

弗拉期—法门期(F-F)之交事件在广西全州地区的沉积学响应

侯亚飞¹, 宋博文^{1*}, 郭俊刚², 寇晓虎¹, 尹家一¹, 艾承志¹, 王嘉轩³

HOU Yafei¹, SONG Bowen^{1*}, GUO Jungang², KOU Xiaohu¹, YIN Jiayi¹, AI Chengzhi¹, WANG Jiakuan³

1. 中国地质大学(武汉)地质调查研究院, 湖北 武汉 430074;

2. 中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所, 河南 郑州 450006;

3. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 湖北 武汉 430074

1. Institute of Geological Survey, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China;

2. Zhengzhou Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, GAGS, Zhengzhou 450006, Henan, China;

3. School of Earth Science, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China

摘要:晚泥盆世弗拉期—法门期之交, 地球环境急剧变化。广西作为中国南方泥盆纪沉积最为发育的地区, 对该事件具有良好的记录。从广西全州地区东山剖面发育的一套海相碳酸盐岩为主夹细颗粒陆源碎屑岩序列的岩相、沉积微相及生物化石入手, 厘定研究区内弗拉期—法门阶界线, 揭示研究区内与弗拉期—法门期事件相关的沉积记录, 进而探讨当时的海平面变化情况。综合剖面重点层位的化石类型及岩石沉积微相特征, 将研究区内弗拉期—法门阶界线限定在剖面第49~50层界线处, 并认为研究区在晚泥盆世弗拉期—法门期之交发生了2次紧邻的阶跃型海平面上升和阶跃型海平面下降过程, 与全球多区域海平面变化趋势一致。

关键词:弗拉期—法门期事件; 岩相; 沉积微相; 生物化石; 阶跃型海平面变化

中图分类号: P534.44; P539.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2021)04-0499-13

Hou Y F, Song B W, Guo J G, Kou X H, Yin J Y, Ai C Z, Wang J X. Frasnian–Famennian Event and its response to the sedimentation in Quanzhou of Guangxi Province. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(4): 499–511

Abstract: At the turn of Frasnian–Famennian(F–F) in Late Devonian, the environment of earth changed rapidly. As the most developed Devonian sedimentary area in South China, Guangxi has a good record of this event. Based on the study of lithic facies, sedimentary microfacies, and fossils from a series of marine carbonate rocks, siltstone and argillaceous rocks in the Dongshan section, the boundary of F–F was confirmed, and sedimentary records related to the F–F events in this area were revealed to discuss the sea level changes at the turn of F–F. It is suggested that the boundary of F–F can be restricted to the boundary between the 49 layer and 50 layer of the section. It is assumed that two adjacent stepped sea-level rise and fall occurred at the turn of F–F, which is similar to other areas in the world.

Key words: F–F event; lithic facies; sedimentary microfacies; fossils; stepped sea-level change

在晚泥盆世弗拉期—法门期(F-F)之交, 地球上的生物及其生活环境均发生了重大变化^[1-3]。F-F 事件作为显生宙以来五大生物灭绝事件之一, 不仅对当时地球的海洋生态系统和生物多样性造成巨

收稿日期: 2019-10-22; 修订日期: 2020-04-04

资助项目: 中国地质调查局项目《南岭成矿带中西段地质矿产调查》(编号: DD20179182) 和《中国洋板块地层综合研究》(编号: DD20190370)

作者简介: 侯亚飞(1996-), 男, 在读硕士生, 古生物学与地层学专业。E-mail: yfhou@cug.edu.cn

* 通信作者: 宋博文(1985-), 男, 博士, 讲师, 从事古生物学与地层学教学及科研工作。E-mail: bwsong1985@cug.edu.cn

大创伤^[4-6],更对该时期的沉积环境和沉积古地理展布影响颇深^[7]。先前学者对于该事件的研究主要集中于生物地层、化学地层等方面的响应^[8-12],相对而言对沉积学方面的研究偏少。经过多年的系列研究,目前学者对 F-F 事件的生物响应、气候环境背景、触发机制及生物灭绝模式已经取得了相当程度的认识^[13-22],然而,F-F 事件的沉积响应的研究相对薄弱。作为与 F-F 事件紧密相关的沉积事件的产物,本次研究主要从广西全州地区东山剖面发育的一套以海相碳酸盐岩为主夹细粒陆源碎屑岩组合的沉积微相和化石记录入手,揭示并分析 F-F 事件在研究区的沉积记录,进而探讨相关沉积记录对于当时海平面变化情况的指示,为弗拉期—法门期关键转折期中生物-环境协同演化研究提供沉积学方面的证据。

1 地质背景

广西是中国南方泥盆纪沉积最发育的地区之一^[23-24]。从早泥盆世早期开始,华南一带的海侵从西南向东北侵进。到早泥盆世晚期和中泥盆世早期,海相沉积扩展到了桂林地区。自中泥盆世开始,华南裂谷活动增强,形成了深水裂谷相和浅水台地相交叉发育的网状格局^[25-28](图 1-A)。至晚泥盆世,早期主要沉积一套浅海相、台地相碳酸盐岩和半深海台间盆地相硅质岩、硅质页岩;晚期海水变浅,主要沉积一套浅海台地相碳酸盐岩,台盆缩小,水体变浅^[30-32]。

研究区位于桂中断陷盆地内,区内出露的主要地层为中新元古界(青白口系、震旦系)、古生界(寒武系、奥陶系、泥盆系、石炭系和二叠系)、中生界(白垩系)和新生界(第四系),其中以上古生界出露最多(图 1-B)。本次研究主要聚焦于晚泥盆世沉积。晚泥盆世本区域受控于不同水深、不同物源及不同沉积环境发育的一套海相碳酸盐岩夹细颗粒陆源碎屑岩组合,对于弗拉期—法门期之交所发生的沉积事件有着很好的记录。

2 实测剖面概况

本次实测的东山剖面位于广西桂林市全州县东山瑶族乡古木村南 1 km 处,剖面 GPS 地理坐标为:东经 111°44.858′、北纬 25°17.197′。实测剖面中—上泥盆统出露齐全,自下而上依次出露棋梓桥

组(D_{2q})、余田桥组(D_{3s})、锡矿山组(D_{3x})、孟公坳组(D_{3m})和马栏边组(C_{1m}),各地层之间均为整合接触。利用岩石自然分层方法共划分了 115 层,其岩层真厚度大于 358 m(图 2)。

自下而上东山剖面底部为棋梓桥组(D_{2q}),未见底,岩性主要为青灰色、深灰色中-厚层状亮晶灰岩、生物碎屑灰岩,其间发育大量珊瑚类生物化石;余田桥组(D_{3s})岩性主要为青灰色中-厚层状亮晶灰岩、生物碎屑灰岩和亮晶砂屑灰岩,其间发育腹足类、珊瑚类、腕足类生物化石;锡矿山组(D_{3x})下部岩性主要为深灰色薄层状泥晶灰岩夹青灰色瘤状结核泥晶灰岩和灰黄色粉砂岩,局部发育草莓状黄铁矿,上部岩性以青灰色中-厚层状亮晶灰岩、生物碎屑灰岩、亮晶砂屑灰岩及灰白色白云岩为主,其间发育腕足、牙形石等生物化石;孟公坳组(D_{3m})岩性以灰色、灰黄色薄层状粉砂岩、泥灰岩、泥岩为主,少见底栖生物及牙形石生物;马栏边组(C_{1m})岩性以青灰色中层状亮晶灰岩、亮晶砂屑灰岩为主,未见顶。

3 牙形石化石对 F-F 界线的约束

泥盆纪是牙形石发育的全盛时期,牙形石生物地层研究最详细。前人在泥盆纪牙形石中建立了众多牙形石标志分子,对于地层年代的约束具有极其重要的意义^[33-35]。

牙形石分子 *Palmatolepis gigas* 和 *Palmatolepis triangularis* 是限定泥盆系弗拉阶和法门阶界线的标准化石^[36-38]。尹家一等^[12]对东山剖面开展了详细的牙形石生物地层学研究,自下而上建立了 8 个牙形石带(组合),依次为:*Icriodus brevis* 带、*Schmidtognathus hermanni* - *Polygnathus cristatus* 带、*Schmidtognathus wittekindtii* 带、*Palmatolepis linguiformis* 带、*Palmatolepis triangularis* 带、*Palmatolepis rhomboidea* 带、*Icriodus cornutus* 带和 *Palmatolepis gracilis sigmoidalis* - *Rhodalepis polylophodontiformis* 带。

尹家一等^[12]根据牙形石 *Pa.gigas*(图 3-C)分子在东山剖面第 49 层顶部最后出现,在第 50 层完全消失,同时牙形石 *Pa.triangularis*(图 3-B)分子在第 50 层首次出现,将研究区弗拉阶/法门阶(F/F)的界线限定在东山剖面第 49/50 层界线处,即该区域余田桥组和锡矿山组的分界线(图 3-A)。同时,东山剖面余田桥组和锡矿山组分别对应国际地层单位

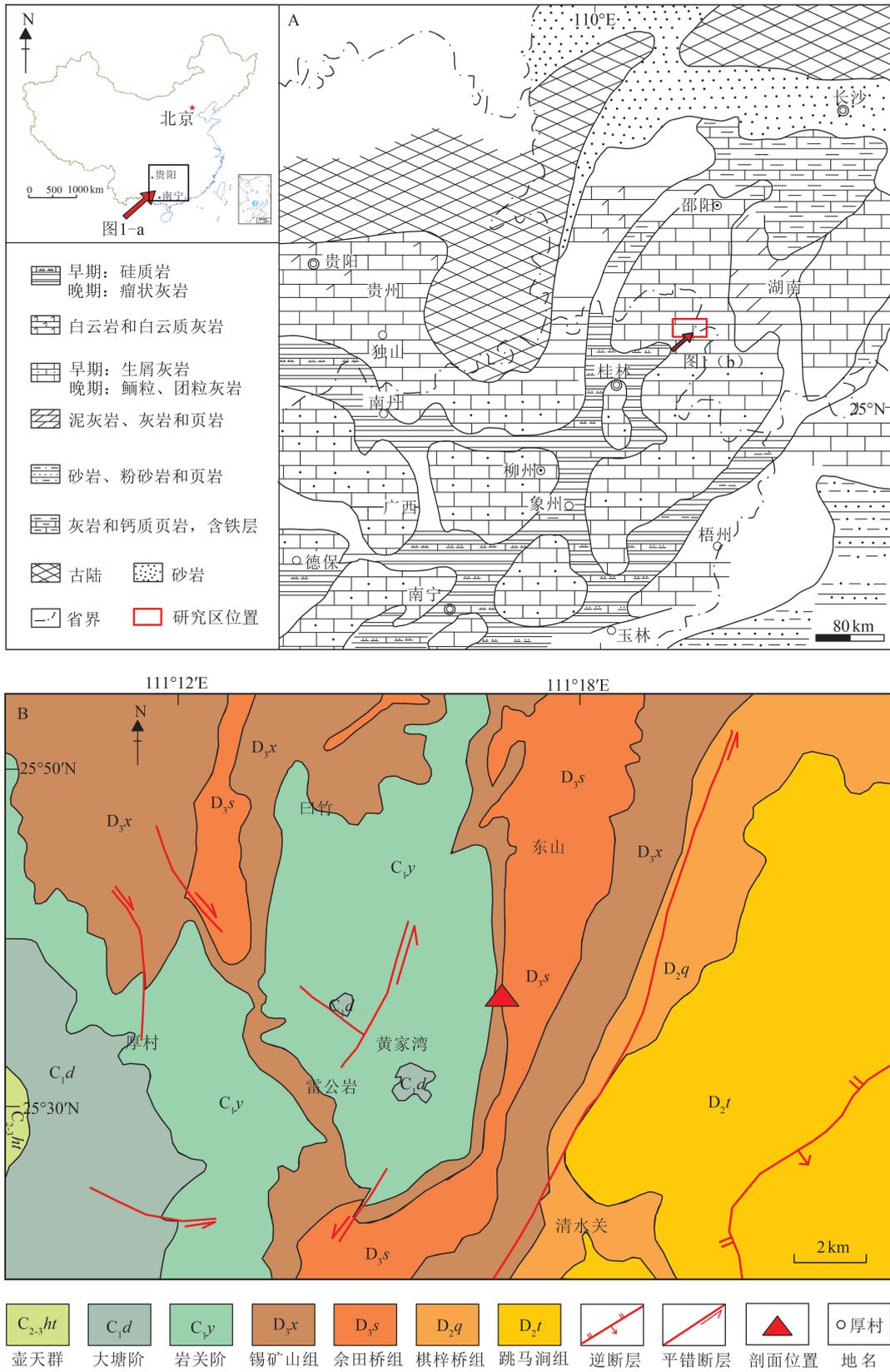


图 1 研究区晚泥盆世古地理图(A, 据参考文献[29]修改)和地质简图(B)

Fig. 1 Late Devonian paleogeography map(A) and geological map(B) of the study area

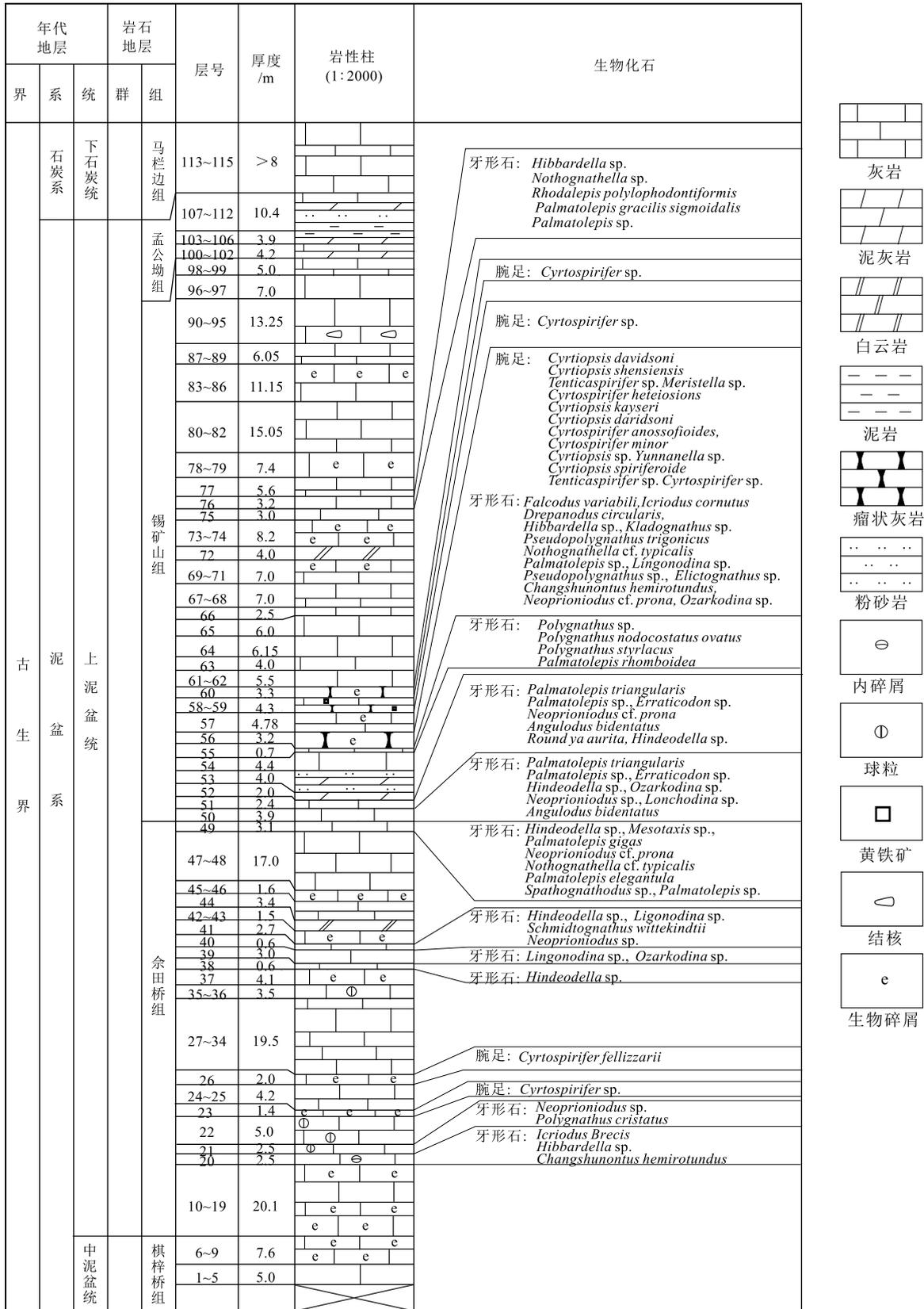


图2 广西全州东山地区中泥盆统一下石炭统剖面柱状图

Fig. 2 The column of Dongshan section in Middle Devonian -Lower Carboniferous in Quanzhou area, Guangxi

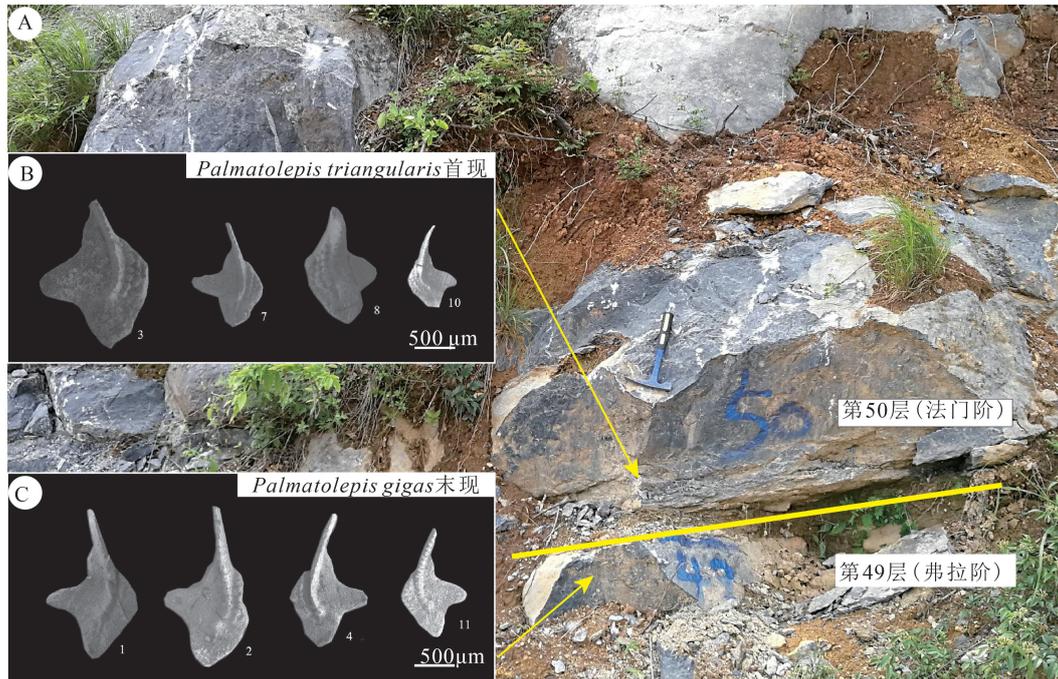


图 3 广西全州东山剖面 F-F 界线野外露头(A)及牙形石 *Palmatolepis triangularis*(B)和 *Palmatolepis gigas*(C)典型照片(据参考文献[12])

Fig. 3 The outcrop of F-F boundary(A) and *Palmatolepis triangularis*(B) and *Palmatolepis gigas*(C) in the Dongshan section of Quanzhou area, Guangxi

A—黄线为 F-F 界限,黄线下方为东山剖面第 49 层(弗拉阶顶部)野外露头,黄线上方为东山剖面第 50 层(法门阶底部)野外露头;B—产于东山剖面第 50 层(法门阶底部);C—产于东山剖面第 49 层(弗拉阶顶部)

的弗拉阶上部、法门阶下部。

4 F-F 界线附近典型层段沉积微相特征

本次研究主要聚焦于下泥盆统 F/F 之交处的重点地层段即余田桥组 (D_3s) 上部与锡矿山组 (D_3x) 下部的岩性岩相特征。该层段即为东山剖面中的第 40~82 层,控制岩层厚度约 140.48 m。下文按照从浅水台地相沉积环境至盆地相沉积环境逐渐演替的顺序,对重点地层段具有环境指示意义的沉积微相进行具体特征描述。

4.1 砂屑灰岩微相(MF1)

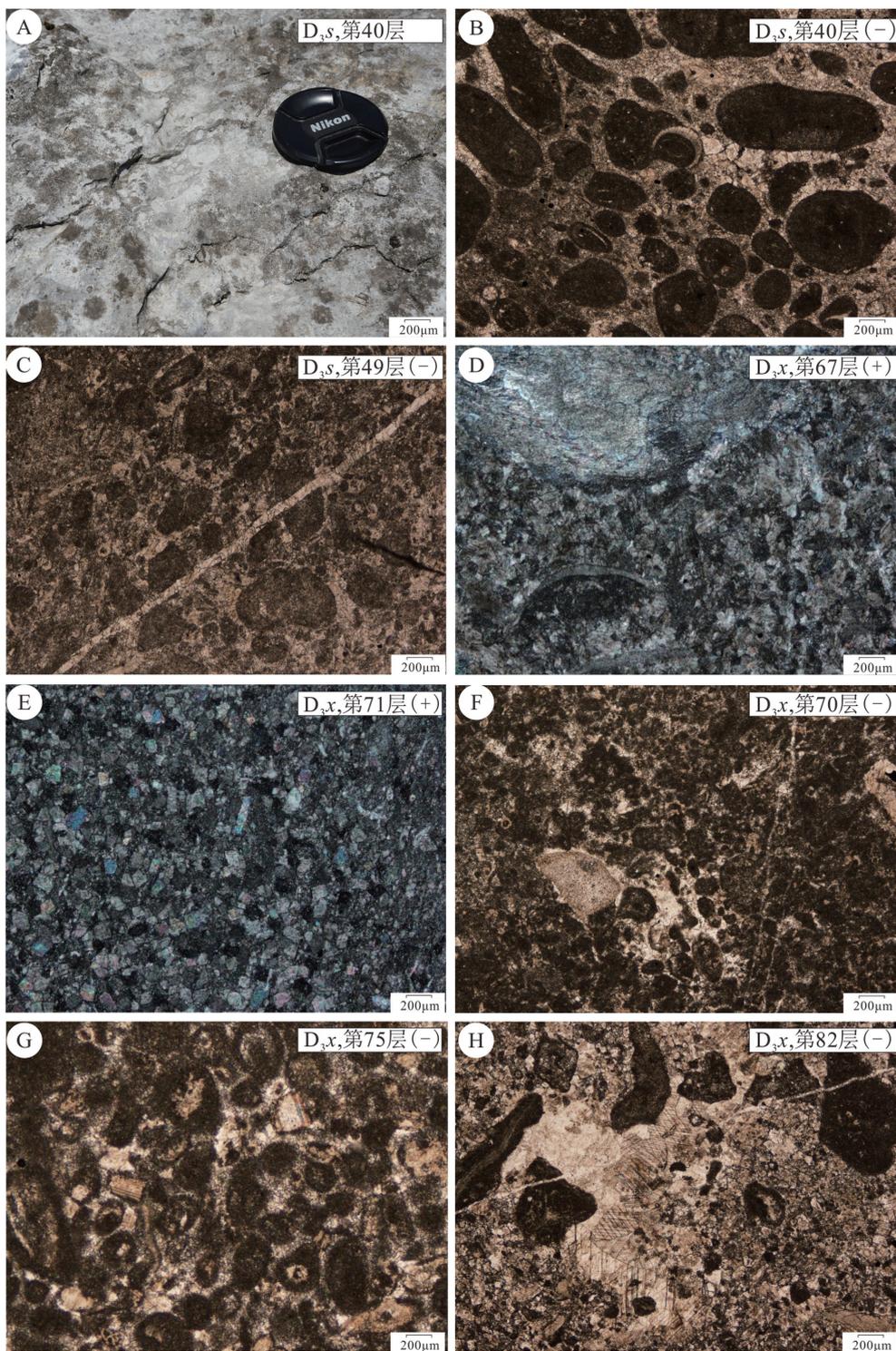
砂屑灰岩主要产于剖面第 40、49、67、70、75、82 层,分布于 F-F 界线两侧。

沉积特征:在露头上砂屑灰岩一般为灰色-深灰色厚层状灰岩(图版 I-A),局部可见明显的碎屑颗粒。在薄片可见大量砂屑颗粒,呈黑色-深灰色,成分为泥晶方解石,粒径为 0.1~0.5 mm,多呈椭圆状,分选性较差,大部分为基质支撑,局部砂屑含

量可达 75%,为颗粒支撑;邻近较大的砂屑颗粒具有一定的定向性(图版 I-B),较大颗粒的长轴方向一致;较小的砂屑颗粒磨圆度较好,分选性较差,排列规律性不强(图版 I-G);颗粒多被较粗的亮晶方解石胶结。F-F 界线之下,即 49 层及以下的砂屑灰岩中,砂屑颗粒较大,但含量较低,多在 20%~30%之间,且少有生物碎屑出现(图版 I-C);F-F 界线之上浅水沉积层段的砂屑灰岩中,砂屑颗粒较小,但含量较高,多在 50%以上(图版 I-F),局部颗粒支撑可达 70%。其中第 67 层(图版 I-D)和第 82 层(图版 I-H)可见较破碎的生物碎屑,且第 71 层出现砂糖状的亮晶方解石,晶形发育完整(图版 I-E)。

环境解释:根据砂屑灰岩露头与薄片特征分析,可确定其为内碎屑灰岩的一种,其成因与传统竹叶状灰岩类似,但水动力条件不同^[39-43]。在浅水潮坪环境中,未经固结的灰质沉积物经持续较强水动力破坏,形成灰质砂屑颗粒。由于此时砂屑颗粒

图版 I Plate I



A.亮晶砂屑灰岩露头照片,肉眼可见大量砂屑,余田桥组(D_{3s})第40层;B.亮晶砂屑灰岩微相照片,砂屑颗粒呈黑色-深灰色,邻近砂屑颗粒可见一定的定向性,余田桥组第40层;C.亮晶砂屑灰岩微相照片,余田桥组第49层,砂屑颗粒呈黑色-深灰色,大小不一,余田桥组第49层;D.含生物碎屑亮晶砂屑灰岩微相照片,生物化石较破碎,砂屑颗粒较小,锡矿山组(D_{3x})第67层;E.含生物碎屑亮晶灰岩微相照片,可见砂糖状粗颗粒亮晶方解石,锡矿山组第71层;F.砂屑泥晶灰岩微相照片,颗粒为黑色泥晶,含量50%以上,锡矿山组第70层;G.砂屑灰岩微相照片,大量砂屑杂乱排列且粒度较小,锡矿山组第75层;H.含生物碎屑砂屑亮晶灰岩,砂屑形状不规则,大小不一,局部含凝块石,锡矿山组第82层。微相照片中(-)为单偏光,(+)为正交偏光

较软,其易磨性、易溶性和结构的相对松散性使之在潮坪潮间带动荡的水体中具有较好的磨圆度。但由于水动力是往复运动的,颗粒基本没有形成明显的搬运距离,所以分选性较差,破碎颗粒基本上原地沉积。在水动力减弱之后,砂屑颗粒重新沉积,经后期生成的亮晶方解石胶结而后固结成岩,形成砂屑灰岩^[44-45]。

据以上分析可知,重点研究层段出现的砂屑亮晶灰岩指示强水动力沉积,是典型的潮汐流往复作用明显、位于平均高潮面与平均低潮面之间的浅水潮坪潮间带沉积产物,海水深度应在0~10 m。

4.2 生物碎屑灰岩微相(MF2)

生物碎屑灰岩主要产出于剖面第44(图版Ⅱ-A)、48(图版Ⅱ-B)和62(图版Ⅱ-C)层。

沉积特征:生物碎屑破碎严重,碎片大小不等,多在0.01~2 mm之间,总含量约20%,亮晶方解石充填,生物类型多为介形类、珊瑚、藻类等浅水生物;基质为泥晶方解石,受生物碎屑不均匀分布影响,局部泥质含量不稳定,但大多在30%左右。

环境解释:在该微相中,亮晶方解石含量相对较高,局部亮晶方解石含量达50%以上;且大部分生物碎屑破碎极其严重,指示了能量较高的水体条件^[46-47];生物类型以介形类、珊瑚、藻类等生物为主导,从该生物组合的古生态判断,该微相代表了深度较浅、阳光充足的洁净水体环境^[48-50]。据此推断,此段生物碎屑灰岩应发育在波浪作用明显、生物丰富的浅水潮间带沉积环境当中,海水深度应在0~20 m。

4.3 含藻纹层泥晶灰岩微相(MF3)

含藻纹层泥晶灰岩(图版Ⅱ-D)主要产出于剖面第50层。

沉积特征:在该微相中,泥质含量较高,含量多大于50%,局部可见较完整的藻纹层,除藻纹层外可见少量腕足和介形类壳体,形态较完整,生物碎屑经后期重结晶作用充填成为亮晶方解石。

环境解释:泥晶发育指示水体较深的环境;藻纹层连续,生物壳体较完整,指示较平静的水动力环境。但是由于藻类的出现,该层段虽为深水沉积,但水体不会过深,推测应在潮下带中部,海水深度应在50 m左右。

4.4 泥灰岩微相(MF4)

泥灰岩主要产出于剖面第52(图版Ⅱ-E)、53

和57层。

沉积特征:该微相主要由泥晶构成,含量均在80%以上,细小泥晶分布均匀,局部可见粘土质和粉砂质陆源碎屑,总含量约为20%(图版Ⅱ-F);可见细小纹层(图版Ⅱ-G),化石稀少,未见生物扰动构造。其中,在第53层泥灰岩中,可见极薄层石英质粉砂岩夹层发育,粉砂岩中细纹层理清晰可见(图版Ⅱ-H)。

环境解释:根据纹层发育、化石缺少、单层厚度小、碳酸盐沉积速率低等特征可以推测,该层段海水深度较深,为深潮下带下部环境;极薄层粉砂岩夹层的出现指示,其最大水深环境可延伸至广海陆棚相^[33,51-53]。所以,无夹层的泥灰岩所处环境的海水深度应在150 m以上,而有极薄层粉砂岩夹层的泥灰岩所处环境最大可达200 m以上。综合以上特征,该微相发育水深估计在150 m左右。

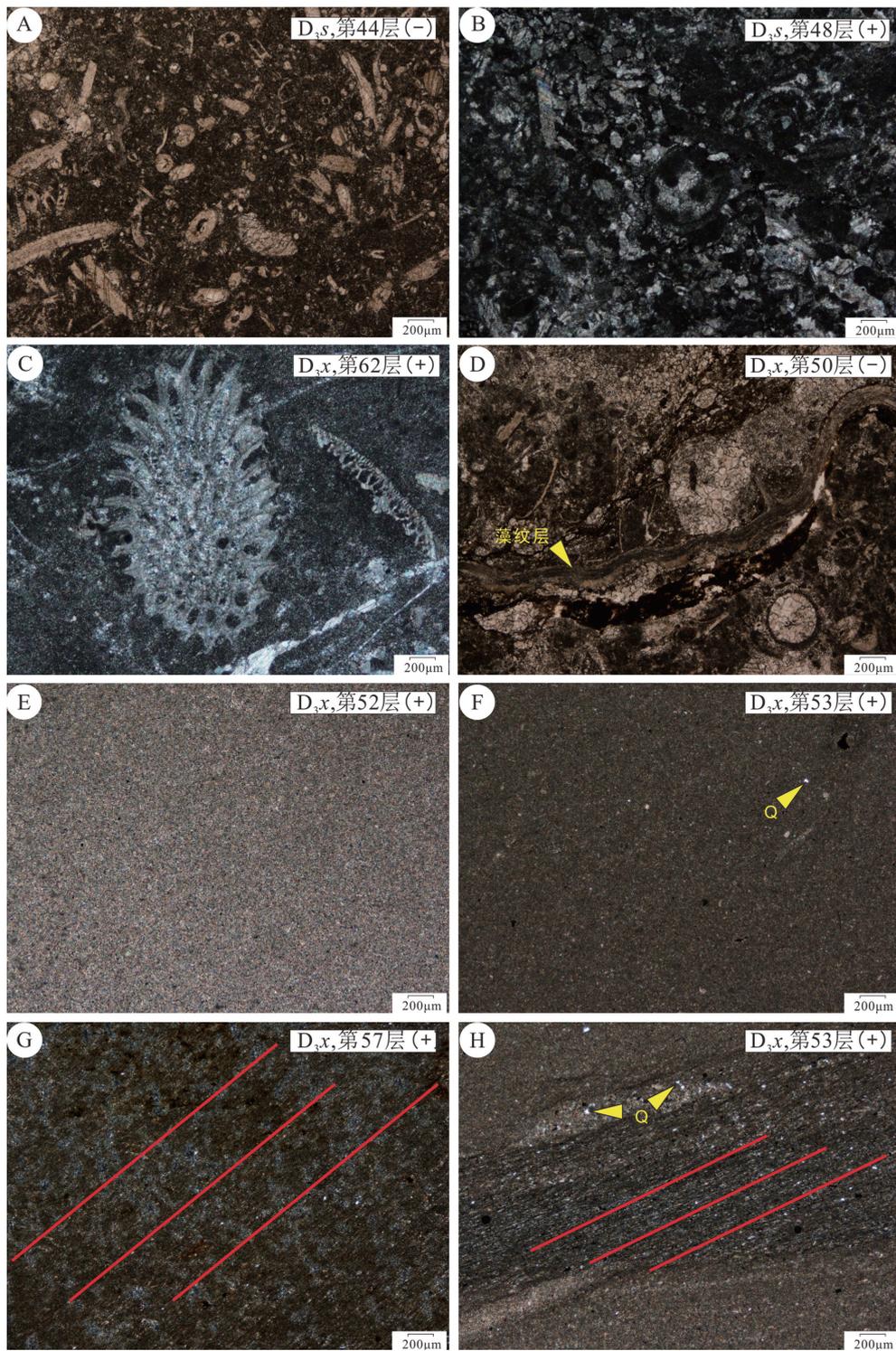
4.5 瘤状结核泥晶灰岩微相(MF5)

瘤状结核泥晶灰岩主要产出于剖面第56、58和60层。

沉积特征:在露头上,瘤状结核泥晶灰岩与上下层之间界线明显,易于分辨。瘤状结核泥晶灰岩整体呈深灰色,分为瘤状结核和基质两部分,瘤体为亮晶结构,基质为泥晶结。瘤体结核呈椭圆状、透镜状、不规则状顺层发育于泥质基质中(图版Ⅲ-A、E),部分瘤体连续,未被基质切断(图版Ⅲ-F),大部分瘤体为不连续串珠状,大小多为1~2 cm不等,成分为亮晶方解石,易发生溶蚀。基质为深灰色泥晶方解石,发育明显的波状层理,波纹绕过瘤体结核将其包围,判断基质沉积稍晚于瘤体形成。由于基质与瘤体成分具有差异性,在风化面上,经雨水淋滤作用,亮晶瘤体易发生溶解、风化,而泥晶基质相比更抗风化,所以在野外易形成顺层蜂窝状的风化面(图版Ⅲ-B)。

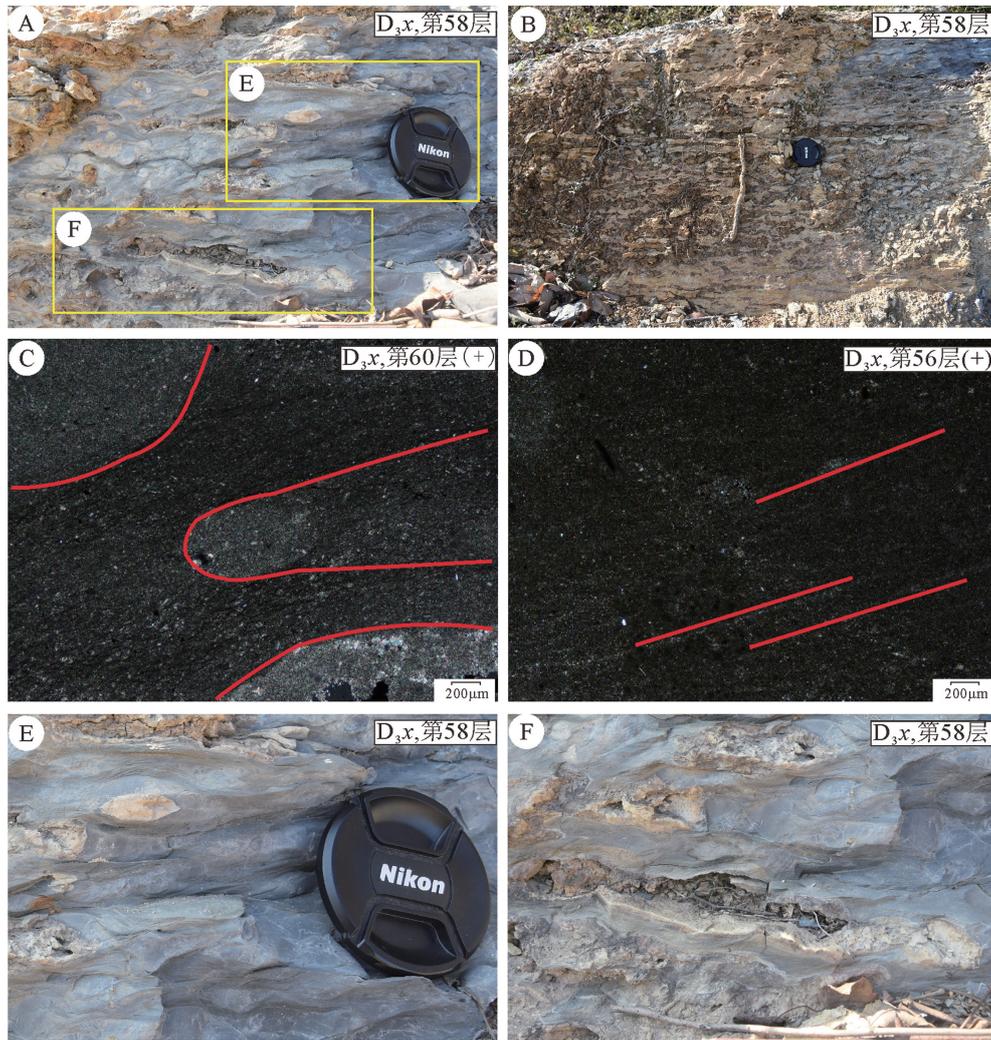
在薄片瘤体与基质界线明显(图版Ⅲ-C),表现为亮晶-泥晶交替出现,且泥晶方解石含量大于亮晶方解石。瘤体结核为较粗的亮晶方解石,边缘平滑;而基质为细小的泥晶方解石,可见细小的纹层(图版Ⅲ-D),尤其在与瘤体结核凸出部分的接触处,纹层更细。在不连续的椭圆状瘤体周围,泥晶基质顺层包围瘤体结核;在部分连续的不规则状瘤体结核周围,泥晶基质可形成火焰状不规则层理。

图版 II Plate II



A. 生物碎屑灰岩微相照片, 可见大量介形类、珊瑚类、藻类生物化石碎屑, 余田桥组 (D_{3s}) 第 44 层; B. 含生物碎屑灰岩, 生物碎屑较为破碎, 余田桥组第 48 层; C. 含生物碎屑灰岩, 可见一较完整的藻类碎屑, 锡矿山组 (D_{3x}) 第 62 层; D. 含藻纹层泥状灰岩微相照片, 可见一条较完整的藻细纹层 (黄色箭头), 锡矿山组第 50 层; E. 泥灰岩微相照片, 细小泥晶均匀分布, 锡矿山组第 52 层; F. 泥灰岩微相照片, 细小泥晶均匀分布, 可见极细颗粒陆源碎屑, 黄色箭头指示为硅质碎屑 (Q), 锡矿山组第 53 层; G. 泥灰岩微相照片, 局部可见细小纹层 (红色线条), 锡矿山组第 57 层; H. 极薄层状粉砂岩夹层, 细纹层 (红色线条) 清晰可见, 黄色箭头指示为硅质碎屑 (Q), 锡矿山组第 53 层。微相照片中 (-) 为单偏光, (+) 为正交偏光

图版 III Plate III



A. 结核泥晶灰岩露头照片, 有连续和不连续 2 种瘤体类型, 锡矿山组 (D_3x) 第 58 层; B. 结核泥晶灰岩风化面露头照片, 瘤体经淡水淋滤易溶解, 形成蜂窝状风化面, 锡矿山组第 58 层; C. 结核泥晶灰岩微相照片, 瘤体结核与基质边界明显, 亮晶与泥晶区分边界 (红色线条), 锡矿山组第 60 层; D. 结核泥晶灰岩微相照片, 泥晶基质中可见纹层 (红色线条), 锡矿山组第 56 层; E. 结核泥晶灰岩中的不连续椭球状结核, 锡矿山组第 58 层; F. 结核泥晶灰岩中的连续不规则状结核, 中间细两端粗, 锡矿山组第 58 层。微相照片中 (-) 为单偏光, (+) 为正交偏光

环境解释: 根据露头和薄片分析, 该区域结核泥晶灰岩应归属于压扁型瘤状结核泥晶灰岩^[54-55], 其特征如下: ①不连续瘤体大多为平缓的椭球体或透镜体, 很少见到粗糙的不规则状结核个体; ②连续结核表现出中间细、两端粗的特征, 为不平衡垂向应力挤压形成, 应力不足, 未将其完全切断; ③在结核周围有连续泥晶纹层绕过结核, 且与结核凸出部分的接触处纹层更细, 为后期压力作用造成。压扁型瘤状结核泥晶灰岩多形成于较大坡度的深水—半深水盆地中, 主要受控于海底溶解作用、沉积期滑塌作用及成岩期差异压实作用。根据前人^[54-58]

对中国南方瘤状结核泥晶灰岩的研究, 结合局部发育的极细草莓状黄铁矿可知, 此种类型的压扁型瘤状结核泥晶灰岩一般形成于水深 200 m 以上的半深海, 有时可达深海, 是一种深水沉积标志^[54, 59]。

根据 3 层瘤状结核泥晶灰岩的厚度、形态等特征, 第 56 层和第 60 层海水深度应大于 200 m; 而 58 层岩层厚度最薄, 沉积速率最低, 应为海侵作用最大处, 即海水深度最深处, 其深度应大于第 56、60 层水深。

综合以上 5 种不同碳酸盐岩微相特征分析, 表明在重点研究层段 (40~82 层) 中的砂屑灰岩微相

(MF1)、生物碎屑灰岩微相(MF2)和含藻纹层泥晶灰岩微相(MF3)代表的沉积环境应为浅水沉积;而泥灰岩微相(MF4)、瘤状结核泥晶灰岩微相(MF5)代表的沉积环境应为深水沉积。

5 F-F 界线附近海平面变化

通过对研究剖面重点层段岩性岩相分析,发现该区域在短时间内具有地层连续、相序突变的沉积特征^[6, 60-63],在地层露头上表现为多个明显的不同水深沉积环境和沉积产物的演化阶段(图4):
 ①F-F 界线下部发育的厚层状砂屑亮晶灰岩,指示强水动力条件,代表浅水潮坪潮下带沉积环境,其海水深度一般为0~10 m;
 ②F-F 界线下部发育的亮晶生物碎屑灰岩,指示阳光充足、水体洁净的浅水潮坪潮间带沉积环境,其海水深度一般为0~20 m;
 ③F-F 界线上部发育的含藻纹层泥晶灰岩代表水体较平静的潮下带中部沉积环境,其海水深度一般为50 m左右;
 ④F-F 界线上部发育的泥灰岩代表深度较深、水体安静的深潮下带下部沉积环境,局部可延伸至广海陆棚相,其海水深度一般为150 m(以

上)至200 m(以上);
 ⑤F-F 界线上部发育的压扁型瘤状结核泥晶灰岩,指示静水动力条件,代表较深水半深海沉积环境,此时海水深度达200 m以上;
 ⑥压扁型瘤状结核泥晶灰岩上部发育的厚层-巨厚层状砂屑亮晶灰岩,再次指示较强水动力条件,此时研究区恢复浅水潮坪潮间带沉积环境,海水深度显著降低至0~10 m。

通过这些沉积产物及其时间跨度对于沉积期内区域海水深度变化的指示,结合前人研究^[2, 6, 60-61, 64-68],得出以下结论:在晚泥盆世F-F之交,研究区海平面发生了显著变化,表现出变化时间短、变化幅度大的阶跃型海平面变化特征。其具体过程表现为:泥盆纪弗拉期晚期发生小规模海退;接着从泥盆纪弗拉期最晚期开始,到泥盆纪法门期早期,发生了显著的海侵作用,海平面显著升高,海水深度由0~10 m跃升至200 m以上;在经历短暂的深水沉积环境后,研究区在法门期早中期达到最大海侵,随即发生明显的海退作用,海平面显著降低,海水深度降至0~10 m。

全球F-F 界线附近海平面的变化一直以来颇

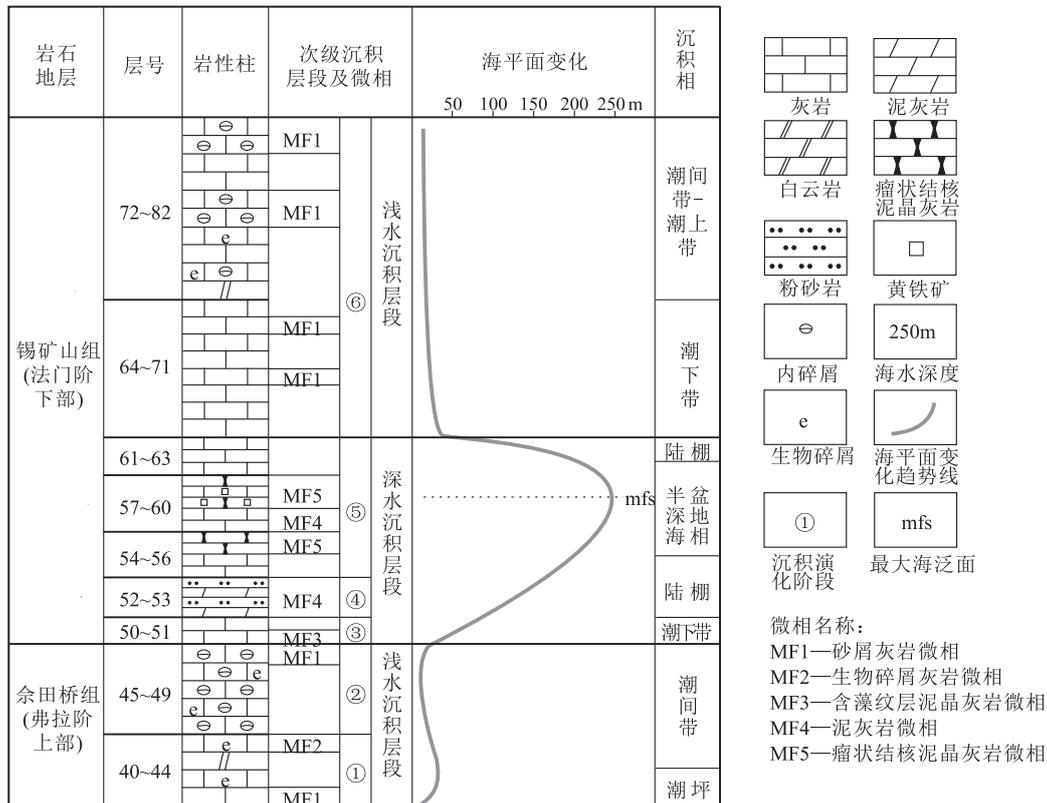


图4 广西全州东山剖面关键层位柱状图及海平面变化

Fig. 4 Column of the key strata of Dongshan section in Guangxi and sea-level's change

受学者重视,前人普遍采用牙形石生物带、腕足生物带、碳氧稳定同位素等手段进行相关研究,探讨了全球范围内不同地区 F-F 界线附近的海平面变化历史。Zhang 等^[69]对广西 Lali 剖面中碳酸盐岩微相及牙形石带进行分析,认为该区域在弗拉期晚期发生海退,在弗拉期最晚期开始发生大规模海侵,至法门期中期海侵达到最大。此外, Ma 等^[70]对中国湖南地区、Johnson 等^[71]和 Over 等^[72]对北美地区、Becker 等^[73-75]对澳大利亚的泥盆纪典型剖面进行研究,发现这些区域在 F-F 界线附近的海平面与东山剖面及 Lali 剖面表现出趋势相同的变化规律(图 5)。不同之处在于东山剖面在达到最大海侵之后立即发生迅速海退,从而保持稳定的浅水环境,而其他区域海退速度较之稍缓。

研究区发育的不同微相的沉积物演替指示,这 2 次紧邻的阶跃型海平面上升和阶跃型海平面下降过程,与全球多区域海平面变化趋势相同。该事件对研究区的沉积过程与沉积产物产生了重大影响,从沉积学的角度再次印证了 F-F 之交区域环境乃至全球环境的巨大变化。

6 结 论

(1) 结合前人研究,根据标准牙形石 *Palmatolepis triangularis* 在东山剖面第 50 层的首次出现,将研究区弗拉阶/法门阶(F/F)的界线限定在东山剖面第

49/50 层界线处。

(2) 东山剖面 F-F 界线附近典型层段微相特征具有明显的分段性,泥晶方解石的相对含量呈低—高一低的变化趋势,即下部为低泥晶高亮晶粗颗粒微相,中部为高泥晶(局部纯泥晶)细颗粒微相,上部为低泥晶高亮晶粗颗粒微相。

(3) 基于不同微相沉积物及相关生物化石记录,认为研究区在晚泥盆世 F-F 之交发生了 2 次紧邻的变化时间短、变化幅度大的阶跃型海平面变化,即弗拉期最晚期先发生显著的海侵作用,经历短暂的深水沉积后法门期早期发生显著的海退作用,海水深度经历了 0~200m(以上)~0 m 的变化,其变化趋势与世界上多区域海平面变化一致。

致谢:艾可可博士参加了野外工作,在撰写本文过程中与朱宁进行有益的讨论完善了文稿,匿名评审专家提出了宝贵修改意见,编辑老师仔细校对全文,在此一并致谢。

参考文献

- [1] Buggisch W. The Global Frasnian - Famennian Kellwasser Event [J]. *Geologische Rundschau*, 1991, 80(1): 49-72.
- [2] 廖卫华. 华南晚泥盆世弗拉斯期—法门期之交的生物大灭绝及其后的残存和复苏[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2004: 437-456.
- [3] Racki G. Toward understanding Late Devonian global events: few answer, many questions [C] // Over D J, Morrow J R, Wignall P B. *Understanding Late Devonian and Permian - Triassic Biotic and*

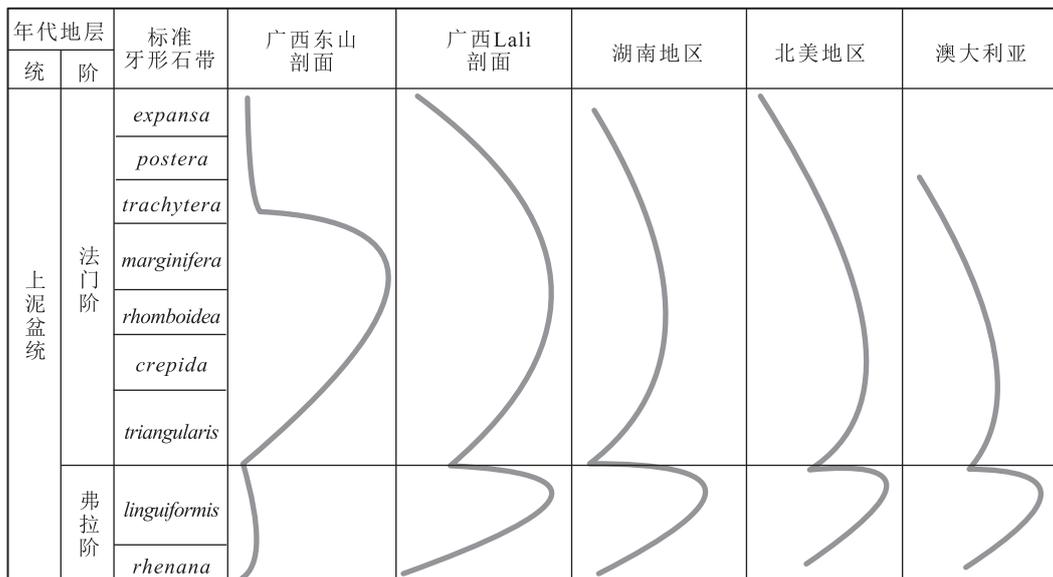


图 5 不同区域 F-F 界线附近海平面变化(据参考文献[69]修改)
 Fig. 5 The sea-level's change near the boundary of F-F in different areas in the world

- Climatic Events: Towards an Integrated Approach. Amsterdam: Elsevier, 2005, 20(5): 5-36.
- [4] Raup V M, Sepkoski J J. Mass Extinctions in the Fossil Record [J]. Science, 1982, 219(4589): 1239-1240.
- [5] 季强. 从牙形类研究论华南弗拉阶—法门阶生物灭绝事件 [M]. 北京: 地质出版社, 1994: 79-107.
- [6] 冯日照, 韦龙明, 何鸿. 桂林地区晚泥盆世沉积相演化特征和海平面变化对 F-F 生物灭绝事件的影响 [C]// 华南青年地学学术研讨会论文集, 2006: 35-38.
- [7] 殷保安. 广西壮族自治区岩石地层 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997: 14-18.
- [8] Chen D Z, Tucker M E. The Frasnian-Famennian mass extinction: insights from high-resolution sequence stratigraphy and cyclostratigraphy in South China [J]. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 2003, 193(1): 87-111.
- [9] 杜远生, 龚一鸣, 张哲, 等. 南华海泥盆纪烃源岩的古氧相和缺氧环境模式——以广西中、上泥盆统为例 [J]. 古地理学报, 2009, 11(1): 28-36.
- [10] 徐冉, 龚一鸣, 谭雪娇, 等. 广西桂林杨堤晚泥盆世弗拉阶—法门期之交上、下 Kellwasser 事件的差异与海洋生产力变化 [J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2015, 40(2): 357-371.
- [11] Huang C, Song J J, Shen J, et al. The influence of the Late Devonian Kellwasser events on deep-water ecosystems: Evidence from palaeontological and geochemical records from South China [J]. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 2018, 504: 60-74.
- [12] 尹家一, 寇晓虎, 郭俊刚, 等. 广西全州地区中—上泥盆统生物地层研究 [J]. 地质通报, 2019, 38(6): 930-949.
- [13] Copper P. Reef development at the Frasnian/Famennian mass extinction boundary [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2002, 181(1/3): 27-65.
- [14] 龚一鸣, 李保华, 吴诒. 广西弗拉阶—法门期之交碳同位素与分子地层对比研究 [J]. 地学前缘, 2002, 93: 151-160.
- [15] 沈树忠, 张华. 什么引起五次生物大灭绝 [J]. 科学通报, 2017, 62(11): 1119-1135.
- [16] Carmichael S K, Waters J A, Königsf P, et al. Paleogeography and paleoenvironments of the Late Devonian Kellwasser event: A review of its sedimentological and geochemical expression [J]. Global and Planetary Change, 2019, 183: 102984.
- [17] 黄家园, 梁昆, 王玉珏, 等. 全球泥盆纪生物礁演化及其影响因素 [J]. 地层学杂志, 2019, 43(2): 198-209.
- [18] Qie W, Ma X, Xu H, et al. Devonian integrative stratigraphy and timescale of China [J]. Science China: Earth Sciences, 2019, 62(1): 112-134.
- [19] Song J, Huang C, Gong Y. Response of Ostracods (Crustacea) to the Devonian F-F event: Evidence from the Yangdi and Nandong sections in Guangxi, South China [J]. Global and Planetary Change, 2019, 173: 109-120.
- [20] Xian H, Zhang S, Li H, et al. How did South China connect to and separate from Gondwana? New paleomagnetic constraints from the Middle Devonian red beds in South China [J]. Geophysical Research Letters, 2019, 46: 7371-7378.
- [21] Racki G, Wignall P B. Devonian global changes—Recent advances and challenges in different domains [J]. Global and Planetary Change, 2020, 191: 103200.
- [22] 王玉珏, 梁昆, 陈波, 等. 晚泥盆世 F-F 大灭绝事件研究进展 [J]. 地层学杂志, 2020, 44(3): 277-298.
- [23] 赵金科. 广西地质 [M]. 北京: 科学出版社, 1958.
- [24] 钟铿. 广西的泥盆纪地层 [J]. 广西科学, 1994, 1(2): 21-23.
- [25] Hou H F, Ji Q, Wang J X. Preliminary report on Frasnian-Famennian events in South China [C]// McMillan N J, Embry A F, Glass D J. Devonian of the World. Canadian Society of Petroleum Geologists Member, 1988, 14(3): 63-69.
- [26] Ji Q. On the Frasnian-Famennian mass extinction events in south China [J]. Courier Forschungsinstitut Senckenberg, 1989, 117: 275-301.
- [27] Chen D Z, Tucker M E, Jiang M S, et al. Long-distance correlation between tectonic controlled, isolated carbonate platforms by cyclostratigraphy and sequence stratigraphy in the Devonian of South China [J]. Sedimentology, 2001, 48(1): 57-78.
- [28] Chen D Z, Tucker M E, Jiang M S, et al. Carbonate sedimentation in a starved pull-apart basin, Middle to late Devonian southern Guilin, South China [J]. Basin Research, 2001, 13(2): 141-167.
- [29] 马学平, 宗普. 湖南中—晚泥盆世腕足动物组合、海平面升降及古地理演变 [J]. 地球科学, 2010, 40(9): 1204-1218.
- [30] 陈志明, 杨培基, 潘正莆, 等. 湘、桂中晚泥盆世台槽相沉积特征 [J]. 沉积学报, 1983, 1(3): 88-98.
- [31] McGhee G R J. The Late Devonian Mass Extinction [M]. Columbia University Press, New York, 1996: 1-303.
- [32] 边春鹏. 滇西保山西邑地区泥盆系沉积特征及沉积古地理研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京)硕士学位论文, 2016.
- [33] 包洪平, 杨承运. 碳酸盐岩微相分析及在岩相古地理研究中的意义 [J]. 岩相古地理, 1999, 19(6): 59-64.
- [34] 江大勇, 丁干, 白顺良. 广西六景泥盆纪吉维阶—弗拉斯阶界线层牙形石生物地层 [J]. 地层学杂志, 2000, 24(03): 195-200.
- [35] 王成源, 王志浩. 中国牙形刺生物地层 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2016: 18-22.
- [36] 韩迎建. 广西象州中坪马鞍山剖面上泥盆统弗拉阶/法门阶 (F/F) 界线的研究 [J]. 地球学报, 1987, (3): 174-200.
- [37] 沈建伟. 广西桂林泥盆纪牙形刺组合序列与海平面变化 [J]. 微体古生物学报, 1995, 12(3): 251-273.
- [38] 王超勇, 夏文臣. 掌鳞刺属演化及晚泥盆世环境变迁 [J]. 广西地质, 2002, 15(2): 21-25.
- [39] 张哲, 杜远生, 舒雪松, 等. 鄂东南地区早三叠世风暴沉积序列及其环境意义 [J]. 地质科技情报, 2006, 25(2): 29-34.
- [40] 曾雄伟, 杜远生, 张哲, 等. 广西桂林地区中、上泥盆统风暴岩沉积特征及其地质意义 [J]. 地质科技情报, 2007, 26(6): 42-46, 65.
- [41] 李世毅, 姜迪, 赵莹莹. 安徽巢湖地区石炭纪—早二叠世碳酸盐岩微相与沉积环境 [J]. 沉积与特提斯地质, 2015, 35(1): 3-15.
- [42] 马永生, 刘波, 郭荣涛, 等. 碳酸盐岩微相: 分析、解释及应用 [M]. 北京: 地质出版社, 2016.
- [43] 周明, 罗平, 董琳, 等. 塔里木盆地柯坪地区奥陶系鹰山组台内滩

- 沉积特征[J].沉积学报,2016,34(5):951-962.
- [44] 马学平.湖南中部泥盆纪弗拉—法门阶界线附近的沉积环境[C]//中国古生物学会学术年会,2001:24-26.
- [45] 李华,马学平,韦龙明.广西莱子岩剖面中上泥盆统界线附近沉积相与海平面变化[J].古地理学报,2009,11(5):504-512.
- [46] 郭峰.碳酸盐岩沉积学[M].北京:石油工业出版社,2011:121-176.
- [47] 桑隆康,马昌前,王国庆,等.岩石学[M].北京:地质出版社,2012:363-384.
- [48] 童金南,殷鸿福.古生物学[M].北京:高等教育出版社,2007.
- [49] 黄臣军,刘格云,刘红光,等.标准微相类型在碳酸盐岩微相及沉积环境研究中的应用——以塔西南玉北地区奥陶系为例[J].沉积学报,2017,35(6):1166-1176.
- [50] 龙建喜,陈建书,彭成龙,等.贵州水城地区早二叠世包磨山组碳酸盐岩微相特征及沉积环境[J].中国岩溶,2017,36(3):313-318.
- [51] 张钰莹,江大勇,何治亮,等.安徽巢湖下三叠统南陵湖组中上段微相及古环境初探[J].地层学杂志,2016,40(3):290-296.
- [52] 韩毅龙,姚倩倩.碳酸盐岩微相与沉积环境浅析[J].石化技术,2016,23(1):55-55.
- [53] 马知恒,喻美艺,晏波,等.贵州兴义乌沙地区法郎组瓦窑段沉积特征初探[J].贵州地质,2018,35(1):37-43.
- [54] 高计元.中国南方泥盆系结核泥晶灰岩的成因[J].沉积学报,1988,6(2):77-86.
- [55] 金若谷.一种深水沉积标志——“结核泥晶结核”及其成因[J].沉积学报,1989,7(2):51-61.
- [56] 韩树菜.安徽沿长江地区下三叠统结核泥晶灰岩成因研究[J].地质科学,1983,(3):232-238.
- [57] 蓝光志,张廷山,高卫东.川西北地区早志留世结核泥晶灰岩的类型、成因及意义[J].西南石油学院学报,1994,16(3):1-6.
- [58] 董兆雄,朱晓惠,侯方浩,等.一种特殊结核泥晶灰岩的成因研究[J].沉积学报,2002,20(1):20-24.
- [59] 刘莽菲.结核泥晶灰岩的分类及成因研究[J].四川有色金属,2015,(2):26-28,39.
- [60] 邝国敦.广西六景泥盆纪地层、古生物与沉积相[J].广西地质,1984,(创刊号):46-57.
- [61] 龚一鸣,李保华.泥盆系弗拉阶—法门阶之交事件沉积和海平面变化[J].地球科学-中国地质大学学报,2001,26(3):251-257.
- [62] 陈建强,周洪瑞,王训练.沉积学及古地理学教程[M].北京:地质出版社,2004:144-193.
- [63] 冯增昭.中国沉积学[M].北京:石油工业出版社,2013:1118-1227.
- [64] 白顺良,金善燊,宁宗善,等.广西泥盆纪牙形石、竹节石分带及对比[J].北京大学学报(自然科学版),1979,(1):101-120,132-133.
- [65] 龚一鸣,吴诒,杜远生,等.华南泥盆纪海平面变化节律及圈层耦合关系[J].地质学报,1997,71(3):212-226.
- [66] 鲜思远,陈继荣,万正权.四川龙门山甘溪泥盆纪生态地层、层序地层与海平面变化[J].沉积与特提斯地质,1995,15(6):2-47.
- [67] 龚一鸣,吴诒,杜远生.黔桂泥盆纪层序地层及海平面变化的频率、速度和相位[J].地球科学,1994,19(5):575-586.
- [68] 杜远生,龚一鸣,刘本培,等.华南板块泥盆纪层序地层及海平面变化[J].岩相古地理,1996,16(6):14-23.
- [69] Zhang X S, Jeffrey Over D, Ma K Y, et al. Upper Devonian conodont zonation, sea-level changes and bio-events in offshore carbonate facies Lali section, South China[J]. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 2019, 531: 109219.
- [70] Ma X P, Wang H H, Zhang M Q. Devonian event succession and sea level change in South China—With Early and Middle Devonian carbon and oxygen isotopic data [J]. Subcomm Devonian Stratigr News, 2017, 32: 17-24.
- [71] Johnson J G, Klapper G, Sandberg C A. Devonian eustatic fluctuations in Euramerica[J]. Geological Society of America Bulletin, 1985, 96: 567-587.
- [72] Over D J, Ruppel S C. Woodford conodonts and biostratigraphy (Upper Devonian-Carboniferous) in the subsurface of eastern New Mexico and Texas[J]. Stratigraphy, 2011, 8: 271-279.
- [73] Becker R T. Stratigraphische Gliederung und Ammonoiten-Faunen im Nehdenium (Oberdevon II) von Europa und Nord-Afrika [J]. Courier Forschungsinstitut Senckenberg, 1993, 155: 1-35.
- [74] Becker R T. Anoxia, eustatic changes, and Upper Devonian to lowermost Carboniferous global ammonoid diversity [M]. The Systematics Association Special, 1993: 115-164.
- [75] Becker R T, House M R. Sea-level changes in the Upper Devonian of the Canning Basin, western Australia[J]. Courier Forschungsinstitut Senckenberg, 1997, 199(199): 129-146.