



贵州寒武纪杷榔组纳罗虫(*Naraoia*)的古地理分布及埋藏特征

孙全义^{1,2}, 彭进^{1,2}, 邵云彬³

1. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵州 贵阳 550025;
2. 贵州大学喀斯特地质资源与环境教育部重点实验室, 贵州 贵阳 550025;
3. 贵州省地质矿产勘查开发局 105 地质大队, 贵州 贵阳 550018

摘要: 纳罗虫属作为一类已经灭绝的节肢动物, 主要分布在寒武纪地层中。其中, 黔东南寒武系杷榔生物群的纳罗虫保存在江南斜坡沉积相区, 目前在台江革一和剑河辣子寨地区杷榔组中发现了大量纳罗虫标本。本次研究基于采自剑河辣子寨剖面的 213 块标本, 鉴定为 *Naraoia taijiangensis*, 化石主要保存在该剖面 3 个化石富集层中。结合这 3 个化石层的岩性特征、沉积环境及化石保存状态, 对 *N. taijiangensis* 的埋藏特征进行分析, 发现化石保存与快速的沉积事件相关, 以印痕化石保存为特征, 局部有矿化现象; 完整的化石个体出现在较厚的快速沉积层中; 不完整的化石则多保存在相对较薄的快速沉积层中。这一发现为揭示斜坡相区杷榔生物群的埋藏特征提供了依据。

关键词: 纳罗虫(*Naraoia*); 古地理; 埋藏学; 杷榔组; 寒武系; 贵州省

PALEOGEOGRAPHIC DISTRIBUTION AND TAPHONOMY CHARACTERISTICS OF *Naraoia* FROM CAMBRIAN BALANG FORMATION IN GUIZHOU PROVINCE

SUN Quan-yi^{1,2}, PENG Jin^{1,2}, SHAO Yun-bin³

1. College of Resources and Environment Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China;
2. Key Laboratory of Karst Georesources and Environment, Ministry of Education, Guizhou University, Guiyang 550025, China;
3. No. 105 Geological Brigade, Guizhou Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Guiyang 550018, China

Abstract: *Naraoia*, an extinct genus of arthropod, is mainly preserved in Cambrian strata. In eastern Guizhou, the *Naraoia* from Cambrian Balang Biota are distributed in the sedimentary facies of Jiangnan slope, where lots of *Naraoia* fossils have been found in the Balang Formation in Taijiang and Jianhe areas. Based on the 213 specimens collected from Lazizhai section in Jianhe County, the fossils are identified to be *Naraoia taijiangensis*, which are accumulated mainly in three fossil enrichment layers. By analyzing the lithological characteristics, sedimentary environment and fossil preserved situation of the three fossil layers, it is confirmed that the fossil preservation is related to a rapid sedimentation event. The preservation is characterized by fossil impression, with local mineralization. The intact individuals of *N. taijiangensis* are found at the bottom of thick rapid sedimentary layer, while the fragmentary fossils are preserved in thinner layer. This discovery provides a basis for the burial characteristics of the Balang Biota in the slope facies area.

Key words: *Naraoia*; paleogeography; taphonomy; Balang Formation; Cambrian; Guizhou Province

收稿日期: 2022-05-05; 修回日期: 2022-05-27. 编辑: 黄欣.

基金项目: 国家自然科学基金项目“贵州寒武纪杷榔动物群系统古生物学、埋藏学研究”(41672005).

作者简介: 孙全义(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事古生物学与地层学研究, 通信地址 贵州省贵州大学资源与环境工程学院, E-mail://1457775228@qq.com

0 前言

纳罗虫属(*Naraoia*)为非矿化保存的三叶形虫节肢动物的一个代表,其背甲由头甲和尾甲两部分铰合而成,成分为几丁质,中轴上发育消化腺,双肢型附肢,为底表移动、食腐或捕食生活方式^[1-3]。该属从寒武纪早期出现^[4-5],延伸至晚志留世^[6],但主要保存在寒武纪布尔吉斯页岩型生物群中^[4-10]。Peng等^[9]报道了寒武纪第4期杷榔生物群台江革一产地发现*Naraoia*,并建立该属化石1个新种*Naraoia taijiangensis*。之后,随着野外工作深入开展,先后在贵州的镇远江古、岑巩羊桥罗家塘、麻江淑里、都匀洛邦、剑河交榜和辣子寨等地共发现了9个杷榔生物群产地^[11-19],且每个产地的化石组合存在一定的差异,其中剑河辣子寨产地生物类群最丰富,包括开腔骨类、海绵动物、刺胞动物、蠕形动物、腕足动物、软舌螺动物、节肢动物、棘皮动物和藻类^[18-21],其中的节肢动物多样性最高^[22-23],也产出了大量非矿化保存的纳罗虫和弱矿化古蠕虫类化石^[21]。该产地纳罗虫不仅丰度高,还保存软体组织盲管,经鉴定与台江革一产地*N. taijiangensis*相同,仅存在一属一种,同时出现与三叶虫、藻类、古蠕虫共同保存在同一层位的现象,一些标本头部和碎片上不规则分布一些肉眼不易观察的褐红色圆圈状构造,其埋藏成因可能与有机质和细菌持续分解代谢有关。

纳罗虫化石主要保存在辣子寨剖面3个化石采集层中。纳罗虫是布尔吉斯页岩型生物群中常见的非矿化保存的软躯体化石,它的埋藏特征可提供生物群埋藏学重要证据。本研究针对3个化石采集层的岩石沉积特征、微量元素变化、化石分布、保存状态对纳罗虫埋藏特征进行研究。纳罗虫主要保存在沉积事件层中,完整的个体和具盲管的标本赋存在事件层的底部,与藻类、蠕虫、腕足等保存在同一层位,应为生物活体被沉积物迅速原地掩埋。纳罗虫碎片零星地分布在较薄的事件层中,未与其他生物化石保存在同一层位,可能是生物体死亡后短暂暴露于静水环境的基底上,受到底栖生物破坏和微生物分解作用崩裂,后被沉积物掩埋。

1 地质背景

贵州寒武纪地层分布广泛,分为扬子台地区、江

南斜坡带和江南盆地区3个沉积区(图1a)。杷榔组沉积在贵州寒武纪过渡相区,是杨敬之、钱义元等人于1959年命名的寒武系岩石地层单元,主要分布在贵州东部和湖南西部,沉积厚度介于100~700 m之间,变动较大^[24-26]。贵州剑河一带的杷榔组由一套斜坡相沉积的灰绿色、黄绿色泥页岩组成,呈北东向分布,出露完整,与下伏呈灰黑色的变马冲组炭质泥、页岩和上覆呈灰白色-灰色的清虚洞组薄层灰岩均整合接触^[13,19]。

杷榔组生物地层最早根据掘头虫类三叶虫组合带划分,其顶部为*Arthrocephalus-Changaspis-Balangia*,底部为*Arthrocephalus*带^[27],后历经多次修订^[28-29],最后将杷榔组的生物地层进一步厘定为*Arthrocephalus chauveui*一个生物带^[18,30]。据中国南方斜坡相区寒武系年代地层框架,杷榔组位于寒武系黔东统都匀阶,相当于寒武系第2统第4阶。

剑河辣子寨剖面杷榔组出露完整,厚277 m,自底部到顶部依次由粉砂质泥页岩、泥页岩和含钙质泥岩组成。近底部小型滑塌构造发育,下部包卷层理和交错层理等构造发育,向上水平层理发育(图1b)。岩石露头为浅黄色和灰绿色,中等程度风化,节理发育,生物化石丰富。该剖面存在纳罗虫3个化石富集层位,分别距杷榔组底部83~87 m(①号层位)、160~164 m(②号层位)、169~172 m(③号层位),产出大量的纳罗虫化石标本,与其他生物化石保存在同一层位。

2 材料和方法

对213块化石标本进行整理,获得完整个体9块、半完整23块、碎片181块。具鉴定特征的纳罗虫标本总体上头甲呈现出近圆形而尾甲为近椭圆形的外轮廓,头甲后边缘没有颊刺,且有较圆润的颊角,尾甲无边缘刺及尾刺,背甲边缘光滑,背甲的最宽处在头甲部位,尾甲长度比头甲长且向后逐渐变窄,具有多分支的盲管,尾甲的长度和宽度之比约为1.3,其形态特征与台江革一产地*N. taijiangensis*相同^[9],确认为*N. taijiangensis*。

使用佳能EOS 5D-Mark II和徕卡M250C相机对剑河辣子寨产地*N. taijiangensis*进行照片采集,用单反相机对和偏光显微镜分别对*N. taijiangensis*

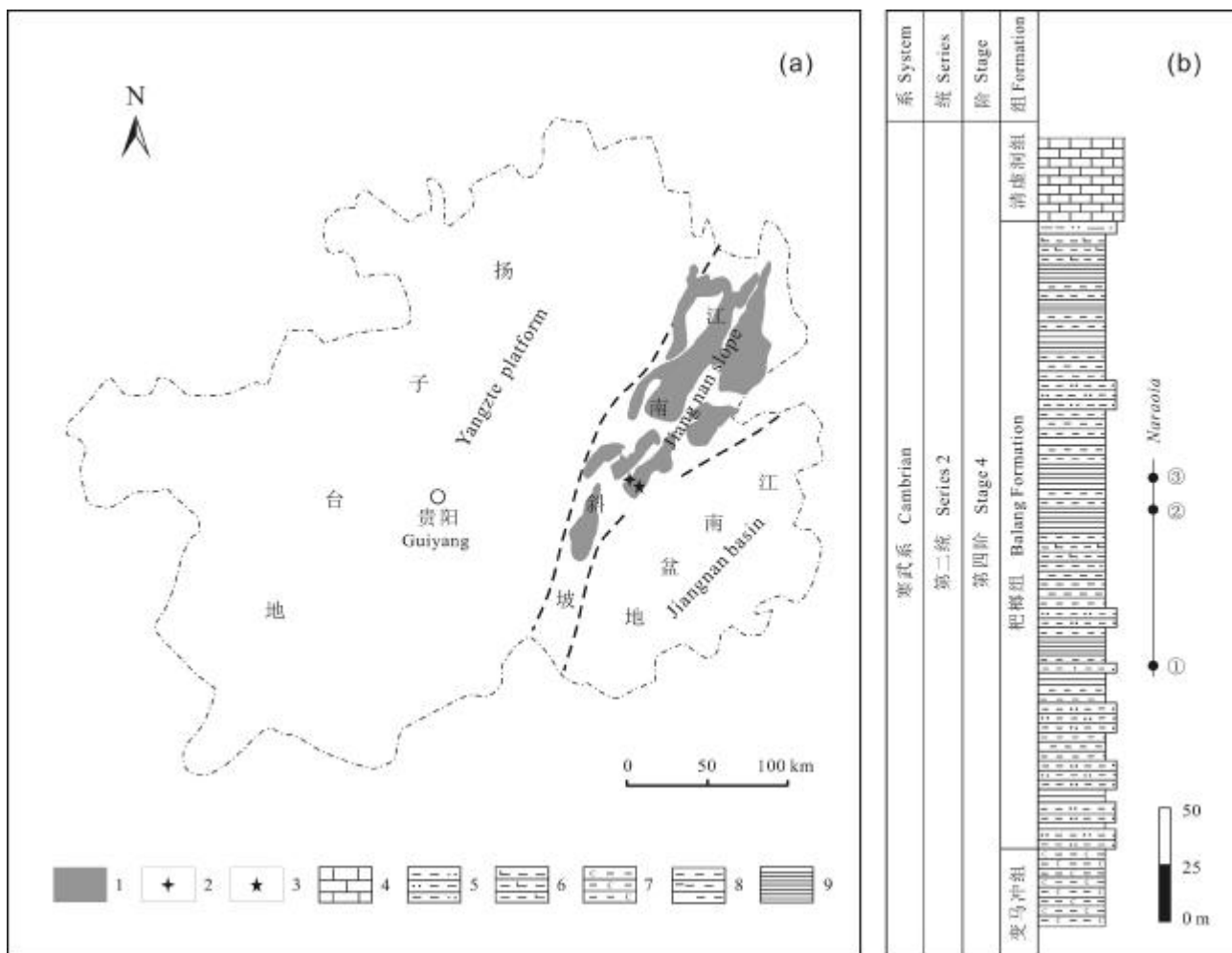


图 1 贵州杷榔组分布及剖面岩性柱状图

Fig. 1 Distribution and lithological column of Balang Formation in the Guizhou Province

a—杷榔组分布范围及化石点位置 (location of Balang Formation and fossil sites); b—辣子寨剖面岩性柱状图 (lithological column of Lazizhai section); 1—杷榔组 (Balang fm.); 2—台江革一剖面 (Geyi section in Taijiang); 3—剑河辣子寨剖面 (Lazizhai section in Jianhe); 4—灰岩 (limestone); 5—粉砂质泥岩 (silty mudstone); 6—钙质泥岩 (calcareous mudstone); 7—碳质泥岩 (carbonaceous mudstone); 8—泥岩 (mudstone); 9—页岩 (shale)

岩石标本抛光面和薄片进行图像采集, 利用扫描电镜 COXEM EM-30 对化石的化学成分进行能谱分析, 并使用 CorelDraw2019 和 Photoshop2019 对所有化石照片调整和统一比例尺。

3 古地理分布

非矿化的纳罗虫一直是古生物学研究的热点, 前人统计发现: 纳罗虫属主要保存在寒武纪的劳伦大陆和冈瓦纳大陆中 (图 2), 在中国、北美洲、澳大利亚等地的寒武纪地层中均有发现. Walcott 首次在加拿大洛基山寒武系第 5 阶的布尔吉斯页岩生物群中发现 *N. compacta*, 并建立了纳罗虫属^[7], 随后,

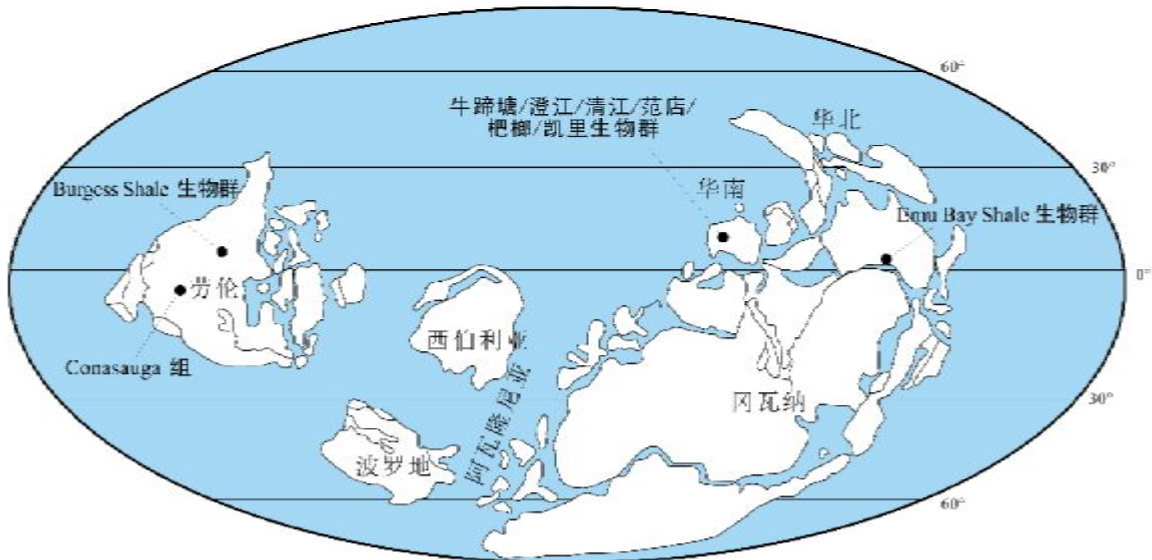
又发现了纳罗虫属的第二个种 *N. spinifer*^[31]. 近些年在加拿大不列颠哥伦比亚的布尔吉斯页岩中发现了纳罗虫属和周小姐虫属动物化石, 分别为 *N. magna*、*N. arcana* 和 *Misszhouia canadensis*^[10]. 澳大利亚南部的寒武系第 4 阶 Emu Bay shale 生物群中发现了 *N. cf. compacta*^[32]; 美国的佐治亚州寒武纪第 5 阶 Conasauga 组中也发现 *N. compacta* 和 *Misszhouia sp*^[33].

我国的寒武纪地层分布广泛, 产出大量的纳罗虫属动物化石. 云南澄江生物群中产出大量保存消化盲管的纳罗虫化石, 经鉴定为 *Naraoia longicaudata* 和 *N. spinosa*, 后经历修订, 将 *Naraoia longicaudata* 更

名为 *Misszhouia longicaudata*, 随后又发现了 *N. spinosa* 同种二型, 为 *N. spinosa* (A)、*N. spinosa* (B) [2,4]。近些年在湖北清江生物群和四川范店生物群中均发现大量纳罗虫化石, 目前均未对纳罗虫属动物化石进行鉴定 [34-35]。贵州寒武纪地层中也产出大量的纳罗虫

化石, 如遵义的牛蹄塘生物群中发现了 *N. compacta* [5]; 凯里生物群中发现了 *N. cf. compacta* [36], 保存有消化盲管; 杷榔生物群中发现了 *N. taijiangensis* [9]。

其中杷榔生物群 *N. taijiangensis*, 目前仅在台江革一、剑河交榜和辣子寨地区发现。在杷榔生物群



系	寒武系										
统	纽芬兰统		第二统		苗岭统			芙蓉统			
阶	卡塔阶	第一阶	第一阶	第四阶	乌蒙阶	鼓山阶	古丈阶	排岩阶	江山阶	第十阶	
年龄/Ma	541.0	~520	~521	~514	509	~504.5	~500.5	~497	~494	~489.5	485.4
生物群或地层			★牛蹄塘生物群 1			★澄江生物群 3,10					
				★范店生物群 7							
				★清江生物群 7							
					★杷榔生物群 6						
						★Enu Bay Shale 生物群 8					
							★凯里生物群 8				
								★Burgess Shale 生物群 1,2,4,5,9			
										★Conasauga 组 11	

图2 寒武纪 *Naraoia* 和 *Misszhouia* 的古地理分布图
(据文献[23]修改)

Fig. 2 Paleogeographic and geohistorical distribution of Cambrian *Naraoia* and *Misszhouia*
(Modified from Reference [23])

1—*Naraoia compacta*; 2—*N. spinifer*; 3—*N. spinosa*; 4—*N. arcana*; 5—*N. magna*; 6—*N. taijiangensis*; 7—*Naraoia* sp.; 8—*N. cf. compacta*; 9—*Misszhouia Canadensis*; 10—*M. longicaudata*; 11—*Misszhouia* sp. (Georgia)

中发现一个现象:保存 *N. taijiangensis* 的产地也发现了底栖的古蠕虫类和始海百合化石,几乎保存在同一层位. 贵州杷榔组是在江南斜坡沉积相区沉积而成,主要分布在贵州省东部,其中台江革一和剑河辣子寨地区的杷榔组厚度相对较小,但出露较好,与上覆的清虚洞组、下伏的变马冲组均整合接触,其岩性以泥岩为主.

寒武纪时期大部分不同种的该属动物分布具有地域性,不同地区的纳罗虫属动物种间差异显著. 但纳罗虫属集中分布在低纬度地区,可能是低纬度地区光照充足,生产者繁盛,该环境适合纳罗虫属等消费者生存.

4 辣子寨剖面 *Naraoia taijiangensis* 埋藏特征讨论

4.1 *Naraoia taijiangensis* 采集层岩石特征

辣子寨剖面赋存 *N. taijiangensis* 化石的3个层位中化石含量最多的是①号采集层,其次是②号和③号采集层. 据3个层位岩石样品抛光光片的观察,均发现了一明一暗韵律性的明暗纹层,微细纹层或水平或微倾斜,3个岩层中明暗纹层出现的频率和厚度存在明显的差异(图3). 亮纹层应是快速的沉积作用导致的事件层,可能是近岸风暴或滑坡作用引起的粉砂质及泥质碎屑沉积物大量卷入到水体中,被带入到陆棚斜坡深处. 远源沉积物受到重力

作用在斜坡及斜坡远端深水环境下快速沉积形成黄绿色泥岩纹层,颜色较亮;暗纹层是沉积物在正常的速率下沉积形成的背景层,因其含有生物碎屑或其他有机质成分,颜色较暗. 颜色较亮的事件层覆盖在颜色较暗的背景层之上^[37-38]. ①号采集层的亮色层多于②号和③号层位;③号层暗色层多于①号层和②号层位.

①号层位岩石样品抛光面中事件层的厚度在1.1~5.3 mm之间,平均厚度为3.1 mm,颜色较暗的背景层与颜色较亮的事件层交替出现频繁,事件层总厚度比背景层总厚度大,以事件层沉积作用为主,沉积物物源较稳定、沉积速率快,岩石样品颜色较亮;②号层位岩石样品抛光面中事件层厚度在0.9~4.5 mm之间,平均厚度为2.6 mm,明暗纹层交替出现的频率相对①号层位小,事件沉积作用相对减弱,规模减小;③号层位岩石样品抛光面中事件层厚度在0.5~4.9 mm,平均厚度为2.3 mm,该层位事件层和背景层交替出现频率显著减小,事件沉积作用显著减弱,主要为静水环境沉积作用,导致生物碎屑或其他有机质含量高,该层位岩石样品颜色较暗(图3).

在偏光显微镜下分别对保存 *N. taijiangensis* 的3个层位岩石样品薄片观察发现:事件层主要由粉砂质陆源碎屑物组成,夹杂一些泥质碎屑,粉砂质

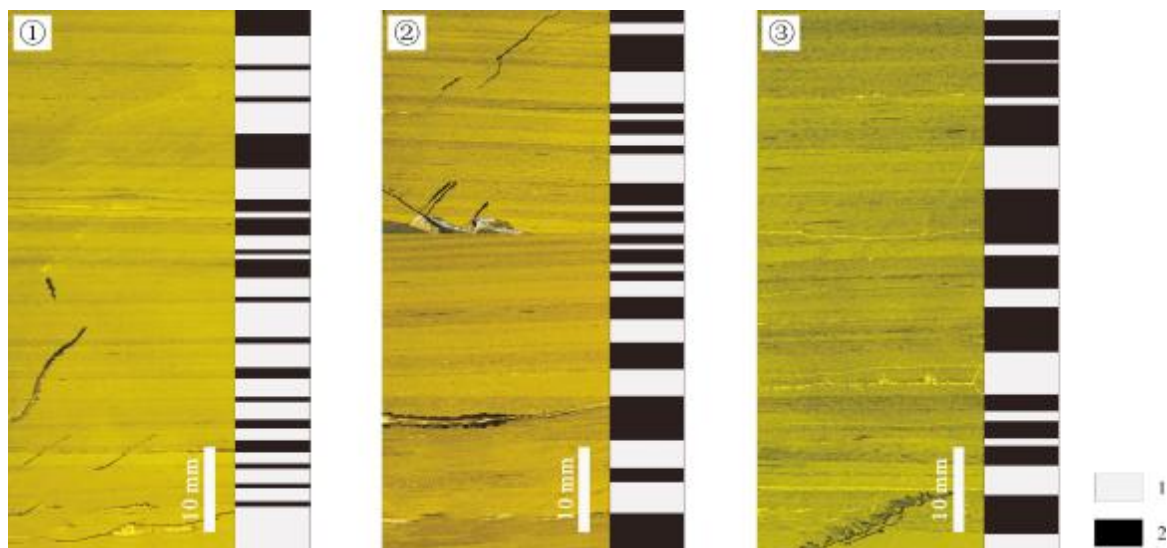


图3 剑河辣子寨剖面 *N. taijiangensis* 保存层位岩石样品抛光面沉积纹层特征

Fig. 3 Sedimentary characteristics on the polished sections of samples from the *N. Taijiangensis* fossil layers in Lazizhai profile

1—事件层(event layer); 2—背景层(background layer)

碎屑颗粒分选性和磨圆性较差,指示沉积物快速沉积特征(图 4a);背景层是由富含有机质的黏土矿物和少量粉砂质碎屑组成,粉砂质碎屑物分选性和磨圆度较好,指示沉积物缓慢沉降的特征(图 4b). 3个层位岩石薄片均出现碎屑相对较粗的粉砂质纹层,表明发生事件沉积作用引起水动力短暂增强,并且3个层位岩石矿物组成基本一致,均由黏土和石英等矿物组成,但是每个层位岩石样品成分含量和颗粒的粒径大小存在差异. ①号层位岩石样品中事件层碎屑颗粒含量多,粒径较粗(图 4c、d); ②号层位岩石样品中事件层碎屑颗粒粒径比①号层位略小且含量相对少,但分选性比①号层位略好(图 4e、f); ③号层位岩石样品中事件层碎屑颗粒含量和粒径大小相对其他两个层位显著减少(图 4g、h),碎屑粒径比背景层略粗,黏土矿物含量最多. 表明自下而上从①号层位到③号层位沉积速率减慢.

静水环境下缓慢沉降和短暂快速沉积对 *N. taijiangensis* 保存影响显著,以短暂快速沉积为主的①②号层位 *N. taijiangensis* 丰度高,保存质量较好,而以背景沉积作用为主的③号层位化石标本数量最少且保存质量较差,表明 *N. taijiangensis* 主要保存在事件层中,短暂的快速埋藏作用有利于化石保存.

4.2 *Naraoia taijiangensis* 埋藏模式

依据3个采集层213块 *N. taijiangensis* 化石标本保存的完整程度将其分为3种类型: I类,头尾甲绞合,背甲较完整的标本(图 5a—d),该类型标本仅9块; II类,仅保存完整的头甲或尾甲的半完整标本(图 5e—f),该类型标本共23块; III类,背甲部分碎片(图 5g—n),该类型标本数量较多,共181块.

统计发现每个采集层 *N. taijiangensis* 化石标本保存类型和数量存在差异(表 1). ①号采集层中部分类型化石标本呈现出低三维形态, III类型化石表面较褶皱,且部分 III类型化石标本表面不规则分布着一些褐红色的圆圈构造,该层位化石丰度较高,共164块. ②号层位 *N. taijiangensis* 标本共42块,产出保存盲管的完整标本(图 5a),该层位 *N. taijiangensis* 个体相对较大,呈二维印模形态保存,压实作用明显,化石表面光滑,颜色比围岩略深. ①②号层位事件沉积作用频发,沉积速率较快,生物体死亡后暴露基底时间较短,避免了其他生物体的破坏,为生物体保存提供有利条件. ③号层位以背景沉积作用为主,生物体死亡后暴露基底时间较长,导致 *N. taijiangensis* 丰度低,仅7块,保存 I 和 III类型标本(图 5).

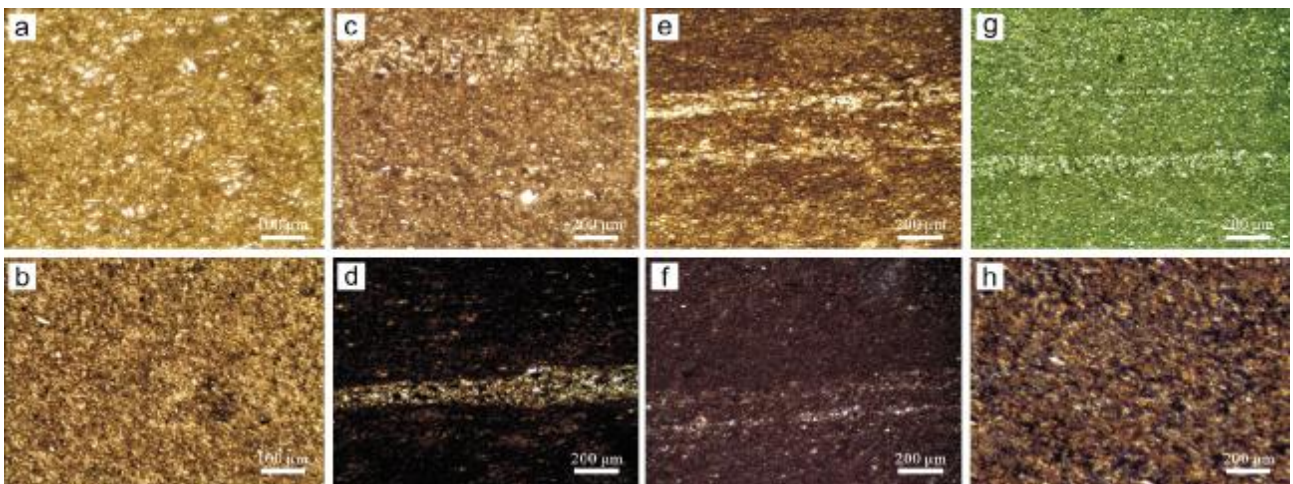


图 4 剑河辣子寨剖面 *N. taijiangensis* 保存层位岩石薄片特征

Fig. 4 Rock characteristics of thin sections of *N. taijiangensis* layers in Lazizhai profile

a—单偏光薄片事件中纹层图像(laminae of event layer under plane polarization light); b—单偏光薄片背景纹层图像(laminae of background layer under plane polarization light); c—单偏光下①号层位图像(the 1st layer, ppl); d—正交偏光下①号层位图像(the 1st layer, cpl); e—单偏光下②号层位图像(the 2nd layer, ppl); f—正交偏光下②号层位图像(the 2nd layer, cpl); g—单偏光下③号层位图像(the 3rd layer, ppl); h—正交偏光下③号层位图像(the 3rd layer, cpl)

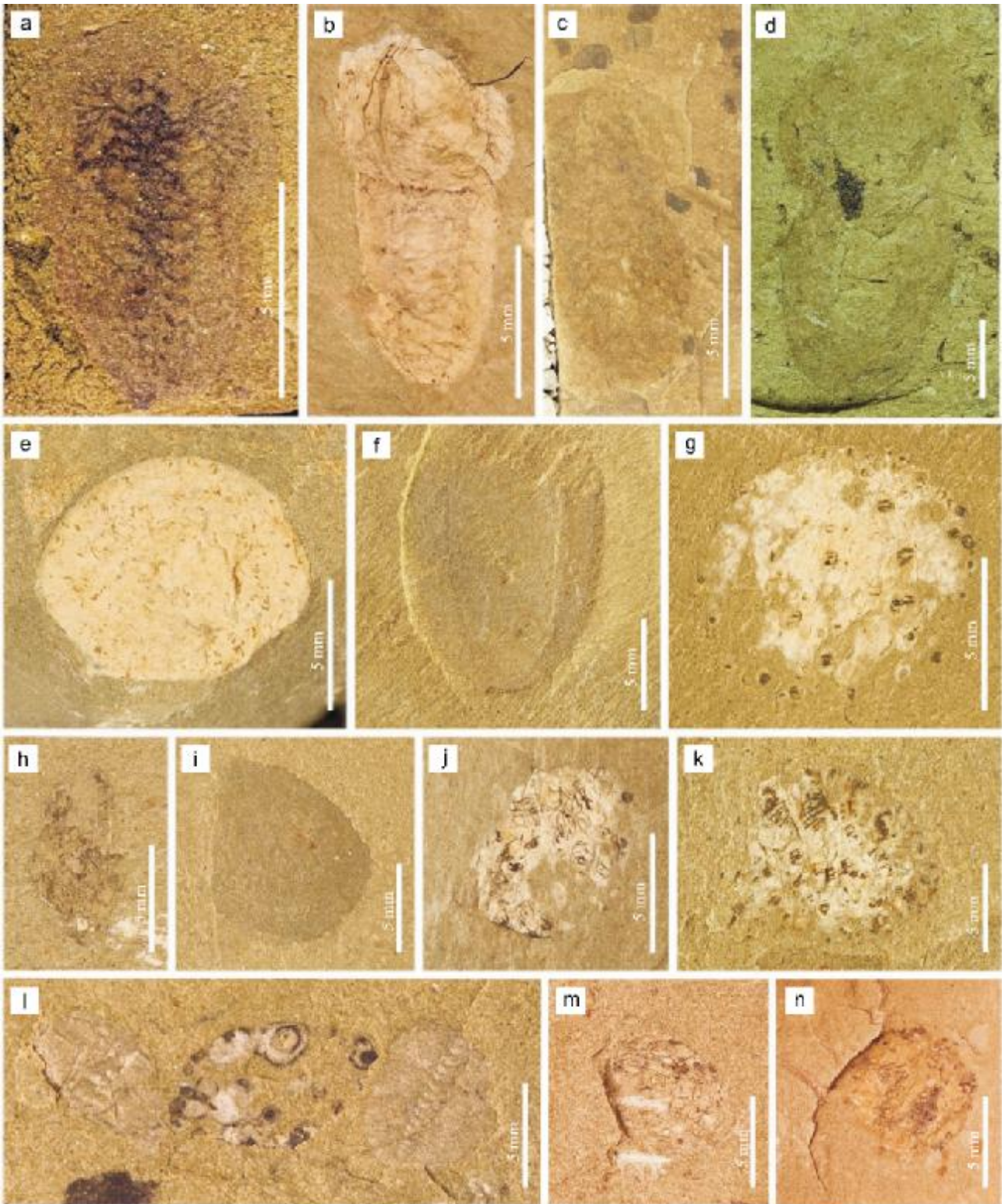


图 5 剑河辣子寨剖面杷榔组中 *N. taijiangensis* 保存差异

Fig. 5 Various preservation of *N. taijiangensis* in Balang Formation in Lazizhai section

a~d— I 类型标本(I-type specimen); e~f— II 类型标本(II-type specimen); g~n— III 类型标本(III-type specimen)

纳罗虫附肢比较合的背甲腐解快, 几乎所有的附肢同时腐解消失^[39], 这 3 个采集层 *N. taijiangensis*

的附肢都未保存, 以背甲碎片保存为主, 且保存姿势单调, 大多数生物体与岩石的微层面平行保存,

表 1 剑河辣子寨杷榔组 3 个采集层中 *N. taijiangensis* 化石保存类型数量统计

Table 1 Fossil numbers by preserved types of *N. taijiangensis* from Balang Formation in Laizhai area

化石层位	I 类	II 类	III 类	总计
①号层位	4	14	146	164
②号层位	3	9	30	42
③号层位	2	0	5	7

少数标本倾斜岩石微层面,说明大多数生物体死亡后才被埋藏,腐解作用发生在埋藏前。I 类型标本保存在相对较厚的事件沉积层底部。在完整的 *N. taijiangensis* 的保存层位,也出现了保存肠道的蠕虫化石,蠕虫个体完整且保存肠道,呈现出平直的状态;双壳铰合的和双壳错动的腕足动物^[40];双壳铰合保存的高肌虫化石,高肌虫呈现出凸面朝上,无定向分布的特点^[21];个体完整、无定向分布的三叶虫幼体标本^[41];具附肢与眼睛的大型双瓣壳吐卓虫化石标本^[42]。特别是具游泳特点的完整个体的三叶虫幼虫、高肌虫、吐卓虫与底栖的海绵、腕足动物共同保存。而 III 类型标本保存在较薄的事件层中,几乎未与其他生物化石同层位保存。物种生活方式不同导致在沉积物中保存特点不同^[43],根据 *N. taijiangensis* 的生活方式、在沉积物中保存状态和保存位置推测:保存盲管的标本很可能是底表移动的 *N. taijiangensis* 活体被风暴或斜坡滑塌引起事件沉积作用迅速埋藏,保存在事件层底部,保存较差的 III 类型标本可能为 *N. taijiangensis* 死亡后短暂暴露在静水环境的基底上,后被风暴作用或滑坡作用引起的粉砂质及泥质碎屑沉积物掩埋形成近原地埋藏。

剑河辣子寨杷榔组化石物种种类和数量较多,出现 *N. taijiangensis* 与其他生物共同保存的现象:1)背甲完整的 *N. taijiangensis* 与藻类在同一层面且平行于岩层微层面保存(图 5c),此标本很可能为蜕壳标本,通常平行岩层微层面^[44],藻类植物通常生长在静水低能的环境,该环境有利于动物的蜕壳,是动物蜕壳的首选环境^[45]。由于蜕壳缺乏软体组织连接,受到流水搬运或生物扰动很容易分离破碎^[46],短暂暴露在基底的蜕壳迅速被沉积物掩埋与藻类共

同保存。2) *N. taijiangensis* 背甲碎片、三叶虫碎片和较完整三叶虫幼体共同保存(图 5f),与近原地埋藏特征相似。三叶虫碎片和 *N. taijiangensis* 碎片可能为生物体死亡后被微生物严重腐解,而较完整的三叶虫幼体死亡后被微生物腐解作用较弱,随后受到事件沉积作用搬运到陆棚斜坡较深处与 *N. taijiangensis* 背甲碎片共同沉积在一起,形成近原地埋藏模式。

4.3 *Naraoia taijiangensis* 矿化特征

N. taijiangensis 主要保存在事件层中,快速埋藏作用从陆源带来大量细粒粉砂和细粒黏土沉积物造成孔隙水缺氧,微生物腐解速率较慢,避免了其他生物的破坏。但是在快速埋藏形成的缺氧环境中,非矿化的节肢动物壳体可以保存数天到几个月^[38-39],而生物体表面发生不同的矿化作用,阻止生物腐烂,对软躯体化石保存起着重要作用,这些矿化作用与水体中细菌的代谢作用有关^[47-48]。

剑河辣子寨杷榔组 *N. taijiangensis* 化石的颜色与围岩区别显著,化石边缘与围岩接触区域能谱(EDS)元素面分布图(图 6)显示:化石与围岩表面碳、氧、硅、铝、硫元素含量区别不大,而铁元素有明显的区别,化石表面铁元素含量高于围岩,尤其化石表面褐红色圆圈区域铁含量更多,说明化石以富铁铝硅酸盐形式保存下来。这是因为黏土矿物表面积较大,具有较强的吸附能力^[49],黏土矿物对死亡 *N. taijiangensis* 体内释放出大量的消化酶和自溶酶发生吸附作用,在生物遗体上包裹一层黏土矿物,使酶的活性抑制或完全消失,有效地阻止了生物遗体腐解过程。这些黏土矿物对 *N. taijiangensis* 的形态进行复制,形成化石保存下来。只有保存完整的 *N. taijiangensis* 呈微三维形态,说明黏土矿物吸附在生物遗体上,增加其稳定性,有利于黏土矿物对尸体的内部进行充填形成微三维形态保存^[50]。黏土矿物对尸体吸附充填越早, *N. taijiangensis* 保存越好;吸附充填越晚,被微生物分解越严重,导致壳体塌陷,受到压实作用破碎,使化石表面较褶皱。

海水中分布大量的好氧异养型的铁细菌,该细菌以富含有机质的生物遗体为能源,吸附在生物尸体上大量繁殖,并且将游离态亚铁离子氧化成不可溶的三价铁化合物聚集在铁细菌周围,形成圆状的代谢产物^[51-52]。*N. taijiangensis* 死亡后在多种细菌参

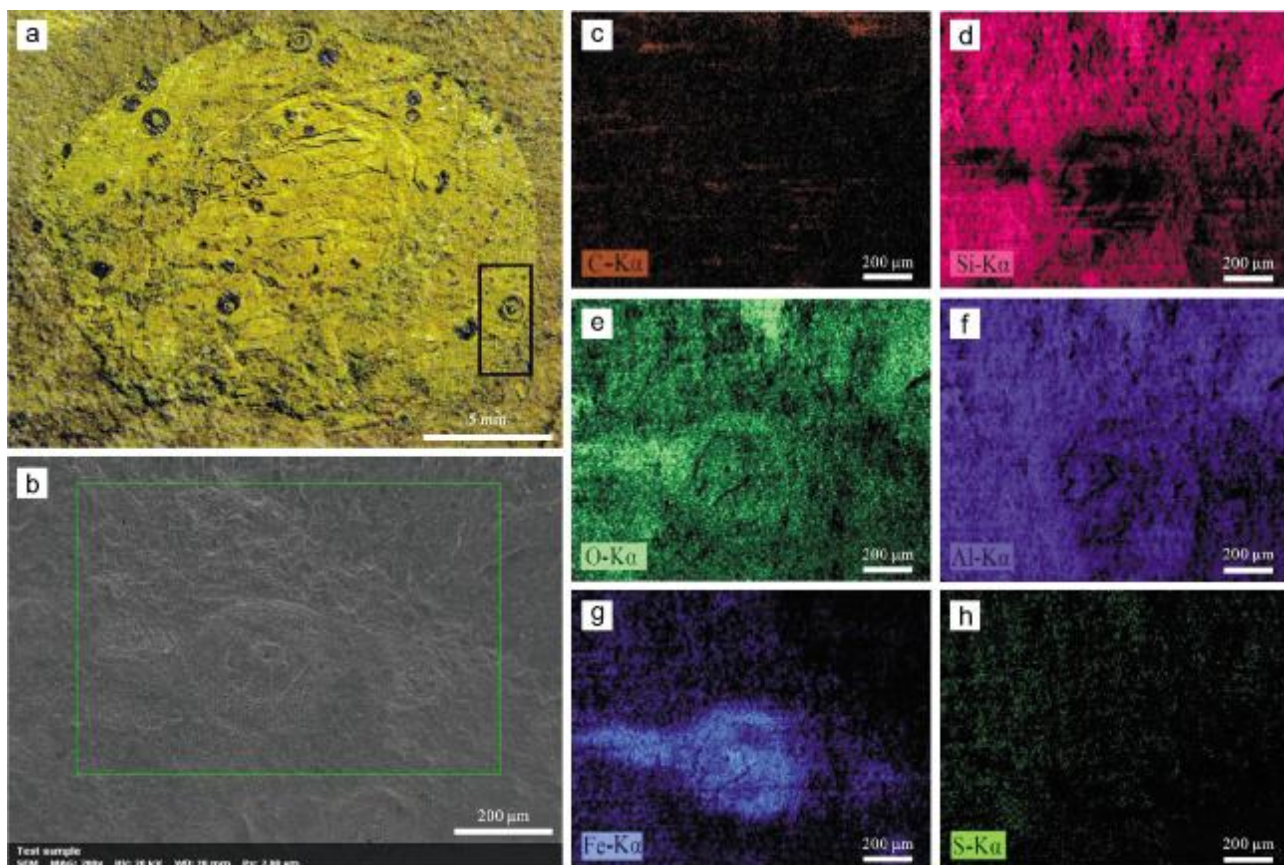


图6 剑河辣子寨剖面杷榔组中 *N. taijiangensis* 头甲与围岩交界处的能谱和扫描电镜图

Fig. 6 EDS and SEM images of the junction between *N. taijiangensis* anterior shield and surrounding rock of Balang Formation

a—*N. taijiangensis* 头甲标本, 头甲上不规则分布一些褐红色圆圈 (specimen of *N. taijiangensis* anterior shield, with some maroon colored circles irregularly distributed); b—图 a 中框选的 *N. taijiangensis* 头甲边缘与围岩交界处电镜图 (SEM image of the *N. taijiangensis* anterior shield edge shown in the black box in Figure a); c~h—图 b 中方框区域的元素分布图 (distributions of elements in the green box in Figure b)

与下发生腐解, 富含有机质的肠道等软体组织被氧化分解成 H_2O 和 CO_2 . CO_2 溶解于海水中形成 HCO_3^- , 使 pH 值降低呈现出弱酸性环境, 该环境有利于海水中铁细菌的繁殖. 随着铁细菌代谢作用进行, 海水中游离低价铁离子逐渐向 *N. taijiangensis* 遗体表面聚集, 进入铁细菌体内, 被生物酶氧化生成不可溶的三价铁化合物排到体外, 在铁细菌周围形成不可溶的三价铁化合物. 事件沉积作用带来的沉积物快速掩埋使铁细菌及其代谢产物共同埋藏在 *N. taijiangensis* 壳上, 同时黏土矿物对生物遗体吸附使表面汇集的亚铁离子起到对生物遗体起到充填作用, 使其以富铁铝硅酸盐形式保存.

①号采集层的部分 *N. taijiangensis* 背甲碎片上不规则分布一些肉眼不易观察的褐红色圆圈状构造 (图 6a). 这些褐红色的圆圈状构造只出现在 *N.*

taijiangensis 碎片上, 未出现在围岩上. 如果是后期地质作用形成, 不应只形成规则的圆圈状, 且不应只出现在化石上, 在围岩上也应有分布. 这些圆圈状的构造很可能是在 *N. taijiangensis* 化石早期石化作用下形成的. 通过对化石上褐红色圆圈中心、圆圈上、圆圈外及围岩 EDS 打点分析发现: 铁元素含量依次呈现出递减的变化趋势 (图 7). 铁细菌随机吸附在 *N. taijiangensis* 壳上, 持续进行代谢作用, 导致生物遗体被严重腐解, 铁细菌代谢产物越来越多, 在生物遗体上累积在铁细菌周围形成以铁细菌为中心, 表现出褐红色的圆圈状构造, 形成以铁细菌为中心向外铁元素含量不断减少的现象. 而背甲保存完整的 *N. taijiangensis* 为生物死亡后迅速被沉积物掩埋, 阻断了生物尸体与外界环境的接触并使生物体内部形成缺氧环境. 缺氧环境和快速沉积带

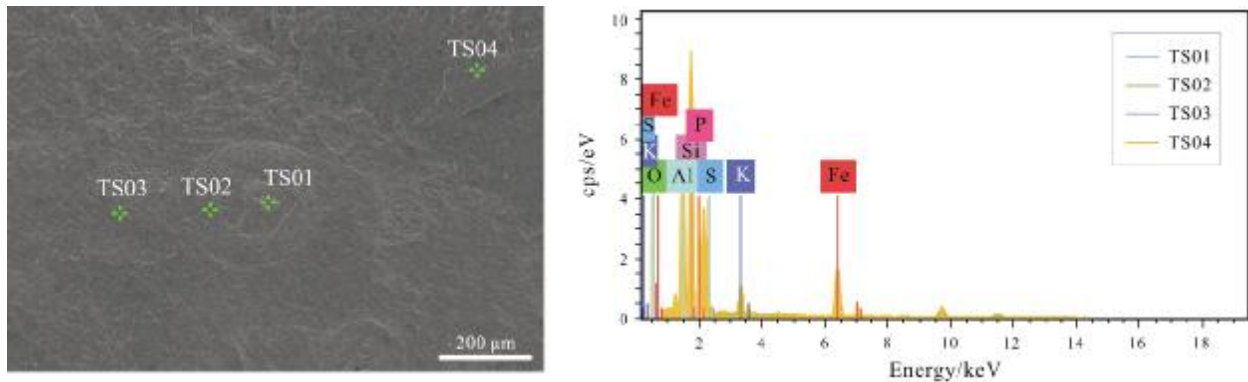


图7 杷榔组中 *N. taijiangensis* 头甲与围岩交界处能谱点分析元素原子百分比总谱图

Fig. 7 Spectrum of atomic percentages of elements by EDS point analysis for *N. taijiangensis* anterior shield and surrounding rock

来黏土矿物对 *N. taijiangensis* 残骸吸附作用, 导致铁细菌代谢作用停止. 由于铁细菌代谢时间短, 不可能在保存完整背甲上代谢生成褐红色圆圈构造, 所以富铁的褐红色圆圈构造只出现在被铁细菌持续分解破碎的背甲碎片.

5 结论

(1) 寒武纪时期的纳罗虫属分布在低纬度地区, 大部分不同种的该属动物分布具有地域性, 其中寒武纪第4期的杷榔生物群 *N. taijiangensis* 保存在江南斜坡沉积相区, 目前在台江革一和剑河辣子寨地区的杷榔组中均有发现.

(2) 贵州剑河辣子寨剖面杷榔组纳罗虫形态与台江革一把榔组 *Naraoia taijiangensis* 形态相同, 确认为 *N. taijiangensis*.

(3) 剑河辣子寨剖面以短暂快速沉积为主的①号、②号层位 *N. taijiangensis* 丰度高, 保存较好; 而以背景沉积作用为主③号层位 *N. taijiangensis* 数量最少, 且保存质量较差. *N. taijiangensis* 以富铁的铝硅酸盐形式保存, 部分碎片出现富铁的褐红色圆圈状构造, 疑似与铁细菌代谢有关.

致谢: 感谢贵州大学王秋军老师, 以及一起野外踏勘、采集化石标本的师兄师姐的指导和帮助, 同时向对本文提出了宝贵修改意见的专家表示衷心的感谢! 文章原通信作者(笔者导师)彭进教授在文章完成后于2022年8月因病去世, 恩师的离世让人悲痛, 感谢恩师的耐心指导, 永不忘恩师的恩情!

参考文献(References):

- [1] Vannier J, Chen J Y. Digestive system and feeding mode in Cambrian naraoiid arthropods [J]. *Lethaia*, 2002, 35(2): 107–120.
- [2] Zhang X L, Shu D G, Erwin D H. Cambrian naraoiids (arthropoda): Morphology, ontogeny, systematics, and evolutionary relationships [J]. *Journal of Paleontology*, 2007, 68(S68): 1–52.
- [3] Zhai D Y, Edgecombe G D, Bond A D, et al. Fine-scale appendage structure of the Cambrian trilobitomorpha *Naraoia spinosa* and its ontogenetic and ecological implications [J]. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2019, 286(1916): 20192371.
- [4] 张文堂, 侯先光. *Naraoia* 在亚洲大陆的发现 [J]. *古生物学报*, 1985, 24(6): 591–595.
Zhang W T, Hou X G. Preliminary notes on the occurrence of the unusual trilobite *Naraoia* in Asia [J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 1985, 24(6): 591–595.
- [5] Steiner M, Zhu M Y, Zhao Y L, et al. Lower Cambrian burgess shale-type fossil associations of South China [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2005, 220(1/2): 129–152.
- [6] Caron J B, Rudkin D M, Milliken S. A new Late Silurian (Pridolian) naraoiid (Euarthropoda: Nektaspida) from the Bertie Formation of southern Ontario, Canada Delayed fallout from the Cambrian explosion [J]. *Journal of Paleontology*, 2004, 78(6): 1138–1145.
- [7] Walcott C. Cambrian geology and paleontology II. Middle Cambrian branchiopoda, malacostraca, trilobita and merostomata [J]. *Smithsonian Miscellaneous Collections*, 1912, 57(6): 145–288.
- [8] 赵元龙, 袁金良, 朱茂炎, 等. 贵州中寒武世早期凯里生物群研究的新进展 [J]. *古生物学报*, 1999, 38(S1): 1–14.
Zhao Y L, Yuan J L, Zhu M Y, et al. A progress report on research on the early Middle Cambrian Kaili Biota, Guizhou, PRC

- [J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 1999, 38(S1): 1-14.
- [9] Peng J, Zhao Y L, Sun H J. Discovery and significance of *Naraoia* from the Qiangongian (Lower Cambrian) Balang Formation, Eastern Guizhou, South China[J]. *Bulletin of Geosciences*, 2012, 87(1): 143-150.
- [10] Mayers B, Aria C, Caron J B. Three new naraoiid species from the Burgess shale, with a morphometric and phylogenetic reinvestigation of Naraoiidae[J]. *Palaeontology*, 2019, 62(1): 19-50.
- [11] Peng J, Zhao Y L, Wu Y S, et al. The Balang Fauna: A new Early Cambrian fauna from Kaili City, Guizhou Province[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(11): 1159-1162.
- [12] Peng J, Feng H Z, Fu X P, et al. New Bradoriid arthropods from the Early Cambrian Balang Formation of eastern Guizhou, South China[J]. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 2010, 84(1): 56-68.
- [13] Peng J, Sun H J, Zhao Y L, et al. The Jiaobang section: The Balang Formation and the Balang Fauna (Cambrian Series 2 Stage 4) near Jiaobang villiage, Jianhe County, Guizhou Province, China[J]. *Journal of Guizhou University (Natural Science)*, 2012, 29(S1): 125-132.
- [14] Peng J, Sun H J, Zhao Y L, et al. The fossiliferous Geyi section of the Balang Formation (Cambrian Series 2, Stage 4) near Taijiang County, Guizhou Province, South China[J]. *Journal of Guizhou University (Natural Science)*, 2012, 29(S1): 89-97.
- [15] 马海涛, 彭进, 赵元龙, 等. 贵州岑巩羊桥罗家塘杷榔动物群的发现及其后生动物早期演化的意义[J]. *地质论评*, 2011, 57(5): 743-748.
- Ma H T, Peng J, Zhao Y L, et al. Discovery of the Balang Fauna at Luojiatang, Yangqiao, Cengong, Guizhou, and its significance to the early evolution of the Metazoa[J]. *Geological Review*, 2011, 57(5): 743-748.
- [16] 达扬, 彭进, 赵元龙, 等. 贵州台江革一黔东南统杷榔组沉积环境初探[J]. *地质论评*, 2011, 57(4): 574-582.
- Da Y, Peng J, Zhao Y L, et al. Preliminary investigation on sedimentary environment of the Balang Formation in Geyi, Taijiang, Eastern Guizhou, China[J]. *Geological Review*, 2011, 57(4): 574-582.
- [17] 赵元龙, 彭进, 伍孟银, 等. 贵州麻江下司寒武系杷榔组棘皮动物始海百合新类型化石[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2015, 40(2): 249-260.
- Zhao Y L, Peng J, Wu M Y, et al. A new type eocrinoids of echinoderms from the Balang Formation in Cambrian at Xiasi Town, Majiang County, Guizhou Province, China[J]. *Earth Science — Journal of China University of Geosciences*, 2015, 40(2): 249-260.
- [18] 申震, 彭进, 文荣琴, 等. 寒武纪似节头虫 *Arthricocephalites* 及其地层意义[J]. *古生物学报*, 2016, 55(1): 9-18.
- Shen Z, Peng J, Wen R Q, et al. *Arthricocephalites* (Trilobite) from the Cambrian and its stratigraphic significance [J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 2016, 55(1): 9-18.
- [19] 刘帅, 文荣琴, 彭进, 等. 贵州寒武系杷榔组杷榔化石库埋藏学初步研究——以剑河辣子寨剖面为例[J]. *古生物学报*, 2017, 56(3): 282-300.
- Liu S, Wen R Q, Peng J, et al. A preliminary study on taphonomy of the Balang Lagerstätte from the Cambrian (Stage 4), Balang Formation at Jianhe, Guizhou, China: Example for Lazizhai section of the Balang Formation[J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 2017, 56(3): 282-300.
- [20] 王秋军, 彭进, 文荣琴, 等. 贵州剑河寒武纪杷榔动物群中的海绵化石组合[J]. *古生物学报*, 2018, 57(3): 312-320.
- Wang Q J, Peng J, Wen R Q, et al. The sponge assemblage from the Cambrian Balang Fauna of Jianhe, Guizhou [J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 2018, 57(3): 312-320.
- [21] 邵云彬, 彭进, 王秋军, 等. 贵州寒武纪杷榔组古蠕虫类埋藏特征及意义[J]. *古生物学报*, 2021, 60(4): 483-498.
- Shao Y B, Peng J, Wang Q J, et al. Taphonomic characteristics and significance of the palaeoscolecid from the Cambrian Balang Formation in Jianhe County, Guizhou Province[J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 2021, 60(4): 483-498.
- [22] Liu S, Peng J, Wen R Q, et al. New data for Isoxys of the Balang Fauna (Cambrian Stage 4), South China[J]. *Bulletin of Geosciences*, 2018, 93(2): 147-162.
- [23] Wen R Q, Babcock L E, Peng J, et al. The bivalved arthropod Tuzoia from the Balang Formation (Cambrian Stage 4) of Guizhou, China, and new observations on comparative species[J]. *Papers in Palaeontology*, 2019, 5(4): 719-742.
- [24] 周志毅, 袁金良, 张正华, 等. 贵州及其邻近地区寒武纪生物地理分区[J]. *地层学杂志*, 1979, 3(4): 258-271.
- Zhou Z Y, Yuan J L, Zhang Z H, et al. Cambrian biogeographical province of Guizhou and the neighbouring areas[J]. *Acta Stratigraphica Sinica*, 1979, 3(4): 258-271.
- [25] 尹恭正. 寒武系[C]//贵州省地质矿产局. 中华人民共和国地质矿产部地质专报(一)区域地质(第7号): 贵州省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1987: 49-96.
- Yin G Z. Cambrian system [C]//Guizhou Bureau of Geology and Mineral Resources. Ministry of Geology and Mineral Resources, People's Republic of China: Geological Memoirs (Series 1 No. 7): Regional Geology of Guizhou Province. Beijing: Geological Publishing House, 1987: 49-96.
- [26] Peng S C, Babcock L E. Cambrian of the Hunan-Guizhou region, South China [C]//Peng S C, Babcock L E, Zhu M Y. Cambrian System of South China. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2001: 3-51.

- [27]周志毅,袁金良,张正华,等. 贵州寒武纪地层的分类和对比[J]. 地层学杂志, 1980, 4(4): 273-281.
Zhou Z Y, Yuan J L, Zhang Z H, et al. Classification and correlation of Cambrian strata in Guizhou Province, China[J]. Journal of Stratigraphy, 1980, 4(4): 273-281. (in Chinese)
- [28]袁金良,赵元龙,李越,等. 黔东南早、中寒武世凯里组三叶虫动物群[M]. 上海:上海科学技术出版社, 2002: 1-423.
Yuan J L, Zhao Y L, Li Y, et al. Trilobite fauna of the Kaili Formation, Lower-Middle Cambrian, from Southeastern Guizhou, South China[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2002: 1-423. (in Chinese)
- [29]秦琴,彭进,傅晓平,等. 贵州黔东南世(早寒武世)杷榔组 *Changaspis* Lee in Chien, 1961 的再研究[J]. 古生物学报, 2010, 49(2): 220-230.
Qin Q, Peng J, Fu X P, et al. Restudy of *Changaspis* (Lee), 1961 From Qiongdongian (Early Cambrian) Balang Formation near eastern Guizhou, South China[J]. Acta Palaeontologica Sinica, 2010, 49(2): 220-230.
- [30]闫巧洁,彭进,赵元龙,等. 贵州剑河寒武系黔东南统杷榔组沉积环境及生物地层再研究——以剑河交榜剖面为例[J]. 地质论评, 2014, 60(4): 893-902.
Yan Q J, Peng J, Zhao Y L, et al. Restudy of sedimentary and biostratigraphy of the Qiongdongian (Cambrian) Balang Formation at Jianhe, Guizhou, China: Example for Jiaobang Section of the Balang Formation[J]. Geological Review, 2014, 60(4): 893-902.
- [31]Walcott C D. Addenda to descriptions of Burgess shale fossils (with 23 plates) [J]. Smithsonian Miscellaneous Collections, 1931, 85: 1-46.
- [32]Nedin C. The Emu Bay shale, a Lower Cambrian fossil lagerstätte, Kangaroo Island, South Australia[J]. Memoirs of the Association of Australasian Palaeontologists, 1995, 18: 31-40.
- [33]Schwimmer D R, Montante W M. Exceptional fossil preservation in the Conasauga Formation, Cambrian, northwestern Georgia, USA[J]. Palaios, 2007, 22(4): 360-372.
- [34]Fu D J, Tong G H, Dai T, et al. The Qingjiang biota: A Burgess shale-type fossil Lagerstätte from the Early Cambrian of South China[J]. Science, 2019, 363(6433): 1338-1342.
- [35]Du K S, Ortega-Hernández J, Yang J, et al. A new Early Cambrian Konservat-Lagerstätte expands the occurrence of Burgess shale-type deposits on the Yangtze Platform [J]. Earth-Science Reviews, 2020, 211: 103409.
- [36]赵元龙,朱茂炎, Babcock L E, 等. 凯里生物群——5.08 亿年前的海洋生物[M]. 贵阳:贵州科技出版社, 2011: 1-251.
Zhao Y L, Zhu M Y, Babcock L E, et al. The Kaili Biota: Marine organisms from 508 million years ago [M]. Guiyang: Guizhou Science and Technology Publishing House, 2011: 1-251.
- [37]赵方臣,朱茂炎. 云南早寒武世澄江化石库中两种埋藏相的化石定量分析[J]. 古生物学报, 2007, 46(1): 75-86.
Zhao F C, Zhu M Y. Quantitative comparison of the fossil assemblages between the event and background mudstones from the Early Cambrian Chengjiang Lagerstätte, Yunnan [J]. Acta Palaeontologica Sinica, 2007, 46(1): 75-86.
- [38]赵方臣. 云南寒武纪澄江生物群埋藏学和定量古生态学研究[D]. 南京:中国科学院南京地质古生物研究所, 2009: 1-164.
Zhao F C. Quantitative analysis of taphonomy and palaeoecology of the Early Cambrian Chengjiang Lagerstätte, Yunnan[D]. Nanjing: Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, Chinese Academy of Sciences, 2009: 1-164.
- [39]Babcock L E, Chang W T. Comparative taphonomy of two nonmineralized arthropods: *Naraoia* (Nektaspida; Early Cambrian, Chengjiang Biota, China) and *Limulus* (Xiphosurida; Holocene, Atlantic Ocean)[J]. Bulletin of the National Museum of Natural Science, 1997, 10: 233-250.
- [40]刘玉娟. 黔东南寒武系第 4 阶至乌溜阶腕足动物研究[D]. 贵阳:贵州大学, 2020: 1-161.
Liu Y J. Brachiopoda from Cambrian Stage 4 to the Wuliuan Stage in eastern Guizhou[D]. Guiyang: Guizhou University, 2020: 1-161.
- [41]刘帅. 贵州寒武纪杷榔动物群埋藏学研究[D]. 贵阳:贵州大学, 2018: 1-125.
Liu S. Study on taphonomy of the Balang Fauna Lagerstätte from the Cambrian (Stage 4) of Guizhou, China[D]. Guiyang: Guizhou University, 2018: 1-125.
- [42]文荣琴. 贵州寒武纪杷榔组大型双瓣壳节肢动物系统古生物学和古生态学研究[D]. 贵阳:贵州大学, 2019: 1-157.
Wen R Q. Systematics and paleoecology of large bivalved arthropods from the Balang Formation (Cambrian), Guizhou, China[D]. Guiyang: Guizhou University, 2019: 1-157.
- [43]赵方臣,朱茂炎,胡世学. 不同生活方式的物种对快速沉积埋藏事件的反应——来自寒武纪早期澄江生物群中的证据[J]. 古生物学报, 2012, 51(3): 265-280.
Zhao F C, Zhu M Y, Hu S X. Diverse responses of Cambrian organisms to sedimentary events: Evidence from the Chengjiang Lagerstätte of eastern Yunnan [J]. Acta Palaeontologica Sinica, 2012, 51(3): 265-280.
- [44]Lin J P. Taphonomy of naraoiids (arthropoda) from the Middle Cambrian Kaili Biota, Guizhou Province, South China [J]. Palaios, 2006, 21(1): 15-25.
- [45]Daley A C, Drage H B. The fossil record of ecdysis, and trends in the moulting behaviour of trilobites[J]. Arthropod Structure & Development, 2016, 45(2): 71-96.

- deposit under Shan'xi residence [J]. *Journal of Xi'an College of Geology*, 1997, 19(1): 21-27.
- [19] 彭海练, 高峰, 菅坤坤, 等. 内蒙古红石山南辉长岩体锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. *矿产勘查*, 2018, 9(9): 1705-1712.
- Peng H L, Gao F, Jian K K, et al. Zircon U-Pb age and its geological significance of gabbro in the south Hongshi Mountain, Ejinna, Inner Mongolia Autonomous Region[J]. *Mineral Exploration*, 2018, 9(9): 1705-1712.
- [20] 彭海练, 杨克俭, 李宁, 等. 内蒙古红石山南金矿地质特征及找矿方向[J]. *西北地质*, 2011, 44(4): 44-49.
- Peng H L, Yang K J, Li N, et al. Geological characteristics and prospecting direction of gold deposit in southern belt of Hongshishan, Ejinaqi, Inner Mongolia[J]. *Northwestern Geology*, 2011, 44(4): 44-49.
- [21] 高峰, 菅坤坤, 何元方, 等. 内蒙古北山鹿咀子锑矿矿床成因及成矿时代[J]. *矿产勘查*, 2018, 9(9): 1664-1674.
- Gao F, Jian K K, He Y F, et al. Genesis and metallogenic Epoch constraints of Luzuizi antimony deposit of Beishan, Inner Mongolia [J]. *Mineral Exploration*, 2018, 9(9): 1664-1674.
- [22] 祁翼, 王军, 李高歌. 内蒙古北山阿德格色格东锑矿发现及找矿意义[J]. *新疆有色金属*, 2020, 43(4): 10-14.
- Qi Y, Wang J, Li G G. Discovery of the Segedong antimony deposit in Adeg, Beishan, Inner Mongolia, and its prospecting significance [J]. *Non-ferrous metal*, 2020, 43(4): 10-14. (in Chinese)
- [23] 孟郁苗, 胡瑞忠, 高剑峰, 等. 锑的地球化学行为以及锑同位素研究进展[J]. *岩矿测试*, 2016, 35(4): 339-348.
- Meng Y M, Hu R Z, Gao J F, et al. Research progress on Sb geochemistry and Sb isotopes[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2016, 35(4): 339-348.
- [24] 张天羽, 李聪颖, 孙赛军, 等. 锑的地球化学性质与华南锑矿带成因初探[J]. *岩石学报*, 2020, 36(1): 44-54.
- Zhang T Y, Li C Y, Sun S J, et al. Geochemical characteristics of antimony and genesis of antimony deposits in South China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2020, 36(1): 44-54.
- [25] 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 等. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1984: 1-548.
- Liu Y J, Cao L M, Li Z L, et al. *Elemental geochemistry*[M]. Beijing: Science Press, 1984: 1-548. (in Chinese)

(上接第 260 页/Continued from Page 260)

- [46] 朱茂炎. 云南澄江化石群埋藏学[D]. 南京: 中国科学院南京地质古生物研究所, 1992: 1-111.
- Zhu M Y. Taphonomy of the Chengjiang Lagerstätte of Yunnan, China[D]. Nanjing: Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, Chinese Academy of Sciences, 1992: 1-111.
- [47] 张兴亮, 舒德干. 试论动物非矿化组织的保存[J]. *沉积学报*, 2001, 19(1): 13-19.
- Zhang X L, Shu D G. Preservation mechanisms of non-mineralized animal tissues[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2001, 19(1): 13-19.
- [48] Zhu M Y, Babcock L E, Steiner M. Fossilization modes in the Chengjiang Lagerstätte (Cambrian of China): Testing the roles of organic preservation and diagenetic alteration in exceptional preservation[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2005, 220(1/2): 31-46.
- [49] Butterfield N J. Organic preservation of non-mineralizing organisms and the taphonomy of the Burgess shale[J]. *Paleobiology*, 1990, 16(3): 272-286.
- [50] Martin D, Briggs D E G, Parkes R J. Experimental mineralization of invertebrate eggs and the preservation of Neoproterozoic embryos [J]. *Geology*, 2003, 31(1): 39-42.
- [51] 陈蕾, 张洪霞, 李莹, 等. 微生物在地球化学铁循环过程中的作用[J]. *中国科学: 生命科学*, 2016, 46(9): 1069-1078.
- Chen L, Zhang H X, Li Y, et al. The role of microorganisms in the geochemical iron cycle [J]. *Science China Vitae*, 2016, 46(9): 1069-1078.
- [52] 邵丽鸥. 小小洞天——微生物世界[M]. 长春: 吉林美术出版社, 2014: 48-49.
- Shao L O. *Microbial world* [M]. Changchun: Jilin Fine Arts Publishing House, 2014: 48-49. (in Chinese)