华北地台中寒武世米级旋回层序与复合海平面变化

陈荣坤

(国家建材局地质研究所,北京)

〔内容提要〕 笔者在对华北地区中寒武统鲕滩碳酸盐建造露头层序地层学研究工作中首次识别出层序中最基本的地层单元——米级旋回层序,它是露头层序分析最基本的工作单元。本文总结概括出不同体系域内米级旋回层序类型和特征。这些米级旋回层序在垂向上叠加构成高级(五级、四级、三级)旋回层序时表现出周期性和规律性。这种不同级次的旋回层序的形成受不同动力成因引起的具不同周期和频率复合海平面变化的控制。米级旋回层序的识别与复合海平面变化的研究得出中寒武世鲕滩层序的形成经历了若干次周期性的淹没—间断—均衡堆积—加积进积事件,这为盆地充填史的恢复提供了新途径。

关键词:中寒武统 米级旋回层序 复合海平面变化 间断加深变浅旋回层序

中寒武世是华北稳定古克拉通台地内碳酸盐发育的主要时期,特别是台地中部地区一套鲕滩碳酸盐层序充分而准确地记录了古海平面升降变化的过程和产物。由于这一产物的发育过程具有稳定的构造背景,因此易获得与全球海平面变化同步性的对比,这为露头层序地层学研究提供了可能。

笔者"八·五"期间参加了关于华北地台及其周缘地区早古生代事件沉积学、沉积动力学和层序地层学研究的重大科研项目[1,2],在此基础上对中寒武世台地鲕滩碳酸盐沉积层序的不同旋回级次,特别是三级、四级、五级和米级旋回层序进行了划分和对比。工作中首次识别出由海平面变化这一异成因机制控制下的自旋回沉积产物——米级旋回层序。这种米级旋回层序垂向上的有序叠加构成了高级次的复合旋回层序(三、四、五级旋回层序),它们的形成受不同级次海平面变化——复合海平面变化的控制。

在众多控制华北地台中寒武世地层层序发育的因素中,海平面变化则相对重要得多,因为整个台地构造活动相对稳定,多以碳酸盐沉积为主,仅有少量的陆源物质供给,海平面变化基本上控制了沉积相和相带的形成和改造、不整合面和沉积间断面的发育和保存,也决定了地层序列发育的具体特征。因此海平面变化的研究是研究区地层序列叠加状态、充填方式和地层格架恢复和对比的有效途径,而实现这一途径的物质基础便是米级旋回层序的识别和研究。

1 米级旋回层序的识别及特征

米级旋回层序是由米兰科维奇天文事件引起的高频海平面振荡这一异成因机制控制下

❶本文1995年6月5日收稿。

自旋回沉积产物。工作中首次识别出了这种在碳酸盐台地普遍发育的地层单元，并以此作为露头层序分析中最基本的工作单元。根据它在垂向层序上的叠加规律划分出了高级次的旋回地层层序。

由于地球轨道效应——偏心率、黄赤交角变化及岁差等天文旋回事件造成地球日照量周期性变化，引起极地冰盖的消融而形成的高频短周期的海平面振荡，造成沉积物容纳空间、海底水文环境的周期性变化而最终形成了多种类型的旋回性地层记录，其中米级旋回层序是研究区中、晚寒武世最发育的旋回层序类型。

1.1 间断加深变浅旋回层序

间断加深变浅旋回层序是米级旋回层序的一种，由 Goodwin 和 Anderson(1985)[3,4]提出的。研究区层序的大部分(特别是高水位体系域)多由这种小级别(1—5m)的向上变浅的旋回层序构成。两旋回层序间由一个突然变到相对深水相为特征的面分开。该面的形成是由于瞬时的在盆地范围内相对海平面快速上升导致的。这一海平面快速上升之后的滞后的薄而细的较深水沉积物构成了旋回层序的下部单元，而在基底面相对海平面下降的长时限内形成的相对厚而粗的浅水沉积物构成了层序的上部单元。这上、下二部分单元的垂向叠加便导致了间断加深向上变浅旋回层序的形成。这一盆地范围内的岩石-时间旋回地层不仅可用于地层对比、古相分析和古环境解释，更重要的是对古海平面变化恢复起重要作用。

该类型层序共发育有六种基本类型(图 1)，主要分布于中寒武统。层序的上部单元为厚层—巨厚层块状亮晶鲕粒灰岩、亮晶云质鲕粒灰岩、亮晶颗粒灰岩，少量泥亮晶砂屑灰岩和泥粉晶藻白云岩，厚度多为 0.5—3.0m；旋回层序的下部单元多为灰色薄层泥晶灰岩、土黄色薄层泥岩和灰绿色页岩，厚度为毫米级至 40cm。

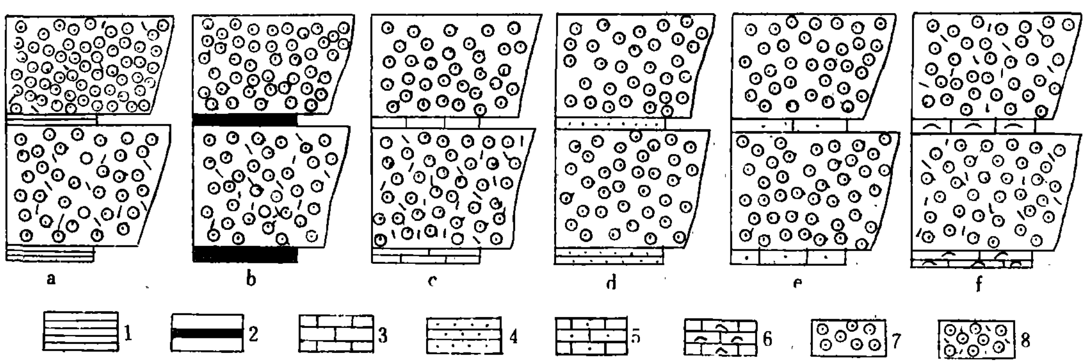


图 1 中寒武统鲕滩层序内间断加深变浅旋回层序类型

1. 页岩；2. 泥岩；3. 薄层泥晶灰岩；4. 粉砂岩；5. 粉砂质泥晶灰岩；6. 生屑灰岩；7. 鲕粒灰岩；8. 砂屑鲕粒灰岩

Fig. 1 Types of punctuated aggradational cyclic sequences in the Middle Cambrian oolitic shoal sequences

1=shale；2=mudstone；3=thin-bedded micritic limestone；4=siltstone；5=silty micritic limestone；6=bioclastic limestone；7=oolitic limestone；8=sandy oolitic limestone

该旋回层序两部分单元在层序从垂向叠加上表现出规律：旋回层序的上部单元在三级层序中自下而上表现为颗粒粒径加大、含量增高、组份由复杂至简单，陆源砂、粉砂含量逐渐减少。特别在层序的顶部可形成大气淡水晶体鲕灰岩、亮晶云质鲕灰岩，层面发育有波痕、冲刷痕以及一些间隙暴露构造标志；旋回层序的下部单元在三级层序中自下而上表现为粒度

变细、厚度减少的特征。上述二部分组成在垂向上的规律性反映出在该旋回层序系列形成期，海平面既是一个高频的周期性上升—下降过程，同时也是一个低频的相对海平面逐渐下降时期，从而导致沉积水体变浅、能量增高、厚度加大沉积层序(即高水位体系域)的形成。

1.2 米级旋回层序

中寒武统除了上述的间断加深变浅旋回层序外，还大量发育了各种典型米级旋回层序。该层序的概念也是由 Anderson 和 Goodwin(1990)提出的。该理论的提出解释了地层基本单元的成因——与海平面振荡相关的地层事件，它为短周期高频海平面升降与长周期低频海平面变化之间的关系研究架起了桥梁。

该旋回层序共发育有十二种类型(图 2)，每一旋回层序也由二部分单元构成，厚度为厘米级至米级，它们多分布于三级旋回层序的海侵体系域内，即徐庄组下部和张夏组中下部，如类型 A、B、C、D、G、H，也有部分分布于早期高水位体系域内，如类型 E、F、H、I、J、L。从旋回本身特点看，它代表的是一个间断加深向上变浅过程，但垂向层序叠加规律反映出水体逐

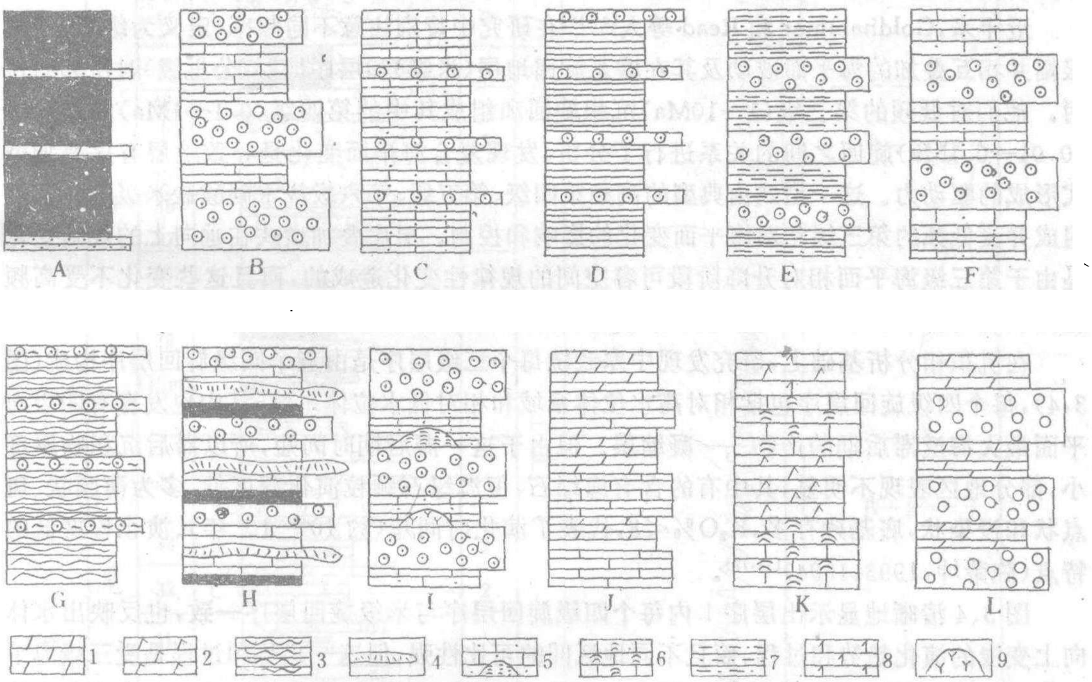


图 2　中寒武统鲕滩层序内米级旋回层序类型

1. 白云岩；2. 白云质灰岩；3. 泥质条带灰岩；4. 风暴砾屑灰岩；5. 含生物丘粉砂质灰岩；6. 含叠层石灰岩；7. 含粉砂泥岩；8. 云质灰岩；9. 附枝藻生物丘(其他图例见图 1)

Fig. 2　Types of meter-scale cyclic sequences in the Middle Cambrian oolitic shoal sequences

1=dolostone；2=dolomitic limestone；3=muddy banded limestone；4=storm calcirudite；5=bioherm-containing silty limestone；6=stromatolite-containing limestone；7=silt-containing mudstone；8=dolomitic limestone；9=*Epiphyton* bioherm (See Fig. 1 for explanation of symbols)

渐变深过程，这正代表了海侵体系域时期海平面变化的特点。如河北井陉徐庄组底部由紫红色泥岩夹薄层粉砂岩和薄层白云岩的米级旋回 A 构成，下部由粉砂质灰岩夹中薄层鲕粒灰岩的类型 C 组成，中部则由薄层泥晶灰岩与中薄层鲕粒灰岩互层的类型 B 构成，这种自下

而上由类型 A 到 C 最后到 B 典型地反映了海平面快速上升水体由浅变深的特点。

由于先成古地理位置的差异，上述各类米级旋回层序在不同地区、同一地区层序的不同部位都不相同，一个层序中通常由三种类型以上米级旋回层序构成，最多可达七、八种。这些旋回层序本身在垂向上叠加呈现周期性，即由四至六个典型米级旋回层序或间断加深变浅旋回层序构成一个五级旋回层序，由五个五级旋回层序构成一个四级旋回层序。这一周期性既遵循三级海平面可容空间变化的规律，又反映出高频海平面变化的特点。

2 米级旋回层序与复合海平面变化

海平面变化具有不同的周期和频率，根据不同的持续周期可划分出由此产生的海平面变化的级次。不同级次的海平面变化具有不同的变化速率和振幅。无论是何种成因的海平面变化都以显示出不同级次的叠加状态从而形成了一个复杂的沉积-复合海平面控制下的复合旋回层序。本文补充了小于五级旋回层序的各种米级旋回层序，它是在低频长周期海平面变化控制下高频短周期海平面变化的产物，也是复合旋回层序的基本单元。

近年来，Goldhammer 和 Read 等人[5-10]在研究中特别注意不同频率（定义为级）和不同振幅并相互叠加的海平面波动及其在联系旋回地层（米级）和层序地层（公里级）时所起的作用。他们对低频的第三级（1—10Ma）沉积旋回和组成其中的第四级（0.1—1Ma）和第五级（0.01—0.1Ma）旋回之间的关系进行了分析，发现复合海平面变化是导致地层有序叠加型式形成的驱动力。这一型式由典型的高频第四级、第五级、第六级浅水碳酸盐米级旋回层序组成并受低频的第三级相对海平面变化的影响和控制。层序叠加型式在垂向上的规则变化是由于第三级海平面相对升降阶段可容空间的规律性变化造成的，而且这些变化不受高频旋回机制的控制。该方法对于联系米级旋回层序和层序地层起到了桥梁和纽带作用。

在沉积相分析基础上，研究发现中寒武统每个三级层序是由五个四级旋回层序构成（图 3，4），每个四级旋回层序包括相对高水位体系域和相对低水位体系域，其中也发育有四级海平面最大海泛滞后期的产物——凝缩层。但由于这一滞后期时间短，所以滞后沉积物厚度小，部分地区表现不明显，其中有的含有海绿石，但海绿石颗粒演化程度低，多为薄膜状、斑点状和浸染状，底基残存多，$K_2O\%<8$，代表了演化时间短（约 10^4—10^5 年）、演化程度低的特点（陈荣坤，1993，1994）[11,12]。

图 3、4 清晰地显示出层序 Ⅰ 内每个四级旋回层序与米级旋回层序一致，也反映出水体向上变浅的演化趋势和过程，而且不同地区间的可比性强。但这一趋势和过程是受三级海平面变化规律控制的，即在构成三级层序海侵体系域内的四级旋回层序中，Ⅳ－1 表现出水体逐渐加深的过程；Ⅳ－2 显示出水体深度最大，与三级旋回层序的最大海泛期前后的产物相吻合；Ⅳ－3、Ⅳ－4 和 Ⅳ－5 共同反映出水体由深变浅、能量由低到高的变化趋势。这一特征充分说明高频海平面（四级）升降周期的变化和沉积物可容空间的变化受低频（三级）的长周期的相对海平面可容空间的控制，而长周期海平面可容空间变化则不受短周期海平面变化的控制，却由它们的作用产物表现出来。

本区四级旋回层序的厚度为十几至几十米，年代范围约 0.2—2.0Ma，由组成其中的若干个不同类型米级旋回层序构成。但构成不同地区同一四级层序以及同一剖面不同四级层序内的米级层序类型不同，它们是不同古地理背景和沉积物可容空间综合作用的物质体现，如层序 Ⅰ（徐庄组）内四级旋回层序 Ⅳ－2，研究区东部以类型 A、C、D 为主，北部以 b、d、E、

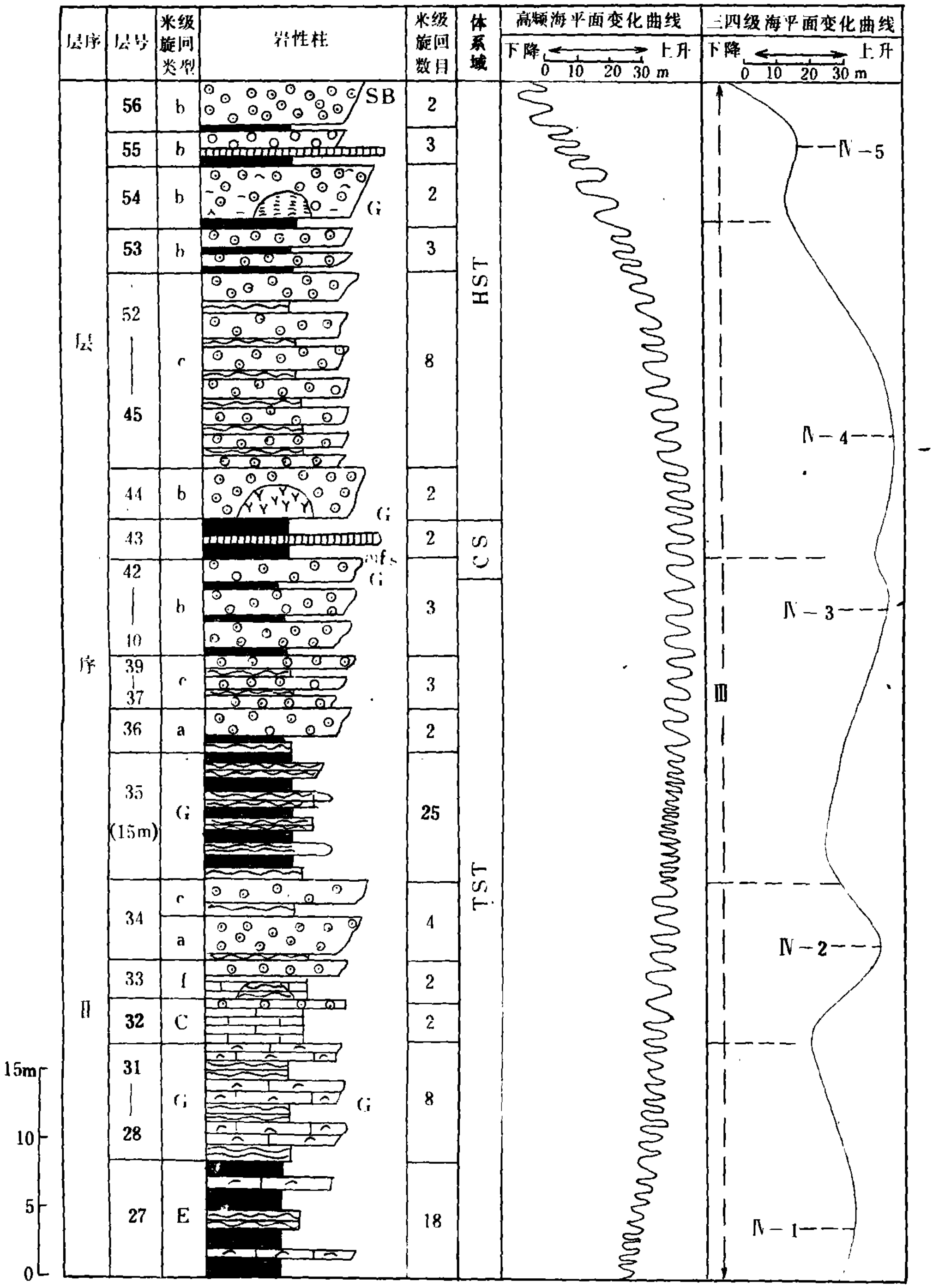
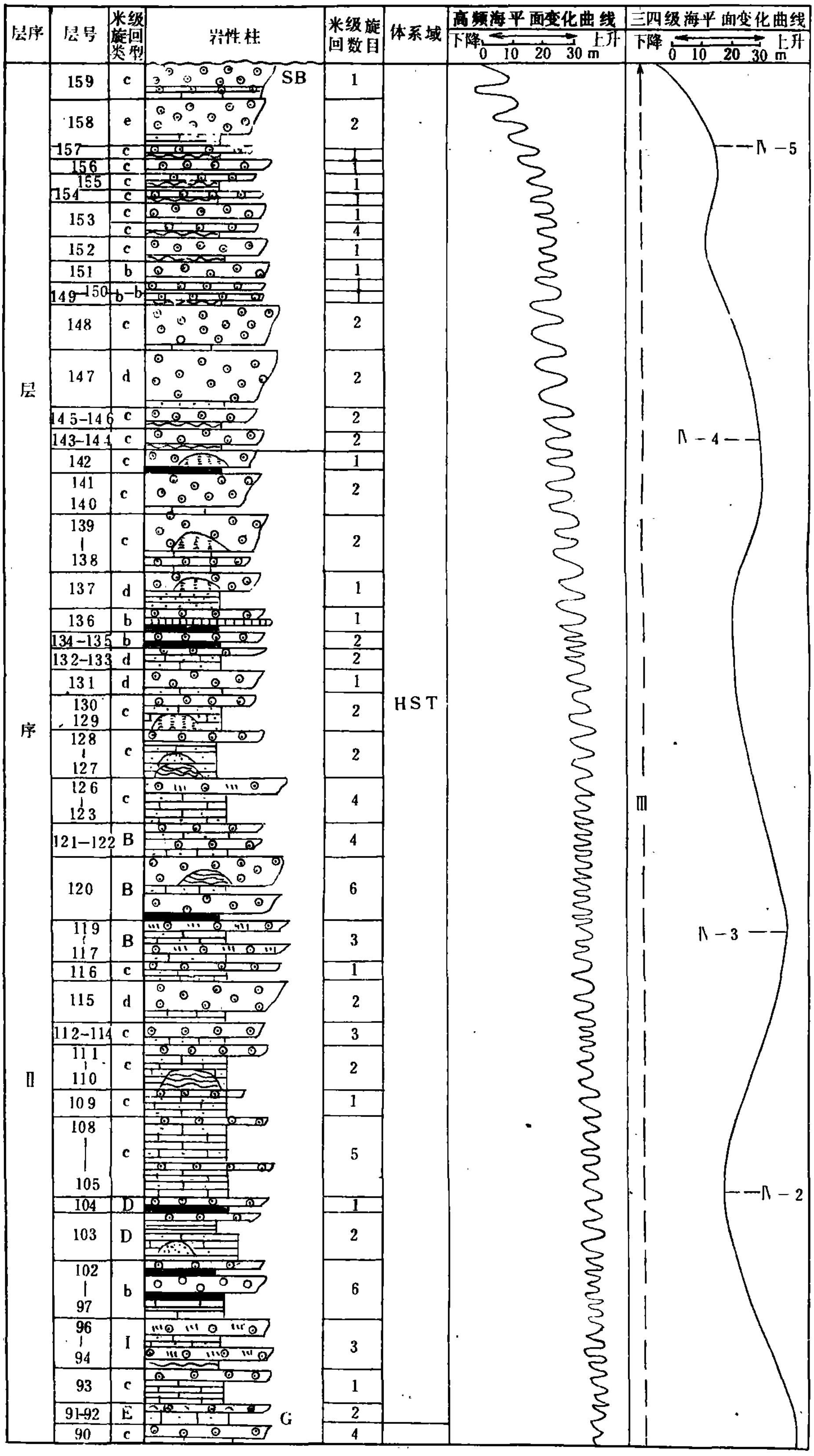


图 3　山西浑源悬空寺张夏组层序 II 内米级旋回层序类型的垂直叠加状态及复合海平面变化特征(图例同图 1,2)

Fig. 3　The vertical stacking patterns of meter-scale cyclic sequences and composite sea-level changes in Sequence II of the Zhangxia Formation, Xuankongsi section, Shanxi (See Fig. 1 for explanation of symbols)


层序
层号
米级旋回类型
岩性柱
米级旋回数目
体系域
高频海平面变化曲线
三四级海平面变化曲线
下降
上升
0 10 20 30 m
SB
G
HST
层序 Ⅱ
Ⅲ
Ⅳ-5
Ⅳ-4
Ⅳ-3
Ⅳ-2
159 c 1
158 e 2
157 c 1
156 c 1
155 c 1
154 c 1
153 c 1
c 4
152 c 1
151 b 1
149-150 b-b
148 c 2
147 d 2
145-146 c 2
143-144 c 2
142 c 1
141-140 c 2
139-138 c 2
137 d 1
136 b 1
134-135 b 2
132-133 d 2
131 d 1
130-129 c 2
128-127 c 2
126-123 c 4
121-122 B 4
120 B 6
119-117 B 3
116 c 1
115 d 2
112-114 c 3
111-110 c 2
109 c 1
108-105 c 5
104 D 1
103 D 2
102-97 b 6
96-94 I 3
93 c 1
91-92 E 2
90 c 4

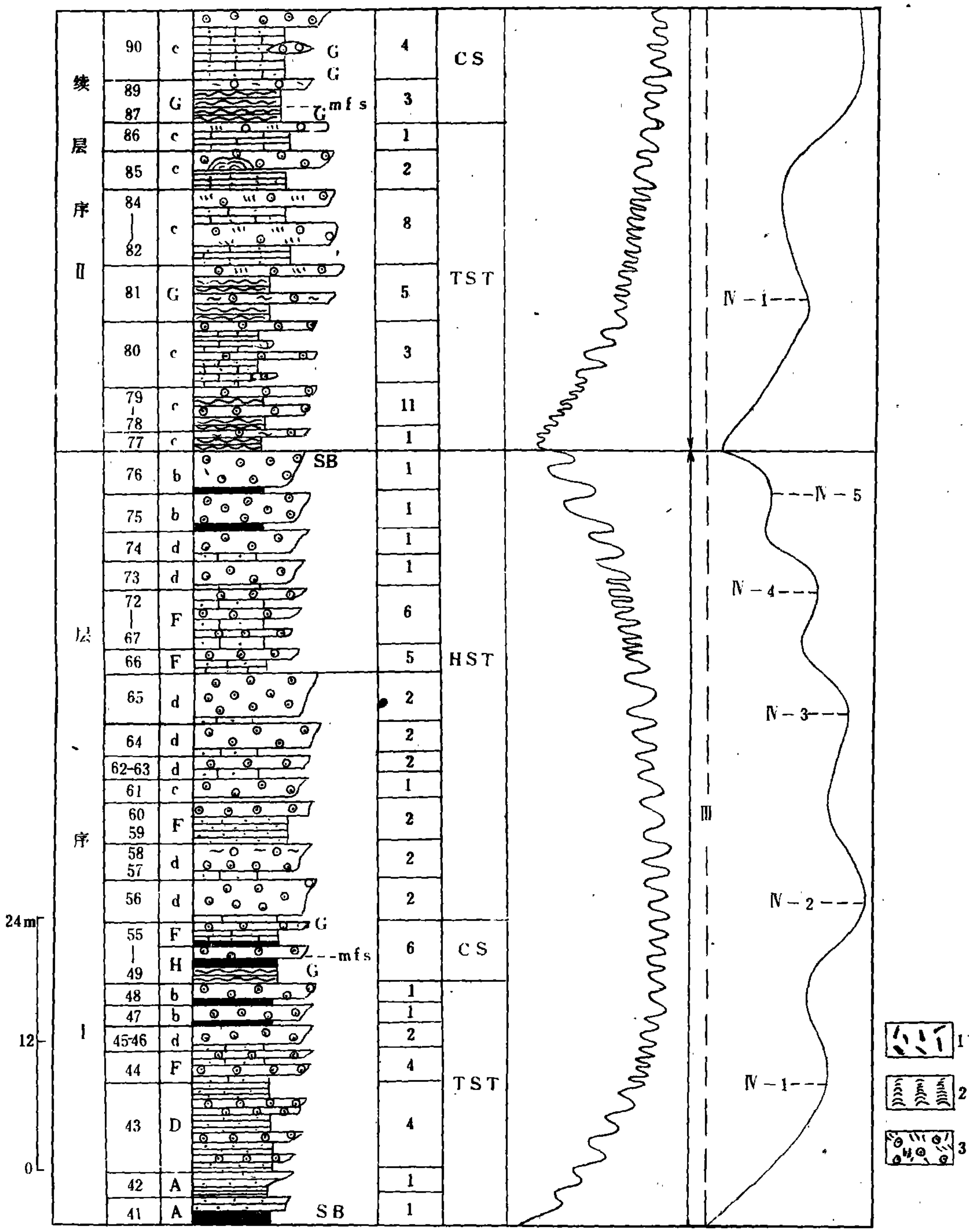


图 4　北京西山丁家滩中寒武统层序Ⅰ、层序Ⅱ内米级旋回层序类型的垂直叠加状态及复合海平面变化特征

G. 海绿石；TST. 海侵体系域；CS. 凝缩层；HST. 高水位体系域；mfs. 最大海泛面；SB. 层序界面；1. 砂屑灰岩；2. 叠层石灰岩；3. 风暴砾屑鲕粒灰岩（其他图例同图 1,2）

Fig. 4　The vertical patterns of meter-scale cyclic sequences and composite sea-level changes in Sequences Ⅰ and Ⅱ of the Middle Cambrian strata in the Dingjiatan section, Beijing

G=glauconite; TST=transgressive systems tract; CS=condensed section; HST=highstand systems tract; mfs=maximum flooding surface; SB=sequence boundary; 1=calcarenite; 2=stromatolitic limestone; 3=storm oorudite (See Figs. 1 and 2 for explanation of symbols)

F、L为主，中部以A、C、L、a为主，南部则以a、b、d、D类型为主，显示出台地南低北高，西高东低的古地理格局。同一体系域内米级旋回层序的垂向叠加过程反映出海平面变化特点：北京西山丁家滩剖面张夏组层序Ⅰ的海侵体系域内的四级层序Ⅳ－1、Ⅳ－2、Ⅳ－3(图4)，自下而上依次发育了G、C、E、I、B等类型，反映了水体由浅变深以淹没节拍为主的米级旋回层序类型的演化趋势；山西大同悬空寺剖面徐庄期层序Ⅰ(图3)内高水位体系域的四级旋回层序Ⅳ－3、Ⅳ－4和Ⅳ－5，依次发育了G，a、c、b等类型，代表了三级海平面晚期上升和回落的水体渐浅的以间隙暴露节拍为主的米级旋回层序复合叠加过程。

上述这种趋势性和规律性的三级层序、四级层序及各类米级旋回层序的形成以及它们的复合有序的叠加状态除了受构造沉降、沉积物供给速率影响外，最主要的是受不同级次复合海平面升降变化的控制，导致了不同级次地层的形成和垂向上的有序叠加。但不同古地理背景的地方性旋回层序特点却有不同：一般在相对水体较深或较浅的地区，高频振荡旋回会失去节拍(不发育)，局部构造活动的影响甚至会造成四级旋回层序的缺失。因此工作中既要掌握复合海平面变化的总规律，划分高级次层序又要结合地区特色剔除古地理因素恢复古海平面变化特征。

由此可见，研究区中寒武统鲕滩碳酸盐层序的形成和发育经历了若干次周期性海平面间断加深变浅旋回事件，即淹没—间断—均衡堆积—加积进积作用过程，从而构成了垂向上有序叠加型式，而并非一个连续的直线发育过程。它的发生、发展、衰亡过程与复合海平面变化紧密相关，这从其产物——不同级次旋回层序及其垂向上叠加表现出来，从而为盆地充填史的恢复提供了新途径。

本文的完成得到了孟祥化、葛铭教授的指导，特此致谢。

主要参考文献

1 孟祥化等. 沉积盆地与建造层序. 北京：地质出版社，1993

2 王英华等. 华北地台早古生代碳酸盐岩岩石学. 北京：地震出版社，1989

3 Anderson, E. J. and Goodwin, P. W. The significance of meter-scale allocycles in the quest for a fundamental stratigraphic unit. Journal of Geological Society, London, 1990, 147: 507—518

4 Goodwin, P. W. and Anderson, E. J. Punctuated aggradational cycles: a general hypothesis of episodic stratigraphic accumulation. The Journal of Geology, 1985, 93: 515—533

5 Goldhammer, P. K., Dunn, P. A. and Hardie, L. A. Depositional cycles, composite sea-level changes, cycle stacking patterns, and the hierarchy of stratigraphic forcing: examples from Alpine Triassic platform carbonate, Geol. Soc of Ann. Bull., 1991, 102: 535—562

6 Einsele, G. General remarks about the nature, occurrence and recognition of cyclic sequences (periodites). In: Cyclic and Event Stratification (Ed. by G. Einsele and A. Seilacher), Springer, 1982

7 Kendell, G. St. C. and Schalager, W. Carbonates and relative changes in sea-level response. Marine Geology, 1981, 44: 181—212

8 Masetti, D., Nero, C. and Bosellini, A. Deep-water asymmetric cycles and progradation of carbonate platform governed by high-frequency eustatic oscillations. Geology, 1991, 19: 336—339

9 Osleger, D. Subtidal carbonate cycles: implication for allocyclic vs. autocyclic controls. Geology, 1991, 19: 917—920

10 Ulf Bayer and Adolf Seilacher (editors). Sedimentary and Evolutionary Cycles. Springer-Verlag, 1985

11 陈荣坤. 层序地层学的研究进展和发展方向. 国外地质科技，1993，第二期

12 周少平、陈荣坤. 沉积旋回、复合海平面变化、旋回叠加型式及地层力等级. 岩相古地理，1993，第二期

METER-SCALE CYCLIC SEQUENCES AND COMPOSITE SEA-LEVEL CHANGES ON THE NORTH CHINA PLATFORM DURING MIDDLE CAMBRIAN TIME

Chen Rongkun

Institute of Geology, China National Bureau of Building Materials

ABSTRACT

The basic stratigraphic units— meter-scale cyclic sequences and their types have been distinguished in the Middle Cambrian oolitic shoal carbonate sequences in North China. The meter-scale cyclic sequences are also the basic research units of outcrop sequence stratigraphy. The present paper gives a detailed description of the meter-scale sequence types and features in different systems tracts. The regular stacking patterns of the cyclic sequences in vertical sections which consist of high-order (5th-, 4th- and 3rd-order) cyclic sequences are controlled by the composite sea-level changes. The formation of oolitic shoal sequences have experienced several periodic events of drowning, interruption, isostatic accumulation, aggradation and progradation, thus providing a useful approach to the reconstruction of the basin filling history.

Key words: Middle Cambrian, meter-scale cyclic sequence, composite sea-level change, punctuated aggradational cyclic sequence