

# 华南新元古代宏体化石特征及生物地层序列

唐 烽<sup>1,2)</sup>, 尹崇玉<sup>1,2)</sup>, 刘鹏举<sup>1,2)</sup>, 高林志<sup>1,2)</sup>, 王自强<sup>3)</sup>

1) 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;

2) 中国地质科学院地层学及古生物学重点实验室, 北京 100037;

3) 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

**摘 要:** 华南的新元古代地层(780~542 Ma)保存有许多经典的地层剖面和丰富的宏体化石记录, 一直是我国新元古代, 特别是南华系和震旦(伊迪卡拉)系地层对比的标准区域。本研究重新考察了部分重要的标准剖面 and 化石点, 重点采集了近年来开始研究的云南“江川生物群”, 贵州江口“翁会生物群”的宏体化石, 在总结了前人研究成果的基础上, 集成了最新的研究进展, 综合记录了华南晚新元古代地层中的宏体化石特征, 组合面貌, 据此提出了华南晚新元古代生物地层序列。宏体化石的记录表明在这一时期伴随着显著的气候和环境变化, 发生了一系列重要的生物演化事件, 多细胞的宏观后生动、植物普遍出现了组织分化, 器官形成和发育创新, 以及生物结构和功能的进一步复杂多样化。这种多样化的发展大体可以划分为三个阶段, 分别以震旦(伊迪卡拉)纪的三个宏体化石组合为代表: (1) *Anhuiiphyton—Thallophyca—Paramecia* 宏体藻类化石组合, (2) *Enteromorphytes—Doushantuophyton—Eoandromeda—Sinosporgia* 宏体化石组合, (3) *Paracharnia—Gaojiashania—Cloudina—Longfengshania* 宏体化石组合。由于华南震旦纪宏体化石具有较为独特的组合面貌, 与国外末次冰期后大量出现的伊迪卡拉型生物群(阿瓦隆生物群, 庞德/白海生物群和纳马生物群)如何对比, 还有待深入的研究。本文还重点讨论了华南地区新元古代宏体化石的南、北方对比问题。

**关键词:** 华南; 新元古代; 宏体化石组合; 生物地层序列; 地层对比

中图分类号: P534.3/31; Q913 文献标志码: A 文章编号: 1006-3021(2009)04-505-18

## Neoproterozoic Macrofossil Records in South China and Biostratigraphic Successions and Correlations

TANG Feng<sup>1,2)</sup>, YIN Chong-yu<sup>1,2)</sup>, LIU Peng-ju<sup>1,2)</sup>, GAO Lin-zhi<sup>1,2)</sup>, WANG Zi-qiang<sup>3)</sup>

1) *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;*

2) *Key Laboratory of Stratigraphy and Paleontology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;*

3) *School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083*

**Abstract:** Neoproterozoic strata in South China (780~542 Ma) have preserved a lot of classical sections and abundant macrofossils, and hence long served as the contrast standard of the Neoproterozoic stratigraphy in China, especially of the glacial Nanhuan System and the Sinian (Ediacaran) System. The authors reinvestigated the important sections and fossil sites and collected macrofossils respectively from “Houjiashan Biota” in Jiangchuan, Yunnan Province, and “Wenghui Biota” in Jiangkou, Guizhou Province. On the basis of the above study and other latest research advancements, the authors integrated and synthesized the macrofossil features and assemblages of the Upper Neoproterozoic strata in South China and brought forward the biostratigraphic successions as well. The

本文由中国地质调查局工作项目(1212010611801-3)、中国地质科学院地层学及古生物学重点实验室专项研究基金(JB0705)和中国地质科学院地质研究所所长基金(J0716)及国家自然科学基金项目(40672022)、科技部基础研究项目(2006FY120300-2)联合资助。

收稿日期: 2009-03-25; 改回日期: 2009-07-20。

第一作者简介: 唐烽, 男, 1965年生。博士, 研究员。主要从事古生物学及地层学研究。通讯地址: 100037, 北京西城百万庄大街26号, 中国地质科学院地质所。电话: 010-68999699。E-mail: tangf65@263.net。

macrofossil records indicate that, in company with the notable climate and environmental changes, the multicellular metazoans and metaphytes experienced a series of important biological evolutionary incidents in this period, such as the organ and form differentiations, the growth innovations and the further diversification of biological structures and functions. This kind of diverse developments can be generally divided into three stages represented by three macrofossil assemblages in the Sinian (Ediacaran) Period: (1) the macroscopic algae fossil assemblage *Anhuiophyton-Thallophyca-Paramecia*, (2) the macrofossil assemblages *Enteromorpha-Doushantuophyton-Eoandromeda-Sinospongia*, and (3) the macrofossil assemblages *Paracharnia-Gaojiashania-Cloudina-Longfengshania*. Due to the relatively unique macrofossil assemblages in the Sinian strata of South China, its comparison with the Ediacara-type Biota occurring abundantly abroad in the strata postdating the last glaciation of Neoproterozoic (including the Avalon Biota, the Pound/White Sea Biota and the Nama Biota) remains to be studied in detail in future. The correlations of the Neoproterozoic macrofossils in South China and those in North China has also been discussed in this paper.

**Key words:** South China; Neoproterozoic; macrofossil assemblages; biostratigraphic successions; stratigraphic correlation

我国南方出露的扬子型和华南型的新元古代地层,为典型的台地及台地边缘海沉积。地层序列基本一致,但因处于不同的古陆边缘,大地构造位置略有差别(王鸿祯等,1986),所以赋存其中的新元古代宏体化石群也略具不同的组合面貌(唐烽等,2008,图1)。

华南型新元古代地层广布于华夏(江南)古陆周缘,西北与上扬子浅海沉积区沟通,其下部为厚度较大的磨拉石,复理石沉积,中部为南华大冰期的冰海沉积组合;上部为较深海的硅质岩与碳酸盐岩,钙质泥岩沉积组合,局部地区可见火山岩侵入。区内新元古界普遍遭受浅变质作用,其中的生物化石发现不多。1981年安徽省区域地质调查队在皖南黟县,休宁的蓝田组中部黑色泥质页岩中首次发现丰富的宏体藻类化石,后经多人的研究报道(邢裕盛等,1985;毕治国等,1988;阎永奎等,1992;陈孟莪等,1994a;唐烽等,1997;Yuan et al.,1999,2001),逐步建立和充实了华南型“蓝田植物群”的古生物化石组合。此外,在浙江建德下涯埠,洋安的灯影组上段深灰色薄层粉砂质泥灰岩中还发现了分类不明的微体蠕形动物化石(阎永奎等,1992);在湖南沅陵小烟溪组(灯影组)底部的灰质板状页岩中也有皱节虫科的蠕形动物化石报道(唐天福等,1978)。

扬子型的新元古代地层广泛沉积于扬子地台及其周缘,属盖层性质,普遍不整合于下伏不同时代的地层或岩体之上,岩石一般不变质。下部普遍含一至二层冰碛层,主要由砂岩,粉砂岩组成,底部常为砾岩;上部以浅海泥质岩,碳酸盐岩为主,由台缘缓坡或泻湖相的含磷,含锰的碳质页岩及一些含海绿石的石英砂岩,过渡为几乎全是开阔浅海相的含硅质条带和团块的碳酸盐岩(柳永清等,2003)。扬子区冰碛层之上的震旦(伊迪卡拉)系富含后生

物化石,在许多地方与上覆寒武系呈连续沉积,是研究震旦系及其与寒武系界线的良好地区之一。因此该区的研究历史较长,研究程度亦较高,是“震旦生物群”宏体化石的主要产地(唐烽等,1998)。其中峡东地区是我国震旦系的层型剖面所在地,自1924年李四光等在此研究建立了震旦系的标准层序后,经过长期的系统研究,成为我国南方同时期地层划分与对比的标准。20世纪80年代以来邢裕盛(1983,1985,1989),丁启秀等(1981)曾对该区震旦纪宏体化石进行了研究报道。随后,丁莲芳等(1992,1996),陈孟莪等(1992,1993,1994b)又进行了陡山沱组的专题研究,并建立了以分枝状宏体藻类化石为主的多细胞宏体化石群——“庙河生物群”。该生物群主要产于三峡地区黄陵背斜西翼秭归县庙河村北边的陡山沱组上部黑色粉砂质页岩中。近年来,在中国南方扬子克拉通东南缘又发现了另外一个保存有“庙河型”宏体化石生物群的陡山沱期地层,即贵州江口地区翁会剖面的陡山沱组。与庙河的陡山沱组顶部化石点相似,这个地点也产出以底栖多细胞藻类为主的宏体碳质压膜化石生物群。化石保存于陡山沱组上部黑色泥质页岩中,多数具有明显底栖固着构造和叶状体片状,叉状分枝的宏体藻类化石,并可能有后生动物的宏体化石证据,如多孔动物门的袋状海绵 *Cucullus*(似僧帽管)和腔肠动物门的 *Protoconites*(原锥虫),最早的八辐射动物 *Eoandromeda*(八臂仙母虫)(唐烽,2007;Tang et al.,2008)。目前已经初步识别出9个宏体藻类化石的形态类别,包括较为丰富的棒形藻 *Baculiphyca*,长索藻 *Longifuniculum* 及革辛娜藻 *Gesinella* 等,其化石类型和埋藏方式都与湖北峡东的庙河生物群非常类似(赵元龙等,2004;唐烽等,2008a)。此外,在贵州瓮安,开阳地区的陡山沱组含磷沉积中,曾有

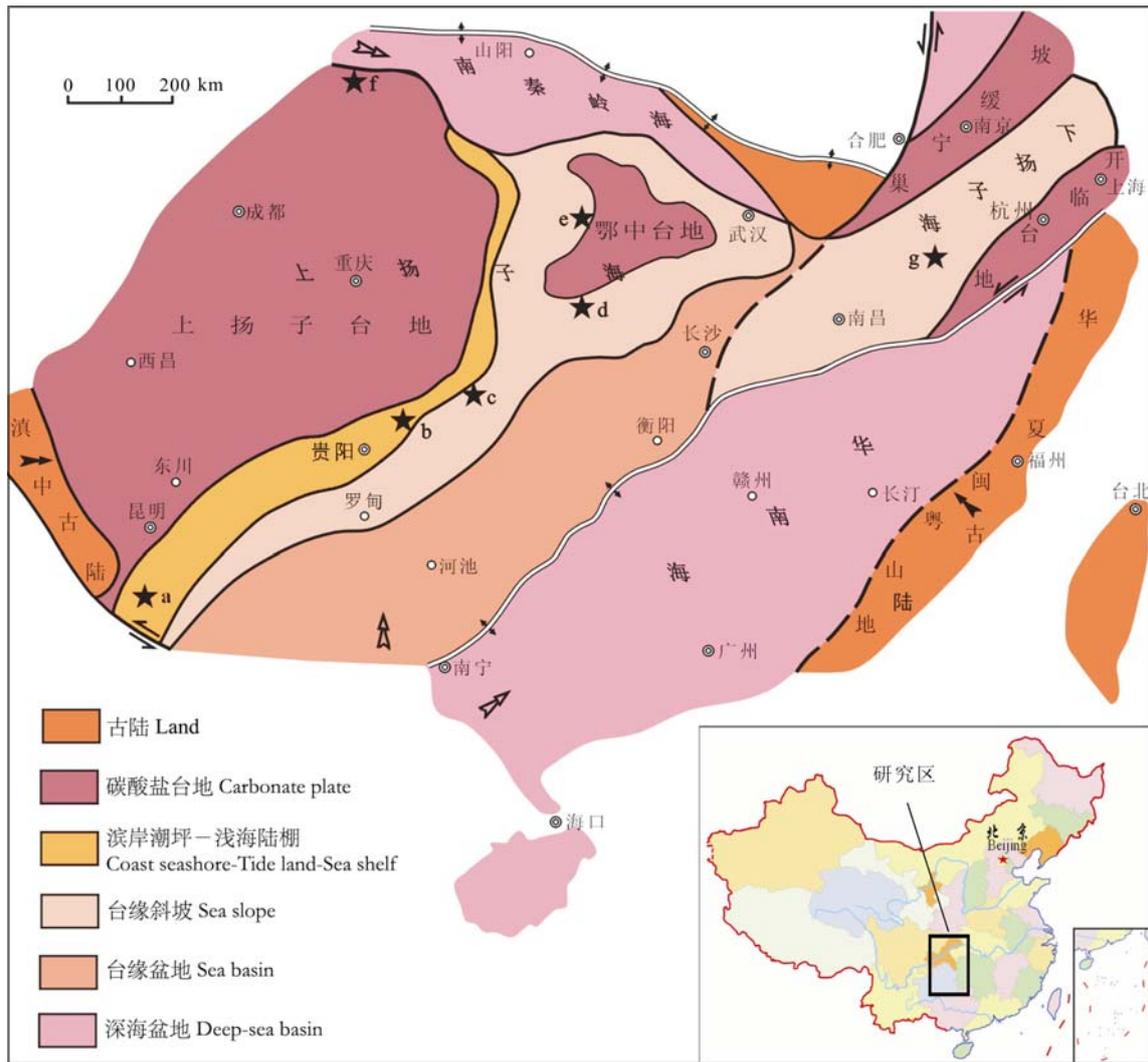


图 1 华南震旦(伊迪卡拉)纪岩相古地理略图及宏体化石群产出位置  
 Fig. 1 Sketch map of the Ediacaran facies and paleogeography in South China, showing the locations of typical macrofossil biota (modified from Wang, 1985 and Xia et al., 1994)

宏观的具组织，器官分化的后生植物红藻类的报道(张昫等, 1995; 袁训来等, 2002)。在“庙河生物群”发现的同时，于扬子克拉通北缘陕西宁强地区上震旦统灯影组高家山段的碎屑岩及灰岩中也采集并建立了“高家山生物群”，代表着生活在晚震旦世晚期的一个独特的过渡型生物群(陈孟莪等, 1982; 张录易等, 1986; 丁莲芳等, 1992; 华洪等, 2001)。与“高家山生物群”相当的还有更早命名的“西陵峡生物群”(陈孟莪等, 1982; 赵自强等, 1988)，产于长江三峡西陵峡区莲沱至三斗坪一带的灯影组石板滩段中。扬子克拉通西南缘滇东晋宁地区的震旦系因与上覆寒武系呈连续的海相沉积，曾是我国南方震旦系与寒武系界线的国际候选层型剖面所在地，在该区及邻近的江川，澄江等地震旦统灯影组旧城段的薄层泥质灰岩夹层中，发现有丰富的宏体藻类

化石(Zang et al., 1992; 唐烽, 2006, 2007)和遗迹化石等。

### 1 华南震旦(伊迪卡拉)纪陡山沱期宏体化石特征

我国南方震旦(伊迪卡拉)系陡山沱组页岩中，保存了以“庙河生物群”为代表的宏体碳质压膜化石群，以大量底栖固着的多细胞藻类化石为主，首次出现分枝的类型，还包含后生动物和海绵动物，可疑的遗迹化石等，化石类型多样，分异显著，代表着新元古代“雪球”冰期之后和寒武纪早期后生动物大爆发前夕地球早期多细胞生物的一次大规模的演化辐射事件。

早震旦世陡山沱期的宏体碳质压膜化石最早发表于 1984 年，朱为庆等首次描述了产自湖北峡

东黄陵背斜西翼庙河地区陡山沱组上部具二歧分叉的宏体碳质压膜藻类化石,命名为中华拟浒苔(*Enteromorphytes siniansis*)(朱为庆等, 1984)。从 20 世纪 90 年代初期开始,产于庙河吊崖坡剖面的陡山沱组近顶部黑色碳质页岩中的“庙河生物群”得到了大量发掘和深入研究。该生物群包含大量宏体碳质压膜化石,由底栖固着的多细胞藻类,推测的后生动物和海绵动物,可疑的遗迹化石组成,以及其他微体化石等多门类生物化石(陈孟莪, 萧宗正, 1991, 1992; 丁莲芳等, 1992, 1996; 陈孟莪等, 1994a, 1994b; Steiner, 1994; 袁训来等, 1995; Xiao et al., 1998)。2002 年, Xiao Shu-hai 等系统记述了庙河生物群中的宏体碳质压膜化石,归并为大约 20 个类别,认为其中的大部分可能与现生的三大高级藻类分支——绿藻,红藻,褐藻有着亲缘关系,属于多细胞的后生藻类植物;此外,至少 5 种类别可能具有动物的属性,其中管状的 *Calyptina* 和锥状的 *Protoconites* 可能为原始的后生动物(Xiao et al., 2002)。

2004 年底,我们在黄陵背斜东南翼,即湖北省秭归县三斗坪镇九龙湾—头顶石新测制了一条南华系—震旦系的连续剖面,新测剖面的南沱组和陡山沱组的沉积层序与其他剖面基本一致,可以对比。在陡山沱组二段中新发现了两个宏体碳质压膜化石新层位(唐烽等, 2005, 图 2, 图 5),较为密集的宏体藻类化石 *Chuarids* 类与 *Tawuia*(唐烽等, 2005, 图 3)保存在其下部的钙泥质页岩夹层中,而个体较大的 *Chuar* 等(唐烽等, 2005, 图 3)和具叉状分枝的宏体藻类化石——拟浒苔 *Enteromorphytes*(唐烽等, 2005, 图 3-12, 21)与可疑的遗迹化石 ? *Cruziana*(唐烽等, 2005, 图 4-1, 3)共同保存在第二段上部的泥质页岩夹层中。这是较低于庙河生物群的宏体化石新层位,也是黄陵背斜东,南翼宏体化石出现的新地点。

与黄陵背斜东,南翼的其他剖面一样,新测剖面中与西翼的庙河生物群产出层位相当的地层,是一套黑色薄层硅泥质页岩,并含大型钙泥质结核,至今尚未发现宏体化石。从目前新发现的化石层位分析,在峡东地区的陡山沱组至少包含三个宏体化石的产出层位(唐烽等, 2005)。该发现为研究和认识新元古代全球冰期后宏体藻类(及可疑的后生动物)的分布和演化提供了重要的古生物学资料;结合近期获得的可靠的陡山沱组锆石 U-Pb 的 SHRIMP II 年龄证据(Yin et al., 2005a, 2005b; Condon et al., 2005)及 C, O 同位素等地球化学资料,新发现的宏

体化石及新层位对于分析新元古代气候及地球化学变化与生物演化之间的相互关系具有重大的意义。

到目前为止,陡山沱期的宏体化石生物群,除峡东地区的庙河生物群外,在我国南方还发现有:(1)安徽休宁蓝田组中的“蓝田植物群”,(2)贵州江口陡山沱组中的“翁会生物群”,均产出以底栖多细胞藻类为主的宏体碳质压膜化石(图 1)。此外,在贵州瓮安以动物胚胎化石闻名的“瓮安生物群”中也产出宏观叶片状,具岛状生殖构造的红藻化石碎片(袁训来等, 2002)和多次分枝状的管状化石(刘鹏举等, 2006)。

### 1.1 陡山沱期庙河生物群的宏体化石特征

迄今为止,峡东地区大量的庙河生物群宏体化石仅产于黄陵北斜西翼长江北岸的湖北省秭归县庙河村吊崖坡剖面,在震旦系陡山沱组近顶部的黑色页岩中,发现丰富的不分枝带状藻体——棒形藻(*Baculiphyca*)和二歧分枝丝状藻体——拟浒苔(*Enteromorphytes*),陡山沱藻(*Doushantuophyton*)等具固着构造的底栖多细胞藻类,还包括:*Anomalophyton*, *Beltanelliformis*, *Konlingiphyton*, *Glomulus*, *Liulingjitaenia*, *Miaohephyton*, *Longifuniculum*, *Jiuqunaoella*, *Protoconites*, *Sinocylindra*, *Calyptina*, *Cucullus*, *Sinospongia*, *Siphonophycus* 等其它的形态类别(丁莲芳等, 1996; 袁训来等, 2002; Xiao et al., 2002)。在庙河地区陡山沱组中尚有少量疑似后生动物和遗迹化石产出,如:简单九曲虫(*Jiuqunaoella simplicis*),环纹杯状管(*Calyptina striata*),似僧帽管(*Cucullus fraudulentus*),小型原锥虫(*Protoconites minor*),标准震旦海绵(*Sinospongia typica*)和八臂仙母虫(*Eoandromeda octobrachiata*)等。其中呈螺旋八辐射的 *Eoandromeda* 极有可能与最早的后生动物之一——栉水母动物具有亲缘关系(Tang et al., 2008; 唐烽等, 2009b)。

庙河生物群中的带状棒形藻(*Baculiphyca taeniata*)叶状体平滑无饰,边缘规则,呈不分枝的带状,底部为圆柱状,连接须根状或团块状的固着构造,是该化石群中较具优势的属种之一。在峡东的庙河生物群中也占据优势,主要保存为两大类:其一为单轴侧分枝的类型,其二为二歧分枝的类型。其中单轴侧分枝的类型以张忠英奇异藻(*Anomalophyton zhangzhongyingi*)为代表,呈单一保存的细长枝体,枝体侧面交互式或螺旋式生出许多毛发状短枝,短枝均不再分枝。二歧分枝类型则由多个属种组成,包含有:屈原陡山沱藻(*Doushantuophyton quyuani*),线状陡山沱藻(*Doushantuophyton lineare*),中华拟浒

苔 (*Enteromorpha siniansis*), 直立崆岭藻 (*Konglingiphyton erecta*)和双叉庙河藻 (*Miaohephyton bifurcatum*)。除中华拟浒苔的藻枝体比较柔细弯曲以外, 其他二歧分枝类型的藻枝体均直立坚挺。陡山沱藻属的藻枝体细丝状, 分枝较为规则, 而屈原陡山沱藻实际上也具有一个明显的主枝, 略呈“之”字型生长, 主枝上叉状生出稀疏的短小侧枝, 侧枝与主枝的宽度区别不大; 线状陡山沱藻, 呈规则的多次二歧分枝, 丝体宽度均匀, 分枝的间距大致相等, 是庙河生物群中常见的类型。中华拟浒苔和直立崆岭藻具有不规则的多级二歧分枝, 藻体为丝状, 窄带状或膜片状。双叉庙河藻在庙河吊崖坡剖面保存很多, 可见分叉的枝体和表面的疣状窝 (Xiao et al., 1998)。裂散长索藻 (*Longifuniculum dissolutum*)是由极细的丝体缠绕成长索状或束状构成, 在末端常见扇状散开, 或呈不规则散开, 一些庙河标本散开的丝体上还观察到可能的二歧分枝。云南中华细丝藻 (*Sinocylindra yunnanensis*)化石则为细长不分枝的带状碳质压膜, 最早发现于云南早寒武世的澄江生物群 (Chen et al., 1991), 在贵州江口的陡山沱组和云南江川伊迪卡拉系顶部旧城段也有发现 (唐烽, 2007; 唐烽等, 2007), 两端钝圆或尖细, 未见固着器。其宽度与文德带藻类 (*Vendotaenids*)相比略细 (Gnilovskaya, 1990), 且均匀规则, 柔软弯曲, 表面光滑无纹饰, 可能为圆筒管状的藻体。缠绕柳林碛带藻 (*Liulingjitaenia alloplecta*)与俄罗斯文德生物群中的文德带藻 (*Vendotaenia*)和基拉索带藻 (*Tyrasotaenia*)一样, 均呈长而直或曲的窄带状 (Gnilovskaya, 1990), 部分化石表面可见纵纹 (邢裕盛等, 1985; Steiner, 1994; Xiao et al., 2002), 但庙河的部分柳林碛带藻表面还保存有螺旋状的皱纹 (Xiao et al., 2002), 而在云南早寒武世“澄江生物群”中产出很多类似的具螺旋条纹的带状化石, 称为圆环抚仙螺旋藻 (*Fuxianospira gyrata*), 并被认为是一种簇生漂浮的管状藻类 (Chen et al., 1996, 1997), 可能与庙河陡山沱期的柳林碛带藻在演化上有继承关系。丝体管球藻 (*Glomulus filamentum*)化石被描述为 5~10  $\mu\text{m}$  直径的纤细丝体或缠绕成束, 或纠结成网散布在层面上组成不规则的宏观可见的群体, 它与产自湘西留茶坡组 (Steiner, 1994)和安徽寿县地区刘老碑组的 *Mucoplagum primitivum* 或八公山小丛藻 (*Fasciculella bagongshanensis* Duan, 1985) (邢裕盛等, 1985; 乔秀夫等, 2001)形态较为相似, 仅丝体粗细和群体大小有所差异, 因而可能为同物异名。

在 20 世纪末的一次野外考察中, 高林志等人曾在庙河对岸的九曲埡剖面的陡山沱组上部层位中发现有分枝状宏体藻类化石, 但未引起重视未及时报道。

2005 年, 在秭归三斗坪的九龙湾剖面震旦 (伊迪卡拉)系陡山沱组中部的灰黑色泥质页岩夹层中, 也发现一块具叉状分枝的拟浒苔 *Enteromorpha* 化石, 这是庙河生物群典型分子首次在长江南岸黄陵背斜东南翼被发现, 藻体大型, 密集丛生, 叉状分枝 3 次以上, 未见固着器保存, 藻枝宽约 0.4 mm, 枝体末端略膨胀, 浑圆状 (唐烽等, 2005, 图 3)。除此之外, 在层面上还发现一件可疑的遗迹化石标本 (唐烽等, 2005, 图 4), 个体较大, 保存长度有 64 mm, 宽约 4 mm, 为平行底层面的印模, 侧缘平直, 穹状突起, 中央具一浅沟, 在标本中线沿浅沟两侧可见很浅的鱼尾状斜纹, 这些形态与我国早寒武世梅树村阶中谊村段和国外早寒武世 Atdabanian 阶底部的二叶形遗迹化石 *Cruziana* 比较相似, 仅长而直的特点与二叶迹不太相符; 其外形大小与南澳大利亚 Rawnsley 石英岩中叶状的伊迪卡拉生物 *Phyllozoon* 和产自巴西的伊迪卡拉型生物 *Corumbella* 也较为类似 (McMenamin, 1998), 只是三斗坪的标本保存的沟纹比较模糊。如果可以进一步证实, 将是两侧后生动物或伊迪卡拉型动物化石在我国峡东陡山沱组存在的有力证据。

## 1.2 陡山沱期蓝田植物群的宏体化石特征

蓝田植物群保存于安徽南部休宁, 黟县地区震旦 (伊迪卡拉)系蓝田组中部的灰黑色粉砂质, 碳质页岩中。1981 年在其中首次发现了宏体藻类化石, 邢裕盛 (1985a)最早报道了这一化石组合, 初步鉴定为后生植物红藻和褐藻类化石。其后, 在该地区产出的宏体碳质压膜化石屡有报道和描述 (毕治国等, 1988; 邢裕盛等, 1989; 阎永奎等, 1992; 陈孟莪等, 1994a; Steiner, 1994; 唐烽等, 1997; 袁训来等, 1995, 2002; Yuan et al., 1999), 并将该化石组合正式命名为“蓝田植物群” (阎永奎等, 1992), 包含有 12 属 18 个种, 代表华南型震旦系与陡山沱组沉积时限相当的地层中的后生植物组合。蓝田植物群除了同样具有明显的固着构造, 分枝和丛状生长的大型底栖藻类化石以外 (唐烽等, 1998), 还包含有大量圆盘状的 *Chuarina* 类化石, 其中部分 *Chuarina* 化石出现分裂的豆荚状保存方式, 曾被认为可能是多细胞藻类生长周期中的生殖囊 (Tang et al., 1997)或分裂胞囊 (Yuan et al., 2001), 可以作为后生植物性分化的宏体化石

证据。1994~1999年,袁训来等人对该生物群进行了系统采集和详细总结,确认该组合具12~15个种一级类别(袁训来等,1995; Yuan et al., 1999)。以丛状生长的不分叉藻丝体 *Anhuiophyton* 和 *Huanshanophyton* 占据优势,也包含具二歧分枝的丝状藻体 *Enteromorphites*, *Doushantuophyton* 和 *Konlingiphyton* 等,以及不分枝的带状藻体 *Baculiphyca*。此外,形态较为独特的气球状,具固着器的 *Flabelliphyton lantianensis* 和扇形,具周期生长环带的 *F. strigata*, 以及呈出芽状,豆荚状或圆盘状(唐烽等,2008,图版 I-10, 16, 17)保存的 *Chuarua* 等类别也较为常见(Tang et al., 1997; Yuan et al., 1999, 2001; 袁训来等, 2002)。

皖南下震旦统蓝田组中至今未发现后生动物化石,大量赋存的是上述高级分化的宏体藻类化石,具固着器官和分枝形态,营底栖固着生活,原地埋藏,以不同发育阶段的单体或群体保存。化石产出层位为高泥质,富含有机质和黄铁矿,微细水平纹层发育的黑色碳质页岩。其 Mo/Mn, V/Ni 比值分析表明,是属于在 H<sub>2</sub>S 缺氧水体中形成的沉积物。其中发现了分泌 Ca 质的红藻类化石 *Cyathophyton simplicis* 的证据(图版 I-23),反映了当时处于较深的静水水域(唐烽等,2008; 李伟新,1982)。因此,在这样的生存环境和沉积环境中应不会保存喜氧的后生动物化石。从化石层位和化石分化程度来看,蓝田组中的宏体藻类生存时代可能略早于峡东庙河陡山沱晚期宏体化石生物的时代。

### 1.3 陡山沱期翁会生物群宏体化石特征

贵州江口地区的翁会生物群是近年发掘并研究的又一个华南震旦(伊迪卡拉)纪陡山沱期化石库。其产地位于新元古界上扬子浅海沉积区的东南缘(图1),在江口翁会剖面的震旦(伊迪卡拉)系陡山沱组上部黑色泥质页岩中产出丰富的宏体碳质压膜化石组合,除大量具有明显底栖固着构造和叉状分枝的宏体藻类化石外,还包括可能的后生动物宏体化石的证据,如八辐射动物 *Eoandromeda*, 袋状海绵 *Cucullus*(似僧帽管)和原锥虫 *Protoconites*。目前已经识别出9个宏体藻类化石的形态类别,总体以具固着构造及叉状分枝的多细胞藻类为主,包括较为丰富的棒形藻 *Baculiphyca*, 长索藻 *Longifuniculum* 及革辛娜藻 *Gesinella* 等。除此之外,还出现了皖南蓝田植物群中常见的扇状藻类化石,表明其层位可能与皖南蓝田组中部的宏体化石出露层位大体相当,略低于峡东地区的典型庙河生物群的产出层位。这为早震旦世陡山沱期的生物地层对比提供了新的宏

体化石依据。

20世纪末,贵州省地质三队的何明华等首先发现这一保存完好,丰富多样的宏体碳质压膜化石点,2004年赵元龙等简要报道了该地区宏体藻类等化石材料,并将这一化石组合与湖北峡东地区的庙河生物群相对比(赵元龙等,2004)。该组合保存了较多的庙河生物群常见分子(唐烽,2007),比如:*Baculiphyca*, *Miaohephyton*, *Enteromorphites*, *Doushantuophyton*, *Glomulus* 和 *Longifuniculum*, 以及数量众多呈膜片状的 *Gesinella*, 均可见盘状,须根状的固着构造保存(唐烽等,2008,图版 I-III)。尤其出露了球囊状的,具有八辐射旋臂的宏体碳质压膜化石——八臂仙虫(*Eoandromeda octobranchiata*)(本文图版 I; Tang et al., 2008; 唐烽等,2008,图版 III-16, 18, 20),与以前报道的发现在庙河地区的曾定名为旋掘迹(*Eilscaptichnus*)的遗迹化石标本(丁莲芳等,1996)比较,两者形态构造一致,应为同一类八辐射动物实体化石。因为后者(*Eilscaptichnus* Li, 1996)命名不规范,被错误地定为遗迹化石,应予以废弃。因此,遗迹化石应为无效名称。通过宏观形态的对比和切片构造的显微观察,认为这类化石可能与早期的腔肠动物或栉水母动物有亲缘关系(Tang et al., 2008),依据目前的化石材料仅宜归属到两胚层动物大类中(Zhu et al., 2008)。这是首次在华南震旦(伊迪卡拉)系陡山沱组中发现完整保存的宏观后生动物实体化石,为揭示后生动物的最早起源和演化提供了重要的宏体化石证据,说明早期辐射动物和螺旋动物在伊迪卡拉纪陡山沱期已经开始分化。最近,在澳大利亚伊迪卡拉纪地层中也发现形态,大小非常相似的印痕化石(Zhu et al., 2008),这说明华南庙河生物群的繁盛时代与澳大利亚伊迪卡拉生物群的时代大体相当。此外,江口地区还发现大量厘米级以上的大型叶片状碳质压膜化石(唐烽等,2008a,图版 II; 唐烽,2007,图 5-10),叶状体呈不分枝的膜片状,长度可达14 cm以上,宽至2.4 cm。此类化石以往在湘西地区的伊迪卡拉系留茶坡组中也有很多发现(Steiner et al., 1992, 1994; 陈孝红等,1999),被定名为湖南革辛娜藻 *Gesinella hunanensis*(Steiner et al., 1992),国外中寒武世布尔吉斯页岩中也保存有类似的碳质压膜化石,但其具体的亲缘关系一直不能肯定(Briggs et al., 1994)。这些标本具有须根状固着构造和分节的现象,据此可以推测这类化石可能属于与现代褐藻门中片藻类形态相近的多细胞藻类的祖先类型。在华北蓟县地区中元古界团山子组中也曾发现不规则的叶片状藻类化石,被认为与片藻类亲



图 2 贵州江口陡山沱组翁会生物群中的部分化石

Fig. 2 Typical macrofossils of Wenghui biota in Doushantuo Formation of Jiangkou, Guizhou Province

a-d, g-i, k-n. 宏体藻类化石; e. 八臂仙母虫 *Eoandromeda octobrachiata* (JK05006) 的正型标本; f. 风化的八臂仙母虫化石; j. 八臂仙母虫的复原图。黑色标尺为 2 mm, 白色为 1 cm。

a-d, g-i, k-n. macroscopic algae fossils; e. holotype of *Eoandromeda octobrachiata* (JK05006); f. Weathering fossil of *E. octobrachiata*; j. reconstruction of *E. octobrachiata*. Scale bars are 2 mm (black) and 1 cm (white).

缘相近, 其记录最长也仅为 3.5 cm(Zhu and Chen, 1995), 因此, 贵州江口产出的这类化石可能是迄今为止在晚前寒武纪地层中所发现的最大的宏体藻类化石。以往仅在安徽蓝田植物群中发现的扇形藻 *Flabelliphyton* 在贵州江口也有出现(唐烽, 2007)。

## 2 华南震旦(伊迪卡拉)纪灯影峡期宏体化石特征

我国南方在震旦纪晚期灯影组主要沉积巨厚的碳酸盐岩或硅质岩。这一时期的典型宏体化石产地有陕西宁强地区震旦系灯影组顶部, 产出矿化的“高家山生物群”(张录易, 1986; 华洪等, 2001), 研究程度很高, 与湖北峡东地区较早发现的上震旦统灯影峡阶的“西陵峡生物群”(赵自强等, 1988)可以对比; 还有云南东部江川地区的伊迪卡拉(震旦)系顶部灯影组旧城段新发现的“江川生物群”(唐烽等, 2006, 2007; 罗惠麟等, 2008); 此外, 在湖南桃源地区震旦系上部的硅质页岩层中, 也发现有“武陵山生物

群”(陈孝红等, 1992; Steiner, 1994)。

由于南华纪广泛发生的冰川活动, 冰后期气候普遍变暖, 震旦纪早期(陡山沱期)受到冰融和海侵的影响, 陆内, 陆缘(大陆斜坡和滨海潮间带)碎屑物的剥蚀加剧, 致使陡山沱期地层以碳酸盐岩与碎屑岩互层为主, 深水或暖水区域出露硅质岩结核或条带, 至灯影峡期的地层则以广泛稳定的碳酸盐岩或硅质岩沉积为主; 海水中富集了各种营养元素, 如 N, P, K, Ca, B, I 等, 以及较为丰富的 C, O 含量, 具备了多细胞生物复苏和繁盛的条件; 现有的古地磁资料也表明, 华南地区震旦系陡山沱组, 灯影组沉积古纬度属于中, 低纬度地区 9°-20°(Li et al., 2001), 是红藻, 绿藻和褐藻等多细胞藻类适宜分布的区带; 古生态及埋葬环境的分析对比, 也反映了华南地区在陡山沱期曾形成过一些局限滞留海盆(如: 湖北峡东庙河地区, 安徽休宁蓝田地区和贵州江口翁会地区等), 成为我国“震旦生物群”最佳的生存和保存地点(唐烽等, 1998)。其数量之丰富, 门

类之众多使庙河生物群, 蓝田植物群等成为同时期后生物群中集大成者。由于底栖固着分枝的高级藻类大量分化繁衍, 占据了海底生境, 且处于相对滞流还原的环境, 所以, 如南澳大利亚伊迪卡拉动物群中大型固着的叶状体后生动物 *Rangea* 等化石则相当罕见, 目前仅在陡山沱组近顶部发现螺旋八辐射的 *Eoandromeda octobrachiata*(八臂仙母虫)(Tang et al., 2008; Zhu et al., 2008), 在灯影组石板滩段发现 *Paracharnia dengyingensis*(灯影拟恰尼虫, 丁启秀等, 1981; Sun, 1986), 这些被确认与伊迪卡拉动物群的软躯体后生动物有关联。

### 2.1 灯影峡期高家山生物群的宏体化石特征

高家山生物群分布在陕西宁强地区高家山等地, 处于扬子地台的西北缘(华洪等, 2001, 图 1), 产于震旦纪晚期的灯影组高家山段, 在下部的碎屑岩和上部的灰岩层中都能发现(丁莲芳等, 1992)。其中宏体藻类化石主要产在高家山段中-上部灰褐色粉砂岩中; 软躯体后生动物化石, 如蠕虫及类水母(?)等也主要发现于高家山段的粉砂岩中, 但多数呈黄铁矿化铸型; 后生动物遗迹化石多层分布, 在高家山段的黄绿, 灰褐, 灰黑色粉砂质泥岩及黑灰色灰岩层面上均有发现。

高家山生物群宏体化石组合经系统研究自下而上可以划分为 3 个化石组合带(华洪等, 2001, 图 2), 即: 1) 以蠕形动物爬迹为代表的 *Shaanxilithes-Helminthopsis* 组合带; 2) 以锥管虫类和瓶状化石为主, 并见大量软躯体蠕形动物和宏体藻类的 *Conotubus-Gaojiashania-Protolagena* 组合带; 3) 以多种管状骨骼化石共生为特征, 并伴有杯(钵)状, 分枝管状及球状化石等的 *Sinotubulites-Cloudina* 组合带, 代表了高家山生物群鼎盛时期的产物。进一步的研究揭示了高家山生物群是迄今为止地球上所发现的最早且最为多样化的骨骼化石组合(华洪等, 2001)。

### 2.2 灯影峡期西陵峡生物群的宏体化石特征

与“高家山生物群”相当的是湖北峡东地区上震旦统灯影峡阶的“西陵峡生物群”, 其化石主要盛产于我国震旦系层型剖面的灯影组石板滩段薄层状碳酸盐岩中(赵自强等, 1988), 以产出后生动物化石 *Paracharnia*(拟恰尼虫)和丰富的长带状藻类化石 *Vendotaenia*(文德带藻)等为特征, 分别与国外“庞德”和“白海”生物群(560 ~ 550 Ma)的典型叶状体化石 *Charnia* 和藻类化石 *Vendotaenia* 特别相似(Sun, 1986; Gnilovskayja, 1990)。但灯影组的时限被推定为 551 Ma 至 543 Ma(Condon et al., 2005; Yin

et al., 2005b)。

### 2.3 灯影峡期江川生物群的宏体化石特征

在我国云南东部江川地区震旦系顶部灯影组旧城段新近报道了丰富多样的宏体化石群——“江川生物群”(唐烽等, 2006; Tang et al., 2007, 2008; 罗惠麟等, 2008)。云南东部位于扬子地区西南缘, 是震旦(伊迪卡拉)系发育的典型地区, 也是中国震旦系与寒武系界线层型剖面所在地(罗惠麟等, 1984; 陈均远, 2004)。继 1984 年在云南澄江帽天山发现早寒武世的宏体化石群——“澄江动物群”以来, 滇东地区一直是研究末前寒武系与寒武系界线层型, 以及“寒武纪大爆发”和此前生物演化事件的热点地区(罗惠麟等, 1984, 1988; Chen et al., 1997; 陈良忠等, 2002; 陈均远, 2004)。其中, 江川, 晋宁地区的震旦系广泛出露, 发育完整, 与峡东地区能很好地对比(罗惠麟等, 1988)。早在 1985 年, 宋学良等就在该地区震旦系顶部的渔户村组旧城段中部发现了丰富的宏体藻类化石, 邢裕盛等(1985)和罗惠麟等(1988)都曾对此有过简短报道, 但有关的化石材料一直未予详尽描述(表 1)。Zang (1992)记述了采自邻近的澄江地区渔户村组旧城段和白岩哨段的部分宏体藻类化石。

唐烽等 2005 年详细测制了江川清水沟磷矿侯家山剖面的灯影组旧城段至白岩哨段, 其中旧城段的岩性主要为厚薄互层的粉晶白云岩夹白云质和泥质粉砂岩, 丰富的宏体藻类化石呈碳质压膜保存, 产出于旧城段中, 上部数层灰黑色薄层状含白云质, 泥质石英粉砂岩夹层中。化石产出层位风化后常呈黄灰, 灰白色, 具水平微层纹, 上覆的薄层粉屑白云岩可见变形层理(唐烽等, 2007, 图 3), 反映出潮间砂泥坪至潮下低能的斜坡相沉积环境(罗惠麟等, 1988)。一般而言, 在此过渡环境中产出的宏体化石形态的分异度很高(彭善池, 2000)。此外, 在晋宁王家湾剖面的旧城段中也采集到少量的宏体藻类化石。

江川地区旧城段的宏体化石群, 除了丰富的小圆盘状 *Chuarua* 和椭圆形的 *Shouhsienia* 属化石(图版 II, 20-17)和长条带状的 *Vendotaenia* 与 *Tyrasotaenia* 类化石以外, 以形体较大的短条状的 *Tawuia* 类和鞋履状的 *Pumilibaxa* 类(图版 II, 1-19), 以及具固着构造的底栖多细胞藻类龙凤山藻科(*Longfengshaniaceae*)(唐烽等, 2006, 图版 I)和呈丝状保存的化石类群占据优势。另外, 还有一些形态奇特, 亲缘关系不明的宏体化石(唐烽等, 2007), 该组合与华南陡山沱组的宏体化石组合存在明显的差

别。长带状的 *Vendotaenia* 藻类化石和灯影组石板滩段的可以对比, 但显然保存了更丰富的宏体藻类化石类别, 以及后生动物的线索, 比如新发现的翼状化石和带刺的长蛹状化石(唐烽等, 2007, 图 5-10, 11)。最近, 唐烽等(2006)依据形态特征记述了产自江川旧城段不同形态的具叶状体和固着构造分化的龙凤山藻科 (*Longfengshaniaceae*)化石(唐烽等, 2006, 图版 1), 并与华北燕山地区骆驼岭组(长龙山组)(杜汝霖等, 1982, 1985, 1986), 北美小达尔群(Hofmann, 1985)和云南海口(Xu, 2002)寒武系底部产出的具明显不分枝叶状体或茎状物, 且具固着构造分化的相似化石进行了对比(唐烽等, 2006, 表 1), 计包含修订后的龙凤山藻科共 2 属 6 种(cf. *Longfengshania ovalis* Duan et Du, 1985; cf. *Longfengshania spheria* Du et Tian, 1986; *Jiangchuania taeniophylla* Tang et al., 2006; *Longfengshania fusiformis* Tang et al., 2006; cf. *Longfengshania elongata* Duan et Du, 1985; *Longfengshania cordata* Xu, 2002)(邢裕盛等, 1987; 杜入霖等, 1986; 唐烽等, 2006); 另外, 还描述了部分具有不同类型固着构造的底栖藻类和归属不明的宏体化石类型(唐烽等, 2007)。本地区曾经报道的 *Chuarua*, *Tawuia*, *Pumilibaxa*, *Vendotaenia*, *Tyrasotaenia* 等 5 个属, 以及在峡东地区“庙河生物群”发现过的长索藻 *Longifuniculum* 属(唐烽等, 2007, 图 4-5)和分枝藻类在江川的组合中均有少量发现。目前, 该宏体化石组合的分类特征和生物属性仍在进一步研究中。

具骨骼动物化石出现之前, 除软躯体动物的印痕, 遗迹化石和蠕形动物化石以外, 惟一肉眼可见的实体生物化石就是宏体藻类化石。近 30 年以来,

在中国发现并报道的新元古代宏体藻类化石产地大多位于我国北方和南方活动区, 产出层位集中在青白口系和震旦系下部陡山沱期地层中。而华南扬子地区出露的震旦系上部地层中, 仅在峡东地区灯影组石板滩段发现有文德带藻类化石。另外在滇东的晋宁, 江川, 澄江地区的渔户村组旧城段和白岩峭段曾报道过少量的宏体藻类化石(邢裕盛, 1985; 罗惠麟等, 1988; Zang, 1992), 但一直没有详细化石组合和新类别的记述(表 1)。笔者在华南滇东地区旧城段最近发现的形态多样的宏体藻类化石组合(唐烽等, 2006, 2007)补充了扬子地区代表伊迪卡拉纪陡山沱期后生生物首次辐射的“庙河生物群”与早寒武世后生动物大爆发之间的宏体化石材料, 丰富了我国震旦纪晚期的宏体化石内容, 对于揭示中国伊迪卡拉纪生物群面貌及这一地质时期地层的划分对比具有重要意义, 同时也进一步表明伊迪卡拉纪末期存在后生植物的多样化发展。可以说, 后生植物和浮游微生物在前寒武纪末期的共同繁盛, 为早寒武世的动物大爆发奠定了生态基础。

#### 2.4 “武陵山生物群”的宏体化石特征

在湖南西部桃源地区与灯影组可以对比的留茶坡组(在相邻的黔东北地区称为老堡组)中部也曾发现数量众多的宏体碳质压膜化石(Steiner et al., 1992; Steiner, 1994; 陈孝红等, 1999), 曾被命名为“武陵山生物群”, 但一直未引起广泛的关注。

该生物群含有丰富的宏体藻类化石, 其中保存最多的是大型叶状体藻类化石 *Gesinella*(革辛娜藻), 化石组合面貌(陈孝红等, 1999), 与邻近的贵州江口翁会陡山沱组上部产出的翁会生物群(唐烽等, 2008)

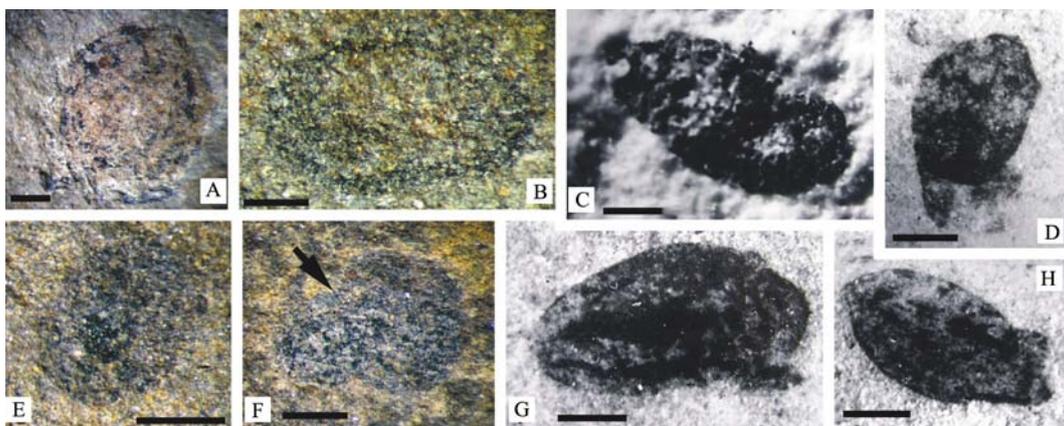


图 3 云南东部江川地区震旦系顶部灯影组旧城段 *Chuarua* 类化石  
 Fig. 3 *Tawuia*-like and *Chuarua*-like macrofossils from the uppermost the Jiucheng Member, the Sinian Dengying Formation in Jiangchuan area, Eastern Yunnan, South China  
 A-H. 形态各异的 *Chuarua*、*Shouhsienia* 化石。比例尺为 1 mm。  
 A-H. The diverse macrofossils of *Chuarua* and *Shouhsienia*. Scale bars are 1 mm.

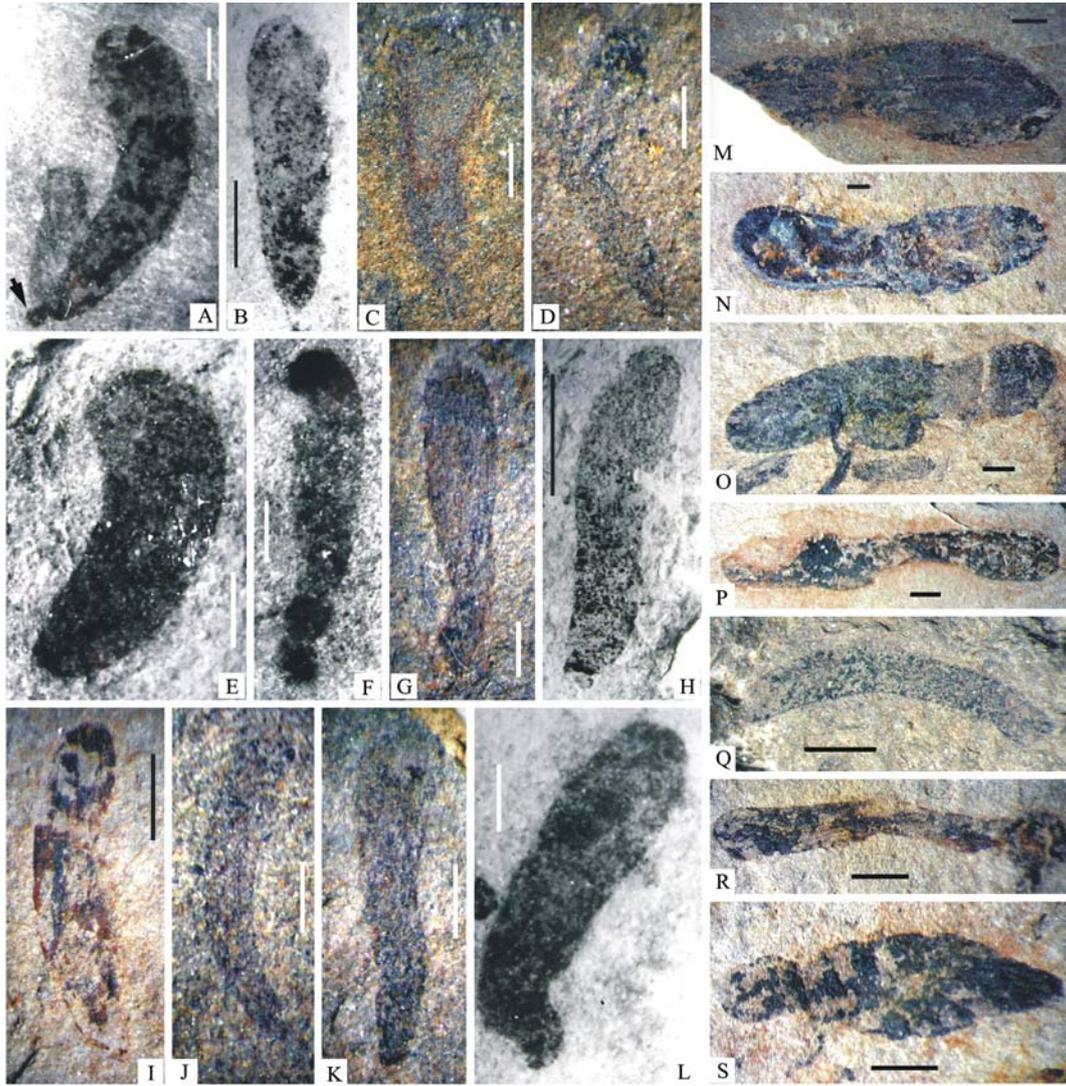


图 4 云南东部江川地区震旦系顶部灯影组旧城段 *Tawuia* 类化石

Fig. 4 *Tawuia*-like and *Chuaria*-like macrofossils from the uppermost Sinian Jiucheng Member, Dengying Formation in Jiangchuan area, eastern Yunnan, South China

A-S. 形态和大小差异很大的 *Tawuia* 类化石。黑色标尺为 2mm；白色标尺为 1mm。

A-S. The diverse macrofossils of *Tawuia* in size and morphology. Scale bars are 2mm (black) and 1cm (white).

极为相似，据此推断两组合的沉积时代可能大体相当。由于该地区至今缺乏可靠的年龄数据和较为完整的地层剖面，以往的研究也未给出相关地层层序的对比资料，所以，湘西武陵山地区所谓的“留茶坡组”是否与峡东的灯影组可以对比，其中的宏体生物群是否属于灯影映期还有待进一步深入研究。

### 3 华南震旦纪宏体化石的生物地层序列

我国震旦纪多细胞生物群的研究，无论在动物方面还是在植物方面近二十年来都取得了突破性的进展。继早期开始研究的灯影组“西陵峡生物群”，“高家山生物群”和蓝田组“蓝田植物群”以后，又有许多的化石产地和层位被发现，陆续建立了陡山沱

组的“庙河生物群”，“瓮安生物群”和灯影组顶部的“宽川铺生物群”，以及贵州江口陡山沱组的“翁会生物群”，云南江川灯影组旧城段的“江川生物群”和湘西桃源留茶坡组的“武陵山生物群”，不断丰富了震旦纪地层中的宏体生物群内容，为我国新元古代，特别是伊迪卡拉(震旦)纪的生物地层对比提供了宏体化石方面的确凿证据。

#### 3.1 *Anhuiphyton*—*Thallophyca*—*Paramecia* 宏体藻类化石组合

*Anhuiphyton* 产于与华南峡东震旦系陡山沱组相当的安徽休宁蓝田组中部的“蓝田植物群”中，是该群的优势属种。“蓝田植物群”多见丛状生长的不分叉藻丝体 *Anhuiphyton* 和 *Huanshanophyton*，同时

也出现“庙河生物群”中的典型分子,如:具有二歧分枝的丝状藻体 *Enteromorphites*, *Doushantuophyton* 和 *Konlingiphyton* 等,以及不分枝的带状藻体 *Baculiphyca*。此外,形态较为独特的气球状,具固着构造的 *Flabellophyton lantianensis* 和扇形,具周期生长环带的 *Flabellophyton strigata*,以及呈圆盘状或豆荚状保存的 *Chuararia* sp.等类别也较为常见(Tang et al., 1997; Yuan et al., 1999, 2001; 袁训来等, 2002)。其中,扇形的 *Flabellophyton* 的藻体可见钙化保存,被推测为钙质红藻。

而在贵州瓮安产出的磷酸盐化保存的陡山沱组“瓮安生物群”(大约为 600~580 Ma)中曾发现大量具有类似现生红藻的“岛状”生殖构造——“果孢子囊”和(假)薄壁组织的宏观膜状碎片,如: *ThallopHYCA* 和 *Paramecia*(Zhang and Yuan, 1992),可能属于具组织,器官分化的后生植物红藻类(Zhang et al., 1998; 袁训来等, 2002)。而且,藻丝体不分叉且丛状生长的种类在现生的绿藻和红藻中比较常见,属于较为原始的类型(刘志礼, 1990; Graham et al., 2000)。而丛状和分叉的宏体藻类化石在贵州中寒武世的“凯里生物群”中均有报道(杨瑞东, 2001)。因而,这一组合可能以绿藻和红藻属性,不分枝且丛状生长的宏体藻类化石为主,分布于“蓝田植物群”和“瓮安生物群”所赋存的化石层位中,推测为震旦纪陡山沱中期,略老于“庙河生物群”的沉积时代。

此外,在峡东地区庙河生物群出露层位之下近年来也同样发现有两层宏体藻类化石的富集层位。黄陵背斜东南翼新近测制的三斗坪九龙湾剖面的南沱组和陡山沱组沉积层序与庙河生物群产地——黄陵背斜西翼的庙河村剖面相比,地层层序基本一致,可以对比。在该剖面上,具叉状分枝的宏体藻类化石——拟浒苔 *Enteromorphites* 和个体较大的 *Chuararia* 等以及可疑的遗迹化石 *Cruziana* 共同保存在陡山沱组中部的泥质页岩夹层中,而较为密集的宏体藻类化石 *Chuarids* 类与 *Tawuia* 保存在陡山沱组下部钙泥质页岩夹层中(唐烽等, 2005)。这两层宏体藻类化石层位大体对应于陡山沱组中两次较大的 C 同位素负漂移的位置,反映了冰期之后多细胞生物的逐渐复苏并趋于繁盛的过程(Tang et al., 2006)。最新的微体化石证据也表明,在峡东黄陵背斜北翼的晓峰河地区,紧邻冰期沉积之上也发现有瓮安生物群中动物胚胎化石的内容(Yin et al., 2007)。因此,在华南长达 80~90 Ma 的陡山沱期地层中进一步研究细分生物化石组合是完全有可能的。

### 3.2 *Enteromorphites—Doushantuophyton—Eoandromeda—Sinospongia* 宏体化石组合

该组合为典型的“庙河生物群”分子,主要以分枝的多细胞藻类化石为主,还包含不分枝的带状藻体 *Baculiphyca*(棒形藻)及少量其它丝状藻类和疑似原始后生动物海绵类的化石 *Sinospongia*(中华海绵)。

尤其在包含有同样分枝状宏体藻类化石的贵州江口庙河型生物群中,发现了完整的螺旋八辐射的实体碳膜化石八臂仙母虫(*Eoandromeda octobranchiata*)(图 1),可与南澳大利亚“伊迪卡拉动物群”中相似的辐射状印痕化石进行对比(Tang et al., 2008; Zhu et al., 2008),基本可以确定华南陡山沱组顶部产出“庙河生物群”的时代相当于南澳大利亚“伊迪卡拉动物群”繁盛的早期阶段(570—550 Ma)。由于辐射对称动物为伊迪卡拉动物群的典型类别之一,本次在相当于庙河生物群的层位首次发现八辐射螺旋动物的实体化石,为我国震旦纪陡山沱晚期的庙河生物群与澳大利亚伊迪卡拉生物群的对比提供了可靠的宏体化石依据。

分枝的多细胞藻类化石是华南伊迪卡拉(震旦)纪陡山沱期地层中首次出现的类型,在峡东和黔东北的庙河生物群中都是占优势的种类,出现了两大类:一类为单轴侧分枝的类型,另一类为二歧分枝的类型,显示出多细胞藻类更趋复杂的形体特性,表明这一组合与“蓝田植物群”和“瓮安生物群”所代表的第一组合相比更为进步。

### 3.3 *Paracharnia—Gaojiashania—Cloudina—Longfengshania* 宏体化石组合

这一组合以华南灯影峡期的“高家山生物群”,“西陵峡生物群”,以及云南东部旧城段“江川生物群”和湘西留茶坡组“武陵山生物群”为代表,地层分布为湖北峡东灯影组石板滩段和白马沱段,陕西南宁强灯影组高家山段,云南江川灯影组旧城段和湘西武陵山留茶坡组。其中,陕西南宁强的“高家山生物群”研究最详, *Gaojiashania* 和 *Cloudina* 均为该生物群中的典型分子,与它们共生的还有蠕形动物 *Ningqiangella* 和爬迹 *Shaanxilithes*。但结合在贵州清镇桃子冲组发现的保存精美的 *Shaanxilithes*,认为其特征与陕南高家山生物群中的相同分子基本一致,并与南澳的“可疑构造”在形态上比较相似,据此推断桃子冲组下部的下部可与高家山段对比,也是该组合的分布地层之一。同时通过对 *Shaanxilithes* 的深入研究,排除了其为遗迹化石或蠕形动物的可能性,而推测它更可能是一类钙化的藻类化

石碎片(华洪等, 2004)。

最近报道的云南江川灯影组旧城段龙凤山藻科化石(*Longfengshaniaceae*)与华北燕山地区骆驼岭组(长龙山组)的相似分子相比, 组成和结构明显复杂得多。结合共生的其它多样化的碳质压膜化石, 可以认为旧城段出现的生物群的演化水平更高, 与“高家山生物群”的生存时限相当。

*Cloudina* 和 *Paracharnia* 以及丰富的长条带状 *Vendotaenia* 与 *Tyrasotaenia* 藻类化石分别出现在湖北峡东灯影组白马沱段和石板滩段, 及陕西宁强灯影组高家山段。根据上述宏体化石的组合特征, 将“西陵峡生物群”和“高家山生物群”与俄罗斯的“文德生物群”进行对比, 并与南澳大利亚伊迪卡拉纪晚期生物群赋存的时代(550~543 Ma)相比较。

实际上, 上述我国华南震旦纪宏体化石的第 2 和第 3 组合, 具有较为独特的生物组合面貌, 尽管其中伊迪卡拉生物群的典型分子发现不多, 但化石组合以多细胞藻类为主, 兼有蠕形动物、辐射动物化石和矿化的管状化石等, 具有丰富多样, 分异显著的特性。关于伊迪卡拉纪宏体生物地层序列, 国外一般认为最早的伊迪卡拉型生物出现在大约 575 Ma 之后, 大致可以分为三个阶段。第一阶段以加拿大纽芬兰半岛 Gaskiers 冰期(580 Ma)之后出现的“阿瓦隆(Avalon)生物群”为代表, 时限大约在 575~560 Ma。第二阶段以澳大利亚、俄罗斯和加拿大发现的“庞德”或“白海”生物群为代表, 时限大约为 560~550 Ma。第三阶段以非洲纳尼比亚发现的“纳马生物群”为代表, 时限大约为 550~542 Ma。这些生物群与我国华南发现的宏体化石组合不同在于它们以伊迪卡拉型生物化石为主。因此, 本文所述及的震旦纪宏体化石第 2 组合和第 3 组合如何与上述三个阶段进行对比还有待进一步深入研究。

#### 4 新元古代宏体化石地层对比及其地层意义

现有资料表明, 宏体化石(包括藻类和动物)为新元古代最重要的古生物资料, 是建立新元古代生物地层序列和地层对比的重要依据。近年来, 虽然诸如淮南生物群, 瓮安生物群, 庙河生物群, 蓝田生物群, 高家山生物群等新元古代古生物化石群备受国内外古生物学家的关注。但是, 由于以往的研究多集中在少数化石产地和层位上, 比较偏重追求单一古生物群资料的发现和挖掘, 导致我国长期存在新元古代地层的南、北方对比问题研究严重滞后。

因此, 本文突出了生物地层学方面的研究, 在认真分析前人资料的基础上, 点、面结合, 特别注重各个生物群之间横向和纵向的关系和变化规律。选择华南, 华北关键地区和长期争论的焦点问题, 对两地区近年来有突破性进展的宏体化石生物群都进行了深入研究, 力争建立相关地层南、北对比的古生物学桥梁。

本文作者首先重点研究了云南江川旧城段宏体生物群, 以期我国的南、北方生物地层对比提供宏体化石的依据。江川宏体化石组合中数量较多的小圆盘状 *Chuarina* 与 Walcott(1899)描述的产于美国亚利桑那州查尔群的 *Chuarina circularis* 形态相似, 椭圆形的 *Shouhsienia* 和短条状的 *Tawuia* 化石分别与 Hofmann(1979)描述的产于加拿大西北麦肯奇山脉小达尔群的 *Moriana? antiqua* 和 *Tawuia* 形态相似。但滇东发现的圆盘状标本平均大小在 1~6 mm 之间, 与国外和华北燕山地区的相比较小, 表面大多平滑无纹饰, 个别标本具边缘环纹, 化石多呈星散状分布于层面上, 很少互相叠覆。此类小圆盘状化石在瑞典、印度、俄罗斯、伊朗等地前寒武纪地层中曾陆续发现。江川组合中同样丰富的长条带状的 *Vendotaenia* 和 *Tyrasotaenia* 类化石与曾发现于前苏联列宁格勒地区文德系的带状化石 *Vendotaenia* 和 *Tyrasotaenia* 可以对比(Gnilovskaja, 1990)。短条状的 *Tawuia* 化石出现巨型化, 个别标本中央缢缩, 与徐淮地区较小的鞋履状的 *Pumilibaxa* 相似, 这类化石形体巨大, 宽达 6~8 mm, 长达 25~30 mm, 为其它化石产地和层位所罕见(唐烽等, 2007, 图 5); 具叶状体和固着构造分化的 *Longfengshaniaceae* 科化石也有大量产出, 与华北燕山地区骆驼岭组(长龙山组)(杜汝霖等, 1982, 1985, 1986), 北美小达尔群(Hofmann, 1985)产出的宏体化石, 同样具有明显的不分枝叶状体, 茎状物和固着构造的分化, 对比结果表明, 尽管作为科, 属的形态特征基本一致, 但是江川出现的该科化石更加复杂多样, 演化水平更高(唐烽等, 2006, 2007; Tang et al., 2007)。

其次, 本文作者还对贵州江口近年新发现的庙河型宏体生物群进行了重点研究和对比(唐烽等, 2008), 并取得了重大突破, 首次在相当于“庙河生物群”的层位发现了八辐射螺旋动物实体化石——“八臂仙母虫”(新属, 新种)(Tang et al., 2008)。这一发现不仅重新认定了“庙河生物群”中的八旋遗迹化石为八辐射螺旋动物化石的真实属性, 而且由于辐射对称动物为典型伊迪卡拉动物群的重要成员之

一, 在南澳大利亚 Rawsley 石英砂岩层中最近也发现了螺旋八辐射的印痕化石(Zhu et al., 2008), 从而为我国华南震旦纪陡山沱晚期出现的生物群与国际公认的澳大利亚典型伊迪卡拉生物群对比提供了重要的化石依据。

近来, 本文作者也重点考察了华北克拉通东缘的新元古代地层, 除了搜寻其中可供测年的火山岩夹层外, 还重点采集了部分经典剖面的宏体化石。

从目前的研究程度看, 华北克拉通东缘可能是解决新元古代南, 北方地层对比问题, 获得重要突破的地区之一, 该地区新元古代生物地层学研究也是本文作者近年来重点关注的领域之一。华北克拉通东缘系指我国华北东部呈 NNE 向展布的胶辽徐淮地区(唐烽等, 2005)。该区新元古代地层普遍发育碳酸盐岩和碎屑岩混合沉积相, 该套地层中含有丰富的生物化石, 特别是类型多样的宏体生物化石几乎在所有的粉砂岩和页岩夹层中都有产出, 对于研究该时期多细胞后生生物的早期演化具有重要的古生物学和生物地层学意义, 使胶辽徐淮地区一直被认为是解决扬子与华北克拉通震旦系及南华系对比的关键地区之一(唐烽等, 2009)。

胶辽徐淮地区新元古代沉积了一套下部碎屑岩为主, 上部碳酸盐岩为主的滨海至浅海相地层, 其中的辽南和苏皖北部地区多处于近 EW 向的中, 低纬度位置, 受古构造作用(古郯庐断裂等)的影响, 呈两端波动的宽带状分布, 尤其至后期碳酸盐岩沉积期, 东端吉南, 辽东和中部的鲁中, 苏北及淮北地区的多数层位, 在西端淮南地区大多缺失, 徐州及皖北地区的震旦系与下古生界为自鲁中向西推覆位移的一系列盖层岩片, 凤台砾岩可能应为构造成因的前缘碎屑堆积。因蚀源区不尽相同及辽南, 淮南地区长期处于较为稳定, 营养丰富的台地边缘浅海沉积, 因而, 刘老碑组及九里桥组中的“淮南生物群”和长岭子组及南关岭组中的“辽南生物群”发育的主要层位中均产出个体相对较大的宏体化石。

不过, 由于与华南地区处在不同的构造古地理区域和不同的生命演化阶段, 宏体化石的产出形态不同, 尤其是宏体藻类化石。胶辽徐淮区多具圆形, 棒形或弯曲成“U”形(马蹄形)等类型, 偶见丛状保存, 目前未见明显的分枝类型。而在华南(扬子)地区除常见圆形, 条带形外, 还出现众多分枝状及假膜状类型的高级藻类化石, 具有盘状或须状的固着器官, 和确切的生殖器官化石。本文作者之一唐烽曾在辽南的营城子组发现分枝状碳质压膜化石的碎片, 可

作为应用宏体藻类化石将华北克拉通东缘与华南(扬子)地区相关地层进行对比的线索之一。

可以说, 随着前寒武纪地层的深入研究, 我国在新元古代宏体藻类化石研究方面已取得很大进展。在前寒武纪地层中宏体藻类化石的发现地点和描述的种类方面已居世界前列。目前, 我国新元古代地层中发现的宏体化石中, 如澳大利亚, 北美和欧洲发现的伊迪卡拉型软躯体后生动物印痕化石甚少, 而且已有的叠层石属种与古, 中元古代的区别不明显, 另外, 颇具争议的蠕形动物化石仅见于震旦系。因而, 宏体藻类化石的发现与研究在新元古代地层研究和对比中占有特殊重要的地位。

华南震旦(伊迪卡拉)系的宏体藻类化石主要赋存在该系的下部地层, 分别出露在黔东的江口地区和鄂西峡东的庙河地区陡山沱组的上部和近顶部, 及皖南休宁地区的蓝田组中部(赵元龙等, 2004; 丁莲芳等, 1996; Xiao et al., 2002; 毕治国等, 1988; Yuan et al., 2001), 还有湘西北桃源地区的留茶坡组中部和滇东江川地区的灯影组顶部地层中(Steiner et al., 1992; 陈孝红等, 1999; 唐烽等, 2006, 2007)。上述地点所发现的这些化石群以宏体藻类化石为主, 多为底栖的多细胞藻类, 数量丰富, 形态多样, 加上近年来在黔中瓮安地区发现的微化石生物群, 都表明在南沱冰期后华南地区的震旦(伊迪卡拉)纪至少出现过两次多细胞生物的大规模辐射事件(袁训来等, 2002; 陈均远, 2004)。最近在峡东三斗坪新测制的伊迪卡拉系剖面的中, 下部也发现丰富的 *Chuar*, *Tawuia* 等宏体藻类化石, 更说明多细胞生物辐射前夕存在着逐渐复苏和繁盛的过程(唐烽等, 2005; Tang et al., 2006)。

继郑文武(1980)首次报道产自胶辽徐淮地区皖北的 *Chuar* 类化石以后, 陆续在我国河北, 天津, 吉林, 辽宁, 山东, 安徽, 云南等地的青白口系或震旦系相当的地层中也发现了 *Chuar* 类化石。这类小圆盘状化石在国外分布地点有: 美国亚历桑那州查尔群(*Chuar Group*, 600~1000 Ma), 美国犹他州伊塔山群(*Uinta Mountain Group*, 950 Ma), 瑞典南部维辛索组(*Vising So Formation*, 750~1060 Ma), 印度文德雅系凯姆群(*Kaimur Group*, 910~1150 Ma)。除 *Chuar* 外, 安徽寿县刘老碑组和九里桥组曾发现过 *Tawuia*。该属首见于加拿大北部麦肯齐山小达尔群(*Little Dal Group*, 800~1100 Ma)。辽南, 淮南地区的宏体藻类化石十分丰富, 包括 *Chuar*, *Shouhsiania*, *Pumilibaxa*, *Tawuia* 等。这些属, 种在

华北燕山地区青白口系的龙凤山生物群和华南震旦(伊迪卡拉)系的各个主要宏体生物群中也屡有发现,说明这些类别具有稳定的地层分布,是南、北方新元古代地层对比的重要标志化石。如前所述,它们的形态特征变化及其与其它宏体化石的组合面貌,对探讨我国新元古代古生物面貌,演化趋势,分布特点及其地层对比具有重要的作用。

致谢:中国地质科学院地质研究所邢裕盛教授,贵州大学赵元龙教授审阅文稿,提出宝贵的修改意见。

### 参考文献:

- 毕治国,王贤方,朱鸿,王自强,丁放. 1988. 皖南震旦系[J]. 地层古生物论文集,第19辑:27-60.
- 陈均远. 2004. 动物世界的黎明[M]. 南京:江苏科学技术出版社,1-366.
- 陈良忠,罗惠麟,胡世学,尹济云,蒋志文,吴志亮,李峰,陈爱林. 2002. 云南东部早寒武世澄江动物群[M]. 昆明:云南科技出版社,1-199.
- 陈孟莪,陈忆元,钱逸. 1981. 峡东区震旦系—寒武系底部的管状动物化石[J]. 中国地质科学院天津地质研究所所刊,(3):117-124.
- 陈孟莪,萧宗正. 1991. 峡东区上震旦统陡山沱组发现宏体化石[J]. 地质科学,26(4):317-324.
- 陈孟莪,萧宗正. 1992. 峡东震旦系陡山沱组宏体生物群[J]. 古生物学报,31(5):513-529.
- 陈孟莪,萧宗正. 1993. *Beltanellivides podolicus* 在中国上震旦统首次发现[J]. 地质科学,28(4):312-316.
- 陈孟莪,萧宗正,袁训来. 1994a. 晚震旦世的特种生物群落——庙河生物群新知[J]. 古生物学报,33(4):391-403.
- 陈孟莪,鲁刚毅,萧宗正. 1994b. 皖南上震旦统蓝田组的宏体藻类化石——蓝田植物群的初步研究[J]. 中国科学院地质研究所论文集,7:252-267.
- 陈孝红,汪啸风,王传尚,李志宏,陈立德. 1999. 湘西震旦系留茶坡组炭质宏化石初步研究[J]. 华南地质与矿产,2:15-30.
- 丁莲芳,李勇,胡夏嵩,张录易,董军社. 1992. 扬子地台北缘晚震旦世—早寒武世早期生物群研究[M]. 科学技术文献出版社,1-188.
- 丁莲芳,李勇,胡夏嵩,肖娅萍,苏春乾,黄建成. 1996. 震旦纪庙河生物群[M]. 北京:地质出版社,1-221.
- 丁启秀,陈忆元. 1981. 湖北峡东地区震旦纪软躯体后生动物化石的发现及其意义[J]. 地球科学——中国地质大学学报,(2):53-57.
- 杜汝霖. 1982. 冀西北青白口系 *Chuaria* 等化石的发现及其意义[J]. 地质论评,28(1):1-7.
- 杜汝霖,田立富. 1985. 燕山青白口系宏观藻类龙凤山藻属的发现和初步研究[J]. 地质学报,59(3):183-190.
- 杜汝霖,田立富. 1986. 燕山地区青白口纪宏观藻类[M]. 河北科学技术出版社,1-114.
- 华洪,张录易,张子福,王静平. 2001. 高家山生物群化石组合面貌及其特征[J]. 地层学杂志,25(1):13-17.
- 华洪,陈哲,张录易. 2004. *Shaanxilithes* 在贵州的发现及其意义[J]. 地层学杂志,28(3):265-269.
- 李伟新,朱仲嘉,刘凤贤. 1982. 海藻学概论[M]. 上海:上海科学技术出版社,1-249.
- 刘鹏举,尹崇玉,唐烽. 2006. 瓮安生物群中多次分叉的微管状后生动物化石[J]. 科学通报,51(4):488-490.
- 刘志礼. 1990. 化石藻类学导论[M]. 北京:高等教育出版社,1-238.
- 柳永清,尹崇玉,高林志,王自强. 2003. 峡东震旦系层型剖面沉积相研究[J]. 地质论评,49(2):187-194.
- 罗惠麟,蒋志文,武希彻,宋学良,欧阳麟,邢裕盛,刘桂芝,张世山,陶永和. 1984. 中国云南晋宁梅树村震旦系—寒武系界线层型剖面[M]. 云南人民出版社,1-154.
- 罗惠麟,武希彻,欧阳麟,宋学良,蒋志文. 1988. 扬子地台震旦系—寒武系界线剖面地层对比的新认识[J]. 云南地质,7(1):13-27.
- 罗惠麟,李勇,胡世学,傅晓平,侯蜀光,刘兴堯,陈良忠,李锋军,庞纪院,刘琦. 2008. 云南东部早寒武世马龙动物群和关山动物群[M]. 云南科技出版社,1-134.
- 彭善池. 2000. 斜坡相寒武系. 中国科学院南京地质古生物研究所编,中国地层研究二十年(1979—1999)[M]. 北京:中国科学技术大学出版社,23-38.
- 乔秀夫,高林志,彭阳. 2001. 古庐带新元古界——灾变,层序,生物[M]. 北京:地质出版社,1-128.
- 唐烽,尹崇玉,高林志. 1997. 皖南休宁县晚震旦世陡山沱组后生植物化石的新观点[J]. 地质学报,71(4):289-296.
- 唐烽,高林志. 1998. 中国“震旦生物群”[J]. 地质学报,72(3):193-204.
- 唐烽,尹崇玉,王自强,陈孟莪,高林志. 2005. 华北地台东缘新元古代地层对比及宏体化石研究现状和发展趋势[J]. 地质通报,24(7):589-596.
- 唐烽,宋学良,尹崇玉,刘鹏举,AWRAMIK S M,王自强,高林志. 2006. 华南滇东地区震旦(Ediacaran)系顶部 Longfengshaniaceae 藻类化石的发现及意义[J]. 地质学报,80(11):1-7.
- 唐烽. 2007. 早震旦世宏体碳质压膜化石. 尹崇玉,柳永清,高林志,等. 伊迪卡拉纪早期磷酸盐化生物群[M]. 北京:地质出版社,69-79.
- 唐烽,尹崇玉,刘鹏举,王自强,高林志. 2007. 滇东地区伊迪卡拉(震旦)系顶部旧城段多样宏体化石群的发现[J]. 古地理学报,9(5):533-540.
- 唐烽,尹崇玉,刘鹏举,段德麟,高林志. 2008. 华南伊迪卡拉纪“庙河生物群”的属性分析[J]. 地质学报,82(5):601-611.
- 唐烽,尹崇玉,高林志,刘鹏举,王自强,陈寿铭. 2009. 华北东部新元古代宏体化石生物地层序列[J]. 地质论评,55(3):305-317.
- 唐天福,张俊明,蒋先健. 1978. 湘鄂西部晚震旦世地层与古生物群的发现及其意义[J]. 地层学杂志,2(1):32-44.

- 王鸿祯, 杨巍然, 刘本培. 1986. 华南地区古大陆边缘构造史[M]. 武汉地质学院出版社, 1-272.
- 邢裕盛, 丁启秀, 罗惠麟, 何廷贵, 王砚耕. 1983. 中国震旦系—寒武系界线[J]. 中国地质科学院地质研究所所刊, 10: 1-262.
- 邢裕盛. 1985a. 云南昆明附近震旦纪宏观藻类的发现及其地层意义[J]. 中国地质科学院地质研究所所刊, 第12号: 118.
- 邢裕盛, 丁启秀. 1985b. 生物群特征. 赵自强等编: 长江三峡地区生物地层学(1)震旦纪分册[M]. 北京: 地质出版社, 21-30.
- 邢裕盛, 段承华, 梁玉左, 曹仁关. 1985c. 中国晚前寒武纪古生物[M]. 北京: 地质出版社, 1-243.
- 邢裕盛, 高振家, 乔秀夫. 1989. 中国的前上寒武系[M]. 中国地层 3. 北京: 地质出版社, 1-314.
- 阎永奎, 蒋传仁, 张世恩, 杜森官, 毕治国. 1992. 浙、赣、皖南地层震旦系研究[J]. 中国地质科学院南京地质矿产研究所所刊. 12(增刊): 1-144.
- 杨瑞东, 毛家仁, 赵元龙, 陈笑媛, 杨兴莲. 2001. 贵州台江中寒武世凯里组中分枝状宏观藻类化石[J]. 地质学报, 75 (4): 433-440.
- 袁训来, 李军, 陈孟莪. 1995. 晚前寒武纪后生植物的发展及其化石证据[J]. 古生物学报, 34 (1): 90-102.
- 袁训来, 肖书海, 尹磊明, A. H. Knoll, 曹瑞骥. 2002. 陡山沱期生物群—早期动物辐射前夕的生命[M]. 合肥: 中国科学技术出版社, 1-171.
- 张录易. 1986. 陕西宁强晚震旦世晚期高家山生物群的发现和初步研究[J]. 中国地质科学院西安地质研究所所刊, (13): 67-87.
- 张昉, 袁训来. 1995. 元古宙末多细胞红藻有性生殖结构的发现[J]. 中国科学(B 辑), 25(7): 749-754.
- 赵自强, 邢裕盛, 丁启秀, 马国干. 1988. 湖北震旦系(中国震旦系建系研究项目成果之二)[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1-112.
- 郑文武. 1980. 皖北震旦系中 *Chuarina* 等化石的发现及其意义[J]. 中国地质科学院天津地质矿产研究所分刊, 1 (1): 1-13.
- 朱为庆, 陈孟莪. 1984. 峡东地区上震旦统宏体化石藻类的发现[J]. 植物学报, 26(5): 558-560.
- CONWAY MORRIS S, eds. The Early Evolution of Metazoa and the Significance of Problematic Taxa[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 57-76.
- CHEN Jun-yuan, ZHOU Gui-qin, ZHU Mao-yan, CHEN Yan-nian. 1996. The Chengjiang Biota: A Unique Window of the Cambrian Explosion[M]. Taichung: National Museum of Natural History, 1-222.
- CHEN Jun-yuan, ZHOU Gui-qin. 1997. Biology of the Chengjiang Fauna[J]. Bulletin of the National Museum of Natural Science (Taipei), (10): 11-105.
- CHEN Liang-zhong, LUO Hui-lin, HU Shi-xue. 2002. Early Cambrian Chengjiang Fauna in eastern Yunnan, China[M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 1-199 (in Chinese).
- CHEN Meng-e, CHEN Yi-yuan, QIAN Yi. 1981. Some tubular fossils from Sinian-Lower Cambrian boundary sequences, Yangtze Gorge[J]. Bulletin of Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, (3): 117-124(in Chinese).
- CHEN Meng-e, XIAO Zhong-zheng. 1991. Discovery of the macrofossils in the Upper Sinian Doushantuo Formation at Miaohe, eastern Yangtze Gorges[J]. Scientia Geologica Sinica, 26(4): 317-324(in Chinese with English abstract).
- CHEN Meng-e, XIAO Zong-zheng. 1992. Macrofossils biota from upper Sinian Doushantuo Formation in eastern Yangtze Gorges, China[J]. Acta Palaeontologica Sinica, 31(5): 513-529 (in Chinese with English abstract).
- CHEN, M., Z. XIAO, AND X. YUAN. 1993. First discovery of *Beltanelloides podolicus* from the upper Sinian in southern China[J]. Scientia Geologica Sinica, 28(4): 312-316(in Chinese with English abstract).
- CHEN Meng-e, XIAO Zong-zheng, YUAN Xun-lai. 1994a. A new assemblage of megafossils—Miaohe biota from upper Sinian Doushantuo Formation, Yangtze Gorges[J]. Acta Palaeontologica Sinica, 33(4): 391-403(in Chinese with English abstract).
- CHEN Meng-e, LU Gang-yi, XIAO Zong-zheng. 1994b. Preliminary study on the algal macrofossils—Lantian Flora from the Lantian Formation of Upper Sinian in southern Anhui[J]. Bulletin of Institute of Geology, Academia Sinica, 7: 252-267(in Chinese with English abstract).
- CHEN Xiao-hong, WANG Xiao-feng, WANG Chuan-shang. 1999. A Preliminary Study on Carbonaceous Magafossils From the Late Sinian Liuchapo Formation of West Hunan[J]. Geology and Mineral Resources of South China, 2: 15-30 (in Chinese).
- DING Lian-fang, LI Yong, HU Xia-song, ZHANG Lu-yi, DONG Jun-she. 1992. The Study of the Late Sinian—Early Cambrian Biotas from the Northern Margin of the Yangtze Platform. Beijing: Scientific and Technical Documents Publishing House, 1-135 (in Chinese).
- DING Lian-fang, LI Yong, HU Xia-song, XIAO Ya-ping, SU Chun-qian, HUANG Jian-cheng. 1996. Sinian Miaohe Biota of China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1-221 (in

## References:

- Chinese with English summary).
- CONDON Daniel, ZHU Mao-yan, BOWRING Samuel, WANG Wei, YANG Ai-hua, JIN Yu-gan. 2005. U-Pb Ages from the Neoproterozoic Doushantuo Formation, China[J]. *Science*, 308: 95-98.
- DING Qi-xiu, CHEN Yi-yuan. 1981. Discovery of soft metazoan from the Sinian System along eastern Yangtze Gorge, Hubei. *Journal of Earthsciences*, (2): 53-57(in Chinese).
- DU Ru-lin. 1982. The discovery of the fossils such as *Chuarina* in the Qingbaikou System in Northwestern Hebei and their significance[J]. *Geological Review*, 28(1): 1-7 (in Chinese with English abstract).
- DU Ru-lin, TIAN Li-fu. 1985. Preliminary research of the macroalgae *Longfengshania* from Qingbaikou System, Yanshan areas[J]. *Acta Geologica Sinica*, 59(3): 183-190 (in Chinese with English abstract).
- DU Ru-lin, TIAN Li-fu. 1986. The Macroalgal Fossils of Qingbaikou Period in Yanshan Range. Shijiazhuang: Hebei Publication House of Science and Technology, 1-114 (in Chinese with English abstract).
- GNILOVSKAYA M B. 1990. Vendotaenids—Vendian metaphytes. In: SOKOLOV B S, IWANOWSKI A B, eds. *The Vendian System*[M], Volume 1, Paleontology. Berlin: Springer-Verlag, 138-147.
- GRAHAM L E, WILCOX L E. 2000. *Algae*[M]. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1-640.
- HOFMANN H J. 1985. The Mid-Proterozoic Little Dal Macrobiota, Mackenzie Mountains, North-west Canada[J]. *Palaeontology*, 28 (2): 331-354.
- HOFMANN H J., Aitken J D. 1979. Precambrian biota from the little Dal Group, Mackenzie Mountains, Northwestern Canada[J]. *Canadian journal of Earth Sciences*, 16 (1): 150-166.
- HUA Hong, ZHANG Lu-yi, ZHANG Zi-fu, WANG Jing-ping. 2001. Assemblage zones of Gaojiashan biota and their characteristics[J]. *Journal of Stratigraphy*, 25(1): 13-17(in Chinese with English abstract).
- HUA Hong, CHEN Zhe, ZHANG Lu-yi. 2004. *Shaanxilithes* from Taozhong Formation of Guizhou Province and its significance[J]. *Journal of Stratigraphy*, 28(3): 265-269(in Chinese with English abstract).
- LI Wei-xin, ZHU Zhong-jia, LIU Feng-xian. 1982. Introduction to the seaweeds[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1-249(in Chinese).
- LIU Peng-ju, YIN Chong-yu, TANG Feng. 2006. Microtubular metazoan fossils with multi-branches in Weng'an biota[J]. *Chinese Science Bulletin*, 51(5): 630-632.
- LIU Zhi-li. 1990. Introductions of the algae fossils[M]. Beijing: Higher Education Press, 1-238(in Chinese).
- LI Zheng-xiang, POWELL C M A. 2001. An outline of the palaeogeographic evolution of the Australasian region since the beginning of the Neoproterozoic[J]. *Eaeth-Science Review*, 53: 237-277.
- LIU Yong-qing, YIN Chong-yu, GAO Lin-zhi, WANG Zi-qiang. 2003. Advances in the study of sedimentary facies of the Sinian Candidate Stratotype in the eastern areas of the Yangtze Gorges, Hubei[J]. *Geological Review*, 49(2): 187-194.
- LUO Hui-lin, JIANG Zhi-wen, WU Xi-che, SONG Xue-liang. 1984. The Sinian-Cambrian boundary stratotype section of Meishucun, Jingning, Yunnan Province, China[M]. Kunming: Yunnan People's Press, 1-154 (in Chinese).
- LUO Hui-lin, WU Xi-che, OUYANG Lin. 1988. New correlation opinions on the sections of Sinian-Cambrian Boundary in the Yangtze Platform[J]. *Yunnan Geology*, 7 (1): 13-27 (in Chinese).
- LUO Hui-lin, LI Yong, HU Shi-xue, FU Xiao-ping, HOU Shu-guang, LIU Xing-yao, CHEN Liang-zhong, LI Fengg-jun, PANG Ji-yuan, LIU Qi. 2008. Early Cambrian Malong Fauna and Guanshan Fauna from the eastern Yunnan, China[M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 1-134(in Chinese).
- MCMENAMIN M A S. 1998. The Garden of Ediacara— Discovering the First Complex Life[M]. New York: Columbia University Press, 1-295.
- PENG Shan-chi. 2000. The Cambrian in slope deposits. In: Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, Academia Sinica (ed.), *Stratigraphical Studies in China (1979-1999)*[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 23-38 (in Chinese).
- QIAO Xiu-fu, GAO Lin-zhi, PENG Yang. 2001. Neoproterozoic along the Paleozone from Tan Cheng to Lujiang——disaster, sequence and life[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1-128 (in Chinese with English summary).
- STEINER M, ERDTMANN B D, CHEN Jun-yuan. 1992. Preliminary assessment of new late Sinian (late Proterozoic) large siphonous and filamentous "megaalgae" from eastern Wulingshan, North-central Hunan, China[J]. *Berliner Geowiss, Abh.*, (E) 3: 305-319.
- STEINER M. 1994. Die neoproterozoischen Megaalgen Südchinas[J]. *Berliner Geowiss, Abh.*, (E) 15: 1-146 (in German).
- SUN Wei-guo. 1986. Late Precambrian pennatulids (sea pens) from the Eastern Yangtze Gorge. China: *Paracharnia* gen. nov[J]. *Precambrian Res.* 31: 361-375.
- TANG Feng, GAO Lin-zhi. 1998. The Sinian Biota of China[J]. *Geological Review*, 1998, 72(3): 193-204(in Chinese with English abstract).
- TANG Feng, YIN Chong-yu, WANG Zi-qiang, CHEN Meng-e. 2005. Advances and development trend in the study of the stratigraphic correlation of the Neoproterozoic and megafossils on the eastern margin of the North China platform[J]. *Geological Bulletin of China*, 24 (7): 589-596 (in Chinese with English abstract).
- TANG Feng, YIN Chong-yu, GAO Lin-zhi. 1997. A New Idea of

- Sinian Doushantuo'an Metaphyte Fossils from Xiuning, Anhui Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 71 (4): 491-501.
- TANG Feng, YIN Chong-yu, BENGTON S, LIU Yong-qing, WANG Zi-qiang, LIU Peng-ju, GAO Lin-zhi. 2006. New discovery of macroscopic fossils from the Doushantuo Formation, Sinian System in the Yangtze Gorges area[J]. *Chinese Science Bulletin*, 51(11): 1487-1493.
- TANG Feng, SONG Xue-liang, YIN Chong-yu, LIU Peng-ju, AWRAMIK S M, WANG Zi-qiang, GAO Lin-zhi. 2007. Discoveries of new Longfengshaniaceae from the uppermost Ediacaran in eastern Yunnan, South China and the significance[J]. *Front. Earth Sci. China*, 1(2): 142-149.
- TANG Feng, YIN Chong-yu, BENGTON S, LIU Peng-ju, WANG Zi-qiang, GAO Lin-zhi. 2008. Octoradiate spiral organisms in the Ediacaran of South China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82 (1): 27-34.
- TANG Feng. 2007. Macroscopic carbonaceous compressions in the early Ediacaran (Sinian). In: YIN Chong-yu, LIU Yong-qing, GAO Lin-zhi, WANG Zi-qiang, TANG Feng, LIU Peng-ju (eds.), *The phosphatized biota from the Early Ediacaran (Sinian) in South China*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 69-79(in Chinese).
- TANG Feng, YIN Chong-yu, LIU Peng-ju, WANG Zi-qiang, GAO Lin-zhi. 2007. Discovery of diverse macrofossil assemblages from the Jiucheng Member of uppermost Ediacaran in eastern Yunnan[J]. *Journal of Paleogeography*, 9(5): 533-540(in Chinese with English abstract).
- TANG Feng, YIN Chong-yu, LIU Peng-ju, DUAN De-ling, GAO Lin-zhi. 2008. Morphological Comparison of the Ediacaran Miaohe Biota from South China: Implications for Their Affinities and Ecology[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(5): 601-611(in Chinese with English abstract).
- TANG Feng, YIN Chong-yu, GAO Lin-zhi, LIU Peng-ju, WANG Zi-qiang, Chen Shou-ming. 2009. Macrofossil records of the Neoproterozoic in the eastern of North China Craton: an implement of Neoproterozoic biostratigraphy. *Geological Review*, 55(3): 305-317(in Chinese with English abstract).
- TANG Tian-fu, ZHANG Jun-ming, JIANG Xian-jian. 1978. Discovery and its significance of the Late Sinian strata and fossils in the western of Hunan and Hubei[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2(1): 32-44(in Chinese).
- WANG Hong-zhen, YANG Wei-ran, LIU Ben-pei. 1986. Tectonic history of the ancient continental margins of South China[M]. Wuhan: Press of China University of Geosciences, 1-272.
- XING Yu-sheng, DING Qi-xiu, LUO Hui-lin, HE Ting-gui, WANG Yan-geng. 1983. The Sinian-Cambrian boundary of China[J]. *Bulletin of the Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences*, 10: 1-262 (in Chinese with English summary).
- XING Yu-sheng. 1985. The discovery and stratigraphical significance of the Sinian macroscopic algae near to Kunming, Yunnan[J]. *Bulletin of the Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences*, 12: 118(in Chinese with English abstract).
- XING Yu-sheng, DING Qi-xiu. 1985b. The characters of the Sinian biotas. In: ZHAO Zi-qiang, XING Yu-sheng, MA Guo-gan, CHEN Yi-yuan(eds), *Biostratigraphy—Sinian*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 21-30 (in Chinese with English abstract).
- XING Yu-sheng, DUAN Cheng-hua, LIANG Yu-zuo, CAO Ren-guan. 1985c. Late Precambrian palaeontology of China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1-243 (in Chinese with English summary).
- XING Yu-sheng, GAO Zheng-jia, Qiao Xiu-fu. 1989. The Upper Precambrian in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1-314 (in Chinese with English summary).
- YAN Yong-kui, JIANG Chuan-ren, ZHANG Shi-en, DU Shen-guan, BI Zhi-guo. 1992. Research of the Sinian system in the region of western Zhejiang, northeastern Jiangxi and southern Anhui Provinces[J]. *Bulletin of the Nanjing Institute of Geology and Mineral Resources, CAGS, Supplementary Issue*, 12: 1-105(In Chinese).
- YANG Rui-dong, MAO Jia-ren, ZHAO Yuan-long, CHEN Xiao-yuan, YANG Xing-lian. 2001. Branching macroalgal fossils of the early-middle Cambrian Kaili Formation from Taijiang, Guizhou Province, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 75 (4): 433-440(in Chinese with English abstract).
- YUAN Xun-lai, LI Jun, CHEN Meng-e. 1995. Development and their fossil records of metaphytes from late Precambrian[J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 34(1): 90-102(in Chinese with English abstract).
- YUAN Xun-lai, XIAO Shu-hai, YIN Lei-ming, MU Xi-nan. 2002. Doushantuo fossils: life on the eve of animal radiation[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1-171 (in Chinese).
- XIAO Shu-hai, KNOLL A H, YUAN Xun-lai. 1998. Morphological reconstruction of *Miaohephyton bifurcatum*, a possible brown alga from the Neoproterozoic Doushantuo formation, South China[J]. *Journal of Paleontology*, 72 (6): 1072-1086.
- XIAO Shu-hai, YUAN Xun-lai, STEINER M, KNOLL A H. 2002. Macroscopic Carbonaceous compressions in a terminal Proterozoic shale: A systematic reassessment of the Miaohe biota, south China[J]. *J. Paleont.*, 76(2): 347-376.
- XU Zhao-liang. 2002. The Occurrence of Longfengshania in the Early Cambrian from Haikou, Yunnan, China[J]. *Acta Botanica Sinica*, 44(10): 1250-1254.
- YIN Chong-yu, TANG Feng, LIU Yong-qing, GAO Lin-zhi, WANG Zi-qiang, LIU Peng-ju. 2005a. U-Pb zircon age from the base of the Ediacaran Doushantuo Formation in the Yangtze Gorges, South China: constraint on the age of Marinoan glaciation[J]. *Episodes*, 28 (1): 48-49.
- YIN Chong-yu, TANG Feng, LIU Yong-qing, GAO Lin-zhi, WANG

- Zi-qiang, LIU Peng-ju. 2005b. New U-Pb zircon ages from the Ediacaran (Sinian) system in the Yangtze Gorges: Constraint on the age of Miaohu biota and Marinoan glaciation[J]. Geological Bulletin of China, 24(5): 393-400.
- YIN Lei-ming, ZHU Mao-yan, KNOLL A H, YUAN Xun-lai, ZHANG Jun-ming, HU Jie. 2007. Doushantuo embryos preserved inside diapause egg cysts[J]. Nature, 466: 661-663.
- YUAN Xun-lai, LI Jun, CAO Rui-ji. 1999. A diverse metaphyte assemblage from the Neoproterozoic black shales of South China[J]. Lethaia, 32: 143-155.
- YUAN Xun-lai, XIAO Shu-hai, LI Jun, YIN Lei-ming, CAO Rui-ji. 2001. Pyritized chuarids with excystment structures from the late Neoproterozoic Lantian formation in Anhui, South China[J]. Precambrian Res., 107: 253-263.
- ZANG Weng-long. 1992. Sinian and Early Cambrian Floras and Biostratigraphy on the South China Platform[J]. Palaeontographica, Abt. B., 224: 75-119.
- ZANG Weng-long. 1997. Megascopic carbonaceous *Chuar* and *Tawuia* from the late Neoproterozoic in South Australia[J]. MESA Journal, 4: 37-40.
- ZHANG Lu-yi. 1986. Discovery and preliminary study of the Late Sinian Gaojiashan biota in Ningqiang area, Shan'xi[J]. Bulletin of the Xi'an Institute of Geology, CAGS, (13): 67-87(in Chinese).
- ZHANG, Y., AND X. YUAN. 1996. Sexual reproductive structures of latest Proterozoic multicellular rhodophytes (red algae) from South China[J]. Science in China (Series C), 39: 27-36.
- ZHANG Yun, YUAN Xun-Lai. 1992. New data on multicellular thallophytes and fragments of cellular tissues from Late Proterozoic phosphate rocks, South China[J]. Lethaia, 25 (1): 1-18.
- ZHANG Yun, YIN Lei-ming, XIAO Shu-hai, KNOLL A H. 1998. Permineralized fossils from the Terminal Proterozoic Doushantuo Formation, South China[J]. Paleontol. Soc. Mem., 50: 52.
- ZHAO Yuan-long, CHEN Meng-e, PENG Jin, YU Mei-yi, WANG Yue, YANG Rong-jun, WANG Ping-lin, ZHANG Zheng-han. 2004. Discovery of a Miaohu-type Biota from the Neoproterozoic Doushantuo Formation in Jiangkou County, Guizhou Province, China. Chinese Science Bulletin, 49(20): 2224-2226.
- ZHAO Zi-qiang, XING Yu-sheng, DING Qi-xiu, MA Guo-gan. 1988. The Sinian System of Hubei[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1-205(in Chinese with English abstract).
- ZHENG Wen-wu. 1980. Discovery and its significance of *Chuar* in the Sinian system of North Anhui[J]. Bulletin of the Tianjing Institute of Geology, CAGS, 1 (1): 1-13(in Chinese).
- ZHU Shi-xing, CHEN Hui-neng. 1995. Megascopic Multicellular Organisms from the 1700-Million-Year-Old Tuanshanzi Formation in the Jixian Area, North China[J]. Science, 270: 620-622.
- ZHU Mao-yan, GEHLING J G, XIAO Shu-hai, ZHAO Yuan-long, DROSER M L. 2008. Eight-armed Ediacara fossil preserved in contrasting taphonomic windows from China and Australia[J]. Geology, 36: 867-870.
- ZHU Wei-qing, CHEN Meng-e. 1984. On the discovery of macrofossil algae from the late Sinian in the eastern Yangtze Gorges, South China[J]. Acta Botanica Sinica, 26(5): 558-560(in Chinese).