

# 陕南寒武系宽川铺组具多级四分体细胞结构的微体化石<sup>\*</sup>

郑亚娟<sup>1,3)\*</sup> 姚肖永<sup>1,3)</sup> 韩 健<sup>2,3)</sup> 郭俊锋<sup>1,3)</sup>

1) 长安大学地球科学与资源学院, 西安 710054, yajuanzheng@126.com;

2) 西北大学地质系及大陆动力学国家重点实验室, 西安 710069;

3) 陕西省早期生命与环境重点实验室(西北大学), 西安 710069

**提要** 我国华南扬子板块埃迪卡拉纪—寒武纪的含磷地层中产有丰富的呈现分裂特征的多细胞球状化石。由于有效信息的缺乏, 长期以来, 这些球状化石的生物属性及分类存在争议。我们在陕南寒武系宽川铺组获得的一些保存精美的分裂型球状化石, 具有明显的多级四分体结构, 通过与同层位产出的动物卵裂期胚胎化石、瓮安生物群中四分体结构的藻类化石对比, 结果表明这些分裂球形化石很可能为多细胞藻类。

**关键词** 藻类化石 球状化石 四分体 宽川铺生物群

## 1 引 言

磷酸盐化多细胞球状化石是指由多个分裂细胞组成的球形、近球形定形体, 是近 20 多年来才相继发现的一类微体化石, 主要保存在华南埃迪卡拉系陡山沱组和寒武系下部梅树村阶的含磷地层中(钱逸, 1977; 薛耀松等, 1995; 岳昭、Bengtson, 1998; Xiao *et al.*, 1998; Yue and Bengtson, 1999)。陡山沱期的多细胞球状化石主要产自贵州瓮安生物群, 薛耀松等于 1995 年报道了瓮安生物群中的具分裂体状的多细胞球状化石, 且将它们归为绿藻纲的团藻目或色球藻目(薛耀松等, 1995); 1998 年 Xiao 等在《自然》上撰文, 根据这些化石的个体大小、细胞的分裂及排列方式等, 认为瓮安磷矿中的部分磷酸盐化球状化石属于后生动物的卵或胚胎化石(Xiao *et al.*, 1998)。此后, 关于此类化石生物属性的争议一直在继续(肖书海、Knoll, 1999; 薛耀松等, 1999; Xiao and Knoll, 2000; Xiao *et al.*, 2002; Bailey *et al.*, 2007; Hultgren *et al.*, 2012), 目前还未形成统一认识。

寒武纪梅树村期宽川铺生物群中的多细胞球状化石含量较少, 1977 年钱逸将此类化石归入了

*Pseudo-ooides* 属, 并认为可能是动物的蛋化石(钱逸, 1977)。近年来, 宽川铺生物群中陆续发现了从囊胚期到幼体发育阶段的动物化石(岳昭、Bengtson, 1998; 李朋等, 2007; 董熙平, 2009; Bengtson *et al.*, 1997; Yasui *et al.*, 2013), 然而仅有数枚可靠处于分裂期的动物胚胎化石材料(李勇等, 2012; Yasui *et al.*, 2013), 远远少于囊胚期以后的化石标本。许多具有分裂细胞的多细胞球状化石, 虽然具有分类意义的特征很少, 也常常被视为卵裂期的胚胎化石(岳昭、Bengtson, 1998; 董熙平, 2009; Yue and Bengtson, 1999), 从而导致了多细胞球状化石分类的混乱。尽管多细胞球状化石与分裂期的动物胚胎化石在外形上有一定的相似性, 两者亦常常共生, 但二者之间还存在诸多不同。目前看来, 这些磷酸盐化多细胞球状化石是多源的, 既有一部分动物胚胎化石, 也有一部分植物藻类化石, 甚至可能属于单细胞生物(如蓝细菌)。因此, 如何区分这些磷酸盐化多细胞球状化石的分类属性, 是当前乃至今后一段时期内的迫切任务之一。本文以宽川铺生物群中获取的大量分裂球状化石为研究材料, 通过对这些化石外部形态结构的观察, 探讨宽川铺生物群中多细胞球状化石的分类及属性等问题。

收稿日期: 2017-10-16

\* 国家自然科学基金(Nos.: 41472015, 41672009, 41621003, 417720104002); 中央高校基金(No. 310827171013)资助。

\*\* 通讯作者。

## 2 材料与方法

将需要酸泡处理的宽川铺组含磷灰岩样品放入干净的塑料容器中,用浓度为5%—10%的工业醋酸或3%—8%氢氟酸进行浸解,每隔2—3天进行样品清洗和酸溶液更换。经酸溶后的残渣用120目的分样筛将样品筛洗分离,然后自然晾干或者在恒温箱烘干,最后用实体双目立体镜手工挑选获得化石标本。将挑选出的标本进行分类统计,并进一步选取形态完整的化石及新物种的化石标本,有序地用导电胶布粘在导电金属靶上,使用FEI Quanta 400 FEG电镜进行SEM扫描成像。

## 3 化石描述

本文所介绍这一类多细胞分裂状化石具有明显的四分体结构,是由多个分裂细胞紧密堆积而组成的定形体。这些多细胞分裂状化石形态饱满,个体浑圆,由此可见在其形成化石的过程中并未受到挤压变形,不规则状球形化石也应代表了生物的原形。从化石表面观察,可以看到每个分裂细胞表现为不规则的三角形、四边形甚至五边形结构。每个细胞之间具有清晰的界线,呈现为一些或长或短的分裂沟或者分裂纹。这些多边形的细胞常常四个一组,并且在四个细胞之间形成呈十字形、或“田”字形的分裂沟,代表典型的四分体结构。而有些细胞3、5、6个一组,则形成三分体或者多边形结构。为了描述方便,我们统称其为四分体结构。多细胞分裂状化石根据外部形态大致可分为球形定形体和不规则状定形体。

### 3.1 球形定形体

球形定形体外形呈球形(插图1A,1C,1E)或近球形(插图1B,1D,1F,1G),有的如菜花状(插图1H,1I)。直径在280—550  $\mu\text{m}$ 之间,现有的标本表面未观察到有机膜状结构包裹,呈裸露状。

在球体的表面,分裂纹长度、深浅不同,因此可以依据分裂纹深浅将其分为一级分裂、二级分裂及三级分裂等等。一级分裂(FC)的分裂纹深而且粗(插图1中FC箭头所指),将整个球体分割成两个半球,一级分裂纹大致处于同一个平面(插图1C)。二级分裂将两个半球又分成两部分,该分裂纹与一级分裂纹正交。在有些化石表面,二级分裂不甚明

显,但是可以看到细胞明显成团,大致占分裂球1/4的体积大小(插图1G)。在一、二级分裂分割出来的细胞团中,还可以识别更多层次的更浅一些十字形或交叉形的分裂纹,代表了三级或更多层次的分裂(插图1中SC箭头所指)。而更深层次的分裂纹清楚显示出了四分体的特征,即球体表面的多边形在平面内以十字形、交叉形被分为四个单细胞,代表最基本的细胞组合方式。

各个单元中的最小一级的分裂纹多数表现为十字形的正交,即构成四分体结构的各细胞之间的位置没有发生明显的相互错动(插图1B、1D、1F),仅有少数细胞之间的位置发生了错动,如插图1E、1I中箭头所指,有些细胞之间表现出T型的结构(插图1黑色箭头所示),有些表现出Y型的结构(插图1黑色圈内所示)。而在上一级的分裂中,各个多边形(由四个四分体结构组成)之间发生明显的位置错动,各多边形之间表现出T型和Y型构架。

### 3.2 不规则状定形体

不同于球形定形体,不规则状定形体外形呈哑铃型或者马鞍形等形状,有些局部呈丘状,在这些标本中四分体分裂特征也同样存在,如插图2A中,哑铃型标本由两个球形单元组成,之间具有一条明显的接缝;球形单元表面被分裂成若干单细胞,单细胞的大小不均一,大的直径可达105  $\mu\text{m}$ ,小的直径仅有25  $\mu\text{m}$ ,在两个球体的接缝处,细胞被拉长成长柱型。在细胞的表面还可见许多微孔(插图2B),每个细胞上约有1—4个微孔,这些微孔多位于细胞的中央部位,如果为原生构造,推测为鞭毛的着生部位,但这些微孔也难以排除为成岩次生结构。在插图2C中,标本呈扁平的不规则形,表面以四分、六分的形式分成许多单细胞,这些单细胞表现为不规则的多边形;分裂比较均一,每个单细胞大小基本一致。在插图2D—E中,姜状的定形体表面可以识别三级分裂纹。一级分裂纹是一些同心辐射状分布的细胞分裂纹,夹角约50°,将整个化石分成6—7个不均匀的三角块状部分。二级分裂纹分布没有规律,将8—9个细胞组成一团。三级分裂纹多呈Y形,代表分裂过程中错动现象非常普遍。

## 4 对比与讨论

### 4.1 与埃迪卡拉纪—寒武纪动物胚胎的对比

引起卵裂期动物胚胎化石和具四分体结构的分

裂状化石分类混乱的主要原因是二者存在许多相似性。首先,在形态上,具四分体的分裂化石除了一部分不规则的定形体外,其余的都和卵裂期动物胚胎

化石相似——呈现出球体状。再加上二者具有相似的分裂特征,相同的产出层位等,这些因素常常给它们的分类带来困扰。

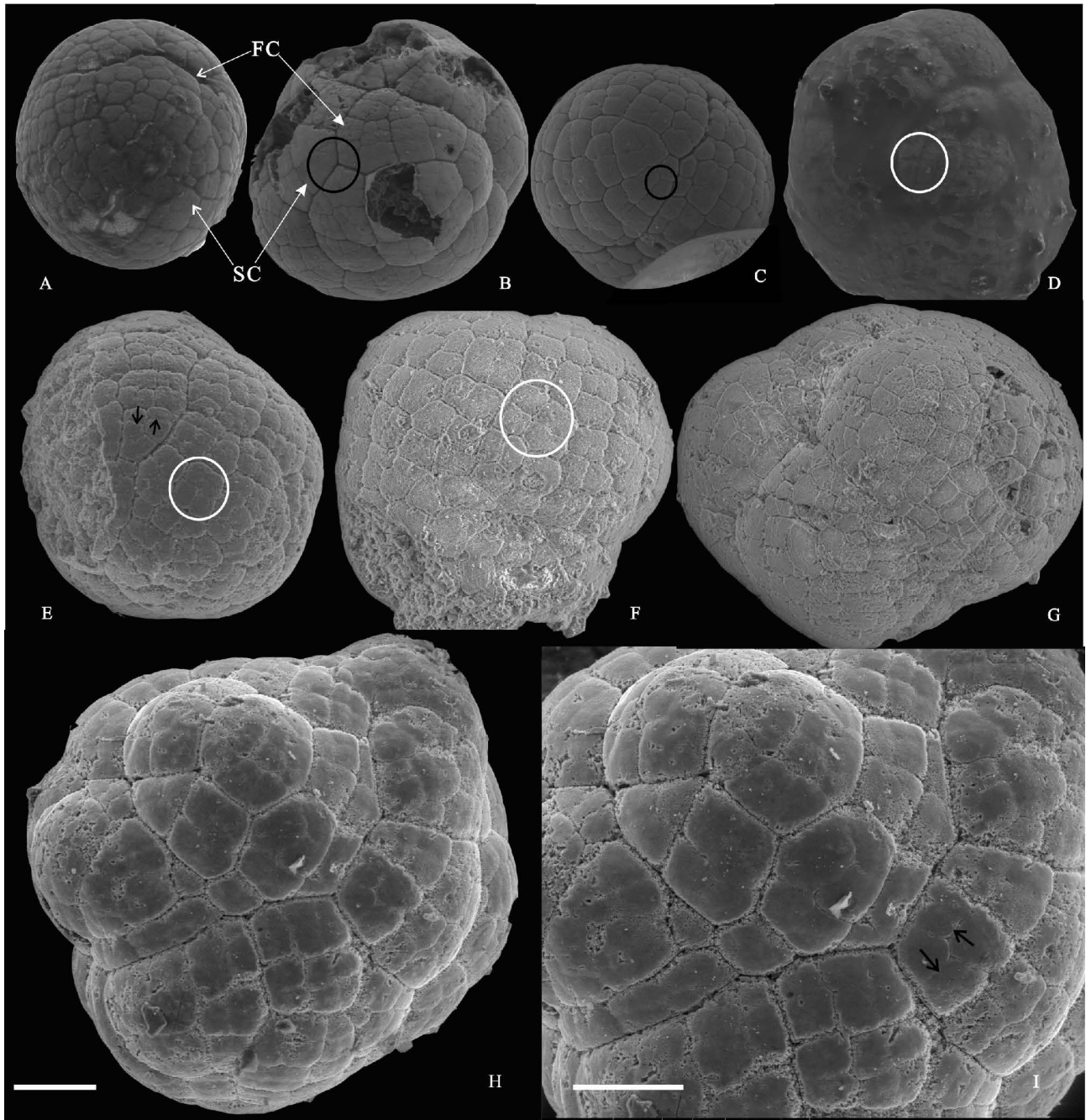


插图 1 陕南宽川铺生物群中的具四分体结构的球状藻类化石

The spheroidal algal fossils with tetrad structures from the Kuanchuanpu biota in southern Shaanxi

A, D, E. 示规则球体状的四分体藻类化石, 标本号分别为: ELISN075, ELISN069, ELISN045; B, C, F, G. 示不规则球体状的四分体藻类化石, 标本号分别为: ELISN074, ELISN038, ELISN037, ELISN074; H. 示菜花状的四分体藻类化石, I 为 H 的局部放大, 标本号: ELISN049. FC 示一级分裂, SC 示二级分裂; 白色圈内示四分体的分裂结构; 黑色圈内示细胞间的 Y 型构架; 黑色箭头示细胞间的 T 型构架。图 A—I 比例尺: 100  $\mu\text{m}$ 。

A, D, E. Show the regular spheroidal algal fossils with tetrad structures, the specimen numbers are ELISN075, ELISN069, ELISN045 respectively; B, C, F, G. Show the irregular spheroidal algal with tetrad structures, the specimen numbers are ELISN074, ELISN038, ELISN037, ELISN074 respectively; H. Show cauliflower-like algal fossil with tetrad structure, I is enlargement of H, the specimen number is ELISN049. FC shows the first division and SC shows the second division; Tetrad structures is shown as the white circle; Y-type framework between cells is shown as the black circle and T-type framework between cells is shown as black arrow. Scale bars represent 100  $\mu\text{m}$  in A-I.

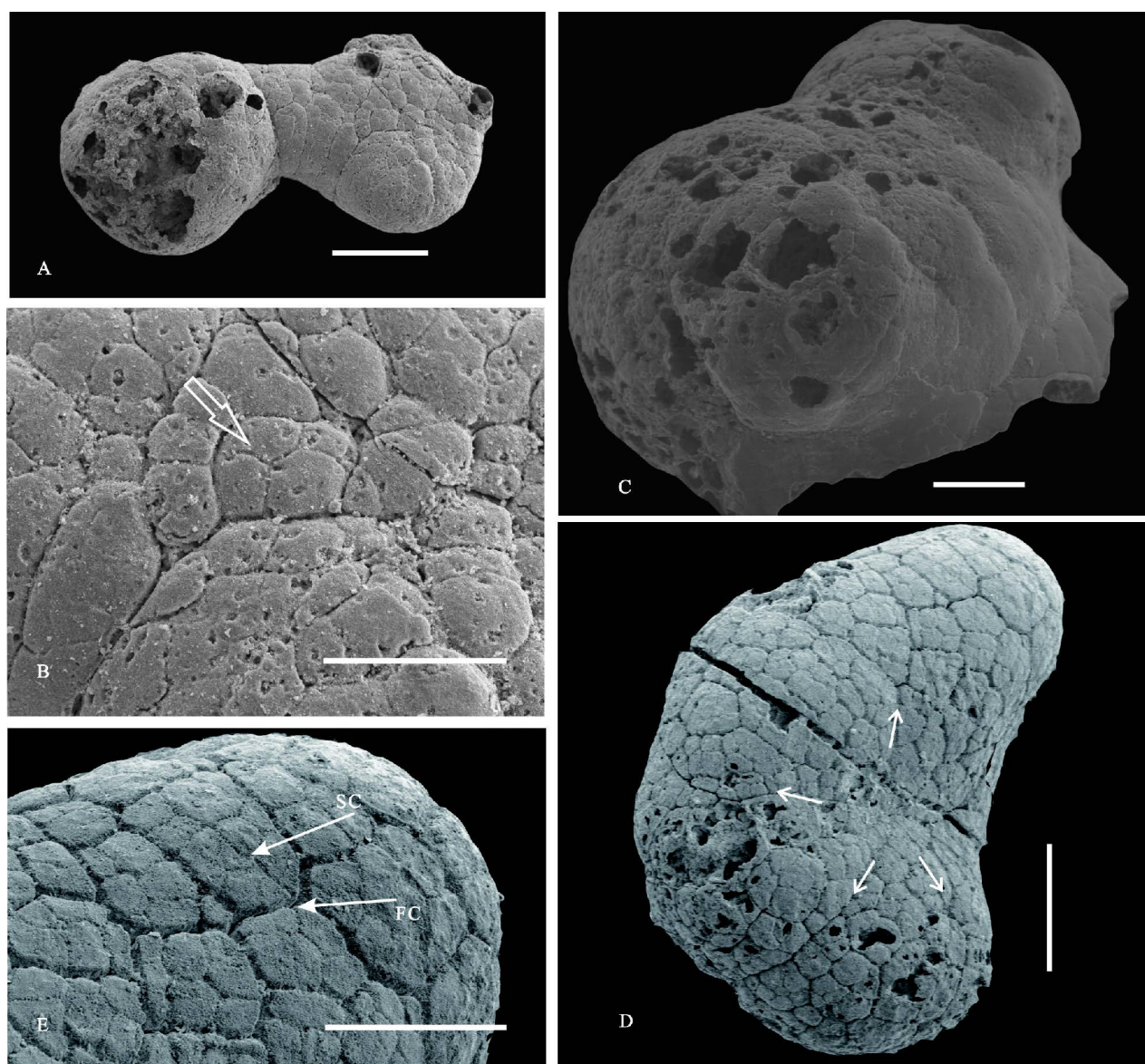


插图2 陕南宽川铺生物群中的具细胞分裂结构的非球状藻类化石

The non-spherical algal fossils with cleavage structures from the Kuanchuanpu biota in southern Shaanxi

A. 哑铃状藻类化石, 标本号为 ELISN128。B. A 的局部放大, 箭头示细胞上的微孔构造。C—E. 为不规则状的藻类化石, 示四分体分裂结构: C. 标本号为: ELISN061; D. 姜状的藻类化石, 白色箭头示辐射状的一级分裂纹, 标本号为: KP3; E. D 的局部放大。FC 示一级分裂, SC 示二级分裂。比例尺: A 为 250  $\mu\text{m}$ , B—E 为 100  $\mu\text{m}$ 。

A. The dumbbell-shaped algal fossils, specimen number; ELISN128. B. Enlargement of A, the micropore on the cell shown as arrow. C—E. The irregular algal fossils, show the tetrad structures; C. Specimen number; ELISN061; D. Ginger-like algal fossils, the radial first division is shown as the white arrow, specimen number; KP3; E. Enlargement of D. FC shows the first division and SC shows the second division. Scale bars represent 250  $\mu\text{m}$  in A, 100  $\mu\text{m}$  in B—E.

然而, 动物胚胎化石和具四分体结构的分裂化石仍然存在明显的差异: (1) 二者大小差异明显, 卵裂期动物胚胎化石直径在 460—580  $\mu\text{m}$ , 四分体分裂球状化石直径大多集中在 270—330  $\mu\text{m}$ , 只有少数的不规则球状体直径在 500  $\mu\text{m}$  左右, 因此, 卵裂期的动物胚胎化石普遍大于具四分体结构的球状化石。(2) 分裂细胞的大小不同, 宽川铺组具有四分体

结构的分裂化石细胞都非常小(直径 15—40  $\mu\text{m}$ ), 而在相同层位卵裂期动物胚胎中的细胞较大(直径约 100  $\mu\text{m}$ ), 毫无疑问, 这些细胞在正常自然状态下仍会继续分裂, 但更多层次分裂的具有更小细胞的化石至今未被发现, 这个可能与保存因素相关。(3) 从整体形态上观察, 寒武纪确切无疑的动物胚胎化石多数外面都包裹有卵膜 (Han *et al.*, 2013,



2016), 由于有卵膜的包裹, 动物细胞的分裂受卵膜的限制, 外观都呈规则的球体(插图 3), 很少形成不规则状、菜花状, 或凸起状的似球体。宽川铺组的具四分体结构的分裂化石外面均没发现有机膜的包裹, 球体中间没有发现空腔; 整体形态除了比较规则的球形体外还有一部分非球体的化石(插图 2)。(4) 分裂细胞及分裂特征不同。动物卵裂期的胚胎化石, 其中的每个分裂细胞呈球体状, 边缘光滑, 多个细胞之间缺少可识别的共同的分裂沟, 因此很难追寻细胞之间的先后分裂关系。宽川铺组中的四分体结构的分裂化石每个细胞边缘尖锐, 表面呈多边形; 每个细胞之间可能由于细胞壁及空间的限制没有发生太多的偏移, 排列紧密, 四分体结构明显,

可以追寻出细胞之间的分裂级数及分裂的先后顺序。如插图 1B 中, 可以清楚地观察到在最末次分裂后, 四个细胞组成一个四分体结构, 而四个四分体又组成一个大的多边形状的细胞集合体, 多个细胞集合体又相互集结组成了整个球状体, 三级分裂明显呈列。(5) 卵裂期动物胚胎化石的相邻细胞之间常常伴有次生的很短的粘膜状的丝状体(插图 3E), 目前研究认为是微生物的降解产物(Yin *et al.*, 2014)。而具有四分体结构的分裂化石各细胞间紧密堆积, 之间未发现粘膜状的丝状体, 即没有微生物的作用痕迹。以上种种差异表明, 宽川铺组具四分体结构的生物化石很难归入到卵裂期的动物胚胎化石。

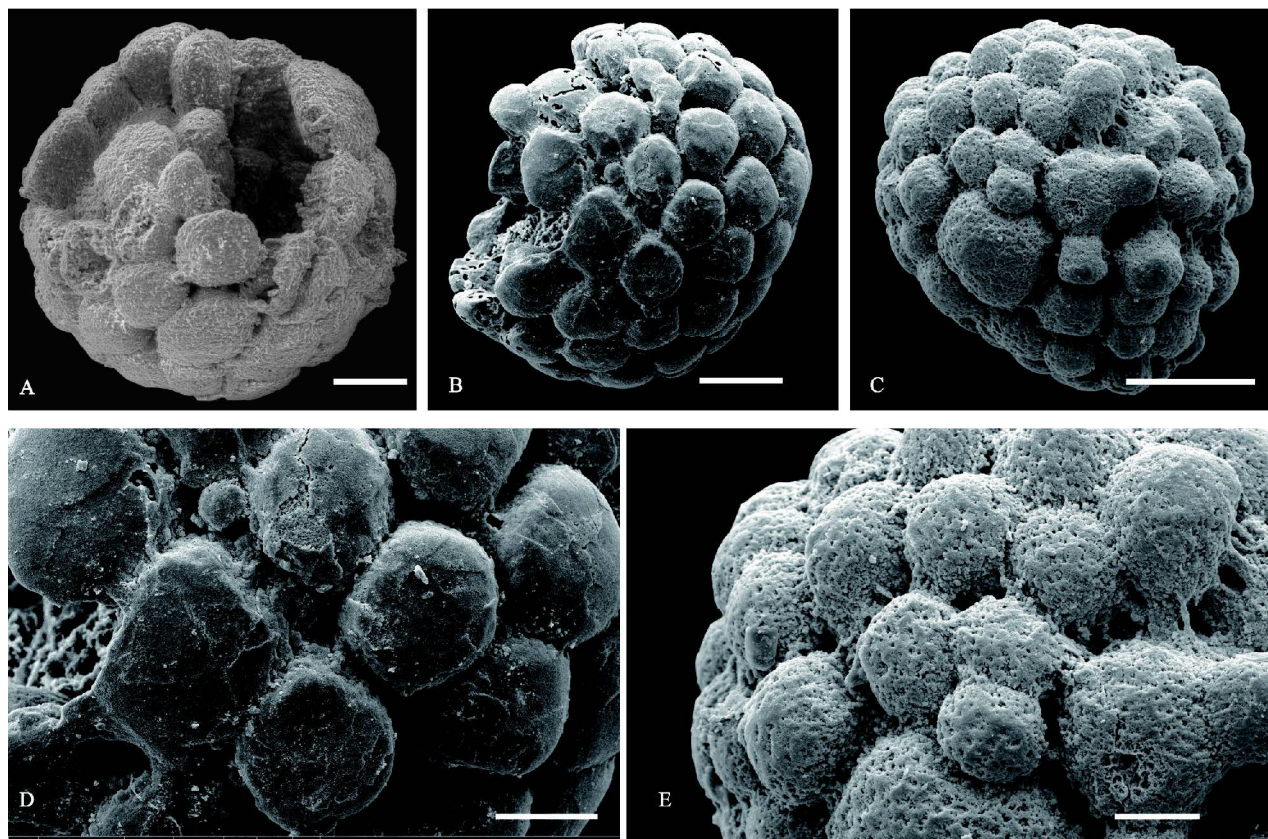


插图 3 陕南宽川铺生物群中的卵裂胚胎化石

The cleavage-gastrulae embryo fossils in the Kuanchuanpu biota in southern Shaanxi

宽川铺生物群中的卵裂期-原肠胚期的胚胎化石, 标本号分别为: ELISN025, ELIXX43, ELIXX63。A 的比例尺为 100  $\mu\text{m}$ , B、C 的比例尺为 200  $\mu\text{m}$ ; D 为 B 的局部放大, 比例尺 50  $\mu\text{m}$ ; E 为 C 的局部放大, 比例尺 50  $\mu\text{m}$ 。

The cleavage-gastrulae embryo fossils in Kuanchuanpu biota. The specimen numbers are ELISN025, ELIXX43 and ELIXX63 respectively. D is enlargement of B, E is enlargement of C. Scale bars represent 100  $\mu\text{m}$  in A, 200  $\mu\text{m}$  in B-C, 50  $\mu\text{m}$  in D-E.

#### 4.2 与蓝细菌的对比

四分体结构在蓝细菌及藻类化石中屡见不鲜。全球范围内最早关于具四分体结构的生物化石报道是 1971 年, 一类保存在澳大利亚新元古代苦泉组

(距今约 10 亿年) 的具 4 个细胞的包裹曾经被解释为两次减数分裂产生的四分体(Schope and Blasic, 1971), 但后来由于在同一化石群中发现有 3 个和不等数目的细胞包裹存在, 以及细胞之间的距离不等而被否定, 并被重新解释为蓝细菌(Golubic and

Barghoon, 1977)。我国对此类藻类化石的报道始于1985年,曹芳描述了陡山沱期的具有四分结构的藻类化石,并建立了拟四分球藻属、多样拟四分球藻属,藻体主要为田字形的四胞体(曹芳,1985)。真正具四分体结构的藻类化石研究始于1978年,Oehler将细胞呈平面或交叉四分体状、二分细胞状及八分细胞构成的群集体藻类化石建立新属——四分藻属(*Tetraphycus*),并归于蓝细菌门的色球藻科中(Oehler, 1978);1982年刘志礼在蓟县雾迷山组发现了此类化石,并将其归入球藻目(刘志礼,1982)。随后,刘雪娴报道了睢宁九顶山组的四分藻属化石,并发现了其生殖构造孢子囊,为该属的分类提供了极好的证据(刘雪娴等,1984)。1987年,尹磊明报道了宽川铺生物群的球状藻类化石,并将由2—8个细胞组成的球聚体藻类化石归入*Tetraphycus*属(尹磊明,1987),但该属缺乏四分细胞状或交叉四分细胞状的群集体。贵州陡山沱组瓮安生物群中富含大量的具四分体结构的生物化石——*Paratetraphycus*和*Sarcinophycus*,*Paratetraphycus*由袁训来等首次报道(袁训来等,1993),*Sarcinophycus*由Xiao首次报道(Xiao *et al.*, 1998),并由Xiao和Knoll正式命名(Xiao and Knoll, 1999)。之后,这两个属名被认为是*Archaeophycus*的同物异名(Dong *et al.*, 2009; Xiao *et al.*, 2014; Schopf *et al.*, 2015; Joshi and Tiwari, 2016)。此外有关该生物属性的研究成果在国内外重要刊物上相继发表,提出了可能为红毛藻类、绿藻的观点(袁训来等, 2002; Zhang *et al.*, 1998; Xiao and Knoll, 1999),但均不具有确切证据,目前仍被归入蓝细菌。

这些研究成果表明,四分体结构是蓝细菌中一种常见的分裂方式,也是判断其分类的一种重要依据。瓮安生物群中的*Archaeophycus*与宽川铺生物群中的四分体结构生物都具有四分体的结构特征,均表现出四分体的生殖、生长方式,但是二者无论在藻体形态、分裂特征及细胞形态方面有着明显的区别:(1)陡山沱期瓮安生物群中的*Archaeophycus*特征是十字形四分体,有时有单细胞体、二分体及八分体,在大多数情况下,两个细胞的分裂面在四分体中并不在同一个面,呈现出一个独立的小球体(插图4)(Zhang *et al.*, 1998; Xiao and Knoll, 1999)。而且每个分裂细胞之间的位置发生了相互错动,呈现出T型的构架(Xiao, 2002)。在宽川铺生物群中,四分体结构的藻类化石其主要特征是每个细胞表现为不规则的三角形、四边形甚至五边形结构,这些多

边形的细胞常常四个一组,并且在四个细胞之间形成呈十字形或交叉形的四分体结构;每个细胞之间的位置错动不是很明显,少数错动的细胞间呈现T型或Y型构架,分析原因可能是由于细胞分裂刚刚发生,甚至还未完成,因而位置没发生变化;而少数位置发生错动的细胞则可能是分裂已经完成,位置的错动有可能是为下次的分裂做准备。在这些四分体藻类化石中,位置错动的主要发生在上一级的结构单元中,细胞单元之间的Y型构架明显,由此可以看出,随着分裂的发生,细胞单元之间的位置移动愈加明显。(2)*Archaeophycus*属的原植体为单细胞体、二分体、四分体或八分体细胞似透镜状细胞的堆叠,几十至几百微米厚,并向两端变窄,整个原植藻体呈松散的细胞聚合体,有时为复杂的网格状且形成放射状排列,细胞间排列致密(Xiao and Knoll, 1999)。宽川铺生物群中的四分体藻类化石其原植体为球体状或非球体状的定形体,细胞以及细胞团之间排列更加紧密。这些不同的原植体结构也造成二者之间细胞构架的不同,在*Archaeophycus*中,原植体是松散堆积,各单元之间位置不受空间的限制,因此细胞的错动较容易发生;而宽川铺生物群中的具四分体结构的生物化石中,其原植体为定形体,各四分体结构之间排列紧密,空间受到了限制,因此细胞之间的错动不易发生。(3)辐射状的分裂纹或者分裂面在宽川铺四分体藻类化石中较为常见,但是在瓮安生物群中未见报道。

尽管本文报道的四分体生物同蓝细菌都具有相似的四分体结构,但蓝细菌为单细胞个体或群体,细胞数目仅有数个,四分体的内部细胞之间相互独立,界限分明,每个四分体之间没有直接联系,这些特征明显不同于宽川铺生物群中的多级四分体结构的多细胞生物化石,因此宽川铺组具四分体结构的生物化石不属于蓝细菌类。

#### 4.3 与多细胞藻类的对比

多细胞藻类在埃迪卡拉纪已经很发育,主要是以分枝状的宏体藻类化石和多细胞的微体藻类化石为主。华南陡山沱期宏体藻类化石常见于安徽休宁蓝田生物群、湖北庙河生物群、贵州瓮安生物群,这些宏体藻类化石以炭质压膜为特征,没有保存真正的多细胞结构(丁莲芳等,1992;王约等,2007;袁训来等,2016)。多细胞微体藻类化石在瓮安生物群中非常常见,代表类型主要有球形瓮安藻 *Wengania globosa*、精美瓮安藻 *Wengania exquisita*、束状伞形



藻 *Gremiphyca corymbiata*、皮状拟原叶藻 *Thallophycoides phloeatus*、皱纹原叶藻 *Thallophyca corrugata* 等,这些藻类保存了假薄壁组织、顶端分生组织、薄壁组织及组织发生分化的原植体,有些藻类还保存了繁殖结构,如果孢子体、果孢子囊和孢囊群,其中在孢子囊中保存了四分体、八分体及多分体结构(袁训来等,2002)。这些多细胞藻类和宽川铺组的具四分体结构生物化石的相似性在于:(1)外部无有机膜的包裹,细胞数量庞大。(2)细胞排列紧

密。(3)原植体具有一定的外形,尤其是插图 2A 的不规则状化石和陕西勉县陡山沱组球形瓮安藻 *Wengania globosa* 都具有双球状的外形;图 1H 的菜花状化石和束状伞形藻 *Gremiphyca corymbiata* 都具有相似的隆突,并在外部都有四分体状或网格状的结构。这些相似性暗示了宽川铺生物群中的四分体化石可能属于多细胞藻类,但仍需要大量的化石材料和内部结构信息来进一步判断它们之间的联系以及其更确切的分类位置。

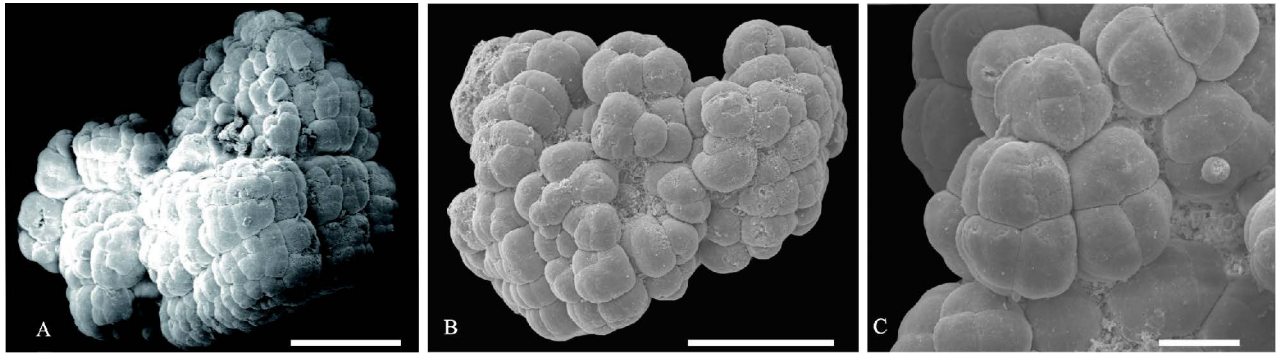


插图 4 贵州埃迪卡拉系陡山沱组瓮安生物群中具四分体结构的藻类化石

The algal fossils with tetrad structures in the Weng'an biota from the Doushantuo Formation in Guizhou

瓮安生物群中具有四分体结构的藻类化石。A, B 的标本号分别为: WA11、WA36; C 为 B 的局部放大。A, B 的比例尺 200  $\mu\text{m}$ ; C 的比例尺 50  $\mu\text{m}$ 。

The algal fossils with tetrad structures in the Wengan biota. The specimen numbers of A and B are WA11 and WA36 respectively; C is enlargement of B. Scale bars represent 200  $\mu\text{m}$  in A-B, 50  $\mu\text{m}$  in C.

## 5 结论及问题

我国寒武纪—埃迪卡拉纪地层中含有大量的多细胞球状化石,这些多细胞球状化石的组成是多源的,既包含了卵裂期动物胚胎化石,亦有藻类化石。宽川铺生物群中具四分体结构的生物化石不仅具有独特的四分体结构,亦不同于同层位中的卵裂期动物胚胎化石,这些特征表明具四分体结构的生物化石可能为藻类。

迄今为止,对微体藻类化石的分类命名仍主要根据形态学的特征,四分体形态是此藻类化石分类的主要根据之一,然而在蓝细菌、红藻、绿藻等藻类中均可见四分体的结构,因此仅根据四分体来判断其生物学属性容易因掌握的信息不足而产生误判。但我们根据其原植体的形态、细胞的数量及排列方式可以判断出宽川铺生物群中具四分体结构的生物化石与多细胞藻类的某种关联,而其确切的生物学分类仍有待于更多化石材料的支撑。

致谢 感谢审稿专家们提出的宝贵意见。

## 参 考 文 献 (References)

- Bailey J V, Joye S B, Kalanetra K M, Flood B E, Corsetti F A, 2007. Evidence of giant sulphur bacteria in Neoproterozoic phosphorites. *Nature*, **445**(11): 198—201.
- Cao Fang (曹 芳), 1985. The new data of algal microfossils from Sinian Doushantuo Formation. *Bulletin of the Tianjing Institute of Geology and Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences* (中国地质科学院天津地质矿产所所刊), **12**: 183—193 (in Chinese with English abstract).
- Ding Lian-fang (丁莲芳), Zhang Lu-yi (张录易), Li Yong (李 勇), Dong Jun-she (董军社), 1992. The Study of the Late Sinian-Early Cambrian Biota from the Northern Margin of Yangtze Platform. Beijing: Scientific and Technical Documents Publishing House. 1—156 (in Chinese with English abstract).
- Dong Lin, Xiao Shu-hai, Shen Bing, Zhou Chuan-ming, Li Guo-xiang, Yao Jin-xian, 2009. Basal Cambrian microfossils from the Yangtze Gorges area (South China) and the Asku area (Tarim Block, northwestern China). *Journal of Paleontology*, **83**(1): 30—44.
- Dong Xi-ping (董熙平), 2009. The anatomy, affinity, and developmental sequences of Cambrian fossils embryos. *Acta Palaeontologica Sinica* (古生物学报), **48**(3): 390—401.

- Golubic S, Barghoun E S, 1977. Interpretation of Microbial Fossils with Special Reference to the Precambrian, Fossil Algae. Berlin; Springer-Verlag. 1—14.
- Han Jian, Kubota S, Li Guo-xiang, Ou Qiang, Yao Xiao-yong, Shu De-gan, Li Yong, 2016. Divergent evolution of medusozoan symmetric patterns: Evidence from the microanatomy of Cambrian tetramerous cubozoans from south China. *Gondwana Research*, **31**: 150—163.
- Han Jian, Kubota S, Li Guo-xiang, Yao Xiao-yong, Yang Xiao-guang, Shu De-gan, Li Yong, Kinoshita S, Sasaki O, Komiya T, Yan Gang, 2013. Early Cambrian pentamerous cubozoan embryos from South China. *PlosOne*, **8**(8): e70741.
- Huldtgren T, Cunningham J A, Yin Chong-yu, Stampanoni M, Marone F, Donoghue P C J, Bengtson S, 2012. Fossilized nuclei and germination structures identify Ediacaran “animal embryos” as encysting protists. *Science*, **334**: 1696—1699.
- Joshi H, Tiwari M, 2016. *Tianzhushania spinosa* and other large acanthomorphic acritarchs of Ediacaran Period from the Infrakrol Formation, Lesser Himalaya, India. *Precambrian Research*, **286**: 325—336.
- Li Peng(李朋), Hua Hong(华洪), Zhang Lu-yi(张录易), Zhang Dong-dong(张东东), Jin Xian-bao(金显宝), Liu Zhu(刘竹), 2007. Lower Cambrian phosphatized *Punctatus* from southern Shaanxi and their ontogeny sequence. *Chinese Science Bulletin (科学通报)*, **52**(20): 2820—2828.
- Li Yong(李勇), Zheng Ya-juan(郑亚娟), Liu Yun-huan(刘云焕), Guo Jun-feng(郭俊峰), Zheng Xi(郑曦), Liu Lian-qun(刘联群), 2012. Discovery of cleavage *Punctatus* embryos fossils from early Cambrian Kuanchuanpu biota. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences(地球科学——中国地质大学学报)*, **37**(5): 869—877.
- Liu Xue-xian(刘雪娴), Liu Zhi-li(刘志礼), Zhang Lun(张仑), Xu Xue-si(徐学思), 1984. A study of late Precambrian microfossils algal community from Suining County, Jiangsu Province. *Acta Micropalaeontologica Sinica(微体古生物学报)*, **1**(2): 171—182 (in Chinese with English abstract).
- Liu Zhi-li(刘志礼), 1982. Microfossil algal communities from the Wumishan Formation in Jixian, China, and their geological significance. *Journal of Nanjing University, Album of Algae(南京大学学报, 藻类专辑)*: 121—166 (in Chinese with English abstract).
- Oehler D Z, 1978. Microflora of the Middle Proterozoic Balbirini Dolomite(McArthur Group) of Australia. *Alcheringa*, **2**(3-4): 269—309.
- Qian Yi(钱逸), 1977. Hyolitha and some problematica from the Lower Cambrian Meishucunian stage in central and S. W. China. *Acta Palaeontologica Sinica(古生物学报)*, **16**(2): 255—275 (in Chinese with English abstract).
- Schope J W, Blasic J M, 1971. New microorganisms from the Bitter Springs Formation (Late Precambrian) of the North-Central Amadeus Basin, Australia. *Journal of Paleontology*, **45**: 925—960.
- Schopf J W, Sergeev V N, Kudryavtsev A B, 2015. A new approach to ancient microorganisms: taxonomy, paleoecology and biostratigraphy of the Lower Cambrian Berkuta and Chulaktau microbiotas of South Kazakhstan. *Journal of Paleontology*, **89**(5): 695—729.
- Wang Yue(王约), Wang Xun-lian(王训练), Huang Yu-ming(黄禹铭), 2007. Macroscopic algae from the Ediacaran Doushantuo Formation in northeast Guizhou, South China. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences(地球科学——中国地质大学学报)*, **32**(6): 829—844 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Shu-hai, 2002. Mitotic topologies and mechanics of Neoproterozoic algae and animal embryos. *Paleobiology*, **28**(2): 244—250.
- Xiao Shu-hai(肖书海), Knoll A H, 1999. Embryos or algae? a reply. *Acta Micropalaeontologica Sinica(微体古生物学报)*, **16**(3): 313—323.
- Xiao Shu-hai, Knoll A H, 1999. Fossils preservation in the Neoproterozoic Doushantuo phosphorite Lagerstätte, South China. *Lethaia*, **32**: 219—240.
- Xiao Shu-hai, Knoll A H, 2000. Phosphatized animal embryos from the Neoproterozoic Doushantuo Formation at Weng'an, Guizhou, South China. *Journal of Paleontology*, **74**(5): 757—788.
- Xiao Shu-hai, Muscente A D, Chen Lei, Zhou Chuan-ming, Schiffbauer J D, Wood A D, Polys N F, Yuan Xun-lai, 2014. The Weng'an biota and the Ediacaran radiation of multicellular eukaryotes. *National Science Review*, **1**(4): 498—520.
- Xiao Shu-hai, Yuan Xun-lai, Steiner M, Knoll A H, 2002. Macroscopic carbonaceous compressions in a terminal Proterozoic shale: A systematic reassessment of the Miaohu Biota, South China. *Journal of Paleontology*, **76**(2): 347—376.
- Xiao Shu-hai, Zhang Yun, Knoll A H, 1998. Three-dimensional preservation of algae and animal embryos in a Neoproterozoic phosphorite. *Nature*, **391**: 553—558.
- Xue Yao-song(薛耀松), Tang Tian-fu(唐天福), Yu Cong-liu(俞从流), Zhou Chuan-ming(周传明), 1995. Large spheroidal chlorophyte fossils from Doushantuo Formation phosphoric sequence (late Sinian), central Guizhou, South China. *Acta Palaeontologica Sinica(古生物学报)*, **34**(6): 688—706 (in Chinese with English abstract).
- Xue Yao-song(薛耀松), Zhou Chuan-ming(周传明), Tang Tian-fu(唐天福), 1999. “Animal embryos”, a misinterpretation of Neoproterozoic microfossils. *Acta Micropalaeontologica Sinica(微体古生物学报)*, **16**(1): 1—4.
- Yasui K, Reimer J D, Liu Yun-huan, Yao Xiao-yong, Kubo D, Shu De-gan, Li Yong, 2013. A diploblastic radiate animal at the dawn of Cambrian diversification with a simple body plan: Distinct from Cnidaria? *PlosOne*, **8**(6): e65890.
- Yin Lei-ming(尹磊明), 1987. New data of microfossils from Precambrian-Cambrian cherts in Ningqiang, southern Shaanxi. *Acta Palaeontologica Sinica(古生物学报)*, **26**(2): 187—195 (in Chinese with English abstract).



- Yin Zong-jun, Liu Peng-ju, Li Gang, Tafforeau P, Zhu Mao-yan, 2014. Biological and taphonomic implications of Ediacaran fossil embryos undergoing cytokinesis. *Gondwana Research*, **25**: 1019—1026.
- Yuan Xun-lai(袁训来), Wan Bin(万 斌), Guan Cheng-guo(关成国), Chen Zhe(陈 哲), Zhou Chuan-ming(周传明), Xiao Shu-hai(肖书海), Wang Wei(王 伟), Pang Ke(庞 科), Tang Qin(唐 卿), Hua Hong(华 洪), 2016. The Lantian Biota. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers. 1—135 (in Chinese).
- Yuan Xun-lai(袁训来), Wang Qi-fei(王启飞), Zhang Yun(张 昀), 1993. Late Precambrian Weng'an biota from Guizhou, south-west China. *Acta Micropalaeontologica Sinica*(微体古生物学报), **10**(4): 409—420 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Xun-lai(袁训来), Xiao Shu-hai(肖书海), Yin Lei-ming(尹磊明), Knoll A H, Zhou Chuan-ming(周传明), Mu Xi-nan(穆西南), 2002. Doushantuo Fossils: Life on the Eve of Animal Radiation. Hefei: China University of Science and Technology Press. 1—171 (in Chinese with English abstract).
- Yue Zhao(岳 昭), Bengtson S, 1998. Phosphatized metazoan embryo fossils in Cambrian Explosion. *Chinese Science Bulletin*(科学通报), **43**: 1858—1882.
- Yue Zhao, Bengtson S, 1999. Embryonic and post-embryonic development of the Early Cambrian cnidarian *Olivoides*. *Lethaia*, **32**: 181—194.
- Zhang Yun, Yuan Xun-lai, Yin Lei-ming, 1998. Interpreting late Precambrian microfossils. *Science*, **282**: 17—83.

## MICROSCOPIC FOSSILS WITH MULTI-LEVEL TETRAD CELL STRUCTURES FROM THE CAMBRIAN KUANCHUANPU FORMATION IN SOUTHERN SHAANXI

ZHENG Ya-juan<sup>1,3)</sup>, YAO Xiao-yong<sup>1,3)</sup>, HAN Jian<sup>2,3)</sup> and GUO Jun-feng<sup>1,3)</sup>

1) School of Earth Sciences and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China, yajuanzheng@126.com;

2) Department of Geology and State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an 710069, China;

3) Shaanxi Key Laboratory of Early Life and Environments (Northwest University), Xi'an 710069, China

**Key words** Algal fossils, spherical fossils, tetrad structures, Kuanchuanpu biota

### Abstract

A large number of multicellular spherical microfossils occur in the phosphorus-bearing strata from the Ediacaran-Cambrian in South China, in which some of the large multicellular spherical fossils are characterized by cell cleavage. The affinity and classification of these spherical fossils have been controversial for a long time due to the

lack of effective anatomical information. Here we report exceptional spherical and non-spherical fossils characterized by specific multi-level, tetrad cell structures from the Kuanchuanpu Formation in southern Shaanxi. These spherical fossils are likely akin to multicellular algae in comparison with co-occurred animal embryos in the cleavage stage and algal fossils with tetrad structures from the Ediacaran Weng'an biota in South China.