

华北晚古生代海平面变化及其层序地层响应

吕大炜 李增学 刘海燕 郭建斌 刘彬彬 孟召磊

(山东科技大学 地质科学与工程学院, 山东 青岛 266510)

摘要:依据沉积学、煤地质学、层序地层学、古生物学等多学科综合方法,对华北地区晚古生代地层进行层序地层分析,并研究了相对海平面升降和其层序地层学响应,研究结果表明:研究区晚古生代地层存在着 8 种层序界面,主要包括古构造运动面、古生物间断面、大面积泥炭化沼泽化界面、陆表海低水位砂体底界、盆地转换界面、大范围冲刷面、大面积暴露面和硅质海绵岩等;依据界面的划分原则可以将研究区地层划分出 1 个盆地充填层序、3 个构造层序(相当于二级层序)和 7 个三级层序;分析发现,基于层序格架下的相对海平面升降可以分为层序 1—层序 3 的短期大规模海侵阶段及长时间海退阶段和层序 4—层序 7 的长时期的海退阶段。在此基础上,依据海平面变化曲线及其层序地层响应特征发现华北晚古生代海平面变化具有周期性与复合性和高频性与事件性等特点。

关键词:层序地层学;海平面变化;事件型海侵

中图分类号: P539.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3657(2009)05-1079-08

1 引言

华北晚古生代地层是一套海陆交互相地层,是晚奥陶世末期华北整体隆起遭受剥蚀后,从晚石炭世开始重新沉降接受沉积形成的。自下而上发育了本溪组、太原组、山西组、下石盒子组、上石盒子组和石千峰组地层。该区的陆表海海平面变化机制^[1]及层序地层学的研究^[2-3]历来是中国地质工作者研究的热点问题。近几年来,许多中国地质工作者解释这种现象^[4-17],研究成果比较多,但众多学者对于北方晚古生代海陆交互沉积时海平面变化特点各抒己见,至今没有一个定论,尤其是在海平面变化特征上的研究,仍然研究甚少,进展不是很大,而这些方面又直接影响着层序地层划分和煤聚集规律的研究,进而制约着油气勘探的进行。因此,考虑海平面变化与层序地层学、基准面变化之间存在着相互变化关系,笔者利用层序地层学原理、基准面旋回变化等方法,采用沉积学、煤地质学、层序地层学、古生物学等多学

科综合手段,分析海平面变化曲线及其与层序地层的响应关系,进一步明确华北地区晚古生代海平面变化特点。

2 华北陆表海盆地层序地层格架

中国华北晚古生代陆表海沉积地层可以作为一个完整的盆地充填层序,该层序反映了陆表海盆地发育至衰亡的全部过程,在垂向上包含了全部垂向沉积序列,该序列由若干套沉积组合构成并按一定顺序出现,其每套沉积组合皆由共生关系密切的沉积相组成^[15,10]。华北晚古生代盆地具有特殊沉积特征和层序特点,主要表现在:①由于极缓的古坡度,难以形成侵蚀成因的角度不整合,②体系域由两元结构海侵体系域和高水位体系域组成,缺少低水位体系域,只在基底活动、沉陷较深地区如贺兰山,发育低水位体系域,在山西组以上过渡沉积环境中,层序发育三分,③层序界面为 I 型,缺少陆棚边缘沉积。华北地区晚古生代层序界面主要有以下几类:

收稿日期:2009-01-09;改回日期:2009-04-03

基金资助:国家自然科学基金项目(40872100)和山东省高校沉积成矿作用与沉积矿产重点实验室(山东科技大学)开放基金资助项目(DMSM200801)共同资助。

作者简介:吕大炜,男,1980年生,博士,讲师,主要从事层序地层学与沉积学研究;E-mail:lvdawei95@163.com。

(1)古构造运动面。古构造运动面是陆相盆地充填沉积中最为关键的界面,这类界面与区域构造事件相吻合,即区域性不整合面。这类区域性的古构造运动面不仅在同一沉积盆地内具等时性且普遍发育,而且在相同应力场作用下的同期盆地也普遍发育,因而具有较好的可比性。华北地区石炭—二叠系与奥陶系/寒武系之间的假整合面在全区发育,并可以在整个华北对比,是典型的古构造界面。

(2)古生物间断面。为古生物缺失带,海平面的下降造成地层不整合,形成层序界面同时因沉积间断造成生物演化的不连续。南华北地区普遍缺失 *Triticites* 带,那么 *Fusulina—Fusulinella* 带与 *Pseudoschwagerina* 带之间生物带的不连续是由于海退造成的,可以作为层序界面。

(3)大面积泥炭化沼泽化界面。陆相盆地充填过程中,由于构造机制改变或充填沉积本身引起盆地废弃,冲积物供应量减少,且水体深度较浅,盆地出现沼泽化进而发生地表暴露。如山西太原西山的 8 煤顶界与庙沟灰岩底界面逐渐的地表暴露面。

(4)陆表海低水位砂体底界。由于陆表海盆地内坡度小,河流对下伏地层的切割微弱,在盆地内形成侧向迁移的河道砂岩,在侧向上连接成片,成为席状砂体。从盆地的边部至中心,这类砂岩的粒度变细,分选性及磨圆性变好,成分成熟度和结构成熟度提高。低水位砂体下往往都对应着一次小规模的海侵,相当于经历了高水位晚期海退后的低位期海平面的短暂恢复,可归结为陆表海低水位砂体的特殊性。如南华北地区的大占砂岩。

(5)盆地转换界面。又称为“沉积相转换面”,如山西的东大窑灰岩底界,东大窑灰岩属于浅海相(或台地相)沉积,其下伏地层属于泥坪沉积,属于沉积相转换界面。煤 9 顶界(五灰底界),属于沉积体系的转换界面,标志着新一轮海侵的开始。

(6)河道冲刷面。代表基准面下降,河流下切,属于典型的层序界面,如山西组底部的北岔沟砂岩,下石盒子组底部的骆驼脖子砂岩以及石千峰组底部平顶山砂岩等。这些砂岩底界面常为河道强烈下切作用形成的区域性冲刷面,其上下沉积环境、古生物组合、陆源碎屑成分及微量元素组成等一般都有明显变化^[7]。

(7)紫红色泥岩。为干燥气候下出露的古土壤层。相当于现代的旱成土或变性土。本区从下石盒子

组顶部开始往上,紫红色泥岩比较发育,是河道间沉积的层序界面的较好标志,其中有些为层序界面,有些则是小层序界面。

(8)硅质海绵岩。其形成与海侵有关^[9],骨针硅质泥岩是较好的海侵标志层。研究区主要有以下两种:第一,灰岩凝缩层,在岩性上以泥晶生物碎屑灰岩和生物碎屑泥晶灰岩为主,泥质含量低,中厚层厚度较稳定,酸不溶残渣含量低、微量元素含量低以及 Fe^{2+}/Fe^{3+} 比值高,常含有大量硅质条带以及生物遗迹化石。如禹州的 L2、L3、L4 和 L6 灰岩可作为凝缩段。第二,南华北地区上石盒子组发现的 1—3 层黑色海绵硅质岩,属滨海沉积,为海侵时大范围迁移过程中形成的。因此,其夹于三角洲沉积之间,代表海平面的上升,可作为凝缩层进行全区对比。

依据上述原则,将华北地区晚古生代地层划分为 1 个盆地充填层序、3 个构造层序(相当于二级层序)和 7 个三级层序(图 1),其中,层序 1、层序 2 和层序 3 为陆表海海侵多发阶段,海平面变化频繁。由于华北构造运动影响,层序 1 表现为北厚南薄,东厚西薄,以障壁—潟湖、潮坪沉积体系为主;层序 2、层序 3 则表现为南厚北薄特点,沉积相带由北向南则是由陆相、过渡相转换海相沉积特点。结合国内外海平面变化的研究现状,采用层序地层学手段对华北地区晚古生代海平面变化进行分析。

3 基于层序地层格架下的海平面升降特点

笔者对华北晚古生代海平面变化的研究,主要是通过华北板块内由于海侵—海退形成的相对薄的沉积旋回来确定,辅助于地球化学特征的研究。通过分析,可以发现,华北晚古生代沉积地层的形成主要可以划分如下两个阶段:

3.1 短期大规模海侵阶段及长时间海退阶段

该阶段是华北地区广泛发育陆表海沉积阶段,即陆表海充填层序,主要包括三级层序的层序 1 至层序 3(图 2)。此时,华北板块经历中奥陶世沉降后,其北部及中部地区于晚石炭世早期开始接受广泛的海侵,其海侵范围广泛,规模巨大、发生次数多,如在鲁西南、河北、山西、辽宁等北华北地区的晚石炭—早二叠世的多套灰岩,分布范围广泛,全区对比。在晚石炭世晚期海侵发生后,华北板块经历了由北高南低向北低南高的“跷跷板”转换,因此,海侵的方向

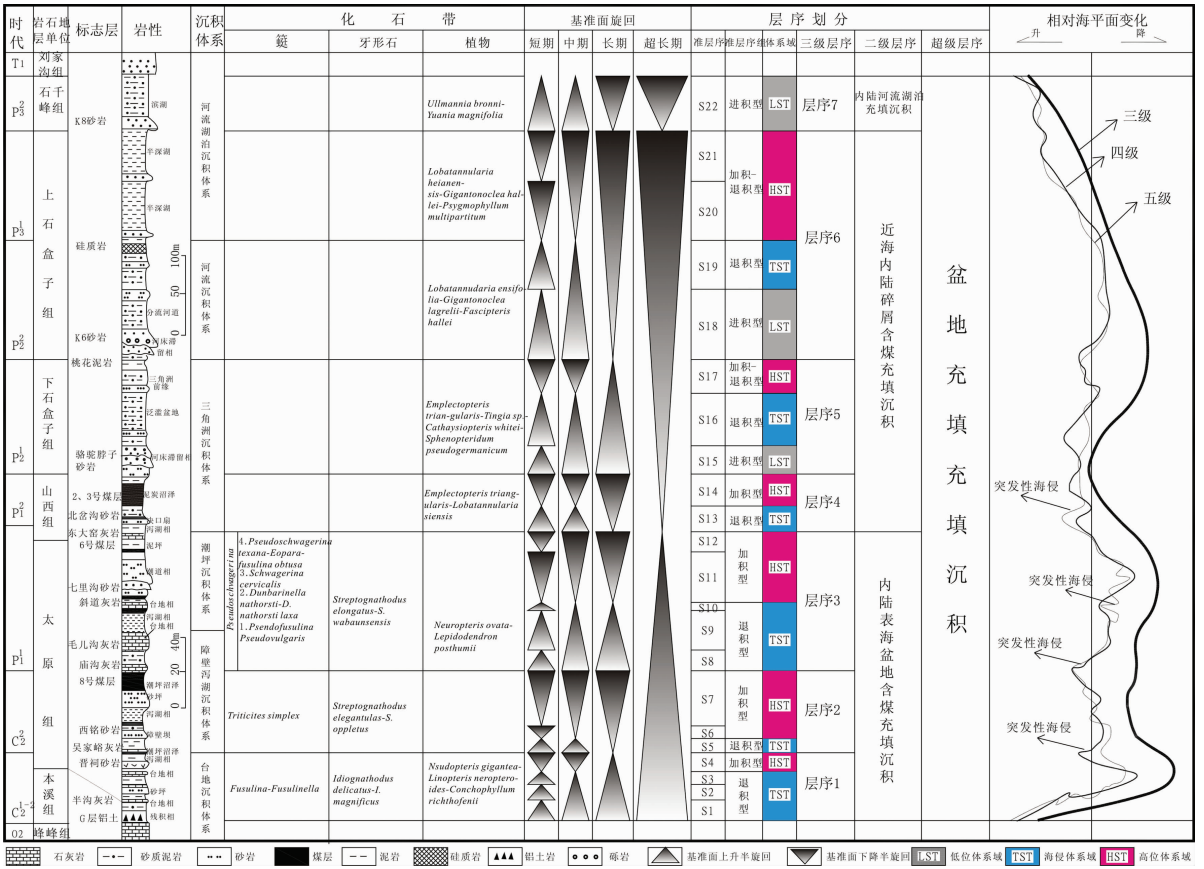


图 1 华北晚古生代层序划分、基准面旋回及海平面变化曲线

Fig.1 Division of sequence stratigraphy, base level cycles and curved shape of sea-level in North China

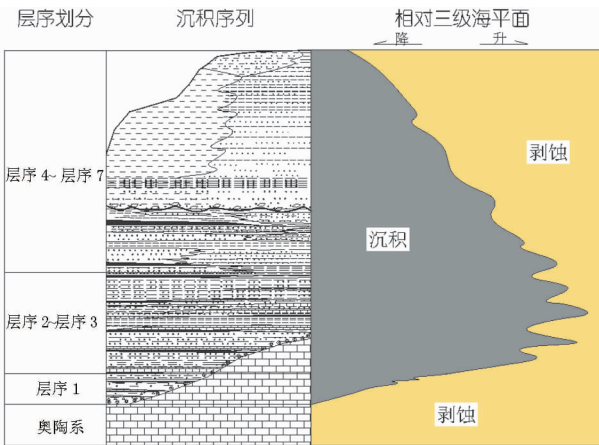


图 2 华北晚古生代海平面变化与沉积关系(图例同图 1)

Fig.2 Relationship between Late Paleozoic sea-level change and sedimentation in North China

转化,此时,海平面变化呈现复合型海侵与长期海退特点,不同层序沉积期的海平面变化又独具特色。具体从以下两个方面分析:

3.1.1 层序 1 海平面变化

本期海平面总体上升,大部分属于小规模缓慢的海侵,局部发生较大规模的海侵(如本溪牛毛岭、辽宁的复州湾),至层序 1 高水位体系域存在了局部海退。晚石炭世早期,由于华北地区刚沉降开始接受海侵沉积,该阶段底部普遍发育了一层残积的铝土岩沉积,全区广泛可以对比,此时海侵发生范围较小,东部海侵方向以东北向盆地侵入,西部主要是南西方向侵入,主要波及山西、山东、河北、辽宁、宁夏等地,且往南海平面变化变小,垂向上的海侵沉积表现为半沟灰岩(山西)、徐家庄灰岩(淄博)、下架灰岩(河北)、小峪灰岩(本溪牛毛岭)等各种薄层不稳定的灰岩沉积,其主要特点是局部地区可对比,横向上分布不稳定,部分地区相变为泥,总体上表现为潮坪沉积,且主要发育在华北北部地区,尤以辽宁复州湾、本溪牛毛岭为典型,南部地区不发育,因此,此时海平面变化较稳定,海域主要分布在盆地中部及北东地区,该阶段总体上处于海侵阶段。

3.1.2 层序2—层序3海平面变化

层序2海侵初期,华北板块发生了“跷跷板”运动,使海侵方向发生了转换,东部海侵由北东方向转换为南东方向,西部仍为南西方向侵入,在层序2海侵末期,全区海侵达到最大,其海相沉积层(山东淄博五灰、山西庙沟—毛儿沟灰岩、河北大青灰岩、两淮地区的L1灰岩等)可以全区对比,其后,华北板块总体处于海退,间夹海侵,其海退持续时间长,海侵持续时间短,海平面变化处于不稳定期,因此该期全华北板块沉积了独具特色的海陆交互地层。层序2海侵体系沉积后,由于板块运动影响,海水由北向南退出,因此,研究区海陆交互沉积表现为由北向南逐渐增厚。总的说来,层序2—层序3时期,海平面变化较不稳定,海域范围达到最大后(层序2)逐渐向南缩小,最终退出华北地区(层序3)。

3.2 长时期的海退阶段

中二叠世(相当于层序4),华北板块总体抬升为陆,海水逐渐由北向南退出,华北地区已经成为近海内陆沉积层序,为干旱的河流湖泊沉积环境,沉积了一套不含煤的灰色杂色碎屑岩地层;南华北地区仍与华南海相通(硅质海绵岩),主要为滨海三角洲沉积环境,气候湿润,有利于植物生长,至晚二叠世(相当于层序5、层序6),海水完全退出南华北地区,气候更加干旱,全区已经演变成陆相河流湖泊沉积环境,整个华北板块已经不受到海域沉积的影响,因此,该区沉积了一套红色的碎屑岩地层。

4 相对海平面变化与层序地层的响应

全球在显生宙以来相对海平面变化及伴随着的周期性全球气候变化,引起了不同地质历史的沉积地层的叠置。相对海平面变化是由构造沉降、气候变化、洋盆容积的改变、冰川的消长、地球体积的胀缩变化、全球性绝对海平面的升降诸多因素影响的综合结果,其相对的基点是陆棚的边缘。华北晚古生代由于板块构造下降,海水从东北或西部侵入,造成研究区内相对海平面上升。全球晚古生代海平面变化引起的地层沉积序列总体呈现出一定的规律性(图3)^[3]:晚石炭世沉积层序是以许多大的岸线快速进、退为特征,这些大型的岸线进、退有的又包括一些次级的岸线进、退,其他的大型岸线进侵与后退表现为一种单一的海平面变化,要么是海平面岸线位置低到陆架边缘附近,要么高到克拉通之上,而缺乏中间

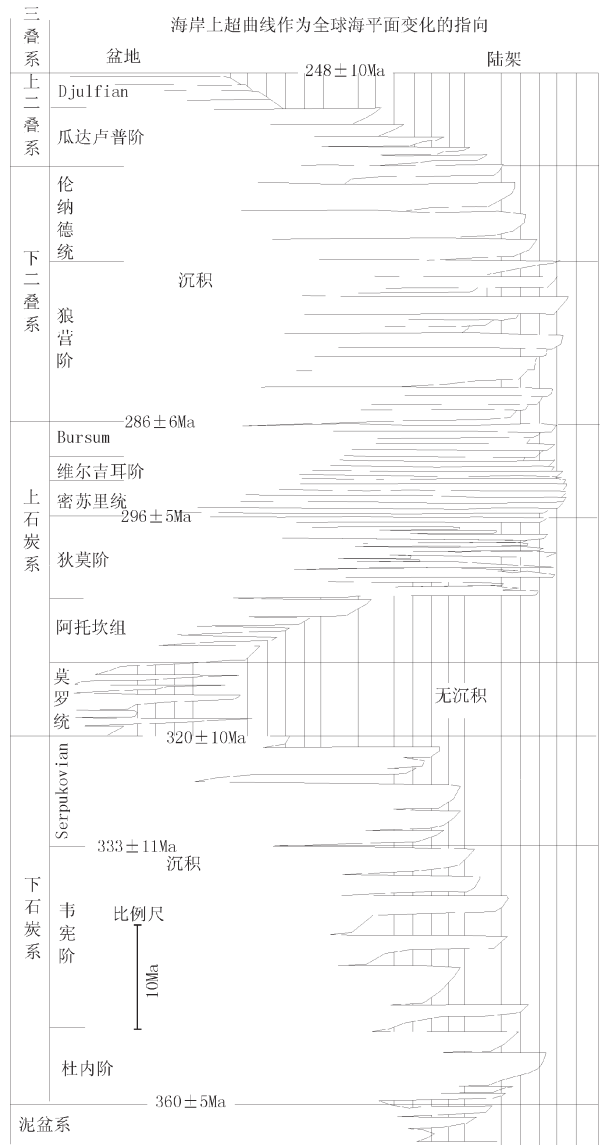


图3 全球石炭、二叠纪陆架沉积的海岸上超曲线 (据 C.A.Ross 等, 1988)^[3]

Fig.3 Coastal onlap shelf sediments, with curves for the Carboniferous-Permian serving as the guide to global sea-level changes (after C. A. Ross et al., 1988)

海面停滞阶段。该期北美地台则相当稳定,形成了含有多层灰岩及海相泥岩夹层的宾夕法尼亚含煤沉积(图3),与华北板块晚石炭世至早二叠世含煤沉积具有较好的可比性。结合以上成果,研究发现华北晚古生代相对海平面变化具有两个特点:

4.1 海平面变化具有一定周期性和复合性

这一个特点具有全球性。复合海平面变化是晚古生代陆表海盆地海平面变化的重要特色,其含义

主要是指不同周期级次的海平面变化相互叠加、复合在一起，长周期的海平面变化之上叠加了高频率短周期的海平面变化^[1]，也就是说在长周期海平面变化沉积记录基础上表现为不同短周期海平面变化的沉积记录，总体上呈现不同级次的旋回相互叠加、复合的特征。笔者将华北海平面变化分为 5 个周期级次(图 4)，分析划分出的 7 个三级海平面变化的周期对应 7 个三级层序。其中，层序 1—层序 3 周期主要是内陆表海海平面变化周期，层序 4—层序 7 周期主要是近海内陆充填周期；四级海平面变化相当于小层序组或者体系域，主要由于大陆冰盖的生长、消亡或三角洲生成与废弃所产生的海平面变化。

全球晚古生代海平面变化可以分为两个阶段，层序 1—层序 3 阶段主要是形成了一系列的海侵—海退沉积序列，每个海侵或海退序列可以划分为 1 个四级层序，即可以识别出 8 个海平面变化周期；层序 4—层序 6 海平面变化影响不到华北板块全部，海平面位置低到陆架坡折一带，只能产生局部的影响，陆相河流湖泊影响本区，产生了相当于低水位体系域的海平面变化周期，而缺乏中间海平面停滞阶段产生了相当于局部水进体系域周期；五级海平面变化相当于小层序变化周期，主要是由于海平面震荡变化或沉积物供给变化造成的，一个微小的海平面震荡变化或沉积物供给增加，就产生一个五级海平面变化周期，因此，五级海平面变化地区性差异很大，需要进一步分区对比研究。

4.2 海平面变化存在一定的高频性和事件性

在海平面变化曲线中和高分辨率层序地层研究中(表 1)，一级至三级海平面属于低频的海平面变化周期(或旋回)，都是构造海平面变化周期，四级至六级为高频海平面变化周期，属于冰川海平面变化周期(旋回)。高频海平面变化是由于地球轨道变化效应造成了地球接受太阳辐射量的周期性变化引起的极地冰盖消长而产生海水体积变化而造成的海平面变化。其一级、二级海平面变化曲线相当于 Vail^[3] 编制海平面变化曲线的宾夕法尼亚系至二叠系顶之间的曲线，其三级曲线包含于二级曲线中，四级包含于三级曲线中等等，总体说来，低频包含高频的变化，总体海侵海退包含多次次级规模的海侵海退，这也反映出了复合性与高频性的共存。

陆表海盆地海平面变化的另一重要特点是“事件性”，即海侵具有事件性质，称“事件型海侵”^[9]。这与盆地背景有着很大关系，晚古生代华北地区为一个“三面高地一面向海”的巨大碟形盆地，相对海平面微小变化便可以引起大规模的海侵海退事件。海侵的事件性主要表现在海侵沉积相序上有明显的不连续现象，见不到海水逐渐侵袭的沉积记录。这表明海侵过程为一种快速突发的海水侵没事件。在华北地区太原组中，可以见到浅海灰岩大面积直接覆盖在陆相沉积物之上，与下伏沉积物间存在明显的相序不连续现象。如鲁西煤田的十二灰与 19 煤、十一灰与 17 煤、十灰与 16 煤、九灰与 15 煤、八灰与 14



图 4 晚古生代陆表海盆地海平面变化及层序划分
Fig.4 Late Paleozoic epicontinental basin sea level change and sequence stratigraphic subdivision in North China

表1 高分辨层序地层、旋回级次划分方案(据李增学等^[10], 1998)
Table 1 Sharing scheme of high-resolution sequence stratigraphy and cycle level (after Li Zengxue et al., 1998)

层序地层级次	旋回级次	时限/Ma	岩石地层	成因
超巨层序	一级	200~400		泛大陆的形成与分裂造成的全球海平面变化
巨层序或大层序	一级	50~60	超群	泛大陆形成与分裂或大洋脊扩张所产生的海平面变化
构造层序	二级	20~30	群、组	大洋脊扩张所产生的海平面变化
超层序	二级	5~10	组	洋脊变化或大陆冰川生长与消亡所产生的海平面变化
层序	三级	2~3	段	大陆冰盖的生长、消亡产生的海平面变化
小层序组	四级	0.4	亚段	大陆冰盖的生长、消亡或三角洲生成与废弃所产生的海平面变化
小层序	五级	0.10		海平面震荡变化或沉积物供给变化造成
小层序单元	六级	0.02~0.04		沉积物供给变化或潮汐流周期性变化

煤、七灰与 12 煤、六灰与 11 煤、三灰与 7 煤等,均是海侵层直接覆盖在煤层之上。

5 结 论

华北地区晚古生代地层是一套海陆交互相沉积,海平面变化复杂,沉积层序划分多样,结合沉积学、煤地质学、层序地层学、古生物学等学科,对华北地区晚古生代地层进行了划分,并进行了海平面变化的研究,得到如下成果:

(1)根据华北晚古生代盆地类型及其沉积背景,并依据层序界面的沉积学属性和特征,寻找出 8 种层序界面:古构造运动面、古生物间断面、大面积泥炭化沼泽化界面、陆表海低水位砂体底界、盆地转换界面、大范围冲刷面、大面积暴露面,以及硅质海绵岩,并将研究区地层划分出 1 个盆地充填层序、3 个构造层序(相当于二级层序)和 7 个三级层序。

(2)对研究区海平面升降特点进行分析发现,华北地区相对海平面升降存在着以下 2 个阶段:第一阶段为短期大规模海侵阶段(层序 1)及长时间海退阶段(层序 2—层序 3),其中,层序 1 海侵方向以北东向盆地侵入,总体上表现为潮坪沉积,且南华北不发育。层序 2—层序 3 东部海侵由北东方向转换为南东方向,在层序 2 海侵末期,全区海侵达到最大,其后,华北板块总体处于海退间夹海侵,其海退时间持续时间长,海侵持续时间短,海平面变化处于不稳定期;第二个阶段为长期海退阶段(层序 4—层序 6),海水由南部退出,全区由北向南表现为陆相向海相沉积的过渡。

(3)结合前人研究成果发现,华北晚古生代海平面变化与欧美地区相类似,且同时期具有可对比的特

点,因此,其海平面变化表现出一定的复合性和周期性特点,同时还存在一定的低频性和事件性等。

参考文献(References):

- [1] Miall A D. Principles of sedimentary Basin Analysis (2nd Edition) [M]. New York:Springer Verlag, 1990.
- [2] Cross T A, Lessenger M A. Sediment volume partitioning:rationale for stratigraphic model evaluation and high-resolution stratigraphic correlation [C]//Gradstein F M, Sandvik K O, Milton N J (eds.). Sequence Stratigraphy Concepts and Applications. NPF Special Publication,1998,8:171-195.
- [3] Wilgus C K, Posamentier H W, Hasting B.S. 徐怀大,魏魁生,洪卫东等译.层序地层学原理(海平面变化综合分析)[M].北京:石油工业出版社,1993:270-295.
Wilgus C K, Posamentier H W, Hasting B S. (Xu Huaida, Wei Kuisheng, Hong Weisheng, et al translated). The Principle of Sequence Stratigraphy[M]. Beijing:Petroleum Industry Press, 1993: 270-295(in Chinese).
- [4] 何起祥,冶治铮,张明书,等.受限陆表海的海侵模式[J].沉积学报,1991,9(1):1-9.
He Qixiang, Ye Yezheng, Zhang Mingshu, et al. Transgression model of restricted epicontinental sea [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1991, 9(1):1-9 (in Chinese with English abstract).
- [5] 李思田.层序地层分析与海平面变化研究——进展与争论[J].地质科技情报,1992,11(4):23-29.
Li Sitian. Development of sequence stratigraphic analysis and the research on sea-level change, and about their controversy [J]. Geological Science and Technology Information, 1992, 11 (4):23-29 (in Chinese with English abstract).
- [6] 张鹏飞,邵龙义,代世峰.华北地台晚古生代海侵模式议[J].古地理学报,2001,3(1):15-24
Zhang Pengfei, Shao Longyi, Dai Shifeng. Discussion on the transgression model of the late Palaeozoic in the North China Platform [J]. Journal of Palaeogeography, 2001, 3 (1):15-24 (in

- Chinese with English abstract).
- [7] 邵龙义, 张鹏飞, 窦建伟, 等. 含煤岩系层序地层分析的新认识——兼论河北南部晚古生代层序地层格架 [J]. 中国矿业大学学报, 1999, 28(1): 20-24.
- Shao Longyi, Zhang Pengfei, Dou Jianwei, et al. New considerations on coal measures sequence stratigraphy——A case study from the Late Paleozoic coal measures in South Hebei [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1999, 28(1): 20-24 (in Chinese with English abstract).
- [8] 李增学, 李守春, 魏久传. 事件性海侵与煤聚积规律——鲁西晚石炭世富煤单元的形成 [J]. 岩相古地理, 1995, 15(1): 1-8
- Li Zengxue, Li Shouchun, Wei Jiuchuan. Episodic transgressions and coal accumulation: an example from the late Carboniferous coal-rich units in the western Shandong coalfields [J]. Sedimentary Facies and Palaeogeography, 1995, 15 (1): 1-8 (in Chinese with English abstract).
- [9] 李增学, 魏久传, 王明镇, 等. 华北南部晚古生代陆表海盆地层序地层格架与海平面变化 [J]. 岩相古地理, 1996, 16(5): 1-9.
- Li Zengxue, Wei Jiuchuan, Wang Mingzhen, et al. Sequence stratigraphic framework and sea-level changes in the late Palaeozoic epicontinental basin in northern China [J]. Sedimentary Facies and Palaeogeography, 1996, 16(5): 1-19 (in Chinese with English abstract).
- [10] 李增学, 魏久传, 等. 华北陆表海盆地南部层序地层分析 [M]. 北京: 地质出版社, 1998: 12.
- Li Zengxue, Wei Jiuchuan et al. The Sequence Stratigraphic Analysis of the Epicontinental Basin in the South of North China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998: 12 (in Chinese).
- [11] 李增学, 魏久传, 魏振岱, 等. 含煤盆地层序地层学 [M]. 北京: 地质出版社, 2000.
- Li Zengxue, Wei Jiuchuan, Wei Zhendai, et al. The Sequence Stratigraphy of the Coal-basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2000 (in Chinese with English abstract).
- [12] 李增学, 余继峰, 郭建斌, 等. 陆表海盆地海侵事件成煤作用机制分析 [J]. 沉积学报, 2003, 21(2): 288-295.
- Li Zengxue, Yu Jifeng, Guo Jianbin, et al. Analysis on coal formation under transgression events and its mechanism in epicontinental sea basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 21 (2): 288-295 (in Chinese with English abstract).
- [13] 李增学, 王明镇, 余继峰, 等. 鄂尔多斯盆地晚古生代含煤地层层序地层与海侵成煤特点 [J]. 沉积学报, 2006, 24(6): 834-839.
- Li Zengxue, Wang Mingzhen, Yu Jifeng, et al. Sequence stratigraphy of Late Paleozoic coal-bearing measures and the transgressive coal-formed features in Ordos basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24 (6): 834-839 (in Chinese with English abstract).
- [14] 郭英海, 刘焕杰. 鄂尔多斯地区晚古生代的海侵 [J]. 中国矿业大学学报, 1999, 28(2): 126-129.
- Guo Yinghai, Liu Huanjie. Transgression of late Paleozoic Era in Ordos area [J]. Journal of University of Mining & Technology, 1999, 28(2): 126-129 (in Chinese with English abstract).
- [15] 陈世悦, 刘焕杰. 华北石炭二叠纪层序地层学研究的特点 [J]. 岩相古地理, 1994, 14(5): 11-19.
- Chen Shiyue, Liu Huanjie. Carboniferous Permian sequence stratigraphy in North China [J]. Sedimentary Facies and Palaeogeography, 1994, 14 (5): 11-19 (in Chinese with English abstract).
- [16] 陈世悦. 华北石炭二叠纪海平面变化对聚煤作用的控制 [J]. 煤田地质与勘探, 2000, 28(5): 8-11.
- Chen Shiyue. Control of sea-level change to coal accumulation in Carboniferous-Permian, North China [J]. Coal Geology & Exploration, 2000, 28(5): 8-11 (in Chinese with English abstract).
- [17] 陈世悦, 徐凤银, 刘焕杰. 华北晚古生代层序地层与聚煤规律 [M]. 东营: 石油大学出版社, 2000.
- Chen Shiyue, Xu Fengyin, Liu Huanjie. The Study of Sequence Strata and Coal Accumulation Law of the Late Paleozoic, North China [M]. Dongying: University of Petroleum Press, 2000 (in Chinese).
- [18] 乔秀夫, 张安棣. 华北块体、胶辽朝块体与郯庐断裂 [J]. 中国地质, 2002, 29(4): 337-345.
- Qiao Xiufu, Zhang Andi. North China block, Jiao-Liao-Korea block and Tanlu fault [J]. Geology in China, 2002, 29(4): 337-345 (in Chinese with English abstract).
- [19] 葛宝勋, 李春生. 河南太原群与上石盒子组含煤建造中的海绵岩 [J]. 煤田地质与勘探, 1982, 1(1): 22-25.
- Ge Baoxun, Li Chunsheng. Spongolith of coal sedimentary in Taiyun Formation and Shangshihezi Formation of Henan Province [J]. Coal Geology & Exploration, 1982, 1(1) : 22-25 (in Chinese).
- [20] 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, 32(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).
- [21] 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 Dakang. 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).

The sea-level change and its response to the Late Paleozoic sequence stratigraphy in North China

LV Da-wei, LI Zeng-xue, LIU Hai-yan, GUO Jian-bin, LIU Bin-bin, MENG Zhao-lei

(College of Geological Science and Engineering, SUST, Qingdao 266510, Shandong, China)

Abstract: Based on data from such disciplines as sedimentology, coal geology, sequence stratigraphy and paleontology, the authors studied the sequence stratigraphy, the relative sea-level fluctuation and its response to sequence stratigraphy. The results show that there are eight sequence surfaces, which mainly include palaeostructural surface, palaeontologic gap surface, large-area peat-moor surface, low stand floor surface of continental sea, transpressional basin surface, large-area buried erosion surface, large-area exposed surface, and siliceous spongolite surface. According to the principle of sequence stratigraphy division, the authors recognized one basin filling sequence, three tectonic sequences (second-grade sequences) and seven third-grade sequences. Two stages of relative sea level can be found based on the sequence stratigraphy framework. The first stage is from sequence 1 to sequence 3, which is composed of a short-time transgression and a long-time regression. The second stage is from sequence 4 to sequence 7, which is a long-time regression. On such a basis, the authors hold that the sea-level change of North China in Late Paleozoic can be studied by the sea-level curved shape and its response to sequence stratigraphy. The first characteristic is periodicity and compounding, and the second characteristic is high frequency and event synchronization.

Key words: sequence stratigraphy; sea-level change; event transgression

About the first author: LV Da-wei, male, doctor and lecturer, mainly engages in the study of sequence stratigraphy and sedimentology; E-mail: lvdawei95@163.com.