

文章编号: 1008-0244(2001)04-65-08

# 元古宙—寒武纪疑源类的辐射演化、 绝灭作用与海洋地球化学演变 ——兼论扬子区元古宙—奥陶纪疑源类的演化

杨瑞东<sup>1,2</sup>, 王世杰<sup>1</sup>, 欧阳自远<sup>1</sup>, 尹磊明<sup>3</sup>

(1. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳, 550002; 2. 贵州工业大学资源与环境学院, 贵州 贵阳, 550003; 3. 中国科学院南京地质古生物研究所, 江苏 南京, 210008)

**摘要:**通过对目前全世界元古宙—寒武纪地层中的浮游植物(疑源类)的统计,发现在新元古代晚期和早寒武世相对较短的时间间隔内发生了一系列的微体植物(疑源类)辐射和绝灭事件。而这些辐射和绝灭事件又与早期后生生物的辐射、绝灭都有密切的镜像关系。通过对古海洋的  $\delta^{13}\text{C}$ 、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  研究,发现元古宙—寒武纪浮游植物(疑源类)的辐射演化、绝灭作用与古海洋环境变化有着密切的关系,即生物辐射时期,  $\delta^{13}\text{C}$ 、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  呈现高异常;生物绝灭时期,  $\delta^{13}\text{C}$ 、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  呈现低异常;冰期  $\delta^{13}\text{C}$  呈现明显的负异常。

**关键词:**海洋地球化学;辐射演化和绝灭作用;浮游植物(疑源类);元古宙—寒武纪

**中图分类号:** P 534.42; P 534.45 **文献标识码:** A

在元古宙(2700~542Ma),海洋生物几乎由相对分异的浮游植物、菌藻类和多细胞藻类占统治地位<sup>[1]</sup>。由于它们在元古宙古生态演变中起重要作用,因此,这些微体化石是研究早期生态系统及生物演变最基本的材料。

对这些浮游植物的系统研究和统计,国外已作了许多工作<sup>[2,3]</sup>;而国内尚未进行类似的工作。作者对我国扬子区新元古代—奥陶纪地层中的疑源类资料进行过统计分析,结果也发现,在新元古代与早寒武世之间存在一个明显的生物绝灭事件,随后,在早寒武世早期疑源类成种作用明显增大,发生了辐射演化。这与 Knoll<sup>[2]</sup>和 Vidal<sup>[3]</sup>对全球疑源类分析统计结果相一致<sup>[2,3]</sup>。由此也说明,作为海洋生物链中占重要地位的疑源类的成种作用、分异性、绝灭作用与早期后生动物具有明显的成像作用。因此,研究疑源类的成种作用、分异性、绝灭作用对研究寒武纪生命大爆发具有一定意义。

元古宙—寒武纪古海洋的  $\delta^{13}\text{C}$ 、Ce、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$

已经有很多研究成果<sup>[4~9]</sup>。通过比较,发现元古宙—寒武纪浮游植物(疑源类)的辐射演化、绝灭作用与古海洋环境地球化学变化有着密切的对应关系。

本文拟对国内外疑源类辐射演化、绝灭作用的研究进展作较详尽介绍。

## 1 元古宙—寒武纪疑源类的分异性

Knoll和Vidal对全球元古宙—寒武纪疑源类化石分类单位进行了分析统计(表1),编制了疑源类的分异性直方图和各生物地层单位内新种和绝灭种占疑源类总数的百分比情况,以及各生物地层单位内疑源类的总数分布特征(图1)。在此基础上探讨了新元古代—晚寒武世疑源类物种的生存和绝灭过程。在800Ma之前,仅发现少量的菌藻类化石以及没有纹饰的球形疑源类。早新元古代疑源类组合已经显示出与晚新元古代几乎相当的分异水平,也可以达到中、晚寒武世分异的水平。R4生物带中的疑源类物种在晚新元古代Varanger期经受了绝灭作用,这时期成种作用与绝灭作用均高,这在Vendian期或整个寒武纪都未有的独特现象,即原来早期生存的物种几乎全部绝灭,同时成种作用也几乎为零(图1)。在这一绝灭作用之后,成种作用又快速增大,在短短的时间间隔内产生的疑源类新物种达76种。Vol-

收稿日期: 2000-08-16; 修回日期: 2001-07-05

基金项目: 贵州省省长专项基金; 国家自然科学基金(编号40062001); 贵州工业大学博士启动基金。

第一作者简介: 杨瑞东(1964-), 男, 教授, 博士后, 从事古生物学、地球化学研究。

hyn—Redkino 生物带含有新的简单形态分类单位,形态简单和生存时间短的分类单位增多,绝灭速率超过新种产生速率。延限 48Ma 的 Volhyn—Redkino 生物带具有明显的复杂的疑源类组合,如中国陡山沱期的疑源类,很明显,疑源类经受的绝灭作用发生在波罗的海 Volhyn 期大量的火山喷发之前。而 Pertatataka 期(相当于陡山沱期)生物

群持续时限不超过 20Ma,随后的文德阶 Kotlin—Rovno(相当于 Sabellidites—Vendotaenia 带)疑源类组合,它延续的时间约 10Ma。这时期疑源类的成种速率低,而绝灭速率高,种的总数达到了很低的水平(图 1),是新元古代又一次重要的绝灭作用,这次绝灭作用使疑源类种总数由 570Ma 的 63 种减到 8 个种。

表 1 全球发现的元古宙—寒武纪的疑源类组合及统计资料来源

Table 1. Proterozoic to Cambrian acritarch assemblages found in the world and their statistics data

绝对年龄/Ma	地层年代	地层单位	资料来源
1800~1400	古元古代 R <sub>1</sub>	串岭沟组, 俄罗斯的 Ajsk, Satka 和 Bakal 组, 北美的下 Belt 群	Horodski 1980; Jankauskas 1982, 1989; Zhang 1986
1300~1050	中元古代 R <sub>2</sub>	俄罗斯 Zigazino—Komarovski 和 Avzyansk 组	Jankauskas 1982, 1989
1270~1190	中元古代 R <sub>2</sub>	北美 Bybt 群	Hofmann and Jackson 1994
1000~700	早新元古代 R <sub>3</sub> —R <sub>4</sub>	俄罗斯 Bederishinsk 组, Chapoma 组, Dashin 组, Kamov 组, Kutov 组, Lakhanda 组, Minyar 组, Podinzersk 组, Zilmerdak 组。瑞典 Visingsö 群, 格陵兰 Eleonore Bay 群, Thule 群, 挪威 Vadso 和 Tanafjorden 群, Barents Sea 群, Hedmark 群, 西伯利亚 Khajpakh 组和 Miroedikha 组。北美 Tindir 群, Chuar and Uinta Mountain 群	Allison and Awramik 1989; Allison and Hilgert 1986; Butterfield et al., 1994; Heman 1990; Jankauskas 1982, 1989; Knoll and Calder 1983; Vidal 1976, 1979, 1981; Vidal and Dawes 1980; Vidal and Ford 1985; Vidal and Nystuen 1990; Vidal and Siedlecka 1983; Vidal et al., 1993
600	Varanger	北美 Mineral Fork 组, 挪威 Moelv and Ekre 页岩组, Smalfjorden 组, Nyborg 组, Mortensnes 组	Knoll and Swett 1987; Knoll et al., 1981; Vidal 1981; Vidal and Nystuen 1990a
570	Volhyn—Redkino	陡山沱组, 澳大利亚 Pertatataka 组, 俄罗斯 Kursovsk 组和 Tongo 组	Awramik et al., 1995; Knoll 1992; Kolsova 1991; Yin 1985a, b, 1990 1991; Zang and Walter 1989, 1992
<551	Kotlin—Rovno	在波罗的海不同组	Knoll and Swett 1987; Moczydlowska 1991; Palacios 1989; Volkova et al., 1983
542~518	<i>Platysolenites</i> , <i>Schmidtiellus</i> , <i>Holmia</i> , <i>Protolenus</i> 带	在波罗的海和北美, 俄罗斯和格陵兰和中国不同地层组	Downie 1982; Eklund 1990; Hagenfeldt 1989a; Knoll and Swett 1987; Vidal and Peel 1993; Vidal et al., 1995; Moczydlowska 1991, Moczydlowska and Vidal 1986; Volkova et al., 1983
518~495	<i>A. oelandicus</i> , <i>P. Paradaxissimus</i> , <i>P. Forchhammeri</i> UC 1~6 带	在波罗的海和俄罗斯以及冈瓦纳大陆和中国不同地层组	Eklund 1990; Hagenfeldt 1989a, b; Martin and Dean 1981, 1983 1984, 1988 Moczydlowska 1991, Vanguetaine 1978, 1992; Vanguetaine and Van Looy 1983; Vidal and Nystuen 1990b; Volkova 1990, 1993 Volkova et al., 1983; Welsch 1983; Young et al., 1994

注: 据 Knoll et al.<sup>[2]</sup>, Vidal et al.<sup>[3]</sup>

寒武纪疑源类辐射演化是很明显的,并在前寒武—寒武纪界线附近有相当数量的新种产生(图 1),而且这些物种中大部分都可延续到下一个生物带中。有许多学者研究表明在前寒武、寒武纪界线之上,疑源类的分异性加速度增长<sup>[2, 10~11]</sup>,这种特征与寒武纪早期后生物爆发相一致<sup>[14]</sup>;这一研究与 Knoll<sup>[2]</sup>的结论相吻合。在早寒武世,疑源类分类单位的绝灭速率在增大,而新种产生速率则下降(图 1)。此外, *Platysolen-*

*ites*, *Schmidtiellus*, *Holmia* 生物带内,疑源类的分类单位数(种)有逐渐增加现象,成种作用也逐渐增大。但在 *Protolenus* 带,成种作用与绝灭作用交替出现,即成种作用下降时,绝灭作用增强,绝灭作用下降时,成种作用增大。就晚寒武世的每一个时间段来说,物种数量是低的,只有晚寒武世的 UC5 生物带表现出明显的分类单位数(种)的增加,但由于奥陶纪资料未被研究和统计,因此,未能表现出晚寒武世的相对分异水平。导致疑源类

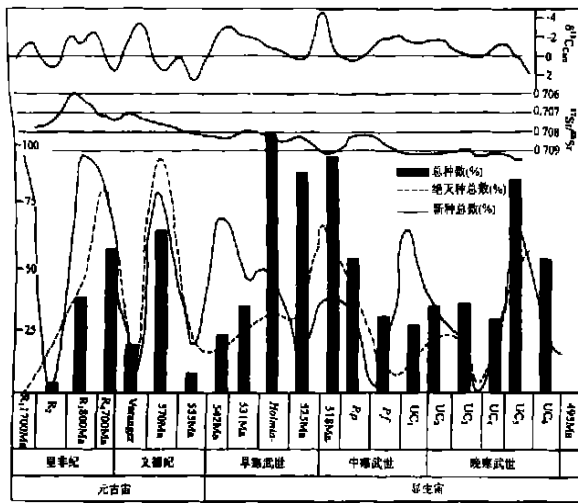


图 1 元古宙—寒武纪疑源类种总数、成种数和绝灭数分布特征(据文献 2~9)

Fig. 1. The map showing the distribution of the total number of species, new species and extinct species of Proterozoic to Cambrian acritarchs.

总的分异性在晚寒武世相对较高的原因可能是物种之间的过渡特征的下降。晚寒武世成种作用强度与早寒武世相当,并且在 UC5, UC6 生物带内有较高的总分异度,这与有相当一部分生存时间长的物种存在有关。这也明显地反映了晚寒武世大部分地层缺少可划分年代的疑源类分子。早寒武世 Holmia 生物带约 6Ma 时间间隔内,疑源类表现出特异的成种作用和强烈的绝灭作用,这与早寒武世最大的海侵事件相一致<sup>[3]</sup>。这种特征在中寒武世及晚寒武世(UC1)也能见到。在很短的时间内疑源类成种速率与种的绝灭速率惊人的交替现象被认为是寒武纪疑源类的演化特征,而这些高分异性的物种转换(成种与绝灭的比例)与最大海侵事件相一致可能被认为是简单的埋藏作用的结果,导致快速埋藏(保存)的最大海侵事件可引起更大的类群出现,它也似乎表现在陆棚海扩张之后,成种速率在增大。

浮游菌藻类在海洋生物链中起重要作用,因此,陆棚海扩张引起浮游菌藻类数量(生物量)的升高和降低是最早期海洋生物基本的分异作用<sup>[11]</sup>。最近,围绕对新元古代—寒武纪生物爆炸的海洋后生生物辐射演化方式研究表明,在寒武纪存在一个相对简单的分异性快速增长<sup>[13]</sup>。但是,当确定这一简单的分异性快速增长方式时,在属级水平上,后生动物的分异性与疑源类分异性具有相似的平行变化特征<sup>[14]</sup>,它包括以下几个方面:

① 在寒武纪最早的生物带内,后生生物和疑源类数量(分异性)逐渐增加,并达到了最佳的分异水平。

② 在早寒武世末期和中寒武世初期疑源类和后生生物达到了最大的分异。

③ 所有研究早、中寒武世界线附近的后生生物群和疑源类资料均表明,在早、中寒武世界线附近存在有一个稳定的分异性降低的特征。

④ 晚寒武世海洋无脊椎动物和疑源类分异性是一个逐渐增加的过程,但没有早寒武世末期—中寒武世那样快速的分异性增长。

## 2 元古宙—寒武纪疑源类的分异性与古海洋地球化学演变关系

早在 20 世纪 50 年代, Nursall 首先提出氧分子是造成生物起源和演化的环境大门守护者。之后, Berkner, Cloud, Raff 和 Williams 进一步论述了这一观点。到了 80 年代,有关研究寒武纪早期和元古代沉积岩中的稳定碳、氧同位素及同位素变化与环境演变、生物辐射之间关系的论文有很多。进入 90 年代,对新元古代和寒武纪的古生物化石,以及对这段时间内形成的地层的同位素的研究成果日趋增多,其中以 Brasier 等<sup>[3]</sup>在英国和纽芬兰早寒武世地层中的碳、氧同位素的研究最为突出,他们划分出四个  $\delta^{13}\text{C}$  漂移; Yang<sup>[5]</sup> 等研究了扬子区震旦纪—寒武纪早期的  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{18}\text{O}$ 、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  和 Ce 异常,他们的研究表明,在南沱冰期  $\delta^{13}\text{C}$  明显有负漂移,陡山沱组内有三次  $\delta^{13}\text{C}$  震荡,陡山沱组顶部有一次强烈的  $\delta^{13}\text{C}$  负漂移, Ce 在南沱组为正的异常,灯影组开始变为负异常,到早寒武世 Ce 异常值降到最低值,之后又快速上升为正异常。很多研究成果分别对元古代—寒武纪的  $\delta^{13}\text{C}$  漂移进行过研究,并认为引起  $\delta^{13}\text{C}$  漂移的原因是大气圈和海洋表层水体中含氧量增加之故。最近几年,有大量的论文论述了元古代—寒武纪这段时期内形成地层中的化石和  $\delta^{13}\text{C}$  漂移、含氧量增加的关系,试图以元古代—寒武纪地球大气圈和水圈的地球化学变化来解释晚元古代和早寒武世生物爆发的原因<sup>[6-9]</sup>。

微体藻类(疑源类)是前寒武纪—寒武纪海洋有机碳的主要生产者,它们的繁盛与海洋  $\delta^{13}\text{C}$  有着密切关系。从图 1 可见,在 Riphean 初期,疑源类种数少; 800~700Ma 是疑源类顶盛时期,这时疑源类成种速率、绝灭速率都很高,疑源类种的总

数也大;到 Varanger 冰期,疑源类种的总数由 90% 降到了 20% 水平,疑源类成种速率、绝灭速率也很低。到 Vollyn — Redkino 期疑源类成种速率、绝灭速率都快速增大,疑源类种的总数达到元古宙最高水平(63%),到了新元古代末期,发生了生物绝灭事件,疑源类种总数达到很低的水平(10%)。而到了前寒武纪—寒武纪界线附近, $\delta^{13}\text{C}$  值呈现正的异常,疑源类成种速率很高,绝灭速率低,这时期小壳动物繁盛。早寒武世早期, $\delta^{13}\text{C}$  值呈现负的异常,但疑源类成种速率还是较高,绝灭速率较低,疑源类总数也较低(23%)。之后, $\delta^{13}\text{C}$  值在逐渐增加,疑源类种总数也在增加。到了早、中寒武世界线附近, $\delta^{13}\text{C}$  值出现明显的负异常,疑源类种总数减少,成种速率快速降低。进入中寒武世, $\delta^{13}\text{C}$  值出现快速的正漂移,疑源类种总数、成种速率和绝灭速率快速增大。中寒武世末, $\delta^{13}\text{C}$  值出现负的异常,疑源类种总数、成种速率和绝灭速率也明显减少。晚寒武世早期  $\delta^{13}\text{C}$  值缓慢增加,成种速率快速增大。晚寒武世中期, $\delta^{13}\text{C}$  值出现明显的负异常,疑源类的成种速率和绝灭速率降到了最低点。到晚寒武世末期, $\delta^{13}\text{C}$  值出现快速的正漂移,疑源类种总数、成种速率和绝灭速率快速增大。

800~600Ma 是冰川强烈活动期, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  波动大, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值处在低值区( $< 0.708$ ),而且在 Riphean 和 Varanger 冰期  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值最低。600Ma 后逐渐增大,至前寒武—寒武纪界线附近达到最大。 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  的这种正漂移与 Ediacaran 动物群的辐射、小壳动物和疑源类的辐射时间是一致的。早寒武世早期,全球性的缺氧事件使  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  降低,生物明显减少。在早、中寒武世界线附近,由于发生了生物绝灭事件, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值由 0.709 快速降到 0.708;晚寒武世  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值保持在 0.709 水平。从元古宙到寒武纪, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值变化曲线与生物绝灭、辐射事件有着密切的关系,生物辐射时期, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  呈现高异常;生物绝灭时期, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  呈现低异常;冰期  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  也呈现低异常。

从图 1 中  $\delta^{13}\text{C}$ 、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  波动与疑源类种总数、成种速率和绝灭速率成正相关关系分析,我们认为前寒武—寒武纪的强烈  $\delta^{13}\text{C}$  正、负异常反映原始生产力突变,这与 Hsu 等<sup>[15]</sup> 观点是一致的。

Kimura 等<sup>[9]</sup> 对元古宙的  $\delta^{13}\text{C}$  波动的原因作了解释,他们认为南沱冰期之后全球气候变暖,南沱冰期时的滞留和分层(表层水体为含氧水体,深

层水体为富营养和缺氧水体)的海洋,由于海平面上升,富营养和缺氧的深层水团上升至海洋表面,引起光合作用的浮游植物大量死亡, $\delta^{13}\text{C}$  呈负异常。Kaufman<sup>[8]</sup> 乃认为引起全球性新元古代冰期的  $\delta^{13}\text{C}$  负异常可能是因海洋的分层性遭到破坏,具有低  $\delta^{13}\text{C}$  的深海水体与表层水体混合所致。另外,构造抬升引起强烈的大陆侵蚀或低水位期富含有机碳的岩石暴露侵蚀,造成有机碳埋藏速率减少,引起  $\delta^{13}\text{C}$  的负异常<sup>[8]</sup>。而 Betts 等认为沉积速率是影响碳的有效埋藏的重要因素。

也有人认为  $\delta^{13}\text{C}$  的负异常很可能与海洋生物生产力有关。Hsu 等<sup>[15]</sup> 认为前寒武—寒武纪的强烈  $\delta^{13}\text{C}$  负异常反映原始生产力突变,并伴随有短期的海洋表层水体  $\delta^{13}\text{C}$  下降到深水水平。Hsu 等研究了白垩纪/第三纪界线上也有明显的  $\delta^{13}\text{C}$  负异常。另外,在二叠纪—三叠纪界线,中泥盆世 Frasnian—Famennia 界线,泥盆纪—石炭纪界线附近,奥陶纪—志留纪界线附近都有生物大绝灭事件,它们都有明显的  $\delta^{13}\text{C}$  负异常。引起这些大的  $\delta^{13}\text{C}$  负漂移的原因可能是:①轻的碳同位素组分输入到大气圈—海洋水圈中;②“死劝海”的形成;③具有轻碳同位素的深水团与较重碳同位素的表层水体混合。

从图 1 可见,在冰期  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$  都呈现出负的异常,疑源类种的总数、绝灭速率都很高;冰期后  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$  快速上升,疑源类种的总数、成种速率都很高。一系列的冰期起着强烈的环境过滤器作用,它导致一系列的遗传“瓶颈和泛滥”,导致冰期末后生生物的辐射开始。也有人认为南沱冰期之后的陡山沱期生物大量繁盛是由于全球温度和海平面上升,海水的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  快速升高,海洋沉积速率增大,因此,在陡山沱期浮游生物“爆发”。造成陡山沱期浮游生物“爆发”的原因有:①全球温度快速上升;②超大陆的解体形成许多较小大陆,浅海面积扩大,这些大陆在文德纪到早寒武世基本处于低纬度区。另外,大陆的漂移、碰撞带来了更多的陆源物质,提供了丰富的 P、N、K、Ca、Mg、Mn 等元素;③富含营养的洋底水上升到海洋表层。

### 3 元古宙—奥陶纪上扬子区疑源类形态特征变化趋势

在我国上扬子区新元古代—奥陶纪疑源类研究资料比较丰富<sup>[16~28]</sup>,特别是在前寒武—寒武

纪界线附近的研究资料更多。这为我们研究新元古代—奥陶纪疑源类形态特征演化趋势提供了基础资料。

通过对上述研究资料中的疑源类膜壳直径进行数理统计, 得到上扬子区各时期疑源类膜壳直径(表 2)。根据表 2 可编制新元古代—奥陶纪疑源类膜壳直径和具刺疑源类的刺体长度变化曲线(图 2)。从图 2 可见在前寒武—寒武纪界线附近, 疑源类膜壳直径发生了明显变小现象, 这与该时期浮游植物发生绝灭作用相吻合, 同时与古海洋  $\delta^{13}C$  发生明显的负异常是一致的。而在陡山沱期、灯影峡期和早寒武世早期微体藻类繁盛,  $\delta^{13}C$  表现出正的异常。而冰期沉积期(澄江组)疑源类形态明显变小,  $\delta^{13}C$  表现出负的异常。

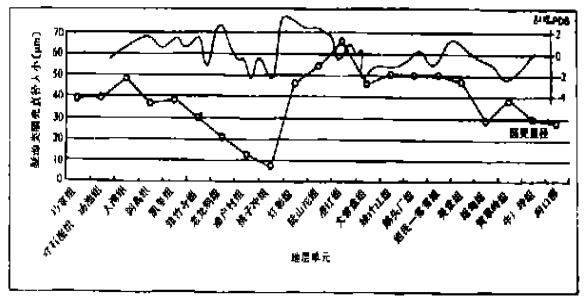


图 2 前寒武纪—奥陶纪扬子区疑源类膜壳直径大小分布曲线与古海洋碳同位素漂移对应关系(碳同位素据 4~6)

Fig. 2. The relationship between the distribution of acritarch diameter and  $\delta^{13}C_{car}$  excursion in Precambrian-Ordovician in the Yangtze region.

表 2 前寒武纪—奥陶纪扬子区疑源类膜壳直径大小分布数据表

Table 2. The data of acritarch diameter in the Precambrian-Ordovician in the Yangtze region

地 层 系 统		膜壳平均直径 $\mu m$		化石产地	资料来源
		深 水	浅 水		
中奥陶统	十字铺组, 巧家组	39		贵州、云南	李军等 <sup>[26]</sup> , 方晓思 <sup>[17]</sup>
下奥陶统	红石崖组—汤池组	39		四川	方晓思 <sup>[17]</sup>
	大湾组	47.93		湖北宜昌	尹磊明 <sup>[18]</sup>
	同高组	36.2		贵州三都	许玩宏 <sup>[27]</sup>
中寒武统	凯里组	38		贵州凯里	尹磊明等 <sup>[19]</sup>
下寒武统	筲竹寺组	30		云南晋宁	尹崇玉 <sup>[23]</sup>
	老龙洞组	20.15		四川峨眉	王福星等 <sup>[21]</sup>
	渔户村组	12.6		云南晋宁	尹崇玉 <sup>[22]</sup>
	桃子冲组	6.8		贵州清镇	罗其玲 <sup>[23]</sup>
震旦系	灯影组	30~37.8	51.8~71.9	云南晋宁	邢裕盛 <sup>[24]</sup>
	陡山沱组	49.4	54.4~62.4	云南王家湾, 峡东	丁莲芳等 <sup>[25]</sup>
	澄江组	65.8		云南晋宁	王福星等 <sup>[21]</sup>
大营盘组	41.26~50.5				
青白口系	绿汁江组	50.31		云南晋宁	
	鹅头厂组	50			
蓟县系	因民—落雪组	50		云南晋宁、东川等地	
	美党组	47			
	塔甸组	28.93			
	黄草岭组	38.24			
长城系	牛厂坪组	29.47		云南晋宁、东川等地	
	河口群	27.65			

由于前寒武—寒武纪界线附近的绝灭事件, Vandalian 末期—寒武世早期疑源类的膜壳大小由陡山沱期的 30~60 $\mu m$  减小到 10~20 $\mu m$ 。笔者对疑源类 Micryhystridium 分子膜壳和刺体长度进行统计, 编制出前寒武—奥陶纪疑源类 Micryhystridium 分子膜壳和刺体长度的变化曲线(图 3)。从

图 3 可见, Vandalian 末期至早寒武世早期疑源类 Micryhystridium 的膜壳和刺体长度都发生了明显的变小现象, 随后的早寒武世晚期至奥陶纪又逐渐增大、变长。这一现象与 Knoll<sup>[2]</sup> 和 Vidal<sup>[3]</sup> 编制的疑源类在新元古代—寒武纪分异性趋势图吻合。这一研究说明前寒武—寒武纪界线附近的绝

灭事件不仅引起物种数量、疑源类总数的大量减少,而且在物种形态特征(疑源类膜壳大小和刺体长度)上也有明显的影响。而中寒武世末期的绝灭事件对疑源类的形态特征没有明显的影响。关于前寒武—寒武纪界线附近绝灭事件的引起原因有各种观点<sup>[2,19]</sup>,但发生在疑源类化石上的这种不仅物种数量和疑源类总数大量减少,而且在物种形态特征(疑源类膜壳大小和刺体长度)上也有明显变小的现象还有待进一步研究。

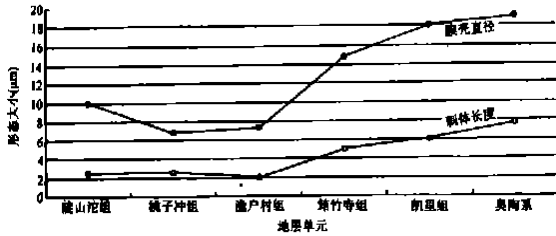


图3 前寒武纪—奥陶纪扬子区疑源类 *Micrystidium* 膜壳直径和刺体长度分布 (据表2文献资料编制)  
1. 膜壳直径; 2. 刺体长度(单位为 $\mu\text{m}$ )

Fig. 3. The curve showing the distribution of diameter of acritarch *Micrystidium* in the Precambrian-Ordovician in the Yangtze region. (from the data and references in Table 2)

## 4 结论

疑源类化石的成种和绝灭过程表现出与早古生代早期后生生物爆炸的一致性。但是,要详细

地了解寒武纪各生物带中疑源类与早古生代初期后生物分异之间的关系还要做大量的工作。现有资料表明,寒武纪浮游植物生态系统不同于低分异的祖先,它已经发生了进化,并且在相对短的时间间隔内发生了分异作用和分化作用。随后生态系统崩溃至近初始水平。

这种特征在晚寒武世生物带内变得更为频繁。因此,Knoll<sup>[2]</sup>认为新元古代—寒武纪浮游植物成种与绝灭作用转变的节拍在加快。寒武纪的研究资料也反映出类似的情况。虽然浮游植物群与后生生物群辐射之间的关系已被初步认识,但它们之间更详细的关系需要更进一步研究。在属级水平上海洋无脊椎动物与疑源类分异性具有密切的镜像关系,将这种特征应用于生物年代地层划分和对比是有一定意义的,以后可在更小级别(种)水平上进行研究,它将是年代地层对比的新方法。

从元古宙到寒武纪,  $\delta^{13}\text{C}$ 、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值变化曲线与生物绝灭、辐射事件有着密切的关系,生物辐射时期,  $\delta^{13}\text{C}$ 、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  呈现高异常;生物绝灭时期,  $\delta^{13}\text{C}$ 、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  呈现低异常;冰期  $\delta^{13}\text{C}$ 、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  也呈现低异常。 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  波动与疑源类种总数、成种速率和绝灭速率成正相关关系,由此我们认为,元古宙—寒武纪的强烈  $\delta^{13}\text{C}$  正、负异常反映原始生产力突变,这与 Hsu 等<sup>[15]</sup>观点是一致的。

## 参 考 文 献

- [1] Knoll A H. The early evolution of eukaryotes: a geological perspective[J]. *Science*, 1992, 256: 622~627.
- [2] Knoll A H. Proterozoic and Early Cambrian protists: Evidence for accelerating evolutionary tempo[J]. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 1994, 91: 6743~6750.
- [3] Vidal G, Moczydlowska M. Biodiversity, speciation, and extinction trends of Proterozoic and Cambrian phytoplankton[J]. *Paleobiology*, 1997, 23(2): 230~246.
- [4] Brasier M D, Magaritz M, Cofield R M, et al. The carbon — and oxygen — isotope record of the Precambrian — Cambrian boundary interval in China and Iran and their correlation[J]. *Geol. Mag.*, 1990, 127: 319~332.
- [5] Yang Jiedong, Sun Weiguo, Wang Zongzhe, et al. Variations in Sr and C isotopes and Ce anomalies in succession from China: evidence for the oxygenation of Neoproterozoic seawater[J]. *Precambrian Research*, 1999, 93: 215~223.
- [6] Montanez I S, Osleger D A, Banner J L, et al. Evolution of the Sr and C isotope composition of Cambrian oceans[J]. *GSA Today*, 2000, 10(5): 1~7.
- [7] Hoffman P F, Kaufman A J, Halverson G P, et al. Neoproterozoic snowball earth[J]. *Science*, 1998, 281: 1342~1346.
- [8] Kaufman A J. Neoproterozoic variations in the C isotopic composition of seawater: stratigraphic and biogeochemical implications[J]. *Precambrian Research*, 1995, 73: 27~49.
- [9] Kimura H, Matsumoto R, Kakuwa Y, et al. The Vendian — Cambrian  $\delta^{13}\text{C}$  record, north Iran, evidence for overturning of the ocean before the Cambrian Explosion[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1997, 147: E1~E7.
- [10] Moczydlowska M. Acritarch biostratigraphy of the Lower Cambrian and the Precambrian — Cambrian Boundary in southeast

Poland J]. *Fossils and Strata*, 1991, 29: 1~127.

- [ 11] Vidal G Moczydlowska M. Biostratigraphical implications of a Chuania—Tawuia assemblage and associated acritarchs from the Neoproterozoic of Yakutia[ J]. *Paleontology*, 1993, 36(2): 387~402.
- [ 12] Valentine J W. The Cambrian explosion[ M]. Bengtson Press Bengtson, 1994. 401~411.
- [ 13] Sepkoski J J Jr. . Proterozoic—Early Cambrian diversification of metazoans and metaphytes[ A]. Schopf J W, Klein C. The Proterozoic Biosphere[ C]. University Press Cambridge, 1992, 553~561.
- [ 14] Brasier M D. The basal Cambrian transition and Cambrian bio—events[ A]. Walliser O H. Global events and event stratigraphy in the phanerozoic[ C]. Springer Press Berlin, 1995, 113~118.
- [ 15] Hsu K J. Mass mortality and its environmental and evolutionary consequences[ J]. *Science*, 1982, 216: 249~256.
- [ 16] 尹磊明. 中国南方陡山沱组大型复杂疑源类的生态学讨论[ A]. 见: 穆西南主编. 中国科学院南京古生物研究所现代古生物和地层学开放实验室年报[ R]. 南京: 南京大学出版社, 1991, 104~109.
- [ 17] 方晓思. 云南昆明—禄劝地区奥陶纪微古植物群及其地层意义[ A]. 中国地质科学院地质研究所, 地层古生物论文集[ C]. 1986, 16: 125~172.
- [ 18] 尹磊明. 吉林浑江、湖北宜昌早奥陶世疑源类[ M]. 北京: 地质出版社, 1995, 1~92.
- [ 19] 尹磊明, 杨瑞东. 贵州台江中寒武世凯里组疑源类[ J]. 古生物学报, 1999, 38(增刊), 66~78.
- [ 20] 尹崇玉. 贵州清镇早寒武世早期藻类化石[ J]. 植物学报, 1992, 34(1): 456~460.
- [ 21] 王福星, 陈乔, 赵霞. 中国西南前寒武纪藻类化石及其它地质意义[ M]. 重庆: 重庆出版社, 1988, 1~127.
- [ 22] 尹崇玉, 高林志. 湖北峡东地区灯影组石板滩段的微体化石[ J]. 地质论评, 1995, 41(3): 197~204.
- [ 23] 罗其玲. 贵州清镇—织金一带震旦—寒武纪跨界地层中的微生物化石的初步研究[ A]. 王砚耕. 贵州上前寒武系及震旦—寒武系界线[ M]. 贵阳: 贵州人民出版社, 1984, 107~116.
- [ 24] 邢裕盛. 云南昆明附近震旦纪及早寒武世微体古植物及地质意义[ J]. 地质学报, 1982, 56(1): 42~49.
- [ 25] 丁莲芳, 李勇, 胡夏嵩, 等. 震旦纪庙河生物群[ M]. 北京: 地质出版社, 1996, 1~146.
- [ 26] 李军, 王烽. 贵州桐梓奥陶系十字铺组疑源类[ J]. 微体古生物学报, 2000, 17(1): 30~38.
- [ 27] 许玩宏. 贵州三都早奥陶世 Arenigian 期疑源类组合特征研究[ M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 2000, 1~182.
- [ 28] 杨瑞东, 尹磊明. 黔东早—中寒武世凯里组疑源类组合及其界线意义[ J]. 微体古生物学报, 2001, 18(1): 55~69.

## STUDY ON THE RELATIONSHIP BETWEEN RADIATION AND EXTINCTION OF PROTEROZOIC AND CAMBRIAN PHYTOPLANKTONS (ACRITARCHS) AND MARINE GEOCHEMICAL EVOLUTION

Yang Ruidong<sup>1, 2</sup>, Wang Shijie<sup>1</sup>, Ouyang Ziyuan<sup>1</sup>, Yin Leiming<sup>3</sup>

(1. The State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002; 2. Guizhou University of Technology, Guiyang 550003; 3. Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

### Abstract

The degradation-resistant organic-walled cell envelopes of acritarchs are the most abundant microfossils in Proterozoic and Cambrian rocks. These microfossils reveal diverse fluctuations that shed light on the nature of the records of primary producers near the Proterozoic/Cambrian boundary. From statistics on known microfossil assemblages in Proterozoic and Cambrian rocks, it is found that the characteristic macrobiotas of the Late Neoproterozoic and the Early, Middle Cambrian blossomed over relatively narrow time ranges. Owing to extinction in the Late Vendian, the number of species decreased to the primary level before the radiation of Neoproterozoic phytoplanktons (acritarchs), followed by the rapid rise of speciation levels in the early Early Cambrian, a quick decrease in the Late Early Cambrian, a rapid rise in the early Middle Cambrian, and extinction in the late Middle Cambrian.

Acritarchs were at the base of the marine trophic chain together with bacteria and other protists that are largely

unrepresentative in the fossil record. For this reason, the rise of diverse Neoproterozoic and Cambrian protistan planktons must have been essential for early marine metazoan differentiation. Indeed, the patterns of total diversity, speciation, and extinction of Neoproterozoic and Cambrian acritarchs clearly mirror those of contemporaneous marine invertebrate fauna at the genetic level.

From  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  values of the Neoproterozoic and Cambrian seas, it is discovered that the patterns of total diversity, speciation, and extinction of Neoproterozoic and Cambrian acritarchs and the evolution of the contemporaneous marine environment are closely related to each other, i. e.,  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  rise during radiation;  $\delta^{13}\text{C}$  is negative, and  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  decreases during extinction. During the glacial period,  $\delta^{13}\text{C}$  is obvious negative and  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  decreased evidently.

**Key words:** marine geochemistry; radiation and extinction; phytoplankton (acritarchs); Proterozoic and Cambrian