紫阳动物群: 华南一个早奥陶世斜坡相化石库

王健^{1,2*}, 华洪^{1*}, 王欣², 辜平阳², 陈锐明², 庄玉军², 何世平², 李银华³

1. 西北大学地质学系早期生命与环境陕西省重点实验室, 大陆动力学国家重点实验室, 西安 710069;

2. 中国地质调查局造山带地质研究中心, 西安 710054;

3. 陕西自然博物馆, 西安 710061

* 联系人, E-mail: wangjian_7610@163.com; huahong@nwu.edu.cn

2019-03-27 收稿, 2019-06-01 修回, 2019-06-03 接受, 2019-07-17 网络版发表

国家自然科学基金(41890844, 41672025, 41621003)、中国地质调查局项目(DD20160014, DD20190078)和陕西省早期生命与环境重点实验室(西北大学)开放课题基金(19LELE04)资助

摘要 陕西省紫阳县洄水镇早奥陶世地层中发现了一个以完整保存的三叶虫化石为主, 兼有笔石、腕足动物、节肢动物、遗迹化石等多个门类化石的特异埋藏生物群——紫阳动物群。经初步研究, 该动物群中三叶虫化石主要有 *Seleneceme*, *Niobe*, *Nileus*, *Ampyx*, *Degamella*, *Borogothus*, *Geragnostus*, *Dividuagnostus* 等; 笔石主要包括 *Tetragraptus* 和 *Paratemnograptus* 等; 腕足动物则主要有 *Tritoechia* 和 *Lingulella* 等。这是一个以三叶虫占优势、处于较深水斜坡相的特殊埋藏动物群, 其中三叶虫兼具有寒武纪 *Ibex* 动物群和奥陶纪 *Whiterock* 动物群的过渡特征。该动物群的发现和研究将为奥陶纪生物多样性大辐射提供重要化石证据, 也为扬子西北缘斜坡相生物多样性辐射研究提供了新的化石材料。

关键词 早奥陶世, 弗洛阶, 紫阳动物群, 三叶虫动物群, 过渡相生物多样性, 扬子区, 陕西紫阳

自 Sepkoski Jr.^[1,2] 提出奥陶纪辐射(Ordovician radiation)假说以来, 十多年来国际相关专家相继对此进行了针对性的研究。尤其以 IGCP 410 和 IGCP 503 为标志, 分别对大辐射的起始时限和环境背景进行了较为深入的研究^[3]。随后的 IGCP 653 项目, 其目的在于继续综合研究寒武纪大爆发到奥陶纪多样性辐射事件(GOBE)之间的古生物事件^[4]。近些年来我国学者也聚焦华南, 对奥陶纪大辐射进行了多门类、多学科的深入研究^[5~18]。目前奥陶纪大辐射研究的关键科学问题主要是: 奥陶纪大辐射与生物门类、生态方式、海水深度、纬度及气候关联; 奥陶纪海洋生物的生态及食物网; 化石记录与真实的生物多样性; 奥陶纪大辐射的起因与控制因素^[11]。迄今为止, 大辐射的真实过程尚未得到全面的揭示, 尚需进行更多的区域性的实例研究。华

南具有独特的优势^[3]。

三叶虫的辐射是奥陶纪生物大辐射重要内容之一。Adrain 等人^[19]提出了 *Ibex* 三叶虫动物群与 *Whiterock* 三叶虫动物群之间相互演替的过程。周志毅等人^[6,15,20]对华南陆块三叶虫多样性变化和辐射模式进行了深入研究, 重点研究了不同沉积环境的15个典型奥陶纪早期地层剖面多个笔石带时段三叶虫动物群, 精确提出华南奥陶纪三叶虫辐射的始发时间和环境。

2017年, 研究人员在完成《陕西1:5斑鸠关幅区域地质调查》项目的填图过程中发现了紫阳动物群, 并对其进行了长期的化石采集和初步研究工作。紫阳动物群位于陕西省南部紫阳县洄水镇端垭村(界岭镇东南方向, 官元镇以西4 km处)。当地交通相对较差, 但乡级路可以到达化石点。

引用格式: 王健, 华洪, 王欣, 等. 紫阳动物群: 华南一个早奥陶世斜坡相化石库. 科学通报, 2019, 64: 2342–2350

Wang J, Hua H, Wang X, et al. Ziyang Fauna: A slope facies fossil lagerstätte of Early Ordovician in South China (in Chinese). Chin Sci Bull, 2019, 64: 2342–2350, doi: 10.1360/N972019-00262

化石点位于秦岭褶皱系, 高桥断裂西南, 隶属华南地层大区-南秦岭-大别山地层区-高滩兵房街地层小区, 化石产自权河口组下段, 岩性主要为中厚层状泥质灰岩夹钙质泥岩。主要化石产自剖面的第六层(图1)。

紫阳动物群其生物组成特点鲜明, 多样性丰富, 是研究奥陶纪三叶虫多样性演化不可多得的化石材料, 它提供了Ibex三叶虫动物群与Whiterock 三叶虫动物群相互演替早期化石证据。

据詹仁斌等人^[3]最新研究表明, 发生在上扬子区的华南奥陶纪腕足动物辐射演化的第一次高潮也表现为幕式特征。辐射(多样性峰值)首先起始于位于江南斜坡上部的黔东南三都地区, 时间是早奥陶世弗洛最早期的*Tetraraptus approximatus*笔石带。但是规模较小, 表现为一批正形贝类、舌形贝类、五房贝类分子在华南的最早出现。个体普遍很小, 反映是一套较深水的底栖动物群。

扬子地台在早奥陶世初期以温暖浅海地台-陆棚相沉积为特征, 处于中-低纬度地区^[21]。紫阳动物群地层区划属于华南地层大区, 南秦岭-大别山地层区, 高滩兵房街地层小区, 属于典型的斜坡相, 这为研究过渡带和斜坡相动物群提供了化石新材料。为研究该区域乃至华南板块奥陶纪生物多样性辐射提供了化石新证据,

研究意义重大。

1 动物群组成

该动物群主要是以三叶虫为主, 同时含有笔石、腕足动物、遗迹化石等。三叶虫化石主要有*Seleneceme*, *Niobe*, *Nileus*, *Ampyx*, *Degamella*, *Borogothus*, *Geragnostus*, *Dividuagnostus*等属; 笔石有*Tetraraptus*和*Paratemnograptus*等属; 腕足动物常见的有*Tritoechia*和*Lingulella*等。

1.1 三叶虫

Seleneceme Clark, 1924头部具有头刺和颊刺(图2(a), (b), (l))。头鞍外形略呈半圆形, 具有一对接近平行的纵沟, 从颈环处一直延伸到头鞍上部; 无眼; 胸节具1~18节, 在第3~4节处壳体最宽; 中轴较窄; 肋沟深。尾部相对较窄小, 具有17~18或者更少的体节, 一般标本较难区别出胸节与尾节。该属的标本数量约占到已采集到三叶虫标本的2/3, 属于该三叶虫动物群的优势种。邓思澄等人^[22]在紫阳双河一带曾经发现过, 并命名为圆头虫属(*Caputrotundum* Deng et Zhao, 1986)。根据本次采集到的多个完整标本进行研究, 发现与美国得克萨斯州标本相同^[23]。根据命名优先原则, 之前紫阳双河

图1 (网络版彩色)紫阳动物群剖面图
Figure 1 (Color online) Ziyang Fauna column profile

图2 紫阳动物群中主要的三叶虫化石。(a), (b), (l) *Seleneceme* sp.; (c), (d) *Niobe* sp.; (e) *Borogothus* sp.; (f) *Degamella* sp.; (k) *Geragnostus* sp.; (i) *Ampyx* sp.; (g) *Nileus* sp.; (j) *Dividuagnostus* sp.; (h) Orometopidae Hupe, 1955

Figure 2 Representative trilobites of the Ziyang Fauna. (a), (b), (l) *Seleneceme* sp.; (c), (d) *Niobe* sp.; (e) *Borogothus* sp.; (f) *Degamella* sp.; (k) *Geragnostus* sp.; (i) *Ampyx* sp.; (g) *Nileus* sp.; (j) *Dividuagnostus* sp.; (h) Orometopidae Hupe, 1955

镇与本次泗水镇两处标本都应该归入*Seleneceme* Clark, 1924^[24]。*Seleneceme*为地槽型三叶虫典型代表,分布在加拿大纽芬兰、魁北克、美国得克萨斯及瑞典等少数地槽活动带的较深水区。

Niobe Angelin, 1851^[25-27] 头部宽大于长,中等突出,后缘脸颊略小于头宽(图2(c), (d))。头鞍最窄处位于两眼之间,头鞍有3对横沟(不深);眼中等大小;颈环窄、浅、直。胸节8个,中轴宽度约为肋部的1/2,肋沟较深,对角线斜向下伸至肋节边缘。尾部亚半圆形,中等凸出,6~7个中轴环,后边缘较宽。中轴约为1/3尾宽。该属为动物群次优势属种。

Borogothus Tjernvik, 1956, 建立刚开始作为*Promegalaspides* Westergard, 1939的一个亚属,后来Eliza-

beth^[27] 1997年出版Treatise将其提升属(图2(e))。其特征是头部和尾部具有窄而凸的边缘,颊刺短;头鞍长可到达前边缘或者接近前边缘,具有短而微弱的头鞍沟和颈沟;面线具有长的后枝和后边缘沟。胸节8个,胸轴突出,肋节远端尖,在最后一个胸节具有长的缓缓向后延伸的肋刺。尾部呈半椭圆形,具有窄而凸的边缘,尾轴突出且长。在该动物群中属于一般常见种。

Nileus Dalman, 1827^[28,29] 头与尾大小几乎相等^[28]。头鞍极宽,无头鞍沟;眼接近头鞍;疑似有短的颊刺(图2(g))。胸部8节,肋沟明显。尾部呈半圆,光滑;尾节不明显。在该动物群中属于一般常见。

Ampyx Dalman, 1827体型小^[28,29](图2(i))。头部及尾部均呈次三角形。头鞍向前扩大,具有向前弯的长刺;

颈环凸;无眼;面线沿颊部的外部弯曲,在头部前缘汇合;具颊刺。胸节6个;肋沟向外变深。尾部中轴分多节。在该动物群中属于常见种。

Degamella Marck, 1961头部略呈半圆形;未见眼叶;头鞍宽阔且较凸,明显高于胸部和尾部;头鞍沟不明显^[30](图2(f))。胸部相对较平,中轴较宽,其宽度可到达胸部的1/2,具有6个胸节,肋沟明显;胸轴与尾轴构成了一个大大的“V”字形。尾部呈亚三角形,宽是长的2倍;尾部中轴分节不明显;内边缘沟深,边缘相对较窄。在该动物群中一般常见属种。

Dividuagnostus Koroleva, 1982个体相对较小,头部和尾部呈亚方形^[31](图2(j))。头鞍呈蕈形,头鞍长占头长的3/4,头鞍近中部收缩,被一个颠倒的宽阔的“V”形横沟分头鞍前后两叶;前叶略短于后叶,后叶凸起高于前叶;头部无面线和眼,有一对三角形的基叶。有2胸节。尾部向后略增宽。中轴凸,为尾部的1/2以上,前部稍收缩,向后迅速扩大,使后叶呈半圆形;轴节呈卵圆形,分为3个轴节;中瘤明显;有一对较短小的边缘刺,位于尾部的侧下方。在动物群中属于一般常见属种。

Geragnostus Howell, 1935属的特征是个体较大、背壳略作长方形^[31~33](图2(k))。头部呈圆形(亚正方形);无面线和眼,头鞍两节,头鞍较凸,略作锥形;头部边缘较宽,边缘沟明显;头鞍占头全长的3/5,颊部较凸;中瘤不明显;头鞍前叶长约为头鞍后叶长的1/2,宽度小于头鞍沟后叶;头鞍沟呈平直;头鞍两端圆润。胸部具两个胸节。尾部呈圆形(亚正方形),具有较短的边缘刺;轴节呈亚长方形,长占尾全长的3/5。尾轴分三节;中瘤明显;背沟深;边缘沟明显。在动物群中属于常见属种。

该动物群中发现了一个三叶虫新属种,根据其头鞍和眼特点将其归入Orometopidea Hupe, 1955(图2(h)),其特点是头部呈亚半圆形,具有两个颊刺;整个面颊及头鞍具有密集的瘤状凸起;头鞍宽阔呈卵圆形;眼小,位于头鞍上半部分水平的位置;头鞍前区宽阔,前缘相对平直。具有6~7对胸节,肋沟短而深;肋间沟特别明显;具有较细肋刺;其中最后一对肋刺较长,向斜下方伸出。尾部未保存。动物群中一般常见。

1.2 笔石

动物群中笔石也较为常见。主要是*Tetragraptus approximatus* Nicholson和*Paratemnograptus* sp.等,其中*Tetragraptus approximatus* Nicholson对动物群的时代有指示意义(图3(a), (b), (e), (f))。

Tetragraptus Salter, 1863特征是笔石体呈两级连续均分,仅具4个末枝,两个一级枝末部组成直的横索,它和胎管相互垂直,呈T形,末枝平伸到上斜,接近攀合。胞管基本为均分笔石式。其中*Tetragraptus approximatus* Nicholson^[34~36]个体大(图3(e), (f)),两个一级枝形成的横索直,长大于3 mm,宽0.5~0.8 mm。自横索两端各生出1对末级枝,它们迅速分叉并与横索呈垂直方向伸展,4个末枝呈“工”字形,始部宽为0.8 mm,末端宽可达1.5~2.0 mm。胎管不清楚,仅有横索中央呈现印痕。胞管为直管状,长3 mm,宽约0.6 mm,倾角30°,相互掩盖2/3,在10 mm内有8~10个胞管。该种与其他四笔石类的最大区别是“4个末枝呈‘工’字形”。这种是全球下奥陶统弗洛阶底界的定义笔石种,它在该动物群中常见,指示该动物群时代为弗洛阶早期。

1.3 腕足动物

该动物群腕足类相对较少,种类相对单一,常见的类群主要是*Tritoechia* sp.和*Lingulella* sp.,个体相对较小(图3(c), (d))。但在个别层位具有成层分布,数量丰富。

1.4 其他类别

该动物群中还发现了一些其他类群(图3(g), (h), (i))。除了新的三叶虫属种还有未名的节肢动物及遗迹化石等。

2 讨论

紫阳动物群中发现了大量笔石带化石-*Tetragraptus approximatus* Nicholson,该笔石带是弗洛阶第一个笔石带。同时还发现了笔石*Tetragraptus bigsbyi*, *Tetragraptus quadribachiatus*和*Paratemnograptus* sp.等。可以推断出该动物群属于弗洛阶。

三叶虫是寒武纪演化动物群的主体门类,奥陶纪也有不少存在。Adrain等人^[37]对全球奥陶纪三叶虫作了进一步的归类,将其划分成两个主要动物群:一类为Ibex动物群(或称寒武纪演化动物群),另一类为Whiterock动物群(或称古生代演化动物群)。Ibex动物群起源于早寒武世,在早奥陶世显示高度分异,然后迅速衰落,并在奥陶纪末期群体灭绝事件中全部消亡,Adrain等人^[38]将Ibex动物群分成Ibex I和Ibex II两个动物群,Ibex I动物群仅在特马豆克(Tremadocian)早期繁衍发达,而Ibex II动物群则在经历了早奥陶纪晚期的一次辐射后才走向衰落。Whiterock动物群发生于早奥陶世,

图3 紫阳动物群中部分笔石、腕足动物和其他门类化石。(a) *Paratemnograptus* sp.; (b) *Tetragraptus* sp.; (c) *Tritoechia* sp.; (d) *Lingulella* sp.; (e), (f) *Tetragraptus approximatus* Nicholson; (g), (h), (i) Phyllocarida. 比例尺=1 mm

Figure 3 Representative graptolites, Brachiopods and Arthropods of the Ziyang Fauna. (a) *Paratemnograptus* sp.; (b) *Tetragraptus* sp.; (c) *Tritoechia* sp.; (d) *Lingulella* sp.; (e), (f) *Tetragraptus approximatus* Nicholson; (g), (h), (i) Phyllocarida. Scale bar =1 mm

在中奥陶世辐射并迅速繁衍,进而度过了奥陶纪末期群体灭绝事件难关,演化为志留纪动物群,其中部分还在泥盆纪、石炭纪或二叠纪得到发展和延续^[15]。

紫阳动物群的主要属种为 *Seleneceme* sp., *Niobe* sp., *Ampyx* sp., *Nileus* sp., *Dividuagnostus* sp., *Geragnostus* sp., *Degamella* sp., *Borogothus* sp., 等。隶属于7个科,与周志毅等人^[6]描述的华南陆块奥陶纪 Ibex I, Ibex II 和 Whiterock 动物群三叶虫科的年代地层分布图对比,其中属于 Whiterock 动物群有2科: Cyclopygidae (*Degamella* sp. 和 *Niobe* sp.), Raphiophoridae (*Ampyx* sp.). 属于 Ibex II 动物群有2科: Asaphidae (*Borogothus* sp.), Nileidae (*Nileus* sp.); 属于 Ibex I 动物群有3科: Agnostoidea (*Dividuagnostus* sp.), Geragnostoidea (*Geragnostus* sp.), Alsataspidae (*Seleneceme* sp.). 根据发现三叶虫新属种(图2(i))特点(椭圆形头鞍、眼小、瘤多、刺多)分析,应该属于 Ibex I 动物群。从动物群的科属组成看, Ibex 动物群略高于 Whiterock 动物群,前者占了主要地位。从数量

上看, Alsataspidae 和 Asaphidae 占到整个动物群的75%以上, Ibex 动物群占主导地位,其中 Ibex I 动物群动物处于繁盛的阶段。初步判断紫阳动物群处在 Ibex 动物群向 Whiterock 动物群过渡的早期阶段。

紫阳动物群与世界上其他地方发现的早奥陶世三叶虫动物群相比较,它与北美和北欧的动物群具有更多相同的属种。对紫阳动物群研究将有助于了解该时期动物群的演化和扩散规律。例如, Whittington^[39]描述的动物群位于加拿大纽芬兰西部,产自 Table Head 组,属于早奥陶世,与紫阳动物群相同的属有: *Niobe*, *Ampyx* 和 *Geragnostus*。Fortey^[29]描述的动物群位于挪威的斯匹次卑尔根,新弗里斯兰北部,产自 Valhalla 组,属于早奥陶世(from Arenig to early Llandvirn),与紫阳动物群相同的属有 *Niobe*, *Ampyx*。

早、中奥陶世正是海洋无脊椎动物出现大分异、发生大辐射的重要时期,是寒武纪演化动物群逐渐被古生代演化动物群取代以及古生代动物群早期演化的

关键阶段^[40]。高滩兵房街地层小区奥陶系至志留系相变复杂,为生物大辐射提供了多样性的生态环境。紫阳动物群组成中含有少量球接子和原尾虫类(*Dividuagnostus* sp., *Geragnostus* sp.和*Degamella* sp.),显示水体应该深于陆棚区,但又浅于寒武纪球接子代表的水深,具有典型的斜坡相动物群特征。从整个三叶虫动物群看,化石保存完整,尤其一些颊刺、体节细节保存完好,变形标本很少,而且还有一些遗迹化石类型。主要产出于浅灰色的钙质泥岩和浅灰色泥灰岩,埋藏条件特殊。

中国属于东泛冈瓦纳的若干地体,奥陶纪三叶虫仅有零星的报道,研究程度均较低^[41],本次发现的*Sele-neceme* sp.标本在动物群中大量的发现,特征明显。与

北美产出的该属化石可以进行对比,为地层对比提供了重要的化石材料。

3 结论

紫阳动物群属于早奥陶世典型的斜坡相三叶虫动物群,是早奥陶海洋性生物高度分异、分区性逐渐加强的又一例证,代表了一次重要的奥陶纪生物多样性事件(GOBE),也是探讨奥陶系多样性第一次峰值之前更多关键细节重要的动物群。它丰富了奥陶纪生物大辐射早期动物群演化证据,是理解Ibex三叶虫动物群向Whiterock 三叶虫动物群演替的重要动物群之一。

致谢 感谢自然资源部陕西紫阳野外科学观测基地、IGCP 653项目(The Onset of the Great Ordovician Biodiversification Event)和IGCP 591项目(The Early to Middle Paleozoic Revolution)对工作的支持。感谢中国地质调查局西安地质调查中心周志强研究员和论文评审专家的建议和帮助。感谢西北大学张志飞教授提供部分化石照相帮助。感谢中国地质调查局西安地质调查中心工程师李林、郭亚鹏和吕百杰同志参与化石采集工作。

参考文献

- 1 Sepkoski Jr J J. A kinetic model of Phanerozoic taxonomic diversity II. Early Phanerozoic families and multiple equilibria. *Paleobiology*, 1979, 5: 222–251
- 2 Sepkoski Jr J J. A factor analytic description of the Phanerozoic marine fossil record. *Paleobiology*, 1981, 7: 36–53
- 3 Zhan R B, Jin J S, Liu J B. Investigation on the great Ordovician biodiversification event (GOBE): Review and prospect. *Chin Sci Bull (Chin Ver)*, 2013, 58: 3357–3371 [詹仁斌, 靳吉锁, 刘建波. 奥陶纪生物大辐射研究: 回顾与展望. 科学通报, 2013, 58: 3357–3371]
- 4 Zhang Y D, Zhan R B, Fan J X, et al. Filling the Gap between the Cambrian Explosion and the Great Ordovician Biodiversification Event (GOBE). Hangzhou: Zhejiang University Press, 2017. 10–359
- 5 Rong J Y, Zhan R B. Late Ordovician brachiopod mass extinction of South China. In: Rong J Y, Fang Z J, Zhou Z Y, et al., eds. Mass Extinction and Recovery—Evidences from the Palaeozoic and Triassic of South China (in Chinese). Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2004. 71–96 [戎嘉余, 詹仁斌. 华南奥陶纪末腕足动物大灭绝. 见: 戎嘉余, 方宗杰, 周志毅, 等, 编. 生物大灭绝与复苏——来自华南古生代至三叠纪的证据. 合肥: 中国科技大学出版社, 2004. 71–96]
- 6 Zhou Z Y, Yuan W W, Zhou Z Q. Ordovician Trilobites radiation South China (in Chinese). In: Rong J Y, Fang Z J, Zhou Z H, et al., eds. Originations, Radiations and Biodiversity Changes—Evidences from the Chinese Fossil Record. Beijing: Science Press, 2006. 259–283 [周志毅, 袁文伟, 周志强. 华南陆块奥陶纪三叶虫的辐射. 见: 戎嘉余, 方宗杰, 周志和, 等, 编. 生物的起源、辐射与多样性演变——华夏化石记录的启示. 北京: 科学出版社, 2006. 259–283]
- 7 Zhan R B, Rong J Y, Cheng J H, et al. Early-middle Ordovician brachiopod diversity preliminary study in South China (in Chinese). *Sci China Ser D-Earth Sci*, 2004, 34: 896–907 [詹仁斌, 戎嘉余, 程金辉, 等. 华南早、中奥陶世腕足动物多样性初探. 中国科学D辑: 地球科学, 2004, 34: 896–911]
- 8 Xu C, Zhang Y D, Fan J X. Ordovician graptolite evolutionary radiation: A review. *Geol J*, 2006, 41: 289–301
- 9 Zhang Y D, Chen X. Ordovician graptolite diversity evolution and environmental background (in Chinese). *Sci China Ser D-Earth Sci*, 2008, 38: 10–21 [张元动, 陈旭. 奥陶纪笔石动物的多样性演变与环境背景. 中国科学D辑: 地球科学, 2008, 38: 10–21]
- 10 Zhang Y D, Chen X. Early-Middle Ordovician graptolite evolutionary radiation (in Chinese). In: Rong J Y, Fang Z J, Zhou Z H, et al., eds. Originations, Radiations and Biodiversity Changes—Evidences from the Chinese Fossil Record. Beijing: Science Press, 2006. 285–316 [张元动, 陈旭. 华南早-中奥陶世笔石动物的辐射演化. 见: 戎嘉余, 方宗杰, 周志和, 等, 编. 生物的起源、辐射与多样性演变——华夏化石记录的启示. 北京: 科学出版社, 2006. 285–316]
- 11 Zhang Y D, Zhan R B, Fan J X, et al. Ordovician bio-radiation the key scientific issues (in Chinese). *Sci China Ser D-Earth Sci*, 2009, 39: 129–143 [张元动, 詹仁斌, 樊隽轩, 等. 奥陶纪生物大辐射研究的关键科学问题. 中国科学D辑: 地球科学, 2009, 39: 129–143]

- 12 Zhang Y D, Chen X, Goldman D, et al. Early-Middle Ordovician graptolite diversity and geographical distribution in the main environment in South China (in Chinese). *Sci China Ser D-Earth Sci*, 2010, 40: 1164–1180 [张元动, 陈旭, Goldman D, 等. 华南早-中奥陶世主要环境下笔石动物的多样性与地理分布. *中国科学: 地球科学*, 2010, 40: 1164–1180]
- 13 Wang X F, Chen X H. Ordovician chitinozoans diversity events in China. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 2003, 33: 129–143 [汪啸风, 陈孝红. 中国奥陶纪几丁虫的多样性事件. *中国科学D辑: 地球科学*, 2003, 33: 210–215]
- 14 Liang Y, Tang P. Early-Middle Ordovician chitinozoans diversity evolution in the Upper Yangtze of South China (in Chinese). *Sci China Earth Sci*, 2016, 46: 809–823 [梁艳, 唐鹏. 华南上扬子区早奥陶世-晚奥陶世初期几丁虫多样性演变. *中国科学: 地球科学*, 2016, 46: 809–823]
- 15 Zhou Z Y. Trilobites: Regional patterns in South China. In: Webby B D, Droser M L, Paris F, et al., eds. *The Great Ordovician Biodiversification Event*. New York: Columbia University Press, 2004. 247–249
- 16 Wu R, Stouge S, Wang Z. Conodontophorid biodiversification during the Ordovician in South China. *Lethaia*, 2012, 45: 432–442
- 17 Wu R C, Stouge S, Wang Z H. Lower and Middle Ordovician conodont diversity of the Yichang Region, Hubei Province, Central China. *Bull Geosci*, 2010, 85: 631–644
- 18 Yan K, Servais T, Li J, et al. Biodiversity patterns of Early-Middle Ordovician marine microphytoplankton in South China. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2011, 299: 318–334
- 19 Adrain J M, Fortey R A, Westrop S R. Post-Cambrian trilobite diversity and evolutionary faunas. *Science*, 1998, 280: 1922–1925
- 20 Zhou Z Q, Zhou Z Y, Yuan W M. Middle Caradoc Trilobite Biofacies of the Micangshan Area, northwestern margin of the Yangtze Block (in Chinese). *J Stratigr*, 2000, 24: 264–274 [周志强, 周志毅, 袁文伟. 上扬子区西北缘米仓山地区卡拉道克中期的三叶虫相. *地层学杂志*, 2000, 24: 264–274]
- 21 Wang X F, Chen X H. Lower ordovician chitinozoa biostratigraphy and paleogeography of Upper Yangtze region (in Chinese). *Acta Palaeontol Sin*, 1994, 33: 720–735 [汪啸风, 陈孝红. 上扬子地区早奥陶世几丁虫生物地层与生物古地理. *古生物学报*, 1994, 33: 720–735]
- 22 Deng S C, Zhao L C, Wu Z Z. lower Ordovician trilobites of Alsataspidae from Ziyang, Southern Shaanxi (in Chinese). *Acta Palaeontol Sin*, 1986, 25: 93–96 [邓思澄, 赵联承, 郭崇章. 陕西紫阳早奥陶世Alsataspidae科三叶虫新属. *古生物学报*, 1986, 25: 93–96]
- 23 Turner F E. *Alsataspis bakeri*, a new lower Ordovician trilobite. *J Paleontol*, 1940, 14: 516–518
- 24 Clark T H. Beekmantown Series at Levis, Quebec. *Bulletin*, 1924, 41: 89–91
- 25 Lu Y H, Zhang W T, Zhu Z L, et al. Trilobites of China (Volume I and II) (in Chinese). Beijing: Science Press, 1965. 17–60 [卢衍豪, 张文堂, 朱兆岭, 等. 中国的三叶虫(上、下册). 北京: 科学出版社, 1965. 17–60]
- 26 Lu Y H. Ordovician Trilobite faunas of Central and Southwest China (in Chinese). *Palaeontol Sin*, 1975, (11): 90–248 [卢衍豪. 华中及西南奥陶纪三叶虫动物群. *中国古生物志*, 1975, (11): 90–248]
- 27 Elizabeth B, Jane K, Jill H, et al. *Treatise on Invertebrate Paleontology, Part O, Trilobite, Revised*. Lawrence: The University of Kansas and the Geological Society of America, Inc., 1997. 373–387
- 28 Whittington H B. Trilobites of the Ordovician Table Head Formation, Western Newfoundland. *Bull Museum Compar Zool*, 1965, 132: 352–434
- 29 Fortey R A. The Ordovician Trilobites of Spitsbergen II. Asaphidae, Nileidae, Raphiophoridae and Telephinidae of the Valhallfonna Formation. *Norsk Polarinstitutt Skrifter Nr*, 1975, 162: 22–118
- 30 Zhou Z Q, Zhou Z Y, Xiang L W. Trilobite fauna from the Ordovician Pagoda Formation of Central and Western Yangtze Block, China (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 2016. 185–198 [周志强, 周志毅, 项礼文. 中国扬子陆块中、西部奥陶系宝塔组三叶虫动物群. 北京: 地质出版社, 2016. 185–198]
- 31 Nanjing Institute of Geology and Mineral Resources, Ministry of Geology and Mineral Resources. *Paleontology Atlas of East China (1) Early Paleozoic Volume* (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1983. 29–42 [地质矿产部南京地质矿产研究所. 华东地区古生物图册(一)早古生代分册. 北京: 地质出版社, 1983. 29–42]
- 32 Geological Bureau of Hunan Province. *Paleontology Atlas of Hunan*. Ministry of Geology and Mineral Resources, Geological Report, II, Stratum and Paleontology, No. 1 (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1982. 291–298 [湖南省地质局. 湖南古生物图册. 中华人民共和国地质矿产部地质专报, 二 地层古生物, 第1号. 北京: 地质出版社, 1982. 291–298]
- 33 Zhou Z Y. Review of the Ordovician Agnostus in China (in Chinese). *Acta Palaeontol Sin*, 1987, 26: 639–661 [周志毅. 中国奥陶纪球接子类评述. *古生物学报*, 1987, 26: 639–661]
- 34 Mu E Z, Li J J, Ge M Y, et al. The Graptolite of China (in Chinese). Beijing: Science Press, 2002. 174–196 [穆恩之, 李积金, 葛梅钰, 等. 中国笔石. 北京: 科学出版社, 2002. 174–196]
- 35 Li M, Feng H Z, Ji X X, et al. Late Tremadoc and Early Floian Graptolites from central Hunan, China. *Acta Geol Sin Engl Ed*, 2010, 84: 1343–1364
- 36 Li L X, Feng H Z, Li M, et al. Biozo Nation of Floian (Lower Ordovician) graptolites from Yiyang, Hunan (in Chinese). *J Stratigr*, 33: 123–136 [李丽霞, 冯洪真, 李明, 等. 湖南益阳下奥陶统弗洛阶的笔石带. *地层学杂志*, 2009, 33: 123–136]
- 37 Adrain J M, Fortey R A, Westrop S R. Post-Cambrian trilobite diversity and evolutionary faunas. *Science*, 1998, 280: 1922–1925

- 38 Adrain J M, Westrop S R, Fortey R A. Trilobites: Global patterns. In: Webby B D, Droser M L, Paris F, et al., eds. The Great Ordovician Biodiversification Event. New York: Columbia University Press, 2004. 231–239
- 39 Whittington H B. Trilobites of the Ordovician table head formation, western Newfoundland. *Bull Mus Comp Zool Harv*, 1965, 132: 275–442
- 40 Zhan R B, Zhang Y D, Yuan W W. A new concept in the life process of the Earth-Ordovician biological radiation (in Chinese). *Progr Nat Sci*, 2007, 17: 1006–1013 [詹仁斌, 张元动, 袁文伟. 地球生命过程中的一个新概念——奥陶纪生物大辐射. *自然科学进展*, 2007, 17: 1006–1013]
- 41 Zhou Z Y, Zhen Y Y, Zhou Z Q, et al. Ordovician trilobite biogeography of China (in Chinese). *J Palaeogeogr*, 2009, 11: 69–78 [周志毅, 甄勇毅, 周志强, 等. 中国奥陶纪三叶虫生物地理. *古地理学报*, 2009, 11: 69–78]

Summary for “紫阳动物群: 华南一个早奥陶世斜坡相化石库”

Ziyang Fauna: A slope facies fossil lagerstätte of Early Ordovician in South China

Jian Wang^{1,2*}, Hong Hua^{1*}, Xin Wang², Pingyang Gu², Ruiming Chen², Yujun Zhuang², Shiping He² & Yinhua Li³

¹ Shaanxi Key Laboratory of Early Life and Environments, State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China;

² Centre for Orogenic Belt Geology, China Geological Survey, Xi'an 710054, China

* Corresponding authors, E-mail: wangjian_7610@163.com; huahong@nwu.edu.cn

“Great Ordovician Biodiversification Event” (GOBE) is one of the major biological innovation in Phanerozoic. Trilobite is one of the major taxa in Cambrian and Ordovician. In 1998, Adrain divided the global Ordovician trilobites into two groups, i.e. Ibex Fauna and Whiterock Fauna, and subsequently, the former was subdivided into Ibex I and Ibex II faunas in 2004. The Ordovician radiation of the trilobites was associated with temporal and spatial expansion of the Whiterock Fauna and contraction of the Ibex Fauna. Ibex Fauna is also known as the Cambrian Evolutionary Fauna, which originated at Cambrian, had high diversity and differentiation soon, decline rapidly in Early Ordovician, and went extinct in Late Ordovician. The Ibex I Fauna raised and flourished only in the Early Tremadocian, while Ibex II fauna declined after the Early Ordovician radiation. Whiterock Fauna is also called the Paleozoic Evolutionary Fauna, which appears in Early Ordovician and shows rapidly radiation and high diversification in Middle Ordovician, and then survived the Ordovician Mass Extinction, evolved into Silurian Fauna, some of them might develop and extend to Devonian, Carboniferous and Permian.

In 2006, Zhiyi Zhou dubbed the Ordovician trilobite radiation in the South China Block, suggested that the time of onset and the environmental pattern of the Ordovician trilobite radiation may have varied geographically, and the major radiation was likely a long-sustained event that extended through about 25 Ma of the late Early-early Late Ordovician interval, coinciding with the worldwide expansion and domination of the Whiterock Fauna. So the taxa of Zhou's Ibex Fauna were proportionally dominant over those of Whiterock Fauna.

Ziyang fauna, an Early Ordovician fossil lagerstätte is discovered and reported from Ziyang County, Shaanxi Province. It is Floian (the late Early Ordovician) in age based on the occurrences of *Tetragraptus approximatus* Nicholson. The fossiliferous rocks are blackish-grey mud limestone and calcareous mudstone of possible slope facies in the Yangtze platform. The fauna is dominated by trilobites, accompanied with graptolites, brachiopods, arthropods and some trace fossils. With relatively high taxonomic diversity, the trilobites in this fauna mainly consist of *Seleneceme*, *Niobe*, *Nileus*, *Ampyx*, *Degamella*, *Borogothus*, *Geragnostus* and *Dividuagnostus*, etc assigned to seven families, of them, Asaphidae, Nileidae, Agnostoidea, Peragnostoidea and Alsataspidae belong to the Ibex Fauna, and Cyclopygidae and Raphiophoridae belong to Whiterock Fauna. Asaphidae and Nileidae are main components of Ibex I Fauna, and Agnostoidea, Peragnostoidea and Alsataspidae are components of Ibex II Fauna respectively. Quantitatively, Alsataspidae and Asaphidae account for more than 75% of the total fauna, Ibex I Fauna were predominant over Ibex II Fauna. Other associated fossils include graptolites of *Tetragraptus approximatus*, *Tetragraptus bigsbyi*, *Tetragraptus quadribrachiatus*, *Tetragraptus* sp., and *Paratemnograptus* sp., and brachiopods of *Tritoechia*, *Lingulella*, etc. The distinctive composition of Ziyang Fauna holds promise for providing insights into the evolution between Ibex and Whiterock faunas in South China.

Early Ordovician, Floian, Ziyang Fauna, trilobite fauna, slope facies biodiversity, Yangtze platform, Ziyang County, Shaanxi Province

doi: [10.1360/N972019-00262](https://doi.org/10.1360/N972019-00262)