

# 华南地区早奥陶世-中奥陶世疑源类生物群落分析及其古环境意义

燕夔<sup>①②</sup>, 李军<sup>①\*</sup>

① 中国科学院南京地质古生物研究所, 南京 210008;

② 现代古生物学和地层学国家重点实验室, 南京 210008

\* 联系人, E-mail: junli@nigpas.ac.cn

2009-03-24 收稿, 2009-04-24 接受

国家自然科学基金(批准号: 40802006, 40672014, J0630967)、现代古生物学和地层学国家重点实验室项目(编号: 083108, 2009404)资助

**摘要** 疑源类是早古生代海生微体浮游植物群落的主要组成者, 绝大多数疑源类被发现于海相地层中, 在元古代和古生代海洋生态系统中处于初级生产者的位置. 以疑源类为主体的海生微体浮游植物群落的分布对其他生物类群的分布有重要影响. 应用聚类分析和主成分分析, 共识别出华南地区下、中奥陶统贵州桐梓红花园湄潭组、重庆城口厚坪大槽组和营盘组、湖北宜昌黄花场和大坪大湾组等 4 条剖面的 10 个疑源类生态组合, 认为这些疑源类组合的时空分布主要受环境因素变化的控制.

## 关键词

早奥陶世-中奥陶世  
疑源类  
华南  
群落  
古环境

Mobius<sup>[1]</sup>在描记北海牡蛎滩时首次建立了生物群落概念, Warming<sup>[2]</sup>发表的《以生态地理为基础的植物分布》被认为是植物生态学诞生的标志; Flahaut 和 Schröter<sup>[3]</sup>提出了个体生态学和群体生态学两个概念. 在现代生物学中, 群落(Community)有两种不同的定义: Hedgpeth<sup>[4]</sup>和 Thorson<sup>[5]</sup>以及 Mobius<sup>[1]</sup>都认为群落内的各个成员应相互依赖, 各种不同的生物成员强烈的相互作用; 而 Petersen<sup>[6]</sup>和 Johnson<sup>[7]</sup>则认为动物群落应该强调优势种的复现联合(Recurrent Combination). 后一种观点更容易在古生物学的研究上得到应用.

大多数疑源类被认为是浮游植物, 其中绝大多数疑源类被发现于海相地层中, 并且在元古代和古生代海洋生态系统中处于初级生产者的位置, 是海生微体浮游植物群落的主要组成者. 疑源类的分布与古环境间关系的研究还比较薄弱, 疑源类群落的研究则更为稀少. 在疑源类古环境分析中, 常用现代

海生沟鞭藻囊孢的分布规律解释疑源类的分布. 现生和化石沟鞭藻不仅反映了纬度(气候)信息, 也反映近岸-远岸分布趋势和盐度信息<sup>[8]</sup>. Wall 等人<sup>[9]</sup>研究现代海生沟鞭藻囊孢分布后指出现代沟鞭藻囊孢在海底沉积物中的分布主要受纬度和距海岸的距离控制, 他的这一模式广泛应用于疑源类古地理分区和古生态研究中.

詹仁斌和戎嘉余<sup>[10]</sup>认为在识别群落时既要强调“优势种的复现联合”, 也要注重群落的时空分布特点. 在古生态研究中, 组合(assemblage)、群集(association)和群落(community)这 3 个不同的术语被不同的研究者使用, 其内涵长期以来没有得到统一的认识. 戎嘉余等人<sup>[11,10]</sup>对这 3 个概念分别加以讨论, 认为他们代表了群落生态研究中的不同层次. 疑源类研究中往往使用组合描述代表一定环境意义的群落(或群集), 如 Jacobson<sup>[12]</sup>; 而 Tongiorgi 等人<sup>[13]</sup>研究宜昌地区疑源类时使用了生物相这个概念. 本研究中使用组合作为

英文版见: Yan K, Li J. The palaeoenvironmental implication of Early-Middle Ordovician acritarch communities from South China. Chinese Sci Bull, doi: 10.1007/s11434-009-0391-0

疑源类生态群落分析的基本单位。

## 1 研究材料和方法

本文选取贵州桐梓红花园涪潭组、重庆城口厚坪剖面大槽组和厚坪组、湖北宜昌黄花场和大坪(陈家河)大湾组等 4 条分布于不同沉积相区的下奥陶统、中奥陶统典型剖面,系统采集疑源类样品。疑源类使用实验室孢粉学的一般处理方法处理,制作薄片。每个样品统计疑源类 300 粒,计算疑源类属的相对丰度。

聚类分析(cluster analysis, CA)和主成分分析(principle component analysis, PCA)目前被广泛用于群落分析,特别是底栖生物群落<sup>[14]</sup>;近年来,孢粉学分析中也使用这些方法分析孢粉相<sup>[13,15]</sup>。本研究中将每个剖面疑源类属的相对百分含量直接在 PAST 中建立矩阵,分别使用聚类分析和主成分分析,并综合考虑化石的实际产出情况,识别华南地区早奥陶世-中奥陶世的疑源类群落,其中聚类分析的参数中,公式使用 UPGMA,相似系数使用 Euclidean distance。

许多学者研究了华南地区奥陶纪海平面的变化,认为早奥陶世-中奥陶世扬子地区海平面存在总体上升的趋势<sup>[16-18]</sup>。苏文博<sup>[19,20]</sup>根据奥陶纪扬子区东南缘地层的层序地层学研究,做出扬子区奥陶纪海平面变化曲线,识别出奥陶纪 16 个 3 级层序。扬子地区早奥陶世-中奥陶世在板块西缘和西北缘分布有数块古陆<sup>[21]</sup>。古陆以东发育南西-北东向带状分布的沉积相带,西部以较粗粒碎屑岩为主,中部为碎屑岩-碳酸盐岩,且向东碳酸盐岩沉积增多<sup>[21]</sup>。刘建波<sup>[22]</sup>在生物地层学研究基础上,通过沉积相和沉积旋回,详细分析了华南地区位于不同相带<sup>[21]</sup>上的四川长宁双河,贵州桐梓红花园,湖北宜昌大坪和重庆城口厚坪剖面早奥陶世-中奥陶世海平面的变化趋势,识别出 7 次海退事件。其中内陆碳酸盐岩-泥质相带的桐梓红花园剖面 and 重庆城口厚坪剖面以及外陆棚泥质-碳酸盐岩相带的宜昌黄花场和大坪剖面的材料也是本研究的样品(相带据张允白等人<sup>[21]</sup>)。本研究以刘建波<sup>[22]</sup>的相带划分为框架,结合不同疑源类组合的分布,讨论古海洋环境变化与疑源类群落变化之间的联系。

## 2 研究结果

综合使用聚类分析和主成分分析,结合化石的实际产出情况,华南地区下奥陶统-中奥陶统 4 条剖面可分别识别出下列疑源类生态组合。

贵州桐梓红花园剖面涪潭组识别出 3 个疑源类组合(图 1)。

(i) *Leiosphaeridia* 组合(HY1)。 *Leiosphaeridia* 组合产于贵州桐梓红花园涪潭组 *Didymograptus eobifidus* 带底部中段、*Expansograptus hirundo* 带下部、*Undulograptus austrodentatus* 带和 *U. intersitus* 带。这一组合以 *Leiosphaeridia*, *Baltisphaeridium*, *Polygonium* 和 *Micrystridium* 等属占优势,主要出现于较深水的页岩盆地环境(图 2)。

(ii) *Stelliferidium* 组合(HY2)。 *Stelliferidium* 组合产于贵州桐梓红花园涪潭组 *Azygograptus suecicus* 带中上部。这一组合以 *Stelliferidium* 占优势,主要出现于水位较低的内陆棚环境(图 2)。

(iii) *Polygonium* 组合(HY3)。 *Polygonium* 组合产于贵州桐梓红花园涪潭组 *D. eobifidus* 带, *Corymbograptus deflexus* 带, *A. suecicus* 带下部和 *E. hirundo* 带中下部。这一组合以 *Polygonium* 占优势,主要出现于外陆棚环境(图 2)。

湖北宜昌黄花场下、中奥陶统大湾组可以识别出 4 个疑源类组合(图 1):

(i) *Peteinosphaeridium* 组合(HC1)。 *Peteinosphaeridium* 组合产于湖北宜昌黄花场大湾组 *A. suecicus* 带中下部和 *Exigraptus clavus* 带上部。这一组合以 *Polygonium*, *Baltisphaeridium*, *Peteinosphaeridium*, *Leiosphaeridia* 等属占优势,主要出现于较深水的页岩盆地环境(图 3)。

(ii) *Cymatiogalea* 组合(HC2)。 *Cymatiogalea* 组合产于湖北宜昌黄花场大湾组 *E. clavus* 带中部。这一组合以 *Cymatiogalea*, *Leiosphaeridia* 等属占优势,主要出现于外陆棚的外侧环境(图 3)。

(iii) *Stelliferidium* 组合(HC3)。 *Stelliferidium* 组合产于湖北宜昌黄花场大湾组 *C. deflexus* 带和 *E. clavus* 带中下部。这一组合以 *Stelliferidium* 占优势,主要出现于内陆棚环境(图 3)。

(iv) *Baltisphaeridium-Leiosphaeridia* 组合(HC4)。 *Baltisphaeridium-Leiosphaeridia* 组合产于湖北宜昌黄花场大湾组 *D. eobifidus* 带, *A. suecicus* 带, *E. hirundo* 带下部, *E. clavus* 带和 *U. austrodentatus* 带上部。这一组合以 *Baltisphaeridium* 和 *Leiosphaeridia* 占优势,主要出现于陆棚环境(图 3)。

湖北宜昌大坪大湾组可以识别出 3 个疑源类组合(图 1):

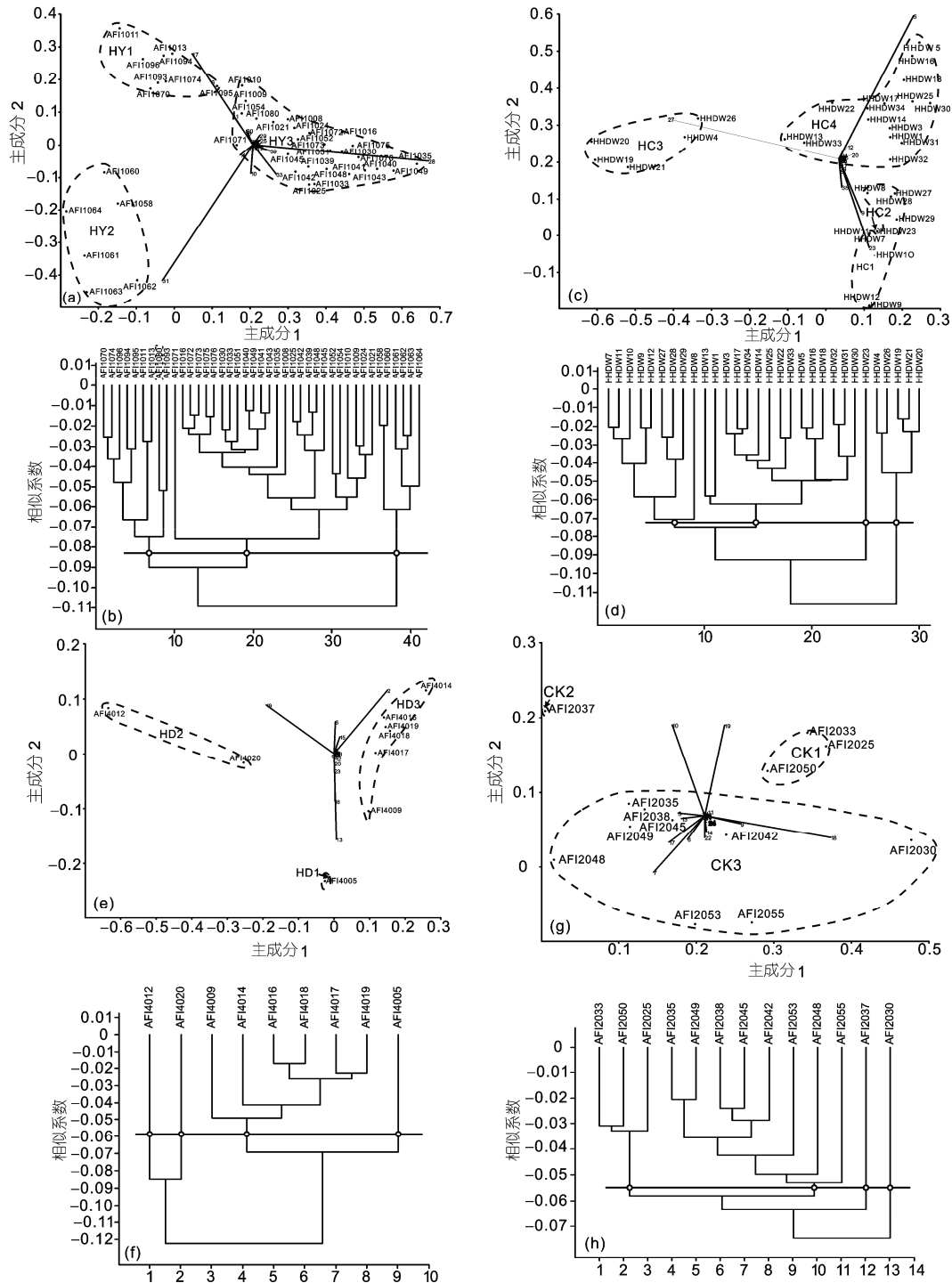


图1 华南早奥陶世-中奥陶世4条剖面疑源类组合主成分分析和聚类分析图

贵州桐梓红花园涪潭组疑源类组合主成分分析(a)和聚类分析(b); 湖北宜昌黄花场大湾组疑源类组合主成分分析(c)和聚类分析(d); 湖北宜昌大坪大湾组疑源类组合主成分分析(e)和聚类分析(f); 重庆城口厚坪大槽组、营盘组疑源类组合主成分分析(g)和聚类分析(h)。HY1, *Leiosphaeridia* 组合; HY2, *Stelliferidium* 组合; HY3, *Polygonium* 组合; HC1, *Peteinosphaeridium* 组合; HC2, *Cymatiogalea* 组合; HC3, *Stelliferidium* 组合; HC4, *Baltisphaeridium-Leiosphaeridia* 组合; HD1, *Baltisphaeridium-Peteinosphaeridium* 组合; HD2, *Stelliferidium-Leiosphaeridia* 组合; HD3, *Baltisphaeridium* 组合; CK1, *Rhopaliophora* 组合; CK2, *Leiosphaeridia* 组合; CK3, *Polygonium* 组合; 主成分分析中各主要矢量方向数字代表不同疑源类属种

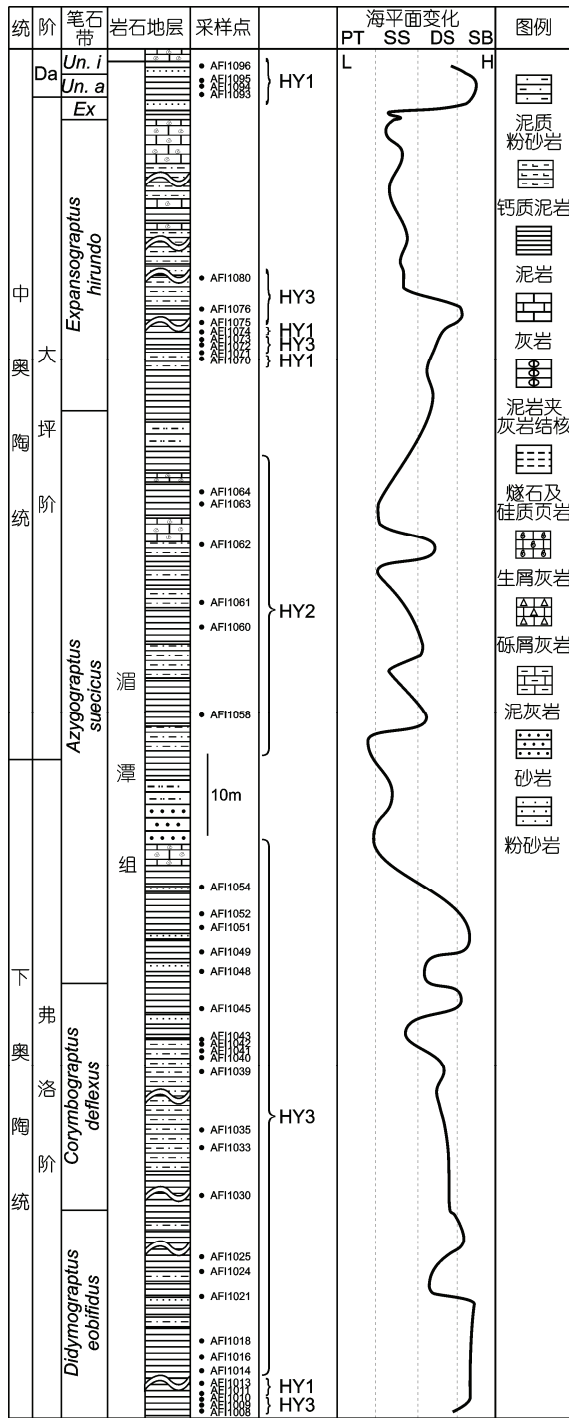


图2 贵州桐梓红花园潭组疑源类变化及海平面变化

Ex, *Exigraptus clavus*; Un. a, *Undulograptus austrodentatus*; Un. i, *Undulograptus intersitus*; Da, Darriwilian; HY1, *Leiosphaeridia* 组合; HY2, *Stelliferidium* 组合; HY3, *Polygonium* 组合; 海平面曲线根据刘建波<sup>[22]</sup>; SB, 页岩盆地; DS, 外陆棚; SS, 内陆棚; PT, 环潮汐带

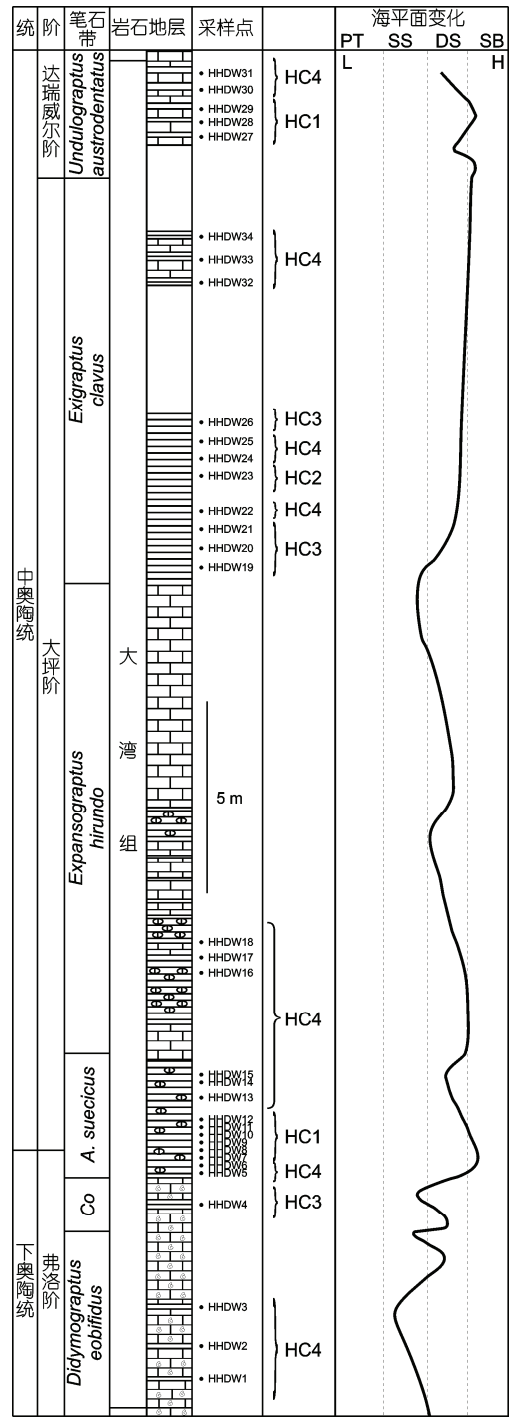


图3 湖北宜昌黄花场大湾组疑源类变化及海平面变化

Co, *Corymbograptus deflexus*; HC1, *Peteinosphaeridium* 组合; HC2, *Cymatogalea* 组合; HC3, *Stelliferidium* 组合; HC4, *Baltisphaeridium-Leiosphaeridia* 组合; 海平面曲线根据刘建波<sup>[22]</sup>; SB, 页岩盆地; DS, 外陆棚; SS, 内陆棚; PT, 环潮汐带, 图例见图2

(i) *Baltisphaeridium-Peteinosphaeridium* 组合(HD1). *Baltisphaeridium-Peteinosphaeridium* 组合产于湖北宜昌大坪大湾组 *C. deflexus* 带. 这一组合以 *Baltisphaeridium* 和 *Peteinosphaeridium* 占优势, 主要出现于较深水的的外陆棚环境(图 4).

(ii) *Stelliferidium-Leiosphaeridia* 组合(HD2). *Stelliferidium-Leiosphaeridia* 组合产于湖北宜昌大坪大湾组 *E. clavus* 带中部和 *U. austrodentatus* 带顶部. 这一组合以 *Stelliferidium* 和 *Leiosphaeridia* 占优势, 主要出现于外陆棚环境(图 4).

(iii) *Baltisphaeridium* 组合(HD3). *Baltisphaeridium* 组合产于湖北宜昌大坪大湾组 *A. suecicus* 带, *E. clavus* 带上部和 *U. austrodentatus* 带. 这一组合以 *Baltisphaeridium* 占优势, 主要出现于较深水的页岩盆地环境(图 4).

重庆城口厚坪大槽组、营盘组可以识别出 3 个疑源类组合(图 1):

(i) *Rhopaliophora* 组合(CK1). *Rhopaliophora* 组合产于重庆城口厚坪大槽组 *Tetraraptus approximatus* 带和营盘组 *E. hirundo* 带. 这一组合以 *Polygonium*, *Rhopaliophora* 等属占优势, 主要出现于较深水的页岩盆地环境(图 5).

(ii) *Leiosphaeridia* 组合(CK2). *Leiosphaeridia* 组合产于重庆城口厚坪营盘组 *D. eobifidus* 带. 这一组合以 *Leiosphaeridia* 占优势, 主要出现于较深水的页岩盆地环境(图 5).

(iii) *Polygonium* 组合(CK3). *Polygonium* 组合产于重庆城口大槽组 *T. approximatus* 带, 厚坪营盘组 *Acrograptus filiformis-E. hirundo* 带. 这一组合以 *Polygonium* 占优势, 主要出现于外陆棚环境(图 5).

综合以上 4 条剖面群落分析的结果, 华南地区早奥陶世、中奥陶世可以识别出 10 个疑源类组合(表 1). *Stelliferidium* 组合(贵州桐梓红花园, 湖北宜昌黄花场)主要出现于内陆棚环境, 在湖北宜昌黄花场大湾组上部则出现于外陆棚环境; *Baltisphaeridium-Leiosphaeridia* 组合主要出现在外陆棚环境中, 但在湖北宜昌黄花场大湾组下部出现于内陆棚环境; *Baltisphaeridium-Peteinosphaeridium* 组合(湖北宜昌大坪), *Cymatiogalea* 组合(湖北宜昌黄花场)出现于外陆棚环境; *Polygonium* 组合(贵州桐梓红花园和重庆城口厚坪)主要出现于外陆棚环境, 在重庆城口地区厚坪剖面营盘组 *A. suecicus* 带的部分层位出现于页岩盆地环境; *Stelliferidium-Leiosphaeridia* 组合(湖北宜昌大坪)出现于

外陆棚环境; *Baltisphaeridium* 组合(湖北宜昌大坪)出现于较深水页岩盆地环境; *Leiosphaeridia* 组合(贵州桐梓红花园, 重庆城口厚坪)主要出现于页岩盆地环境, 在贵州桐梓红花园涪潭组 *E. hirundo* 带的部分层位出现于内陆棚环境; *Peteinosphaeridium* 组合(湖北宜昌黄花场)和 *Rhopaliophora* 组合(重庆城口厚坪)主要出现于较深水页岩盆地环境.

时间分布上, *Rhopaliophora* 组合出现于 *T. approximatus* 带和 *E. hirundo* 带; *Polygonium* 组合出现于 *T. approximatus* 带-*E. hirundo* 带; *Leiosphaeridia* 组合出现于 *D. eobifidus* 带, *E. hirundo* 带, *U. austrodentatus* 带和 *U. intersitus* 带; *Baltisphaeridium-Peteinosphaeridium* 组合出现于 *A. suecicus* 带-*U. austrodentatus* 带; *Baltisphaeridium-Peteinosphaeridium* 组合出现于 *C. deflexus* 带; *Stelliferidium* 组合出现于 *D. eobifidus* 带-*A. suecicus* 带和 *E. clavus* 带; *Peteinosphaeridium* 组合出现于 *A. suecicus* 带和 *U. austrodentatus* 带; *Baltisphaeridium* 组合出现于 *A. suecicus* 带, *E. clavus* 带和 *U. austrodentatus* 带; *Cymatiogalea* 组合出于 *E. clavus* 带; *Stelliferidium-Leiosphaeridia* 组合出现于 *E. clavus* 带和 *U. austrodentatus* 带. *D. eobifidus* 带, *A. suecicus* 带, *E. clavus* 带疑源类组合在内、外陆棚和页岩盆地环境均有分布; 疑源类组合在 *T. approximatus* 带, *U. austrodentatus* 带, *C. deflexus* 带和 *E. hirundo* 带主要分布于外陆棚环境和页岩盆地环境; 而在 *A. filiformis* 带和 *U. intersitus* 则仅分布于页岩盆地环境.

### 3 疑源类群落的古环境学意义

现在一般认为大多数疑源类是海相微体浮游植物的囊泡, 因此在疑源类古环境分析中, 常用现代海生沟鞭藻囊泡的分布规律解释疑源类的分布. 中生代早期到现代以来, 海洋浮游植物, 如沟鞭藻的分布与环境变化有密切的关系<sup>[23]</sup>, 如温度<sup>[8]</sup>, 离岸远近<sup>[24]</sup>, 盐度<sup>[9]</sup>等. 与沟鞭藻类似, 疑源类组合的分布与环境变化有着非常密切的联系.

Jacobson<sup>[12]</sup>识别出美国肯塔基州和俄亥俄州中奥陶统、上奥陶统地层中代表浅水近岸海洋环境的 *Leiosphaeridia* 为主的组合; 代表浅滩环境的 *Peteinosphaerid-Dicommopalla* 组合; 代表离岸、开阔海环境的 *Baltisphaerid-Verhachid-Polygonium* 组合. Dorning<sup>[25]</sup>研究了威尔士志留纪(Ludlovian)陆架的疑源类组合, 根据古环境的不同识别出 3 个疑源类组

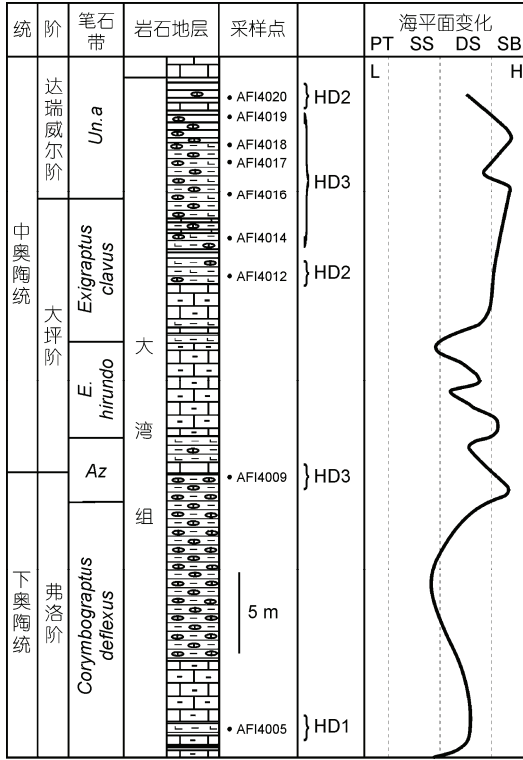


图4 湖北宜昌大坪大湾组疑源类变化及海平面变化

Az, *Azygograptus suecicus*; HD1, *Baltisphaeridium-Peteinosphaeridium* 组合; HD2, *Stelliferidium-Leiosphaeridia* 组合; HD3, *Baltisphaeridium* 组合; 海平面曲线根据刘建波<sup>[22]</sup>; SB, 页岩盆地; DS, 外陆棚; SS, 内陆棚; PT, 环潮汐带; 图例见图2

合: 近岸组合分异度低, 以光球类为主, *Micrhystridium*, *Diexallophasis* 及带3枚短突起的 *Veryhachium* 也较常见; 远岸组合分异度较高, 没有单一的优势种; 深水组合呈低分异度, 以光球类占优势. Vecoli<sup>[26]</sup>研究了阿尔及利亚和突尼斯撒哈拉北部地区寒武纪-奥陶纪界线附近的疑源类组合, 认为 *Leiosphaerid-Netromorphia*, *Veryhachium* 占优势时, 疑源类分异度较低, 代表浅水近岸的环境; 而 *Diacromorphitae-Herkomorphitae-Acanthomorphitae* 占优势时, 疑源类的分异度较高, 代表开放海的环境. Jacobson<sup>[12]</sup>, Dorning<sup>[25]</sup>和 Vecoli<sup>[26]</sup>的研究表明, 不同的疑源类组合能指示不同的环境. 而本研究中疑源类组合的分布也基本符合这一规律, 陆棚环境中的疑源类组合没有单一的优势分子, 如外陆棚环境中有 *Baltisphaeridium-Leiosphaeridia* 组合, *Baltisphaeridium-Peteinosphaeridium* 组合等疑源类组合, 这些组合中较少有单一分子在群落中占优势, 而深水的页岩盆地环境中疑源类组合以 *Leiosphaeridia* 组合为主.

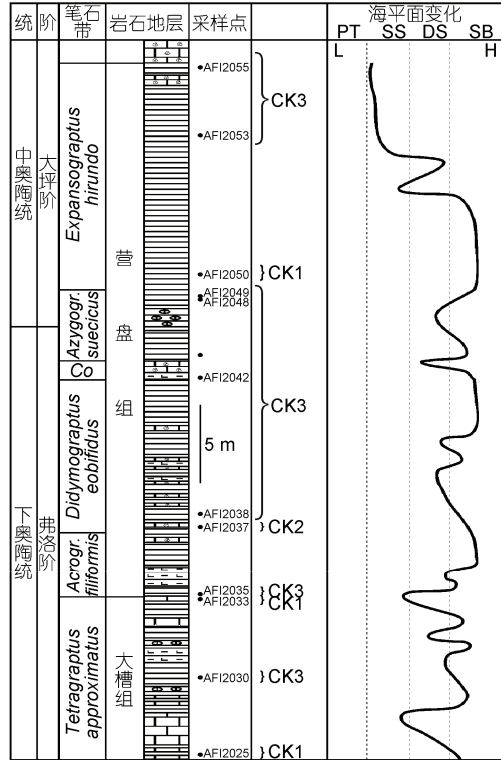


图5 重庆城口厚坪大槽组、营盘组疑源类变化及海平面变化

Co, *Corymbograptus deflexus*; CK1, *Rhopaliophora* 组合; CK2, *Leiosphaeridia* 组合; CK3, *Polygonium* 组合; 海平面曲线根据刘建波<sup>[22]</sup>; SB, 页岩盆地; DS, 外陆棚; SS, 内陆棚; PT, 环潮汐带; 图例见图2

本文研究的疑源类组合中, 突起较为复杂的以 *Peteinosphaeridium*, *Rhopaliophora* 等属占优势的组合(*Peteinosphaeridium* 组合和 *Rhopaliophora* 组合)多出现在远岸环境中, 这一规律在前人的研究中也都有所反映. Li 等人<sup>[27]</sup>分析上扬子区 *C. deflexus-A. suecicus* 带7条剖面后指出不同环境下疑源类的优势分子是有差异的, 它们的分布符合疑源类近岸-远岸分布规律, 如 *Baltisphaeridium*, *Peteinosphaeridium* 和 *Rhopaliophora* 等属在近岸环境丰度较低, 而在陆棚环境则较丰富. Stricanne 等人<sup>[28]</sup>在研究瑞典哥特兰地区志留纪疑源类组合的分布后, 指出远岸环境出现的疑源类组合中的分子装饰物更加复杂.

燕夔等人<sup>[29]</sup>研究贵州桐梓湄潭组的疑源类组合时, 指出疑源类不同属的相对含量变化趋势对于海平面的变化有不同的反应, *Baltisphaeridium*, *Polygonium*, *Peteinosphaeridium* 等属, *Galeata*, *Diacromorph* 等类群的相对丰度变化与海平面的上升趋势基本一致,

表1 奥陶纪疑源类组合与沉积环境<sup>a)</sup>

剖面	环潮汐带环境	内陆棚环境	外陆棚环境	页岩盆地环境
贵州桐梓红花园		<i>Stelliferidium</i> 组合	<i>Polygonium</i> 组合	<i>Leiosphaeridia</i> 组合
湖北宜昌黄花场		<i>Stelliferidium</i> 组合	<i>Cymatiogalea</i> 组合; <i>Baltisphaeridium-Leiosphaeridia</i> 组合	<i>Peteinosphaeridium</i> 组合
湖北宜昌大坪			<i>Baltisphaeridium-Peteinosphaeridium</i> 组合; <i>Stelliferidium-Leiosphaeridia</i> 组合	<i>Baltisphaeridium</i> 组合
重庆城口厚坪			<i>Polygonium</i> 组合	<i>Leiosphaeridia</i> 组合; <i>Rhopaliophora</i> 组合

a) 环境资料根据刘建波文<sup>[22]</sup>

而 *Leiosphaeridia*, *Striatotheca* 等属的相对丰度变化与海平面的上升趋势呈负相关。本研究中显示 *Baltisphaeridium* 组合主要在出现于外陆棚和页岩盆地环境中, *Peteinosphaeridium* 组合主要出现于外陆棚环境中, *Galeata* 则出现于陆棚环境中, *Polygonium* 组合可出现于陆棚到页岩盆地环境中, 这一结果和笔者之前的研究结果<sup>[29]</sup>是一致的。

Servais 和 Eiserhardt<sup>[30]</sup>以具有半球形轮廓和大圆口盖为特征建立了 *Galeata* 类群, Stricanne 和 Servais<sup>[31]</sup>试图用定量的方法解决这一类群的分类问题, Servais 等人<sup>[32]</sup>指出 *Galeata* 类群的形态变化与海平面变化以及海水盐度有密切关系。本研究中属于 *Galeata* 类群的疑源类有两个属: 膜壳被分为多角形区域为特征的 *Cymatiogalea* 和突起基部出现放射状条纹的 *Stelliferidium*。本研究的 10 个组合中, *Stelliferidium* 占优势的 *Stelliferidium* 组合一般出现在内陆棚环境, 而 *Cymatiogalea* 占优势的组合 *Cymatiogalea* 组合出现在外陆棚外部的环境, 这一结果反映了 *Galeata* 类群的不同形态类型对环境的适应表现不同。

詹仁斌和戎嘉余<sup>[14]</sup>分析华南早奥陶世腕足动物群落的分布和变化, 指出华南地区早奥陶世腕足动物群多数分子首先出现在正常浅海区域, 然后才向更深或更浅的底域发展, 少数分子出现在较深水, 之后向更浅的底域发展。这一演化模式与浮游植物的疑源类有较大的差异。本研究中疑源类组合在 *D. eobifidus* 带, *A. suecicus* 带, *E. clavus* 带, 内、外陆棚

和页岩盆地环境均有分布; 在 *T. approximatus* 带, *C. deflexus* 带, *E. hirundo* 带和 *U. austrodentatus* 带主要分布于外陆棚环境和页岩盆地环境; 而在 *A. filiformis* 带和 *U. intersitus* 则仅分布于页岩盆地环境, 10 个疑源类组合交替出现, 没有明显的演化关系, 因此疑源类组合的时空分布可能主要受环境因素变化的控制。

Servais 等人<sup>[33]</sup>探讨了奥陶纪营养链的演化, 指出浮游植物的代表疑源类的演化与浮游动物的演化有密切的联系, 奥陶纪营养链的革命可能由疑源类的辐射引起。但是不同习性生物的宏演化(包括辐射演化)进程、规模和型式等差异显著<sup>[14]</sup>, 如前文所述, 奥陶纪疑源类组合演化模式与腕足动物群的演化模式有较大的差异, 因此, 奥陶纪营养链的演化过程中各化石门类间的相互作用还需要进一步研究。

#### 4 结论

研究华南地区下奥陶统、中奥陶统 4 条剖面的疑源类, 通过聚类分析和主成分分析, 共识别出 10 个疑源类生态组合, 这 10 个疑源类组合的时空分布与早、中奥陶世古环境的变化有着密切的联系: *Stelliferidium* 组合一般出现于水位较低的内陆棚环境; *Baltisphaeridium-Leiosphaeridia* 组合, *Baltisphaeridium-Peteinosphaeridium* 组合, *Cymatiogalea* 组合, *Polygonium* 组合和 *Stelliferidium-Leiosphaeridia* 组合一般出现于外陆棚环境; 而 *Baltisphaeridium* 组合, *Leiosphaeridia* 组合, *Peteinosphaeridium* 组合和 *Rhopaliophora* 组合主要出现于较深水页岩盆地环境。

致谢 承蒙张元动、詹仁斌、王怿、袁文伟博士协助采集样品、提供剖面资料, 对他们的帮助, 在此深表感谢。

## 参考文献

- 1 Mobius K. The Oyster and oysterculture. Miscellaneous Documents, No. 29, United States Senate, 46th Congress, 3rd Sessoin, U.S. Community of Fish and Fisheries, Report of Community for 1880, 1877. 1883. 683—751
- 2 Warming J E B. Plantesamfund: Grundtrekk af den økologiske plantegeografi. Philipsen, København. 1895. 1—335
- 3 Flahaut C, Schröter C. Phytogeographische Nomenklatur. Berichte und Vorschläge. 3th Intern. Bot. Congress, Bruxelles 14-22 Mai, 1910. 40
- 4 Hedgpeth J W. Treatise on marine ecology and paleoecology Vol.1. Geol Soc Amer Mem, 1957, 67: 1—1296
- 5 Thorson G. Bottom communities. In: Hedgpeth J W, ed. Treatise on Marine Ecology and Paleoecology. V.1 Ecology. Geol Soc Amer Mem, 1957, 67: 461—534
- 6 Petersen C G J. Valuation of the sea II, The animal communities of the sea bottom and their importance for marine zoogeography. Rept Danish Biol Sta, 1914, 21: 3—44
- 7 Johnson R G. The community approach to paleoecology. In: Imbrie J, Newell N, eds. Approaches to Paleoecology. New York: Wiley, 1964. 107—134
- 8 Dale B. Dinoflagellate cyst ecology: Modeling and geological application. In: Jansonius J, McGregor D C, eds. Palynology: Principles and Applications, Vol. 3. Salt Lake City, Utah: American Association of Stratigraphic Palynologists Foundation, Publishers Press, 1996. 1249—1257
- 9 Wall D, Dale B, Lohmann G P, et al. The environmental distribution of dinoflagellate cysts in modern marine sediments from regions in the north and south Atlantic oceans and adjacent seas. Mar Micropaleontol, 1977, 2: 121—200
- 10 詹仁斌, 戎嘉余. 浙赣边区晚奥陶世腕足动物群落生态分布型式. 科学通报, 1995, 40: 932—935
- 11 戎嘉余. 生态地层学的基础——群落生态的研究. 中国古生物学会第 13—14 次学术年会论文集. 合肥: 安徽科学技术出版社, 1986. 1—24
- 12 Jacobson S R. Acritarchs as paleoenvironmental indicators in Middle and Upper Ordovician rocks from Kentucky, Ohio and New York. J Paleontol, 1979, 53: 1197—1212
- 13 Tongiorgi M, Yin Leiming, Di Milia A. Lower Yushangian to Zhjiangian palynology of the Yangtze Gorges area (Daping and Huanghua-chang sections), Hubei Province, South China. Palaeontogr Abt B, 2003, 266: 1—160
- 14 詹仁斌, 戎嘉余. 华南早奥陶世-中奥陶世腕足动物的辐射. 见: 戎嘉余, 方宗杰, 周忠和, 等, 编. 生物的起源、辐射与多样性演变——华夏化石记录的启示. 北京: 科学出版社, 2006. 259—283, 865—866
- 15 Smith J. Multivariate techniques in palynofacies analysis. In: Harper D A T, ed. Numerical Palaeobiology. New York: John Wiley & Sons, 1999. 361—394
- 16 陈旭, 丘金玉. 宜昌奥陶纪的古环境演变. 地层学杂志, 1986, 10: 1—15
- 17 汪啸风, 李志明, 陈建强, 等. 华南早奥陶世海平面变化及其对比. 华南地质与矿产, 1996, 1—11
- 18 Chen X, Rong J Y, Zhou Z Y. Ordovician Biostratigraphy of China. In: Zhang W T, Chen Peiji, Palmor A R, eds. Biostratigraphy of China. Beijing: Science Press, 2003. 121—171
- 19 苏文博. 上扬子地台东南缘奥陶纪层序地层及海平面变化的研究. 北京: 地质出版社, 2001. 1—106
- 20 苏文博. 奥陶纪海平面变化: 来自扬子地台的证据. 古生物学报, 2007, 46 (增刊): 471—476
- 21 张允白, 周志毅, 张俊明. 扬子陆块早奥陶世末期-中奥陶世 Darriwilian 初期沉积分异. 地层学杂志, 2002, 26: 302—314
- 22 刘建波. 华南早-中奥陶世生物大辐射期间的海平面变化. 见: 戎嘉余, 方宗杰, 周忠和, 等, 编. 生物的起源、辐射与多样性演变——华夏化石记录的启示. 北京: 科学出版社, 2006. 335—360, 875—877
- 23 Servais T, Li J, Molyneux S, et al. Ordovician organic-walled microphytoplankton (acritarch) distribution: The global scenario. Paleogeogr Paleoclimatol Paleoecon, 2003, 195: 149—172
- 24 Head M J, Wrenn J H. Neogene and Quaternary dinoflagellate cysts and acritarchs. Am Assoc Stratigr Palynol Foundation, 1992. 1—438
- 25 Dorning K J. Silurian acritarch distribution in the Ludlovian shelf sea of South Wales and the Welsh borderland. In: Neale J, Brasier M, eds. Ellis Horwood Limited: Microfossils from Recent and Fossil Shelf Seas. Chichester: Ellis Horwood Ltd, 1981. 31—36
- 26 Vecoli M. Palaeoenvironmental interpretation of microphytoplankton diversity trends in the Cambrian-Ordovician of the northern Sahara Platform. Paleogeogr Paleoclimatol Paleoecon, 2000, 160: 329—346
- 27 Li J, Servais T, Yan K, et al. A nearshore-offshore trend in the acritarch distribution of the Early-Middle Ordovician of the Yangtze Platform, S-China. Rev Palaeob Palynol, 2004, 130: 141—161
- 28 Stricanne L, Munnecke A, Pross J, et al. Acritarch distribution along an inshore-offshore transect in the Gorstian (lower Ludlow) of Gotland, Sweden. Rev Palaeob Palynol, 2004, 130: 195—216
- 29 燕夔, 李军, 刘建波. 华南早-中奥陶世颖源类生物多样性与海平面变化. 科学通报, 2005, 50: 1998—1995
- 30 Servais T, Eiserhardt K H. A discussion and proposals concerning the Lower Paleozoic 'galeate' acritarch plexus. Palynology, 1995, 19: 191—210
- 31 Stricanne L, Servais T. A Statistical approach to classification of the Cambro-Ordovician galeate acritarch plexus. Rev Palaeob Palynol, 2002, 118: 239—260
- 32 Servais T, Stricanne L, Montenari M, et al. Population dynamics of galeate acritarchs at the Cambrian-ordovician transition in the algerian sahara. Palaeontology, 2004, 47: 395—414
- 33 Servais T, Lehnert O, Li J, et al. The Ordovician Biodiversification: Revolution in the oceanic trophic chain. Lethaia, 2008, 41: 99—109