

一个罕见的奥陶纪末期深水腕足动物群 在浙江杭州余杭的发现

戎嘉余 詹仁斌 黄冰 俞国华

(现代古生物学和地层学国家重点实验室, 中国科学院南京地质古生物研究所, 南京 210008; 浙江省区域地质调查院, 杭州 311203. E-mail: jyrong@nigpas.ac.cn)

摘要 奥陶纪末赫南特期(Hirnantian)以北非为中心的大陆冰川形成, 全球海平面大幅下降, 凉浅水海域广泛分布, 底栖无脊椎动物群与前赫南特期(pre-Hirnantian)的面貌迥异。截止目前, 所报道的赫南特期化石群基本上属于较浅水的产物, 而深水底栖生物群还鲜为人知。最近, 笔者在浙江省杭州市余杭镇安乐村旁狮子山堰口组上部泥岩中, 发现一个以腕足动物-三叶虫占优势的底栖化石群, 将其命名为 *Leangella-Dalmanitina*(*Songxites*)组合, 其时代宜确定为奥陶纪末期。通过动物群的对比和群落生态分析, 推测该组合可能栖息于 BA5 的底域生态位。本区 *Leangella-Dalmanitina*(*Songsites*)组合与世界广布的 *Hirnantia-Dalmanitina* 动物群尽管生存时代相近, 但主要生态域不同, 面貌组分差别很大。研究表明: (1) 奥陶纪末期从赣西北到浙北可能发育从浅斜坡向深斜坡过渡的海底栖息环境; (2) 深水相环境是奥陶纪末大灭绝首幕之后底栖腕足类幸存的一个关键场所。

关键词 奥陶纪末期 深水海域 腕足类 三叶虫 中国东部

奥陶纪末赫南特期(Hirnantian)全球遭遇了环境恶化并由此引发了生物大灭绝事件。大灭绝首幕导致阿什吉(Ashgill)中期的海洋生态环境出现重大变化, 不仅浅水海域无脊椎动物群遭殃, 连深水海域动物群(如腕足类叶月贝动物群 *Foliomena* Fauna^[1]和三叶虫圆尾虫动物群 *Cyclopyge* Fauna^[2])也惨遭重创^[3,4]。这个大事件在华南有明显的反映。

赫南特期寒、温带和亚热带广阔的陆表海和陆棚浅水海域里, 普遍栖息了与前赫南特期(pre-Hirnantian)面貌迥异的无脊椎动物(如 *Hirnantia-Dalmanitina* 腕足类-三叶虫底栖生物群)。截止目前, 所记载的基本上是浅水生态域的产物, 唯个别地方有深水底栖生物群的报道, 如苏格兰南部 Dob's Linn 剖面的奥陶系顶部地层中, 除笔石外, 只发现 *Dalmanitina*(以发育盲眼为特征)单种三叶虫化石^[5], 栖息深度可能超过 BA5; 再浅些, 如美国缅因州 *Hirnantia* 动物群中发现部分常见于深水相的属, 可能属于 BA4 上部^[6]。

在奥陶纪发育一批主要见于深水相的腕足动物属, 它们多半是历程长、分布广、穿越奥陶纪末期大灭绝事件的分类单元, 那么这些深水分子在这次大

灭绝两幕期间会栖息在何处呢?

2007 年 1 月, 我们在浙江省杭州市余杭镇安乐村旁狮子山上开展野外工作时, 发现了奥陶纪末期的深水相地层及化石。该镇安乐路尽头的狮子山是安乐公园林区所在地; 山顶上矗立一座宝塔即安乐塔; 山脚入口处左侧发育可能是志留系最下部的安吉组地层, 因位于公园大门附近, 不便采集化石, 遂拾级而上, 在安乐塔以东约 50 m 处山坡小树林中(图 1)找到露头, 属于堰口组上部的土黄色(风化很甚)泥岩(厚约 40 cm, 野外编号为 AFL303, GPS 读数为 30°16'36"N, 119°56'36"E)(表 1), 在该地层中, 一个以腕足类-三叶虫占优势的底栖无脊椎动物群的发现, 引起了我们极大的关注。

本文拟探讨这个介壳相组合的成分、地质时代、群落生态特征与同期其他动物群的差异。经分析, 本文认为它具有许多典型的深水腕足动物群落的特点, 更可能栖息在 BA5 的底域生态位, 时代宜归于奥陶纪末期。至于这个深水动物组合在余杭地区被发现的古地理、沉积环境和大地构造意义, 笔者将另文阐述。

2007-03-23 收稿, 2007-08-23 接受

中国科学院知识创新工程方向性项目(批准号: KZCX3-SW-149, KZCX2-YW-122)、科技部基础性工作专项(批准号: 2006FY20300-5)和国家重点基础研究发展计划(批准号: 2006CB806400)资助

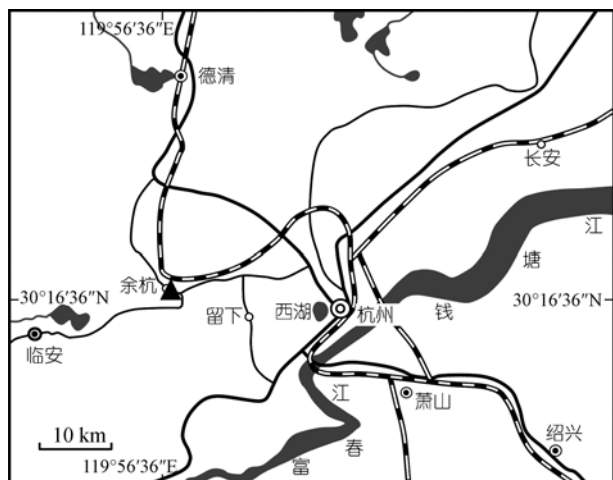


图 1 浙江杭州余杭狮子山的化石产地位置

表 1 浙江余杭狮子山和临安于潜堰口奥陶系-志留系交界地层对比表

年代地层			笔石带	浙江西北部	浙江北部
系	统	阶		临安市于潜堰口	杭州余杭狮子山
志留系	兰多维列统	鲁丹阶	<i>Parakidograptus acuminatus</i>	<i>acuminatus</i> <i>ascensus</i>	<i>Cathaysiorthis</i> 组合
			<i>Akidograptus ascensus</i>		
奥陶系	上统	赫南特阶	<i>Normalograptus persculptus</i>	<i>persculptus</i> <i>Aegiromena-Paromalomena</i> 组合	<i>Leangella-Dalmanitina</i> (Songxites) 组合
			<i>Normalograptus extraordinarius</i>		

1 组合成分

余杭安乐村旁狮子山一带堰口组上部为浅黄褐色泥岩, 主要由伊利石的细鳞片组成, 含少量细粉砂, 薄片下偶见硅化介壳碎片(薛耀松研究员鉴定)。化石群以小个体壳相化石为特征, 总量有限; 腕足类占整个动物群个体总数的近 90%; 相伴的有少量三叶虫、海林檎及个别的腹足类、海百合茎和短剑类等化石(图 2)。介壳化石稀少, 保存分散, 层面分布无规律可寻。

本组合的腕足类多样性大致为中等程度, 经笔者鉴定, 至少由 16 个属组成: *Orbiculoidea*(舌形贝目); *Pseudopholidops*(髑髅贝目); *Skenidioides*(原正形贝目); *orthid*, *dalmanellid*, *draboviid*, *Ravozetina*, *?Jezerica*, *Epitomyonia*(正形贝目); *Aegiromena*, *Anisopleurella*, *Leangella*, *Eoplectodonta*(扭月贝目); *Bre-*

vilamnulella(五房贝目); *?Alispira*, *Eospirigerina*(无洞贝目)。其中, 正形贝目和扭月贝目占总属数的 62.5%, 其余的目大都只含 1 个属。共生的三叶虫有 *Dalmanitina* (*Songxites*) cf. *wuningensis* Lin(较多)和 *Niuchangella* sp.(个别)(周志毅研究员鉴定), 还有个别的腹足类 *Holopea* sp., 短剑类 *Lepidocoleus* sp. 和海百合茎及骨板。

腕足类 *Leangella* 在分类和生态特征上最重要, 数量也多; 三叶虫 *Dalmanitina* (*Songxites*) 分布较广, 地质历程短暂, 在其他门类中数量最多。考虑到这两个分类单元的特殊意义, 笔者将这个介壳相化石群命名为 *Leangella-Dalmanitina* (*Songxites*) 组合, 作为一个生物地层单元处理。

2 地质时代讨论

截止目前, 可以确定地层时代的关键笔石化石尚未发现, 故含 *Leangella-Dalmanitina* (*Songxites*) 组合的地层(AFL303)时代主要是根据腕足动物、三叶虫和地层层序确定的。

所含腕足类属, 大都是从奥陶纪延续到志留纪的, 但是也有例外。 *Aegiromena planissima* Reed 种产自缅甸奥陶系顶部的 Panghsa-Pye 组^[7], 它与那里的 *Hirnantia* 动物群部分成员相伴, 时代为赫南特期。该种还见于江西修水-武宁地区的新开岭组和浙江临安市于潜堰口的堰口组, 时代都是奥陶纪末期。这个种是本组合与 *Hirnantia* 动物群联系的唯一已知种, 故对确定本组合的时代有重要意义。

除腕足类外, 最引人注目的是发育三叶虫 *Dalmanitina* (*Songxites*) cf. *wuningensis*。该种是江西西北部修水-武宁地区奥陶系顶部新开岭层(赫南特期)的特征和常见分子^[8-10], 还曾在浙西德清三桥埠和临安市于潜两地赫南特期地层(堰口组)中发现过^[11], 据周志毅面告, 本地的 *D.* (*Songxites*) cf. *wuningensis* 与于潜堰口所产者最为接近。该种至今尚未在其他地层中被记载。可见, 它不仅是华南奥陶纪末期重要的标志性化石, 与其关系密切的相关种也见于欧洲和澳洲的奥陶纪末期^[10,12]。据此, 将本组合的时代确定为奥陶纪末期(赫南特期)的结论, 也被三叶虫证据所支持。

从安乐公园大门沿路上山, 在去安乐塔的半山坡上有一座小亭子, 其旁紧挨山坡脚处出露灰褐色厚层泥质粉砂岩地层(野外编号为 AFL305, GPS 读数为 30°16'35"N, 119°56'34"E), 此系志留系安吉组底部。

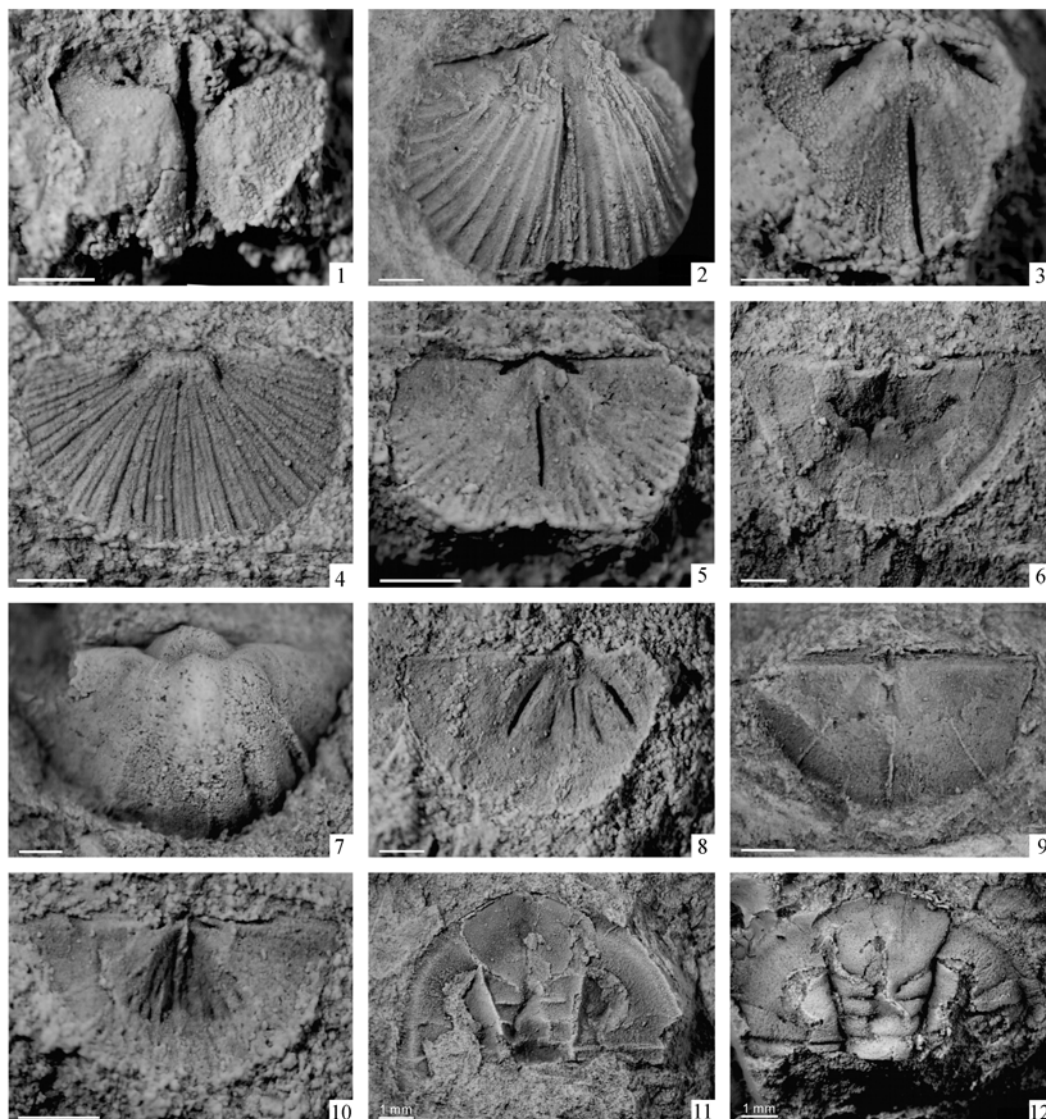


图2 浙江杭州余杭狮子山上奥陶统堰口组顶部(Hirnantian)壳相动物群的代表分子

全部标本保存在中国科学院南京地质古生物研究所。1, *Skenidioides* sp., 背内模 (NIGP143440); 2, 3, *Epitomyonia* sp., 腹内模与背内模 (NIGP143441, 143442); 4, 5, *Aegiromena planissima* (Reed), 腹外模与背内模 (NIGP143443, 143444); 6, 7, *Leangella* cf. *scissa* (Davidson), 背内模与腹内模 (NIGP143445, 143446); 8, 9, *Anisopleurella* sp., 背内模与背外模 (NIGP143447, 143448); 10, *Eoplectodonta* sp., 背内模 (NIGP143449); 11, 12, *Dalmanitina* (*Songxites*) cf. *wuningensis* Lin, 头鞍外模及其铸模 (NIGP143450)。线段比例尺为 0.5 mm(例外注明)

从中, 首次发现了多样性有限的壳相化石, 主要为腕足类, 尽管保存不佳, 数量不多, 但从发育 *Glyptorthis*, *Eospirifer*, *Cathaysiorthis*(新属名)等属中, 大致可确定其时代为志留纪最早期。 *Cathaysiorthis* 的意义很大, 因为它是浙西、赣东北地区志留纪仕阳组或安吉组底部(鲁丹阶最下部, lowermost Rhuddanian, 相当于 *Akidograptus ascensus* 带)的特征分子^[13,14]。本组合所含 *Glyptorthis*, *Eospirifer* 等, 也是仕阳组或安吉组底部的常见分子。故推测这个腕足类组合(AFL305)的

时代很可能属于志留纪初期。通过野外实地考察, 追索地层发育关系, 从层序上分析, AFL305 与前述 AFL303 层位相距很近, 这也支持将 AFL303 置于奥陶系最顶部的结论。

AFL303 究竟属于 *Normalograptus extraordinarius* 带还是 *N. persculptus* 带, 目前还难以确定。但是, 根据区域地质发育状况并考虑其地层层序, 产 *Leangella*-*Dalmanitina* (*Songxites*) 组合的地层靠近仕阳组底部(相当于 *Akidograptus ascensus* 带), 故归

其于赫南特晚期(相当于 *N. persculptus* 带)的可能性似乎更大。

3 集群分析

Leangella-Dalmanitina (*Songxites*) 组合, 作为生物地层单位不仅有其地层意义, 还因为能反映古地理特征并对阐释其环境有指示价值而具有群落生态意义。由于系统分类研究正在进行, 暂不命名它为群落生态单元(如群落或群集)。综括起来, 本组合有以下几个特点。

3.1 组成

含有一批以往在奥陶纪较深水相地层中的常见分子, 如 *Leangella*, *Epitomyonia*, *Revozetina*, *Skenidioides*, *Eoplectodonta*^[15-18]。此外, 如 *Anisopleurella* 等属, 在较深水相区也常出现; 本地所产的小型 *Aegiromena planissima*(Reed)与同期常见于浅水域的 *A. ultima* 相比, 个体更小, 背壳肌台基本不发育, 指示其较深水海域的特点。以上这些属的联合出现通常是 BA4-5 底栖群落的一个识别特征。本组合含 16 个腕足类属, 与较深水群落的多样性并无矛盾。共生的三叶虫 *Dalmanitina* (*Songxites*) cf. *wuningensis* Lin 在赣北、皖南、苏南和浙北都见于较深水域。值得重视的现象是在三山地区浅水海域的常见门类(如双壳类、四射和横板珊瑚、苔藓虫等)均未在本地发现。

3.2 生存特征

腕足类是以摄悬浮物(包括微小动、植物, 如浮游生物)为生的海洋底栖无脊椎动物。浅海底域的腕足类, 因靠近古陆, 营养物质丰富, 介壳生物量较大, 不同类群、不同属种的个体大小参差不齐; 然而, 一旦离岸较远, 海水加深, 营养物质减少, 水压增大, 光线减弱, 较大个体不利于贝壳启、闭的摄食方式。史前海域底栖生物的这些分布特征也在现代海域中得到证实^[19]。较深水底域的个体普遍变小, 不仅体现在奥陶纪、志留纪群落中, 也见于晚古生代群落中^[20,21], 乃是一个概率性的重要特征^[15,16,22]; 诚然, 这与二叠纪大灭绝后的残存期情况不一样^[23]。有些学者比较强调正形贝目、扭月贝目和小嘴贝目符合这个假说, 而无洞贝目和石燕目似乎恰好相反^[19]。本区 *Leangella-Dalmanitina* 组合中的腕足类都以小个体为特征, 除极个别分子(如 *Eospirigerina*)可能经过较远距离搬运外, 绝大部分个体壳宽均不超过 10 mm, 很多个体壳宽在 3.5~7.5 mm 之间。尽管类似的小个体

群落的产生原因很多^[24], 但当海域底质(substrates)大抵相同, 属种生存特征、海底地形和环境变化处于正常状态时, 水深可能是制约腕足类分布的一个最重要的因素。

3.3 保存特征

根据化石保存状况, 笔者推断, *Leangella-Dalmanitina* (*Songxites*) 组合基本上是原地埋藏的产物, 被长距离运移后埋葬的可能性很小, 尽管这并不意味着每个化石都是原位保存的。一般来说, 近岸群落的个体较为密集, 化石常呈介壳叠堆的方式保存。本组合的情况刚好相反: 腕足类个体被埋藏得很稀疏, 化石量很少、宽阔散布而密度很低, 与浅水底域高密度保存的埋藏特征完全不同, 少数个体的腹、背壳甚至呈铰合保存, 说明底域环境的水动力条件很弱。欧、美地区志留纪的深水 *Clorinda* 群落和 *Dicoelosia* 群落就属于这种类型, 被归于底栖组合 BA5 的位置^[16]。深水腕足动物虽说可产自砂岩地层中, 但实例很少, 它们所保存的母岩基本上以细粉砂质或泥质为特征, 也反映了深水海域中洋(水)流的微弱程度。

3.4 与 *Hirnantia* 动物群的比较

Leangella-Dalmanitina (*Songxites*) 组合与典型的 *Hirnantia* 动物群迥然有别, 主要在于: () 典型的 *Hirnantia* 动物群和本组合所拥有的共有属仅 2 个 (*Aegiromena* 和 *Pseudopholidops*), *Hirnantia* 动物群中许多主要分子^[25-27]在本组合里完全缺失, 而后的绝大多数成员在典型的 *Hirnantia* 动物群中则毫无踪迹。() *Hirnantia* 动物群以浅水域为主, 介壳叠堆, 生物量大, 与本组合的埋藏特点完全不同。() 在典型的 *Hirnantia* 动物群^[27-29]中, 主要分子同属个体常近岸者较大、远岸者较小。如在近岸、浅水的黔北遵义, *Hirnantia* 的个体很大, 壳宽多半在 35~45 mm 之间^[28], 而远岸的鄂西宜昌, 它的个体变小, 壳宽大都在 18~30 mm 之间, 个别可达 35 mm; 同样的情况也出现在华南的 *Paromalomena* 和 *Coolinia* 中, 水体越深, 化石个体越小(如在下扬子区和江南区)。本区 *Leangella-Dalmanitina* (*Songxites*) 组合所含属种基本上都是以小个体为特征的。

4 结论

根据上述讨论, *Leangella-Dalmanitina* (*Songxites*) 组合具备了远岸、静水低能、深水底栖群落的特点。基于化石组分及其生物群落特点, 它具有深水相的

性质;它可能栖息在比赣北、皖南和浙北奥陶纪末期所产者 *Paromalomena-Aegiromena* 组合(BA4)^[25]更深的环境,故推测更可能是 BA5 的产物。也就是说,它可能栖居在正常浪基面之下的更深水域,水深可能超过 100 m,但最大深度恐不会超过 200 m,这与周志毅等人^[2]对三叶虫 *Dalmanitina* (*Songxites*) 生态区间的分析不谋而合。本组合显示的深水相的许多特点与凉水海域典型的 *Hirnantia* 动物群不同,后者大都是浅海底域(正常浪基面之上,即下限为 60 m 左右)的栖居者^[30,31]。

Leangella-Dalmanitina (*Songxites*) 组合和世界广布、扬子海域常见的奥陶纪末(赫南特期)*Hirnantia-Dalmanitina* 动物群面貌有如此大的差别,令人深思。它们都含三叶虫 *Dalmanitina*, 显示两者间的重要联系。但就三叶虫而言,上扬子台地观音桥组(赫南特期)常见的另 2 属, *Eoleonaspis* 和 *Platycoryphe*^[32], 却在本区缺失,但在下扬子区赣西北修水武宁新开岭层(赫南特期)中有所记载^[10],在那里,它们与分异度很低、非典型的 *Hirnantia* 动物群(仅由 *Paromalomena*, *Aegiromena*, *Coolinia* 组成)相伴,缺失许多该动物群特征分子,指示了海水较深的生存环境。这个组合从武宁向东,延伸至皖南泾县北贡里^[25,33]和南京汤山^[25,34],再往南到浙西临安于潜堰口^[35]。在堰口,除寻获较多的 *Dalmanitina* 外,腕足动物很少,目前仅发现 *Aegiromena*(很少)和 *Paromalomena*(极少)。笔者推测,从赣西北到浙西北,可能有一个从上斜坡到下斜坡的更深海域栖息环境,这是一种可能。还有一种可能是根据含化石地层的时代分析得出的。临安市于潜堰口组大部分属于 *Normalograptus extraordinarius* 带^[35],而本文研究的余杭狮子山堰口组顶部含 *Leangella-Dalmanitina* (*Songxites*) 组合的时代可能更晚些,属于 *N. persculptus* 带。若这个推测最终能被证实,那么本组合和上述低分异度、非典型的 *Hirnantia* 动物群的差别是可以被解释的,即尽管都生活在 *Hirnantian*,但前后环境和生物群有过显著变化。但是更重要的是奥陶-志留纪交界期底栖生物群落的更替,主要表现在 *Hirnantia* 动物群的基本消亡和奥陶纪较深水相动物群的部分代表冲破大灭绝事件并在志留纪早期参与组成新的动物群。

应该指出,本组合所含这些深水分子,从空间上分析基本上都是外来属群,从时间上考证都是从奥陶纪延续过来的。本文的结论是:深水相环境可能是

奥陶纪末大灭绝首幕之后底栖腕足类幸存的一个关键场所;由于余杭一带在古地理上相对靠近外海,水域较深,故可能首先接纳外来分子的栖息。

致谢 周志毅、薛耀松两位研究员分别鉴定三叶虫和沉积岩样品并提供了分析意见,特此致谢。

参 考 文 献

- 1 Rong J Y, Zhan R B, Harper D A T. The Late Ordovician (Caradoc-Ashgill) *Foliomena* (Brachiopoda) fauna from China: Implications for its origin, ecological evolution and global distribution. *Palaios*, 1999, 14: 412—432[DOI]
- 2 周志毅,袁文伟,韩乃仁,等. 扬子陆块奥陶纪末期-志留纪早期三叶虫的灭绝和复苏. 见: 戎嘉余,方宗杰,编. 生物大灭绝与复苏——来自华南古生代和三叠纪的证据. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2004. 127—152
- 3 Sheehan P M. The Late Ordovician mass extinction. *Ann Rev Earth Planet Sci*, 2001, 29: 331—364[DOI]
- 4 戎嘉余,詹仁斌. 华南志留纪早期腕足动物的残存与复苏. 见: 戎嘉余,方宗杰,编. 生物大灭绝与复苏——来自华南古生代和三叠纪的证据. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2004. 97—126
- 5 Williams S H. Upper Ordovician graptolites from the *Dicellograptus complanatus* Zone of the Moffat and Girvan districts and their significance for correlation. *Scott J Geol*, 1987, 23: 65—92
- 6 Rong J Y, Boucot A J, Harper D A T, et al. Global analyses of brachiopod faunas through the Ordovician and Silurian transition: Reducing the role of the Lazarus effect. *Can J Earth Sci*, 2006, 43: 23—39[DOI]
- 7 Cocks L R M, Fortey R A. The palaeogeographical significance of the latest Ordovician fauna from the Panghsa-Pye Formation of Burma. *Spec Pap Palaeontol*, 2002, 67: 57—76
- 8 林天瑞. 江西武宁晚奥陶世小达尔曼虫(*Dalmanitina*)的一个新种. *南京大学学报(自然科学版)*, 1974, 1: 113—120
- 9 林天瑞. 江西武宁晚奥陶世 *Dalmanitina* 的一个新亚属——*Songxites*. *古生物学报*, 1981, 20: 88—90
- 10 林天瑞. 江西武宁晚奥陶世晚期三叶虫. *南京大学学报(自然科学版)*, 1985, 21: 146—154
- 11 Wu H J. A species of *Dalmanitina* (Trilobite) from Deqing and Yuzhen Counties, western Zhejiang. In: Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, ed. *Stratigraphy and Palaeontology of Systemic Boundaries in China; Ordovician-Silurian Boundary*. Hefei: Anhui Science and Technology Publishing House, 1984. 456—466
- 12 Cocks L R M, Fortey R A. A new *Hirnantia* fauna from Thailand and the biogeography of the latest Ordovician of South east Asia. *Geobios*, 1997, 20: 117—126[DOI]
- 13 曾庆奎,胡昌铭. 江西玉山王家坝早志留世早期(Early Llandoveryan)新腕足动物群的发现及其意义. *古生物学报*, 1997, 36: 1—17
- 14 Rong J Y, Zhan R B. Surviving the end-Ordovician extinctions: Evidence from the earliest Silurian brachiopods of northeastern Jiangxi and western Zhejiang provinces, East China. *Lethaia*, 2006, 39: 39—48[DOI]
- 15 Boucot A J. *Evolution and Extinction Rate Controls*. New York:

- Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, Oxford, 1975. 1—427
- 16 Cocks L R M, McKerrow W S. Ordovician and Silurian. In: McKerrow W S, ed. *The Ecology of Fossils, An Illustrated Guide*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 1975. 62—92, 93—124
- 17 Zhang N. Wenlockian (Silurian) brachiopods of the Cape Phillips Formation, Baillie Hamilton Island, Arctic Canada: Part . *Palaeontographica*, 1989, 206: 67—68
- 18 Musteikis P, Cocks L R M. Strophomenide and orthotetide Silurian brachiopods from the Baltic region, with particular reference to Lithuanian boreholes. *Acta Palaeontol Pol*, 2004, 49: 455—482
- 19 Fursich F T, Hurst J M. Environmental factors determining the distribution of brachiopods. *Paleontology*, 1974, 879—900
- 20 王成文, 杨式薄. 广西玉林北均塘组腕足动物群的发现及意义. *长春地质学院学报*, 1994, 24: 1—8
- 21 He W H, Feng Q L, Gu S Z, et al. Changxingian (Upper Permian) radiolarian fauna from Meishan D section, Changxing, Zhejiang, China and its possible paleoecological significance. *J Paleontol*, 2005, 79: 209—218[DOI]
- 22 Ziegler A M, Cocks L R M, Bambach R K. The Composition and structure of Lower Silurian marine communities. *Lethaia*, 1968, 1: 1—27[DOI]
- 23 Chen Z Q, Kaiho K, George A D. Survival strategies of brachiopod faunas from the end-Permian mass extinction. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2005, 224: 232—269[DOI]
- 24 Jones B. Variation in the Upper Silurian brachiopod *Atrypella phoca* (Salter) from Somerset and Prince of Wales Islands, Arctic Canada. *J Paleontol*, 1977, 51: 459—479
- 25 戎嘉余. 中国的赫南特贝动物群(*Hirnantia* fauna)并论奥陶系与志留系的分界. *地层学杂志*, 1979, 3: 1—29
- 26 Rong J Y. Distribution of the *Hirnantia* fauna and its meaning. In: Bruton D L, ed. *Aspects of the Ordovician System*. Oslo: Universitetsforlaget, 1984. 101—112
- 27 Rong J Y, Harper D A T. A global synthesis of the latest Ordovician Hirnantian brachiopod faunas. *T Roy Soc Edin-Earth*, 1988, 79: 383—402
- 28 戎嘉余. 生态地层学基础——群落生态的研究. 见: 中国古生物学会, 编. *中国古生物学会第十三、十四届学术年会论文集*. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1986. 1—24
- 29 Havlíček V. Climatic changes and development of benthic communities through the Mediterranean Ordovician. *Geologie*, 1989, 44: 79—116
- 30 Cocks L R M, McKerrow W S. Review of the distribution of the commener animals in Lower Silurian marine benthic communities. *Palaeontology*, 1984, 27: 663—670
- 31 Brett C E, Boucot A J, Jones B. Absolute depths of Silurian benthic assemblages. *Lethaia*, 1993, 25—40
- 32 Zhu Z L, Wu H J. The *Dalmanitina* Fauna (trilobite) from Huanghuachang and Wangjiawan, Yichang County, Hubei Province. In: Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, ed. *Stratigraphy and Palaeontology of Systemic Boundaries in China: Ordovician-Silurian Boundary (1)*. Hefei: Anhui Science and Technology Publishing House, 1984. 83—110
- 33 Li J J, Qian Y Y, Zhang J M. Ordovician-Silurian Boundary from Jingxian, Anhui. In: Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, ed. *Stratigraphy and Palaeontology of Systemic Boundaries in China: Ordovician-Silurian Boundary (1)*. Hefei: Anhui Science and Technology Publishing House, 1984. 287—308
- 34 张全忠, 焦世鼎. 南京汤山地区志留纪地层新进展. *中国地质科学院南京地质矿产研究所所刊*, 1985, 6: 97—111
- 35 Ge M Y. The Graptolite Fauna of the Ordovician-Silurian Boundary section in Yuqian, Zhejiang. In: Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, ed. *Stratigraphy and Palaeontology of Systemic Boundaries in China: Ordovician-Silurian Boundary (1)*. Hefei: Anhui Science and Technology Publishing House, 1984. 389—454