

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.155>



湖北宜昌樟村坪地区陡山沱组地层划分与对比

安志辉^{1,2,3},童金南^{3*},叶琴³,田力³,赵小明^{1,2},刘圣德⁴,牟宗玉⁴

- 1.中国地质调查局武汉地质调查中心,湖北武汉 430205
- 2.中国地质调查局古生物与生命—环境协同演化重点实验室,湖北武汉 430205
- 3.中国地质大学生物地质与环境地质国家重点实验室,湖北武汉 430074
- 4.湖北省地质局第七地质大队,湖北宜昌 443100

摘要: 华南峡东地区(黄陵隆起南缘)的陡山沱组是国际上埃迪卡拉纪地层和生物与环境事件的研究热点之一,但近在咫尺的黄陵北缘陡山沱组地层研究相对较少,已有的研究不足以反映黄陵北缘陡山沱组地层的特征,甚至与黄陵南缘地区未能建立起明确的对比关系。选取了黄陵北缘樟村坪及其周边地区的4个完整的陡山沱组剖面进行研究,以完整连续的钻孔剖面为依据,配合露头剖面的宏观沉积现象,对埃迪卡拉系陡山沱组进行详细的划分和对比。将樟村坪地区陡山沱组岩石地层划分出4个岩性段,并在层序地层学上划分出两个半三级层序,层序界面分别位于陡山沱组底界、陡山沱组第二段第二亚段顶界和陡山沱组第三段与第四段分界处。通过与黄陵隆起南缘陡山沱组各段岩性比较分析,建立了南、北缘地层对比联系,从而为黄陵北缘磷矿区的地层学研究奠定了基础。

关键词: 埃迪卡拉系;陡山沱组;地层划分对比;峡东地区;樟村坪。

中图分类号: P534.31

文章编号: 1000-2383(2018)07-2206-16

收稿日期: 2018-04-10

Stratigraphic Division and Correlation of Ediacaran Doushantuo Formation in Zhangcunping Area, Yichang, Hubei Province

An Zhihui^{1,2,3}, Tong Jinnan^{3*}, Ye Qin³, Tian Li³, Zhao Xiaoming^{1,2}, Liu Shengde⁴, Mou Zongyu⁴

1.Wuhan Center of China Geological Survey, Wuhan 430205, China

2.Key Laboratory for Paleontology and Coevolution of Life and Environment, China Geological Survey, Wuhan 430205, China

3.State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

4.Seventh Geological Brigade of Hubei Geological Bureau, Yichang 443100, China

Abstract: The Ediacaran Doushantuo Formation in Yangtze Gorges area is one of the most intensively investigated units for Ediacaran biological and environmental study in the world. However, the Doushantuo Formation was less investigated in the northern Huangling area than the southern one. The correlation of Doushantuo Formation between the two areas is still unclear. Four complete sections of the Doushantuo Formation, including two drill cores and two outcrop sections, are documented in this paper. The Doushantuo Formation in the northern Huangling area is subdivided into four members. Three sequence boundaries are recognized in the Doushantuo Formation, separately at the base of Member I, the top of the second part of Member II and the boundary between Member III and Member IV. According to the lithostratigraphic and sequence stratigraphic studies, the Doushantuo Formation between the northern and southern Huangling areas can be well correlated. This study provides a

基金项目:中国地质调查局项目(Nos.1212011120787,12120114066301,121201009000161427,DD20160029)。

作者简介:安志辉(1986—),男,助理研究员,博士,主要从事古生物学和地层学研究。ORCID: 0000-0002-0502-9676。

E-mail: anzihui163@163.com

***通讯作者:**童金南,E-mail: jntong@cug.edu.cn

引用格式: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.

firm base for the stratigraphic study of the phosphate strata.

Key words: Ediacaran; Doushantuo Formation; stratigraphic division and correlation; eastern Yangtze Gorges area; Zhangcunping.

鄂西黄陵隆起周缘地区的埃迪卡拉系陡山沱组既是当代地球科学前沿研究的热点,也是我国最重要的工业磷矿层位之一。但是长期以来,这一地区存在基础科学研究与生产实践的严重脱节。

埃迪卡拉纪是地球历史上重要的成磷期,黄陵隆起北缘樟村坪地区的磷矿也主要形成于这一时期。磷矿不仅是我国重要的矿产资源,而且磷也是主要的生源要素。磷矿中保存了大量精美的微体化石(叶琴等,2015),磷与生物之间的关系还有很多未解之谜,磷矿的研究对于解开早期多细胞生命的出现及演化具有重要的科学价值。黄陵隆起南缘的峡东地区既是我国震旦系的标准命名地点(Lee and Chao, 1924)和层型参考序列(全国地层委员会,2002),又是国际上这一时期庙河生物群(朱为庆和陈孟义,1984;丁连芳等,1996; Xiao et al., 2002)和后生动物“休眠卵”(Yin et al., 2007)等生物事件,与雪球地球崩解(Jiang et al., 2003)、第二大气增氧(McFadden et al., 2008; Scott et al., 2008; Kendall et al., 2015)等环境事件研究的热点。

但近在咫尺的黄陵北缘磷矿区埃迪卡拉纪陡山沱组研究相对薄弱,与南缘峡东地区未能建立起明确的对比关系,使得峡东地区优秀的科学研究成果不能应用到黄陵北缘磷矿的生产中,从而导致了科研与生产的脱节。例如,在岩石地层方面,黄陵南缘地区陡山沱组被划分为4个岩性段(Wang et al., 1998; Zhu et al., 2003),其完整而连续的地层可以作为峡东地区地层对比的参考,陡山沱组第一段盖帽白云岩和第四段黑色页岩更是华南地区地层对比的标志层(Jiang et al., 2011)。然而,黄陵北缘从事磷矿区调查的地质工作者将陡山沱组自下而上划分为樟村坪段、胡集段、王丰岗段和百果园段(杨刚忠等,2010),其在磷矿区陡山沱组及磷矿层的对比中起到非常重要的作用,并可以指导磷矿的找矿工作。然而,其中黄陵北缘陡山沱组樟村坪段包括底砾岩、下白云岩、含钾页岩和上白云岩4个部分,究竟是其中的哪一个部分或者哪几个部分对应黄陵南缘陡山沱组第一段盖帽白云岩呢?这不仅是地层时代对比问题,对于磷矿层的成因认识也具有至关重要的作用。另外,黄陵北缘樟村坪地区陡山沱组第四段为一套灰黑色薄层状白云岩,而非黑色页岩,那么黑色页岩究竟是缺失了,还是沉积相变,目前还存在争议。

同时,由于地层划分对比的不统一,可能会得到矛盾的结论。例如,黄陵北缘樟村坪地区已经报道的碳同位素特征显示在陡山沱组下部暴露面附近发生了明显的碳同位素异常(Zhu et al., 2007, 2013; Yuan et al., 2011; 李小霞, 2014; Wang et al., 2017; Zhou et al., 2017),然而此次碳同位素异常具有对应到陡山沱组第二段中部的 WANCE 异常(Zhu et al., 2013)和对应到陡山沱组第二段上部的 EN2 异常(Yuan et al., 2011; Zhou et al., 2017)的不同观点。大量微体化石的研究表明,樟村坪地区陡山沱组中的化石组合与瓮安及峡东地区陡山沱组中的微体化石组合相似(Liu et al., 2009, 2013; McFadden et al., 2009; 陈寿铭等, 2010; 叶琴等, 2015),但是同时存在着这套化石组合究竟属于微体化石下组合带还是属于上组合带的争议(Xiao et al., 2012)。

因此,本文以黄陵北缘樟村坪地区2个钻孔剖面和2个露头剖面(图1)为基础,以完整连续的钻孔剖面为依据,配合露头剖面的宏观沉积现象,重点对该区域埃迪卡拉纪陡山沱组地层序列及其区域对比进行研究。

1 地质背景

华南陡山沱组沉积在被动大陆边缘,具有镶边碳酸盐岩台地模式的古地理格局(Jiang et al., 2011)。黄陵南缘的峡东地区处于局限泻湖内,而黄陵北缘为潮坪相沉积,黄陵周缘整体表现为南深北浅的格局。

黄陵南缘陡山沱组自下而上发育4个岩性段。陡山沱组第一段为一套2~6 m厚的灰白色厚层状一块状白云岩,即“盖帽白云岩”,发育帐篷构造、层状裂隙、重晶石等特殊的沉积构造,并具有显著的碳同位素负偏(Jiang et al., 2003, 2006; Wang et al., 2008; 王家生等, 2012)。陡山沱组第二段为一套含丰富有机质的黑色页岩与灰黑色薄层状白云岩互层的地层,并夹有大量的硅磷质结核。陡山沱组第三段分为两部分,下部为灰白色块状白云岩夹不规则状硅质结核或团块;上部为一套灰色条带状薄层灰岩。陡山沱组第四段为一套富含有机质的黑色炭质页岩夹碳酸盐岩结核。

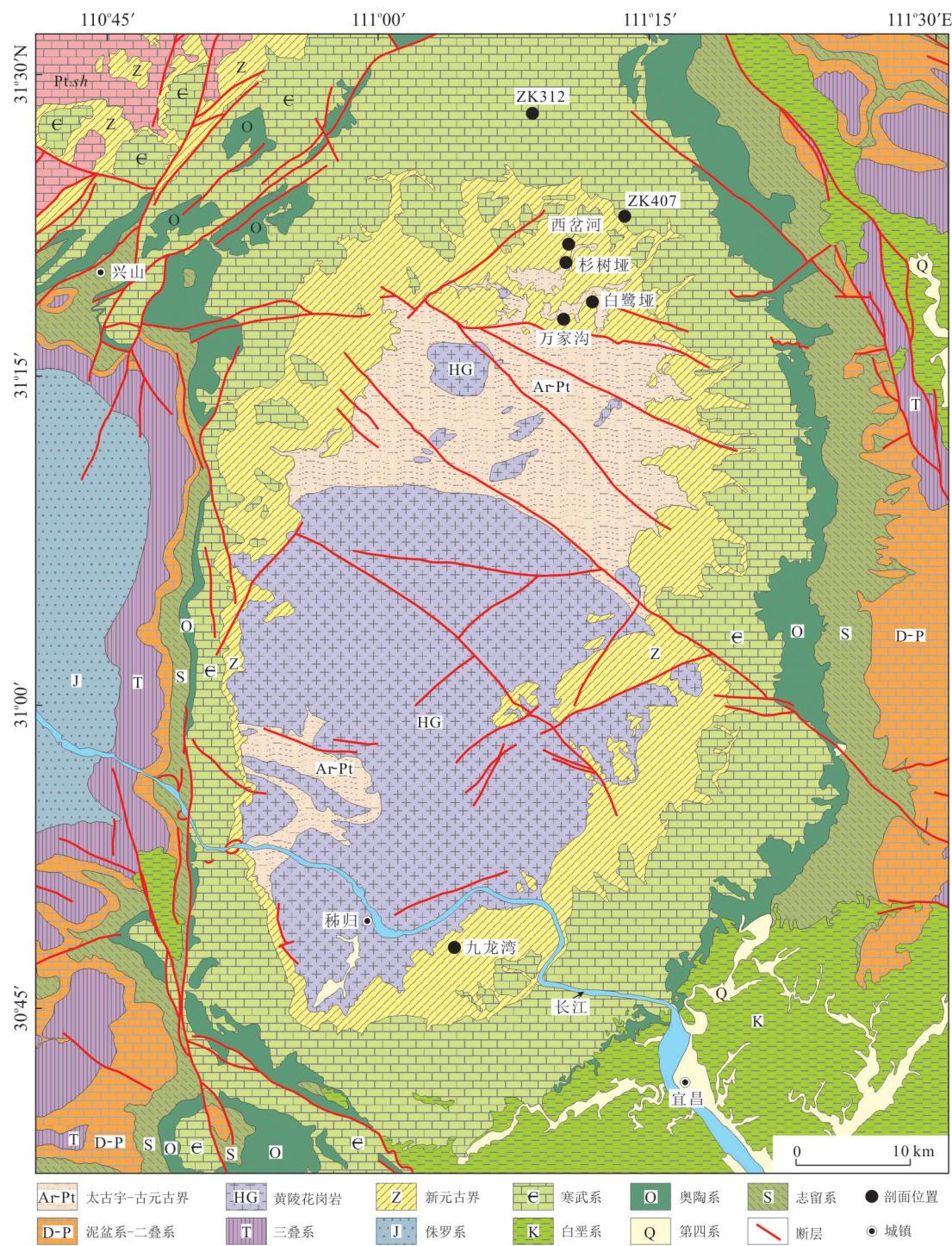


图 1 剖面位置及地质图

Fig.1 Locality and geological map of the sections

黄陵北缘陡山沱组自下而上划分为樟村坪段、胡集段、王丰岗段和百果园段 4 个岩性段。樟村坪段包括底部砾岩、下白云岩、含钾页岩和上白云岩 4 个部分。底部砾岩为一套白云岩质胶结杂砾岩，其在鄂西地区含磷岩系底部都有不同程度的发育，关于这套砾岩的成因一般有两种解释，一种认为归属陡山沱组底部（杨刚忠等，2010），另一种认为这套砾岩为

冰碛砾岩（邓延忠等，1986；李仲模等，1994）；下白云岩也被称为含锰白云岩，是一套灰白色厚层状白云岩，风化后显褐色；含钾页岩为一套黑色页岩，顶部发育具有工业品位的磷矿，区域内被称为第 1 磷矿层；上白云岩为一套灰白色厚层状一块状白云岩。胡集段大致可以分为 3 个部分：底部为灰黑色磷块岩，为区域内第 2 工业磷矿层；中部为中厚层白云岩与

薄层状泥质白云岩互层; 上部为灰黑色薄层状白云岩, 含大量硅质结核和条带, 在白云岩中还发现硅化的六水碳钙石假晶(Wang et al., 2017), 代表了寒冷的气候特征。王丰岗段总体为灰白色中厚层状白云岩夹薄层泥质白云岩, 底部常发育豆粒状硅质磷块岩, 是区域内第3磷矿层。白果园段总体为深灰色—灰黑色薄层状白云岩, 顶部发育砂屑磷块岩, 为区域内第4磷矿层。

本文在黄陵北缘开展系统的陡山沱组地层研究, 并选取2个钻孔和2个露头剖面为代表, 以基础地质研究丰富的黄陵南缘峡东地区陡山沱组地层划分为参照, 对黄陵北缘陡山沱组进行重新划分。

2 地层剖面

通过对樟村坪及其周边地区大量的野外调查工作, 对黄陵隆起北缘完整的埃迪卡拉纪陡山沱组地层序列进行研究。本文自北向南依次选取ZK312钻孔剖面、ZK407钻孔剖面、西岔河剖面和白鹭垭剖面, 具体位置见图1。

2.1 ZK312 钻孔剖面

ZK312钻孔剖面位于湖北省保康县段江村, 是陡山沱组隐伏区, 岩心取样率接近100%, 陡山沱组出露连续完整。

剖面最下部为一套白云质胶结的杂砾岩(图2a), 砾石主要为白云岩, 多为棱角状, 大小变化较大; 向上变为青灰色泥—粉砂质胶结杂砾岩(图2b), 明显的区别于上覆浅灰色厚层状白云岩, 因此本文将这套砾岩单独划分出来, 归为南沱组, 是成冰系的产物。

根据岩性特征的不同, 陡山沱组自下而上划分出7个不同的岩石单元。岩石单元一为浅灰色厚层状白云岩, 发育皮壳状构造(图2c), 总厚2.91 m。岩石单元二为一套黑色页岩, 明显区别于上下地层, 层间夹磷质条带或团块, 顶部发育条带状磷块岩(图2d), 是磷矿的重要工业层位之一, 总厚12.99 m。岩石单元三为灰—灰白色厚层状白云岩(图2e), 以色浅、层厚为特征, 底部和顶部偶夹硅磷质条带或团块, 总厚14.48 m。岩石单元四主要为灰色薄层状白云岩和磷块岩, 底部和上部以灰色薄层状白云岩为主夹磷质团块或条带, 中部为磷块岩夹少量灰色白云岩条带, 为磷矿区工业采矿的重要层位之一, 总厚21.28 m。岩石单元五为黑灰色薄层状白云岩, 含大量硅质结核(图2g), 底部发育灰白色—白色星斑

状硅质团块(图2f), 是硅化的六水碳钙石假晶, 中部含大量鲕粒(图2h), 总厚26.24 m。岩石单元六以浅灰色—灰色中薄层状白云岩(图2i)为主, 中间夹有少量灰黑色薄层白云岩, 层间偶夹硅质条带或团块及页岩薄层, 岩石以整体较浅的颜色而不同于上下岩层, 总厚46.93 m。岩石单元七整体为灰黑色薄层状白云岩(图2j), 以色黑、层薄为特征, 明显区别于上下岩层, 总厚12.88 m。

ZK312钻孔剖面灯影组底部为灰白色—浅灰色厚层状白云岩, 以色浅、层厚、含大量鲕粒为特征, 明显区别于陡山沱组第四段地层。

2.2 ZK407 钻孔剖面

ZK407钻孔剖面位于樟村坪镇西北的黄马河地区, 是陡山沱组隐伏区, 剖面包括南沱组、陡山沱组和灯影组底部地层, 其中陡山沱组连续完整, 有利于开展陡山沱组地层划分和对比工作。

剖面底部为一套以白云质胶结杂砾岩为主的地层, 中间夹灰绿色泥质白云岩胶结杂砾岩(图3a), 厚13.18 m, 整体上角砾的大小和含量自下而上分别变小和减少, 至顶部变成为含角砾白云岩。本文认为这是成冰系的产物, 与南沱组层位相当, 即划归为南沱组。

根据岩石发育特征, 陡山沱组在ZK407钻孔剖面中自下而上划分出7个明显不同的岩石单元。岩石单元一为灰白色厚层状白云岩, 位于陡山沱组最底部, 厚2.84 m。岩石单元二为灰绿色页岩, 夹磷质团块, 厚1.46 m。岩石单元三为灰白色厚层状白云岩, 其底部和顶部夹有硅磷质条带或团块, 在剖面中厚8.4 m。岩石单元四由磷块岩和深灰色白云岩组成, 下部为8.95 m厚的磷块岩(图3b)夹白云岩或与白云岩互层, 是工业采矿的重要层位之一, 上部为2.5 m厚的深灰色白云岩, 且颜色明显浅于上下地层。岩石单元五为灰黑色中薄层状白云岩, 底部含有灰白—白色星斑状硅化六水碳钙石假晶(图3c), 层内发育大量扁豆状硅质结核(图3d), 厚28.85 m。岩石单元六整体为灰色中薄层状白云岩, 夹少量深灰色中薄层状白云岩, 偶夹硅质条带或硅质层, 中部含磷质碎屑或条带, 上部发育一层角砾状白云岩(图3e), 总厚27.35 m。岩石单元七为一套灰黑色薄—中层状白云岩(图3f), 层间夹红褐色泥质薄膜层, 偶夹硅质团块, 总厚13.9 m。

灯影组底部为一套灰白色—浅灰色厚层状白云岩, 以色浅、层厚为特征, 明显区别于陡山沱组第

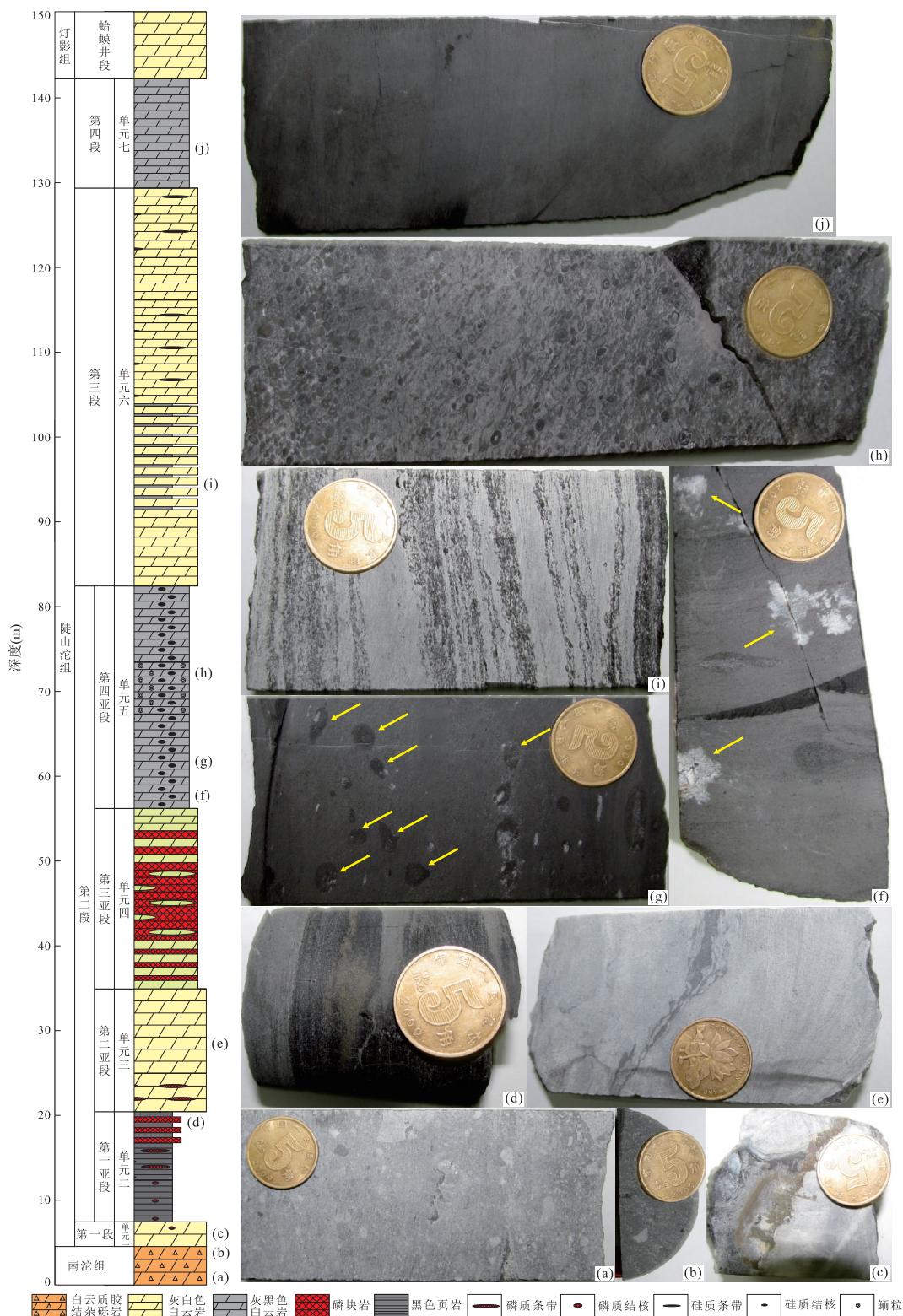


图 2 ZK312 钻孔剖面柱状图和部分岩心照片

Fig.2 Stratigraphic column and some drill core photos at the ZK312 section

a.剖面底部白云质胶结杂砾岩;b.泥-粉砂质胶结杂砾岩;c.陡山沱组第一段(岩石单元一)中皮壳状构造;d.陡山沱组第二段第一亚段(岩石单元二)顶部含磷层;e.陡山沱组第二段第二亚段(岩石单元三)灰白色厚层状白云岩夹硅磷质条带;f.陡山沱组第二段第四亚段(岩石单元五)下部灰黑色白云岩,箭头指向硅化六水碳酸钙假晶;g.岩石单元五中灰黑色含硅质结核白云岩,箭头指向硅质结核;h.岩石单元五中灰黑色鲕粒白云岩;i.陡山沱组第三段(岩石单元六)上部灰白色白云岩;j.陡山沱组第四段(岩石单元七)灰黑色白云岩

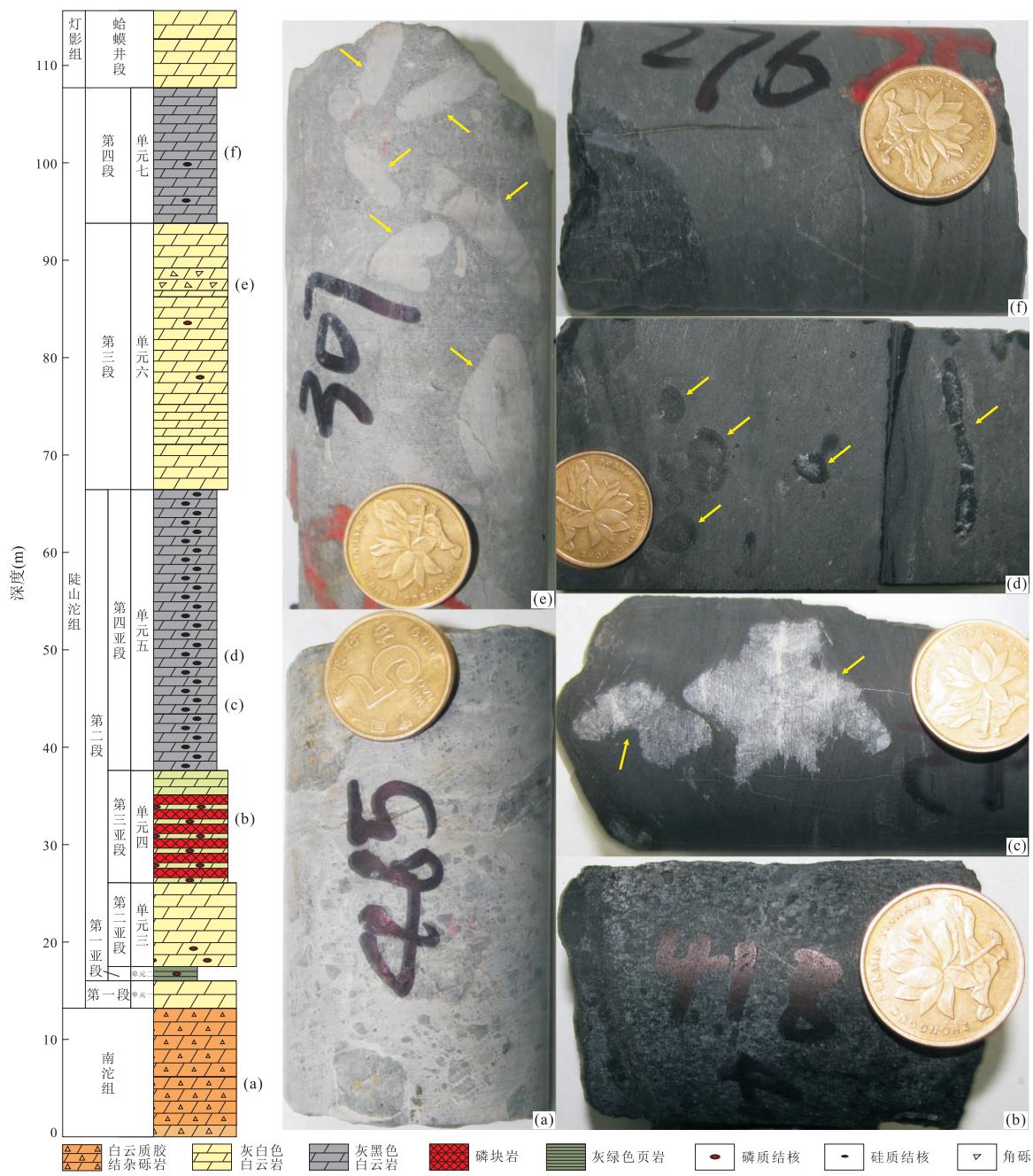


图 3 ZK407 钻孔剖面柱状图和部分岩心照片

Fig.3 Stratigraphic column and some drill core photos at the ZK407 drill core section

a. 白云质胶结杂砾岩; b. 陡山沱组第二段第三亚段(岩石单元四)磷块岩;c. 陡山沱组第二段第四亚段(岩石单元五)灰黑色白云岩,箭头所指为硅化六水碳酸钙石假晶;d. 陡山沱组第二段第四亚段(岩石单元五)灰黑色含硅质结核白云岩,箭头指向硅质结核;e. 陡山沱组第三段(岩石单元六)含角砾白云岩,箭头指向角砾;f. 陡山沱组第四段(岩石单元七)灰黑色白云岩

四段地层.

2.3 西岔河剖面

西岔河剖面位于樟村坪镇北约 8 km 的西岔河村,交通非常便利,剖面起点 GPS 为 N:31°21'56.22", E:111°11'23.26", 剖面底部沿公路出露,上部沿上山小路测制。

剖面底部出露一套青灰色白云质胶结杂砾岩,

砾石成分混杂,大小不一,棱角一次棱角状,白云质胶结,出露 1 m,未见底;其上为一层 0.18 m 厚的泥质—粉砂质胶结杂砾岩,岩性同峡东地区南沱组相似.本文将这套白云质胶结杂砾岩和泥质—粉砂质胶结杂砾岩统一划归为南沱组。

陡山沱组自下而上具有 7 个特征明显的岩石单元.岩石单元一为陡山沱组底部的灰白色厚层状白

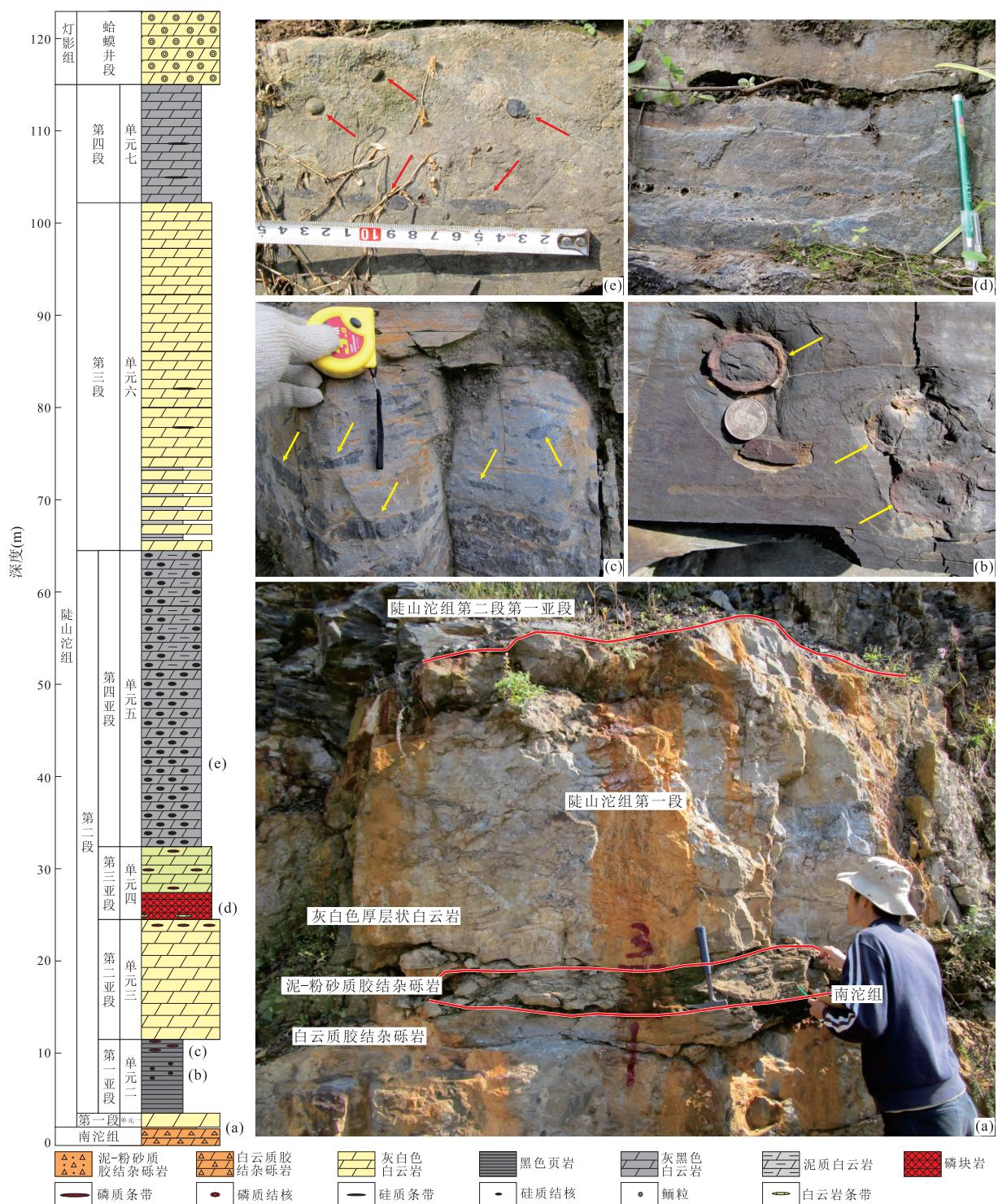


图 4 西岔河剖面柱状图和部分野外照片

Fig.4 Stratigraphic column and some field photos at the Xichahe section

a. 陡山沱组与南沱组界线和陡山沱组第一段与第二段界线;b. 陡山沱组第二段第一亚段(岩石单元二)内部结核,箭头指向结核;c. 陡山沱组第二段第一亚段(岩石单元二)顶部磷质条带,箭头指向部分磷质条带;d. 陡山沱组第二段第三亚段(岩石单元四)下部磷块岩;e. 陡山沱组第二段第四亚段(岩石单元五)下部硅质结核,箭头指向硅质结核

云岩(图 4a),底部夹黑色极薄层硅质条带,中部发育皮壳状构造,总厚度 1.5 m. 岩石单元二为一套黑色页岩,层内发育少量硅质和钙质结核(图 4b),顶

部 1.4 m 夹磷块岩,呈扁平砾石状(图 4c),局部可见倒小字结构,总厚 9.4 m. 岩石单元三整体为灰白色厚层状白云岩,底部夹硅磷质条带及团块,总厚

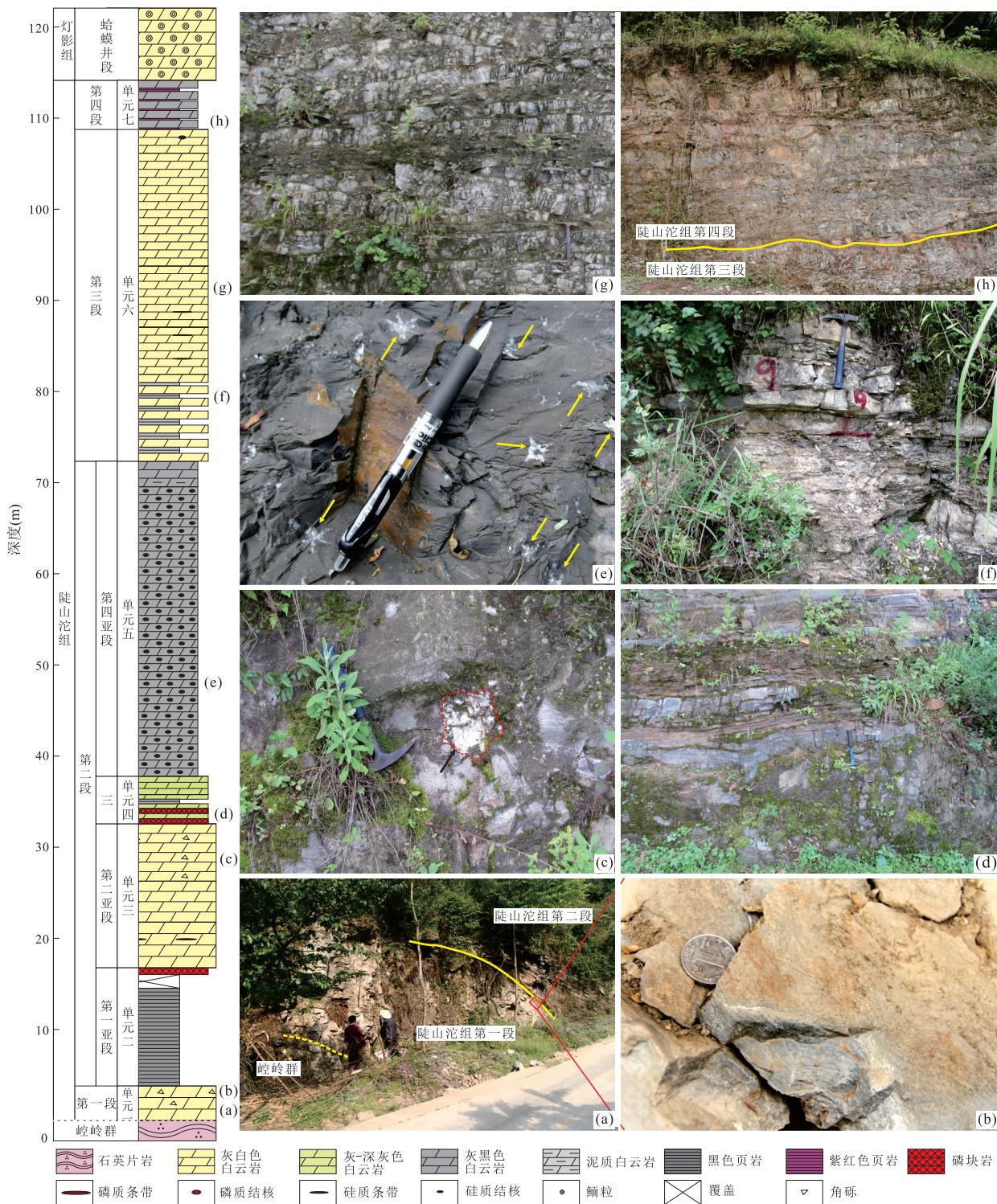


图 5 白鹭垭剖面柱状图和部分野外照片

Fig.5 Stratigraphic column and some field photos at the Bailuya section

a. 为剖面陡山沱组第一段(岩石单元一)及与上下地层的接触关系;b. 为陡山沱组第一段(岩石单元一)顶部叠层石;c. 为陡山沱组第二段第二亚段(岩石单元三)上部含角砾白云岩, 黑色箭头指向角砾;d. 为陡山沱组第二段第二亚段(岩石单元三)与第三亚段(岩石单元四)分界;e. 为陡山沱组第二段第四亚段(岩石单元五)灰黑色白云岩, 箭头指向硅化六水碳钙石假晶;f. 为陡山沱组第三段(岩石单元六)底部;g. 为陡山沱组第三段(岩石单元六)中部;h. 为陡山沱组第四段(岩石单元七)下部

13 m; 岩石单元四为磷块岩和深灰色白云岩, 下部2.9 m 为磷块岩(图 4d), 偶夹白云岩条带或透镜体,

上部为 5 m 厚的深灰色中层状白云岩, 夹硅磷质条带, 总厚 7.9 m. 岩石单元五为灰黑色中薄层状白云

岩,层内夹大量硅质结核或条带(图 4e),总厚 32.1 m.岩石单元六整体浅灰色—灰色白云岩,下部为浅灰色薄层状白云岩与黄绿色页岩互层,中部夹硅质条带或团块,总厚 32.75 m.岩石单元七为深灰色—灰黑色薄层状白云岩,上部夹硅质条带,以色深、层薄为特征,总厚 13.55 m.

灯影组蛤蟆井段底部为灰白色厚层状白云岩,鲕粒极为发育.

2.4 白鹭垭剖面

白鹭垭剖面位于樟村坪镇中心北约 1.7 km 的白鹭垭地区,交通非常便利,剖面沿公路出露,剖面起点 GPS 为 N:31°18'36.899", E:111°12'36.367".

剖面底部为崆岭群石英片岩,平行不整合(图 5a)在其之上的为一套 3.8 m 厚的灰白色含角砾白云岩,这套白云岩底部 0.5 m 不含角砾,中部角砾较多,角砾成分多为石英岩和花岗岩,棱角一次棱角状,大小 2 mm~40 cm 不等,这套白云岩除不同层位角砾含量不同外,岩性一致,为一个整体,而且白云岩内见皮壳状构造,顶部发育叠层石(图 5b),具有盖帽白云岩的特征,因此将这套白云岩划归为陡山沱组底部地层,而南沱组在该剖面上不发育.

根据地层发育特征,白鹭垭剖面陡山沱组自下而上具有 7 个特征明显的岩石单元.岩石单元一为陡山沱组最底部的灰白色厚层状含角砾白云岩,厚 3.8 m.岩石单元二为一套黑色页岩,层内含磷质碎屑或团块,顶部发育 1 m 厚的条带状磷块岩,总厚 10.72 m.岩石单元三为灰白色厚层状白云岩,底部 0.75 m 夹大量磷质条带,上部含有大量白云岩角砾(图 5c),角砾粒径大小为 15~60 cm,总厚 16.55 m.岩石单元四整体为薄层状泥质白云岩,下部 1.7 m 为硅磷质层与泥质白云岩互层(图 5d),上部 3.52 m 为灰色薄层状泥质白云岩夹薄层页岩.岩石单元五整体为灰黑色薄层状白云岩,以色黑、层薄及含大量硅质结核为特征,下部含有大量灰白色—白色星斑状硅化六水碳钙石假晶(图 5e),顶部灰黑色白云岩变为厚层状,而且不含硅质结核,总厚 34.56 m.岩石单元六整体以灰白色中薄层状白云岩夹页岩为主,底部为灰白色中薄层状白云岩与土黄色页岩互层(图 5f),页岩层厚度向上变薄,岩性变为灰白色中薄层状白云岩夹页岩薄层(图 5g),层间偶夹硅质条带或硅质层,总厚 36.4 m.岩石单元七为深灰色—灰黑色中薄层状白云岩夹红褐色页岩薄层(图 5h),以其较深的颜色和红褐色页岩的发育明显地区别于第三段,总厚 5.4 m.

上覆灯影组蛤蟆井段为灰白色厚层状鲕粒白云岩,明显区别于陡山沱组第四段地层.

3 岩石地层划分与对比

上述 2 个钻孔剖面和 2 个露头剖面从北到南分布,涵盖了樟村坪及其周边地区陡山沱组隐伏区到出露区,该区陡山沱组具有相似的地层序列,同样自下而上发育 7 个岩石单元,能够进行普遍的地层对比.现总结一下这一地区陡山沱组的地层特征,并认为樟村坪及其周边地区陡山沱组可以划分为 4 个岩性段(图 6).

陡山沱组第一段即岩石单元一,在上述 4 个剖面中以浅灰色—灰白色厚层状白云岩为主,发育硅质条带,皮壳状构造,叠层石,帐篷构造等,同时可能含有角砾,厚度在 1.5~3.8 m 之间,为“盖帽白云岩”,在樟村坪地区普遍发育,与黄陵南缘的峡东地区较为相似,也可以进行对比.

陡山沱组第二段以黑色页岩的出现为底,以灰黑色薄层状白云岩的结束为顶,由岩石单元二、单元三、单元四和单元五 4 个部分组成,这 4 个岩石单元分别对应陡山沱组第二段的 4 个亚段.第一亚段即岩石单元二,是以页岩为主,厚度变化较大,其中厚度最小的表现在 ZK407 钻孔剖面上,为 1.46 m;而在万家沟地区厚度可达 26.6 m.黑色页岩中普遍含磷,即使在厚度最薄的 ZK407 钻孔剖面中都含有磷质碎屑,该亚段下部和中部含磷质碎屑或夹稀疏的磷块岩条带;而上部磷块岩最为发育,但是区域上差别较大,例如在万家沟和白鹭垭地区该段上部磷块岩是工业采矿的主要矿层之一,但在西岔河地区仅含少量扁平砾石状的磷块岩,而在 ZK407 钻孔剖面上仅发育少量磷质碎屑.第二亚段即为岩石单元三,整体为灰白色厚层状白云岩,其底部和顶部常夹有硅磷质条带,厚度在 8.6~20.0 m 之间变化,该亚段顶部存在一个暴露面(周传明等,2005; Zhu *et al.*, 2007, 2013),在西岔河、白鹭垭、万家沟等露头剖面上都能观察到该亚段白云岩顶部呈现波状起伏.第三亚段即岩石单元四,以灰—深灰色薄层状白云岩—泥质白云岩和磷块岩为主,磷块岩的发育受区域古地理的控制,在偏北较浅水的 ZK312 钻孔剖面、ZK407 钻孔剖面和西岔河剖面上该亚段发育大量磷块岩,是重要的工业矿层之一,在白鹭垭剖面上仅在下部发育少量硅磷质条带,而在万家沟剖面上基本不发育磷块岩.第三亚段磷矿岩中发育有大量微

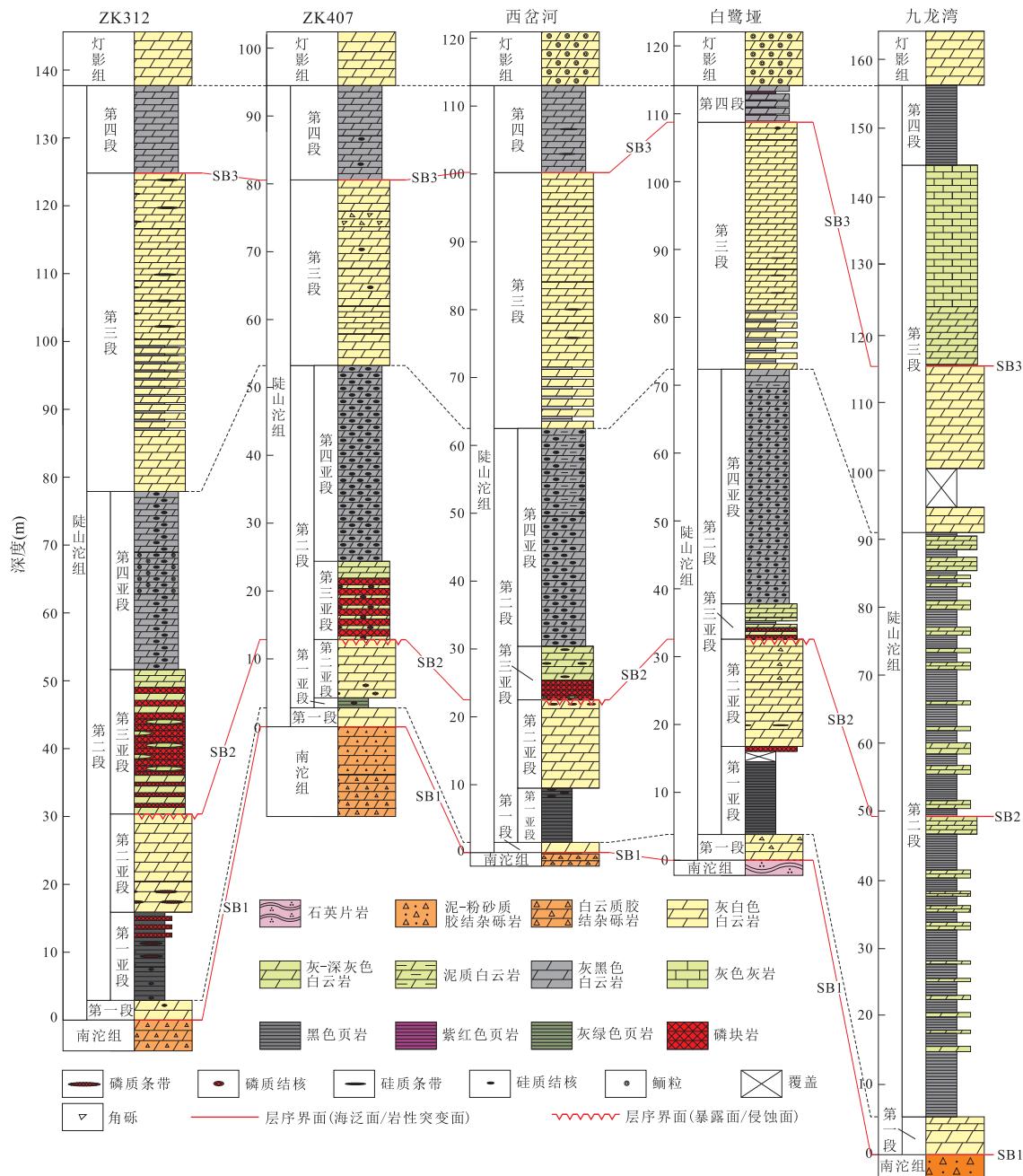


图 6 黄陵北缘与黄陵南缘陡山沱组剖面柱状对比

Fig.6 Stratigraphic correlation of Doushantuo Formation between the northern and the southern Huangling areas
黑色虚线为岩石地层对比连线;红色实线为层序地层对比连线;黄陵南缘峡东地区以九龙湾剖面为例,据 Zhu et al.(2013)

体化石,例如ZK407钻孔剖面中该层位发育包括动物胚胎化石在内的大量微体化石(叶琴等,2015).第四亚段即岩石单元五,整体灰黑色薄层状白云岩,以色黑、层薄及含大量硅质结核为特征,硅质结核中保存大量微体化石(周传明等,2005; Liu et al., 2009, 2013; McFadden et al., 2009; 陈寿铭等,2010),厚度在26.24~34.56 m之间。

陡山沱组第三段在上述4个剖面中为岩石单元六,整体以灰色—灰白色中薄层状白云岩夹薄层页

岩为主,偶夹硅质条带或团块,本段以其较浅的颜色明显的区别于上下地层,厚度在27.35~46.93 m之间变化。

陡山沱组第四段即岩石单元七,是一套深灰—黑灰色薄层状白云岩为主的地层,以色黑、层薄为特征。区域内陡山沱组第四段存在一定的变化,在较浅水的ZK312钻孔剖面、ZK407钻孔剖面和西岔河剖面为灰黑色中薄层状白云岩,厚度较大,在12 m左右;而在相对较深水的白鹭垭剖面沉积灰黑色薄层

状白云岩夹页岩层,厚度 5 m.

上述陡山沱组的 4 个岩性段和 7 个岩石单元在黄陵北缘樟村坪及周边地区可以进行普遍对比。

4 层序地层

本文所研究的 4 个剖面及其周边地区陡山沱组具有相似的地层序列,可以划分为两个半的三级层序(图 6)。

4.1 层序地层划分

(1) 层序 1. 层序 1 包括陡山沱组第一段、陡山沱组第二段第一亚段和第二亚段,即岩石单元一、单元二和单元三。陡山沱组第一段为一套灰白色厚层状白云岩,发育帐篷构造、叠层石、皮壳状构造等,为潮间带沉积,是海侵的开始阶段。随后快速的海侵,陡山沱组第二段第一亚段沉积局限盆地黑色页岩,具有水平层理,为海侵体系域。然后水体开始逐渐变浅,在陡山沱组第二段第一亚段顶部沉积条带状磷块岩并夹透镜状白云岩,至陡山沱组第二段第二亚段底部进一步变浅,沉积灰白色厚层状白云岩夹硅磷质条带,随后开始沉积灰白色厚层状白云岩,为高位体系域。层序 1 的底界面为陡山沱组与南沱组的岩相转换面(SB1),顶界面为陡山沱组第二段第二亚段与第三亚段的分界面(SB2),在不同剖面表现出不同的接触关系,整体为暴露面。

(2) 层序 2. 层序 2 包括陡山沱组第二段的第三亚段、第四亚段和陡山沱组第三段,即岩石单元四、单元五和单元六。陡山沱组第二段第三亚段主要沉积薄层状白云岩,并发育磷块岩,是潮下带上部沉积;陡山沱组第二段第四亚段为灰黑色薄层状白云岩,夹大量硅质结核和条带,为潮下带沉积;陡山沱组第二段第三亚段和第四亚段共同组成了海侵体系域。向上为陡山沱组第三段灰色—灰白色中薄层状白云岩,是潮下带上部—潮间带沉积,为高位体系域。层序 2 的底界面为陡山沱组第二段第二亚段顶部暴露面(SB2),顶界面为陡山沱组第三段的灰白色中厚层状白云岩与第四段灰黑色薄层状白云岩的岩相转换面(SB3)。

(3) 层序 3. 层序 3 在陡山沱组中包括了陡山沱组第四段,即岩石单元七。陡山沱组第四段主要沉积潮下带深灰色—灰黑色薄层状白云岩,为海侵体系域。向上灯影组蛤蟆井段沉积灰白色厚层状白云岩,发育鲕粒,是高位体系域。层序 3 的底界面为陡山沱组第三段的灰白色中厚层状白云岩与第四段灰黑色薄层状白云岩的岩相转换面(SB3)。

4.2 层序界面

本文识别的层序界面有两种类型:地层不整合界面和地层不连续界面。地层不整合界面指可以观察到具有明显暴露或者侵蚀特征;而地层不连续界面是指在剖面中没有明显的暴露面或侵蚀面,而在存在岩性突变面。这两种类型的界面可以沿着一个层序界面在横线上发生变化,因为暴露或侵蚀特征可能在有些剖面中并不发育或者并不典型,而横向表现岩性突变面。

层序界面 1(SB1)为陡山沱组第一段与南沱组的分界面,该界面是南沱组冰期杂砾岩与陡山沱组盖帽白云岩之间的岩相转换面。由于不同剖面中该转换面之下的南沱组具有差异,SB1 在黄陵北缘樟村坪及周边地区具有 3 种类型。例如在 ZK312 钻孔剖面和西岔河剖面中,SB1 为南沱组灰绿色泥—粉砂质胶结杂砾岩与陡山沱组第一段灰白色厚层状白云岩的岩性突变面;而在 ZK407 钻孔剖面,SB1 表现为南沱组白云质胶结杂砾岩与陡山沱组厚层状白云岩之间的岩性突变面;另外,在白鹭垭剖面中,由于南沱组不发育,SB1 则为陡山沱组与崆岭群的不整合界面。

层序界面 2(SB2)为陡山沱组第二段第二亚段顶部的暴露面,在万家沟剖面和白鹭垭剖面中,第二亚段与第三亚段之间具有明显的波状起伏,局部具有侵蚀凹坑,SB2 表现为具有明显侵蚀特征的暴露面。在黄陵北缘樟村坪及周边地区陡山沱组第二段第二亚段,均能够在其顶界面看到不同程度波状起伏。

层序界面 3(SB3)为陡山沱组第三段与陡山沱组第四段地层的岩相转换面。在 ZK312 钻孔剖面、ZK407 钻孔剖面和西岔河剖面中,SB3 为陡山沱组第三段浅色中厚层状白云岩与陡山沱组第四段暗色薄层状白云岩之间的岩性突变面。而在白鹭垭剖面中,为陡山沱组第三段浅色白云岩与薄层状页岩直接的岩性突变面。

上述 3 个层序界面在黄陵北缘樟村坪及周边地区陡山沱组中均能识别出来,对于黄陵北缘陡山沱组的地层对比具有重要意义。

5 讨论

5.1 黄陵北缘陡山沱组地层划分对比

黄陵北缘樟村坪及周边地区陡山沱组地层序列非常清楚,虽然具体厚度和岩性有所差异,但是总体都能够划分出 7 个岩石单元,非常有利于开展陡山

沱组地层对比工作.以往针对磷矿区陡山沱组的划分方案(杨刚忠等,2010)也能一定程度地开展陡山沱组地层对比工作,并指导磷矿的找矿工作,但其与黄陵南缘峡东地区的划分方案有明显差异,导致基础科研与磷矿生产的脱节.本文重新对黄陵北缘陡山沱组的地层划分进行厘定,虽然都将陡山沱组划分出4个岩性段,但是磷矿区划分方案与本文存在一定差异,其中陡山沱组上部的两个岩性段划分对比基本没有改变,主要是下部的两个岩性段存在较大差异(图7).

磷矿区划分方案中将樟村坪段最下面的底砾岩划归为了陡山沱组,本文将这套杂砾岩划归到南沱组.之所以对陡山沱组含磷岩系之下的杂砾岩时代的认识存在不同,是因为这套杂砾岩中发育一套灰色白云质胶结杂砾岩.一种解释认为杂砾岩中的砾石来自下伏地层,而白云岩不能在冷水中沉积,认为应该是底砾岩,属于陡山沱组底部(杨刚忠等,2010),如果底砾岩的认识成立,那么磷矿区陡山沱组的地层将存在缺失,而另一种认识将这套砾石解释为冰碛砾岩,这套砾石的颜色、成分、构造以及分选性都与底砾岩的性质不同,而与冰碛岩的性质相同(邓延忠等,1986;李仲模等,1994).事实上,这套杂砾岩的岩性比较复杂,包括泥—粉砂质胶结杂砾岩、砂质胶结杂砾岩和白云质胶结杂砾岩.在ZK312钻孔剖面和西岔河剖面

中自下而上具有白云质胶结杂砾岩(图8b,8c)、泥—粉砂质胶结杂砾岩(图4a)、灰白色块状白云岩的序列,即在陡山沱组盖帽白云岩之下发育了与黄陵南缘陡山沱组相似的冰碛岩.在万家沟地区,陡山沱组盖帽白云岩之下发育了厚约10 m的灰绿色—黄绿色泥—粉砂质胶结杂砾岩(图8a),其中砾石成分复杂,大小不一,多棱角一次棱角状,无定向性,个别砾石可看到擦痕,是典型的南沱组冰碛岩.在杉树垭地区发育砂质胶结杂砾岩(图8d),砾石成分复杂,大小不一,多棱角状一次棱角状,排列杂乱无序.上述3种杂砾岩的砾石在大小、分选、磨圆等方面具有相似性,都体现出快速混杂堆积的特点,具有冰碛岩的特征.

樟村坪段除了底砾岩外,还有下白云岩、含钾页岩和上白云岩,究竟哪一个或者哪几个能够与盖帽白云岩对比呢?本文将下白云岩划分为陡山沱组第一段,即盖帽白云岩.(1)下白云岩中发育有叠层石、帐篷构造、皮壳状构造等沉积及构造,与典型盖帽白云岩中的沉积特征相似.(2)在年代学的研究方面,上白云岩底部的同位素年龄为 614.0 ± 7.6 Ma(Liu et al., 2009),上白云岩的顶部年龄早于 605 ± 5 Ma(Zhou et al., 2017),由于盖帽白云岩的年龄要早于 632.5 ± 0.5 Ma(Condon et al., 2005),因此上白云岩肯定不属于盖帽白云岩.(3)万家沟剖面下白云岩具有盖帽白云岩的碳同位素特征(Zhu et al., 2007).综上,黄陵北缘樟村坪及周边地区陡山沱组樟村坪段的下白云岩(即岩石单元一)为盖帽白云岩,本文将其划归为陡山沱组第一段.

磷矿区划分方案中陡山沱组第二个岩性段为胡集段,仅包括岩石单元四和单元五两个部分;而本文的划分方案陡山沱组第二段包括了岩石单元二、单元三、单元四和单元五4个部分.由于岩石单元一划分为陡山沱组第一段,其上的岩石单元二则划分为陡山沱组第二段.

总之,本文提出的陡山沱组地层划分方案与磷矿区划分方案具有一定的对比联系,新的划分方案为基础科学研究与磷矿生产的结合提供支撑.

5.2 黄陵北缘与黄陵南缘陡山沱组地层划分对比

黄陵北缘的樟村坪地区与黄陵南缘的峡东地区陡山沱组都划分为4个岩性段,由于古地理位置的不同,具有相似性,也具有差异性.

陡山沱组盖帽白云岩作为陡山沱组底部的标志层在华南都可以进行普遍对比(Jiang et al., 2006),黄陵北缘和南缘陡山沱组第一段都为盖帽白云岩,在两个区域内它们的底界都是南沱组与陡山沱组的岩

黄陵北缘磷矿区方案		黄陵北缘(本文)			黄陵南缘		
陡山沱组	百果园段	Ph4	陡山沱组	第四段	单元七	Ph4	第四段
	王丰岗段	Ph3				Ph3	
	胡集段	Ph2		第三段	单元六	Ph3	第三段
		Ph2				Ph2	
		Ph1		第二段	单元五	Ph2	第二段
	樟村坪段	上白云岩				Ph1	
		含钾页岩		第二段	单元四	Ph1	
		下白云岩				Ph1	第一段
		底砾岩				Ph1	
南沱组		南沱组			南沱组		

图7 黄陵北缘樟村坪地区陡山沱组地层划分方案对比

Fig.7 Relationship of the two Doushantuo Formation stratigraphic divisions in the northern Huangling area

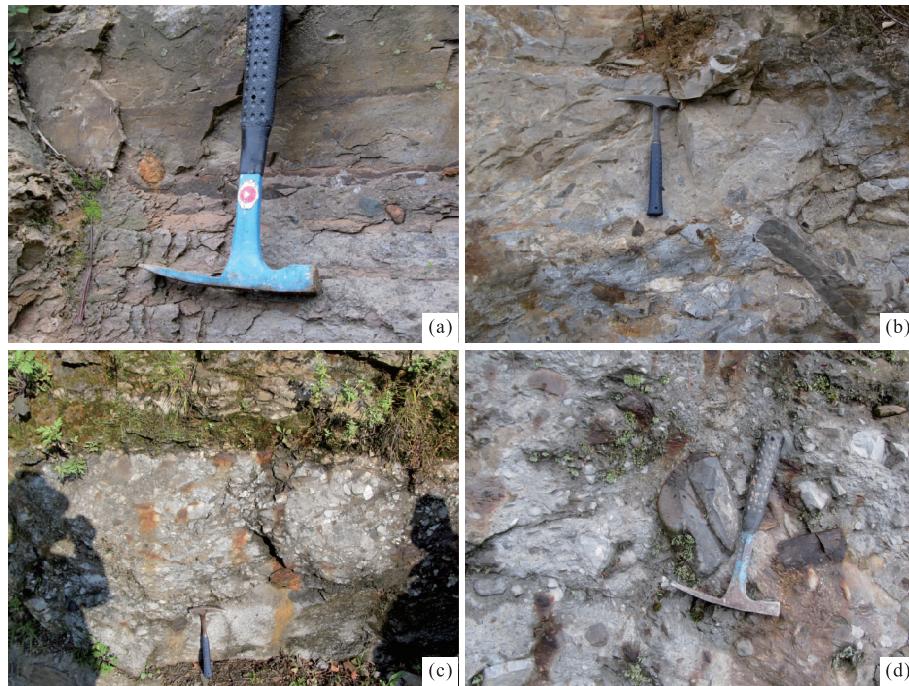


图 8 樟村坪地区南沱组杂砾岩野外照片

Fig.8 Some field photos of the diamictite of Nantuo Formation in Zhangcunping area

a.万家沟地区泥—粉砂质胶结杂砾岩;b,c.西岔河地区白云质胶结杂砾岩;d.杉树坪地区砂质胶结杂砾岩

相转换面(SB1),顶界都是白云岩与黑色页岩的岩相转换面,可以进行对比。

黄陵北缘樟村坪及周边地区和黄陵南缘峡东地区陡山沱组第二段整体大致可以对比。在岩石地层方面,相比陡山沱组第一段和第三段,陡山沱组第二段在两个区域岩石颜色较深,岩层厚度相对较薄,明显的区别于上下地层。不同点在于峡东地区陡山沱组第二段整体为一套黑色页岩与灰黑色白云岩互层的地层,除了中间发育一些较厚的白云岩层外,岩性差别较小;而樟村坪及周边地区陡山沱组第二段自下而上具有第一亚段黑色页岩、第二亚段灰白色厚层状白云岩、第三亚段磷块岩和白云岩以及第四亚段灰黑色薄层状白云岩 4 个部分。尤其是在黄陵北缘陡山沱组第二段第二亚段的灰白色厚层状白云岩在黄陵南缘基本不发育,或仅表现为陡山沱组第二段中部的一层厚层状白云岩 (Zhu et al., 2007, 2013)。在层序地层方面,樟村坪及周边地区陡山沱组第二段第二亚段与第三亚段之间是一个暴露面(SB2),而黄陵南缘可以与之进行对比的界面被认为在陡山沱组第二段中部的一个厚层状白云岩的顶部 (Zhu et al., 2007, 2013; 杨爱华等, 2015)。在微体古生物方面,黄陵北缘与黄陵南缘都发育有大量保存精美的大型具刺疑源类,其化石面貌被认为可以进行对比 (周传明等, 2005; Liu et al., 2009,

2013; 陈寿铭等, 2010; 叶琴等, 2015)。当然, 生物地层目前还没有完全建立, 而且黄陵北缘与黄陵南缘微体化石在沉积层位上还存在一些差异。黄陵北缘微体化石目前仅在陡山沱组第二段第三亚段的磷块岩中和第四亚段硅质结核中发现, 第一亚段和第二亚段并没有发现化石, 而且第一亚段中也发育有硅磷质结核 (图 4b) 和条带状磷块岩。而黄陵南缘的微体化石在距离陡山沱组第二段底部 6 m 就开始出现了 (Zhou et al., 2007)。微体化石方面的差异可能与沉积古地理相关: 黄陵北缘位于较浅水的潮坪环境中, 水体动荡较大, 甚至经常发生风暴作用 (图 4c), 不利于微体生物的生存和保存; 而黄陵南缘位于局限的泻湖环境中 (Jiang et al., 2011), 水体相对安静, 有利于微体生物的生存和保存。

陡山沱组第三段在黄陵北缘和黄陵南缘都表现为较浅色的白云岩, 明显的区别于上下地层。但是黄陵北缘陡山沱组第三段整体都发育有硅质条带或结核, 而黄陵南缘则不同, 例如九龙湾剖面中陡山沱组第三段仅下部发育硅质条带或结核, 而上部条带状灰岩中并不发育硅质条带或结核。层序地层方面, 在黄陵北缘陡山沱组第三段与第四段的岩性突变面为 SB3, 而在黄陵南缘陡山沱组第三段中部发育一个层序界面, 表现为岩性突变面 (Zhu et al., 2013; 杨爱华等, 2015) 或暴露面 (安志辉等, 2014), 本文认为这两

个界面可以对比,因此黄陵北缘陡山沱组第三段可能仅相当于黄陵南缘陡山沱组第三段下部地层。

陡山沱组第四段地层在黄陵南缘与黄陵北缘差异最大,黄陵南缘表现为一套黑色炭质页岩夹锅底状碳酸盐岩结核,黄陵北缘则以灰黑色薄层状白云岩为主,局部夹黑色页岩。两个区域陡山沱组第四段与灯影组蛤蟆井段均为连续整合接触,因此黄陵北缘与黄陵南缘第四段顶部大致可以对比。然而由于底界的的不同,黄陵北缘陡山沱组第四段地层可能对比黄陵南缘陡山沱组第三段上部和第四段地层。

综上所述,黄陵南缘与黄陵北缘陡山沱组岩性差异较大,本文通过岩石地层和层序地层的划分对比建立了两个区域陡山沱组之间的联系(图6),其中陡山沱组第一段和第二段地层在两个区域基本可以对比,而黄陵北缘陡山沱组第三段仅相当于黄陵南缘陡山沱组第三段下部,黄陵北缘陡山沱组第四段对应黄陵南缘陡山沱组第三段上部和第四段。

6 结论

本文通过对黄陵北缘樟村坪及其周边地区4条完整的陡山沱组剖面的对比研究,对陡山沱组进行了地层划分对比,建立了黄陵南缘与黄陵北缘陡山沱组之间的联系,为基础科学的研究和磷矿生产的结合提供基础地质支撑。

(1)提出该地区陡山沱组的地层划分对比方案,陡山沱组可以划分为4个岩性段,第一段为“盖帽白云岩”,第二段由黑色页岩—灰白色厚层状白云岩—灰—深灰色薄层白云岩和磷块岩—灰黑色薄层状含硅质结核白云岩组成,第三段由灰—灰白色中薄层状白云岩夹薄层页岩组成,第四段以深灰色—灰黑色薄层状白云岩为主。

(2)将樟村坪地区陡山沱组划分为两个半层序,SB1为陡山沱组与南沱组的岩性突变面,SB2为陡山沱组第二段第二亚段顶界的暴露面,SB3为陡山沱组第三段与第四段的岩性突变面。

(3)通过岩石地层和层序地层的对比,建立了黄陵北缘和南缘的陡山沱组的对比关系。黄陵北缘和黄陵南缘陡山沱组第一段和第二段可以直接对比,黄陵北缘陡山沱组第三段仅相当于黄陵南缘陡山沱组第三段下部地层,黄陵北缘陡山沱组第四段与黄陵南缘陡山沱组第三段上部和第四段对比。

致谢:感谢廖宗明、杨刚忠、张权绪对野外工作的帮助!

References

- An, Z. H., Tong, J. N., Ye, Q., et al., 2014. Neoproterozoic Stratigraphic Sequence and Sedimentary Evolution at Qinglinkou Section, East Yangtze Gorges Area. *Earth Science*, 39(7):795—806 (in Chinese with English abstract).<https://doi.org/10.3799/dqkx.2014.075>
- Chen, S. M., Yin, C. Y., Liu, P. J., et al., 2010. Microfossil Assemblage from Chert Nodules of the Ediacaran Doushantuo Formation in Zhangcunping, Northern Yichang, South China. *Acta Geological Sinica*, 84(1):70—77 (in Chinese with English abstract).
- Chinese Commission on Stratigraphy, 2002. Regional Stratigraphic Chart and Its Reference. Geological Publishing House, Beijing, 1—72 (in Chinese).
- Condon, D. J., Zhu, M. Y., Bowring, S., et al., 2005. U-Pb Ages from the Neoproterozoic Doushantuo Formation, China. *Science*, 308:95—98.<https://doi.org/10.1126/science.1107765>
- Deng, Y. Z., Ou, Y. G., Zhu, J. G., 1986. The Cause of the Diamictite under Doushantuo Formation, Wangji, Hubei Province. *Geology of Chemical Minerals*, 2:58—61 (in Chinese).
- Jiang, G. Q., Kennedy, M. J., Christie-Blick, N., 2003. Stable Isotopic Evidence for Methane Seeps in Neoproterozoic Postglacial Cap Carbonates. *Nature*, 426: 822—826. <https://doi.org/10.1038/nature02201>
- Jiang, G. Q., Kennedy, M. J., Christie-Blick, N., et al., 2006. Stratigraphy, Sedimentary Structures, and Textures of the Late Neoproterozoic Doushantuo Cap Carbonate in South China. *Journal of Sedimentary Research*, 76(7): 978—995.<https://doi.org/10.2110/jsr.2006.086>
- Jiang, G. Q., Shi, X. Y., Zhang, S. H., et al., 2011. Stratigraphy and Paleogeography of the Ediacaran Doushantuo Formation (ca. 635—551 Ma) in South China. *Gondwana Research*, 19: 831—849. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2011.01.006>
- Kendall, B., Komiya, T., Lyons, T. W., et al., 2015. Uranium and Molybdenum Isotope Evidence for an Episode of Widespread Ocean Oxygenation during the Late Ediacaran Period. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 156: 173—193.<https://doi.org/10.1016/j.gca.2015.02.025>
- Lee, J. S., Chao, Y. T., 1924. Geology of the Gorges District of the Yangtze (from Ichang to Tzekuei) with Special Reference to the Development of the Gorges. *Bulletin of the Geological Society of China*, 3(3—4):351—391.
- Li, X. X., 2014. The Variation and Implication of Carbon Isotope from the Doushantuo Formation in the Sirensan-Dingbai Section across the East Yangtze Gorges (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing, 1—57.
- Li, Z. M., Dongye, M. X., Zheng, W. Z., et al., 1994. How to

- Constrain in Character and Time the Conglomerate Layers Underlying the Phosphate-Bearing Sequences in the Western Hubei. *Geology of Chemical Minerals*, 16(3):173—176 (in Chinese with English abstract).
- Liu, P.J., Yin, C.Y., Chen, S.M., et al., 2013. The Biostratigraphic Succession of Acanthomorphic Acritarchs of the Ediacaran Doushantuo Formation in the Yangtze Gorges area, South China and Its Biostratigraphic Correlation with Australia. *Precambrian Research*, 225: 29—43. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2011.07.009>
- Liu, P.J., Yin, C.Y., Gao, L.Z., et al., 2009. New Material of Microfossils from the Ediacaran Doushantuo Formation in the Zhangcunping Area, Yichang, Hubei Province and Its Zircon SHRIMP U-Pb Age. *Chinese Science Bulletin*, 54(1):1—7.
- McFadden, K.A., Huang, J., Chu, X.L., et al., 2008. Pulsed Oxidation and Biological Evolution in the Ediacaran Doushantuo Formation. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, 105(9):3197—3202. <https://doi.org/10.1073/pnas.0708336105>
- McFadden, K.A., Xiao, S.H., Zhou, C.M., et al., 2009. Quantitative Evaluation of the Biostratigraphic Distribution of Acanthomorphic Acritarchs in the Ediacaran Doushantuo Formation in the Yangtze Gorges Area, South China. *Precambrian Research*, 173(1—4): 170—190. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2009.03.009>
- Scott, C., Lyons, T.W., Bekker, A., et al., 2008. Tracing the Stepwise Oxygenation of the Proterozoic Ocean. *Nature*, 452(7185): 456—459. <https://doi.org/10.1038/nature06811>
- Wang, J.S., Jiang, G.Q., Xiao, S.H., et al., 2008. Carbon Isotope Evidence for Widespread Methane Seeps in the ca. 635 Ma Doushantuo Cap Carbonate in South China. *Geology*, 36(5):347—350. <https://doi.org/10.1130/G24513A.1>
- Wang, J.S., Wang, Z., Hu, J., et al., 2012. Multiple Proxies Indicating Methane Seepage during the Neoproterozoic Cap Carbonate in South China. *Earth Science*, 37(S2): 14—22 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2012.S2.003>
- Wang, X.F., Erdtmann, B.D., Chen, X.H., et al., 1998. Integrated Sequence-, Bio- and Chemo- Stratigraphy of the Terminal Proterozoic to Lowermost Cambrian “Black Rock Series” from Central South China. *Episodes*, 21(3):178—189.
- Wang, Z., Wang, J.S., Suess, E., et al., 2017. Silicified Glendonites in the Ediacaran Doushantuo Formation (South China) and Their Potential Paleoclimatic Implications. *Geology*, 45(2): 115—118. <https://doi.org/10.1130/G38613.1>
- Xiao, S.H., McFadden, K.A., Peek, S., et al., 2012. Integrated Chemostratigraphy of the Doushantuo Formation at the Northern Xiaofenghe Section (Yangtze Gorges, South China) and Its Implication for Ediacaran Stratigraphic Correlation and Ocean Redox Models. *Precambrian Research*, 192—195:125—141. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2011.10.021>
- Xiao, S.H., Yuan, X.L., Steiner, M., et al., 2002. Macroscopic Carbonaceous Compressions in a Terminal Proterozoic Shale: A Systematic Reassessment of the Miaohe Biota, South China. *Journal of Paleontology*, 76(2):347—376.
- Yang, A.H., Zhu, M.Y., Zhang, J.M., et al., 2015. Sequence Stratigraphic Subdivision and Correlation of the Ediacaran (Sinian) Doushantuo Formation of Yangtze Plate, South China. *Journal of Palaeogeography*, 17(1):1—20 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.7605/gdlxb.2015.01.001>
- Yang, G.Z., Song, Y.Q., Nie, K.H., et al., 2010. Analysis on Metallocogenetic Geological Features and Deep Prospecting Model for Yichang Phosphate Ore Field. *J. Mineral. Petrol.*, 30(2):50—59 (in Chinese with English abstract).
- Ye, Q., Tong, J.N., An, Z.H., et al., 2015. Phosphatized Fossil Assemblage from the Ediacaran Doushantuo Formation in Zhangcunping Area, Yichang, Hubei Province. *Acta Palaeontologica Sinica*, 54(1):43—65 (in Chinese with English abstract).
- Yin, L.M., Zhu, M.Y., Knoll, A.H., et al., 2007. Doushantuo Embryos Preserved inside Diapause Egg Cysts. *Nature*, 466(7301):661—663. <https://doi.org/10.1038/nature05682>
- Yuan, X.L., Chen, Z., Xiao, S.H., et al., 2011. An Early Ediacaran Assemblage of Macroscopic and Morphologically Differentiated Eukaryotes. *Nature*, 470(7334): 390—393. <https://doi.org/10.1038/nature09810>
- Zhou, C.M., Li, X.H., Xiao, S.H., et al., 2017. A New SIMS Zircon U-Pb from the Ediacaran Doushantuo Formation: Age Constraint on the Weng'an Biota. *Geological Magazine*, 1—9. <https://doi.org/10.1017/S0016756816001175>
- Zhou, C.M., Xie, G.W., McFadden, K.A., et al., 2007. The Diversification and Extinction of Doushantuo-Pertatataka Acritarchs in South China: Causes and Biostratigraphic Significance. *Geological Journal*, 42:229—262. <https://doi.org/10.1002/gj.1062>
- Zhou, C.M., Xie, G.W., Xiao, S.H., 2005. New Data of Microfossils from Doushantuo Formation at Zhangcunping in Yichang, Hubei Province. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 22(3):217—224 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, M.Y., Lu, M., Zhang, J.M., et al., 2013. Carbon Isotope Chemostratigraphy and Sedimentary Facies Evolution of the Ediacaran Doushantuo Formation in Western Hu-

- bei, South China. *Precambrian Research*, 225: 7—28.
<https://doi.org/10.1016/j.precamres.2011.07.019>
- Zhu, M. Y., Zhang, J. M., Steiner, M., et al., 2003. Sinian-Cambrian stratigraphic framework for shallow- to deep-water environments of the Yangtze Platform: An integrated approach. *Progress in Natural Science*, 13(12): 951—960.
- Zhu, M. Y., Zhang, J. M., Yang, A. H., 2007. Integrated Ediacaran (Sinian) Chronostratigraphy of South China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 254(1—2): 7—61. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2007.03.025>
- Zhu, W. Q., Chen, M. E., 1984. On the Discovery of Macrofossil Algae from the Late Sinian in the Eastern Yangtze Gorges, South China. *Acta Botanica Sinica*, 26 (5): 558—560 (in Chinese).
- 邓延忠,欧宜珪,朱京革,1986.湖北王集磷矿陡山沱组下部砾岩的成因.化工矿产地质,2: 58—61.
- 丁莲芳,李勇,胡夏嵩,等,1996.震旦系庙河生物群.北京:地质出版社,1—221.
- 李小霞,2014.峡东似人山—丁白剖面陡山沱组碳同位素变化及其指示意义(硕士学位论文).北京:中国地质大学,1—57.
- 李钟模,东野脉兴,郑文忠,等,1994.对鄂西地区含磷岩系下伏砾岩地层归属的认识.化工地质,16(3): 173—176.
- 王家生,王舟,胡军,等,2012.华南新元古代“盖帽”碳酸盐岩中甲烷渗漏事件的综合识别特征.地球科学,37(S2): 14—22.
- 杨爱华,朱茂炎,张俊明,等,2015.扬子板块埃迪卡拉系(震旦系)陡山沱组层序地层划分与对比.古地理学报,17 (1): 1—20.
- 杨刚忠,宋银桥,聂开红,等,2010.宜昌磷矿田成矿地质特征及深部找矿模式探析.矿物岩石,30(2): 50—59.
- 叶琴,童金南,安志辉,等,2015.湖北宜昌樟村坪埃迪卡拉系陡山沱组磷酸盐化微体化石组合.古生物学报,54(1): 43—65.
- 周传明,解古巍,肖书海,2005.湖北宜昌樟村坪陡山沱组微体化石新资料.微体古生物学报,22(3): 217—224.
- 朱为庆,陈孟莪,1984.峡东区上震旦统宏体化石藻类的发现.植物学报,26(5): 558—560.

附中文参考文献

- 安志辉,童金南,叶琴,等,2014.峡东青林口地区新元古代地层序列及沉积演变.地球科学,39(7): 795—806.
- 陈寿铭,尹崇玉,刘鹏举,等,2010.湖北宜昌樟村坪埃迪卡拉系陡山沱组硅磷质结核中的微体化石.地质学报,84 (1): 70—77.
- 全国地层委员会,2002.中国区域年代地层(地质年代)表说明书.北京:地质出版社,1—72.