

文章编号: 1009-3850(2010)03-0046-07

贵州瓮安陡山沱组含磷岩系沉积序列及磷块岩的形成

密文天¹, 林丽¹, 马叶情¹, 王新利², 任才云³, 周玉华³

(1. 成都理工大学 沉积地质研究院, 四川 成都 610059; 2. 鑫达金银开发中心, 北京 100054; 3. 贵州瓮福磷矿, 贵州 福泉 550508)

摘要: 贵州瓮安陡山沱组磷块岩为碳酸盐岩型含磷岩系, 属于浅海碳酸盐岩台地沉积区。对瓮安磷矿大塘剖面进行沉积环境研究, 将 Marjorcan冰期后沉积的陡山沱组地层分为6个向上变浅的沉积序列。瓮安含磷岩系大部分为多旋回的叠置体, 其常见的交错层理、波状层理、透镜状层理等表明了磷块岩形成于水体较浅的高能环境。南沱冰期后, 陡山沱期剧烈的海侵作用引发上升洋流, 携带富磷海水涌入浅水区, 在海平面间歇性波动的条件下, 为磷块岩的形成提供了物源与动力条件。

关 键 词: 贵州; 瓮安; 陡山沱组; 磷块岩; 沉积序列

中图分类号: P588.2

文献标识码: A

1 前言

贵州瓮安陡山沱组含磷地层是地史时期全球第一次大规模成磷事件的典型代表。在地层学及层序划分方面, 周传明等将瓮安陡山沱组以中部的古喀斯特侵蚀面为界分为下、上两个岩性段: 下段的白云岩磷块岩 白云岩序列和上段的磷块岩 白云质生屑磷块岩 磷质白云岩序列^[1]; 尹崇玉等对陡山沱组进行了层序地层学研究, 认为瓮安地区与峡东地区无论在沉积组合还是生物组合上都有所不同, 但层序划分具有完全对比性, 两地有共同的海水进退过程及等时界面^[2]。在有机地球化学方面, Wang等将瓮安陡山沱组磷块岩与冰期沉积物的有机碳等指标进行对比, 发现前者比后者含量高出一个数量级^[3], 显示冰期后古海洋生产力大幅提高。在古生物学方面, 继《NATURE》报道瓮安陡山沱组磷块岩中发现三维细胞结构的藻类与动物胚胎化石后^[4], Chen等报道了其中与腔肠动物有亲缘关系的胚胎

和幼虫, 这些胚胎由早期卵裂胚胎和双层状原肠胚所组成, 为该地区生物起源提供一个新的视角^[5]; 殷宗军等对瓮安生物群化石的含量统计分析后发现, 磷块岩中化石质量和岩石中磷酸盐组分质量成正线性相关, 证实了保存在瓮安陡山沱组上磷矿段灰色富氧含磷埋藏相中的瓮安生物群主要由动物胚胎化石组成^[6]。在同位素年代学方面, 刘鹏举等据 SHRIMP锆石 U-Pb研究结果, 认为陡山沱组中部暴露间断面之上出现的瓮安生物群存在的年龄晚于 614 ± 7.6 Ma^[7]。

在磷块岩成因方面, Sher等认为震旦纪 寒武纪的两个成磷阶段, 磷块岩形成机制有所不同, 在陡山沱期的成磷事件中, 微生物的过度繁殖与铁离子泵的作用可能起了很大作用^[8]。黄永建等认为总磷和活性磷的埋藏速率与长期的海平面变化明显关联, 在温室气候条件下两者基本呈正相关关系^[9], 这与冰期后陡山沱期大规模的海侵作用相一致。在化学地层学方面, 瓮安陡山沱组 $\delta^{13}\text{C}$ 值显示出两个

收稿日期: 2010-04-26 改回日期: 2010-08-03

作者简介: 密文天 (1982-), 男, 博士, 主要从事古生物学与地层学方面的研究

资助项目: 国家自然科学基金项目 (批准号: 40743016)、教育部“高等学校博士学科点专项科研基金” (批准号: 20070616014)、中石化海相油气勘探前瞻性项目 (编号: G0800-06-25-319) 和贵州瓮福大信北斗山磷矿项目联合资助

负异常, 其 $\delta^{13}\text{C}$ 绝对值与华南三峡地区及全球其它地区同时代地层明显不同, 在某种程度上代表了古代海水的地球化学特征, 记录了陡山沱盆地氧化界面在空间和时间上的不稳定性^[10]。本文在分析实测剖面资料的基础上, 对瓮安陡山沱组地层进行沉积序列划分, 并探讨磷块岩沉积环境的变化。

2 地质背景

瓮安磷矿所在的黔中成磷区位于黔湘鄂磷矿带的南部, 大地构造上属于扬子地台黔中隆起的北部。矿区属于白岩高坪背斜构造, 中部由小坝断层截断, 北部为白岩背斜, 南部为高坪背斜^[11], 受南北向和北西南东向断裂破坏。背斜核部出露的最老地层为前震旦系板溪群清水江组, 向两侧依次出露震旦系、寒武系地层。瓮安陡山沱组地层一般分为两个大的沉积旋回, 中间被一侵蚀间断面分隔。年代为 551~630 Ma 的陡山沱组^[12] 沉积在南沱组冰砾岩之上, 下伏于灯影组碳酸盐岩沉积。陡山沱组与下伏南沱组或者板溪群为假整合接触, 局部地段呈明显角度不整合接触; 灯影组则与下伏陡山沱组整合接触。

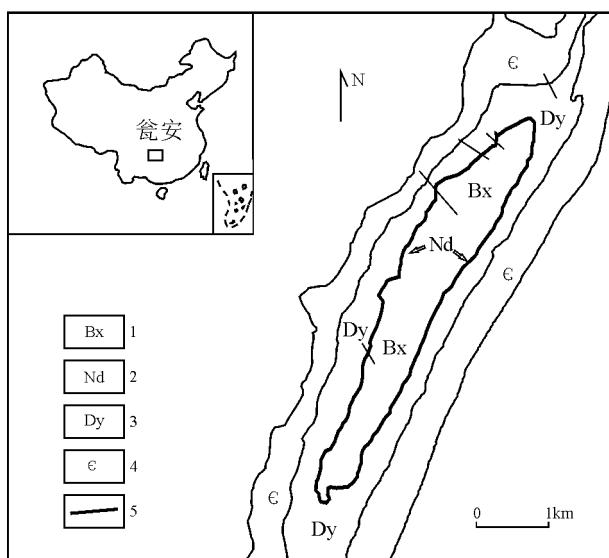


图 1 贵州瓮安磷矿区域地质图^[11]

(据吴凯等, 2006, 略改)

1 板溪群; 2 南沱组与陡山沱组; 3 灯影组; 4 寒武系; 5 断层
Fig. 1 Regional geological map of the Weng'an phosphorite deposit in Guizhou (modified from Wu Kai et al., 2006)
1 = Banxi Group, 2 = Nanduo Formation and Doushantuo Formation, 3 = Dengying Formation, 4 = Cambrian, 5 = fault

陡山沱组含磷岩系为冰期后海平面上升形成的海侵沉积体系。陡山沱期时该区处于黔中隆起向北

东倾斜的浅水环境, 属于台地型沉积区。实测的瓮安大塘矿段剖面, 自下而上大体分为 4 个岩性段: 第一岩性段为底板段, 厚 10.1 m, 下部为代表滞留沉积的灰绿色泥岩, 上部为泥质或硅质白云岩; 第二岩性段为下矿层, 厚 5.7 m, 下部为白云质砂屑磷块岩, 上部为薄板状或条带状磷块岩及硅质磷块岩层 (图 2a, 2d)。含磷海水涌入浅水地带后沉积了下磷矿层, 后随着海平面变化, 经过暴露剥蚀作用, 形成了第三岩性段, 即夹层段, 由硅质磷块岩及含硅磷质白云岩组成, 厚 2.1 m; 第四岩性段为上矿层, 厚 8.0 m, 为主要磷矿层, 瓮安生物群化石即发现于陡山沱组上磷矿层中, 由含球粒砂屑磷块岩、不规则凝块状藻磷块岩、白云质砂砾屑磷块岩及白云岩等组成。

3 沉积序列划分

瓮安陡山沱组含磷岩系由于受南沱冰期时复杂古地理地形控制, 沉积厚度在各局部区域有很大差异, 沉积环境总体为川黔滇台地东南缘陆表海型碳酸盐岩台地环境, 碎屑岩、碳酸盐岩、磷酸盐岩为其基本组合类型。在结合尹崇玉等前人研究的基础上^[2], 本文将其划分为 6 个向上变浅的沉积序列。向上变浅的沉积组合是海平面不断侵进和上升时期的产物, 主要发育潮下及潮间坪沉积微相^[2] (图 2)。对发育最厚、沉积旋回最完整的大塘段陡山沱组地层的分析显示, 海平面的多次波动变化增加了成磷物质的输入, 对磷矿的形成有积极作用。

3.1 第 1~2 序列

第 1~2 沉积序列属于底板段。在 Marinoan 冰期时, 瓮安大塘属于冰水沉积区, 沉积了一套灰绿色粉砂质泥岩及冰砾砾岩。冰期后, 冰砾岩上沉积有 $\delta^{13}\text{C}$ 值明显负漂移的“盖帽碳酸盐岩”, 其不仅在华南地区而且在全球都有广泛分布。第 1~2 序列的浅水台地相碳酸盐岩沉积可以与冰期后呈全球性发育的盖帽碳酸盐岩相对比, 处于下矿层与冰砾岩之间, 其主体由细晶或泥晶白云岩、硅质岩及少量泥岩组成。在第 1 序列内, 在冰水沉积物基底上发育有海绿色片状泥岩, 存在波状层理及微细交错层理, 代表最初的陡山沱期海侵作用的沉积。早期海侵时, 大塘地区可能为一个小型海湾, 与南沱期小型冰水湖展布相吻合^[1]。其上依次为泥质白云岩、硅质白云岩及厚层粉晶白云岩等, 白云岩化和硅化作用明显, 含有较多的硅质条带及团块, 为潮间带沉积, 构成了首个向上变浅的潮坪旋回沉积体系。第 2 序列可分为两个更小的沉积旋回。下部次级旋回中, 底部沉

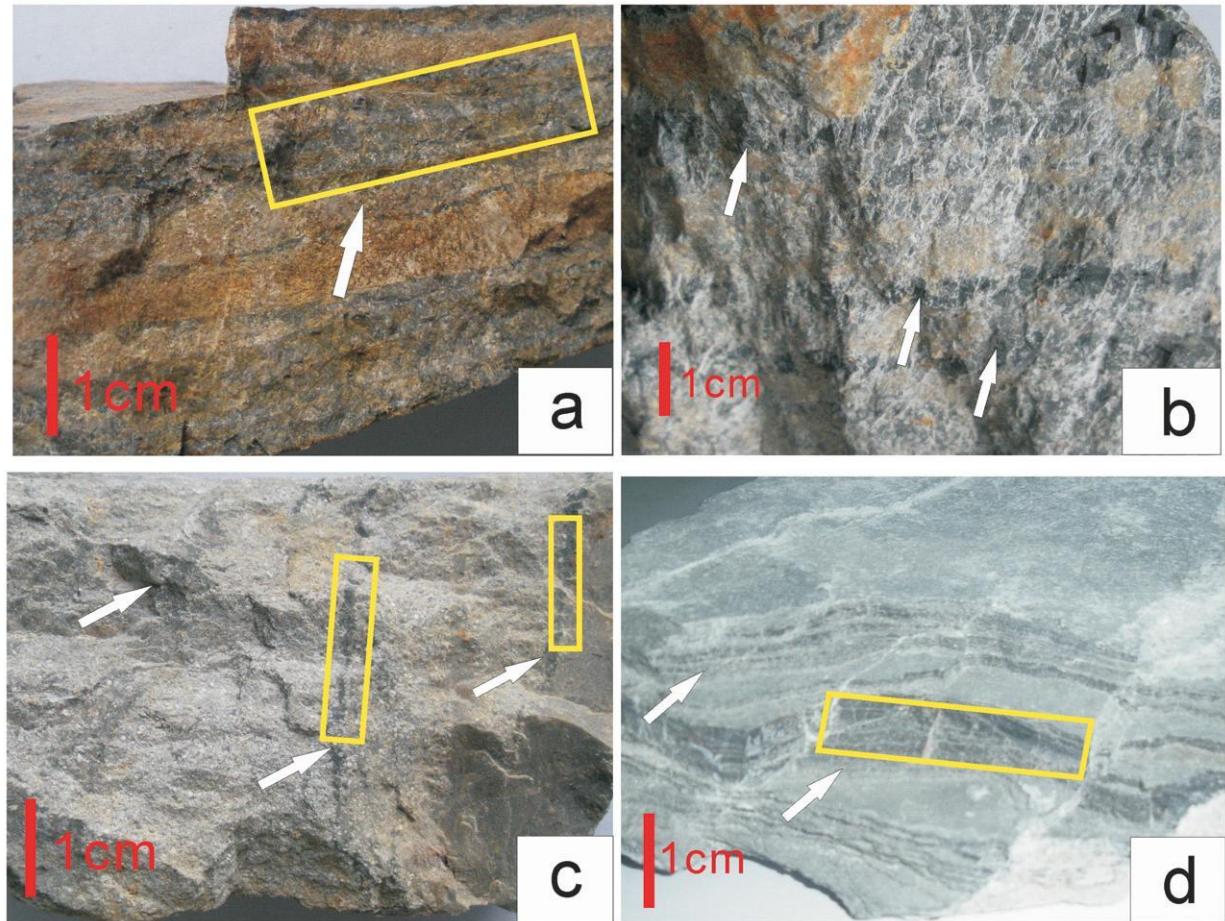


图 2 贵州瓮安陡山沱组沉积特征

^a 陡山沱组下矿层下部, 潮下带砂屑磷块岩沉积, 深灰色条纹及条带为砂屑胶磷矿, 黄红色为白云质砂屑磷块岩, 大塘剖面; ^b 陡山沱组上矿层上部, 深潮下带砂砾屑磷块岩沉积, 潮汐冲刷与充填构造, 可见潮汐层理与平行层理, 大塘剖面; ^c 陡山沱组上矿层中部, 深潮下带砾屑磷块岩沉积, 箭头指示砾屑胶磷矿, 平行层理, 大塘剖面; ^d 陡山沱组下矿层上部, 浅潮下带薄板状白云质磷块岩, 水平层理, 大塘剖面

Fig. 2 Sedimentary features of the Doushan tuo Formation in Weng'an, Guizhou

^a Subtidal sandy phosphorites in the lower part of the lower ore horizons of the Doushan tuo Formation; ^b Subtidal sandy and gravelly phosphorites in the upper part of the upper ore horizons of the Doushan tuo Formation; ^c Subtidal gravelly phosphorites in the middle part of the upper ore horizons of the Doushan tuo Formation; ^d Subtidal dolomitic phosphorites in the upper part of the lower ore horizons of the Doushan tuo Formation

积物组成突然变化, 下部为粘土质泥岩、粉砂质泥岩层, 向上白云质逐渐增多, 形成泥质白云岩, 含少量砂质泥岩; 上部次级旋回的下部为含黄铁矿的泥岩, 白云质较少, 向上变为泥质白云岩, 夹有泥质岩屑。第 2 序列的沉积为潮间带砂泥坪及浅潮间带混积坪的沉积体系。

3.2 第 3~6 序列

这 4 个序列皆是以磷酸盐岩为特征的沉积体系, 潮汐韵律层理发育明显, 构成了以潮下带 潮间带沉积为主的向上变浅的沉积序列。海侵进一步扩大, 上升洋流携带富磷海水的涌入为其沉积提供了动力条件。这些含磷沉积序列反映了在海侵高峰期的高水位下海平面的波动频繁, 这就为磷块岩的沉

积不断补充了成磷物质, 形成了充分、持续的物源供给。含磷岩系大部分为多旋回的叠置体, 其常见的交错层理、波状层理、透镜状层理等充分说明了层状颗粒磷块岩形成于水体较浅的高能环境。第 3 序列下部由白云质砂屑磷块岩或砂屑磷质白云岩组成, 反映了深潮下带环境(图 2^a), 多为潮汐层理构造; 上部为灰白色厚层块状硅磷质白云岩, 为潮间带沉积环境。第 4 序列内, 下部为纹层状砂屑磷块岩、白云质砂屑磷块岩, 发育平行层理、压扁透镜状层理及各种潮汐冲刷侵蚀与充填构造^[2], 显示海水不断加深的过程, 为深潮下带环境; 上部依次出现白云质砂屑磷块岩、硅质磷块岩及硅质白云岩等, 磷质白云岩间有滑动揉皱现象, 应为潮间带环境, 其白云岩

化、硅化趋势明显,显示海退时期水体变浅、暴露作用的影响;顶部为夹层段上部,有明显的沉积间断,属于古喀斯特现象。古岩溶洞内填充有少量磷块岩。这次地表风化暴露事件被认为与 Gaskiers冰期(582 Ma)有关^[12],海水的快速升降震荡可能形成了冲蚀力较强的底流,磷块岩及硅质团块定向排列在凹凸不平的间断面上。含磷岩系中的沉积间断面及缺失面经常出现,而这些区带往往水动力条件最强,海面的进退也最为频繁^[13],海水震荡导致生物地球化学条件经常改变。第5序列下部为灰色薄中层磷块岩、硅泥质磷块岩,中部为深色薄中层灰质及磷质粉砂岩,胶磷矿具有鲕粒结构,发育平行层理;上部为灰白色厚层含硅质团块白云质磷块岩及砂砾屑磷块岩(图29),具有鲕粒及团粒等磷质颗粒组分,并发育有石英晶洞,总体上表现为从深潮下带向潮间带的过渡,水动力仍然较强。此序列为疑源类、多细胞藻类、丝状球状蓝菌细菌类及后生动物化石等瓮安生物群组成分子开始密集出现的层位,呈三维立体保存的磷酸盐化微体生物化石在第5序列内的上部与下部保存水平有所差异,Stepher等认为该层位下部,即紧靠近凹凸不平的中部冲刷面的磷块岩层,其磷质化学沉积作用比较充分,而次生白云石化作用较轻,且较低水平的改造作用有利于瓮安生物群化石的保存,而上部的成岩改造作用较强,不利于化石的保存^[14]。根据这一观点,序列5应作为磷酸盐化后生生物化石保存的主要层位。第6序列下部为砂屑磷块岩(图2b),具有平行及波状层理构造,磷质颗粒多为半棱角状至浑圆状,总体上磨圆度较好,由泥晶磷块岩破碎后胶结组成,胶结物多为粉晶白云石,反映了砂屑经过搬运重新富集成矿,暗示磷块岩形成于具有较强水动力条件的潮下带沉积环境中,上部依次为不规则块状角砾状白云质磷块岩、薄中层磷质白云岩,内部含有磷质条带及条纹;最上部为含硅质团块白云岩及含磷白云岩,Xiao等发现的藻类及动物胚胎化石就产于此层位^[1,4]。总体为深潮下带潮间带的沉积环境。据Condon等同位素年代学研究^[12],陡山沱期时间跨度约为 $70\sim80\text{ Ma}$ 之间,由于中部的冲刷界面处出现沉积间断,每个沉积序列平均时限应在 10 Ma 以内。在海侵阶段,规模较小的震荡运动($1\sim10\text{ Ma}$)十分频繁,这与瓮安含磷岩系的沉积序列时限相符合。

4 海侵作用与磷块岩的形成

陡山沱期大海侵使上扬子区进入成磷期。瓮安

地区处于滨岸潮坪带的浅水环境,为磷块岩的形成提供了场所。有利于磷质来源和造成浅水环境的地质构造背景应是隆起与拗陷相互配合,隆起地段形成成磷场所,拗陷地段保证深层海水供应的磷质来源^[13]。瓮安地区处于黔中隆起且附近有拗陷地段,使其成为有利的成磷区。潮下带潮间带形成的砂屑磷块岩成为其原生沉积型磷矿床的重要类型。3~6的各序列上部由于海平面下降时的白云石化作用,使矿石品位下降。前寒武纪大型矿床的含矿系都与海侵活动有关,海平面波动创造了成矿物质沉淀聚集的环境,并导致沉积环境变化^[15]。瓮安含磷岩系也不例外,除底板段外形成了4组磷酸盐岩碳酸盐岩沉积序列,每组都显示了韵律性的岩性组合。新元古代末寒武纪的磷块岩沉积的磷质来源主要由上升洋流的涌入、陆壳风化的地表含磷物的搬运和深部热源或热点活动三个方面提供^[16]。南沱冰期时剧烈的物理风化作用和陡山沱期气候转暖后的化学风化将陆壳磷质输入海洋;同时,“雪球地球”时期过后,冰层融化解除了对海洋生物光合作用的阻挡^[17],海洋从滞留、封闭状态转为对流状态,大洋环流重新开始,上升洋流将深海的富磷海水带到滨海区。厌氧的硫酸盐还原细菌的作用使陡山沱期大洋底水具有高 $\delta^{34}\text{S}$ 值和高磷的状态,浅水地区则很低^[18~19]。海侵作用为二者的交换提供了初始动力,海侵扩大了海水覆盖面,形成的浅水区域提供了成磷场所,在海平面间歇性波动震荡的背景下,最终使黔中瓮安地区形成纵向上具有旋回性特点的磷酸盐岩碳酸盐岩互层沉积。

5 成磷事件的意义

磷元素只占地壳质量的 0.09% ,但作为一种生命元素,生物的新陈代谢与光合作用都有磷的参与,而DNA双螺旋结构和细胞膜的建造也离不开磷。磷在古细菌和藻类进行光合作用产生氧气过程中也发挥着作用。Javaux等认为氧气的缺乏是导致真核生物进化缓慢的制约因素^[20],而在古海洋中氧气的积累靠藻类等低等生物的光合作用来释放。同时,古海洋中活性磷的增加对于大洋生物生产力的提高极为有利^[21],可见,磷在生命早期的生态系统中很重要,磷循环推动了环境和生物圈的协同演化。新元古代末期早寒武世,成磷事件与生物演化事件几乎同时出现:在陡山沱期,瓮安生物群、庙河生物群和蓝田植物群所代表的真核生物大辐射事件与陡山沱期的成磷现象有着一定的联系(图3)。陡山沱期

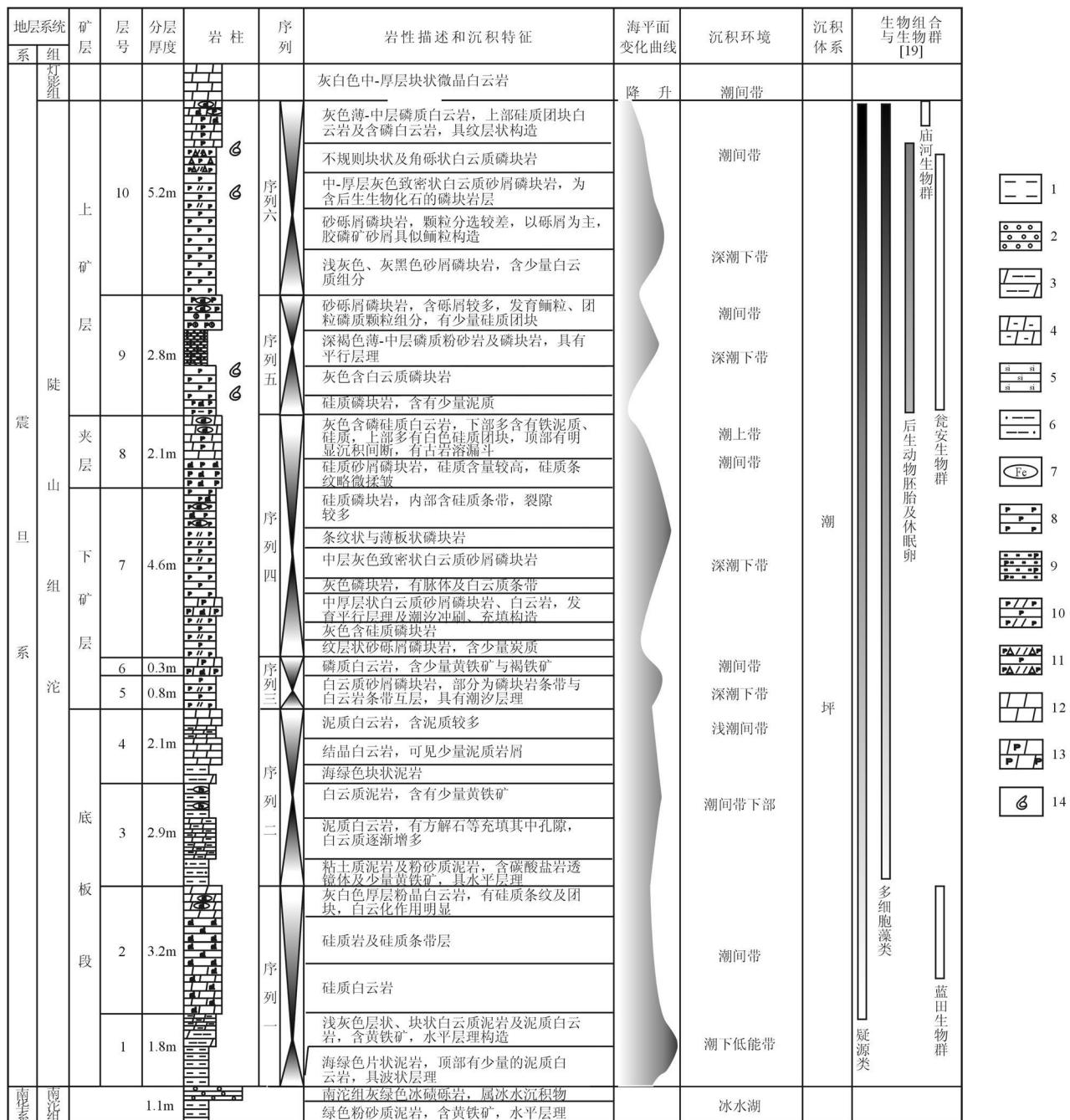


图 3 贵州瓮安陡山沱组剖面沉积序列

1 泥岩; 2 冰砾砾岩; 3 白云质泥岩; 4 泥质白云岩; 5 硅质岩; 6 粉砂质泥岩; 7 黄铁矿; 8 磷块岩; 9 磷质粉砂岩; 10 白云质磷块岩; 11 角砾状磷块岩; 12 白云岩; 13 磷质白云岩; 14 生物化石

Fig. 3 Depositional sequence through the Doushantuo Formation in Weng'an, Guizhou

1=mudstone; 2=moraine conglomerate; 3=dolomitic mudstone; 4=muddy dolostone; 5=siliceous rock; 6=silty mudstone; 7=pyrite; 8=phosphorite; 9=phosphate siltstone; 10=dolomitic phosphorite; 11=brecciated phosphorite; 12=dolostone; 13=phosphate dolostone; 14=biological fossil

古洋水中磷的增加导致浅海中以疑源类、低等藻类为代表的初始生产力提高, 进而由于“牧食压力”和种群的生态空间竞争推动真核浮游生物产生了大量繁殖和自身结构的进化^[22]。前寒武纪大部分时期,

游离氧仅能支持单细胞异养生物的呼吸, 而游离氧至少达到大约 6% ~ 10% PAI 才能维持正常的生物呼吸作用^[23]; 而新元古代末的大冰期之后, 大气中氧浓度达到一定水平, 可以维持动物的呼吸作用。

但是大气圈中自由氧的增长是与低等藻类生物的光合作用分不开的,而无论是它们的大量繁殖还是光合作用的进行都与古海水中的磷分不开。正是由于磷、氧循环之间的耦合关系以及磷循环对大气氧含量的稳定作用^[21, 24, 25],才使瓮安生物群后生动物的出现成为可能。可见,磷循环对推动地球早期生命演化尤其在真核细胞生物向多细胞动物进化、宏体藻类的演化有重要作用。

6 结 论

利用地层学等方法对瓮安地区含磷岩系进行研究,结合南沱冰期结束后陡山沱期大规模海侵作用的环境背景,得出以下几点认识:

(1)通过对瓮安磷矿大塘剖面进行沉积环境分析,将陡山沱组地层划分为6个向上变浅的沉积序列,底板层的两个序列并无大规模成磷现象出现;上、下磷矿层及夹层段为磷块岩富集层段,潮下带-潮间带为成磷的优势区带。

(2)南沱冰期后陡山沱期大海侵引发的上升洋流携带大量富磷海水进入瓮安地区的浅水环境,在有利的成磷场所下形成了4个磷酸盐岩-碳酸盐岩沉积序列;陡山沱期古海洋海平面的持续波动,为磷块岩的沉积不断补充了成磷物质,形成了充分、持续的物源供给。

(3)成磷事件是地球古海洋磷循环的表现形式,海洋中磷含量的增加为生物进化提供了动力,导致了以瓮安生物群等为代表的陡山沱期生物事件的发生。

参考文献:

- [1] 周传明,薛耀松,张俊明.贵州瓮安磷矿上震旦统陡山沱组地层和沉积环境[J].地层学杂志,1998,22(4):308—314.
- [2] 尹崇玉,柳永清,高林志,等.震旦(伊迪卡拉)纪早期磷酸盐化生物群:瓮安生物群特征及其环境演化[M].北京:地质出版社,2007.4—119.
- [3] WANG T G, LI MEIJUN, WANG CHUNJANG et al. Organic molecular evidence in the Late Neoproterozoic Tillites for a paleo-oceanic environment during the snowball Earth era in the Yangtze region, southern China[J]. Precambrian Research, 2008, 162: 317—326.
- [4] XIAO S, ZHANG Y, KNOLL A H. Three-dimensional preservation of algae and animal embryos in a Neoproterozoic phosphorite[J]. Nature, 1998, 394: 553—558.
- [5] 陈均远,迟慧梅.贵州前寒武纪陡山沱组磷酸盐化胚胎和幼虫化石及其亲缘性[J].科学通报,2005,50(16):1750—1757.
- [6] 殷宗军,朱茂炎.贵州埃迪卡拉纪瓮安生物群化石含量的统计分析[J].古生物学报,2008,47(4):477—487.
- [7] 刘鹏举,尹崇玉,高林志,等.湖北宜昌樟村坪埃迪卡拉系陡山沱组微体化石新材料及锆石 SHRIMP U-Pb年龄[J].科学通报,2009,54(6):774—780.
- [8] SHEN Y, SCHIDLICKI M, CHU X. Biogeochemical approach to understanding phosphogenic events of the terminal Proterozoic to Cambrian[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2000, 158: 99—108.
- [9] 黄永建, Théry A, 邹艳荣,等.古海洋活性磷埋藏记录及其在氧气地球化学循环研究中的运用[J].地学前缘,2005,12(2):189—197.
- [10] 蒋干清,张世红,史晓颖,等.华南埃迪卡拉纪陡山沱盆地氧化界面的迁移与碳同位素异常[J].中国科学D辑:地球科学,38(12):1481—1495.
- [11] 吴凯,马东升,潘家永,等.贵州瓮安磷矿陡山沱组地层元素地球化学特征[J].东华理工学院学报,2006,29(2):108—114.
- [12] CONDON D, ZHU M, BOWRING S et al. U-Pb ages from the Neoproterozoic Doushantuo Formation, China[J]. Science, 2005, 308: 95—98.
- [13] 叶连俊,陈其英,赵东旭等.中国磷块岩[M].北京:科学出版社,1989.
- [14] DORNBOS S Q, BOTTJER D J, CHEN J et al. Environmental controls on the taphonomy of phosphatized animals and animal embryos from the Neoproterozoic Doushantuo Formation, Southwest China[J]. Paläjörs, 2006, 21: 3—14.
- [15] 范德廉,张焘,叶杰,等.中国的黑色岩系及其有关矿床[M].北京:科学出版社,2004.76—437.
- [16] 吴朝东,陈其英.湘西磷块岩的岩石地球化学特征及成因[J].地质科学,1999,34(2):213—222.
- [17] HOFFMAN P F, KAUFMAN A J, HALVERSON G P et al. A Neoproterozoic snowball Earth[J]. Science, 1998, 281: 1342—1346.
- [18] COOK P J, SHERGOLD J H. Phosphorus, phosphorites, and skeletal evolution at the Precambrian-Cambrian Boundary[J]. Nature, 1984, 308: 231—236.
- [19] ZHU MAOYAN, ZHANG JUNMING, YANG A HUA. Integrated Ediacaran (Sinian) chronostratigraphy of South China[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2007, 254: 7—61.
- [20] JAVAUX E J, KNOLL A H, WALTER M R. Morphological and ecological complexity in early eukaryotic ecosystems[J]. Nature, 2001, 412: 66—69.
- [21] LENION T M, WATSON A J. Redfield revisited I. Regulation of nitrate, phosphate and oxygen in the ocean[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2000, 14: 225—248.
- [22] 袁训来,肖海,周传明.新元古代陡山沱期真核生物的辐射[A].戎嘉余,方宗杰,周忠和,等.生物的起源、辐射与多样性演变:华夏化石记录的启示[C].北京:科学出版社,2006.13—27.
- [23] 张同钢,储雪蕾,陈孟羲,等.新元古代全球冰川事件对早期生物演化的影响[J].地学前缘,2002,9(3):49—56.
- [24] PETSCH S T, BERNER R A. Coupling the geochemical cycles

of C, P, Fe and S. The effect on atmospheric O₂ and the isotope records of carbon and sulfur [J]. American Journal of Science, 1998, 298: 246—262.

[25] KUMP LR. Terrestrial feedback in atmospheric oxygen regulation by fire and Phosphorus [J]. Nature, 1988, 335: 152—154.

Depositional sequences of the phosphatic rock series and formation of the phosphorites in the Doushantuo Formation in Weng'an Guizhou

MI Wen-tjard, LIN Li, MA Ye-qing, WANG Xin-li, REN Cai-yun, ZHOU Yu-hua

(1. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2. Xinda Gold-Silver Development Center, Beijing 100054, China; 3. Weng'an Fuquan Phosphorus Mine Company, Fuquan 550508, Guizhou, China)

Abstract The phosphorites in Weng'an Guizhou are hosted in the lower and upper parts of the Doushantuo Formation and made up of carbonate rock-type phosphatic rock series on a shallow marine carbonate platform. The strata of the Doushantuo Formation deposited after the Marinoan glacial period may be grouped into six shallowing-upward depositional sequences. The bulk of phosphatic rock series is built up of polycyclic stacking deposits in which cross-bedding, wavy bedding and lenticular bedding are common, implying that the phosphorites rested in the shallow marine high-energy environments. From the Nantuoan glacial period onwards, the large-scale transgressions gave rise to the upwelling oceanic currents and carried plentiful phosphatic sea water into the shallow marine areas as sites of phosphorites development. The repeated sea level fluctuations contributed to the phosphatic source and development of polycyclic depositional sequences of the phosphorites.

Key words Guizhou, Weng'an, Doushantuo Formation, phosphorite, depositional sequence