

华南埃迪卡拉(震旦)系顶部地层划分及与寒武系界线 FAD 分子的选择

顾鹏¹⁾, 钟玲²⁾, 张国栋³⁾, 宋思存⁴⁾, 唐烽¹⁾, 凌茂前³⁾, 高林志¹⁾

1) 中国地质科学院地质研究所, 北京, 100037; 2) 四川博物院, 成都, 610071;
3) 四川省地勘局 207 地质队, 乐山, 614000; 4) 南京大学地球科学与工程学院, 南京, 210023

内容提要:“雪球事件”以来,早期生命呈现多层次、大规模的加速演化,到寒武纪前夕,生命大爆发达到高潮;在生命剧烈演替的同时,地球环境标志也发生着响应,碳同位素剧烈漂移,并且与各个生命演化节点相对应。但是在划分最重要的地质界线,埃迪卡拉(震旦)系——寒武系界线及界线层型和点位(“金钉子”, GSSP)确立的问题上迄今仍存在着较大的分歧,以遗迹化石 *Treptichnus pedum* 作为该 GSSP 的标志化石,因其跨系、跨阶产出,生物延续长,因而在全球的生物地层划分对比中(特别在西伯利亚和中国华南地区)一直质疑声不断,而且以遗迹化石作为标志化石本身也具有一定的缺陷。中国华南地区两类古老的宏体化石——矿化管状的 *Cloudina* 和条带状的 *Shaanxilithes* 在全球范围内可以很好的对比,并且这两种实体化石的出现都对应着碳同位素的明显正漂移。本文通过研究华南震旦系顶部化石带的地层分布和地理分布,综合分析了其时空分布特点和系统演化意义,深入探讨了 *Cloudina* 和 *Shaanxilithes* 作为寒武系底界标志化石所具备的潜力,对埃迪卡拉(震旦)纪—寒武纪地层界线划分和层型选择提出了更为理想的标准。

关键词:埃迪卡拉(震旦)系—寒武系;标志化石;遗迹化石;宏体化石;*Shaanxilithes*; *Cloudina*

1977 年,云南地质科学研究所和中国地质科学院的专家率先在云南开展了全球埃迪卡拉系—寒武系界线层型的研究。开启了中国首个全球年代地层学“金钉子”的研究。以罗惠麟、邢裕盛为首的研究团队在前人的基础上,对昆明南部梅树村剖面的埃迪卡拉系—寒武系过渡地层做了多学科的综合研究,取得了重要的研究进展,并将埃迪卡拉(震旦)系—寒武系界线点置于梅树村阶 I 组合 *Anabarites-Circotheca-Protohertzina* 组合之底,即渔户村组小歪头山段底界之上 0.8m 处(“A”点)(Luo Huilin et al., 1980, 1982),在其它两地的辅助剖面界线点,如湖北宜昌划在了黄麟洞组(天柱山组)之底,四川峨眉划在了麦地坪组之底。根据 1983 年在英国布里斯托尔大学举行的国际埃迪卡拉(震旦)系—寒武系界线工作组会议决定,罗惠麟等人将该界线重新划在了梅树村阶第 II 组合带底部(“B”点)(Luo Huilin, 1990),并得到工作组的正式表决通过。由此,中国的梅树村剖面曾经成为了全

球埃迪卡拉(震旦)系—寒武系界线点(GSSP,“金钉子”)的唯一候选层型剖面。

然而,地史上第一枚“金钉子”的确立,其国际竞争异常激烈。国际上的部分专家学者,特别是研究加拿大纽芬兰剖面的竞争专家对采用小壳化石对比的可靠性提出质疑,因而极力反对梅树村剖面,部分研究者又极力游说以遗迹化石定义埃迪卡拉(震旦)系—寒武系界线的种种优势和纽芬兰剖面的优越性。由于以上的种种原因,工作组决定推迟表决梅树村剖面,直到 6 年后纽芬兰剖面的研究完成了对 Fortune Head 剖面较为全面的研究,并采用遗迹化石 *Treptichnus pedum* 的首现定义寒武系底界(Landing, 1994),这时,埃迪卡拉(震旦)系—寒武系工作组才重新开始表决,最终将“金钉子”确定在加拿大纽芬兰的 Fortune Head 剖面(Peng Shanchi, 2012)。随后随着全球,特别是我国华南埃迪卡拉(震旦)系—寒武系地层及古生物研究成果的不断涌现,发现 Fortune Head 剖面中的 *Treptichnus*

注:本文为国家自然科学基金项目(编号 41572024);中国地质科学院地质研究所基本科研业务费项目(编号 YYWF201602)资助的成果。
收稿日期:2017-03-24;改回日期:2017-09-30;责任编辑:黄敏。
作者简介:顾鹏,男,1992 年生。硕士研究生在读,古生物地层学。Email:996806588@qq.com。通讯作者:唐烽,男,1965 年生,研究员,主要从事地层学及古生物学方面的研究。Email:tangfeng@cags.ac.cn。

pedum 跨系、跨阶、延限长,且该剖面缺乏含磷层的小壳化石保存,将遗迹化石 *Treptichnus pedum* 确定为埃迪卡拉(震旦)系—寒武系界线层型的标志化石,在实际工作中难以进行全球广泛的地层对比和划分,因其可靠性与有效性而被诸多的地质学家所争议与质疑。

从全球“雪球事件”结束以后,地表温度升高,海平面升高,大气和海水含氧量有了显著上升,促进了地球早期生命的快速演化。根据该时期碳同位素漂变的明显负异常,王新强等(2010)曾经将埃迪卡拉纪生物快速演化的过程划分为四个阶段,并阐述了生物从简单的原核藻类生物演化到具有复杂结构的后生生物的过程。而到了寒武纪早期,生物演化则呈井喷式爆发,形成了前奏—序幕—主幕的三幕式爆发,后两个阶段以我国的梅树村生物群(小壳化石群)和澄江生物群为代表,另一个则是发生在“寒武纪前夜”,以埃迪卡拉纪生物群为代表(Shu Degan, 2009)。在这个阶段生物的快速辐射与繁盛为划分埃迪卡拉(震旦)系—寒武系地层的界线提供了丰富的古生物学证据,而目前国际地层委员会所确定的以遗迹化石为该界线标志化石的方案,因遗迹化石自身的局限性而遭到很多的争议与质疑。本文通过对近年来大量资料成果的分析研究与地层划分对比,认为实体化石 *Shaanxilithes* 和最早的骨骼化石 *Cloudina* 更适合作为埃迪卡拉(震旦)系—寒武系界线的标志化石。其中广泛出现于西伯利亚、印度及我国埃迪卡拉(震旦)纪晚期细粒碎屑岩相地层中的 *Shaanxilithes*,通常保存为碳膜压扁的条带状化石体,化石体上发育碳质横纹,并呈现出可能分节的化石体特征。根据其独特的形态学和埋藏学特征,可与世界各地的 *Shaanxilithes* 进行对比,表明其具有广泛而稳定的地史、地理分布,因而可以作为新元古代末期一个潜在的标志化石;同样广泛分布于全球的埃迪卡拉纪锥管状化石 *Cloudina* 则代表了最早的一类骨骼化动物,具有稳定的时代分布(550~543Ma),其繁盛对应着明显的碳同位素正漂移,根据这些特点,故 *Cloudina* 也是新元古代末期一个潜在的标志化石。

1 华南埃迪卡拉(震旦)纪—寒武纪古地理背景

我国华南地区在新元古代末期到寒武纪早期处在低纬度带,总体呈东西高,中间低的地理格局。大

约在 1000Ma± 晋宁造山运动后,随着新元古代花岗岩底劈侵位,导致扬子地区不断碰撞造山迅速隆升。在大约 800Ma 的武陵造山运动后,随扬子周缘一系列裂谷盆地的充填关闭,扬子周缘完成了由活动型向稳定型沉积盆地的转换,整个扬子地区迅速转化为稳定的地台并接受沉积。其大体以绍兴—宜春之间的平行大断裂和衡阳—南宁之间的裂谷型断裂(Wang Ziqiang et al., 1986; Xia Wenjie, 1994)为界,将华南地区划分为东南区和西北区:东南区属于华南型沉积相区;西北区则为扬子型浅海盆地,自埃迪卡拉(震旦)纪末期开始,本地区主要是碳酸盐台地、台地边缘、浅海陆棚沉积区(Zi Jinping et al., 2017)。

在华南扬子地层的埃迪卡拉(震旦)纪末期地层层序主要由三部分组成,①直接覆盖于南沱组冰碛岩之上的陡山沱组盖帽碳酸盐岩;②发育在盖帽碳酸盐岩之上的互层状黑色泥页岩和灰岩、粉砂质白云岩;③浅水地台区灯影组主要由厚层状的白云岩和灰岩组成,在深水沉积区则是由黑色泥页岩、硅质岩和硅质灰岩组成的老堡组。本区有良好的研究基础,前人做了大量的沉积学、地层学、岩相古地理和生物地层学等工作(Geng Yuansheng et al., 2017),并取得了一批重要的成果,积累的丰富的地质资料,为今后进一步研究埃迪卡拉(震旦)—寒武系地层及古生物,地层界线提供了良好的基础。

2 华南地区埃迪卡拉(震旦)—寒武系无机碳同位素变化特征

新元古代南沱冰期结束后,在向寒武纪转化的期间内,埃迪卡拉生物群在短短的几百万年时间内就被突然出现的大量的后生动物各门类所取代,在这次重大的生物快速演替进行的同时,生物圈环境也发生的剧烈的变化。其中,碳同位素的漂移与生物快速演化存在着密切的关系。我国华南扬子地区出现了几次较为明显的碳同位素变化,其中出现了 4 次较为明显的碳同位素负漂移,分别位于陡山沱组底部(N1)、中部(N2)、顶部(N3)和灯影组顶部(N4);而 2 次明显的正漂移发生在陡山沱组的下部(P1)和上部(P2)(Zhu Maoyan et al., 2007; Zhou Chuanming et al., 2007; Jiang Ganqing et al., 2007; Jiang Ganqing et al., 2008),而这些同位素变化特征在澳大利亚、阿曼、纳米比亚、北美、印度和西伯利亚等地的同时代地层中都有出现,这说明华

南的碳同位素变化不仅仅是区域上的,而是可以进行洲际对比的全球海水无机碳同位素特征。因此,在选择标志化石划分埃迪卡拉(震旦)一寒武纪地层界线时,可进行洲际对比的碳同位素漂移也具有一定的指示意义。

3 华南埃迪卡拉纪生物的快速演化

埃迪卡拉(震旦)纪一寒武纪转化时期是地质历史中最重要生命演化转折期之一,其中最显著的表现是多细胞动物的起源和寒武纪爆发式的快速演化。而扬子陆块则是世界上埃迪卡拉纪化石研究最关键的地区之一(图 1),根据目前已经研究的化石记录和碳同位素变化特征,埃迪卡拉生物演化可以划分为 4 个阶段(Wang Xinqiang et al. , 2010):第一个阶段的持续时间大致从 630Ma 至 595Ma,以大型带刺疑源类及后生动物胚胎(如 *Tianzhushania spinosa*),并伴随着少量的宏观藻类和原核生物为特征;第二阶段的持续时间大致 590Ma 到 575Ma,显著特征是具刺疑源类和后生动物胚胎大量分异;第三个阶段大体发生在 580Ma 到 550Ma 之间,是以碳质压膜保存的多细胞宏体化石为代表,如八辐射的 *Eoandromeda octobrachiata* (Tang Feng et al. , 2008, 2011; Zhu Maoyan et al. , 2008;),以及可能的蠕虫类化石 *Wenghuia jiangkouensis*(Zhou Chuanming et al. , 2007; Wang Yue et al. , 2008)

等;第四个阶段则处于埃迪卡拉(震旦)纪末期,是以宏体化石、两侧对称动物形成的遗迹/实体化石和具有钙化外壳的动物化石如 *Shanxilithes* 和 *Cloudina* 等为代表,而作为实体化石的 *Shanxilithes* 和 *Cloudina* 具有广泛与稳定的全球分布,因此作为埃迪卡拉(震旦)纪一寒武纪地层界线的标志化石具有很大的潜力。

3.1 埃迪卡拉系陡山沱组大型带刺疑源类与后生动物休眠卵化石

大型带刺疑源类是新元古代“雪球事件”后开始大范围辐射,并在寒武纪前夜灭绝的一类个体一般大于 100 μ m 的特殊类群,这类化石在我国华南地区陡山沱组中、下部大量出现,因其特殊的演化和生物地层学意义,长期以来受到国内外的学者关注。现有的研究资料表明(Yin Chongyu et al. , 2001; Ouyang Qing et al. , 2015),陡山沱组含有的大型带刺疑源类组合产出的层位低于俄罗斯北部、澳大利亚、乌克兰及加拿大纽芬兰等地发现的多种典型埃迪卡拉生物群的层位,年代应早于以埃迪卡拉期生物群为标志的早期后生动物多样化的时段。尹磊明等(Yin Leiming et al. , 2007)在宜昌陡山沱组硅质结核中发现分布广泛的一类大型带刺疑源类化石 *Tianzhushania*,其最低层位发现于陡山沱组底部,不仅分布广泛、层位稳定,而且相对丰度高,也证明早期大型疑源类是在新元古代大冰期结束后迅速

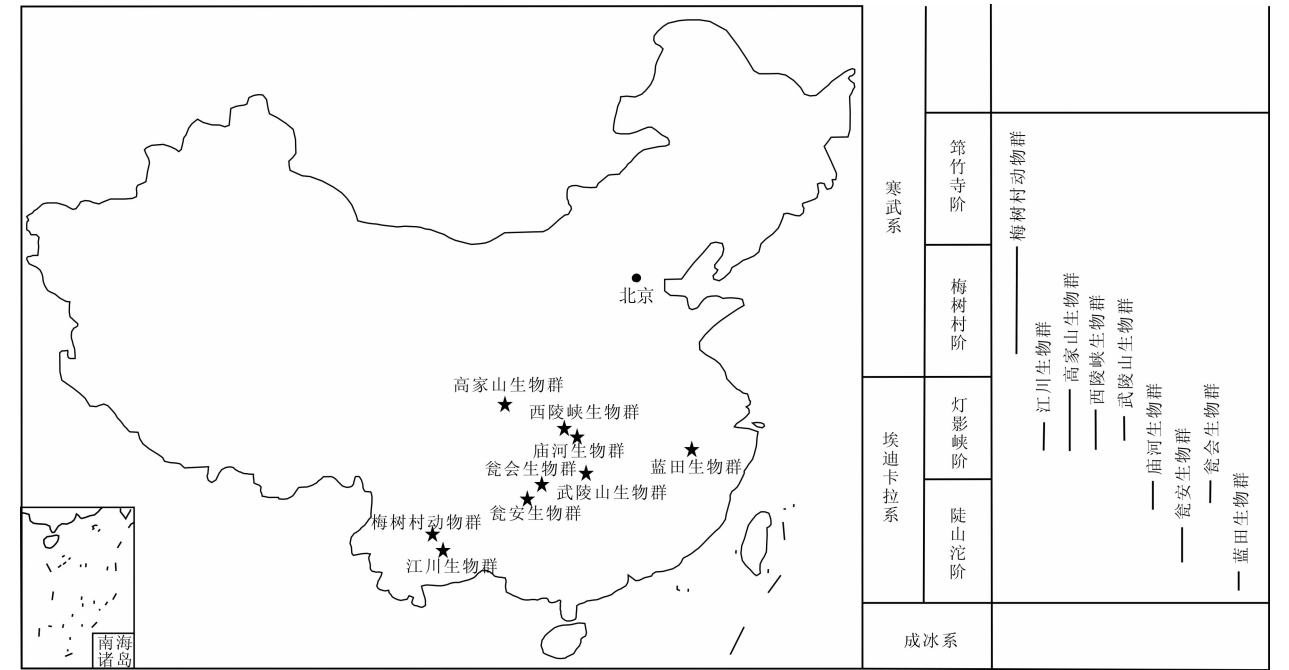


图 1 华南埃迪卡拉纪主要生物群的分布

Fig. 1 The distribution of the significant biota from Ediacaran in South China

辐射,这对研究这类疑似动物胚胎化石的生物起源辐射指明了一个新的方向。*Tianzhushania* 最早发现于我国长阳天柱山的陡山沱组,所采集到的原始标本出自碳酸盐岩燧石结核的岩石薄片,其模式标本为 *Tianzhushania spinosa* (Yin Leining et al., 1978)。在宜昌发现的 *Tianzhushania* 具有 2 至 16 个分裂球的动物胚胎发育特征,这些分裂球包裹在一个具有复杂表面纹饰的厚壁中,与现生动物的滞育卵囊胞内含的早期卵裂胚胎很相似,因此被确认为是动物的休眠卵 (Yin Leiming et al., 2007)。

尹崇玉早在 2001 年就将 *Tianzhushania* 与瓮安生物群中的某些休眠卵化石进行壳体结构和表面纹饰对比,认为 *Tianzhushania* 可能是动物的休眠卵化石 (Yin Chongyu et al., 2001),并得到国外学者的支持 (Cohen et al., 2009; Willman, 2009)。并且,地质证据 (Zhu Maoyan et al., 2007) 也支持了尹崇玉的观点,因为地球上所有的大型带刺疑源类几乎都在埃迪卡拉纪中期灭绝,其灭绝面刚好与地球第二次大规模增氧事件的碳同位素负异常出现的时间相一致。因为氧气的增加,动物的休眠卵个体得以继续发育为成年个体 (Zhu Maoyan et al., 2010)。

3.2 多种类型的微球状后生动物胚胎和具刺疑源类化石

近 20 年来,在华南瓮安生物群发现了大量的多细胞藻类、大型带刺疑源类和疑似处于不同发育阶段的多种后生动物胚胎化石,并包括少量的后生动物幼虫和成体化石,是迄今为止全球保存最好的晚埃迪卡拉 (震旦) 纪磷质化石库。瓮安生物群产出于埃迪卡拉系陡山沱组上部的磷块岩中,以三维立体的形态保存下来。在成岩期,岩石发生快速磷酸盐化从而使得生物许多的细微结构都得以保存下来,如部分球状化石表面的褶皱、藻类化石的细胞、组织结构和生殖结构等。瓮安生物群提供了早期生命从简单到复杂进化过程的重要化石记录,展示了埃迪卡拉纪生物群出现以前早期多细胞生物演化的过程,为探索早期后生动物演替提供了一个重要的窗口。

3.3 碳质压膜保存的多细胞藻类化石

主要位于华南陡山沱组上部至顶部地层中的宏体藻类化石,大多在黑色的泥岩、粉砂岩中以碳质压膜的形式保存下来。其中,位于皖南休宁县蓝田组的宏体藻类碳质膜化石基本上都是以碳质膜形式保

存的宏体藻类化石,主要为扇状、丛状的藻类,也有疑似触手和肠道特征、形态可与现代腔肠动物相比较的可能的后生动物,绝大部分类型都发育固着装置,表明它是一个底栖固着生长的复杂生物群 (Yuan Xunlai, 2012)。

瓮会生物群位于贵州江口县桃映乡瓮会村陡山沱组地层,其生活在贫氧的、透光性较差的浅海低能环境。其中以碳质压膜保存的 *Eoandromeda* 化石在南澳大利亚却以印痕化石保存在石英岩中 (Zhu Maoyan et al., 2008),这是全球发现的同种埃迪卡拉型化石以截然不同的方式保存在两种不同沉积环境中的化石记录。瓮会生物群不但含有鄂西庙河生物群和皖南蓝田生物群的分子,也含有南澳大利亚埃迪卡拉生物群和俄罗斯白海生物群的分子,可能成为全球同时代生物地层对比的桥梁之一。

华南在同一时期以碳质压膜的形式保存在埃迪卡拉系陡山沱组上部的化石群还包括:位于湖北三峡黄陵背斜西翼长江北岸庙河村的庙河生物群和位于湖南桃源县理公港留茶坡组的武陵山生物群,其化石类型主要都是多细胞藻类化石,庙河生物群中也发现了埃迪卡拉型化石 *Eoandromeda octobrachiata* 以及少数几类存疑的动物化石。而武陵山生物群除了宏观藻类化石之外,还发现了形态上与埃迪卡拉型化石相似、个体较大的圆盘状似水母化石 (Chen Xiaohong et al., 1999)。

3.4 宏体藻类化石、遗迹化石以及分类不明的实体化石

陕西南部宁强地区灯影组中部的高家山段化石保存于台地边缘近陆地的局限浅水盆地环境。1986 年,张录易首次系统描述了产自该地区的化石,鉴定了包括动物化石、遗迹化石和宏体藻类化石 17 种之多,同时将其命名为高家山生物群。目前高家山生物群自下而上可以划分为 3 个化石带 (Hua Hong et al., 2001): ① 以蠕形动物爬迹为代表的 *Helminthopsis-Shaanxilithes* 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 以多种管状矿化骨骼化石共生为特征,并伴有杯状、分枝管状和球状化石等的 *Sinotubulites-Cloudina* 组合带,此带展示了高家山生物群发展演化最鼎盛时期的生物组合面貌。高家山生物群代表了全球这一时期和埃迪卡拉生物群完全不同的独特化石组合,生物形态与生态特征与寒武纪早期动物具有密切的相关性。

西陵峡生物群与高家山生物群所处时代相一致,是我国南方埃迪卡拉(震旦)纪末期首次发现的保存丰富宏体化石的生物群,最早被陈孟莪等(1981)命名为西陵峡动物群,因有藻类化石,后来被丁莲芳等(1992)称为西陵峡生物群。西陵峡生物群位于湖北三峡埃迪卡拉(震旦)系灯影组的中部,该区灯影组主要由三个岩性段组成,分别是蛤蟆井段、石板滩段和白马沱段(Zhao Ziqiang, 1985)。其中,石板滩段的文德带藻类碳质膜丝状体化石是灯影组最早发现的化石,而灯影组最早的动物化石 *Sinotubulites* 最早由王义昭 1975 年发现于白马沱段下部(Chen Meng'e et al., 1977, 1981),此外,石板滩段与寒武纪早期地层一样,也产出大量的遗迹化石,为研究寒武纪动物起源及演替提供了重要的线索(Xue Yaosong et al., 2004)。

江川生物群发现于华南滇东清水沟磷矿中江川侯家山—清水沟旧城段剖面(图 2),地层出露连续,化石产出层位具有较好的分带性,其中旧城段剖面自下而上包含五个层位:①似 *Helminthopsis* 遗迹化石;② *Chuarina-Tarwua-Pumilibaxa* 化石层;③ *Shouhsienia-Vendotaenia-Palaeocystiformis* 化石层;④ *Longfengshaniaceae-Cycliomedusa-Parainaria* 化石层。以及位于白岩哨段的⑤ *Vendotaenia-Tyrasotaenia* 化石层(Tang Feng et al., 2006, 2009)。这一生物群的发现补充了扬子地区以庙河生物群为代表的埃迪卡拉纪陡山沱期后生生物首次辐射,同时笔者等在清水沟埃迪卡拉系—寒武系界线附近发现了似 *Shaanxilithes* 宏体化石,这些与早寒武世后生生物大爆发之间的宏体化石内容,对于这一时期地层的建阶分带及国际对比具有重要意义(Tang Feng et al., 2015)。

4 埃迪卡拉(震旦)系—寒武系界线标志化石

埃迪卡拉(震旦)系—寒武系界线标志化石的确定曾经有小壳化石组合与遗迹化石之争,并决定了显生宇第一个 GSSP“金钉子”最终花落哪个国家。国际地层委员会 1992 年批准将全球埃迪卡拉(震旦)系—寒武系界线的层型点确定在加拿大纽芬兰统的幸运角剖面中遗迹化石 *Treptichnus* (*Phycodes*) *pedum* 首次出现的层位。但是这项决议一经公布,就受到了各国学者的激烈争论与质疑,原因在于(Sun Weiguo, 1999):其一,作为划定埃迪卡拉(震旦)—寒武系界线的标志化石 *Treptichnus*

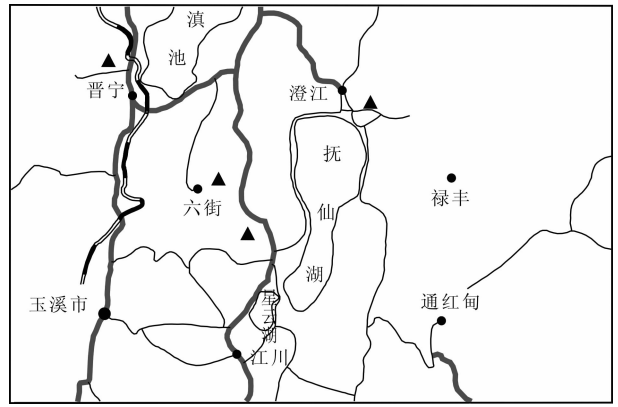


图 2 滇东地区江川—晋宁交通概要图
Fig. 2 The traffic sketch map between Jiangchuan and Jinning, South Yunnan

pedum 是一个跨系、跨阶及延限长的化石,作为划界的标志化石的可靠性和有效性欠缺;其二,该剖面以硅质碎屑岩为主,缺乏碳酸岩盐为主的界线层型中常见的微小骨骼化石(又称“小壳化石”),不能反映埃迪卡拉(震旦)纪—寒武纪过渡期生命演化的最显著特征,而且用遗迹化石组合也难以进行全球的精确对比;其三,该界线剖面附近的层位明显受到变质作用的影响,且缺乏火山岩层,无法进行可靠的同位素地质年代学、同位素化学地层学和古地磁学测试,限制了全球地层对比的可能性与普遍广泛性。因此,选择埃迪卡拉系—寒武系界线合适的全球层型剖面,特别是更合适的标志化石成为全球地层与古生物专家共同努力和关注的方向。

作为国际界线层型剖面 and 层型点(GSSP“金钉子”)的任何地层必须尽可能连续、海相和单相,划分界线的首要方法是生物地层学(Cowie et al., 1975)。可以说,这一确立 GSSP 的原则至今没有改变;1983 年 5 月,英国布里斯托尔会议还对埃迪卡拉(震旦)系—寒武系划界原则进一步补充为:埃迪卡拉(震旦)系—寒武系界线层型点应尽可能地接近具有良好对比潜力,并具多门类小壳化石组合最早层序的底部(Cowie et al., 1986)。

4.1 小壳化石

最初小壳化石的定义仅仅是早寒武世早期的一类“微小壳化石”(Small Shelly Fossil),用以强调“体小,带壳”的特征,在地质历史中是较早出现具有矿化骨骼(内骨骼或外骨骼)的生物类群,并且在三叶虫和古介形类出现之前的无三叶虫带占据优势地位,因此具有重要的生物演化和地质历史意义。我国寒武纪的小壳化石的研究始于 20 世纪 20 年代,

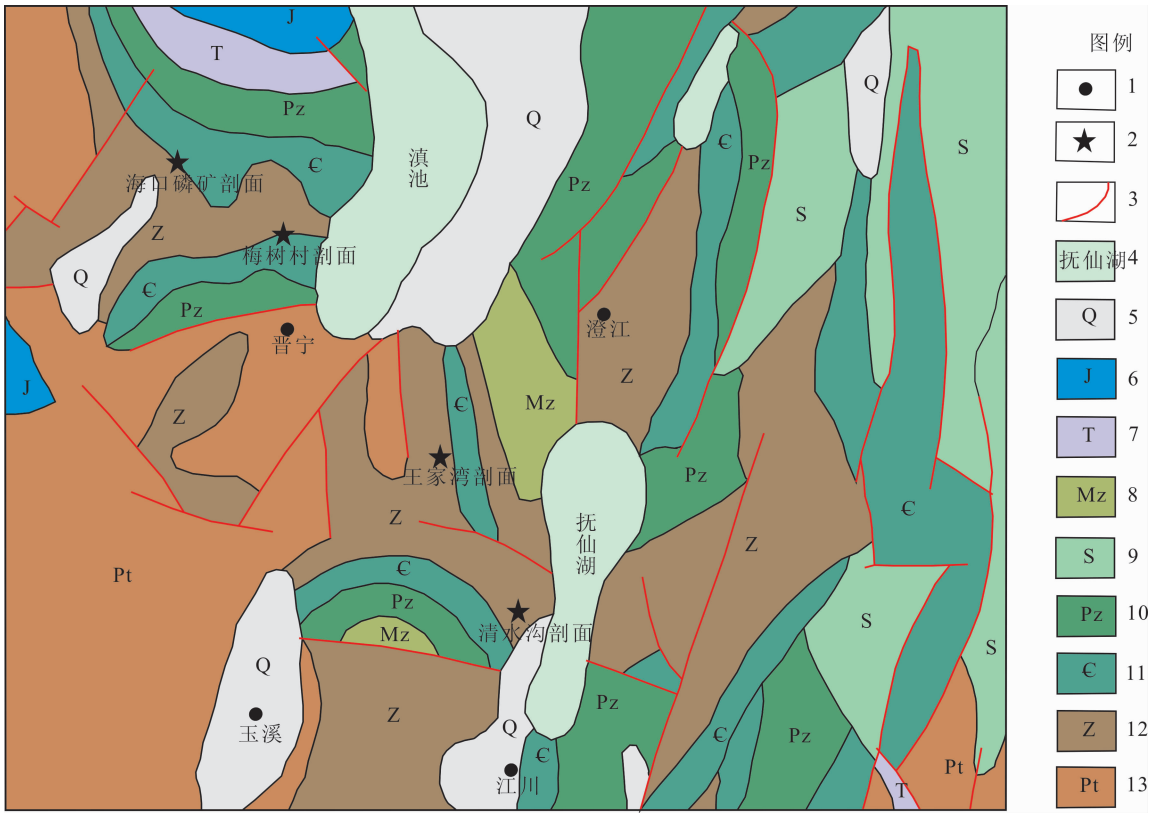


图 3 滇东地区江川—晋宁地质简图

Fig. 3 The geological map of Jiangchan and Jinning Section in Yunnan Province

1—工作区;2—工作剖面;3—断层;4—主要水体;5—第四系;6—侏罗系;7—三叠系;8—中生界未分;

9—志留系;10—古生界未分;11—寒武系;12—埃迪卡拉(震旦)系;13—古元古界

1—study area; 2—study section; 3—fault; 4—lake; 5—Quaternary System; 6—Jurassic System; 7—Triassic System;

8—uncatalogued Mesozoic Erathem; 9—Silurian System; 10—uncatalogued Paleozoic; 11—Cambrian System; 12—Ediacarian; 13—Paleoproterozoic

Walcott (1913)在“中国寒武纪动物群”(图 3)中描述了华北中、下寒武统的软舌螺 2 属、9 种、2 未定种;而真正与埃迪卡拉系—寒武系界线有关的小壳化石的研究是王鸿祯(1941)在云南昆明中谊村磷矿调查时,描述了采自磷矿层面上的软舌螺 4 种类型。随着国际上开展埃迪卡拉(震旦)系—寒武系界线层型的确定工作,推动了我国寒武纪最早期小壳化石的研究,在华南地区发现了许多小壳化石产地,并取得了至关重要的成果:基本摸清了这一化石动物群在我国的分布规律和地层垂直层序上的演化特点;发现了大量可以国际对比的典型种属及我国特有的类群。我国梅树村阶的小壳化石可明显的划分出三个各有特色、极易区分的组合(Jiang Zhiwen et al., 1982, 1988; Zhou Chuanming et al., 2001): I 组合 *Anabarites-Protohertzina* 带,组成单调,结构原始,纹饰简单,极少分异,处于梅树村阶初期带壳生物刚刚兴起的低级阶段,常见软舌螺、似软舌螺、单板类、腹足类等; II 组合 *Paragloborilus-Siphononuchites*

带,梅树村阶小壳化石发育高潮阶段,无论个体数量、种属类别、分异程度、纹饰结构都达到了登峰造极的地步,也是一个可以进行全球性对比的特征组合,代表类别有软舌螺、似软舌螺、管壳类、齿形类、腹足类、单板类、喙壳类、腕足类、开腔骨类、卡门壳类、原始单壁古杯、苔藓虫等; III 组合 *Sinosachites-Lapworthella* 带,三叶虫、古介形类出现之前的最后一个组合,处于梅树村阶带壳生物发育的末期,大部分常见的类别都消亡了,出现了一些适应特殊环境的类型,结构常变异,其中的一些很可能是节肢动物的始祖,主要包括软舌螺、单板类、管壳类、卡门壳类和开腔骨类等。以梅树村阶带壳化石为主,加上古杯类、苔藓虫的生物类群统称为“梅树村动物群”。小壳化石在全球具有十分广阔的分布,在我国主要集中在上扬子地台周缘的古陆附近,而云南东部则是密集保存的中心地带。

4.2 遗迹化石

遗迹化石一般为动物保存在沉积底质表面或内

部的居留或行迹化石,是生物化石种类中比较特殊的类别,由于它在沉积物中并不保存化石化的实体,因此要像动物化石那样系统分类是极其困难的,但以时间和沉积环境为序建立相应的时空变化序列以及进行适当的形态分类和相分类还是可能的。1982年蒋志文等深入研究了梅树村阶层型剖面——云南晋宁梅树村剖面极其丰富的遗迹化石材料,建立了中国梅树村阶的遗迹化石序列表。这代表古陆边缘浅水环境含磷岩系中碎屑岩、碳酸盐岩、硅质岩和胶磷矿交替变化的沉积类型中的遗迹化石序列,大致相当于遗迹化石的 *Skolithos* 相和 *Cruziana* 相,而且越是接近古陆边缘越是丰富。其中数量最多、发现最广的 *Didymaulichnus* 和 *Plagiognus* 具有全球对比意义,这为划分埃迪卡拉(震旦)系—寒武系界线及相邻地层创造了条件。梅树村阶遗迹化石共有 7 个层位产出:其中渔户村组中谊村段 4 个层位,箬竹寺组八道湾段 3 个层位。由下而上划分为 4 个序列如下:序 1—*Sellaulichnus meishucunensis*,梅树村阶最低序次,典型的单槽型迹,可能为带有附肢的软体节肢动物生成;序 2—*Cavaulichnus vialorus*,横断面为规则半圆弧形的单槽型迹,是为蠕虫运动的痕迹;序 3—*Didymaulichnus miclensis*,一种具有全球分布的典型的双槽复型迹,层位稳定,可以作为早寒武世早期地层的重要对比标志,它具有一个清楚的上迹痕和一个特征的下迹模,很可能是一类具有复杂外形腹部的具附肢动物运动时留下的痕迹;序 4—*Plagiognus* cf. *urcualus*,代表节肢动物出现之前遗迹化石产出的最高序次,为大型具附肢动物在沉积物内部活动留下的内迹孔穴(Jiang Zhiwen, 1982)。

随着对小壳化石的深入研究及其对应层位中遗迹化石的发现,一些研究者对小壳化石和遗迹化石之间的联系产生了浓厚的兴趣,但是二者很难发现在同一层位中,使得这种研究出现了较大的限制。Daily 就曾指出,寒武纪早期带壳动物群和遗迹化石群是同时形成并平行发展的两套动物群,在没有带壳动物群的沉积物中,遗迹化石就可以作为地层对比的“标志”(Daily, 1972)。在划分埃迪卡拉(震旦)系—寒武系界线时,由于考虑到由真核生物、多细胞生物和后生软躯体动物逐步发展到大量多门类带壳动物的出现,这是生物界一个划时代的重大转变,代表了动物界从不具骨骼向具骨骼演化的一次重大变革,因此将埃迪卡拉(震旦)系—寒武系界线定在“A”点(即 I 带之底)。但是由于各地的沉积环境和

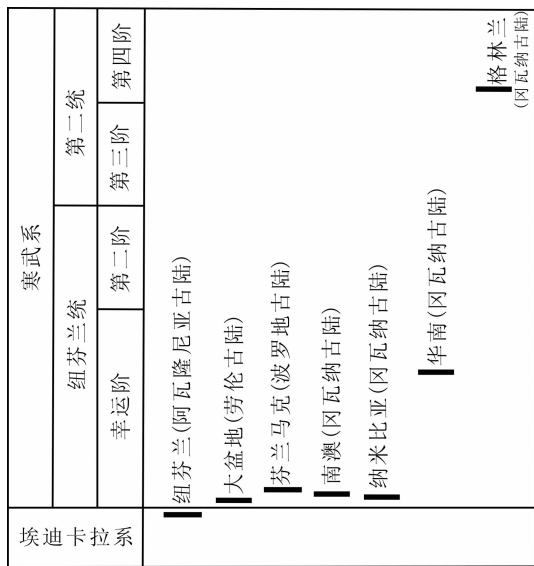


图 4 *Treptichnus pedum* 首现面在全球的分布
(改自 Babcock et al., 2014)

Fig. 4 Chart illustrating approximate positions of the first known appearances of *Treptichnus pedum* (indicated by black bars) in the uppermost Ediacaran and lower part of the Cambrian in some areas of the world (modified from Babcock et al. , 2014)

保存条件不同,再加上生物的发生和迁移等因素,导致了全球各个地区产生小壳化石的层位不一定相同,因此使划界和对比出现了困难。根据 1983 年布里斯托会议决定,界线层型点必须具有广泛的全球对比性,并以多门类小壳化石出现的最早地层的底部为界,因此,梅树村剖面该层型点被定在“B”点(Ⅱ带和Ⅲ带之间),其不仅是小壳化石发展的顶峰时期,化石门类增多,而且可以在碳酸盐沉积区和碎屑岩沉积区进行对比(Luo Huilin et al., 1990)。然而,国际地层委员会其后却将遗迹化石 *Treptichnus pedum* 的首现作为寒武纪的开始(Narbonne et al., 1987; Brasier et al., 1994)。对于这一划分一直存在争议,该遗迹化石在全球寒武纪早期地层中多层甚至跨统、阶出现,延限很长,极易造成生物地层对比的混乱(图 4);特别是后来在纽芬兰层型剖面的界线点之下的十多米处又有发现,表明当年确定的界线层型剖面研究并不详尽,存在明显的天然缺陷。不过, *Treptichnus pedum* 作为最早记录动物复杂活动的遗迹化石,它的出现代表了动物活动能力的显著增强,因此以 *Treptichnus pedum* 作为埃迪卡拉(震旦)系—寒武系界线的标志化石可以很好诠释埃迪卡拉(震旦)纪—寒武纪过渡时期早期生命演化出现重大转折的含义(Dong

Lin et al. , 2012)。

5 埃迪卡拉(震旦)系—寒武系界线附近可广泛对比的宏体化石

5.1 *Shaanxilithes* 条带状化石

Shaanxilithes 为广泛分布于埃迪卡拉(震旦)纪末期地层中一类属性未定的疑难化石,通过大量的形态学及显微构造观察表明其具有稳定的形态结构,往往以具有纵向排列的环纹、宽约 1~5mm 的条带状分布于粉砂岩、砂质页岩中,并相互时有叠覆(Zhang Zhiliang et al. , 2015)。*Shaanxilithes* 作为最古老的后生动物化石之一(Glaessner et al. , 1984),在全球范围内可以很好的对比(图 5),例如在我国的陕西宁强、云南晋宁、宁夏贺兰山、青海柴达木盆地、贵州清镇,西伯利亚中北部,西伯利亚平原,印度西北部等地区相继报道了 *Shaanxilithes* 化石的发现(Grazhdankin et al. , 2008; Zhuravlev et al. , 2009,2011; Tarhan et al. , 2014)。作为埃迪

信息后,更倾向于把 *Shaanxilithes* 解释为实体化石(Grazhdankin et al. , 2008; Meyer et al. , 2012; Tarhan et al. , 2014)。这对我们了解埃迪卡拉(震旦)纪—寒武纪之交生物的绝灭、复苏、繁盛过程以及划分埃迪卡拉(震旦)纪—寒武纪过渡期的地层界线都有着重要的意义。

Shaanxilithes 最早发现于陕西宁强震旦系高家山段底部灰黑色钙质粉砂岩中,该化石带在区域上分布比较广泛,层位稳定。张录易于 1964 年将其在陕西宁强宽川铺李家沟原下寒武统宽川铺组发现的“蠕形虫化石”定名为藻类 *Chabakovia* sp. (Hua Hong et al. , 2004),随后被重新修订为皱节虫,并将其赋存地层命名为上震旦统高家山组。而罗惠麟(1982)在观测云南澄江渔户村剖面时描述了第 1—4 层中具螺旋状显微断续构造与第 5 层中具层纹状构造及绿色泥质片,将其解释为非生物成因构造所形成的泥皮(Zhang Zhiliang, 2015)。邢裕盛(1984,1985)将其定为后生动物遗迹化石,并正式命

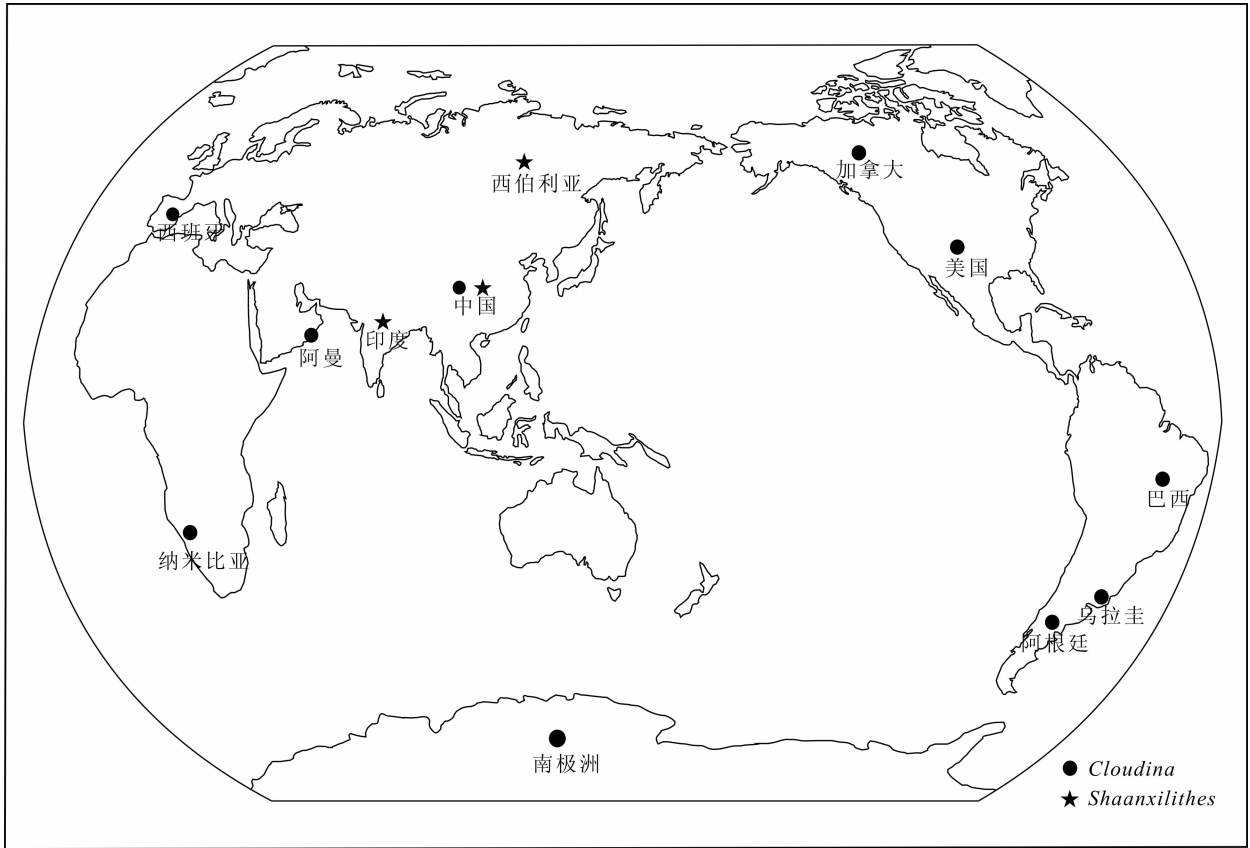


图 5 *Shaanxilithes* 和 *Cloudina* 化石在全球的分布
Fig. 5 The distribution of *Shaanxilithes* (black star) and *Cloudina* (black ball) in the world

卡拉(震旦)纪末期海洋环境中较为广布的一类生物,多数研究者在结合腐解与保存等埋藏学方面的

名为陕西宁强迹,沿用至今;张录易(1986)为了便于与峡东地区地层对比,将宁强地区富含高家山生物

群的层位重新命名为灯影组高家山段。随后的工作不断地推进了对 *Shaanxilithes* 的研究(Yang Shipu et al., 1985; Luo Huilin et al., 1988, 1991; Bengtson et al., 1992; Li Rihui et al., 1997; Hua Hong et al., 2000, 2004; Shen Bing et al., 2007; Weber et al., 2007; Cai Yaoping et al., 2010; Meyer et al., 2012), 对其埋藏环境和属性有了更加深入的认识。

Zhang Zhiliang et al. (2015)通过对晋宁六街镇旧城段粉砂岩中所采集的大量精美化石标本的观察研究,发现化石个体通常具紧密排列的环纹,呈带状延伸,并具有一定的厚度,为压扁状态保存的三维实体化石,个体长度 10~60mm 不等。化石以群体保存较为常见,个体之间常以断裂的袋状体和破裂的圆盘、次圆盘状体在不同的岩层面上相互交叠而不出现分支;而唐烽等在江川地区新发现碳膜保存的条带状化石,疑似 *Shaanxilithes*(图 6),可见密集的横脊纹,且横脊纹与体壁垂直(Tang Feng et al., 2015),这与邢裕盛(1984)的命名化石较为相似,而与六街镇旧城段所采集的化石有一定的区别(另文阐述)。

Cai Yaoping et al. (2011)、Meyer et al. (2012)从形态学上,结合埋藏学和地球化学信息对陕西南宁强高家山段不同类型的化石进行了分析,证实了 *Shaanxilithes* 存在不同保存及埋藏方式,扩大了对该化石的理解程度,不仅提高了洲际对比的精确程度,对于地层更加细致的划分也有一定的指导作用。同时,*Shaanxilithes* 广泛的产出于全球的地层中,又骤然消失灭绝于寒武系,目前的研究成果显示,其为埃迪卡拉系——寒武系地层划分及界线划定的全球性的标准化石之一。

5.2 *Cloudina* 矿化管状化石

产于埃迪卡拉(震旦)纪—寒武纪连续沉积层序界线之下的 *Cloudina* 化石,是介于埃迪卡拉型动物群和早寒武世小壳动物群之间,代表了隐生宙—显生宙时代生物大变革前的生物化石记录,因而在早期生命演化中具有极其重要的地位。最早的 *Cloudina* 化石发现于非洲西南部纳米比亚的 Nama 群中埃迪卡拉(震旦)纪地层中(图 5),并建立新属 *Cloudina* Germs, 1972 (Germs, 1972)。在 Germs 研究之后,在全世界都有 *Cloudina* 或者类似 *Cloudina* 化石的发现,Yochelson 和 Herrera(1974)将发现于阿根廷 Serra de Villiam 的管状化石归于 *Cloudina*, 之后,在南极洲 (Yochelson et al.,

1977)、美国的 Nevada 及 California (Signor et al., 1983)、巴西 (Hahn et al., 1985)、西班牙、阿拉伯半岛 Oman 地区 (Morris et al., 1990) 和中国陕西南宁强地区 (Morris et al. 1990; Bengtson et al. 1992; Zhang Luyi et al., 1992) 等数十个国家地区同时代的层位均有发现,产出年限为 548—542Ma 之间。Chen Zhe et al. (2001)根据宁强地区大量的孤立的三维立体标本研究,构建了两新的管状模型,即具有共同外壁的 A 型和不具外壁锥管裸露的 B 型; Hua Hong et al. (2005)对 *Cloudina* 的形态特征、骨骼发育和无性生殖方面做了系统的深入研究。通过众多学者多年来的研究及化石证据表明, *Cloudina* 在埃迪卡拉(震旦)纪—寒武纪界线附近灭绝了。虽然 *Cloudina* 在全球近乎所有的大陆均有分布,但是受制于保存环境和保存条件,几乎所有的化石只能用切片法来研究,大大影响了形态复原过程中的完整性和精确性。仅仅只有中国陕南地区和西班牙中部地区的 *Cloudina* 化石以三维立体的形式保存,这些化石标本对形态学恢复研究起了决定性的作用。特别是我国陕南地区灯影组地层中以磷酸盐化形式三维立体保存的 *Cloudina*, 不仅保留了精美的且完整的管状结构,而且管体表面的壳饰结构也很好的保存了下来,这成为研究 *Cloudina* 形态学的良好材料。同时,由于其广泛的全球分布,作为划分地层的标志化石也是很好的研究材料,为厘清埃迪卡拉(震旦)纪—寒武纪地层的工作提供了新的资料成果。

陕南宁强地区位于扬子地台北部边缘, *Cloudina* 化石主要采自陕西南宁强地区宽川铺南 3km 处的李家沟剖面灯影组高家山段的灰白色白云岩中。该地区灯影组地层可分为藻白云岩段、高家山段和宽川铺段 (Ding Lianfang et al., 1983, 1990)。藻白云岩段为厚层白云岩,夹具葡萄状、花斑状结构的白云岩。高家山段是以夹砂岩或砂页岩的碎屑岩为主的岩段,下部为钙质粉砂岩及页岩,含化石 *Shaanxilithes ningqiangensis*, 中部为砂质白云岩夹白云质砂岩,上部为灰白色白云岩,含 *Cloudina*、*Sinotubulites* 化石;宽川铺段为白云岩、灰岩、黑色燧石层,夹磷块岩及页岩,富含小壳化石和微古植物,小壳化石最低出现的层位含有 *Circotheca* sp., *Anabarites trisulcatus* Miss., *Paleosulcatus irregularis* Qian 以及 *Olivoides multisulcatus* Qian 等 (Xing Yusheng et al., 1984; Ding Lianfang et al., 1990), 化石产出层位属于埃

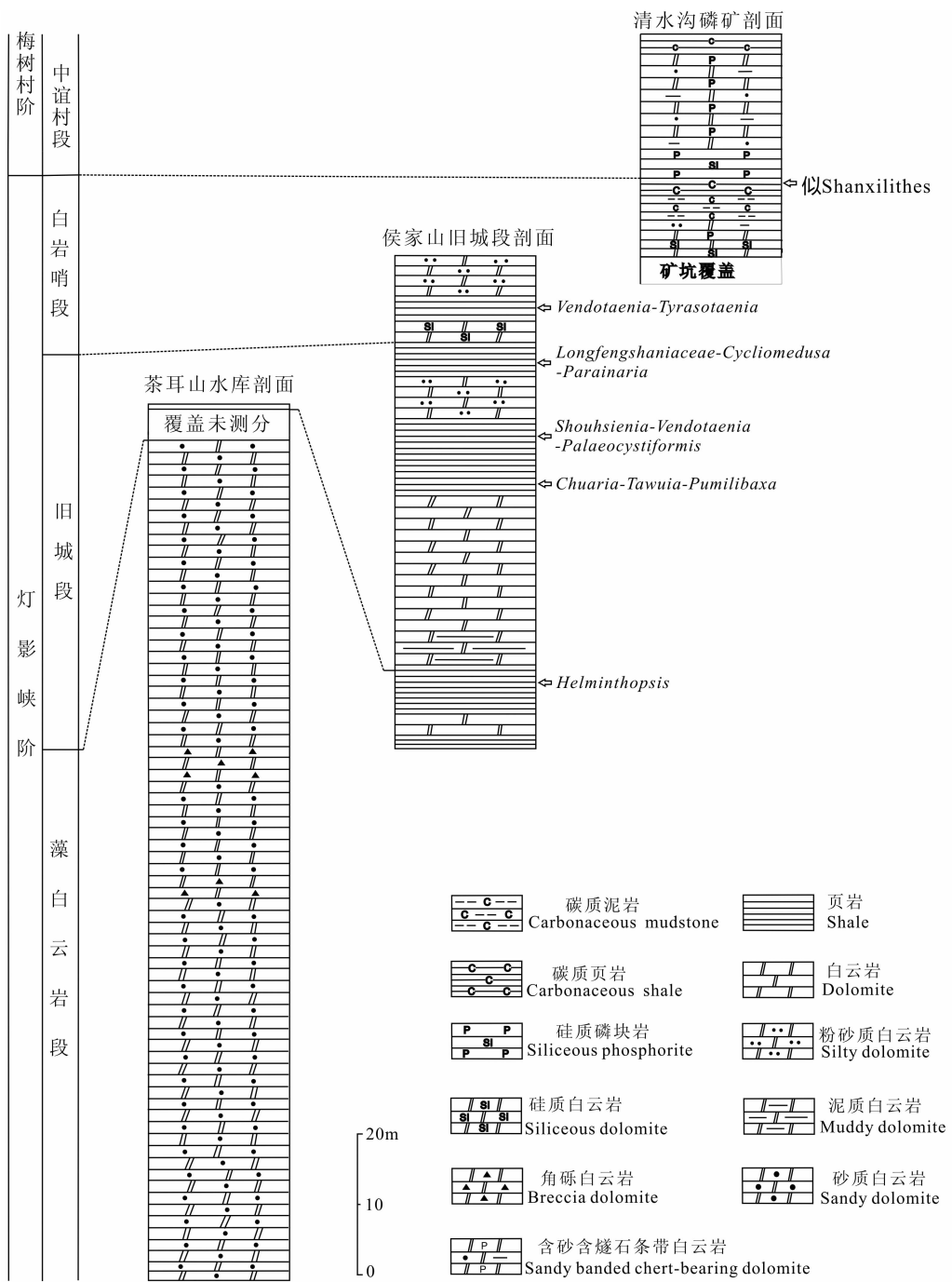


图 6 云南江川研究区柱状图

Fig. 6 The column chart in the Jiangchuan area, Yunnan Province

迪卡拉纪晚期至寒武纪早期过渡沉积。

由于化石保存的原因,以往的 *Cloudina* 研究多局限于化石光薄片材料,这使得对 *Cloudina* 的形态结构认识不太全面而易出现分歧。我国陕西宁强地区李家沟剖面产出的 *Cloudina* 化石经过早期磷酸盐化的作用,使得化石能够以三维立体结构的方式保存下来,为研究 *Cloudina* 的形态提供了完美的立体标本。Chen Zhe et al. (2001)和 Hua Hong et al. (2005)对此进行深入详尽的研究后认为 *Cloudina* 是一类管体直或弯曲具叠锥套合结构的管状化石。高家山生物群中 *Cloudina* 主要以两种不同的保存方式出现(Hua Hong et al., 2009),在李家沟剖面 *Cloudina* 管体普遍磷酸盐化,化石管体直径较小,一般仅为 0.2~1.1mm,最大直径 3mm,保存长度为 1~2mm,最长可达 20mm;在高家山—牛落坑剖面,*Cloudina* 以碳酸钙质生物碎屑存在,管体直径

普遍较大。并且,Hua Hong et al. (2009)发现陕西宁强地区高家山——牛落坑剖面的同位素变化与纳米比亚地区 *Cloudina* 产出层位的同位素变化极为吻合,都伴随着 δ^{13} 的明显正漂移,同时这与世界上其他地区的埃迪卡拉系中上部的碳同位素变化曲线也可以很好的对比。因此可以充分的说明,*Cloudina* 是目前埃迪卡拉系——寒武系地层划分最有潜力的标准化石之一。

6 对埃迪卡拉(震旦)系—寒武系界线标志化石选取的思考与建议

埃迪卡拉(震旦)系—寒武系界线是地质历史时期一个十分重要的转折点,它代表了由藻类、微体生物为主的埃迪卡拉(震旦)纪生物圈向以后生动物为代表的寒武纪生物圈的演替,同时也揭示了相对富氧的地表环境的开始(Anbar et al., 2002)。1992年国际地层委员会将埃迪卡拉(震旦)系—寒武系界线层型的“金钉子”确定在加拿大纽芬兰统,不过作为标志化石的 *Treptichnus pedum* 在原来的层型剖面的界线层型点之下十多米处又被发现(Gehling et al., 2001),使得这一界线层型有了瑕疵。尽管如此,*Treptichnus pedum* 作为最早记录了动物复杂生命活动的遗迹化石,而成为“金钉子”标志化石还是较为合适的。但事实上 *Treptichnus pedum* 作为标志化石在实际地层对比中存在诸多困难。首先,这是迄今为止,显生宙所有“金钉子”中唯一使用遗迹化石首现作为地层对比的标志化石,而遗迹化石毕竟不同于特征显著、分类明确和单向演化的实体化石,本身存在很大的局限性,包括:形态相对简单,造迹生物不明确,同相岩层会出现同样的遗迹化石;其次,遗迹化石几乎都保存在碎屑岩层中,其分布受沉积环境的影响很大,如该类标志化石在全球许多早寒武世早期剖面不存在或者不易找到,而在纽芬兰层型剖面和云南梅树村标准剖面却多层出露;更为麻烦的是,该类化石出现的层位跨度较大,且不等时,在华南最早记录在梅树村阶底部,最晚甚至可以见于中寒武统都匀阶的凯里生物群(Wang Yue et al., 2006),给界线附近地层的精准对比和区域地质调查的实际工作增加了难度。为了解决这一问题,学术界日益倾向于寻找其他易于对比的化石门类对埃迪卡拉(震旦)系—寒武系过渡地层进行厘定。

我国华南地区的梅树村阶可能代表着中国寒武系底部的年代地层单位,其命名剖面曾经作为显生

宙第一个“金钉子”的全球唯一候选层型,其中发育着最原始、最古老的具有矿化内外骨骼的多门类带壳化石生物群——梅树村生物群,标志着生物发展中两次较为重大的演化事件:其一是地史中首次出现大量多门类的带壳动物化石,这是动物由软躯体向具硬体骨骼方向的演化,是一次重大的变革;其二是以软舌螺为主的最古老的小型带壳动物演化到更复杂的以三叶虫、古介形虫为代表的节肢动物群。因此最早将埃迪卡拉(震旦)系—寒武系界线层型剖面和界线点(GSSP)确立在梅树村剖面的底界“A”点(即小壳化石的首现,也是I带的底界),只是为了广泛的全球地层对比,在1983年布尔斯托会议才决定以多门类小壳化石出现的最早地层的底部为界,因而该层型界线点又被定在“B”点(II带和III带之间),其不仅是小壳化石发展的顶峰时期,化石门类增多,而且碎屑岩夹层中出现有遗迹化石等宏体化石类别,可以在碳酸盐沉积区和碎屑岩沉积区同时进行对比。但上述方案又被界线地层工作组的英语系专家以若干非学术因素所否定,于1992年最终投票选择了加拿大纽芬兰幸运阶以遗迹化石为标志的界线层型“金钉子”,造成了现今的局面。

因此,笔者认为,随着研究工作的深入和地层对比的实际需要,埃迪卡拉(震旦)系—寒武系界线层型及其标志化石的选取应该首选分布广泛、易于观察的宏体化石,再结合小壳化石、遗迹化石、疑源类微化石和同位素地球化学资料等其他辅助标志,来共同确定埃迪卡拉(震旦)系——寒武系界线,这应该是将来一个更好的地层对比选择。

产自埃迪卡拉生物群和小壳生物群之间的最早的矿化管状化石 *Cloudina* 是埃迪卡拉(震旦)系—寒武系过渡层中的生物重大演化事件的主角之一,在生物系统演化中占有重要的地位,是新元古代末期一类重要的标准化石;通过对 *Cloudina* 的管体形态学和埋藏学的综合研究推断,它是软泥基底上的一类底栖生物类群,倾斜或者平躺式生长;它具有较为稳定的时代分布(550~543Ma, Hua Hong et al., 2009)和更为广泛的地理分布范围,利于进行全球对比。而同样广泛出现于我国扬子地台周缘埃迪卡拉纪末期最早含磷沉积层之下细粒碎屑岩中的 *Shaanxilithes* 碳膜实体或铸型化石,在西伯利亚、印度等地也同样有广泛的分布;其独特的条带状构造(单一不分枝管状或扁平带状),具有均匀细密的横节纹,在特定岩层中较为常见,容易识别;从生物分类的角度分析,*Shaanxilithes* 更可能属于蠕形动

物,推测为两侧对称的三胚层动物的最原始类别,在多细胞动物早期演化中应当占有极为重要的地位(将另文报道),因而作为显生宙起始的标志化石具备更大的潜力;而且,目前经过笔者等深入系统的发掘研究,在华南滇东地区的江川侯家山—清水沟剖面自下而上从灯影组旧城段至中谊村段底部出露有基本完整连续的宏体化石组合记录,可与晋宁底寒武统的梅树村阶标准剖面对接,可以争取建立埃迪卡拉(震旦)系顶阶层型剖面,剖面顶部大量保存的 *Shaanxilithes* 化石可以修订现行的埃迪卡拉(震旦)系—寒武系界线“金钉子”标志。

7 结论

新元古代冰期结束后,生物圈环境剧烈变化,并伴随这同位素的剧烈漂移,而导致了早期生命的快速演替。作为划分埃迪卡拉系——寒武系界线的标准化石,小壳化石因其生物时限长,首现面化石丰度低而不利于对比,因而不是标准化石的理想选择;遗迹化石 *Treptichnus pedum* 不仅因为其生物时限长,不利于对比,同时因其在寒武纪早期地层中跨系、跨阶产出,以及 *Treptichnus pedum* 出现的层位下移导致其首现面的确定出现问题,所以也并不适合作为标准化石。我国华南地区埃迪卡拉系灯影组的矿化管状 *Cloudina* 和条带状 *Shaanxilithes* 在全球范围内都有广泛的分布,以磷酸盐化形式三维立体保存的 *Cloudina* 保留了精美而完整的管状结构,而且它还代表了隐生宙—显生宙时代生物大变革前的生物化石记录;实体化石 *Shaanxilithes* 广泛的分布于寒武纪底部磷块岩之下,埃迪卡拉系顶部的地层之中,易于识别与对比,并且又骤然消失灭绝与寒武系,化石时限短,因此 *Cloudina* 和 *Shaanxilithes* 都是作为埃迪卡拉系—寒武系界线标准化石的理想材料。

致谢: 云南省环境规划院段向东、江川江城镇国土所周建华、晋宁昆阳磷矿张世山和肖运波、中科院澄江研究站吴怀智、西北大学地质系华洪和闵筱、贵州大学资环学院王约、陕西宁强高家山村李发志等协助或指导野外工作;耶鲁大学 Lidya Tarhan 和 Noah Planavsky 博士提供对比资料并对本文提出重要修改意见;中科院成都生物所曹跃同学帮助收集资料,在此一并表示感谢!

References

Anbar A D, Knoll A H. 2002. Proterozoic ocean chemistry and

- evolution: a bioinorganic bridge? *Science*, 297 (5584): 1137~42.
- Babcock L E, Peng Shanchi, Zhu Maoyan, Xiao Shuhai, Ahlberg P. 2014. Proposed reassessment of the Cambrian GSSP. *Journal of African Earth Sciences*, 98(7): 3~10.
- Bengtson S, Yue Zhao. 1992. Predatorial borings in late precambrian mineralized exoskeletons. *Science*, 257 (5068): 367~9.
- Brasier M, Cowie J, Taylor M. 1994. Decision on the Precambrian-Cambrian boundary stratotype. *Episodes*, 17(1): 3~8.
- Cai Yaoping, Hua Hong, Xiao Shuhai, Schiffbauer J D, Li Peng. 2010. Biostratinomy of the Late Ediacaran pyritized Gaojiashan Lagerstätte from southern Shaanxi, South China; Importance of event deposits. *Palaios*, 25: 487~506.
- Chen Meng-e, Wang Yizhao. 1977. Tubular animal fossils in the middle Dengying Formation, Upper Sinian, East Yangtze Gorge. *Chinese Science Bulletin*, 22: 219~221 (in Chinese).
- Chen Meng-e, Chen Yiyuan, Qian Yi. 1981. Some tubular fossils from Sinian-Lower Cambrian boundary sequences, Yangtze Gorge. *Bulletin of Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences*, 3: 117~124 (in Chinese with English abstract).
- Chen Xiaohong, Wang Xiaofeng, Wang Chuangshang, Li Zhihong, Chen Lide. 1999. A preliminary study on carbonaceous megafossils from the Late Sinian Liuchapo Formation of West Wuhan. *Geology and Mineral Resources of South China*, 2: 1~30 (in Chinese with English abstract).
- Chen Zhe, Sun Weiguo. 2001. Late Sinian metazoan tubular fossils *Cloudina* and *Sinotubulites* in south Shaanxi, China. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 18 (2): 180~202 (in Chinese).
- Cohen P A, Knoll A H, Kodner R B. 2009. Large spinose microfossils in Ediacaran rocks as resting stages of early animals. *Proceedings of National Academy of Sciences of the USA*, 106(16): 6519~6524.
- Cwoie J W, Glawssner M F. 1975. The Precambrian-Cambrian Boundary: A symposium. *Earth-Science Reviews*, 11(3): 209~251.
- Cwoie J W. 1986. Guidelines for boundary stratotypes. *Episodes*, 9: 78~82.
- Daily B. 1972. The base of the Cambrian and the first Cambrian faunas. *Special Paper-Center for Precambrian Research*, 1: 13~37.
- Dong Lin, Song Weiming, Xiao Shuhai, Yuan Xunlai, Chen Zhe, Zhou Chuanming. 2012. Micro-and macrofossils from the Piyuancun Formation and their implications for the Ediacaran-Cambrian boundary in South Anhui. *Journal of Stratigraphy*, 36(3): 600~610 (in Chinese with English abstract).
- Ding Lianfang, Li Yong, An Guoqin. 1983. On Sinian-Cambrian boundary in south Shaanxi, China. *Journal of Chang'an University*, 5(2): 9~22 (in Chinese).
- Ding Lianfang, Qin Hongbin, Li Yong. 1990. The study of Sinian-

- Cambrian boundary in south Shaanxi, China. *Biostratigraphic Symposium*(23), Beijing: Geological Publishing House, 96~130(in Chinese).
- Germis G J B. 1972. New shelly fossils from Nama Group, South West Africa. *American Journal of Science*, 272(8):752~761.
- Gehling J G, Jensen S, Droser M L, Myrow P M, Narbonne G M. 2001. Burrowing below the basal Cambrian GSSP, Fortune Head, Newfoundland. *Geological Magazine*, 138 (2): 213~218.
- Geng Yuansheng, Kuang Hongwei, Liu Yongqing, Du Lilin. 2017. Subdivision and correlation of the Mesoproterozoic stratigraphy in the western and northern of Yangtze block. *Acta Geologica Sinica*, 91 (10): 2151~2174 (in Chinese with English abstracts).
- Glaessner M F. 1984. The dawn of animal life—A biohistorical study. Cambridge: Cambridge University Press, 1~241.
- Grazhdankin D V, Balthasar U, Nagovitsin K E, Kocchnev B B. 2008. Carbonate-hosted Avalon-type fossils in arctic Siberia. *Geology*, 36(10):803~806.
- Hahn G, Hahn R, Leonardos OH, Pflug HD, Walde DHG. 1982. Körperlich erhaltene Scyphozoen-Reste aus dem Jungpralambrium Brasiliens. *Geologica Et Palaeontologica*, 16: 1~18.
- Hua Hong, Zhang Luyi, Zhang Zifu, Wang Jingping. 2001. Assemblage zone of Gaojiashan Biota and their characteristics. *Journal of Stratigraphy*, 25 (1): 13~17 (in Chinese with English abstract).
- Hua Hong, Zhang Luyi, Zhang Zifu, Wang Jingping. 2000. Fossil evidences of latest neoproterozoic gaojiashan biota and their characteristics. *Acta Palaeontologica Sinica*, 39(4):507~515 (in Chinese with English abstract).
- Hua Hong, Chen Zhe, Yuan Xunlai, Zhang Luyi, Xiao Shuhai. 2005. Skeletogenesis and asexual reproduction in the earliest biomineralizing animal Cloudina. *Geology*, 33(4):277~280.
- Hua Hong, Chen Zhe, Cai Yaoping, Li Peng. 2009. The earliest biomineralizing animal Cloudina: an important index fossil in the Late Ediacaran. *Journal of Northwest University*, 39(3): 522~527(in Chinese with English abstract).
- Hua Hong, Chen Zhe, Zhang Luyi. 2004. Shaanxilithes from taozichong formation of guizhou province and its significance. *Journal of Stratigraphy*, 28 (3): 265~269 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Ganqing, Kaufman A J, Christie-Blick N, Zhang Shihong Wu Huaichuan. 2007. Carbon isotope variability across the Ediacaran Yangtze platform in South China: implications for a large surface-to-deep ocean $\delta^{13}\text{C}$ gradient. *Earth Planetary Science Letters*, 261: 303~320.
- Jiang Ganqing, Zhang Shihong, Shixiaoying, Wang Xinqiang. 2008. Migration of the oxide boundary and oxygen isotope variations of the Ediacaran Doushantuo basin in South China. *Science in China D-Earth Sciences*, 38(12):1481~1495(in Chinese).
- Jiang Zhiwen. 1982. Meishucunian Small Shell Fossils and trace fossils sequence in Yunnan, China. *Yunnan Geology*, 1(3):256~264(in Chinese).
- Jiang Zhiwen, M D Brasier, B Hamdi. 1988. Correlation of the Meishucun Stage in South Asia. *Acta Geologica Sinica*, 3: 191~199(in Chinese with English abstract).
- Landing, E. 1994. Precambrian-Cambrian boundary global stratotype ratified and a new perspective of Cambrian time. *Geology*, 22:179~182.
- Li Rihui, Yang Shipu, Li Weiqun. 1997. Trace Fossils from Sinian-Cambrian Boundary Strata in China. Beijing: Geological Publishing House, 1~99(in Chinese with English abstract).
- Luo Huilin, Jiang Zhiwen, Xue Chongjiu, Song Xueliang, Xue Xiaofeng. 1980. The research of Sinian-Cambrian boundary from Meishucun and Wangjiawan in Jinning county, Yunnan province. *Acta Geologica Sinica*, 2:95~111(in Chinese without English abstract).
- Luo Huilin, Jiang Zhiwen, He Tinggui. 1982. On the Sinian-Cambrian boundary in the Sichuan-Yunnan region. *Scientia Geologica Sinica*, 2: 215~219 (in Chinese without English abstract).
- Luo Huilin, Jiang Zhiwen, Wu Xiche, Song Xueliang, Ou Yanglin. 1990. Global correlation of biostratigraphic in Meishucunian and Precambrian-Cambrian boundary. *Scientia Sinica*, 3:313~318(in Chinese without English abstract).
- Luo Huilin, Wu Xiche, Ouyang Lin. 1991. Facies changes and transverse correlation of the sinian—cambrian boundary strata in eastern yunnan. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 4:27~35(in Chinese with English abstract).
- Luo Huilin, Wu Xiche, Ouyang Lin, Jiang Zhiwen. 1988. New correlation opinions on the sections of sinian-cambrian boundary in the yangtze platform. *Yunnan Geology*, 7(1):13~27(in Chinese with English abstract).
- Meyer M, Schiffbauer J D, Xiao Shuhai, Cai Yaoping, Hua Hong. 2012. Taphonomy of the upper ediacaran enigmatic ribbonlike fossil shaanxilithes. *Palaos*, 27(5):354~372.
- Morris C, Mattes S, Chen M. 1990. The early skeletal organism Cloudina: New occurrences from Oman and possibly China. *American Journal of Science*, (1):245~260.
- Narbonne G M, Myrow P M, Landing E, Andersen M M. 1987. A candidate stratotype for the Precambrian-Cambrian boundary, Fortune Head, Burin Peninsula, southeastern Newfoundland. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 24(7):1277~1293.
- Ouyang Qing, Zhou Chuanming, Guan Chengguo, Wang Wei. 2015. New Microfossils from the Ediacaran Doushantuo Formation in the Yangtze Gorges area, South China, and their biostratigraphic implications. *Acta Palaeontologica Sinica*, 54 (2):207~229(in Chinese with English abstract).
- Peng Shanchi, Wang Xiaofeng, Xiao Shuhai, Tong Jinnan, Hua Hong, Zhao Yuanlong. 2012. A call to replace the chronostratigraphic unit Sinian System (Period) with the global Ediacaran System (Period). *Journal of Stratigraphy*, 36(1): 55~59(in Chinese without English abstract).

- Shen Bing, Xiao Shuhai, Dong Ling, Zhou Chuanming, Liu Jianbo. 2007. Problematic macrofossils from Ediacaran successions in the North China and Chaidam blocks: Implications for their evolutionary roots and biostratigraphic significance. *Journal of Paleontology*, 81(6):1396~1411.
- Shu De-gan. 2009. Cambrian explosion: formation of tree of animals. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 31(2): 111~134(in Chinese without English abstract).
- Signor P W, Mcmenamin M A S, Gevirtzman D A, Mount J F. 1983. Two new pre-trilobite faunas from western north america. *Nature*, 303(5916): 415~418.
- Sun Weiguo, Feng Weimin. 1999. The reconsideration of the GSSP in Precambrian-Cambrian. *Geoscience*, 2: 239 ~ 240 (in Chinese).
- Tang Feng, Song Xueliang, Yin Chongyu, Liu Pengju, Awramik S M, Wang Ziqiang, Gao Linzhi. 2006. Discoveries of Longfengshaniaceans from Uppermost Ediacaran (Sinian) in Eastern Yunnan, South China and significances. *Acta Geologica Sinica*, 80(11):1643~1649(in Chinese with English abstract).
- Tang Feng, Gao Linzhi, Wang Ziqiang. 2009. Palaeogeography and palaeoecology of the Ediacaran (Sinian) macrofossil biota in South China. *Journal of Palaeogeography*, 11(5):524~533(in Chinese with English abstract).
- Tang Feng, Gao Linzhi, Yin Chongyu, Wang Yue, Gu Peng. 2015. Macrofossil biotas in the Late Ediacaran-Cambrian boundary interval of South China and stratotype correlation. *Geological Bulletin of China*, 34(12):2150~2162(in Chinese with English abstract).
- Tang Feng, Yin Chongyue, Stefan Bengtson, Liu Pengju Wang Ziqiang Gao Linzhi. 2008. Octoradiate spiral organisms in the Ediacaran of South Chian. *Acta Geologica Sinica*, 82: 27~34.
- Tang Feng, Stefan Bengtson, Wang Yue, Wang Xunlian, Yin Chongyue. 2011. Eoandromeda and the origin of Ctenophora. *Evolution & Development*, 13: 5, 408~414.
- Tarhan L G, Hughes N C, Myrow P M, Bhargava O N, Ahluwalia A D, Kudryavtsev A B. 2014. Precambrian-Cambrian boundary interval occurrence and form of the enigmatic tubular body fossil *Shaanxilithes ningqiangensis*, from the Lesser Himalaya of India. *Paleontology*, 57(57):283~298.
- Wang Xinqiang, Shi Xiaoying. 2010. Spatio-temporal carbon isotope variation during the Ediacaran period in South China and its impact on bio-evolution. *Science China: Earth Sciences*, 52(10): 1520~1528(in Chinese without English abstract).
- Wang Yue, Wang Xunlian, Huang Yuming. 2008. Megascopic Symmetrical Metazoans from the Ediacaran Doushantuo Formation in the Northeastern Guizhou, South China. *Journal of China University of Geosciences*. 19(3): 200~206.
- Wang Yue, Zhou Zhicheng, Zhao Yuanlong, Yu Meiyi. 2006. Relationship between ichnocoenosis and sedimentary environment in the lower middle Cambrian Kaili Formation of Taijiang, Guizhou, China. *Acta Palaeontologica Sinica*, 45(2):243~251.
- Wang Zhengjiang, Wang Jiang, Wang Xinsheng, Sun Haiqing, Gao Tianshan, Chen Jianshu, Qiu Yansheng, Du Qiuding, Deng Qi, Yang Fei. 2015. New Progress for the Stratigraphic Division and Correlation of Neoproterozoic in Yangtze Block, South China. *Geological Review*, 61(1): 1~22(in Chinese with English abstract).
- Wang Ziqiang, Suo Shutian. 1986. The paleostructure and palaeogeography of Meso-Neoproterozoic in South China/Wang Hongzhen, Yang Weiran, Liu Benpei. The tectonic history of paleo-continental margin in South China. Wuhan: Geological College Press, 16~38(in Chinese).
- Weber B, Steiner M, Zhu Maoyan. 2007. Precambrian-Cambrian trace fossils from the Yangtze Platform (South China) and the early evolution of bilaterian lifestyles. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 254(1-2):328~349.
- Willman S. 2009. Morphology and wall ultrastructure of leiosphaeric and acanthomorphic acritarchs from the Ediacaran of Australia. *Geobiology*, 7: 8~20.
- Xia Wenjie, Du Senguan, Xu Xinhuang. 1994. Sinian lithofacies and palaeogeography in south China. Beijing: Geological Publishing House, 50~62(in Chinese).
- Xing Yusheng, Yue Zhao. 1984. Sinian-Cambrian boundary in China. *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences*, 10:111~125.
- Xing Yusheng, Ding Qixiu, Luo Huilin, He Tinggui, Wang Yangeng, Chen Yiyuan, Zhang Shusen, Liu Guizhi, Xiong Xingwu, Chen Ping, Jiang Zhiwen, Wu Xiche, Song Xueliang, Ouyang Lin, Ding Lianfang, Yin Gongzheng, Zheng Shufang, Qian Yi, Yue Zhao. 1984. The Sinian-Cambrian boundary of China. *Bulletin of the Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences*, 10: 1~262 (in Chinese with English abstract).
- Xing Yusheng, Duan Chenghua, Liang Yuzuo. 1985. Late Precambrian Palaeontology of China. Beijing: Geological Publishing House, 1~243(in Chinese).
- Xue Yaosong, Zhou Chuanming, Chen Zhe. 2004. Discovery of microfossils of the Late Sinian Gaojiashanian age in Nanzhang, Hubei province, China, with remarks on the geological significance of the Nanjiang uplift movement. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 21(1): 1~12 (in Chinese with English abstract).
- Yang Shipu, Zheng Zhaochang. 1985. The Sinian trace fossils from Zhengmuguan Formation of Helanshan Mountain, Ningxia. *Earth Science Journal of Wuhan College of Geology*, 10:9~18 (in Chinese).
- Yin Chongyu, Gao Linzhi, Xing Yusheng. 2001. New observations on phosphatized spheroidal fossils in Sinian Doushantuoan phosphorites in Weng'an, Guizhou Province. *Acta Geologica Sinica*, 75(2): 145~152(in Chinese with English abstract).
- Yin Leiming, Zhu Maoyan, Knoll A H, Yuan Xunlai, Zhang Junming, Hu Jie. 2007. Doushantuo embryos preserved inside

diapause egg cysts. *Nature*. 446: 661~663.

Yin Leiming, Li Zaiping. 1978. Precambrian microfloras of southwest China, with reference to their stratigraphical significance. *Memoir of Nanjing Institute of Geology and Palaeontology*, Academia Sinica. 10: 41~108.

Yochelson E L, Stump E. 1977. Discovery of Early Cambrian Fossils at Taylor Nunatak, Antarctica. *Journal of Paleontology*, 51(4):872~875.

Yuan Xunlai, Chen Zhe, Xiao Shuhai, Wan Bin, Guan Chengguo, Zhou Chuanming, Hua Hong. 2012. Lantian Biota: A window for understanding the origin and early evolution of multicellular organisms. *Chinese Science Bulletin*, 57(34): 3219~3327 (in Chinese).

Zhang Luyi, Dong Junshe, Tian Shuhua. 1992. Gaojiashan Biota. / Ding Lianfang. Early biological study cross Late Sinian to Early Cambrian in Yangtze Gorges margin(in Chinese).

Zhang Zhiliang, Hua Hong, Zhang Zhifei. 2015. Problematic Ediacaran fossilSha anxilithes from the Jiucheng Member of Wangjiawan Section in Jinning, Yunnan Province. *Acta Palaeontologica Sinica*, 54: 12~28 (in Chinese with English abstract).

Zhao Ziqiang, Xing Yusheng, Ma Guogan, Chen Yiyuan. 1985. The biostratigraphy in Yangtze Gorges area, I : The Sinian Section. Beijing: Geological Publishing House, 1~143 (in Chinese).

Zhou Chuanming, Xiao Shuhai. 2007. Ediacaran $\delta^{13}C$ chemostratigraphy of South China. *Chemical Geology*, 237: 89~108.

Zhou Chuanming, Xie Guwei, Kathleen McFadden, Xiao Shuhai, Yuan Xunlai. 2007. The diversification and extinction of Doushantuo-Pertatataka acritarchs in South China: causes and biostratigraphic significance. *Geological Journal*, 42: 229~262.

Zhou Chuanming, Yan Kui, Hu Jie, Meng Fanwei, Chen Zhe, Xue Yaosong, Cao Ruiji, Yin Leiming, Wang Jinqian, Wang Jinlong, Xiao Shuhai, Bao Huiming, Yuan Xunlai. 2001. The neoproterozoic tillites at lantian, xiuning county, anhui province. *Journal of Stratigraphy*, 25, 247~252 (in Chinese with English abstract).

Zhu Maoyan, Zhang Junming, Yang Aihua. 2007. Integrated Ediacaran (Sinian) chronostratigraphy of South China. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 254: 7~61.

Zhu Maoyan, Gehling J G, Xiao Shuhai, Droser M L. 2008. Eight-armed Ediacara fossil preserved in contrasting taphonomic windows from China and Australia. *Geology*, 36(11): 867~870.

Zhu Maoyan, Strauss H, Shield G A. 2007. From Snowball Earth to the Cambrian bioradiation: Calibration of Ediacaran-Cambrian Earth history in South China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 254: 1~6.

Zhu Maoyan. 2010. The origin and Cambrian explosion of animals; fossil evidences from China. *Acta Palaeontologica Sinica*, 49 (3): 269~287(in Chinese with English abstract).

Zhuravlev A Y, Vintaned J G, Ivantsov A Y. 2009. First finds of problematic Ediacaran fossilGaojiashania in Siberia and its origin. *Geological Magazine*, 146(146):775~780.

Zhuravlev A Y, Vintaned J G, Ivantsov A Y. 2011. Discussion of “First finds of problematic Ediacaran fossilGaojiashania in Siberia and its origin”(Reply). *Geological Magazine*, 148:329~333.

Zi Jinping, Jia Dong, Wei Guoqi, Yang Zhenyu, Zhang Yong, Hu Jing, Shen Shuxin. 2017. LA-ICP-MS U-Pb zircon ages of volcanoclastic beds of the third Member of the Sinian (Ediacaran) Dengying Formation in Leshan, Sichuan, and a discussion on the rift evolution in the basin. *Geological Review*, 63 (4): 1040~1050 (in Chinese with English abstracts).

参 考 文 献

陈孟莪,王义昭. 1977. 峡东地区上震旦统灯影组中段的管状化石动物. *科学通报*,22:219~221.

陈孟莪,陈忆元,钱逸. 1981. 三峡地区下震旦统到寒武系界限的管状化石. *中国地质科学院天津地质矿产研究所所刊*, 3: 117~124.

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碳质宏化石初步研究. *华南地质与矿产*, 2:1~30.

陈哲,孙卫国. 2001. 陕南晚震旦世后生动物管状化石 *Cloudina* 和 *Sinotubulites*. *微体古生物学报*, 18(2):180~202.

丁莲芳,李勇,安国勤. 1983. 论陕南震旦系—寒武系界线. *长安大学学报:地球科学版*, 5(2):9~22.

丁连芳,秦洪宾,李勇. 1990. 陕南震旦系——寒武系界线研究. *地层古生物论文集*,第二十三辑,北京:地质出版社, 96~130.

董琳,宋伟明,肖书海,袁训来,陈哲,周传明. 2012. 皖南地区埃迪卡拉系皮园村组微体和宏体化石——兼论埃迪卡拉纪—寒武纪界限. *地层学杂志*, 36(3):600~610.

耿元生,旷红伟,刘永清,杜利林. 2017. 扬子地块西、北缘中元古代的划分与对比. *地质学报*, 91(10):2151~2174.

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. *地层学杂志*, 25(1):13~17.

华洪,张录易,张子福,王静平. 2000. 陕南末元古代高家山生物群主要化石类群及其特征. *古生物学报*, 39(4):507~515.

华洪,陈哲,张录易. 2004. *Sha anxilithes* 在贵州的发现及其意义. *地层学杂志*, 28(3):265~269.

华洪,陈哲,蔡耀平,李朋. 2009. 最早骨骼生物 *Cloudina*——埃迪卡拉纪晚期一类重要的标准化石. *西北大学学报:自然科学版*, 39 (3):522~527.

蒋干清,张世红,史晓颖,王新强. 2008. 华南埃迪卡拉纪陡山沱盆地氧化界面的迁移与碳同位素异常. *中国科学 D 辑:地球科学*, 38 (12):1481~1495.

蒋志文. 1982. 中国梅树村阶小壳化石组合及遗迹化石序列. *云南地质*, 1(3):256~264.

蒋志文, M D Brasier, B Hamdi. 1988. 南亚梅树村阶的对比. *地质学报*, 3:191~199.

- 李日辉,杨式溥,李维群. 1997. 中国震旦纪——寒武纪界线地层中的遗迹化石. 北京:地质出版社,1~99.
- 罗惠麟,蒋志文,徐重九,宋学良,薛啸峰. 1980. 云南晋宁梅树村、王家坪震旦系—寒武系界线研究. 地质学报,2:95~111.
- 罗惠麟,蒋志文,何廷贵. 1982. 川滇地区震旦系——寒武系界线. 地质科学,2:215~219.
- 罗惠麟,蒋志文,武希彻,宋学良,欧阳麟. 1990. 梅树村阶及前寒武系——寒武系界线的全球生物地层对比. 中国科学(B辑),2:313~318.
- 罗惠麟,武希彻,欧阳麟. 1991. 云南东部震旦系——寒武系界限地层的相变与横向对比. 沉积地质与特提斯地质,4:27~35.
- 罗惠麟,武希彻,欧阳麟,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. 云南地质,7(1):13~27.
- 欧阳晴,周传明,关成国,王伟. 2015. 宜昌峡东地区埃迪卡拉系陡山沱组疑源类化石新材料及其生物地层学意义. 古生物学报,54(2):207~229.
- 彭善池,汪啸风,肖书海,童金南,华洪,朱茂炎,赵元龙. 2012. 建议在我国统一使用全球通用的正式年代底层单位——埃迪卡拉系(纪). 地层学杂志,36(1):55~59.
- 舒德干. 2009. 寒武纪大爆发与动物树的成型. 地球科学与环境报,31(2):111~134.
- 孙卫国,冯伟民. 1999. 前寒武系——寒武系全球层型的再选择. 现代地质,2:239~240.
- 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* 藻类化石的发现意义. 地质学报,80(11):1643~1649.
- 唐烽,高林志,王自强. 2009. 华南埃迪卡拉(震旦)纪宏体生物群的古地理分布及意义. 古地理学报,11(5):524~533.
- 唐烽,高林志,尹崇玉,王约,顾鹏. 2015. 华南埃迪卡拉(震旦)系顶部建阶层型和界线条层型新资料. 地质通报,34(12):2150~2162.
- 王新强,史晓颖. 2010. 华南埃迪卡拉纪碳同位素时空变化及其对生物演化的影响. 中国科学:地球科学,40(1):18~27.
- 王约,周志澄,赵元龙,俞美艺. 2006. 贵州台江下一中寒武统凯里组遗迹化石群落与环境关系的探讨. 古生物学报,45(2):243~251.
- 汪正江,王剑,江新胜,孙海清,高天山,陈建书,邱艳生,杜秋定,邓奇,杨菲. 2015. 华南扬子地区新元古代地层划分对比研究新进展. 地质论评,61(1):1~22.
- 王自强,索书田. 1986. 华南地区中、晚元古代阶段古构造及古地理. 见:王鸿祯,杨巍然,刘本培. 华南地区古大陆边缘构造史. 湖北武汉:武汉地质学院出版社,16~38.
- 夏文杰,杜森官,徐新煌. 1994. 中国南方震旦纪岩相古地理与成矿作用. 北京:地质出版社,50~62.
- 邢裕盛,丁启秀,罗惠麟,何廷贵,王砚耕,陈忆元,张数森,刘桂芝,熊兴武,陈平,蒋志文,武希彻,宋学良,欧阳麟,丁连芳,尹恭正,郑淑芳,钱逸,岳昭. 1984. 中国的震旦——寒武纪界限. 中国地质科学院地质所所刊,10:1~262.
- 邢裕盛,段承华,良玉左. 1985. 中国末前寒武纪古生物. 北京:地质出版社,1~243.
- 邢裕盛,岳昭. 1984. 中国震旦系——寒武系界线专号. 中国地质科学院地质研究所所刊,第10号,111~125.
- 薛耀松,周传明,陈哲. 2004. 湖北南漳地区晚震旦世高家山期微化石的新发现——兼论南江上升运动的地质意义. 微体古生物学报,21(1):1~12.
- 杨式溥,郑昭昌. 1985. 宁夏贺兰山正目观组震旦纪的遗迹化石. 地球科学—中国地质大学学报(武汉),10:9~18.
- 袁训来,陈哲,肖书海,万斌,关成国,王伟,周传明,华洪. 2012. 蓝田生物群:一个认识多细胞生物起源和早期演化的新窗口. 科学通报,57(34):3219~3227.
- 尹崇玉,高林志,邢裕盛. 2001. 贵州瓮安震旦纪陡山沱期磷酸盐化球状化石的新观察. 地质学报,75(2):145~152.
- 张录易,董军社,田淑华. 1992. 高家山动物群. 丁连芳. 扬子地台北缘晚震旦世——早寒武世早期生物群研究. 北京:科学技术出版社.
- 张志亮,华洪,张志飞. 2015. 埃迪卡拉纪疑难化石 *Shaanxilithes* 在云南王家湾剖面的发现及地层意义. 古生物学报,54(1):12~28.
- 赵自强,邢裕盛,马国干,陈忆元. 1985. 长江三峡地区生物地层学(1)震旦纪分册. 北京:地质出版社,1~143.
- 周传明,燕夔,胡杰,孟凡巍,陈哲,薛耀松,曹瑞骥,尹磊明,王金权,王金龙,肖书海,鲍惠铭,袁训来. 2001. 皖南新元古代两次冰期事件. 地层学杂志,25(4):247~252.
- 朱茂炎. 2010. 动物的起源和寒武纪大爆发:来自中国的化石证据. 古生物学,49(3):269~287.
- 资金平,贾东,魏国齐,杨振宇,张勇,胡晶,沈淑鑫. 2017. 四川乐山震旦系灯影组火山碎屑岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年及盆地裂陷演化讨论. 地质论评,63(4):1040~1050.

The Division of the Late Ediacaran-Cambrian Boundary Interval Stratigraphy and New Options of Index Fossil FAD in South China

GU Peng¹⁾, ZHONG Ling²⁾, ZHANG Guodong³⁾, SONG Sicun⁴⁾,
TANG Feng¹⁾, LING Maoqian³⁾, GAO Linzhi¹⁾

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

2) *Sichuan Museum, Chengdu, Chengdu, 610071, Sichuan, China;*

3) *Sichuan Geological Prospecting Bureau 207 Teams, Leshan, 614000, Sichuan, China;*

4) *School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing, 210023, Jiangsu, China*

Abstract

Since the “Snowball Event”, the early life has presented a multi-level, massive evolution, and reached its climax before the eve of the Cambrian. Accompanied the dramatic succession of life, the environment sign of the Earth changed and carbon isotope also shifted dramatically, both of which corresponded to the each stage of life succession. However, a big difference still occurs in the division of the most important geological boundaries, Precambrian-Cambrian stratotype section and point (“Golden Nail”, GSSP). *Treptichnus pedum* as a marker fossil of the GSSP has been questioned constantly in the global biostratigraphic division (especially in Siberia and South China), partially due to the fact that remains of trace fossils as a symbol also has certain defects. The earliest skeletal fossil *Cloudina* and the body fossil *Shaanxilithes* in South China can be well compared on a global scale, and the appearance of these two fossils corresponds to significant positive excursions of carbon isotope. By studying the stratigraphic distribution and geographical distribution characteristics of the fossil zone, this paper analyzes the spatiotemporal features and evolutionary significance of the system, and discusses the potentials of *Cloudina* and *Shaanxilithes* as markers of Cambrian bottom. Finally, a more ideal standard is proposed to determine the Precambrian-Cambrian boundary.

Key words: Precambrian-Cambrian; index fossil; trace fossil; Macrofossil; *Cloudina*; *Shaanxilithes*