

粤北中一晚泥盆世生物礁与沉积古地理时空演化^{*}张海军^{1,2} 张黎渊² 王亚轮³ 杨光子夜³
骆满生² 寇晓虎² 张华川⁴ 徐亚东^{2,3}

1 中国地质调查局武汉地质调查中心(中南地质科技创新中心), 湖北武汉 430205

2 中国地质大学(武汉)地质调查研究院, 湖北武汉 430074

3 中国地质大学(武汉)地球与行星科学学院, 湖北武汉 430074

4 中国地质调查局自然资源实物地质资料中心, 河北三河 065201

摘 要 华南粤北地区泥盆系分布广泛, 化石资料丰富, 地层发育齐全。通过对该区域岩石地层、生物地层、层序地层和事件地层的综合地层对比, 结合粤北连南实测剖面 4 个沉积相带、3 个生物带和 8 个三级层序的控制, 恢复了粤北地区中泥盆世吉维特期、晚泥盆世弗拉期和法门期 3 个阶段的沉积古地理演化。结果表明, 伴随着钦防海槽的打开和扩张, 从中泥盆世吉维特期开始粤北地区逐步海侵, 形成台盆-台沟交互的洋盆格局, 至弗拉期晚期海侵达到最大, 自法门期开始逐步海退。该古地理面貌影响了生物礁的分布和时空迁移, 在粤北连南地区表现为珊瑚-层孔虫生物礁(吉维特期)→层孔虫生物礁(弗拉期)→菌藻类生物礁(法门期)的变迁。综合分析粤北地区泥盆纪的沉积古地理演化、生物(礁)群落、构造和气候背景, 认为构造因素是该地区泥盆纪生物事件与地质环境变化的主控因素, 尤其是晚泥盆世 F-F 事件。

关键词 多重地层 古地理演化 生物礁迁移 构造背景 泥盆纪 广东

第一作者简介 张海军, 男, 1981 年生, 博士, 正高级工程师, 主要从事沉积学、矿床学研究。E-mail: zhanghaijun@mail.cgs.gov.cn。

通讯作者简介 徐亚东, 男, 1983 年生, 博士, 副教授, 从事古生物地层学和沉积古地理研究。E-mail: yadong.xu@cug.edu.cn。

中图分类号: P52 文献标志码: A

Spatial and temporal patterns of sedimentary paleogeographic evolution
and reef migration of the Middle-Late Devonian
in northern Guangdong ProvinceZHANG Haijun^{1,2} ZHANG Liyuan² WANG Yalun³ YANG Guangziye³
LUO Mansheng² KOU Xiaohu² ZHANG Huachuan⁴ XU Yadong^{2,3}

1 Wuhan Centre of China Geological Survey (Central South China Innovation Center for Geosciences), Wuhan 430205, China

2 Institute of Geological Survey, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3 School of Earth and Planetary Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

^{*} 中国地质调查局项目(编号: DD20230100510, DD20221645, DD20190811)和国家自然科学基金项目(编号: 41572075)联合资助。
[Co-funded by China Geological Survey Project (Nos. DD20230100510, DD20221645, DD20190811) and the National Natural Science Foundation of China (No. 41572075)]

收稿日期: 2025-08-15 改回日期: 2026-03-27

4 Cores and Samples Center of Natural Resources, China Geological Survey, Hebei Sanhe 065201, China

Abstract The Devonian strata in the northern Guangdong Province are widely distributed and well-developed, with abundant fossil data. Through comprehensive stratigraphic comparisons and analyses of lithostratigraphy, biostratigraphy, sequence stratigraphy and event stratigraphy in the research area, and based on a measured section in the Nangang Village, Liannan County (four sedimentary facies, three biological zones and eight stratigraphic sequences), three distinct evolutionary stages of Devonian sedimentary paleogeography are recovered (Middle Devonian Givetian, Late Devonian Frasnian and Famennian). Under the opening and expansion of the Qinfang Trough, the northern Guangdong Province was gradually transgressed, forming a platform basin intertwined with a trough basin. It reached the largest ocean basin in the late Frasnian stage, and began to gradually recede during the Famennian stage. The paleogeographic feature affected the paleontological distribution and spatiotemporal migration, such that the transition from the coral-stromatoporoid reef community (Givetian), stromatoporoid reef community (Frasnian) and fungal-algae reef community (Famennian) was clear in the Nangang Village, Liannan County. According to Devonian regional paleogeographical characteristics, reef communities, tectonic and climatic background, the tectonic event was the dominant factor for the biological and geological environment, especially during the Late Devonian F-F event.

Key words multiple stratigraphy, paleogeographic evolution, reef migration, tectonic background, Devonian, Guangdong Province

About the first author ZHANG Haijun, born in 1981, Ph. D., is a professorial senior engineer. He is mainly engaged in researches on sedimentology and mineral deposit. E-mail: zhanghaijun@mail.cgs.gov.cn.

About the corresponding author XU Yadong, born in 1983, Ph. D., is an associate professor. He is mainly engaged in researches on stratigraphical paleontology and sedimentary palaeogeography. E-mail: yadong.xu@cug.edu.cn.

泥盆纪是生物与环境演化的重要转折期之一,也是生物礁演变的一个重要时期 (Kiessling and Flügel, 2002)。这一时期不仅出现了脊椎动物登陆、大规模根系植物登陆、无脊椎动物各门类空前繁盛的景象 (Algeo *et al.*, 1995; Ma *et al.*, 2016; 黄家园等, 2019), 还发生了许多生物灭绝事件, 尤其是从吉维特中—晚期开始, 陆续发生了众多规模不一和持续时间不等的生物地质事件, 如吉维特期的 Taghanic 事件和弗拉期—法门期之交的 F-F 事件 (Oliver and Pedder, 1994; Aboussalam and Becker, 2002; Baird and Brett, 2008)。这些事件均不同程度地影响到底栖生物的多样性及海洋生物礁生态系统 (Jablonski, 1991; Copper, 2002; 廖卫华, 2015; 王玉珏等, 2020), 尤其是作为显生宙 5 次大灭绝事件之一的 F-F 事件, 更是导致泥盆纪繁盛一时的后生生物礁系统彻底崩溃 (黄家园等,

2019)。

华南是中国泥盆系研究的主要地区之一, 自 20 世纪 80 年代开始便针对广西、贵州、湖南等地区的生物礁进行了大规模、系统性研究 (周棣康等, 1981; 戴光亚, 1982; 田洪均和郑和荣, 1983; 宋裕发等, 1994; 沈建伟, 1996; 柳祖汉等, 2003)。经过数十年的研究, 国内外众多学者已经对华南泥盆纪生物礁的组成、演化以及控制因素有了相当的认识 (董兆雄, 1987; Copper, 2002; 吴义布等, 2010), 也对全球范围内生物礁演化与生物事件的相关性进行了初步探讨 (黄家园等, 2019)。

然而, 针对粤北地区生物礁目前鲜有报道, 同时对该地区地史关键转折期内的生物礁时空演化与地质环境变化之间的地球生物学过程缺乏深入探讨。本研究以粤北连南地区出露的中—上泥盆统生

物礁为控制点,开展泥盆系多重地层对比研究,旨在丰富华南地区泥盆系的资料,恢复粤北地区泥盆纪的沉积古地理面貌,同时分析各种生物、环境事件(尤其是 F-F 事件)对生物礁类型演化及其时空分布规律的影响,探讨生物礁时空演化与地质环境变化之间的地球生物学过程,为地史关键转折期重大生物事件和环境事件研究提供地球生物学的证据。

1 地质背景

研究区位于华南地区,在大地构造上隶属于上扬子板块东南缘的湘桂地块与华夏造山系中罗霄地块的结合带(张克信等, 2015, 2024; 牛志军等, 2024; 骆满生等, 2025)(图 1-a), 北西侧为上扬子地层区的湘桂地层分区, 东南侧为武夷—云开地层区的罗霄地层分区, 是华南褶皱带的一部分(潘桂棠等, 2016)。

奥陶纪末—志留纪, 华夏陆块裂解形成的各个地块(云开、武夷等地块)以及湘桂、保山、腾冲等地块逐渐向扬子陆块移动靠近, 导致板内碰撞(刘运黎等, 2009), 使得华夏地块和扬子地块最终拼合, 形成了初步统一的中国南方古地理格局(舒良树, 2012; 李三忠等, 2016), 并使得中扬子地区具有页岩气的成藏条件(王保忠等, 2026)。在加里东运动晚期, 扬子地块和华夏地块再次发生陆—陆碰撞, 这次碰撞在华南也被称为“广西运动”, 其使得华南地块上的古陆进一步大规模抬升, 形成了著名的加里东增生造山带(潘桂棠等, 2016)。这次大规模的隆起也造成华南绝大部分地区地层遭受剥蚀, 仅钦防地区没有受到造山作用的影响而保持为深海残余盆地。华南地区的泥盆系普遍呈不整合覆盖于下古生界及其他更老地层之上, 标志着该地区整体进入陆内演化阶段(王剑和宁浦功, 1998; 刘运黎等, 2009; 杜远生和徐亚军, 2012; 张国伟等, 2013; 梁锦等, 2015; 张克信等, 2015; 汤家富和戴圣潜, 2016)。

自早泥盆世开始, 华南地区出现造山期之后的松弛, 因古特提斯裂谷作用的控制, 由加里东末期的挤压作用变为海西早期的拉张作用, 并伴有明

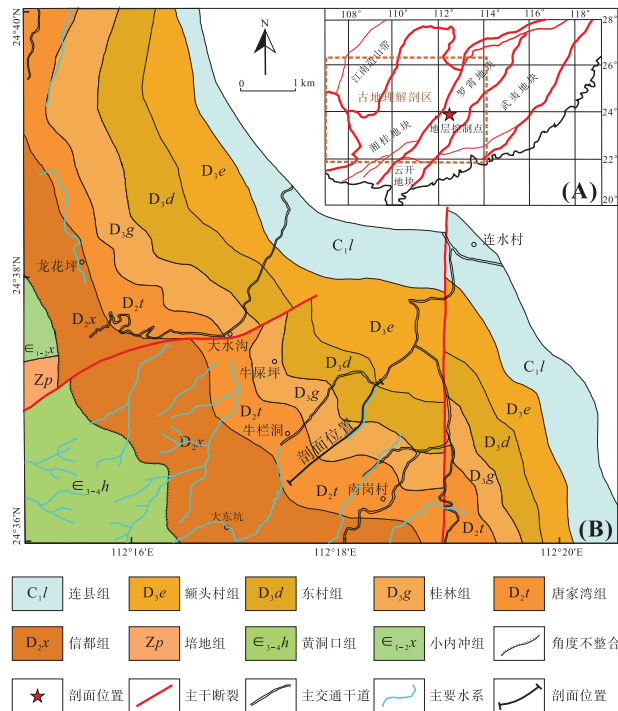


图 1 粤北地区大地构造背景简图和连南剖面地质简图(图 A 据马力等, 2004; 有修改; 图 B 据邓卓辉等, 2015^①和本次实测数据)

Fig. 1 Schematic map of tectonic setting in northern Guangdong Province and geologic map of Liannan section (A modified after Ma *et al.*, 2004; and B modified after Deng *et al.*, 2015 and this research data)

显的左行走滑运动(曾允孚等, 1992); 在此背景之下, 湘、桂、粤等地的泥盆纪沉积盆地明显受到走滑断裂的制约, 被动陆缘内也发育北西向拉张和北东向拉张走滑 2 种类型的盆地, 加上自南而北的海侵, 形成了泥盆纪独有的“盆包台”式沉积格局(陈代钊和陈其英, 1995; 梅冥相等, 2005; 马永生等, 2009)。中泥盆世早期, 华南地区虽然经历了一次明显的海退事件(郄文昆等, 2019), 但是整体上来说还是继承了前期台—沟格架的古地理格局, 海侵自南西向北东推进; 中泥盆世晚期之后, 沉积区面积不断增加, 海侵的范围也持续扩大(白志强, 1998; 周家云等, 2009), 至晚泥盆世早期海侵规模达到最大, 并在晚泥盆世晚期开始发生海退(黄云皇, 1992)。受此地质背景影响, 华南泥盆纪的生物礁和古地理面貌也发

① 邓卓辉, 彭兆金, 李晨, 温永辉, 龚杰龙, 彭书良, 陈春良, 王健, 黄小荣, 李自卫. 2015. 1/5 万连山县幅 G49E021017、寨岗幅 G49E021018、大良圩幅 G49E022018、阳山县幅 G49E022019 矿产远景调查成果报告. 全国地质资料馆, 1-230.

生了相应的变迁,并制约了该地区的能源、矿产和环境演变。

2 泥盆纪多重地层划分与对比

本研究依据 1 条剖面作为控制点,结合区域多重地层划分和对比,开展古生物和古地理面貌综合对比。其中,控制剖面位于广东省清远市连南瑶族自治县三排镇千年瑶寨附近,全长 1984 m,地层出露良好,详测始于中泥盆统唐家湾组,止于上泥盆统额头村组二段(图 1-b;图 2)。

2.1 岩石地层与沉积相特征

2.1.1 岩石地层

连南剖面中—上泥盆统的代表性地层包括唐家湾组、桂林组、东村组和额头村组。

唐家湾组 (D_2t):底部为中—薄层状灰—深灰色泥灰岩、生物碎屑灰岩,单层厚 10~30 cm,生物化石丰富,含有腕足类、珊瑚、海百合茎等。中部为厚层状灰—灰黑色层孔虫灰岩、白云质灰岩、白云岩,具大量枝状层孔虫,局部层理不清晰而呈块状。上部为灰—深灰色薄—中层状微晶灰岩、砂屑灰岩夹生物碎屑灰岩。与下伏信都组和上覆桂林组皆呈整合接触,厚 72.7 m。

桂林组 (D_3g):下部主要为一套中薄—中层状白云质灰岩和中—中厚层状白云岩互层,上部主要为一套灰色厚层状生物礁灰岩。白云质灰岩多呈灰色、灰褐色,中—薄层状构造,可见大量的藻纹层;白云岩多呈灰色、灰白色,巨厚层状,发育明显的刀纹状;生物礁灰岩多呈灰色、灰黑色,厚层状构造,造礁生物以层孔虫为主,含有较多的腕足类、珊瑚、苔藓虫等附礁生物。与下伏唐家湾组和上覆东村组皆呈整合接触,厚 62.8 m。

东村组 (D_3d):可以划分为 3 段。一段为泥质灰岩、含生物碎屑泥质灰岩、泥质白云岩、灰质白云岩,顶部可见礁前角砾岩,其中灰质白云岩多呈灰—灰黑色、中—厚层状构造,泥质白云岩多呈灰白—灰褐色、厚层状构造,含生物碎屑泥质灰岩多呈灰色、厚层状构造、含丰富的海百合茎、钙球、有孔虫、层孔虫等化石。二段为泥质灰岩、含生物碎屑泥质灰岩,多呈灰黑色,中—厚层状构造,内含介壳、海百合、钙球等化石。三段主要为灰质白云岩、泥质灰岩、含生物碎屑泥质灰岩、礁

灰岩,其中灰质白云岩多呈灰色、厚—巨厚状构造,泥质灰岩多呈灰黑色、中—厚层状构造,含生物碎屑泥质灰岩多呈灰色、中—厚层状构造。在第 50 层中可见巨厚层状以层孔虫为主要骨架的礁灰岩,多呈灰色、灰黑色。东村组整合于桂林组之上、额头村组之下,厚 120.2 m。

额头村组 (D_3e):为一套灰色中—厚层状结晶灰岩、泥质灰岩、含藻纹层泥质灰岩、白云质灰岩和灰质白云岩,可以划分为 2 段。一段主要为灰色中—厚层状结晶灰岩。二段主要为泥质灰岩、含藻纹层泥质灰岩、白云质灰岩和灰质白云岩,其中泥质灰岩、含藻纹层泥质灰岩多呈灰色,薄—中层状构造,而白云质灰岩和灰质白云岩多呈灰色、灰黑色,中—厚层状构造。额头村组整合于东村组之上,厚 46.1 m。

2.1.2 沉积相划分

依据出露地层的岩性变化和生物化石,参照经典的威尔逊沉积相模式,将连南剖面划分为 4 个沉积相带(图 2),分别是开阔台地相、局限台地相、台地边缘浅滩相和台地边缘生物礁相。

开阔台地相:属于浅水相,水深一般数十米,台地顶部较为平坦,水温和盐度与外海相近,水循环较好,距陆地较远而无陆源碎屑。在连南剖面,开阔台地相广泛分布,生物化石丰富,发育有以底栖生物为主的各类生物,包括腕足类、珊瑚、腹足类、棘皮类、介形虫和藻类等。

局限台地相:相当于浅的水坳和潟湖,与开阔海的连通性较差,海水循环受阻,水体较为封闭,水动力较弱,导致水体盐度高,常见白云化现象,发育广盐度的生物,具水平层理、块状层理,局部具粒序层理、暴露标志。该相区水循环相对较弱,环境闭塞,除少量层孔虫化石之外,偶见棘皮类、介形虫、钙球、腹足类及少许腕足类碎屑,化石保存较完整。

台地边缘浅滩相:水体较浅,氧气充足,一般为正常浪基面以上的水深,盐度正常。其岩性多为灰黑色含生物碎屑泥质灰岩。

台地边缘生物礁相:在唐家湾组、桂林组、东村组中可见,尤其是在桂林组和东村组。主要岩石类型为灰黑色中—厚层状礁灰岩、层孔虫骨架岩、障积岩和粘结岩。造礁生物主要为层孔虫和苔藓虫,构成层孔虫生物礁。此外,含有众多珊瑚、腕

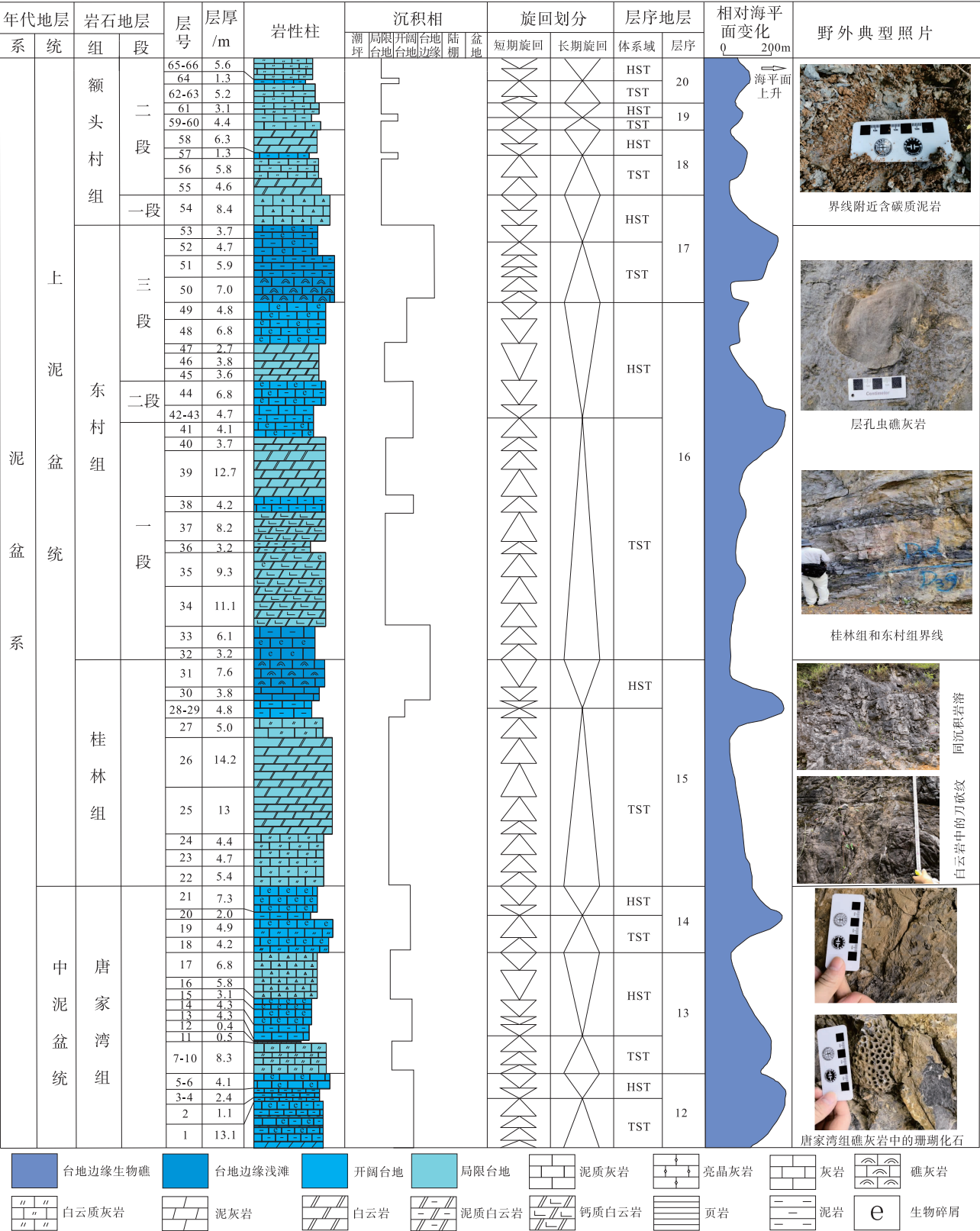


图 2 粤北地区连南剖面泥盆系综合柱状图

Fig. 2 Comprehensive column diagram of the Devonian in Liannan section, northern Guangdong Province

足类等附礁生物化石。

在连南剖面,中泥盆世局限台地相分布较少,说明该地区中泥盆世的海侵规模较小。到晚泥盆世,局限台地相分布较为广泛,指示该地区海侵规模较中泥盆世进一步扩大,而且经历了多次海侵-海退事件。连南剖面出露地层整体上属于碳酸盐岩台地相,中一晚泥盆世出现多次局限台地和开阔台地的转换,反映该时期发生多次海平面升降(图2)。

华南地区的下泥盆统在上扬子区和下扬子区等地区大面积缺失,但在钦防区(桂东南和桂北)仍为连续沉积,包含莲花山组、那高岭组、郁江组和贺县组等地层单元。其与志留系为连续沉积,底部为滨岸碎屑岩相,之上发育一套台地相生物碎屑灰岩夹钙质砂岩、泥灰岩和白云质灰岩,富含珊瑚、腕足类、介形虫和层孔虫等化石(骆满生等, 2025)。中一晚泥盆世华南地区以台地相最为发育,可进一步可分为局限一半局限台地相、开阔台地相、台地边缘相和台间海槽相(台沟)4种类型(广西壮族自治区地质调查院, 2024)。局限一半局限台地相一般沿陆地边缘或夹持于滨岸碎屑岩相区与台沟之间,岩性为灰色至深灰色纹层状粉一泥晶白云岩、泥质白云岩、鸟眼泥晶灰岩、亮晶鲕粒灰岩、生物碎屑白云岩、条带状藻砂屑白云岩等,以桂林组、北流黄獐山组为代表。开阔台地相在早泥盆世晚期至中泥盆世晚期呈大面积分布,岩性主要为灰岩、生物碎屑灰岩及白云岩组合,古生物化石较丰富,主要有珊瑚、层孔虫、腕足类、苔藓虫、棘皮类等,其次为有孔虫、牙形刺、藻类、竹节石等,以大乐组、融县组为代表。台地边缘相带一般较窄,仅沿台地与陆间海槽交界的台地一侧断续分布,岩性主要为生物灰岩、礁灰岩、内碎屑灰岩、礁屑角砾岩等,北流等地介壳灰岩和层礁相的层孔虫礁灰岩较发育,并发育点礁层孔虫礁灰岩,以融县组为代表。台间海槽相又称台沟,出现层位为中一上泥盆统,岩石组合多样,随不同地区、层位而异,主要分布于百色、那坡一带和南丹县罗富、象州等地,呈不规则带状(广西壮族自治区地质调查院, 2024)。

2.2 生物地层

以连南剖面为代表,其生物化石丰富,唐家湾组可见腕足类、珊瑚、海百合、介形虫、藻类等

(图3),桂林组可见大量层孔虫和苔藓虫(图4),东村组含生物碎屑和层孔虫,额头村组含藻纹层。通过对大量化石的梳理,建立了2个腕足生物带及1个横板珊瑚生物带。

2.2.1 腕足类

连南剖面唐家湾组产大量腕足类化石,根据属种分布,可划分为2个腕足动物带,从下而上分别是 *Emanuella* (爱曼扭贝) 顶峰带和 *Stringocephalus* (鸚头贝) 顶峰带。

***Emanuella* (爱曼扭贝) 顶峰带:**以 *Emanuella pennsylvanica* (Willard) 首现为底界,以 *Emanuella ronensis* (Mansuy) 首现为顶界。共生的腕足类分子包括 *Emanuella takwanensis* (Kayser)、*Emanuella plicata* Gtabau、*Emanuella transversa* Grabau。本带广泛分布于华南地区,且产出层位很稳定, *Emanuella* 富集层是很好的对比标志,如在广西象州地区吉维特阶东岗岭组(Bai, 1994)、贵州独山剖面吉维特阶鸡窝寨组(Ma, 2009)。近年来,华南地区的 *Emanuella* 分布时限又被重新考证和厘定,被限定在吉维特阶(Zhang and Ma, 2019)。因此,本研究将此带划归为中泥盆世吉维特期,位于连南剖面唐家湾组下部。

***Stringocephalus* 顶峰带:**以 *Stringocephalus burtoni* 首现为底界,以 *Stringocephalus obesus* 首现为顶界。共生的腕足类分子包括 *Stringocephalus transversa*、*Bornhardtina* sp.、*Atrypa* sp.、*Atrypa richthofeni*、*Pseudoatrypa baiguopingensis*、*Pseudoatrypa guanwushanensis*。本带以 *Stringocephalus* 带分子在华南地区的普遍分布为特征,除带化石外其他常见的类型还包括 *Bornhardtina* 以及一些石燕贝和无洞贝类。在华南众多的典型剖面中(如菜子岩剖面、六景剖面 and 独山剖面等), *Stringocephalus* 产出层位多位于吉维特阶 *Po. varcus* 带内(Bai, 1994)。*Stringocephalus* 顶峰带的主体部分可与底栖相的四射珊瑚 *Stringophyllum-Paramixogonaria* 及 *Endophyllum-Sunophyllum* 组合(廖卫华和马学平, 2007)在时代上大体对应,相当于牙形石 *Po. hemiansatus-Po. varcus* 带。其时代属于中泥盆世吉维特期,位于连南剖面唐家湾组中上部。

2.2.2 珊瑚

连南剖面出露不少珊瑚化石,经过对唐家湾组的珊瑚化石进行系统鉴定,共识别出四射珊瑚化石

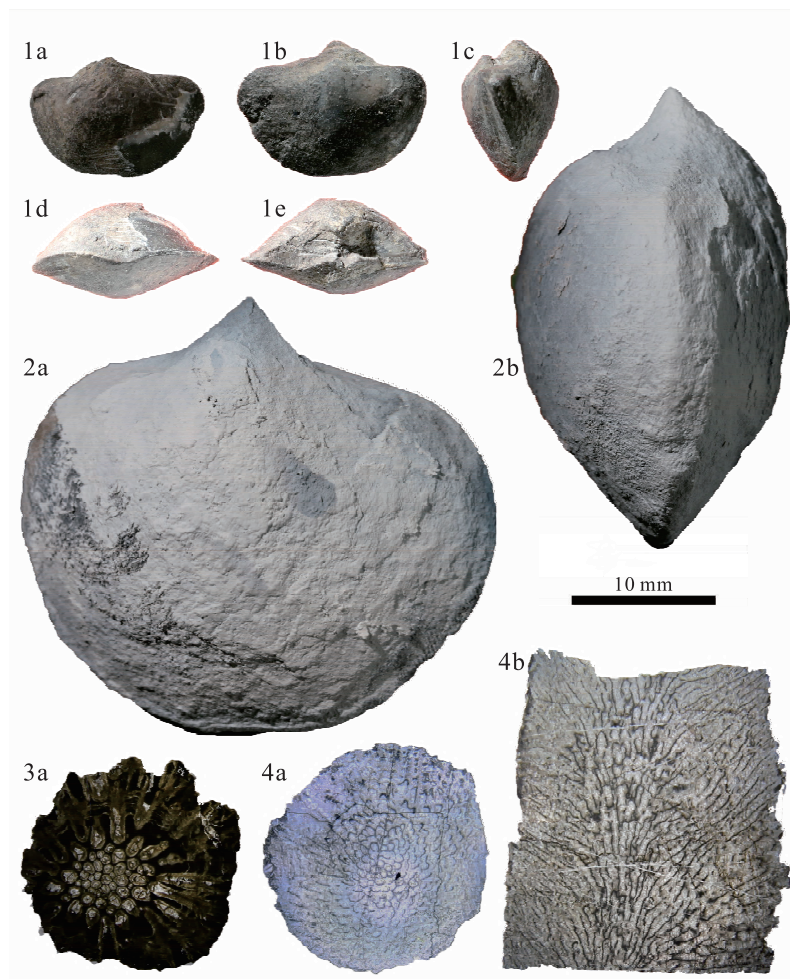


图 1a-1e: *Emanuella plicata* Grabau, 1931, a 为腹视图, b 为背视图, c 为侧视图, d 为前视图, e 为后视图; 图 2a-2b: *Stringocephalus burtini* Defrance, 1827, a 为腹视图, b 为侧视图; 图 3a: *Thamnopora* aff. *reticulata* Blainville, 1959, 横切面; 图 4a-4b: *Alveolitella arbuscula* Raduguin, 1938, a 为横切面, b 为纵切面。所有化石均产自粤北连南唐家湾组

图 3 粤北地区连南剖面中泥盆世代表性化石类型

Fig. 3 Representative Middle Devonian fossils of Liannan section in northern Guangdong Province

4 属 6 种, 横板珊瑚化石 3 属 4 种。

四射珊瑚包括 *Hexagonaria simplex* Yoh, *H. junghsienensis* Yoh, *H. hexagona* Goldfuss, *Ceristella huishuiensis* He et Li, *Pseudomicroplasma fonggi* Yoh, *Mesophyllum tungkanglingense* Yoh. *Hexagonaria* 属可以从中泥盆世早期延续到晚泥盆世, 例如在贵州独山剖面, 其出现于上泥盆统贺家寨段和中泥盆统鸡泡段 (俞昌民等, 1963, 1979)。 *Pseudomicroplasma* 属在华南地区分布广泛, 几乎在所有的吉维特阶灰岩地层中都有产出, 如横县六景的民塘组, 德保钦甲、北流大风门的螺村组, 苍梧石桥、罗城班瓦的东岗岭组, 独山猴儿山的独山组 (俞昌民等, 1963, 1979)。 *Mesophyllum* 属是指在泡沫板中

夹杂着发育了隔壁构造的一种泡沫珊瑚, 繁盛期在早一中泥盆世, 中泥盆世晚期数量逐渐减少, 故在吉维特期 Taghanic 事件之后, *Mesophyllum* 随着全部的泡沫珊瑚与腕足类鸭头贝 *Stringocephalus* 一起灭绝 (廖卫华, 2015), 出现的最高层位是鸡窝寨组。许多标志性的中泥盆世四射珊瑚, 如 *Endophyllum*、*Stringophyllum*、*Sinospongophyllum*, 也因为这次事件的影响没有能够跨过中泥盆统的顶界。 *Mesophyllum* 和 *Pseudomicroplasma* 这两种泡沫珊瑚属出现的最后层位对应于连南剖面 18 层, 和此次珊瑚群更替事件相符合。

横板珊瑚包括 *Thamnopora tumeoforma* Tchi, *T.* aff. *reticulata* Blainville, *Pachyfavosites polymorphus*

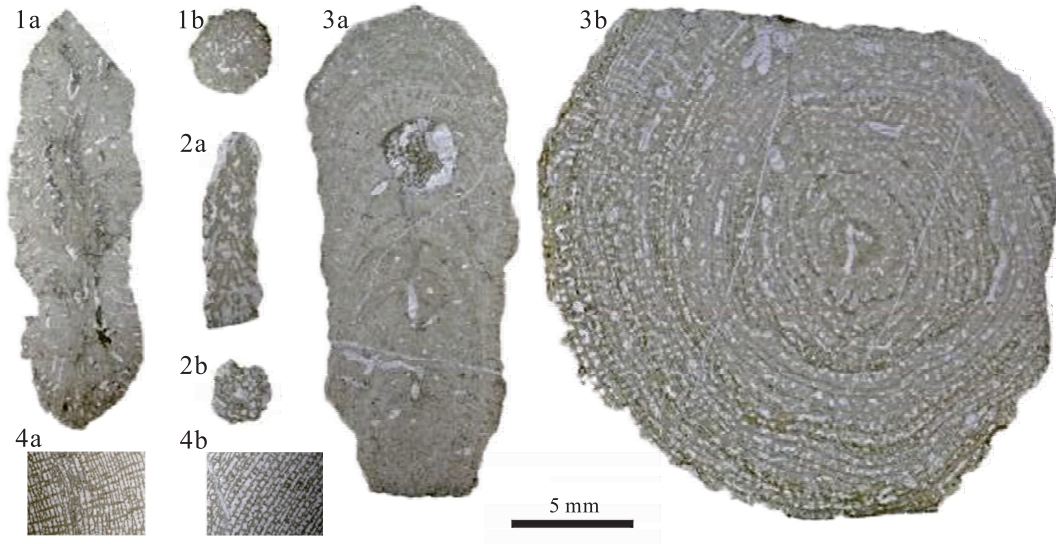


图 1a-1b: *Amphipora batschatensis* Yavorsky, 1955, a 为宏观纵切面, b 为宏观横切面; 图 2a-2b: *Amphipora ninglangensis* Dong, 2001, a 为宏观纵切面, b 为宏观横切面; 图 3a-3b: *Idiostroma reticulatum* Yang, 1979, a 为宏观纵切面, b 为宏观横切面; 图 4a-4b: *Gerronostroma densatum* Yang et Dong, 2001, a 为横切面, b 为纵切面。标本 1a-3b 产自粤北连南东村组, 标本 4a-4b 产自粤北连南桂林组

图 4 粤北地区连南剖面晚泥盆世代表性化石类型

Fig. 4 Representative Late Devonian fossils from Liannan section in northern Guangdong Province

Goldfuss, *Alveolitella arbuscula* Raduguin。根据剖面中产出的特征分子, 建立了 1 个横板珊瑚组合带: *Alveolites-Thamnopora* 带(图 3)。该带以 *Thamnopora* 属特别发育为特征, 横板珊瑚个体较小、体壁厚, 外形多为圆柱状或者枝状。值得指出的是, *Thamnopora* 抗浪性弱, 更适宜于在静水环境中生存, 指示富氧、较安静的浅海环境, 常出现于中泥盆统吉维特阶。

2.2.3 层孔虫

在桂林组和东村组中层孔虫广泛分布, 包括: *Amphipora batschatensis* Yavorsky、*A. ninglangensis* Dong、*Idiostroma hermatoides* Wang、*I. reticulatum* Yang et Dong、*Stachyodes costulata* Lecompte、*Gerronostroma densatum* Yang et Dong 等(图 4), 时代为晚泥盆世弗拉期。

2.3 层序地层

依据野外测量和区域地层对比开展层序地层分析, 共在研究剖面 and 区域对比剖面上识别出中一晚泥盆世副层序 8 个, 其中吉维特阶 3 个、弗拉阶 2.5 个、法门阶 2.5 个。

吉维特期的层序地层可划分为 3 个副层序

(图 5; 吴诒等, 1997)。下部层序中, TST 为深灰色薄层泥质灰岩, SS 为薄层灰色泥灰岩和泥质灰岩互层, HST 由 2 个进积型副层序构成, 下部为厚层白云质灰岩偶夹薄层泥质灰岩, 上部为浅灰色厚层生物碎屑灰岩和厚层白云质灰岩互层。中部层序中, TST 为一套中薄—中层状白云质灰岩, SS 为一套深灰色薄层泥灰岩和薄层泥质灰岩互层, HST 为一套灰色厚层状生物碎屑灰岩、灰色厚层状泥晶灰岩。上部层序 TST 为一套中薄—中层状白云质灰岩和中薄层状生物碎屑灰岩互层, SS 为一套深灰色薄层泥灰岩, HST 为一套灰色厚层状生物碎屑灰岩、中薄层状泥质灰岩。

弗拉期的层序地层可划分为 2.5 个副层序(图 6; 吴诒等, 1997)。下部层序中, TST 为一套中薄—中层状白云质灰岩和中—中厚层状白云岩互层, SS 为一套深灰色薄层泥质灰岩, HST 为一套灰色厚层状生物礁灰岩。中部层序中, TST 为一套中—中厚层状白云岩偶夹中薄层状泥质灰岩, SS 为一套深灰色薄层白云质灰岩, HST 为一套灰色厚层状生物碎屑灰岩偶夹中薄层状泥质灰岩。上部层序中, TST 为一套中薄—中层状礁灰岩, SS 为一套深灰色薄层泥质灰岩, 而 HST 推测已经跨越了

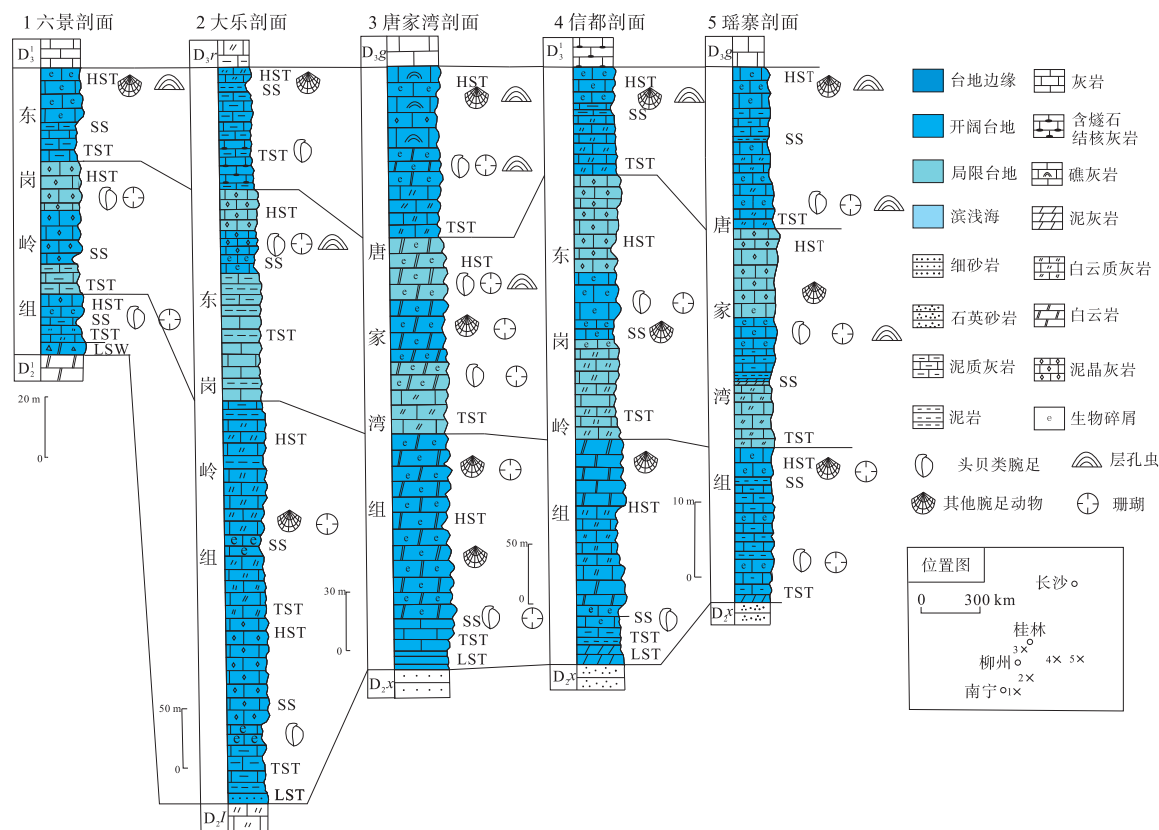


图 5 粤北地区吉维特阶多重地层对比图

Fig. 5 Comprehensive Givetian stratigraphic correlation chart of northern Guangdong Province

F-F 界线。

法门期的层序地层可划分为 2.5 个副层序 (图 7; 吴治等, 1997)。下部层序仅可见 HST, 为一套中一中厚层状泥晶灰岩。中部层序可见 TST 和 HST, SS 发育不明显, 其中 TST 为一套中薄一中层状白云质灰岩和中一中薄层状泥质灰岩互层, HST 为一套灰白色中一中厚层状白云质灰岩和中一中厚层状白云岩互层。上部层序中, TST 为一套中一中厚层状白云质灰岩, SS 为一套深灰色薄层泥质灰岩, HST 为一套中一中厚层状白云质灰岩。

3 生物礁迁移与沉积古地理演化

在加里东运动末期, 扬子板块与华夏板块碰撞拼合, 华南陆块整体上升, 遭受剥蚀, 仅在广西钦州有 1 处残余海槽, 造成整个华南地区形成了三面靠陆、一面靠海的地理格局。自早泥盆世开始, 受桂东南钦防海槽的影响, 自西北滇黔桂地区开始逐渐向北东方向发生海侵, 并且海侵规

模逐渐扩大, 东至粤北—湘东南一带, 北至川西浅海, 海盆中出现浅水碳酸盐台地 (象州型) 和条带状深水硅、泥和泥灰质台盆及台沟沉积 (南丹型) 这两种华南地区典型的沉积类型, 生物相发生分异, 同时在黔南、桂东、川西等浅海区域出现生物礁。然而, 早埃姆斯期生物礁发育数量较少, 分布零星, 仅在黔南、桂东、川西的浅海地区有少量出现, 生物礁规模也较小, 造礁生物以床板珊瑚为主, 含少量层孔虫, 附礁生物多为四射珊瑚、腕足类和海百合等 (吴义布等, 2010)。因此, 华南地区自早泥盆世晚期以来广泛接受来自西南的大规模海侵, 形成了台—沟格架相交错的沉积古地理格局。

3.1 中泥盆世

中泥盆世早期, 华南地区基本继承了早泥盆世晚期的古地理格局, 海平面持续上升, 进一步向北东方向海侵。至中泥盆世晚期的吉维特期, 海侵规模再一次迅速扩大, 湘、粤两地绝大部分的古陆也

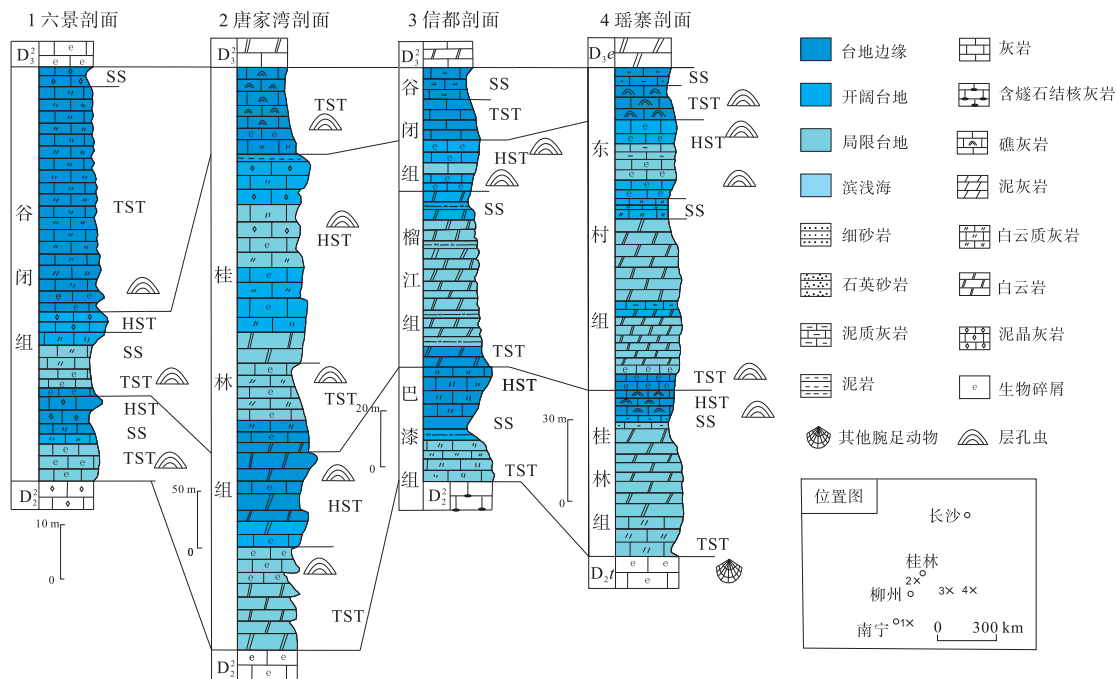


图 6 粤北地区弗拉阶多重地层对比图

Fig. 6 Comprehensive Frasnian stratigraphic correlation chart of the research area

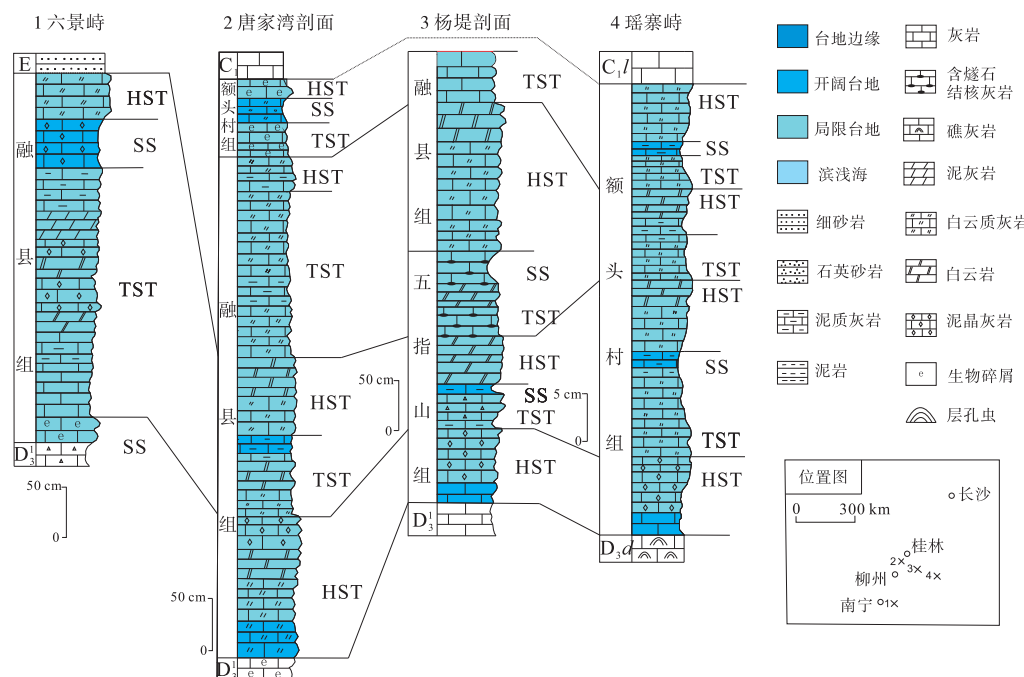


图 7 粤北地区法门阶多重地层对比图

Fig. 7 Comprehensive Famennian stratigraphic correlation chart of northern Guangdong Province

都被海水所侵占，形成了湘桂浅海。与此同时，碳酸盐台地也在滇黔桂浅海及湘桂浅海的滨浅海区域开始大量出现。伴随着海侵规模的不断扩大，中泥盆世的生物礁延续了早泥盆世晚期的复苏局面，数

量上有明显的增加。在艾菲尔晚期，海侵规模进一步扩大，碳酸盐台地的数量急剧增多，至吉维特早中期达到顶峰，华南地区出现了第 1 个生物礁高峰期(图 8-A)。

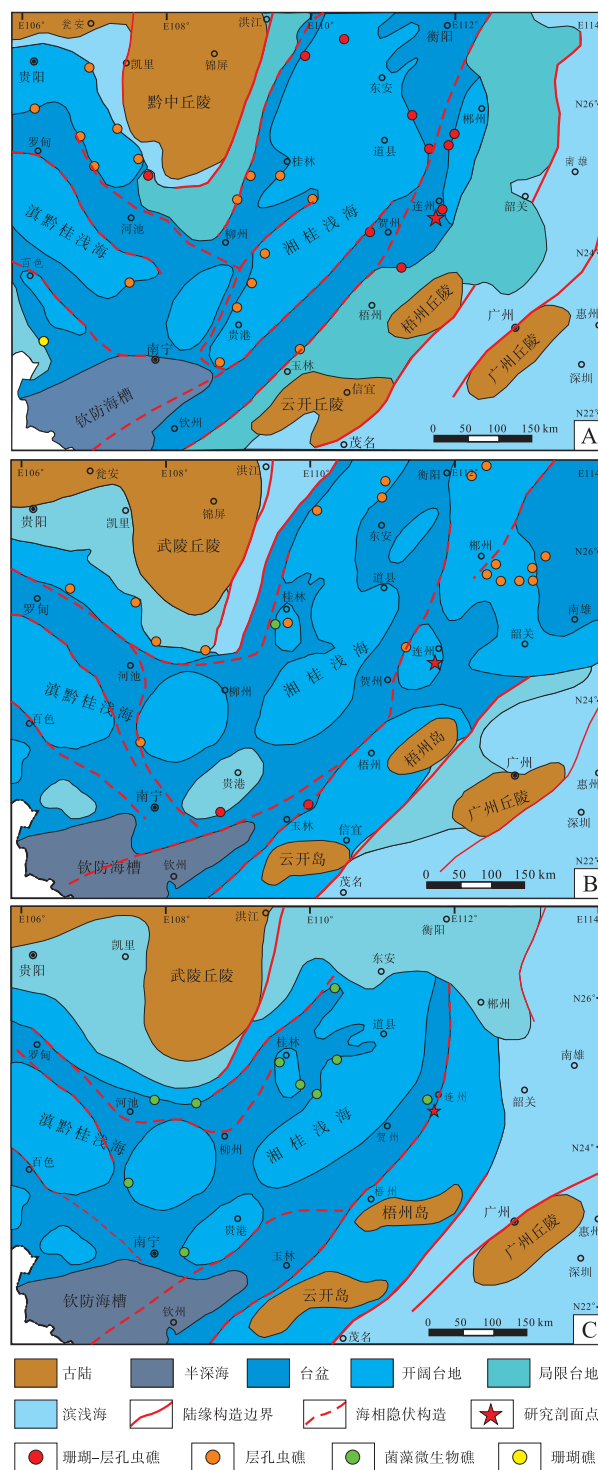
吉维特期的生物礁发育非常广泛，在黔南、桂东、湘中的浅海地区广泛出现，生物礁规模非常大，常呈条带状出现。相较于早泥盆世埃姆斯期，伴随着海侵范围的不断扩大，生物礁具有向北东方向明显迁移的规律。该期的生物礁大多分布在开阔台地或是其边缘相，局限台地中一般发育较少，同时可以很明显地看到，构造断裂对于台地相分布以及生物礁发育都有很大的影响，其不仅对生物礁的分布有着显著影响，而且还会影响到陆源碎屑的补给，进而影响到生物礁的类型。值得指出的是，吉维特期的生物礁，其造礁生物主要是层孔虫，次为复体珊瑚，附礁生物为腕足类、单体四射珊瑚、层孔虫、海百合等。随着海侵范围的不断扩大，每个台地的陆源碎屑物质补给变得非常少，这导致了层孔虫的繁盛，所以这个时期的主要造礁生物已经开始从珊瑚向层孔虫慢慢发生转变。

中泥盆世华南地区发生广泛海侵，海平面也经历了多次短暂快速的波动，尤其是自吉维特中晚期开始，海平面的短期快速变化引发了不同规模的生物事件，使得造礁生物的多样性减少。如受 Taghanic 事件影响，珊瑚、层孔虫等造礁生物的多样性快速降低，生物礁的规模开始逐渐减小。

3.2 晚泥盆世弗拉期

晚泥盆世弗拉期，研究区继承了中泥盆世的古地理格局，海侵范围持续扩大，在中晚弗拉期达到整个泥盆纪的最大值。受吉维特晚期 Taghanic 事件和 Genesee 事件的影响，珊瑚、层孔虫等造礁生物的多样性均不同程度地减少，弗拉早期生物礁发育受到明显遏制。随着海侵范围的进一步扩大，生物礁在弗拉中期逐渐复苏，但规模跟吉维特期相比衰减较多。

弗拉期的生物礁规模虽然相比吉维特期衰减很多，但是其分布范围还是较为广泛，主要分布在黔南、桂东、湘中浅海碳酸盐岩台地边缘，同时伴随着海水向北东方向的侵入，生物礁也有明显的向北东方向迁移发育的规律。受生物事件影响，珊瑚的多样性锐减，造礁生物多为层孔虫，其次为珊瑚和菌藻类，附礁生物多为一些枝状层孔虫、苔藓虫和菌藻类(图 8-B)。到晚弗拉期，开始出现以菌藻类为主要造礁生物的生物礁，这一现象说明以层孔虫、珊瑚等为主的后生动物生物多样性开始衰退，造礁能力逐渐减弱，而菌藻类的造礁能力逐渐增



A—中泥盆世吉维特期；B—晚泥盆世弗拉期；C—晚泥盆世法门期。生物礁点位来源：曾鼎乾等，1988；范嘉松等，1996；金善橘和鞠天吟，1998；柳祖汉等，2000；本文数据。古地理图：地质矿产部成都地质矿产研究所，1994 和马永生等，2009；有修改

图 8 粤北地区中一晚泥盆世岩相古地理图及生物礁分布

Fig. 8 Lithofacies paleogeography and reef distribution of the Middle-Late Devonian in northern Guangdong Province

强,开始逐渐取代层孔虫、珊瑚等后生动物。这可能可以作为对 F-F 事件的一个预示。

弗拉期—法门期之交,发生了显生宙 5 次大灭绝事件之一的 F-F 事件。此次事件导致了极端的环境变化,出现大范围缺氧、降温,造成了全世界范围内海洋生物多样性的锐减,约 57% 属一级的海洋无脊椎动物消失 (Sepkoski, 1996), 包括以珊瑚—层孔虫为代表的后生生物。这一生物事件也导致了在泥盆世中晚期繁盛一时的以珊瑚—层孔虫为主要造礁生物的后生动物礁生态系统的崩溃 (Copper, 2002)。

3.3 晚泥盆世法门期

受 F-F 事件的影响,从法门期开始华南地区进入海退。虽然海平面仍有频繁波动的特征,但是整体上还是呈下降的趋势,这就使得原本发育生物礁的许多碳酸盐台地直接暴露地表,导致生物礁大规模消失。

相较于吉维特期和弗拉期,法门期的生物礁规模急剧减小,仅在广西桂林一带的开阔台地相中有所分布。这个时期的生物礁类型以菌藻类生物礁为主,几乎不发育珊瑚—层孔虫生物礁,仅在法门最晚期得到小规模复苏,局部发育有以层孔虫和笛管珊瑚为主的后生生物礁 (Copper, 2002)。在随后 D-C 之交的 Hangenberg 事件之中,大约有 45% 的属级海洋无脊椎动物灭绝 (Sepkoski, 1996), 包括层孔虫的彻底灭绝,此次事件也使得在法门末期得到小规模复苏的后生生物礁彻底消失 (Kaiser *et al.*, 2016), 同时菌藻类生物礁受到巨大影响,进入了长时间的沉寂期 (图 8-C)。

4 讨论

4.1 生物礁演化阶段和迁移规律

珊瑚动物对陆源物质的抵抗能力强于层孔虫 (Kershaw, 1998), 在吉维特期,构造相对稳定,陆源物质补给较少,促使层孔虫在这个时期逐渐繁盛,并取代珊瑚成为主要造礁生物,为较大规模生物礁的发育提供了必要的条件。而到了晚泥盆世,构造活动变强,陆源物质增多,抑制了造礁生物的发展,导致生物礁衰退。综合生物礁类型和古地理演变的过程,粤北中—晚泥盆世生物礁演化可以分为 3 个阶段: (1) 中泥盆世艾菲尔期—吉维特早中

期,为珊瑚—层孔虫生物礁时期; (2) 吉维特晚期—弗拉期,为层孔虫生物礁时期; (3) 法门期,为菌藻类生物礁时期。生物礁富集点位的迁移规律很好地反映了中—晚泥盆世海平面变化的过程: 自早泥盆世开始,海水逐渐向北东方向侵入,生物礁也随之开始大量出现; 在中泥盆世吉维特期—晚泥盆世弗拉期,海水继续向北东侵入,生物礁富集点也逐渐向北东方向迁移; 晚泥盆世法门期开始,海水逐渐向西南退出,生物礁富集也从湘中地区退回至黔桂地区 (图 9)。

剧烈的大地构造活动导致了在吉维特期及弗拉期—法门期之交发生过 2 次重要的快速海侵事件,这与全球范围内 Taghanic 事件和 Kellwasser 事件可一一对应。连南剖面唐家湾组 17—19 层的岩性组合中可见多个白云质灰岩—灰岩的旋回,指示着海平面快速高频的波动,腕足动物 *Stringocephalus* 在 19 层之后的地层中非常少见,同时珊瑚化石 *Mesophyllum* 和 *Pseudomicroplasma* 也在这层之后的地层中消失,与廖卫华 (2015) 总结的 Taghanic 事件对华南地区生物面貌影响的认识相当。Kellwasser 事件可分为 2 幕,其中下 Kellwasser 事件不是很明显,推测事件层在连南剖面 48 层,其主要特点为海侵规模的扩大。上 Kellwasser 事件在研究剖面有较好的响应,从岩性方面看,在 53 层与 54 层界线处可发现 1 层较薄的暗色富碳质泥岩层,可以作为识别 F-F 事件重要标志的黑色岩系 (富有机质的泥/页岩、泥质灰岩和沥青质灰岩),指示了 F-F 事件层的位置; 从生物化石方面看,在事件层之前发育多处生物礁,其中第 48、49 层为灰色、灰黑色厚层含生物碎屑灰岩,为生物礁的礁基部分,可见很多层孔虫、水螅、苔藓虫和棘皮类等造礁生物; 第 50 层以灰黑色、灰色厚层礁灰岩和生物碎屑颗粒灰岩为主,可见大量的层孔虫参与造礁,生物含量可达 50%~60%,为生物礁的礁核,以出露大量富含层孔虫的礁灰岩为特征; 第 51 层为灰白色厚层含生物碎屑亮晶灰岩,为生物礁的礁顶,可见少量枝状层孔虫、海百合茎等生物碎屑,生屑较为破碎,含量为 20%~35%。2 次快速海侵极大地改变了生物地层格局,海平面的快速上升及海水温度的变化,导致一方面以层孔虫为主要造礁生物的后生生物多样性急剧变化,另一方面由于海水的大规模后退,大量的碳酸盐岩台地暴露,使得生

物礁直接裸露地表后逐渐衰亡(图 9)。前人研究表明,南华海表层洋流流经的地方往往出现生物礁密集区(杜远生等, 2009), 因为这种暖热的洋流会带来丰富的营养物质, 促进生物在洋流流经区域繁衍定殖, 进而影响生物礁的发育, 然而构造运动会改变古地貌格局, 导致洋流范围随之改变, 且伴随着海平面的波动变化, 生物礁富集区也随着发生变化。其中, Frasnian 事件对应的海退在连南剖面上的主要识别标志为第 21 层之后灰岩逐渐变为白云质灰岩, 同时伴随着造礁珊瑚和层孔虫的大量消失, 这与吴义布等(2010)的认识一致。

4.2 生物古地理演化的控制因素

华南粤北泥盆纪生物礁演化与迁移的影响因素较多(董兆雄, 1987; 吴义布等, 2010; 沈建伟等, 2012), 其中加里东运动以来的构造背景是主控因素, 形成了“构造控(海)盆、(海)盆控沉积相、相控生物迁移演化”的规律。

4.2.1 构造背景与古地貌

泥盆纪, 华南板块处于克拉通前缘盆地, 此时的被动大陆边缘为北东—南西走向, 与后来古特提斯裂谷作用控制下的北东—南西向主断裂方向一致(沈建伟等, 2012), 板内活动由加里东末期的挤压作用变为海西早期的拉张作用, 并伴随着明显的左行走滑运动(Zhao *et al.*, 1996)。另一组北西—南东向的断陷导致了一系列互相联系的台沟的形成, 控制了华南海中“以槽围台”的古地貌格局(董兆雄, 1987)。这些由华南海槽中主要基底断裂派生的北东—南西向断裂是控制泥盆纪生物礁组合发育的主要因素(沈建伟等, 2012), 该时期生物礁一般沿断裂控制的台地边缘发育(图 9)。

吉维特期, 同沉积断裂活动进一步加剧, 导致南华海系列北西—南东向和北东—南西向台盆或台沟形成并扩大, 海流可以沿此进入南华海内部(董兆雄, 1987), 使得早泥盆世一些不适合生物礁发育的滨浅海碳酸盐岩台地变成了生物礁富集区。吉维特期的生物礁发育较广泛, 常呈条带状出现于开阔台地之中或是开阔台地的边缘相中, 受到古断裂和古地貌较强的影响。构造活动还会显著影响到生物面貌的特征, 如研究区吉维特期构造相对稳定, 陆源物质补给较少, 其造礁生物主要是层孔虫和珊瑚, 附礁生物为腕足类和海百合等, 而随着

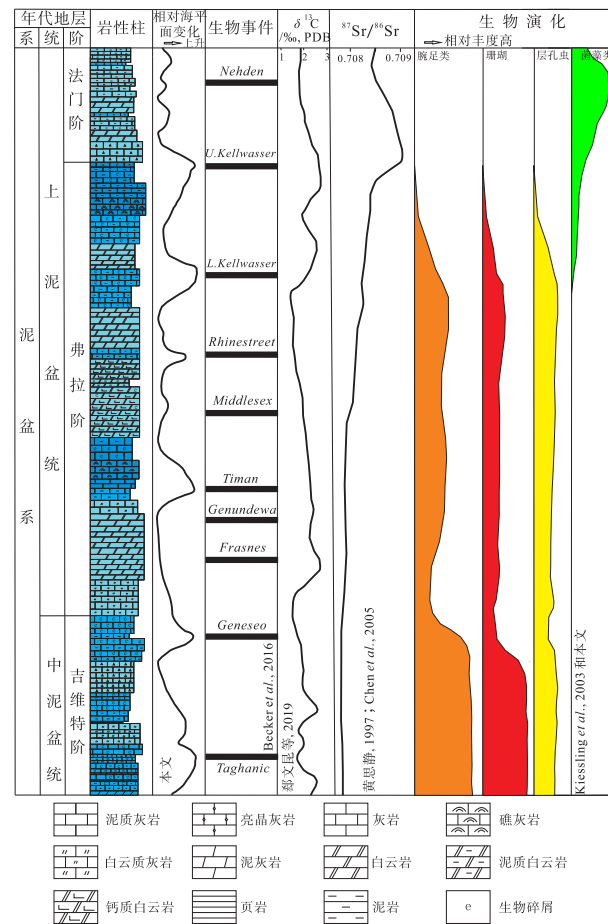


图 9 粤北地区中一晚泥盆世古环境变化以及生物类型演化

Fig. 9 Paleoenvironmental changes and evolution of biological types during the Middle-Late Devonian in northern Guangdong Province

海侵的不断扩大, 周边台地间的陆源碎屑物质补给进一步变少, 导致了层孔虫的繁盛, 逐渐取代了珊瑚对于造礁生物的统治力。

晚泥盆世构造活动强烈(Racki *et al.*, 2018), 这一时期由于劳俄、冈瓦纳、哈萨克斯坦、西伯利亚等大陆板块碰撞, 不仅导致了大陆块体变形和抬升, 进一步加强了地貌的差异化, 而且还造成了洋壳的俯冲引发的超级地幔柱的强烈火山活动(黄程和龚一鸣, 2014)。构造活动变强, 陆源物质增多, 抑制了层孔虫等造礁生物的生长发育, 导致生物礁逐渐衰退。海平面在短期之内的快速变化引发了不同规模的生物事件, 使得造礁生物的多样性减少, 也导致生物礁的规模逐渐减小。弗拉期的生物礁规模相比吉维特期衰减了很多, 主要分布在浅海碳酸盐台地边缘地区, 比如在研究区, 珊瑚动物多

样性锐减,造礁生物多为层孔虫,其次为珊瑚和菌藻类,附礁生物多为一些枝状层孔虫、苔藓虫和菌藻类。

4.2.2 海平面波动和古气候变化

在吉维特中晚期,基于桂林组、东村组和谷闭组等地层的区域对比,可见普遍发育海侵体系域(TST)和高水位体系域(HST)共3个副层序旋回,为一套深灰色—灰黑色中薄层状含生物碎屑泥质灰岩与薄层灰黑色泥岩互层的韵律层,总体为海侵→海退→海侵3次海平面变化构成的进积层序,引发了不同规模的生物事件,但造礁生物的多样性良好,生物礁的规模逐渐减小。

到弗拉期,基于唐家湾组和东岗岭组的区域地层对比,可见普遍发育海侵体系域(TST)和高水位体系域(HST)的6个副层序旋回,下部为薄—中层状白云质灰岩,中部为中—中厚层状白云岩,上部为薄—中层状白云质灰岩与薄—中层状泥质灰岩,发育6次海平面短期快速变化,大趋势为进积—退积的层序。海平面相对快速和剧烈的波动造成生物礁类型的变迁,从珊瑚—层孔虫生物礁型转变为层孔虫生物礁型。

至法门期,基于额头村组和融县组等地层的区域对比,可见普遍发育海侵体系域(TST)和高水位体系域(HST)的6个副层序旋回,总体上为进积的灰色中厚层灰岩与深灰色中薄层泥质灰岩互层,夹灰黑色薄层富碳质页岩,整体是一个大的进积层序,海平面相对下降明显,生物礁类型变为菌藻类生物礁型。

晚泥盆世强烈的造山(构造)活动,使得硅酸盐的风化作用显著增强,导致Si、P等营养物质不断进入海洋(Averbuch *et al.*, 2005),初级生产力增强。此外,造山作用减弱了古特提斯洋和泛大洋之间的循环,增强了海水缺氧程度,导致浅水生物灭绝(Bond, 2014),从而增加了有机碳的埋藏量,导致气候变冷(Buggisch and Joachimski, 2006; Joachimski *et al.*, 2009; McArthur *et al.*, 2012; 黄家园等, 2019; 郗文昆等, 2019)。弗拉期与法门期之交, F-F事件导致了极端的环境变化,海水出现大范围缺氧、降温,造成了全世界范围内海洋生物多样性锐减,属一级的海洋无脊椎动物约57%消失(Sepkoski, 1996),包括以珊瑚—层孔虫为代表的后生生物,这也导致了在泥盆世中晚

期繁盛一时的以珊瑚—层孔虫为主要造礁生物的后生动物礁生态系统的崩溃(黄家园等, 2019)。强烈的造山运动,加上这一时期的陆地森林生态系统演化,使得大陆风化作用显著提升,从而造成海水富营养化。在此背景之下,菌藻类开始大规模繁盛,加上环境影响,后动植物的生长发育受到抑制并开始大规模死亡,这又加剧了环境恶化与菌藻类的繁盛,直至生物礁生态系统彻底崩溃。

5 结论

1) 粤北中一晚泥盆世生物礁类型演化可以分为3个阶段:中泥盆世艾菲尔期—吉维特早中期为珊瑚—层孔虫生物礁时期,造礁生物以珊瑚、层孔虫和腕足类为主;吉维特晚期—弗拉期为层孔虫生物礁时期,造礁生物以层孔虫为主;法门期为菌藻类生物礁时期,造礁生物以菌藻类为主。

2) 生物礁富集点位的迁移规律反映了中一晚泥盆世海平面变化的过程:自早泥盆世开始,海水逐渐向北东方向迁移,生物礁也随之出现;中泥盆世吉维特期—晚泥盆世弗拉期,海水继续向北东方向侵入,生物礁富集区也逐渐向北东方向移动;晚泥盆世法门期,海水逐渐向西南退缩,生物礁富集点位也从湘中地区退回至黔桂地区。

3) 区域构造事件是生物礁迁移的主要控制因素,即构造运动通过影响古地貌格局、古气候变化和海平面波动等控制着碳酸盐岩台地的形成和演化,并进一步影响了生物礁的类型演变和时空迁移。

参考文献 (References)

- 白志强. 1998. 泥盆纪华南板块古地理的位置及其漂移. 北京大学学报(自然科学版), 34(6): 807-812. [Bai Z Q. 1998. The paleogeographical position and drifting of the Southern China plate in Devonian. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 34(6): 807-812]
- 陈代钊, 陈其英. 1995. 黔南地区早、中泥盆世沉积演化的动力机制. 沉积学报, 13(3): 54-65. [Chen D Z, Chen Q Y. 1995. Dynamics of sedimentary evolution for the early and middle Devonian, southern Guizhou. Acta Sedimentologica Sinica, 13(3): 54-65]
- 戴光亚. 1982. 湖南中部泥盆系棋梓桥组生物礁初步研究. 石油实验地质, 4(1): 11-18, 85. [Dai G Y. 1982. A preliminary study on the reefs of Devonian Qiziqiao Formation in mid-Hunan. Petroleum Geology & Experiment, 4(1): 11-18, 85]
- 地质矿产部成都地质矿产研究所. 1994. 中国南方岩相古地理图集:

- 震旦纪—三叠纪. 北京: 科学出版社, 86-113. [Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Ministry of Geology and Mineral Resources. 1994. Atlas of Lithofacies Palaeogeography in Southern China: Cambrian-Triassic. Beijing: Science Press, 86-113]
- 董兆雄. 1987. 华南泥盆纪生物礁及其控制因素初探. 西南石油学院学报, 9(4): 1-14. [Dong Z X. 1987. Preliminary approach to Devonian reefs and their control factors in South China. Journal of Southwest Petroleum Institute, 9(4): 1-14]
- 杜远生, 徐亚军. 2012. 华南加里东运动初探. 地质科技情报, 31(5): 43-49. [Du Y S, Xu Y J. 2012. A preliminary study on Caledonian event in South China. Geological Science and Technology Information, 31(5): 43-49]
- 杜远生, 龚一鸣, 张哲, 曾雄伟. 2009. 华南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. 古地理论, 11(1): 28-36. [Du Y S, Gong Y M, Zhang Z, Zeng X W. 2009. Paleooxygenation facies and oxygen-deficient environmental model of the Devonian source rocks from southern south China sea: an example from the middle and upper devonian of Guangxi. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 11(1): 28-36]
- 范嘉松, 徐克定, 金梅春, 叶俭, 杨友运, 兰晓东, 许安东, 郑荣才, 杨万容, 穆西南, 杜韞华, 胡平忠, 王金中. 1996. 中国生物礁与油气. 北京: 海洋出版社, 1-329. [Fan J S, Xu K D, Jin M C, Ye J, Yang Y Y, Lan X D, Xu A D, Zheng R C, Yang W R, Mu X N, Du Y H, Hu P Z, Wang J Z. 1996. The Ancient Organic Reefs of China and Their Relations to Oil and Gas. Beijing: China Ocean Press, 1-329]
- 广西壮族自治区地质调查院. 2024. 中国区域地质志: 广西志. 北京: 地质出版社, 1-1135. [Geological Survey of Guangxi Zhuang Autonomous Region. 2024. Chinese Regional Geology of Guangxi Zhuang Autonomous Region. Beijing: Geological Publishing House, 1-1135]
- 黄程, 龚一鸣. 2014. 广西杨堤剖面上泥盆统弗拉阶—法门阶之交磷质微球粒的发现及其地球生物学意义. 中国科学: 地球科学, 44(6): 1171-1184. [Huang C, Gong Y M. 2014. Phosphatic microspherules and their geobiological implications from the Frasnian-Famennian transition at the Yangdi section, Guilin, South China. Scientia Sinica (Terrae), 44(6): 1171-1184]
- 黄家园, 梁昆, 王玉珏, 郑文昆. 2019. 全球泥盆纪生物礁演化及其影响因素. 地层学杂志, 43(2): 198-209. [Huang J Y, Liang K, Wang Y J, Qie W K. 2019. Evolution of Devonian reefs and its influencing factors. Journal of Stratigraphy, 43(2): 198-209]
- 黄思静. 1997. 上扬子地台区晚古生代海相碳酸盐岩的碳、锶同位素研究. 地质学报, 71(1): 45-53. [Huang S J. 1997. A study on carbon and strontium isotopes of Late Paleozoic carbonate rocks in the Upper Yangtze platform. Acta Geologica Sinica, 71(1): 45-53]
- 黄云皇. 1992. 广东泥盆纪各时期古地理. 沉积与特提斯地质, 12(1): 20-25. [Huang Y H. 1992. Devonian palaeogeography in Guangdong. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 12(1): 20-25]
- 金善嫖, 鞠天吟. 1998. 中国南方震旦纪—三叠纪生物礁分布特征、成因及储集性能的研究. 上海: 上海科学技术出版社, 1-152. [Jin S J, Ju T Y. 1998. Research on Paleogeographic Setting, Fundamental Feature and Reservoir Property of Sinian-Triassic Reef in Southern China. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1-152]
- 李三忠, 李玺瑶, 赵淑娟, 杨朝, 刘鑫, 郭玲莉, 王永明, 郝义, 张剑. 2016. 全球早古生代造山带(Ⅲ): 华南陆内造山. 吉林大学学报(地球科学版), 46(4): 1005-1025. [Li S Z, Li X Y, Zhao S J, Yang C/Z, Liu X, Guo L L, Wang Y M, Hao Y, Zhang J. 2016. Global Early Paleozoic Orogens (Ⅲ): intracontinental orogen in South China. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 46(4): 1005-1025]
- 梁锦, 周永章, 李红中. 2015. 扬子—华夏构造结合带的演化阶段及对斑岩铜矿形成的控制机制. 地学前缘, 22(2): 144-159. [Liang J, Zhou Y Z, Li H Z. 2015. Tectonic evolution of the juncture between Yangtze craton and Cathaysian block: its significance for mineralization of porphyry copper deposits. Earth Science Frontiers, 22(2): 144-159]
- 廖卫华. 2015. 华南中泥盆世两次重要的珊瑚群更替事件. 古生物学报, 54(3): 305-315. [Liao W H. 2015. Two major faunal turnover events of middle Devonian corals in South China. Acta Palaeontologica Sinica, 54(3): 305-315]
- 廖卫华, 马学平. 2007. 华南浅海相泥盆系吉维特阶和弗拉阶四射珊瑚组合特征. 古生物学报, 46(2): 213-224. [Liao W H, Ma X P. 2007. The assemblage sequences and characteristics of the Devonian Givetian and Frasnian rugose corals in near-shore facies from South China. Acta Palaeontologica Sinica, 46(2): 213-224]
- 刘运黎, 周小进, 廖宗庭, 杨帆. 2009. 华南加里东期相关地块及其汇聚过程探讨. 石油实验地质, 31(1): 19-25. [Liu Y L, Zhou X J, Liao Z T, Yang F. 2009. Relative blocks and convergence process during the Caledonian movement in South China. Petroleum Geology and Experiment, 31(1): 19-25]
- 柳祖汉, 杨孟达, 刘新华, 杨荣丰, 莫时旭. 2000. 湖南晚古生代生物礁. 北京: 煤炭工业出版社, 1-59. [Liu Z H, Yang M D, Liu X H, Yang R F, Mo S X. 2000. Late Paleozoic Biogenic Reefs in Hunan Province. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1-59]
- 柳祖汉, 刘新华, 杨孟达, 杨荣丰. 2003. 贵州布寨泥盆纪生物礁的古生物学和古生态学特征. 湘潭矿业学院学报, 18(3): 29-32. [Liu Z H, Liu X H, Yang M D, Yang R F. 2003. Palaeontology and palaeoecology characteristics of Devonian reefs in Buzhai of Guizhou. Journal of Xiangtan Mining Institute, 18(3): 29-32]
- 骆满生, 袁晓萍, 张克信, 何卫红. 2025. 中国泥盆系构造—地层区划及岩石地层格架. 地球科学, 50(7): 2811-2843. [Luo M S, Yuan X P, Zhang K X, He W H. 2025. Devonian tectonic-stratigraphic realms and lithostratigraphic framework in China. Earth Science, 50(7): 2811-2843]
- 马力, 陈焕疆, 甘克文, 徐克定, 许效松, 吴根耀, 葉舟, 梁兴, 吴少华, 邱蕴玉, 章平澜, 葛芃芃. 2004. 中国南方大地构造和海相油气地质(上册). 北京: 地质出版社, 1-451. [Ma L, Chen H J, Gan K W, Xu K D, Xu X S, Wu G Y, Ye Z, Liang X, Wu S H, Qiu Y Y, Zhang P L, Ge G G. 2004. Geotechnical and Marine Oil and Gas Geology in Southern China (Volume 1). Beijing: Geological Publishing House, 1-451]

- 马永生,陈洪德,王国力. 2009. 中国南方构造—层序岩相古地理图集. 北京: 科学出版社, 15–23. [Ma Y S, Chen H D, Wang G L. 2009. Atlas of Tectonics-sequence Lithofacies Palaeogeography in Southern China. Beijing: Science Press, 15–23]
- 梅冥相,马永生,邓军,李浩,郑宽兵. 2005. 加里东运动构造古地理及滇黔桂盆地的形成: 兼论滇黔桂盆地深层油气勘探潜力. 地学前缘, 12(3): 227–236. [Mei M X, Ma Y S, Deng J, Li H, Zheng K B. 2005. Tectonic palaeogeographic changes resulting from the Caledonian movement and the formation of the Dianqiangui Basin: discussion on the deep exploration potential of oil and gas in the Dianqiangui Basin. Earth Science Frontiers, 12(3): 227–236]
- 牛志军,何垚砚,宋芳,周岱,杨文强,田洋,刘浩,王志宏,安志辉. 2024. 华夏块体及邻区新元古代—早古生代沉积记录与华南洋演化: 问题、讨论与建议. 华南地质, 40(2): 234–251. [Niu Z J, He Y Y, Song F, Zhou D, Yang W Q, Tian Y, Liu H, Wang Z H, An Z H. 2024. Relationship between Neoproterozoic and Early Paleozoic stratigraphic sequence and the evolution of South China Ocean in the Cathaysia Block and adjacent area: problem, discussion and suggestions. South China Geology, 40(2): 234–251]
- 潘桂棠,陆松年,肖庆辉,张克信,尹福光,郝国杰,骆满生,任飞,袁四化. 2016. 中国大地构造阶段划分和演化. 地学前缘, 23(6): 1–23. [Pan G T, Lu S N, Xiao Q H, Zhang K X, Yin F G, Hao G J, Luo M S, Ren F, Yuan S H. 2016. Division of tectonic stages and tectonic evolution in China. Earth Science Frontiers, 23(6): 1–23]
- 郅文昆,马学平,徐洪河,乔丽,梁昆,郭文,宋俊俊,陈波,卢建峰. 2019. 中国泥盆纪综合地层和时间框架. 中国科学: 地球科学, 49(1): 115–138. [Qie W K, Ma X P, Xu H H, Qiao L, Liang K, Guo W, Song J J, Chen B, Lu J F. 2019. Devonian integrative stratigraphy and timescale of China. Scientia Sinica (Terra), 49(1): 115–138]
- 沈建伟. 1996. 广西桂林晚泥盆世弗拉斯期珊瑚礁. 沉积学报, 14(2): 75–81. [Shen J W. 1996. Late Devonian Frasian coral reefs in Guilin, Guangxi. Acta Sedimentologica Sinica, 14(2): 75–81]
- 沈建伟,赵娜,王月,杨红强. 2012. 构造和地层背景对华南、澳大利亚和日本晚泥盆世和密西西比纪生物礁发育的影响. 地球科学, 37(3): 391–400. [Shen J W, Zhao N, Wang Y, Yang H Q. 2012. Effect of different tectonic-stratigraphic settings on Late Devonian and Mississippian reefs in western Australia, eastern Australia, South China and Japan. Earth Science, 37(3): 391–400]
- 舒良树. 2012. 华南构造演化的基本特征. 地质通报, 31(7): 1035–1053. [Shu L S. 2012. An analysis of principal features of tectonic evolution in South China Block. Geological Bulletin of China, 31(7): 1035–1053]
- 宋裕发,张永铭,刘家润. 1994. 湖南新邵巨口铺中泥盆世棋梓桥期生物礁群落生态. 古生物学报, 33(6): 739–755, 801–804. [Song Y F, Zhang Y L, Liu J R. 1994. Community ecology of middle Devonian (Qiziqiao time) organic reef from Jukoupu, Xinshao, Hunan. Acta Palaeontologica Sinica, 33(6): 739–755, 801–804]
- 汤家富,戴圣潜. 2016. 华南地区基底组成与构造演化及其对成岩成矿的控制. 地学前缘, 23(4): 109–128. [Tang J F, Dai S Q. 2016. Composition and tectonic evolution of Precambrian basement in South China and their control in diagenesis and mineralization. Earth Science Frontiers, 23(4): 109–128]
- 田洪均,郑和荣. 1983. 四川马角坝陈家崖泥盆纪点礁的基本特征. 矿物岩石, 3(4): 68–76. [Tian H J, Zheng H R. 1983. The basic features of Middle–Upper Devonian organic reef from Chenjiaya, Majiaoba, Sichuan. Journal of Mineralogy and Petrology, 3(4): 68–76]
- 王保忠,石万忠,王传尚,张国涛,田巍,李海. 2026. 中扬子地区下古生界页岩拉曼光谱特征及其对页岩气勘探的启示. 华南地质, 42(1): 116–130. [Wang B Z, Shi W Z, Wang C S, Zhang G T, Tian W, Li H. 2026. Raman spectral characteristics of the Lower Paleozoic shale in the Middle Yangtze region and their implications for shale gas exploration. South China Geology, 42(1): 116–130]
- 王剑,宁浦功. 1998. 桂北桂中泥盆纪沉积盆地大地构造演化与铅锌成矿作用. 广西地质, (1): 1–6. [Wang J, Ning P G. 1998. Study on tectonic evolution of Devonian sedimentary basins and lead-zinc metallization of Guangxi. Guangxi Geology, (1): 1–6]
- 王玉珏,梁昆,陈波,宋俊俊,郭文,乔丽,黄家园,郅文昆. 2020. 晚泥盆世 F-F 大灭绝事件研究进展. 地层学杂志, 44(3): 277–298. [Wang Y J, Liang K, Chen B, Song J J, Guo W, Qiao L, Huang J Y, Qie W K. 2020. Research progress in the Late Devonian F-F mass extinction. Journal of Stratigraphy, 44(3): 277–298]
- 吴诒,龚一鸣,杜远生. 1997. 华南泥盆纪层序地层及海平面变化. 湖北武汉: 中国地质大学出版社. [Wu Y. 1997. Devonian Sequence Stratigraphy and Sea Level Change of South China. Hubei Wuhan: China University of Geosciences Press]
- 吴义布,龚一鸣,张立军,冯启. 2010. 华南泥盆纪生物礁演化及其控制因素. 古地理学报, 12(3): 253–267. [Wu Y B, Gong Y M, Zhang L J, Feng Q. 2010. Evolution and controlling factors of the Devonian bioreefs in South China. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 12(3): 253–267]
- 俞昌民,吴望始,赵嘉明,张肇诚. 1963. 中国的珊瑚化石. 北京: 科学出版社: 1–488. [Yu C M. 1963. Coral Fossils in China. Beijing: Science Press, 1–488]
- 俞昌民,廖卫华,邓占球. 1979. 中国南方泥盆纪珊瑚化石的分布和组合层序. 地层学杂志, 3(2): 96–102. [Yu C M, Liao W H, Deng Z Q. 1979. Distribution and assemblage sequence of Devonian coral fossils in South China. Journal of Stratigraphy, 3(2): 96–102]
- 张国伟,郭安林,王岳军,李三忠,董云鹏,刘少峰,何登发,程顺有,鲁如魁,姚安平. 2013. 中国华南大陆构造与问题. 中国科学: 地球科学, 43(10): 1553–1582. [Zhang G W, Guo A L, Wang Y J, Li S Z, Dong Y P, Liu S F, He D F, Cheng S Y, Lu R K, Yao A P. 2013. Tectonics of South China continent and its implications. Scientia Sinica (Terra), 43(10): 1553–1582]
- 张克信,潘桂棠,何卫红,肖庆辉,徐亚东,张智勇,陆松年,邓晋福,冯益民,李锦轶,赵小明,邢光福,王永和,尹福光,郝国杰,张长捷,张进,龚一鸣. 2015. 中国构造—地层大区划分新方案. 地球科学, 40(2): 206–233. [Zhang K X, Pan G T, He W H, Xiao Q H, Xu Y D, Zhang Z Y, Lu S N, Deng J F, Feng Y M, Li J Y, Zhao X M, Xing G F, Wang Y H, Yin F G, Hao G J, Zhang C J, Zhang J, Gong Y M. 2015. New division of tectonic-strata superregion in Chi-

- na. *Earth Science*, 40(2): 206–233]
- 张克信, 何卫红, 徐亚东, 王丽君, 牛志军, 邢光福, 王嘉轩, 徐德明, 赵希林, 宋芳, 寇晓虎. 2024. 华夏造山系元古宙—早古生代洋板块地层分布与演化. *华南地质*, 40(2): 181–210. [Zhang K X, He W H, Xu Y D, Wang L J, Niu Z J, Xing G F, Wang J X, Xu D M, Zhao X L, Song F, Kou X H. 2024. Distribution and evolution of OPS from Proterozoic to Early Paleozoic in the Cathaysian orogen. *South China Geology*, 40(2): 181–210]
- 周棣康, 邹志福, 刘素英. 1981. 广西南丹大厂龙头山泥盆纪生物礁. *石油与天然气地质*, 2(3): 243–253, 301–302. [Zhou D K, Zou Z F, Liu S Y. 1981. On the Devonian Longtou Mountain atoll, Nandan, Kuangsi. *Oil & Gas Geology*, 2(3): 243–253, 301–302]
- 周家云, 郑荣才, 张裕书, 朱志敏, 李潇雨, 罗丽萍, 周满庚. 2009. 华南泥盆纪古地理环境对宁乡式铁矿床时空分布、矿石特征的制约. *地质科技情报*, 28(1): 93–98. [Zhou J Y, Zheng R C, Zhang Y S, Zhu Z M, Li X Y, Luo L P, Zhou M G. 2009. Constraints of South China Devonian Ningxiang palaeogeography on the temporal and spatial distribution of iron ore deposits and their characteristics. *Geological Science and Technology Information*, 28(1): 93–98]
- 曾鼎乾, 刘炳温, 黄蕴明. 1988. 中国各地质历史时期生物礁. 北京: 石油工业出版社. [Zeng D Q, Liu B W, Huang Y M. 1988. Biological Reefs from Various Geological Historical Periods in China. Beijing: Petroleum Industry Press]
- 曾允孚, 陈洪德, 张锦泉, 刘文均. 1992. 华南泥盆纪沉积盆地类型和主要特征. *沉积学报*, 10(3): 104–113. [Zeng Y F, Chen H D, Zhang J Q, Liu W J. 1992. Types and main characteristics of Devonian sedimentary basin in South China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 10(3): 104–113]
- Aboussalam Z S, Becker R T. 2002. The base of the Hermann Zone as the base of an upper Givetian substage. *SDS Newsl*, 19: 25–34.
- Algeo T, Berner R, Maynard J, Scheckler S. 1995. Late Devonian oceanic anoxic events and biotic crises: 'rooted' in the evolution of vascular land plants. *GSA Today*, 45–66.
- Averbuch O, Tribouillard N, Devleeschouwer X, Riquier L, Mistiaen B, Van Vliet-Lanoe B. 2005. Mountain building-enhanced continental weathering and organic carbon burial as major causes for climatic cooling at the Frasnian-Famennian boundary (c. 376 Ma)? *Terra Nova*, 17(1): 25–34.
- Bai S L. 1994. Devonian Events and Biostratigraphy of South China. Beijing: Peking University Press, 1–103.
- Baird G C, Brett C E. 2008. Late Givetian Taghanic bioevents in New York State: new discoveries and questions. *Bulletin of Geosciences*, 83(4): 357–375.
- Becker R T, Königshof P, Brett C E. 2016. Devonian climate, sea level and evolutionary events: an introduction. *Geological Society, London, Special Publications*, 423: 1–10.
- Bond D P G. 2014. Large igneous provinces and mass extinctions: an update. *Geological Society of America Special Papers*, 505: 29–55.
- Buggisch W, Joachimski M M. 2006. Carbon isotope stratigraphy of the Devonian of central and southern Europe. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 240(1–2): 68–88.
- Chen D Z, Qing H R, Li R W. 2005. The Late Devonian Frasnian-Famennian (F/F) biotic crisis: insights from $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotopic systematics. *Earth and Planetary Science Letters*, 235: 151–166.
- Copper P. 2002. Silurian and Devonian reefs: 80 million years of global greenhouse between two ice ages. *Phanerozoic Reef Patterns*, 72: 181–238.
- Jablonski D. 1991. Extinctions: a paleontological perspective. *Science*, 253: 754–757.
- Joachimski M M, Breisig S, Buggisch W, Talent J A, Mawson R, Gereke M, Morrow J R, Day J, Weddige K. 2009. Devonian climate and reef evolution: insights from oxygen isotopes in apatite. *Earth and Planetary Science Letters*, 284(3–4): 599–609.
- Kaiser S I, Aretz M, Becker R T. 2016. The global Hangenberg Crisis (Devonian-Carboniferous transition): review of a first-order mass extinction. *Geological Society, London, Special Publications*, 423: 387–437.
- Kershaw S I. 1998. The applications of stromatopore palaeobiology in palaeoenvironmental analysis. *Palaeontology*, 41: 509–544.
- Kiessling W, Flügel E. 2002. Paleoreefs: a database on Phanerozoic reefs. *Phanerozoic Reef Patterns*, 72: 77–92.
- Kiessling W, Flügel E, Golonka J, König D, Röper W, Steuding R, Haas A, Däßler R. 2003. The Paleoreefs Project. <http://www.paleoreefs.pal.uni-erlangen.de>.
- Ma X P. 2009. Spiriferide brachiopods from the Frasnian (Devonian) of the Dushan area, southern Guizhou, China. *Acta Palaeontologica Sinica*, 48(4): 611–627.
- Ma X P, Gong Y M, Chen D Z, Racki G, Chen X Q, Liao W H. 2016. The Late Devonian Frasnian-Famennian Event in South China: patterns and causes of extinctions, sea level changes, and isotope variations. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 448: 224–244.
- McArthur J M, Howarth R J, Shields G A, Zhou Y. 2012. Strontium Isotope Stratigraphy. *Geologic Time Scale*, 2012. Amsterdam: Elsevier, 211–238.
- Oliver W A Jr, Pedder A E H. 1994. Crises in the Devonian history of the rugose corals. *Paleobiology*, 20(2): 178–190.
- Racki G, Rakociński M, Marynowski L, Wignall P B. 2018. Mercury enrichments and the Frasnian-Famennian biotic crisis: a volcanic trigger proved? *Geology*, 46(6): 543–546.
- Sepkoski J J Jr. 1996. Patterns of Phanerozoic extinction: a perspective from global data bases. *Global Events and Event Stratigraphy in the Phanerozoic*. Berlin, Heidelberg: Springer, 35–51.
- Zhang M Q, Ma X P. 2019. Origination and diversification of Devonian ambocoeloid brachiopods in South China. *Palaeobiodiversity and Palaeoenvironments*, 99(1): 63–90.
- Zhao X, Allen M B, Whitham A G, Price S P. 1996. Rift-related Devonian sedimentation and basin development in South China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 14(1): 37–52.

(责任编辑 张西娟)