

文章编号: 1000-0747(2017)01-0021-11

DOI: 10.11698/PED.2017.01.03

上扬子地区下寒武统页岩沉积相类型及分布特征

刘忠宝^{1,2,3}, 高波^{1,2,3}, 张钰莹⁴, 杜伟¹, 冯动军¹, 聂海宽¹

(1. 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室, 北京 100083; 2. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083; 3. 中国石化页岩油气勘探开发重点实验室, 北京 100083; 4. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

基金项目: 国家自然科学基金项目(41202103); 中国石油化工股份有限公司科技开发部项目(P15114)

摘要: 通过露头、岩心、薄片、矿物X衍射、氩离子抛光、扫描电镜及钻井资料的综合研究, 在上扬子地区寒武系梅树村组沉积期—筇竹寺组沉积期沉积地层中识别出9种页岩岩相、5类沉积相标志, 提出了页岩沉积相类型精细划分方案, 建立了页岩沉积演化发育模式。指出梅树村组沉积期与筇竹寺组沉积期在沉积作用方式、沉积体系类型及沉积相分布上均存在差异: 梅树村组沉积期以机械-化学沉积和生物沉积为主, 主体为碳酸盐缓坡台地—陆棚—斜坡—深水盆地沉积体系; 筇竹寺组沉积期以砂质机械沉积、泥质絮凝及生物沉积为主, 主体为滨岸—陆棚—斜坡—深水盆地沉积体系。资阳—长宁近南北向展布的地区、东南部鄂西—渝东—黔中及东北部宜昌—房县—一线的地区为两个深水陆棚相富有机质页岩沉积中心, 是页岩气勘探有利地区, 但前者富有机质页岩以多层、薄层为特点, 后者以连续厚层为特点, 今后应考虑其差异进行有针对性的页岩气勘探部署。图8表2参23

关键词: 页岩; 岩相; 沉积相; 下寒武统筇竹寺组; 下寒武统梅树村组; 上扬子地区; 四川盆地

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

Types and distribution of the shale sedimentary facies of the Lower Cambrian in Upper Yangtze area, South China

LIU Zhongbao^{1,2,3}, GAO Bo^{1,2,3}, ZHANG Yuying⁴, DU Wei¹, FENG Dongjun¹, NIE Haikuan¹

(1. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing 100083, China; 2. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China; 3. Key Laboratory of Shale Oil/Gas Exploration and Production, SINOPEC, Beijing 100083, China; 4. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on comprehensive analysis of outcrops, cores, rock thin sections, mineral X-ray diffraction and Argon ion-milling - scanning electron microscopy, nine lithofacies types and five facies marks in the Lower Cambrian Meishucun Formation and Qiongzhusi Formation in the Upper Yangtze are identified, a classification scheme of the shale sedimentary facies is proposed, and the deposition and evolution model of the shale in the Lower Cambrian is figured out. This research shows there are difference in sedimentation, types and distribution of the sedimentary facies in the Meishucun Formation and Qiongzhusi Formation. The main sedimentation modes in the Meishucun Stage were mechanical-chemical and biological sedimentation, the sedimentary facies (from west to east) were carbonate ramp, shelf, and slope and bathyal basin. The main sedimentation of the Qiongzhusi Stage was clastic mechanical, argillaceous flocculation and biological deposition, and the sedimentary facies were shore, shelf, and ramp and bathyal basin. There are two depositional centers of rich organic shale in the Upper Yangtze which are the prospective area for shale gas exploration. The first one is in the Ziyang-Changning area in nearly north-south strike, which is characterized by multiple thin layers. The other one is in the Western Hubei-Eastern Chongqing-Middle Guizhou and Yichang-Jianshi-Fangxian, which is characterized by the thick-layer shale. The shale gas exploration in these areas in the future should take pertinent strategies in line with their differences.

Key words: shale; lithofacies; sedimentary facies; Lower Cambrian Qiongzhusi Formation; Lower Cambrian Meishucun Formation; Upper Yangtze area; Sichuan Basin

引用: 刘忠宝, 高波, 张钰莹, 等. 上扬子地区下寒武统页岩沉积相类型及分布特征[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(1): 21-31.

LIU Zhongbao, GAO Bo, ZHANG Yuying, et al. Types and distribution of the shale sedimentary facies of the Lower Cambrian in Upper Yangtze area, South China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(1): 21-31.

1 研究区概况及研究思路

近年来, 随着美国、加拿大、中国等国家在页岩

油气勘探开发领域取得成功, 改变了石油地质学家对泥页岩的传统认知, 即泥页岩除具有生烃、封盖性能外, 还可以储集油气, 具备生-储-盖一体的特点, 在颠

覆常规油气勘探理论的同时,也使非常规页岩油气勘探成为国内外的热点研究领域。页岩层系沉积相分析是页岩油气勘探研究中不可或缺的基础工作,目前认为海相富有机质页岩主要发育于浅海陆棚沉积环境^[1-2],古代浅海陆棚(陆表海环境)与现代浅海陆棚(陆缘海环境)沉积特征存在差异,前者沉积时间长、厚度大、分布广,而后者沉积时间短、厚度小且范围局限。国外学者认为海相富有机质页岩沉积可用“黑海”滞留静海模式与沿岸上升洋流模式进行解释^[3]。对中国四川盆地地下志留统龙马溪组研究认为,深水陆棚相控制了富有机质页岩的发育,是页岩气勘探有利相带^[4]。总之,国内外学者均已认识到对泥页岩层系开展精细的沉积相划分,明确有利沉积相带可为页岩油气勘探选区评价提供重要地质依据。

早寒武世早期上扬子地区沉积发育了一套海相黑

色泥页岩层系,其厚度大、有机质丰度高、分布范围广,是中国南方寻找海相页岩气的重要勘探层系之一(见图1)。前人对南方曾开展过多轮次、多层系的岩相古地理编图^[5-8],提出了下寒武统为海相克拉通盆地背景下的浅水陆架或陆棚沉积的重要认识,但受编图范围大、钻井少等条件的限制,已难以满足目前页岩气勘探开发的实际需求,急需以其成果为基础和指导,开展更为精细的沉积相研究。近年来,针对研究区寒武系开展了大量的页岩气调查与钻探工作,相继获得了一些页岩气发现:在川西南 W201 井和 JY1 井筇竹寺组、黔南 HY1 井九门冲组、黔东南 TX1 井牛蹄塘组压裂测试均获得页岩气流,充分揭示了寒武系良好的页岩气勘探潜力,也为进一步的勘探研究提供了较丰富的资料。为此,本文通过典型露头剖面观测、新钻页岩气井岩心观察、室内岩矿测试及钻(测)井等资

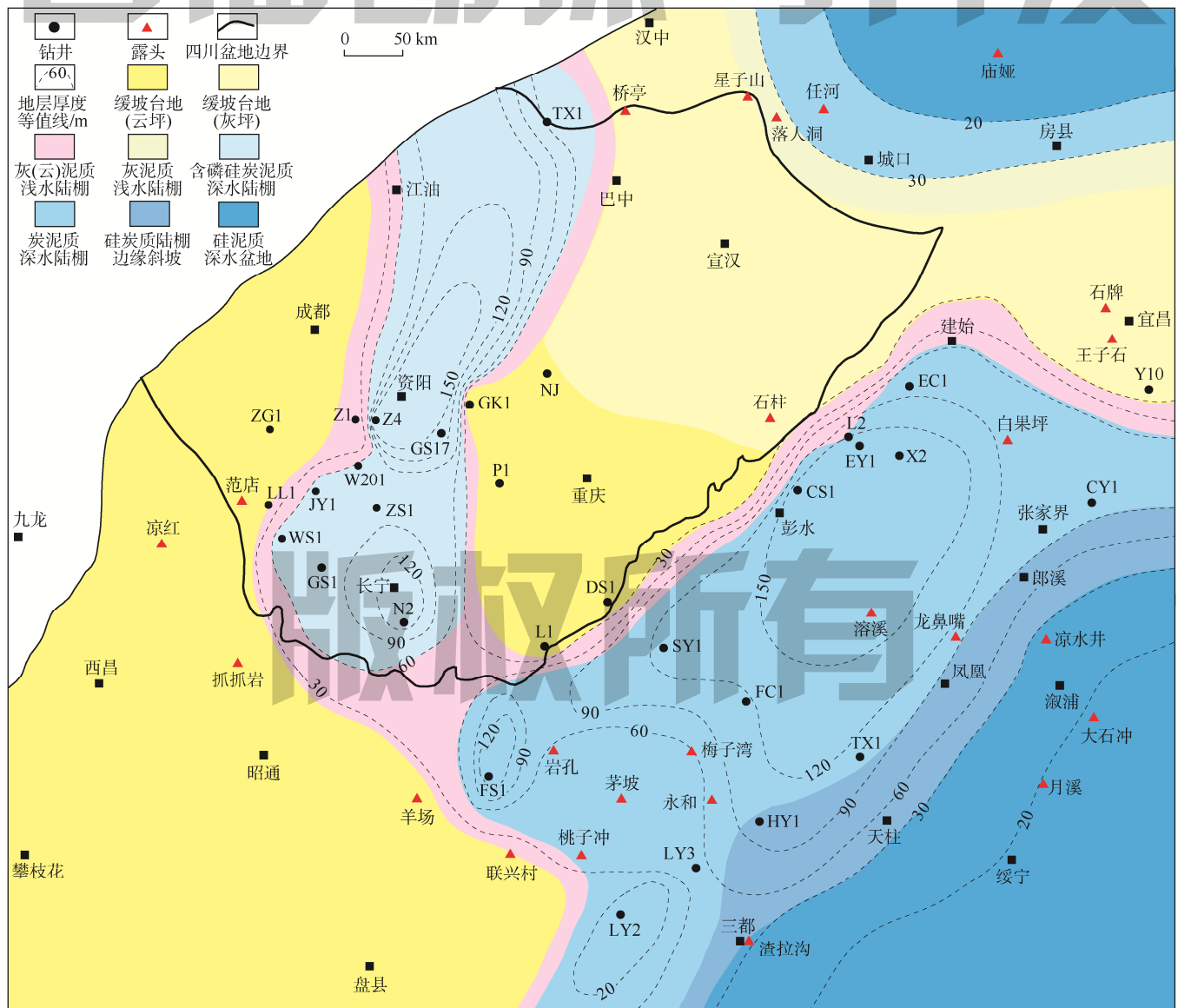


图1 上扬子地区位置及其早寒武世梅树村组沉积期沉积相分布图

料综合分析，开展了早寒武世早期页岩岩相、沉积相标志、沉积相类型及特征的研究，并结合构造-古地貌特征，建立了页岩沉积演化发育模式。以此为指导，综合单（连）井岩相分布及地层厚度等因素，刻画了早寒武世梅树村组沉积期和筇竹寺组沉积期沉积相平面展布特征，指出富有机质页岩发育的有利相区，对发展细粒沉积学及指导研究区寒武系页岩气勘探选区部署具有重要理论与现实意义。

2 地层特征

目前国际上寒武系划分采用的是中国彭善池提出

的 4 统划分方案^[9-10]，据此可将研究区下寒武统划分为 2 统（纽芬兰统和第二统）4 期，其岩石地层分区多，地层名称复杂多样，主要地层分区及各组之间对应关系详见表 1。地层对比研究表明，4 期地层横向可对比性较好，其中梅树村组沉积期地层以发育小壳化石为标志，具有高自然伽马、高电阻率的电性特征；筇竹寺组沉积期地层自然伽马及电阻率曲线均较平直；沧浪铺组沉积期地层自然伽马及电阻率曲线以锯齿状为主；龙王庙组沉积期地层为低自然伽马、高电阻率的碳酸盐岩沉积。本文重点以下寒武统梅树村组沉积期—筇竹寺组沉积期沉积地层为研究对象。

表 1 上扬子地区早寒武世（纽芬兰统一第二统）主要地层分区及划分对比表

系	统	组（期）	川西南地区	黔中—黔北地区	川北南江地区	黔南黄平地区	鄂西—渝东地区
寒武系	第二统	龙王庙组	龙王庙组	清虚洞组	孔明洞组	清虚洞组	石龙洞组
				金顶山组			天河板组
		沧浪铺组	沧浪铺组	明心寺组	阎王碛组	杷榔组— 变马冲组	石碑组
					仙女洞组		
		筇竹寺组	筇竹寺组	牛蹄塘组	郭家坝组		
						九门冲组	水井沱组
	纽芬兰统	梅树村组	麦地坪组		宽川铺组		
震旦系	上震旦统		灯影组	灯影组	灯影组	灯影组	灯影组

3 岩相类型及特征

典型露头剖面和钻井的页岩全岩矿物组成研究表明，梅树村组沉积期—筇竹寺组沉积期页岩矿物成分以黏土矿物和石英为主，其次为长石、碳酸盐矿物、黄铁矿及胶磷矿。依据岩石矿物成分、镜下结构构造、有机质含量及古生物化石等特征，共识别出 9 种页岩岩相类型（见图 2）。其中含小壳化石磷炭质页岩、含小壳化石硅质页岩主要发育于梅树村组沉积期，硅质页岩、炭质页岩在梅树村组沉积期和筇竹寺组沉积期均有发育，钙质纹层炭质页岩、泥（粉）晶钙质页岩、纹层状黏土质页岩、纹层状粉砂质页岩和粉砂质页岩主要发育于筇竹寺组沉积期。图 2 中（a）—（e）岩相主要形成于浅水、含氧、较弱水动力沉积环境，（f）—（i）为较深水、贫氧、较弱水动力—弱水动力沉积环境。

4 典型沉积相标志

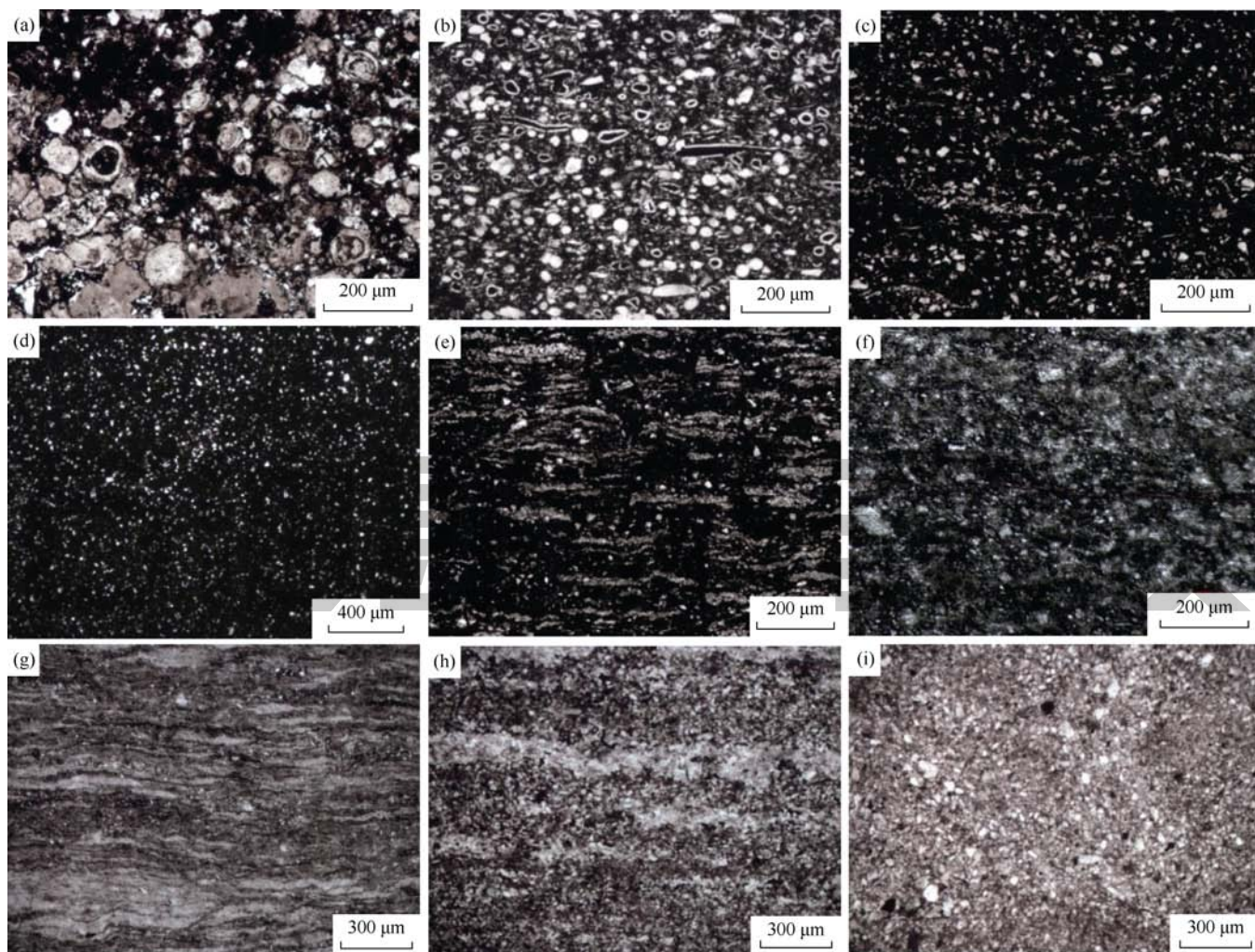
沉积相标志是沉积相类型划分的重要依据，通过典型露头剖面与钻井岩心观察、岩石薄片与氩离子抛光-扫描电镜鉴定分析，共识别出 5 类沉积相标志，包括：层理构造、黄铁矿、结核体、上升洋流作用产物及古生物化石。各类相标志发育特征详述如下。

4.1 层理构造

层理构造主要有 8 种：①水平层理（见图 3a）及（钙质或粉砂质）纹层；②平行层理；③波状层理；④小型交错层理；⑤灰质条带；⑥小型变形层理及扰动构造（见图 3b）；⑦透镜状层理（见图 3c）；⑧滑塌构造（见图 3f、3g）。其中以①、②最为发育，在露头剖面和岩心观察中均较常见，主要形成于水体安静的沉积环境；③—⑦仅在局部地区砂泥岩互层段中较发育，如 CS1 井石碑组下部，反映出沉积过程中沉积物的供给及水体环境是不断变化的，水体相对动荡。

4.2 黄铁矿

黄铁矿是富有机质沉积的特征矿物，对沉积环境具有重要的指示意义。其矿物形态和粒度大小可以用来判断成因及沉积环境的差异^[11]。宏观岩心与微观氩离子抛光-扫描电镜观察发现，主要发育 4 种类型黄铁矿：①黄铁矿团块，个体最大可达 5 cm×8 cm，但晶粒极细小；②自形粒状黄铁矿集合体，单晶大小 0.2~1.0 cm（见图 3i）；③黄铁矿条带及透镜体，条带与岩层面平行，宽 0.3~2.0 cm，透镜体沿层面断续分布；④莓状黄铁矿集合体，由大量微米级、形态和大小基本相同的黄铁矿微晶聚合形成类似草莓状的球形集合体，草莓体的大小分布可指示氧化或缺氧的沉积环境^[11]。研究区大量页岩扫描电镜图像鉴定分析表明，莓状黄



(a) 含小壳化石磷炭质页岩, 壳壁为均匀磷质单层壳, 内充填物质多呈粒状或斑状结构, JY1 井, 单偏光; (b) 含小壳化石硅质页岩, 壳壁为硅质单层壳, 个体小, 几微米至几十微米, 见硅质海绵骨针, HY1 井, 单偏光; (c) 硅质页岩, 片状石英, 成岩过程中微小石英颗粒聚集成不规则多边形, 龙鼻嘴剖面, 单偏光; (d) 炭质页岩, 石英颗粒直径小于 $5\mu\text{m}$, 磨圆度较好, 含大量团絮状有机质, HY1 井, 单偏光; (e) 钙质纹层炭质页岩, 钙质纹层由细粒方解石组成, 呈断续分布, 龙鼻嘴剖面, 单偏光; (f) 泥(粉)晶钙质页岩, 细粒方解石集合体呈斑块状及絮状散布, L1 井, 单偏光; (g) 纹层状黏土质页岩, 少量有机质沿纹层呈线状分布, 龙鼻嘴剖面, 单偏光; (h) 纹层状粉砂质页岩, 主要由黏土矿物、石英颗粒及有机质组成, 有机质呈粒状及斑状分布, JY1 井, 单偏光; (i) 粉砂质页岩, 主要由黏土矿物、石英组成, 其次为岩屑与长石颗粒, 碎屑颗粒磨圆度较差, 棱角一次棱角状, JY1 井, 单偏光

图2 上扬子地区早寒武世梅树村组沉积期—筇竹寺组沉积期页岩岩相特征

铁矿集合体较发育, 直径以 $2\sim 5\mu\text{m}$ 为主(见图 3l), 仅个别样品中见少量大于 $10\mu\text{m}$ 莓状集合体。总体而言, 页岩中含有多种类型黄铁矿, 尤其是大量莓状黄铁矿的发育, 反映出其主要形成于厌氧沉积环境。

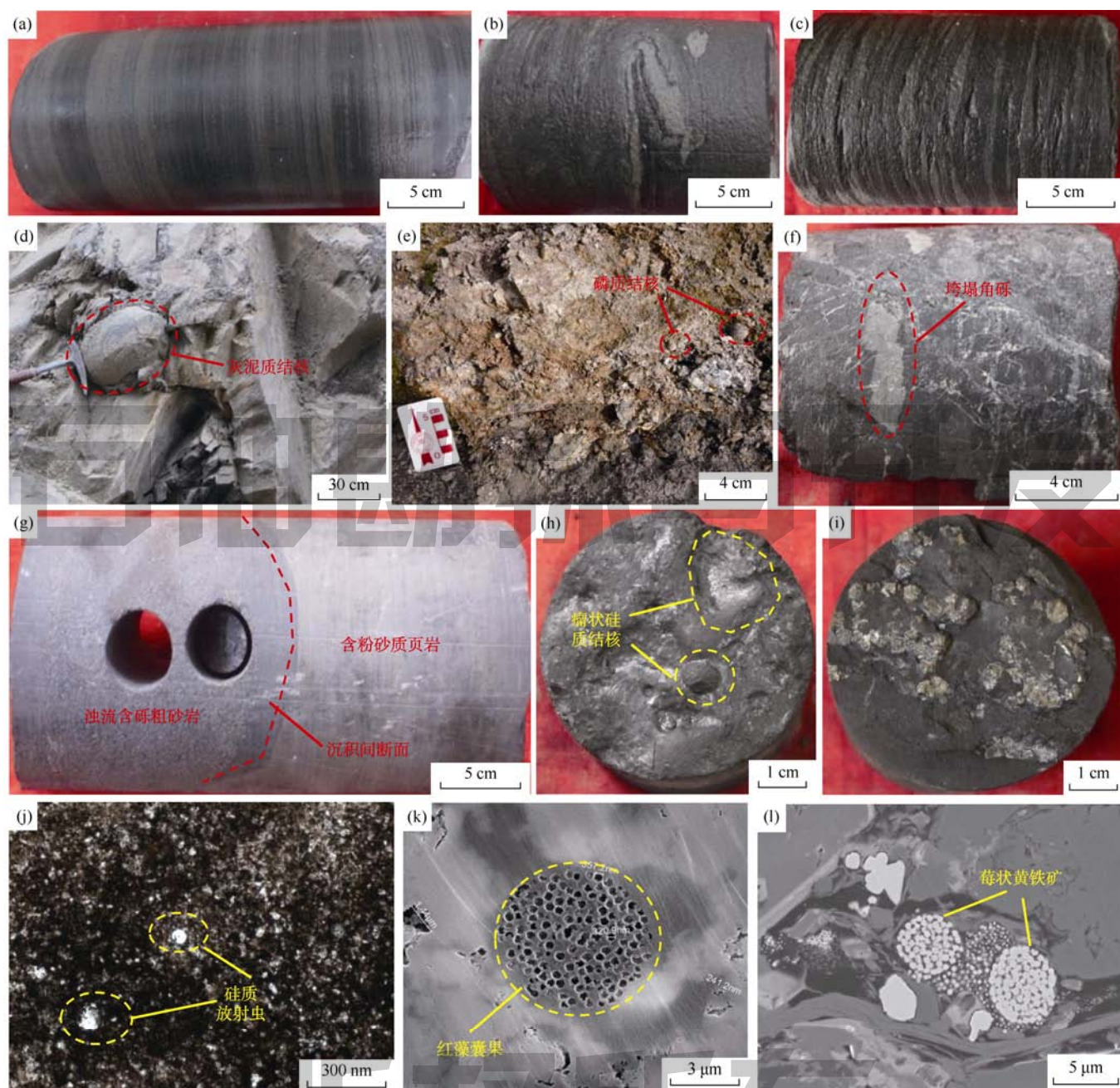
4.3 结核体

结核体是一种沉积构造, 一般发育于外陆棚至盆地相沉积环境中, 其形成需要低沉积速率, 被埋藏后就停止生长^[12]。露头剖面及钻井岩心观察发现, 研究区结核体较发育, 根据其形态、成分可划分为 2 种类型: ① 椭球状结核体, 内部结构致密, 成分为灰质泥岩和泥质灰岩, 个体相对较大, 直径一般 $0.1\sim 0.5\text{m}$ 不等, 如川北南江桥亭剖面郭家坝组上部深灰色钙质纹层状页岩段中见大量椭球状结核体发育(见图 3d), 反映其形成于静水低能沉积环境; ② 瘤状结核体, 由

富硅质结核和富有机质黏土外壳组成, 个体相对较小, 直径一般 $0.3\sim 2.0\text{cm}$, 如 HY1 井九门冲组下部硅质页岩段中发育较多的该类瘤状结核体(见图 3h), 其主要是在底流和洋流作用下, 由海底早期成岩胶结作用形成, 生长缓慢, 反映沉积水体较深的弱水动力沉积环境。

4.4 上升洋流作用产物

上升洋流是陆棚环境与大陆斜坡环境中重要的沉积作用之一, 其通过带来有利于生物发育的磷、硅、铁族元素及细菌等营养物质, 促进富有机质烃源岩的形成^[13]。研究区发育上升洋流作用形成的 5 种类型沉积标志: ① 磷块岩、磷质页岩等(见图 3e); ② 硅-炭页岩组合; ③ 炭-硅-磷页岩组合; ④ 石煤-硅质岩-金属硫化物富集层-黑色页岩组合; ⑤ 炭-硅质页岩-金属硫化物富集层组合。上述 5 种典型上升洋流作用形成



(a) 水平层理, CS1 井石牌组粉砂质页岩, 岩心; (b) 扰动构造, CS1 井石牌组粉砂质页岩, 岩心; (c) 透镜状层理, CS1 井石牌组粉砂质页岩, 岩心; (d) 椭圆状灰泥质结核体, 南江桥亭郭家坝组钙质纹层页岩, 野外露头; (e) 富磷层段, 瓮安永和牛蹄塘组底部上升洋流标志, 野外露头; (f) 斜坡滑塌白云质角砾, HY1 井九门冲组底部硅质岩, 岩心; (g) 垮塌浊流砂质沉积, JY1 井筇竹寺组, 岩心; (h) 富硅瘤状结核体, 黏土质外壳, HY1 井九门冲组底部硅质岩, 岩心; (i) 粒状黄铁矿集合体, HY1 井九门冲组炭质页岩, 岩心; (j) 硅质放射虫, 瓮安永和牛蹄塘组炭质页岩, 单偏光; (k) 蜂窝状含硅有机质颗粒, 红藻囊果, 结构孔保存完好, 渣拉沟牛蹄塘组页岩, 扫描电镜; (l) 莓状黄铁矿集合体, 秀山溶溪水井沱组页岩, 扫描电镜

图 3 上扬子地区早寒武世梅树村组沉积期—筇竹寺组沉积期页岩典型沉积相标志

的重要产物广泛发育于川东南及黔北牛蹄塘组下部。

4.5 古生物化石

不同的生物具有特定的生存环境, 因此页岩的生物类型能够反映其形成的沉积环境。研究区古生物类型主要有: ①藻类, 不同藻类生活的水体深度不同, 一般水深 50~60 m, 红藻可生活在较深水区 (松桃盘石牛蹄塘组), 褐藻残片可在较深水区埋藏下来 (羊

跳剖面牛蹄塘组), 蓝细菌只能生活在浅水区, 故红藻 (见图 3k)、褐藻可发育于深水陆棚沉积环境, 而蓝细菌可发育于浅水陆棚环境^[14]; ②放射虫, 放射虫的多囊虫类壳体是不易溶解的无定形硅, 能在海底沉积物中被较好地埋藏保存, 其残体是研究深海沉积不可或缺的重要微体古生物化石^[15]。研究区瓮安永和剖面牛蹄塘组下部炭质页岩中见硅质放射虫 (见图 3j),

揭示其页岩发育于较深水沉积环境。

5 沉积相类型及特征

以岩相划分、沉积相标志识别、典型露头及单井相分析为基础(见图4),考虑实际生产中适用性和可操作性,按水体深度与沉积物类型2种因素相结合的方法,提出沉积相类型精细划分方案,在梅树村组沉积期—筇竹寺组沉积期页岩中共识别出5种相、8种亚相和16种沉积微相(见表2)。重点针对陆棚相的各亚相及其微相特征详述如下。

5.1 浅水陆棚亚相

浅水陆棚为处于滨外浪基面之下至风暴浪基面之上的区域,水体较浅,海底地形较平缓,沉积物以砂泥及碳酸盐为主,常具有牵引流特征,水动力条件相对较强,且间歇性动荡^[16]。按沉积物类型可进一步

划分为砂泥质浅水陆棚、泥质浅水陆棚、碳酸盐质浅水陆棚及混积浅水陆棚4种微相。

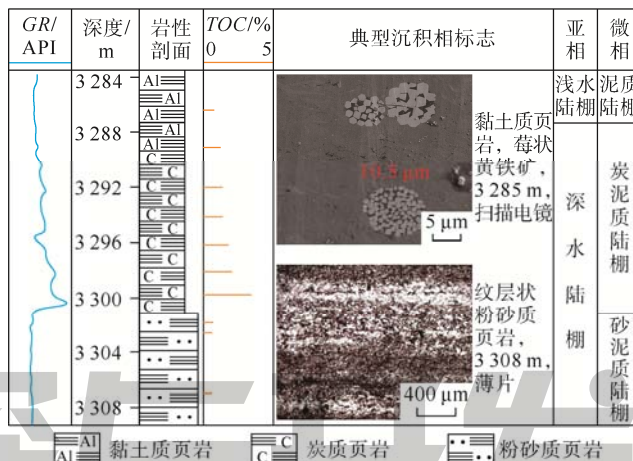


图4 JY1井筇竹寺组上部页岩段沉积构造及微相特征

表2 上扬子地区早寒武世梅树村组沉积期—筇竹寺组沉积期沉积相类型划分及其特征

相	亚相	微相	颜色	岩石类型	识别标志及特征	TOC/%	代表性剖面
滨岸	近滨	砂坝	褐灰色、灰色	中—细粒石英砂岩	板状及槽状交错层理、浪成波痕、生物扰动构造等		凉红剖面筇竹寺组
碳酸盐岩	潮坪	云坪	浅灰色、灰色	含磷粉—细晶云岩、含磷泥晶灰岩	薄层状为主, 常见变形层理, 磷质小壳化石丰富	<0.2	范店、抓扒岩麦地坪组
缓坡	浅水	泥灰质缓坡	灰色、深灰色	泥质灰岩、灰质泥岩	厚层状、团块状为主, 泥质灰岩、灰质泥岩与泥岩互层	<0.2	L2井水井沱组
陆棚	浅水	砂泥质陆棚	浅灰色、灰色	黏土质页岩、含灰泥岩、粉砂质页岩、含炭页岩	炭质含量低, 波状层理、小型交错层理发育, 砂泥互层、碎屑岩与碳酸盐岩混积, 绿藻、蓝细菌发育, 局部见少量黄铁矿	0.1~0.2	JY1井筇竹寺组
		泥质陆棚				0.1~1.0	CS1井石牌组
		碳酸盐质陆棚				0.1~0.5	南江桥亭郭家坝组
		混积陆棚				<0.2	DS1井明心寺组
	深水	含磷硅炭泥质陆棚				0.5~2.5	GS17井筇竹寺组
		炭泥质陆棚		炭质页岩、含磷云泥岩、含粉砂质页岩、钙质纹层页岩	磷质、炭质含量高, 黄铁矿较发育, 上升洋流产物发育。局部纹层及水平层理发育, 发育红藻及褐藻, 海绵骨针, 钼铀比极低	1.5~8.5	永和剖面牛蹄塘组
		碳酸盐质陆棚	黑色、黑灰色			0.2~1.5	EY1井水井沱组
		砂泥质陆棚				2.0~5.0	岩孔剖面牛蹄塘组
		浊积砂微相					JY1井筇竹寺组
陆棚边缘	陡斜坡	硅炭泥质斜坡	黑色、灰黑色	硅质页岩、炭质页岩	黄铁矿极发育, 滑塌构造发育, 上升洋流产物发育, 钼铀比极低	2.0~10.0	HY1井九门冲组下部、吉首龙鼻嘴牛蹄塘组下部
盆地	深水滞流盆地	硅泥质盆地	黑色、灰黑色	硅质岩、硅质页岩、硅炭质页岩	地层厚度明显减薄, 基本无砂质及碳酸盐岩, 硅质含量高	1.5~13.0	洞口月溪、新化大石冲小烟溪组

5.1.1 砂泥质浅水陆棚微相

主要发育在靠近碎屑物源古陆的地区, 岩石类型以浅灰色粉砂质页岩、泥质粉砂岩与灰色黏土质页岩、粉砂岩互层发育为特征, 厘米级和毫米级平行纹层或水平层理较发育, 偶见波状层理、透镜状层理及小型交错层理。如JY1井筇竹寺组3350~3550 m、CS1井石牌组1851~1876 m主要为粉砂质页岩与泥质粉砂岩不等厚互层沉积(见图5), 常规测井曲线表现为较平直的自然伽马低值(90~130 API), 加积沉积特征明显, 纵向上厚度较大, 可达几百米。

5.1.2 泥质浅水陆棚微相

主要发育在远离碎屑物源古陆的地区, 岩石类型

以灰色黏土质页岩为主, 偶见少量粉砂质纹层发育, TOC值(总有机碳含量)很低, 如川东南L1井牛蹄塘组2503~2550 m, TOC值小于0.2%, 常规测井曲线表现为自然伽马中低值(110~150 API), 且形态平直, 岩性基本无变化, 以泥质沉积为主, 形成于安静、水体稳定的沉积环境。

5.1.3 碳酸盐质浅水陆棚微相

主要发育在碳酸盐岩古陆或水下隆起的周边地区, 岩石类型以灰色灰质泥岩、泥质灰岩及薄层泥晶灰岩互层为主。如彭水CS1井2253~2256 m、鄂中古陆西侧长阳王子石、石牌等剖面水井沱组均发育该类微相沉积。

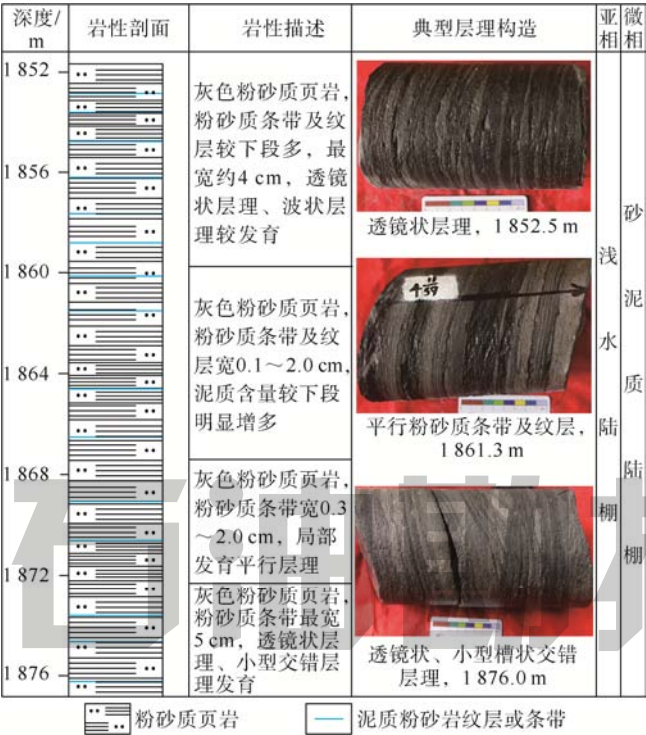


图 5 CS1 井石牌组砂泥质浅水陆棚微相特征

5.1.4 混积浅水陆棚微相

主要发育在碎屑物源古陆与碳酸盐岩古陆（或水下隆起）之间的过渡地区，岩石类型为粉砂质页岩、黏土质页岩与灰质泥岩、泥质灰岩互层混合沉积，如 DS1 井 3 250~3 350 m 黏土质页岩-薄层泥质灰岩-砂泥岩互层的沉积序列，常规测井曲线表现为微齿状自然伽马低值（20~40 API），反映较为动荡的浅水沉积环境。

5.2 深水陆棚亚相

深水陆棚为风暴浪基面以下，靠近大陆斜坡的相对深水区域，沉积水动力条件弱，能量低^[16-17]。与浅水陆棚相比，其沉积物颜色更深、粒度更细、有机质含量高。按沉积物类型可进一步划分为含磷硅炭泥质深水陆棚、炭泥质深水陆棚、碳酸盐质深水陆棚、砂泥质深水陆棚、深水浊积砂 5 种微相类型。

5.2.1 含磷硅炭泥质深水陆棚微相

该沉积微相以富磷、富硅、富炭为特征，上升洋流作用较发育，常见黄铁矿团块及磷质结核。如 Z4 井 4 275.0~4 471.5 m，主要为深灰色含硅磷白云岩及灰岩、泥质白云岩和硅质页岩、灰质页岩互层；GS17 井 5 325~5 465 m，主要为白云岩、灰岩与硅质岩、硅质页岩、黑色页岩互层，含胶磷矿^[18]；JY1 井 3 580~3 640 m，主要为磷质白云岩、云质泥岩、炭质页岩互层，自然伽马能谱测井显示，钍铀比低（小于 2），反映较深水、闭塞、缺氧沉积环境。

5.2.2 炭泥质深水陆棚微相

主要以发育灰黑色—黑色炭质页岩、不含或仅局部含少量极细粉砂为特征，如 HY1 井九门冲组上部、金沙岩孔和瓮安永和剖面牛蹄塘组下部均属该类沉积微相（见图 6），氩离子抛光-扫描电镜下莓状黄铁矿较发育，直径以 2~4 μm 为主，常规测井曲线表现为自然伽马极高值，一般 200~500 API，局部可达 1 100 API，自然伽马能谱测井显示，钍铀比极低（小于 0.5），反映其处于深水、缺氧沉积环境。

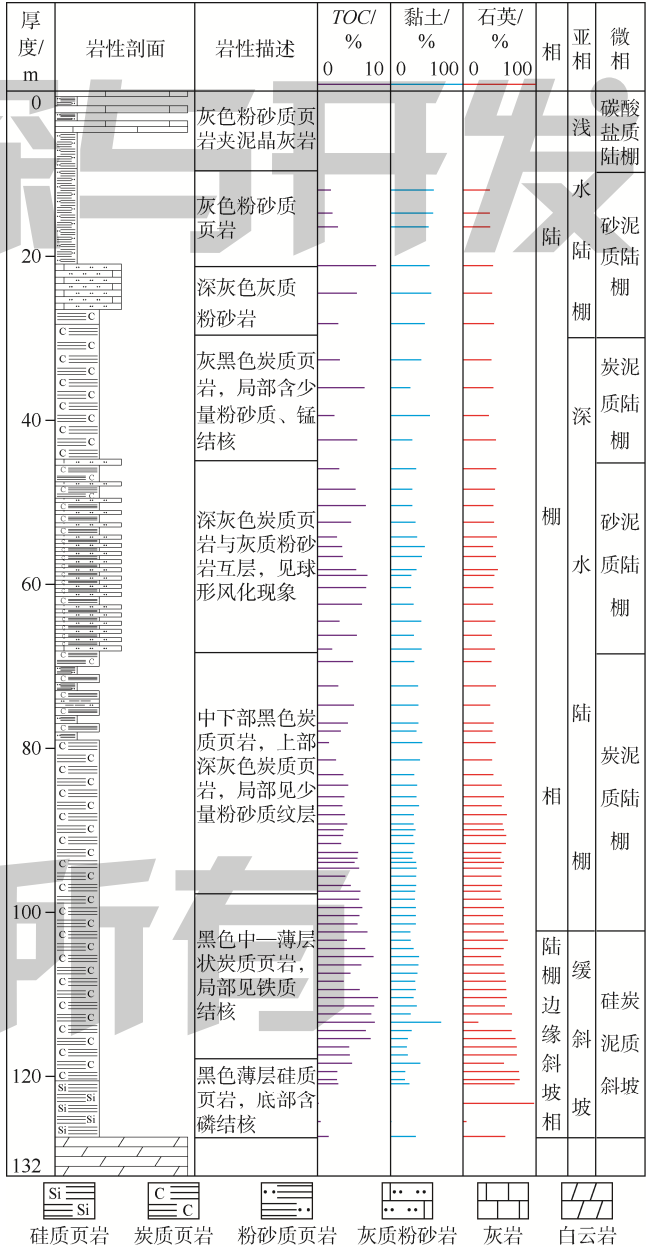


图 6 瓮安永和剖面牛蹄塘组沉积微相及特征

5.2.3 碳酸盐质深水陆棚微相

主要以发育灰黑色—黑色灰质泥岩、泥质灰岩夹钙质纹层炭质页岩为特征，如彭水地区 CS1 井水井沱

组上部 2 253.0~2 261.5 m, 岩石类型主要为灰质泥岩夹薄层炭质页岩及泥灰岩条带, L2 井水井沱组 3 150~3 350 m, 主要为深灰色含灰泥岩夹薄层泥质灰岩 (2~5 m), 均属碳酸盐质深水陆棚微相沉积。

5.2.4 砂泥质深水陆棚微相

主要以灰黑色含炭页岩、粉砂质页岩及泥质粉砂岩互层为特征, 主要发育在川西南筇竹寺组中上部及黔中牛蹄塘组中部的局部层段。如 GS17 井 5 050~5 110 m, 因粉砂质和泥质含量差异, 测井曲线表现为自然伽马值变化范围较大 (115~250 API), 顶、底部突变接触, 呈微齿状或指状箱型—漏斗型复合沉积特征, 沉积物自下而上表现出粗—细—粗的演变特征。

5.2.5 深水浊积砂微相

目前仅在少量钻井的局部层段见深水浊积砂微相沉积, 如 JY1 井 3 295.0~3 303.9 m 取心段, 见约 13 cm 厚浊积砂岩, 岩性具下粗上细特征, 依次为深灰色含砾粗砂岩、中—粗砂岩、灰黑色含粉砂炭质页岩, 其底部与下伏灰色粉砂质页岩段呈突变接触 (见图 3g)。结合区域构造^[17-20]与沉积背景研究, 其主要是在早寒武世构造拉张裂隙作用下发生堑垒式活动, 沉积水体快速变深, 来自西部碎屑物源区的粗粒砂质沉积物在重力作用下垮塌搬运进入相对深水区形成浊积砂沉积。

6 沉积相对比分析

以沉积相类型划分、典型露头剖面及单井相分析为基础, 进行不同地区沉积相对比, 研究结果表明:

下寒武统沉积物自下而上由富硅、富磷、富炭页岩至砂泥质互层或砂质、泥质与灰质互层混积或灰泥质, 再到纯碳酸盐岩沉积, 反映其快速海侵—缓慢海退, 沉积水体由深变浅的特征。如黔南 HY1 井九门冲组自下而上由底部的斜坡—深水盆地相硅质岩、硅质页岩沉积, 向上演变为深水陆棚相炭质页岩、浅水陆棚相粉砂质页岩及碳酸盐岩缓坡相泥晶灰岩及泥质灰岩沉积。不同地区横向对比分析显示: 四川盆地内部除资阳—长宁—一线地区发育厚度较大的含磷硅炭泥质深水陆棚相沉积外, 其东西两侧地层厚度明显减薄, 且主要以砂泥质浅水陆棚沉积为主。从上扬子地区整体来看, 由川西南—川东—黔中—湘西地区, 沉积水体自西向东逐渐加深, 依次发育滨岸砂质沉积—砂泥质浅水陆棚沉积—炭泥质深水陆棚沉积—陆棚边缘斜坡—硅泥质深水盆地沉积。

7 沉积模式及平面分布特征

7.1 沉积相发育模式

以岩相划分、单井相及连井沉积相对比分析为基础, 结合地层与构造古地貌特征^[17-19]研究, 建立了上扬子地区早寒武世早期页岩沉积演化发育模式 (见图 7)。结果表明: 梅树村组沉积期沉积物受其沉积前不同地区震旦系碳酸盐岩顶面岩溶古地貌高差大的影响, 快速海侵后, 在四川盆地西南裂陷区及盆地外东南部低洼区沉积了厚度较大的暗色页岩段, 主要为深

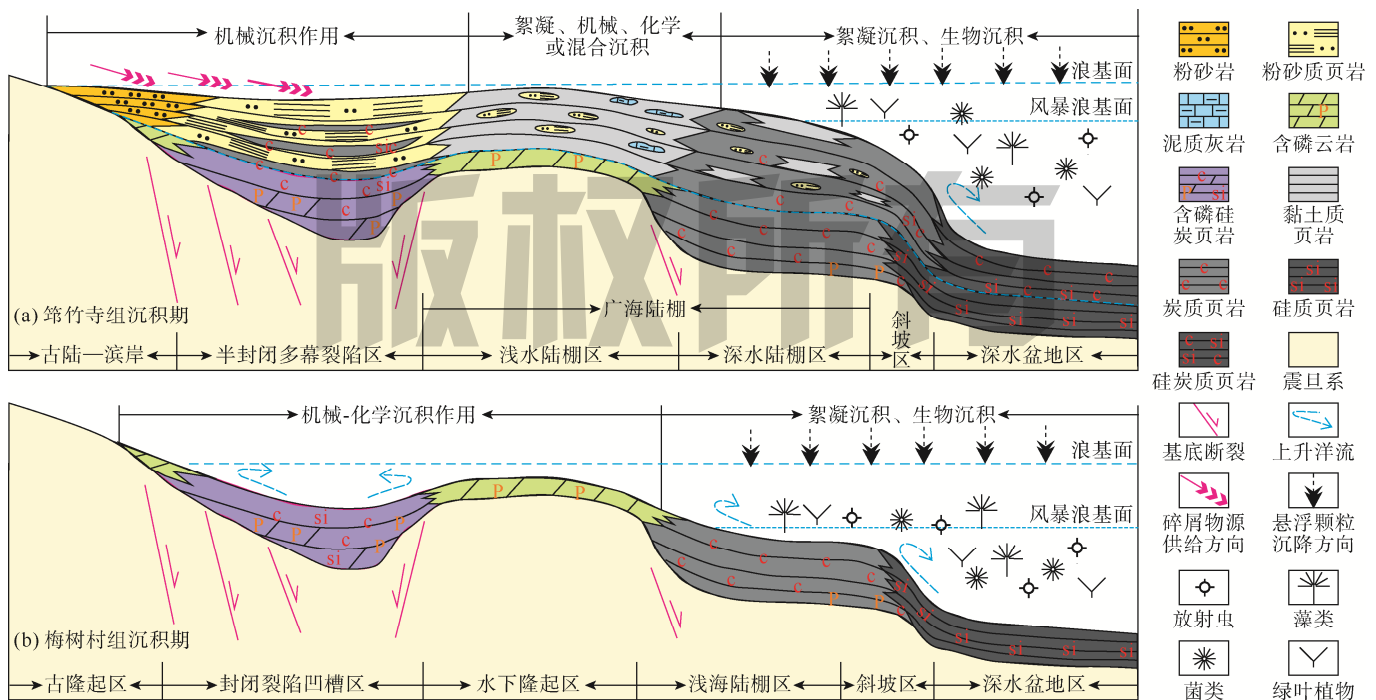


图 7 上扬子地区早寒武世早期页岩沉积演化发育模式

灰色—灰黑色含磷硅炭页岩及灰黑—黑色硅质页岩、炭质页岩，其他高部位沉积薄层含磷云岩；梅树村组沉积期沉积物沉积充填后，筇竹寺组沉积期不同地区古地貌高差变小，故再次快速海侵，海侵范围明显更大，其后缓慢海退，以退积或加积沉积为主，四川盆地西南裂隙区及盆地外东南部仍为沉积中心，富有机质页岩分布的面积进一步扩大，但厚度明显变小、有机质含量也有所降低；沧浪铺组沉积期，持续海退，沉积物粒度变粗，不同地区沉积厚度差异变小；至龙王庙组沉积期演变为稳定的浅水碳酸盐台地相沉积。

7.2 沉积相平面展布特征

上扬子地区早寒武世梅树村组沉积期和筇竹寺组沉积期沉积相综合研究表明：两者在沉积作用方式、

沉积体系类型及沉积相展布特征上均存在明显差异。四川盆地西南部资阳—长宁一线近南北向展布的地区和盆地外东南部鄂西—渝东—黔中一线北东至南西向展布的地区为早寒武世早期两个沉积中心，控制了深水陆棚相富有机质页岩的发育，是页岩气勘探有利地区（见图8）。

梅树村组沉积期沉积岩石类型主要以富磷、富硅、富碳酸盐及小壳化石为特征，沉积作用方式以机械-化学沉积和生物沉积为主，受其影响主体为碳酸盐缓坡台地—陆棚—斜坡—深水盆地沉积体系。自西向东依次发育碳酸盐岩缓坡—含磷硅炭泥质深水陆棚—碳酸盐岩缓坡—灰（云）泥质浅水陆棚—炭泥质深水陆棚—硅炭质陆棚边缘斜坡—硅质深水盆地沉积。其中大部分地区主要为碳酸盐缓坡台地沉积，岩性为含磷

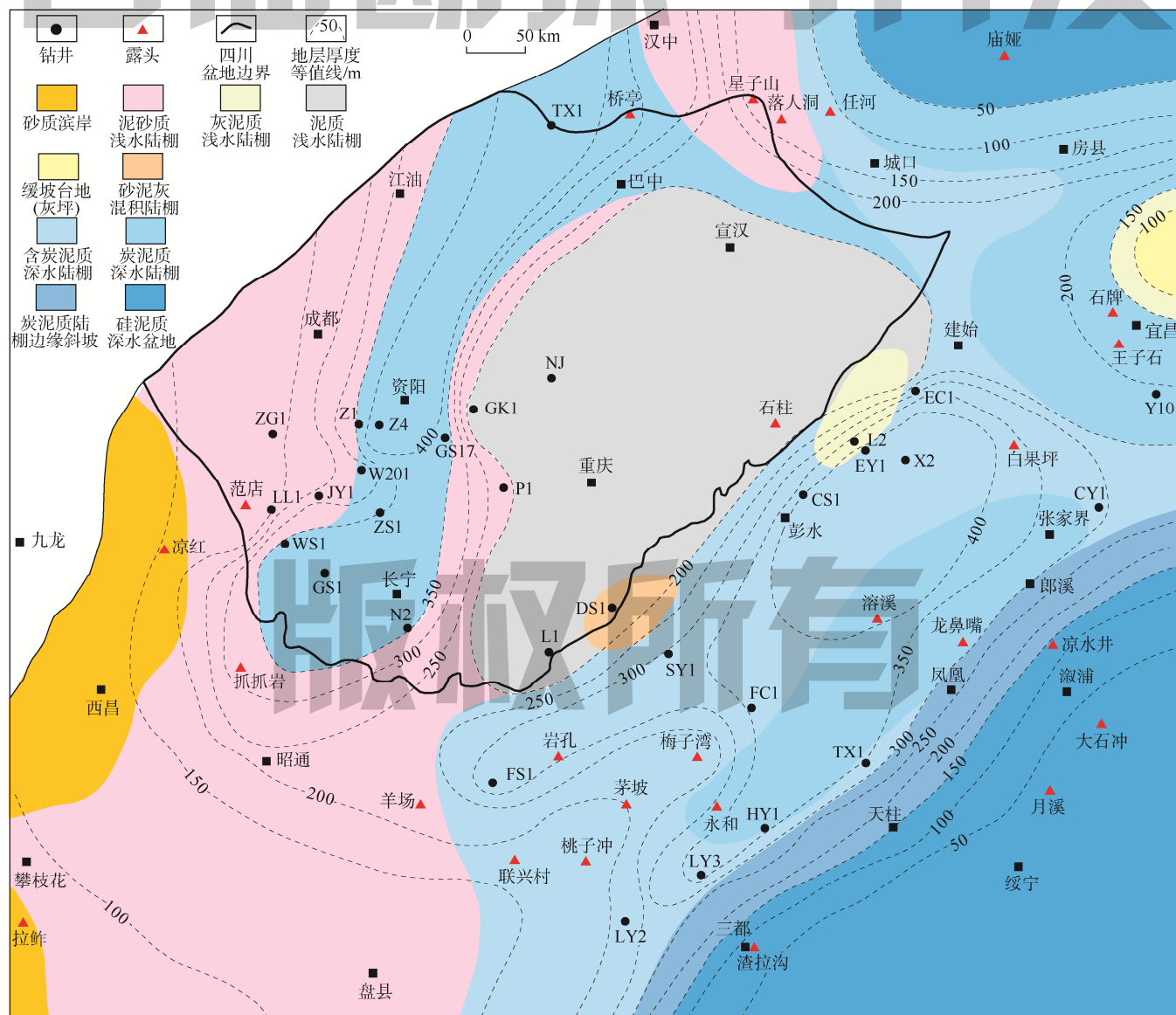


图 8 上扬子地区早寒武世筇竹寺组沉积期沉积相分布图

云岩或含磷灰岩,厚度较小(5~30 m),以四川盆地西南部资阳—长宁—一线近南北向带状展布的区域和盆地外东南部鄂西—渝东—黔中—一线大部分地区地层厚度最大,一般60~150 m,最大可达190 m,为梅树村组沉积期的两个沉积中心(见图1)。其差别在于前者为发育于碳酸盐缓坡台地内部的含磷硅炭泥质深水陆棚沉积(TOC值为0.5%~2.5%),受震旦纪晚期形成的克拉通内裂陷控制^[20-23],而后者为发育于碳酸盐缓坡台地与斜坡—深水盆地之间的硅炭泥质深水陆棚沉积(TOC值为1.5%~8.5%)。黔南三都—天柱—淑浦—一线及以东地区、城口—房县以北地区主要发育黑色硅质岩、硅质页岩,厚度小(15~30 m),欠补偿沉积特征明显,为斜坡—深水盆地相沉积。总体而言,梅树村组沉积期沉积物受震旦纪末期碳酸盐岩顶面构造-岩溶古地貌与快速海侵作用控制,以两大深水陆棚相区富有机质页岩发育最好。

筇竹寺期沉积岩石类型主要以富砂、富泥、富炭为特征。经梅树村组沉积期沉积物填平补齐沉积后,沉积古地貌背景变得相对平缓,筇竹寺组沉积期海平面再次上升,海侵范围进一步加大,沉积作用方式发生改变,研究区西部及北部开始接受来自古陆的碎屑砂质机械沉积,东南部及东北部仍以泥质絮凝及生物沉积为主,受其影响主体为滨岸—陆棚—斜坡—深水盆地沉积体系。自西向东依次发育砂质滨岸—砂泥质浅水陆棚—炭泥质深水陆棚—泥质浅水陆棚—炭泥质深水陆棚—炭质陆棚边缘斜坡—硅泥质深水盆地沉积。其中大部分地区主要为砂泥质、泥质浅水陆棚相沉积,四川盆地西南部资阳—长宁—一线南北向炭泥质深水陆棚沉积中心范围基本不变,而盆地外东南部炭泥质深水陆棚沉积中心由鄂西—渝东—黔中—一线进一步扩大至东北部宜昌—房县地区。黔南三都—凤凰—郎溪—一线及以东地区、城口—房县以北地区仍为斜坡—深水盆地相沉积。

总体而言,筇竹寺组沉积期沉积受西部及北部碎屑物源区、东北部鄂中碳酸盐岩隆起及相对海平面升降变化控制,沉积物类型丰富多样,砂质、泥质、碳酸盐质及混积等均有发育。两大深水陆棚相区仍是富有机质页岩发育的最有利地区。

四川盆地西南部资阳—长宁—一线深水陆棚相富有机质页岩以多层(至少3层)、薄层为特点(见图7),而盆地外东南部深水陆棚相富有机质页岩以厚层连续沉积为特点,页岩气勘探应考虑其差异进行有针对性的研究与部署。

8 结论

早寒武世早期发育9种页岩岩相、5类沉积相标

志,按水体深度与沉积物类型相结合的划分方法,提出了页岩沉积相类型精细划分方案,建立了早寒武世早期页岩沉积演化发育模式。指出梅树村组沉积期与筇竹寺组沉积期在沉积作用方式、沉积体系类型及沉积相展布特征上均存在差异:受震旦纪末期碳酸盐岩顶面构造-岩溶古地貌与快速海侵作用控制,梅树村组沉积期以机械-化学沉积和生物沉积为主,主体为碳酸盐缓坡台地—陆棚—斜坡—深水盆地沉积体系;受西部及北部碎屑物源区、东北部鄂中碳酸盐岩隆起及相对海平面升降变化控制,筇竹寺组沉积期以砂质机械沉积、泥质絮凝及生物沉积为主,主体为滨岸—陆棚—斜坡—深水盆地沉积体系。四川盆地西南部资阳—长宁—一线近南北向展布的地区和盆地外东南部鄂西—渝东—黔中—一线及东北部宜昌—房县—一线的地区为早寒武世早期两个沉积中心,控制了深水陆棚相富有机质页岩的发育,是页岩气勘探的有利地区,但前者富有机质页岩以多层、薄层为特点,后者以连续厚层为特点,今后应考虑不同地区富有机质页岩发育特征的差异,有针对性地进行页岩气勘探部署。

致谢:中国地质大学(北京)孙梦迪博士在小壳化石鉴定上给予了帮助,在此表示感谢!

参考文献:

- [1] 李伟,余华琪,邓鸿斌.四川盆地中南部寒武系地层划分对比与沉积演化特征[J].石油勘探与开发,2012,39(6):681-690.
LI Wei, YU Huaqi, DENG Hongbin. Stratigraphic division and correlation and sedimentary characteristics of the Cambrian in central-southern Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(6): 681-690.
- [2] 徐政语,蒋恕,熊绍云,等.扬子陆块下古生界页岩发育特征与沉积模式[J].沉积学报,2015,33(1):21-35.
XU Zhengyu, JIANG Shu, XIONG Shaoyun, et al. Characteristics and depositional model of the lower Paleozoic organic rich shale in the Yangtze Continental Block[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2015, 33(1): 21-35.
- [3] MEYERS P A. Paleocceanographic and paleoclimatic similarities between Mediterranean sapropels and Cretaceous black shales[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2006, 235(1/2/3): 305-320.
- [4] 郭旭升.南海相页岩气“二元富集”规律:四川盆地及周缘龙马溪组页岩气勘探实践认识[J].地质学报,2014,88(7):1210-1218.
GUO Xusheng. Rules of two-factor enrichment for marine shale gas in southern China: Understanding from the Longmaxi Formation shale gas in Sichuan Basin and its surrounding area[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(7): 1210-1218.
- [5] 刘宝珺,许效松.中国南方岩相古地理图集(震旦纪—三叠纪)[M].北京:科学出版社,1994.
LIU Baojun, XU Xiaosong. Atlas of the palaeogeography of South

- China(Sinian-Triassic)[M]. Beijing: Science Press, 1994.
- [6] 冯增昭, 彭勇民, 金振奎, 等. 中国寒武纪和奥陶纪岩相古地理[M]. 北京: 地质出版社, 2004.
- FENG Zengzhao, PENG Yongmin, JIN Zhenkui, et al. China Cambrian and Ordovician lithofacies paleogeography[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004.
- [7] 马永生, 陈洪德, 王国力. 中国南方层序地层与古地理[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 254-280.
- MA Yongsheng, CHEN Hongde, WANG Guoli. Sequence stratigraphy and ancient geography in South China[M]. Beijing: Science Press, 2009: 254-280.
- [8] 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. Chinese pre-Mesozoic tectonic lithofacies paleogeographic Atlas[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010.
- [9] 彭善池. 全球寒武系四统划分框架正式确立[J]. 地层学杂志, 2006, 30(2): 147-148.
- PENG Shanchi. A new global framework with four series for Cambrian system[J]. Journal of Stratigraphy, 2006, 30(2): 147-148.
- [10] 彭善池, BABCOCK L E. 全球寒武系年代地层再划分的新建议[J]. 地层学杂志, 2005, 29(1): 92-93.
- PENG Shanchi, BABCOCK L E. Newly proposed global chronostatigraphic subdivision on Cambrian system[J]. Journal of Stratigraphy, 2005, 29(1): 92-93.
- [11] 王佳. 贵州桃映下寒武统牛蹄塘组黑色页岩中草莓状黄铁矿的粒径特征及其环境意义[D]. 成都: 成都理工大学, 2013.
- WANG Jia. Size distribution of the framboidal pyrites in the black shales of the Lower Cambrian Niutitang Formation in Taoying, Guizhou, and its environmental significance[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2013.
- [12] 金若谷. 一种深水沉积标志: “瘤状结核”及其成因[J]. 沉积学报, 1989, 7(2): 51-61.
- JIN Ruogu. A deep water sedimentary criteria: “Knotty nodule” and origin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1989, 7(2): 51-61.
- [13] 蔡雄飞, 顾松竹, 罗中杰. 陆棚环境与大陆斜坡环境的识别标志和研究意义[J]. 海洋地质动态, 2009, 25(6): 10-14.
- CAI Xiongfei, GU Songzhu, LUO Zhongjie. The depositional environment and identification mark of the continental slope environment and research significance[J]. Marine Geology Letters, 2009, 25(6): 10-14.
- [14] 梁狄刚, 郭彤楼, 边立曾, 等. 中国南方海相生烃成藏研究的若干新进展(三): 南方四套区域性海相烃源岩的沉积相及发育的控制因素[J]. 海相油气地质, 2009, 14(2): 1-19.
- LIANG Digang, GUO Tonglou, BIAN Lizeng, et al. Some progresses on studies of hydrocarbon generation and accumulation in marine sedimentary regions, southern China(Part 3): Controlling factors on the sedimentary facies and development of Palaeozoic marine source rocks[J]. Marine Petroleum Geology, 2009, 14(2): 1-19.
- [15] 张兰兰, 陈木宏, 胡维芬, 等. 现生放射虫的水深分布及其环境指示意义[J]. 热带海洋学报, 2013, 32(6): 101-107.
- ZHANG Lanlan, CHEN Muhong, HU Weifen, et al. Vertical distribution of living radiolarians and its environmental implication[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2013, 32(6): 101-107.
- [16] 李延钧, 赵圣贤, 黄勇斌, 等. 四川盆地南部下寒武统筇竹寺组页岩沉积微相研究[J]. 地质学报, 2013, 87(8): 1136-1148.
- LI Yanjun, ZHAO Shengxian, HUANG Yongbin, et al. The sedimentary micro-facies study of the lower Cambrian Qiongzhusi Formation in southern Sichuan Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87(8): 1136-1148.
- [17] 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.
- [18] 李忠权, 赖芳, 李应, 等. 四川盆地震旦系威远—安岳拉张侵蚀槽特征及形成演化[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(1): 26-33.
- LI Zhongquan, LAI Fang, LI Ying, et al. Formation and evolution of Weiyan-Anyue extension-erosion groove in Sinian system, Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(1): 26-33.
- [19] 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.
- [20] 魏国齐, 杨威, 杜金虎, 等. 四川盆地震旦纪—早寒武世克拉通内裂陷地质特征[J]. 天然气工业, 2015, 35(1): 24-35.
- WEI Guoqi, YANG Wei, DU Jinhu, et al. Geological characteristics of the Sinian-Early Cambrian intracratonic rift, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(1): 24-35.
- [21] 魏国齐, 杨威, 谢武仁, 等. 四川盆地震旦系—寒武系大气田形成条件、成藏模式与勘探方向[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(5): 785-795.
- WEI Guoqi, YANG Wei, XIE Wuren, et al. Formation conditions, accumulation models and exploration direction of large gas fields in Sinian-Cambrian, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(5): 785-795.
- [22] 周慧, 李伟, 张宝民, 等. 四川盆地震旦纪末期—寒武纪早期台盆的形成与演化[J]. 石油学报, 2015, 36(3): 310-323.
- ZHOU Hui, LI Wei, ZHANG Baomin, et al. Formation and evolution of Upper Sinian to Lower Cambrian intraplatformal basin in Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(3): 310-323.
- [23] 赵文智, 李建忠, 杨涛, 等. 中国南方海相页岩气成藏差异性比较与意义[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(4): 499-510.
- ZHAO Wenzhi, LI Jianzhong, YANG Tao, et al. Geological difference and its significance of marine shale gases in South China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(4): 499-510.

第一作者简介: 刘忠宝(1978-), 男, 黑龙江富锦人, 博士, 中国石化石油勘探开发研究院高级工程师, 主要从事层序地层学、碳酸盐岩沉积集层、非常规油气地质研究工作。地址: 北京市海淀区学院路31号, 中国石化石油勘探开发研究院非常规资源研究所, 邮政编码: 100083。E-mail: liuzb.syky@sinopec.com

收稿日期: 2016-03-24 修回日期: 2016-12-19

(编辑 黄昌武)