

文章编号: 1000-4734(2016)02-0253-07

贵州织金磷块岩结构及其沉积环境

刘洁^{1,3}, 温汉捷^{1*}, 刘世荣², 樊海峰¹, 张羽旭¹

(1. 中国科学院 地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002;

2. 中国科学院 地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 贵州织金磷矿为一超大型含稀土磷矿床, 产于早寒武世梅树村期底部含磷岩系。本文在分析该磷矿矿石化学组成、矿物组合的基础上, 重点针对磷块岩的结构特征进行扫描电子显微镜和电子探针微区分析, 发现在纵向上: 上段硅质磷块岩结构类型包含泥晶结构、内碎屑结构、无定形结构和少量生物屑结构, 其结构成熟度较低, 沉积水体较深, 属于宁静的半局限海/浅海沉积环境; 而下段白云质磷块岩结构类型包含内碎屑、无定形结构和较多生物屑结构, 其结构成熟度较高, 水动力作用较强, 沉积水体较浅, 属于动荡的滨海沉积环境。横向上, 织金戈仲伍组与滇东渔户村组大海段在地层年代上相互对应, 两处的磷块岩系所含的结构类型相似, 只是各种结构类型所占比例不同。此外, 结合其他沉积环境指标, 发现织金磷矿沉积于弱氧化—贫氧的滨海向浅海过渡的环境。

关键词: 贵州; 织金; 早寒武世; 磷块岩结构; 沉积环境

中图分类号: P612; P619.2

文献标识码: A

doi: 10.16461/j.cnki.1000-4734.2016.02.013

作者简介: 刘洁, 女, 1989年生, 博士, 同位素地球化学专业。E-mail: liujie@mail.gyig.ac.cn

Structures and Sedimentary Environment of Phosphorite in Zhijin County, Guizhou Province, China

LIU Jie^{1,3}, WEN Han-jie¹, Liu Shirong², Fan Haifeng¹, Zhang Yuxu

(1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China;

2. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang

550081, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The early Cambrian phosphorite deposit in the Gezhongwu Formation, Zhijin County, Guizhou Province, P.R. China is a super large ore deposit combined with phosphorus and REE. Based on the analysis of the chemical and mineral composition of this phosphorus rock series, we focus on the analysis of the phosphorite structures' characteristics using scanning electron microscope (SEM) and electron probe microscopic analyzer (EPMA). Vertically, it shows that the upper section of silicious phosphorite possesses mud-crystalline structure, clastic structure, amorphous structure and bioclastic structure with lower maturity and sea water from a relatively deep level; and that the lower section dolomitic phosphorite bore clastic structure, amorphous structure and bioclastic structure with higher structure maturity, a stronger hydrodynamic effect and sea water from a relatively shallow level. Horizontally, the Gezhongwu Formation corresponds with the Yuhucun Formation in stratigraphic chronology, both of which have the same structural characteristics. In addition, combined with other sedimentary environment redox indexes, it indicates that the phosphorite deposit formed in the suboxic-anoxic waters and evolved in an environment that was from the coast to a shallow sea.

Keywords: Guizhou; Zhijin; the Early Cambrian; phosphorite structure; sedimentary environment

收稿日期: 2015-11-19

基金项目: 科技部“973”项目(编号: 2014CB440904); 国家自然科学基金(批准号: 40930425; 41173026; 41273024); 中国科学院国家外国专家局创新团队国际合作伙伴计划“陆内成矿作用研究团队”(KZZD-EW-TZ-20); 中国科学院矿床地球化学国家重点实验室“十二五”项目群(编号: SKLOGD-ZY125-07); 中国科学院西部之光重点项目(2014)

* 通讯作者, E-mail: wenhanjie@vip.gyig.ac.cn

我国是世界上重要的磷矿生产国之一,已探明的资源储量仅次于摩洛哥和美国,居世界第3位。其中,贵州省磷矿资源储量占全国总储量的26.45%^[1],而织金含稀土磷矿是贵州省磷矿资源和稀土资源量最多的特大型矿区,已探明磷矿资源量13.4亿吨^[2-5],稀土资源总储量144.6万吨^[2-5],具有很高的经济价值和重要的理论研究意义,受到很多研究者的重视^[5-18]。

含磷岩系及磷矿床的区带形成、分布与沉积期的古地理有关,古地貌控制着海侵范围和沉积相带分布,是含磷岩系和磷矿沉积的重要地质背景^[15]。前人的研究在磷块岩的沉积古地理环境(包括沉积介质的古盐度、古纬度、古气候、海水深度、pH值和Eh值等)、沉积相带、沉积建造和矿床地球化学等方面得出了颇多重要的结论^[15-16],他们多数是利用磷块岩矿物组合^[15]、粒度特征^[8]、微量、稀土元素地球化学特征^[19-25]以及生物化石组合特征^[26-28]等来重建磷矿沉积环境。然而,磷块岩的结构、构造特征是成矿过程的特点和演化的物质反映^[7,8,15,29-31],因此从研究磷块岩矿石组构特征入手,并综合分析它们在纵向上和横向上的组合和更替变化规律,也可对成矿过程、成矿阶段和成矿环境做出比较切合客观实际的解释。

贵州织金含稀土磷矿是典型的海相沉积磷酸盐岩,成矿作用发生于沉积、成岩作用阶段^[29],它能很好地记录其形成时的沉积环境。故本文则以贵州织金磷矿为例,在分析该区磷矿的矿物和化学组成基础上,重点研究该区磷块岩结构类型、特征及它们所反映的磷块岩形成时的物理、化学和生物作用,并结合地质构造作用分析,反演其古地理环境、沉积建造和沉积旋回。

1 矿床地质概况

贵州织金磷矿位于织金城东14 km处,坐标为N26°40'24",E105°51'30",矿体岩层平缓,呈长条状,倾斜度10°~15°,沿北东—南西方向延伸20 km,宽0.4~4.0 km,面积32 km²^[29]。该磷矿产于早寒武世梅树村期底部含磷岩系,位于牛蹄塘组黑色页岩和灯影组白云岩构成的古喀斯特侵蚀面之间^[32],位于“黔中隆起”西南端,属扬子地层区,在燕山运动期间,矿区遭受区域性北西—南东方向的构造应力挤压,形成北东—南西走向的新华背斜和一系列走向正断层,局部小构造发育,矿体主要出露于织金果化背斜—戈仲伍背斜、张维背斜的北西翼部^[10,23,34-35],如图1所示,F₁正断层

和F₂、F₃等逆断层控制着该区地层及磷矿的产出形态,这些断层破坏了部分矿层的完整性。该磷矿属于扬子地台前缘、局部有浅滩的缓坡碳酸盐岩沉积区,矿体属台地前缘缓坡碳酸盐岩相,在早寒武世时期整个扬子地台的地势是西高东低,梅树村期,自西向东海水变深^[33]。

矿体自北东向南西向可分为4个矿化段:佳垮—大嘎矿段、果化矿段、戈仲伍矿段、高山矿段^[1,23]。其中,戈仲伍矿段的剖面保存完好,呈水平层状、似层状及透镜状产出,磷块岩多为灰黑色,微层状、条带状及致密块状构造,局部地区受到压实作用发生弯曲变形,矿体总厚度约16.58 m,主体以1~7 cm厚生物碎屑磷块岩和2~33 cm厚含磷质生物屑细晶白云岩交替出现,并在顶部出现少量硅质磷块岩,矿体出露地表或埋藏较浅。

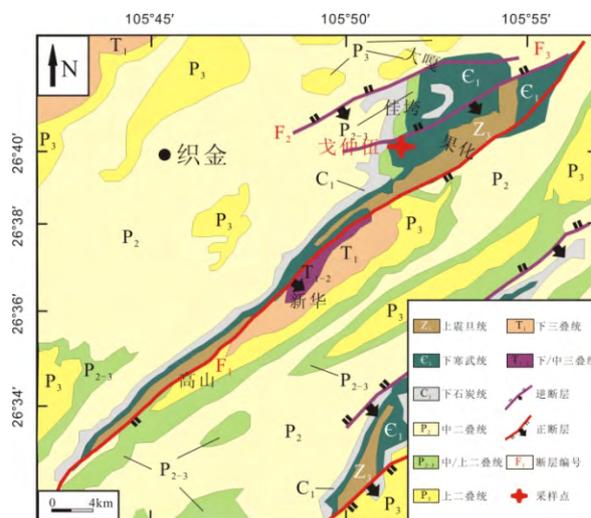


图1 织金磷矿矿床地质图(根据贵州省地质局1:20万地质图修改)

Fig. 1. Geological map of phosphate deposit in Zhijin County, Guizhou Province, China.

2 样品制备及分析方法

测试样品采自织金戈仲伍矿段,自上而下,逐层采样,按样品深度依次编号,采集戈仲伍组磷块岩53件,并且采集最顶部牛蹄塘组黑色页岩和最底部灯影组白云岩样品2件作为地层界面的分界线,共计55件。测试之前,将所有样品清洗、去皮,在65℃左右低温烘干约24 h。将其中不同层位的26件样品各称取20 g,送至澳实分析检测(广州)有限公司,磨到200目(约80 μm),采用X荧光光谱法(XRF)分析其主量元素组成,并据此判断岩石的主要化学组分和矿物组成;同时,采用等离子体发射光谱与等离子体质谱(ICP-AES & ICP-MS)

分析样品的微量元素组成, 其准确度按“相对误差 (RE) <10%”, 精确度按“相对偏差 (RD) <10%”来控制, 在矫正元素之间的光谱干扰之后得出结果, 用于分析各微量元素含量变化趋势以及稀土元素分布规律等。

对其中 12 件比较完整且无氧化现象的块状样品进行切割、研磨和抛光, 制备成光薄片和探针片, 再用真空镀膜仪在抛光面上蒸镀一层 20~30 nm 的碳膜。在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学重点实验室、环境地球化学重点实验室分别采用 EPMA-1600 型电子探针仪, JSM-6460LV 低、高真空数字化扫描电子显微镜, 结合配装的 EDAX 公司生产的 X 射线能谱仪 (即 SEM-EDX), 进行矿物结构形态观察、成分分析及元素 X 射线面扫描分析, 据此研究磷酸盐组分的精细结构、沉积富集形态、显微结构、各类型磷酸盐组分的微区成分及其成因类型等。

3 结果与讨论

3.1 成分及其产出形式

该区磷矿石的化学组分主要有 P_2O_5 、 SiO_2 、 CaO 、 MgO 、 CO_2 、 R_2O_3 等, 不同的矿石类型组分有一定的差异, 但各组分之间都有明显的变化规律。 CaO 、 MgO 、 P_2O_5 、 SiO_2 含量随层位变化趋势如图 2 所示。除碳酸盐质磷矿石外, P_2O_5 、 SiO_2 、 CaO 三者含量总和一般为 80% 左右, 其中 P_2O_5 的含量与 SiO_2 和 MgO 的含量都呈负相关变化, 稀土元素含量与 P_2O_5 含量呈正相关变化。对整个矿层而言: 纵向上, 矿层的底部 P_2O_5 含量较低, 中下部 P_2O_5 含

量最高, 向上 P_2O_5 含量降低。

该地区磷块岩主要由磷酸盐矿物, 碳酸盐矿物, 伴生黄铁矿、镁钛矿、粘土矿物和石英等组成。其中磷酸盐矿物为碎屑磷灰石 (俗称氟磷灰石, 条带状、柱状为主, 可见半月形、S 形、弯钩形等变型; 占总量的 40%~80%)、无定形磷酸盐组分 (俗称胶磷矿, 丝状、网状微细条带分布于集体胶结物中) 及生物屑磷灰石; 碳酸盐矿物以微细晶—粉微晶白云石为主, 含少量方解石, 呈生物碎屑、胶磷矿及胶磷矿内碎屑、石英粉砂屑等颗粒间隙物产出; 黄铁矿在中上部出现较多, 呈星点状分散于含硅质磷块岩和磷质白云岩中。

根据矿石中各种非磷酸盐矿物的种类和所占比例, 可将该区磷矿的矿石类型自下而上分为 2 大类: 白云质磷矿岩和硅质磷块岩, 如图 2 的岩性柱状图所示。通常情况下, 在水体较浅的沉积环境下, 碳酸盐和磷酸盐胶结物大量发育, 泥质和硅质则很不发育, 故织金磷矿的岩石组合特征反映了其成矿成岩环境的演化规律: 下段白云质磷块岩沉积于水体较浅的滨海环境; 上段硅质磷块岩沉积于水体较深的半局限海/浅海环境。

3.2 织金磷块岩结构特征

织金戈仲伍磷块岩的结构以沉积结构和成岩结构为主, 其中最常见的是内碎屑结构、生物屑结构、泥晶结构和无定形结构。具体结构特征如下:

(1) 内碎屑结构: 在白云质磷块岩和硅质磷块岩中均有出现, 所占比例约为 75%。以砂屑结构 (图 3A) 居多, 含少量砾屑, 胶结物以碳酸盐质

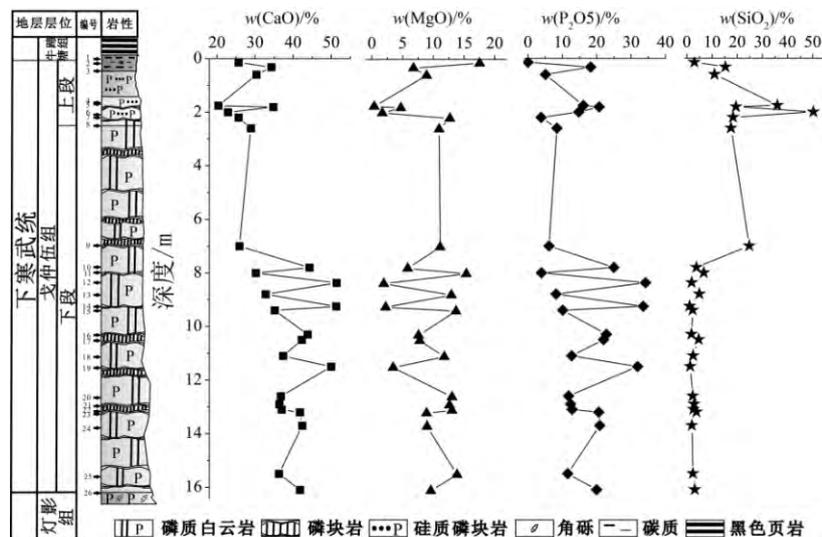
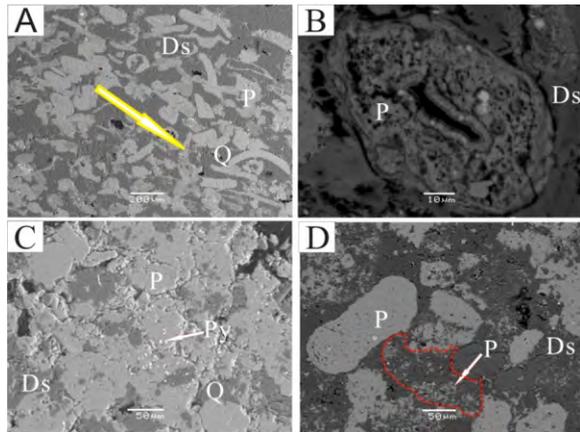


图 2 戈仲伍剖面岩性柱状图及各组分含量变化趋势图

Fig. 2. Lithological histogram and content changes of several components of the Gezhongwu section.

为主,呈胶结物支撑结构。砂屑的棱角发育,磨圆程度不一,呈扁豆状、长条状及塑性变形的不规则状。前人对这类结构也进行了详细的描述,认为这种内碎屑是沉积水体内部自生的,不具有陆源碎屑长距离搬运沉积所形成的分选性和磨圆特征,少数砂屑边缘出现弯曲、破碎和磨蚀现象,并且剖面中上部的磷质砂屑朝着平行于长轴方向呈半定向、定向排列(如图 3A 箭头所指),反映缓慢的沉积作用特征^[29,36]。



A-内碎屑结构, X 75, 内碎屑颗粒以长条状、柱状及扁豆状为主,可见半月形、S 形、弯钩形等变形,箭头表示碎屑长轴方向; B-生物屑结构, X 1400, 生物屑的单层壳由磷酸盐矿物构成,内充填物呈凌乱颗粒状结构特征,壳壁与内充填物构成一体,具有明显的生物构造特征,分布于磷质内碎屑颗粒和白云质基质之间; C-泥晶结构, X 330, 泥晶磷质团块边部出现干缩裂纹,箭头所指为黄铁矿,形态以不规则状为主,少数呈现为草莓状; D-无定形结构, X 300, 散乱分布在磷质碎屑和基质之间,无固定形态(如箭头所指处)。Ds-白云质岩; P-磷质岩; Py-黄铁矿; Q-硅质岩

图 3 较常见的 4 类结构背散射电子图像 (BSE)

Fig. 3. Backscattered electron (BSE) images for four common structures.

(2) 生物屑结构: 在剖面的整个层位上都有出现,所占比例约 5%。其中生物化石保存不完整,多以圆球形、椭圆形及不规则形态的生物碎屑(图 3B)形式存在。该剖面中的生物屑的量较少,表明大量富集的磷质来源不是由生物贡献的;生物屑大多保存原来的形态,为原地埋藏,表明成岩期后剥蚀作用较弱,没有受到后期强烈外作用力的改造或破坏。前人研究指出,织金戈仲伍剖面含有丰富的小壳动物化石,以软舌螺为主,其次为海绵骨针等^[14];该剖面的生物屑(如小壳动物化石)多被磷酸盐质所充填,少数生物屑被硅酸盐质和碳酸盐质所充填^[7,26,29],这与本次观察的生物屑特征类似。

(3) 泥晶结构: 主要出现在该剖面的顶部,所占比例约 5%。常呈过渡型结构(“颗粒泥晶结构”

或“泥晶颗粒结构”)出现(图 3C),以泥晶磷质紧密排列堆积形成团块,边部出现干缩裂纹,呈现出浑圆形及椭圆形的外部轮廓,这里需要与刘世荣^[29]提出的“球粒结构”进行区分,球粒磷质不与基质相镶嵌,也无重力胶结特点,这些球粒磷质的特征与干缩裂纹形成的椭圆形泥晶磷质的特征是完全不同的。剖面中上部出现较多的黄铁矿,大多呈不规则状,存在少量草莓状黄铁矿,表明当时的沉积作用发生于缺氧的水体环境。

(4) 无定形结构: 整个剖面中都有分布,所占比例为 8%。此类结构的磷酸盐组分无固定形态(图 3D),它与均质的磷酸盐碎屑颗粒形成鲜明对比。无定形结构磷块岩内无生物结构,衬度明暗不一,大小不定,散乱分布于胶结物之中,因其矿物相不是单一的,而是以磷酸盐为主要成分的多相集合体,这里沿用刘世荣^[29]对这一结构类型的定义,称其为无定形结构。

3.3 织金磷块岩构造特征

该剖面岩石的沉积构造相对较简单,由下段的透镜状、波状及双向交错状向上变为微波状-水平状层理。其中,下段为薄到中厚层(2~33 cm)深灰色磷质生物碎屑细晶白云岩和薄层(1~7 cm)生物碎屑磷块岩互层交替出现,总厚度为 14.5 m,岩石手标本呈现为致密块状构造和条带状构造等;上段为薄到中厚层(8~20 cm)深灰色硅质磷块岩和薄层(5~8 cm)黑色含碳质硅质磷块岩夹层出现,总厚度为 2.08 m,岩石手标本呈现为致密块状构造和纹层状构造等。该剖面沉积构造变化反映了当时沉积介质从动荡的滨海环境向上转变为宁静的半局限海/浅海环境。

3.4 织金磷块岩结构横向、纵向变化特征

(1) 横向变化: 不同地区、不同时代的磷块岩系大多具有相似的岩石组合特征,只是各类岩石所占比例会发生变化,表明磷块岩系的形成是在特定条件下发生的。“洋流上升成因学说”认为磷块岩的沉积环境较为特殊,而且磷块岩相带的宽度一般不超过 10 km,相应地,在特定的沉积环境下,磷块岩会形成特定的结构特征^[8]。本文的织金戈仲伍组与滇东的渔户村组大海段在地层年代表上相互对应,两处的磷块岩系所含的结构类型相似^[13];并且,就中国各个时代的磷块岩系而言,最重要最基本的结构类型包括内碎屑结构、团(球粒)结构、鲕粒和豆粒结构、泥晶结构、生物屑结构等,含少量的结核状结构、晶粒结构和后生交代淋滤结构,只是

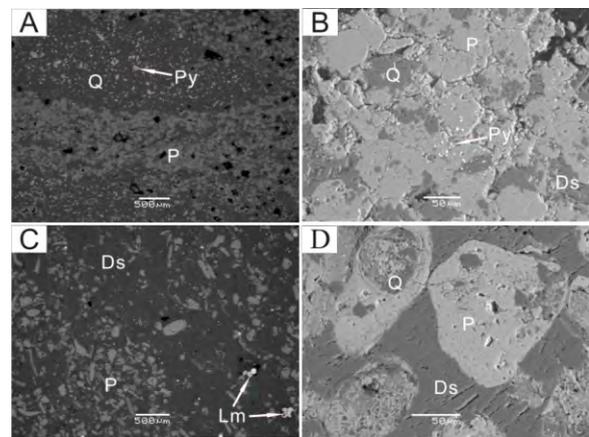
在不同地区、不同时代, 各种结构类型所占的比例有所变化。

(2) 纵向变化: 织金戈仲伍剖面在垂直方向自上而下被分为两段: 上段, 为硅质白云质磷块岩, 中间夹纹层状磷质白云岩—泥晶结构、内碎屑结构、无定形结构和少量生物屑结构等, 该段被称为原生磷块岩^[12,13]; 下段, 为灰黑色条带磷质白云岩夹深灰色磷块岩—内碎屑结构、无定形结构和生物屑结构, 该段被称为被改造的磷块岩^[12,13]。如表1中所述, ①上段: 含较多硅质, 伴有草莓状和不规则状黄铁矿(图4A、B)零星出现, 表明沉积水体相对较深, 沉积物通常处于缺氧状态; 含有较多泥晶结构(图4B), 胶结结构较简单单调, 表明孔隙水的流通缓慢, 水动力作用较弱, 沉积环境处于相对比较稳定, 停滞的状态; 磷质粒屑的结构不规则, 大小参差不齐, 分选差, 粒屑棱角分明或边界模糊, 磨圆度差, 结构成熟度较低, 表明没有受到外界作用力的颠选或改造, 与外界的交流较弱; 磷质粒屑多平行于长轴方向定向排列沉积, 且呈现为均质体, 磷质充填致密, 碎屑颗粒表面平整光滑, 鲜有交代溶蚀的现象, 不具有陆源碎屑长距离搬运沉积所形成的特征, 表明没有受到复杂水动力的干扰, 是在宁静环境下缓慢沉积的产物。②下段: 含较多的白云质, 出现的五角十二面体和正六边形的褐铁矿(图4C), 表明原生沉积作用发生在水体较浅、较氧化的环境中; 磷质粒屑边界清晰, 胶结类型复杂多变, 磨圆度比上段好, 结构成熟度高, 磷质充填稀薄, 出现很多微小孔洞, 碎屑表面不平整, 长条状磷质碎屑呈半定向或无定向排列, 且出现磷质叠加在早期沉积的白云质和硅质基底之上的非同期生长现象(图4D), 即磷质碎屑颗粒发生了白云质、硅质交代作用, 表明沉积区处于偏高能的环境, 强水动力作用使早期已堆积的磷酸盐得以冲搅、颠选而再次运移, 达到富集成矿的目的。

3.5 戈仲伍磷块岩系成岩、成矿环境

结合稀土元素和微量元素氧化还原环境指标(图5)可知, 整个剖面的稀土总量高, 且 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 比值较大(>4.6), 这足以印证该矿区含磷岩系属于典型的海相沉积。从其他氧化还原环境指标特征来看, 也出现上、下两段各不相同的现象: ①上段, 样品的 Th/U 值逐渐增大, 并出现 Th/U 值 >0.75 的现象, 而且 V/Cr 值 >2 , δEu 正异常和 δCe 负异常变化比较显著且趋于向贫氧的水体环境演化^[37,38], 表明当时沉积区水体深度变大, 处于海进时期。②下段, 样品的 Th/U 值 <0.75 且变化区间不大,

表明整个戈仲伍磷块岩剖面形成于相对比较氧化的环境中^[37], 可能受到多期次水动力作用的影响, 使得整个下段样品的元素比值和异常值趋于被均一化, 比值变化波动不大; 而 V/Cr 值在2左右波动, 表明水体深度呈周期性变化, 沉积环境在氧化和贫氧之间波动; δEu 总体具有正异常特征(1.00~2.05), δCe 具有负异常特征(0.33~0.70), 中上部异常值逐渐变大, 表明沉积作用发生于比较氧化的环境, 海水深度总体呈不断加深的趋势, 沉积环境从底部的氧化环境逐步过渡到顶部的贫氧环境。综合以上所有的稀土和微量元素指标特征, 可知, 整个戈仲伍剖面从底部较氧化—贫氧的沉积环境向顶部贫氧的海相沉积环境过渡。



A-上段出现较多泥晶结构, X27; B-上段磷灰石边界模糊, 接触式胶结, 黄铁矿零星分布, X330; C-下段条带状磷质屑呈半定向或无定向排列, X30; D-下段磷质屑边界清晰, 磨圆度较高, 基底式胶结, 而且出现后期磷质叠加生长在早期白云质和硅质基底之上的现象, X430。其中Ds-白云质; P-磷质; Py-黄铁矿; Q-硅质岩; Lm-褐铁矿

图4 戈仲伍组上段、下段结构背散射电子图像 (SEM)
Fig. 4. Backscattered electron image (SEM) for the structures of the upper and lower members of the Gezhongwu Formation.

通过观察磷块岩的结构成因、颗粒粒度、胶结类型、分选程度、定向性、磨圆度和结构成熟度等, 可以对成岩、成矿环境进行大体上的定位。在纵向上, 含磷岩系不同层位所呈现的特征表明: ①上段, 厚约2.08 m, 含磷岩系中磷质的沉积作用是发生在相对比较稳定的潮下滞积和悬浮沉积环境, 海水深度是逐渐加深的, 属于半局限海/浅海环境; ②下段, 厚约14.5 m, 底部含磷岩系中磷质的早期沉积作用是在比较稳定的环境下发生的, 后期受到水动力作用, 使得已经形成的结构被改造、溶蚀, 并发生多期次沉积作用, 环境的演化规律为潮下高能带到潮间中部, 属于滨海环境。

表 1 戈仲伍组上、下段结构特征对比

Table 1. Contrast of the structures' characteristics of the upper and lower members of the Gezhongwu Formation

纵向	主体岩性	结构类型	粒级	粒径 (mm)	胶结类型	分选性	定向性	磨圆度	结构成熟度
上段	硅质磷块岩	泥晶、球粒、内碎屑和生物屑结构	泥-细砂	<0.25	接触-孔隙式; 单调	差	好	差	不成熟
下段	磷质白云岩夹磷块岩	内碎屑、鲕粒和生物屑结构	粉砂-中砂	<0.5	孔隙-基底式; 复杂	较好	无定向	较好	较成熟

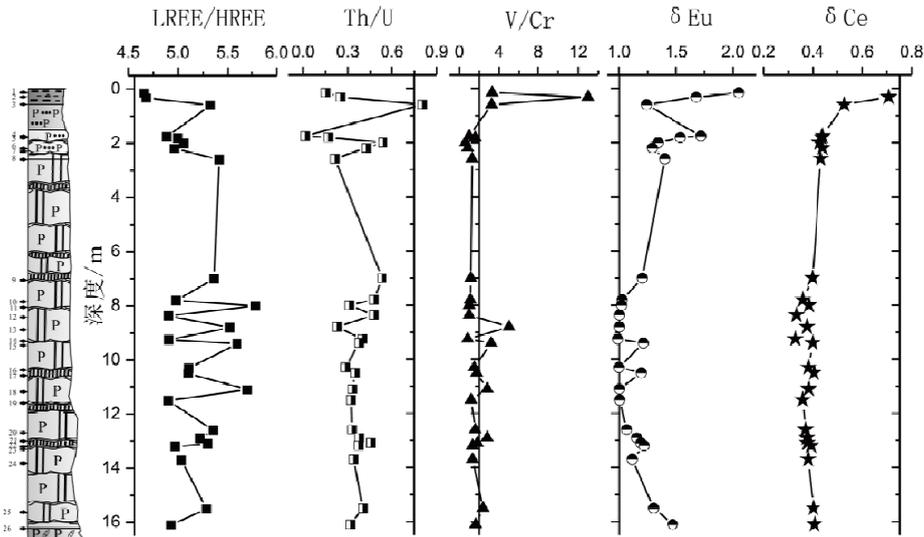


图 5 戈仲伍剖面氧化还原指标变化特征

Fig. 5. Variation characteristics of the redox indexes of the Gezhongwu section.

综合来看, 织金戈仲伍磷矿处于古陆、古岛之间的海相沉积环境^[15], 遭受海侵作用, 循环上升的洋流提供动力, 使得含磷的海水随着海进进入该区发生沉积; 风暴作用和潮汐、波浪作用为磷质改造簸选、富集、再沉积提供重要营力, 使得已堆积的磷酸盐得以冲搅、颠选而再次运移; 磨圆度较高, 分选性好, 沉积速率较慢等, 这些条件都能使得磷质很好地聚集—沉积—再搬运—富集成矿。本文提及的以内碎屑结构为主, 含部分生物屑结构、泥晶结构和无定形结构, 微层状、条带状及致密块状构造磷块岩, 由下段的透镜状、波状及双向交错状向上变为微波状-水平状层理, 反映的是一种弱氧化—贫氧的从滨海向浅海过渡的沉积环境。

4 结论

通过对早寒武世织金戈仲伍剖面磷块岩进行了系统的化学成分和矿物组分分析, 并结合手标本特征、以及薄片扫描电镜和电子探针观察结果, 得出以下几点结论:

(1) 根据磷块岩岩石结构组分特征, 该区含稀土白云质磷块岩的结构成因类型包括: 内碎屑结构、

生物屑结构、泥晶结构和无定形结构。

(2) 在垂向上, 按岩性组合大体将该区分为成两段, 每一段内的沉积成岩特征、结构特征和成矿环境演化特征都有一定差异: 上段含磷岩系含硅质较高, 磷块岩以泥晶结构、内碎屑结构和无定形结构为主, 生物碎屑较少, 结构成熟度低, 磷质碎屑多呈均质, 表面平整光滑, 沉积作用发生于水体较深的环境中, 结构成熟度低, 属于半局限海/浅海环境; 下段含磷岩系含白云质较高, 磷块岩以内碎屑结构和无定形结构为主, 含较多生物屑结构, 结构成熟度高, 磷质碎屑内部并伴有硅质、白云质交代溶蚀作用现象, 沉积作用发生于水体较浅的环境中, 受到强水动力的影响, 结构成熟度高, 属于滨海环境。

(3) 在横向上, 织金戈仲伍组与滇东渔户村组大海段在地层年代上相互对应, 两处的磷块岩系所含的结构类型相似, 只是各种结构类型所占比例不同。

(4) 综合微量元素环境指标和磷块岩结构成因类型变化特征, 表明织金戈仲伍磷矿沉积于弱氧化—贫氧的滨海向浅海演化的环境。

参考文献:

- [1] 温婧. 中国磷矿资源类型和潜力分析[D]. 北京: 中国地质大学(硕士论文), 2011.
- [2] 殷究国. 贵州织金含稀土磷矿的开发与加工[J]. 磷肥与复肥, 2010, 25(1): 76-78.
- [3] 路坊海. 织金含稀土磷矿石浮选及浸出工艺的研究[D]. 贵阳: 贵州大学(硕士论文), 2006.
- [4] 梅吟. 织金磷矿综合利用研究[D]. 武汉: 武汉工程大学(硕士论文), 2011.
- [5] 刘家仁. 试谈织金磷矿的综合利用问题[J]. 贵州地质, 1999, 16(3): 253-258.
- [6] 王砚耕, 尹恭正, 郑淑芳, 等. 贵州上前寒武系及震旦系—寒武系界线[M]. 贵阳: 贵州人民出版社, 1984.
- [7] 陈其英, 郭师曾. 中国东部震旦纪和寒武纪磷块岩的结构成因类型及其沉积相和环境[J]. 地质科学, 1985, 3: 224-237.
- [8] 叶连俊, 陈其英, 赵东旭, 等. 中国磷块岩[M]. 北京: 科学出版社, 1989.
- [9] 王敏, 孙晓明, 马名扬. 黔西新华大型磷矿磷块岩稀土元素地球化学及其成因意义[J]. 矿床地质, 2004, 23(4): 484-493.
- [10] 施春华, 胡瑞忠, 王国芝. 贵州织金磷矿元素地球化学特征[J]. 矿物学报, 2006, 26(2): 169-174.
- [11] 张杰, 孙传敏, 龚美菱, 张覃, 陈代良, 陈吉艳. 贵州织金含稀土生物屑磷块岩稀土元素赋存状态研究[J]. 稀土, 2007, 28(1): 75-79.
- [12] Nelson G J, Pufahl P K, Hiatt E E. Paleooceanographic constraints on Precambrian phosphorite accumulation, Baraga Group, Michigan, USA [J]. *Sedimentary Geology*, 2010, 226: 9-21.
- [13] Wen H J, Carignan J, Zhang Y X, Fan H F, Cloquet C, Liu S R. Molybdenum isotopic records across the Precambrian-Cambrian boundary [J]. *Geology*, 2011, 39(8): 775-778.
- [14] 谢宏, 朱立军. 贵州寒武纪梅树村期磷块岩稀土元素存在形式研究[J]. 中国矿业, 2012, 21(6): 65-70.
- [15] 韩豫川, 夏学惠, 肖荣阁, 等. 中国磷矿床[M]. 北京: 地质出版社, 2012.
- [16] 崔克信, 甄勇毅. 华南震旦纪和寒武纪磷块岩沉积环境探讨[J]. 沉积学报, 1987, 5(1): 1-10.
- [17] 蒲心纯, 等. 中国南方寒武纪岩相古地理与成矿作用[M]. 北京: 地质出版社, 1993.
- [18] 东野脉兴. 扬子地块陡山沱期与梅树村期磷矿区域成矿规律[J]. 化工矿产地质, 2001, 23(4): 193-209.
- [19] Wright J, Schrader H, Holser W T. Paleoredox variations in ancient oceans recorded by rare earth elements in fossil apatite [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1987, 51: 637-644.
- [20] Bertram C J, Elderfield H, Aldridge R J, Morris C. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ and REEs in Silurian phosphatic fossils [J]. *Earth Planetary Science Letter*, 1992, 113: 239-249.
- [21] Chen D F, Dong W Q, Qi L, Chen G D, Chen X P. Possible REE constrains on the depositional and diagenetic environment of Doushantuo Formation phosphorites containing the earliest metazoan fauna [J]. *Chemical Geology*, 2003, 201: 102-118.
- [22] Yang R D, Gao H, Wang Q, Bao M. REE Enrichment in Early Cambrian Gezhongwu Formation Phosphorous Rock Series in Sanjia, Zhijin County, Guizhou Province, China [J]. *Journal of Rare Earths*, 2005, 23: 760-767.
- [23] 施春华, 胡瑞忠, 王国芝. 贵州织金磷矿岩稀土元素地球化学特征研究[J]. 矿物岩石, 2004, 24(4): 71-75.
- [24] 王建蕊, 张杰. 织金含稀土白云质磷块岩物质组成及稀土元素特征[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2011, 1: 25-27, 59.
- [25] 王录峰. 织金含稀土磷精矿稀土元素赋存状态分析[J]. 现代矿业, 2013, 10: 60-61.
- [26] 杨瑞东, 钱逸, 张杰, 张位华, 姜立君, 高慧. 贵州织金早寒武世戈仲伍组磷块岩中海绵骨针[J]. 自然科学进展, 2004, 14(8): 898-903.
- [27] 毛铁, 杨瑞东. 贵州织金寒武系磷块岩中的小壳动物化石微结构特征及成分研究[J]. 微体古生物学报, 2013, 30(2): 199-207.
- [28] 段凯波, 王登红, 熊先孝, 连卫, 高鹏, 王英林, 张杨. 贵州织金磷矿床中离子吸附型稀土的存在及初步定量[J]. 岩矿测试, 2014, 33(1): 118-125.
- [29] 刘世荣. 织金新华磷矿成矿作用的微束分析研究[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所(博士论文), 2008.
- [30] 王正瑛, 王曙, 等. 沉积岩结构构造图册[M]. 北京: 地质出版社, 1988.
- [31] 叶德隆, 等. 岩石典型结构分析[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1995.
- [32] 张杰. 贵州寒武纪早期磷块岩稀土元素特征[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008.
- [33] 高慧, 杨瑞东. 早寒武世早期贵州织金含磷岩系地球化学特征与成磷作用[J]. 地球与环境, 2005, 33(1): 33-42.
- [34] 刘世荣, 胡瑞忠, 周国富, 龚国洪, 金志升, 郑文勤. 织金新华磷矿碎屑磷灰石的矿物成分研究[J]. 矿物学报, 2008, 28(3): 244-250.
- [35] 杨捷, 何天元. 贵州省织金县新华含稀土磷矿矿床地质特征及成因探讨[J]. 化工矿产地质, 2013, 35(1): 27-33.
- [36] 张杰, 陈代良. 贵州织金新华含稀土磷矿床扫描电镜研究[J]. 矿物岩石, 2000, 20(3): 59-65.
- [37] 胡修棉, 王成善. 古海洋溶解氧研究方法综述[J]. 地球科学进展, 2001, 16(1): 66-71.
- [38] 韦恒叶. 古海洋生产力与氧化还原指标——元素地球化学综述[J]. 沉积与特提斯地质, 2012, 32(2): 76-88.