

广西泥盆系弗拉斯-法门期之交的事件沉积及其对小行星碰撞引起的大海啸的启示

杜远生^{①②*}, 龚一鸣^{①②}, 曾雄伟^②, 黄宏伟^②, 杨江海^②, 张哲^②, 黄志强^②

① 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 武汉 430074;

② 中国地质大学生物地质与环境地质教育部重点实验室, 武汉 430074

* E-mail: dxxyz@cug.edu.cn

收稿日期: 2008-06-04; 接受日期: 2008-07-11

国家自然科学基金(批准号: 40621002)、中国石油化工海相油气勘探前瞻性项目(编号: G0800-06-ZS-319)、“111”项目(编号: B08030)和教育部创新团队发展计划(编号: IRT0546)资助

摘要 广西泥盆系弗拉斯-法门阶事件界线附近广泛分布一套事件沉积. 该事件沉积具有等时性、成因相关性、分区性和广布性. 事件沉积绝大部分位于下 *triangularis* 带, 分布于台间海槽相区和台地边缘斜坡相区. 事件沉积以重力流沉积为特色, 在横县六景、象州罗秀、巴漆等台地边缘斜坡相区 F-F 事件沉积为碎屑流沉积的粗砾岩或砾屑灰岩; 台间海槽相区的桂林杨堤和白沙、德保都安、武宣南峒和三利、象州香田和马鞍山、崇左那艺、上林云攀等地 F-F 事件沉积为浊积岩; 台间海槽相区的南丹芒场、罗富和南丹-天峨公路 F-F 事件沉积为块状砂屑灰岩. 这些事件沉积可以和比利时的 Hony 剖面、美国内华达的 Devils Gate 剖面、摩洛哥的 Atrous 剖面、俄罗斯的南乌拉尔、西伯利亚东北部的 Fore-Kolyma、波兰-摩拉维亚盆地南部(Holy Cross 山脉, Cracow 和 Brno 地区)法门阶底部的浊积岩和角砾岩对比. 如此广泛的全球性分布的等时性的事件沉积可以和巨大的外星体坠入到海洋中引起的全球性海啸相联系.

关键词

广西
泥盆系
弗拉斯-法门期生物绝灭事件
海啸
事件沉积

泥盆纪弗拉斯阶-法门阶之交的生物绝灭事件是全球 5 大生物灭绝事件之一(通称 F-F 事件). 在这次绝灭事件中, 几乎全部的层孔虫和竹节石, 大量的珊瑚、具铰腕足类、菊石、海百合、三叶虫、介形虫、盾皮鱼类绝灭. 该事件发生于 *linguiformis* 带和 *triangularis* 带之间, 并且具有全球性、等时性特征^[1,2]. 对于 F-F 事件, 许多学者从牙形石的铈异常^[3], 碳、氧、锶、硫同位素对比^[4-10], 古环境和古生态变化^[11,12], 高分辨层序地层和旋回地层^[13,14], 磁性地层^[15], 事件地层^[16,17]对 F-F 事件进行了研究. 关于 F-F 事件的成因,

长期以来存在地外成因(小行星撞击地球)和地内成因的不同认识. McLaren^[18]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. Leroux 等^[19]报道了与撞击事件相关的撞击石英. Over 等^[20]通过 F-F 之交的铂族元素的富集和球粒陨石的钨/铱比进一步论证了 F-F 事件的撞击成因. Robert 和 Playford^[21]发现了 F-F 界限上的铱异常. Claeys 和 Casier^[22]发现微玻璃石类的撞击玻璃. Ma 和 Bai^[23]论述了华南 F-F 界限微球粒及地球化学记录. Racki^[24]讨论了 F-F 生物绝灭事件和外

行星碰撞的关系. Bai等^[25]和龚一鸣等^[26]论述了华南 F-F界限附近的事件沉积, Bai等^[25]初步提出了事件沉积的海啸成因. Girard等^[27]研究了法国南部层型剖面区的F-F界限的撞击证据. 对于地内成因, 许多学者认为F-F生物绝灭事件与全球性缺氧有关^[3-5,27-30].

对于华南F-F事件, 许多学者从生物灭绝和生物复苏^[31,32]、生物地层^[33,34]、化学地层和同位素^[23,25,35-39]、层序和旋回地层及海平面变化^[13,14]等方面进行了研究. 与之相比, F-F事件的沉积响应的研究相对薄弱. 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/法门期之交的事件沉积类型及可能的海啸成因.

1 地质背景

加里东末期, 受广西运动的影响, 广西全区除了钦州地区继承早古生代海槽沉积外, 全区褶皱隆升为陆. 泥盆纪开始, 海水自南而北侵入. 早泥盆世洛赫考夫期到布拉格期以滨岸陆源碎屑沉积为主, 早埃姆斯期碎屑岩、碳酸盐岩交替发育. 早泥盆世晚埃姆斯期到法门期, 强烈活动的同沉积断裂切割海盆, 形成了台地-台间裂陷海槽交替、棋盘式的古地理格局^[40]. 这种格局控制沉积相的分布, 构成了广西泥盆纪特有的、分异明显的、丰富多彩的沉积和生物组合. 早泥盆世晚埃姆斯期到晚泥盆世法门期, 随着台内裂陷槽的形成, 广西的古地理大致可以分为古陆边缘的碎屑岩相区、碳酸盐台地相区、台地边缘相区、台地斜坡相区、台间裂陷槽相区及深水盆地和深水盆地边缘相区(图 1), 其中碳酸盐台地分为桂北、桂东滨岸台地, 合山、黎塘、巴马、靖西、田东等孤立台地. 台地边缘一侧礁、丘组合较发育. 台间裂陷槽相区呈条带状, 以含竹节石、浮游介形虫的硅质岩、泥灰岩发育为特色.

不同相区存在不同的弗拉斯阶和法门阶地层系统. 台地相区弗拉斯阶为谷闭组或桂林组, 法门阶为融县组或东村组-额头村组. 台地斜坡相区弗拉斯阶为谷闭组, 法门阶为融县组. 台间裂陷槽相区弗拉斯阶为榴江组, 法门阶为五指山组. 谷闭组主要为含生物碎屑的粒泥灰岩、泥状灰岩、泥质条带状灰岩及少量白云岩. 桂林组主要为含生物泥粒灰岩和粒泥灰岩.

东村组主要为含藻纹层白云质灰岩、灰质白云岩和白云岩. 额头村组主要为泥状灰岩. 融县组主要为含藻纹层、藻屑白云质灰岩、灰质白云岩和白云岩. 榴江组主要为硅质岩和硅质页岩. 五指山组主要为扁豆状灰岩和条带状灰岩. 弗拉斯阶和法门阶界线位于榴江组/五指山组、谷闭组/融县组、桂林组/东村组界线附近.

2 弗拉斯-法门阶之交的事件沉积

广西泥盆系弗拉斯-法门阶事件界线附近广泛分布一套等时的、成因相关的事件沉积. 这套事件沉积以横县六景的碎屑流沉积、桂林杨堤的浊流沉积和南丹芒场、罗富、南丹-天峨公路的块状砂屑灰岩最为典型.

2.1 横县六景剖面的碎屑流沉积

六景剖面位于黎塘孤立台地的台地前缘斜坡地带(图 1). 该剖面弗拉斯-法门阶界线位于融县组底部 7~8 层之间(图 2). 谷闭组上部为条带状、扁豆状灰岩(图 2, 1~4 层). 融县组底部自下而上为砾屑灰岩(5 层)、扁豆状灰岩(6~7 层)、砾屑灰岩(8~13 层, 图 3(a), (b))、菌藻礁灰岩(13~14). 融县组底部两套砾屑灰岩厚度分别为 1.4 和 6.0 m. 砾屑成分比较复杂, 包括泥状灰岩(图 3(a))、微生物粒泥灰岩和粒泥灰岩、叠层石灰岩(图 3(b))、核形石灰岩等. 砾石大小混杂, 砾径几毫米到十几厘米不等, 大部分 1~5 cm. 砾石多为棱角状, 无分选. 局部可见放射状组构(图 3(a)), 类似风暴沉积. 牙形石处理分析表明, 砾屑灰岩中出现破碎的再沉积牙形石. 8~13 层的砾石比 5 层的砾石砾径更大, 成份更复杂. 从砾屑灰岩砾石成分和砾屑灰岩与上下地层关系分析, 砾屑灰岩相邻的扁豆状灰岩为浅海相沉积, 而砾屑灰岩包括潮间带-局限潮下带的菌藻类叠层灰岩、菌藻屑灰岩和核形石灰岩砾屑, 因此推测该砾屑不仅仅是来源于源区附近的浅海沉积, 还来自更远的台地和台地边缘相区, 与风暴岩砾石主要来源于原地沉积的再破碎砾石不同.

根据谷闭组顶部到融县组底部的牙形石分析, 可将该段底层划分为 3 个牙形石带(图 2):

(i) 上 *rhenana* 带. 谷闭组-融县组的第 1~6 层归于此带, 厚 5.06 m. 重要组成分子有 *Palmatolepis*

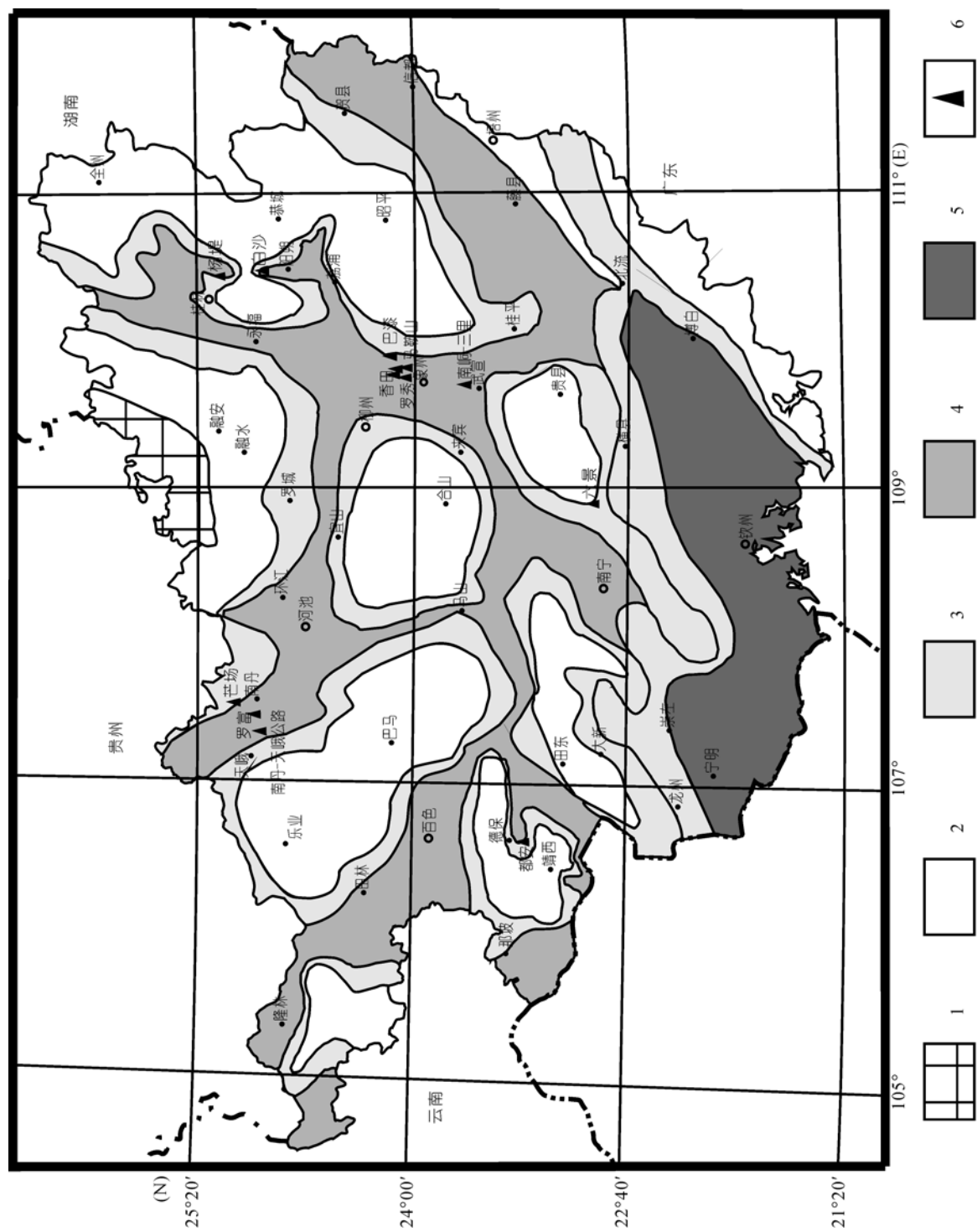


图 1 广西泥盆纪弗拉斯期古地理和事件沉积位置(据钟铨等^[40]修改)

1, 陆地; 2, 台地; 3, 台地边缘斜坡; 4, 台内裂陷槽; 5, 深水海槽; 6, 事件沉积位置。

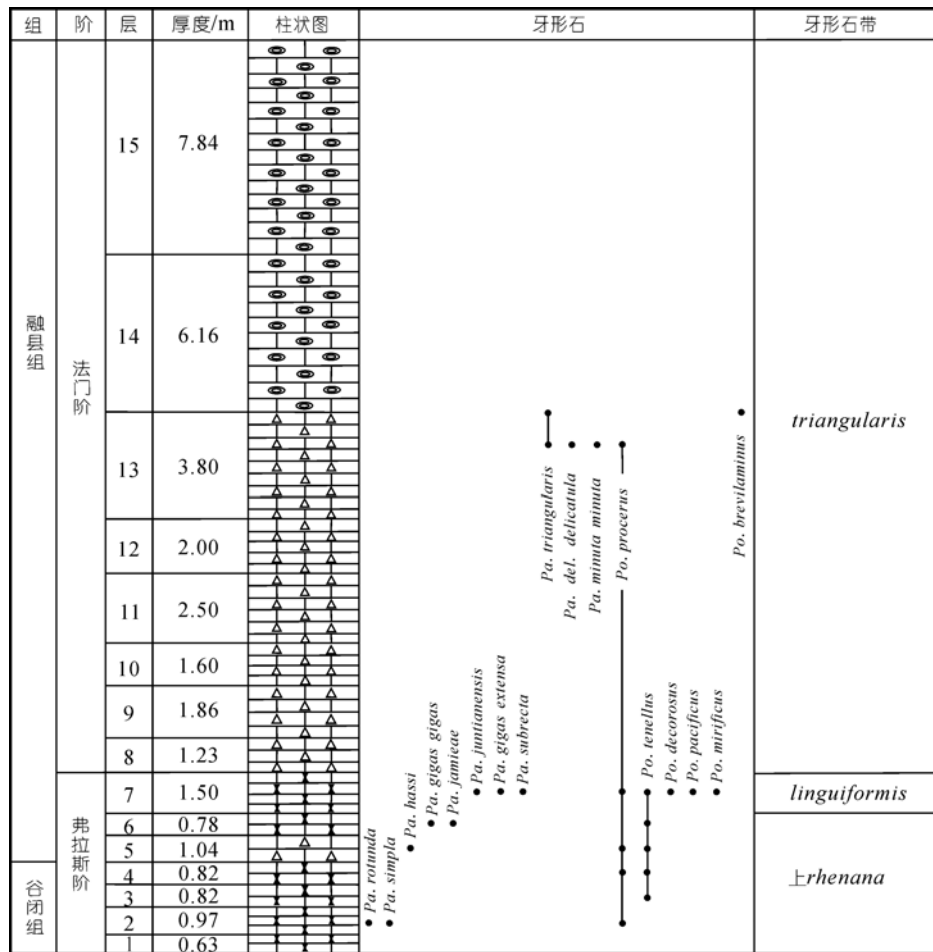


图 2 六景剖面弗拉斯阶顶部-法門阶底部柱状图

rotunda, *Pa. simpla*, *Pa. hassi*, *Pa. gigas gigas*, *Pa. jamieae*, *Polygnathus procerus*, *Po. tenellus*. 其中 *Palmatolepis rotunda* 首次出现于本带的底部; *Pa. simpla* 绝灭于本带; *Pa. jamieae* 最后出现于本带顶部。

(ii) *linguiformis* 带。融县组第 7 层归于此带, 厚 1.50 m。重要组成分子有 *Palmatolepis juntianensis*, *Pa. gigas extensa*, *Pa. subrecta*, *Polygnathus decorosus*, *Po. pacificus*, *Po. tenellus*, *Po. mirificus*。其中 *Palmatolepis* 所有弗拉斯的种都在该带顶部附近突然灭绝。

(iii) *triangularis* 带。融县组第 8~15 层归于此带, 厚 26.99 m。*triangularis* 带可细分为下、中、上三带, 第 13 层上部同时发现了带化石 *Palmatolepis triangularis* 和 *Pa. minuta minuta*, 并且从成因上认为融县组的角砾岩是一次事件形成, 因此将下、中、上 *triangularis* 带合并为一个牙形石组合带。重要组成分子有 *Pal-*

matolepis triangularis, *Pa. minuta minuta*, *Pa. delicatula delicatula*, *Polygnathus brevilaminus*, *Po. procerus*。因此认为, 弗拉斯-法門阶界线位于 7~8 层之间。

2.2 桂林杨堤剖面的浊流沉积

杨堤位于桂林台间海槽相区, 杨堤五指山组以条带状、扁豆状灰岩为主, 下部夹泥质灰岩、泥灰岩和硅质灰岩。五指山组下部出现两套事件沉积, 一是底部之上 5.8 m 处见砾屑灰岩, 二是 17.93 m 处见递变层理的浊积灰岩(图 3(c))。砾屑灰岩厚度 1.6 m, 砾屑为泥状灰岩, 分选差, 圆度呈次棱角状到次圆状, 大小 0.5~5 cm 为主。浊积灰岩厚度 50 cm 左右, 具递变层理, 夹于薄层泥状灰岩和泥质灰岩之中。

砾屑灰岩中含有牙形石 *Palmatolepis rhenana*, 砾屑灰岩之上的泥质灰岩中出现 *Pa. linguiformis*。浊



图3 广西法门阶底部的事件沉积

(a), (b) 六景剖面粗砾灰岩; (c) 杨堤剖面的浊积灰岩; (d) 芒场剖面的块状砂屑灰岩

积灰岩下伏泥质灰岩中见 *Pa. linguiformis*, 之上的扁豆状灰岩中见 *Pa. triangularis*. 因此下部事件层砾屑灰岩为 *rhenana* 带, 上部事件层浊积灰岩位于 *linguiformis* 带和下 *triangularis* 带之交, 即弗拉斯阶和法门阶界线上^[41].

2.3 南丹五指山、芒场、南丹-天峨公路剖面的块状砂屑灰岩

南丹地区位于南丹-河池台间海槽相区, 在南丹五指山、芒场和南丹-天峨公路剖面上, 五指山组底部均为薄板状灰岩夹厚层块状砂屑灰岩(图 3(d)). 薄板状灰岩为泥质条带灰岩, 泥质条带和灰质条带交互, 条带厚度 2~5 mm, 显水平层理. 砂屑灰岩之下的薄板状灰岩厚度 0.5 m 左右, 下伏榴江组硅质岩和硅质页岩. 块状砂屑灰岩厚度均一, 1 m 左右. 岩石主要为砂屑, 砂屑粒径 1 mm 左右, 分选好, 圆度中等到差. 块状层理, 局部显波状或丘状层理.

南丹地区榴江组顶部见介形类 *Entomoprimitina*, *Entomozoe pseudorichterina* 等, 竹节石 *Homoctenus* 已经绝迹. 五指山组底部未发现牙形石,

之上薄板状灰岩中发现 *Palmatolepis quadrantinodosa lobata*, *Pa. minuta lobata*, *Pa. glabara acuta*, *Pa. glabara glabara*, *Pa. subprelobata*, *Pa. delicatula* 等. *Palmatolepis quadrantinodosa lobata* 的时限为 *crepida* 带到 *rhomboidea* 带^[40], 因此推测块状砂屑灰岩也位于弗拉斯阶-法门阶界线上.

除了上述 3 个剖面, 在德保都安剖面, *triangularis* 带含很多再沉积牙形石, 并见有浊积岩发育, 上 *rhenana* 带底部见软变形灰岩. 在武宣南垌剖面, 下 *triangularis* 带下部发育 5.3 m 厚的 4 层浊积岩, 并伴随有 Ni 异常和 $\delta^{13}\text{C}$ 负偏移^[25]. 在象州马鞍山剖面, 下 *triangularis* 带底部见 2.4 m 厚的砂屑灰岩, 伴随 $\delta^{13}\text{C}$ 负偏移^[25]. 在象州巴漆剖面, 早 *triangularis* 带底部见 0.6 m 厚的砂屑灰岩并含很多再沉积牙形石和滑塌岩块. 在象州香田剖面, 下 *triangularis* 带底部见 0.7 m 厚的浊积岩, 上 *rhenana* 带底部见 2.7 m 厚的角砾岩. 在上林云攀剖面, *Pa. triangularis* 带化石之下, 见不含化石的含滑塌构造的燧石团块灰岩. 在武宣三利剖面, 下 *triangularis* 带底部见再沉积牙形石^[25]. 在象州罗秀剖面, 下 *triangularis* 带底部见 20 m 厚的

砾屑灰岩^[40]. 在湖南桂阳莲塘, 下 *triangularis* 带底部和 *rhenana* 带也见两套角砾状灰岩. 在崇左那艺和桂林白沙剖面, 类似的浊积岩也都见于早 *triangularis* 带底部^[26](图 4).

3 讨论

广西乃至更大范围的弗拉斯-法门阶界线的事件沉积具有以下特征: (1) 等时性, (2) 分区性(受相带控制), (3) 成因相关, (4) 广布性.

广西及邻区泥盆纪弗拉斯-法门阶界线附近至少有两层事件沉积, 一是 *rhenana* 带的砾屑灰岩, 二是 *linguiformis* 带和下 *triangularis* 带之交, 即弗拉斯-法门阶界线的浊积岩、粗砾灰岩、砾屑灰岩和块状砂屑灰岩. 前者见于横县六景, 桂林杨堤和白沙、湖南桂阳莲塘; 后者见于横县六景, 桂林杨堤, 南丹罗富、芒场、南丹-天峨公路, 武宣南峒和三利, 象州马鞍山、罗秀、巴漆、香田, 湖南桂阳莲塘, 崇左那艺等剖面(图 4). 这些浊积岩、粗砾灰岩、砾屑灰岩和块状砂屑灰岩大部分都见于下 *triangularis* 带底部, 个别见于 *linguiformis* 带顶部. 这些事件沉积多具有再沉积的牙形石或其他化石, 表明为同一事件所致.

泥盆纪弗拉斯-法门阶界线的事件沉积具有明显的分区性. 事件沉积主要位于台间海槽相区, 如桂林台间海槽、武宣台间海槽、南丹-河池台间海槽、百色-钦甲台间海槽及湖南桂阳台间海槽, 个别位于台地边缘斜坡相区, 如黎塘孤立台地与南宁台间海槽之间的六景斜坡相区, 武宣台间海槽和桂东台地之间的台地斜坡相区.

泥盆纪弗拉斯-法门阶界线的事件沉积成因是相关的. 这些沉积大部分是重力流沉积. 其中台地斜坡相区主要是碎屑流沉积. 碎屑流的砾石来源复杂, 以来源于碳酸盐台地的叠层石、核形石等浅水沉积为特色. 台间海槽相区主要是浊积岩和块状砂屑灰岩. 浊积岩发育递变层理, 其砂-粉屑也是来源于台地和斜坡相区, 与相邻的扁豆状、条带状灰岩岩性差别很大. 块状砂屑灰岩发育均质层理, 其砂屑与相邻的条带状灰岩差别也很大, 反映具有远源特征.

泥盆纪弗拉斯-法门阶界线的事件沉积具有广泛分布的特征. 在广西桂林台间海槽、武宣台间海槽、南丹-河池台间海槽、百色-钦甲台间海槽及湖南桂阳

台间海槽及其边缘都有事件沉积的分布. 显然, 分布如此广泛的等时的事件沉积不是一个单独的沉积事件, 而是不同盆地不同的事件形成的等时事件群. 从更大范围讲, 比利时 Hony 剖面、内华达 Devils Gate 剖面、摩洛哥 Atrous 剖面、南乌拉尔、西伯利亚东北部 Fore-Kolyma 剖面法门阶底部也存在同时的浊积岩^[25,42-45]. 波兰-摩拉维亚盆地南部(Holy Cross山脉, Cracow 和 Brno 地区)弗拉斯-法门阶界线上出现剥蚀不整合、角砾岩化(Sumbera 1 剖面)和再沉积的牙形石(Plucki II剖面)也可以和该事件沉积对比^[17]. 如此广泛的等时的事件沉积必然联系到全球性的地质事件.

关于弗拉斯-法门阶生物灭绝事件, 许多学者认为是外行星碰撞成因的. McLaren^[18]首次提出弗拉斯-法门阶界线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. Robert和Playford^[21]发现了弗拉斯-法门阶界线上的铍异常. Claeys和Casier^[22]发现微玻陨石类的撞击玻璃. Leroux等^[19]发现了弗拉斯-法门阶界线上与撞击事件相关的撞击石英. Over等^[20]根据弗拉斯-法门阶界线的铂族元素的富集和球粒陨石的钨/铍比进一步论证了 F-F 事件的撞击成因. Girard等^[27]研究了法国南部层型剖面区的F-F界限的撞击证据. Ma和Bai^[23]论述了华南弗拉斯-法门阶界线微球粒及地球化学记录. Racki^[24]讨论了弗拉斯-法门阶生物绝灭事件和外行星碰撞的关系. Bai等^[25]初步提出了弗拉斯-法门阶界线事件沉积可能为海啸成因.

海啸是一种破坏力极强的水体运动, 是由地震、火山、海底滑坡、外行星坠入海洋引起大量水体扰动所引发的长周期水波. 海啸由源区向外传播, 随扩散区域增大波浪能量衰减. 海啸的传播速度与海啸经过的海底深度成正比, 最大可达 1000 km/h. 当海啸进入浅海, 由于水深急剧变浅, 传播速度从早期的每小时 800~1000 km 降到数十公里, 巨大的水能转变成波能, 形成波高数米甚至数十米的水墙, 形成特征的海啸沉积. 虽然地震、火山、海底滑坡引起的海啸也可以传播很大的距离, 但一般都限于一个大洋. 全球性的海啸常常是外行星坠入海洋引起的. 目前在地球表面上发现的 160 多个陨石坑中有 7 个在现代海洋中, 还有 20 个所处的位置在地史时期也曾是海洋.

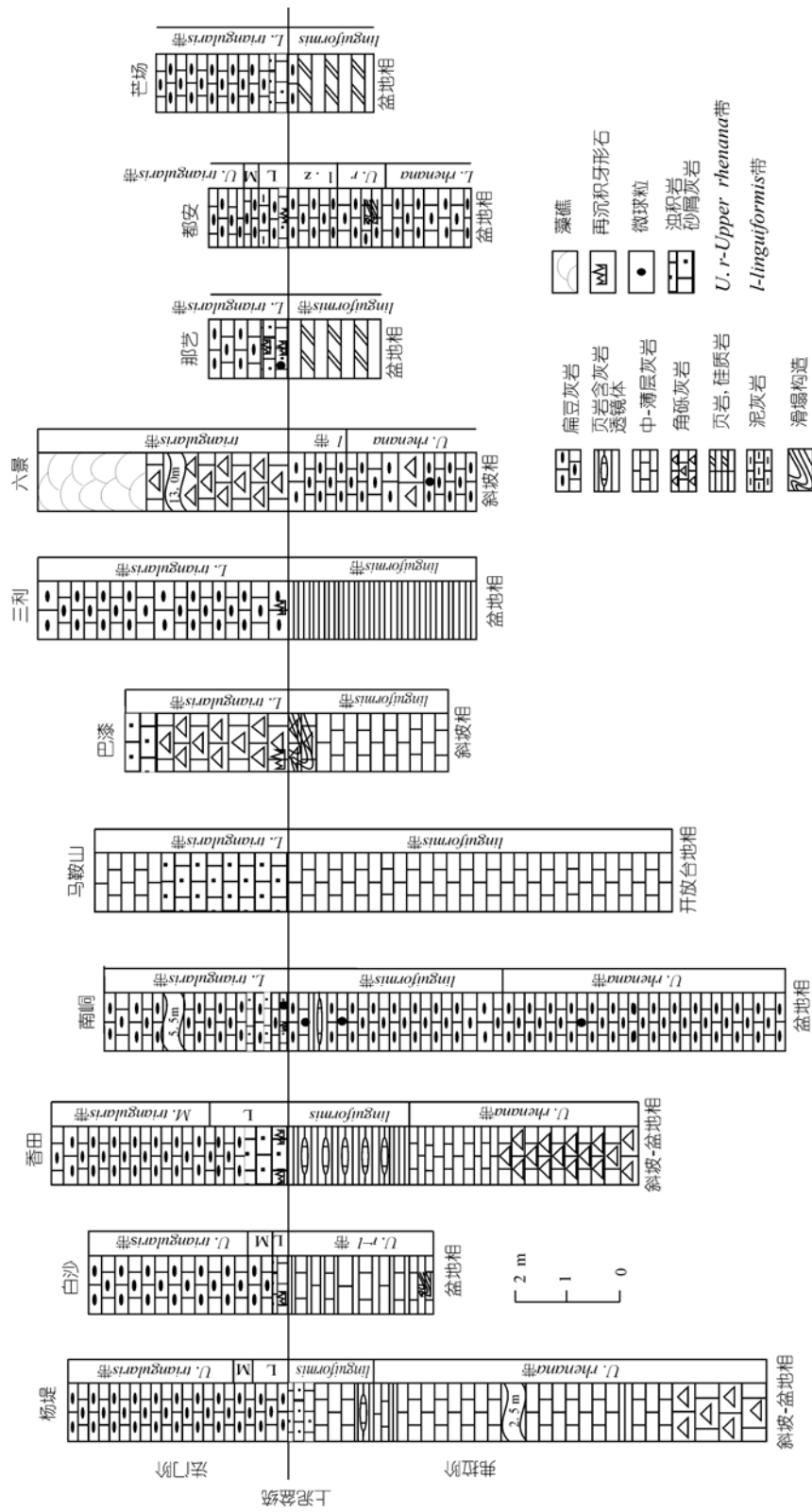


图 4 广西泥盆系弗拉斯-法门阶之交的事件沉积对比

根据陨石对地球的撞击频率可知, 在过去的 3.5 亿年中有超过 8000 个陨石撞击海洋. 这就使得小行星和彗星撞击海洋成为引发海啸的非常可能的因素^[46].

数字模拟得出, 直径大于 1 km 的小行星可以穿透 5000 m 深的海洋并立即扰动整个水体, 在瞬间引起与海洋深度相当的巨浪. 随着水中空气凹穴的破碎, 这些水沿着撞击坑边缘从高到低迅速跌落, 引发几百米高的巨浪, 在距陨石坑 1000 km 的海域这样的撞击仍会产生约 100 m 高的波浪^[46]. 据报道, 2.15 Ma 前一颗名为 Eltain 的小行星(直径 4 km)陨落贯穿到南太平洋底部, 在距发生地 1200~1500 km 远的南美北部和南极半岛引起的海啸波浪高达 200~300 m^[47]. 据 Hills 和 Goda^[48] 研究, 像这样能产生浪高达 100 m 的海啸的小行星每 3000~5000 年就会撞击地球的任何部位, 而且地球表面的 2/3 被海洋覆盖, 所以那些大小中等的小行星、彗星与海洋之间的撞击成为海啸发生的一个重要原因^[46]. 由于海啸波浪超过 5 m 就会在地史沉积中留下记录, 这充分证明大小中等的小行星可以留下它所形成的海啸的证据(即海啸岩).

自从 1980 年 Alvarez 等^[49] 报道了与 K/T 碰撞有关的海啸沉积以来, 与小行星碰撞引起的海啸一直受到关注. 1988 年, Bourgeois 等^[50] 在布拉索斯河发现了

一海啸成因的含泥岩、石灰岩碎片和植物碎片的粗粒砂岩. Masaitis^[51] 报道称在波罗的海和俄罗斯西北地区发现了中泥盆统磨圆差的角砾岩, 他认为这可能是由 380 Ma 前, Kaluga (卡卢加) 撞击东欧地台浅海引发的海啸造成的. Hassler 等^[52] 认为澳大利亚西部 Hammersley 地台晚太古代的小球粒的细小浪成波浪可能是由小行星与海洋撞击引起巨大的海啸从几千公里远的地方传过来的波浪冲刷形成的深的冲蚀坑后期充填形成的.

弗拉斯期末-法门期初广西、华南乃至全球的事件沉积可能是小行星撞入海洋引起的海啸形成的. 可以推测一个小行星坠入古特提斯洋, 引起的巨大海啸向外扩展到几千公里之外. 包括华南、欧洲-北美、西伯利亚、冈瓦纳等陆块的海底被巨大的海啸浪侵蚀(图 5). 海啸及其触发的碎屑流、浊流在深水盆地和斜坡形成碎屑流粗砾灰岩、砾屑灰岩、浊积岩、海啸岩等事件沉积. 华南弗拉斯-法门期之交的事件沉积主要发育于台地边缘斜坡和台间海槽, 原因在于: (1) 这些部位具有丰富的物源, 易于触发重力流; (2) 这些部位位于正常浪及面之下, 海啸形成的沉积在沉积后不易遭到破坏. 浪及面以上的地区海啸沉积由于易于被后期的波浪破坏, 所以难以保存.

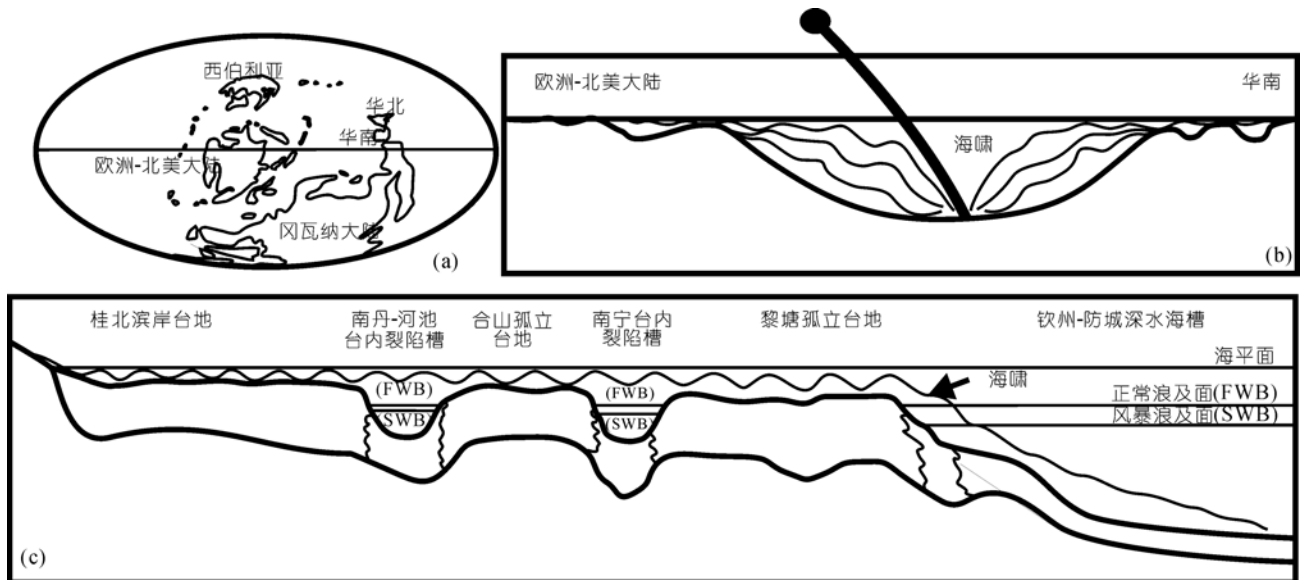


图 5 泥盆纪弗拉斯-法门期之交与小行星碰撞相关的海啸模式

(a) 泥盆纪弗拉斯-法门期之交的全球古大陆-古海洋分布; (b) 古特提斯洋与小行星碰撞相关的海啸; (c) 华南地区与小行星碰撞相关的海啸

4 结论

广西泥盆纪弗拉斯-法门阶界线上存在一套碎屑流、浊流和块状砂屑灰岩事件沉积。这些事件沉积是等时的, 均位于下 *triangularis* 带底部或 *linguiformis* 带顶部。该事件沉积广泛分布于广西及湖南泥盆系台地前缘斜坡区和台间裂隙槽区。可以与比利时 Hony 剖面、内华达 Devils Gate 剖面、摩洛哥 Atrous

剖面、南乌拉尔、西伯利亚东北部 Fore-Kolyma 剖面法门阶底部的浊积岩, 波兰-摩拉维亚盆地南部(Holy Cross 山脉, Cracow 和 Brno 地区)弗拉斯-法门阶界线上出现的剥蚀不整合、角砾岩化对比。浊积岩、粗砾灰岩、砾屑灰岩是重力流沉积, 块状砂屑灰岩可能为海啸沉积。如此广泛的事件沉积可以和外行星坠入海洋引起的海啸相联系。

致谢 感谢评审专家的建设性意见。

参考文献

- 1 McGhee G R. The Late Devonian Mass Extinction: the Frasnian-Famennian Crisis. New York: Columbia University Press, 1996. 1—327
- 2 McGhee G R. The late Devonian mass extinction, the Frasnian/Famennian crisis. *Geobios*, 1999, 29: 1—234
- 3 Girard C, Lecuyer C. Variations in Ce anomalies of conodonts through the Frasnian/Famennian boundary of Poland (Kowala-Holy Cross Mountains): implications for the redox state of seawater and biodiversity. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2002, 181: 299—311 [\[DOI\]](#)
- 4 Joachimski M M. Comparison of organic and inorganic carbon isotope patterns across Frasnian-Famennian boundary. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 1997, 132: 133—145 [\[DOI\]](#)
- 5 Joachimski M M, Ostertag-Henning C, Pancost R D, et al. Water column anoxia, enhanced productivity and concomitant changes in ^{13}C and ^{34}S across the Frasnian-Famennian boundary (Kowala-Holy Cross Mountains/Poland). *Chem Geol*, 2001, 175: 109—131 [\[DOI\]](#)
- 6 Joachimski M M, Pancost R D, Freeman K H, et al. Carbon isotope geochemistry of the Frasnian-Famennian transition. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2002, 181: 91—109 [\[DOI\]](#)
- 7 Chen D Z, Qing H, Li R W. 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 Planet Sci Lett*, 2005, 235: 151—166 [\[DOI\]](#)
- 8 Yan Z, Hou H F, Ye L F. Carbon and oxygen isotope event markers near the Frasnian-Famennian boundary, Luoxiu section, South China. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 1993, 104: 97—104 [\[DOI\]](#)
- 9 Gorjan P, Kakegawa T, Casier J G, et al. ^{34}S sulfate increase at the Frasnian-Famennian (Late Devonian) transition. *Goldschmidt Conference Abstracts*, 2006, A210 [\[DOI\]](#)
- 10 龚一鸣, 李保华, 吴诒. 广西弗拉阶-法门阶之交碳同位素与分子地层对比研究. *地学前缘*, 2002, 9(3): 152—160
- 11 Giles K A, McMillan N J, McCarson B L. Geochemical analysis and paleoecological implications of phosphatic microspherules (otoliths?) from Frasnian/Famennian boundary strata in the Great Basin, USA. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2002, 181: 111—125 [\[DOI\]](#)
- 12 Pujol F, Berner Z, Stüben D. Palaeoenvironmental changes at the Frasnian/Famennian boundary in key European sections: chemostratigraphic constraints. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2006, 240: 120—145 [\[DOI\]](#)
- 13 Gong Y M, Li B H, Wang C Y, et al. Orbital cyclostratigraphy of the Devonian Frasnian-Famennian transition in South China. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2001, 168: 237—248 [\[DOI\]](#)
- 14 Chen D Z, Tucker M E. The Frasnian-Famennian mass extinction: insights from high-resolution sequence stratigraphy and cyclostratigraphy in South China. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2003, 193: 87—111 [\[DOI\]](#)
- 15 Crick R E, Ellwood B B, Feist R, et al. Magnetostratigraphy susceptibility of the Frasnian/Famennian boundary. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2002, 181: 67—90 [\[DOI\]](#)
- 16 Schindler E. Event-stratigraphic markers within the Kellwasser crisis near the Frasnian/Famennian boundary (upper Devonian) in Germany. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 1993, 104: 115—125 [\[DOI\]](#)
- 17 Racki G, Racka M, Matyja H, et al. The Frasnian/Famennian boundary interval in the South Polish-Moravian shelf basins: integrated event-stratigraphical approach. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2002, 181: 251—297 [\[DOI\]](#)
- 18 McLaren D J. Time, life and boundaries. *J Paleontol*, 1970, 44: 801—815
- 19 Leroux H, Warne J E, Doukhan J C. Shocked quartz in the Alamo breccia, southern Nevada: evidence for a Devonian impact event. *Geology*, 1995, 23: 1003—1006 [\[DOI\]](#)
- 20 Over D J, Conaway C A, Kaitz D J, et al. Platinum group element enrichments and possible chondritic Ru/Ir across Frasn-

- nian-Famennian boundary, western New York state. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 1997, 132: 399—410[DOI]
- 21 Robert S N, Playford P E. Upper Devonian iridium anomalies, conodont zonation and the Frasnian-Famennian boundary in the Canning Basin, Western Australia. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 1993, 104: 105—113[DOI]
- 22 Claeys P, Casier J G. Microtektite-like impact glass associated with the Frasnian-Famennian boundary mass extinction. *Earth Planet Sci Lett*, 1994, 122: 303—315[DOI]
- 23 Ma X P, Bai S L. Biological, depositional, microspherule, and geochemical records of the Frasnian/Famennian boundary beds, South China. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2002, 181: 325—346[DOI]
- 24 Racki G. The Frasnian-Famennian biotic crisis: how many (if any) bolide impacts? *Geol Rundsch*, 1999, 87: 617—632[DOI]
- 25 Bai S L, Bai Z Q, Ma X P, et al. Devonian Events and Biostratigraphy of South China. Beijing: Peking University Press, 1994. 1—303
- 26 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. *地球科学——中国地质大学学报*, 2001, 26(3): 251—257
- 27 Girard C, Robin E, Rocchia R, et al. Search for impact remains at the Frasnian-Famennian boundary in the stratotype area, southern France. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 1997, 132: 391—399[DOI]
- 28 Joachimski M M, Buggisch W. Anoxic event in the late Frasnian-cause of the Frasnian-Famennian faunal crisis? *Geology*, 1993, 21: 675—678[DOI]
- 29 Bratton J F, Berry W B N, Morrow J R. Anoxia pre-dates Frasnian-Famennian boundary mass extinction horizon in the Great Basin, USA. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 1999, 154: 275—292[DOI]
- 30 Casier J G, Lethiers F, Baudin F. Ostracods, organic matter and anoxic events associated with the Frasnian/Famennian boundary in the Schmidt Quarry (Germany). *Geobios*, 1999, 32(6): 869—881[DOI]
- 31 廖卫华. 中国晚泥盆世 F/F 生物集群灭绝事件及其后的生物复苏的研究. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2001, 31(8): 663—667
- 32 Wang C Y, Ziegler W. Frasnian/Famennian conodont mass extinction and recovery in South China. *Senckenbergiana Lathaea*, 2002, 82(2): 463—496
- 33 Ji Q. On the Frasnian-Famennian mass extinction event in South China. In: Ziegler W, ed. First Senckenberg Conference and 5th European Conodont Symposium, Contribution 3. *Cour Forsch Inst Senckenberg*, 1989. 275—301
- 34 Wang C Y, Xia W C. Geochemical properties and stratigraphical correlation of Frasnian-Famennian transitional strata in Wuzhishan Section. *J China Univ Geosci*, 2002, 13(1): 48—52
- 35 Hou H F, Muchez P, Swennen R, et al. The Frasnian-Famennian event in Hunan Province, South China: biostratigraphical, sedimentological and geochemical evidence. *Mem Inst Geol Univ Louvain*, 1996, 36: 209—229
- 36 白顺良. 泥盆纪弗拉阶-法门阶事件的化学-生物地层学研究. *北京大学学报(自然科学版)*, 1998, 34(2-3): 363—369
- 37 Wang K, Geldsetzer H H J, Goodfellow W D, et al. Carbon and sulfur isotope anomalies across the Frasnian-Famennian extinction boundary, Alberta, Canada. *Geology*, 1996, 24: 187—191[DOI]
- 38 Yan Z, Hou H F, Ye L F. Carbon and oxygen isotope event markers near the Frasnian-Famennian boundary, Luoxiu section, South China. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 1993, 104: 97—104[DOI]
- 39 龚一鸣, 李保华, 司远兰, 等. 晚泥盆世赤潮与生物集群绝灭. *科学通报*, 2002, 47(7): 554—560
- 40 钟铨, 吴诒, 殷保安, 等. 广西的泥盆系. 武汉: 中国地质大学出版社, 1992. 214—311
- 41 季强. 从牙形类研究论华南弗拉斯阶-法门阶生物灭绝事件. 见: 中国地质科学院地层古生物论文集编辑委员会, 主编. *地层古生物论文集(第 24 辑)*. 北京: 地质出版社, 1994. 79—104
- 42 Sandberg C A, Ziegler W, Dreesen R, et al. Late Frasnian mass extinction: conodont event stratigraphy, global changes, and possible cause. *Cour Forsch Inst Senckenberg*, 1988, 102: 102—120
- 43 Walliser O H, Xu H K, Yu C M. Comparison of Devonian of South China and Germany. *Cour Forsch Inst Senckenberg*, 1989, 110: 5—16
- 44 Stepanova G A, Khalymbadza V G, Chernysheva N G, et al. Boundary of stages of the Upper Devonian on the South Urals (the Eastern slope). *Cour Forsch Inst Senckenberg*, 1985, 75: 123—134
- 45 Gagiev M H. Subdivision and correlation of Frasnian-Famennian boundary deposits (in term of conodonts), USSR North-East (Fore-Kolyma uplift). *Cour Forsch Inst Senckenberg*, 1985, 75: 53—64
- 46 Alastair G D, Iain S. Tsunami deposits in the geological record. *Sediment Geol*, 2007, 200: 166—183[DOI]
- 47 Ward S N, Asphaug E. Impact tsunami—Eltanin. *Deep-Sea Res Part II*, 2002, 49: 1073—1079[DOI]
- 48 Hills J G, Goda M P. Damage from comet-asteroid impacts with earth. *Phys D*, 1999, 133: 189—198[DOI]
- 49 Alvarez L W, Alvarez W, Asaro F, et al. Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction. *Science*, 1980, 208: 1095—1108[DOI]
- 50 Bourgeois J, Hansen T A, Wiberg P L, et al. A tsunami deposit at the Cretaceous-Tertiary boundary in Texas. *Science*, 1988, 241: 567—570[DOI]
- 51 Masaitis V L. The middle Devonian Kaluga impact crater (Russia): new interpretation of marine setting. *Deep-Sea Res Part II*, 2002, 49: 1157—1169[DOI]
- 52 Hassler S W, Robey H F, Simonson B M. Bedforms produced by impact-generated tsunamis, ~2.6 Ga Hammersley Basin, western Australia. *Sediment Geol*, 2000, 135: 283—294[DOI]