

# 新元古代末期高家山生物群研究新进展与展望

张录易<sup>1</sup>, 华 洪<sup>2</sup>, 谢从瑞<sup>1</sup>

(1. 西安地质矿产研究所, 陕西 西安 710054 2. 西北大学, 陕西 西安 710069)

**提 要:**高家山生物群是以骨骼化石为主, 兼有软躯体后生动物及宏观藻类化石的一个多门类化石组合, 是目前已知新元古代末期最为多样化的生物群。化石产于上震旦统灯影组高家山段中上部, 时限约为 565~543Ma。概略地介绍了近年研究取得的 10 个方面新发现和新进展, 进一步证实高家山生物群面貌与世界较常见的伊迪卡拉生物群和早寒武世小壳动物群有显著区别, 代表了由隐生宙—显生宙过渡时期大变革前的生物记录, 因而在早期生物演化史中具有显要的地位和研究价值。

**关键词:**新元古代末期; 高家山生物群; 研究进展

高家山生物群于 1984 年发现, 1986 年命名, 10 余年来的研究取得了突破性进展, 已被称为震旦纪“五大生物群”之一<sup>[1]</sup>。高家山生物群是以骨骼化石为主, 兼有软躯体后生动物及宏观藻类化石的一个多门类化石组合, 是目前已知新元古代末期最为多样化的生物群。化石主要产于上震旦统灯影组高家山段中上部, 时限约为 565~543Ma。该生物群目前虽然尚难进行系统的生物学分类, 但根据化石的形态特征可以划分几个类群, 即具矿化壁的骨骼类群(包括管状化石、锥管状化石、瓶状化石、球状化石、杯状化石和奇异化石等)、蠕形动物化石类群、遗迹化石类群和宏观藻类化石类群等。国际末元古代工作组主席、美国科学院院士、哈佛大学教授 Andrew H. Knoll 1996 年访问西安时观看了高家山生物群的标本后给予了评价:高家山生物群面貌与世界较常见的埃迪卡拉生物群明显不同, 也与早寒武世小壳动物群有显著区别, 因此它具有指示早期动物演化新方向的内在潜力, 是对进化论知识的一个巨大贡献, 并且也是中国化石记录特别丰富的另一例证, 对其研究具有世界意义。它们产于震旦系—寒武系连续沉积层序的  $\epsilon/\zeta$  界线之下, 介于埃迪卡拉型动物与早寒武世小壳动物群之间, 代表了由隐生宙向显生宙过渡时期大变革前的生物记录, 因而在早期生物演化史中具有显要的地位和研究价值。

## 1 研究的新进展<sup>[2-10]</sup>

(1) 发现“天下第一虫”及软躯体蠕虫类群。陕西北强晚震旦世高家山化石库的蠕虫类化石群, 化石类型繁多, 个体普遍宏大, 均是厘米级, 是生物演化史上的一个特殊的阶段代表。其

收稿日期: 2001-03-26; 修订日期: 2001-07-16

基金项目: 国家自然科学基金(49772081)、科学技术部(G2000077701)、国土资源部国际合作与科技司(2000438)和

中国地质调查局地质调查项目(19991300013011)资助。

化石保存方式多种,有黄铁矿化、海绿石化、磷酸盐化、硅化、钙化等。尤其是黄铁矿化的化石均是三维立体保存,其中化石个体巨大的保存完美,环纹和口部构造保存也十分完好,栩栩如生,实属罕见;而且从地球历史来说也是后生动物出现最早的化石证据,实可称谓“天下第一虫”。这些珍奇标本不仅填补了生物演化史上的巨大空白,而且使研究体腔动物演化的“源头”以及各类化石形态学、组织学、埋葬学和生态环境成为可能。

(2)发现微体奇异化石类群。化石材料丰富,微细构造保存精美,类型繁多,大体分为9种类型:①铆钉状奇异化石;②可能的骨针状构造;③多种分叉样式的管状化石;④半球状化石;⑤微小管状化石;⑥球状化石:可分为单个圆球状体(光滑球体,球内具规则,球状个体;由大量小管状集合体组成的球状体;具中央环带的球状体);具横分裂的两两相连球状体、串珠状球体;⑦可能的有孔虫;⑧具特殊网孔状骨架结构的杯状化石;⑨似*Spirellus*构造。

(3)发现食肉动物证据。以管状化石管壁上的钻孔特征判断。

(4)初步发现蠕形动物生理学证据。以黄铁矿化的化石中生物硫的数据判断。

(5)描述了1个新属(*Yudaiella* Zhang et Hua 2000) 2个新种(*Yudaiella formosa* Zhang et Hua 2000; *Chenella regularis* Zhang et Hua 2000),修订了2个属:*Qinella*(Zhang Li et Dong, 1992)和*Chenella*(Zhang, Li et Dong, 1992)。将*Qinella shaanxiensis* Zhang Li et Dong 1992和*Q.lijiaougouensis* Zhang Li et Dong 1992归入*Sinotubulites cienegensis* Mc Menamin 1985<sup>[8]</sup>。

(6)查明了高家山生物群化石产出顺序。初期以蠕形动物活动痕迹为主,缺少实体化石证据;中期出现黄铁矿化蠕形动物实体化石和锥管化石、瓶状骨骼化石;后期具矿化壁生物极为繁盛,带壳生物种类和数量逐渐增多。上述进程可能真实地记录了生物界发展由软躯体蠕形动物占主导,到矿化骨骼生物的出现以及骨骼生物全面发展的历史。

(7)发现了宏观藻类*Vendotaenia*新层位多处,为区域地层对比提供了依据。

(8)发现具时代特征管壳化石类群*Cloudina*和*Sinotubulites*新剖面产地。

(9)修改了化石组合带。对张录易(1986)在建立高家山生物群时,根据化石产出层位及产出特征划分了3个化石组合,后又分为4个化石组合带<sup>[4]</sup>,经近年来较为深入的系统发掘和研究,认为建立3个化石组合带比较合适,并以专文作了报道<sup>[10]</sup>。

(10)发现了生物矿物学和生物矿物演化的新证据。高级生物矿物体镁方解石和文石一般认为在早寒武世早期开始出现,但张录易等<sup>[4]</sup>在陕西宁强上震旦统灯影组高家山段发现具镁方解石微粒胞壳的原古瓶虫;在锥管虫、克劳德虫和陈氏虫等壳壁上发现呈晶粒结构的原始文石。为深入研究生物矿物学和生物矿物演化奠定了基础<sup>[11]</sup>。

## 2 展望与意义

(1)早寒武世澄江动物群已震惊世界,它是探索后生动物起源和寒武辐射(爆发)奥秘的罕见宝库,是当今地学界研究的热点。寒武纪的后生动物大爆发是生物进化史上最为空前的事件,在不到两千万年时间内,所有后生动物的门类均已出现了<sup>[12-15]</sup>。然而“寒武纪大爆发”之前的新元古代晚期的动物界研究,20年前几乎还是一片空白,曾有人认为最年轻的伊迪卡拉型动物与早寒武世带壳化石之间有一个明显的间断(gap),称为“Kotlin间隔”<sup>[16]</sup>,从而提出了新的生物进化理论。高家山生物群由于产在震旦系—寒武系连续沉积层序的 $\epsilon/\gamma$ 界线之下,介于伊迪卡拉型动物与早寒武世小壳动物群之间,属于由隐生宙—显生宙时代大变革前的生物记

录。其产出的特殊位置不仅填补了所谓“Kotlin 间隔”空白,而且在一定程度上说明了前寒武纪至寒武纪生物演化的连续性。寒武纪之初的生物“大爆发”并非“突然”、“神奇”和“不可理解”<sup>[4,17]</sup>,为达尔文生物进化论提供了古生物证据,解决了达尔文晚年因前寒武纪生物化石保存不完整而对进化论的提出深深地感到困惑和焦虑不安的难题。

(2) 该生物群除含大量后生动物遗迹化石和宏观藻类外,软躯体蠕虫类和骨骼化带壳动物新类群占绝对优势是该生物群的特色。化石之丰富,类型之多样性,保存之精美,实属国内外所罕见;其总体面貌与世界较为常见的伊迪卡拉生物群明显不同,也与早寒武世小壳动物群有显著区别。因此它具有指示早期动物演化新方向的内在潜力。

(3) 带壳生物首次出现是生物演化史上一次重要事件,是后生动物由软躯体到带硬部构造生物进化中质的飞跃,具重大意义<sup>[18]</sup>。但生物带壳演化的始点以及最初阶段的概貌至今仍然是个谜<sup>[19]</sup>。目前流行的说法是以小壳化石为先导的骨骼化石大量出现则标志着寒武纪的起始,晚前寒武纪晚期动物似乎显得十分贫乏<sup>[19]</sup>。现在,高家山带壳生物的大量存在,生物体大和构造复杂性,充分说明了它在震旦纪已经历了一段时间系统演化,在震旦纪晚期适应辐射早已发生,所以在地质界流行的带壳生物演化历程应进一步修正。

(4) 生物骨骼的矿化机制也颇多争议,涉及到水圈、岩石圈及大气圈的协同演化,也涉及生物自身进化<sup>[20]</sup>,仍是一个未解之谜,目前已提出了近20种可能的骨骼化机理。新元古代晚期微体骨骼生物的发现可能为解决这一问题提供新的线索和重要启示,对其进一步深入研究也将极大丰富早期生物演化的历史。从高家山奇异骨骼化石组合来看,它不仅包括矿化的动物化石,还同时包含了可能的矿化后生藻类(如具各种分枝类型)、矿化的蓝绿藻类化石(如相互缠绕类似 *Girvanella*)及似 *Spirellus* 构造等,种种迹象表明在新元古代末期整个生物界发生了一次强烈的生物矿化事件,而其直接起因可能与新元古代末期水化学条件变化等外界因素有更大的关系<sup>[21]</sup>。众所周知,陡山沱组磷块岩中保存有极为丰富的、分异度极高的后生植物群<sup>[20, 22-23]</sup>,而其后的灯影组由于岩性上的缺陷,除碳质压膜化石外,尚未有矿化后生植物的报道,目前的发现极大地弥补了国内外这一时期后生植物资料的空缺。

(5) 目前发现的微体奇异骨骼化石群落,主要有9种形态奇特类型。其中的一些似与寒武纪早期的小壳化石有一定的亲缘,证实寒武纪与前寒武纪生物界之间看来存在明显的连续性。自 Bengston 等<sup>[24-25]</sup>、Li Chaiwei 等<sup>[26]</sup>、Xiao Shuhai 等<sup>[27-29]</sup>和 Chen Junyuan et al<sup>[30]</sup>相继报道寒武纪早期和震旦纪陡山沱期的胚胎化石以来,磷酸盐球状化石的研究再次成为热点,引起古生物学家、演化生物学家、分子生物学家等的广泛关注。目前已形成古生物学中的一个新的分枝学科——化石胚胎学。值得指出的是,陡山沱组动物胚胎化石主要为卵细胞至前囊胚期的胚胎发育序列,而梅树村阶地层中保存的则主要为囊胚期至动物幼体发育阶段的孵化标本,为何存在这种差异保存现象,颇受人们关注<sup>[1]</sup>。高家山生物群所出现的化石由于时代处于上述两者之间,球体形态多样,数量众多(有数百枚之多),内部结构各异,可能代表了卵细胞及囊胚期胚胎的不同发育阶段,对其深入研究,可望在后生动物起源和早期演化研究方面取得重大突破。

(6) 蠕虫类处于三胚层动物的最原始类别,囊括了无体腔、假体腔和真体腔三大类,整个动物界总共只有20多个门类,而蠕虫类至少占其中12个门,约占全部大门类的一半,因而在动物演化史中占有极为显要的地位。然而它们都缺乏硬骨骼,除环节动物门少数虫颚化石外,整个蠕虫类在传统的硬体化石领域构成一个巨大的未知空白<sup>[17]</sup>。20世纪以来,有关晚前寒武纪蠕虫

类化石,世界各地陆续有所报道,可概括地分为先伊迪卡拉期和伊迪卡拉期<sup>[18-31]</sup>。前者除淮南生物群中有须腕动物和环节动物宏体碳质压模化石外,大部分是尚有争议的遗迹化石<sup>[32-33]</sup>。对于淮南生物群的宏观压模化石,由于缺少可供进一步研究的微细构造,其亲缘关系一直在讨论中,一些学者认为它们可能是蓝藻的聚集体<sup>[34-35]</sup>,部分学者归入亲缘关系不明的化石组合<sup>[36-37]</sup>,钱迈平等<sup>[30]</sup>发现有明显的固着器和叶状体的分化,认为是后生植物。后者伊迪卡拉期的生物多样性表现明显,主要为软躯体的腔肠动物、蠕形动物和环节动物等<sup>[38]</sup>,蠕虫类在世界典型的动物群中,如伊迪卡拉、白海等动物群中,中国庙河生物群<sup>[39-40]</sup>、西陵峡生物群<sup>[38,41]</sup>等生物群中均有所发现,但是化石保存多为印痕化石或碳质薄膜保存。前者由于微细结构构造未保存,给进一步研究带来困难;后者归属尚有争议,是藻类还是蠕虫类各家说法尚不统一。幸运的是,高家山生物群含有极为丰富的蠕虫类化石类群。其特征为:形态类型繁多,化石个体普遍宏大,多为厘米级,黄铁矿化的化石均是三维立体保存,化石个体巨大,保存完整,微细结构构造保存也十分完好,在世界上实属罕见;而且从地球历史上说也是后生动物出现最早的化石证据,实可谓“天下第一虫”。这些举世珍奇的标本,代表了生物演化史上的一个特殊阶段的产物,它不仅填补了生物演化史上的巨大空白,而且使探讨体腔动物演化的“源头”以及深入研究该类群各类化石形态学、组织学、埋葬学和生态环境成为可能。

(7)高家山生物群中蠕虫类群极为丰富,种类繁多,除已经描述的3属7种外,还有大量的标本尚未研究,其分类、归属和在演化谱系中的位置更未确定。目前从世界上新元古代的化石记录来看,伊迪卡拉动物群中软躯体动物主要为腔肠动物和环节动物,大多数出现在拉普蓝冰积层与上覆下寒武统Tommotian阶之间的文德系下半部,在文德系的上半部消失,可靠的蠕虫类比较贫乏,某些两侧对称动物的遗迹化石可延至文德系的顶部<sup>[42]</sup>。早寒武世蠕虫类化石近年来在澄江动物群发现了许多珍奇的标本<sup>[43-44]</sup>,动物的主要进化的多样化到寒武纪始已经出现,其祖先性形态种类必定生存得更早<sup>[15]</sup>。因此,高家山生物群中的蠕虫类与伊迪卡拉期和早寒武世的蠕虫类在生物演化谱系上有什么关系?各在演化树上所处的位置,哪是基干类群或许冠顶类群?这些问题都有待我们去认识。

(8)伊迪卡拉期动物群异常之一是生物“稀奇古怪”,缺少寒武纪重要无脊椎动物类群的明显祖先,因而给研究后生动物系统演化带来困难。Knoll等<sup>[45]</sup>通过比较生物学和地质学得出早期动物进化的新观点,依据18S rRNA序列得出的新的分子系统发育,认为后生动物的系统发育要重写谱系树,需要深入地发掘元古宙晚期的两侧对称动物的化石记录和深刻认识古环境;了解两侧对称动物的工具包的装配,调查其遗传学;关键性发育特征(如,中胚层、螺旋卵裂)的起源;大大深入阐明塑造动物的遗传调控网络的结构和演化。高家山生物群研究的新进展表明,该生物群除含大量后生动物遗迹化石和宏观藻类外,软躯体蠕虫类群和骨骼化动物类群占绝对优势。最近又发现了与*Cloudina*共生的奇异骨骼化石新类群,它可能是元古宙最晚期海洋中能保存骨骼的唯一的中等多样性的动物类群<sup>[45]</sup>。因此进一步深入研究高家山生物群是十分必要的和适时的,很有可能对Knoll等<sup>[45]</sup>提出的新观点提供有说服力的化石证据。

(9)峡东震旦系剖面已被推荐为全球新元古III系候选层型,底界层型点放在陡山沱组底<sup>[46]</sup>,此方案得到广泛支持。但是峡东区晚震旦世西陵峡生物群由于硅化强烈,化石类别少,至今进展不大,与其时代相当的高家山生物群显然填补了它的不足。因此,为使凝聚着几代地质学家心血的“震旦系”能被国际末元古系工作组选中层型,继续扩大研究该生物群是十分必要和适时的。再

者,高家山生物群在震旦纪年代地层学中是具有重要意义的,正像殷继成等<sup>[47]</sup>提出建立峡东系(相当震旦系)时,将高家山生物群作为建系的依据,“考虑到峡东系为前寒武纪最后沉积的一个系,所含化石有特殊性,因而年代地层单位的划分常常把陕西南强灯影组作为重要的参考剖面”。所以高家山生物群的研究越来越被地学界重视,它在地球早期生命研究中的地位越来越明显。

(10)早寒武世澄江生物群震惊世界,它是探索后生动物起源和寒武纪辐射(爆发)奥秘罕见的宝库<sup>[12-13]</sup>。高家山生物群要早几百万年,从这个意义上说,对“探源取宝”更具意义。

总之,上述几点都是当前地学界十分关注的热点,高家山化石产地已具备后生动物“源头”和接近“源头”及软躯体动物特异保存条件,有可能在研究过程中发现始祖生物类型。只要充分发扬这一宝库得天独厚的优势,对高家山生物群研究中软躯体蠕虫类群和微体奇异化石类群这两个新的重要生长点不失时机地加强研究,就能在揭示生命演化真谛上作出贡献。

### 参考文献:

- [1] 陈孟莪.震旦纪生命大爆炸!——浅论地史早期动物的演化[J].前寒武纪研究进展,1999,22(3):36~47.
- [2] 张录易.陕南震旦系灯影组瓶状微化石研究新进展[J].甘肃地质学报,1994,2(2):1~8.
- [3] 张录易.陕西南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矿所刊,1986,13:67~88.
- [4] 张录易,等.高家山生物群[A].见:秦洪宾指导,丁莲芳、张录易等著.扬子地台北缘晚震旦世—早寒武世生物群研究[M].科学技术文献出版社,1992.
- [5] 张录易,等.寒武大爆发前的高家山生物群[J].现代地质—中国地质大学研究生院学报,1999,13(2):238~239.
- [6] 张录易,华洪.震旦纪晚期管壳化石类群特征及其意义[J].古生物学报,2000,39(3):381~333.
- [7] 张录易,等.高家山生物群及科学意义[A].见:西部大开发科技先行与可持续发展——中国科协2000年学术年会文集[C].中国科学技术出版社,2000.541~542.
- [8] 华洪,张录易,等.晚震旦世高家山生物群化石新材料[J].古生物学报,2000,39(3):381~390.
- [9] 华洪,张录易,等.陕南末元古高家山生物群化石组合面貌及其特征[J].古生物学报,2000,39(4):507~515.
- [10] 华洪,张录易,等.高家山生物群主要化石类群及其特征[J].地层学杂志,2001,25(1):13~17.
- [11] 戴永定,等.生物矿物学[M].北京:石油工业出版社,1994.66~77.
- [12] Shu D-Get al. Reinterpretation of Yunnanozoon as the earliest known hemichordate[J].Nature,1996a,380:4Appil.
- [13] Shu D-G, Conway Morris S & Zhang X-L. A Pikaia-like Ghordate from the Lower Cambrian of China[J].Nature, 1996b,384:14Norember.
- [14] Shu D-G, Luo H-L, Conway Morris S et al. Lower Cambrian vertebrates from South China[J].Nature,1999,402:42.
- [15] Chen J-Y et al. Precambrian animal diversity: Putative phosphatized embryos from the Doushantuo Formation of China[J].PNAS,2000,97(9):4457~4462.
- [16] Grotzinger, John P et al. Calibraing the Terminal Proterozoic Time Scale[A].in:30Th Intern.Geol.Congress Abstracts[C]. Beijing, China, 1996,47.
- [17] 舒德干,陈苓.软躯体化石库的研究[A].见:肖庆辉等著.当代地质科学前沿——我国今后值得重视的前沿领域[C].武汉:中国地质大学出版社,1993.
- [18] 杜汝霖.前寒武纪古生物学及地史学[M].北京:地质出版社,1992.
- [19] 蒋志文.初期生物的带壳演化及晚前寒武纪的终止[J].前寒武纪地质,1987,(3):515~523.
- [20] 袁训来,李军,陈孟莪.晚前寒武后生植物发展及其花生记录[J].古生物学报,2000,34(1):90~102.

- [ 21 ] Grotzinger , John P et al. Calcified metazoans in thrombolite–stromatolite reefs of the terminal Proterozoic Nama Group[J].Paleobiology,2000,26(3):334~359.
- [ 22 ] Zhan Yun , Yin Leimin , Xiaoshuhai et al. Permineralized fossils from the Terminal Proterozoic Doushantuo Formation , South China[J].Paleont.Soc.Mem. ,1998,50,52.
- [ 23 ] Yuan Z L , Li J , Cao R J. A diverse metaphyte assemblage from the Neoproterozoic black shales of South China[J]. Lethaia,32:143~155.
- [ 24 ] Bengtson S , Yue Zhao. Fossilized metazoan embryos from the earliest Cambrian[J].Science,1977,277:1645~1648.
- [ 25 ] Bengtson S. Proterozoic and earliest Cambrian skeleton metazoans[A].In:Schopf W I and Klein C eds.The Proterozoic biosphere—A multidisciplinary[C]. Cambridge University Press.1992,1017~1054.
- [ 26 ] Li Guoxiang , Xue Yaosong and Zhou Chuanming. Late Proterozoic tubular fossils from Doushantuo Formation of Weng'an , Guizhou , China[J]. Palaeoworld,1997,(7) 29~35.
- [ 27 ] Xiao S , Zhang Y , Knoll A H. Three dimensional preservation of algae and animal embryos in a Neoproterozoic phosphorite[J]. Nature,1998,391:553~558.
- [ 28 ] Xiao Shuhai ,Knoll A H.Phosphatized animal embryos from the Neoproterozoic Doushantuo Formation at Weng'an , South China[J]. J.palen.1999,74(5):768~788.
- [ 29 ] Xiao S , Yuan X , Knoll A H. Eumetazoan fossils in terminal Proterozoic phosphorites ? [J].PNAS,2000,97(25):1364.
- [ 30 ] 钱迈平 ,等.华北地区新元古代后生植物化石新材料[J]古生物学报 ,2000 ,39( 4 ) 516~520.
- [ 31 ] Conway Morris S. The early evolution and reservation of Metazoa fossil[J]Nature,1993,361.
- [ 32 ] 尹磊明 ,薛耀松 ,袁训来.中国南方元古宙陡山沱组中的具刺磷酸盐微体化石[J]微体古生物学报 ,1999 ,16( 3 ) 267.
- [ 33 ] 陈孟莪.中国震旦系的古生物[A]见 :刘鸿允等著 :中国震旦系[M]北京 :科学出版社 ,1991.
- [ 34 ] Steiner M. *Chuarua circularis* Walcott 1899—" Megasphaeromorph Acritarch "or Prokaryotic Colony ? [ A ] in:Fatka O, Servais T(eds). Acritarcha in Praha[M]. Acta Universitatis Carolinae Geologica ,1997 ,40( 1996 ) 645~665.
- [ 35 ] Sun W G. Palaeontology and biostratigraphy of Late Precambrian magascopic colonial Algae *Chuarua* Walcott and *Tauuia* Hofmann[J]. Palaeontographica Abt.,1987,203(4-6):109~134.
- [ 36 ] 符俊辉.淮南生物群及其特点[J]古生物学报 ,28( 5 ) 624~652.
- [ 37 ] Hofmann H J. Proterozoic carbonaceous ( " megaphytes " and " worms " ) [ A ] in: Bengtson S(ed.)Early Life on Earth[C]. Karlskoga , Sweden. Clumbia U. P. , New York, 1994 ,342~357.
- [ 38 ] 邢裕盛 ,等.中国晚前寒武纪古生物[M]北京 :地质出版社 ,1986.
- [ 39 ] 陈孟莪 ,等.峡东震旦系陡山沱组宏体生物群[J]古生物学报 ,1992 ,31( 5 ) 513~520.
- [ 40 ] 丁莲芳 ,等.震旦纪庙河生物群[M]北京 :地质出版社 ,1996.
- [ 41 ] 陈孟莪 ,等.峡东震旦系—寒武系底部的管状动物化石[J]中国地质科学院天津地质矿产研究所所刊 ,1981 ,3 :117~120.
- [ 42 ] Fedonkin M A. The Metazoa Snimal of Precambrian[J] Paleobiology,1985.
- [ 43 ] 罗惠麟 ,胡世学 ,陈良忠 ,等.昆明地区早寒武世澄江动物群[M]昆明 :云南科技出版社 ,1999.
- [ 44 ] 陈均员 ,等.澄江动物群——寒武纪大爆发的见证[M]国立自然科学博物馆 ,1996.
- [ 45 ] Knoll A H and Carroll S B. Evolution of the early animal : New opinion of the comparative biology and geology[J] Science,1999,284(5423):2129~2137.
- [ 46 ] 孙卫国.末元古系地层学[J]地球科学进展 ,1994 ,( 1 ) 62~65.
- [ 47 ] 殷继成 ,等.四川盆地周边及邻区震旦亚代地质演化与成矿作用[M]成都 :成都科技大学出版社 ,1993.