

华北龙山地区青白口系混积岩层序地层格架及发育模式

张 琴^{1,2},周 琛³,田寒云¹,朱筱敏^{1,2},吴新松^{1,2},宋泽平¹,王 凯¹

[1. 中国石油大学(北京) 地球科学学院,北京 102249; 2. 中国石油大学(北京) 油气资源与探测国家重点实验室,北京 102249;
3. 中国石化胜利油田分公司胜利采油厂,山东 东营 257000]

摘要:华北龙山地区新元古界出露完整,从下向上依次发育碎屑岩和碳酸盐岩,研究层序地层格架及其沉积相演化对恢复华北地区古地理环境具有重要指导意义。对龙山地区青白口系进行了系统的野外实测、岩石薄片鉴定、X射线衍射、微量元素等实验分析,在野外和室内岩性特征和沉积序列分析的基础上,结合区域构造运动背景,建立了等时层序地层格架,分析了各层序沉积相演化,并建立了层序地层发育模式。研究认为,依据不整合界面和岩性突变界面,将研究区青白口系自下而上依次划分为SQ₁(下马岭组)、SQ₂(长龙山组)和SQ₃(景儿峪组)3个三级层序,每个层序都发育了TST和HST两个体系域。SQ₁和SQ₂以碎屑岩沉积为主,对应陆源碎屑供给充分;SQ₃以混积岩沉积为主,对应相对清水沉积模式。根据岩性和沉积构造及其沉积序列等特征,SQ₁层序TST以浅海陆棚沉积为主,HST以潮下带砂坪和潮间带砂-泥混合坪为主;SQ₂层序TST以潮下带砂坪和潮道为主,HST以潮间带砂-泥混合坪和潮上带泥坪为主;SQ₃层序TST发育潮下带砂质浅滩和泥质灰坪,HST以潮间含云灰坪和潮上灰质和泥质云坪为主。在层序划分和沉积相演化基础上,建立了以潮坪-浅海陆棚相为主的陆源碎屑-碳酸盐岩混积型层序地层发育模式,具有开阔陆表海特征。

关键词:潮坪相;层序地层格架;层序地层发育模式;混积岩;青白口系;新元古界;龙山地区;华北

中图分类号:TE121.3 文献标识码:A

Sequence stratigraphic framework and model of mixed siliciclastic-carbonate rocks in the Qingbaikouan System, Longshan area, North China

Zhang Qin^{1,2}, Zhou Chen³, Tian Hanyun¹, Zhu Xiaomin^{1,2}, Wu Xinsong^{1,2}, Song Zeping¹, Wang Kai¹

[1. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 2. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 3. Shengli Oil Production Plant, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 257000, China]

Abstract: The Neoproterozoic in the Longshan area, North China, is well exposed. With clastic rocks and carbonates developed successively from bottom to top, the strata serves as an ideal subject for the study of sequence stratigraphic framework and sedimentary facies evolution, which has been considered significant to the paleogeographic reconstruction of North China. Field and lab analyses of lithologic characteristics and sedimentary sequences of the strata are combined with the regional tectonic movement to establish the isochronous sequence stratigraphic framework, analyze the sedimentary facies evolution, and build up the sequence stratigraphic development model. The results show that according to the unconformities and lithologically abrupt interfaces, the Neoproterozoic Qingbaikouan System can be divided into three third-order sequences from bottom to top: the SQ₁ (Xiamaling Formation), SQ₂ (Changlongshan Formation) and SQ₃ (Jingeryu Formation), each consisting of transgressive systems tract (TST) and highstand systems tract (HST). The SQ₁ and SQ₂ sequences are mainly composed of clastic rocks indicating sufficient input of terrigenous clastics. The SQ₃ sequence is dominated by mixed siliciclastic-carbonate rocks against a relatively clear water depositional setting. The lithological characteristics, sedimentary structures and superposing styles, all point to shallow sea shelf facies for the SQ₁-TST, and subtidal sand flat and intertidal mixed sand-mud flat for the SQ₁-HST. The SQ₂-

收稿日期:2022-04-07;修订日期:2022-05-01。

第一作者简介:张琴(1973—),女,副教授、硕士生导师,沉积学及储层地质学。E-mail: zhangqin@cup.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(41872134)。

TST mainly develops subtidal sand flats and tidal channels, while SQ_2 -HST mainly develops intertidal mixed sand-mud flats and supratidal mud flat. The SQ_3 -TST develops subtidal sandy shoal and argillaceous limestone flat, while SQ_3 -HST mainly develops intertidal dolomitic limestone flat and supratidal calcareous and argillaceous dolomite flat. Based on the understanding, a sequence stratigraphic development model of mixed siliciclastic-carbonate rocks dominated by tidal flat-shallow sea shelf facies is established, indicating the possibility of an open epicontinental sea with gentle slopes.

Key words: tidal flat facies, sequence stratigraphic framework, sequence stratigraphic development model, mixed siliciclastic-carbonate rock, Qingbaikouan System, Neoproterozoic, Longshan area, North China

引用格式:张琴,周琛,田寒云,等. 华北龙山地区青白口系混积岩层序地层格架及发育模式[J]. 石油与天然气地质,2022,43(4):792-803. DOI: 10.11743/ogg20220405.

Zhang Qin, Zhou Chen, Tian Hanyun, et al. Sequence stratigraphic framework and model of mixed siliciclastic-carbonate rocks in the Qingbaikouan System, Longshan area, North China[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(4): 792-803. DOI: 10.11743/ogg20220405.

陆源碎屑与碳酸盐组分在同一套岩层内混杂或由硅质碎屑岩与碳酸盐岩旋回性薄互层,再或侧向上彼此过渡都被认为是混和沉积或混积岩^[1-5]。混积岩等时地层格架的建立及其对沉积相的控制制约着有利储集相带和烃源岩的分布,在恢复古地理环境和古气候、进行区域或全球海平面变化对比等方面也有着广泛的应用^[4-13],因此近年来混积岩层序地层学和沉积相研究成为地质学研究的热点。华北地区青白口系自下而上划分为下马岭组、长龙山组和景儿峪组^[14-18],整体为碎屑岩过渡为由碳酸盐岩和碎屑岩构成的混积岩地层。铁岭组沉积后的“芹峪运动”使燕山地区上升成为剥蚀大陆,之后地壳开始下降,发生了海侵作用^[19-20]。下马岭期后发生“蔚县上升”,造成下马岭组与上覆长龙山组之间明显的沉积间断^[19,21]。现有学者根据定年认为原青白口系解体,将下马岭组归为待建系,青白口系只包含长龙山组和景儿峪组^[21-24],前期研究证明下马岭组与长龙山组的陆源碎屑物质具有一定的亲缘关系^[25],本次为了研究整体的层序和沉积相演化,仍把下马岭组放在青白口系一起研究。

华北地区青白口系一直以来是诸多专家学者研究的焦点^[14-17,20-25],早在20世纪70年代就已经有了对青白口系的沉积解释^[15],基本认为华北盆地青白口系是以浅海陆棚-潮坪为主的一套沉积体系^[14-17,26-32],但即使在这一共同的认识下,不同专家学者对青白口系的层序划分和沉积相类型及模式仍有不同看法。乔秀夫认为青白口系发育混合外力的沉积物^[15]。周洪瑞等将北京地区青白口系划分为3个层序类型,分别为河流型准层序、陆源碎屑和碳酸盐潮坪型准层序^[14]。不同学者对华北地区长龙山组的沉积相研究更是观点不一,如王立峰等认为怀来、蔚县地区的长龙山组主要发育滨浅海相碎屑岩^[16];周洪瑞等认为燕

山地区长龙山组为曲流河沉积和碎屑潮坪沉积组合^[14];陈小军等认为宣龙坳陷长龙山组主要发育滨浅海碎屑岩^[17]。因此长龙山组基本是一套陆源碎屑为主的沉积,但是在沉积相类型及其亚微相划分上仍存在差异。

华北龙山地区是青白口系长龙山组的命名剖面^[24],青白口系出露完整,自下而上下马岭组、长龙山组和景儿峪组界限明显,下马岭组和长龙山组以发育碎屑岩为主,而景儿峪组底部在局部地区发育钙质砂岩,大部分地区为泥质灰岩(已变质成为板岩)、云质灰岩和泥质云岩等岩性,因此垂向上属于纯碎屑岩到碎屑岩和碳酸盐岩同时发育的混积岩层序。龙山地区的层序地层划分和发育模式前人还未有过系统研究,层序格架内沉积相类型并未统一,且沉积相演化并不明确,进一步制约了华北地区新元古代岩相古地理条件的恢复。本文通过野外露头剖面、沉积序列及薄片分析鉴定,结合X射线衍射、扫描电镜和微量元素分析等室内分析化验,对青白口系岩石学特征进行分析,结合区域构造运动和不整合界面特征建立等时层序地层格架,进一步分析格架内沉积相标志,确定沉积相类型及演化,并结合区域构造背景进一步探讨层序地层发育模式,以期为华北地区中、新元古代古地理条件恢复提供科学依据。

1 样品采集及实验

本次样品主要采集于华北龙山地区,位于北京市昌平城区西北部,十三陵水库的西南部(图1)。研究区前寒武纪地处燕辽裂陷槽西北部^[18,23,29]。从太古宙至今发育了长城纪裂陷沉积、蔚县纪均衡负载沉积和青白口纪盖层沉积^[15,19,29](图1),之后进入了剥蚀期,

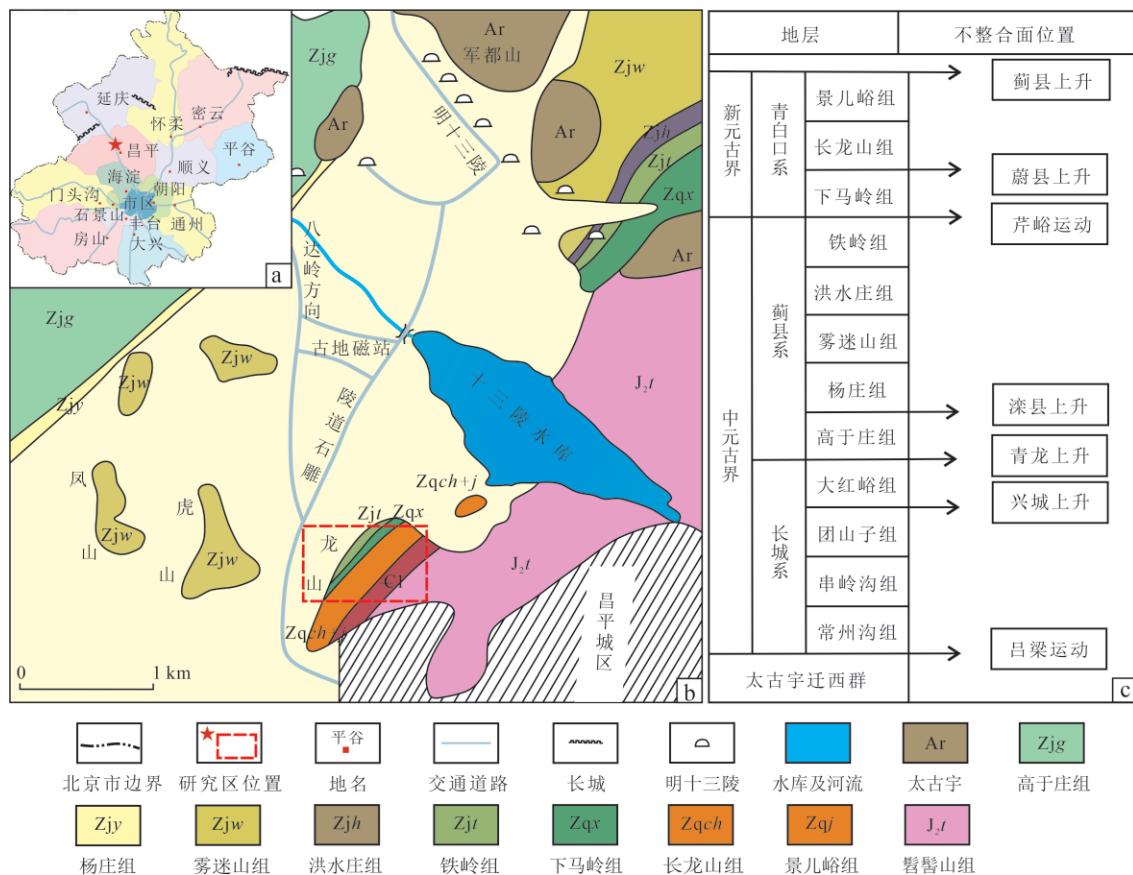


图1 华北龙山地区位置图及中、新元古界发育特征

Fig. 1 Location of the Longshan area in North China with characteristics of the Mesoproterozoic-Neoproterozoic strata illustrated

a. 研究区在北京市位置; b. 研究区在昌平区位置; c. 中、新元古界发育特征

直至后来发育了古生代—中生代沉积盖层,研究区主要沉积了寒武系和侏罗系。华北地区长城系、蓟县系、青白口系和寒武系均为碎屑岩和碳酸盐岩混合沉积组合^[14,20]。侏罗系主要发育火山碎屑岩和火山岩^[30]。青白口系下马岭组和长龙山组砂岩和页岩中海绿石和铁质非常发育^[25]。

通过前期资料收集和野外踏勘,对北京龙山地区青白口系进行了野外剖面观察、描述、测量和系统取样。其中野外踏勘近3 km,测量剖面共3条,照相共300余张,取样共90余块,主要进行了普通薄片鉴定(42块)、扫描电镜观察分析(15块)、X射线衍射矿物含量分析(10块)、电子探针分析(12块)及微量元素分析(REE+Y)(7块)等实验测试。岩性及矿物组成特征主要使用Nikon Eclipse LV100N POL偏光显微镜进行观察;应用D2 Phaser衍射仪,分别进行全岩和粘土矿物含量测试;通过日立SU8010高分辨率场发射扫描电镜鉴定分析了矿物组成及形态特征,使用电子探头(SE)成像技术进行形态表征,成分差异通过背散射探头(SSD)进行分析;使用JEOL JXA-8100型电子探针

显微分析仪进行元素组成测试分析。REE+Y分析主要通过微钻岩石抛光面,使用PE300Q型ICP-MS仪进行测试分析,测试精度高于10%。

2 岩石学特征

华北龙山地区青白口系剖面整体出露厚度较薄,但下马岭组、长龙山组和景儿峪组各组出露相对完整,依据前人研究和野外观察绘制了研究区青白口系层序地层和沉积相综合柱状图(图2)。青白口系的地层和岩石在华北板块具有代表性,而且研究区的青白口系剖面可以与华北其他地区的剖面进行对比^[14]。

2.1 下马岭组

下马岭组在研究区出露约150 m,根据岩性组合差异,并结合区域研究成果^[22,33],自下而上将下马岭组分为4段(图2)。下马岭一段(下一段)主要发育了炭质页岩、粉砂质页岩,颜色呈灰-灰黑色-灰绿色,同时夹有薄层粉砂岩和薄层泥灰岩透镜体。下二段主要发

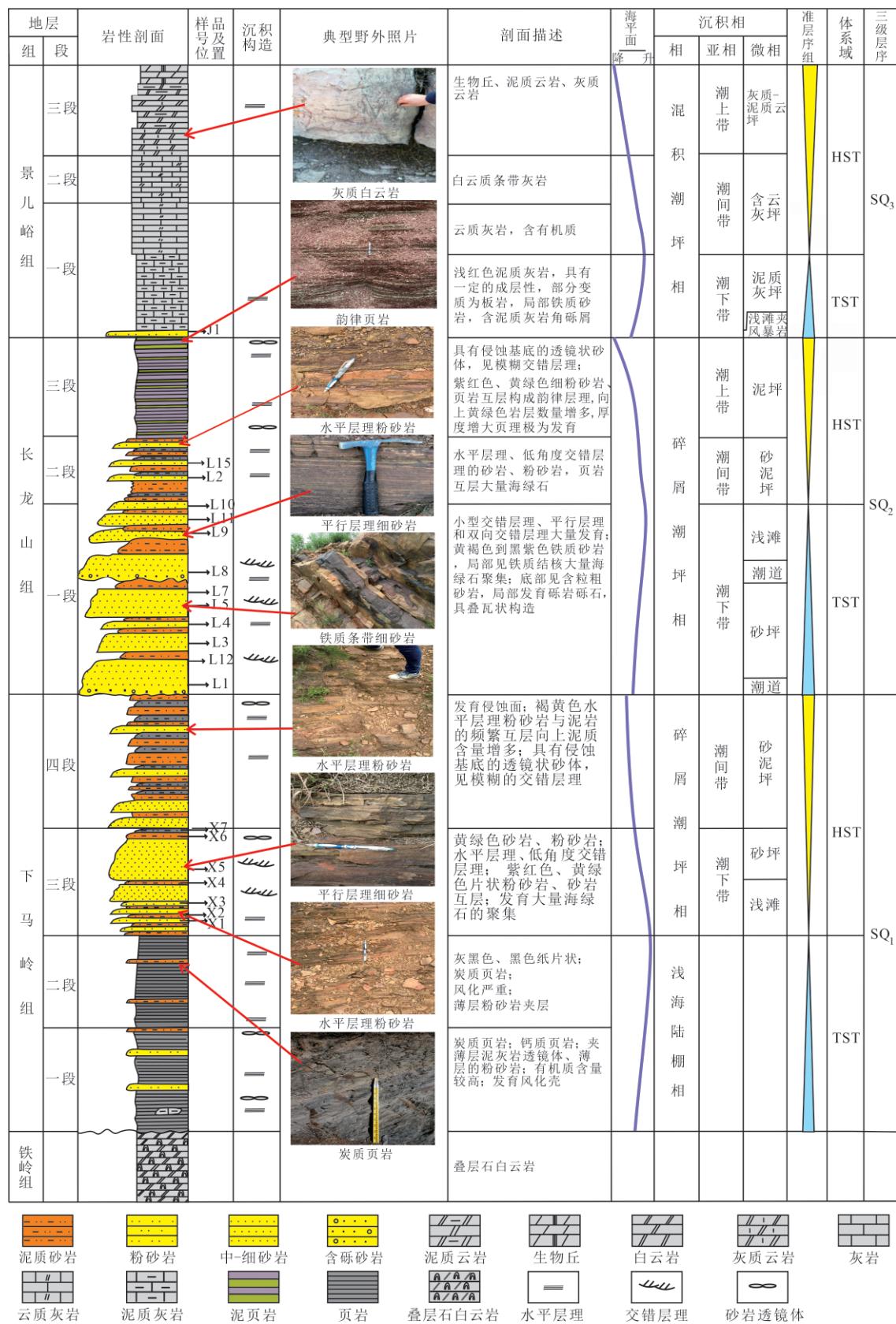


图2 华北龙山地区青白口系层序地层和沉积相综合柱状图

Fig. 2 Comprehensive column chart showing the sequence stratigraphy and sedimentary facies of the Qingbaikouan System, Longshan area, North China

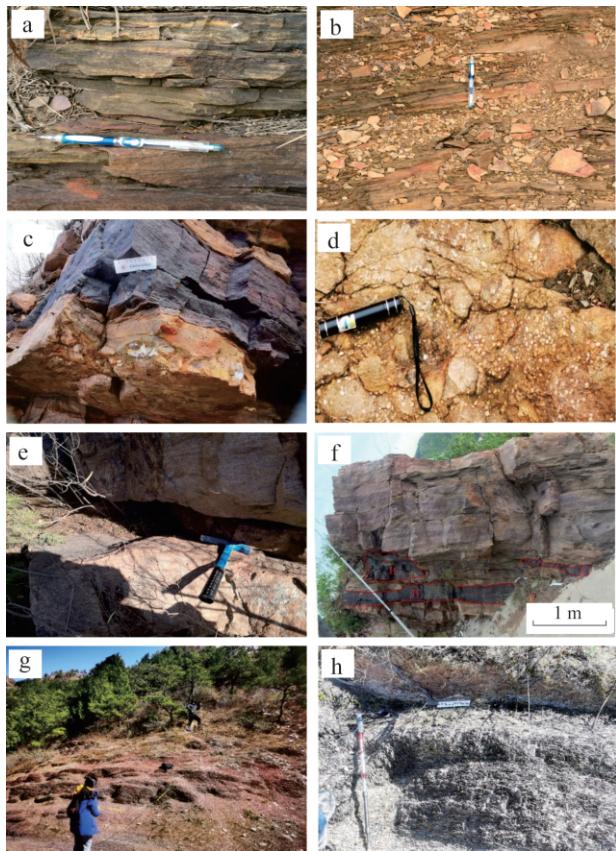


图3 华北龙山地区下马岭组和长龙山组岩性特征

Fig. 3 Lithology of the Xiamaling Formation and Changlongshan Formation, Longshan area, North China

a. 下三段平行层理细砂岩; b. 下三段水平层理粉砂岩; c. 长一段中部含砾砂岩剖面分布特征,砾石呈显叠瓦状构造; d. 长一段中部含砾砂岩中砾石在层面的分布特征; e. 长一段石英砂岩层面波痕构造; f. 长一段铁质条带和斑块; g. 长三段顶部紫红色和灰绿色韵律页岩; h. 长三段顶部灰黑色页岩

育炭质页岩,页理非常发育,呈纸片状,风化较严重,颜色较下一段变深,大都呈灰黑色,相较于下一段粉砂质页岩夹层增多,且发育灰白色薄板状硅质岩夹层。下三段下部为灰绿色薄层粉砂岩与泥质粉砂岩互层,发育水平层理(图3b);向上变为厚层细砂岩,以发育平行层理为主,有大量海绿石富集(图3a)。下四段下部为黄绿色薄层细砂岩、粉砂岩,可见水平层理与低角度交错层理,含有海绿石或铁质;向上颗粒变细,杂色粉砂岩与页岩频繁互层。

2.2 长龙山组

研究区长龙山组为一套以含砾砂岩、砂岩和泥页岩互层序列为特征的剖面,厚约120 m,根据岩性组合差异,并结合区域研究成果^[22,33],自下而上将长龙山组分为3段(图2)。长龙山组一段(长一段)底部为中-厚层铁质细砂岩为主;中部普遍发育一套不连续

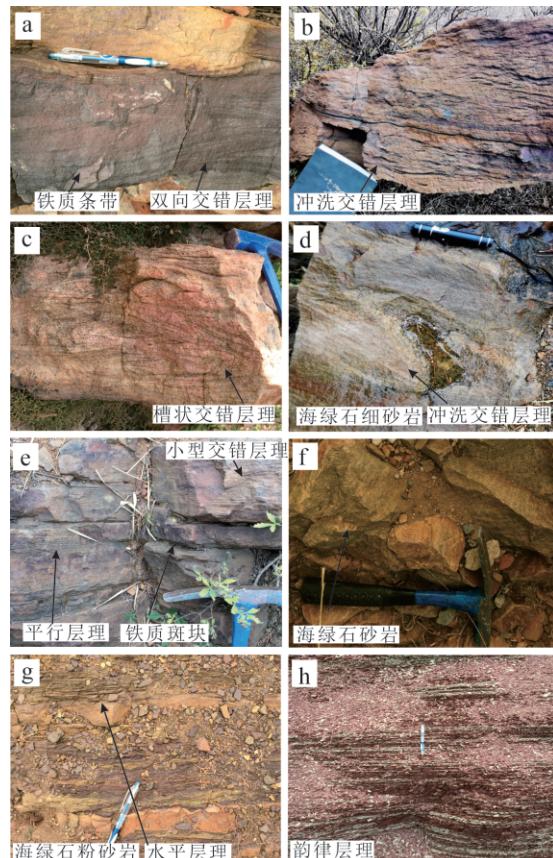


图4 华北龙山地区长龙山组沉积构造特征

Fig. 4 Sedimentary structure of the Changlongshan Formation, Longshan area, North China
a-f. 长一段; g. 长二段; h. 长三段

的含砾粗砂岩沉积(图3c,d),颜色呈偏浅的肉红色,长石含量较高,砾石大小在2~15 mm,分选差-中等,砾石磨圆度为次圆状-圆状,成分以花岗岩和石英为主,在剖面上大部分顺层排列,长轴平行于层面,呈叠瓦状构造(图3c),在层面上分布不均匀、无规律(图3d),向上变为含有双向交错层理、槽状交错层理和冲积交错层理的粗-中砂岩(图4a-c),层面上可见大型波痕构造(图3e),夹多套铁质条带或斑块(图3f,图4e);向上粒度逐渐变细,发育砂岩夹黄绿色页岩及粉砂岩,冲积交错层理、羽状交错层理、平行层理等构造发育(图4d,e),夹多套海绿石砂岩(图4d-f)。长二段发育灰白色薄层低角度交错层理石英砂岩夹黄绿色页岩及水平层理海绿石粉砂岩(图4g)。长二段与长一段相比泥岩与粉砂岩含量增多,石英砂岩含量减少,含海绿石的石英砂岩增多,分布稳定。长三段为一套具紫红-黄绿色韵律层理的页岩互层(图4h),局部为灰黑色页岩(图3h),自下而上钙质含量逐渐增多,黄绿色页岩层减少(图3g),由于页理发育,野外露头破碎严重(图4h)。

2.3 景儿峪组

研究区景儿峪组出露约94 m,根据岩性组合差异,并结合区域研究成果^[22,33],自下而上将景儿峪组分为3段(图2)。景一段底部局部发育有一薄层钙质石英砂岩,铁质含量高,局部在砂岩底部发现不规则漂砾,为泥质灰岩漂砾(图5a,b),大部分地区为一套灰紫色、夹灰绿色的薄层状灰质板岩(图5c),为泥质灰岩发生了初级变质而成,易破碎成小块状。之上过渡为薄层蛋青色含云灰岩(图5d),向上变为薄层状灰白色云质灰岩,较破碎。景二段为紫红色块状含泥云质灰岩(图5e)和灰色中厚层含白云质条带灰岩(图5f)。景三段为豹斑(云质)灰岩夹灰岩透镜体,上部灰岩和云岩中泥质含量较高,白云岩具准同生特征,在龙山中部北坡可见到两个由灰质云岩过渡到褐红色和灰绿色泥质云岩的旋回叠加,下部旋回泥岩厚度较大(图5f),显示潮上带陆源碎屑沉积少量出现。在龙山南坡见一生物丘(图5g),与上覆寒武系昌平组底部角砾岩(图5h)呈平行不整合接触。

3 层序地层格架的建立

层序是一套相对整一的、成因上有联系的、以不整合和可以与之对比的整合为界的地层^[34-35]。通过前期对野外露头剖面的观察和各组岩性序列旋回分析,并参考前人在华北地区元古界构造演化^[18-19,21,23]、层序地层^[14-15,22,29,33,36-37]和沉积相方面^[16,20,26-29,31-32]的研究成果,对研究区青白口系进行了层序边界的识别和层序划分,建立了等时层序地层格架(图2)。本文将龙山地区青白口系划分为3个三级层序,从下向上SQ₁、SQ₂和SQ₃层序分别对应于下马岭组、长龙山组和景儿峪组。

SQ₁底界,即下马岭组与下伏中元古界铁岭组之间的界面是由“芹峪运动”形成的区域性平行不整合(图1)。受“芹峪运动”的影响,下马岭组与下伏蓟县系铁岭组叠层石白云岩之间存在着明显的沉积间断^[15,18-19,21]。在研究区此沉积间断表现为高低不平的侵蚀面,在下伏铁岭组的顶部可见到古风化壳。龙山地区下马岭组与铁岭组之间的地层产状基本一致,呈典型的平行不整合接触关系^[21]。在铁岭组上部普遍发育有红土型风化壳和铁矿层^[19],具有明显的陆上风化侵蚀标志,在下马岭组底部局部发育底砾岩,在蓟县系剖面更为典型,说明在下马岭组沉积前,华北地区曾发生过大规模的抬升和风化剥蚀作用,龙山地区下部粗粒沉积并不明显,因而缺失低位体系域(LST),只发育了海侵体系域



图5 华北龙山地区景儿峪组岩性特征

Fig. 5 Lithology of the Jingeryu Formation, Longshan area, North China

a, b. 景儿峪组底部风暴岩; c. 景儿峪组底部板岩; d. 景一段上部淡青色含云灰岩; e. 景二段褐红色云质灰岩; f. 景三段灰质云岩-泥质云岩; g. 景儿峪组顶部生物丘; h. 寒武系底部昌平组底砾岩; i. 层面波痕构造; j. 云质条带灰岩

(TST)和高位体系域(HST)。下一段、下二段构成TST,由大套泥页岩和炭质页岩为主,夹薄层粉砂岩,且泥页岩颜色逐渐加深,组成向上水体加深的退积型准层序组;下三段、下四段构成HST,下三段为含海绿石砂岩和粉砂岩为主,向上下四段发育杂色粉砂岩及页岩的频繁互层,整体构成了水体逐渐变浅的进积式准层序组(图2)。TST和HST之间的最大海泛面为下二段顶部的炭质页岩顶面,向上变为HST的粉砂质泥岩(图2),其中HST顶部由于后期剥蚀而发育不全。

SQ₂底界,即长龙山组与下马岭组之间的界面为“蔚县上升”形成的区域平行不整合面^[15,18-19,21],在整个华北地区普遍见到下马岭组的较深水细粒碎屑岩突变

为长龙山组底部的相对浅水粗粒沉积(图1,图2),期间具有明显的沉积间断。下马岭组顶部的深水页岩容易发生风化剥蚀,在龙山地区与长龙山组的分界易被植被覆盖。长龙山组最底部以双向交错层理细砂岩覆盖于下马岭组页岩之上,分布范围广,反映了潮坪相潮下砂坪的沉积环境,仅局部发育含砾粗砂岩,为潮下带潮道沉积。而在蓟县地区长龙山组底部发育较粗砾岩,并能看到河流的下切作用。因此研究区 SQ_2 也缺少LST,只识别出TST和HST两个体系域。TST由长一段中-细砂岩夹上部旋回底部的含砾砂岩组成,构成向上水体变深的退积式准层序组;HST由长二段薄层含海绿石细砂岩、粉砂岩夹泥质粉砂岩和长三段的韵律页岩构成,构成向上水体变浅的进积式准层序组(图2)。TST和HST之间的最大海泛面位于长一段的顶部,为一套潮下带砂质浅滩沉积,向上过渡为长二段下部的潮间带砂泥混合坪沉积(图2)。

SQ_3 底界,即景儿峪组和长龙山组之间没有明显的地壳上升运动^[19,21],景儿峪组底界以发育区域性紫红色夹灰绿色板岩为主,是由泥质灰岩经过初级变质而成,龙山的个别区域发育了薄层钙质砂岩,之后变为含云灰岩和云质灰岩为主的清水沉积,顶部有少量泥质云岩,因此景儿峪组和长龙山组之间的层序界面没有明显的沉积间断,由较深水的碳酸盐岩沉积直接超覆在较浅水的碎屑岩之上(图2),层序界面为一最大海退面,之后发生快速海侵,早期发育混合沉积,说明整体气候变得比较干燥,陆源碎屑供给不甚充分。根据旋回序列,在 SQ_3 内部进一步识别出TST和HST两个体系域。TST由景一段钙质砂岩和紫红色、灰绿色泥质灰岩构成,后者大部分蚀变为板岩,总体构成一水体变深的退积式准层序组;HST由景二段、景三段云质灰岩、灰质云岩、泥质云岩构成向上变浅的进积式准层序组(图2)。TST和HST之间的最大海泛面位于景一段下部泥质灰岩(板岩)的顶部,向上变为HST的蛋青色云质灰岩(图2)。而 SQ_3 顶界为长龙山组与古生界寒武系之间的“蓟县上升”造成的区域性不整合接触界面^[15,18-19,21],在研究区可以见到寒武系下部昌平组的底砾岩覆盖在景儿峪组顶部的灰质白云岩之上,在龙山的南坡顶可以见到灰质角砾覆盖在生物藻丘之上,呈角度不整合接触关系(图5g,h)。

4 各层序沉积相演化特征

根据前期微量元素分析物源区和源岩判别图解研究结果^[25],龙山地区下马岭组和长龙山组物源区均为

大陆岛弧的构造背景,且母岩以安山岩与长英质混合岩为主。根据野外剖面观察及岩性序列旋回分析,结合前人研究成果^[16,20,26-29,31-32],认为研究区下马岭组主要为陆源碎屑浅海-潮坪沉积,长龙山组整体为一套陆源碎屑潮坪沉积,景儿峪组为碳酸盐-陆源碎屑混积潮坪沉积(图2)。

4.1 SQ_1 沉积相演化

龙山地区下一段属于 SQ_1 的TST早期,发育灰-灰黑色-灰绿色炭质页岩、粉砂质页岩夹薄层泥灰岩透镜体,有机质含量较高,整体反映低能较深水沉积,主要为浅海陆棚沉积(图2)。下二段属于TST晚期,发育灰黑色、黑色纸片状炭质页岩夹薄层粉砂岩,泥页岩颜色更深,水体进一步加深到最大,仍属于浅海陆棚沉积。下三段属于HST早期,发育黄绿色含海绿石砂岩、粉砂岩互层(图6a,b),发育平行层理、低角度交错层理和水平层理(图3a,b),海绿石的出现指示了弱氧化-弱还原环境,为潮下带浅滩-砂坪沉积。下四段属于HST晚期,发育含海绿石薄层细-粉砂岩、含铁质粉砂岩与页岩的频繁互层,向上泥质含量增加,且为杂色,反映了从潮下带上升向潮间带过渡的沉积环境。综上所述,研究区下马岭组从下向上为浅海陆棚、潮下带浅滩和砂坪及潮间带4种沉积环境,水体先加深后变浅,准层序组叠置样式由退积型演变为进积型(图2)。

4.2 SQ_2 沉积相演化

华北地区长龙山组与下马岭组之间存在明显的沉积间断,下马岭组顶部长期出露遭受风化剥蚀,为长龙山组提供了陆源物质基础^[25]。长一段中下部属于 SQ_2 的TST早期,以发育较厚层铁质石英砂岩夹薄层泥岩为主,砂岩中发育双向交错层理,向上海绿石发育,以潮下带砂坪沉积为主(图2)。长一段中部属于TST的晚期,普遍发育一套含砾砂岩,龙山山脊上可见到层面上砾岩不规律分布,粒径2~15 cm,局部分选较好,磨圆度以次圆状-圆状为主,剖面上可见砾石顺层排列,呈叠瓦状构造,反映了潮下带潮道沉积环境(图3c,d)。向上变为中-厚层黄褐色至黑紫色铁质石英砂岩(铁质呈条带或斑块状)(图3c,f,图6c)和灰白色石英砂岩互层,主要以石英颗粒为主,石英次生加大较为发育,可见少量燧石发育,局部见铁质结核,发育大型槽状交错层理(图4a,c),层面上可见大型波痕构造(图3e),向上海绿石砂岩层增多(图4d),可见小型交错层理、双向交错层理、冲洗交错层理和

平行层理(图4)。普通薄片镜下观察海绿石一般呈胶结物状或颗粒状(图6d)[³⁸]，扫描电镜下呈裂片状发育(图6e, f)。X射线衍射发现岩石中石英含量可达44.5%~70.9%，普遍含有赤铁矿，可达8.2%~26.5%，粘土矿物在4.1%~20.1%，含少量黄铁矿(表1)。海绿石的发育指示了弱氧化-弱还原环境为主，主要为潮下带砂坪和浅滩沉积。长二段属于HST早期，发育灰白色薄层石英砂岩夹黄绿色页岩及紫红色、黄绿色含泥粉砂岩夹粉砂质泥岩互层为主，可见水平层理或低角度冲洗交错层理(图4)，为潮间带砂泥混合坪沉积。长三段属于HST晚期，沉积物颗粒变细，主要为紫红色页岩夹灰绿色页岩组成韵律层理

(图3g)，局部发育灰黑色页岩(图3h)，向上红色页岩增多，由于页理非常发育，整体破碎严重，反映了水体变浅的潮上带沉积。

综上所述，研究区SQ₂以碎屑潮坪沉积为主，从下向上依次为潮下带砂坪、潮道、浅滩和潮间带砂泥混合坪及潮上带泥坪沉积，水体先加深后变浅，准层序组叠置样式由退积型演变为进积型(图2)。

4.3 SQ₃沉积相演化

SQ₃沉积时期，陆源供给明显减少，以发育碳酸盐潮坪沉积为主，同时夹薄层泥质灰岩或泥质云岩混合岩沉积(图2)。景一段下部属于TST时期，大部分地

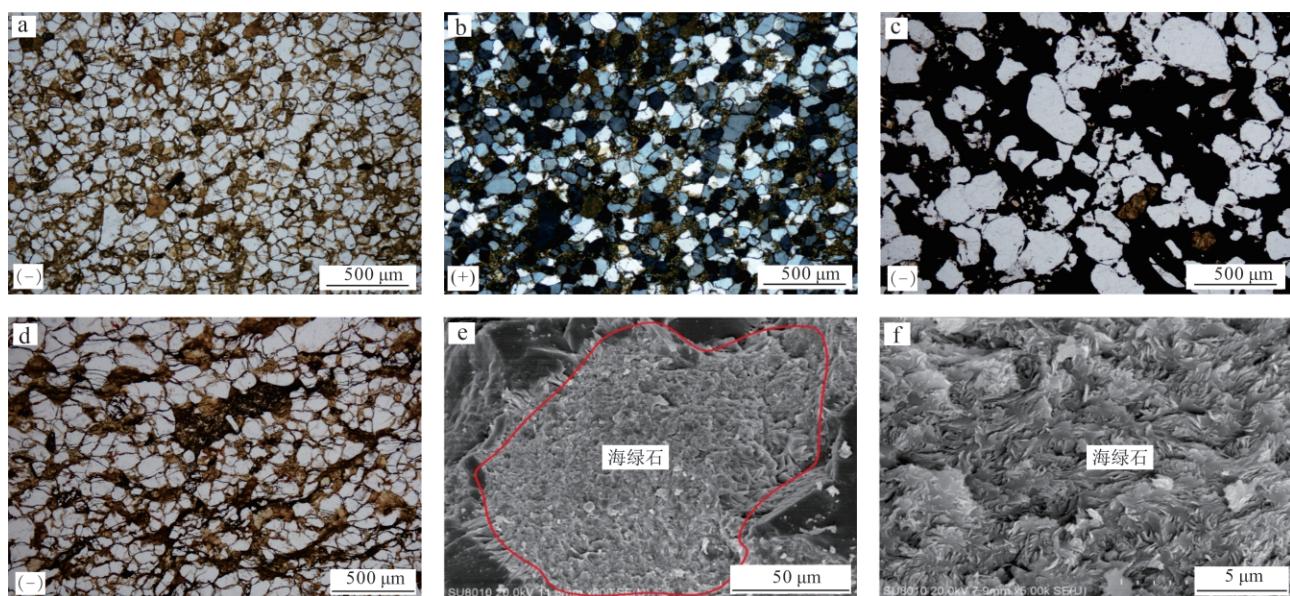


图6 华北龙山地区下马岭组和长龙山组镜下微观特征

Fig. 6 Microscopic photos showing the Xiamaling Formation and Changlongshan Formation rocks, Longshan area, North China

a, b. 下三段含海绿石石英细砂岩，普通薄片；c. 长一段铁质石英砂岩，普通薄片；d. 长一段海绿石石英砂岩，普通薄片；

e. 长一段胶结物状海绿石，扫描电镜；f. 长一段海绿石裂片状，扫描电镜

表1 华北龙山地区长龙山组部分样品X射线衍射全岩矿物组成

Table 1 X-ray diffraction-based whole-rock mineralogy of the Changlongshan Formation, Longshan area, North China

样品号	矿物分含量/%							
	石英	钾长石	斜长石	方解石	赤铁矿	黄铁矿	针铁矿	粘土矿物
L1	70.3	2.5	0	0	8.2	0	0	19.0
L7	60.3	0	1.8	3.2	16.1	3.0	0	15.7
L3	50.6	0	0	0	20.1	3.3	5.9	20.1
L4	68.2	0	0	0	21.4	3.5	0	6.9
L5	70.6	0	0	0	14.6	5.5	0	9.3
L8	70.9	0	0	0	14.9	1.3	0	12.9
L2B	56.3	2.9	0	5.0	26.5	5.2	0	4.1
L2E	44.5	2.1	0	4.0	22.2	4.2	4.3	18.7
L2F	62.1	0	2.2	8.8	13.4	1.9	0	11.6
L2H	51.8	0	2.1	12.3	15.7	2.4	0	15.7

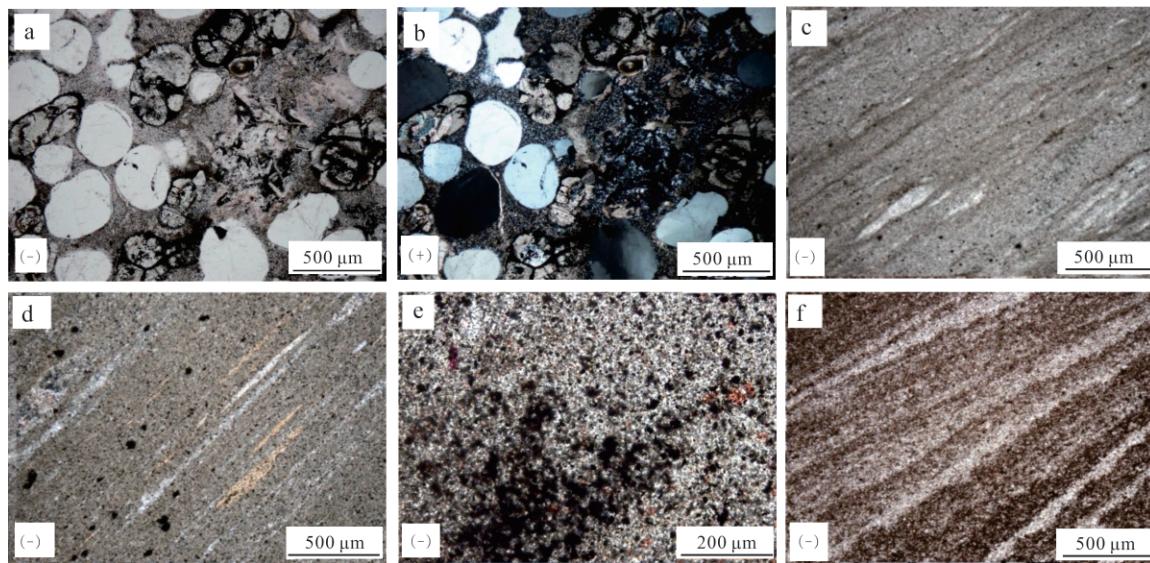


图7 华北龙山地区景儿峪组镜下岩性特征

Fig. 7 Microscopic photos showing lithologies of the Jingeryu Formation, Longshan area, North China

a, b. 含铁钙质石英砂岩, 普通薄片; c. 蛋青色含云灰岩, 普通薄片; d. 富含有机质的云质灰岩, 普通薄片;
e. 富含有机质的泥质条带云岩, 普通薄片; f. 白云质条带灰岩, 普通薄片

区早期为紫红色夹灰绿色泥质灰岩, 并发生变质成为板岩, 为潮下带泥质灰坪沉积, 局部发育薄层含铁钙质石英砂岩(图7a, b), 为潮下带陆源碎屑浅滩沉积环境, 其底部可见不规则漂砾(图5a, b), 漂砾成分为 SQ_3 层序TST早期的泥质灰岩, 分选差, 棱角状, 无定向排列, 反映了期间发生了一次大的风暴潮, 将早期塑性的泥质灰岩沉积进一步搅起、打碎、再次搬运和沉积而形成风暴岩。景一段上部进入 SQ_3 层序HST早期, 为薄层的蛋青色含云灰岩(图5e, 图7c)过渡为薄层状灰白色云质灰岩, 较破碎, 属于潮间带云质灰坪沉积。景二段属于HST中期, 为紫红色块状云质灰岩和灰色中厚层含白云质条带灰岩(图5j), 可见到波痕构造(图5i), 上部夹水平层理的薄层云质灰岩(图7d), 指示了潮间带水上和水下频繁交替的中-低能环境, 因此景一段上部与景二段都为潮间带含云-云质灰坪沉积。景三段属于HST晚期, 自下向上依次发育含有藻类有机质的浅灰色(图7e)与浅绿色灰质白云岩互层, 同时在岩石中发育有石膏、藻类, 且向上白云质条带或豹斑和有机质增多, 发育微波状-水平层理的藻纹层和泥质条带(图7f), 指示了含有陆源碎屑的潮上带沉积环境。在龙山中部北坡可见到由云质灰岩过渡到褐红色和灰绿色泥质云岩的两个类似的旋回叠加, 下部旋回泥岩厚度较大(图5f), 整体显示为一套进积式准层序组。

综上所述, 龙山地区景儿峪组从下向上分为潮下碎屑浅滩和泥质灰坪、潮间含云-云质灰坪、潮上灰质

云坪-泥质云坪等沉积环境(图2)。整体水体由深变浅, 且由陆源碎屑浑水沉积变为碳酸盐岩清水沉积和后期的陆源碎屑-碳酸盐岩的过渡沉积。

5 层序地层发育模式

通过对华北龙山地区青白口系层序地层、沉积特征的研究, 并结合华北地区前寒武纪构造运动^[18-19, 21, 23]和古地理背景^[16, 20, 26-29, 31-32], 整个华北地区中、新元古代的滨浅海具有陆表海特征^[39], 地形坡度极缓, 水体浅, 范围广, 海岸波浪能量较小, 以潮汐为主^[40-41], 因此海岸以发育开阔的潮坪相为主, 发育陆源碎屑潮坪、碳酸盐潮坪和陆源碎屑-碳酸盐混合潮坪3种类型, SQ_1 和 SQ_2 为陆源碎屑潮坪型沉积, SQ_3 层序TST和HST上部都发育陆源碎屑-碳酸盐混合沉积, SQ_3 层序HST下部主要为碳酸盐潮坪沉积, 在此基础上建立了研究区青白口系潮坪-浅海陆棚相为主的陆源碎屑-碳酸盐混合型层序地层发育模式, 具有开阔陆表海特征(图8)。

SQ_1 即下马岭组底界是由“芹峪运动”形成的区域性平行不整合面, 发育有铁质风化壳和底砾岩, 具有明显的陆上风化侵蚀标志^[18-19, 21, 23]。在龙山地区低位体系域不发育, TST为浅海陆棚相沉积, 黑色页岩大套出现(图2), 显示了沉积范围不断扩大、水体逐渐加深的过程。HST为潮下带浅滩、潮下带砂坪沉积。从沉积特征上来看具有明显的沉积韵律, 总体上构成一个先海侵后海退的沉积旋回(图8)。

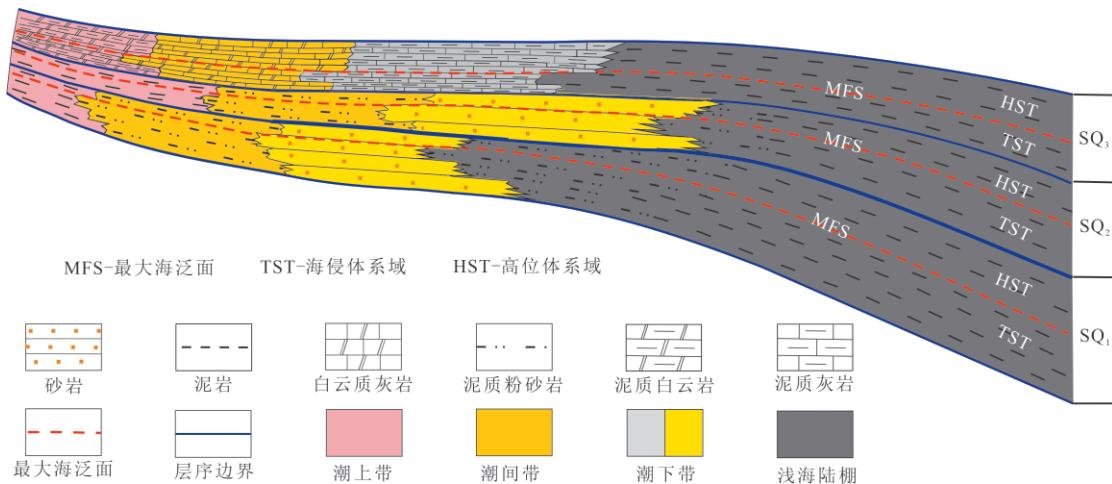


图8 华北龙山地区青白口系层序地层发育模式

Fig. 8 Sequence stratigraphic model of the Qingbaikouan System, Longshan area, North China

SQ₂即长龙山组底界为“蔚县上升”形成的区域平行不整合面^[18-19,21,23],TST由潮下带潮道、砂坪和浅滩组成,沉积厚度大,总体表现为砂岩厚度变薄,砂/泥比值降低(图2),由水体逐渐变深的退积型准层序组成,与下马岭组具有相似性。HST由潮间带过渡为潮上带,主要由粉砂岩、页岩组成向上水体逐渐变浅的进积型准层序组(图2)。整体来看也具有明显的沉积韵律,总体上构成一个先海侵后海退的沉积旋回(图8)。

SQ₃即景儿峪组底界为一岩性突变面,以碎屑岩突变为碳酸盐岩为主,层序界面为一最大海退面,之后发生快速海侵,早期局部为纯陆源碎屑沉积,过渡为陆源碎屑和碳酸盐岩的混合沉积,逐渐变为纯碳酸盐岩沉积,后期又变为混合沉积,说明此时整体气候开始变得比较干燥^[22-23],陆源碎屑供给不充分,以清水环境中形成的碳酸盐岩层序为主,早期TST由潮下带浅滩和泥质灰坪组成,后期HST由潮间带含云灰坪和潮上带灰质云坪和泥质云坪组成,总体上也构成一个先海侵后海退的沉积旋回(图8)。

6 结论与建议

1) 华北龙山地区青白口系下马岭组下部以发育炭质页岩、粉砂质页岩,中部以细砂岩-粉砂岩,上部以粉砂岩及页岩的频繁互层为特征。长龙山组以自下而上依次发育大套砂岩、薄层粉砂岩和大套韵律页岩为特征;景儿峪组以自下而上依次发育含铁质砂岩、泥质灰岩(板岩)、白云质条带灰岩、灰质和泥质云岩混积岩为特征。

2) 以“芹峪运动”“蔚县上升”和“蔚县上升”造成

的不整合界面、长龙山组-景儿峪组的碎屑岩和碳酸盐岩岩性界面为界,将青白口系划分为3个三级层序,每个层序分别由海侵体系域和高位体系域构成。

3) 下马岭组主要发育陆源碎屑浅海陆棚-潮坪相沉积,长龙山组为陆源碎屑潮坪沉积,景儿峪组以陆源碎屑-碳酸盐岩混积型潮坪沉积层序为主。建立了青白口系潮坪-浅海陆棚相为主的陆源碎屑-碳酸盐岩混积型层序地层发育模式,具有开阔陆表海特征。

4) 青白口系层序地层格架的建立和沉积相演化对于华北地区中、新元古代古地理条件恢复具有重要意义。由于目前露头取样资料有限,建议下一步针对不同层序的不同体系域进行系统取样,进行微量元素实验分析,并结合古生物方面的资料,进一步恢复古气候、古水深、古盐度,为高分辨率层序地层格架的建立及古环境恢复提供更可靠的依据。

参考文献

- [1] 刘桂珍,高伟,尉加盛,等. 混积层系沉积、层序特征——以鄂尔多斯盆地高桥地区本溪组为例[J]. 天然气地球科学,2021, 32(3):382-392.
Liu Guizhen, Gao Wei, Wei Jiasheng, et al. Sedimentary characteristics and sequence stratigraphy in a mixed siliciclastic-carbonate depositional system: Case study of Benxi Formation in Gaoqiao area, Ordos Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32 (3) : 382-392.
- [2] 梅冥相,刘智荣,孟庆芬,等. 南口虎峪中元古界大红峪组混积岩系的层序地层划分——海侵砂岩中的微生物席碎片简介[J]. 地质科技情报,2007,26(1):33-40.
Mei Mingxiang, Liu Zhirong, Meng Qingfen, et al. Sequence-stratigraphic divisions of the mixed rock system for Mesoproterozoic Dahongyu Formation at Huyu Section of Nankou Town in Beijing: Brief introduction on Microbial-Mat Chips in transgressive sandstones [J]. Geological Science and Technology Information,

- 2007, 26(1):33-40.
- [3] 白莹,徐安娜,刘伟,等.塔里木盆地西北部中下寒武统混积岩沉积特征[J].天然气工业,2019,39(12):46-57.
Bai Ying, Xu Anna, Liu Wei, et al. Sedimentary characteristics of Lower and Middle Cambrian diamict in the northwestern Tarim Basin[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(12):46-57.
- [4] Arnaby R J, Ward W B. Outcrop analog for mixed siliciclastic-carbonate ramp reservoirs—stratigraphic hierarchy, facies architecture, and geologic heterogeneity: Grayburg Formation, Permian Basin, USA[J]. Journal of Sedimentary Research, 2007, 77(1): 34-58.
- [5] 郑荣才,周刚,董霞,等.龙门山甘溪组谢家湾段混积相和混积层序地层学特征[J].沉积学报,2010,28(1):33-41.
Zheng Rongcai, Zhou Gang, Dong Xia, et al. The characteristics of hybrid facies and hybrid sequence of Xiejiawan Member of Ganxi Formation in the Longmenshan Area [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(1):33-41.
- [6] Mount J. Mixed siliciclastic and carbonate sediments: A proposed first-order textural and compositional classification[J]. Sedimentology, 2010, 32(3), 435-442.
- [7] Brandon B H, Ángel P B, Andr  w D, et al. Mixed carbonate-siliciclastic sedimentation along the Great Barrier Reef Upper Slope: A challenge to the reciprocal sedimentation model [J]. Journal of Sedimentary Research, 2015, 85(9):1019-1036.
- [8] Du Xiao, Tian Changbing, Wang Youjing, et al. Sedimentary and reservoir characteristics of an Oligocene-Miocene mixed siliciclastic-carbonate succession in southeast Iraq[J]. Marine and Petroleum Geology, 2022, 138:105533.
- [9] Dantas M V S, Holz M. High-resolution sequence stratigraphy of a cretaceous mixed siliciclastic-carbonate platform succession of the Sergipe-Alagoas Basin, NE Brazil[J]. Facies, 2020, 66: 4.
- [10] Loevezijn G V, Raven J. Facies patterns and depositional processes in two Frasnian mixed siliciclastic-carbonate systems in the Cantabrian Mountains, northwest Spain [J]. Geology, 2020, 26(1):1-23.
- [11] Sallam E S, Ruban D A. Facies analysis and depositional environments of the Miocene syn-rift carbonate-siliciclastic rock packages in the northwest Gulf of Suez, Egypt[J]. Carbonates and Evaporites, 2020, 35(1):10.
- [12] Xavier P L A, Silva A F, Soares M B, et al. Sequence stratigraphy control on fossil occurrence and concentration in the epeiric mixed carbonate-siliciclastic ramp of the Early Permian Irati Formation of southern Brazil [J]. Journal of South American Earth Sciences, 2018, 88(12):157-178.
- [13] Zecchin M, Catuneanu O. High-resolution sequence stratigraphy of clastic shelves VI: Mixed siliciclastic-carbonate systems [J]. Marine and Petroleum Geology, 2017, 88:712-723.
- [14] 周洪瑞,梅冥相,罗志清,等.燕山地区新元古界青白口系沉积层序与地层格架研究[J].地学前缘,2006,13(6):280-290.
Zou Hongrui, Mei Mingxiang, Luo Zhiqing, et al. Sedimentary sequence and stratigraphic framework of the Neoproterozoic Qingbaikou system in the Yanshan region, North China [J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13(6):280-290.
- [15] 乔秀夫.青白口群地层学研究[J].地质科学,1976,11(3): 21-22.
Qiao Xiufu. Investigation on stratigraphy of the Qingbaikou Group of the Yanshan Mountains, North China [J]. Scientia Geoloica Sinica, 1976, 11(3):21-22.
- [16] 王立峰,李文宣,罗均林,等.河北省怀来新元古代长龙山组沉积相研究[J].世界地质,2000,19(2):138-143.
Wang Lifeng, Li Wenxuan, Luo Junlin, et al. The study on sedimentary facies of Changlongshan Formation of Neoproterozoic Era in Huailai, Hebei [J]. Word Geology, 2000, 19(2):138-143.
- [17] 陈小军,罗顺社,李家华.宣龙坳陷青白口系长龙山组碎屑岩地球化学特征[J].中国地质,2011,38(6):1477-1484.
Chen Xiaojun, Luo Shunshe, Li Jiahua. Clastic rock geochemical features of Changlongshan Formation in Qingbaikou System within Xuanlong Depression [J]. Geology in China, 2011, 38 (6) : 1477-1484.
- [18] 曲永强,潘建国,梁利东,等.燕辽裂陷槽中元古界不整合面的性质[J].沉积与特提斯地质,2012,32(2):11-22.
Qu Yongqiang, Pan Jianguo, Liang Lidong, et al. The attributes of the Mesoproterozoic unconformities in the Yanliao rift trough [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2012, 32 (2) : 11-22.
- [19] 潘建国,曲永强,马瑞,等.华北地块北缘中新元古界沉积构造演化[J].高校地质学报,2013,19(1):109-122.
Pan Jianguo, Qu Yongqiang, Ma Rui, et al. Sedimentary and tectonic evolution of the Meso-Neoproterozoic strata in the Northern Margin of the North China Block [J]. Geological Journal of China Universities, 2013, 19(1):109-122.
- [20] 郭庆恒,金振奎,朱小二,等.燕山地区京西坳陷青白口地区新元古界沉积相演化[J].古地理学报,2019,21(3):422-430.
Guo Qiheng, Jin Zhenkui, Zhu Xiaor, et al. Sedimentary facies evolution of the Neoproterozoic in Qingbaikou area of Jingxi Depression, Yanshan Region [J]. Journal of Palaeogeography, 2019, 21(3):422-430.
- [21] 朱士兴,刘欢,胡军.论燕山地区青白口系的解体[J].地质调查与研究,2012,35(2):81-95.
Zhu Shixing, Liu Huan, Hu Jun. On the disintegration of the Neoproterozoic Qingbaikou System in Yanshan Range, North China [J]. Geological Survey and Research, 2012, 35(2):81-95.
- [22] 高林志,张传恒,刘鹏举,等.华北—江南地区中、新元古代地层格架的再认识[J].地球学报,2009,30(4):433-446.
Gao Linzhi, Zhang Chuanheng, Liu Jupeng, et al. Recognition of Meso- and Neoproterozoic stratigraphic framework in North and South China [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2009, 30(4):433-446.
- [23] 陆松年,杨春亮,李怀坤,等.华北古大陆与哥伦比亚超大陆[J].地学前缘,2002,9(4):225-233.
Lu Songnian, Yang Chunliang, Li Huakun, et al. North China continent and Columbia supercontinent [J]. Earth Science Frontiers, 2002, 9(4):225-233.
- [24] 范文博.华北克拉通中元古代下马岭组地质特征及研究进展——下马岭组研究百年回眸[J].地质论评,2015,61(6): 1383-1406.
Fan, Wenbo. Geological features and research progress of the Meso-proterozoic Xiamaling Formation in the North China Craton: A review after nearly one hundred years of study [J]. Geological Review, 2015, 61(6): 1383-1406.
- [25] 张琴,王柏寒,周琛,等.北京十三陵地区青白口系长龙山组含

- 铁建造的发育特征及成因[J]. 古地理学报, 2020, 22(3): 570-586.
- Zhang Qin, Wang Bohan, Zhou Chen, et al. Developmental characteristics and genesis of iron-bearing formations in Changlongshan Formation of Qingbaikou in Beijing Ming Tombs[J]. Journal of Palaeogeography, 2020, 22(3):570-586.
- [26] 陈小军,李任远,罗顺社. 燕山地区宣龙坳陷长龙山组沉积相特征研究[J]. 沉积与特提斯地质,2012,32(1): 50-54.
- Chen Xiaojun, Li Renyuan, Luo Shunshe. Sedimentary facies in the Changlongshan Formation, Xuanlong Depression, Yanshan area, Hebei[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2012, 32(1): 50-54.
- [27] 宋庆伟,胡福根,熊春华,等. 冀东卢龙地区青白口系景儿峪组沉积相分析[J]. 城市地质,2015,10(S1):257-260.
- Song Qingwei, Hu Fugen, Xiong Chunhua, et al. Sedimentary facies analysis of Jingeryu Formation of Qingbaikou System in Lu-long area, Eastern Hebei [J]. City Geology, 2015, 10 (S1) : 257-260.
- [28] 罗顺社,吕奇奇,尚飞,等. 宣龙坳陷新元古界下马岭组沉积相特征研究[J]. 断块油气田, 2011, 18(1):26-29.
- Luo Shunshe, Lv Qiqi, Shang Fei, et al. Characteristics of sedimentary facies of Neoproterozoic Xiamaling Formation reservoir in Xuanlong Depression [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2011, 18(1):26-29.
- [29] 张驰,李建安,焦杰伟,等. 北京西山下苇甸地区青白口系长龙山组沉积相及层序地层研究[J]. 古地理学报, 2017, 19(6): 955-964.
- Zhang Chi, Li Jianan, Jiao Jiewei, et al. A study of sedimentary facies and sequence stratigraphy of the Changlongshan Formation (Qingbaikou) in Xiaweidian area, West Mountain of Beijing[J]. Journal of Palaeogeography, 2017, 19(6):955-964.
- [30] 刘庆余. 北京西山的地质研究及其地质实习基地的历史回顾[J]. 地球科学, 1990, 15(6): 697-704,679.
- Liu Qingyu. The historical reminiscence of the geological study and the practical training base in Xishan (West Hills) of Beijing [J]. Earth Science, 1990, 15(6): 697-704,679.
- [31] 常全明. 秦皇岛石门寨地区海绿石赋存特点及沉积环境研究[J]. 唐山工程技术学院学报, 1992, (2):54-58.
- Chang Quanming. Research on the concentration features and the sedimental context of glauconite in Shimenzhai area, Qinhuangdao [J]. Journal of Tangshan Institute of Technology, 1992, (2) : 54-58.
- [32] 褚庆忠,犹遵艳,林景昱,等. 河北秦皇岛柳江盆地新元古界海绿石矿物特征与形成环境研究——以鸡冠山长龙山组为例[J]. 地球学报, 2022, 43(1):25-37.
- Chu Qingzhong, You Zunyan, Lin Jingyu, et al. Mineral characteristics and formation environment of glauconite in Upper Archean of Lijiang Basin, Qinhuangdao, Hebei Province: A case study of Changlongshan Formation in Jiguanshan[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2022, 43(1):25-37.
- [33] 温献德. 华北北部中、上元古界的大陆裂谷模式和地层划分[J]. 前寒武纪研究进展,1997,20(3):21-28.
- Wen Xiande. The failed rift model and stratigraphic division of middle-upper proterozoic stratum in the northern part of north China [J]. Progress in Precambrian Research, 1997, 20 (3) : 21-28.
- [34] Vail P R, Mitchum R J, Thompson S. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part3: Relative changes of sea level from cosatalonlap. Payton C E. Seismic stratigraphy-applications to hydro-carbon exploration[M]. Oklahoma: AAPG, 1977.
- [35] 叶涛,王清斌,代黎明,陈容涛,崔普媛. 台地相碳酸盐岩层序划分新方法—以渤中凹陷奥陶系为例[J]. 岩性油气藏,2021, 33(3):95-103.
- Ye Tao, Wang Qingbin, Dai Liming, et al. New method for sequence division of platform facies carbonate rocks: A case study of Ordovician in Bohai Sag [J]. Lithologic Reservoirs, 2021, 33 (3):95-103.
- [36] 黄学光,朱士兴,贺玉贞. 蓟县中、新元古界剖面层序地层学研究的几个基本问题[J]. 前寒武纪研究进展, 2001, 24(4) : 201-221.
- Huang Xueguang, Zhu Shixing, He Yuzhen. Some basic problems in research on sequence stratigraph of the meso-and neoproterozoic strata in Jixian area[J]. Progress in Precambrian Research, 2001, 24(4):201-221.
- [37] 李儒峰. 华北中、新元古界层序地层分析及其应用[J]. 石油大学学报(自然科学版),1998,22(1):11-16+111-112.
- Li Rufeng. Sequence stratigraphy and its application in oil and gas exploration of the meso-and neo-proterozoic north China [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 1998,22(1):11-16+111-112.
- [38] 张琴,周琛,田寒云,等. 不同地质时期海绿石发育特征差异及成因[J]. 石油与天然气地质,2022, 43(1):186-195, 240.
- Zhang Qin, Zhou Chen, Tian Hanyun, et al. Characteristic differences of glauconite formed in different geologic periods and related genetic analysis[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(1):186-195, 240.
- [39] 汤冬杰,史晓颖,马坚白,等. 中元古代海绿石:前寒武纪海洋浅化变层深度的潜在指示矿物[J]. 地学前缘, 2016, 23(6) : 219-235.
- Tang Dongjie, Shi Xiaoying, Ma Jianbai, et al. Mesoproterozoic glauconite as a potential mineral proxy for shallow chemocline in the Precambrian ocean [J]. Earth Science Frontier, 2016, 23 (6) : 219-235.
- [40] Messadi A M, Touir J, Mardassi B, et al. Factors controlling sedimentation and sequence stratigraphy evolution in shallow marine (carbonates) platform: Example of Middle Eocene deposits from Gafsa Basin[J]. Carbonates and Evaporites, 2020, 35(2):58.
- [41] 陈维涛,徐少华,孙珍等. 层序地层学标准化理论在陆架坡折-陆坡区的应用[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42 (6) : 1414-1422.
- Chen Weitao, Xu Shaohua, Sun Zhen, et al. Application of standardized sequence stratigraphy theory in the shelf break-to-slope area: A case study of the Middle Miocene sedimentary sequence in the PRMB[J]. Oil & Gas Geology, 2021,42(6):1414-1422.

(编辑 张亚雄)