

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.284>



湖北宜昌滚子坳剖面寒武系幸运阶顶底界线

潘时妹^{1,2,3}, 冯庆来^{1,3*}

1. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074
2. 广东省佛山地质局, 广东佛山 528000
3. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

摘要: 对湖北宜昌地区滚子坳剖面寒武系组芬兰统幸运阶顶底界线的位置进行较为细致的研究. 通过切片法及酸蚀法对 61 个样品进行系统处理, 获得了大量的小壳化石、疑源类化石及其他分类位置未定化石. 系统鉴定和描述了 23 属 44 种. 根据具刺疑源类化石 *Asteridium* 和小壳化石 *Protohertzina* sp. 的首现位置以及无机碳同位素 BACE 曲线最大负值位置可以推断出埃迪卡拉系—寒武系界线应该位于第 1 层底部往上约 10.5 m 处; 根据 *Zhijinites longistriatus* 的首现位置以及无机碳同位素 ZHUCE 曲线最大值位置可以推断出幸运阶与第二阶的界线位置大致为第 4 层底部往上约 2.78 m. 此外, 还将峡东地区的小壳化石 II 带和 III 带重新定义, 即将 *Purella antiqua* 组合 (Zone II) 修订为 *Purella antiqua-Siphogonuchites triangularis* 组合; 将 *Aldanella yanjiahensis* 组合 (Zone III) 修订为 *Aldanella yanjiahensis-Zhijinites longistriatus* 组合.

关键词: 寒武系; 幸运阶第二阶; 小壳化石带; AHC; 化石组合; 滚子坳剖面.

中图分类号: P53

文章编号: 1000-2383(2021)01-136-12

收稿日期: 2020-11-27

Lower and Upper Boundaries of Fortunian from Yichang, Hubei, China

Pan Shimei^{1,2,3}, Feng Qinglai^{1,3*}

1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
2. Foshan Geological Bureau of Guangdong Province, Foshan 528000, China
3. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: This paper is focused on the base of the Fortunian and Cambrian Stage 2 in the Gunziao section of Yichang, Hubei province. Thousands of SSFs has been found by dealing with 61 samples, 23 genera and 44 species to be identified and described. Additionally, some conclusions are drawn as follows. According to the first appearance datum of *Asteridium* and *Protohertzina* sp., and the large negative carbon isotope anomaly (BACE), the base of the Fortunian should be located at 10.5 meters above the Beds 1. According to the first appearance datum of *Zhijinites longistriatus* and the large positive carbon isotope anomaly (ZHUCE), it can be inferred that the base of Stage 2 is approximately 2.78 meters above the Beds 4. *Purella antiqua* Assemblage Zone (Zone II) and *Aldanella yanjiahensis* Assemblage Zone (Zone III) in Three Gorge area are redefined based on the new data, which is to be *Purella antiqua-Siphogonuchites triangularis* Assemblage Zone and *Aldanella yanjiahensis-Zhijinites longistriatus* Assemblage Zone.

Key words: Cambrian; Fortunian Stage 2; small shelly fossils; AHC assemblage zone; Gunziao section.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目“放射虫的起源、早期演化及其环境背景研究”(No.41430101).

作者简介: 潘时妹(1993—), 女, 硕士, 助理工程师, 主要从事湖北寒武系早期地层的研究. ORCID: 0000-0001-8183-3116. E-mail: shimei-pan@qq.com

***通讯作者:** 冯庆来, ORCID: 0000-0003-3036-9186. E-mail: qinglaifeng@cug.edu.cn

引用格式: 潘时妹, 冯庆来, 2021. 湖北宜昌滚子坳剖面寒武系幸运阶顶底界线. 地球科学, 46(1):136-147.

0 引言

寒武纪早期是后生生物的起源与大爆发的重要时期,处于地球生命由隐生宙的软躯体生物转变为有硬骨骼的生物,并迅速发展、分异和辐射的重要阶段,而这一重要的地质历史时期,由于缺乏可用于广发地层划分对比的生物标志化石,长期缺乏正式的地质年代或年代地层划分(Babcock *et al.*, 2005; 彭善池, 2006; Zhu *et al.*, 2006; Zhu *et al.*, 2007; Babcock and Ahlberg, 2014; 朱茂炎等, 2019). 寒武纪自命名以来常被称作为“三叶虫时代”,但近半个世纪以来,寒武纪研究得到了很好的发展,随着学者们熟知的布尔吉斯页岩动物群、澄江动物群、小壳化石群以及最近发表的清江生物群(Da *et al.*, 2009; Fu *et al.*, 2019)等一系列的寒武纪化石的发现,寒武纪将不再简称“三叶虫时代”. 由于呈浮游和有用性生物分子如三叶虫中的球接子化石在寒武纪中期才出现,且真牙形刺化石在寒武纪晚期才出现,导致寒武系早期即纽芬兰统幸运阶地层全球对比产生困难.

根据国际地学研究存在的科学问题,本论文选择埃迪卡拉系—寒武系界线与幸运阶—第二阶界线位置作为研究的科学问题,研究材料来自湖北宜昌滚子坳剖面. 湖北宜昌三峡地区埃迪卡拉系、寒武系地层发育完整,出露连续,且含有大量的生物化石,且滚子坳剖面的岩家河组中含有这两个界线,是研究埃迪卡拉系—寒武系和第一阶—第二阶界线的理想地区.

(1)幸运阶于2007年被国际地科联批准为寒武系第一阶的正式名称(Landing *et al.*, 2007),其底界以遗迹化石 *Treptichnus pedum* 的首现为定义(Brasier *et al.*, 1994; Landing, 1994). 然而,随着研究的深入,许多学者对寒武系底界的定义提出质疑. 在华南,该遗迹化石仅在云南东部有报道,其首次出现比小壳化石 *Anabarites trisulcatus* 的首次出现的时间晚,且华南寒武系底部大部分岩性为碳酸盐岩与硅质岩,因此,华南的寒武系底界无法依据国际地层委员会建议的标志化石 *Treptichnus pedum* 来划分. 目前,小壳化石 *Anabarites trisulcatus*-*Protohertzina anabarica* 的首现(钱逸和何廷贵, 1996; Yi *et al.*, 2002; 朱茂炎等, 2019)、无机碳同位素负异常曲线 BACE 以及相应层位的同位素年代学(Zhu *et al.*, 2006; Li *et al.*, 2009, 2013; Landing and

Kruse, 2017; Zhu *et al.*, 2017; 朱茂炎等, 2019)、具刺疑源类化石 *Asteridium-Heliosphaeridium-Comasphaeridium* (AHC)组合中的 *Asteridium* 的首现(Yao *et al.*, 2005; Dong *et al.*, 2009; Ahn and Zhu, 2017; 朱茂炎等, 2019)等为寒武系底界的指标得到了广泛的认可. 研究对象是湖北宜昌滚子坳剖面寒武系纽芬兰统岩家河组底部的含磷硅质岩地层,以切片、薄片鉴定方式为主,主要研究其中的具刺疑源类化石,并且结合文献中的无机碳同位素负异常 BACE 曲线来判定埃迪卡拉系—寒武系的界线位置.

(2)幸运阶—第二阶的界线目前研究成熟度不高(Babcock *et al.*, 2005; Zhu *et al.*, 2006; Li *et al.*, 2007, 2013; Steiner *et al.*, 2007; Zhu *et al.*, 2007; Ahn and Zhu, 2017). 第二阶的底界主要依据小壳化石带, Zone III 带化石 *Watsonella crosbyi*、*Aladanella yangjiahensis* 和 *Zhijinites longistriatus* 的首现以及结合文献中的无机碳同位素正异常 ZHUCE 曲线来界定(Landing, 1994; Zhu *et al.*, 2006; Landing *et al.*, 2013; Li *et al.*, 2013; Yang *et al.*, 2014a, 2014b; Jacquet *et al.*, 2016; Ahn and Zhu, 2017). 研究对象是湖北宜昌滚子坳剖面寒武系纽芬兰统岩家河组第3~5层的灰岩,以酸蚀法为主,主要研究其中的小壳化石,并且结合文献中的无机碳同位素正异常 ZHUCE 曲线来推断幸运阶与第二阶的界线位置.

1 地质背景

研究区位于扬子板块北部,具体地址为湖北省宜昌土三公路滚子坳剖面岩家河组. 该区地层出露良好,从新元古界到寒武系地层都发育(图1)(安志辉等, 2018). 岩家河组下伏地层为灯影组白马沱段厚层白云岩,两者整合接触. 上覆地层为水井沱组底部含灰岩透镜体的泥页岩,两者之间呈平行不整合接触. 该组下部岩性主要为黑色硅质白云岩夹黑色硅质粉砂质页岩(含浮游的微古植物薄层硅质岩、富含小壳化石的硅磷质砾屑白云岩);中上部为黑色碳质页岩与黑色薄层、中层状碳质灰岩互层(含硅磷质结核、黑色燧石条带、白云岩结核等). 岩家河组总厚度为41.6 m,从下至上分为5层(图2).

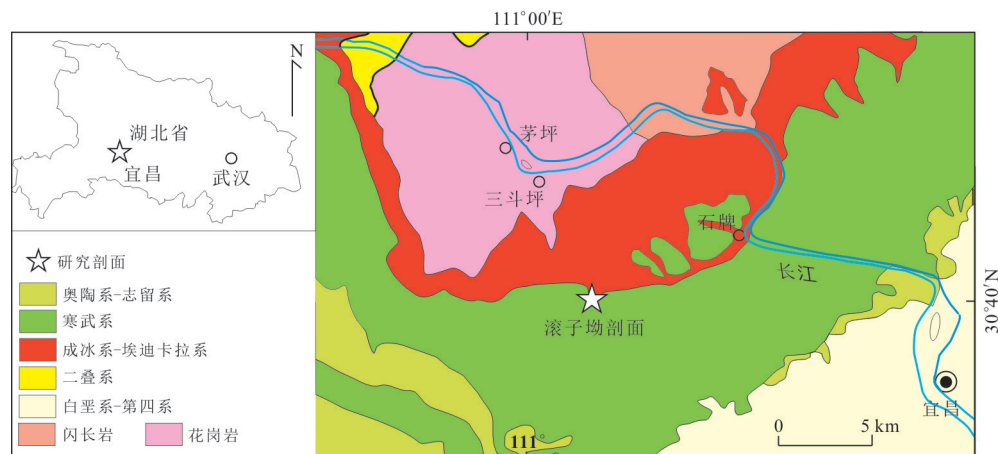


图1 研究地质简图及剖面位置

Fig.1 Geological map showing the locations of the studied sections

岩家河组地层剖面描述

上覆地层:寒武系水井沱组, >1.36 m

黑色含炭质粉砂质泥页岩, 夹灰质白云岩、白云质灰岩透镜体, 底部为 2~3 cm 灰白色, 黄褐色粘土(风化壳)。

平行不整合

寒武系岩家河组, 41.6 m

5. 灰色中一薄层状灰岩, 含大量不规则状硅磷质结核、灰岩透镜体、白云岩透镜体等, 产遗迹化石。含小壳化石 *Al-danella yanjiaheensis*-*Zhijinites longistriatus* 组合; 2.2 m

4. 灰色中一薄层状含炭质灰岩, 该段含有幸运阶与第二阶的界线, 于第4层底部至约 2.78 m 处属于幸运阶, 其余上部地层为第二阶; 下部幸运阶含三角棱管壳 *Siphonochites triangularis*, 棱管壳未定种 *Siphonochites* sp., 长锥圆管螺 *Conotheca longiconica*, 细小薄软舌螺 *Hyolithellus tenuis*, 短小圆管螺 *Conotheca nana*, 小小角螺 *Microcornus parvulus*, 剑形原始赫兹刺 *Protohertzina unguiformis*, 古老峨眉锥 *Purella antiqua*, 珍珠橄榄蛋 *Olivoides pearlformis*, 似古球蛋未定种 *Archaeooides* sp. 等化石; 上部第二阶含有心形盘织金壳 *Zhijinites cordiformis*, 提琴盘织金壳 *Zhijinites panduriformis*, 纵轮织金壳 *Zhijinites longistriatus*, 肿瘤形盘织金壳 *Zhijinites tumouriformis*, 贵州织金刺 *Zhijinacrus guizhouensis*, 角状裂螺 *Scissotheca cornuta*, 粗糙棒形壳 *Rhabdochites exasperates*, 贵州织金刺 *Zhijinacrus guizhouensis*, 二分牛軋形骨片 *Zeugites bifidus*, 厚壳椭圆口螺 *Turcutheca lubrica*, 光滑椭圆口螺 *Turcutheca crasseocochlia*, 肥胖圆管螺 *Conotheca obesa*, 湖北拉普沃兹慈壳 *Lapworthella hubeiensis*, 细小薄软舌螺 *Hyolithellus tenuis*, 珍珠橄榄蛋 *Olivoides pearlformis*, 似古球蛋未定种 *Archaeooides* sp. 等化石; 4.7 m

3. 灰色中层状灰岩夹黑色粉砂质页岩, 灰岩层面见遗迹化石, 页岩中含硅磷质结核和白云岩透镜体, 见大

量宏体藻类化石; 灰岩、泥岩中均见硅磷质结核, 含大量燧石条带, 含小壳化石 *Purella antiqua*-*Siphonochites triangularis* 组合; 19.3 m

2. 灰白色中层状含硅磷质砾屑白云岩, 含具刺疑源类化石 *Asteridium-Heliosphaeridium-Comasphaeridium* (AHC) 组合、小壳化石 *Anabarites trisulcatus*-*Protohertzina anabarica* 组合; 2.6 m

1. 中薄层硅质白云岩夹页岩。燧石条带十分发育, 硅质岩中含具刺疑源类化石 *Asteridium-Heliosphaeridium-Comasphaeridium* (AHC) 组合, 小壳化石 *Protohertzina* sp.; 12.8 m

平行不整合

下伏地层:震旦系灯影组白马沱段(Z_2dn^b), >2.44 m
灰色厚层含硅质白云岩。

2 材料与方法

共采集样品 61 个, 其中第 1~3 层共采集 30 个含磷硅质岩样品; 第 4 层共采集 31 个含炭质灰岩样品。将灰岩碎成约 1×3 cm 小块, 然后用 3%~5% 的稀醋酸酸蚀法处理, 之后在光学显微镜下挑出化石个体, 并对化石个体用 SEM 扫描电镜拍照成像。将硅质岩切片处理, 之后将切片在偏光显微镜下观察并成像。

3 化石与地层

本文在湖北宜昌滚子坳剖面第 1~3 层发现了具刺疑源类化石 *Asteridium-Heliosphaeridium-*



图 2 研究剖面地层柱状图

Fig.2 Stratigraphic column of the study area

修改自 Guo *et al.*(2014);潘时妹等(2018)

Comasphaeridium (AHC)组合,主要获得的化石有 *Asteridium tornatum*,大型拟粘球藻 *Myxococcoides grandis*,古光球藻 *Leiopsophosphaera infriata*,毛发球藻 *Comasphaeridium annulare*,宽出日棘球藻 *He-*

liosphaeridium ampliatus,日棘球藻属(未定种) *Heliosphaeridium* sp.,毛球藻属未定种 *Comasphaeridium* sp.,长超斯瑞克管 *Megathrix longus*,中型囊鞘丝藻 *Saccolyngbya intermedia*,以及小壳化石原始

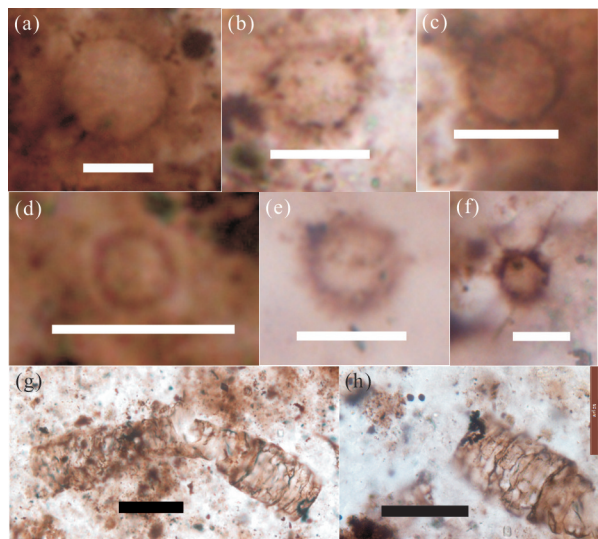


图3 湖北宜昌滚子坳剖面纽芬兰统岩家河组疑源类化石及其共生化石

Fig.3 The acritarchs and paragenetic fossils from Yanjiahe Formation of Gunziao section in Yichang, Hubei Province

a~c. *Asteridium tornatum*, 内视图; d~e. *Comasphaeridium annulare*, 内视图; f. *Heliosphaeridium ampliatus*, 内视图; g~h. *Megathrix longus*, 纵切面; 图 f 引自 Chang *et al.* (2019); 比例尺 a~f 为 10 μm , g~h 为 50 μm

赫兹刺属(未定种) *Protohertzina* sp. (图 3). *Asteridium* 的首现与 *Protohertzina* sp. 的首现在第 1 层的 10.5 米处首次出现(图 6).

在第 4 层获得了 Zone II 化石有三角棱管壳 *Siphogonuchitriangularis*, 棱管壳未定种 *Siphogonuchites* sp., 长锥圆管螺 *Conotheca longiconica*, 细薄小软舌螺 *Hyolithellus tenuis*, 短小软舌螺 *Conotheca nana*, 小小角螺 *Microcornus parvulus*, 剑形原始赫兹刺 *Protohertzina unguiformis*, 古老峨眉锥 *Purella antiqua*, 珍珠橄榄蛋 *Olivoides pearlformis*, 似古球蛋未定种 *Archaeooides* sp. 等化石; Zone III 含有心形盘织金壳 *Zhijinites cordiformis*, 提琴盘织金壳 *Zhijintes panduriformis*, 纵轮织金壳 *Zhijinites longistriatus*, 肿瘤形盘织金壳 *Zhijinites tumouriformis*, 贵州织金刺 *Zhijinacrus guizhouensis*, 角状裂螺 *Scissotheca cornuta*, 粗糙棒形壳 *Rhabdochites exasperates*, 贵州织金刺 *Zhijinacrus guizhouensis*, 二分牛轭形骨片 *Zeugites bifidus*, 厚壳椭圆口螺 *Turcutheca lubrica*, 光滑椭圆口螺 *Turcutheca crasseochoelia*, 肥胖圆管螺 *Conotheca obesa*, 湖北拉普沃兹壳 *Lapworthella hubeiensis*, 细小薄软舌螺 *Hyolithellus tenuis*, 珍珠橄榄蛋 *Olivoides pearlfor-*

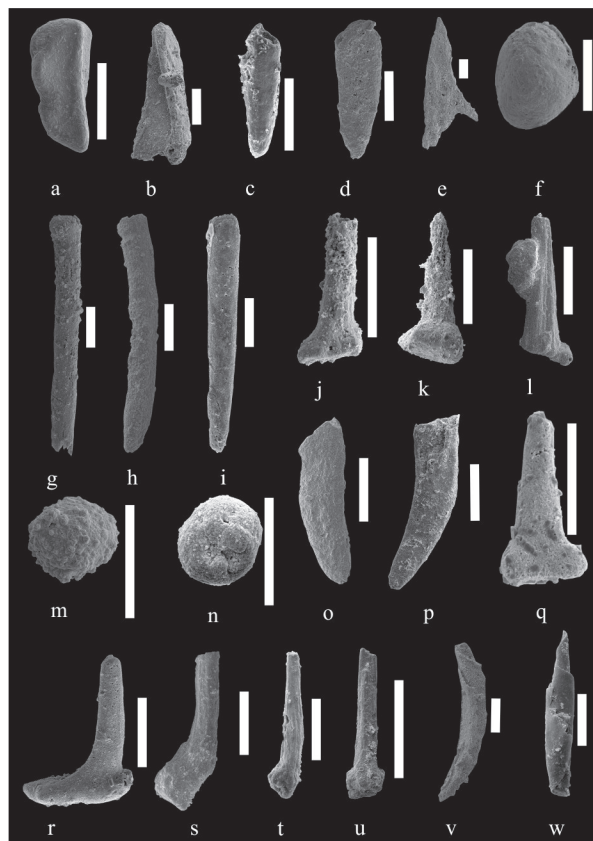


图4 湖北宜昌滚子坳剖面纽芬兰统岩家河组小壳化石 Zone II

Fig.4 The small selly fossils from Yanjiahe Formation of the Gunziao section in Yichang, Hubei Province

比例尺 = 100 μm ; a~i 为 Zone II, j~w 为 Zone III; a~b. *Siphogonuchitriangularis*, a. 凹面视, b. 侧视; c~d. *Microcornus parvulus*, 侧视; e. *Protohertzina unguiformis*, 侧视; f. *Purella antiqua*, 顶视; g~i. *Conotheca longiconica*, 侧视; j~k. *Zhijinites longistriatus*, 侧视; m~n. *Archaeooides* sp., 外视; o~p. *Turcutheca lubrica*, 侧视; q. *Zhijinites cordiformis*, 侧视; r. *Zhijinacrus guizhouensis*, 侧视; s. *Zhijintes panduriformis*, 侧视; t~u. *Zhijinites tumouriformis*, 侧视; v~w. *Lapworthella hubeiensis*, 侧视; 其中 j~l, q~u 引自潘时妹等(2018)

mis, 似古球蛋未定种 *Archaeooides* sp. 等化石(图 4). 其中纵轮织金壳 *Zhijinites longistriatus* 首次出现在第 4 层底部往上 2.78 m 处(图 6).

4 讨论

华南和西伯利亚地区寒武系下部地层是全球发育最好、化石最丰富和研究程度最高的两个代表性地区, 是寒武系下部地层再划分国际工作组开展工作的突破口(朱茂炎等, 2019). 俄罗斯西伯利亚地区寒武系下部地层发育连续, 剖面出露好、含大量化石, 下寒武统自下而上建立了 4 个阶, 即 Tom-

埃迪卡拉系	寒 武 系			剖面	地层系统
	纽 芬 兰 统				
	幸 运 阶		第二阶		
灯影组	疑源类 <i>Asteridium-Heliosphaeridium-Comasphaeridium</i>	<i>Purella antiqua-Siphogonuchites triangularis</i>	<i>Aldanella yanjiaheensis-Zhijinites longistriatus</i>	本文 滚子坳剖面	南 (湖北)
	小壳化石 <i>Anabarites trisulcatus-Protohertzina anabarica</i>	<i>Purella antiqua</i>	<i>Aldanella yanjiaheensis</i>	Guo <i>et al.</i> (2014) 滚子坳剖面	
	疑源类 <i>Asteridium-Heliosphaeridium-Comasphaeridium</i>	<i>Purella antiqua</i>	<i>Aldanella yanjiaheensis</i>	Ahn and Zhu(2017) 计家坡剖面	
	小壳化石 <i>Anabarites trisulcatus-Protohertzina anabarica</i>	缺乏化石记录	<i>Watsonella crosbyi</i>	Yang <i>et al.</i> (2014) 四川	
	小壳化石 <i>Anabarites trisulcatus-Protohertzina anabarica</i>	<i>Paragloborilus subglobosus-Siphogonuchites triangularis</i>	<i>Watsonella crosbyi-Zhijinites longistriatus</i>	Yang <i>et al.</i> (2014) 云南	
Qigebaq组	疑源类 <i>Asteridium-Heliosphaeridium-Comasphaeridium</i>	缺乏化石记录	缺乏化石记录	Yao <i>et al.</i> (2005) 塔里木	塔里木
Tsagan-Loom组	小壳化石 <i>Anabarites trisulcatus</i>	<i>Purella</i>	<i>Watsonella crosbyi</i>	Gubanov(2002) 蒙古	国际
Ust-Yudoma组	小壳化石 <i>Anabarites trisulcatus</i>	<i>Purella antiqua</i>	<i>Watsonella crosbyi</i>	Gubanov(2002) 西伯利亚	
Renconter组	遗迹化石 <i>Treptichnus pedum</i>	<i>Ladotheca cylindrica</i>	<i>Watsonella crosbyi</i>	Landing(1994) 纽芬兰	

图5 湖北宜昌滚子坳剖面与其他地区寒武系底部地层划分与对比

Fig.5 The subdivision and correlation of the lower Cambrian between Gunziao section in Yichang and other area

motian、Atdabanian、Botoman 和 Toyonian (Cowie and Glaessner, 1975), 其中 Tommotian 也正式作为寒武纪的第一期列入 1989 版的地质年代表。随着研究深入, 以西伯利亚单位层型定义的阶不符合界线层型的定义标准 (Cowie *et al.*, 1986)。湖北宜昌埃迪卡拉系、寒武系地层发育完整, 出露连续。其中滚子坳剖面含有大量的生物化石, 既含有大量小壳化石, 又有具刺疑源类化石, 且沉积了一套碳酸盐岩, 可以获得碳同位素曲线, 且此剖面的岩家河组中含有这两个界线, 是少有的研究埃迪卡拉系—寒武系和幸运阶—第二阶界线的理想剖面 (图 5)。其他地区其他剖面或无寒武系底部的小壳化石, 或无具刺疑源类化石, 或无碳酸盐岩, 不能获得碳同位素曲线。

关于湖北宜昌岩家河组的划分, 不同学者有不同的划分标准。汪啸风等 (1987) 根据岩性和所含化石将岩家河组地层分为上下两个部分, 下部平行不整合于灯影组之上, 其岩性主要为黑色硅质白云岩夹黑色硅质粉砂质页岩、薄层硅质岩、硅磷质砾屑白云岩, 化石丰富, 页岩含浮游的微古植物化石, 硅磷质砾屑白云岩富含小壳化石;

上部地层与上覆地层水井沱组呈平行不整合接触, 其岩性主要为黑色碳质页岩与黑色薄层、中层状碳质灰岩互层, 含硅磷质结核、黑色燧石条带、白云岩结核等, 小壳化石非常丰富。

郭俊锋等 (2009) 根据岩性和化石产出特征, 将宜昌三斗坪滚子坳剖面岩家河组分为 5 层, 自下而上依次为: (1) 黑色中薄层硅质岩夹砂屑白云岩及黑色粉砂质页岩; (2) 灰白色中层状含硅磷质砾屑白云岩 (下砾屑层); (3) 灰黑色中薄层状微晶灰岩与黑色粉砂质页岩互层, 页岩中含硅磷质结核; (4) 灰黑色中层状含炭质灰岩; (5) 灰白色中层状含硅磷质砾屑灰岩 (上砾屑层)。其中, 第 1、2 层相当于汪啸风等 (1987) 的下部地层, 第 3 层到第 5 层相当于汪啸风等 (1987) 的上部地层。岩家河组自下往上第 1 层含有具刺疑源类化石 *Asteridium-Heliosphaeridium-Comasphaeridium* (AHC) 组合 (原 *Michrystidium* 化石组合); 第 2 层含有为小壳化石 *Anabarites trisulcatus-Protohertzina anabarica* 组合 (Zone I) 与具刺疑源类化石 *Asteridium-Heliosphaeridium-Comasphaeridium* (AHC) 组合; 第 3 层为小壳化石 *Purella antiqua* 组合 (Zone II); 第 5 层中有小壳化石 *Aldanella yanjiaheensis* 化石组合 (Zone III); 而第 4 层缺少化石记录 (Guo *et al.*, 2014)。时代上 I、II 带属于纽芬兰统幸运阶, III 应该属于纽芬兰统第二阶。然而, 第 4 层化石记录的缺失导致幸运阶与第二阶的界线位置尚不明确 (Guo *et al.*, 2014)。

本文在湖北宜昌滚子坳剖面纽芬兰统岩家河组第 4 层发现了大量的小壳化石, 尤其是 II 带的带化石 *Siphonochites triangularis*, *Purella antiqua*, *Zhijinites longistriatus* 的带化石, 在第 1 层发现了具刺疑源类化石 *Asteridium-Heliosphaeridium-Comasphaeridium* (AHC) 组合, 结合无机碳同位素负异常 BACE 与无机碳同位素 ZHUCE 正异常曲线以讨论埃迪卡拉系—寒武系与幸运阶—第二阶的界线。

4.1 埃迪卡拉系—寒武系的界线位置

1994 年, Brasier *et al.* (1994) 和 Landing (1994) 将加拿大 Fortune Head 剖面定为界线层型剖面, 以遗迹化石 *Treptichnus pedum* 在该剖面的首现作为寒武系底界的标志。然而, 自寒武系底界确定后, 一直受到诸多质疑。2004 年, 彭善池在韩国举行的寒武系再划分国际会议上, 以华南寒武系新的年代地层框架为基础提出了 4 统 10 阶的划分方案 (Peng, 2004), 该方案由寒武系分会表决通过 (Babcock *et*

al., 2005), 被 2005 年国际年代地层表所采用. 鉴于“Fortune Head”界线层型剖面存在的问题, 国际寒武纪地层分会重新开展了寒武系底界的研究工作 (Babcock *et al.*, 2014), 目的是为寻找其他可以广泛对比的地层指标, 为重新定义寒武系底界提供依据. 根据国际地层委员意见, 以遗迹化石 *Treptichnus pedum* 的首现点作为前寒武系—寒武系界线点, 或者说 *Treptichnus pedum* 遗迹化石作为寒武系底部 (Brasier *et al.*, 1994; Landing, 1994; Babcock *et al.*, 2005; Landing *et al.*, 2013). 然而, 由于该化石保存、埋藏或者岩性等原因, 一些地区如华南、西伯利亚板块、Avalonia 和 Baltica 等地, *Treptichnus pedum* 并不常见 (Babcock *et al.*, 2005; Steiner *et al.*, 2007), 且其首次出现比小壳化石 *Anabarites trisulcatus* 的首现时间晚 (Li *et al.*, 2007; Steiner *et al.*, 2007). 因此, 用 *Treptichnus pedum* 及其共生遗迹化石作为前寒武系—寒武系界线的唯一依据是不可靠的, 近年来遗迹化石 *Treptichnus pedum* 作为寒武系底界逐渐受到争议, 国际上提出重新拟定寒武系底界 (Babcock *et al.*, 2005; Zhu *et al.*, 2006; Li *et al.*, 2007; Steiner *et al.*, 2007; Zhu *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2013; Ahn and Zhu, 2017).

小壳化石出现于埃迪卡拉系软躯体动物群之后、以三叶虫为代表的节肢动物群之前这段地质历史时期中, 是埃迪卡拉系—寒武系界线划分与对比的重要生物证据. 小壳化石 *Anabarites* 和 *Protohertzina* 再全球分布广泛、特征明显、已识别, 保存潜力大, 许多学者将小壳化石 *Anabarites* 和 *Protohertzina* 的首现作为寒武系底界的标志 (Steiner *et al.*, 2007; Zhu *et al.*, 2007; Ahn and Zhu, 2017). 近十年来, 寒武系底界具刺疑源类化石的研究得到了很好的发展, 其中 *Asteridium-Heliosphaeridium-Comasphaeridium* (AHC) 组合外形上已识别, 为浮游分子, 地理位置分布广泛, 且 *Asteridium* 的首现时间与小壳化石 *Anabarites* 的首现时间相近, 因此, 寒武系底界具刺疑源类化石 *Asteridium* 的首现作为寒武系底界另一个标志也逐渐得到了认可 (Moczydlowska, 1991; Yao *et al.*, 2005; Ahn and Zhu, 2017). 无机碳同位素负异常 BACE 曲线为全球性事件, 可以用来定义寒武系底界 (Ahn and Zhu, 2017).

因此, 当某些地区遗迹化石 *Treptichnus pedum* 不存在或者不适用时, 埃迪卡拉系—寒武系界线的标志为小壳化石 *Anabarites trisulcatus* 的首

现、无机碳同位素负异常 BACE 曲线的峰值、*Asteridium* 的首现做为寒武系底界, 三者时间和空间上代表的时间大致相当 (Zhu *et al.*, 2006; Zhu *et al.*, 2007; Landing *et al.*, 2013; Babcock *et al.*, 2014; Ahn and Zhu, 2017).

本文在湖北宜昌滚子坳剖面第 1~3 层发现了具刺疑源类化石 *Asteridium-Heliosphaeridium-Comasphaeridium* (AHC) 组合, 主要获得的化石有 *Asteridium tornatum*, 大型拟粘球藻 *Myxococcoides grandis*, 古光球藻 *Leiopsophosphaera infriata*, *Comasphaeridium annulare*, 宽出日棘球藻 *Heliosphaeridium ampliatus*, 日棘球藻属 (未定种) *Heliosphaeridium* sp., *Comasphaeridium* sp., 长超斯瑞克管 *Megathrix longus*, 中型囊鞘丝藻 *Saccolingbya intermedia*, *Satka coloninalica*, 以及小壳化石原始赫兹刺属 (未定种) *Protohertzina* sp.. *Asteridium* 的首现与 *Protohertzina* sp. 的首现在第 1 层的 10.5 m 处首次出现 (图 6). 结合前人无机碳同位素 BACE 曲线 (Ishikawa *et al.*, 2008) 的负值的峰值位置可以推断出埃迪卡拉系—寒武系界线应该位于湖北宜昌滚子坳剖面第 1 层底部往上 10.5 m 处.

4.2 幸运阶与第二阶界线的位置

在扬子板块, 尤其云南地区, Zone II 为 *Siphonochitestrangularis-Purella squamulosa* (Steiner *et al.*, 2007), 这个组首先是 *Paragloborilus-Siphonochitestrangularis* (罗惠麟等, 1980), 随后 Steiner *et al.* (2007) 重新描述并定义了 Zone III 小壳化石带, 为 *Watsonella crosbyi* 化石组合. 由于峡东地区没有发现 *Purella squamulosa*, 而 *Purella antiqua* 在峡东地区岩家河组第三段中广泛分布, 而岩家河组第三段对应的是云南东部的中谊村段, 此外, *Purella antiqua* 与西伯利亚板块 Nemakit-Daldynian 上部能对应上 (Khomentovsky and Karlova, 1993), 也就是说岩家河组第三段为幸运阶顶部, 即 Zone II 出现的层位, 故郭俊锋 (2009) 将 *Purella antiqua* 作为峡东地区的 Zone II.

钱逸和何廷贵 (1996) 定义了第 III 小壳化石组合, *Heraultipegma yunnanensis* 组合. 而 *Heraultipegma yunnanensis* 是 *Watsonella crosbyi* 的同异名 (Steiner *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2011), Steiner *et al.* (2007) 重新描述并定义了 Zone III 小壳化石带, 为 *Watsonella crosbyi* 化石组合. 该小壳化石组合是依据 *Watsonella crosbyi* (原 *Heraultipegma yunnanensis*)

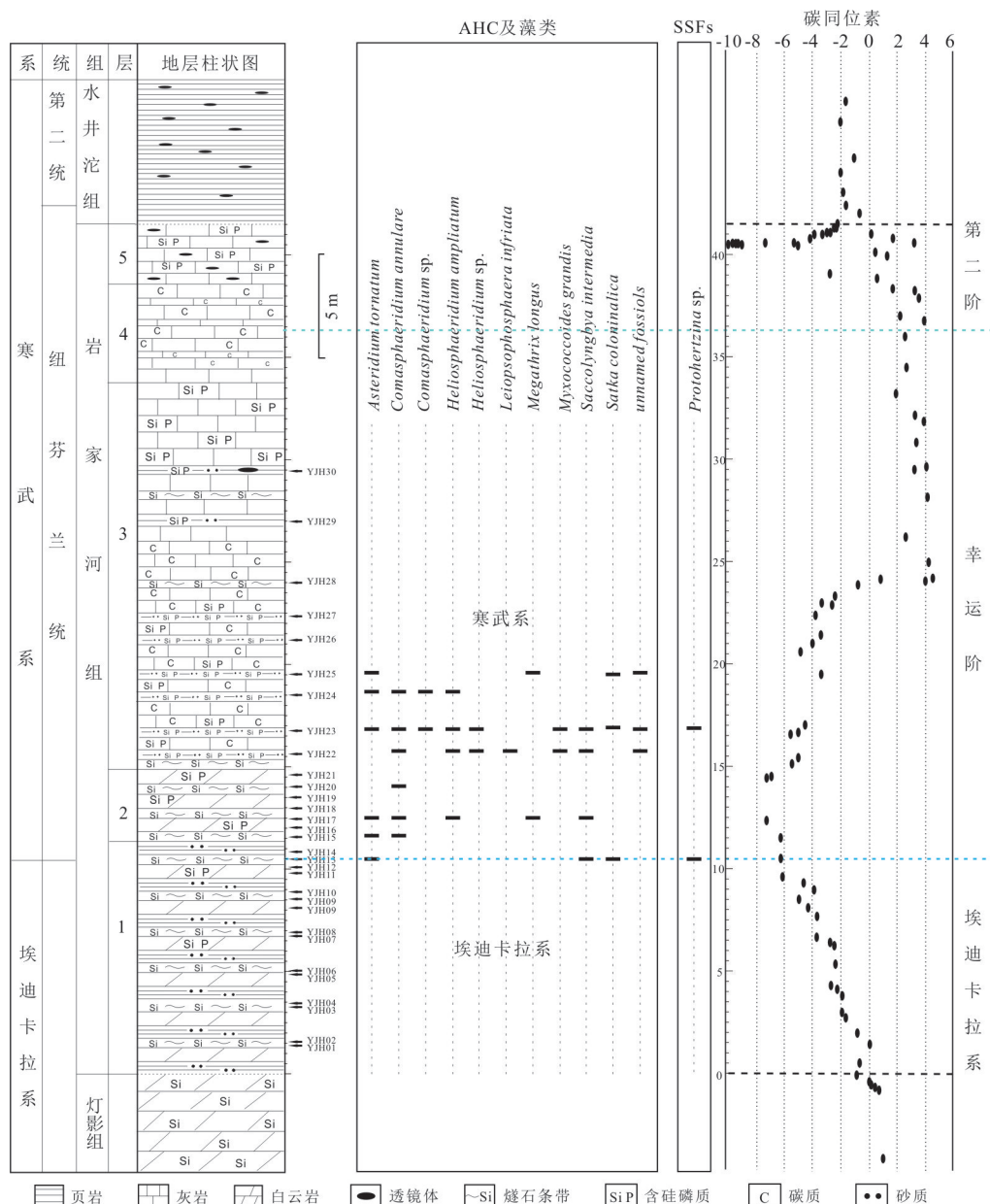


图6 湖北宜昌滚子坳剖面埃迪卡拉系—寒武系界线附近主要化石分布及无机碳同位素曲线

Fig.6 Distribution of fossils and inorganic carbon isotope curves near the Ediacaran-Cambrian boundary line in the Gunziao section of Yichang, Hubei Province

1. 无机碳同位素图修改自(Ishikawa *et al.*, 2008); 2. 寒武系底界置于BACE负异常什么位置目前国际上无定论, 本文有大量化石, 根据化石的指示将BACE负值的峰值作为寒武系底界, 第二阶底界的定义同理

sis), *Aldanella yanjiaheensis* 和 *Oelandiella korobkovi* (原 *Archaeospira ornate*) 共生化石组合定义, 底界为 *Watsonella crosbyi* 最早出现的层位, 顶界为 *Aldanella yanjiaheensis* 和 *Oelandiella korobkovi* 最晚出现的层位. 因为在云南东部 *Zhijinites longistriatus* 的出现晚于 *Watsonella crosbyi*, 而 *Oelandiella korobkovi* 比较常出现在第 II 小壳化石组合 (Zone II) (Yang *et al.*, 2014a), 所以 Yang *et al.*

(2014b) 依据 *Watsonella crosbyi*, *Aldanella yanjiaheensis*, *Zhijinites longistriatus* 化石组合又重新定义了 *Watsonella crosbyi* 化石组合.

由于峡东地区岩家河组没有发现 *Watsonella crosbyi* (Guo *et al.*, 2014), *Zhijinites longistriatus*, *Oelandiella korobkovi*, 郭俊锋 (2009) 将 *Aldanella yanjiaheensis* 定义 Zone III. 峡东地区岩家河组的 *Aldanella yanjiaheensis* 出现的层位即第 5 层相当于

云南东部的待补段,由于第4层没有化石报道(Khomentovsky and Karlova, 1993; Guo *et al.*, 2014),故待补段底部是属于第5层的底部还是在第4层中某一位位置这一问题未得到解决(Guo *et al.*, 2014)。

本文研究获得了 Zone II 化石有三角棱管壳 *Siphogonuchitestriangularis*, 棱管壳未定种 *Siphogonuchites* sp., 长锥圆管螺 *Conotheca longiconica*, 细薄小软舌螺 *Hyolithellus tenuis*, 短小软舌螺 *Conotheca nana*, 小小角螺 *Microcornus parvulus*, 剑形原始赫兹刺 *Protohertzina unguiformis*, 古老峨眉锥 *Purella antiqua*, 珍珠橄榄蛋 *Olivoooides pearlformis*, 似古求蛋属未定种 *Archaeooides* sp. 等化石; Zone III 含有心形盘织金壳 *Zhijinities cordiformis*, 提琴盘织金壳 *Zhijinities panduriformis*, 纵轮织金壳 *Zhijinities longistriatus*, 肿瘤形盘织金壳 *Zhijinities tumouriformis*, 贵州织金刺 *Zhijinacus guizhouensis*, 角状裂螺 *Scissotheca cornuta*, 粗糙棒形

壳 *Rhabdochites exasperates*, 贵州织金刺 *Zhijinacus guizhouensis*, 二分牛軋形骨片 *Zeugites bifidus*, 厚壳椭圆螺 *Turcutheca lubrica*, 光滑椭圆螺 *Turcutheca crasseocochlia*, 肥胖圆管螺 *Conotheca obesa*, 湖北拉普沃兹壳 *Lapworthella hubeiensis*, 细小薄软舌螺 *Hyolithellus tenuis*, 珍珠橄榄蛋 *Olivoooides pearlformis*, 似古球蛋属未定种 *Archaeooides* sp. 等化石。其中纵轮织金壳 *Zhijinities longistriatus* 首次出现在第4层底部往上 2.78 m 处(图 7)。

由于此次研究在第4层底部到 2.78 m 处发现了 *Siphogonuchitestriangularis*, *Siphogonuchites* sp., *Purella antiqua* 即 II 带化石, 第4层底部往上 2.78 m 处发现了 *Zhijinities longistriatus*, 故将湖北宜昌地区小壳化石带 Zone II 与 Zone III 修订, 即将 *Purella antiqua* 组合 (Zone II) (Guo *et al.*, 2014) 修订为 *Purella antiqua*-*Siphogonuchites triangularis* 组合, *Aldanella yanjiahensis* 组合 (Zone

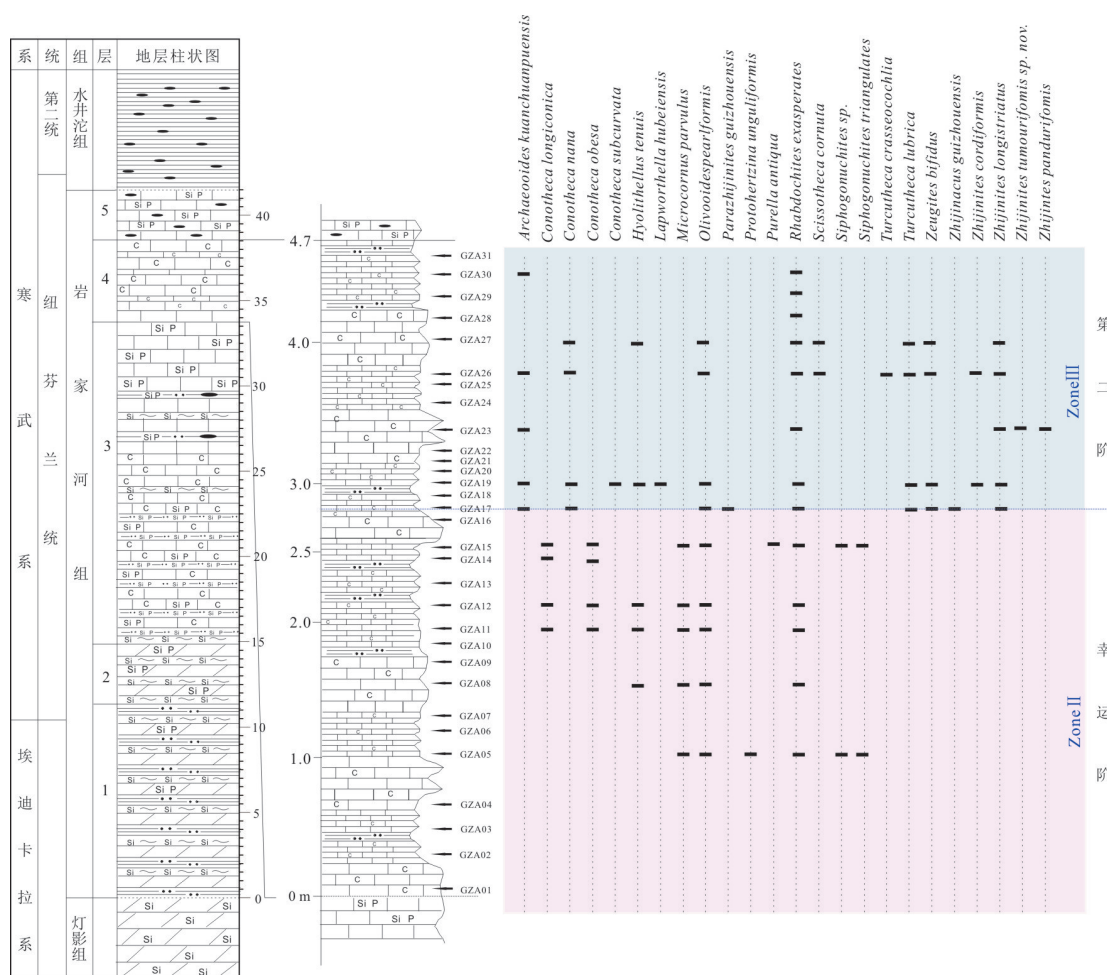


图 7 湖北宜昌滚子坳剖面幸运阶—第二阶界线附近化石分布

Fig.7 Distribution of fossils near the Fortunian-Stage 2 boundary line in the Gunziao section of Yichang, Hubei Province

Ⅲ)(Guo *et al.*, 2014)修订为 *Aldanella yanjia-hensis-Zhijiniteslongistriatus* 组合。

由于位于第4层底部往上2.78 m处, *Zhijinites longistriatus* 首次出现, 2.78 m之下为Ⅱ带化石, 之上为Ⅲ带化石, 且结合前人前人无机碳同位素 ZHUCE 曲线(Ishikawa *et al.*, 2008; Li *et al.*, 2009; 王丹等, 2012; Li *et al.*, 2013; Ahn and Zhu, 2017)峰值, 可以推断出幸运阶与第二阶的界线位置大致在第4层底部往上约2.78 m处。

5 结论

本文主要对湖北宜昌地区寒武系组芬兰幸运阶顶底界线的位置做了较为细致的研究, 选择了土三公路29~30 km之间的滚子坳剖面。通过61个样品的系统分析, 笔者获得了大量的小壳化石、疑源类化石及其他分类位置未定化石。系统鉴定和描述了23属44种。根据化石数据可以得到以下几个结论和成果:

(1) *Zhijinites* 是峡东地区的首次报道。将峡东地区小壳化石的Ⅱ带和Ⅲ带重新定义, 即将 *Purella antiqua* 组合 (Zone Ⅱ) 修订为 *Purella antiqua-Siphonochites triangularis* 组合; 将 *Aldanella yanjia-hensis* 组合 (Zone Ⅲ) 修订为 *Aldanella yanjia-hensis-Zhijiniteslongistriatus* 组合。

(2) 根据具刺疑源类化石 *Asteridium* 和小壳化石 *Protohertzina* 的首现位置以及无机碳同位素 BACE 曲线负值的峰值位置, 可以推断出埃迪卡拉系—寒武系界线应该位于第一层底部往上约10.5 m处。

(3) 根据 *Zhijiniteslongistriatus* 的首现位置以及无机碳同位素 ZHUCE 正值的峰值位置, 可以推断出幸运阶与第二阶的界线位置大致在第4层底部往上约2.78 m处。

致谢: 本文感谢常珊为本文提供了部分疑源类化石切片数据!

References

Ahn, S. Y., Zhu, M. Y., 2017. Lowermost Cambrian Acratachs from the Yanjiahe Formation, South China: Implication for Defining the Base of the Cambrian in the Yangtze Platform. *Geological Magazine*, 154(6): 1217—1231. <https://doi.org/10.1017/s0016756816001369>

An, Z., Tong, J., Xu, C., et al., 2018. Stratigraphic Division and Correlation of Ediacaran Doushantuo Formation in Zhangcunping Area, Yichang, Hubei Province.

Earth Sciences, 43(7): 2206—2221 (in Chinese with English abstract).

Babcock, L. E., Peng, S. C., Zhu, M. Y., et al., 2014. Proposed Reassessment of the Cambrian GSSP. *Journal of African Earth Sciences*, 98: 3—10. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2014.06.023>

Babcock, L. E., Peng, S. C., Geyef, G., et al., 2005. Changing Perspectives on Cambrian Chronostratigraphy and Progress Toward Subdivision of the Cambrian System. *Geosciences Journal*, 9(2): 101—106. <https://doi.org/10.1007/bf02910572>

Brasier, M., Cowie, J., Taylor, M., 1994. Decision on the Precambrian-Cambrian Boundary Stratotype. *Episodes*, 17(1/2): 3—8. <https://doi.org/10.18814/epi-ugs/1994/v17i1.2/002>

Chang, S., Lei, Z., Sébastien, C., et al., 2019. The Ediacaran-Cambrian Rise of Siliceous Sponges and Development of Modern Oceanic Ecosystems. *Precambrian Research*, 333: 105438.

Cowie, J. W., Glaessner, M. F., 1975. The Precambrian-Cambrian Boundary: A Symposium. *Earth-Science Reviews*, 11(3): 209—251. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(75\)90120-8](https://doi.org/10.1016/0012-8252(75)90120-8)

Cowie, J. W., Ziegler, W., Boucot, A. J., et al., 1986. Guidelines and Status of the International Commission on Stratigraphy Courier Forsch. *Cour Forsch-Inst Senckenberg*, 83:1—14.

Da, L. I., Ling, H. F., Jiang, S. Y., et al., 2009. New Carbon Isotope Stratigraphy of the Ediacaran - Cambrian Boundary Interval from SW China: Implications for Global Correlation. *Geological Magazine*, 146(4): 465—484. <https://doi.org/10.1017/s0016756809006268>

Dong, L., Xiao, S. H., Shen, B., et al., 2009. Basal Cambrian Microfossils from the Yangtze Gorges Area (South China) and the Aksu Area (Tarim Block, Northwestern China). *Journal of Paleontology*, 83(1): 30—44. <https://doi.org/10.1666/07-147r.1>

Fu, D. J., Tong, G. H., Dai, T., et al., 2019. The Qingjiang Biota: A Burgess Shale-Type Fossil Lagerstätte from the Early Cambrian of South China. *Science*, 363(6433): 1338—1342. <https://doi.org/10.1126/science.aau8800>

Guo, J., 2009. Yanjiahe Biota from the Early Cambrian of Yichang, Hubei, China (Dissertation). Northwest University, Xi'an, 1—158 (in Chinese with English abstract).

Guo, J. F., Li, Y., Li, G. X., 2014. Small Shelly Fossils from the Early Cambrian Yanjiahe Formation, Yichang, Hubei, China. *Gondwana Research*, 25(3): 999—1007.

- <https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.03.007>
- Ishikawa, T., Ueno, Y., Komiya, T., et al., 2008. Carbon Isotope Chemostratigraphy of a Precambrian-Cambrian Boundary Section in the Three Gorge Area, South China: Prominent Global-Scale Isotope Excursions just before the Cambrian Explosion. *Gondwana Research*, 14 (1):193–208.
- Jacquet, S. M., Brougham, T., Skovsted, C. B., et al., 2016. *Watsonella Crosbyi* from the Lower Cambrian (Terreneuvian, Stage 2) Normanville Group in South Australia. *Geological Magazine*, 154(5): 1088–1104. <https://doi.org/10.1017/s0016756816000704>
- Khomentovsky, V. V., Karlova, G. A., 1993. Biostratigraphy of the Vendian-Cambrian Beds and the Lower Cambrian Boundary in Siberia. *Geological Magazine*, 130(1): 29–45. <https://doi.org/10.1017/s0016756800023700>
- Landing, E., Peng, S. C., Babcock, L. E., et al., 2007. Global Standard Names for the Lowermost Cambrian Series and Stage. *Episodes*, 30(4): 287–289. <https://doi.org/10.18814/epiugs/2007/v30i4/004>
- Landing, E., Geyer, G., Brasier, M. D., et al., 2013. Cambrian Evolutionary Radiation: Context, Correlation, and Chronostratigraphy: Overcoming Deficiencies of the First Appearance Datum (FAD) Concept. *Earth-Science Reviews*, 123: 133–172. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.03.008>
- Landing, E., Kruse, P. D., 2017. Integrated Stratigraphic, Geochemical, and Paleontological Late Ediacaran to Early Cambrian Records from Southwestern Mongolia: Comment. *Geological Society of America Bulletin*, 129 (7/8): 1012–1015. <https://doi.org/10.1130/b31640.1>
- Landing, E., 1994. Precambrian-Cambrian Boundary Global Stratotype Ratified and a New Perspective of Cambrian Time. *Geology*, 22(2): 179. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1994\)022<0179:pcbgsr>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1994)022<0179:pcbgsr>2.3.co;2)
- Li, D., Ling, H. F., Jiang, S. Y., et al., 2009. New Carbon Isotope Stratigraphy of the Ediacaran-Cambrian Boundary Interval from SW China: Implications for Global Correlation. *Geological Magazine*, 146(4): 465–484. <https://doi.org/10.1017/s0016756809006268>
- Li, D., Ling, H. F., Shields-Zhou, G. A., et al., 2013. Carbon and Strontium Isotope Evolution of Seawater Across the Ediacaran-Cambrian Transition: Evidence from the Xiaotan Section, NE Yunnan, South China. *Precambrian Research*, 225: 128–147. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2012.01.002>
- Li, G. X., Steiner, M., Zhu, X. J., et al., 2007. Early Cambrian Metazoan Fossil Record of South China: Generic Diversity and Radiation Patterns. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 254(1/2): 229–249. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2007.03.017>
- Li, G. X., Zhao, X., Gubanov, A., et al., 2011. Early Cambrian Mollusc *Watsonella Crosbyi*: A Potential GSSP Index Fossil for the Base of the Cambrian Stage 2. *Acta Geologica Sinica - English Edition*, 85(2): 309–319. <https://doi.org/10.1111/j.1755-6724.2011.00400.x>
- Luo, H., Jiang, Z., Xu, C., et al., 1980. On the Sinian-Cambrian Boundary of Meishucun and Wangjiawan, Jinning County, Yunnan. *Acta Geologica Sinica*, (2):13–85 (in Chinese with English abstract).
- Moczydlowska, M., 1991. Acritarch Biozonation and Regional Correlation of the Lower Cambrian. *Geologiska Föreningen i Stockholm Förhandlingar*, 113(1): 87–87. <https://doi.org/10.1080/11035899109453834>
- Pan, S.M., Feng, Q.L., Chang, S., 2018. Small shelly fossils from the Terreneuvian Yanjiahe Formation, Yichang, Hubei, China. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 35(1):30–40 (in Chinese with English abstract).
- Peng, S., 2006. New Global Subdivision on Cambrian Chronostratigraphy. *China Academic Journal Electronic Publishing House*, 21(4):325–328 (in Chinese with English abstract).
- Peng, S., 2004. Suggested Global Subdivision of Cambrian System and Two Potential GSSPs in Hunan, China for defining Cambrian stages. *Lethaia*, 37:365–379.
- Qian, Y., He, T., 1996. New investigation of Precambrian-Cambrian Boundary Sections in Eastern Yunnan. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 36(1):21–30 (in Chinese with English abstract).
- Steiner, M., Li, G. X., Qian, Y., et al., 2007. Neoproterozoic to Early Cambrian Small Shelly Fossil Assemblages and a Revised Biostratigraphic Correlation of the Yangtze Platform (China). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 254(1/2): 67–99. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2007.03.046>
- Wang, D., Ling, H.F., Li, D., et al., 2012. Carbon Isotope Stratigraphy of Yanjiahe Formation across the Ediacaran-Cambrian Boundary in the Area of the Three Gorges. *Journal of Stratigraphy*, 36(1):21–30 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X.F., Ni, S.Z., Zeng, Q.L., 1987. Biostratigraphy in the Three Gorges Area of the Yangtze River (2), Early Paleozoic Volume. Geological Publishing House, Beijing, 43–143 (in Chinese)
- Yang, B., Steiner, M., Li, G., et al., 2014a. Terreneuvian Small Shelly Faunas of East Yunnan (South China) and

- Their Biostratigraphic Implications. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 398:28–58.
- Yang, B., Steiner, M., Zhu, M. Y., et al., 2014b. Transitional Ediacaran-Cambrian Small Skeletal Fossil Assemblages from South China and Kazakhstan: Implications for Chronostratigraphy and Metazoan Evolution. *Precambrian Research*, 285: 202–215. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2016.09.016>
- Yao, J., Xiao, S., Yin, L., et al., 2005. Basal Cambrian Microfossils from the Yurtus and Xishanblaq Formations (Tarim, North-West China): Systematic Revision and Biostratigraphic Correlation of *Micrhystridium*-Like Acritarchs. *Palaeontology*, 48(4): 687–708. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4983.2005.00484.x>
- Yi, Q., Yan, Z.M., Xiang, L.G., et al., 2002. A Supplemental Precambrian-Cambrian Boundary Global Stratotype Section in Southwest China. *Acta Palaeontologica Sinica*, 35(35): 165–185.
- Zhu, M., Yang, A., Yuan, J., et al., 2019. Cambrian Integrative Stratigraphy and Timescale of China. *Science China Earth Sciences*, 49(1): 26–65 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, M. Y., Babcock, L. E., Peng, S. C., 2006. Advances in Cambrian Stratigraphy and Paleontology: Integrating Correlation Techniques, Paleobiology, Taphonomy and Paleoenvironmental Reconstruction. *Palaeoworld*, 15(3/4): 217–222. <https://doi.org/10.1016/j.palwor.2006.10.016>
- Zhu, M. Y., Strauss, H., Shields, G. A., 2007. From Snowball Earth to the Cambrian Bioradiation: Calibration of Ediacaran-Cambrian Earth History in South China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 254(1/2): 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2007.03.026>
- Zhu, M., Zhuravlev, A. Y., Wood, R. A., et al., 2017. A Deep Root for the Cambrian Explosion: Implications of New Bio- and Chemostratigraphy from the Siberian Platform. *Geology*, 45(5): 459–462. <https://doi.org/10.1130/g38865.1>

附中文参考文献

- 安志辉, 童金南, 叶琴, 等, 2018. 湖北宜昌樟村坪地区陡山沱组地层划分与对比. *地球科学*, 43(7):2206–2221.
- 郭俊锋, 2009. 湖北宜昌早寒武世岩家河生物群研究(博士学位论文). 西安:西北大学, 1–158.
- 罗惠麟, 蒋志文, 徐重九, 等, 1980. 云南晋宁梅树村、王家湾震旦系—寒武系界线研究. *地质学报*, (2):13–85.
- 潘时妹, 冯庆来, 常珊, 2018. 湖北宜昌寒武系组芬兰统岩家河组小壳化石. *微体古生物学报*, 35(1):30–40.
- 彭善池, 2006. 全球寒武系年代地层新划分. *中国科学院院刊*, 21(4):325–328.
- 钱逸, 何廷贵, 1996. 再论滇东前寒武系与寒武系界线剖面. *微体古生物学报*, (3): 225–240.
- 王丹, 凌洪飞, 李达, 等, 2012. 三峡地区岩家河埃迪卡拉系—寒武系界线剖面碳同位素地层学研究. *地层学杂志*, 36(1):21–30.
- 汪啸风, 倪世钊, 曾庆鑫, 1987. 长江三峡地区生物地层学. 北京:地质出版社, 43–137.
- 朱茂炎, 杨爱华, 袁金良, 等, 2019. 中国寒武纪综合地层和时间框架. *中国科学:地球科学*, 49(1): 26–65.