

泥盆系弗拉阶/法门阶之交事件沉积和海平面变化

龚一鸣, 李保华

(中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074)

摘要: 在华南板块南部被动大陆边缘和西伯利亚板块南部活动大陆边缘弗拉阶/法门阶之交识别出7种物理事件相: 细粒钙屑浊积岩相、钙质角砾岩相、软变形灰岩相、含微球粒的粒泥灰岩相、凝灰质砾岩相、黑色页岩相和火山喷溢相。它们在法门阶下 *Palmatolepis triangularis* 带底部和/或上 *Palmatolepis rhenana* 带底部具有广泛的分布, 可能是两次陨击事件记录, 是良好的高分辨率年代地层对比标志。弗拉期/法门期之交的海平面变化不具有同步性和一致性, 可分辨出2种型式(阶跃型和渐进型)和5种状态(弗拉期最末期下降→法门期最初期上升、弗拉期最末期上升→法门期最初期下降、弗拉期最末期上升→法门期最初期上升、弗拉期最末期下降→法门期最初期下降、弗拉期最末期与法门期最初期海平面变化不明显)。弗拉阶/法门阶之交生物的阶梯状绝灭可能与从上 *Palmatolepis rhenana* 带底部至 *Palmatolepis crepida* 带不均匀分布的6次陨击事件密切相关。

关键词: 事件沉积; 海平面变化; 集群绝灭; 泥盆纪; 中国。

中图分类号: P53

文献标识码: A

文章编号: 1000—2383(2001)03—0251—07

作者简介: 龚一鸣(1958), 男, 教授, 1991年获中国地质大学理学博士学位, 主要从事沉积地质、遗迹化石和地史古生物方面的教学和研究工作。

自从加拿大学者 McLaren 1970 年首次提出在晚泥盆世极短时间内发生的生物绝灭可能是由小行星撞击地球导致的全球生物集群绝灭现象以来, 弗拉阶/法门阶之交事件(或称 F/F 事件, Kellwasser 事件)就引起国内外地质工作者的广泛关注, 在生物地层、化学地层、同位素地层和层序地层等方面作了大量工作, F/F 事件的生物效应(浅水生物的集群绝灭)、化学—同位素效应(Ir, Os, Ni, Sr, La, Cu, $\delta(^{13}\text{C})$ 异常)已积累了较丰富的资料, 与之相比, F/F 事件的物理效应的研究相对薄弱。本文将已有的生物地层, 特别是牙形石生物地层为基础, 阐述弗拉期/法门期之交在华南板块南部被动大陆边缘和西伯利亚板块南部活动大陆边缘的事件沉积类型和海平面变化特征及其与 F/F 之交生物集群绝灭的关系。

1 F/F 之交的事件沉积类型

F/F 之交的事件沉积至少可分辨出7种物理事

件相: 细粒钙屑浊积岩相、钙质角砾岩相、软变形灰岩相、含微球粒的粒泥灰岩相、凝灰质砾岩相、黑色页岩相和火山喷溢相。

(1) 细粒钙屑浊积岩相。在露头上表现为薄到中层状扁豆状灰岩或泥灰岩, 镜下为粒泥灰岩, 颗粒主要为细小的生物碎屑, 如钙藻、腕足、海百合茎的碎片, 再沉积的牙形石等, 镜下可见微递变层理。细粒钙屑浊积岩相主要见于白沙、香田、南垌、那艺和都安剖面 *Palmatolepis triangularis* 带底部^[1~4], 也发育于桂林杨堤剖面 *Palmatolepis linguiformis* 带顶部(图1), 为低密度浊流形成的远端浊积岩。

(2) 钙质角砾岩相。在露头上为块状无层理, 砾石成分包括两类, 其一, 下伏盆地相或斜坡较深水环境中沉积的灰色—深灰色薄层状粒泥灰岩; 其二, 浅水碳酸盐台地相的骨屑灰岩、颗粒灰岩或礁灰岩, 含这种砾石的钙质角砾岩的厚度通常较前者大, 可达数 m。角砾棱角状, 无分选和磨圆, 砾径一般 3~5 cm, 大者可达数十 cm, 少数砾石具塑性破裂或塑性变形的特征, 岩石的胶结物或填隙物为灰泥或砂屑。钙质角砾岩相的层位集中分布在下 *Palmatolepis triangularis* 带底部和上 *Palmatolepis rhenana* 带

收稿日期: 2000—08—19

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 40072041, 49472086); 国家“九五”攀登计划专项“SSER”项目。

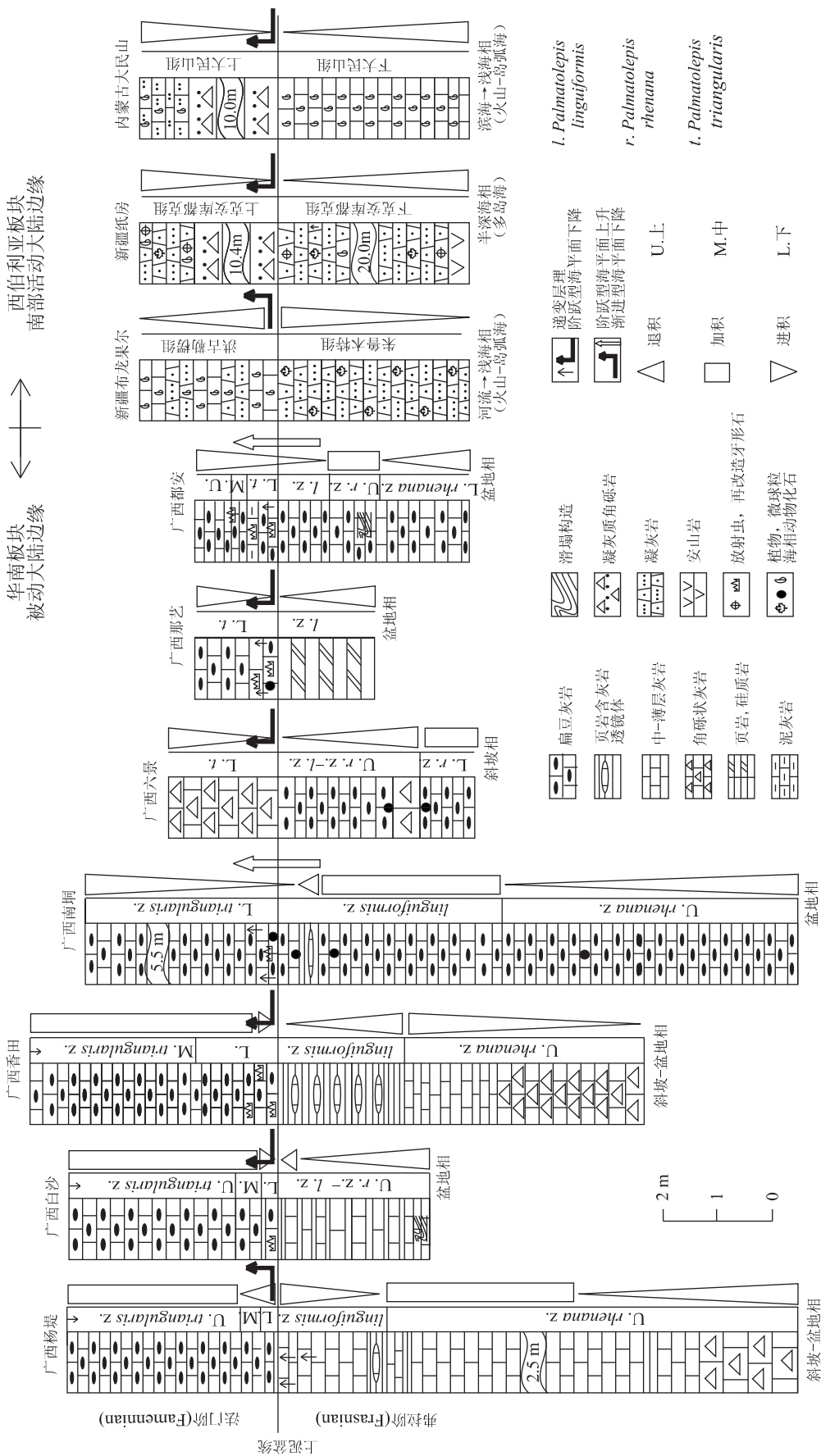


图1 泥盆系弗拉阶/法门阶之交事件沉积、海平面变化和综合地层对比
Fig.1 Event deposits, sea-level changes and an integrated stratigraphic correlation of the Frasnian/Famennian transition in South and northern China

底部,前者见于六景剖面,后者见于杨堤、香田和六景剖面(图1)。下 *Palmatolepis triangularis* 带底部的钙质角砾岩相也见于南宁青秀山剖面,为水下碎屑流沉积。

(3)软变形灰岩相。岩性为粒泥灰岩,软变形灰岩层表现为复杂的褶皱或包卷层理,上覆和下伏灰岩层产状稳定,灰岩的沉积环境为较深水碳酸盐斜坡相—盆地相。软变形灰岩的层位集中分布在白沙和都安剖面上 *Palmatolepis rhenana* 带底部(图1)。

(4)含微球粒的粒泥灰岩相。以含丰富的微球粒为特征。微球粒可分为两类,其一:磷质微球粒,呈浅黄色、褐色或深褐色,大多透明,球状或椭球状,大小一般 100~300 μm ,表面光滑,部分微球粒表面可见在塑性状态下被碎屑物刻划的痕迹。在微球粒的球切剖面上,可分辨出球壳、球幔和球核,主要成分为磷酸钙和无定型碳,这类微球粒与牙形石紧密共生,在数量上二者成正相关关系,很可能是牙形石动物产出的卵细胞,类似于现今的鱼卵^[5]。磷质微球粒,见于六景和垌村剖面上 *Palmatolepis rhenana* 带底部,与钙质角砾岩共生,为事件沉积期卵细胞被快速埋藏的产物。那艺剖面下 *Palmatolepis triangularis* 带底部的微球粒^[3]可能也属于这一类。其二:铁镍质或硅质微球粒,其大小、形态与磷质微球粒类似,仅成分和内部结构与磷质微球粒不同,为微玻璃石球粒,被认为是天体撞击地球的直接证据。铁镍质或硅质微球粒曾报道于南垌和锡矿山剖面 *Palmatolepis linguiformis* 带至下 *Palmatolepis triangularis* 带底部^[1,2]。微球粒产于深水碳酸盐斜坡相—盆地相的粒泥灰岩中。

(5)凝灰质砾岩相。见于东准噶尔纸房地区弗拉阶/法门阶之交的法门阶底部,厚度大于 20 m,沿走向在数 km 内均可见。其岩性特征表现为杂砾岩,砾石大小混杂,分选、磨圆差,砾石成分见有安山岩、凝灰岩、放射虫硅质岩、海百合茎、粗大的植物茎干化石和下、中泥盆统常见的群体珊瑚碎块,砾径大者可达 47.7 cm,一般为 3~5 cm。在层序上这套杂砾岩的下伏地层为具水平层理的放射虫硅质岩和细粒火山碎屑浊积岩,上覆地层为中粒火山碎屑浊积岩。因此作者认为,这套杂砾岩的沉积环境为多岛洋环境中的半深海—深海盆地,沉积作用为滑移—滑塌—水下块体流堆积,驱动机制为西伯利亚板块南部板片向哈萨克斯坦板片俯冲导致的火山地震海啸事件^[6,7],诱发因素可能为小行星撞击地球。法门阶底

部的凝灰质角砾岩相也见于内蒙古东北部的大民山剖面^[8],二者在板块构造背景、沉积环境、驱动机制和诱发因素方面应具有一致性和同时性(图1)。

(6)黑灰色页岩相。露头上为黑灰色页岩或钙质页岩,具水平纹理,有机碳含量高,染手,在镜下可见星点状的黄铁矿,无生物扰动,见于白沙剖面 *Palmatolepis linguiformis* 带顶部或杨堤剖面下 *Palmatolepis triangularis* 带底部,在层序上常位于强退积序列的底部(图1),为深水低能环境中的缺氧事件沉积。

(7)火山喷溢相。见于东准噶尔纸房地区弗拉阶上部克安库都克组下亚组上部,厚度 20~30 cm,岩性为含杏仁体的安山岩,呈夹层产于半深海火山碎屑浊积岩序列中(图1),相当层位的火山喷溢相也见于西准噶尔朱鲁木特组上部。法门阶底部的火山喷溢相也见于广西西部的那坡坡荷剖面和南丹大厂剖面^[9],以凝灰岩(爆发相)或中—基性熔岩(溢流相)的发育为特征。

2 F/F 之交的海平面变化

弗拉阶/法门阶之交存在两种型式的海平面变化:阶跃型海平面变化(阶跃型海平面上升、阶跃型海平面下降)和渐进型海平面变化(渐进型海平面下降)(图1)。阶跃型海平面变化是指海平面在一个非常短的时间间隔内发生快速、高幅度的跳跃型变化,在浅水环境中通常形成地层连续、相序不连续的地层序列;在较深水和深水环境中地层结构和环境相的变化也非常瞩目,阶跃型海平面变化面通常为直观、清楚和易于识别的地层结构转换面。渐进型海平面变化则是指随着时间的推移,海平面逐渐、连续地上升或下降,通常地层连续、相序也连续;地层结构和沉积相的变化不易察觉和识别^[10]。

杨堤剖面下 *Palmatolepis triangularis* 带底部和白沙剖面 *Palmatolepis linguiformis* 带顶部的阶跃型海平面上升以强退积型层序结构为特征,海进面为瞩目的地层结构转换面;西准噶尔布龙果尔剖面洪古勒楞组法门阶底部的阶跃型海平面上升,以沉积环境的跳跃型变化为特征,即朱鲁木特组顶部的河流沉积快速地转变为洪古勒楞组底部的浅海沉积,海进速度之快,以至于没有留下典型的滨海沉积。南垌剖面和都安剖面弗拉阶/法门阶界线上的渐进型海平面下降以弱进积型层序结构为特征。西伯

利亚板块南部活动大陆边缘三个剖面上法门阶底部的阶跃型海平面变化与板块俯冲导致沉积盆地地基盘急剧上升或下降密切相关^[6,7],应是构造型海平面变化的产物;华南板块南部的阶跃型海平面变化主要与基底断块的差异升降有关^[9,11].

通过对华南板块、秦岭造山带和我国境内西伯利亚板块南部活动大陆边缘及世界其他地区生物年代地层基础好的弗拉阶顶部和法门阶底部海平面变化的比较分析发现,弗拉期/法门期之交的海平面变化存在 5 种状态(表 1).这表明 F/F 事件期的海平面变化不论从中国范围还是从世界范围来看是不一致和不同步的.

表 1 中国与世界其他地区弗拉期最末期(Fr)与法门期最初期(Fa)海平面变化比较

Table 1 Comparison between the latest Frasnian (Fr) and the earliest Famennian (Fa) sea-level changes in China and other areas of the world

海平面变化	中国	世界其他地区
Fa 上升	杨堤;布龙果尔;东秦岭镇安 ^[12] ;西秦岭洞山 ^[12]	俄罗斯 Ukhta 地区 ^[15] ;俄罗斯 Timan-Pechora 地区南部 ^[16] ;俄罗斯 Ufa 地区 ^[17] ;东北亚西部和东部 ^[18] ;阿尔泰山—萨岩岭褶皱区 ^[19] ;澳大利亚西部 Canning 盆地 ^[20] ;欧美地台 ^[21] ;伊朗中部 ^[22]
Fr 下降		
Fa 下降	白沙;香田;六景;那艺;纸房;大民山;贵州独山 ^[13] ;西秦岭迭部 ^[12]	
Fr 上升		
Fa 上升		白俄罗斯 Pripyat 凹陷 ^[23]
Fr 上升		
Fa 下降	四川龙门山 ^[14]	波兰 ^[24] ;欧亚北部 ^[25] ;东北亚东北部 ^[18] ;比利时南部 ^[26]
Fr 下降		
Fa 下降	南桐;都安;东秦岭金钱河 ^[12] ;东秦岭二峪河 ^[12] ;西秦岭文县 ^[12]	
Fr 下降		

3 讨论与结论

(1)F/F 之交事件沉积的全球性、等时性和可能原因. F/F 之交的事件沉积不仅见于中国,而且也报道于比利时 Senzeilles 剖面 and Hony 剖面^[27,28]、美国内华达的 Devils Gate 剖面、俄罗斯的南乌拉尔地区和摩洛哥的 Atrous 地区^[1]. 尽管这些事件沉积的特征不同,分布于不同的相区、沉积盆地和板块上,但它们均集中分布于下 *Palmatolepis triangularis*

laris 带底部和上 *Palmatolepis rhenana* 带底部,在极少数剖面上(如:杨堤剖面) 分布于 *Palmatolepis linguiformis* 带的最顶部. 因此,我们认为天体撞击地球造成全球范围的地震、火山爆发和撞击型海啸是最可能的诱发因素. 与这次撞击有关的可能的陨石坑包括中国的太湖(直径 ≥ 370 km;层位:上泥盆统五通组)^[29]、瑞典的 Siljan Ring(直径:50 km;年龄值:(368 $\pm$ 1) Ma)^[28]和加拿大魁北克的 Charlevoix(直径:46 km;年龄值:(360 $\pm$ 20) Ma)^[28]. 由于同位素的定年误差,这些陨石坑的年龄值尚不完全一致.

(2)F/F 之交的陨击事件序列与生物的阶梯状集群绝灭. F/F 之交的生物集群绝灭是显生宙 5 次最引人瞩目的生物集群绝灭和重大地史转折期之一,地学家们普遍认为小行星撞击地球、缺氧和全球范围的大规模海退是这次生物集群绝灭的重要原因^[1,2,27,28,30~32],然而有趣的是,以往报道的直接陨击事件产物—微玻陨石球粒层和法门期大海退,大都位于弗拉期末大规模生物集群绝灭和 $\delta(^{13}\text{C})$ 负异常层之上^[1,2,27,28,30,31,33],因此,它们不可能是弗拉期末大规模生物集群绝灭的原因. 上 *Palmatolepis rhenana* 带底部可能的陨击事件和 *Palmatolepis linguiformis* 带发现的陨击事件^[1,2],很可能是导致弗拉期末全球环境剧变和大规模生物集群绝灭的最直接的重要候选事件. 根据现有资料和我们 F/F 之交地层的米兰柯维奇旋回研究^[34], F/F 之交存在多次陨击事件,可能的陨击事件序列和发生时间为:上 *Palmatolepis rhenana* 带底部(陨击事件 1: 377.9 Ma) $\rightarrow$ *Palmatolepis linguiformis* 带上部南桐页岩下^[2](陨击事件 2:376.7 Ma) $\rightarrow$ *Palmatolepis linguiformis* 带上部南桐页岩上^[2](陨击事件 3: 376.6 Ma) $\rightarrow$ *Palmatolepis triangularis* 带底部^[2,28](陨击事件 4:376.5 Ma) $\rightarrow$ *Palmatolepis triangularis* 带上部^[27](陨击事件 5:376.2 Ma) $\rightarrow$ *Palmatolepis crepida* 带^[31](陨击事件 6: ≤ 375.6 Ma). 这些陨击事件既是 F/F 之交生物阶梯状集群绝灭的地质—天文背景,也是上述事件沉积的重要诱发因素,三者共同构成 F/F 之交令人瞩目的全球性事件群.

俞昌民的研究表明,早泥盆世—中泥盆世早期,四射珊瑚属的发生数大于绝灭数,中泥盆世晚期(吉维特期)至晚泥盆世早期(弗拉期)四射珊瑚属的发生数小于绝灭数,在早泥盆世绝灭的属中,地方性属

多于广布性属,弗拉期的情况则正好相反(据文献[35]).泥盆纪竹节石的演化也是非常引人注目的,从早志留世至早泥盆世,尽管在早泥盆世末竹节石有一次重要的绝灭,但竹节石属的发生数仍大于绝灭数,中泥盆世至晚泥盆世早期(弗拉期)竹节石属的发生数大大小于绝灭数,到法门期竹节石仅存 *Homoctenus*, *Striatostyliolina*, *Styliolina* 3 属,至法门阶牙形石 *Palmatolepis rhomboidea* 带顶竹节石全部绝灭^[36].腕足^[37]、牙形石^[2,38]等生物类别也具有类似的分阶段绝灭的特点.我们认为,F/F 之交全球范围内生物的阶梯状绝灭,可能与上述的陨击事件序列有关.从现有资料来看^[2, 35, 39],分阶段绝灭应是显生宙五大全球生物集群绝灭的普遍规律.

(3)在精细生物地层带控制下的高能物理事件层是高分辨率地层对比的首选标志.弗拉阶上 *Palmatolepis rhenana* 带底部和法门阶 *Palmatolepis triangularis* 带底部,在不同板块、不同相区如此广泛地发育各种物理事件层,该事件层很可能是不同等时地质—天文作用的物质记录.天体撞击导致的地震、火山爆发和海啸可能是该物理事件沉积的直接诱发因素.在系统精细的(牙形石)生物地层和米兰柯维奇旋回等时对比基础上,跨相、跨板块的高能量物理事件层应是万年级至年、天级高分辨率年代地层划分对比的重要标志.我们认为,高分辨率年代地层划分对比的基础是系统精细的生物地层工作或 GSSP 工作,高分辨率年代地层划分对比的等时标志是跨区域、跨相的高能量物理事件层,理由是:高分辨率年代地层学追求的时间分辨率谱(高于百万年级)高于生物地层学的时间分辨率谱(低于或等于百万年级),满足这一时间分辨率谱的自然事件只有物理(能量)事件和化学(成分)事件,且前者不易受成岩和后生作用的影响,在等时性、瞬时性、空间延展性及其宏观记录的可识别性上也明显优于后者.F/F 之交两个层位稳定、分布广泛的物理事件层在华南板块南部被动大陆边缘和西伯利亚板块南部活动大陆边缘的发现及其广泛对比,对弗拉阶/法门阶之交地层的高分辨率地层学研究具有重要意义.

参考文献:

- [1] Bai S L. High resolution correlation, Milankovitch cyclicity, and nickel event-evidence from the Devonian of South China [M]. Beijing: Peking University Press, 1995. 1—62.
- [2] 白顺良. 泥盆纪弗拉阶—法门阶事件的化学—生物地层学研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 1998, 34 (2—3): 363—369.
- [3] 刘生成. 广西那艺泥盆系五指山组下段地层研究[J]. 地层学杂志, 1997, 21(3): 214—218.
- [4] Wang C Y. Application of the Frasnian standard conodont zonation in South China [J]. Cour Forschungsinst Senckenberg, 1994, 168: 83—129.
- [5] 龚一鸣, 司远兰, 徐光辉, 等. 晚泥盆世牙形石动物卵细胞的三维保存[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2001, 26(1): 40.
- [6] 龚一鸣, 刘本培. 新疆北部泥盆纪火山沉积岩系的板块沉积学研究[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1993. 1—138.
- [7] Gong Y M. Process-facies types and sequences of Devonian volcanic sedimentary successions in Northern Xinjiang and their relation to plate tectonics [J]. Acta Geologica Sinica, 1993, 67(3): 297—314.
- [8] 郭胜哲. 弗拉斯期—法门期生物事件与大兴安岭晚泥盆世珊瑚化石[J]. 古生物学报, 1990, 29 (4): 427—433.
- [9] 钟铿, 吴治, 殷保安, 等. 广西的泥盆系[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1992. 1—384, 图版 1—16.
- [10] 龚一鸣. 一种新的海进模式[J]. 地层学杂志, 1995, 19 (2): 129—132.
- [11] 吴治, 龚一鸣, 杜远生. 华南泥盆纪层序地层及海平面变化[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997. 1—110.
- [12] 杜远生. 秦岭造山带泥盆纪沉积地质学研究[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997. 1—130.
- [13] 杜远生, 龚一鸣, 刘本培, 等. 黔南独山上泥盆统层序、海平面变化和成岩层序地层研究[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1994, 19(5): 587—596.
- [14] 刘文均, 陈源仁, 郑荣才, 等. 龙门山地区泥盆纪层序地层划分、对比和海平面相对变化[A]. 见: 刘文均, 陈源仁. 层序地层[C]. 成都: 成都科技大学出版社, 1996. 1—11.
- [15] Kuzmin A V, Yatskov S V. Transgressive-regressive events and conodont and ammonoid assemblages in the Frasnian of the South Timan [A]. In: House M R, Ziegler W, eds. On sea-level fluctuations in the Devonian [C]. Cour Forschungsinst Senckenberg, 1997, 199: 25—36.
- [16] Veimarn A B, Kuzmin A V, Kononova L I, et al. Geological events at the Frasnian/Famennian boundary on the territory of Kazakhstan, Urals and adjacent regions of the Russian plate [A]. In: House M R, Ziegler W, eds. On sea-level fluctuations in the Devonian [C]. Cour Forschungsinst Senckenberg, 1997, 199: 37—

- 50.
- [17] Yunusov M A, Masagutov R Kh, Arkhipova V V. Devonian sea-level changes in the platform region of Bashkortostan [A]. In: House M R, Ziegler W, eds. On sea-level fluctuations in the Devonian [C]. Cour Forschungsinstitut Senckenberg, 1997, 199: 65—73.
- [18] Gagiev M H. Sedimentary evolution and sea-level fluctuations in the Devonian of North-east Asia [A]. In: House M R, Ziegler W, eds. On sea-level fluctuations in the Devonian [C]. Cour Forschungsinstitut Senckenberg, 1997, 199: 75—82.
- [19] Yolkin E A, Gratsianova R T, Izokh N G, et al. Devonian sea-level fluctuations on the south-western margin of the Siberian continent [A]. In: House M R, Ziegler W, eds. On sea-level fluctuations in the Devonian [C]. Cour Forschungsinstitut Senckenberg, 1997, 199: 83—98.
- [20] Becker R T, House M R. Sea-level changes in the Upper Devonian of the Canning basin, western Australia [A]. In: House M R, Ziegler W, eds. On sea-level fluctuations in the Devonian [C]. Cour Forschungsinstitut Senckenberg, 1997, 199: 129—146.
- [21] Johnson J G, Klapper G, Sandberg C A. Devonian eustatic fluctuations in Euramerica [J]. Geological Society of America Bulletin, 1985, 96: 567—587.
- [22] Dastanpour M. Upper Devonian sea-level changes of central Iran [A]. In: House M R, Ziegler W, eds. On sea-level fluctuations in the Devonian [C]. Cour Forschungsinstitut Senckenberg, 1997, 199: 99—102.
- [23] Pushkin V. Eustatic changes of sea-level in the Lower Famennian in the Pripyat' depression [A]. In: House M R, Ziegler W, eds. On sea-level fluctuations in the Devonian [C]. Cour Forschungsinstitut Senckenberg, 1997, 199: 51—64.
- [24] Racki G. Devonian eustatic fluctuations in Poland [A]. In: House M R, Ziegler W, eds. On sea-level fluctuations in the Devonian [C]. Cour Forschungsinstitut Senckenberg, 1997, 199: 1—12.
- [25] Karaulov V B, Gretschnichnikova I A. Devonian eustatic fluctuations in North Eurasia [A]. In: House M R, Ziegler W, eds. On sea-level fluctuations in the Devonian [C]. Cour Forschungsinstitut Senckenberg, 1997, 199: 13—24.
- [26] Muchez Ph, Boulvian F, Dreesen, R, et al. Sequence stratigraphy of the Frasnian-Famennian transitional strata; a comparison between South China and southern Belgium [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1996, 123: 289—296.
- [27] Claeys P, Casier J G, Margolis S V. Microtektites and mass extinctions: evidence for a Late Devonian asteroid impact [J]. Science, 1992, 257: 1102—1104.
- [28] Claeys P, Casier J G. Microtektite-like impact glass associated with the Frasnian-Famennian boundary mass extinction [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1994, 122: 303—315.
- [29] He Y N, Xu D Y, Lu D F, et al. Preliminary study on the origin of Taihu Lake; inference from shock deformation features in quartz [J]. Chinese Science Bulletin, 1991, 36 (10): 847—851.
- [30] Wang K, Orth C J, Attrep M, et al. Geochemical evidence for a catastrophic biotic event at the Frasnian/Famennian boundary in South China [J]. Geology, 1991, 19: 776—779.
- [31] Wang K. Glassy microspherules (microtektites) from an Upper Devonian limestone [J]. Science, 1992, 256: 1546—1549.
- [32] Joachimski M M, Buggisch W. Anoxic event in the late Frasnian — cause of the Frasnian-Famennian faunal crisis? [J]. Geology, 1993, 21: 675—678.
- [33] Hou H F, Muchez P, Swennen R, et al. The Frasnian-Famennian event in Hunan Province, South China: biostratigraphical, sedimentological and geochemical evidence [J]. Mem Inst Geol Univ Louvain, 1996, 36: 209—229.
- [34] Gong Y M, Li B H, Wang C Y, et al. Orbital cyclostratigraphy of the Devonian Frasnian-Famennian transition in South China [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2001, 168 (3—4): 237—248.
- [35] 龚一鸣, 殷鸿福, 童金南. 地史重大转折期环境变化综述 [J]. 地质科技情报, 1998, 17(4): 101—106.
- [36] 李西兴. 广西罗富法门期竹节石——F/F 绝灭事件的幸存者 [J]. 桂林工学院学报, 1995, 15(2): 157—170.
- [37] 侯鸿飞. 泥盆纪 [A]. 见: 程裕淇. 中国大百科全书——地质学 [C]. 北京·上海: 中国大百科全书出版社, 1993. 417—420.
- [38] 季强. 从牙形类研究论华南弗拉斯阶—法门阶生物绝灭事件 [A]. 见: 中国地质科学院地层古生物论文集编辑委员会. 地层古生物论文集 [C]. 北京: 地质出版社, 1994. 79—107.
- [39] Yin H F, Tong J N. Multidisciplinary high resolution correlation of the Permian-Triassic boundary [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1998, 143: 199—212.

DEVONIAN FRASNIAN/FAMENNIAN TRANSITIONAL
EVENT DEPOSITS AND SEA-LEVEL CHANGES

Gong Yiming, Li Baohua

(Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: Seven kinds of physical event deposits have been recognized in the Frasnian/Famennian transition of both the passive continental margin of the South China plate and southern active continental margin of the Siberian plate. They are fine calcareous turbidite facies, calcareous breccia facies, limestone facies with soft-sediment deformation, wackestone facies with microspherules, tuffaceous breccia facies, black shale facies and volcanic explosive and effusive facies and they are widely distributed in the bottom of the Lower *Palmatolepis triangularis* zone of the Famennian and/or in the bottom of the Upper *Palmatolepis rhenana* zone of the Frasnian. These event deposits must have been induced by two-time asteroid impact events and should be good indicators of high resolution chronostratigraphic correlation. Data indicated that the sea-level changes were not synchronal and that there existed two types of saltatory and gradual sea-level changes, and five kinds of different characteristics in sea-level changes from the latest Frasnian to the earliest Famennian in China and other regions of the world. They were the latest Frasnian sea-level falling → the earliest Famennian sea-level rising, the latest Frasnian sea-level rising → the earliest Famennian sea-level falling, the latest Frasnian sea-level rising → the earliest Famennian sea-level rising, the latest Frasnian sea-level falling → the earliest Famennian sea-level falling, the Frasnian/Famennian transitional sea-level still. The stepped mass extinction of the Frasnian/Famennian transition may be closely related to six-time asteroid impact events from the bottom of the Upper *Palmatolepis rhenana* zone to the *Palmatolepis crepida* zone.

Key words: event deposit; sea-level change; mass extinction; Devonian; China.

(上接 250 页)

used as reference of sedimentary facies. The study of magnetic susceptibility anisotropy in Jurassic and Cretaceous shows that there exit two maximal axis directions of magnetic susceptibility in the study area of Jianmenguan. The southeastward maximal axis direction corresponds to the direction of paleocurrent in the area. However, the southwestward maximal axis direction is probably caused by tectonism.

Key words: magnetic susceptibility; Upper Jurassic; Lower Cretaceous; Sichuan Province.