

文章编号:1009-3850(2015)03-0001-10

四川江油马角坝地区上石炭统层序地层研究

徐锦龙¹, 洪天求²

(1. 安徽省地质调查院, 安徽 合肥 230001; 2. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:应用露头层序地层学基本原理和方法、结合碳酸盐岩微相、古生物学、成岩作用、沉积相和沉积事件等理论,对江油马角坝地区上石炭统碳酸盐岩地层进行了露头层序地层研究。研究表明,研究区晚石炭世为典型的陆表海沉积,地形平坦,地壳下降相对缓慢,海水较浅,沉积物界面与海平面接近,主体为碳酸盐岩开阔台地和浅滩沉积环境。水体主体深度为0~50m,为低幅高频低速的海平面变化。根据沉积层序界面的露头和镜下标志,共划分出7个三级层序,反映了研究区晚石炭世具有7次相对较大的海平面升降旋回。发育TST和HST,普遍缺失LST,局部CS难以识别。平均每个层序时限约为2.7Ma,并伴随着多次四级、五级乃至高频海平面变化,共同组成了研究区简单而复杂的碳酸盐岩地层格架。动力机制主要源于晚古生代冰川型全球海平面变化,其原因可能为晚古生代冰期(大洋水体积的周期型变化或大陆冰盖的增长和衰减)和风暴事件共同作用的结果,同时受到古地形、物源和沉积物供应量变化的制约。其中,CSQ1、CSQ3和CSQ4对应的海平面变化幅度较大,海平面变化速率主要为突发性的快速上升到缓慢下降或缓慢上升到相对下降的特点。CSQ2、CSQ5、CSQ6和CSQ7对应的海平面变化幅度不大,为缓慢上升和缓慢下降的特点。

关键词:层序地层;上石炭统;海平面变化;江油马角坝地区

中图分类号:TE121.3⁺⁴

文献标识码:A

层序地层学作为一种新兴的具有完整理论体系的划分、对比和分析沉积地层的新方法,为精确的地层划分、对比、岩相古地理再造和油气勘探提供了新理论和新方法,已成为油气勘探的重要理论和手段之一^[1]。层序地层学起源于海相地层,主要受控于构造沉降、海平面升降、沉积物供给和气候四大因素,相互制约着层序的形成。碳酸盐岩作为重要的海相地层之一,也是目前油气勘探的主攻方向,其层序地层研究还相对薄弱。有关沉积层序级别划分、海平面变化驱动机制和不同相带间层序对比方面,仍存在着许多不同认识。

本文采用露头层序地层学原理和方法、结合碳酸盐岩微相、古生物学、成岩作用、沉积相和沉积事

件等理论,在详细的沉积学研究和精细的地层划分与对比基础上,对江油马角坝地区3条主干剖面上石炭统碳酸盐岩地层进行了露头层序地层研究。

1 地质背景

研究区位于龙门山推覆构造带的北段,石炭纪处于扬子板块的西缘半封闭海湾环境(图1),发育一套以局限-半局限台地、开阔台地相为主的碳酸盐岩沉积^[2]。上石炭统发育齐全,出露良好,化石丰富,是研究四川盆地乃至上扬子地区晚石炭世沉积特征的经典地区之一。上石炭统沉积类型以碳酸盐岩为主,颜色浅、岩相分异和层序界限不明显,三级、四级和五级层序发育良好,为该区层序地层研

收稿日期:2014-07-02; 改回日期:2014-07-12

作者简介:徐锦龙(1985-),男,助理工程师,古生物学与地层学。E-mail:xujinlong0909@126.com

资助项目:国家自然科学基金面上项目(批准号41072085)资助

究带来一定的困难。近年来,不少学者对此开展了工作,并取得了丰富的成果,张遵信^[3]和王治平,叶干^[4]对蜓和珊瑚类进行了较全面的总结;杨剑^[5]对江油匡南地区的岩石地层进行了重新划分;方少仙等^[6]和冯增昭等^[7]曾对沉积古地理进行了较全面的研究;覃建雄等^[2]、李儒峰等^[8]和梅冥相等^[9]对

龙门山地区石炭系层序地层进行了研究;王增吉^[10]以底栖腕足类、珊瑚及蜓类为主体,建立了上石炭统可进行区域对比的化石组合带。笔者根据生物化石组合的特点,将研究区上石炭统划分为黄龙组

和船山组下段,石炭系-二叠系界线位于小独山阶之顶。以上研究成果为本次工作奠定了基础。

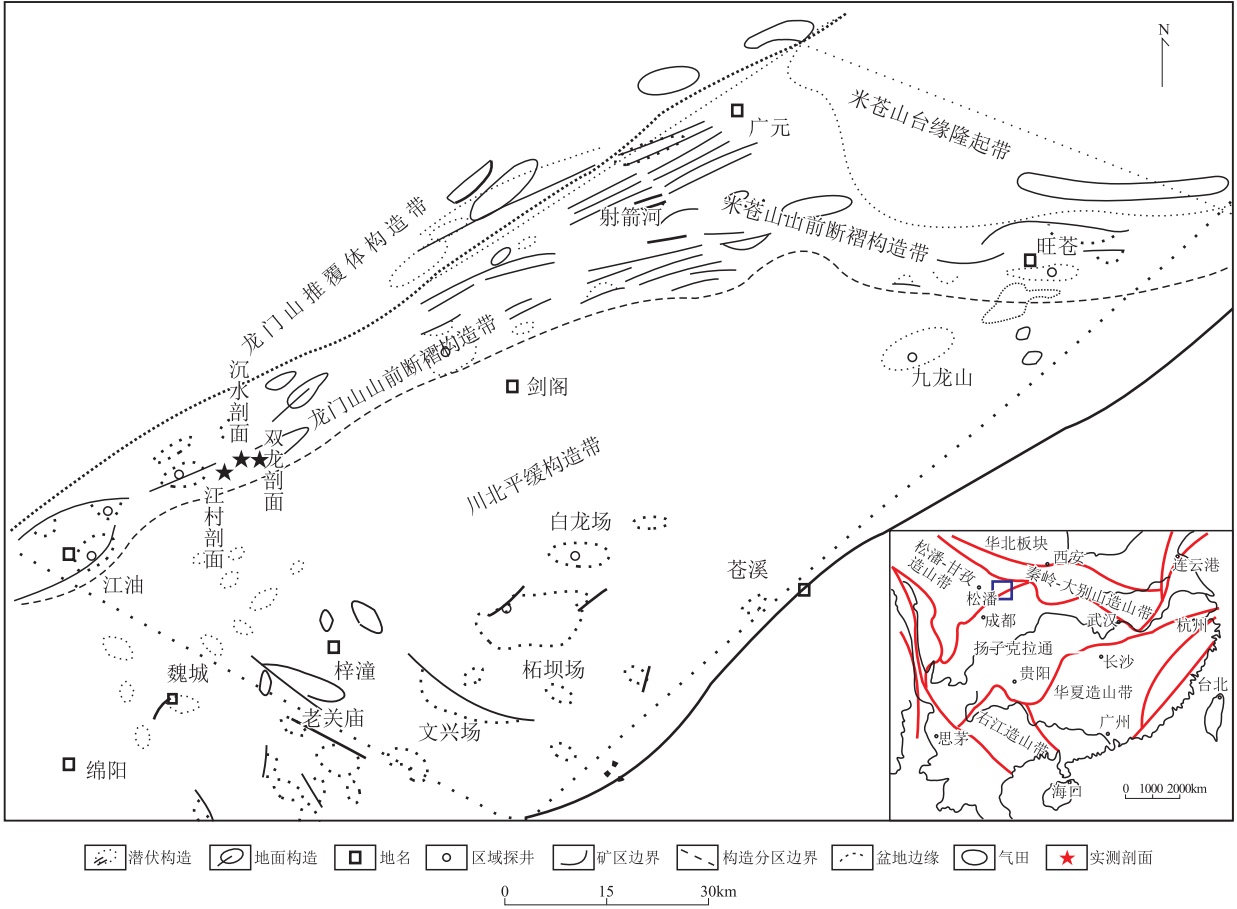


图1 研究区构造区划及所研究剖面位置图^[11]

Fig.1 Tectonic setting of the measured sections in the Majaiaoba region, Jiangyou, Sichuan (modified from Li Guohua et al. , 2003)

石炭-二叠系界线问题历来争论较大,结合最新的研究成果认为 *Pseudoschwagerina* 的首次出现^[12-14]作为二叠系的开始。由于本区未进行精确的生物地层界线的研究,因此本研究结合扬子区和全球小独山阶的特点,以小独山阶与紫松阶之间的碳酸盐岩遭受到明显的淡水淋滤作用,以两者的整合(双龙剖面)或平行不整合(沉水剖面)即核形石灰岩的消失作为石炭-二叠系界线。

2 三级层序的划分依据

20 世纪 70 年代后期至 80 年代前期, Vail 等^[15-16]在地震地层学基础上创立起来的一门新的地层学分支科学。层序是层序地层学研究的基本

单元,指在一定年代地层格架内,由一个成因上相关、内部相对整合连续的地层单元,其顶、底被不整合面或与之相对应的整合面所限定、重复出现并有成因联系的、限制的岩石地层组合^[15]。不同地区局部受到的沉积条件(构造升降、全球性海平面变化沉积物供应以及气候)的差异(非匀速和不等幅)^[17-18],将影响其控制的沉积层序,进而导致各地沉积层序存在一定的差异,即便在同一盆地的不同位置也不尽相同。

三级层序是层序地层学研究的主要对象和基本层序地层单位,是一套以不整合或可与其对比的整合界面为界,相对统一、彼此有成因关系的地层^[19],其平均时限延续约为 2~5 Ma,在层序地层学

研究和开展全球性对比中具有特别重要的意义^[18,20]。同时,它又是一个争议较多的层序地层单位;Goldhammer 等^[21]认为是 1~10Ma, Vail 等^[20]提出为 1~5Ma, Mitchum 等^[22]和 van Wagoner 等^[23]认为是 1~3Ma。总的趋势是时代自老至新时限逐渐变短,但不明显。总之,三级层序所限定的时限较长(1~10 Ma,笔者认为 2~5Ma 更为合适),就其原因可能与古地理条件、沉积物补给以及区域性构造运动的影响和叠加有关,不恰当的识别也可能是造成其时限变化较大的一个重要因素。

在地质发展历史中,石炭纪是联合古陆(Pangea)形成的重要转折时期。层序地层学的研究对于认识石炭纪的沉积盆地演化、古地理格局和全球区域对比具有重要意义^[2,8,24-27]。中国南方石炭系可划分为两个二级层序,上石炭统命名为 SS11,主要由罗苏阶、滑石板阶、达拉阶和小独山阶与早二叠世的紫松阶组成。上扬子地区的上石炭统在大部分地区发育齐全,不同地区可识别出 3~6 个三级层序。如川滇黔桂地区可识别 4 个三级层序^[26],滇黔桂盆地及其邻区可识别出 3 个三级层序^[27];滇西南地区可划分为 5 个三级层序;黔南地区可划分为 6 个三级层序^[28]。而王鸿祯则指出,上石炭统可划分为 14 个三级层序,时限为 2.36Ma(老上石炭统划分方案,新方案使得晚石炭世由 33Ma 变为 19Ma)。以上差异的形成不仅与其所处的古地理位置差异(缺失部分层序)有关,还与层序级别划分、确定层序的标准、不同相带间层序对比、三级层序的界面和时间延续等方面的认识有密切的关系^[29-31]。

根据马永生等的研究^[1],上石炭统相当组之间,其三级层序单元也存在较大的差异:广西那坡大坡跃石炭系马平组可划分为 5 个三级层序;云南懂有石炭系马平组可划分为 4 个三级层序;贵州独山铁坎石炭系马平组可划分为 3 个三级层序。

总之,三级层序认识上不确定的原因主要是层序级别划分、确定层序的标准、不同相带间层序对比,三级层序界面和时间延续等方面存在一定的差异^[29-31]。因此,如何正确识别三级层序就成为层序地层学研究的关键,而层序划分的关键是有关界面的识别,包括层序的底界面、初始海泛面和最大海泛面。其中最为重要的是层序底界面的识别,这是层序划分的基础和前提。

3 沉积层序划分及其特点

三级层序是层序地层学研究的主要对象,层序

内体系域的划分关键是识别和确定初始海泛面(ffs)和最大海泛面(mfs),从而确定层序边界及其内部的沉积体系域。研究区晚石炭世构造运动不强烈,海平面升降较为频繁,但升降幅度不大,整体处于碳酸盐台地相区^[2],主要发育海侵体系域(TST)和高水位体系域(HST),局部发育低水位体系域(LST)。

覃建雄等^[2]对该区石炭系进行了层序地层研究,提出上石炭统包括 4 个三级层序,其中威宁组 2 个,马平组 2 个(包括紫松阶一个三级层序),即马角坝地区上石炭统仅发育 3 个三级层序,层序时限 5~11.5Ma。马永生等^[1]对扬子地区石炭系进行了层序地层对比研究,显示该区存在 5 个三级层序。江油马角坝地区上石炭统以厚度薄、颜色浅、岩性差异小为特征,给三级层序的划分带来了一定的困难,使得在三级层序划分过程中对层序边界的确定存在一定的差异。传统的露头层序地层学方法可能对层序关键界面、体系域特征的识别带来局限,必须结合碳酸盐岩微相、古生物学、成岩作用等多学科知识,探讨该地区的层序地层格架。

3.1 层序边界的确定

陆表海盆沉积层序边界有 I 型层序边界和 II 型层序边界。I 型层序边界是海平面相对下降造成陆上或水下侵蚀作用,具有很好的等时性,是层序地层划分的基础。其识别标志有地表或海底侵蚀、地层上超、岩性岩相及古生物突变和区域可对比性等。在研究区常表现为沉积间断、古风化壳、假整合面和暴露面,即古风化壳,从长沟组灰色泥质灰岩到黄龙组紫红色粉砂岩的过渡(CSQ1/C1 界线);黄龙组下段鸟眼-窗格构造和溶蚀孔裂隙等浅水暴露标志(CSQ2/CSQ1 界线);黄龙组与船山组之间的含鲕粒岩屑颗粒灰岩,陆缘石英磨圆度极好,局部含量可达 60%,显示了离陆缘很近的暴露标志(CSQ5/CSQ4 界线);船山组下段与船山组上段的淡水成岩作用(P1/CSQ7 界线)。

II 型层序边界表现为上下地层之间为整合接触,岩性、岩相和古生物呈渐变过渡,海平面也呈过渡变化。在研究区的表现形式主要为岩性渐变过渡和沉积环境的过渡(CSQ4/CSQ3、CSQ5/CSQ4、CSQ6/CSQ5 等界线)。

3.2 层序中的地层界面

层序内划分体系域的关键是识别和确定初始海泛面和最大海泛面。

初始海泛面为海侵体系域与下伏低水位体系

域的物理界面,通常表现为一个非常明显的副层序结构转换面,下部为进积到加积的副层序组,上部为退积副层序组。研究区一般不发育低水位体系域,使得初始海泛面与层序边界重合,表现为岩性渐变面(生物碎屑颗粒灰岩与核形石颗粒灰岩转换面)和沉积环境突变面(开阔台地与台地边缘浅滩渐变过渡)。

最大海泛面指海平面上升速率变缓,趋于相对稳定,达到最大海侵时的沉积物界面,是沉积层序中唯一的等时面,为高水位体系域与下伏海侵体系域的物理界面。研究区的表现形式主要是薄层生物碎屑粒泥灰岩、灰土黄色泥岩、泥灰岩与泥岩组成的瘤状层等。

4 层序地层分析

根据露头层序地层原理,主要考虑层序关键界面、体系域特征、层序区域追踪对比性,并通过对岩石地层、生物地层、微相和成岩作用的研究,将马角坝地区上石炭统划分出7个三级层序,分别命名为CSQ1-CSQ7。上述7个三级层序反映研究区晚石炭世具有7次相对较大的海平面升降旋回,若以晚石炭世(318~299Ma)19Ma计,平均每个层序约为2.7Ma,这与三级层序平均时间延续约为2~5Ma大致相当^[20,18,22-23],与上扬子川滇黔桂地区^[26-27,30]可能存在一定的差异,其原因可能为层序级别划分、确定层序的标准不一致所致。

在浅水陆表海和克拉通盆地构造背景下,沉积层序的底部大部分以海侵体系域开始(低水位体系域仅部分层序存在),其上为高水位体系域。通过对马角坝地区典型剖面的观测研究,建立了该地区上石炭统层序地层格架(图2),主要表现为黄龙组含4个三级层序(罗苏阶1个、滑石板阶1个和达拉阶2个)和船山组下段含3个三级层序(小独山阶),其中每个三级层序又可细分为若干个四~五级或高频层序和准层序,其划分依据和特征如下。

4.1 第一层序 CSQ1

对应的岩石地层单位为黄龙组下段下部。以灰白色生物碎屑灰岩夹两套紫红色风暴岩组成一个三级层序。

层序底界面:位于早晚石炭世之间的平行不整合。该平行不整合是早石炭世末本区发生大规模海平面下降而遭受陆上暴露的标志,属I型层序界面。

低水位体系域:由台缘潮坪相紫红色铁泥质粉

砂岩组成,仅见于江村剖面,具明显的冲刷界面(覃建雄等^[2]认为其为台缘斜坡相塌积岩)。在双龙水泥厂剖面为暗紫红色中层状含岩屑泥质灰岩。

初始海泛面:以灰白色中层生物碎屑粒泥灰岩和灰泥球粒灰岩为主,代表晚石炭世滑石板阶海侵的开始。

海侵体系域:滑石板阶早期,由于海平面的上升,沉积了灰白色厚层生物碎屑泥粒灰岩、生物碎屑颗粒灰岩和包壳生物碎屑颗粒灰岩,富含窄盐度的有孔虫、腕足类和棘皮动物等化石,属于追上型碳酸盐岩台地,形成退积型沉积序列。

最大海泛面:以一套风暴岩代表一次大规模突发性的海侵事件的发生。底部的灰绿色介壳灰岩与紫红色含砾生物碎屑灰岩组成的滞留层代表最大海泛面。同时,见海绿石,使得介壳层呈现灰绿色,底部见冲刷构造。

高水位体系域:以灰白色厚层生物碎屑灰岩、集合粒颗粒灰岩、砾屑灰岩等为特征,含大量的蜓、非蜓有孔虫、棘皮动物、刺毛珊瑚和藻类等化石。同时,中间发育一套近源极浅水风暴岩。该层序高水位体系域总体处于开阔台地或台地边缘环境中,碳酸盐岩产率一般,发育追上型碳酸盐岩沉积,晚期又演变成滞后型碳酸盐岩沉积,形成进积-加积型沉积序列。

4.2 第二层序 CSQ2

对应的岩石地层单位为黄龙组下段上部。以灰白色生物碎屑灰岩和顶部两套风暴岩组成一个三级层序。

层序底界面:位于滑石板阶上下部之间的暴露面,可见底部大量的紫红色风化壳泥岩,属I型层序界面。

初始海泛面:本区缺乏低水位体系域,因此,初始海泛面与层序边界重合,表现为短暂的暴露面。以灰白色厚层生物碎屑灰岩的出现作为海侵的开始。

海侵体系域:以灰白色-浅灰色厚层生物碎屑泥粒-颗粒灰岩为特征,生物碎屑破碎严重,常被泥晶套包裹。碳酸盐岩沉积速率快,属于追上型碳酸盐岩台地,形成退积型沉积序列。

最大海泛面:以浅灰色厚层生物碎屑颗粒灰岩中见大量的黄铁矿颗粒作为最大海泛面。

高水位体系域:以紫红色砾岩产出,位于氧化面以上,发育生物碎屑颗粒灰岩和包壳生物碎屑颗粒灰岩。同时可见粗-细-粗和细-粗的粒序层理,整

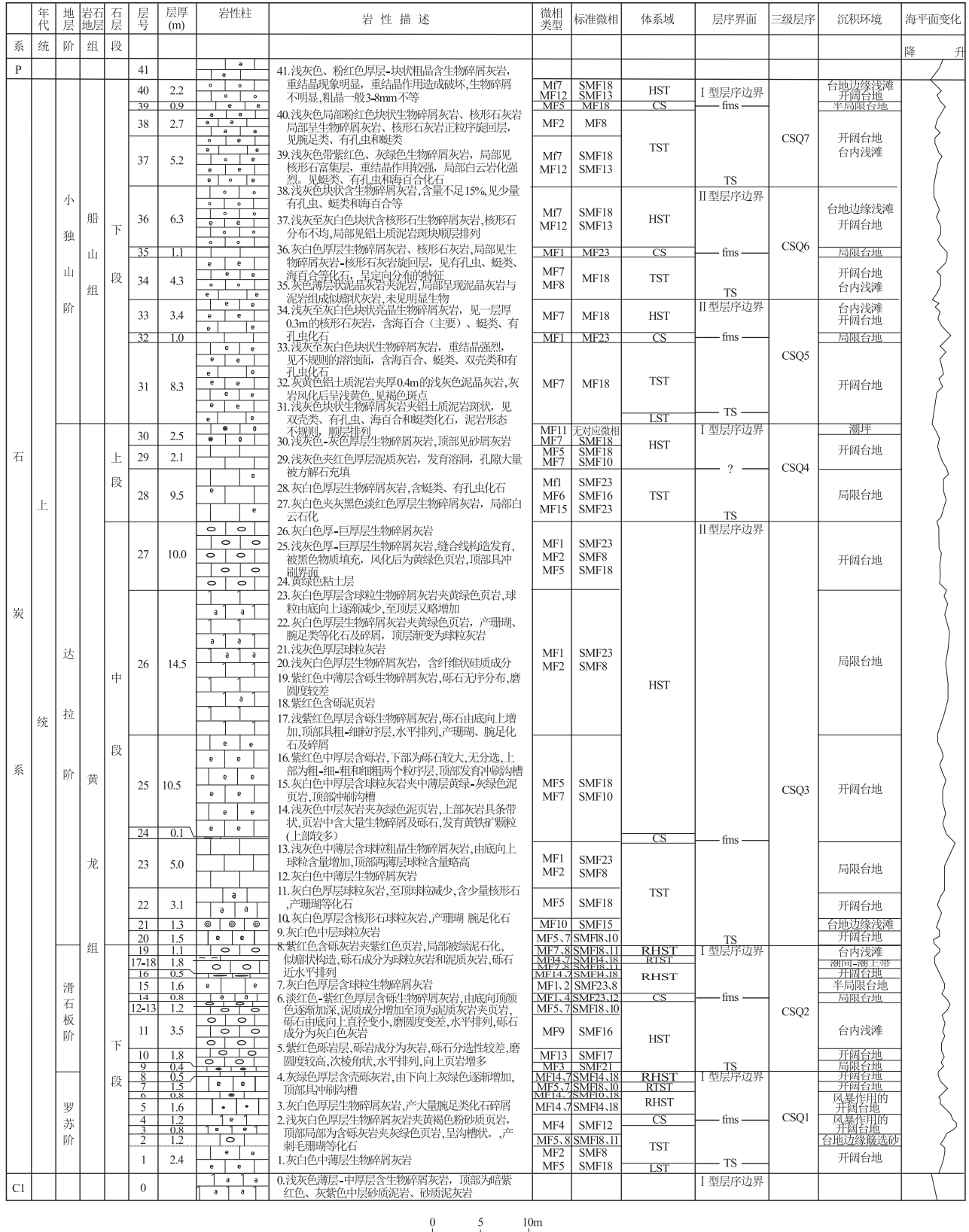


图2 江油市马角坝地区上石炭统剖面微相特征、微相类型、沉积环境及层序特征综合柱状图

Fig. 2 Generalized column showing sedimentary microfacies, environments and sequence stratigraphy of the Upper Carboniferous strata in the Majiaoba region, Jiangyou, Sichuan

体表现为浅水的风暴沉积层序,主要表现为一个海退旋回。沉积水体较浅,为滞后型碳酸盐岩台地沉积,形成进积-加积型沉积序列。

4.3 第三层序 CSQ3

相对应的岩石地层单位为黄龙组中段。以灰白色厚层生物碎屑灰岩组成一个三级层序。

层序底界面:位于滑石板阶与达拉阶之间平行不整合面,属 I 型层序界面。

初始海泛面:本区缺乏低水位体系域,因此,初始海泛面与层序边界重合,可能表现为短暂的暴露面。以灰白色厚层生物碎屑灰岩的出现作为海侵的开始。

海侵体系域:灰白色厚层生物碎屑泥粒-颗粒灰岩和放射鲕粒颗粒灰岩形成的局限-开阔-局限台地组成海侵体系域。富含蜓、非蜓有孔虫、腕足类和藻类化石。反映了一种中低能半局限台地环境。富颗粒相和贫灰泥相特征显示了一种相对追上型碳酸盐岩台地沉积,形成退积型沉积序列。

最大海泛面:以灰白色厚层生物碎屑颗粒灰岩夹一层 20cm 的黄绿色泥岩(凝缩段)作为最大海泛面。

高水位体系域:由浅灰色厚层灰泥石灰岩、生物碎屑粒泥灰岩-灰白色厚层包壳生物碎屑颗粒灰岩的变化表明海平面缓慢上升,物源丰富,碳酸盐岩产率高,发育追上型碳酸盐岩沉积,形成加-进积型沉积序列。

4.4 第四层序 CSQ4

相对应的岩石地层单位为黄龙组上段。以灰白色厚层灰泥石灰岩和生物碎屑颗粒灰岩和鲕粒-砂屑灰岩组成一个三级层序。

层序底界面:位于上、下达拉阶内部整合面,未露出地表,以浅滩相的包壳生物碎屑颗粒灰岩向灰泥石灰岩转变的分界面作为海侵的开始,属于 II 型层序界面。

初始海泛面:本区缺乏低水位体系域,因此,初始海泛面与层序边界重合,表现为整合面。以灰白色厚层生物碎屑灰岩的出现作为海侵的开始。

海侵体系域:灰白色厚层灰泥石灰岩和生物碎屑粒泥灰岩形成的局限-开阔台地作为海侵体系域。蜓、非蜓有孔虫的含量不足 25%,富灰泥相,表明海平面上升较快,沉积物堆积速率较慢,沉积物不足以充填海平面上升产生的可容空间,属于滞后型碳酸盐岩台地,形成退积型沉积序列。

最大海泛面:本层序最大海泛面位置不详,初

步以灰白色生物碎屑粒泥灰岩的消失作为最大海泛面。

高水位体系域:由浅灰色厚层生物碎屑颗粒灰岩组成的开阔台地向鲕粒-砂屑颗粒灰岩组成台地边缘浅滩的演化,沉积物不足以充填海平面上升产生的可容空间,属于滞后型碳酸盐岩台地,形成向上变浅的进积型层序序列。

4.5 第五层序 CSQ5

相对应的岩石地层单位为船山组下段下部。在马角坝地区沉水剖面,14 套灰白色生物碎屑颗粒泥粒-颗粒灰岩-核形石颗粒灰岩组成的韵律层可能构成了 CSQ5、CSQ6 和 CSQ7,对其层序的划分较难,有待进一步的地化数据进行证实。在马角坝地区双龙剖面,三级层序界限清晰,现主要以其沉积特征进行详细的层序地层分析。

CSQ5 以浅灰色、灰白色生物碎屑颗粒灰岩组成一个三级层序。

层序底界面:可能为黄龙组和船山组平行不整合面,晚石炭世发生小规模的海平面下降,导致形成陆上暴露标志。以黄色、紫红色铁质砂质泥岩和泥质粉砂岩为特征,常呈透镜状,分布极不稳定,中间夹厚约 1m 的透镜状浅灰色厚层生物碎屑泥粒灰岩,见陆源石英和蜓类化石,属 I 型层序界面。

低水位体系域:由潮坪相黄色、紫红色铁泥质粉砂岩、粉砂质泥岩组成,仅见于双龙剖面,具明显的冲刷界面。在沉水剖面表现为暗紫红色中层状含鲕粒岩屑颗粒灰岩。

初始海泛面:以浅灰色厚层-块状生物碎屑泥粒-颗粒灰岩夹泥岩斑块为主,代表晚石炭世小独山阶海侵的开始。

海侵体系域:以浅灰色厚层-块状生物碎屑泥粒-颗粒灰岩为主,见不同程度的铝土质泥岩斑块。生物碎屑含量特别高,主要为双壳类、海百合、有孔虫和蜓类。以上特征表明,该时期沉积水体较浅,生物种属丰富,物源丰富,为台地边缘相沉积,属于追上型碳酸盐岩台地,形成退积型沉积序列。

最大海泛面:以灰黄色铝土质泥岩和浅灰色薄层灰泥石灰岩夹生物碎屑泥粒灰岩条带为特征,泥岩不稳定,常变化为灰岩间的夹层,见褐灰色斑点(黄铁矿风化斑点?),可能属于较深水环境。

高水位体系域:以灰白色厚层生物碎屑颗粒灰岩和生物碎屑泥粒灰岩为特征,含大量的蜓、非蜓有孔虫、棘皮动物、双壳类和藻类等化石。以上特征表明,该时期沉积水体极浅,富含生物碎屑、亮晶

胶结,为台地边缘浅滩沉积,属于向上变浅的进积型层序。局部呈现多个生物碎屑颗粒-核形石泥粒-颗粒灰岩的旋回层,似正粒序,中间无明显界限,可能指示了四、五级层序乃至高频层序格架。

4.6 第六层序 CSQ6

相对应的岩石地层单位为船山组下段中部。以浅灰色、灰白色生物碎屑颗粒-核形石颗粒灰岩组成一个三级层序。

层序底界面:位于上、下小独山阶内部整合面,未露出地表,以浅滩相的生物碎屑颗粒灰岩向核形石泥粒灰岩-颗粒灰岩渐变过渡,属Ⅱ型层序界面。

初始海泛面:本区缺乏低水位体系域,因此,初始海泛面层序边界重合,表现为整合面。以多个生物碎屑颗粒-核形石泥粒-颗粒灰岩的旋回层的出现为标志,中间无明显界限。

海侵体系域:以浅灰、灰白色厚层生物碎屑颗粒灰岩-核形石颗粒灰岩为特征,富含有孔虫、蛭类、棘皮动物和双壳类化石。以上特征表明沉积水体较浅,沉积物堆积速率较慢,为台地边缘浅滩沉积,属于退积型碳酸盐岩台地。

最大海泛面:以灰色薄层状灰泥石灰岩的出现为界,局部形成生物碎屑粒泥灰岩与灰泥石灰岩形成的似瘤状灰岩,见少量有孔虫和蛭类化石,可能为较深水开阔台地环境。

高水位体系域:由灰白色厚层含核形石生物碎屑颗粒灰岩和核形石颗粒灰岩为特征,核形石致密,呈正粒序。核形石的同心纹层明显,局部可达 $15\text{mm} \times 21\text{mm}$ 。生物碎屑分布于核形石间隙内,亮晶胶结,富含孔虫、蛭类、棘皮动物和双壳类化石,局部呈定向分布,其特征表明其为台地边缘浅滩环境,可能为进积型碳酸盐岩台地。

4.7 第七层序 CSQ7

相对应的岩石地层单位为船山组下段上部,以浅灰色、灰白色生物碎屑颗粒-核形石颗粒灰岩组成一个三级层序。

初始海泛面:本区缺乏低水位体系域,因此,初始海泛面常与层序边界重合,表现为整合面。以多个生物碎屑颗粒-核形石泥粒/颗粒灰岩的旋回层的出现为标志,中间无明显界限。

海侵体系域:以浅灰、灰白色厚层生物碎屑颗粒灰岩和核形石颗粒灰岩夹零星铝土质泥岩斑块为特征,向上变为生物碎屑粒泥灰岩。底部富含孔虫、蛭类、棘皮动物和双壳类化石,顶部生物含量明显减少。以上特征表明沉积水体由浅变深,沉积

物堆积速率较慢,为台地边缘浅滩向开阔台地环境沉积过渡,属于退积型碳酸盐岩台地。

最大海泛面:以浅灰带紫红色生物碎屑粒泥灰岩,富含黄铁矿为特征,可能属于相对较深开阔台地环境。

高水位体系域:浅灰色带红色生物碎屑颗粒灰岩、核形石颗粒灰岩,局部重结晶作用较强,表现为粗晶白云岩,含腕足类、蛭类、有孔虫等化石。以上特征表面沉积水体极浅,受淡水淋滤作用影响明显,重结晶作用和白云石化作用明显,属于台地边缘相环境,可能为进积型碳酸盐岩台地。

综合所述,研究区上石炭统可划分为7个三级层序,其沉积环境主要为开阔台地和台地边缘浅滩环境,这与 Vail^[15] 认为三级层序时限范围是1~5Ma 基本吻合。其中黄龙组下段时代近似为罗苏阶和滑石板阶,相当于 Bashkirian(318.1~311.7 Ma)阶,时限6.4Ma,见两个三级层序,每个级层序的时限约为3.2Ma;黄龙组上段时代近似为达拉阶,相当于 Moscovian(311.7~306.5 Ma)阶,时限4.8Ma,见两个三级层序,每个三级层序时限约为2.4Ma;船山组下段时代近似为小独山阶,相当于 Kasimovian 和 Gzhelian(306.5~299.5 Ma)阶,时限7.0Ma,见3个三级层序,每个三级层序的时限约为2.3Ma。以上7个三级层序显示以下特征:

(1)低水位体系域常以黄色铝土质泥岩、紫红色泥质粉砂岩或粉砂质泥岩和灰色含鲕粒岩屑颗粒灰岩为特征,冲刷界面较清晰,陆源石英和岩屑较多,生物含量较少,存在一定程度的沉积间断,整体为潮坪和局限台地环境。

(2)海侵体系域常以生物碎屑泥粒灰岩、生物碎屑粒泥灰岩和生物碎屑颗粒灰岩为特征,为明显的退积型副层序组。可见明显的海平面上升过程,生物碎屑类型丰富、含量高,泥质含量中等,整体为开阔台地-台地边缘生物滩环境。

(3)凝缩层见于TST上部,局部不易区分,常以浅灰色、灰色薄层灰泥石灰岩、含生物碎屑灰泥石灰岩、生物碎屑粒泥灰岩、铝土质泥岩和似瘤状灰岩组成。内部含保存完整的原地生物化石,主要为腕足类和有孔虫为主,局部黄铁矿发育,反映了最大海泛面。颜色深、薄层状,生物含量少,为TST退积型和HST加积-进积型副层序组的转换面。

(4)高水位体系域常为台地边缘浅滩和生物碎屑滩环境、主要以生物碎屑颗粒灰岩和核形石颗粒灰岩等为主,局部见淡水淋滤作用,少量白云石化,

向层序顶,淡水淋滤作用更明显,为加积-进积型副层序组。见多个生物碎屑灰岩-核形石灰岩旋回层,可能代表了多次的四、五级层序海平面变化旋回。

(5) I型层序界面常见沉积间断,表现为紫红色泥质粉砂岩、潮坪相黄色泥岩和淡水淋滤的灰岩和冲刷界面,界面之上紧接 TST。II型层序界面常为整合界面,表现为生物碎屑灰岩与核形石灰岩等岩性转换面,为 HST 进积型-TST 退积型的结构转换面。

5 沉积层序与海平面变化规律

研究区 7 个三级层序反映了晚石炭世具有 7 个较大的海平面升降旋回,平均每个旋回约为 2.3 ~ 3.2Ma,与 Vail^[20] 三级层序平均时间延续约为 2 ~ 5 Ma 大致相当,与川滇黔桂地区石炭纪三级层序时限基本一致^[26,30]。研究区的沉积相和海平面相对变化曲线反映 7 个较大的海平面变化旋回,其成因可能与全球冰盖的增长和衰减及洋中脊的变化有关。

CSQ1 所对应的海平面升降,为晚石炭世的海侵开始,瞬间升降幅度最大,发生了两次较大的风暴沉积,沉积深度可能达到风暴浪基面附近,见介壳堆积层,沉积速率较大,可能沉积时限最短。其对北川茨子娅和江油马角坝地区影响较大,主体为风暴沉积,海平面快速上升到最高点,后期又相对缓慢下降,沉积了似潮坪/台地边缘浅滩相的生物碎屑灰岩。

CSQ2 海平面升降幅度不大,海水较浅,沉积物界面与海平面较接近,其容纳空间较小,主要为以极浅水风暴沉积生物碎屑颗粒灰岩为主。正粒序、反粒序和复合粒序发育。沉积剖面见核形石泥粒灰岩层,岩性在江油、北川一带分布不稳定,仅见北川茨子娅-江油马角坝一带的局部地区。

CSQ3 对应的海平面,先是缓慢上升,而后下降,幅度较大,延续时间可能最长。整个川西北地区 and 川东地区沉没在海平面以下,成为开阔台地相和局限台地相海盆。碳酸盐岩分布广泛,是晚石炭世最大的一次海侵事件,川东地区丰富的油气资源与该期海平面变化存在直接和密切的关系。

CSQ4 与 CSQ3 类似,先是缓慢上升,而后下降,幅度偏大,整个川西北地区和川东地区接受碳酸盐沉积,但深度较 CSQ3 浅。

CSQ5 对应的海平面变化,先为缓慢上升,而后相对快速下降,沉积层局部暴露水面,发生沉积间断,沉积间断的延续时间不长。局部为潮坪相铁泥

质粉砂岩、粉砂质泥岩,局部为鲕粒岩屑颗粒灰岩(可能为整合接触)。

CSQ6 和 CSQ7 对应的海平面变化,升降幅度不大,海水较浅,沉积物界面与海平面较接近,其容纳空间较小,主要为生物碎屑颗粒灰岩和核形石颗粒灰岩沉积,为晚古生代海平面持续海退的结果。生物碎屑灰岩-核形石灰岩旋回层的发育为层序内高频层序,其成因与周期性的晚古生代冰川消融事件有密切的关系,其中 CSQ6 的水深较 CSQ7 较深。

总之,研究区主体为开阔台地到台地边缘浅滩相,CSQ1 水深可能突发性达到风暴浪基面,变化幅度不超过 100m;其它均在浪基面附近,变化幅度主体为 0 ~ 50m 之间为主,为低幅海平面变化。

从海平面升降造成的海水进退的速度、幅度和频率考虑,CSQ1、CSQ3 和 CSQ4 对应的海平面变化幅度较大,海平面变化速率主要表现为突发性的快速上升到缓慢下降或缓慢上升到相对下降的特点。CSQ2、CSQ5、CSQ6 和 CSQ7 对应的海平面变化幅度不大,同一层序内环境变化为开阔台地到台地边缘浅滩环境,海平面变化具有缓慢上升和缓慢下降的特点。

从海水进退或升降过程中的振荡频率来看,对应的海平面变化呈低频的海平面上升或海退,高频的海平面下降和海进,其海平面升降的细节变化均和更高级的海平面变化密切相关。研究区晚石炭世和早二叠世部分组成一个二级旋回,呈现出一个明显的大的海退-海进过程,最大海退为达拉阶早期,与 CSQ3 对应。在这个大的海退-海进过程中,伴随着多期的次级海平面变化。在晚石炭世共发生 7 次周期性的三级层序海平面变化,并伴随着多次四级、五级乃至高频海平面变化,进而组成了简单而复杂的晚石炭世地层格架,其原因可能主要是晚古生代冰期和风暴事件共同作用的结果。

6 沉积层序形成机制探讨

研究区晚石炭世为相对稳定的碳酸盐台地环境。这一时期冈瓦纳大陆冰川的消长引起了全球海平面变化,进而形成了不同的层序地层格架。同时,不同的大地构造环境、物源供给和沉积速率差异造成了不同地区地层格架的差异。研究区处于构造较为稳定的清水碳酸盐台地环境,岩石类型单调,水深变化幅度主体不大于 50m,生物种属丰富,主体表现为三级层序地层格架,局部呈现为较好的四级乃至高频海平面变化的副层序级的沉积记录。

总之,研究区独特的碳酸盐层序沉积格架的动力机制主要源于晚古生代冰川型全球海平面变化,其成因可能与大洋水体积的周期型变化或大陆冰盖的增长和衰减有密切关系^[19],同时受到古地形、物源和沉积物供应量变化的制约^[31]。

7 结论

通过对研究区 3 条石炭系剖面露头层序地层学的分析,结合碳酸盐岩微相、古生物学、成岩作用、沉积相和沉积事件等理论,得出如下结论:

(1)研究区石炭纪为典型的陆表海沉积,地形平坦,构造下降相对缓慢,海水较浅。沉积物界面与海平面接近,主体为碳酸盐开阔台地和浅滩沉积环境。水体深度主体为 0~50m 左右,为低幅高频低速的海平面变化。

(2)江油马角坝地区上石炭统可划分出 7 个三级层序,反映了研究区晚石炭世具有 7 次相对较大的海平面升降旋回。若以晚石炭世(318~299Ma)19Ma 计,平均每个层序约为 2~7Ma,这与三级层序平均时间延续约为 2-5 Ma 基本一致。三级层序发育 TST 和 HST,有时缺失 LST,局部 CS 难以识别。

(3)从海平面升降造成的海水进退的速度、幅度和频率考虑,CSQ1、CSQ3 和 CSQ4 对应的海平面变化幅度较大,海平面变化速率主要为突发性的快速上升到缓慢下降或缓慢上升到相对下降的特点。CSQ2、CSQ5、CSQ6 和 CSQ7 对应的海平面变化幅度不大,为缓慢上升和缓慢下降的特点。晚石炭世 7 次周期性的三级层序海平面变化,伴随着多次四、五级乃至高频海平面变化,进而组成了简单而复杂的碳酸盐岩地层格架,可能是晚古生代冰期和风暴事件共同作用的结果。

(4)研究区独特的碳酸盐岩层序沉积格架的动力机制主要源于晚古生代冰川型全球海平面变化,其成因可能与大洋水体积的周期性变化或大陆冰盖的增长和衰减有密切关系,同时受到古地形、古气候、物源和沉积物供应量变化的制约。

参考文献:

[1] 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. 1-603.

[2] 覃建雄,曾允孚,黄志勋等. 四川龙门山马角坝地区石炭纪层序地层及海平面变化研究[J]. 岩相古地理,1996,16(1):19-33.

[3] 张遵信. 四川江油马角坝中晚石炭世的蜓类[J]. 古生物学报,1964,(2):217-232.

[4] 王治平,叶干. 四川江油马角坝早石炭世异珊瑚[J]. 武汉地质学院学报地球科学版,1984,(3):33-38.

[5] 杨剑. 四川江油匡南地区石炭系的重新划分[J]. 西安工程学院学报,1999,21(1):36-38.

[6] 方少仙,侯方浩,李凌等. 四川华蓥山以西石炭系黄龙组沉积环境的再认识[J]. 海相油气地质,2000,5(1):158-166.

[7] 冯增昭,杨玉卿,金振奎等. 从岩相古地理论中国南方石炭系油气潜景[J]. 古地理学报,1999,1(4):86-92.

[8] 李儒峰,刘本培,赵澄林. 扬子板块石炭纪沉积层序及其全球性对比研究[J]. 沉积学报,1997,15(3):23-28.

[9] 梅冥相,孟庆芬,易定红等. 黔桂地区石炭系层序地层格架及海平面变化[J]. 地球学报,2004,25(1):39-46.

[10] 王增吉. 中国地层(8)中国石炭系[M],北京:地质出版社,1990.

[11] 李国华. 川西地区北部上二叠统沉积相及其与油气关系的研究[D]. 成都:西南石油大学,2003. 1-49.

[12] 周铁明,盛金章,王玉净. 云南广南小独山石炭-二叠系界线地层及蜓类分带[J]. 微体古生物学报,1987,(2)123-160.

[13] 张正华,王治平,李昌全. 黔南二叠纪地层[M]. 贵阳:贵州人民出版社,1988. 1-113.

[14] 张遵信,周建平. 论中国的石炭系与二叠系界线[J]. 地层学杂志,2000,24(3):224-229.

[15] VAIL P R, MICHUAN R M, THONOSON S. Seismic stratigraphy and global changes of sea level [A]. Payton C E. Seismic Stratigraphy—Application to Hydrocarbon Exploration (Part 3): relative changes of sea level from coastal onlap [C]. Tulsa: AAPG Memoir, 1977,26:63-81.

[16] VAIL P R. Seismic stratigraphy interpretation using sequence stratigraphy. Part1: seismic stratigraphy interpretation procedure [A]. Bally A W. Atls of Seismic Stratigraphy, AAPG studies in Geology [C]. Tulsa: AAPG Publishing Bureau, 1987, 27: 1-10.

[17] VAN WAGONER J C et al. An overview of the fundamentals of sequence stratigraphy and key definitions [A]. Sea-Level Changes - An Integrated Approach [C]. Tulsa: SEPM Speial Publication, 1988,42:39-45.

[18] HAQ B V ,HARDENBOL J, VAIL P I. Mesozoic and Cenozoic chronostratigraphy and eustatic cycles [A]. Wilgus C K, Hastings B S, Posamentier H M, et al. Sea Level Changes: An Integrated Approach [C]. Tulsa: SEPM Special Publication, 1988,42:71-108.

[19] SCHANLEY K W and MC CABE P J. Perspectives on the sequence sratigraphy of continental strata [J]. AAPG Bulletin, 1994,78(4):544-568.

[20] VAIL P R, AUDEMARD F, BOWMAN S A, EISNER P N. The Stratigraphic Signatures of Tectonics. Eustasy and Sedimentology — An Overview, Cycles and Events in Stratigraphy[M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1991. 617-659.

[21] GOLDDHAMMER R K, DUN D A. Depositional cycles, composite sea-level changes, cycles stacking patterns, and the hierarchy of stratigraphic forcing: An example from Alpine Triassic platform carbonates in northern Italy [J]. Bulletin of the Geological Geological of America, 1990 ,102(5):535-562.

- [22] MITCHUM R M, VAN WAGONER J C. High frequency sequences and their stacking patterns; sequence-stratigraphic evidence of high frequency eustatic cycles [J]. *Sedimentary Geology*, 1991, 70(2): 131 – 160.
- [23] VAN WAGONER J C. Overview of sequence stratigraphy of foreland basin deposits; terminology, summary of papers, and glossary of sequence stratigraphy [A]. Van Wagoner J C & Bertram G T. *Sequence Stratigraphy of Foreland Basin Deposits: Outcrop and Subsurface Examples from the Cretaceous of North America* [C]. Tulsa: AAPG Publishing Bureau, 1995, 64: 10 – 101.
- [24] 张海清, 刘本培, 方念乔. 滇西南古特提斯石炭纪海山碳酸盐台地的层序地层学研究[J]. *沉积学报*, 1997, 15(4): 18 – 23.
- [25] 廖卓庭. 中国与西欧石炭系的对比[J]. *地层学杂志*, 1999, 23(1): 1 – 9.
- [26] 彭军, 陈洪德, 田景春等. 川滇黔桂地区石炭系层序地层研究[J]. *沉积学报*, 2000, 18(2): 190 – 197.
- [27] 梅冥相, 马永生, 邓军, 等. 滇黔桂盆地及其邻区石炭纪至二叠纪层序地层格架及三级海平面变化的全球对比[J]. *中国地质*, 2005, 32(1): 13 – 24.
- [28] 林小兵, 李国忠, 田景春等. 黔南石炭系层序地层格架中碳酸盐岩成岩作用研究[J]. *成都理工大学学报*, 2007, 34(3): 267 – 272.
- [29] 王训练. 露头层序地层学研究的几个基本理论问题[J]. *中国科学*, 1999, 29(1): 22 – 30.
- [30] 刘本培, 李儒峰, 尤德宏. 黔南独山石炭系层序地层及麦粒蜓带冰川型全球海平面变化[J]. *地球科学*. 1994, 19(5): 553 – 564.
- [31] 王鸿祯, 史晓颖. 沉积层序及海平面旋回的分类级别 – 旋回周期的成因讨论[J]. *现代地质*, 1998, 12(1): 1 – 16.

Sequence stratigraphy of the Upper Carboniferous strata in the Majiaoba region, Jiangyou, Sichuan

XU Jin-long¹, HONG Tian-qiu²

(1. *Anhui Institute of Geological Survey, Hefei 230001, Anhui, China*; 2. *School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China*)

Abstract: The Upper Carboniferous strata in the Majiaoba region, Jiangyou, Sichuan are known for well-developed sections and abundant fossils, and thus selected as a classical area for the study of sedimentary characteristics of the Sichuan Basin and even the whole area of the Upper Yangtze area during the Late Carboniferous. Sequence stratigraphy of the Upper Carboniferous strata in the Majiaoba region, Jiangyou, Sichuan is based on the principles and methods of sequence stratigraphy, in integration of carbonate microfacies, palaeontology, diagenesis, sedimentary facies and depositional events. Seven third-order sequences have been distinguished, and represent seven major cycles of sea-level changes in this region. The transgressive and highstand systems tracts are recognized while the low stand systems tract is absent and condensed sections are seldom observed. Each sequence has recorded the time duration of ca. 2.7 Ma, and may be accompanied by several fourth- to fifth-order high-frequency sea-level changes, which may be constrained by the Late Palaeozoic glacial-type sea-level changes, storm events, palaeotopography, palaeoclimatology, provenance and sediment supply.

Key words: sequence stratigraphy; Upper Carboniferous; sea-level change; Majiaoba region in Jiangyou