

湖南下寒武统层序地层特征与古环境演化变迁

庞维华¹ 丁孝忠¹ 高林志¹ 刘燕学¹ 宗文明² 逯永光¹

(1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2 沈阳地质矿产研究所, 辽宁 沈阳 110034)

摘要: 湖南下寒武统发育完整, 湘西北和湘中地区主要发育一套从黑色岩系到碳酸盐岩的地层序列, 湘南地区相变为一套以杂砂岩和炭质板岩不等厚韵律层为主的地层序列, 整体构成一个完整的二级层序, 可进一步划分为 6 个三级层序, 对应 6 个有序的海进-海退沉积旋回, 其中三级层序的沉积体系域受沉积古环境的影响由“凝缩段(CS)+高位体系域(HST)”和“海进体系域(TST)+凝缩段(CS)+高位体系域(HST)”两种垂向叠加形式组成, 下寒武统的层序界面类型主要为 II 型层序界面和淹没不整合型层序界面。在空间上, 湘西北和湘中地区为由 NW 向 SE 的缓坡环境, 随着沉积环境逐渐加深, 下寒武统沉积厚度逐渐变薄, 至湘南地区沉积厚度增厚, 沉积深海相厚层杂砂岩夹板岩, 其相序变化系统记录了湖南省早寒武世复杂的被动陆缘古地理环境演化和变迁, 其演化和变迁也反映了古环境演化对成矿作用的制约。

关键词: 下寒武统; 层序地层; 岩石地球化学; 古环境演化

中图分类号: P534.41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2011)-03-0560-17

扬子地台大冰期(南华系)之后, 从震旦系到上古生界为连续沉积的碳酸盐岩台地, 震旦系上部留茶坡组硅质岩与寒武系底部牛蹄塘组硅质炭质页岩为整合接触关系。湖南下寒武统沉积相类型多样, 不仅蕴藏大量的矿产资源, 主要包括油气、石煤、磷矿、铅锌矿等多金属矿床以及稀有金属、稀土元素等, 而且具有重要的解释古大陆旋回意义^[1-4]。本套地层为时空上连续的岩石地层序列, 代表了震旦纪与寒武纪过渡时期大规模淹没事件之后的由碎屑岩相向碳酸盐岩台地过渡, 并由 NW 向 SE 沉积环境总体变深的沉积演化过程^[5], 同时古环境对沉积矿产的赋存方式和分布规律具有强烈的制约作用。根据露头层序地层学的原理与方法^[6-10], 笔者通过对湘西北地区的石门杨家坪和桃源马金洞剖面、湘中地区的安化桑坪溪和隆回羊岩口剖面以及湘南地区的江华悬水剖面等 5 条主要剖面和数条辅助剖面(图 1)的观测和研究, 从区域上对湖南下寒武统进行了野外

露头层序地层学研究, 划分了 6 个三级层序和若干个体体系域, 同时结合全球海平面的变化及构造运动等因素对其古环境演化进行分析, 并在此基础上对各个层序的地球化学特征和成矿特征进行初步探讨。

1 区域地质概况

研究区位于扬子陆块东南缘向华夏陆块的过渡区。自晚震旦世已形成稳定碳酸盐岩台地-浅海陆棚-盆地的格局, 到早寒武世早期, 随着全球海平面快速上升, 海底形成缺氧环境, 此时期形成了南方广泛出露的覆盖在扬子陆块震旦纪地层之上的黑色岩系为主的沉积地层, 反映了显生宙以来的最大的一次海侵^[11]。之后, 即自筇竹寺晚期开始, 本区构造及沉积环境出现了三分的格局, 根据地层、岩性、沉积相及地质构造等特征, 将研究区由 NW 向 SE 依次划分为湘西北(I)、湘中(II)、湘南(III)3 个地层区^[11,12](图 1):

收稿日期: 2011-03-01; 改回日期: 2011-04-15

基金项目: 中国地质调查局项目“中国地质构造区划与区域地质调查综合集成”(1212010811033)资助。

作者简介: 庞维华, 女, 1984 年, 硕士生, 从事区域地质学及沉积相分析研究; E-mail: wei huapang@yahoo.cn。

通讯作者: 丁孝忠, 男, 1963 年, 博士, 研究员, 从事区域地质综合研究与编图、盆地分析研究; E-mail: xiaozhongding@sina.com。

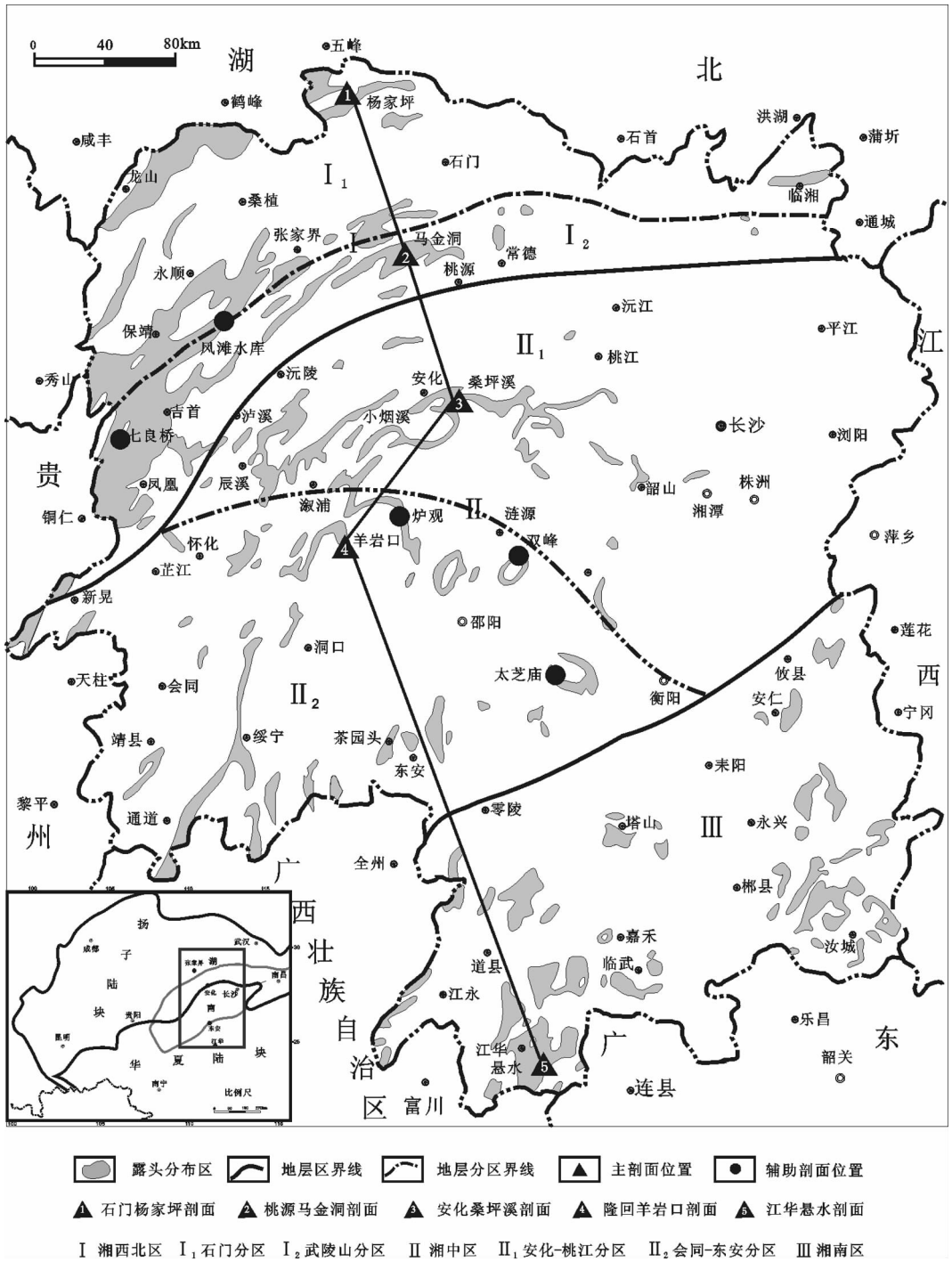


图 1 湖南下寒武统地层分布及分区图(据湖南省区域地质志,1988;中南区区域地层,1978;修编)

Fig.1 Distribution and division of lower Cambrian strata in Hunan(modified after Regional Geology of Hunan, 1988;Regional Stratigraphy of Central-South China, 1978)

1)湘西北地区(I),自下而上依次分为:牛蹄塘组、杷榔组、清虚洞组 3 个组^[13-14](表 1)。其中石门分区(I₁)沉积特征为牛蹄塘组主要由黑色硅质炭泥质

页岩组成,整合接触于下伏震旦系灯影组白云岩之上;杷榔组以底部黑色泥灰岩与下伏牛蹄塘组黑色炭质页岩整合接触,沉积一套下部钙质砂质页岩,上

表1 湖南下寒武统地层划分对比简表

Table 1 Stratigraphic division and correlation in Hunan

地层单位		岩石地层 (NW→SE)				
统	阶	石门	桃源	安化	隆回	江华
下寒武统	龙王庙阶	清虚洞组	清虚洞组	小烟溪组	小烟溪组	香楠组
	沧浪铺阶	杷榔组	杷榔组			
	筲竹寺阶	牛蹄塘组	牛蹄塘组			
	梅树村阶					

部泥灰岩为主的岩性地层;清虚洞组是以泥晶灰岩、白云质粉砂质泥质灰岩为主夹少量白云岩的岩性组合,沉积厚度 410~1120 m;武陵山分区(I_2)特征为牛蹄塘组黑色页岩整合于下伏震旦系留茶坡组的硅质岩之上;杷榔组为泥质岩为主的由黑色页岩向钙质页岩转化的地层;以碳酸盐岩为主的清虚洞组则整合于中寒武统敖溪组之下,沉积厚度为 320~900 m。

2) 湘中地区(II),溆浦—涟源一线由于受“江南古陆”基底及水下隆起带的影响而形成由北向南的坳—隆—坳的格局,以此相对隆升地带为界,分为安化—桃江分区(II_1)和会同—东安分区(II_2)。本区总体岩性变化不大,整个下寒武统由小烟溪组(表1)组成,下段以黑色炭质板状页岩为主,下部夹黑色硅质岩、硅质炭质板状页岩及“石煤层”,近底部炭质板状页岩中含磷结核及镍、钼、钴、钒、铀等;上段为黑色炭质板状页岩,夹白云质灰岩、灰岩或呈互层,但碳酸盐岩的出现很不稳定,中部隆起地带出露较广泛。岩层厚度 147~350 m,受构造背景的影响形成南北向厚—薄—厚的沉积特征。

3) 湘南地区(III)以江华地区为代表,香楠组(表1)主要以颜色深黑、单层厚度小、板岩和杂砂岩互层,夹有石煤层、磷结核层为特征,对应整个下寒武统^[15],厚度可达 700 m 以上。

需要提出的是,关于寒武系的划分,2004 年新国际地层年表中采用并确定了中国提出的 4 统划

分方案^[16-17],根据最新资料,全国地层委员会在新的《中国区域地质年表》中将采用底、下、中、上统的 4 分方案。但鉴于区内地层研究程度和叙述方便,本文仍采用全国地层委员会 2002 年划分方案^[18],即寒武系分为下、中、上 3 个统,本文研究层位下寒武统对应 4 分方案中底寒武统和下寒武统的梅树村阶、筲竹寺阶、沧浪铺阶和龙王庙阶(表 1)。

2 层序地层划分

本区下寒武统层序地层,由于划分依据和研究者侧重点的不同,有多种不同的划分方案,有的将其划为 2 个二级层序^[19],有的划分为 4 个三级层序^[20],有的划分为 5 个三级层序^[21-23],杨家驛^[24]、王鸿祯^[25]等划分了 6 个三级层序。一方面可能与各地区二级海平面变化旋回的差异有关,另一方面也可能与区域性地壳升降差异有关,有的还受当地地层露头的影响,从而出现不同的划分方案。本文依据区内下寒武统地层接触关系、沉积相序的演变、副层序的叠置方式以及地球化学特征等标志,结合区域层序界面特征,将其划分为 6 个三级层序,除湘西北和湘南地区的层序 1 由凝缩段(CS)和高位体系域(HST)组成外,其余均由海侵体系域(TST)、凝缩段(CS)、高位体系域(HST)组成(图 2)。

2.1 层序界面(SB)

根据层序界面识别标志,划分出其层序边界^[26-28]。本区下寒武统的地层层序界面主要为岩性、结构转换面,即 II 型层序界面(SBII),界面上下岩石成分和结构发生突然变化,反映了两种沉积环境形成的不同沉积结构,代表了一种水下沉积间断,但未造成沉积相的缺失(图 2)。其中不同的是层序 1 的底界面显示了与贵州东部等地区发育的淹没不整合层序界面相当的界面^[9],即 III 型层序界面,形成以凝缩段直接覆盖在 III 型层序界面之上的“CS+HST”序列为特征的淹没不整合型层序^[29-30]。结合古地理环境分析,认为本区的层序界面除湘西北地区层序 1 的淹没不整合型层序界面外,均为 II 型层序界面。

2.2 副层序类型

根据岩性和结构差异,以及其叠置方式和韵律变化,研究区可识别出 A-P 型 16 个类型的副层序(图 3)。其中 A、B、C、D 为向上加深的退积序列;E、F、G、H 为凝缩段沉积类型;I、J、K、L、M、N、O、P 为向上变浅的进积序列。

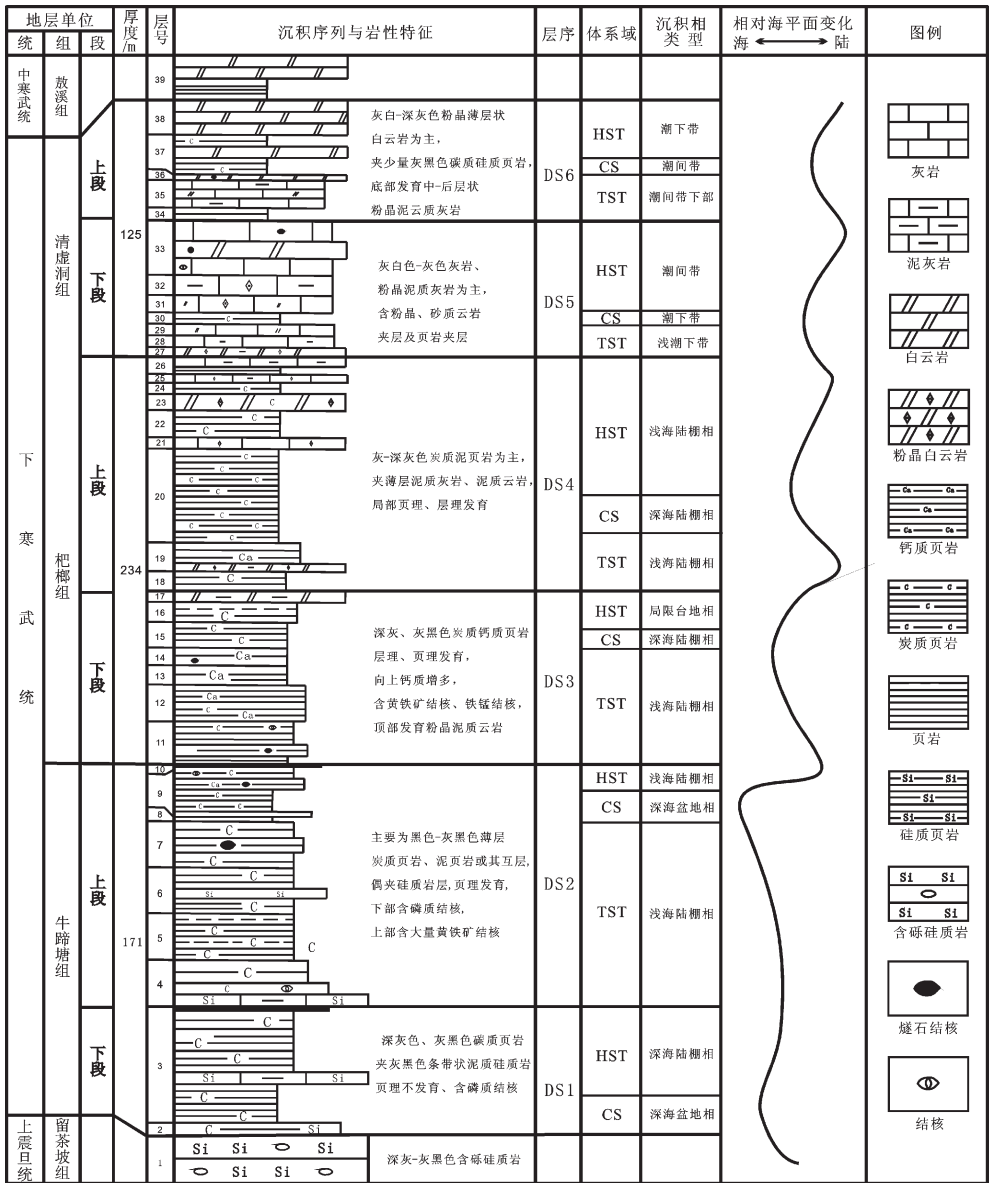


图 2 湖南桃源地区马金洞下寒武统沉积特征及层序地层划分
Fig.2 Sedimentary environment and sequence stratigraphic division of Lower Cambrian strata in Taoyuan, Hunan

2.3 层序地层的划分及对比

1)层序 1(DS1):

本层序层位对应早寒武世早期的梅树村阶和箬竹寺阶下部, 由牛蹄塘组下段或与其相当的层序组成, 发育 B、D、K 型副层序(图 3)。由于所处的古地理位置不同, 湘西北和湘南地区发育 III 型层序, 湘中地区发育 II 型层序。

湘西北石门分区(I₁), 底界面为牛蹄塘组底部的深黑色炭质页岩夹硅质岩(即 CS 段)与震旦系灯

影组灰白色白云岩之间的岩性转换面, 形成一个以快速加深为特征的淹没不整合面, 代表了显生宙以来的第一次较大规模的海侵。该层序不发育低位体系域和海进体系域, 直接由凝缩段(CS)和高位体系域(HST)组成。牛蹄塘组下段是以含大量磷质结核及浸染状黄铁矿结核为特征的深水海盆相, 偶夹沉积型重晶石富集层, 下部含薄层粉屑磷块岩、薄层磷灰岩, 发育微侵蚀面和粒序层理等沉积构造, 何幼斌等认为可能为远源浊流沉积^[9], 但是鉴于黑色岩系

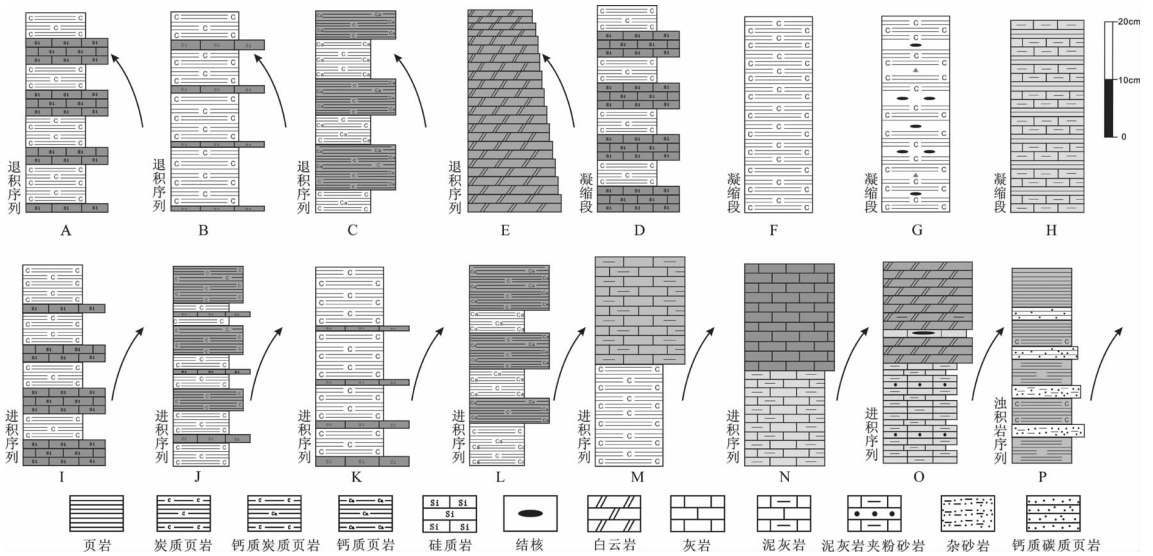


图3 湖南下寒武统副层序类型

Fig.3 Sketch of Lower Cambrian Parasequence types in southwestern Hunan

的发育，本文认为应归入还原环境的闭塞滞留海盆环境。武陵山分区(I₂)层序特征与石门分区相似(图4-1、2)，所不同的是层序底界面为牛蹄塘组底部的黑色中薄层炭质泥岩和震旦系留茶坡组的黑色中薄层硅质岩的岩性转换面，亦形成淹没不整合面。凝缩段(CS)由约1 m厚的极薄层炭质页岩、炭硅质岩组成(图3-D)，底部发育一层燧石结核层，结核椭球状，长轴0.5~5 mm，为深海盆地相沉积；高位体系域(HST)由40 m厚的深海陆棚相的炭质页岩夹薄层炭泥质硅质岩组成，向上硅质岩夹层变少，炭质页岩变厚，形成向上变浅的沉积序列(图3-K；图4-3)，包括5~6个副层序组沉积。

在湘中地区(II)，受大范围海侵的影响，早寒武世小烟溪组底部发育薄层硅质岩、炭硅质岩覆盖于下部留茶坡组厚层硅质岩之上。安化地区小烟溪组底部发育一层约0.5 m厚的风化的土黄色泥页岩，向上约3 m处发育一层厚1 m左右的灰白色凝灰岩层。本层序由海进体系域(TST)、凝缩段(CS)和高位体系域(HST)组成，TST为厚层黑色页岩夹薄层硅质岩等一系列副层序堆叠组成，向上硅质岩层增厚，黑色页岩变薄(图3-A)，在CS段形成黑色页岩和硅质岩等厚层(图3-D)，向上的高位体系域(HST)，形成整体向上变浅的序列，硅质岩减薄，黑色页岩层增厚(图3-I)，硅质岩中还见同生变形构造和滑塌堆积，属滞留海盆环境。

在湘南地区(III)江华一带，以震旦系丁腰河组顶部代表海侵体系域的浅灰、灰绿色硅质岩，与下寒武统香楠组底部含磷质结核的黑色炭质板岩夹薄层黑色绢云页岩和硅质岩层整合接触，其下部含石煤的地层亦代表了层序1的凝缩段，为深水盆地相。向上杂砂岩开始增多，逐渐过渡到杂砂岩与板岩等厚互层，杂砂岩与板岩组成的由斜层理向水平层理递变的韵律层显示了水体向上变浅的高位体系域的沉积特征，为深水盆地浊积扇内扇—外扇相。

2)层序2(DS2)：

本层序层位对应筇竹寺阶上部，主要地层为牛蹄塘组上段的黑色炭质页岩及与其相对应的小烟溪组和香楠组下部，发育B、D、F、G、J、K、P型副层序(图3)，沉积体系域包括海进体系域(TST)、凝缩段(CS)和高位体系域(HST)，II型层序界面。

湘西北地区(I)，以底部发育一套约1m厚的凝灰质含量很高的泥岩、粉砂质泥岩为标志和层序1区分。TST由下部为黑色中层硅质岩，上部为极薄层炭质泥岩夹薄层硅质岩的副层序组成，向上变薄，显示了向上变深的退积序列(图3-B)，顶部演变为均厚的薄层炭质泥岩夹硅质岩(图3-D)，见一层磷质结核层。局部发育水平层理，单层厚度1.5~12 cm，含炭量较高，为深海陆棚相。CS段为0.6~0.7 m深海盆地相沉积的极薄层炭泥质页岩(图3-F、3-G；图4-4)，厚度0.1~0.2 cm，发育毫米级水平纹层带，

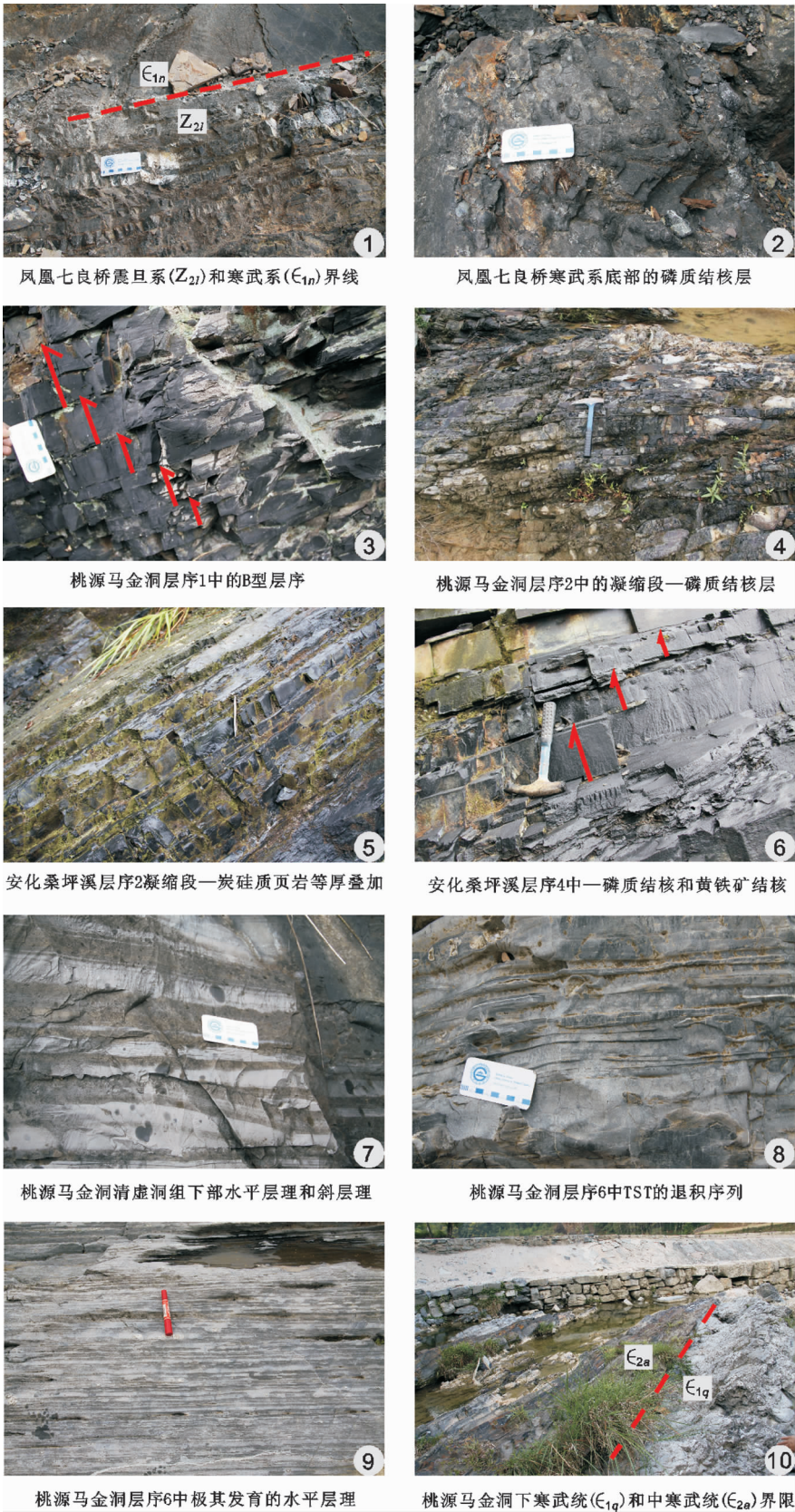


图 4 湖南下寒武统地层典型层序界面、标志层和副层序类型

Fig.4 Sequence boundary, marker bed and different types of parasequence of Lower Cambrian in Hunan

黄铁矿结核和磷质结核呈透镜状近似平行层面分布,指示良好的还原环境。HST 由下部为薄层炭质泥岩夹硅质岩,上部为中层炭质页岩的副层序组成,形成向上逐渐变厚的沉积序列(图 3-J;3-K),显示了沉积环境向上变浅的变化趋势,含炭量高,指示宁静封闭的深海还原环境。HST 顶部产出一层厚约 10 cm 的风化成黄褐色泥土状的泥质灰岩为顶界。横向上由北西向南东炭质含量增加,向北西方向水平纹层更为发育,出现砂泥质夹层,产三叶虫及海绵骨针化石,显示了向北西方向沉积环境相对变浅的现象,为浅水陆棚至外陆棚环境。

湘中地区(II)在该时期发育一套灰黑色中厚层炭质板岩,黑色薄层硅质岩夹硅质炭质页岩,偶见不清晰的水平纹层,炭质页岩形成韵律层沉积(图 3-J,3-F,3-L),分别显示了 TST、CS、HST 的变化特征(图 4-5)。局部含黄铁矿结核、磷质结核及石煤层,属滞留海盆—斜坡相。

湘南地区(III)发育黑色炭质板岩和灰绿色中厚层泥质粉砂岩互层,向上砂岩层变厚的韵律层(图 3-P),见砂纹层、水平纹层、粉砂质条带,具鲍马序列 abcd、de 等组合特征,指示下斜坡—深水盆地环境。

3)层序 3(DS3):

层位为沧浪铺阶下部,以杷榔组下段及其相对应的地层为主。由海进体系域(TST)、凝缩段(CS)和高位体系域(HST)组成,发育 C、F、J、L 型副层序(图 3),II 型层序界面。

湘西北地区(I),沧浪铺期扬子陆块受“兴凯运动”的影响^[4],海盆有所抬升,扬子陆块海平面相对下降。在石门一带(II)该层序发育一套杷榔组的炭泥质、白云质灰岩、薄层状灰岩,夹黑色—灰黑色薄层页岩(图 3-M;3-N),毫米级水平纹层发育,为深水缓坡—浅海陆棚相泥质岩、碳酸盐岩沉积。武陵山分区(I₂)由杷榔组下段厚约 120 m 的炭质页岩过渡为钙质泥岩构成,以发育一层土黄色的泥灰岩风化层为界面,之下为黑色炭质板岩,其上发育一层硅质岩,向上钙泥质增多,由炭质页岩逐渐变为钙质页岩。沉积体系域由海进体系域(TST)、凝缩段(CS)、高位体系域(HST)构成。TST 底部以泥质灰岩与下伏牛蹄塘组为界,L 型副层序下部主要为薄层钙质泥岩、上部为中层钙质泥岩、粉砂质泥岩,显示向上变薄的浅水陆棚相沉积特征(图 3-L);CS 段以出现深海陆棚相的极薄层钙质页岩为特征(图 3-G),其

发育黄铁矿结核、铁锰质结核等,结核呈似层状、透镜状,核体宽为 3~10 cm,显示了最大海泛面水体加深的沉积现象;HST 为薄层和厚层钙质页岩互层的进积序列,上部发育层泥灰岩,顶部出现中层白云岩(图 3-M),表现为局限台地相。

湘中地区(II)为一套相对较深水环境的沉积地层,产出含磷质结核的炭质泥岩、页岩为主的斜坡亚相,偶夹层理清晰的薄层硅质岩层。

湘南地区(III)为灰绿色中—厚层夹块状粉砂岩、石英杂砂岩夹炭质、砂质板岩。岩石组合为向上变细的杂砂岩、砂质板岩、板岩叠置组成的旋回层(图 3-P),具有底部切蚀现象,可见槽模、沟模等,单个旋回层厚 1~2 m。含砾杂砂岩、杂砂岩内发育递变层理、粒序层理,块状杂砂岩中的递变层理一般厚 2~8 cm,砂质板岩、板岩发育小型交错层理、水平层理,常见的鲍马序列组合有 abde、ade、ace、cde、de 等,为典型的深海相沉积。

4)层序 4(DS4):

该层序对应沧浪铺阶上部,为杷榔组上部地层或其相应层位,主要发育 C、F、L、M、N 型副层序。由海进体系域(TST)、凝缩段(CS)和高位体系域(HST)组成,II 型层序界面。

湘西北地区(I),在沧浪铺末期随上扬子台地的继续抬升而逐步向碳酸盐岩缓坡发展。石门分区(II)主要发育杷榔组深灰色—灰绿色页片状及薄层泥粉晶含泥灰岩、泥晶泥质灰岩夹薄层泥晶灰岩及白云质泥灰岩,水平纹层发育,具正粒序,为盆地边缘—碳酸盐岩缓坡相沉积环境。武陵山分区(I₂),由杷榔组上段钙质页岩为主的地层构成,发育 C、L 型副层序,海侵体系域(TST)为浅海陆棚相钙质页岩夹灰色、深灰色薄层状泥灰岩,略含炭质,水平纹层发育,宽 1~2 cm,泥灰岩页理发育,单层厚 2~5 cm;CS 段以极薄层钙质泥岩夹薄层泥灰岩为特征的深海陆棚相沉积,水平纹层发育,见有铁锰质氧化物薄膜,显示具有低能封闭的沉积环境特征;HST 下部为深灰—灰黑色炭质页岩、钙质泥岩,上部出现颗粒灰岩(图 3-M),顶部开始出现浅潮下泥灰岩和潮坪相灰岩(图 3-N),发育脉状层理、小型斜层理,冲刷面明显。

此时期的湘中地区(II)与层序 3 相似,仍为斜坡相炭质、硅质页岩,常见黄铁矿结核顺层理方向发育,偶见灰黑色中厚层状含铁锰质炭质板岩(图 4-

6), 风化呈松软的铁锰土状, 属下斜坡亚相。

湘南地区(III)为一套深海相杂砂岩-页岩相。

5) 层序 5(DS5):

对应层位为龙王庙阶下部, 主要由海进体系域(TST)、凝缩段(CS)和高位体系域(HST)组成, 发育 C、F、H、L、M、N、O 型等副层序, 为 II 型层序界面。

湘西北地区(I), 随着扬子地台的继续抬升, 石门分区(II)发育一套深灰色中厚层状泥晶灰岩、白云质泥质灰岩, 夹泥质灰岩为主的浅海碳酸盐岩沉积, 层序底部亦即榔榔组和清虚洞组界线, 为下部钙质页岩、灰岩互层和上部灰岩的岩性转换面。水平泥质条带宽 1~2 cm, 风化后条带易脱落, 呈现“千层饼”状外观, 可见波痕及大量遗迹化石, 发育同沉积角砾, 主要为灰岩角砾, 为低能的台地前缘斜坡沉积。在武陵山分区(12), TST 下部为发育平行层理的细砂屑灰岩和泥质灰岩组成的薄韵律层, 向上为浅潮下中薄层泥灰岩夹极薄层泥灰岩; 凝缩段(CS)为薄层泥灰岩(图 3-H); HST 下部为浅潮下带中薄层泥灰岩夹极薄层泥灰岩、颗粒泥灰岩互层, 上部为潮下中层白云岩(白云质灰岩)夹泥灰岩, 向上夹泥灰岩透镜体, 顶部几乎全部为白云岩, 表现为向上变浅的序列(图 3-N; 3-O), 水平层理、波状层理、小型斜层理等发育(图 4-7), 为潮间带沉积。

湘中地区(II)岩性变化较小, 为炭质页岩、炭硅质页岩相, 沉积构造主要为水平纹层, 黄铁矿呈团块状、结核状、纹层状分布, 产海绵骨针, 属边缘海还原环境。

湘南地区(III)为灰黑色薄-中层板岩、砂质板岩夹灰绿色中-厚层状石英杂砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩。层序底部发育一层砾岩, 向上粒度变细, 板岩增多, 局部杂砂岩内发育递变层理, 泥质粉砂岩、粉砂质板岩内发育小型砂纹层理、水平层理、粉砂质条带, 常见有 ade、bde、ce、cde、de 等鲍马序列组合, 为深海相沉积环境。

6) 层序 6(DS6):

层序 6 由清虚洞组上段的灰岩、白云岩构成(龙王庙阶上部), 发育 TST、CS、HST 3 部分, 主要发育 C、D、E、F、L、N、O 型等副层序(图 3), II 型层序界面。

在湘西北地区(I), 显示了灰岩向白云岩过渡的趋势(图 3-O)。在石门分区(II), 底部见鲕粒灰岩和瘤状灰岩层, 向上由粉晶灰岩夹细晶白云岩、细晶含灰质白云岩、白云质灰岩组成, 发育交错层理, 波

状层理, 偶夹薄层亮晶颗粒灰岩、鲕粒灰岩, 白云岩具韵律互层, 产三叶虫, 属潮下高能带向高能带变迁的相带。武陵山分区(12), TST 为中薄层泥灰岩夹极薄层泥灰岩、颗粒泥灰岩互层, 向上为薄层白云质灰岩(图 4-8; 4-9), 属潮间带下部; CS 段表现为 0.5 m 厚的极薄层黑色泥岩, 属潮下带沉积; HST 下部为中厚层潮下带白云岩或白云质灰岩, 向上白云质灰岩快速变薄, 层数变少, 上部为潮坪相极薄层白云岩夹薄层白云质灰岩, 顶部的白云质灰岩中发育渗流孔洞, 与中寒武统敖溪组以其底部发育的约 0.2 m 厚的黑色页岩为界呈整合接触(图 4-10), 属于潮下带灰岩沉积。

湘中地区(II)仍处于陆坡深水还原环境, 为小烟溪组顶部的炭泥质页岩夹薄层硅质岩和粉砂质泥板岩, 局部夹似层状和透镜状泥灰岩。

湘南地区(III)为灰黑色薄-中层板岩、砂质板岩夹灰绿色中-厚层状石英杂砂岩、泥质粉砂岩, 浅变质石英粉砂岩与板岩韵律互层, 板岩所占比例增多, 顶部普遍发育薄层黑色炭质板岩, 与上部的大套厚层块状石英杂砂岩接触, 构成香楠组顶部和上部中寒武统茶园头组(ϵ_x)的界面, 亦即层序 6 的层序顶界面, 仍为深海沉积环境。

3 岩石地球化学特征

为了进一步研究本区早寒武世的古地理环境, 示踪岩石来源和探讨大地构造属性, 笔者对杨家坪剖面各组分别选取了 5~9 个的岩石样品进行了系统的岩石地球化学研究。

3.1 稀土元素

REE 作为最不易溶解的微量元素, 在低变质作用、风化作用和热液蚀变作用中能保持相对的不活泼性^[2]。因此, 对于碎屑岩来说, REE 含量主要取决于其物源区的岩石成分, 可以反映物源区的地球化学特征; 而在化学沉积岩中其含量则最能够反映沉积环境中海水的成分。

研究区样品的稀土元素分析由国家地质实验测试中心完成, 采用 ICP-MS 法分析测定(表 2)。

结合稀土元素北美页岩标准化配分图(图 5)可以看出, 不同岩性及层位稀土元素的富集程度不同, 下部牛蹄塘组的黑色岩系的 \sum REE 明显较高, 向上呈减少趋势, 清虚洞组碳酸盐岩显示了较低的 \sum REE, 但分布形式基本一致, 曲线近于水平。其中

表 2 湖南杨家坪下寒武统岩石样品稀土元素分析结果(10⁻⁶)
Table 2 Analytical results of the REE of Lower Cambrian strata in Yangjiaping, Hunan Province

样品号	09046-0	09046-1	09047-0	09047-1	09047-2	09049-1	09049-2	09049-3	09050-1	09050-2	09050-3	09050-4	09050-5	09050-6	09051-1	09051-2	09051-3	09051-4	09051-5
La	2.40	3.03	32.20	35.70	44.30	37.50	18.30	19.30	11.30	7.38	12.60	50.20	37.80	37.50	5.00	7.31	3.11	2.25	1.00
Ce	2.79	6.07	66.10	63.50	41.80	65.90	34.30	34.40	21.20	13.40	22.00	89.20	71.50	72.60	9.52	12.10	7.51	4.00	1.94
Pr	0.55	0.67	8.70	7.03	10.10	7.30	4.13	4.14	2.57	1.60	2.70	10.10	7.57	8.06	1.07	1.24	0.89	0.47	0.22
Nd	2.41	2.55	32.80	24.00	43.80	25.10	15.50	15.40	9.27	5.92	10.20	36.00	26.00	29.70	3.73	4.28	3.47	1.71	0.82
Sm	0.47	0.48	6.47	4.18	9.15	4.42	3.42	3.45	1.87	1.10	2.36	6.38	4.20	5.50	0.73	0.80	0.80	0.35	0.14
Eu	0.16	0.16	1.14	0.84	2.56	0.76	0.79	0.73	0.35	0.23	0.50	1.15	0.82	1.08	0.15	0.16	0.14	0.07	0.05
Gd	0.78	0.58	5.28	4.07	14.60	4.13	3.79	3.79	1.90	1.19	2.74	5.95	4.44	5.22	0.80	0.84	0.85	0.32	0.20
Tb	0.10	0.08	0.81	0.65	2.13	0.69	0.58	0.60	0.28	0.18	0.45	0.91	0.69	0.77	0.11	0.12	0.15	0.05	<0.05
Dy	0.62	0.47	4.29	3.81	14.20	3.85	3.39	3.43	1.60	0.95	2.62	5.14	3.88	4.18	0.59	0.63	0.83	0.30	0.17
Ho	0.14	0.10	0.88	0.78	3.33	0.77	0.71	0.70	0.34	0.20	0.56	1.04	0.84	0.81	0.12	0.12	0.16	0.06	<0.05
Er	0.43	0.23	2.62	2.37	9.78	2.29	1.99	1.93	0.86	0.57	1.55	3.06	2.44	2.50	0.36	0.34	0.49	0.17	0.07
Tm	0.05	<0.05	0.38	0.35	1.26	0.32	0.27	0.29	0.14	0.09	0.21	0.43	0.37	0.38	0.05	<0.05	0.07	<0.05	<0.05
Yb	0.31	0.19	2.43	2.18	7.49	2.26	1.73	1.83	0.83	0.50	1.49	2.78	2.39	2.40	0.35	0.26	0.49	0.14	0.08
Lu	0.38	<0.05	0.34	1.07	0.33	0.31	0.26	0.25	0.12	0.07	0.20	0.41	0.35	0.38	0.05	<0.05	0.08	<0.05	<0.05
Y	6.18	2.47	25.50	21.70	161.00	22.70	20.90	20.40	9.85	6.03	16.30	30.00	22.90	23.30	3.56	4.00	4.34	1.83	0.82
Σ REE	11.59	14.61	164.44	150.53	204.83	155.60	89.16	90.24	52.63	33.38	60.18	212.75	163.29	171.08	22.63	28.20	19.04	9.89	4.69
LREE	8.78	12.96	147.41	135.25	151.71	140.98	76.44	77.42	46.56	29.63	50.36	193.03	147.89	154.44	20.20	25.89	15.92	8.85	4.17
HREE	2.81	1.65	17.03	15.28	53.12	14.62	12.72	12.82	6.07	3.75	9.82	19.72	15.40	16.64	2.43	2.31	3.12	1.04	0.52
LREE/HREE	3.12	7.85	8.66	8.85	2.86	9.64	6.01	6.04	7.67	7.90	5.13	9.79	9.60	9.28	8.31	11.21	5.10	8.51	8.02
LaN/YbN	0.73	1.50	1.25	1.54	0.56	1.56	1.00	0.99	1.28	1.39	0.80	1.70	1.49	1.47	1.35	2.65	0.60	1.52	1.18
δ Eu	1.24	1.42	0.92	0.96	1.04	0.83	1.03	0.95	0.87	0.94	0.92	0.88	0.89	0.95	0.92	0.92	0.80	0.98	1.40
δ Ce	0.58	1.01	0.94	0.95	0.47	0.94	0.91	0.93	0.83	0.93	0.89	0.99	1.00	0.99	0.98	0.95	1.07	0.92	0.98

牛蹄塘组上部代表最大海侵期凝缩段的 09047-1 样品,显示了高 \sum REE 和明显的 δ Ce 和 δ Eu 负异常,为海相热水沉积的特征^[33]。

根据 Murray^[34-35]等提出的以 δ Ce 来判断大地构造环境的方案:①沉积页岩 δ Ce 极小(约 0.29)代表扩张洋中脊区(400 km 以内);② δ Ce 为中等值(约 0.55)的为洋盆区;③大陆边缘区 δ Ce 比较大(0.85~1.30)。可以看出本区显示了弱异常的 δ Ce 值:除牛蹄塘顶部的 0.46 和 0.79 之外,均在 0.88~1.05 之间,应主要属大陆边缘相。而牛蹄塘组顶部黑色岩系形成于下寒武统二级海平面的最大海泛时期即筇竹寺期晚期,沉积环境较深,这与前面所述的沉积环境的分析相吻合。

3.2 同位素地球化学特征

近年来碳酸盐岩中的碳氧同位素的组成特点已成为地层划分和沉积环境分析的重要手段^[36-40],海相碳酸盐岩的 $\delta^{13}C$ 与海平面升降变化关系密切^[41]。笔者在前人研究成果的基础上,对杨家坪下寒武统不同层位进行了样品的选取。取新鲜质纯的灰岩或白云岩和少量泥质页岩用细钻取样。样品由国家地质实验测试中心进行了微量元素测定后,选取 Mn/Sr 比值小于 10 的合格样品由中国地质科学院矿产资源研究所同位素实验室 MAT261 固体质谱仪进行 C、O 同位素的测定,结合 $\delta^{18}O$ 值进行化学地层的研究。

根据表 3 中的部分数据及岩石地层柱状图标绘了 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{18}O$ 含量分布曲线图(图 6),主要可以看出杷榔组和清虚洞组的 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{18}O$ 含量分布特征,因牛蹄塘组岩性主要为黑色页岩系,而杷榔组

下段也主要为泥页岩,受源区影响较大,不适合进行碳-氧同位素化学地层研究,故主要采取了杷榔组上段和清虚洞组样品进行分析。

从表 3 和图 6 可以看出,杷榔组上段 $\delta^{13}C$ 含量在-2.4‰~0.4‰, $\delta^{18}O$ 在-9.6~-13.2, Mn/Sr 除样品 09050-2 外均在 0.32~6.89, 故其 $\delta^{13}C$ 基本均可代表原始海洋的碳同位素含量^[42]。总体呈现出先增大后变小的趋势,在杷榔组顶部达到最小值,很好地响应了层序 4 的沉积特征。其早期处于海侵期,海平面上升,随着古陆面积减小,带入海洋的有机碳数量减少,与海水进行同位素交换的物质以重碳同位素为主, $\delta^{13}C$ 值增加;后来的海平面下降期 $\delta^{13}C$ 值则减少,到杷榔组顶部达到最小,与清虚洞组的界面亦即层序 4 和层序 5 层序界面处 $\delta^{13}C$ 突然的增多显示了 SB II 的沉积界面。清虚洞组下段, $\delta^{13}C$ 组成在-1.3~-0.4‰, 且 $\delta^{18}O$ 在-5.3~-9.2, Mn/Sr 比值为 0.83~4.5, 均为以 $\delta^{13}C$ 进行化学地层研究的合格样品,具有代表意义。其总体趋势依然可以看出先减小后增大而后又减小的两次旋回对应了清虚洞组的 2 个三级层序。

另外,根据 Keith 和 Weber(1964)提出的经验公式^[43-44]:

$$Z=2.048(\delta^{13}C+50)+0.498(\delta^{18}O+50)$$

计算出古盐度指数 Z 值(PDB 标准),除 09050-4、09050-5、09050-6 三个样品外,其余均在高于 120 的海相灰岩区(表 3),而其碳-氧同位素分布除 09046-1、09050-4、09050-5 外均落入含膏盐等潟湖成岩区(图 7),从而进一步说明了当时的沉积环境由深海沉积环境向盐度较高的浅海相沉积环境变化,也验

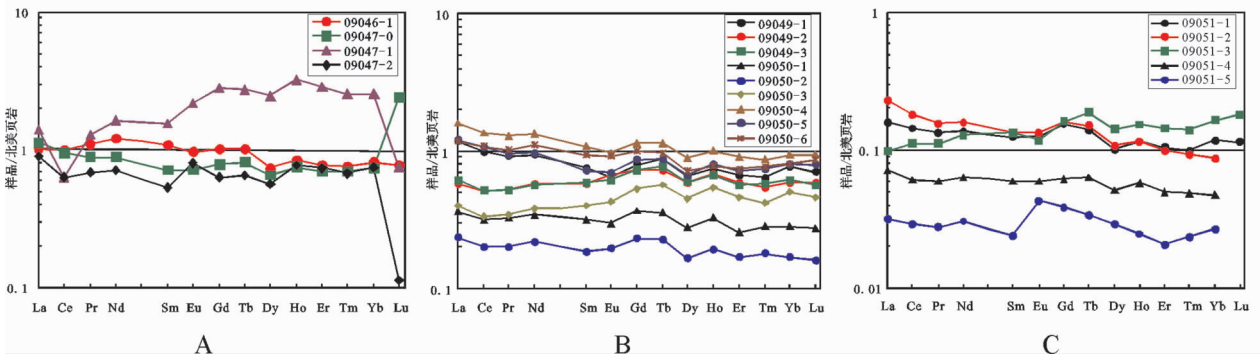


图 5 湖南杨家坪下寒武统沉积岩稀土元素北美页岩标准化配分图

A: 牛蹄塘组; B: 杷榔组; C: 清虚洞组

Fig.5 Chondrite-normalized REE patterns of Lower Cambrian sedimentary rocks in Yangjiaping, Hunan Province

A: Niututang Formation; B: Palang Formation; C: Qingxudong Formation

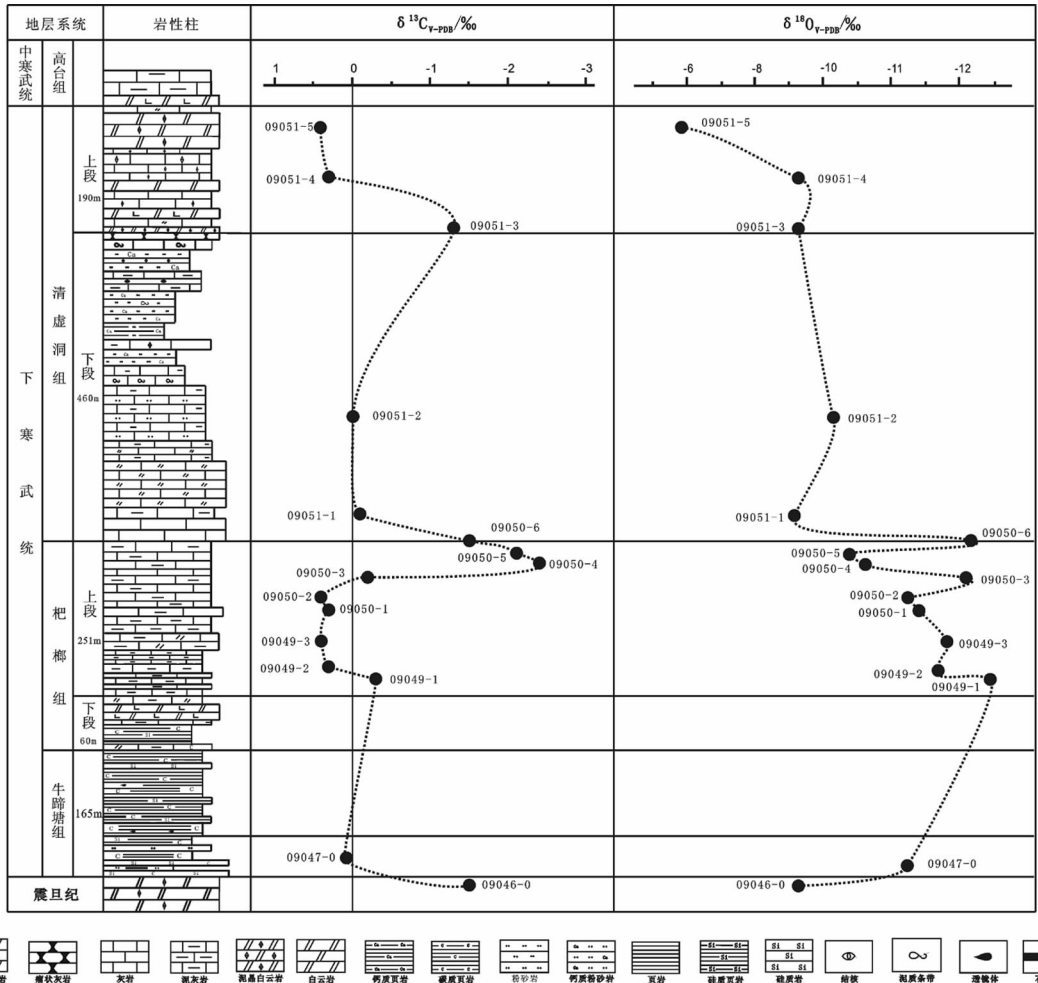


图 6 湖南杨家坪下寒武统 $\delta^{13}\text{C}-\delta^{18}\text{O}$ 同位素组成分布曲线

Fig.6 Characteristic curve of $\delta^{13}\text{C}-\delta^{18}\text{O}$ isotopes in Lower Cambrian strata of Yangjiaping, Hunan Province

证了结果的可靠性。

4 层序地层格架、古环境演化特征及其对成矿作用的影响

4.1 层序地层格架

在上述层序地层划分原则和层序界面识别标志研究的基础上，将湖南下寒武统划分为 6 个三级层序。根据每个地层分区选取一个有代表性的层序剖面进行区内不同相带间层序对比研究，进而建立起本区下寒武统层序地层格架(图 8)。

通过等时层序地层格架可以看出，湖南省早寒武世经历了深海盆地-滞留海盆-盆地边缘-深海陆棚边缘-台缘斜坡-碳酸盐岩台地的发展过程。总体的变化趋势是:纵向上自下而上海水不断变浅,盐度不断升高;横向上由 NS 到 SE,沉积环境总体加深,

沉积厚度先是逐渐变薄,至湘南地区大幅度增厚。研究区典型剖面的层序地层特征,反映了本区早寒武世海平面变化特征,6 个三级层序对应早寒武世 6 次三级海平面变化,共同组成了一个从海侵到海退的二级层序,时限约 32 Ma。

4.2 古环境演化

早寒武世初期(梅树村期、筇竹寺期)华南泛大陆解体,导致扬子陆块和华夏陆块处于拉张裂谷阶段,构造沉降加剧,相对海平面迅速升高,可容空间迅速增大,加之受到早寒武世早期大洋缺氧事件的影响,湖南省沉积了大范围的黑色岩系,即主要由黑色页岩、硅质页岩、硅质岩、粉砂岩、石煤、磷块岩、重晶石岩等组成的岩层,以高炭质含量及含有大量黄铁矿、磷质结核、重晶石等沉积为特征。该套黑色岩系地层在扬子陆块广泛发育,甚至在全球具有很好

表 3 湖南杨家坪下寒武统 C、O 同位素测量结果
 Table 3 Carbon and Oxygen isotopes of Lower Cambrian strata in Yangjiaping area, Hunan Province

层位	样品号	样品名称	¹³ C _{V-PDB} ‰	¹⁸ O _{V-PDB} ‰	Mn/Sr	Mn/μg·g ⁻¹	Sr/μg·g ⁻¹	Z
Є ₁ p	09051-5	灰岩	0.4	-5.3	0.72	77.46	108	125.48
	09051-4	白云岩	0.3	-8.3	0.49	154.93	317	123.78
	09051-3	白云岩	-1.3	-8.3	1.20	154.93	129	120.50
	09051-2	灰岩	0	-9.2	0.38	77.46	204	122.72
	09051-1	灰岩	-0.1	-8.2	0.22	77.46	355	123.01
	09050-6	灰岩	-1.5	-12.7	5.13	774.65	151	117.90
Є ₁ p	09050-5	灰岩	-2.1	-9.6	4.41	232.39	52.7	118.22
	09050-4	灰岩	-2.4	-10	3.10	464.79	150	117.40
	09050-3	灰岩	-0.2	-12.6	0.26	309.86	1205	120.62
	09050-2	灰岩	0.4	-11.1	0.07	77.46	1164	122.59
	09050-1	灰岩	0.3	-11.4	0.14	154.93	1082	122.24
	09049-3	灰岩	0.4	-12.1	0.41	464.79	1133	122.09
	09049-2	灰岩	0.3	-12	0.45	464.79	1041	121.94
	09049-1	灰岩	-0.3	-13.2	0.76	309.86	409	120.11
Є ₁ m	09047-0	灰岩	0.1	-11	1.66	387.32	233	122.03
	09046-0	泥岩	-1.5	-8.3	3.48	232.39	66.8	120.09

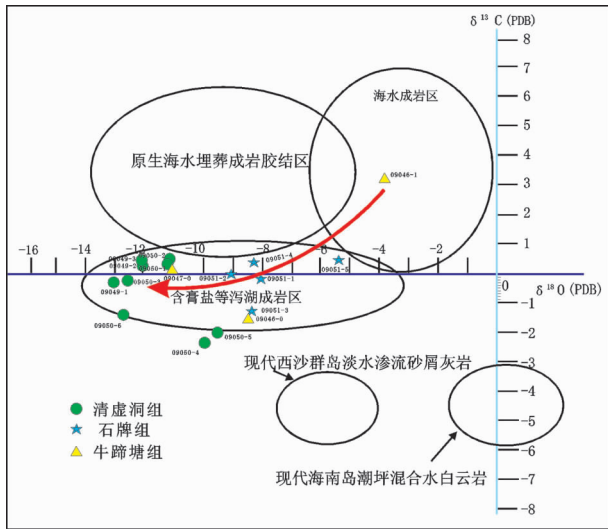


图 7 湖南杨家坪下寒武统地层碳-氧同位素分布
 Fig.7 δ¹³C-δ¹⁸O isotopic diagram of Lower Cambrian strata in Yangjiaping, Hunan Province

的可对比性^[45-46],同时也是重要的多金属、非金属和油气资源的富集层。筇竹寺期,达到二级层序的最大海泛期,形成三级层序 DS2 的黑色页岩沉积序列,代表了中国南方显生宙以来的最大的一次海侵,也响应了全球海平面的上升,形成 NW 向 SE 浅海陆棚相-深海陆棚相-深海滞留盆地相-边缘海槽相沉积序列和古地理格局^[47-48](图 9-A)。

沧浪铺期早期至龙王庙期,全球海平面仍处于

上升期,但扬子区由于受到“兴凯运动”的影响,扬子陆块有所抬升,相对海平面下降,对应了本区二级层序的海退期。纵向上,沉积地层呈现总体向上变浅的趋势,湘西北地区为由陆源碎屑沉积相向碳酸盐岩台地相过渡,龙王庙期逐渐抬升为碳酸盐岩台地;湘中地区主要为斜坡相的泥页岩沉积,但总体明显表现出向上变浅的沉积序列,炭质含量减少,钙泥质含量增多。横向上,全区呈现出明显四分的古地理格局。图 9-B 为龙王庙早期(DS5)的湖南省岩相古地理图,在该时期由碳酸盐岩台地相-台地边缘相-边缘海相-深海相由浅到深的稳定沉积^[47-48]。

需要提出的是在湘中地区东部即长沙—湘潭—衡阳一线以东地区,受北东向江绍断裂的影响,形成江南古陆的隆升^[4,47],而缺失下寒武统沉积;中部溁浦—涟源一带相对较薄的沉积地层,以及局部地区下寒武统上部出露碳酸盐岩等沉积特征,可能指示了该区中部的带状水下隆起环境,形成湘中地区由 S 向 N 拗-隆-拗的构造格局,由此增强了湘中地区两侧分区的滞留海盆和缺氧环境。而位于华夏初始洋盆的湘南地区早期接受扬子陆块和华夏陆块双重物源,底部呈现泥板岩和砂岩互层的韵律层,中晚期来自华夏陆块的陆源粗碎屑物质增多,加之水体频繁升降,形成一套厚层的泥板岩-杂砂岩互层的复理石建造,处于深海-边缘海槽环境。另外,根据地球化学分析数据:稀土元素的富集程度变化和

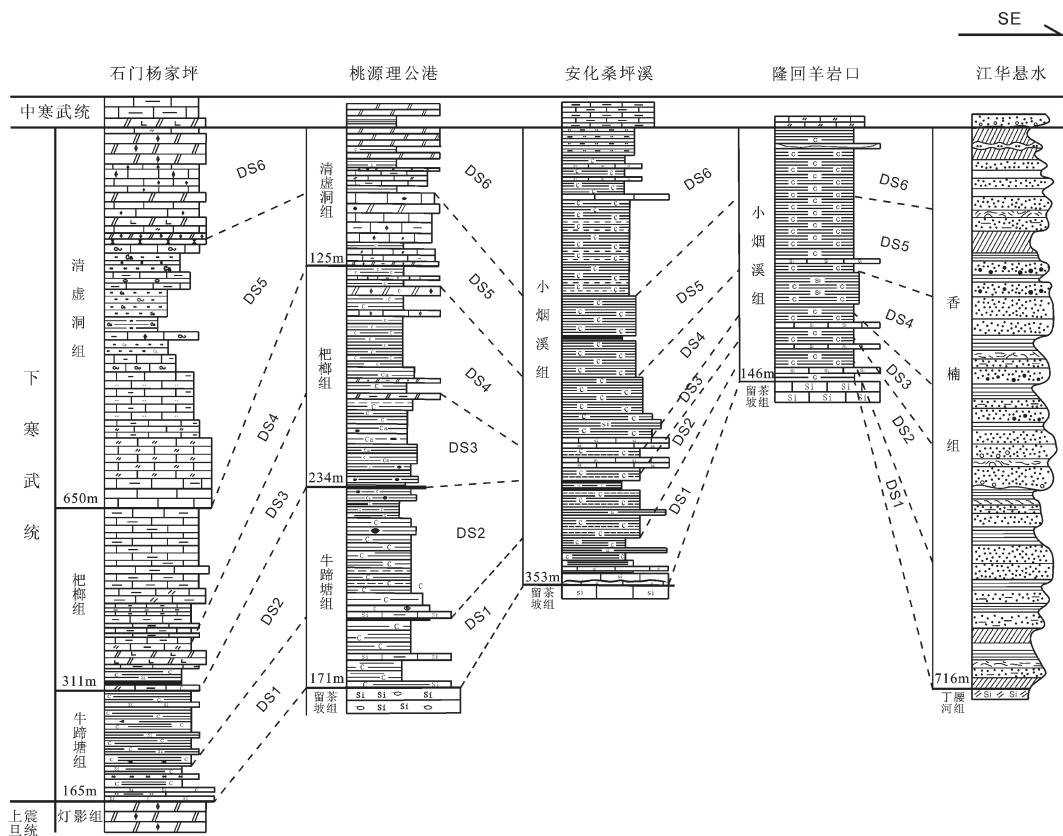


图 8 湖南省下寒武统层序地层格架对比图(图例见图 2、图 3)
Fig.8 Sequence stratigraphy column correlation of Lower Cambrian strata in Hunan

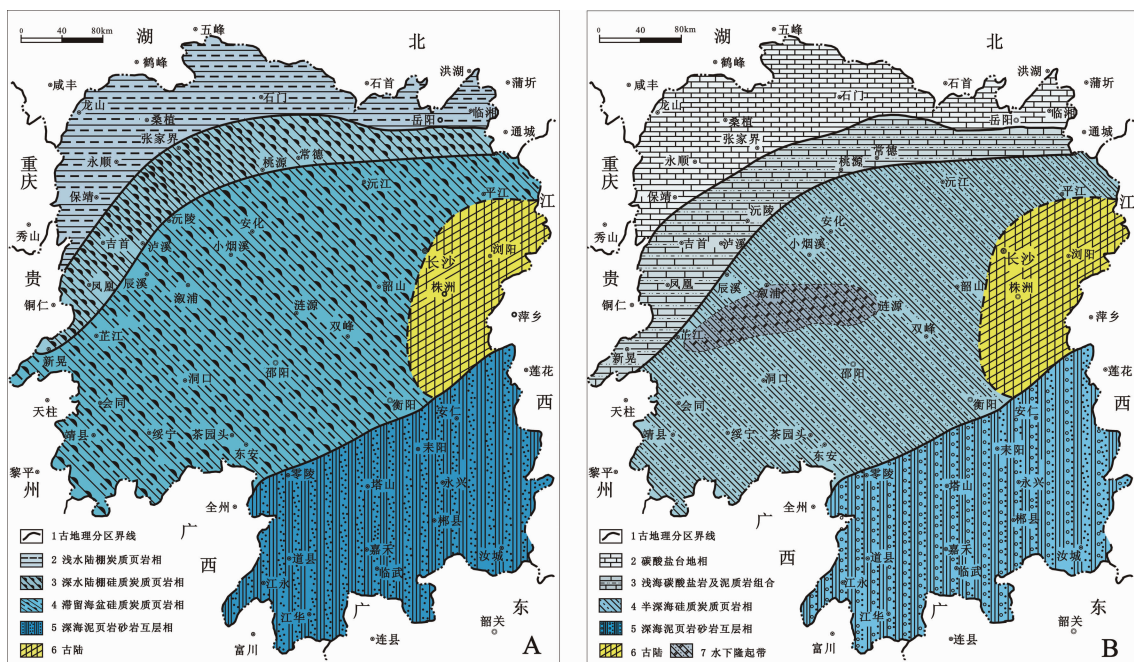


图 9 湖南下寒武统三级层序 DS2(A)和 DS5(B)形成时期岩相古地理简图
Fig.9 Lithofacies palaeogeography of early Cambrian 3rd-order sequence DS2(A)and DS5(B) in Hunan

δCe 异常、 δEu 异常以及 LREE/HREE 的变化较好地响应了层序特征和海平面变化趋势;碳-氧同位素在杷榔组上段和清虚洞组的变化趋势,总体反映了该地层对应的 3 个三级层序,并显示了石门杨家坪地区当时盐度较高的海相沉积环境。

4.3 成矿特征

湖南下寒武统的沉积矿产主要有磷块岩、铅锌矿、油气、石煤、多金属矿产及稀有、稀土元素等。由于受构造、古地理环境、层序地层^[49]等因素的控制,不同沉积建造组成的沉积相区其矿产也各有特点。

层序 1 和层序 2 在湘西北地区和湘中地区以硅-泥质建造为主,其广泛分布的黑色岩系是良好的烃源岩和最重要的赋矿层,主要形成于早寒武世早期最大海侵期的深水封闭滞流环境,微量元素分析显示,其 V_2O_5 含量最高可达 0.74%, BaSO_4 可达 0.88%, P_2O_5 可达 5.075%,丰富的有机质和缺氧滞流而形成的还原环境,不仅是烃源岩形成的最佳条件,也有利于磷块岩、重晶石、及多元素富集层的形成。

层序 3 和层序 4 在湘西区为泥质-碳酸盐岩建造,湘中地区仍处于较深水陆坡环境,但是硅质含量减少,泥质建造为主,虽不适宜有机质的繁殖却是有有机质埋藏的有利条件,属于较好的储集层。

层序 5 和层序 6 在湘西北地区发育碳酸盐岩建造,层序 5 处于碳酸盐岩台地的高能环境,层序 6 台地变浅形成白云岩相,与下部的生烃层组成完整的生储盖序列,同时也是铅锌矿重要的控矿层;而湘中地区因泥质含量过高抑制了有机质的繁殖,成矿性较差。

5 结 论

(1)根据层序地层学研究,湖南下寒武统划分为 6 个三级层序对应 6 个有海进-海退旋回序列,共同组成一个从海侵到海退的二级层序,时限约 32 Ma,海侵发育在梅树村期和筲竹寺期,海退发育在沧浪铺期和龙王庙期,具有大区域性乃至全球性对比意义。

(2)本区早寒武世经历了深海盆地-滞留海盆-盆地边缘-深海陆棚边缘-台缘斜坡-碳酸盐岩台地的发展过程,为稳定大陆边缘沉积环境。其层序地层格架显示:①纵向上由下到上海水不断变浅,盐度不断升高;②横向上由北西向南东沉积环境总体加深,相对海平面变化规律明显;③由于江南古陆基底等构造背景的影响,本区下寒武统地层沉积厚度呈现

由北西向南东逐渐减薄又增厚的趋势;④湘南地区沉积的一套厚度很大的复理石组合与湘西北地区 and 湘中地区截然不同的岩性特征,也说明了其不同的沉积环境、区域构造背景和物源区。

(3)湘西北地区下寒武统自下而上组成一套完整的生储盖组合序列,具备良好的生油性,其清虚洞组高能环境的碳酸盐岩是重要的储集层,并含有重要的层控型铅锌矿;而湘西北地区和湘中地区的牛蹄塘组及其对应的小烟溪组下部(即层序 1 和层序 2)普遍发育的黑色岩系其有机碳丰度平均达 2.17%^[49],是优质烃源岩,而且是 Ni、Mo、PGE、REE、V、Au、Ag 等多种重要矿产的富集层。

致谢:本研究得到了湖南省地质调查院刘耀荣、孙海清、王先辉、刘伟、谭正修等诸位老师的全力支持和野外工作的协助,中国地质科学院地质研究所刘训研究员的悉心指导,以及中国地质大学(北京)王自强教授对地球化学数据分析中提出的宝贵意见,在此一并表示衷心的感谢!

参考文献(References):

- [1] 湖南省地质矿产局. 湖南省区域地质志 [M]. 北京:地质出版社, 1988:41-61.
Hunan Bureau of Geology and Mineral Resources, Regional Geology of Hunan Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988:41-61(in Chinese).
- [2] 项礼文,等. 中国的寒武纪 [M]. 北京:地质出版社, 1981:73-152.
Xiang Liwen, et al. Cambrian of China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1981:73-152(in Chinese).
- [3] 冯增昭,彭永民,金振奎,等. 中国南方寒武纪和奥陶纪岩相古地理 [M]. 北京:地质出版社, 2001:13-36.
Fwng Zengzhao, Peng Yongmin, Jin Zhenkui, et al. Lithofacies Paleogeography of the Cambrian and Ordovician in south China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2001:13-36 (in Chinese).
- [4] 蒲心纯,周浩达,王熙林,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, 1993:2-53, 103-160.
Pu Xinchun, Zhou Haoda, Wang Xilin, et al. Cambrian Lithofacies and Paleogeography and Mineralization of South China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993:2-53, 103-160 (in Chinese).
- [5] 梅冥相,张丛,张海,等. 上扬子区下寒武统的层序地层格架及其形成的古地理背景 [J]. 现代地质, 2006, 20(2):195-208.
Mei Mingxiang, Zhang Cong, Zhang Hai, et al. Sequence - Stratigraphic frameworks and their forming backgrounds of Paleogeography for the Lower Cambrian of the Upper - Yangtze region [J]. Geoscience, 2006, 20 (2): 195-208 (in Chinese with

- English abstract).
- [6] Vail P R, Mitchum R M, Thompson S, et al. Seismic stratigraphy and global changes of sea level; Part 3 and Part 4 [C] // Payton C E. Seismic stratigraphy applications to hydrocarbon exploration [J]. AAPG Memorior, 1977, 26: 63-98.
- [7] Vail P R, Mitchum R M, Todd J R G, et al. Seismic stratigraphy and global changes of sea level [C] // Payton C E (ed.). Seismic stratigraphy—application to hydrocarbon exploration [J]. AAPG, 1977, 26(1): 51-97.
- [8] Van Wagoner J C, Mitchum R M, Campion K M, et al. Sequence stratigraphy application to shelf sandstone reservoirs; outcrop to subsurface examples [J]. AAPG, 1992, 72(1): 11-16.
- [9] Tucker M E, et al. Carbonate diagenesis and sequence stratigraphy [J]. Sedimentology Review. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1993, 1: 51-72.
- [10] 梅冥相, 马永生, 邓军, 等. 滇黔桂盆地及其邻区石炭纪至二叠纪层序地层格架及三级海平面变化的全球对比 [J]. 中国地质, 2005, 3(1): 13-25.
- Mei Mingxiang, Ma Yongsheng, Deng Jun, et al. Carboniferous to Permian sequence stratigraphic framework of the Yunnan - Guizhou-Guangxi basin and its adjacent areas and global correlation of third-order sea-level change [J]. Geology in China, 2005, 32(1): 13-25 (in Chinese with English abstract).
- [11] 刘宝珺, 许效松. 中国南方岩相古地理图集 [M]. 北京: 科学出版社, 1994: 1-21.
- Liu Baojun, Xu Xiaosong. Atlas of Lithofacies Palaeogeography of South China [M]. Beijing: Science Press, 1994: 1-15.
- [12] 赵自强, 丁启秀, 等. 中南区区域地层 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1996: 29-62.
- Zhao Ziqiang, Ding Qixiu, et al. Regional Stratigraphy of Central-south China [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1996: 29-62.
- [13] 马永生, 陈洪德, 王国力, 等. 中国南方层序地层与古地理 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2009: 2-6.
- Ma Yongsheng, Chen Hongde, Wang Guoli, et al. Sequence Stratigraphy and Paleogeography of South China [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2009: 2-6.
- [14] 项礼文, 朱兆玲, 李善姬, 等. 中国地层典(寒武系) [M]. 北京: 地质出版社, 2000: 1-15.
- Xiang Liwen, Zhu Zhaoling, Li Shanji, et al. Stratigraphic Lexicon of China (Cambrian) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2000: 1-15.
- [15] 马丽芳, 乔秀夫, 闵隆瑞, 等. 中国地质图集 [M]. 北京: 地质出版社, 2002: 244-252.
- Ma Lifang, Qiao Xiufu, Min Longrui, et al. Geological Atlas of China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002: 244-252.
- [16] 彭善池. 华南寒武系年代地层系统的修订及相关问题 [J]. 地层学杂志, 2008, 32(3): 240-245.
- Peng Shanchi. Revision on Cambrian Chronostratigraphy of South China and related remarks [J]. Journal of Stratigraphy, 2008, 32(3): 240-245 (in Chinese with English abstract).
- [17] 彭善池. 华南新的寒武纪生物地层序列和年代地层系统 [J]. 科学通报, 2009, 54(18): 2691-2698.
- Peng Shanchi. The newly-developed Cambrian biostratigraphic succession and chronostratigraphic scheme of South China [J]. Chinese Sci. Bull., 2009, 54(18): 2691-2698 (in Chinese with English abstract).
- [18] 全国地层委员会. 中国区域年代地层(地质年代)表说明书 [M]. 北京: 地质出版社, 2002: 1-10.
- Introduction to China Regional Chronostratigraphic (Geo-chronologic) Scale [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002: 1-10.
- [19] 肖传桃, 吴健辉, 胡明毅, 等. 湘西北杨家坪寒武纪层序地层 [J]. 地层学杂志, 1998, 22(2): 94-101.
- Xiao Chuantao, Wu Jianhui, Hu Mingyi, et al. Cambrian sequence-stratigraphy in the Yangjiaping district of northwestern Hunan [J]. Journal of Stratigraphy, 1998, 22(2): 94-101 (in Chinese with English abstract).
- [20] 李忠雄, 王剑, 段太忠, 等. 湘西北慈利-大庸地区上震旦统-下寒武统沉积特征及层序地层划分 [J]. 沉积与特提斯地质, 2003, 23(4): 27-33.
- Li Zhongxiong, Wang Jian, Duan Taizhong, et al. Sequence stratigraphic division of the Upper Sinian - Lower Cambrian strata in the Cili-Dayong region, northwestern Hunan [J]. Chengdu: Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2003, 23(4): 27-33 (in Chinese with English abstract).
- [21] 梅冥相, 马永生, 邓军, 等. 上扬子区下古生界层序地层格架的初步研究 [J]. 现代地质, 2005, 19(4): 551-562.
- Mei Mingxiang, Ma Yongsheng, Deng Jun, et al. Sequence-stratigraphic framework for the Early Palaeozoic of the Upper-Yangtze region [J]. Geoscience, 2005, 19(4): 551-562 (in Chinese with English abstract).
- [22] 梅冥相, 马永生, 张海, 等. 上扬子区寒武系的层序地层格架——寒武纪生物多样性事件形成背景的思考 [J]. 地层学杂志, 2007, 31(1): 68-78.
- Mei Mingxiang, Ma Yongsheng, Zhang Hai, et al. Sequence-stratigraphic frameworks for the Cambrian of the Upper-Yangtze region: ponder on the sequence stratigraphic background of the Cambrian biological diversity events [J]. Journal of Stratigraphy, 2007, 31(1): 68-78 (in Chinese with English abstract).
- [23] 梅冥相, 周鹏, 张海. 上扬子区震旦系层序地层格架及其形成的古地理背景 [J]. 古地质量, 2006, 8(20): 219-231.
- Mei Mingxiang, Zhou Peng, Zhang Hai, et al. Sequence stratigraphic framework and its palaeogeographical background for the Sinian of Upper Yangtze region [J]. Journal of Palaeogeography, 2006, 8(20): 219-231 (in Chinese with English abstract).
- [24] 杨家驩, 徐世球, 肖诗宇, 等. 川黔湘交界寒武纪层序划分 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1995, 20(5): 485-495.
- Yang Jialu, Xu Shiqiu, Xiao Shiyu, et al. Sequence division of

- Cambrian system of the boundary area among Sichuan, Guizhou and Hunan provinces [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 1995, 20(5):485–495(in Chinese with English abstract).
- [25] 王鸿祯, 史晓颖, 王训练, 等. 中国层序地层研究 [M]. 广州: 广东科技出版社, 2000:99–142.
Wang Hongzhen, Shi Xiaoying, Wang Xunlian, et al. *Research on the Sequence Stratigraphy of China* [M]. Guangzhou: Guangdong Science & Technology Press, 2000:99–142.
- [26] 倪超, 纪友亮. 饶阳凹陷古近系沙河街组层序地层分析及沉积体系研究 [J]. *中国地质*, 2006, 33(1):193–200.
Ni Chao, Ji Youliang. Sequence stratigraphy and sedimentary system of the Paleogene Shahejie Formation in the Raoyang subbasin [J]. *Geology in China*, 2006, 33 (1):193–200 (in Chinese with English abstract).
- [27] 靳松, 朱筱敏, 钟大康. 扇三角洲高分辨率层序地层对比及砂体分布规律 [J]. *中国地质*, 2006, 33(1): 212–220.
Jin Song, Zhu Xiaomin, Zhong Dahang. High-resolution sequence stratigraphic correlation of fan deltas and distribution characteristics of sandbodies [J]. *Geology in China*, 2006, 33 (1):212–220 (in Chinese with English abstract).
- [28] 赵永刚, 陈景山, 雷卞军, 等. 川西邛崃县白马庙气田上侏罗统蓬莱镇组高分辨率层序地层分析 [J]. *中国地质*, 25, 32 (4):674–681.
Zhao Yonggang, Chen Jingshan, Lei Bianjun, et al. Analysis of high-resolution sequence stratigraphy of the Upper Jurassic Penglaizhen Formation in the Baimamiao gas field, Qionglai County, western sichuan [J]. *Geology in China*, 2005, 32(4): 674–681 (in Chinese with English abstract).
- [29] 梅冥相. 淹没不整合型碳酸盐三级旋回层序——兼论碳酸盐台地的“凝缩作用” [J]. *岩相古地理*, 1996, 16(6): 24–33.
Mei Mingxiang. The third-order carbonate cyclic sequence of drowned unconform type with discussions on “Condensation” of carbonate platforms [J]. *Sedimentary Facies and Palaeogeography*, 1996, 16(6): 24–33(in Chinese with English abstract).
- [30] 符颖, 韩林. 淹没不整合型层序——一种特殊的加深淹没 [J]. *海相油气地质*, 2007, 12(3):15–20.
Fu Ying, Han Lin. Drowned unconformity sequence: A special type of deepened submerge sequence interface [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2007, 12 (3):15–20 (in Chinese with English abstract).
- [31] 何幼斌, 高振中, 郭成贤, 等. 石门杨家坪下寒武统杷榔组三段内波和内潮汐沉积研究 [J]. *中国地质*, 2005, 32(1): 62–69.
He Youbin, Gao Zhenzhong, Guo Chengxian, et al. Study on internal-wave and internal-tide deposits of the third member of the Lower Cambrian Balang Formation at Yangjiaping, Shimen [J]. *Geology in China*, 2005, 32 (1):62–69 (in Chinese with English abstract).
- [32] Hugh R. Rollinson, et al. *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation* [M]. Pearson Education Limited. 1993: 106–125.
- [33] 徐晓春, 王文俊, 熊亚平, 等. 安徽石台早寒武世黑色岩系稀土元素地球化学特征及其地质意义 [J]. *岩石矿物学杂志*, 2009, 28(2):118–128.
Xu Xiaochun, Wang Junwen, Xiong Yaping, et al. REE geochemical characteristics of the Lower Cambrian black shale series in Shitai area, Anhui Province, and their geological significance [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2009, 28(2):118–128(in Chinese with English abstract).
- [34] Murray R W, Buchholtz ten Brink M R, Jones D L, et al. Rare earth elements as indicators of different marine depositional environment in chert and shale [J]. *Geology*, 1990, 18:268–271.
- [35] 张凡, 冯庆来, 张志斌, 等. 滇西南耿马地区弄巴剖面早石炭世硅质岩的地球化学特征及古地理意义 [J]. *地质通报*, 2003, 22(5):335–240.
Zhang Fan, Feng Qinglai, Zhang Zhibin, et al. Geochemical characteristics and paleogeographic significance of Early Carboniferous cherts at the Nongba section in the Gengma area, southwestern Yunnan [J]. *Geological Bulletin of China*, 2003, 22(5):335–240(in Chinese with English abstract).
- [36] Knoll A H, Walter M R. Latest Proterozoic stratigraphy and earth history [J]. *Nature*, 1992, 365:673–678.
- [37] Narbonne G M, Kaufman A J, Knoll A H. Integrated chemostratigraphy and biostratigraphy of the Windermere Supergroup, northwestern Canada: Implication for Neoproterozoic correlation and the early evolution of animals [J]. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 1994, 106:1281–1291.
- [38] Kaufman A J, Knoll A H. Neoproterozoic variation in the C-isotope composition of sea water: stratigraphic and biogeochemical implication [J]. *Precambrian Research*, 1995, 73(3–4):27–49.
- [39] Saylor B Z, Kaufman A J, Grotzinger J P, et al. A composite reference section for terminal Proterozoic strata of southern Namibia [J]. *J. Sediment. Res.*, 1998, 68(6):1223–1235.
- [40] 陈孝红, 李华芹, 陈立德, 等. 三峡地区震旦系碳酸盐岩碳氧同位素特征 [J]. *地质论评*, 2003, 49(1):66–73.
Chen Xiaohong, Li Huaqin, Chen Lide, et al. Carbon and oxygen isotope feature of the Sinian carbonate strata in the three Gorges region [J]. *Geological Review*, 2003, 49(1):66–73(in Chinese with English abstract).
- [41] 陈明, 万方, 蒲心纯. 深水浊积岩层序地层学中碳氧同位素的应用——以湖南大庸田坪剖面为例 [J]. *沉积与特提斯地质*, 2002, 22(4): 55–60.
Chen Ming, Wan Fang, Pu Xinchun. The application of carbon and oxygen isotopes to the sequence stratigraphy of deep-water turbidites: An example from the Tianping section in Dayong, Hunan [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2002, 22(4):55–60(in Chinese with English abstract).
- [42] 高林志, 王自强, 张传恒. 华北块体南缘上元古界氧碳同位素特征及其沉积环境意义 [J]. *古地理学报*, 2010, 12(6):639–654.
Gao Linzhi, Wang Ziqiang, Zhang Chuanheng. Geochemical

- character of C/O isotope of the Upper Proterozoic from southern margin of North China Block and implication for its depositional environment [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2010, 12(6):639-65 (in Chinese with English abstract).
- [43] Keith M L, Weber J N. Carbon and Oxygen isotopic composition of selected limestones and fossils [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1964, 28(10/11):1787-1816.
- [44] 张英志, 丁孝忠, 韩坤英, 等. 新疆库车坳陷晚白垩世沉积的地球化学特征及意义 [J]. *地球学报*, 2006, 27(2):129-134.
Zhang Yingzhi, Ding Xiaozhong, Han Kunying, et al. Geochemical characteristics and significance of Late Cretaceous deposits in the Kuqa Depression, Xinjiang [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2006, 27(2):129-134(in Chinese with English abstract).
- [45] 金之钧, 郑和荣, 蔡立国, 等. 中国前中生代海相烃源岩发育的构造-沉积条件 [J]. *沉积学报*, 2010, 28(5):875-883.
Jin Zhijun, Zheng Herong, Cai Liguang, et al. Tectonic-sedimentary conditions for development of Pre-Mesozoic marine source rocks in China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(5):875-883(in Chinese with English abstract).
- [46] 陈兰, 夏敏全, 万云, 等. 黑色页岩与大洋缺氧事件研究进展 [J]. *重庆科技学院学报(自然科学版)*, 2007, 9(4):1-8.
Chen Lan, Xia Minquan, Wan Yun, et al. Study on black shales and ocean anoxic events [J]. *Chongqing Institute of Technology Journal*, 2007, 9(4):1-8(in Chinese with English abstract).
- [47] 王鸿祯. 中国古地理图集 [M]. 北京:地质出版社, 1985:25-32.
Wang Hongzhen. *Atlas of the Paleogeography of China* [M]. Beijing:Geological Publishing House, 1985:25-32.
- [48] 李忠雄, 陆永潮, 王剑, 等. 中扬子地区晚震旦世-早寒武世沉积特征及岩相古地理 [J]. *古地理学报*, 2004, 6(2):151-162.
Li Zhongxiong, Lu Yongchao, Wang Jian, et al. Sedimentary characteristics and lithofacies palaeogeography of the Late Sinian and Early Cambrian in middle Yangtze region [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2004, 6 (2):151-162 (in Chinese with English abstract).
- [49] 樊爱萍, 杨仁超, 韩作振, 等. 惠民凹陷商河砂体储层特征与高分辨率层序地层控制 [J]. *中国地质*, 2009, 36(4):819-825.
Fan Aiping, Yang Renchao, Han Zuozhen, et al. Characteristics of Shanghe sandbody reservoirs and high-resolution sequence stratigraphic control in Huimin sag [J]. *Geology in China*, 2009, 36 (4):819-825(in Chinese with English abstract).

Characteristics of Sequence Stratigraphy and Palaeoenvironmental Evolution of Lower Cambrian strata in Hunan Province

PANG Wei-hua¹, DING Xiao-zhong¹, GAO Lin-zhi¹,
LIU Yan-xue¹, ZONG Wen-ming², LU Yong-guang¹

(1. *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;*

2. *Shenyang Institute of Geology and Mineral Resources, Shenyang 110032, Liaoning, China)*

Abstract: Lower Cambrian strata are well developed in Hunan. With the main sedimentary formations of black shale and carbonates in western and central Hunan and a suite of greywacke and carbonaceous slate with different thicknesses of rhythmic layers in southern area, the Lower Cambrian in the study area constitutes a second-order sequence, which can be further divided into six third-order sequences, corresponding to six orderly transgression-regression cycles. Impacted by palaeosedimentary environment, the depositional system tracts of the third-order sequences are formed by the vertical sequences of "CS + HST" and "TST (transgression system tract) + CS + HST", with the major sequence boundaries being II type sequence boundary and the drowning-type sequence boundary. The Lower Cambrian sedimentary formation resulted from continental slope-ramp in the northwestern and central parts of Hunan; from northwest to southeast, with the gradual deepening of the sedimentary environment, the total thickness of the Lower Cambrian sedimentary formation becomes thinned. In the southern Hunan, in contrast, a suite of greywacke and carbonaceous slate of abyssal facies was deposited and becomes thickened remarkably. The sequence-stratigraphic framework records the complex palaeoenvironment evolution of passive margin in the Early Cambrian in Hunan and also reflects the restriction of the metallogenesis from palaeoenvironment evolution.

Key words: Lower Cambrian; sequence stratigraphy; litho-geochemistry; Palaeoenvironment evolution2

About the first author: PANG Wei-hua, female, born in 1984, master candidate, engages in the study of regional geology and sedimentary geology; E-mail: weihuapang@yahoo.cn.

About the corresponding author: DING Xiao-zhong, male, born in 1963, senior researcher, supervisor of master candidates, engages in the study of regional geological mapping and analysis; E-mail: xiaozhongding@sina.com.