

扬子陆块下古生界页岩发育特征与沉积模式^①

徐政语¹ 蒋 恕² 熊绍云¹ 梁 兴³ 王高成³ 郭燕玲¹ 何 勇³ 饶大騫³

(1.中国石油勘探开发研究院杭州地质研究院 杭州 310023;2.犹他大学能源与地球科学研究院 盐湖城 UT84108;

3.中国石油浙江油田分公司 杭州 310013)

摘 要 为了深入探讨扬子陆块下古生界页岩发育与分布特征、建立沉积模式,系统收集与整理了扬子陆块下寒武统牛蹄塘组与上奥陶统一志留统五峰—龙马溪组两套富有机质页岩大量数据,选取贵州省三都县渣拉沟及四川省筠连县昭104井两个典型剖面与井岩芯进行了系统观察与采样,对扬子陆块范围内两套富有机质页岩岩性与沉积相发育特征进行了系统分析。研究表明,早古生代以来,扬子陆块受被动大陆边缘扩张与陆缘造山挠曲拗陷两类成盆环境影响^[1-2],牛蹄塘组页岩沉积于被动大陆边缘扩张环境,缘于上升洋流与缺氧事件复合沉积模式,富有机质页岩以扬子陆块东南缘深水陆棚—斜坡相区最为发育、厚度最大、有机碳含量最高;五峰—龙马溪组页岩沉积于加里东期周缘前陆造山环境,缘于浅水陆棚—闭塞滞留海湾沉积模式,富有机质页岩以中上扬子陆块东南缘深水陆棚区最为发育、厚度最大、有机碳含量最高。

关键词 沉积模式 发育特征 富有机质页岩 下古生界 扬子陆块

第一作者简介 徐政语 男 1964年出生 博士 高级工程师 构造地质学与石油地质学 E-mail: Xuzy_hz@pet-rochina.com.cn

中图分类号 P512.2 P595 **文献标志码** A

0 引言

受传统技术所限,以往油气勘探开发工作主要关注烃源岩周缘颗粒粒径相对较粗、物性(孔、渗等)相对较好的常规砂岩或碳酸盐岩类储层,忽略了颗粒粒径相对较细、物性相对较差的硅质岩或泥质岩类储层。近年来随着全球常规油气资源份额的逐渐减少,一些储集非常规油气(煤层气,页岩油与页岩气,致密油与致密气)资源、颗粒粒径相对较细、物性相对较差的致密岩或有机岩类储层日渐成为当今勘探开发研究工作的热点领域。许多学者便于区别,将以往研究的常规储层岩类称为粗粒沉积岩,将现今关注的颗粒粒径小于1/16 mm的硅质岩、泥页岩、黏土岩以及煤岩等非常规储层岩类称为细粒沉积岩,从而极大地丰富了沉积岩石学研究领域,拓展了储层研究范畴,发展了传统沉积学与储层地质学。

包括泥岩、页岩在内的细粒沉积学研究工作可以追溯至上世纪四十年代^[3],初期主要注重宏观环境与岩相学研究,如海底水道与海底扇^[4-5]、浊流与浊积岩^[6]、潮汐流与潮汐岩^[7]、淡水湖泊^[8]与盐湖^[9]环

境中泥质岩类沉积、海洋环境中风尘沉积^[10]等;至上世纪七十一八十年代逐渐拓展至沉积岩石学^[11-12]与沉积建模方面研究,创建了包括深海悬浮沉积^[13]、浊流与等深流沉积^[14]、潮汐流沉积^[15]等在内的多种模式,探讨了陆上湖泊环境中细粒岩沉积成因^[16],进行了细粒沉积实验^[17]与模拟^[18-20]研究,分析了细粒岩沉积机理^[21],注意到了富有机质岩细粒沉积建模研究^[22];至九十年代逐渐关注到细粒岩沉积微观构造^[23]与控制因素方面研究^[24]。本世纪以来随着非常规油气工业的快速发展,富有机质页岩沉积建模与机理研究备受关注^[25],目前已建立有多种类型模式,主要包括有上升流模式^[22]、大洋缺氧事件模式^[22,26-27]、远洋悬浮沉积模式^[28-29]、黑海模式^[30]、陆缘斜坡—海盆模式^[25]、浅水陆棚模式^[31-32]、周缘前陆盆地沉积模式^[33]以及内陆湖盆沉积模式^[34-35]等,认为富有机质页岩沉积与发育需要满足三方面条件,即:①大量的有机物质供给;②快速的沉积速率;③贫氧或缺氧的水体环境。从有机物富集、淀积与保存三方面限定了沉积环境。

有关扬子陆块下古生界页岩发育与分布特征研

^①国家重大科技专项(编号:2015ZX05068)、中国石油天然气集团公司重大科技项目(编号:2012F-47-02)与中国石油天然气股份公司科技项目(编号:2012B-0504)基金联合资助

收稿日期:2014-02-24;收修改稿日期:2014-04-25

究由来已久^[36-41],近年来受南方页岩气勘探开发选区与先导试验区建设等方面工作影响,下古生界富有机质页岩发育与分布规律研究成为大家关注的热门话题^[42-43];但针对其沉积机理及控制因素研究较少、且争论颇多,目前已提出的沉积学成因模式有上升流模式^[44-45]、大洋缺氧事件模式^[2,38,46]、滞流海盆模式^[47]或称黑海滞流盆地模式^[48]、上升洋流与缺氧事件复合模式^[49]、深水陆棚—底栖藻席模式^[48]以及边缘海盆与斜坡模式^[50]等多种类型,笔者结合近年来在这一地区开展的野外地质调查成果与资料仅想在这方面做一初步分析与探讨。

1 富有机质页岩发育特征

扬子陆块下古生界主要发育有下寒武统牛蹄塘组与上奥陶统一志留统五峰—龙马溪组两套富有机质页岩,其中下寒武统牛蹄塘组(或称筇竹寺组)富有机质页岩主要为深灰—黑色页岩、碳质页岩、硅质页岩、粉砂质页岩和粉砂岩组合,有机碳(TOC)含量一般1%~4%;底段发育碳质页岩与硅质岩互层、TOC含量值达2%~11%,中上段过渡为页岩、粉砂质页岩夹薄层灰岩、粉砂岩,中段底部夹有多层1~20 cm厚的薄层斑脱岩(浅灰—灰白色黏土质火山灰沉积层),页岩单层厚0.5~40 m,累计厚度50~100 m,最厚可超过200 m。笔者观察到贵州三都剖面本套页岩自下而上颜色逐渐变浅,砂质灰质含量依次增加,硅质减少、有机质含量渐次降低;层理构造由底部薄层块状泥岩与硅质岩互层过渡至下段上部厚层块状泥页岩、炭质泥岩,过渡至中段页理发育的泥页岩夹薄层砂岩、至上段砂质页岩与薄层灰岩互层;沉积环境呈现由深海盆地向半深水陆棚斜坡、向浅水陆棚、台地环境过渡特征(图1)。地层中放射性元素含量显示页岩下段U+K+Th元素总含量偏高、达70~100 ppm,中上段偏低、仅15~45 ppm(图1)。据前人成果分析本套页岩生物群以底栖海绵类为主,包含刺胞、节肢、软体等动物以及宏体藻类等生物门类^[51];底部夹含斑脱岩层测试的U-Pb年龄对应沉积时间早于518±5 Ma^[52],晚于556±5 Ma^[49],处在556±5 Ma~518±5 Ma之间,与全球寒武纪地层发育时代542 Ma基本一致。

上奥陶统一志留统五峰—龙马溪组富有机质页岩为一套深灰—黑色笔石页岩、碳质页岩、硅质页岩、粉砂质页岩夹泥质粉砂岩组合,有机碳含量(TOC)一般1%~2%;底段富有机质页岩发育、炭质

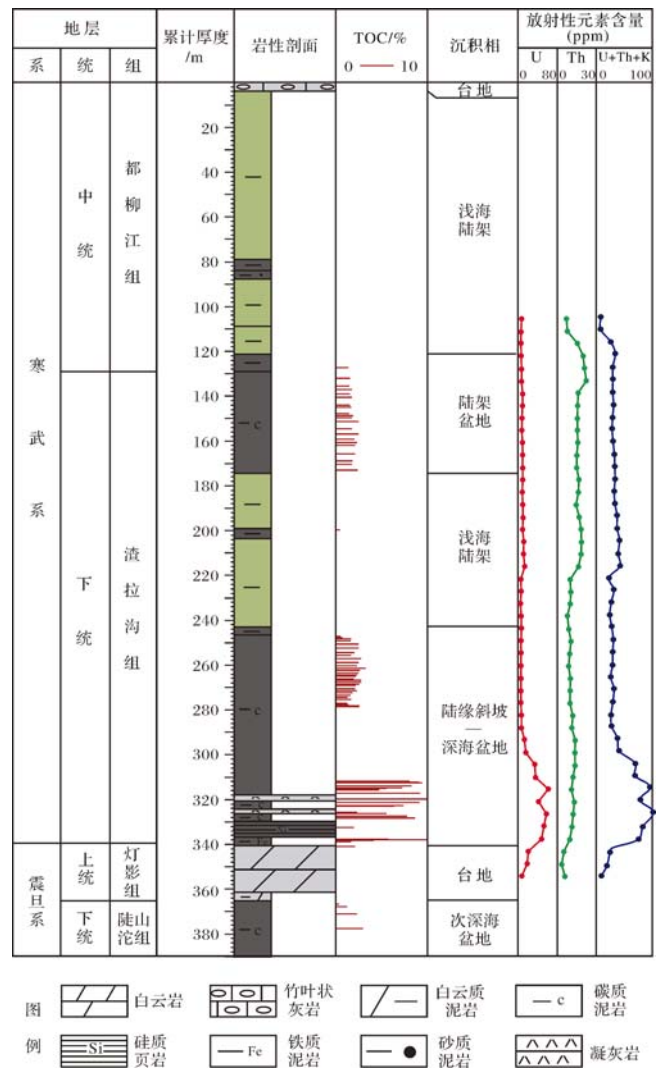


图1 贵州省三都县渣拉沟剖面下寒武统渣拉沟组页岩沉积相剖面图

图中U+K+Th元素含量为笔者2013年9月下旬自带的伽马射线谱仪(型号GS-512)沿剖面现场采集数据。

Fig.1 Column showing Lower Cambrian Zhilagou Group shale sedimentary facies in Zhilagou section, Sandu county of Guizhou province

含量高,TOC含量达2%~5%,中、上段页岩夹有薄层灰岩、粉砂岩,单层厚1~10 m,累计厚度20~40 m,最厚可逾100 m;下段夹有20~70余层斑脱岩层(蛋青—灰白色黏土质火山凝灰岩)^[37,39],单层厚1~2 cm、个别层段厚度可达30 cm。昭104井本套页岩自下而上颜色逐渐变浅、砂质灰质含量增加、有机质含量降低;底部五峰组页岩夹有多层1~2 cm厚的薄层斑脱岩(图2中照片),含有大量黄铁矿晶粒(图2中照片),发育有硅质放射虫,页理不发育、呈块状;向上至龙马溪组底部层理、页理逐渐清晰,向上至中上部又呈厚层块状、层理不发育。本套页岩中下部笔石

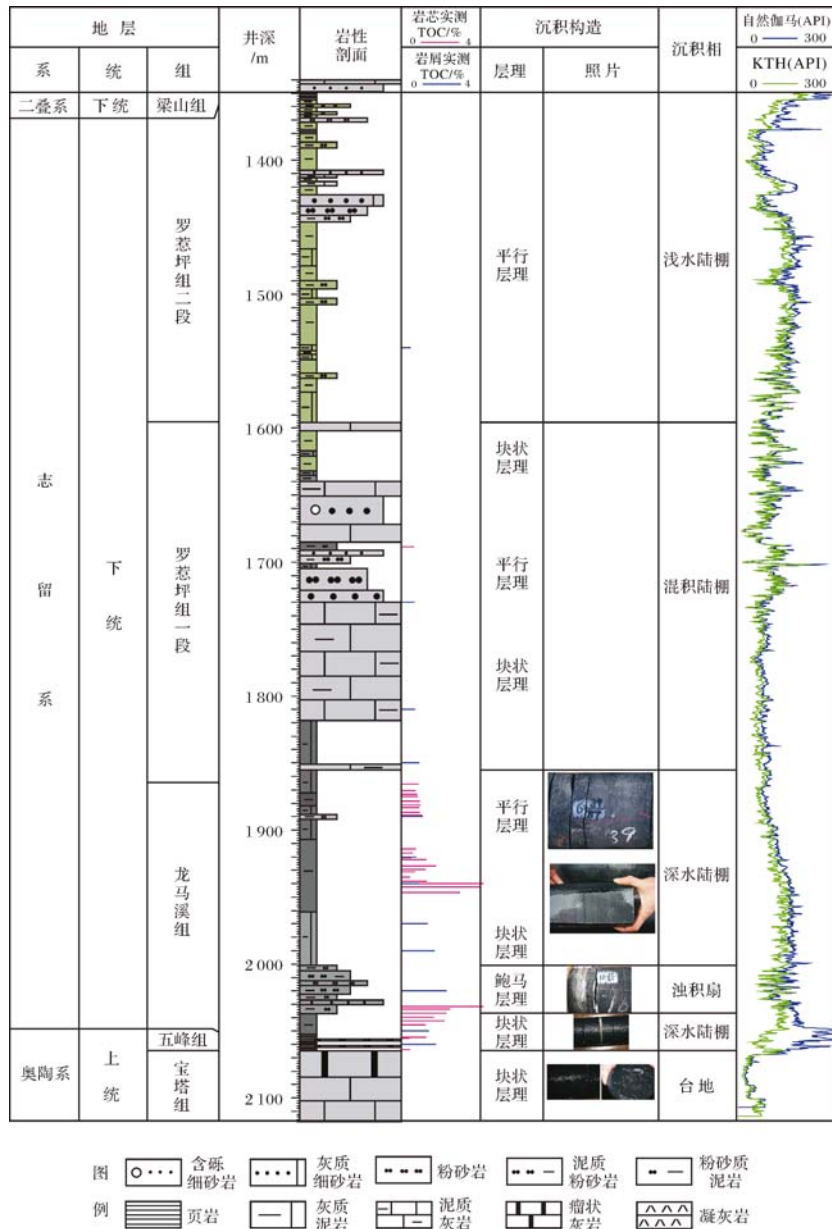


图 2 四川省筠连县昭 104 井上奥陶—下志留统页岩沉积相地层剖面图

Fig.2 Zhao104 Well Wufeng-Longmaxi Group shale sedimentary facies of Upper Ordovician-Lower Silurian in Junlian county, Sichuan province

丰富,可富集成黑色笔石页岩;放射性元素特征与牛蹄塘组类似,中下段 U+K+Th 元素含量明显偏高、曲线值达 200~300 API,上段含量降低、曲线值处在 150 API 以下(图 2)。

2 富有机质页岩分布特征

2.1 牛蹄塘组富有机质页岩分布特征

扬子陆块下古生界牛蹄塘组页岩以碳质页岩最为发育、分布范围最广,主要富集于陆块东南及北缘

山前;陆块西缘隆起区页岩不发育、较薄,总体相变为粉—细砂岩夹泥页岩(图 3,4)^[53]。平面上以陆块东南部浙西皖南、赣北鄂南、湘鄂西、黔东南、滇黔北、川南渝东地区以及陆块北缘苏北、鄂北、川北渝北地区页岩相对较厚,以江南隆起北缘及秦岭—大别—苏鲁造山带南缘邻近区域富有机质页岩累计厚度最大、达 40~100 m 以上,陆块中部相对较薄、一般累计厚度小于 60 m,整体呈现“南北厚、中间薄”总趋势。本套页岩有机碳含量特征总体类似,以陆块南、北山前富

有机质页岩发育区 TOC 值最高、一般 $\geq 2\%$ ；中部富有机质页岩发育区 TOC 值相对较低、一般 $1\% \sim 3\%$ (图 5)。

据近年来国土资源部、中石油、中石化、中海油以及相关省区单位在扬子陆块开展的大量页岩气调查与先导试验区钻采工作证实,牛蹄塘组富有机质页岩在陆块西南及东南部大体形成以川南珙县—滇北镇雄、黔东凯里—湘西张家界—湘北常德、浙西常山—皖南宁国为中心的三大富集区(图 5)^[42-43,54-57],三大区中心轴线总体构成与扬子陆块西南及东南边界相平行,自西向东呈现北北西、北东至北东东向延展的沉积与富集中心。其中,以西区中心勘探程度最高、列首位,已建有中石油滇黔北昭通和川南威远、长宁三大页岩气先导试验区与富顺—永川页岩气中外合作开发区,钻揭本套页岩的直探深井 8 口、水平井 3 口、各类资料浅井 6 口,初步查明区内牛蹄塘组页岩发育、厚约 200 m (YQ2 井)~520 m (昭 101 井),有机质页岩富集段 (TOC 均值大于 2%) 累计厚度接近或超过 200 m 的直探深井 4 口 (YQ2 井 198.6 m、威 201 井 208.2 m、昭 103 井 206 m、昭 101 井 319 m)、处在 100~200 m 间的直探深井 4 口 (威 5、宁 206、宝 1、阳 1 井);目前该中心有 2 口直探深井经试采后已获得了日产过万方的产能 (威 201 井 $1.35 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 、威 5 井 $2.46 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$),已初见页岩气工业气流。

陆块南缘牛蹄塘组富有机质页岩中区中心勘探

程度相对较低、位列第二,目前仅国土资源部与中石化在黔东南及黔东北优选有岑巩、松涛、黄平 3 个重点区,共钻直探深井 4 口 (岑页 1 井、松页 1 井、黄页 1 井、麻页 1 井)、千米浅井 3 口 (龙山 1 井、龙山 2 井、常德 1 井),初步摸清该区牛蹄塘组页岩发育、中心区页岩厚 250~280 m,有机质页岩富集段 (TOC 均值大于 2%) 累计厚度在 100 m 以上 (图 5);中心区西南端页岩渐减薄为 90 m (岑页 1 井)~190 m (松页 1 井),有机质页岩富集段累计厚度减至 53 m (岑页 1 井)~84 m (黄页 1 井),区内有一口井 (黄页 1 井)经初试采后获得了 $418 \text{ m}^3/\text{d}$ 的低产气流。

陆块南缘牛蹄塘组富有机质页岩东区中心勘探程度最低、位列第三,当前仅中石化华东局在皖南宣城一带实施了 1 口直探深井 (宣页 1 井),初步了解到该中心发育有奥陶系宁国组、印渚埠组及寒武系大陈岭及荷塘组四套页岩,其中与牛蹄塘组相当的荷塘组页岩具有有机质丰度高 (TOC 均值 $\geq 3.0\%$)、累计厚度大的特点 (269.8 m 未穿),表明下扬子区牛蹄塘组页岩沉积与富集中心值得重视,但遗憾的是宣页 1 井试气未果。

此外,陆块北缘牛蹄塘组页岩仅川北南江桥亭一带钻有一口资料浅井 (页浅 1 井) 钻揭,初步了解到秦岭造山带山前牛蹄塘组富有机质页岩 (TOC 均值大于 2%) 同样发育、较厚,累计厚度超过 146.24 m (页浅 1 井未穿),可能是陆块北缘西部最值得重视

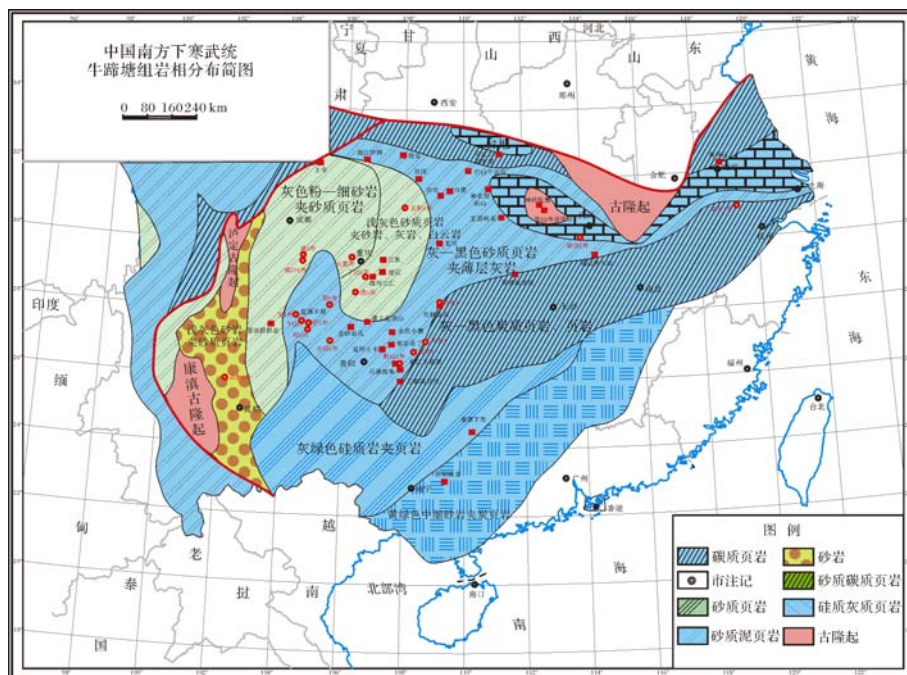


图 3 中国南方下寒武统牛蹄塘组岩相分布简图

Fig.3 The Lower Cambrian Niutitang Formation. lithofacies distribution sketch map in South China

部地区砂质页岩最为发育,分布最稳定,累计厚度300~600 m,向扬子陆块南、北缘山前逐渐相变为三角洲相砂砾岩夹泥页岩(图6);其中四川盆地内部一般累计厚度100~500 m,东南局部达700 m以上,TOC含量0.5%~1%、局部达2%以上,TOC含量达

2.0%以上的富有机质页岩以中—上扬子区东南及下扬子区中北部最为发育、厚度最大,累计厚度分别20~40 m及0~40 m(图8);总体呈现自上扬子川南向下扬子苏北地区页岩地层厚度逐渐增大、有机质页岩富集段累计厚度逐渐减薄的总趋势(图7,8)。

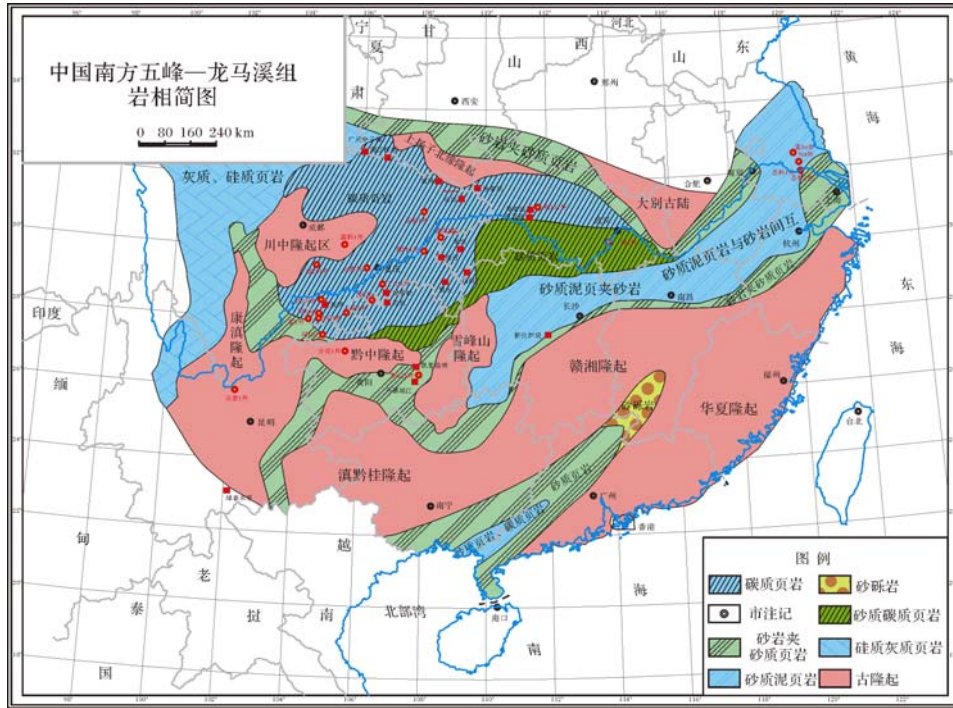


图6 中国南方五峰—龙马溪组岩相分布简图

Fig.6 Lithofacies distribution map of Wufeng-Longmaxi Formation in South China

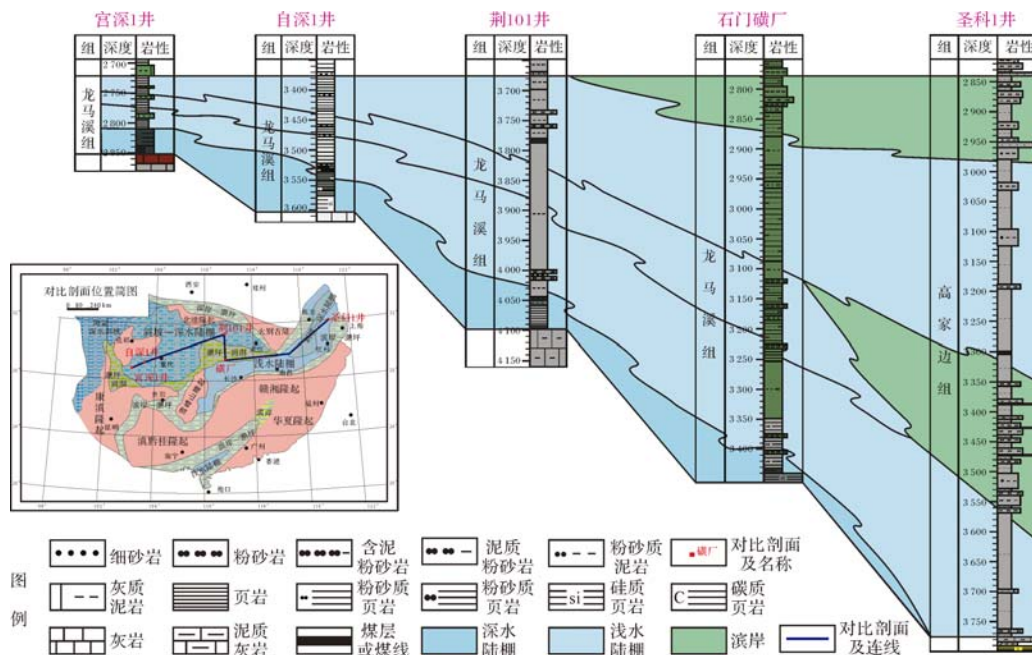


图7 扬子陆块下古生界下志留统龙马溪组富有机质页岩对比图

Fig.7 The comparison chart of organic rich shale of the Lower Silurian Longmaxi Formation in the Yangtze Continental Block

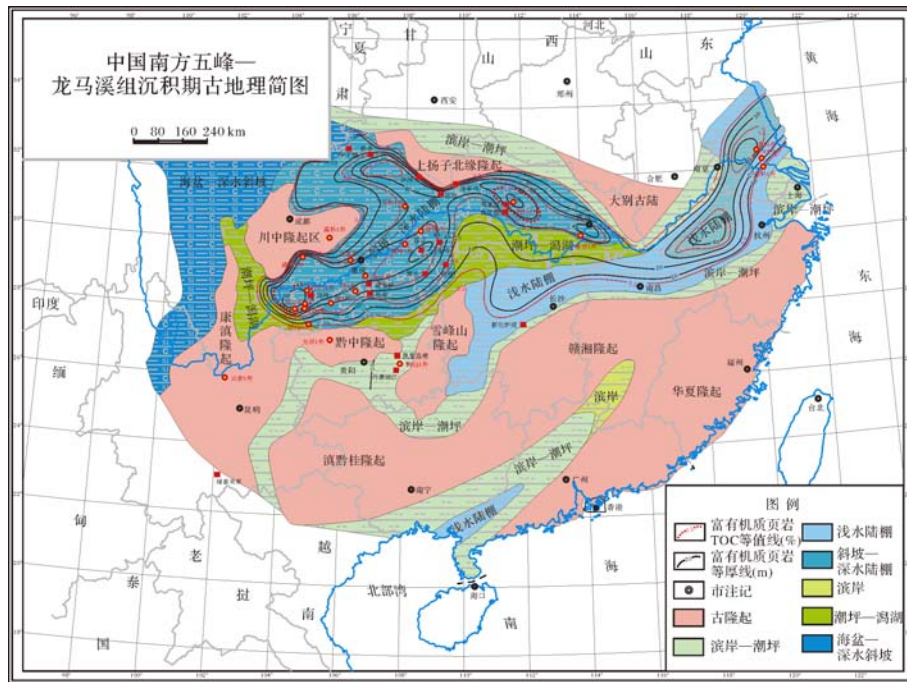


图 8 中国南方五峰—龙马溪组沉积期古地理简图

Fig.8 Depositional palaeogeographic map of Wufeng-Longmaxi Formation in South China

据近期页岩气勘探实践证实,五峰—龙马溪组页岩在扬子陆块中南部主要发育有川南珙县—渝东涪陵—鄂西利川、浙西常山—皖南宁国两大沉积与富集中心(图 8),北缘主要发育有川北南江—城口、鄂北南漳—荆门、苏北扬州—盐城三大沉积与富集中心(图 8)。其中,以川南珙县—渝东涪陵—鄂西利川中心勘探程度最高、位列五区之首,以中石化渝东涪陵页岩气先导试验区开发效果最好,区内共有 10 余口直探深井钻揭本套页岩层系,据焦页 1 井区 4 口深井资料统计,本套页岩地层厚 83~101 m、TOC>2.0%的有机质页岩富集段累计厚度 35~45 m^[58],中心区富有机质页岩最厚达 115 m(石柱漆辽剖面);总体与中石化建南(建深 1 井页岩厚 119 m、富有机质页岩厚 40 m±)、中石油长宁(宁 201 井页岩厚 234 m、富有机质页岩厚 46 m)及昭通试验区(昭 104 井页岩厚 210 m、富有机质页岩厚 38 m)连成一体,形成一自北东向南西延伸、大体与扬子陆块东南边缘江南—雪峰造山带相平行的富有机质页岩沉积与富集中心,目前该中心三大页岩气先导试验区与富顺—永川页岩气中外合作开发区已有 15 口以上直井经试采获得了日产万方以上的工业气流、有 20 口以上水平井获得了日产 10×10⁴m³ 以上产能,现已初步建成南方页岩气开发先导试验区。

陆块北缘中部鄂北南漳—荆门五峰—龙马溪组页岩沉积与富集中心区因勘探程度相对较低、位列第二,目前仅有 1 口直探深井(荆 101 井)钻揭,初步了解到中心区页岩累计厚度 407 m、底部有机质页岩富集中段(TOC 均值 3.0%以上)累计厚度达 52 m,是陆块北缘本套富有机质页岩最值得重视的沉积与富集中心区。

此外,陆块南缘东部五峰—龙马溪组页岩浙西常山—皖南宁国沉积与富集中心、北缘西部川北南江—城口沉积与富集中心及东部苏北扬州—盐城沉积与富集中心仅进行过浅井钻探与陆相找油兼探工作。其中浙西常山—皖南宁国区仅中海油有 5 口千米浅井钻揭,初步了解到该中心可能发育有一呈北东至南西向延展的钱塘坳陷页岩沉积与富集中心,累计厚度 50~200 m。川北南江—城口区仅南江桥亭有 1 口浅井钻揭本套页岩地层,累计厚度 62.37 m(页浅 2 井)~100 m(城口双河剖面)、有机质页岩富集段(TOC 均值 2.0%以上)累计厚 15 m(页浅 2 井)~65 m(巫溪田坝剖面),总体呈现一北西西至南东向延伸、大体与秦岭造山带相平行的大型川北坳陷型页岩沉积与富集中心。苏北扬州—盐城地区仅苏北油田在以往陆相盆地油气勘探过程中有 4 口井(真 86、N4、沈 1 圣科 1)钻揭本套页岩地层,泥页岩累计厚度达

453 m(沈 1 井)~1 347.4 m(N4 井)、底部有机质页岩(TOC 均值 1.0%以上)富集段累计厚度 0 m(圣科 1 井)~40 m(真 86 井),表明陆块北缘沿苏鲁造山带发育、呈北东—南西向延展的南京拗陷可能相对较窄,是造山带前缘页岩沉积与沉降中心,而非非扬子北缘重要的五峰—龙马溪组页岩富集中心。

3 富有机质页岩沉积环境分析

据扬子陆块下古生界牛蹄塘组及五峰—龙马溪组页岩在上述沉积与富集中心发育、分布特征,大体将扬子陆块页岩划分为 9 种类型,即硅质页岩、含粉砂碳质页岩、含钙质含粉砂页岩、含粉砂灰质页岩、粉砂质灰质页岩、碳质页岩、含粉砂页岩、粉砂质页岩、灰质页岩。结合两套页岩表现出黏土质含量低、碳酸盐含量少,石英长石含量丰富特点;以及牛蹄塘组页岩较五峰—龙马溪组页岩碳酸盐岩含量少、石英长石含量高的特征,经综合分析认为两者沉积背景不同、沉积环境存在明显差异,但总体具有与北美 Barnett 页岩矿物组成特征类似(图 9)。

3.1 牛蹄塘组沉积环境分析

平面上牛蹄塘组页岩在扬子陆块西区不发育,主体相变为一套灰黑—灰色粉砂岩、砂质页岩夹细砂岩的浅色碎屑岩系,邻近隆起区相变为滨岸砂岩相(图 3,5)^[53];陆块西南(黔北过渡区)页岩砂质含量相对较高、达到 10%~25%,上部薄层粉砂岩夹层或透镜体中见有丰富的斜层理构造,表现出过渡区牛蹄塘组页岩沉积环境应有的水动力条件^[51];本组地层中下部砂质页岩中水平层理发育(如金沙岩剖面灰黑色含粉砂泥页岩中水平层理清晰,图版 I-a),含分散状和纹层状霉粒黄铁矿^[59],页岩 TOC 含量一般 1.16%~2.83%,总体显现浅水陆棚相沉积环境特征。向扬子陆块东南(江南—雪峰西缘)一带,本组页岩厚度逐渐增大,颜色变深、以黑色为主,并夹有灰岩透镜体或灰岩薄层发育,砂质含量逐渐降低,水平层理依然发育,常见磷铁矿结核及黄铁矿晶体顺层分布(如贵州翁安县朵丁关剖面本组地层页岩段,图版 I-b),黑色页岩中普遍产有以底栖动物海绵类为主的牛蹄塘生物群^[51];页岩 TOC 含量增高至 2.0%~11%(集中于 4%~8%),局部有机质富集形成石煤层^[60],显现为深水陆棚相沉积环境。再向陆块东南缘(江南—雪峰造山沿线带),牛蹄塘组页岩厚度开始减薄、单层厚度降至 8~35 cm,发育块状层理与水平纹层理,颜色进一步变深,并与硅质岩呈不等厚互层或

夹层(如三都渣拉沟、麻江羊跳寨等剖面本组底部硅质岩发育段,图版 I-c),砂质含量进一步降低,页岩 TOC 含量也随之降至 1.72%~5.79%,页岩和硅质岩中生物结构石英常见,主要为海绵骨针和放射虫,同时见有大量磷、钒、镍、钼、锰等结核(图版 I-b),总体表现为半深海斜坡至海盆沉积环境^[61]。至扬子陆块东南边界(江绍—十万大山大断裂)沿线牛蹄塘组页岩逐渐消失、岩性相变为块状砂岩,如广西大瑶山地区金秀县烂木场至宾阳县镇龙山一带牛蹄塘组已完全相变为深水盆地相块状浊积细砂岩,偶夹薄层水平纹层状炭质页岩及砂质页岩(图版 I-d,e)。

本套地层“牛蹄塘生物群”在生态地理上显现出由扬子区向江南区逐渐过渡的带状分布特征,水体环境总体显现由上扬子西缘滨岸浅海向东南斜坡及深海盆地区逐渐过渡、逐渐变深的趋势,总体呈现陆缘海盆—斜坡环境(图 10)。

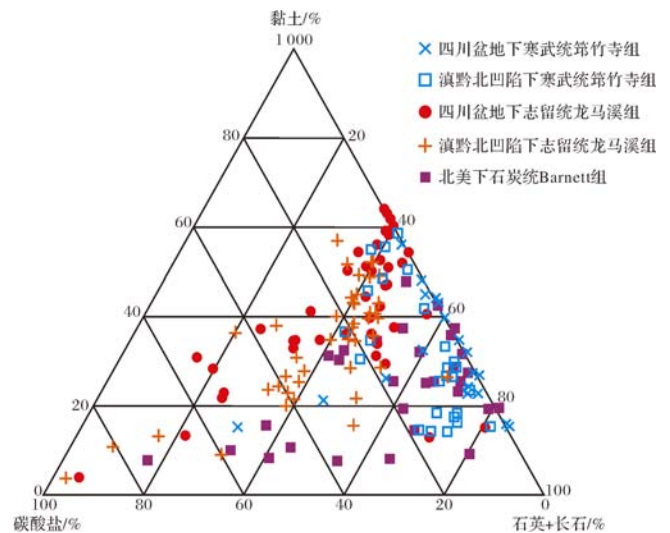


图 9 扬子陆块下古生界富有机质页岩矿物含量三角图
Fig.9 The mineral content triangular diagram of Lower Paleozoic organic rich shale in the Yangtze Continental Block

此外,据本套地层页岩含有物分析,富有机质碳质页岩、硅质岩中主要微量元素明显富集 V、Cu、Zn、Zr、Nb、Mo、Ba 等微量元素,向上呈现出逐渐递减趋势^[49],表明牛蹄塘组页岩源区可能有火山喷发事件及海平面升降,沉积环境与热液活动关系密切,总体处在被动伸展的大陆边缘环境,与全球 Rodinia 超级大陆裂解基本同期。依陆块东南湘鄂西、黔东南地区牛蹄塘组页岩中富含的物质来源^[62-63]及其中夹有的斑脱岩成分分析,本组页岩底段发育的凝灰岩(含硫化物等)可能是火山活动阶段喷气作用的产物,富集

的多种元素可能与页岩地层中生物与有机质对一些元素具有吸收与络合作用有关,是海底热液作用导致海底缺氧的结果^[64-65],地层中特征含有物(磷、石煤层、重晶石)以及有机碳高碳同位素组成分层结构特征($\delta^{13}C$ 值从-27‰降至-34‰)明显支持了寒武纪初期扬子陆块总体处于陆缘拉张与洋流上升的被动大陆边缘沉积环境^[66],并兼有限流缺氧环境的一些特征^[44]。

综合区域岩性岩相、生物与水体分区带特点以及页岩含有物分层分异变化特征,笔者总体支持牛蹄塘组页岩为被动陆缘洋流上升与缺氧事件复合模式^[49](图 11a)。

3.2 五峰—龙马溪组沉积环境分析

平面上(图 6,8)五峰—龙马溪组页岩在上扬子西区(邻近川中、汉中古隆起区)主要发育砂质或灰质页岩,颜色相对较浅,为灰绿—灰色浅色碎屑岩系,如四川长宁县双河剖面见及的灰—灰黑色砂质页岩、贵州桐梓县松坎剖面见及的灰绿—灰色灰质及砂质页岩,常见页岩夹有薄层生屑灰岩或粉砂岩,页理不甚发育,砂质或灰质含量较高(图版 I -e),页岩 TOC 含量相对较低、一般<2%,总体呈现浅水陆棚沉积环

境。往中上扬子区东南(江南—雪峰西缘区),本套地层相变为炭质页岩与泥岩,在湖南张家界一带笔石页岩厚达数百米、水平层理发育,单个纹层厚度一般仅 1~2 mm 左右;在湖北荆门一带(荆 101 井)龙马溪组页岩页理清晰,泥岩发育块状层理,常见顺层发育的黄铁矿层(图版 I -f);本区本套地层颜色总体较深、为灰黑—黑色笔石页岩,页岩砂质含量较低,TOC 含量较高、为 2%~5%,总体显现为深水陆棚相沉积环境。至中上扬子区东南边缘(江南—雪峰东缘区),本套地层逐渐相变为厚层块状细砂岩、粉砂岩夹薄层砂质页岩及炭质页岩(如湘中周家溪群),沉积环境过渡为造山带前渊深水浊积盆地^[50]。往北至中上扬子区北缘(秦岭—大别造山带前缘),因本套地层层序发育齐全^[2],且发育炭质页岩及硅质页岩,常见星点状黄铁矿颗粒、块状层理与水平层理以及硅质放射虫与海绵骨针等^[68],总体表现出深水陆棚斜坡—盆地沉积环境^[2]。中下扬子区(苏浙皖赣)因五峰—龙马溪组整体相变为薄层黄绿—灰绿色砂质泥页岩与粉砂岩岩相(图 6),且夹有多层斑脱岩,见水平层理与水平波状层理发育,总体显现山前前渊深水陆棚相沉积环境^[2,50]。

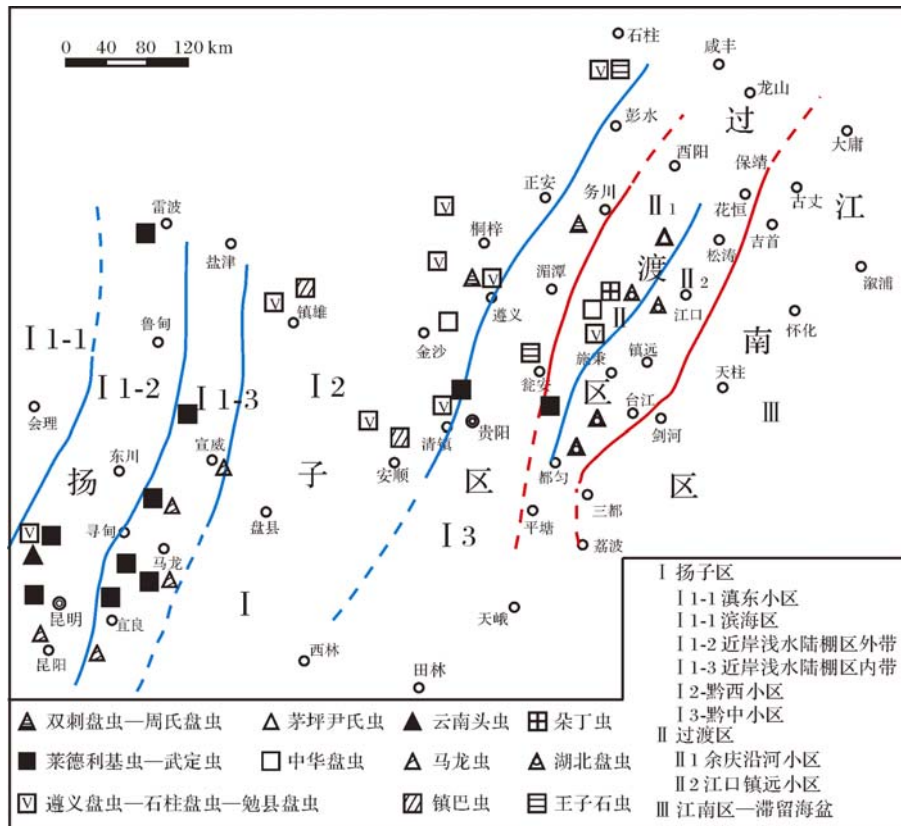


图 10 扬子陆块早寒武世牛蹄塘期生物地理分布图^[67]

Fig.10 The Early Cambrian Niutitang period bio-geographical distribution map in Yangtze Continental Block (Chen Xu, et al., 2012)

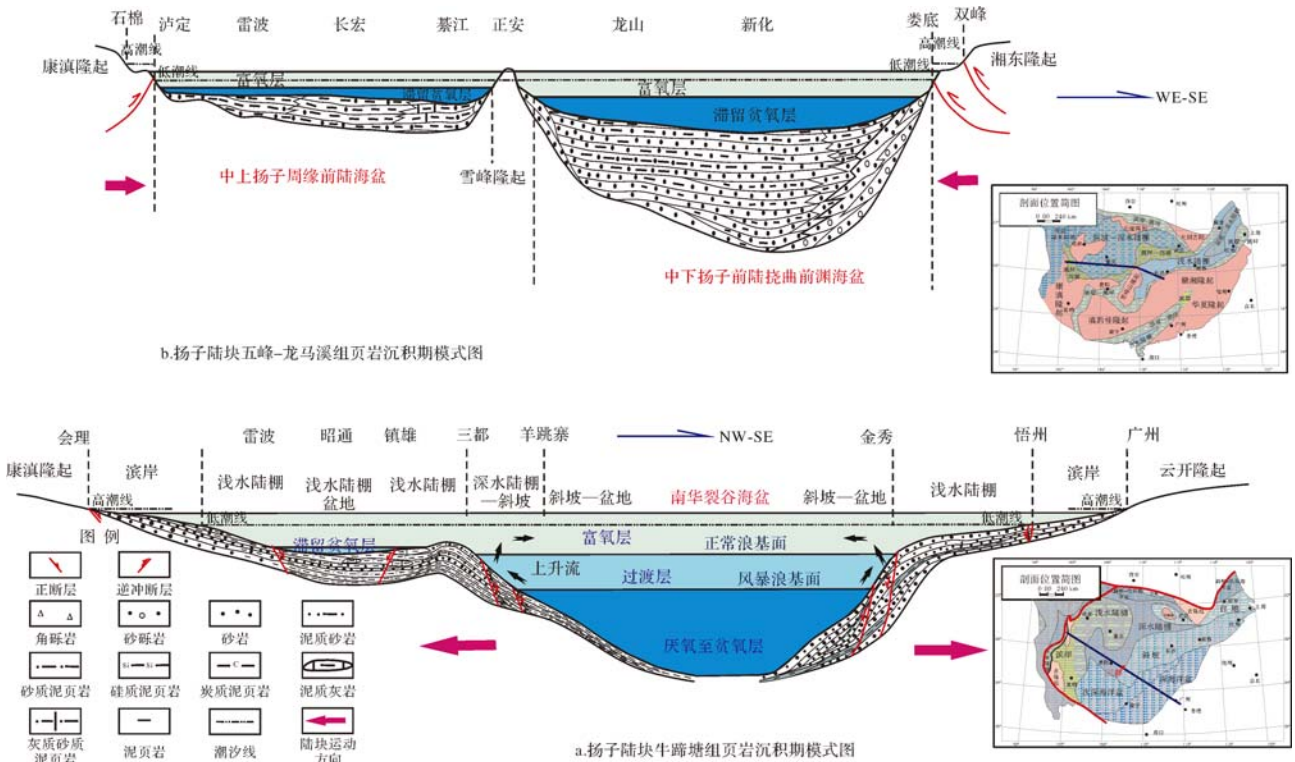


图 11 扬子陆块早古生代富有机质页岩沉积模式图

Fig.11 Sedimentary model of Early Paleozoic organic rich shale in Yangtze Continental Block

纵观扬子陆块五峰—龙马溪组地层综合对比分析(图 7),发现本套地层岩性呈现由下至上砂质含量、灰质逐渐增加,有机质含量逐渐降低的变化特点,同时显现明显的分层分异变化特征,表明其沉积环境经历了由深水陆棚相向浅水陆棚相逐渐过渡、演化的历程。

结合志留系兰多维列统生物群分区分布图分析,扬子区生物生态按地理划分为上扬子、下扬子与湘桂三大区^[69],具有明显的分区分布特征。

此外,依据本组硅质岩及页岩分析,下扬子区五峰组硅质岩呈现 Ba、Ti、P 等微量元素相对富集,Sr 和 Ca 元素含量相对亏损;地层上部出现 Cr、V 元素含量增加,Mg、Ca、Mn、SiO₂ 含量等减少;硅质沉积呈现随水深增加、氧同位素值增加,水温环境出现逐渐降低趋势^[37]。中下扬子区东南缘五峰—龙马溪组页岩同样表现出微量元素富集程度与沉积环境的密切相关,呈现出 V、Ni、Cu、Zn、Ba、Hf、Ta、Tl 和 U 等微量元素明显富集,Li、Sc、Co、Ga、Rb 和 Sr 等相对亏损,总体表现出区域性缺氧的还原环境;其上覆观音桥组则相反,除 Sr 元素相对富集外,其它微量元素多亏损,表现出氧化环境^[70],总体表现出了由还原至

氧化的沉积环境变化,体现出与牛蹄塘组页岩不一样的沉积背景与环境。经结合五峰组和龙马溪组页岩体现出的由扬子陆块南东向北西逐渐迁移变新的“爬坡”现象以及两组地层往往富集 As、Ag、Cd、Co、Cr、Cu、Mo、Ni、U、V 和 Zn 等微量元素,观音桥组相对亏损的特点分析,认为五峰—龙马溪组页岩沉积早期可能总体处于相对缺氧的深水陆棚与欠补偿闭塞海湾沉积环境,晚期逐渐过渡为浅水陆棚的弱还原至弱氧化闭塞海湾沉积环境,闭塞海湾沉积区实为扬子陆块加里东造山期周缘造山带所围限的周缘前陆盆地^[2,39,47,50,69]。

综合五峰—龙马溪组页岩上述区域岩性岩相、生物与水体分区特征以及页岩组成与含有物分层分异变化特征,笔者认为本套地层发育应归结于浅水陆棚—闭塞海湾复合沉积模式(图 8、图 11b)。

4 结论

(1) 牛蹄塘组富有机质页岩主要发育于地层底段,具有颜色深,有机碳、硅质含量高特点;平面上以碳质页岩分布范围最广,主要展布于扬子区东南缘及北缘,以陆块周缘造山带前缘累计厚度最大,总体

呈现“南厚北薄”趋势。上奥陶统五峰组及下志留统龙马溪组富有机质页岩亦发育于地层底段,富含丰富笔石,具有有机碳、砂质或灰质含量高特点;平面上以砂质页岩分布范围最广,主要展布于中上扬子区东南缘。

(2) 牛蹄塘组与五峰—龙马溪组页岩大体可划分为9种类型,总体表现出黏土质含量低、碳酸盐含量少,石英长石含量丰富特点;其中牛蹄塘页岩较五峰—龙马溪页岩碳酸盐含量少,石英长石含量更丰富,表明两者沉积背景不同、沉积环境有差异。

(3) 综合岩性岩相与生物生态特征,发现牛蹄塘组岩相古地理环境呈北东向带状展布、水深呈现由扬子西缘向东南缘逐渐变深的总趋势,结合岩性及其含有物纵向分层分异变化特征分析,认为牛蹄塘组富有机质页岩发育于被动陆缘深水陆棚—斜坡环境,可能缘于上升洋流与缺氧事件复合模式。综合五峰—龙马溪组页岩呈现出的岩性岩相与生物地理分区特征,以及地层岩性与含有物显示出的有弱还原至弱氧化沉积环境演化特点,认为五峰—龙马溪组页岩发育于周缘前陆造山沉积环境,可能缘于浅水陆棚—闭塞滞留海湾复合沉积模式。

致谢 文中使用了中石油、中石化等相关单位及个人的大量成果与实际资料在此深表感谢,对两位审稿人在审稿过程中提出的宝贵意见表示衷心谢意。

参考文献 (References)

- 余达淦,管太阳,黄国夫. 华南(东)晋宁—加里东海盆地形成、演化及封闭[J]. 华东地质学院学报, 1993, 16(4): 301-319. [Yu Dagan, Guan Taiyang, Huang Guofu. The formation, evolution and closure of Jinning-Caledonian Sea Basin in the East of Huanan[J]. Journal of East China Geological Institute, 1993, 16(4): 301-319.]
- 苏文博,李志明,Ettensohn F R,等. 华南五峰组—龙马溪组黑色岩系时空展布的主控因素及其启示[J]. 地球科学, 2007, 32(6): 819-827. [Su Wenbo, Li Zhiming, Ettensohn F R, et al. Distribution of black shale in the Wufeng-Longmaxi Formations (Ordovician-Silurian), South China: Major controlling factors and implications[J]. Earth Science, 2007, 32(6): 819-827.]
- Dapples E C, Rominger J F. Orientation analysis of fine-grained clastic sediments; a report of progress[J]. The Journal of Geology, 1945, 53(4): 246-261.
- Dill R F, Dietz R S, Stewart H. Deep-sea channels and delta of the Monterey submarine canyon[J]. Geological Society of America Bulletin, 1954, 65(2): 191-194.
- Sullwold H H Jr. Tarzana fan, deep submarine fan of late Miocene age Los Angeles County, California[J]. AAPG Bulletin, 1960, 44(4): 433-457.
- Kuenen P H. Properties of turbidity currents of high density[J]. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 1951, (2): 14-33.
- van Straaten L M J U, Kuenen P H. Tidal action as a cause of clay accumulation[J]. Journal of Sedimentary Research, 1958, 28(4): 406-413.
- Webb J B. Geological history of plains of western Canada[J]. AAPG Bulletin, 1951, 35(11): 2291-2315.
- Dellwig L F. Origin of the salina salt of Michigan[J]. Journal of Sedimentary Research, 1955, 25(2): 83-110.
- Radczewski O E. Eolian deposits in marine sediments: Part 6. Special features of sediments[J]. AAPG Special Volumes, 1939, 142: 496-502.
- Picard M D. Classification of fine-grained sedimentary rocks [J]. Journal of Sedimentary Research, 1971, 41(1): 179-195.
- Lundegard P D, Samuels N D. Field classification of fine-grained sedimentary rocks[J]. Journal of Sedimentary Research, 1980, 50(3): 781-786.
- Schubel J R, Kana T W. Agglomeration of fine-grained suspended sediment in Northern Chesapeake Bay[J]. Powder Technology, 1972, 6(1): 9-16.
- Stow D A V, Piper D J W. Deep-water fine-grained sediments: facies models[J]. Geological Society, London, Special Publications, 1984, 15: 611-646.
- McCave I N. Deposition of fine-grained suspended sediment from tidal currents[J]. Journal of Geophysical Research, 1970, 75(21): 4151-4159.
- Lick W. Entrainment, deposition, and transport of fine-grained sediments in lakes[J]. Sediment/Freshwater Interaction: Developments in Hydrobiology, 1982, 9: 31-40.
- Kranck K. Experiments on the significance of flocculation in the settling of fine-grained sediment in still water[J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 1980, 17(11): 1517-1526.
- McCave I N, Swift S A. A physical model for the rate of deposition of fine-grained sediments in the deep sea[J]. Geological Society of America Bulletin, 1976, 87(4): 541-546.
- Stow D A V, Bowen A J. A physical model for the transport and sorting of fine-grained sediment by turbidity currents[J]. Sedimentology, 1980, 27(1): 31-46.
- Jones K P N, McCave I N, Patel D. A computer-interfaced sedigraph for modal size analysis of fine-grained sediment[J]. Sedimentology, 1988, 35(1): 163-172.
- McCave I N. Mechanics of deposition of fine-grained sediments from nepheloid layers [J]. Geo-Marine Letters, 1984-1985, 4(3/4): 243-245.
- Wignall P B. Model for transgressive black shales? [J]. Geology, 1991, 19(2): 167-170.
- Bennett R H, Bryant W R, Hulbert M H, et al. Microstructure of Fine-Grained Sediments: From Mud to Shale[M]. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1991.
- Arthur M A, Dean W E, Stow D A V. Models for the deposition of Mesozoic-Cenozoic fine-grained organic-carbon-rich sediment in the

- deep sea [J]. Geological Society, London, Special Publications, 1984, 15: 527-560.
- 25 Loucks R G, Ruppel S C. Mississippian Barnett Shale; lithofacies and depositional setting of a deep water shale gas succession in the Fort Worth Basin, Texas [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 579-601.
- 26 Van Cappellen P, Ingall E D. Benthic phosphorus regeneration, net primary production, and ocean anoxia: A model of the coupled marine biogeochemical cycles of carbon and phosphorus [J]. Paleoceanography, 1994, 9(5): 677-692.
- 27 Erbacher J, Huber B T, Norris R D, et al. Increased thermohaline stratification as a possible cause for an ocean anoxic event in the Cretaceous period [J]. Nature, 2001, 409(6818): 325-327.
- 28 Stow D A V, Tabrez A R. Hemipelagites; processes, facies and model [J]. Geological Society, London, Special Publications, 1998, 129: 317-337.
- 29 Stow D A V, Huc A Y, Bertrand P. Depositional processes of black shales in deep water [J]. Marine and Petroleum Geology, 2001, 18(4): 491-498.
- 30 Wijsman J W M, Herman P M J, Middelburg J J, et al. A model for early diagenetic processes in sediments of the continental shelf of the Black Sea [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2002, 54(3): 403-421.
- 31 Leckie D A, Singh C, Goodarzi F, et al. Organic-rich, radioactive marine shale: a case study of a shallow-water condensed section, Cretaceous shaftesbury formation, Alberta, Canada [J]. Journal of Sedimentary Research, 1990, 60(1): 101-117.
- 32 Egenhoff S O, Fishman N S. Traces in the dark-sedimentary processes and facies and gradients in the upper shale member of the upper Devonian-Lower Mississippian Bakken formation, Williston basin, North Dakota, U.S.A [J]. Journal of Sedimentary Research, 2013, 83(9): 803-824.
- 33 Lehmann D, Brett C E, Cole R, et al. Distal sedimentation in a peripheral foreland basin: Ordovician black shales and associated flysch of the western Taconic foreland, New York State and Ontario [J]. Geological Society of America Bulletin, 1995, 107(6): 708-724.
- 34 Piasecki S, Christiansen F G, Stemmerik L. Depositional history of an Upper Carboniferous organic-rich lacustrine shale from East Greenland [J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 1990, 38(3): 273-287.
- 35 Giles J M, Soreghan M J, Benison K C, et al. Lakes, loess, and paleosols in the permian wellington formation of Oklahoma, U.S.A.: implications for paleoclimate and paleogeography of the Midcontinent [J]. Journal of Sedimentary Research, 2013, 83(10): 825-846.
- 36 卢衍豪. 中国寒武纪沉积矿产与“生物—环境控制论” [M]. 北京:地质出版社, 1979. [Lu Yanhao. China Cambrian Sedimentary Minerals and “Biological Environment Control Theory” [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1979.]
- 37 黄志诚, 黄钟瑾, 陈智娜. 下扬子区五峰组火山碎屑岩与放射虫硅质岩 [J]. 沉积学报, 1991, 9(2): 1-14. [Huang Zhicheng, Huang Zhongjin, Chen Zhina. Volcanic rock and radiolarian silicilith of Wufeng Formarion in Lower Yangtze region [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1991, 9(2): 1-14.]
- 38 姜月华, 岳文浙, 业治铮. 华南下古生界缺氧事件与黑色页岩及有关矿产 [J]. 有色金属矿产与勘查, 1994, 3(5): 272-278. [Jiang Yuehua, Yue Wenzhe, Ye Zhizheng. Anoxic event, black shales and related mineral resources: Taking the Lower Palaeozoic in southern China as an example [J]. Geological Exploration for Non-ferrous Metals, 1994, 3(5): 272-278.]
- 39 苏文博, 何龙清, 王永标, 等. 华南奥陶—志留系五峰组及龙马溪组底部斑脱岩与高分辨综合地层 [J]. 中国科学(D辑): 地球科学, 2002, 32(3): 207-219. [Su Wenbo, He Longqing, Wang Yongbiao, et al. Southern China Ordovician-Silurian Wufeng and Longmaxi Formation at the bottom of bentonite with high resolution [J]. Science China (Seri. D): Earth Sciences, 2002, 32(3): 207-219.]
- 40 冯增昭. 中国寒武纪和奥陶纪岩相古地理 [M]. 北京:石油工业出版社, 2004. [Feng Zengzhao. China Cambrian and Ordovician Lithofacies Paleogeography [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004.]
- 41 马永生, 陈洪德, 王国力, 等. 中国南方层序地层与古地理 [M]. 北京: 科学出版社, 2009: 1-584. [Ma Yongsheng, Chen Hongde, Wang Guoli, et al. China Southern Sequence Stratigraphy and Paleogeography [M]. Beijing: Science Press, 2009: 1-584.]
- 42 董大忠, 程克明, 王玉满, 等. 中国上扬子区下古生界页岩气形成条件及特征. 石油与天然气地质 [J], 2010, 31(3): 288-299. [Dong Dazhong, Cheng Keming, Wang Yuman, et al. Forming conditions and characteristics of shale gas in the Lower Paleozoic of the Upper Yangtze region, China [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(3): 288-299.]
- 43 潘继平, 乔德武, 李世臻, 等. 下扬子地区古生界页岩气地质条件与勘探前景 [J]. 地质通报, 2011, 30(2/3): 337-343. [Pan Jiping, Qiao Dewu, Li Shizhen, et al. Shale-gas geological conditions and exploration prospect of the Paleozoic marine strata in Lower Yangtze area, China [J]. Geological Bulletin of China, 30(2/3): 337-343.]
- 44 李任伟, 卢家烂, 张淑坤, 等. 震旦纪和早寒武世黑色页岩有机碳同位素组成 [J]. 中国科学(D辑): 地球科学, 1999, 29(4): 351-357. [Li Renwei, Lu Jialan, Zhang Shukun, et al. Sinian and Early Cambrian black shale organic carbon isotope composition [J]. Science China (Seri. D): Earth Sciences, 1999, 29(4): 351-357.]
- 45 吕炳全, 王红罡, 胡望水, 等. 扬子地块东南古生代上升流沉积相及其与烃源岩的关系 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2004, 24(4): 29-35. [Lü Bingquan, Wang Honggang, Hu Wangshui, et al. Relationship between Paleozoic upwelling facies and hydrocarbon in Southeastern marginal Yangtze block [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2004, 24(4): 29-35.]
- 46 赵明胜, 王约, 田景春, 等. 从生物化石组合特征剖析黑色页岩的沉积环境——以鄂西长阳地区寒武系牛蹄塘组为例 [J]. 中国地质, 2013, 40(5): 1484-1492. [Zhao Mingsheng, Wang Yue, Tian Jingchun, et al. Asedimentary environment analysis of black shales based on fossil assemblage characteristics: A case study of Cambrian Niutitang Formation in Changyang area, western Hubei [J]. Geology in China, 2013, 40(5): 1484-1492.]
- 47 张海全, 许效松, 刘伟, 等. 中上扬子地区晚奥陶世—早志留世岩相古地理演化与黑色页岩的关系 [J]. 沉积与特提斯地质, 2013,

- 33(2):17-24.[Zhang Haiquan, Xu Xiaosong, Liu Wei, et al. Late Ordovician-Early Silurian sedimentary facies and palaeogeographic evolution and its bearings on the black shales in the Middle-Upper Yangtze area[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2013, 33(2): 17-24.]
- 48 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.]
- 49 汪正江,王剑,卓皆文,等. 扬子陆块震旦纪—寒武纪之交的地壳伸展作用:来自沉积序列与沉积地球化学证据[J]. *地质论评*, 2011, 57(5): 731-742.[Wang Zhengjiang, Wang Jian, Zhuo Jiewen, et al. Crust extensional activity during the transition from Sinian (Ediacaran) to Cambrian in Yangtze Block: Evidence from the depositional Sequence and geochemistry[J]. *Geological Review*, 2011, 57(5): 731-742.]
- 50 李志明,全秋琦. 中国南部奥陶—志留纪笔石页岩相类型及其构造古地理[J]. *地球科学*, 1992, 17(3): 261-269.[Li Zhiming, Quan Qiuqi. Geography of Ordovician and Silurian graptolite-bearing strata in South China[J]. *Earth Science*, 1992, 17(3): 261-269.]
- 51 程立雪,王元君,陈洪德,等. 上扬子地区震旦系—早古生界黑色页岩的沉积和埋藏环境[J]. *岩石学报*, 2013, 29(8): 2906-2912. [Cheng Lixue, Wang Yuanjun, Chen Hongde, et al. Sedimentary and burial environment of black shales of Sinian to Early Palaeozoic in Upper Yangtze region[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(8): 2906-2912.]
- 52 周明忠,罗泰义,李正祥,等. 遵义牛蹄塘组底部凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *科学通报*, 2008, 53(1): 104-110.[Zhou Mingzhong, Luo Taiyi, Li Zhengxiang, et al. Bottom of Zunyi Niutitang Formation tuff zircon SHRIMP U-Pb age and its geological significance[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(1): 104-110.]
- 53 闫剑飞,余谦,刘伟,等. 中上扬子地区下古生界页岩气资源前景分析[J]. *沉积与特提斯地质*, 2010, 30(3): 96-103.[Yan Jianfei, Yu Qian, Liu Wei, et al. Perspectives of the Lower Palaeozoic shale gas resources in the Middle-Upper Yangtze area[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2010, 30(3): 96-103.]
- 54 王兰生,邹春艳,郑平,等. 四川盆地下古生界存在页岩气的地球化学依据[J]. *天然气工业*, 2009, 29(5): 59-62.[Wang Lansheng, Zou Chunyan, Zheng Ping, et al. Geochemical evidence of shale gas existed in the Lower Paleozoic Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2009, 29(5): 59-62.]
- 55 孙玮,刘树根,冉波,等. 四川盆地及周缘地区牛蹄塘组页岩气概况及前景评价[J]. *成都理工大学学报:自然科学版*, 2012, 39(2):170-175.[Sun Wei, Liu Shugen, Ran Bo, et al. General situation and prospect evaluation of the shale gas in Niutitang Formation of Sichuan Basin and its surrounding areas[J]. *Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition*, 2012, 39(2): 170-175.]
- 56 王丽波,久凯,曾维特,等. 上扬子黔北地区下寒武统海相黑色泥页岩特征及页岩气远景区评价[J]. *岩石学报*, 2013, 29(9): 3263-3278.[Wang Libo, Jiu Kai, Zeng Weite, et al. Characteristics of Lower Cambrian marine black shales and evaluation of shale gas prospective area in Qianbei area, Upper Yangtze region[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(9): 3263-3278.]
- 57 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.]
- 58 郭彤楼,张汉荣. 四川盆地焦石坝页岩气田形成与富集高产模式[J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(1): 28-36.[Guo Tonglou, Zhang Hanrong. Formation and enrichment mode of Jiaoshiiba shale gas field, Sichuan Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(1): 28-36.]
- 59 袁宏,肖加飞,何熙琦,等. 黔北牛蹄塘组的地球化学特征及形成环境[J]. *贵州地质*, 2007, 24(1): 55-63.[Yuan Hong, Xiao Jiafei, He Xiqi, et al. Geochemical characteristics and formation environment of the Niutitang Formation in the North Guizhou[J]. *Guizhou Geology*, 2007, 24(1): 55-63.]
- 60 姜月华,岳文浙,业治铮. 中国南方下寒武统石煤的特征、沉积环境和成因[J]. *中国煤田地质*, 1994, 6(4): 26-31.[Jiang Yuehua, Yue Wenzhe, Ye Zhizheng. Characteristics, sedimentary environment and origin of the Lower Cambrian stone-like coal in Southern China[J]. *China Coal Geology*, 1994, 6(4): 26-31.]
- 61 吴朝东. 湘西震旦—寒武纪交替时期古海洋环境的恢复[J]. *地质学前沿*, 2000, 7(增刊): 45-57.[Wu Chaodong. Recovery of the Palaeo-ocean environment in the alternating epoch of Late Sinian and Early Cambrian in the West Hunan[J]. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7(Suppl.): 45-57.]
- 62 李有禹. 湖南大庸慈利一带下寒武统黑色页岩中海底喷流沉积硅岩的地质特征[J]. *岩石学报*, 1997, 13(1): 121-126.[Li Youyu. The geological characteristics of sea-floor exhalation sedimentary chert in Lower Cambrian Black Shales in Dayong-Cili area, Hunan province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1997, 13(1): 121-126.]
- 63 李娟,于炳松,郭峰. 黔北地区下寒武统底部黑色页岩沉积环境条件与源区构造背景分析[J]. *沉积学报*, 2013, 31(1): 20-31.[Li Juan, Yu Bingsong, Guo Feng. Depositional setting and tectonic background analysis on Lower Cambrian black shales in the north of Guizhou province[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(1): 20-31.]
- 64 魏怀瑞,杨瑞东,鲍森,等. 贵州早寒武世黑色页岩地球化学特征及其意义[J]. *贵州大学学报:自然科学版*, 2007, 23(4): 356-360.[Wei Huairui, Yang Ruidong, Bao Miao, et al. Geochemical characteristics of Early Cambrian black shale in Guizhou province, China[J]. *Journal of Guizhou University: Natural Science Edition*, 2007, 23(4): 356-360.]

- 65 吴朝东,杨承运,陈其英. 湘西黑色岩系地球化学特征和成因意义[J]. 岩石矿物学杂志, 1999, 18(1): 26-39. [Wu Chaodong, Yang Chengyun, Chen Qiyang. The origin and geochemical characteristics of Upper Sinain-Lower Cambrian black shales in western Hunan[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 1999, 18(1): 26-39.]
- 66 杨恩林,吕新彪,鲍森,等. 黔东下寒武统黑色页岩微量元素的富集及成因分析[J]. 地球科学进展, 2013, 28(10): 1160-1169. [Yang Enlin, Lü Xinbiao, Bao Miao, et al. Enrichment and origin of some trace elements in black shales from the Early Cambrian in Eastern Guizhou province [J]. Advances in Earth Science, 2013, 28(10): 1160-1169.]
- 67 陈旭,张元动,樊隽轩,等. 广西运动的进程:来自生物相和岩相带的证据[J]. 中国科学(D辑):地球科学, 2012, 42(11): 1617-1626. [Chen Xu, Zhang Yuandong, Fan Junxuan, et al. Process of Guangxi movement: Evidence from biological phase and facies belts [J]. Science China (Seri. D): Earth Sciences, 2012, 42(11): 1617-1626.]
- 68 刘树根,王世玉,孙玮,等. 四川盆地及其周缘五峰组龙马溪组黑色页岩特征[J]. 成都理工大学学报:自然科学版, 2013, 40(6): 621-639. [Liu Shugen, Wang Shiyu, Sun Wei, et al. Characteristics of block shale in Wufeng Formation and Longmaxi Formation in Sichuan Basin and its peripheral areas[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science and Technology Edition, 2013, 40(6): 621-639.]
- 69 陈旭,戎嘉余. 从生物地层学到大构造学——以华南奥陶系和志留系为例[J]. 现代地质, 1999, 13(4): 385-389. [Chen Xu, Rong Jiayu. From biostratigraphy to tectonics—with Ordovician and Silurian of South China as an example [J]. Geoscience, 1999, 13(4): 385-389.]
- 70 严德天,陈代钊,王清晨,等. 扬子地区奥陶系—志留系界线附近地球化学研究[J]. 中国科学(D辑):地球科学, 2009, 39(3): 285-299. [Yan Detian, Chen Daizhao, Wang Qingchen, et al. Geochemical study of Yangtze Ordovician-Silurian boundary [J]. Science China (Seri. D): Earth Sciences, 2009, 39(3): 285-299.]

Characteristics and Depositional Model of the Lower Paleozoic Organic Rich Shale in the Yangtze Continental Block

XU ZhengYu¹ JIANG Shu² XIONG ShaoYun¹ LIANG Xing³
WANG GaoCheng³ GUO YanLing¹ HE Yong³ RAO DaQian³

(1. Hangzhou Research Institute of Petroleum Geology, PetroChina, Hangzhou 310023;

2. Energy & Geoscience Institute (EGI), University of Utah, Salt Lake City, UT 84108;

3. Zhejiang Oilfield company, PetroChina, Hangzhou 310013)

Abstract: To further investigate the Paleozoic organic-rich shale development and distribution characteristics in the Yangtze Continental Block, and the depositional model, we systematically collected and compiled large data sets of organic-rich shales for the Lower Cambrian Niutitang equivalent Formation and Upper Ordovician Wufeng-Lower Silurian Longmaxi equivalent Formation. Outcrop in Zhalagou of Sandu county, Guizhou province and Zhao 104 wells Junlian Prefecture, Sichuan Province were selected for the systematic observation, sample tests, sedimentary facies, and so on. Regional reconstruction of paleogeography and correlation between different regions show that the Yangtze block was passive continental margin during the early Paleozoic and peripheral foreland during early Silurian. Niutitang equivalent shales were deposited in a passive continental margin environment, the upwelling nutrient flow and anoxic events in complex depositional model is interpreted for the depositional model of Lower Cambrian shale in Yangtze Block, organic-rich thick shale was mainly developed in the southeastern margin of the Yangtze block deep water shelf to slope facies; Ordovician Wufeng-Lower Silurian Longmaxi equivalent shales were deposited in the Caledonian orogenic front of the periphery foreland environment, organic-rich thick shale was mainly developed in in the anoxic intra-shelf low setting in southeastern margin of the Upper to middle Yangtze block.

Key words: depositional model; development characteristic; organic rich shale; Early Paleozoic; Yangtze Continental Block



图版说明 I a. 灰色粉砂质页岩, 水平层理, 浅水陆棚相, 下寒武统牛蹄塘组, 金沙岩孔; b. 炭质页岩, 含磷结核, 深水陆棚—斜坡相, 下寒武统牛蹄塘组, 翁安朵丁关; c. 硅质岩夹炭质页岩, 水平层理, 盆地相, 下寒武统牛蹄塘组, 三都渣拉沟; d. 黄绿色中厚层状粉砂—细砂岩夹薄层砂质泥页岩, 深水洋盆, 下寒武统, 宾阳镇龙山; e. 灰绿—灰色灰质砂质页岩, 夹有薄层生屑灰岩或粉砂岩, 水平层理发育, 下志留统龙马溪组, 桐梓县松坎; f. 灰色泥岩、页岩, 夹条带状粉砂岩透镜体, 含有黄铁矿, 水平层理发育, 下志留统龙马溪组, 荆门荆 101 井。

a. Gray silty shale, horizontal bedding, shallow shelf facies, the lower Cambrian Niutitang Formation, Yankong town of Jinsha county in Guizhou province; b. Photo 2 Carbonaceous shale, phosphorus tubercles, deep shelf slope facies, the Lower Cambrian Niutitang Formation, Duo Ding Guan town of Weng An county in Guizhou province; c. Siliceous rock interbedded carbonaceous shale, horizontal bedding, basin facies, the Lower Cambrian Niutitang Formation, Zhalagou village of Sandu county in Guizhou province; d. Yellow green medium thick bedded silty sand fine sandstone interbedded thin sandy shale, deep ocean basin, the Lower Cambrian, Zhenlongshan Forest Farm of Binyang County in the Guangxi Zhuang Autonomous Region; e. Gray green to grey grey sandy shale, with thin bioclastic limestone and siltstone, horizontal bedding, Lower Silurian Longmaxi Formation, Songkan town of Tongzi County in Guizhou province; f. Gray mudstone, shale, clip strip siltstone lens, containing pyrite, horizontal bedding, Lower Silurian Longmaxi Formation, Jing101 Well of Jingmen county in Hubei province.