中国科学: 地球科学 2010 年 第 40 卷 第 9 期: 1115 ~ 1124
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

论 文

关山生物群构成及埋藏学研究进展

胡世学[①②*], 朱茂炎[①], Michael STEINER[③], 罗惠麟[②], 赵方臣[①], 刘琦[④]

① 中国科学院南京地质古生物研究所地层古生物国家重点实验室, 南京 210008;
② 云南省地质调查院, 昆明 650051;
③ Freie Universität Berlin, 12249 Berlin, Germany;
④ 中国地质大学地球科学学院, 武汉 430074
* E-mail: hushixue@hotmail.com

收稿日期: 2010-04-13; 接受日期: 2010-06-13
国家重点基础研究发展计划项目(编号: 2006CB806401)和国家自然科学基金(批准号: 40772020, 40725005, 40930211)资助

摘要 关山生物群(寒武系第二统第四阶)是中国继澄江动物群和凯里动物群之后又一个大量保存软躯体特异化石的寒武纪重要的布尔吉斯页岩型生物群. 本文系统概述了云南东部关山生物群形成的沉积学、埋藏学背景以及化石群组成. 最新的化石发掘和研究表明, 关山生物群共有 60 余种化石, 归属 10 个大类; 其中叶足类、类水母化石、具撑肢的软舌螺类和绿藻等属于首次报道. 软躯体化石, 尤其是壳体化石如三叶虫和腕足动物中大量软体的保存使得关山生物群成为探讨寒武纪大爆发期间动物演化和特异保存的另一个重要窗口.

关键词
软躯体化石
关山生物群
寒武纪早期
寒武纪大爆发
布尔吉斯页岩型动物群

布尔吉斯页岩型动物群对探讨地球早期生命演化和生态系统具有重要意义. 20 世纪 80 年代澄江动物群的发现掀起了在中国寻找布尔吉斯页岩型动物群的热潮, 并在中国扬子地台发现了一系列的寒武纪化石库[1,2], 包括贵州的凯里生物群[3]和杷榔动物群[4]、云南的关山生物群[5]、湖北的石牌动物群[6]以及贵州和安徽等地黑色页岩系的海绵动物群[1,7,8]等.

关山生物群发现于 20 世纪 90 年代, 在时代上稍晚于著名的澄江动物群. 随着近年来一系列的重要化石的发现和报道[9~14], 关山生物群吸引了古生物学界越来越多的关注[2,15~17]. 本文的主要目的在于对关山生物群研究进行系统的总结, 并着重介绍最近的一些新的化石发现. 昆明附近寒武纪早期乌龙箐组软躯体化石最初被命名为为关山动物群[5], 但是我们最近的野外工作发现了大量绿藻类化石, 因此在本文中改为关山生物群, 以便更为全面和准确地反映其面貌及意义.

关山生物群产于寒武纪早期的乌龙箐组(原来沧浪铺组乌龙箐段), 该组地层广泛分布于云南东部昆明-武定及马龙-宜良地区, 其名称来源于马龙县城附近的乌龙箐村[18](图 1). 关山生物群主要化石产地包括昆明附近的岗头村、高楼房以及武定洒普山等. 保存软躯体化石的层位从沧浪铺阶上部的*Palaeolenus*带一直到*Megapalaeolenus*带. 根据最新的国际地层表, 关山生物群的时代应归属于寒武系第二统第四阶早期(原早寒武世沧浪铺阶晚期, 约 5.15~5.10 亿年之间). 区域上, 乌龙箐组可与贵州的杷榔组和湖北的石牌组对比, 后两者也都发现有类似的布尔吉斯

引用格式: Hu S X, Zhu M Y, Steiner M, et al. Biodiversity and taphonomy of the Early Cambrian Guanshan biota, eastern Yunnan. Sci China Earth Sci, 2010, doi: 10.1007/s11430-010-4086-9

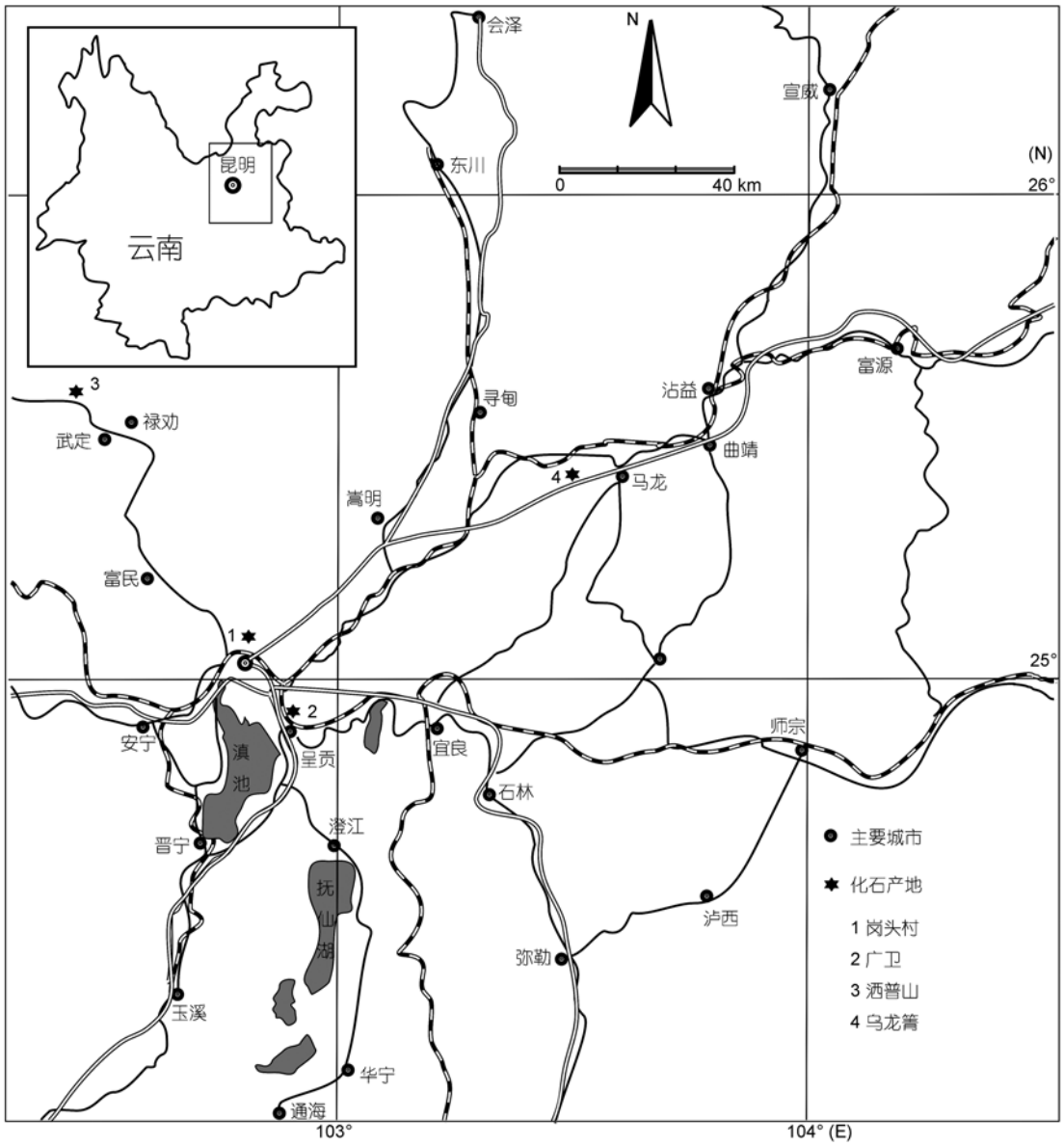

图 1　关山生物群主要化石产地

页岩型动物群[4,6]. 国际上沧浪铺阶大致相当于西伯利亚的Botomian阶, 故关山生物群大体与西伯利亚的Sinsk动物群[19,20]及澳大利亚的Emu Bay动物群时代相当[21].

1　沉积学和埋藏学特征

乌龙箐组地层在昆明附近的广卫村高楼房采石场出露较好, 研究也最为详细[13]. 此处乌龙箐组总厚度约 60 m(图 2). 在此需要指出的是由于断层重复, 此前发表的高楼房采石场乌龙箐组厚度较实际厚度大[13,22]. 虽缺失上覆地层, 软躯体化石从下到上在乌龙箐组出露的层位都有发现. 高楼房剖面下伏地层为红井哨组厚层砂岩, 顶部夹数层泥岩. 乌龙箐组底部见有一至数层底砾岩. 砾石为石英质, 直径 0.5~5 cm, 磨圆好(图 3(a)). 乌龙箐组主要岩性为泥岩和粉砂岩互层. 在下部以泥岩为主, 夹有少量薄层粉砂岩, 厚约 5 m. 往上薄层粉砂岩及砂岩的数量逐渐增多. 在粉砂岩底部见有大量底模和生物扰动构造. 波痕和皱纹状微生物席也经常可见(图 3(f), (g)). 由粉砂-

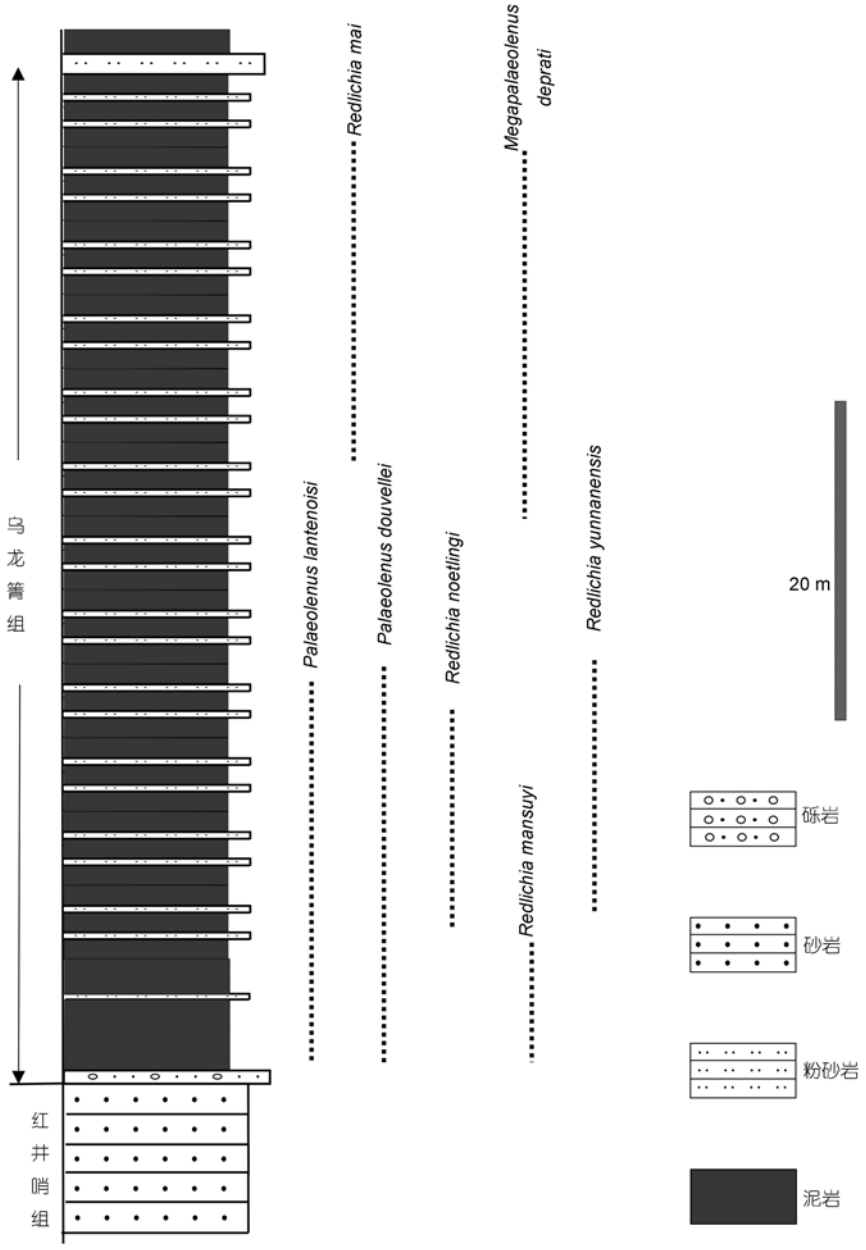

图 2　广卫高楼房剖面乌龙箐组岩性柱状图及三叶虫分布图

泥组成的正粒序层理在整个乌龙箐组都较为普遍(图 3(b), (c)). 泥岩层常具有侵蚀和冲刷的底面, 下部为粉砂段, 向上逐渐变细为泥质段, 厚度 0.5~2 cm, 但很少超过 3 cm.

乌龙箐组下伏的红井哨组在昆明地区以厚层砂岩为主, 顶部夹有泥岩, 为典型的三角洲沉积(三角洲前沿及三角洲平原). 乌龙箐组最底部的底砾岩属于海侵底砾岩, 代表了当时华南地区一次区域性的海侵. 分选磨圆好的石英砾石说明其来源于潮道等高能环境. 大量粉砂-泥粒序组合及其底部的冲刷面说明是远基风暴流能量逐渐减弱的快速沉积事件. 在粉砂岩和泥岩底部粉砂段中发现大量的生物扰动构造(图 3(e)), 说明当时的水体和沉积物/水界面之下的表层沉积物可能是富氧并适合生物生存, 但底栖群落的演化经常被风暴作用引起的扰动中断.

含化石层位绿藻化石的存在, 说明当时水体深

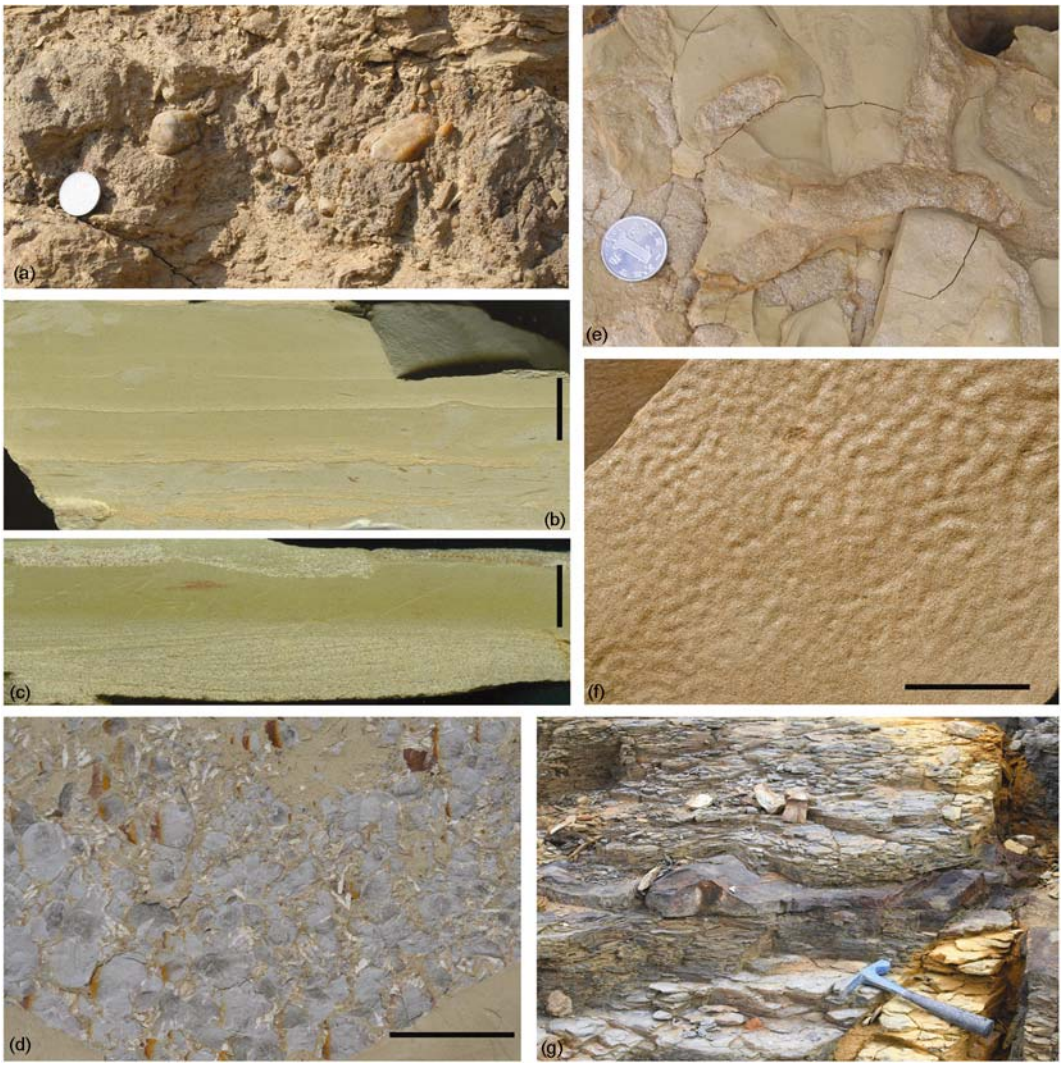

图 3　昆明广卫高楼房乌龙箐组沉积特征

(a) 乌龙箐组底部底砾岩, 硬币直径 2.5 cm; (b) 乌龙箐组上部泥岩光面, 显示粉砂-泥组成的粒序层; (c) 乌龙箐组下部泥岩光面; (d) 腕足和虫管富集的层面; (e) 乌龙箐组中部遗迹化石, 硬币直径 2.5 cm; (f) 皱纹状微生物席构造; (g) 泥岩和粉砂岩互层, 粉砂岩顶面具波痕构造, 铁锤为比例尺. (b)~(d)和(f)的比例尺均为 1 cm

度位于透光带之内, 水深小于 100 m. 近年来的研究认为绝大部分皱纹状微生物席是由蓝细菌作用形成[23], 有利于其保存的环境是潮间带和远滨转换带. 乌龙箐组以泥岩为主, 夹砂岩、粉砂岩, 具大量风暴沉积、皱纹状微生物席发育的特点符合远滨转换带的特征[24,25], 其沉积环境位于正常天气浪基面与风暴浪基面之间, 水深大约 40~50 m.

关山生物群绝大部分化石保存在泥岩层中, 仅有少量碎片及矿化度高的动物硬体发现于粉砂岩层中. 发现的多数化石表面呈褐红色或者灰白色, 与灰绿色或黄色的围岩形成明显的对比. 根据野外系统的观察和分析, 关山生物群中含化石地层可划分为两个埋藏相: 第一种埋藏相主要由具有粒序层理构造、上部生物扰动较低的泥岩段所代表. 目前, 软躯体保存较好的化石都发现于这一埋藏相, 如火炬虫 *Phlogites*, 保存翻吻的鳃曳动物, 保存肉茎和刚毛的腕足类, 保存触角、附肢、肠管、消化腺构造的三叶虫等. 多数化石呈微斜穿层面的三维立体保存. 结合沉积学和埋藏学特征, 该埋藏相代表了远源风暴流引起的快速掩埋作用. 第二种埋藏相由乌龙箐组底

部泥岩和具有粒序层理构造的事件层下部的粉砂岩段所代表. 该埋藏相内化石以三叶虫及腕足类为主, 绝大多数保存的是矿化的壳体, 化石多呈破碎或解体状态, 未见软躯体构造保存; 说明化石经过了风暴或波浪簸选的作用.

总的说来, 关山生物群代表了没有经历搬运或搬运距离很短的原地或近原地埋藏生物组合. 沉积学和埋藏学证据表明, 相对于其他布尔吉斯页岩型化石库而言, 关山生物群的生活环境水深相对较浅, 更为靠近陆源.

2 关山生物群化石组成

到目前为止, 关山生物群已发现 10 多个门类的化石, 包括藻类、海绵动物、开腔骨类、腔肠动物、腕足动物[26]、软舌螺类、类水母化石、鳃曳动物[14]、叶足类、奇虾类、节肢动物[11,13,22,27~29]、始海百合类[12]、古虫动物类[9,30]、部分分类不明化石及遗迹化石. 表 1 是根据最新化石发掘所整理的关山生物群化石名单. 下面就动物群各类化石的组成和保存特征做简要总结:

(1) 藻类. 与稍早的澄江动物群及较晚的凯里动物群相比, 关山生物群的宏观藻类分异度相对较低. 目前发现的藻类以绿藻为主, 一类是表面具网格状构造的分叉的绿藻(图 5(i)). 另外一类表面具瘤点、边缘具刺, 与美国犹他州寒武纪中期的*Margaretia*[31]类似, 也属于绿藻. 绿藻化石的出现说明当时水体深度在透光带以内.

(2) 海绵动物. 关山生物群中的海绵动物种类相对较少. 目前仅发现 3 种, 分别是 *Crumillospongia biporosa*, *Choia* sp.(图 4(d))和 *Paraleptomitella* sp., 其中前两种较少, 后一种相对较常见.

(3) 开腔骨类. 开腔骨类在关山生物群中相对较常见. 在广卫剖面乌龙箐组上部可见大量的 *Allonnia*(图 4(c))富集成层保存. 个体大小从数厘米到数十厘米都有. 在武定石将军也发现有 *Allonnia* 个体在部分层面密集保存.

(4) 腔肠动物. 最近的研究认为管状化石 *Sphenothallus*是一种腔肠动物[32]. 关山生物群发现有一定数量的*Sphenothallus*, 其中一些标本显示几个个体同时附着在其他动物的硬体上(图 5(h)), 这与其他动物群中同类化石的保存非常相似, 显示该类生物固着的生活习性.

(5) 腕足动物. 动物群中腕足类无论是个体数量还是分异度都仅次于节肢动物. 目前, 已经发现至少 6 个单种属(具体名单见表 1), 其中 4 种发现有软体构造保存, 即 *Acanthotretella decaius*(图 5(b)), *Diangdongia pista*, *Lingulellotreta malongensis*, *Heiliomedusa minuta*. 关山生物群中腕足类软体构造保存的精美程度堪比澄江动物群中的腕足类化石. 保存的软体构造有纤毛环、脉管、刚毛以及肉茎等. 动物群中腕足类数量上以 *L. malongensis* 最为丰富, 其次是 *H. minuta* 和 *D. pista*, 其余种类相对较少, 最为稀少的是 *Nususia* 和 *Kutorgina*.

(6) 软舌螺类. 仅发现*Linevitus malongensis*一个种. 值得指出的是在部分标本上见有可能的撑肢保存(图 5(f)). 保存撑肢的软舌螺化石比较少见, 此前的报道主要来自寒武纪中期的美国犹他州Spence页岩动物群和布尔吉斯页岩动物群[33]. 关山生物群软舌螺撑肢等软体的发现将对该类动物的形态功能学研究提供新的信息.

(7) 类水母化石. 外形呈水母状的伊尔东钵在关山生物群中十分稀少, 到目前为止仅发现数块标本(图 5(e)), 保存相对较差, 但鉴定特征明显. 关山生物群类水母化石稀少的原因可能与动物群形成的环境水深较浅, 生物扰动较强有关.

(8) 鳃曳动物. 鳃曳动物虽然在动物群中数量上不占优势, 但也是关山生物群中的常见分子. 除了已经报道的*Guanduscolex minor*[14](图 5(a))外, 还有几个尚未描述的古蠕虫类新属种和一个棒形虫类的新种. 鳃曳动物在澄江动物群和关山生物群都较为丰富, 说明当时扬子地台西部以软泥底质为主的云南东部浅海地区在寒武纪早期是鳃曳动物的辐射中心.

(9) 叶足类. 关山生物群目前仅发现一种叶足类化石, 即怪诞虫 *Hallucigenia(*图 5(g)). 分散保存的怪诞虫骨片并不少见, 但完整个体十分稀少. 就目前已知的材料来看, 澄江动物群是所有寒武纪布尔吉斯页岩型化石库中叶足动物最为丰富的动物群.

(10) 奇虾类. 奇虾类在关山生物群中共发现了两种, 即 *Anomalocaris* cf. *saron*(图 4(b)和 *Parapeytoia* sp.(图 4(e)). 目前所发现的标本都是躯干前面的大附肢及不完整的口器构造, 未见完整个体化石.

(11) 节肢动物. 节肢动物是关山生物群最为丰富的化石种类, 无论是个体数量还是物种数量在动

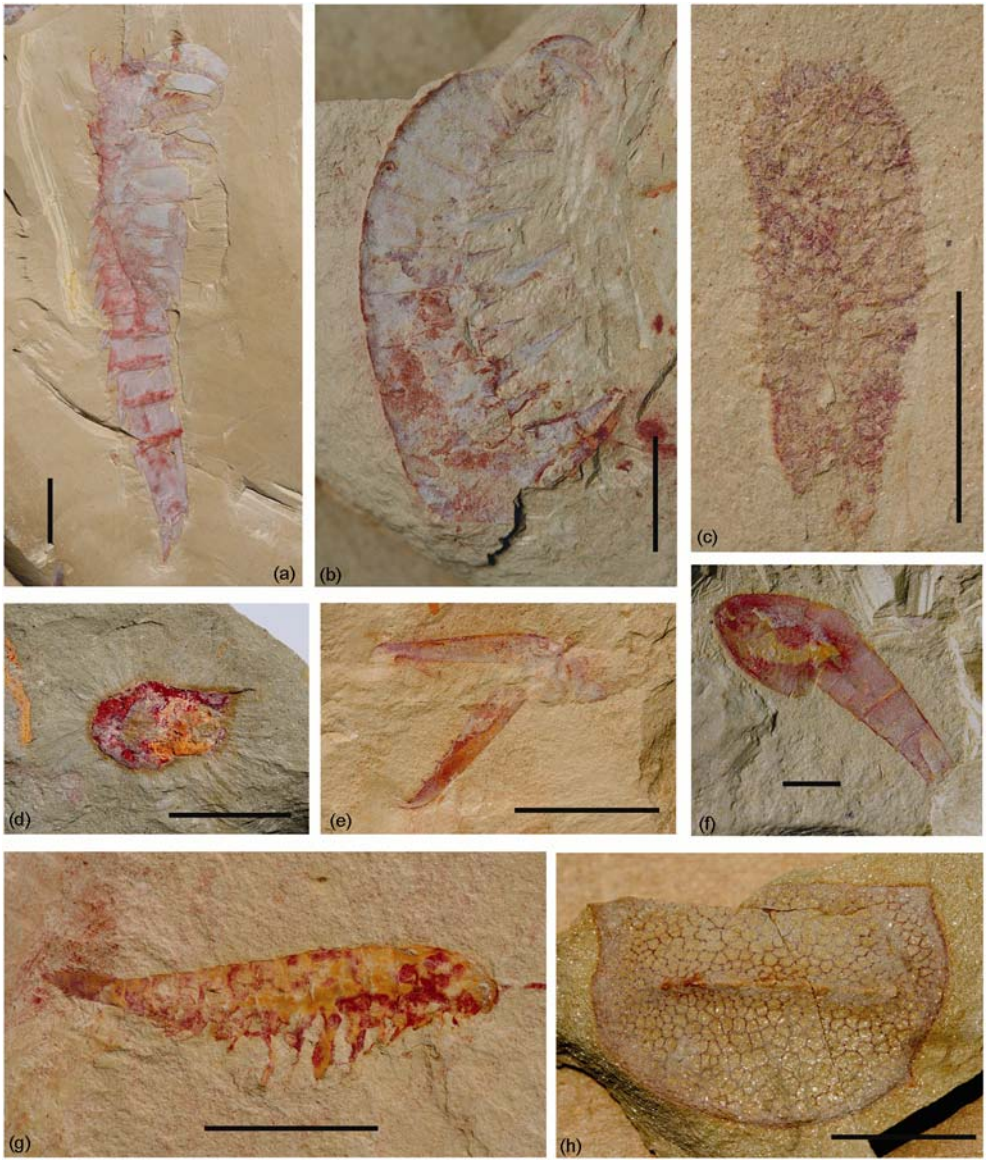

图 4　关山生物群典型分子

(a) *Guangweicaris spinatus* Luo, Fu et Hu, Kgs-1-137; (b) *Anomalocaris* cf. *saron* Hou et al., GKG-110; (c) *Allonnia* sp., GKG-111; (d) *Choia* sp., GKG-112; (e) *Parapeytoia* sp., GKG-113; (f) *Waptia* sp., GKG-114; (g) *Leancholia illecebrosa*(Hou), GKG-115; (h) *Tuzoia* cf. *retifera* Walcott, GKG-116. 比例尺均为 1 cm

物群中都占有绝对的统治地位. 发现的化石包括有三叶虫、非三叶虫节肢动物、双瓣壳节肢动物及其他一些类型. 节肢动物又以三叶虫为主. 部分三叶虫化石保存了较好的触角、附肢、肠道和消化腺等软体构造(图 5(d)). 双瓣壳节肢动物是仅次于三叶虫化石的另一个主要类别, 其中 *Tuzoia sinensis*, *T.* cf. *retifera* (图 4(h)), *T. tylodensa; Isoxys wudingensis*, *I. minor*, *Branchiocaris yiliangensis*, *Waptia* sp.(图 4(f)), *Lianshanella liangshanensis*, *L. yunnanensis*, *Neokunmingella minuta*, *Houlongdongella disulata* 都保存较好. 其他非三叶虫节肢动物相对较为单调, 部分发现有软体保存, 如 *Panlongia spinosa*, *Guangweicaris spinatus*(图 4(a)), *Leanchoilia illecebrosa*(图 4(g)), *Longquania bispinosa* 及 *Sinoburius* sp.等.

(12) 古虫类. 古虫类在关山生物群中仅报道 *Vetulicola* 一个属, 包括两个种: *V. gangtoucunensis* 及

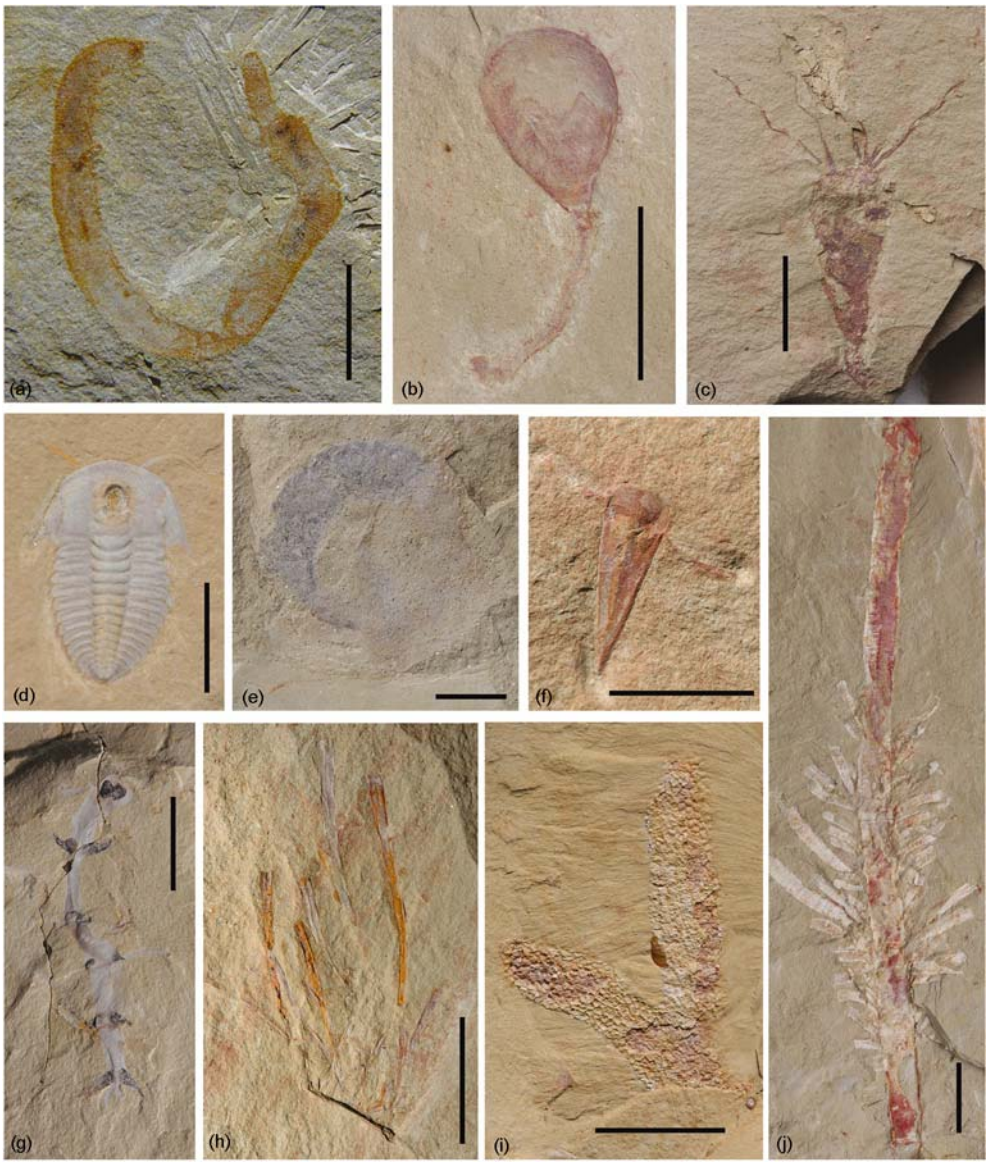

图 5　关山生物群典型分子

(a) *Guanduscolex minor* Hu, Luo, et Fu, Kgs-6-76; (b) *Acanthotretella decaius*, GKG-008; (c) *Wudingeocrinus rarus* Hu et Luo, GKG-116; (d) *Palaeolenus lantenoisi* Mansuy, Kgs-1-186; (e) *Eldonia* sp. GKG-122; (f) 保存附肢的 *Linevitus malongensis* Yu, GKG-117; (g) *Hallucigenia* sp., GKG-118; (h) *Sphenothallus* sp., GKG-119; (i) 绿藻化石, GKG-120; (j) *Gangtoucunia aspera* Luo et Hu, 多个幼体附着在一个成年个体上, GKG-121. (a), (d), (f), (g)的比例尺为 0.5 cm; (b), (c), (e), (h), (i), (j)的比例尺为 1 cm

V. longbaoshanensis. *V. gangtoucunensis*数量较为丰富, 目前已采集到数百块标本, 其与澄江动物群中的*V. rectangular*[5]较为相似, 主要差别在于前者个体较大, 且背鳍的位置相对靠前. *V. longbaoshanensis*有可能是*V. gangtoucunensis*的晚出同物异名, 其有效性还有待进一步研究.

(13) 棘皮动物. 虽然经过大量的发掘, 但关山生物群目前为止发现的棘皮动物仅有*Wudingeocrinus rarus*(图 5(c))一个种. 该种在总体上与产自贵州寒武纪杷榔动物群的*Guizhoueocrinus yui*[34]较为接近, 最主要的区别是具有较长且弯曲的柄部. 尽管关山生物群与杷榔动物群时代相近, 但始海百合类在关山生物群中相对较少, 在杷榔动物群却十分丰富. 两个生物群始海百合类化石丰富程度的明显差

表 1　关山生物群化石名单

藻类	三叶虫类
Margaretia sp.	*Redlichia noetlingi*
绿藻未定种	*R. mansuyi*
海绵动物	*R. yunnanensis*
Crumillospongia biporosa	*R. mai*
Choia sp.	*R. chinensis*
Paraleptomitella sp.	*R. kaiyangensis*
开腔骨类	*Palaeolenus lantenoisi*
Allonnia sp.	*P. douvillei*
腔肠动物	*Megapalaeolenus deprati*
Sphenothallus sp.	*Yuehsienszella szechuanensis*
腕足动物	*Kootinia* sp.
Acanthotretella decaius	非三叶虫节肢动物
Diangdongia pista	*Branchiocaris yiliangensis*
Lingulellotreta malongensis	*Guangweicaris spinatus*
Heiliomedusa minuta	*Houlongdongella disulata*
Nususia sp.	*Isoxys wudingensis*
Kutorgina sp.	*I. minor*
软舌螺	*Leanchoilia illecebrosa*
Linevitus malongensis	*Lianshanella liangshanensis*
类水母化石	*L. yunnanensis*
Eldonia sp.	*Longquania bispinosa*
鳃曳动物	*Neokunmingella minuta*
Corynetis sp.	*Panlongia spinosa*
Guanduscolex minor	*Sinoburius* sp.
Palaeoscolex sp.	*Tuzoia sinensis*
叶足类	*T.* cf. *retifera*
Hallucigenia sp.	*T. tylodensa*
奇虾类	*Waptia* sp.
Anomalocaris cf. *saron*	古虫动物
Parapeytoia sp.	*Vetulicola gangtoucunensis*
遗迹化石	*Vetulicola longbaoshanensis*
Astropolichnus cf. *hispanicus*	棘皮动物
Glockerichnus? sp.	*Wudingeocrinus rarus*
Hormosiroidea? sp.	分类不明化石
Qipanshanichnus gytus	*Gangtoucunia aspera*
Tomaculum problematicum	*Phlogites* sp.
Teichichnus sp.	*Sinoflabrum antiquum*

异应该是生态因素的影响而非埋藏差异. 寒武纪初期始海百合类的分布可能和水深有关, 水体相对较深的环境更适宜始海百合类生长.

(14) 分类不明化石. 发现于马龙县乌龙箐剖面的*Sinoflabrum antiquum*曾被当做类似伊迪卡拉型的化石报道[35]. 由于缺乏典型的伊迪卡拉化石特征, 在此将其归入分类不明的化石之列. 分类位置存在疑问的化石还包括火炬虫*Phlogites*及管状的岗头村虫*Gangtoucunia(*图 5(j))等.

(15) 遗迹化石. 关山生物群中的遗迹化石与世界上其他地点寒武纪早期的遗迹化石组合类似, 尤其是与瑞典寒武纪“Tessini 砂岩”的遗迹化石组合十分相似. 目前已识别的遗迹化石包括 *Glockerichnus*? sp., *Astropolichnus* cf. *hispanicus*, *Teichichnus* sp., *Tomaculum problematicum* 和 *Qipanshanichnus gytus* 等, 明显较澄江动物群时期丰富, 显示了动物行为的复杂化趋势.

3　结论

关山生物群是华南寒武纪早期继澄江动物群之后又一属种高度分异的软躯体化石群, 至今已发现十多个门类的化石, 包括节肢动物、腕足动物、海绵动物、棘皮动物、腔肠动物、软舌螺类、古虫动物、鳃曳动物、开腔骨类、奇虾类、叶足类和类水母化石等, 此外还有一些绿藻化石, 代表了寒武系沧浪铺期(第二统第四阶)浅水环境海洋生物的多样性. 关山生物群物种多样性的丰富程度使得对发生在寒武系沧

浪铺期生物绝灭[36,37]的力度需要重新评估. 如同一些学者[38]所指出的, 对该灭绝事件的认识可能由于埋藏方面的原因而被夸大.

关山生物群的生存环境是一个受风暴作用影响的浅海远滨转换带, 位于晴天浪基面和风暴浪基面之间. 关山生物群化石主要是没有经过搬运的原地埋藏组合或仅有极短距离搬运的近原地组合. 综合沉积学和埋藏学方面的特征来看, 风暴作用引起的快速埋藏是关山生物群软躯体化石得以完好保存的主要原因. 关山生物群相对较浅的生活环境, 更为靠近陆源的特点, 以及生物扰动的大量发育, 都明显区别于已知的其他布尔吉斯页岩型动物群, 极大的拓展了布尔吉斯页岩型动物群的范畴, 对探讨布尔吉斯页岩型动物群特异埋藏提供了一个独特的窗口.

关山生物群的发现填补了寒武纪早期澄江动物群和寒武纪中期的凯里动物群、布尔吉斯页岩动物群以及犹他州动物群之间的空白, 对探讨“寒武纪大爆发”和早期生命演化具有重要的意义. 进一步的发掘和深入研究还将为探索寒武纪早中期海洋生物群落的演替、生物多样性变迁等提供更为详尽的信息.

致谢 中国科学院南京地质古生物研究所李国祥教授、德国柏林自由大学 Bernd Weber 博士、西北大学张志飞博士和张兴亮教授在腕足类、节肢动物、遗迹化石等多方面提出有益的建议; 西北大学舒德干教授和云南大学张喜光教授对本文提出重要建议; 昆明学院陈庆韬老师在野外给予支持; 贵州大学赵元龙教授提供帮助; 审稿人提出修改建议; 在此一并致谢.

参考文献

1 Steiner M, Zhu M Y, Zhao Y L, et al. Lower Cambrian Burgess shale-type fossil associations of South China. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 2005, 220(Suppl): 129—152
2 Zhang X L, Liu W, Zhao Y L. Cambrian Burgess Shale-type Lagerstätten in South China: Distribution and significance. Gondwana Res, 2008, 14(Suppl): 255—262
3 Zhao Y L, Zhu M Y, Babcock L E, et al. Kaili biota: A taphonomic window on diversification of metazoans from the basal Middle Cambrian, Guizhou, China. Acta Geol Sin-Engl Ed, 2005, 79: 751—765
4 彭进, 赵元龙, 巫宜山, 等. 贵州凯里早寒武世杷榔动物群的发现. 科学通报, 2005, 50: 1055—1057
5 罗惠麟, 胡世学, 陈良忠, 等. 昆明地区早寒武世澄江动物群. 昆明: 云南科技出版社, 1999. 129
6 Zhang X L, Hua H. Soft-bodied fossils from the Shipai Formation, Lower Cambrian of the Three Gorge area, South China. Geol Mag, 2005, 142: 1—11
7 Xiao S H, Hu J, Yuan X L, et al. Articulated sponges from the Lower Cambrian Hetang Formation in southern Anhui, South China: Their age and implication for the early evolution of sponges. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 2005, 220(Suppl): 89—117
8 Wu W, Yang A H, Janussen D, et al. Hexactenellid sponges from the early Cambrian black shales of South Anhui, China. J Paleont, 2005, 79: 1043—1051
9 Luo H L, Fu X P, Hu S X, et al. New vetulicoliids from the Lower Cambrian Guanshan fauna, Kunming. Acta Geol Sin-Engl Ed, 2005, 79: 1—6
10 李勇, 陈良忠, 罗惠麟, 等. 昆明地区早寒武世关山动物群研究新进展. 地质通报, 2006, 35: 415—418
11 Luo H L, Fu X P, Hu S X, et al. A new arthropod, *Guangweicaris* Luo, Fu et Hu gen. nov. from the Early Cambrian Guanshan fauna, Kunming, China. Acta Geol Sin-Engl Ed, 2007, 81: 1—7
12 胡世学, 罗惠麟, 侯蜀光, 等. 云南武定早寒武世关山动物群棘皮动物化石. 科学通报, 2006, 51: 1366—1368
13 罗惠麟, 李勇, 胡世学, 等. 云南东部早寒武世马龙动物群和关山生物群. 昆明: 云南科技出版社, 2008. 134
14 Hu S X, Li Y, Luo H L, et al. New record of palaeoscolecids from the Early Cambrian of Yunnan, China. Acta Geol Sin-Engl Ed, 2008, 82: 244—248
15 Zhu M Y, Strauss H. From snowball earth to the Cambrian bioradiation: Calibration of Ediacaran-Cambrian Earth history in South China. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 2007, 254(Suppl): 1—6
16 Han J, Zhang Z F, Liu J N. A preliminary note on the dispersal of the Cambrian Burgess shale-type faunas. Gondwana Res, 2008, 14(Suppl): 269—276
17 Clausen S, Hou X G, Bergström J, et al. The absence of echinoderms from the Lower Cambrian Chengjiang fauna of China: Palaeoecological and palaeogeographical implications. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 2010, 294: 133—141

18 罗惠麟, 蒋志文, 唐良栋. 中国下寒武统建阶层型剖面. 昆明: 云南科技出版社, 1994. 183
19 Ponomarenko A G. Unique Sinsk localities of Early Cambrian organisms (Siberian Platform). Trans Palaeontol Inst Nauka, 2005, 284: 143
20 Ivantsov A Y, Zhuravlev A Y, Leguta A V, et al. Palaeoecology of the Early Cambrian Sinsk biota from the Siberian Platform. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 2005, 220(Suppl): 69—88
21 Paterson J R, Brock G A. Early Cambrian trilobites from Angorichina, Flinders Ranges, South Australia, with a new assemblage from the *Pararaia bunyerooensis* Zone. J Paleont, 2007, 81: 116—142
22 杨杰, 侯先光, 董渭. 昆明地区下寒武统节肢动物 *Guangweicaris* Luo, Fu et Hu, 2007 的再研究. 古生物学报, 2008, 46: 115—122
23 Mata S A, Bottjer D J. The paleoenvironmental distribution of Phanerozoic wrinkle structures. Earth-Sci Rev, 2009, 96: 181—195
24 Nelson J R, Eckman J E, Robertson C Y, et al. Benthic microalgal biomass and irradiance at the seafloor on the continental shelf of the South Atlantic Bight: Spatial and temporal variability and storm effects. Cont Shelf Res, 1999, 19: 477—505
25 Kuwahara V S, Toda, T, Hamasaki K, et al. Variability in the relative penetration of ultraviolet radiation to photosynthetically available radiation in temperate coastal waters, Japan. J Oceanogr, 2000, 56: 399—408
26 Hu S X, Zhang Z F, Holmer L E, et al. Soft-part preservation in a linguliform brachiopod from the Lower Cambrian Wulongqing Formation (Guanshan Fauna) of Yunnan, South China. Acta Palaeont Polon, 2010, 55: 495—505
27 罗惠麟, 傅晓平, 胡世学, 等. 昆明、武定地区早寒武世关山动物群的双瓣壳节肢动物. 古生物学报, 2006, 45: 460—469
28 刘琦, 罗惠麟, 陈良忠, 等. 昆明地区早寒武世三叶形虫新属——*Panlongia* Liu et Luo gen. nov. 古生物学报, 2006, 45: 400—407
29 罗惠麟, 李勇, 胡世学, 等. 论早寒武世三叶虫大古油栉虫属. 古生物学报, 2007, 46: 314—326
30 杨杰, 侯先光, 丛培允, 等. 昆明地区下寒武统沧浪铺组古虫动物新发现. 古生物学报, 2010, 49: 54—63
31 Conway M S, Robison R A. More soft-bodied animals and algae from the Middle Cambrian of Utah and British Columbia. Univ Kansas Paleont Contr, 1988, 122: 1—48
32 Pen J, Babcock L E, Zhao Y L, et al. Cambrian *Sphenothallus* from Guizhou Province, China: Early sessile predators. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 2005, 220(Suppl): 119—127
33 Babcock L E, Robison R A. Taxonomy and paleobiology of some Middle Cambrian scenella (cnidaria) and hyolithids (mollusca) from western North America. Univ Kansas Paleont Contr, 1988, 121: 1—22
34 Zhao Y L, Parsley R L, Peng J. Early Cambrian eocrinoids from Guizhou Province, South China. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 2007, 254(Suppl): 317—327
35 Zhang W T, Babcock L E. New extraordinarily preserved enigmatic fossils, possibly with Ediacaran affinities, from the Lower Cambrian of Yunnan, China. Acta Paleontol Sin, 2001, 40(Suppl): 201—213
36 Zhuravlev A Y, Wood R A. Anoxia as the cause of the mid-Early Cambrian (Botomian) extinction event. Geology, 1996, 24: 311—314
37 Zhuravlev A Y. Biotic diversity and structure during the Neoproterozoic-Ordovician transition. In: Zhuravlev A Y, Riding R, eds. The Ecology of the Cambrian Radiation. New York: Columbia University Press, 2001. 173—199
38 Li G X, Steiner M, Zhu X J, et al. Early Cambrian metazoan fossil record of South China: Generic diversity and radiation patterns. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 2007, 254(Suppl): 229—249