

湘西黑色岩系沉积演化与含矿序列

吴朝东 陈其英 杨承运

摘要 研究了湘西晚震旦世—早寒武世形成黑色页岩的沉积环境和含矿性。黑色岩系形成于沉积盆地斜坡或以下地带，与海平面上升有关。晚震旦世到早寒武世早中期的沉积层序可划分为三个III级层序。海平面上升的结果使下层海水成为还原环境，有机质得以保存，沉积了大面积的黑色岩系。湘西上震旦统、下寒武统分别构成了黑色页岩-磷块岩-硅质岩组合和磷结核-重晶石-石煤-多金属富集层两个成矿系列，含矿层段集中发育于海平面上升期和凝缩层沉积中，在受海底火山、喷泉活动提供丰富物源的背景条件下，有机质参与元素的迁移、富集作用，经成岩期的转化富集成黑色岩系型矿床。

关键词 黑色页岩 含矿序列 湘西

中图分类号 P588.2 **文献标识码** A

The Black Shale Series and Ore-bearing Sequences of Upper Sinian-Lower Cambrian, Southwest of China

WU Chao-dong¹ CHEN Qi-ying² YANG Cheng-yun¹

1(Department of Geology, Peking University, Beijing 100871)

2 (Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract

The Yangtze area during the Late-Sinian and Early Cambrian is the typical passive continental margin basin, which is the ideal basin type for us to study the sedimentary crust and recovery the eustatic curve. Black shales are widely distributed in the Upper Sinian and Lower Cambrian of the western Hunan, which belongs to the southeastern margin of the Yangtze Platform. The strata of the Upper Sinian - Lower Cambrian can be divided as two super-sequences and three sequences. The sequence of Upper-Sinian and Lower Cambrian is as follows (in ascending order): Upper Sinian-dolostone, black slate and siliceous slate, lenticular barite, black slate, phosphorite, black siliceous slate; Lower Cambrian-black slate, concretinary phosphorites, barite, stone coal, V-Ni-Mo deposits, black slate, black sandstone, K-shale, limestone. The series of ore bearing are the black shale-phosphate-silicalite of Upper Sinian and phosphate-barite-stone coal-metals rich of Lower Cambrian. Advances presented in this thesis can be summarized as follows:

1. There are six types of black shales: black shale, chert, coal stone, phosphorite, barite

and carbonate rich in organic matter. They exhibit different regional characteristics in time and space;

2. The geological evidence suggest that the black shales were formed in a platform marginal trough on southeastern margins of the upper Yangtze-Exi Platform, which belongs to a shallow water shelf reductive environment with water depth less than 250 meters. The environment evolved gradually from shallow water during late Sinian to deeper, and more open during early Cambrian.

3. Many organisms have been discovered in the black shales, including radiolarians, spicules, and bacteria-algae, which indicate that they have played an important role in the formation of the black shale series.

4. Bio-sedimentation and bio-geochemical processes play a certain leading role. Resulted from the reworked benthos, the organic carbon in the sediments (especially in Xinhuang region) is rather abundant. As the upper layer (surface) seawater is abundant nutrient and rather high biotic productivity, the biomass influx is relatively large. The biologic processes cause the enrichment of metal elements, minor elements and REE, and locally change the pH and Eh values as to form a weak reduction condition resulting in the leaching of the Fe and Mn and remigration and re-distribution of metal elements.

5. The rate of sedimentation is very slow and discontinuous. The bottom current eroded and reworked the sediments and hence restrained the accumulation. Therefore, the sedimentation rate in the area is very low and even some segments without sediments.

On the above, the black shale of the Upper Sinian-Lower Cambrian generated from the anoxic event, and the organic matter source is algae and fungal (Thallophyta). After the organisms degrade slowly, the organic matter absorbed and complexed many elements. At the early diagenesis stage, the organic matter decomposed, and some element relaxed, i.e., the element accumulated by many stages, so the elements exist in many styles. The generation of Ni-Mo, coal stone, barite and phosphorite deposits are controlled by the sea-level change, and the ore-bearing sets developed in the transgressive systems tract and condensed section. Finally, the author concluded that the ore-bearing characteristics controlled by the two aspects of the abundant source of organic matter from algae and fungi and the preserved and transverse conditions of the organic matter in the anoxic environment.

Key words black shale ore-bearing series south west Hunan

黑色岩系的研究是目前国际上重点研究的课题，首先因为黑色岩系型矿床的成因与分布的研究，对矿产资源的勘察具有重要的指导意义，二是黑色岩系常富集多种有害元素，因此黑色岩系分布地区及其矿山开采过程中造成的环境污染问题是值得研究的，三是黑色岩系代表了一定的古环境特点，对恢复地球演化的历史和研究全球环境变化具有借鉴意义。

湘西是我国多种沉积矿床广泛分布的地区，发育了上震旦统和下寒武统两套黑色岩系，并以其分布广、所含矿床类型多样、成矿条件好而引起了许多地学工作者的广泛注意。由于湘西上震旦统-下寒武统岩石类型变化复杂，矿床类型多样，如何利用层序地层学的方法来解决深水盆地地层对比问题、凝缩层的成矿意义以及全球海平面变化与矿床时空分布关系等问题，具有重要意义。湘西黑色岩系中除了赋存一定规模的磷、重晶石、石煤资源外，而且还有罕见的Ni、Mo、Au、Ag、REE、Se、Ti、Cd的

富集，成矿序列比较清楚。本文通过新晃贡溪和怀化花桥剖面的野外实测，解剖了上震旦统-下寒武统沉积层序变化，结合室内编图，对湘西地区黑色页岩沉积特征、几何形态和组合关系进行了分析，探讨了海平面变化与生物、有机质成矿作用的关系。

1 地质背景

对湘西构造发展和演化的认识目前尚存在不同意见，夏文杰等^{〔1〕}认为湘西在震旦纪时属于湘黔桂陆缘断陷盆地，是在晋宁期的江南—龙胜岛弧及其弧后盆地基础上发展起来的被动陆缘。盆地边缘和内部分布有若干近东西向和北东向的张性断裂，控制着盆地的形成，在早震旦世沉陷较为强烈并有少量火山活动，到晚震旦世沉降幅度大为减弱，沉积厚度一般在300 m以下，在古地貌上始终是比武陵断陷盆地深的棚缘盆地或台缘盆地。寒武纪则是震旦纪构造发展的延续，具有明显的继承性。

黔东、湘西和湘西北地区南沱组为冰碛岩组，生物化石十分稀少，主要以疑源类中的球藻菌(微古植物)组合为代表。随着冰川消融，海平面相对上升，扬子海侵扩大，陡山沱期开始海域可分出上、中、下扬子浅海和湘桂次深海(图1)，以黑色页岩、硅质页岩为主，水平纹层发育，可见少量海绵骨针及软躯动物遗迹，疑源类中有少量刺球藻群的分子。灯影组(或留茶坡组)为硅质岩，含浮游生物和放射虫，并发育软躯后生动物遗迹化石，宏观藻类也开始比较发育。早寒武世初期随着海平面上升，形成台地边缘—斜坡盆地的灰黑色硅、钙、泥质沉积，早期沉积的灰黑色薄层硅质岩中还夹有黑色页岩及少量凝灰岩，底部的黑色含磷结核的硅质岩层为牛蹄塘组、九门冲组、杨家坪组或相当岩组的底界，常有多门类带壳动物化石发育。

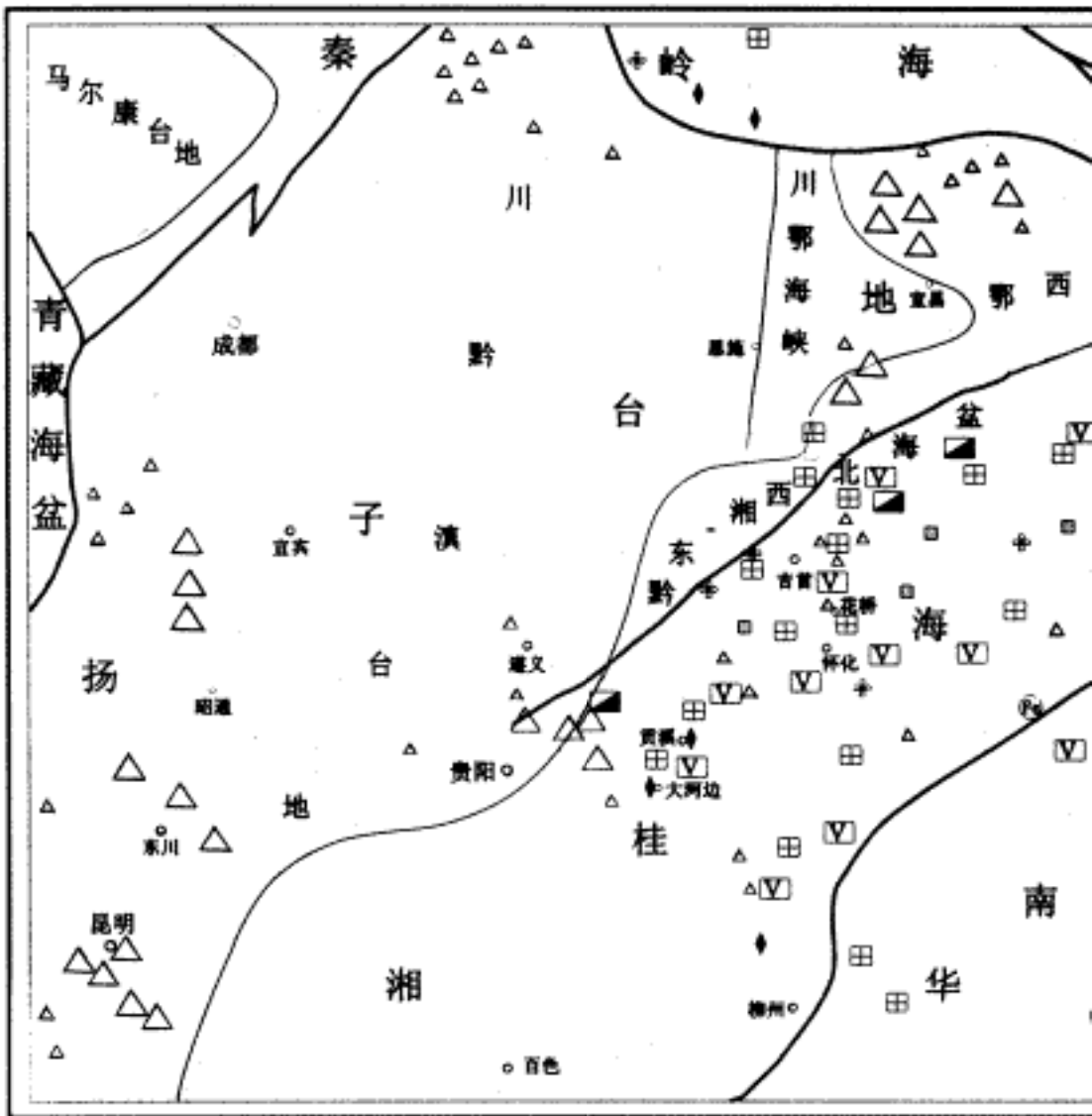




图1 中国扬子区晚震旦世、早寒武世古地理轮廓及矿产分布图

Fig.1 The sketch map of the palaeogeography and the mineral deposits of the Late Sinian and Early Cambrian of Yangtze

2 实测剖面

怀化花桥剖面出露地层较全(图2)。南陀冰碛岩组为暗灰绿色厚层状砂砾岩、含砾砂质板岩。顶部有一层含砾石英砂岩或石英砂岩体。陡山陀组假整合于冰碛岩之上,底部为厚0.3~0.65 m的透镜状菱锰矿,含锰最高达45.64%,但厚度薄,含磷过高。下部为条带状薄层钙泥质板岩夹少量白云岩透镜体,含星点状黄铁矿。中部发育磷矿层,由黑色暗灰色薄层条带状磷块岩、白云岩和板岩组成, P_2O_5 含量8%~24%。上部为灰白色含黄铁矿钙质板岩、含磷炭质板岩互层,单层厚0.05~0.2 m。上震旦统灯影组以硅质岩为主,下部灰黑色硅质岩(遂石岩)夹黑色硅质板岩、炭质板岩,局部夹石英砂岩,发育变形构造。中部黑色中厚层状硅质岩夹黄绿色薄层板岩,浅灰色硅质岩夹硅质板岩。上部黑色炭质板岩夹硅质板岩。下寒武统小烟溪组为黑色页岩,产海

绵骨针(*Protospongia* sp.)，局部层段发育泥灰岩，中部发育一层黑色石煤，厚6 m，因断层常沿石煤层发育，而形成破碎带。中寒武统以灰黑色薄层状泥灰岩为主，夹薄层结晶灰岩及其结核，发育三叶虫(*Ptychagnostus* sp.等)和海绵骨针(*Protospongia* sp.)。

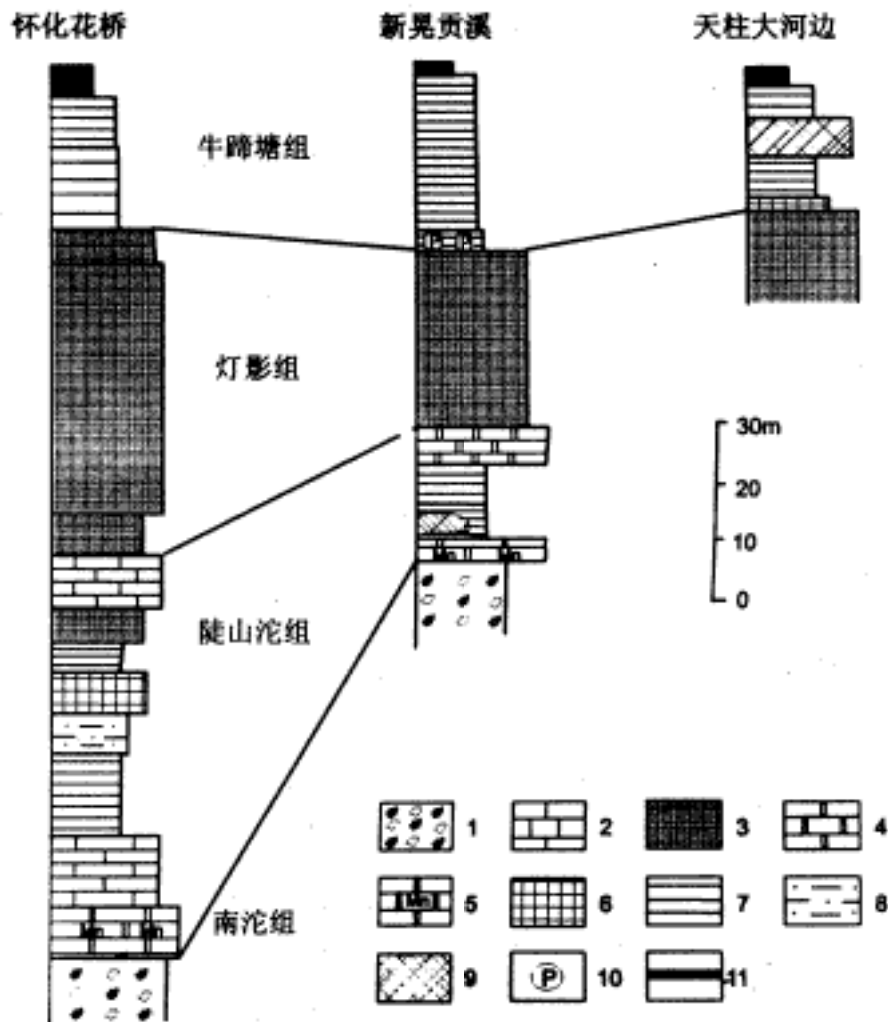


图2 湘西上震旦统 - 下寒武统实测剖面层序对比图
1.冰碛岩；2.灰岩；3.硅质岩；4.白云岩；5.含锰白云岩；
6.磷块岩；7.页岩；8.粉砂岩；9.重晶石；10.磷结核；11.石煤

Fig.2 Stratigraphic correlation of the Upper Sinian and Lower Cambrian in west Hunan

新晃贡溪剖面发育有磷块岩及重晶石岩(图2)。陡山沱组为黑色、灰白色薄层碳质硅质板岩，偶夹薄层硅质岩，顶部夹白云岩透镜体。灯影组为灰色中厚层状不连续条带状硅质岩，硅质灰岩夹透镜状重晶石岩。牛蹄塘组上段为深灰-黑灰色薄层-中厚层状含炭质石灰岩，厚0~25 m，下段为炭质页岩，富含有机质及黄铁矿，在区域上比较稳定，富含钼、钒及多种有色金属、稀有元素，在区域上构成了有一定意义的含矿层。含矿层由一套炭化程度高，富含硅质、磷质及黄铁矿的岩石组成，磷块岩中一般含钼、锶元素较高，并伴生有铀矿，但厚度薄。钼、钒矿的主矿层为磷片状和板状炭质页岩，厚度大。在磷片状炭质页岩之上、薄层炭质页岩的下部，常见富含碳酸盐物

质的扁豆体，富含锌、镍、钴等多种金属，而钼、钒的含量低，钒在区域上分布广，钼在局部地段富集成矿。下寒武统明心寺组为灰黑色厚层状粉砂质碳质板岩夹砂岩，底部有一层黄铁矿厚13 cm。金顶山组为灰色、黄绿色条带状粉砂质板岩。青虚洞组为中层状灰岩、白云岩夹碳质板岩，产三叶虫化石(*Redlichia chnensis waleott*, *Micmacca cf. elongata*, *Probowmania sp.*)。

贵州天柱大河边位于湘黔边境贡溪复向斜中，发育地层主要为上震旦统灯影组和下寒武统(图2)。下寒武统底部发育有我国超大型重晶石矿，局部地段(铜仁下河等地)于重晶石层之下有沉凝灰岩薄层(0~1.24 m)产出。主矿层呈层状稳定分布，矿石品位高。根据矿石结构构造，可分为块状、条纹状、花斑状、结核状四种矿石类型。矿体厚度与品位呈正相关，而与下覆硅质岩、白云岩厚度呈负相关；矿石的成分、结构、构造简单，当其底部为硅质磷块岩，顶板为炭质页岩时，则矿体厚度大、品位高，且矿体厚度和品位与底部硅质磷块岩的厚度呈正相关。含矿岩系的上覆地层为黑色含磷结核炭质页岩，该层富含Ni、Mo、V、Ag及稀土元素，其中重晶石矿层顶界之上0.14~6 m一段内，含V₂O₅为0.5%~1.14%，Ag为10~33g/t，前者已构成工业矿体，后者可达综合利用的工业指标。

3 沉积环境

湘西地区的深水盆地沉积以炭质页岩、硅质岩为主。含较多的星点状和草莓状黄铁矿。以水平层理为主，局部发育生物成因的层理类型。黑色页岩常被认为是沉积构造比较单一的岩石，其实泥页岩的沉积构造很复杂。湘西地区黑色页岩纹层状层理较为普遍，其厚度范围为0.04~1.5 mm，多数为0.1~0.5 mm。纹理的显示是岩石内颗粒成分不同、粒度和有机质含量的变化等原因引起的。硅质含量较高的黑色页岩，颜色、粒度、岩性较均一，在宏观上纹层构造特征不明显，但经风化后，由于成分的差异仍可见平行纹理。一些学者依据纹层的连续性划分了纹层类型〔2~4〕。正确识别黑色页岩中的纹层和构造产生的页理是非常重要的，因为纹层表明了沉积作用的节律性，而具有页理的均一黑色页岩表明了连续沉积。纹层一般是在离岸较远、碎屑物的供给相对缺乏的深水环境形成的。在缺氧条件下，由于底栖生物不发育，也是纹理得以保存的重要原因。

浊流沉积见于金顶山组的底部。在早寒武世共发育了两次浊流活动，其中上部层序具完整的鲍马序列，下覆岩层为含海绵骨针的黑色页岩，砂岩中可见含大量海绵骨针的团块。上覆为薄板状粉砂岩或泥岩，说明浊积岩是在深水斜坡环境中沉积的。A段为块状细砂岩，与下覆岩层呈突变接触，界线明显，具明显的正粒序，底面呈微波状和发育槽模构造。由槽模测得的古流向为110°，大致垂直斜坡走向。粒度的分布以单峰型为主，底部偏正态，上部砂岩偏负态。B段具单向斜层和细纹层的极细砂岩为主，主要为小型板状斜层理和楔状斜层理，层系厚5~15 cm。C段为泥质粉砂岩，常见砂纹层理。D段为粉砂质页岩；E段为具水平层理的黑色页岩。砂岩矿物成分成熟度高，结构成熟度低，砂岩颗粒分选较差，颗粒支撑和杂基支撑，白云母和长形石英颗粒定向顺层排列，其粒度分布特征在概率图中为二段式，跳跃组分总体含量75%，斜率35°，近底部砂岩具滚动组分，含量低于25%，斜率72°，两者突变接触，粗截点为2.2 (图3)。下部的浊积岩为由极细砂岩和粉砂岩组成的韵律层，以CDE组合为主。

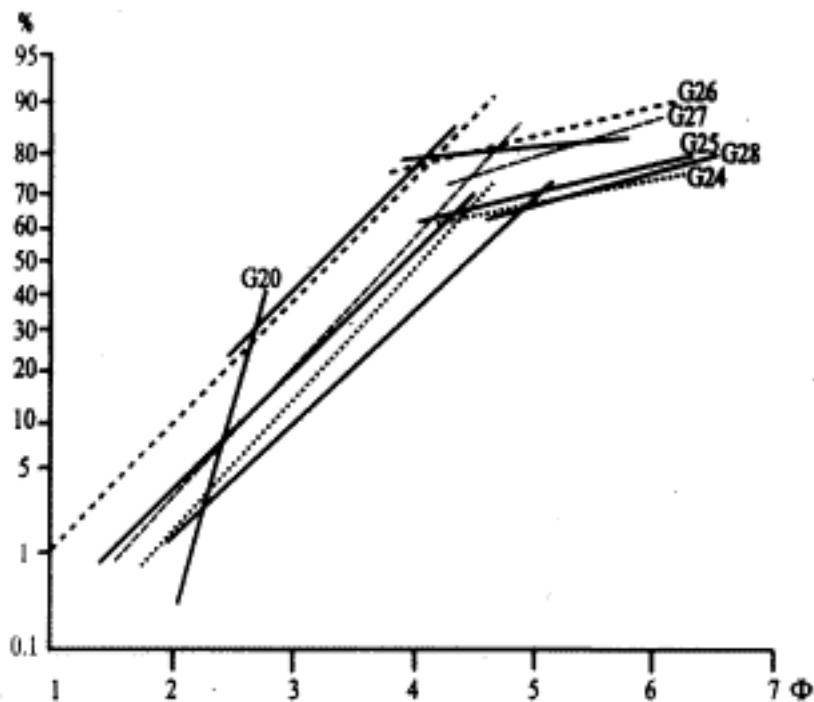


图3 新晃贡溪浊流砂岩粒度概率曲线图
(样品位置见图4)

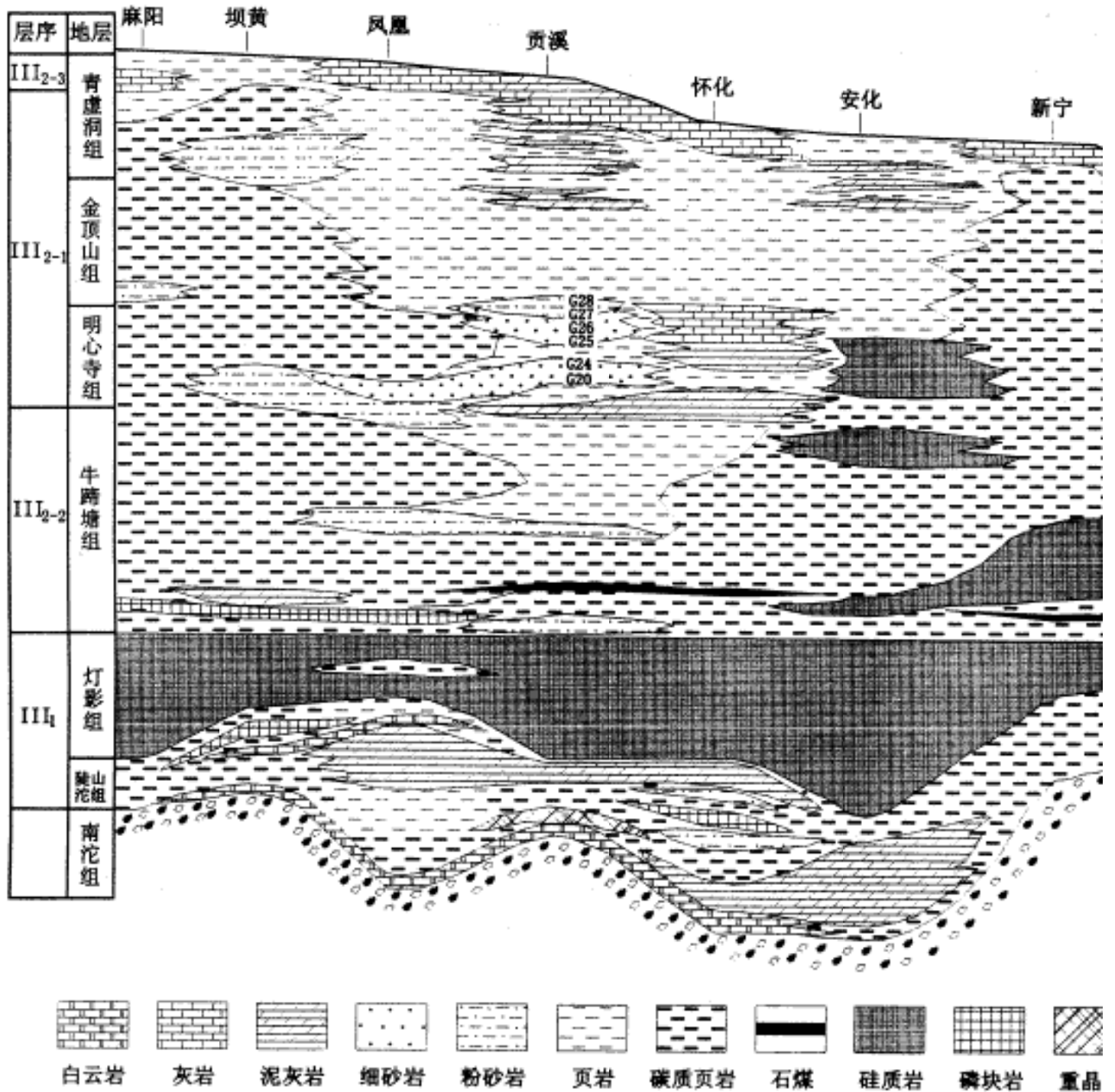
Fig.3 The probability cumulative curve of the turbidite sandstone of the Xinh uang profile

滑动沉积发育于怀化花桥陡山沱组与灯影组的界线附近。其底界明显，与下覆层平行，顶面上凸，滑动边缘和底部可见剪切褶皱和砾屑，体内岩层连续性较好，出现塌积和滑塌揉皱构造。滑积角砾岩的成分较单一，多为斜坡上正常的硅质沉积物，经揉皱、破碎原地堆积而成，常伴随着揉皱构造，有时还可以出现有颗粒流和浊流沉积。其成因可能有二：在枢纽带附近常发育同生断层，颤动活动的特点常造成滑动或沉积物的重力超负荷，从而使沉积物处在不稳定状态，其二，滑动沉积也可能代表了台地边缘较迅速的推进而引起斜坡的不稳定性。

关于黑色页岩形成于水体深度主要有两种不同意见，一些学者依据为海平面上升初期浅水相组合和黑色页岩的相互关系而认为是浅水成因的〔5~8〕，其实黑色页岩底部海进滞流的沉积常代表了长期、深水的饥饿沉积〔2〕。Jervy〔9〕认为在地质记录中，当多数碎屑发育在海岸平原和陆架相时，薄的平行的海绿石砂、磷和富有机质的黑色页岩指明了由于海平面升高造成的容纳空间迅速增加期。水体深度的迅速增加，表明了富有机质的黑色页岩是饥饿的深水沉积相，侧向上相变为沉积厚度较大的海岸相。从沉积相的空间分布明显看出湘西地区的黑色页岩形成于浅海-半深海环境，具有一定的水体深度。张爱云〔10〕根据建造序列及古生物标志，认为黑色页岩形成于水深200 m左右，王东安〔11〕研究认为湘西上震旦统硅质岩的形成水深不超过250 m。因为在黑色页岩中陆源碎屑物明显增多，推断黑色页岩的沉积环境要浅于硅质岩。

4 沉积层序和相对海平面变化

通过剖面实测和编图分析，依据中国南方大地构造演化^{〔12〕}和建造层序分析，将湘西地区晚震旦到早寒武世早中期的沉积层序划分为三个级层序(图4)，上震旦统陡山沱组和灯影组构成南沱冰期后的较早沉积层序(I_1)，下寒武统以牛蹄塘组为主组成早寒武世第一个沉积层序(I_2-1)，明心寺组和金顶山组为第二个沉积层序(I_2-2)，它们代表了超三级周期的相对海平面变化，青虚洞组的灰岩和板岩互层构成下一个超三级旋回的底界。



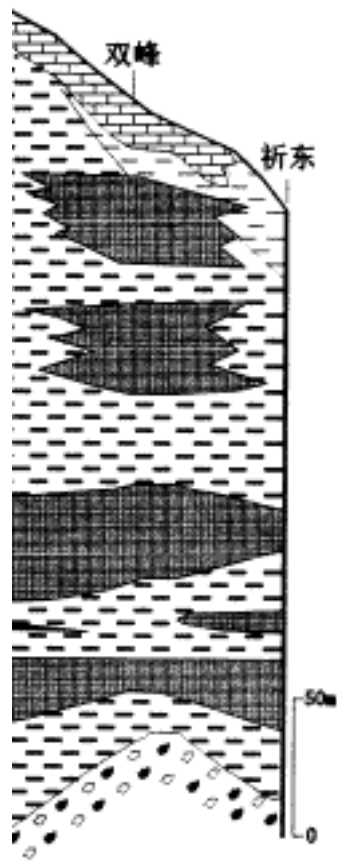


图4 湘西上震旦统、下寒武统层序对比

The Comparison of the sequence level of the Upper Sinian and Lower Cambrian in western Hunan

1层序发育于震旦系，层序的下部为大陆裂谷冰水沉积、中上部为海相裂谷深水相或台地碳酸盐沉积。在经历了南沱期的冰期以后，扬子海开始大范围海进，形成陡山沱组的含锰白云岩、炭质板岩及磷块岩。在陡山沱组顶部发育一层白云岩，多呈透镜状分布，可将它划分为次一级旋回的沉积层序界面，最大海泛缩凝期为陡山沱期的含锰、含磷硅质页岩。灯影组硅质岩代表了海平面稳定、水位较高时期沉积。晚震旦世以海岸上超和覆盖在扬子古陆上的陡山沱组海侵沉积物为界，其年龄为 700 ± 5 Ma。晚震旦世以来，扬子海域性质发生变化，大洋缺氧，扬子板块边缘海域发育黑色页岩，扬子板块克拉通浅海水体变深，为黑色页岩覆盖。在深水盆地沉积层序中，很难将海平面达到高水位和低水位时的沉积分开，即区分凝缩沉积与非凝缩沉积已非常困难。在上震旦统中可作为凝缩层的沉积物是陡山沱组的含磷矿层，在怀化花桥剖面磷块岩中常见由各种大小不同的颗粒组成的内碎屑磷块岩和杂基支撑的组构，说明作为凝缩层沉积的胶磷矿经过多次的侵蚀改造和簸选。磷矿层中除了夹有悬浮沉积的粘土外，基本上没有陆源碎屑，说明胶磷矿沉积和改造期间均处于海侵和海平面上升的过程。

早寒武世第一沉积层序(2-1)位于下寒武统，主要由早寒武世的拉张裂谷型沉积序列构成，最大海泛期形成了广泛分布的黑色页岩、磷块岩及硅质页岩的凝缩段，是扬子板块东南缘发育极好的等时性对比单元。在将近30 Ma间，西部克拉通边缘沉积了厚4~200 m的磷酸盐和碳酸盐岩，而陆坡带以下区域则只有数十米的硅质岩或富炭质页岩。湘西牛蹄塘组的富镍、钼多金属层黑色页岩，是海平面上升率向最大值增加阶段的产物，代表我国南方早寒武世最大海进期。该时期滨岸线迅速向陆方向迁震旦统硅质岩呈假整合接触，该界线为晚震旦世晚期海平面相对停滞和逐渐下降从而形成界线不整合。早寒武世的拉张活动导致海平面上升速率较快，在陆坡深水带则造成多次小的无沉积间断，因而海侵沉积物与凝缩沉积可组成复合体，两者之间很难找到界面。湘西的沉积环境处于无改造的风暴浪基面以下，保留了凝缩沉积的原始结构，为含磷结核的黑色页岩和硅质页岩，与下覆上震旦统灯影组的硅质岩为整合接触，其中所含的小壳化石带高于梅树村组磷矿而与筲竹寺组软舌螺化石相近。

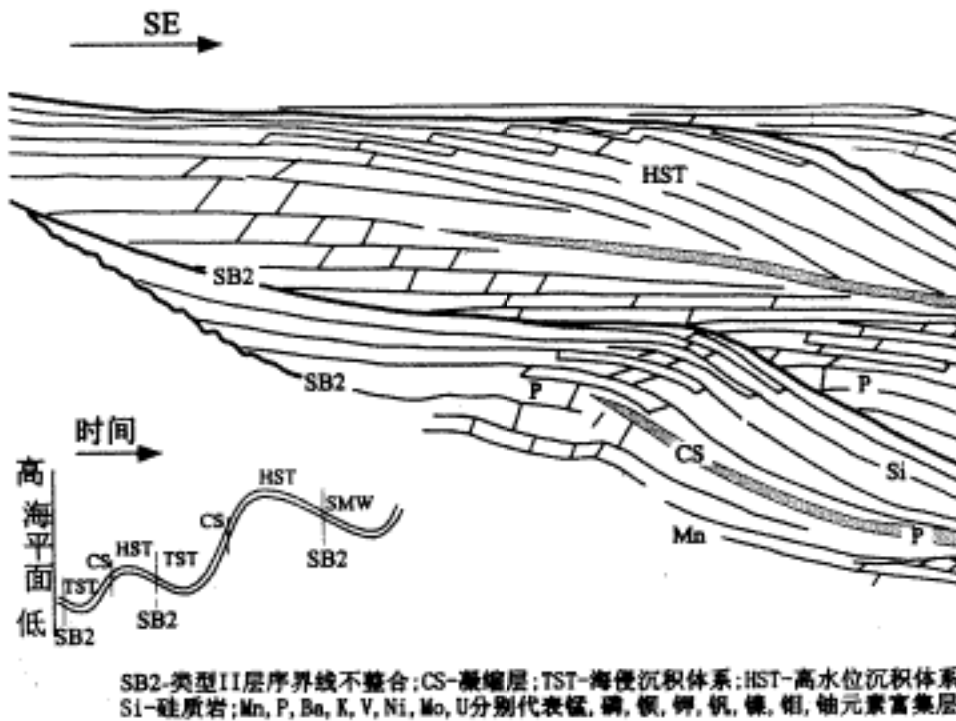
金顶山组和明心寺组属于早寒武世海平面升降变化产生2-2沉积层序。相对2-1层序，海平面有所下降。主要由金顶山组中、上部的灰绿色页岩，金顶山组中、上部深灰色粘土页岩，及清虚洞组下部薄板状泥灰岩夹页岩组成，水平纹理发育。由于海平面上升速率大，海相沉积物向陆方向迁移，陆源物质沉积在浅水区，而较深水区则出现泥灰岩、页岩及硅质页岩，底面具微冲刷面，属远源钙屑浊积岩，常见滑动构造，沉积厚度60~100 m，盆地内以硅泥质沉积为主，厚度小于40 m，可能为陆隆沉积环境。

在研究黑色页岩时人们常忽视它的地层样式，黑色页岩在海进层序中的位置是需要引起注意的一个问题。目前一些学者认为世界上黑色页岩多属于海进成因类型〔13〕，黑色页岩沉积在剥蚀或间断面(不连续面)上，表明了海进的初始阶段。黑色页岩通常发育在海岸线最大后退期的海进峰〔8〕。海进的沉积记录是非常薄的，仅是在沉积物

输入较高的条件下，海进体系域比较发育。湘西黑色页岩地层厚度薄，分布稳定，延伸范围较广，这种趋向从近岸向远岸到盆轴方向越来越明显，尤其陡山沱组的含磷层位可以从黔东一直分布到湘西地区。陡山沱组底部仅有一层薄的含锰碳酸盐沉积，尔后就是广泛分布的富有机质的黑色页岩，也正反映了类似的特点。牛蹄塘组的海侵体系域在湘西地区也不发育，以较薄的含磷结核的页岩为代表，随后即是广泛分布的黑色页岩。

5 沉积模式与矿床赋存层位

湘西沉积矿床因受区域地质、地球化学背景、海平面变化、沉积和成岩作用所控制，具有一定的时空分布规律(图1，图5)，一些具有内在联系的矿床共生在一定地质单元内的层位中，可形成矿床组合或成矿序列。湘西上震旦统、下寒武统可分别划分为黑色页岩-磷块岩-硅质岩组合和磷结核-重晶石-石煤-多金属富集层两个成矿系列。



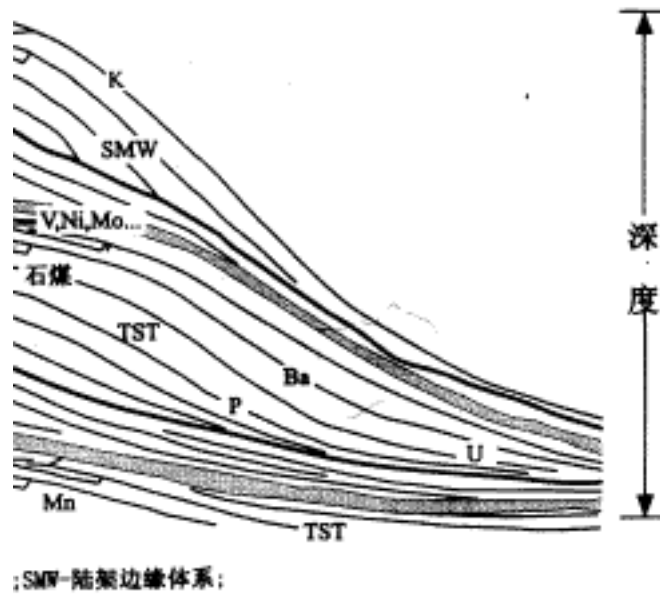


图5 湘西晚震旦世晚期 - 早寒武世早期层序地层沉积模式

SB2 - 类型II层序界线不整合；TST - 海侵沉积体系；HST - 高水位沉积体系；SMW - 陆架边缘体系；Si - 硅质岩；Mn, P, Ba, K, V, Ni, Mo, U分别代表锰，磷，钡，钾，钒，镍，钼，铀等元素富集层

Fig.5 The model of the sequence and the ore deposits of the Late Sinian and Early Cambrian, Southwest China

磷矿主要分布在黔中(开阳磷矿和瓮福磷矿)、黔北和湘西北的东山峰、古丈、洗溪等地。赋存层位主要是陡山沱组，在少数地区灯影组中也有具工业价值的磷矿产出，如湖南长沙麻田磷矿。关于海水中的磷质来源的讨论较多〔1, 14~15〕。震旦纪时期的古陆磷质含量不会很高，因为陆生生物还不具备，而中性火山可提供大量火山磷灰石。湘西磷块岩中总轻稀土与总重稀土元素之比(Ce/Y)为0.81~0.9，接近于同期海底喷发的凝灰岩总轻稀土与总重稀土元素之比($Ce/Y=1.03$)，而与围岩黑色页岩的总轻稀土与总重稀土元素之比(Ce/Y)4.86相差较远，表明海底火山喷发提供原始磷的可能性最大。由于湘西陆棚斜坡盆地是一种滞流海盆，上升洋流沿地形转折部位将海盆深处的富磷海水携带至滞流海盆地海水表层，致使表层海水营养丰富，促进了生物的发育，为聚磷作用提供了条件。

石煤在上震旦统的分布比较局限，陡山沱组仅在安化叙浦、黔阳、通道一带有石煤层分布，煤质也较差。灯影组的石煤仅分布于桃源、常德、汉寿等地，大部分地区不含石煤。寒武纪是石煤形成的重要地质时期，集中分布于牛蹄塘组，石煤总厚为10~30 m。自晚震旦世晚期整个南方处于地壳拉张裂隙作用之后，海平面迅速上升，江南陆坡海盆形成水体较深的非补偿沉积环境。由于受古构造控制作用的影响，地形分割渐趋明显，形成水下隆起和凹地。在这些地形转折部位，上升洋流活跃，海水具有较高的有机物生成率；另由于处于非补偿沉积环境，有利于有机质的堆积富集。因此，在陆坡盆地内形成大量的石煤。沉积作用是石煤形成不可忽视的重要因素。只有

菌藻类与海水中的胶状硅质或悬浮泥质的沉积速率与地壳的沉降幅度相互补偿和缺氧的条件下,才能使菌藻类避免遭受氧化破坏而被保存,并使菌藻类逐渐富集,从而为形成石煤保存了必要的物质条件。到早寒武世中期以后,扬子区处于陆棚环境,沉积界面位于氧化界面之上,沉积物仅厚十几米至几十米。这种沉积作用,不利于菌藻类保存和造成大量的菌藻类富集。因此石煤发育差,或仅形成碳质含量相对较高的含碳沉积物而无石煤形成。

早寒武世是扬子地区多金属沉积矿床的一个重要成矿时代。黑色页岩以富有机质为特征,并聚集数十种元素的多金属富集层。已知在下寒武统黑色岩系中赋存伴生元素六十余种,其中有二十多种达到工业要求,可供综合利用〔10,16〕。钒是湘西黑色页岩中常见的伴生元素,其含矿率达50%~70%,矿石品位较高,含 V_2O_5 0.54%~1.04%,而含有机碳低的硅质岩, V_2O_5 含量仅在0.14%~0.41%。湘西位于江南陆坡相区,深层水上涌,陆坡区浮游生物极其繁盛,火山活动为表面水提供营养物质,光照和温度条件适宜。促使浮游生物生成力很高,不断地向海底提供充分的有机物质,吸取多种矿质,在海底堆积得到富集。由于海平面的迅速上升,海基面升高,水体加深,光合作用能达到的界面也随之上升,导致下部水体严重缺氧,伴随着洋流上涌,更加强了海底的缺氧、地外事件的袭击,大量生物死亡的骨骸堆积、分解,形成缺氧环境。由于底层水缺氧滞流而形成还原环境,为多元素富集层的形成创造了有利条件。除此之外,陆源物质供应量较少、沉积速率缓慢、水动力条件较宁静,这种特殊的环境也有利于有机质与金属元素可进行长期缓慢的交换和吸附,进而有利于海解作用的发生。

分布在贵州天柱、湖南新晃的超大型重晶石矿床发育在下寒武统底部,受控于加里东旋回和裂谷的拉张裂隙作用。重晶石底板为黑色硅质磷块岩,顶板为炭质页岩,其沉积特征反映其沉积环境为陆坡深水非补偿海盆,但重晶石多大规模聚集于海隆之间或隆起中的次级凹陷和洼地。由于沉积物中富含有机质、黄铁矿和具规则的水平纹层等,表明了这种深水半封闭滞流环境对重晶石的形成具有重要作用。大河边重晶石矿中重晶石 ^{34}S 值为+41.65,大于同时代海洋硫酸盐的 ^{34}S 值,说明成矿环境处于封闭-半封闭系统。震旦纪-寒武纪热活动主要表现为深部热源物质通过断裂和裂隙,沟通地表水、地下水和海水,形成热水循环或热水活动,并常常伴有火山喷发〔12〕。特别是最近发现在扬子板块东南边缘筇竹寺期的火山碎屑沉积物,呈凝灰岩或凝灰质页岩夹于黑色页岩中,在桃江还发现梅树村期黑色含放射虫、硅质海绵骨针的薄层硅质岩、凝灰岩与碱性黄长玄武岩组合,证实了早寒武世火山活动的存在。在现代海洋中普遍存在的白“烟囱”是一种典型例子,蛋白石和重晶石的生成主要与低温热液有关,也就是温度较低的热液喷出时形成的“白烟”。白烟囱喷出热液中含的固体微粒为蛋白石和重晶石。湘西重晶石矿床形成于大陆边缘裂谷或裂隙槽的火山喷发作用时期,地壳深部物质由于地幔热能及岩浆作用,遭受熔融或部分熔融。至火山喷发旋回结束的气液阶段,壳层重熔体中的 SiO_2 携带P、大量钡、钒、镍、钼、钨、金等多金属元素随同沉积深断裂上升,喷溢于裂隙槽海盆,并有少量火山凝灰物质同时喷出形成沉凝灰岩层。因 SiO_2 饱和而首先沉积硅质岩、含磷硅质岩或夹磷结核层、磷块岩、同时,当硅胶凝聚成硅质岩时, Ba^{2+} 被释放而进入海水。当海水和沉积物由酸性演化至弱酸性-弱碱性的环境时, Ba^{2+} 与海水中的 SO_4^{2-} 相结合而沉淀出重晶石矿层。

6 讨论

黑色岩系的形成受两个重要条件的限制,一是生物生产率要高,能够向海底提供充分的沉积有机质,二是必须具备有利于沉积有机质保存、聚集与转化的条件。湘西晚震旦世到早寒武世沉积层序的演化序列阶段性明显,随着南沱冰期的结束,消融的冰水入海造成海水体积大幅度增加,发展为大规模的海侵。海侵沉积体系第一次覆盖在经历了40~100 Ma 暴露时间的古陆上,致使扬子古陆被海水淹没,海平面上升时需一部分海水补偿,促使上升洋流和富磷冷海水向海面表层上涌。海平面上升的结果使下部海水柱成为还原环境,沉积了大面积覆盖的黑色页岩和碳质页岩。

陡山沱组的磷块岩为上震旦统层序中的凝缩层,牛蹄塘组的黑色页岩形成于海侵阶段的浅海-半深海沉积条件,构成了黑色岩系型含矿序列。两套黑色岩系的含矿性在空间上和 时间上的分布规律,陡山沱组为含Mn、P、硅质岩序列,磷块岩从台地向盆地方向含矿性变差,牛蹄塘组为P、重晶石、石煤、V-Ni-Mo序列。扬子区在经历了冰期以后,大陆壳经长期风化,使Mn等元素迁移,在海洋的环境得到富集,经有机质的还原作用形成 Mn^{2+} ,最终以碳酸盐的方式沉淀,形成在海进底部的碳酸锰矿床。随着海洋生物的进一步繁盛,上升洋流带来丰富的富P海水和营养物质,使磷在这一时期得到富集,经成岩作用富集形成磷矿床,以花桥的磷矿为代表。在寒武系底部多形成层位稳定的磷结核层,以含丰富的海绵骨针为特征,可能反应了生物的聚磷作用。随着裂谷作用火山喷发、气液喷溢和地外事件,提供了丰富的含金属元素的卤水,形成重晶石透镜状矿层,由于海平面的进一步上升而引起的缺氧环境和生物富集,发育了全区稳定分布的石煤层,石煤中有机质来源一方面来自于发育该地区的藻类,另一重要来源是台地、斜边的有机质被海水迁移而来。随着海侵范围的进一步扩大,由浅水运移来的有机质丰度提高,使钒达到最大富集状态,而形成富含钒的层位,发育了一定规模的矿床。

致谢 本文在完成过程中得到了叶连俊院士的悉心指导,在此深表衷心感谢。

国家自然科学基金(49802014)和地质行业科学技术发展基金(HY979821)资助项目。

第一作者简介 吴朝东 男 1965年出生 博士后 沉积地球化学

作者单位:吴朝东 杨承运(北京大学地质系 北京 100871)
陈其英(中国科学院地质研究所 北京 100029)

参考文献

- [1] 夏文杰、杜森官、徐新煌等著,中国南方震旦纪岩相古地理与成矿作用[M].北京:地质出版社.1994.1~12
- [2] Wignall, P.B., Black shales [M]. Oxford: Clarendon Press. 1994. 24~28
- [3] Nuhfer, E.B., Mudrock fabrics and their significance-discussion [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1981, 51: 1027~1029
- [4] Pye K, Krinsley D H. Microfabric, mineralogy and early diagenetic history of the Whitby Mudstone Formation(Toarican), Cleveland Basin [J], UK. Geological

Magazine,1986, 123: 191 ~ 203

[5] Leckie D A, Singh C, Goodarzi F, Wall J H. Organic-rich, radioactive marine shale: a case study of a shallow-water condensed section, Cretaceous Shaftesbury formation, Alberta, Canada [J] . Journal of Sedimentary Petrology, 1990, 60: 101 ~ 117

[6] O'Brien N R. Significance of lamination in Toarcian(Lower Jurassic)shales from Yorkshire, Great Britain [J] . Sedimentary Geology, 1990, 67: 25 ~ 34

[7] Banerjee I, Kidwell S M. Significance of molluscan shell beds in sequence stratigraphy: an example from the Lower Cretaceous Maunville Group of Canada [J] . Sedimentology, 1991,38:913 ~ 934

[8] Coveney R M Jr, Watney W L, Maples C G. Contrasting depositional models for Pennsylvanian black shale discerned from molybdenum abundances [J] . Geology, 1991,19: 147 ~ 150

[9] Jervey M T. Quantitative geological modeling of siliceous clastic rock sequences and their seismic expression. In:Wilgus C K,et al,eds.Sea-level changes: an integrated approach [C], SEPM Special Publication, , 1988 , 42 : 47 ~ 70

[10] 张爱云,伍大茂,郭丽娜,王云龙著,海相黑色页岩建造地球化学与成矿意义 [M] .北京:科学出版社,1987:20 ~ 60

[11] 王东安,扬子地台晚元古代以来硅岩地球化学特征及其成因 [J] .地质科学, 1994, 29(1):41 ~ 54

[12] 刘宝君,许效松著,中国南方古大陆沉积地壳演化与成矿 [M] .北京:科学出版社, 1993 : 61 ~ 65

[13] Creaney, S., and Passey, Q.R. Recurring patterns of total organic carbon and source rock quality within a sequence stratigraphic framework [J] , AAPG Bulletin, 1993,77:386 ~ 401.

[14] 杨卫东,肖金凯,于炳松等滇黔磷块岩沉积学、地球化学与可持续发展战略 [M] .北京:地质出版社, 1997:76 ~ 86

[15] Batrin, G.N., Stages of Phosphorite formation on the ocean floor [J] , Nature, 1971, 232: 61 ~ 62.

[16] 范德廉,杨秀珍,王连芳等,某地下寒武统含镍钼多元素黑色岩系的岩石学及地球化学特点 [J] .地球化学, 1973, 3 : 143 ~ 165

收稿日期:1998-05-26