

# 华南地区石炭纪—早二叠世早期成冰期的地球生物学过程与烃源岩的形成

郅文昆, 张雄华, 蔡雄飞, 张 扬

中国地质大学生物地质与环境地质教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

**摘要:** 石炭纪—二叠纪冈瓦纳大陆成冰事件控制着全球(尤其是华南地区)的海平面变化, 从而决定着生境型及生产力的变化。冈瓦纳大陆成冰事件造成石炭纪—早二叠世早期有 4 次全球性海退, 其中 Tournasian 末期到 Viséan 早期的海退在华南地区最为明显, 导致生境型发生了明显的变化。在盆地相区, 由斜坡相(V<sub>1</sub>)转变为下部浅海上部(IV<sub>1</sub>)。在远岸碳酸盐台地区, 由上部浅海(III<sub>1</sub>)、(III<sub>2</sub>)转变为潮间带(II<sub>1</sub>)、潮下带(II<sub>2</sub>)。在连岸碳酸盐台地区, 由浅水碳酸盐沉积区(II<sub>1</sub>)、(II<sub>2</sub>)转变为陆相或海陆交互沉积区。通过对生境型、生物类群的分布及氧化还原环境的分析, 探讨了冰期与间冰期生物群的演替、海洋生物生产力及埋葬条件的变化, 进而确定成冰事件对烃源岩形成和分布的控制作用。

**关键词:** 石炭纪; 成冰作用; 烃源岩; 生境型。

中图分类号: P534.45

文章编号: 1000-2383(2007)06-0803-08

收稿日期: 2007-08-08

## Geobiological Processes and the Formation of Hydrocarbon Source Rocks in the Carboniferous–Early Permian Glacial Period in South China

QIE Wen-kun, ZHANG Xiong-hua, CAI Xiong-fei, ZHANG Yang

Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

**Abstract** From Carboniferous to Early Permian, the glaciation of Gondwanaland played a crucial role in controlling changes of the sea level, the biohabitat types and the productivity, in particular in South China. Four global regression events identified during this period were attributed to the glaciation of Gondwanaland. In South China, the regression event occurred between the latest Tournasian and early Viséan led to an obvious change of the biohabitat types. In the intraplatform basin, the biohabitat types shifted from V<sub>1</sub> to IV<sub>1</sub>. In the isolated carbonate platform, the biohabitat types shifted from III<sub>1</sub>–III<sub>2</sub> to II<sub>1</sub>–II<sub>2</sub>. In the carbonate platform connected with the land, the biohabitat types shifted from II<sub>1</sub> and II<sub>2</sub> to terrestrial or marine-continental sedimentary environment. Analyses of the biohabitat types, paleocommunities and redox conditions, enable us to investigate the paleocommunity evolution, the productivity of marine organisms and the changes of organic burial conditions in the glacial and postglacial period, and thus to explore the control of Carboniferous glaciation on the generation and distribution of hydrocarbon source rocks.

**Key words:** Carboniferous; glaciation; hydrocarbon source rocks; biohabitat type.

我国华南地区石炭纪位于赤道附近, 整个石炭纪都发育大量的碳酸盐沉积和丰富的特提斯型暖水底栖动物群, 生物群落属于特提斯大区。沉积域内的古地理格架与晚泥盆世基本相同, 构造环境相对稳

定, 碳酸盐台地与盆地广布。华南地区石炭纪—早二叠世早期海平面变化频繁, 但有明显的变化规律, 其三级旋回层序, 甚至部分层位的副层序与北美大陆及世界其他地区均能进行很好的对比(刘本培等,

基金项目: 国家自然科学基金项目(Nos. 49802002, 40372057); 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)。

作者简介: 郅文昆(1983—), 男, 硕士研究生, 地层古生物专业, E-mail: earth789@163.com

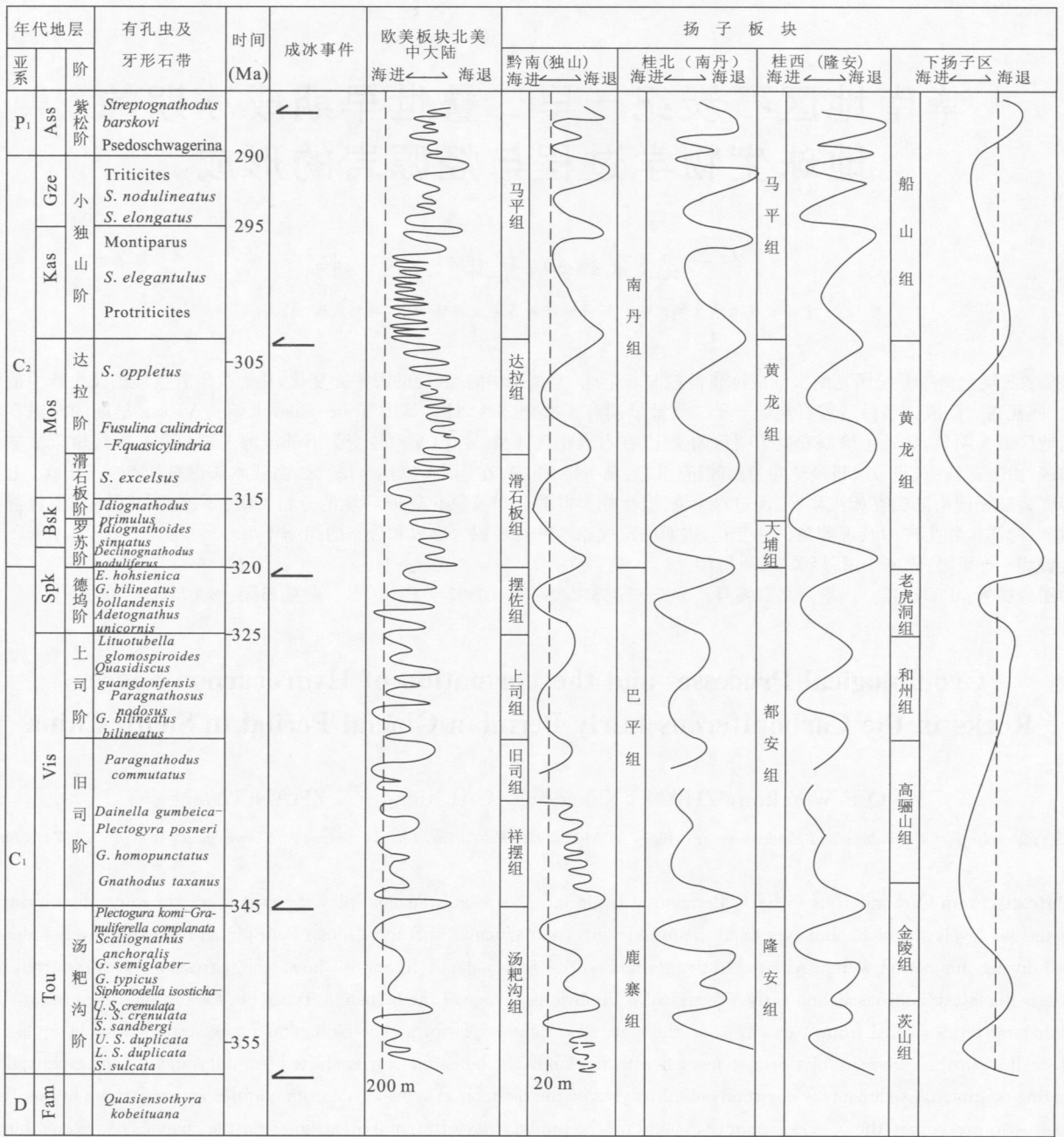


图 1 石炭纪扬子板块与欧美板块海平面变化曲线对比(李儒峰等, 1997)

Fig. 1 Correlation of sea-level curves of the Carboniferous between Yangtze and European American plate

1994; 李儒峰等, 1997; 如图 1 所示). 由于这一时期主要的海退事件与冈瓦纳大陆的成冰事件能一一对应, 所以一般认为当时全球海平面的变化受控于冈瓦纳大陆的成冰事件(Veevers and Powell, 1987; Crowley and Baum, 1991; 覃建雄等, 1996).

海平面变化决定了生境型的变化, 在一定程度上控制了海洋生产力的大小, 同时也决定了有机质沉积时的氧化还原环境, 进而控制有机质的埋藏. 马

力等(2004)认为: 海侵期尤其是海侵规模最大的时候, 海洋生物最繁盛, 生产力较高. 并且, 由于海水较深, 一般处于一种滞流还原的沉积环境, 优质烃源岩一般形成于这个时期. 既然华南地区石炭纪一早二叠世早期的海平面变化受控于冈瓦纳大陆的成冰事件, 冰期对应于海退, 间冰期对应于海侵, 那么这些成冰事件就影响生境型和生产力的变化, 也影响沉积时的氧化还原条件, 进而影响着烃源岩的形成. 本

文旨在通过对华南黔桂地区几个典型剖面, 尤其是广西隆安都结剖面、南丹巴平剖面的研究, 对华南地区石炭纪成冰事件与烃源岩的形成和分布的关系进行分析。

## 1 石炭纪成冰事件在华南地区的沉积响应

晚古生代冈瓦纳大陆出现了几次重要的成冰事件, 其中最早的一次在晚泥盆世末, 华南地区表现在晚泥盆世末的大规模海退, 部分地段表现为区域性的平行不整合(覃建雄等, 1996; 吴诒等, 1997)。早石炭世早期(相当于岩关期)为该冰期之后的间冰期, 气候变暖, 海平面快速升高, 生物分异度较高, 且主要为一种还原环境, 在华南地区形成了一套区域性的烃源岩(冯增昭等, 1998; 马力等, 2004)。

石炭纪—早二叠世早期冈瓦纳大陆成冰事件规模更大, 主要有四期, 这四期成冰事件在华南地区均有很好的沉积响应(覃建雄等, 1996; 李儒峰等, 1997; 马力等, 2004)(图1)。

从 Tournasian 末期到 Viséan 早期, 出现冈瓦纳大陆晚古生代第二次冰期, 其规模最大, 与 Vail *et al.* (1977) 全球旋回曲线中早密西西比世末海平面下降相一致。华南地区表现为大规模海退。桂西碳酸盐台地区主要表现为由隆安组的夹黑色硅质结核的灰黑色、深灰色灰岩向上转为都安组的浅灰色颗粒、含藻鲕灰岩。桂北南丹等地的盆地区表现为由鹿寨组盆地相的黑色泥质沉积转变为下部浅海的碳酸盐沉积。上扬子靠近古陆边缘的滇东、黔西北、桂北、湘中地区则上升为陆, 出现祥摆组、万寿山组、测水组的陆源碎屑岩及海陆交互相沉积。

在 Serpukhovian 末期, 即早石炭世末期, 出现冈瓦纳大陆晚古生代第三次冰期, 海平面下降与 Vail *et al.* (1977) 全球旋回曲线晚密西西比世末期大规模海退事件或区域性不整合相吻合。Serpukhovian 末期冰期在黔南地区表现为摆佐组向上变浅序列, 桂北南丹巴平地区表现为巴平组含硅质结核和条带的深灰色薄—中层生屑灰岩向上变为上石炭统黄龙组浅灰色厚层生屑灰岩夹白云岩。

Moscovian 晚期的海平面下降, 大致与冈瓦纳大陆晚古生代第四次冰期—晚石炭世史蒂芬早期冰期相吻合。在上扬子地区表现为黄龙组顶部出现淡

水渗滤砂沉积和喀斯特溶滤面, 在桂西地区表现为黄龙组顶部向上变浅序列、白云岩沉积及若干古暴露面。

Asselian 末期的海平面下降, 与冈瓦纳大陆晚古生代冰川时间第五次冰期—晚石炭世史蒂芬晚期—早二叠世萨克马尔晚期冰期相对应, 并大致与全球旋回曲线早二叠世 Asselian 末海退事件相吻合, 表现为上扬子、下扬子等广大华南地区海平面相对下降, 海域面积大大缩小, 造成马平组中上部向上变浅序列及其顶部广泛分布的平行不整合。

## 2 华南地区石炭纪成冰期各生境型的划分和特点

### 2.1 远岸碳酸盐台地

通过对广西隆安县都结剖面野外实测观察, 在室内偏光显微镜下对 176 块岩石薄片进行了碳酸盐岩微相分析, 研究了石炭纪生物演化过程(图2)。泥盆纪末冰期事件之后, 早石炭世 Tournasian 期为一快速海侵过程。隆安都结剖面隆安组为该海侵的沉积产物, 生物类型与下伏泥盆纪冰期的有很大的差别。主要表现在: (1) 微体化石: 出现大量的介形虫, 其丰度、分异度均较高; 有孔虫少见, 分异度低, 主要为 *Archaeosphaera*; 由蓝绿藻形成的藻团粒极为发育。(2) 宏体化石: 腕足类的含量基本一致, 但类别有较大的变化, 个体相对较小, 壳薄; 四射珊瑚分异度及个体数明显变少, 仅有少量单体单带型和双带型分子, 代表有 *Uralinia* 及 *Caninia*; 泥盆纪和石炭纪浅海中常见的棘皮类在这一快速海侵沉积中未见踪迹。(3) 遗迹化石: 出现大量遗迹化石, 仅有一属 *Chondrites*, 但优势度极高。该属一般出现在缺氧还原环境中, 为缺氧环境中以化学合成菌为食的蠕虫动物所营造的化学共栖构造(Bromley and Ekdale, 1984; 龚一鸣, 2004), 其生境型主要为 III。

从 Tournasian 末期到 Viséan 早期的海退事件, 在隆安县都结剖面体现为隆安组顶部至都安组的转变, 生物分异度增大, 生物类别有较大的不同。主要表现在: (1) 微体化石: 有孔虫大量繁盛, 分异度较高, 且丰度较大; 介形虫向上变少, 直至消失。藻类含量与下伏间冰期的相比, 略有减少, 发育大量的藻鲕, 藻粘结岩。(2) 宏体化石: 腕足类含量没有太大的变化, 但类型有明显的变化, 壳体变大, 但基本上都

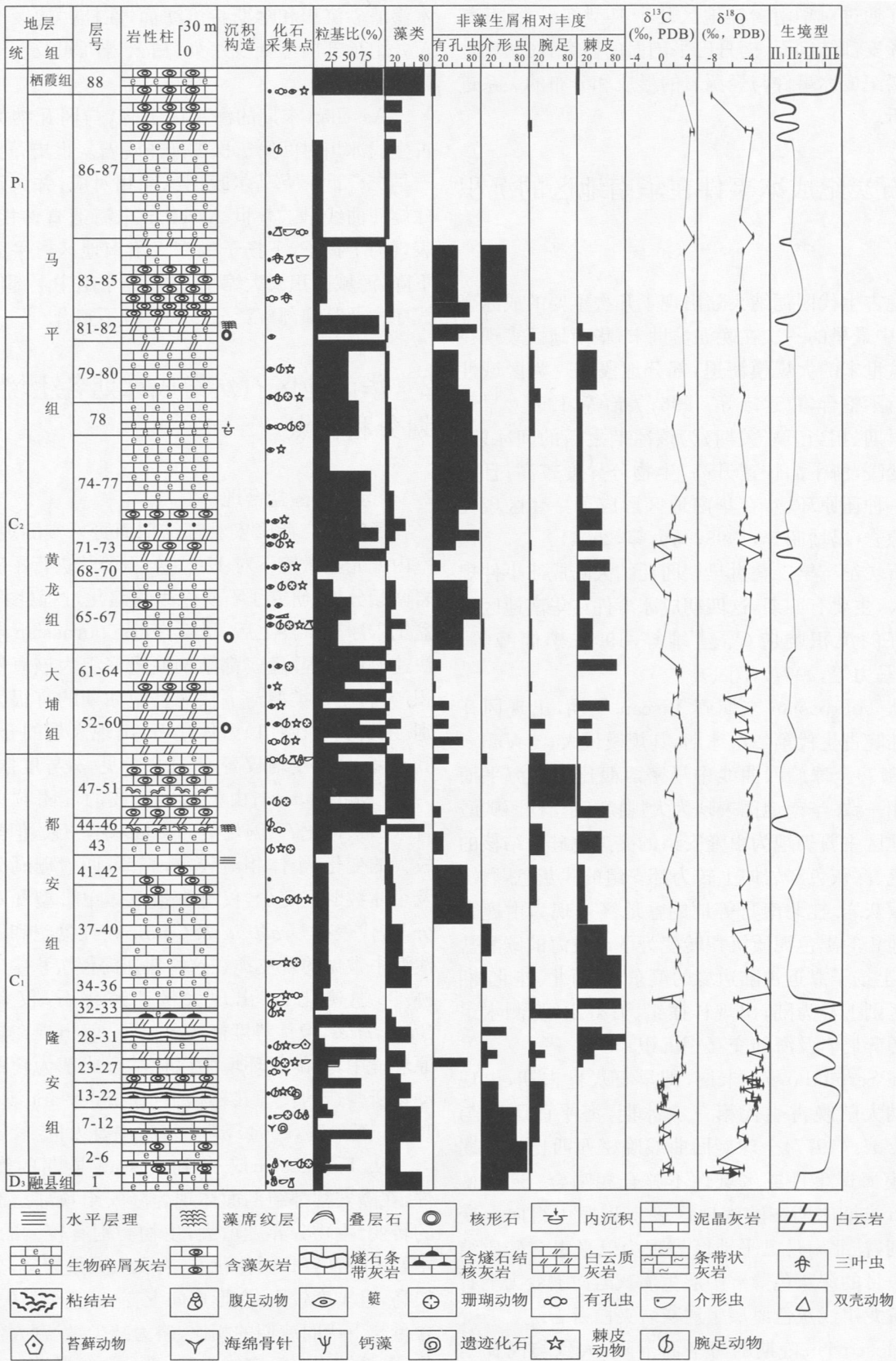


图 2 广西都结石炭纪成冰期生境型划分

Fig. 2 The distributions of biohabitat types of Doujie section in Carboniferous glacial period, Guangxi

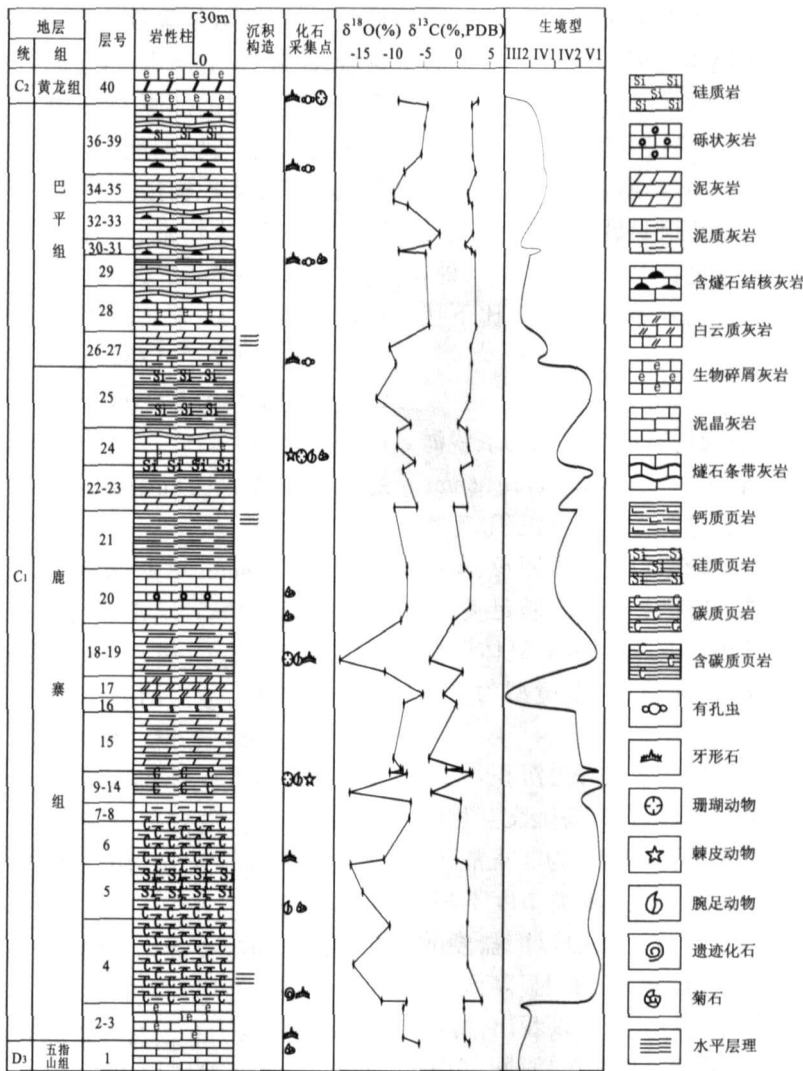


图 3 广西巴平石炭纪成冰期生境型划分

Fig. 3 The distributions of biohabitat types of Baping section in Carboniferous glacial period Guangxi

为单瓣壳，大部成层排列；四射珊瑚分异度和丰度明显增加，出现大量单体双带型和丛状复体分子；棘皮类大量繁盛，其含量可占生物碎屑的 50%~70%。生境型由 III、III 变为 II<sub>1</sub>、II<sub>2</sub>。隆安组由于海水相对较深，处于一种缺氧环境，藻类、微体及宏体生物丰度均比其上都安组冰期的浅海潮间带的要低，因而生物生产力也相对较小。在隆安地区这次成冰事件导致海洋中生物生产力增高。

在 Serpukhovian 末期、Moscovian 晚期和 Asselian 末期发生的成冰事件，在隆安地区表现为明显的海退，分别对应为都安组上部、黄龙组顶部及马平组顶部沉积，多为白云岩，生物贫乏，仅有少量藻类、有孔虫和腕足类，生物分异度低，生境型为 II<sub>1</sub>。

上石炭统大埔组、黄龙组下部、马平组下部为海

侵体系域，生物大量繁盛，主要为珊瑚、藻类、有孔虫、海百合茎、腕足等。其中藻类及海百合茎丰度极高，占生屑 90%以上。珊瑚大量发育，以丛状复体及块状复体为主，而下石炭统则以单体珊瑚为主。马平组以含大量的纺锤型及长纺锤型藻类为特点，生物类型基本相似。生境型基本未发生改变，主要为 II<sub>2</sub>。

### 2.2 碳酸盐盆地相

与隆安地区相比，地处盆地环境的桂北南丹地区下石炭统也有类似的生物更替、生产力和生烃潜力变化(图 3)。属间冰期快速海侵沉积的鹿寨组与下伏泥盆纪末冰期沉积相比，微体化石除牙形刺较多外，局部见有较多的介形虫。有孔虫少见，对可见光依赖较强的藻类丰度极低。产在背景沉积中的宏体化石相对也较少。除菊石丰度较大外，还产少量腕

足类、生物类型及丰度发生了重要的变化,生境型由 III 快速变为 VI。由于初级生产者藻类和低级消费者有孔虫丰度低,该生境型的生产力较低。

鹿寨组之上的巴平组为晚古生代第二次冰期海退(Tournasian 末期到 Viséan 早期)沉积,属下部浅海环境。生物分异度相比鹿寨组明显增大,主要表现在有孔虫及藻类繁盛,宏体化石中除见大量菊石外,还产少量腕足类。生境型为 III、IV<sub>1</sub>, 生产力比下伏鹿寨组明显增大。

### 2.3 连岸碳酸盐台地

黔南独山地区石炭系为扬子地台边缘的滨浅海相沉积环境,为连岸台地相。早石炭世 Tournasian 期属间冰期的快速海侵期,主要为碳酸盐沉积。生物分异度极高,有孔虫及由蓝绿藻组成的藻团粒、藻鲕非常繁盛。宏体化石主要为底栖类,珊瑚、腕足类、苔藓虫及棘皮类很繁盛,其中还见有较多的复体四射珊瑚。反映了一种浅海富氧的环境,生境型为 II<sub>1</sub>、II<sub>2</sub>, 生产力极高。

其上 Viséan 早期祥摆组为冰期海退沉积,以碎屑岩为主,部分全为陆相沉积,发育有海陆交互的泥炭沼泽沉积。其中的海相沉积环境多为非正常海,生物分异度不高。有孔虫极为少见,藻类丰度不高,局部可见有较多的介形虫。宏体化石也以广盐度的双壳类多见为特征,海洋生物的生产力明显降低。

从以上三种代表性沉积类型中可以看出,海洋生物分异度及生产力与生境型密切相关。潮间、潮下带及上部浅海生物分异度及生产力最大,其次是下部浅海,最低的是盆地相。石炭纪成冰事件控制了海平面及生境型的变化,从而决定了海洋生物的分异度及生产力。从早石炭世早期的间冰期到其后晚古生代第二次冰期的海退过程中,盆地区和碳酸盐台地区的海洋生物分异度及生产力增大,而碳酸盐台地边缘区(或连岸台地区)则正好相反。

## 3 烃源岩分布与成冰期生境型的关系

烃源岩的形成取决于生烃母质生物的生产力和有机质良好的保存条件,合适的沉积速率、成岩作用、氧化还原环境则是沉积有机质保存的必要条件(Carroll and Wartes, 2003; Meyers *et al.*, 2003; Bohacs *et al.*, 2005)。

华南地区在早石炭世岩关期和大塘期,盆地较为发育,主要包括西南部的黔桂盆地、钦防盆地和六

枝盆地。这些盆地岩性主要是碳酸盐岩、泥岩、泥质灰岩、泥灰岩、硅质岩等,色暗,层薄,有机质丰富,是石炭纪最主要的烃源岩。到晚石炭世盆地范围减小,水体变浅,岩石生油能力降低。此外,石炭纪碳酸盐台地由于在大地构造上一直处于较稳定的状态,地层厚度较大,生物繁盛,有机质丰富,也是有利的生油气地区(冯增昭等, 1998)。下石炭统罗甸、柳州、六枝地区碳酸盐岩和泥岩有机碳含量分别为 1.14%、0.1%~0.72%、0.12%~0.88%,均大于 0.1%,基本上达到了马力等(2004)所定的烃源岩标准——有机碳含量 > 0.4%。

### 3.1 早石炭世 Tournasian 期不同生境型与烃源岩分布

Tournasian 早期为间冰期,华南地区快速海侵,形成大规模较深水碳酸盐台地与深水碳酸盐盆地沉积。Pasley *et al.* (1991)认为在冰期与间冰期之交,气候变暖,冰川消融,海平面迅速上升,形成快速海侵—缓慢海退过程,海水分层,使得沉积界面变为还原环境,有利于烃源岩的形成,形成于海侵体系域(图 4)。同时,海侵扩大了海盆范围,盆地边缘向台地推进,增加了烃源岩的分布区,有利于形成区域性的烃源岩。

在广西隆安远岸碳酸盐台地区,隆安组岩性主要为深灰色薄层灰岩和深灰色中—厚层含生物碎屑灰岩。生境型为 III、III<sub>1</sub>, 生物繁盛,生产力很高。同时由于位于浪基面以下及间冰期海侵导致的水体分层,形成缺氧还原环境,有利于大量有机质的保存。Clavert(1987)认为海相烃源岩的形成是海洋生物高生产力的结果,表层水的高有机质生产力是决定性因素。即使是在含氧的水底,只要有机生产力高,有机质在其分解时可以消耗大量的氧气,造成水底缺氧并形成还原环境,也能形成烃源岩。隆安组高有机质埋藏量的形成主要是因为高生产力的结果,与广西柳州地区下石炭统碳酸盐沉积类似,有机碳含

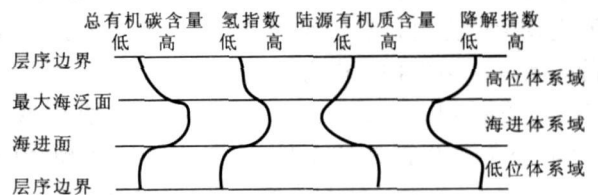


图 4 沉积序列与烃源岩发育相关性(Pasley *et al.*, 1991)

Fig. 4 Plot showing the relationship between depositional successions and the marine source rocks

量较高。

在广西南丹碳酸盐盆地区, 鹿寨组岩性主要为一套黑色炭质泥岩。由于 Tournasian 早期海侵过程, 由高生产力潮下碳酸盐沉积环境转变为欠补偿的台盆还原环境。生境型为 IV<sub>2</sub>、V<sub>1</sub>, 生物含量少, 生产力较低。但是由于水体较深, 为缺氧环境, 是有机质保存的最理想条件, 埋藏量高。与六枝盆地下石炭统泥岩沉积类似, 为一套较好的烃源岩。

### 3.2 早石炭世 Visean 期不同生境型与烃源岩分布

从 Tournasian 末期到 Visean 早期, 华南地区发生大规模海退。在广西隆安远岸碳酸盐台地区, 隆安组转变为都安组碳酸盐浅滩沉积。生境型为 II<sub>1</sub>、II<sub>2</sub>, 生物繁盛, 生产力高。水体浅且动荡, 溶氧量高, 有机质被大量分解, 埋藏量极低, 不能形成烃源岩。

在广西南丹碳酸盐盆地区, 鹿寨组向上转变为巴平组下部浅海沉积, 岩性为深灰色薄—中层灰岩夹燧石条带。生境型为 III<sub>B</sub>、IV<sub>1</sub>, 生物丰度及分异度与鹿寨组相比均有很大的提高, 生产力较高。同时处于深水还原环境, 有机埋藏量增加。与罗甸盆地下石炭统碳酸盐岩沉积相类似, 为高有机碳的烃源岩。

在黔南独山连岸碳酸盐台地区, 生境型属于 II<sub>1</sub>。由于水体较浅, 靠近古陆, 常含有陆源碎屑, 海相烃源岩不发育。然而值得注意的是, 石炭纪陆地上已经发育有丰富的欧美热带植物群, 为这种海陆交互环境提供了大量的有机碳。从 Tournasian 末期到 Visean 早期, 华南地区大规模海退, 靠近古陆边缘形成大规模的滨海平原, 可以形成陆相烃源岩。如黔南地区的祥摆组、湘中地区的测水组煤系地层, 为区域性的烃源岩(马力等, 2004)。

### 3.3 $\delta^{13}\text{C}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 对生境型转变过程的响应

全岩碳、氧同位素分析样品采自广西都结剖面 and 巴平剖面, 野外采样时避免了裂隙、方解石脉, 共采集新鲜碳酸盐岩和泥岩样 166 个(图 2, 图 3), 在中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室进行化学分析。

海相碳酸盐岩的  $\delta^{13}\text{C}$  变化主要受沉积环境的氧化还原条件、海水深度和有机碳含量等主要因素控制(Jasper and Hayes, 1990), 海洋生物通过光合作用在生命活动过程中吸收海水大量的  $^{12}\text{C}$  构成自身的组成部分, 结果使海水及其形成的碳酸盐岩相对富集  $^{13}\text{C}$ 。

都结剖面 and 巴平剖面 Tournasian 与 Visean 界线处  $\delta^{13}\text{C}$  与  $\delta^{18}\text{O}$  都急剧正偏, 表明温度降低, 发生

海退。由隆安组向上转变为都安组沉积, 生境型由 III<sub>B</sub> 转换为 II<sub>1</sub>、II<sub>2</sub>, 有机质埋藏量降低, 然而  $\delta^{13}\text{C}$  与有机质含量成负相关, 可能与冰川融水或大气淡水的大量注入有关。

鹿寨组  $\delta^{13}\text{C}$  初始正偏, 而后负偏。鹿寨组下部表现为海侵过程, 由氧化环境转变为还原环境, 生境型为 V<sub>1</sub>, 有机质大量保存,  $\delta^{13}\text{C}$  正偏, 为 1.24‰~3.96‰ 到鹿寨组上部生境型由 V<sub>1</sub> 转换为 IV<sub>2</sub>, 生产力低, 溶氧量相对增加, 有机质埋藏量减少,  $\delta^{13}\text{C}$  负偏, 为 -4.11‰~2.49‰ 其上巴平组  $\delta^{13}\text{C}$  正偏, 为 1.29‰~2.89‰, 且  $\delta^{18}\text{O}$  与  $\delta^{13}\text{C}$  正相关,  $\delta^{18}\text{O}$  正偏, 表明其温度相对鹿寨组下降。 $\delta^{18}\text{O}$  与  $\delta^{13}\text{C}$  在垂向上的变化有明显的旋回性, 可能代表有多期的次级成冰作用。至巴平组后, 海平面下降, 进入冰期, 但是由于生境型转变为 III<sub>B</sub>、IV<sub>1</sub>, 生物丰度、分异度增加, 生产力大大提高, 有机质沉积速率增加, 消耗大量氧气, 形成缺氧环境, 有机质埋藏量增加, 形成有机碳含量相对较高的烃源岩。

综上所述, 不同的生境型具有不同的生烃潜力, 生境型决定了生物生产力的大小及有机质保存环境, 进而决定了烃源岩的形成与分布。石炭纪成冰事件控制着海平面的变化和生境型的转变, 因此, 石炭纪烃源岩的形成与展布主要受控于冈瓦纳大陆的冰期作用。

## 4 结论

(1) 冈瓦纳大陆石炭纪—早二叠世早期共有四次重要的成冰事件, 控制着华南地区该期的海平面变化, 影响了生境型的分布、生物类群的演替及海洋生物生产力的变化, 也影响了有机质沉积时的氧化还原环境, 从而影响了烃源岩的形成与分布。

(2) 早石炭世 Tournasian 早中期是间冰期的快速海侵期, 远岸碳酸盐台地的隆安组生境型主要为 III<sub>B</sub>, 海洋生物生产力高, 处于缺氧还原环境, 有机质大量埋藏, 形成碳酸岩型烃源岩; 盆地相鹿寨组生境型为 V<sub>1</sub>、IV<sub>2</sub>, 水体深, 为厌氧环境, 有机质的保存条件极好, 形成泥岩型烃源岩。

(3) 从石炭纪 Tournasian 末期到 Visean 早期, 成冰事件的规模最大, 华南地区表现为大规模的海退。冰期海退, 海平面降低, 巴平组由盆地相鹿寨组转变为潮下碳酸盐沉积, 生境型为 IV<sub>1</sub>、III<sub>B</sub>, 有利于高生产力形成。同时水体较深, 为缺氧还原环境, 大

量有机质保存下来,形成高有机碳烃源岩。在连岸台地相区,海退形成大规模的滨海沼泽相,有利于形成陆相烃源岩。

(4)晚石炭世至早二叠世早期,华南地区碳酸盐台地广布,盆地面积大大减少,水体很浅,在 Serpukhovian 末期、Moscovian 晚期和 Asselian 末期发生的成冰事件对华南地区影响相对较小。生境型主要为 II<sub>1</sub>、II<sub>2</sub>,有时为 I<sub>1</sub>、III,生产力很高,但是溶氧量同样很高,不利于形成烃源岩。

致谢:感谢黄俊华教授、胡超涌教授及罗根明同学在野外和室内对本专题研究的帮助。

## References

- Bohacs, K. M., Grabowski, Jr. G. J., Carroll A. R., et al., 2005. Production, destruction, and dilution: The many paths to source-rock development. *Special Publication—Society for Sedimentary Geology*, 82: 61–101.
- Bromley, R. G., Ekdale, A. A., 1984. Chondrites: A trace fossil indicator of anoxia in sediments. *Science* 224 (4651): 872–874.
- Carroll, A. R., Wartes, M. A., 2003. Organic carbon burial by large Permian lakes Northwest China. *Special Paper—Geological Society of America*, 370: 91–104.
- Clavert, S. E., 1987. Oceanographic controls on the accumulation of organic matter in marine sediments. In: Brook, J., Fleet, A. J., eds., *Marine petroleum source rock*. Blackwell Scientific, London, 137–151.
- Crowley, T. J., Baum, S. K., 1991. Estimating Carboniferous sea-level fluctuations from Gondwana ice extent. *Geology*, 19(10): 975–977.
- Feng Z. Z., Yang Y. Q., Bao, Z. D., et al., 1998. Lithofacies paleogeography of Carboniferous in South China. Geological Publishing Housing, Beijing (in Chinese).
- Gong, Y. M., 2004. Facies characteristics and tiering distributions of Chondrites. *Acta Palaeontologica Sinica*, 43 (1): 94–102 (in Chinese with English abstract).
- Jasper, J. P., Hayes, J. M., 1990. A carbon isotope record of CO<sub>2</sub> levels during the late Quaternary. *Nature*, 347 (6292): 462–464.
- Li R. F., Liu B. P., Zhao, C. L., 1997. Correlation of Carboniferous depositional sequences on the Yangtze plate with others on a global scale. *Acta Sedimentologica Sinica*, 15(3): 23–28 (in Chinese with English abstract).
- Liu, B. P., Li R. F., You, D. H., 1994. Carboniferous sequence stratigraphy and glacio-eustasy of Triticites zone in Southern Guizhou, China. *Earth Science—Journal of*

*China University of Geosciences*, 19 (5): 553–564 (in Chinese with English abstract).

- Ma, L., Chen, H. J., Gan, K. W., et al., 2004. Geotectonics and petroleum geology of marine sedimentary rocks in southern China. Geological Publishing Housing, Beijing (in Chinese).
- Meyers S. R., Sageman, B. B., Lyons T. W., 2003. The role of sulfate reduction in organic matter degradation and molybdenum accumulation: Theoretical framework and application to a Cretaceous organic matter burial event. *Abstracts with Programs—Geological Society of America*, 35(6): 82.
- Pasley, M. A., Gregory, W. A., Hart, G. F., 1991. Organic matter variations in transgressive and regressive shales. *Organic Geochemistry*, 17(4): 483–509.
- Qin, J. X., Zeng, Y. F., Huang, Z. X., et al., 1996. Carboniferous sequence stratigraphy and sea-level changes in the Majiaoba district, Sichuan. *Sedimentary Facies and Palaeogeography*, 16(1): 19–33 (in Chinese with English abstract).
- Vail P. R., Todd, R. G., Sangree J. B., 1977. Seismic stratigraphy and global changes of sea level. In: Seismic stratigraphy-applications to hydrocarbon exploration. *American Association of Petroleum Geologists*, 26: 99–116.
- Veevers, J. J., Powell, M., 1987. Late Paleozoic glacial episodes in Gondwanaland reflected in transgressive-regressive depositional sequences in Euramerica. *Geological Society of America Bulletin*, 98(4): 475–487.
- Wu, Y., Gong, Y. M., Du, Y. S., 1997. Devonian sequence stratigraphy and sea-level changes within the South China plate. China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese).

## 附中文参考文献

- 冯增昭, 杨玉卿, 鲍志东, 等, 1998. 中国南方石炭纪岩相古地理. 北京: 地质出版社.
- 龚一鸣, 2004. 遗迹化石 Chondrites 的指相意义和阶层分布. *古生物学报*, 43(1): 94–102.
- 李儒峰, 刘本培, 赵澄林, 1997. 扬子板块石炭纪沉积层序及其全球性对比研究. *沉积学报*, 15(3): 23–28.
- 刘本培, 李儒峰, 尤德宏, 1994. 黔南独山石炭系层序地层及麦粒筵带冰川型全球海平面变化. *地球科学——中国地质大学学报*, 19(5): 553–564.
- 马力, 陈焕疆, 甘克文, 等, 2004. 中国南方大地构造和海相油气地质. 北京: 地质出版社.
- 覃建雄, 曾允孚, 黄志勋, 等, 1996. 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. *岩相古地理*, 16(1): 19–33.
- 吴诒, 龚一鸣, 杜远生, 1997. 华南泥盆纪层序地层及海平面变化. 武汉: 中国地质大学出版社.