

# 上扬子区下寒武统富有机质页岩 沉积环境及其对有机质含量的影响

张钰莹<sup>1,2,3,4</sup>, 何治亮<sup>2,3,4</sup>, 高波<sup>2,3,4</sup>, 刘忠宝<sup>2,3,4</sup>

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

**摘要:** 选取上扬子区 3 个下寒武统地层剖面, 对岩石样品进行了有机碳含量和主、微量元素测试, 结合前人研究成果, 分析了早寒武世不同沉积阶段生物初级生产力及氧化还原条件的变化特征, 及其对有机质富集的影响。结果表明: 第 I—II 阶段, 浅水陆棚以缺氧铁化海水为主, 具有较高的初级生产力; 深水陆棚为缺氧硫化环境, 生物初级生产力较低; 斜坡—盆地地区为缺氧铁化环境且上升洋流带来大量营养物质, 生物初级生产力最高。第 III 阶段, 陆棚区与开阔海沟通良好, 为氧化环境, 有机质难以有效保存; 斜坡—盆地地区演化为氧化—贫氧环境, 由于初级生产力依然很高, 大量有机质在氧化分解之前快速堆积埋藏而形成有效烃源岩。总体而言, 陆棚区富有机质页岩主要受海水氧化还原条件控制, 有机质在还原环境中更易保存; 斜坡—盆地地区富有机质页岩中有机质含量主要受生物初级生产力和沉积环境控制, 相同沉积条件下, 有机质丰度相较于陆棚区更高。下寒武统富有机质页岩是页岩气勘探开发的有利层系, 有机质含量可影响页岩中的含气量, 因此发育的陆棚及斜坡—盆地相页岩是页岩气勘探开发的层位。

**关键词:** 有机质; 富有机质页岩; 沉积环境; 下寒武统; 上扬子区

中图分类号: TE121.31

文献标识码: A

## Sedimentary environment of the Lower Cambrian organic-rich shale and its influence on organic content in the Upper Yangtze

Zhang Yuying<sup>1,2,3,4</sup>, He Zhiliang<sup>2,3,4</sup>, Gao Bo<sup>2,3,4</sup>, Liu Zhongbao<sup>2,3,4</sup>

(1. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing 100083, China;

3. Key Laboratory of Shale Oil/Gas Exploration and Production, SINOPEC, Beijing 100083, China;

4. SINOPEC Petroleum Exploration and Production Research Institute, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Rock samples from 3 typical Lower Cambrian outcrops in the Upper Yangtze have been collected to test the content of total organic carbon (TOC) as well as major elements and trace elements. The characteristics of primary productivity and redox in the Early Cambrian, and their effect on organic enrichment were analyzed. In stages I—II, the shallow shelf was anoxic and ferruginous with a high primary productivity; the deep shelf was anoxic and sulphate rich with a low primary productivity; and the slope-basin where upwelling brought massive nutrients was anoxic and ferruginous with an extremely high primary productivity. In stage III, the shelf was changed to oxic communicating well with the open sea and decreasing the preservation of organic matter. Although the slope-basin became oxic-suboxic in this stage, the primary productivity was high enough to prevent organic matter from complete aerobic degradation before it was buried. In general, organic-rich shale in the shelf which was deposited in a reducing environment was controlled by in the Eh at the bottom; organic-rich shale in slope-basin with a higher TOC content was controlled by primary productivity as well as the sedimentary environment. Organic-rich shale of the Lower Cambrian deposited on the shelf and in the slope-deep basin would be a target layer for shale gas exploration and exploitation.

**Key words:** organic matter; organic-rich shale; sedimentary environment; Lower Cambrian; Upper Yangtze

### 1 研究概况

华南地区下寒武统牛蹄塘组富有机质页岩是

一套优质烃源岩, 类似北美典型的黑色页岩, 分布范围广, 厚度 40~100 m, TOC 含量一般为 2%~10%, 生烃强度  $(5\sim 15)\times 10^9\text{ m}^3/\text{km}^2$ , 具备页岩气聚集

的有利地球化学条件<sup>[1-5]</sup>。海相富有机质页岩的形成主要可归结为“保存模式”<sup>[6]</sup>和“生产力模式”<sup>[7]</sup>,前者强调在高初级生产力下,还原环境有利于有机质的保存,后者强调高有机质的形成得益于较高的初级生产力。

华南地区早寒武世海洋环境与生物的变化,为下寒武统富有机质页岩的发育提供了背景。根据已有的元素地球化学、同位素及铁组份化学证据显示,华南地区早寒武世海洋为高度分层状态,顶部为氧化表层水,底部为铁化水(富含 Fe<sup>2+</sup>),中部为范围在大陆边缘区域动态变化的硫化水(富含游离态 H<sub>2</sub>S)<sup>[8-11]</sup>。早寒武世发生“寒武纪生物大爆发”事件,地层中的生物化石丰度和种类较前寒武纪陡然增加<sup>[12-13]</sup>。

前人针对下寒武统地层的沉积环境及生物特征进行了大量研究工作,但是在有机—无机相结合,通过主量和微量元素分析、判别沉积环境,进而分析有机质与沉积环境之间的关系等方面的研究仍有待深入。页岩中有有机质含量对页岩的生烃潜力、储集空间和含气性起决定性作用<sup>[14]</sup>,因此研究富有机质页岩沉积环境对其形成及有机质富集的影响,分析有机质的时空分布特征,能够为寻找页岩气有利勘探区提供科学依据。本文选取早寒武世扬子板块不同水深及构造位置的地层剖面为研究对象(图 1),应用氧化还原及初级生产力指标,研究了下寒武统富有机质页岩沉积时期的氧化还原条件和初级生产力特征,及其对有机质富集的影响。

## 2 区域地质背景

### 2.1 研究区古地理及位置

扬子板块和华夏板块在新元古代(约 1.0 Ga),由于四堡造山运动拼合成华南板块,新元古代(约 750~690 Ma) Rodinia 超大陆裂解,华南板块从 Rodinia 超大陆边缘分离出来,由一个裂谷盆地向被动大陆边缘演化<sup>[16-18]</sup>。华南地区早寒武世时期发生大规模海侵,新元古代末期,大范围碳酸盐台地覆盖的部分被随后的深水泥质陆棚取代,自西向东可分为 6 种沉积相<sup>[19-20]</sup>:(1)台地;(2)拉张盆地;(3)浅水陆棚;(4)深水陆棚;(5)斜坡;(6)深水盆地(图 1,2)。

### 2.2 岩石地层及生物地层

本次研究选取桃子冲、龙鼻嘴和岩背剖面为重点研究剖面,结合前人研究过的 4 个剖面(肖滩、金沙、丁台和南皋剖面)进行对比。所选剖面涵盖了早寒武世扬子板块的各沉积环境类型(台地相除外),可以全面反映早寒武世扬子板块各地区沉积环境特征及其对有机质含量的影响。

桃子冲剖面早寒武世位于深水陆棚环境,下寒武统地层不整合覆盖于震旦系灯影组之上,自下而上分为桃子冲组和牛蹄塘组。桃子冲组为磷质硅质岩及白云质硅质岩,夹薄层生物磷块岩,底部含有大量的微体藻类和小壳动物化石。牛蹄塘组下部为 42 m 厚黑色硅质页岩,底部含简单的遗迹化石与海绵骨针;上部为黑色碳质页岩—深灰色页岩及粉砂岩,含三叶虫化石。

龙鼻嘴剖面早寒武世位于斜坡环境,埃迪卡拉系—寒武系地层序列连续,覆盖于陡山沱组之上,自下而上分为留茶坡组和牛蹄塘组。留茶坡组为深灰—黑色薄—中层硅质岩,部分层位夹薄层硅质页岩;牛蹄塘组下部为一套硅质—磷质页岩,夹少量磷灰岩;上部为更厚层的黑色碳质页岩和泥岩。留茶坡组和牛蹄塘组下部化石稀少,牛蹄塘组上部含较丰富的海绵和海绵骨针,可能属于 *Protospongiidae* sp.<sup>[8]</sup>。

湖南岩背剖面早寒武世位于深水盆地环境,震旦系—寒武系地层序列连续,覆盖于陡山沱组之上,自下而上分为留茶坡组和牛蹄塘组。留茶坡组底部为黑色硅质岩,向上渐变为硅质页岩及碳质页岩;牛蹄塘组底部含少量硅质岩,下部以黑色碳质页岩为主,牛蹄塘组上部为深灰色碳质页岩及泥岩,夹黑色煤层,顶部含灰色泥灰岩。岩背剖面早寒武世位于深水盆地相,底栖生物化石稀少。

### 2.3 研究区地层相关性

华南地区梅树村阶地层中广泛发育小壳化石

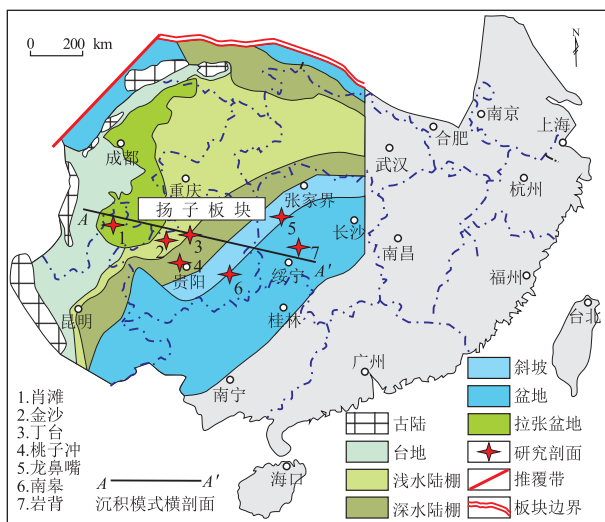


图 1 上扬子区早寒武世古地理相图  
修改自文献[15]。

Fig.1 Lithofacies paleogeographic map of Upper Yangtze during Early Cambrian

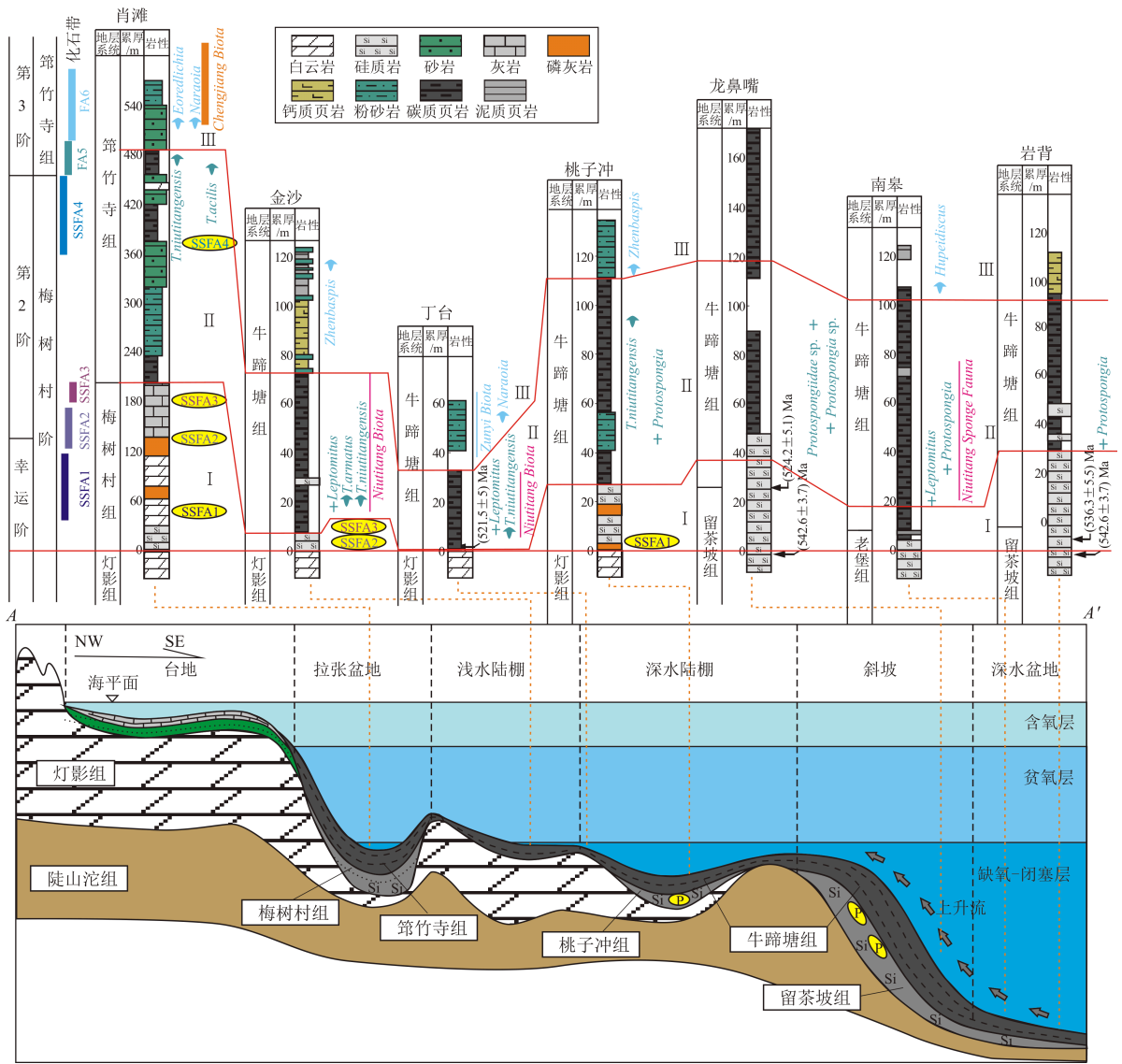


图 2 上扬子区下寒武统地层格架及沉积模式

剖面位置见图 1。岩石地层及生物地层数据来源:肖滩剖面<sup>[15]</sup>;丁台剖面<sup>[21-22]</sup>;金沙剖面<sup>[23-24]</sup>;桃子冲剖面<sup>[25]</sup>;龙鼻嘴剖面<sup>[8]</sup>;南皋剖面<sup>[15]</sup>;岩背剖面(本次研究)。丁台剖面 Re-Os 定年数据来自 Xu 等<sup>[26]</sup>;龙鼻嘴剖面 U-Pb 定年数据来自 Chen 等<sup>[27]</sup>;岩背剖面 U-Pb 定年数据来自临近的柑子坪剖面<sup>[28]</sup>。

Fig.2 Stratigraphic framework and sedimentary model of Lower Cambrian in Upper Yangtze

组合,以生物矿化作用和两侧对称动物为特征;筇竹寺阶底部发育以澄江动物群为代表的生物群落,其种类丰度及生态空间利用率都大幅提高<sup>[29-30]</sup>。

本次研究地层包括梅树村阶及筇竹寺阶,6 个化石带(图 2)。其中梅树村阶包含 4 个小壳化石带(SSFA),分别为 *Anabarites trisulcatus*-*Protohertzina anabarica* Assemblage Zone(SSFA1)、*Siphogonuchites triangularis* - *Paragloborilus subglobosus* Zone(SSFA2)、*Watsonella crosbyi*(SSFA3)和 *Sinosachites flabelliformis*-*Tannuolina zhangwentangi* Assemblage Zone(SSFA4);筇竹寺阶包含 2 个化石带,分别为 *Tsunyidiscus niutitangensis* (FA5)和 *Wutingaspis* - *Eoredlichia* Interval Zone(陆棚区)/*Hupei*

*Sinodiscus*(斜坡—盆地地区)(FA6)<sup>[31]</sup>。

根据岩石地层及生物化石带资料,7 个剖面的下寒武统地层可分为 3 个沉积阶段(图 2)。第 I 阶段包括梅树村阶中下部地层[(541±1.0)~(526.5±1.1) Ma],包含化石带 SSFA1、SSFA2 及 SSFA3(图 2)。第 II 阶段包含梅树村阶上部及筇竹寺阶下部,以出现黑色碳质页岩为开始,包含化石带 SSFA4 及 FA5 下部(图 2)。第 III 阶段包括筇竹寺阶上部,以页岩中碳质含量减少,出现大量粉砂岩为开始,包含化石带 FA5 上部及 FA6(图 2)。

### 3 样品与研究方法

桃子冲剖面全长约 136 m,样品平均间隔约

7.56 m;龙鼻嘴剖面全长约 170 m,样品平均间隔约 8.5 m;岩背剖面全长约 120 m,样品平均间隔约 5.71 m。将野外采集的样品磨成 200 目,用于测试有机碳含量及微量元素含量。有机碳含量测试由中国石化油气成藏重点实验室完成,测试方法分别见国标《GB/T 19145-2003 沉积岩中总有机碳的测定》。主量、微量元素含量测试由核工业北京地质研究院实验室完成,主量元素测试方法见国标《GB/T 14506.14-2010 硅酸盐岩石化学分析方法 第 14 部分:氧化亚铁量测定》与《GB/T 14506.28-2010 硅酸盐岩石化学分析方法 第 28 部分:16 个主次成分量测定》;微量元素测试方法见国标《GB/T 14506.30-2010 硅酸盐岩石化学分析方法 第 30 部分:44 个元素量测定》。

## 4 结果与讨论

### 4.1 海洋氧化还原环境的时空波动

微量元素 U/Th 及 Ni/Co 的比值常作为氧化还原条件的指标。Jones 和 Manning<sup>[32]</sup>认为 U/Th<0.75 为氧化环境,0.75<U/Th<1.25 为贫氧环境,U/Th>1.25 为缺氧环境;Ni/Co<5 为氧化环境,5<Ni/Co<7 为贫氧环境,Ni/Co>7 为缺氧环境。

陆棚区:第 I 阶段肖滩剖面以沉积白云岩及灰岩为主,说明该地区处于氧化环境;丁台剖面缺失该阶段沉积;金沙剖面及桃子冲剖面均以缺氧环境为主,且金沙地区还原程度高于桃子冲地区(图 3)。第 II 阶段肖滩地区由于构造活动形成棚内盆地,Ni/Co 值与 U/Th 值位于氧化—缺氧区间之内

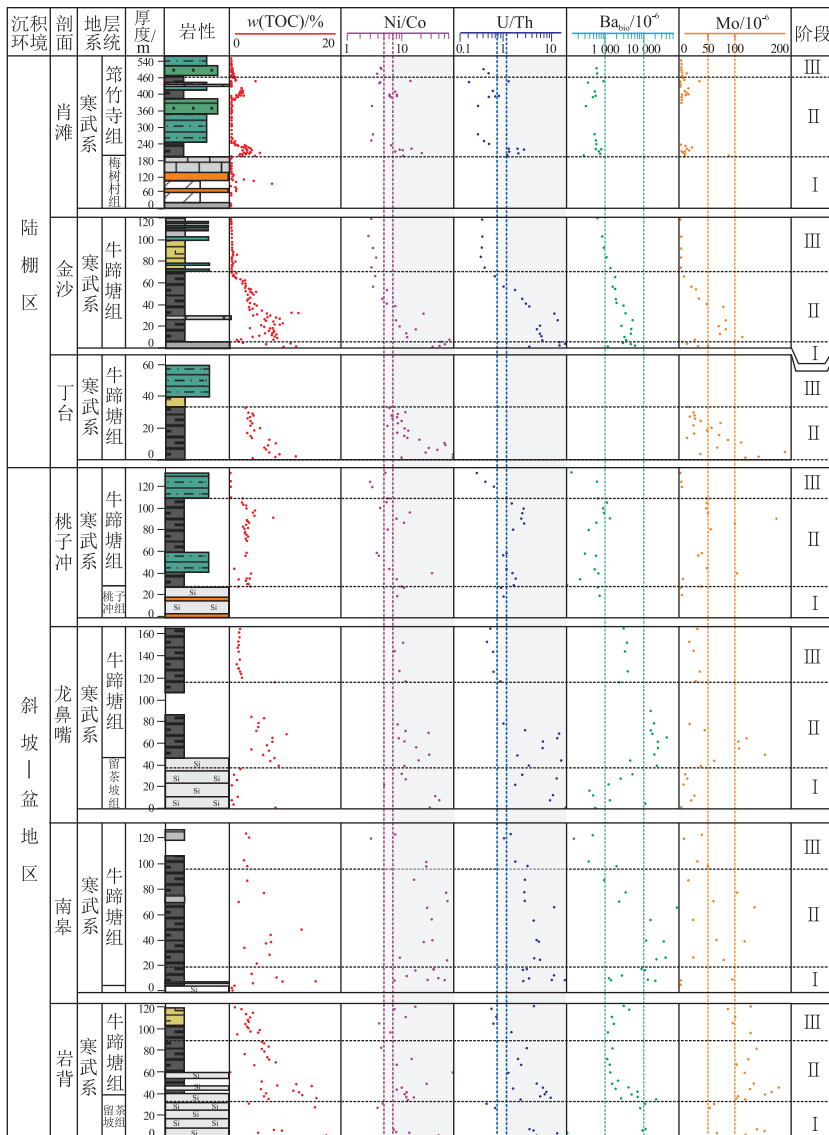


图 3 上扬子区下寒武统地球化学数据空间分布

岩性花纹及数据来源见图 2。

Fig.3 Spatial distribution of geochemical data of Lower Cambrian strata, Upper Yangtze



波动,说明由于水下隆起的阻隔,水体间歇性缺氧,沉积 2 套富有机质页岩;其余地区绝大多数 Ni/Co 值大于 7,且 U/Th 值大于 1.25,均指示缺氧环境,说明该阶段均以缺氧环境为主,早期由于快速海侵,还原程度较高,随后还原程度逐渐降低(图 3)。第 III 阶段各剖面 Ni/Co 值小于 5,且 U/Th 值小于 0.75,氧化还原指标均指示氧化状态(图 3)。

斜坡—盆地地区:第 I—II 阶段各剖面绝大多数 Ni/Co 值大于 7,U/Th 值大于 1.25,氧化还原指标均指示缺氧状态,且还原程度较高(图 3)。第 III 阶段由于海平面下降,斜坡—盆地地区海水含氧量上升,导致还原程度降低,部分 Ni/Co 值与 U/Th 值指示结果相矛盾,说明水体于氧化—贫氧状态之间波动(图 3)。

#### 4.2 海洋古生产力的时空波动

初级生产力是指古海洋生物在能量循环过程中固定能量的速率,即单位面积单位时间内所产生的有机物的量,初级生产力的变化对有机质的富集起着关键性的作用<sup>[33]</sup>。Ba 是目前运用最广泛的古生产力的指标之一,初级生产力较高的半深—深海中,其海水 Ba 通量和沉积物中重晶石的含量也较高,且生物 Ba ( $Ba_{bio}$ ) 保存率可达 30%,因此可在表层水生产力与 Ba 通量之间建立联系<sup>[34-35]</sup>。在还原环境下,Mo 通量与有机碳的堆积成正比,因而 Mo 可以作为某种条件下的生产力指标<sup>[36]</sup>。

陆棚区(图 3):第 I—II 阶段桃子冲地区及肖滩地区  $Ba_{bio}$  值均小于  $1\ 000 \times 10^{-6}$ ,Mo 通量多数小于  $50 \times 10^{-6}$ ;金沙地区  $Ba_{bio}$  值均大于  $1\ 000 \times 10^{-6}$ ,Mo 通量多数位于  $(30 \sim 100) \times 10^{-6}$  之间;丁台地区(缺失第 I 阶段)Mo 通量多数位于  $(30 \sim 150) \times 10^{-6}$  之间(图 3)。说明在以金沙地区为代表的浅水陆棚区生物初级生产力高于外陆棚区及陆棚内盆地区。第 III 阶段各地区  $Ba_{bio}$  值均小于  $1\ 000 \times 10^{-6}$ (图 3),说明此时期整个陆棚区初级生产力都处于较低状态。

斜坡—盆地地区(图 3):第 I—III 阶段各地区尽管  $Ba_{bio}$  值变化范围较大,绝大多数样品  $Ba_{bio}$  值大于  $1\ 000 \times 10^{-6}$ ,部分  $Ba_{bio}$  值甚至大于  $10\ 000 \times 10^{-6}$ (图 3)。说明与陆棚区不同,早寒武世斜坡—盆地地区一直持续高初级生产力。

华南寒武纪梅树村期—筲竹寺期化石的记录与海洋化学的时空差异性有良好的相关性,以节肢动物为主的生物群(如澄江生物群及遵义生物群)生活于氧化的水体中;海绵或以海绵为主的生物群或小壳生物群发现于缺氧非硫化水体中;硫化水体

中未见到化石<sup>[37]</sup>。铁化水体中存在生命所需的  $Fe^{2+}$  离子,可促进生物的繁盛<sup>[38]</sup>;硫化水中的游离态  $H_2S$  上涌到表层海水中<sup>[39]</sup>,可能抑制生物的生长。因此以桃子冲为代表的深水陆棚区由于长期处于中部硫化水范围内,可能导致了生物初级生产力相较内陆棚区及斜坡—盆地地区更低。

#### 4.3 有机质富集的控制因素

海相烃源岩中影响有机质富集的 2 个最重要因素是高生产力和底部水缺氧的保存条件<sup>[33]</sup>,或者两者兼有。为了判断是初级生产力还是氧化还原条件控制了上扬子区下寒武统页岩中有机质的富集,本文以 TOC 代表有机质富集程度,讨论 TOC 与初级生产力参数( $Ba_{bio}$ )和氧化还原状态之间的关系。

沉积第 I 阶段尚未发生大规模海侵(丁台剖面缺失此阶段),生物以小壳化石及海绵为主,海洋环境特征继承了埃迪卡拉纪末期的分层特征,表层海洋已被氧化,但深海海洋依旧为缺氧铁化的环境,且中部楔状的硫化水体动态发展于陆架—斜坡地区<sup>[37]</sup>(图 4)。浅水陆棚金沙地区铁化海水为生物的繁盛提供了丰富的营养物质,因此具有较高的初级生产力(平均  $Ba_{bio} > 3\ 000 \times 10^{-6}$ );深水陆棚区为缺氧硫化环境,硫化海水抑制了生物(尤其是以海绵为主的动物群或小壳动物群)的发育,生物初级生产力较低( $Ba_{bio} < 1\ 000 \times 10^{-6}$ );斜坡—盆地地区由于铁化海水及富含营养的上升洋流存在,因此该地区生物初级生产力极高(平均  $Ba_{bio} > 2\ 000 \times 10^{-6}$ )。浅水陆棚区肖滩地区以氧化—一次氧化环境为主,不利于

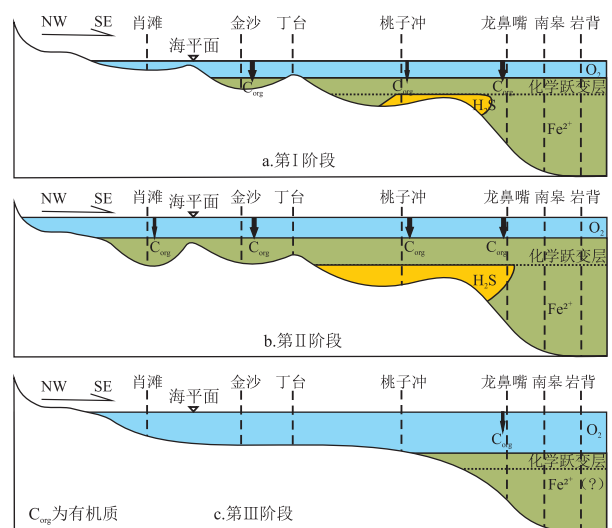


图 4 上扬子区早寒武世海洋分层状态与有机质富集模式  
修改自文献[10]。

Fig.4 Stratified redox and organic-rich model of Upper Yangtze during Early Cambrian

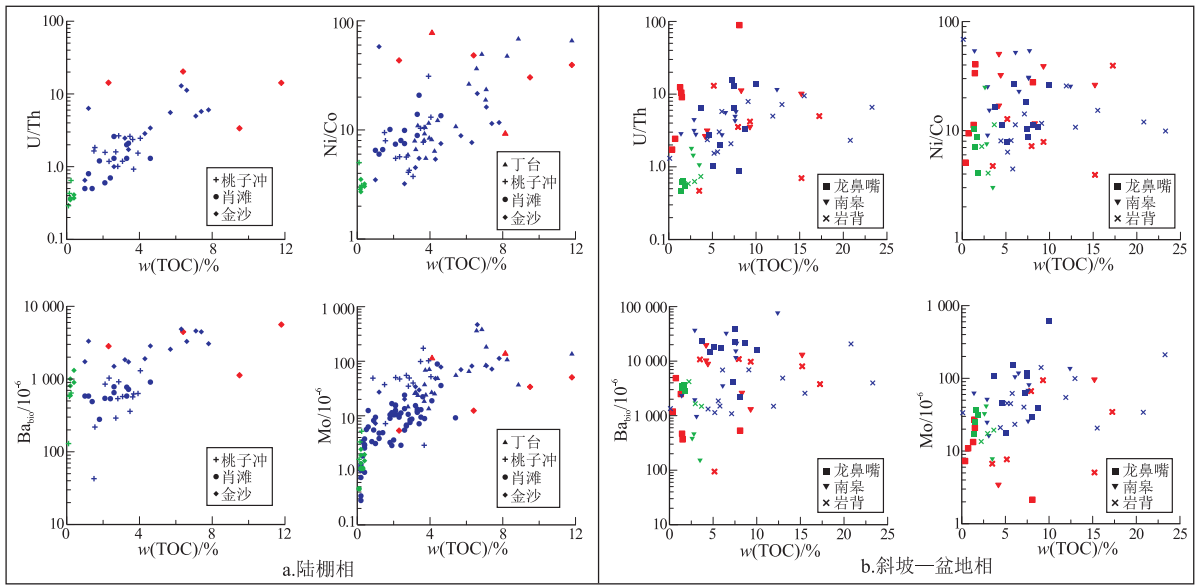


图 5 上扬子区早寒武世陆棚相和斜坡—盆地相有机质含量影响因素散点图  
 红色点为第 I 阶段;蓝色点为第 II 阶段;绿色点为第 III 阶段

Fig.5 Scatter diagram of influence factors for organic matter content in shelf and slope-basin during Early Cambrian, Upper Yangtze

有机质的保存,因此仅中部磷灰岩段存在 TOC 高值,其余地层段 TOC 值较低;金沙—岩背地区以缺氧环境为主,有利于有机质的保存(图 5)。

沉积第 II 阶段开始发生大规模快速海侵作用,化学跃变层上升,并且中部硫化海水范围有所扩大(图 4)。海侵阶段,可抑制底栖生物的发育,降低有机质的氧化分解速率,提高有机质埋藏量和保存率。肖滩地区由于构造作用形成陆棚内盆地,水体被水下隆起分割,导致滞留程度较强,以缺氧间歇性硫化环境为主<sup>[9]</sup>,生物初级生产力不高(平均  $Ba_{bio} \approx 600 \times 10^{-6}$ )。浅水陆棚区及斜坡—盆地地区仍以缺氧铁化环境为主,具有较高初级生产力,有机质保存较好;深水陆棚区仍以硫化环境为主,尽管生物初级生产力不高,但保存较好(图 5)。

沉积第 III 阶段海平面缓慢下降,三叶虫大量繁盛,海水氧化范围扩大,硫化层完全消失,底部缺氧层仅存在于盆地区(图 4)。陆棚区生物初级生产力依然不高(平均  $Ba_{bio} < 1\,000 \times 10^{-6}$ ),且完全演化为氧化环境,与开阔海沟通良好,无法有效保存有机质,因此该阶段陆棚区富有机质页岩消失(图 3,图 5a)。斜坡—盆地地区演化为氧化—贫氧环境,但是初级生产力依然很高(平均  $Ba_{bio} > 2\,000 \times 10^{-6}$ )(图 3),国内外许多学者认为即使在非还原环境中,如有足够丰富的有机质也可以形成高有机碳含量的海相沉积,而且丰富的有机质在分解时可以消耗大量氧气,造成水底缺氧,有利于有机质的保

存<sup>[7]</sup>。因此该阶段斜坡—盆地地区有机质含量尽管较之前有所下降,依然沉积富有机质页岩(TOC 平均值大于 1.5%)(图 3,图 5b)。

据上述分析可知,陆棚区富有机质页岩中有机质含量主要受海水氧化还原条件控制,富有机质页岩只在还原环境中沉积(图 5a)。由于斜坡—盆地地区位于扬子板块东南缘,在古特提斯洋上升流作用下,上升流水体中富营养盐和  $SiO_2$ ,使生物大量繁盛,并加剧了底部水的缺氧程度,从而形成硅质和磷质沉积以及有机质丰富的页岩<sup>[40]</sup>。尤其是筇竹寺期晚期,尽管斜坡—盆地地区海水中氧气含量增加,沉积环境为氧化—一次氧化,但是由于高生产力使得该时期依然沉积富有机质页岩(图 5b)。因此斜坡—盆地地区富有机质页岩中有机质含量主要受生物初级生产力控制,且有机质丰度相较于陆棚区更高。因此,上扬子区早寒武世梅树村期陆棚及斜坡—盆地地区富有机质页岩极其发育,是页岩气勘探开发的有利地区。

## 5 结论

(1) 第 I 阶段肖滩地区处于氧化环境,金沙地区及桃子冲地区均以缺氧环境为主,且内陆棚区还原程度高于外陆棚区;第 II 阶段肖滩地区水体间歇性缺氧,其余地区均以缺氧环境为主;第 III 阶段各剖面均处于氧化环境。斜坡—盆地地区,第 I—第 II 阶段各剖面均处于缺氧状态,且还原程度较高;

第Ⅲ阶段由于海平面下降,斜坡—盆地海水含氧量上升,导致还原程度降低,水体于氧化—贫氧状态之间波动。

(2)第Ⅰ—Ⅱ阶段在以金沙地区为代表的浅水陆棚区,生物初级生产力高于深水陆棚区及陆棚内盆地区;第Ⅲ阶段整个陆棚区初级生产力都处于较低状态。斜坡—盆地地区,与陆棚区不同,第Ⅰ—Ⅲ阶段斜坡—盆地地区一直持续高初级生产力。

(3)沉积第Ⅰ阶段尚未发生大规模海侵,金沙地区及斜坡—盆地地区由于铁化海水(斜坡区存在富含营养的上升洋流),生物初级生产力极高;深水陆棚区为缺氧硫化环境,生物初级生产力较低。浅水陆棚—盆地地区均以缺氧环境为主,有利于有机质的保存。沉积第Ⅱ阶段开始发生大规模快速海侵作用,浅水陆棚区及斜坡—盆地地区仍以缺氧铁化环境为主,具有较高初级生产力,有机质保存较好;深水陆棚区仍以硫化环境为主,尽管生物初级生产力不高,但保存较好。沉积第Ⅲ阶段海平面缓慢下降,海水氧化范围扩大,硫化层完全消失,底部缺氧层仅存在于盆地地区。陆棚区完全演化为氧化环境,无法有效保存有机质;斜坡—盆地地区演化为氧化—贫氧环境,但是初级生产力依然很高,足够丰富的有机质在氧化分解之前快速堆积埋藏,因此该阶段斜坡—盆地地区有机质含量尽管较之前有所下降,依然沉积富有有机质页岩。

(4)陆棚区富有机质页岩中有机质含量主要受海水氧化还原条件控制,富有机质页岩只在还原环境中沉积。因此斜坡—盆地地区富有机质页岩中有机质含量主要受生物初级生产力控制,且有机质丰度相较于陆棚区更高。

#### 参考文献:

[1] 刘树根,曾祥亮,黄文明,等.四川盆地页岩气藏和连续型—非连续型气藏基本特征[J].成都理工大学学报(自然科学版),2009,36(6):578-592.  
Liu Shugen,Zeng Xiangliang,Huang Wenming, et al. Basic characteristics of shale and continuous-discontinuous transition gas reservoirs in Sichuan Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2009, 36(6): 578-592.

[2] 王兰生,邹春艳,郑平,等.四川盆地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.

[3] 王世谦,陈更生,董大忠,等.四川盆地古生界页岩气藏形成条件与勘探前景[J].天然气工业,2009,29(5):51-58.  
Wang Shiqian, Chen Gengsheng, Dong Dazhong, et al. Accumula-

tion conditions and exploitation prospect of shale gas in the Lower Paleozoic Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(5): 51-58.

[4] 董大忠,程克明,王世谦,等.页岩气资源评价方法及其在四川盆地的应用[J].天然气工业,2009,29(5):33-39.  
Dong Dazhong, Cheng Keming, Wang Shiqian, et al. An evaluation method of shale gas resource and its application in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(5): 33-39.

[5] 王同,熊亮,徐猛,等.川南地区下寒武统筇竹寺组页岩储层特征[J].石油实验地质,2016,38(2):197-203.  
Wang Tong, Xiong Liang, Xu Meng, et al. Shale reservoir characteristics of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in the southern Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016, 38(2): 197-203.

[6] Demaison G J, Moore G T. Anoxic environments and oil source bed genesis[J]. AAPG Bulletin, 1980, 64(8): 1179-1209.

[7] Pedersen T F, Calvert S E. Anoxia vs. productivity: What controls the formation of organic-carbon-rich sediments and sedimentary rocks? [J]. AAPG Bulletin, 1990, 74(4): 454-466.

[8] Wang Jianguo, Chen Daizhao, Yan Detian, et al. Evolution from an anoxic to oxic deep ocean during the Ediacaran-Cambrian transition and implications for bioradiation [J]. Chemical Geology, 2012, 306/307: 129-138.

[9] Och L M, Shields-Zhou G A, Poulton S W, et al. Redox changes in Early Cambrian black shales at Xiaotan section, Yunnan Province, South China[J]. Precambrian Research, 2013, 225: 166-189.

[10] Feng Lianjun, Li Chao, Huang Jing, et al. A sulfate control on marine mid-depth euxinia on the Early Cambrian (ca. 529-521 Ma) Yangtze platform, South China[J]. Precambrian Research, 2014, 246: 123-133.

[11] Jin Cengsheng, Li Chao, Algeo T J, et al. A highly redox-heterogeneous ocean in South China during the Early Cambrian (~529-514 Ma): Implications for biota-environment co-evolution [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2016, 441: 38-51.

[12] Brasier M D. Background to the Cambrian explosion [J]. Journal of the Geological Society, 1992, 149(4): 585-587.

[13] Zhu Maoyan, Strauss H, Shields G A. From snowball earth to the Cambrian bioradiation: Calibration of Ediacaran - Cambrian earth history in South China[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2007, 254(1/2): 1-6.

[14] 李玉喜,乔德武,姜文利,等.页岩气含气量和页岩气地质评价综述[J].地质通报,2011,30(2/3):308-317.  
Li Yuxi, Qiao Dewu, Jiang Wenli, et al. Gas content of gas-bearing shale and its geological evaluation summary [J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(2/3): 308-317.

[15] 罗超.上扬子地区下寒武统牛蹄塘组页岩特征研究[D].成都:成都理工大学,2014.  
Luo Chao. Geological characteristics of gas shale in the Lower Cambrian Niutitang Formation of the Upper Yangtze Platform [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014.

[16] Li Zhengxiang, Li Xianhua, Zhou Hanwen, et al. Grenvillian continental collision in South China; New SHRIMP U-Pb zircon results and implications for the configuration of Rodinia [J]. Geology,

- 2002, 30(2): 163-166.
- [17] Li Zhengxiang, Zhang Linghua, Powell C M. South China in Rodinia: Part of the missing link between Australia - east Antarctica and Laurentia? [J]. *Geology*, 1995, 23(5): 407-410.
- [18] Wang Jian, Li Zhengxiang. History of Neoproterozoic rift basins in South China: Implications for Rodinia break-up [J]. *Pre-Cambrian Research*, 2003, 122(1/4): 141-158.
- [19] Zhu Maoyan, Zhang Junming, Yang Aihua, et al. Sinian-Cambrian stratigraphic framework for shallow-to deep-water environments of the Yangtze Platform: An integrated approach [J]. *Progress in Natural Science*, 2003, 13(12): 951-960.
- [20] Zhu Maoyan, Babcock L E, Peng Shanchi. Advances in Cambrian stratigraphy and paleontology: Integrating correlation techniques, paleobiology, taphonomy and paleoenvironmental reconstruction [J]. *Palaeoworld*, 2006, 15(3/4): 217-222.
- [21] 赵元龙, 杨洪, 李勇, 等. 贵州新元古代到寒武纪早期特异埋藏后生物群及其研究意义 [J]. *古生物学报*, 2008, 47(4): 405-418.
- Zhao Yuanlong, Yang Hong, Li Yong, et al. Exceptionally-preserved early metazoan biotas of Neoproterozoic-Cambrian in Guizhou and their implications: A brief introduction [J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 2008, 47(4): 405-418.
- [22] Xu Lingang, Lehmann B, Mao Jingwen, et al. Mo isotope and trace element patterns of Lower Cambrian black shales in South China: Multi-proxy constraints on the paleoenvironment [J]. *Chemical Geology*, 2012, 318/319: 45-59.
- [23] 杨兴莲, 祝明金, 朱露艳, 等. 贵州金沙下寒武统牛蹄塘组中的高肌虫 [J]. *高校地质学报*, 2009, 15(3): 296-303.
- Yang Xinglian, Zhu Mingjin, Zhu Luyan, et al. The bradoriida of the Niutitang Formation from traditional Lower Cambrian in Jinsha County, Guizhou Province [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2009, 15(3): 296-303.
- [24] Yang Xinglian, Zhao Yuanlong, Wu Weiye, et al. *Phragmodictya jinshaensis* sp. nov., a hexactinellid dictyosponge from the Cambrian of Jinsha, South China [J]. *GFF*, 2014, 136(1): 309-313.
- [25] 杨瑞东, 毛家仁, 张位华, 等. 贵州早寒武世早期黑色页岩中生物化石保存及生态学研究 [J]. *沉积学报*, 2004, 22(4): 664-671.
- Yang Ruidong, Mao Jiaren, Zhang Weihua, et al. Fossil preservation and palaeoecological research in Early Cambrian black shale [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004, 22(4): 664-671.
- [26] Xu Lingang, Lehmann B, Mao Jingwen, et al. Re-Os age of poly-metallic Ni-Mo-PGE-Au mineralization in Early Cambrian black shales of South China: A reassessment [J]. *Economic Geology*, 2011, 106(3): 511-522.
- [27] Chen Daizhao, Zhou Xiqiang, Fu Yong, et al. New U-Pb zircon ages of the Ediacaran - Cambrian boundary strata in South China [J]. *Terra Nova*, 2015, 27(1): 62-68.
- [28] Chen Daizhao, Wang Jianguo, Qing Hairou, et al. Hydrothermal venting activities in the Early Cambrian, South China: Petrological, geochronological and stable isotopic constraints [J]. *Chemical Geology*, 2009, 258(3/4): 168-181.
- [29] Knoll A H, Carroll S B. Early animal evolution: Emerging views from comparative biology and geology [J]. *Science*, 1999, 284(5423): 2129-2137.
- [30] 朱茂炎. 动物的起源和寒武纪大爆发: 来自中国的化石证据 [J]. *古生物学报*, 2010, 49(3): 269-287.
- Zhu Maoyan. The origin and Cambrian explosion of animals: Fossil evidences from China [J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 2010, 49(3): 269-287.
- [31] 彭善池. 华南新的寒武纪生物地层序列和年代地层系统 [J]. *科学通报*, 2009, 54(18): 2691-2698.
- Peng Shanchi. The newly-developed Cambrian biostratigraphic succession and chronostratigraphic scheme for South China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(22): 4161-4170.
- [32] Jones B, Manning D A C. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones [J]. *Chemical Geology*, 1994, 111(1/4): 111-129.
- [33] Wei Hengye, Chen Daizhao, Wang Jianguo, et al. Organic accumulation in the lower Chihhsia Formation (Middle Permian) of South China: Constraints from pyrite morphology and multiple geochemical proxies [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2012, 353/355: 73-86.
- [34] Dymond J, Suess E, Lyle M. Barium in deep-sea sediment: A geochemical proxy for paleoproductivity [J]. *Paleoceanography*, 1992, 7(2): 163-181.
- [35] Francois R, Honjo S, Manganini S J, et al. Biogenic barium fluxes to the deep sea: Implications for paleoproductivity reconstruction [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9(2): 289-303.
- [36] Lyons T W, Werne J P, Hollander D J, et al. Contrasting sulfur geochemistry and Fe/Al and Mo/Al ratios across the last oxic-to-anoxic transition in the Cariaco Basin, Venezuela [J]. *Chemical Geology*, 2003, 195(1/4): 131-157.
- [37] 金承胜. 华南寒武纪早期海洋化学时空演化及其对早期动物演化的影响 [D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2014.
- Jin Chengsheng. A preliminary study on spatiotemporal variability of ocean chemistry and its relationship with animal evolution in the Early Cambrian (Ca. 526 - 514 Ma), South China [D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2014.
- [38] Anbar A D. OCEANS: Elements and evolution [J]. *Science*, 2008, 322(5907): 1481-1483.
- [39] Wille M, Nägler T F, Lehmann B, et al. Hydrogen sulphide release to surface waters at the Precambrian/Cambrian boundary [J]. *Nature*, 2008, 453(7196): 767-769.
- [40] 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.