemical studies on the lower Cambrian Witherite-bearing Cherts in the Northern Daba Mountains[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 78(3): 390-406.
- [21] 雒昆利, 谭见安, 王五一, 等. 大巴山区早古生代地层和石煤中硒的化学活动性的初步研究[J]. 环境科学学报, 2002, 22(1): 86-91.
- LUO Kunli, TAN Jianan, WANG Wuyi, et al. Chemical mobility of selenium in early Paleozoic rock and stone coal in Daba Mountain, South Qinling[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2002, 22(1): 86-91.
- [22] 张林, 魏国齐, 李熙喆, 等. 四川盆地震旦系——下古生界高过成熟烃源岩演化史分析. 天然气地球科学, 2007, 18(5): 726-731.
- ZHANG Lin, WEI Guoqi, LI Xizhe, et al. The thermal history of Sinian-lower Palaeozoic high/over Mature source rock in Sichuan basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2007, 18(5): 726-731.
- [23] 余川, 聂海宽, 曾春林, 等. 四川盆地东部下古生界页岩储集空间特征及其对含气性的影响[J]. 地质学报, 2014, 88(7): 1311-1320.
- YU Chuan, NIE Haikuan, ZENG Chunlin, et al. Shale reservoir space characteristics and the effect on gas content in lower Palaeozoic Erathem of the Eastern Sichuan Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 88(7): 1311-1320.
- [24] 焦伟伟, 方光建, 汪生秀, 等. 渝东南地区下古生界页岩含气性差异关键控制因素[J]. 煤炭学报, 2019, 44(6): 1786-1794.
- JIAO Weiwei, FANG Guangjian, WANG Shengxiu, et al. Key control factor for the gas-bearing properties difference of lower Paleozoic shale in southeast Chongqing[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(6): 1786-1794.

(编辑 尹淑容)

(上接第106页)

- FANG Zhixiong, HE Xipeng. Formation and evolution of normal pressure shale gas reservoir in Wulong Syncline, Southeast Chongqing, China[J]. *Oil & Gas Geology*, 2016, 37(6): 819-827.
- [24] 吴蓝宇, 陆永潮, 蒋恕, 等. 上扬子区奥陶系五峰组—志留系龙马溪组沉积期火山活动对页岩有机质富集程度的影响[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(5): 806-816.
- WU Lanyu, LU Yongchao, JIANG Shu, et al. Effects of volcanic activities in Ordovician Wufeng-Silurian Longmaxi period on organic-rich shale in the Upper Yangtze area, South China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(5): 806-816.
- [25] 吴聿元, 张培先, 何希鹏, 等. 渝东南地区五峰组—龙马溪组页岩岩石相及与页岩气富集关系[J]. 海相油气地质, 2021, 25(4): 335-343.
- WU Yuyuan, ZHANG Peixian, HE Xipeng, et al. Lithofacies and shale gas enrichment of Wufeng Formation-Longmaxi Formation in Southeastern Chongqing[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2021, 25(4): 335-343.
- [26] 何贵松, 万静雅, 周嶝娜, 等. 南川地区南页1井五峰组—龙马溪组页岩特征与生物地层[J]. 地层学杂志, 2019, 43(4): 376-388.
- HE Guisong, WAN Jingya, ZHOU Di'na, et al. Characteristics and biostratigraphy of Wufeng-Longmaxi Formation shale in Nanye well 1 of Nanchuan area[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2019, 43(4): 376-388.
- [27] 方栋梁, 孟志勇. 页岩气富集高产主控因素分析——以四川盆地涪陵地区五峰组—龙马溪组一段页岩为例[J]. 石油实验地质, 2020, 42(1): 37-41.
- FANG Dongliang, MENG Zhiyong. Main controlling factors of shale gas enrichment and high yield: A case study of Wufeng-Longmaxi formations in Fuling area, Sichuan Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2020, 42(1): 37-41.
- [28] 舒志国, 王进. 四川盆地涪陵气田焦石坝区块上部气层地质特征分析及有利区优选[J]. 石油实验地质, 2021, 43(1): 34-44.
- SHU Zhiguo, WANG Jin. Geological characteristics and optimization of favorable areas in the upper gas reservoir of Jiaoshiiba block in the Fuling Shale Gas Field, Sichuan Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2021, 43(1): 34-44.

(编辑 柳超超)