

doi:10.3799/dqkx.2012.017

# 川西北二叠系茅口组海相优质烃源岩发育控制因素

李红敬<sup>1,2</sup>, 解习农<sup>1\*</sup>, 黄俊华<sup>2</sup>, 陈慧<sup>1</sup>, 林正良<sup>3</sup>

1. 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

3. 中国石化石油物探技术研究院, 江苏南京 210014

**摘要:** 中国南方茅口组地层为区域性烃源岩。茅口组底部和顶部均发育硅质岩, 顶部地层残余有机碳高达 10.90%, 其厚度 16 m, 为优质烃源岩层, 而该组底部为差烃源岩。通过岩石学、碳同位素和微量元素分析, 表明华南川西北地区茅口组存在 2 期上升流, 分别发育于茅口组沉积早期和晚期; 上升流所带来的营养盐有利于生物的发育, 产生高的初级生产力。结合碳同位素资料, 发现茅口组古海洋生物产率呈现出高一低一高的变化过程, 而大气中 CO<sub>2</sub> 含量变化也呈现高一低一高的变化过程。虽然茅口组底部为高初级生产力层段, 但是由于该沉积及早期成岩阶段为常氧环境, 不利于沉积有机质保存, 形成了差烃源岩, 而茅口组顶部沉积时期存在大的海侵事件, 海平面的上升导致厌氧环境形成, 沉积有机质大量保存下来, 形成优质烃源岩层段。该套烃源岩形成与发育主控因素分析是中国南方海相优质烃源岩分布预测和油气成藏研究的基础。

**关键词:** 海相优质烃源岩; 岩石学; 碳同位素; 上升流; 茅口组; 二叠系; 川西北; 地层学。

中图分类号: P618.1

文章编号: 1000-2383(2012)01-0171-10

收稿日期: 2011-08-20

## Main Factors Controlling the Formation of Excellent Marine Source Rocks in Permian Maokou Formation of Northwest Sichuan, China

LI Hong-jing<sup>1,2</sup>, XIE Xi-nong<sup>1\*</sup>, HUANG Jun-hua<sup>2</sup>, CHEN Hui<sup>1</sup>, LIN Zheng-liang<sup>3</sup>

1. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. SINOPEC Geophysical Research Institute, Nanjing 210014, China

**Abstract:** The Permian Maokou Formation in southern China is taken as regional source rocks. Both the bottom and the top layers of Maokou Formation at the Shangsi section in Guangyuan, Northwest Sichuan developed siliceous rocks, however, only the top layer is taken as excellent source rocks with a thickness of 16 m and the maximum residual organic carbon of 10.90%. Based on the analysis of petrology, carbon isotopes and trace elements, it suggests the existence of upwelling in both the Wordian and Capitanian periods. Nutrient elements brought by upwelling are beneficial to form high primary productivity. The paleo-oceanic phytoplankton growth rate became from high to low and finally to high which coincided with the changes of atmospheric  $p_{CO_2}$ . The lower Maokou Formation with high primary productivity is poor source rock. The reason is that normoxic environment during the deposition and earlier diagenesis stages of the lower Maokou Formation went against the conservation of organic matter. While the upper Maokou Formation with high primary productivity is taken as excellent source rocks, as a great transgression event during Late Maokou period result in the occurrence of anaerobic environment which led to the formation of excellent source rock layer. The study on the controlling factors in the formation of excellent source rocks in the Maokou Formation is the base of distribution prediction of marine excellent source rocks and hydrocarbon reservoirs prediction in southern China.

**Key words:** excellent marine source rock; petrology; carbon isotope; upwelling; Maokou Formation; Permian; Northwest Sichuan; stratigraphy.

**基金项目:** 中国石油化工股份有限公司海相油气勘探前瞻性项目(No. G0800-06-ZS-319); 湖北省自然科学基金(No. 2008CDA095); 地质过程与矿产资源国家重点实验室开放课题(No. GPMR200914); 中国地质大学(武汉)构造与油气资源教育部重点实验室开放基金项目(No. TPR-2010-07).

**作者简介:** 李红敬(1983-), 女, 在读博士, 主要从事层序地层学和烃源岩的研究。\* 通讯作者: 解习农, E-mail: xnjie@cug.edu.cn

中二叠世栖霞组—茅口组沉积时期,中国南方形成了海西期第一套区域性烃源岩(马立桥等, 2007),其中栖霞组—茅口组泥岩和碳酸盐岩为重要烃源岩层(张永刚等,2007).蔡开平等(2003)对川西北广旺地区二、三叠系烃源岩研究指出,茅口组属于很好的烃源岩层,并指出有机碳含量与沉积相、地质时代密切相关.腾格尔等(2008)对川西北地区海相地层的研究表明,龙门山北段海相烃源岩主要有筇竹寺组、大隆组优质泥质烃源岩和栖霞组、茅口组优质碳酸盐岩烃源岩,并指出龙门山逆冲推覆构造带和川西拗陷深处具有良好的海相油气勘探前景.

海相沉积中有机质富集因素主要为沉积物形成时水体中生物生产率、沉积速率、沉积阶段及早期成岩阶段氧化还原条件、深部流体作用(陈践发,

2006).国外学者研究指出潜在烃源岩层有机质富集与缺氧环境密切相关,其主要沉积于 4 种缺氧背景:缺氧湖泊、缺氧的封闭海盆、由上升流产生的缺氧层和开放大洋缺氧层(Demaison and Moore, 1980).水体中的生物生产率是控制沉积物中有机碳丰度的最重要因素(Pedersen and Calvert, 1990).张水昌等(2005)指出烃源岩的形成取决于生烃母质生物的生存环境和有机质良好的保存条件,这 2 个因素从根本上来说又取决于生物繁殖时和埋藏时的古气候、古洋流、古构造及古环境等各要素之间的良好匹配.前人已认识我国南方川西北地区茅口组地层为良好的烃源岩层,但对该套烃源岩发育控制因素研究甚少.本文利用地球化学指标对扬子地区典型剖面古海洋环境进行判识,分析残余有机碳与该区沉

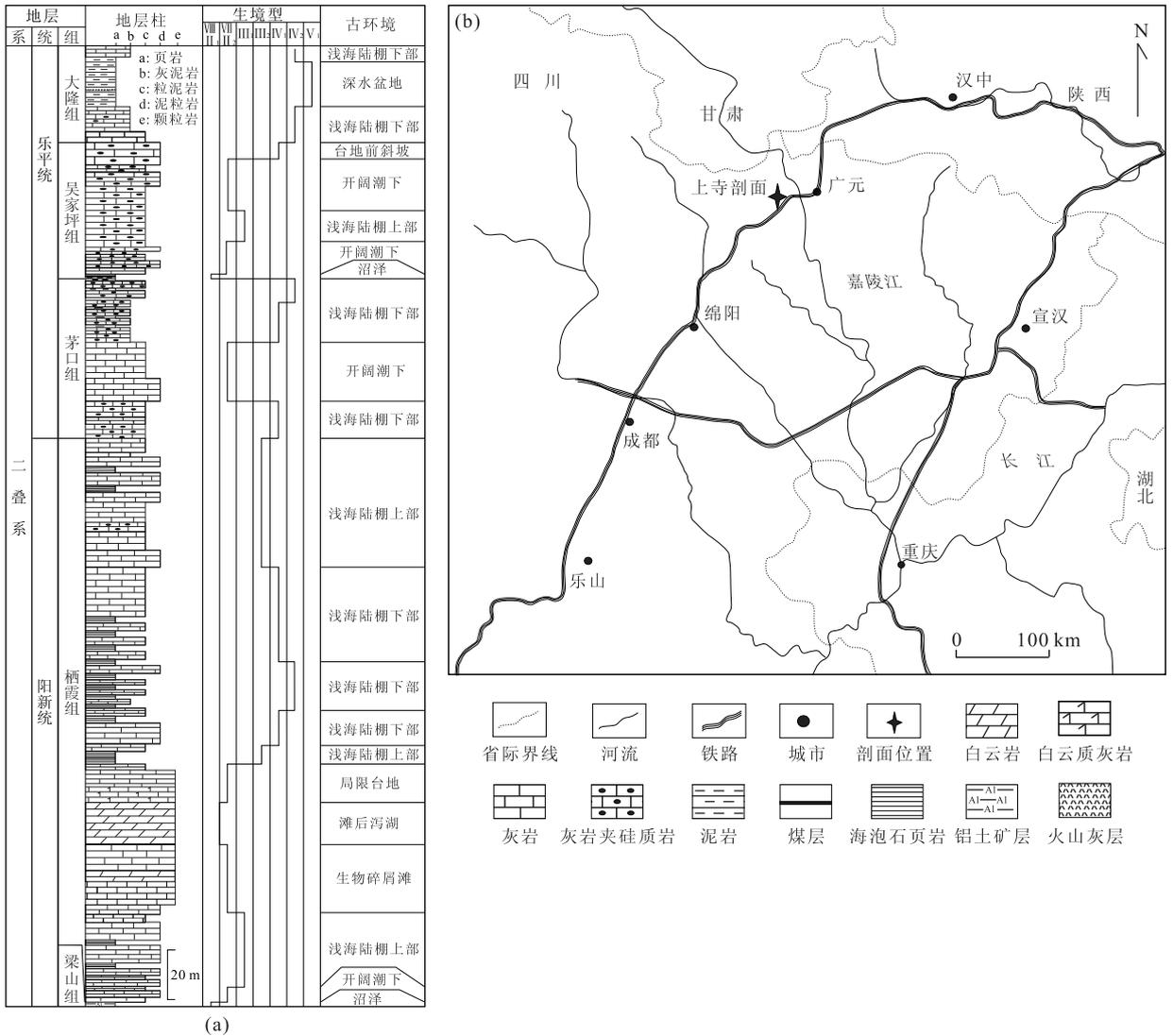


图 1 二叠系四川广元上寺剖面岩性柱状图(a)及其地理位置(b)

Fig. 1 Map of the lithology (a) and location (b) of the Shangsi section in Guangyuan, Northwest Sichuan

积环境的关系,进而探讨华南地区茅口组优质烃源岩发育的主要控制因素。

### 1 区域地质背景

茅口期研究区整体位于古特提斯洋东侧、赤道偏南一带(Yan and Liu, 2007)。在构造上,四川广元地区南北跨于扬子准地台及秦岭褶皱系 2 个一级构造单元之间,位于龙门山与大巴山褶皱带的交接地带。该地区地质构造较为复杂,地层发育齐全,我国许多标准地层剖面创建于此。广元长江沟地层剖面位于四川省广元市剑阁县的上寺镇,北距广元市 40 km,南距成都 260 km(图 1a)。该剖面出露的二叠系地层从下向上依次为梁山组、栖霞组、茅口组、吴家坪组和大隆组(图 1b)。本文关于四川广元上寺剖面年代地层和岩石地层的划分(图 1)分别参考 Sun *et al.* (2008)和 Yan *et al.* (2008)。本文研究的层段中二叠世茅口组,厚度约 64 m,其岩性与下伏栖霞组明显不同,以大套碳酸盐岩夹黑色硅质岩为特征(图 2)。茅口组顶底部均为灰白色薄层—中厚层碳

酸盐岩夹黑色硅质条带或深灰色页岩,中部为中—巨厚层灰白色碳酸盐岩,在碳酸盐岩裂缝中可见干沥青和油苗。剖面整体由下向上泥质逐渐增多。

### 2 样品和测试

样品采自于四川广元上寺剖面,残余有机碳样品共 58 件,采样间隔约 1 m,残余总有机碳测试在中国石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所实验研究中心完成,仪器为美国 Leco CS-200 碳硫测定仪,灵敏度为 3~5 位有效数字,准确度: $C > 0.1\% \pm 0.001$  或  $0.1\% \pm 0.005$ ;  $C < 0.1\% \pm 0.0002$ 或 $0.1\% \pm 0.005$ 。微量元素样品共 28 件,其中硅质岩样品 2 件,泥岩样品 4 件,微量元素分析仪器为 Agilent7500a 等离子体质谱仪,测试结果见表 1。碳氧同位素样品共 37 件,其实验方法及流程见 Bai *et al.* (2008)。微量元素和碳氧同位素分析均是在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成。

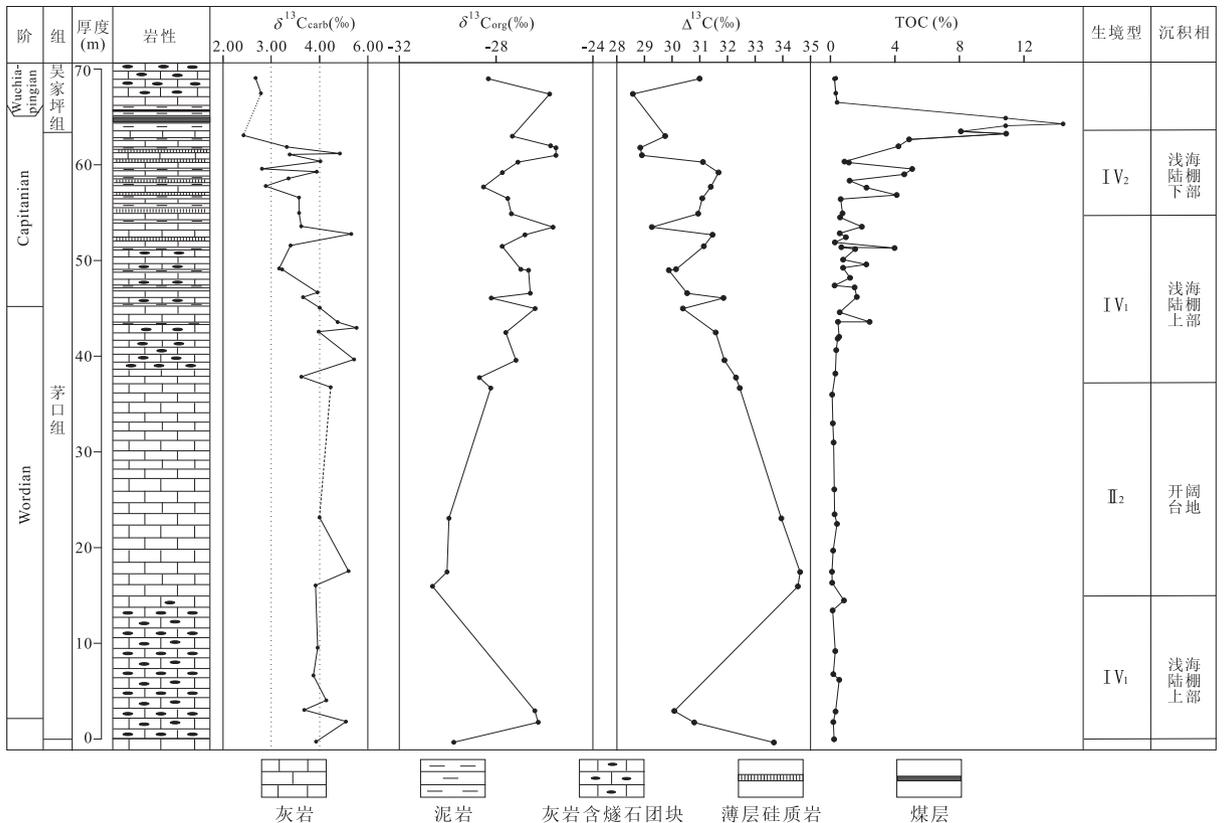


图 2 四川广元上寺剖面茅口组  $\delta^{13}C_{carb}$ 、 $\delta^{13}C_{org}$ 、 $\Delta^{13}C$  和 TOC 分布( $\Delta^{13}C = \delta^{13}C_{carb} - \delta^{13}C_{org}$ ) (生境型的划分据 Yan *et al.*, 2008)  
 Fig. 2 Paired carbon isotope and total organic carbon (TOC) from Maokou Formation at the Shangsi section in Guangyuan, Northwest Sichuan ( $\Delta^{13}C = \delta^{13}C_{carb} - \delta^{13}C_{org}$ )



通常  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  和  $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$  正相关指示岩石受大气淡水成岩作用影响 (Bai *et al.*, 2008). 本文所研究剖面茅口组样品碳氧同位素相关性很差 ( $R^2=0.004$ ), 表明所采样品受后期淡水成岩作用影响很弱.

### 3 有机质丰度特征

秦建中等 (2007) 通过生排烃模拟实验指出, 对于未成熟—低成熟阶段 ( $R_0 < 0.75\%$ ) 的烃源岩而言, 利用残余有机碳测试结果表示原始有机质含量时, 不必对其样品的残余有机碳结果进行恢复. 本次研究实测四川广元剖面二叠系煤和黑色泥岩样品, 其镜质体反射率  $R_0$  为  $0.611\% \sim 0.689\%$ , 表明该套地层处于成熟早期阶段, 因此广元剖面茅口组测试所得残余有机碳含量近似代表原始有机质含量. 四川广元上寺剖面茅口组残余有机碳 (TOC) 分布范围为  $0.10\% \sim 10.90\%$ , 平均值为  $1.49\%$ . 从图 2 可见, TOC 高值区分布于茅口组顶部  $38 \sim 64 \text{ m}$ , 厚  $16 \text{ m}$ , 该段岩性为薄层碳酸盐岩、页岩和硅质岩互层, 上部岩层泥质含量较下部岩层泥质含量高, TOC 值最高可达  $10.90\%$ , 为优质烃源岩层段. 从四川广元上寺剖面茅口组 TOC 分布情况 (图 2) 可知, 川西北在二叠系茅口期末沉积有机质丰富.

四川广元上寺剖面二叠系茅口组沉积相和生境型主要发育  $\text{II}_2$ 、 $\text{IV}_1$ 、 $\text{IV}_2$  这 3 种生境型类型 (颜佳新和刘新宇, 2007), 各生境型发育层位见图 2. 生境型  $\text{II}_2$  为开阔台地相, 岩性主要为灰白色厚层—巨厚层状灰岩, TOC 分布范围  $0.10\% \sim 0.41\%$ , 平均值为  $0.21\%$ ; 生境型  $\text{IV}_1$  为浅海陆棚上部, 岩性为中层—厚层状灰岩夹燧石条带或层状硅质岩, TOC 分布范围  $0.14\% \sim 3.98\%$ , 平均值为  $0.92\%$ ; 生境型  $\text{IV}_2$  为浅海陆棚下部, 岩性为灰色薄层—中层碳酸盐岩夹灰黑色钙质页岩, TOC 分布范围  $0.64\% \sim 10.90\%$ , 平均值为  $3.75\%$ . 由此可见, TOC 值在上述 3 种生境型的分布情况为  $\text{IV}_2 > \text{IV}_1 > \text{II}_2$ , 即 TOC 值从开阔台地相—浅海陆棚上部—浅海陆棚下部逐渐增大.

岩石中 TOC 值与岩性密切相关. 从表 2 中可见不同岩性 TOC 值差别较大, 42 件碳酸盐岩 (包含 4 种沉积结构: 薄层状、中层状、厚层状和巨厚层状) TOC 值范围为  $0.10\% \sim 10.90\%$ , 平均为  $1.17\%$ , 其中薄层状灰岩 TOC 值普遍很高, 分布范围  $1.22\% \sim 10.90\%$ , 平均值为  $5.16\%$ ; 硅质岩 (4 件) TOC 值范围为  $0.45\% \sim 0.96\%$ , 平均为  $0.78\%$ ; 钙质页岩 (6 件) TOC 值范围为  $2.43\% \sim 5.07\%$ , 平均

表 2 四川广元上寺剖面二叠系茅口组 TOC (%) 数据统计  
Table 2 TOC content (%) in different lithologies, Maokou Formation at the Shangsi section in Guangyuan, Sichuan

岩性	样品数	最小值	最大值	平均值
薄层状灰岩	5	1.22	10.90	5.16
中层状灰岩	26	0.14	2.24	0.78
厚层状灰岩	4	0.11	0.75	0.39
巨厚层状灰岩	7	0.10	0.41	0.21
硅质岩	4	0.45	0.96	0.78
钙质页岩	6	2.43	5.07	4.19

为  $4.19\%$ . 同一岩性不同沉积结构的岩石 TOC 值也不同, 从表 2 中可以得出, 从薄层状—中层状—厚层状—巨厚层状 TOC 值依次减小. 不同的沉积相带由不同结构的岩石或不同的岩性组合而成. TOC 值在不同岩性或同一岩性不同结构中分布不同, 进而导致了不同沉积相的 TOC 值存在差异.

### 4 海相优质烃源岩控制因素

烃源岩的形成必须具备 2 个基本条件: 一是生物大量繁殖, 成为油气生成的物质基础; 二是水体较深, 在浪基面以下能形成稳定的还原环境. 本文通过对四川广元上寺剖面茅口组岩石学、碳同位素、微量元素分析, 得出上扬子川西北地区茅口组顶部优质烃源岩层发育主要取决于上升流和海平面上升 2 个因素.

#### 4.1 上升流

茅口期华南上扬子地块位于古特提斯洋东侧、赤道偏南一带, 该区西侧受古特提斯洋流影响, 东侧受赤道暖流和赤道逆流影响 (Yan and Zhao, 2001). 海洋底部水向上涌流可造成  $\text{C}_{\text{carb}}$  同位素组成 ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ ) 偏轻, 而  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  偏重 (腾格尔等, 2005). 四川广元上寺剖面茅口组顶部  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  偏轻, 而  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  偏重可能是由于上升流造成的 (图 2). 本文对茅口组硅质岩 (2 件) 和灰黑色页岩 (4 件) 进行微量元素和稀土元素测试分析, 6 件样品的 Th/Sc 和 Th/U 平均比值分别为  $0.07$  和  $0.54$  (表 1), 这 2 对元素比值较上地壳中的平均比值 ( $1.00$  和  $3.81$ ) 以及地壳中同类岩石 (粘土岩) 的平均比值 ( $1.1$  和  $3.4$ ) 明显偏低, 说明了富铁镁质物源的存在 (McLennan and Taylor, 1980, 1991; McLennan *et al.*, 1990). 页岩和硅质岩稀土元素球粒陨石标准化后, Eu 具有较明显的负异常,  $\text{Eu}/\text{Eu}^*$  平均为  $0.66$ , 与上地壳平均值  $0.65$  相当 (于炳松等, 2003). 稀土元素数据北美页岩标准化后,  $\text{Ce}/\text{Ce}^*$  从  $0.44$  到  $0.98$ , 平均值为

0.61. Ce 的负异常明显,为大洋盆地环境(Murray *et al.*, 1990). 上述一系列的地球化学标志指示本文所研究剖面茅口组页岩和硅质岩应沉积在具有深源物质注入的远洋盆地背景中. 但这一认识与系统的沉积学研究所得出的开阔陆棚沉积环境的结论相差甚远,这可能是上升洋流将形成于大洋盆地背景中的物质带到大陆边缘陆棚环境中发生再沉积作用所致,从而造成了沉积在陆棚环境中的硅质岩在地球化学组成上保留了大洋盆地背景的特征.

上升流对有机质丰度高的烃源岩形成的控制作用主要通过改变环境的原始生产力和保存条件来实现,一方面,上升流所带来的底部营养盐有利于生物的发育,从而较大幅度地提高原始生产力;另一方面,从底层带来的底层水氧含量低,有利于缺氧环境的形成(Parrish, 1982; David and Paul, 2002). 华南地区茅口期硅质岩是上升流沉积模式的重要依据(颜佳新和刘新宇, 2007); 杨玉卿和冯增昭(1997)也认为华南地区下二叠统层状硅质岩具有生物化学成因硅质岩的特征. 因此,茅口组底部和顶部的硅质岩表明了富含营养盐的上升流存在,上升流产生高生物产率,并且高生物产率也可以解释  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  偏重(低  $\Delta^{13}\text{C}$  值)的现象. 四川广元上寺剖面茅口组  $\Delta^{13}\text{C}$  的变化趋势主要是受剖面上变化较大的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  值所控制,  $\Delta^{13}\text{C}$  低值区与该地层发育的硅质岩层段相一致(图 2). 现代海洋浮游生物实验和野外研究表明  $\epsilon_p$  的减少是由于生物产率的增大、细胞体积与表面积之比增大,或者大气中  $\text{CO}_2(\text{aq})$  的浓度减少(图 3)(Freeman and Hayes, 1992; Francois *et al.*, 1993; Popp *et al.*, 1998; Hayes *et al.*, 1999). 四川广元剖面茅口组  $\Delta^{13}\text{C}$  的变化指示上扬子川西北地区茅口期古海洋生物产率高—低—高的变化过程,大气中  $\text{CO}_2$  含量变化也呈现高—低—高的变化过程(图 3 虚线所示). 上扬子川西北地区茅口期古海洋由上升流(富营养表层水)到贫营养表层水再转化为上升流(富营养表层水),同期生物产率的变化与反映营养物质输入变化的岩性证据是一致的. 高生物产率层段分布于茅口组底部 a 段(0~15 m)和顶部 b 段(38~64 m)(图 4). 高生物产率层段 b,正好对应茅口组 TOC 高值区, TOC 分布范围 0.26%~10.90%, 平均为 2.12%, 其中 TOC 值大于 1.5% 的样品数占此段样品总数的 47%; a 段同样因上升流存在高生物产率,而其 TOC 值较顶部低,分布范围 0.14%~0.84%, 平均为 0.34%. a、b 岩层段 TOC 值存在明显差异,由此可见高初级生产力不是

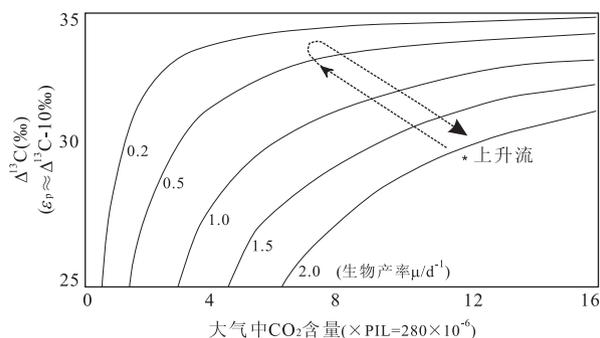


图 3 光合作用( $\epsilon_p$ )、大气  $\text{CO}_2$  含量和现代海洋浮游生物产率( $\mu\text{m}/\text{d}$ )关系(Hayes *et al.*, 1999, 有修改)

Fig. 3 Generalized relationship between the photosynthetic fractionation effect ( $\epsilon_p$ ), atmospheric  $\text{CO}_2$  levels, and modern marine phytoplankton growth rates ( $\mu\text{m}/\text{d}$ )

大气  $\text{CO}_2$  浓度( $280 \times 10^{-6}$ )采用前工业水平(PIL)

高沉积有机质保存的唯一控制因素(图 4).

#### 4.2 相对海平面变化

本文对上扬子地区广元上寺剖面茅口组样品 REE 含量依北美页岩组合(NASC)(Haskin and Haskin, 1966)标准化. 按  $\log[3\text{Ce}_n/(2\text{La}_n + \text{Nd}_n)]$  计算 Ce 异常值(冯洪真等, 2000), Ce 异常变化见图 4, 可见研究剖面顶部地层发育时期存在大规模的海侵事件. 根据上述内容可知研究剖面顶部地层大气  $\text{CO}_2$  浓度高, 存在温室效应, 古气候温暖湿润, 随着相对海平面的大幅度上升, 水动力条件由生物扰动强烈、动荡环境转为静水环境, 利于粘土、有机质等悬浮—细颗粒物沉淀、积聚, 与顶部地层发育薄纹层状微晶灰岩、泥灰岩和黑色页岩等实际情况相吻合. 相对海平面上升, 引起水体分层, 底部水体缺氧, 沉积界面处于氧化—还原界面之下. Hatch and Leventhal (1992)和 Jones and Manning (1994)通过研究北美、北欧黑色页岩地球化学特征, 提出过渡元素含量及  $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$ 、 $\text{U}/\text{Th}$ 、 $\text{V}/\text{Cr}$  和  $\text{Ni}/\text{Co}$  比值为古氧化还原条件的判识标志, 并确定出了相应标准. 对广元地区前人研究发现  $\text{Ni}/\text{Co}$  为判识该区古氧化还原条件的最佳指标(Xie *et al.*, 2008). 从图 4 可见, b 段沉积环境为厌氧环境, a 段虽然样品较少, 但依然可以反映此段的氧化还原条件为常氧环境. b 段岩层沉积及早期成岩阶段厌氧环境的形成是由于相对海平面上升(图 4). 海平面的上升致使 b 段沉积时期为还原条件, 降低有机质的氧化分解速率, 提高有机质埋藏量和保存率, 进而形成高 TOC 层段. 因此, 海平面变化是前述高生物产率层段 a 和 b

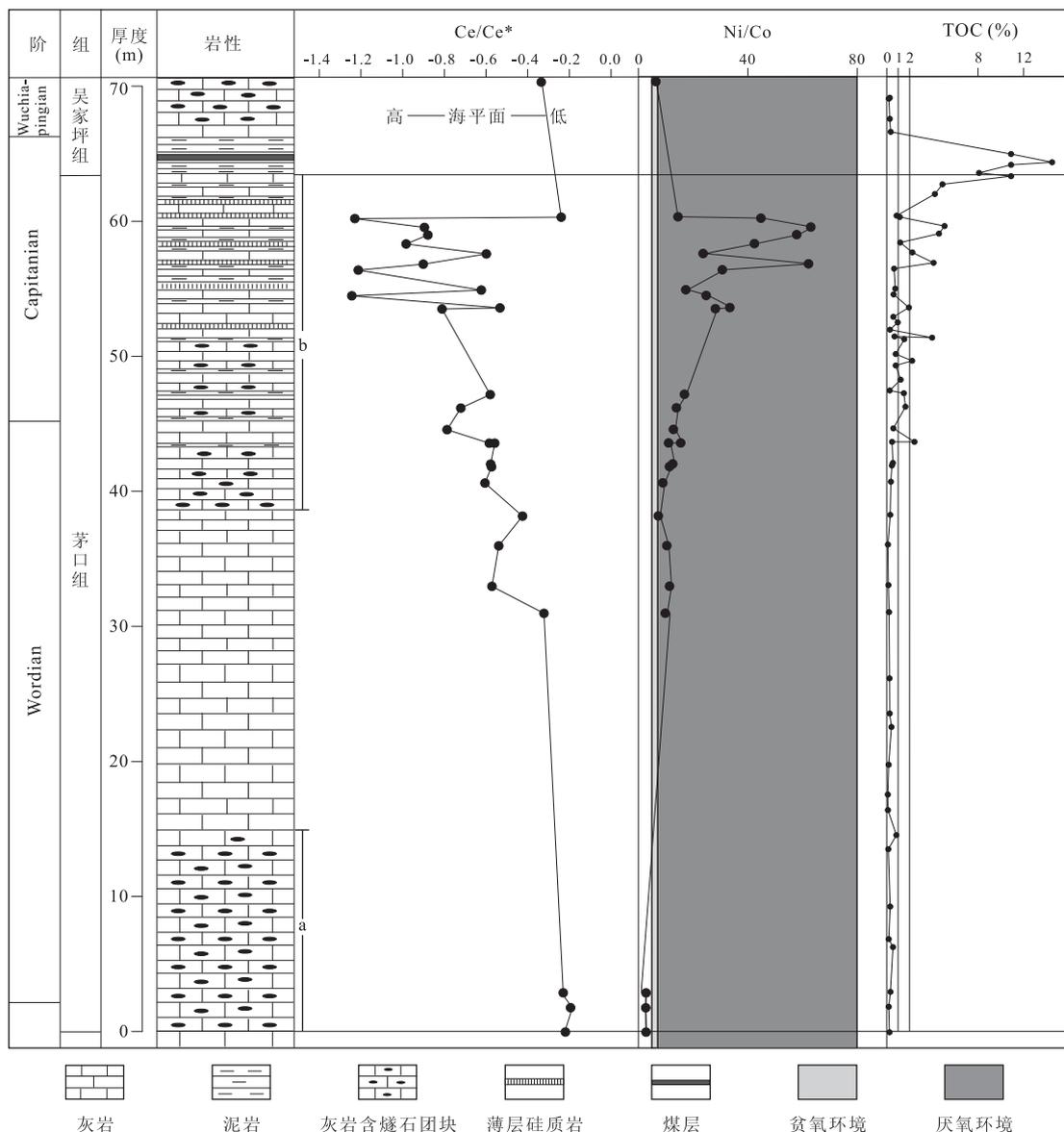


图 4 四川广元上寺剖面茅口组 Ce 异常及 Ni/Co 比值变化

Fig. 4 Ce abnormality and the ratio of Ni/Co from Maokou Formation at the Shangsi section in Guangyuan, Sichuan

段 TOC 差异的根本原因。

### 5 茅口组优质烃源岩发育模式

烃源岩形成是生命系统和地球系统相互作用的产物。华南川西北茅口组优质烃源岩发育模式见图 5。从古地理、古洋流格局来看，茅口期华南上扬子西北缘受古特提斯洋流影响，随着深部水体的上涌，铁等营养元素被带到水体表层；加上温暖的气候和较高的大气 CO<sub>2</sub> 含量，使得浮游生物大量繁盛，具有较高的初级生产力。Demaison and Moore (1980) 认为富有机质沉积层段形成的最好条件是底层水缺

氧。前述全岩 Ce 异常表明茅口期末该区存在海侵作用，海平面的上升使得海洋水体分层，底部形成厌氧环境；Ni/Co 比值为该段岩层早期成岩作用阶段的厌氧环境提供了证据。由此可见，上升流和相对海平面上升导致华南川西北地区茅口期生态、沉积环境发生了显著变化，沉积了一套茅口组顶部有机碳含量较高，有机质类型好的层段，以上因素构成茅口组顶部优质烃源岩段形成的主要因素。

### 6 结论

川西北茅口组有机质分布显示从开阔台地相一

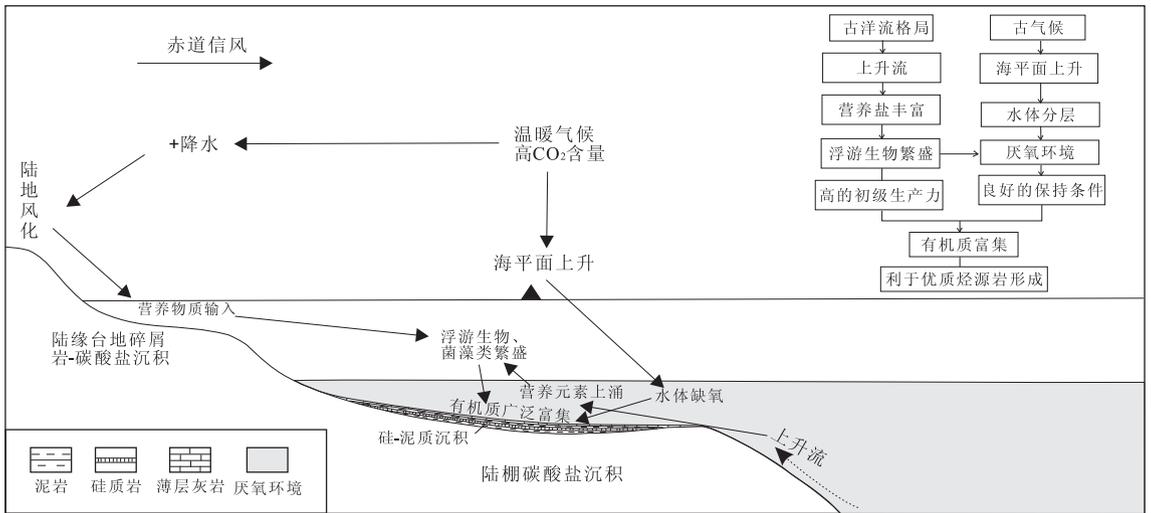


图 5 川西北二叠系茅口组海相优质烃源岩形成模式

Fig. 5 Forming model of excellent marine source rocks in Maokou Formation of the Permian strata, Northwest Sichuan

浅海陆棚上部—浅海陆棚下部逐渐增多的特点, 富含有机质的岩性为薄层灰岩、页岩, TOC 值在不同岩性、不同沉积相或生境型存在较大的差异。川西北茅口组顶部存在厚度为 16 m 的富含有机质层段, 其岩性为薄层碳酸盐岩、页岩和硅质岩互层。茅口组底部和顶部硅质岩发育指示了川西北地区茅口期存在 2 期上升流, 分别发育于茅口组沉积早期和晚期。碳同位素资料显示茅口期古海洋生物生产率呈现高一低一高的变化过程, 而大气中  $\text{CO}_2$  含量变化也呈现高一低一高的变化过程。虽然茅口期底部为高初级生产力层段, 但是由于该沉积及早期成岩阶段为常氧环境, 不利于沉积有机质保存, 故此段为差烃源岩; 而茅口组顶部沉积时期存在大的海侵事件, 海平面的上升导致厌氧环境形成, 沉积有机质大量的保存下来, 形成优质烃源岩层段。因此, 上升流和海平面上升是导致茅口组优质烃源岩形成的主控因素。

## References

- Bai, X., Luo, G. M., Wu, X., et al., 2008. Carbon isotope records indicative of paleoceanographical events at the Latest Permian Dalong Formation at Shangsi, Northeast Sichuan, China. *Journal of China University of Geosciences*, 19(5): 481–487. doi:10.1016/S1002-0705(08)60053-9
- Cai, K. P., Wang, Y. R., Yang, Y. M., et al., 2003. Evaluation of hydrocarbon source rocks in Permian and Triassic at Guangyuan-Wangcang region in Northwest Sichuan basin and a primary discussion on gas source. *Natural Gas Industry*, 23(2): 10–14 (in Chinese with

English abstract).

- Chen, J. F., Zhang, S. C., Bao, Z. D., et al., 2006. Main Sedimentary environments and influencing factors for development of marine organic-rich source rocks. *Marine Origin Petroleum Geology*, 11(3): 49–54 (in Chinese with English abstract).
- David, Z. P., Paul, K. L., 2002. An upwelling model for the Phosphoria sea: a Permian ocean-margin sea in the Northwest United States. *AAPG Bulletin*, 86(7): 1217–1235. doi:10.1306/61EEDC60-173E-11D7-8645000102C1865D
- Demaison, G. J., Moore, G. T., 1980. Anoxic environments and oil source bed genesis. *AAPG Bulletin*, 64(8): 1179–1209.
- Feng, H. Z., Erdtmann, B. D., Wang, H. F., 2000. Sea-level change and Ce anomaly in the whole rock from the Early Palaeozoic in the upper Yangtze region. *Science in China (Ser. D)*, 30(1): 66–72 (in Chinese with English abstract).
- Francois, R., Altabet, M. A., Goericke, R., et al., 1993. Changes in the  $\delta^{13}\text{C}$  of surface water particulate organic matter across the subtropical convergence in the SW Indian Ocean. *Global Biogeochemical Cycles*, 7(3): 627–644. doi:10.1029/93GB01277
- Freeman, K. H., Hayes, J. M., 1992. Fractionation of carbon isotopes by phytoplankton and estimates of ancient  $\text{CO}_2$  levels. *Global Biogeochemical Cycles*, 6(2): 185–198. doi:10.1029/92GB00190
- Haskin, M. A., Haskin, L. A., 1966. Rare earth in European shales: a redetermination. *Science*, 154(3748): 507–509. doi:10.1126/science.154.3748.507

- Hatch, J. R., Leventhal, J. S., 1992. Relationship between inferred redox potential of the depositional environment and geochemistry of the Upper Pennsylvanian (Missourian) stark shale member of the dennis limestone, Wabaunsee County, Kansas, U. S. A. *Chemical Geology*, 99: 65—82. doi: 10. 1016/0009—2541(92)90031
- Hayes, J. M., Strauss, H., Kaufman, A. J., 1999. The abundance of  $^{13}\text{C}$  in marine organic matter and isotopic fractionation in the global biogeochemical cycle of carbon during the past 800 Ma. *Chemical Geology*, 161: 103—125. doi: 10. 1016/S0009—2541(99)00083—2
- Jones, B. J., Manning, A. C., 1994. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones. *Chemical Geology*, 111: 111—129. doi: 10. 1016/0009—2541(94)90085
- Ma, L. Q., Dong, Y., Tu, X. L., et al., 2007. Petroleum prospect of marine sequences in South China. *Acta Petrolei Sinica*, 28(3): 1—7 (in Chinese with English abstract).
- McLennan, S. M., Taylor, S. R., 1980. Th and U in sedimentary rocks: crustal evolution and sedimentary recycling. *Nature*, 285: 621—624. doi: 10. 1038/285621a0
- McLennan, S. M., Taylor, S. R., 1991. Sedimentary rocks and crustal evolution: tectonic setting and secular trends. *Geology*, 99(1): 1—21. doi: 10. 1086/629470
- McLennan, S. M., Taylor, S. R., McCulloch, M. T., et al., 1990. Geochemical and Nd-Sr isotopic composition of deep-sea turbidites: crustal evolution and plate tectonic associations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54: 2015—2052. doi: 10. 1016/0016—7037(90)90269—Q
- Murray, R. W., Buchholtz ten Brink, M. R., Jones, D. L., et al., 1990. Rare earth elements as indicators of different marine depositional environments in chert and shale. *Geology*, 18: 268—271. doi: 10. 1130/0091—7613(1990)
- Parrish, J. T., 1982. Upwelling and petroleum source beds with reference to Paleozoic. *AAPG Bulletin*, 66(6): 70—774.
- Pedersen, T. F., Calvert, S. E., 1990. Anoxia vs. productivity: what controls the formation of organic-carbon-rich sediments and sedimentary rock? *AAPG Bulletin*, 74(4): 454—466.
- Popp, B. N., Laws, E. A., Bidigare, R. R., et al., 1998. Effect of phytoplankton cell geometry on carbon isotopic fractionation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62: 69—77. doi: 10. 1016/S0016—7037(97)00333—5
- Qin, J. Z., Zheng, L. J., Teng, G. E., 2007. Study on the restitution coefficient of original total organic carbon for high mature marine hydrocarbon source rocks. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(6): 853—860 (in Chinese with English abstract).
- Sun, Y. D., Lai, X. L., Jiang, H. S., et al., 2008. Guadalupian (Middle Permian) conodont faunas at Shangsi section, Northeast Sichuan Province. *Journal of China University of Geosciences*, 19(5): 451—460. doi: 10. 1016/S1002—0705(08)60050—3
- Teng, G. E., Liu, W. H., Xu, Y. C., et al., 2005. Correlative study on parameters of inorganic geochemistry and hydrocarbon source rocks formative environment. *Advances in Earth Science*, 20(2): 193—199 (in Chinese with English abstract).
- Teng, G. E., Qin, J. Z., Fu, X. D., et al., 2008. Basic conditions of marine hydrocarbon accumulation in Northwest Sichuan basin: high quality source rocks. *Petroleum Geology & Experiment*, 30(5): 478—483 (in Chinese with English abstract).
- Xie, X. N., Li, H. J., Xiong, X., et al., 2008. Main controlling factors of organic matter richness in a Permian section of Guangyuan, Northeast Sichuan. *Journal of China University of Geosciences*, 19(5): 507—517. doi: 10. 1016/S1002—0705(08)60056—4
- Yan, J. X., Liu, X. Y., 2007. Geobiological interpretation of the oxygen-deficient deposits of the Middle Permian marine source rocks in South China: a working hypothesis. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(6): 789—796 (in Chinese with English abstract).
- Yan, J. X., Ma, Z. X., Xie, X. N., et al., 2008. Subdivision of Permian fossil communities and habitat types in Northeast Sichuan, South China. *Journal of China University of Geosciences*, 19(5): 441—450. doi: 10. 1016/S1002—0705(08)60049—7
- Yan, J. X., Zhao, K., 2001. Permo-Triassic paleogeographic, paleoclimatic and paleoceanographic evolutions in eastern Tethys and their coupling. *Science in China (Ser. D)*, 44(11): 968—978. doi: 10. 1007/BF02875390
- Yang, Y. Q., Feng, Z. Z., 1997. Formation and significance of the bedded siliceous rocks of the Lower Permian in South China. *Acta Petrologica Sinica*, 13(1): 111—120 (in Chinese with English abstract).
- Yu, B. S., Chen, J. Q., Li, X. W., et al., 2003. Geochemistry of black shale at the bottom of the Lower Cambrian in Tarim basin and its significance for lithosphere evolution. *Science in China (Ser. D)*, 46(5): 498—507.
- Zhang, S. C., Zhang, B. M., Bian, L. Z., et al., 2005. Development constraints of marine source rocks in China. *Earth Science Frontiers*, 12(3): 39—48 (in Chinese with English abstract).

Zhang, Y. G., Ma, Z. J., Yang, K. M., 2007. The forecast of natural oil & gas potential in marine strata, western Sichuan basin, Southwest China. *Acta Geologica Sinica*, 81(8): 1041—1047 (in Chinese with English abstract).

### 附中文参考文献

- 蔡开平, 王应蓉, 杨跃明, 等, 2003. 川西北广旺地区二、三叠系烃源岩评价及气源初探. *天然气工业*, 23(2): 9—15.
- 陈践发, 张水昌, 鲍志东, 等, 2006. 海相优质烃源岩发育的主要因素及沉积环境. *海相石油地质*, 11(3): 49—54.
- 冯洪真, Erdtman, B. D., 王海峰, 2000. 上扬子区早古生代全岩 Ce 异常与海平面长缓变化. *中国科学(D 辑)*, 30(1): 66—72.
- 马立桥, 董庸, 屠小龙, 等, 2007. 中国南方海相油气勘探前景. *石油学报*, 28(3): 1—7.
- 秦建中, 郑伦举, 腾格尔, 2007. 海相高演化烃源岩总有机碳恢复系数研究. *地球科学——中国地质大学学报*, 32(6): 853—860.
- 腾格尔, 刘文汇, 徐永昌, 等, 2005. 无机地球化学参数与有效烃源岩发育环境的相关研究. *地球科学进展*, 20(2): 193—199.
- 腾格尔, 秦建中, 付小东, 等, 2008. 川西北地区海相油气成藏物质基础——优质烃源岩. *石油实验地质*, 30(5): 478—483.
- 颜佳新, 刘新宇, 2007. 从地球生物学角度讨论华南中二叠世海相烃源岩缺氧沉积环境成因模式. *地球科学——中国地质大学学报*, 32(6): 789—796.
- 杨玉卿, 冯增昭, 1997. 华南下二叠统层状硅岩的形成及意义. *岩石学报*, 13(1): 111—120.
- 于炳松, 陈建强, 李兴武, 等, 2003. 塔里木盆地寒武统底部黑色页岩地球化学及其岩石圈演化意义. *中国科学(D 辑)*, 32(5): 374—382.
- 张水昌, 张宝民, 边立曾, 等, 2005. 中国海相烃源岩发育控制因素. *地学前缘*, 12(3): 39—48.
- 张永刚, 马宗晋, 杨克明, 等, 2007. 川西坳陷中段海相层系油气勘探潜力分析. *地质学报*, 81(8): 1041—1047.